

目 录

一、变压器	1
(一)一般概念	1
1. 变压器及其同类产品有什么用途?	1
2. 什么是变压器? 它的工作原理怎样?	3
3. 三绕组变压器和自耦变压器的工作原理怎样?	8
4. 电力变压器是怎样分类的? 其产品型号的含义是什么?	10
5. 我国输变电线路电压等级有哪些? 怎样区别是升压还是降 压变压器?	12
6. 变压器是由哪些主要部分组成的?	12
7. 变压器有哪些主要技术数据?	13
8. 变压器接在直流电源上、低压绕组接在高压电源上、电源改 变电压等,情况将怎样?	18
9. 电源频率对变压器励磁电流、空载损耗、电抗、负载损耗、温 升有什么影响? 50Hz的变压器能当60Hz的变压器用吗?	19
10. 变压器类产品的正常使用条件有哪些规定? 如不符合正常 使用条件,在特殊情况下怎么办?	21
(二)铁心与励磁	22
11. 铁心有什么作用? 铁心是怎样分类的? 铁心对变压器性能 有什么影响?	22
12. 铁心是由哪些部分组成的?	24
13. 电工钢片牌号有哪些? 它们的电磁性能怎样?	24
14. 变压器类产品铁心中磁通密度怎样选择?	27
15. 铁心片加工有什么特点?	29
16. 铁心装配和检修时应注意什么?	32
17. 铁心为什么要接地? 而又为什么不能多点接地?	35
18. 为什么空载电流有谐波分量? 它有什么影响?	37
19. 变压器空载合闸时为什么有励磁涌流?	39
20. 变压器的噪声是怎样产生的? 什么是声级水平及其基准	

值?	41
(三)绕组与漏磁	45
21. 绕组有什么作用? 绕组是怎样分类的?	45
22. 什么是绕组的绕向? 什么是并联导线的换位?	48
23. 什么是电压比?	50
24. 绕组中常采用哪些措施以改善冲击电压分布? 为什么采用 纠结式和内屏蔽式绕组?	51
25. 选择绕组导线时要注意什么? 导线有哪一种? 电流密度应 取多少?	54
26. 双饼纠结式绕组线匝连接结构有哪几种?	56
27. 变压器各种绕组的绕制有什么特点?	58
28. 变压器绕组的排列方式有哪几种?	62
29. 什么是主磁通? 什么是漏磁通?	63
30. 绕组的漏磁通是怎样分布的? 产生什么样的电磁力?	64
31. 变压器短路时短路电流有什么危害?	65
32. 什么是分裂式绕组? 对它有什么要求?	68
33. 什么是绕组中的主绝缘和纵绝缘? 绕组为什么要真空干燥 和浸漆?	69
(四)绝缘与干燥	71
34. 什么是变压器的绝缘水平? 绝缘水平是怎样分级的?	71
35. 变压器绝缘是怎样分类的? 有哪几部分绝缘?	72
36. 变压器各部分绝缘有什么作用? 生产中为什么要注意绝缘 件的清洁并防止其变形?	74
37. 绝缘结构尺寸受什么影响? 主要绝缘距离有哪些?	77
38. 什么是绝缘材料? 共分几级? 变压器为什么常采用油纸绝 缘结构? 什么是绝缘材料的电击穿和热击穿?	80
39. 变压器油有什么作用? 不同牌号的变压器油能混合使用吗? 它有哪些主要指标?	81
40. 器身绝缘为什么要真空干燥处理?	83
41. 变压器干燥有哪些方法?	85
42. 变压器套管有什么作用? 它有哪一种?	90
(五)结线与联结组	93
43. 什么是变压器绕组的电压相位关系?	93

44. 变压器绕组有多少种结线方式? 常用的结线有什么特征?	96
45. 什么是绕组的结线组合? 常用的结线组合有什么特征?	101
46. 什么是绕组的联结组? 联结组是怎样确定的?	104
47. Y_z 结线组合的变压器为什么防雷性能好?	109
48. 为什么要限制 $Y_{yn}0$ 联结组变压器的中线电流不能超过 25% 的低压额定电流?	110
49. $Yd11$ 联结组变压器的空载电流为什么不平衡?	111
50. 一次 10kV 级 Y 形结线的变压器, 改成 6kV 级 D 形结 线后, 容量是否要降低?	113
(六) 电压调整与分接开关	113
51. 电压调整的目的是什么? 怎样进行电压调整?	113
52. 什么是恒磁通调压? 什么是变磁通调压?	114
53. 无励磁调压时绕组抽分接头方式有几种? 无励磁分接开 关有几种? 无励磁分接开关是怎样结线的?	116
54. 有载分接开关的工作原理是什么? 它是怎样构成的?	120
55. 有载调压时绕组抽分接头方式有几种? 有载调压分接开 关是怎样结线的?	125
56. 什么是调容量变压器、调容量分接开关?	127
(七) 发热与冷却	131
57. 变压器为什么会发热? 它的温度是怎样分布的?	131
58. 油浸式变压器的油系统是怎样的?	132
59. 油浸式变压器的温升限值是怎样得来的?	134
60. 变压器冷却方式有几种? 各种冷却方式有什么特点?	135
61. 油浸式与干式吹风冷却变压器冷却方式如何选择?	138
62. 变压器为什么要采用冷却装置? 冷却装置有几种?	139
63. 如何看待变压器允许温升?	142
64. 变压器运行寿命是多少? 过负载运行有什么规定?	145
(八) 运行与维护	147
65. 什么是变压器的零序阻抗? 一般结法的变压器其零序阻抗 值各是多少?	147
66. 变压器并联运行的条件是什么? 不符合条件时能否并联运 行?	150
67. 三绕组变压器运行的特点是什么?	153

68. 变压器过励磁是怎样产生的？它对变压器有什么危害？	154
69. 自耦变压器为什么只能运行在中点有效接地系统中？它有哪几种运行方式？	155
70. 什么是额定容量？什么是负载能力？	157
71. 变压器有哪些安全保护装置？它们有什么作用？	159
72. 气体继电器是怎样动作的？使用时应注意什么？	163
73. LS-80型气体继电器流速试验台是怎样使用的？	165
74. 变压器有哪些测温装置？它们有什么作用？	167
75. 变压器有哪些油保护装置？吸湿器和净油器有什么作用？	169
76. 储油柜有哪几种型式？密封式储油柜安装时应注意什么？	172
77. 怎样隔离潜油泵产生的金属末？	175
78. 变压器油怎样带电处理？有那些油的再生方法？	177
79. 变压器为什么一定要用避雷器保护？怎样进行保护？	180
80. 环境如何影响变压器运行？	182
81. 选用和使用套管时应注意什么？	187
82. 变压器不对称运行时的对称分量怎样？	189
(九) 检修与试验	191
83. 变压器检修时起吊油箱、绕组套装、压板装配等应注意什么？	191
84. 60kV及以上变压器的引线焊接要注意什么？	193
85. 为什么一台变压器上有那么多的放气塞、导气联管？为什么从油箱下部注油？	193
86. 油浸式变压器应采用什么密封材料和什么样的密封结构？	194
87. 油浸式变压器怎样进行打泵试漏？	198
88. 套管软引线的安装有什么方法？	199
89. 运输时为什么要充氮，又要拆下套管等组件？真空注油时为什么要把储油柜和安全气道拆除？	200
90. 变压器能不能带油补漏？怎样带油补漏？	201
91. 在现场怎样更换大型变压器的局部线段？	203
92. 变压器有哪些常规电气试验？它们是怎样进行的？	204
93. 变压器的参数偏差值与使用峰值的参数是如何规定的？	208
94. 绕组电阻、介质损耗率正切和绝缘电阻与温度有什么关系？它们还受什么因素的影响？	210

95. 检定电压相量关系有哪几种方法? 怎样检定?	211
96. 怎样进行阻抗试验和空载试验? 它们为什么要校正?	217
97. 负载损耗与空载损耗测量时应注意一些什么问题?	219
98. 变压器有哪些绝缘试验(耐压试验)? 它们是怎样进行的?	224
99. 局部放电在变压器和互感器中产生的原因是什么? 又怎样 进行测量?	227
100. 变压器特殊试验项目中的零序阻抗测量、声级测量和空载 电流谐波测量是怎样进行的?	231
101. 温升试验对变压器有什么好处?	233
102. 有载分接开关的工作顺序试验是怎样进行的?	235
103. 变压器做各项试验时分接开关应置于何分接位置?	237
104. 为什么可从变压器油中溶气来判断变压器类产品的内部 故障? 怎样判断?	239
105. 照国标或 IEC 标准试验合格的产品, 在运行中是否有 足够的可靠性?	241
(十) 特种变压器	243
106. 特种变压器是怎样分类的? 它的型号含义有什么特征?	243
107. 干式变压器有哪几种型式? 有什么特点?	244
108. 什么是整流变压器? 它的技术参数是怎样决定的?	245
109. 什么是炼钢电弧炉变压器? 它是怎样调节电压和阻抗的?	248
110. 试验变压器有什么特点? 它有哪些?	251
111. 矿用变压器有哪几种? 矿用隔爆型移动变电站有什么特 点?	255
112. 三倍频变压器的原理是什么? 它怎样用于感应耐压试验?	257
113. 中频变压器的结构有什么特点? 什么样的铁氧体可用于 中频变压器?	260
114. 接地变压器有什么作用? 它有什么特点?	261
115. 般用变压器有什么特点?	262
二、互感器	264
(一) 电压互感器	264
116. 什么是电压互感器? 它与变压器相比有什么不同?	264
117. 电压互感器是怎样分类的? 三绕组、高电压的电压互感 器有何结构特点?	265

118. 电压互感器有哪些主要技术要求?	269
119. 为改善电压互感器误差特性可采用什么补偿方法?	272
120. 电压互感器有哪些接线方式? 各有什么特点?	274
121. 同型号电压互感器接线时为什么要注意极性?	276
122. 电压互感器为什么会发生铁磁谐振? 防止铁磁谐振有什么措施?	277
123. 电压互感器的误差是怎样测量的?	279
124. 为什么要测量串级式电压互感器的介质损耗率($\tan\delta$)? 怎样测量?	280
125. 高电压电压互感器为什么测量和保护要有分开的绕组?	282
126. 什么是油箱式电压互感器? 它有何特点?	283
127. 高压互感器的防潮、防油劣化需要采取什么措施?	284
128. 什么是电容式电压互感器?	286
(二) 电流互感器	289
129. 什么是电流互感器? 它与变压器相比有什么不同?	289
130. 电流互感器是怎样分类的? 结构上有什么特点?	290
131. 电流互感器有哪些主要技术要求?	293
132. 怎样减小电流互感器的误差? 采用什么补偿方法?	298
133. 电流互感器的极性是怎样规定的? 怎样检查?	305
134. 电流互感器的误差(测量准确级)是怎样测量的?	306
135. “U”形电流互感器的二次绕组是怎样排列的? 为什么?	307
136. 套管式电流互感器有何特点? 变压器内怎样配置?	308
137. 220kV 及以上电流互感器为何要装一次绕组过电压保护器?	309
138. 什么是电流互感器的暂态特性? 有何要求?	311
139. 什么是 SF ₆ 互感器?	314
140. 什么是倒立式电流互感器? 有何特点?	317
141. 什么是剩余电流互感器?	319
142. 直流互感器的工作原理是怎样的?	321
三、调压器	323
(一) 概述	323
143. 调压器是怎样分类的?	323
144. 调压器的主要技术数据和额定容量等级有哪些?	325

(二)接触调压器	326
145. 接触调压器的工作原理怎样?	326
146. 接触调压器的结构有哪些特点?	327
147. 接触调压器有哪几种接线方式?	329
148. 接触调压器应怎样运行与维护保养?	331
(三)移圈调压器	331
149. 移圈调压器的工作原理怎样?	331
150. 移圈调压器的绕组联结组有几种?	333
151. 移圈调压器的调压阻抗特性是怎样的?	334
152. 移圈调压器的结构有什么特点?	334
153. 移圈调压器常见故障和维护要点有哪些?	336
(四)磁性调压器	336
154. 磁性调压器的工作原理是什么?	336
155. 单相磁性调压器的结构有什么特点?	337
156. 三相磁性调压器有几种结构形式?	339
157. 磁性调压器的调压特性与负载外特性有何特点?	340
158. 磁性调压器怎样用于闭环控制系统?	341
159. 磁性调压器的使用与维修应注意些什么?	341
(五)感应调压器	342
160. 感应调压器的工作原理是什么?	342
161. 感应调压器采用哪些绕组联结组?	344
162. 感应调压器的输出电压正弦性与调压特性是怎样的?	346
163. 感应调压器的结构有什么特点?	347
164. 感应调压器的选用、安装、运行与维修要注意什么?	349
(六)自动调压器	358
165. 自动调压器有哪些类型? 各有什么特点?	358
166. 自动调压器有哪些主要性能指标?	360
167. 自动调压器有哪些常见的控制系统	360
168. 感应和接触自动调压器有哪些常用的主回路?	362
169. 自动调压器怎样选型、使用和运行?	364
四、电抗器	366
170. 电抗器是怎样分类的? 电抗器有什么用途?	366

171. 两台完全相同的电抗器串联或并联时的电抗值是否是 2 倍关系?	367
172. 电抗器的容量、电抗压降百分数、电感的毫亨数和稳定短路电流是怎样表示的?	369
173. 铁心材料、气隙和磁通密度对铁心电抗器有什么影响?	370
174. 限流电抗器有哪几种? 有什么用途? 如何安装?	372
175. 什么是并联电抗器? 在结构上有什么特点?	375
176. 什么是串联电抗器? 它有什么用途?	376
177. 什么是消弧线圈? 其系列基本参数怎样?	377
178. 消弧线圈为什么能消除电弧? 有的消弧线圈为什么还装有一副绕组? 分级绝缘消弧线圈怎样做感应耐压试验?	379
179. 什么是启动电抗器? 启动电抗器有什么作用?	381
180. 什么是饱和电抗器? 应用在哪些地方? 有什么特点?	383
181. 饱和电抗器的原理怎样? 铁心结构有何特点? 什么是电抗变化倍数和交直流同时磁化曲线?	385

一、变压器

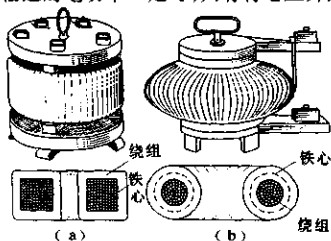
(一) 一般概念

1. 变压器及其同类产品有什么用途?

自从匈牙利冈茨工厂于 1885 年制造出第一台单相变压器雏型以来(见图 1-1),至今已 100 多年了。由于电能是能量输送的最好形式,所以变压器诞生不久就获得了应用。在一个多世纪内,电力事业获得了飞速的发展,我国变压器制造业也取得了重大发展,国产 500kV 级超高压电力变压器在 80 年代初已投入了运行(见图 1-2、图 1-3)。

变压器一般分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器可分为发电机变压器、输电变压器、联络变压器和配电变压器。

发电机变压器是把发电机发出的电压升高,以便远距离输送电能。因为输送的电功率一定时,只有将电压升高,电流才可以减



(a) 心式结构 (b) 壳式结构

图 1-1 1885 年匈牙利冈茨工厂的单相变压器

图 1—2 我国生产的大容量三相电力变压器

小,从而减小能量消耗。例如,将输电电压升高到 110kV 时,可将 50MW 的功率输送到 50 ~ 150km 的地方去;将输电电压升高到 220kV 时,可将 100 ~ 500MW 的功率输送到 200 ~ 300km 的地方去。要输送更大的功率到更远的地方就得把电压升高到 500kV 甚至更高。这样,就可以集中地利用水力,将水电站中水轮发电机发出的电能输送到较远的用户去;也可将火力发电厂建在煤矿附近,将火电站中汽轮发电机发出的电能输送到较远的用户去。

变压器还能把电压降低,满足用户的需要。要在用电的地区,建立一次和二次变电站,用输电变压器把传

图 1—3 我国生产的 500kV 级超高压电力变压器

输来的高压电能降到合适的电压或由联络变压器与其他电网相联。最后,用配电变压器将电能直接送给用户。

由于用户的不同,不能只用配电变压器,还必须设有许多特种

变压器,如:

交流变压器 可将三相电能变成六相、十二相或更多相的电能(或者相数不变),然后再将其整流,以供炼铝、电解铜、电解、电镀、充电、拖动等用;

电炉变压器 可以送出强大电流供炼钢炉、合金炉、电石炉、电阻炉、盐浴炉等用;

矿用变压器 作矿下供电用;

试验变压器 作高压试验用。

变压器的用途十分广泛,品种、规格繁多。通常,变压器的安装总容量为发电机安装总容量的8~10倍。

属于变压器类产品范畴的还有互感器、调压器和电抗器。由于其基本原理和结构与变压器相似,常和变压器一起统称为变压器类产品。它们的用途更为广泛,品种更多。互感器用于测量电流或电压和继电保护;调压器用于调节和稳定电压,并作为控制系统的执行元件;电抗器用于限流、补偿和控制等方面。

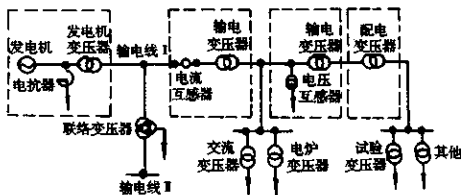


图 1—4 变压器类产品在电力系统中的应用

变压器类产品在电力系统中应用概况如图 1—4 所示。

2. 什么是变压器?它的工作原理怎样?

变压器是借助于电磁感应,以相同的频率,在两个或更多的绕组之间,变换交流电压和电流而传输交流电能的一种静止电器。其工作原理如下:

变压器的基本原理是电磁感应原理。现以单相双绕组(或三相中一相)变压器为例来加以说明,如图2—1所示。它由两个绕组和一个铁心组成。

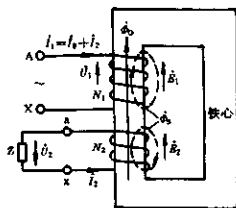


图2—1 变压器工作原理图

当匝数为 N_1 的一次绕组 AX 接到频率为 f 、电压为 U_1 的交流电源上时,很小的励磁电流 I_0 就足以在铁心中产生主磁通 Φ_0 (最大值为 Φ_m),以及经铁心外回路的漏磁通 Φ_1, Φ_2 。在—、二次绕组中分别感应出电势 E_1, E_2 ,二次绕组 ax 端就有电压 U_2 。当二次绕组接有负载时,二次绕组就流通电流 I_2 ,而一次电流就由空载时励磁电流 I_0 增至 I_1 。

在空载运行条件下,如果忽略励磁磁势、一次与二次绕组的电阻 r_1 和 r_2 以及漏磁通产生的电抗 x_1 和 x_2 ,在这种情况下,由法拉第定律:

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\Phi_m$$

两式相除得电压变换关系为:

$$U_1/U_2 = E_1/E_2 = N_1/N_2$$

这就是说,一、二次绕组的电压比 U_1/U_2 等于其匝数 N_1/N_2 。 N_2 不变, N_1 越大或 N_1 不变, N_2 越小,则 U_2 越小; N_2 不变, N_1 越小或 N_1 不变, N_2 越大,则 U_2 越大。很明显,只要改变两个绕组中任一个的匝数,就可以达到改变电压的目的。通常就是在某一绕组上引出若干抽头(分接头),来改变匝数比 N_1/N_2 ,从而改变二次电压值。这就是变压器能改变电压的道理。

令 $U_1/U_2 = K$, K 即为电压比,也就是电压变换倍数,并设定 $K \geq 1$ 。

当二次绕组接上负载并流过电流时,由于忽略了励磁磁势,则

二次磁势(电流×匝数)必然抵消一次磁势。为了保持平衡,二次电流越大,一次电流也越大,则由磁势平衡关系:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

得出在负载条件下电流变换关系为:

$$I_1/I_2 = N_2/N_1$$

从而 $I_1/I_2 = 1/K$ 。由此可知,电流变换关系与电压变换关系正好相反。电压比扩大几倍,电流比就缩小几倍。这就是变压器也能改变电流的道理。

这样,就可得变压器传输电能的容量的关系:一次输入容量 S_1 等于二次输出容量 S_2 , 即

$$S_1 = U_1 I_1 = K U_2 \cdot \frac{1}{K} I_2 = U_2 I_2 = S_2$$

这种改变电压和电流以及传输能量的道理就是变压器的工作原理。

下面再用具体方法把变压器原理进一步阐明一下。

(1) 电压方程式法

由图 2—1 所示,假定两个绕组绕向相同,端子标记也相同(或均相反),那么接电源的一次绕组本身是电源的负载,而接实际负载的二次绕组本身是实际负载的电源。其各物理量符合于电磁规律的方向(正方向)如下:

电流方向:如果产生主磁通 Φ_0 的一次电流 I_1 从 A 端流入,根据右手定则,则铁心中主磁通 Φ_0 方向向上;而二次绕组中电流总是产生反磁通,所以二次电流 I_2 必从 x 端流入。

电势方向:感应电势产生的电流是去磁的,反磁通向下,二次电流是感应电流从 x 端流入,同样一次感应电流也从 x 端流入(与 I_1 相反),而电势是由高电位指向低电位的,所以一、二次电势 E_1 、 E_2 均向上。

电压方向:任一绕组两端电压的方向不但与流过该绕组的电流方向有关,而且还与该绕组是电源还是负载有关。一次绕组既

然是负载,一次电压 U_1 表示外部电源加在一次绕组上的电压,所以 U_1 的方向应与一次电流 I_1 方向相反;二次绕组既然是电源,所以二次电压 U_2 的方向应与二次电流 I_2 方向相同。一、二次电压 U_1 、 U_2 也均向上。

在空间上,一、二次电流是反向的,即磁势是平衡的,而实际上变压器的一次需要励磁磁势 $I_0 N_1$, 并且, $I_1 N_1 - I_0 N_1 = I_2 N_2$ 是平衡的,即 $I_1 N_1 = I_0 N_1 + I_2 N_2$, 两边同除以 N_1 , 则

$$I_1 = I_0 + \frac{1}{K} I_2 = I_0 + I_2'$$

这就是具体表示电流变换的电流方程式,可见一、二次电流不是简单的比例关系。

一、二次电压和电势是同向的,而实际变压器中的绕组有电阻和电抗产生的压降。根据基尔霍夫第二定律,则

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 \\ \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 x_2 \end{aligned} \right\}$$

或

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_2 \end{aligned} \right\}$$

这就是具体表示电压变换的电压方程式,可见一、二次电压也不是简单的比例关系。其中 $r_1 + jx_1 = Z_1$ 称一次绕组短路阻抗, $r_2 + jx_2 = Z_2$ 称二次绕组短路阻抗。

(2) 相量图法

变压器电压和电流的关系如上述各式所示,那么怎样直观地看出它们之间的关系呢,这就需用相量图作一下几何解释。应当注意,在作几何解释时一般是把一、二次绕组的匝数比假定为 1 (或认为是折算到同一侧的)。一、二次电流在时间上是同相的。相量图的正确画法是这样的:

- 选一水平(或垂直)相量为主磁通 Φ_0 ;
- 画出超前 Φ_0 为 θ_0 角的空载电流 I_0 (其损耗分量 $I_{0\alpha} = I_0 \sin \theta_0$, 励磁分量 $I_{0\alpha} = I_0 \cos \theta_0$);

c. 画出一、二次绕组电势 E_1 、 E_2 超前 Φ_0 为 90° ;

d. 由负载的性质(一般为感性)画出二次电流 I_2 , 再与 I_0 合成为 I_1 ;

e. E_1 加上 $I_1 r_1$ 和 $j I_1 x_1$ 得 \dot{U}_1 ; E_2 减 $I_2 r_2$ 和 $j I_2 x_2$ 得 \dot{U}_2 (相量加减)。

这样就得到图 2—2 的双绕组变压器相量图。

很明显, 二次电压与一次电压是不等的, 其差值为 $KU_2 - U_1$ (K 在相量图上才可认为是 1), 二次电压与一次电压是有相位差的, 相位差为 δ_0 。同样, 二次电流与一次电流有差值 $K_1 I_2 - I_1$ ($K_1 = 1/K$ 为电流比) 和相位差 δ_1 。而一次输入的功率 $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$, 二次输出功率 $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ 。

如果一、二次绕组绕向相同, 而端子标记相反(或者反之), 则得出的相量图如图 2—3 所示。

(3) 等值电路法

变压器的电压和电流的关系可以通过等值变换, 即将二次回路参数用电压比 K 折

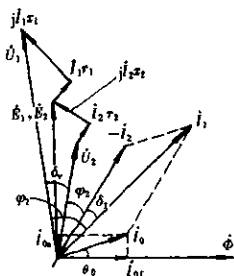


图 2—2 双绕组变压器相量图

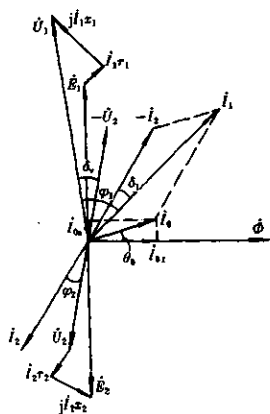


图 2—3 双绕组变压器的另一种相量图

算到一次；或者将一次回路参数用电压比 K 折算到二次，就可以将一、二次电路化为一个电路来描绘。变压器的工作原理用等值电路表示，对于参数的计算就大为方便了。

图 2—4 是一种等值电路，它是由折算到一次侧参数的二次回路（包括负载阻抗）与励磁回路并联后，再与一次回路串联的电路。

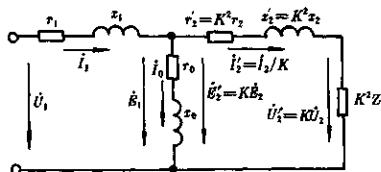


图 2—4 双绕组变压器的等值电路

以上三种方法是互相联系的，电压方程式法和等值电路法计算方便，而相量图法比较直观，常常互相配合应用，以便较完整地解释各种变压器类产品的工作原理。

3. 三绕组变压器和自耦变压器的工作原理怎样？

(1) 三绕组变压器

三绕组变压器是每相有三个在电路上独立的绕组的变压器，可以将其看成是由三对双绕组变压器组成的，如图 3—1 所示。三绕组变压器有三个不同的电压，有三个电压比： $K_{12} = N_1/N_2$ ， $K_{13} = N_1/N_3$ ， $K_{23} = N_2/N_3$ ；同样也有三个短路阻抗： Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{23} 。

为满足对短路阻抗的要求，三个绕组的同心位置可以不同，由外向里可以有高压、中压和低压绕组的排列，也可有高压、低压、中压绕组的排列。

(2) 自耦变压器

两个绕组具有公共部分的变压器称为自耦变压器。降压自耦变压器的结构和接线原理如图 3—2 所示。理想情况下电压比和电流比与双绕组变压器一样，即 $U_1/U_2 = K$ ， $I_1/I_2 = 1/K$ ；而传输

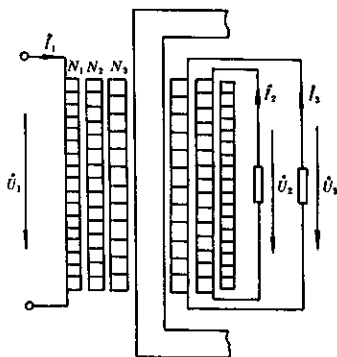


图 3—1 三绕组变压器的原理接线图

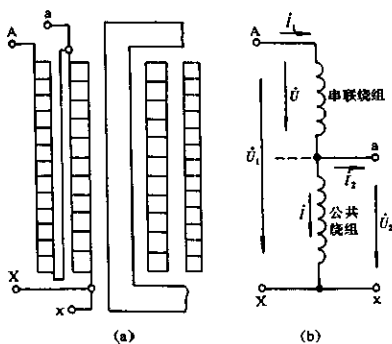


图 3—2 双绕组降压自耦变压器的原理图(a)和接线图(b)

容量(通过容量)也一样,即 $S_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 = S_2$ 。

但是,由接线图可知,公共绕组中电流为:

$$I = I_2 - I_1 = I_2 - I_2/K = I_2(1 - 1/K)$$

而串联绕组电压为：

$$U = U_1 - U_2 = U_1 - U_1/K = U_1(1 - 1/K)$$

所以串联绕组的容量为：

$$S_{\text{串}} = UI_1 = U_1 I_1 (1 - 1/K)$$

公共绕组的容量：

$$S_{\text{公}} = U_2 I = U_2 I_2 (1 - 1/K)$$

因此绕组容量，即变压器结构容量小于通过容量，它们的比值就是效益系数 $(1 - 1/K)$ ，即

$$\frac{S_{\text{串}}}{S_1} = \frac{S_{\text{公}}}{S_2} = \left(1 - \frac{1}{K}\right) < 1$$

电压比 K 越小， $(1 - 1/K)$ 也越小，如图 3—3 所示。 $K = 2$ ， $(1 - 1/K) = 1/2$ ，结构容量才是通过容量的 1/2。因此自耦变压器体积小，重量轻，损耗少，最经济。但由于一、二次绕组相连，自耦变压器中性点必须死接地，其线端还应装有避雷器。

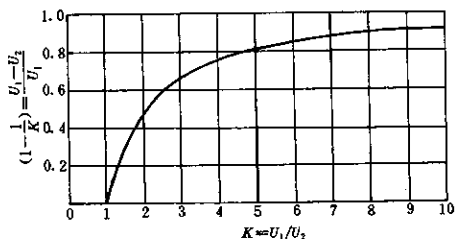


图 3—3 自耦变压器电压比与效益系数的关系

4. 电力变压器是怎样分类的？其产品型号的含义是什么？

电力变压器是按其特征分类的。

按铁心形式分为：心式的、壳式的；

按绕组耦合方式分为:普通的、自耦的;

按相数分为:单相的、三相的;

按冷却方式分为:油浸自冷、干式空气自冷、干式浇注绝缘、油浸风冷、油浸水冷;

按循环方式分为:自然循环、强迫循环;

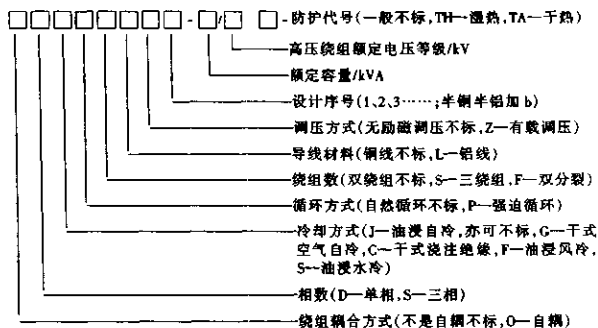
按绕组数分为:双绕组的、三绕组的;

按绕组导线材料分为:铜的、铝的;

按调压方式分为:无励磁时调压、有负载时调压;

按用途分为:升压、降压、配电、联络和厂用电变压器。

电力变压器哪种分类也包含不了变压器的全部特征,在产品型号中往往要把所有的特征均表达出来。因此电力变压器产品型号表示方法如下:



电力变压器产品型号举例:

例1: S9-2 000/35 表示三相油浸自冷双绕组铜线、第9系列设计、额定容量2 000kVA,高压额定电压等级35kV电力变压器。

例2: OSFPSZ-250 000/220 表示自耦三相风冷强迫油循环三绕组铜线有载调压、额定容量250 000kVA,高压额定电压等级为220kV电力变压器。

5. 我国输变电线路电压等级有哪些？怎样区别是升压还是降压变压器？

我国输变电线路电压等级(kV)为：

0.38、3、6、10、15(20)、35、60、110、220、330、500

线路的始端(电源端)电压将比这些数值为高。10kV 及以下的电压等级始端要高 5%，而 10kV 以上的电压等级要高 10%，因此变压器的额定电压也相应提高。所以线路始端变压器的额定电压(kV)为：

0.4、3.15、6.3、10.5(11)、15.75、38.5、66、121、242、363、550

由此可见，如果变压器高压额定电压比线路电压等级的电压高，则必为升压变压器；反之，高压额定电压低于上述始端额定电压的则为降压变压器。

另外，发电机额定电压(kV)也比线路电压等级高，一般为：

6.3、10.5、13.8、15.75、18

所以，可以得出结论，在额定电压比中，仅仅是低压额定电压高于线路电压等级的为降压变压器，其余为升压变压器。如

例 1：额定电压比为 121kV/10kV 时，则为升压变压器(低压额定电压不高)。

例 2：额定电压比为 110kV/10.5kV 时，则为降压变压器(仅有低压额定电压高)。

例 3：额定电压比为 121kV/10.5kV 时，则为升压变压器(不仅是低压额定电压高，高、低压额定电压都高，实际上是发电机变压器)。

例 4：额定电压比为 242kV/121kV/13.8kV 时，则为升压变压器。

例 5：额定电压比为 110kV/38.5kV/11kV 时，则为降压变压器。

6. 变压器是由哪些主要部分组成的？

变压器的结构对提高产品效率、节约材料、提高劳动生产率、缩小运输尺寸有直接影响。

变压器运行维护人员首先应该了解变压器的结构，才能正确

使用,便于监视和检测,进行维护和修理,从而提高运行的可靠性。

目前,油浸式变压器的产量最广,应用面最广,因此以中小型油浸式变压器为例,解剖一下变压器的结构,如图6—1所示。油浸式变压器主要由下列部分组成。

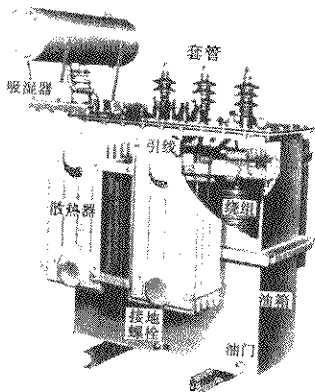
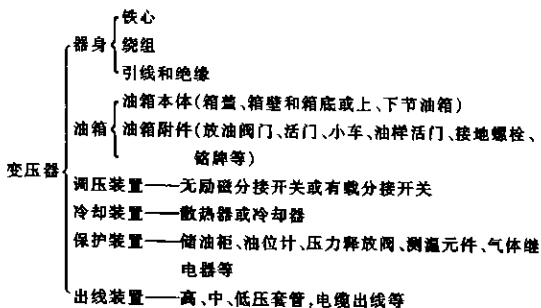


图6—1 油浸式电力变压器的结构

7. 变压器有哪些主要技术数据?

变压器在规定的使用环境和运行条件下,主要技术数据一般都标注在变压器铭牌上。它们包括:额定容量、额定电压及其分接电压、额定频率、绕组联结组以及额定性能数据(阻抗电压、空载电流、空载损耗和负载损耗)和总重等。

(1) 额定容量和重量

我国现在变压器的额定容量等级是按 $\sqrt[10]{10}$ 倍数增加的 R10 优先数系,只有 30kVA 及 63 000kVA 以上的与优先数系有所不同。具体容量等级(kVA)如表 7—1 所示。

1967 年以前是按 $\sqrt[8]{10}$ 倍数增加的 R8 容量系列(现已不用)。具体容量等级(kVA)如表 7—2 所示。

表 7—1 我国现在变压器的额定容量等级/kVA

10	100	1 000	10 000	(120 000)
	125	1 250	12 500	(150 000)
	160	1 600	16 000	(180 000)
20	200	2 000	20 000	(240 000)
	250	2 500	25 000	(360 000)
(30)	315	3 150	31 500	等
	400	4 000	40 000	
50	500	5 000	50 000	
63	630	6 300	63 000	
80	800	8 000	(90 000)	

注:组成三相变压器组的单相变压器为表中数值的 1/3,其余用途的单相变压器与表中数值相同。

表 7—2 1967 年以前的变压器额定容量等级/kVA

10	100	1 000	10 000
20	180	1 800	20 000
	320	3 200	31 500
50	560	5 600	40 500
	750	7 500	60 000

(2) 额定电压组合和联结组

油浸式电力变压器额定电压组合和联结组标号如表 7—3 所示。

表 7—3 油浸式电力变压器额定电压组合和联结组标号

容量/kVA	电压组合/kV			联结组标号
	高压	中压	低压	
10 ~ 1 600	6、10		0.4	Yyn0 (Dyn11), (Yzn11)
630 ~ 6 300	6、10		3.15、6.3	Yd11(Dyn11)
50 ~ 1 600	35		0.4	Yyn0
800 ~ 31 500	35 (38.5)		3.15 ~ 10.5 (3.3 ~ 11)	Yd11 (YNd11)
6 300 ~ 120 000	110 (121)		6.3、11 (10.5、13.8)	YNd11
6 300 ~ 63 000	110 (121)	38.5	6.3、11	YNyn0d11
31 500 ~ 120 000	220 (242)		6.3 ~ 13.8 (38.5)	YNd11 (YNyn0)
31 500 ~ 63 000	220 (242)	121	6.3、11 (38.5)	YNyn0d11 (YNyn0ym0)
63 000 ~ 120 000	220 (242)	121	10.5、13.8 (38.5)	YNd0d11 (YNd0ym0)
120 000 以上	110 以上	按技术协议		

(3) 空载电流和空载损耗

当变压器二次绕组开路，一次绕组施加额定频率正弦波形的额定电压时，其中所流通的电流称空载电流 I_0 。通常 I_0 以额定电流的百分数表示，即 $i_0 = I_0/I_n \times 100\% = 2\% \sim 8\%$ ，大容量变压器可小于 1%。

空载电流 $I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$ ，其中无功分量 I_{0a} 是励磁电流，用以

产生磁通 Φ_0 ; 有功分量 I_{0a} 是损耗电流, 在额定频率与额定电压下所汲取的有功功率称空载损耗 P_0 。空载损耗常以下式表示:

$$P_0 = K_0 P_1 G_1$$

式中 K_0 ——加工增大系数或称工艺系数, 1.15 ~ 1.5;

P_1 ——对应于铁心磁密的电工钢片的单位损耗(W/kg);

G_1 ——铁心重量(kg)。

(4) 阻抗电压和负载损耗

当变压器二次绕组短路(稳态), 一次绕组流通额定电流而施加的电压称阻抗电压 U_z 。通常 U_z 以额定电压的百分数表示, 即 $u_z = (U_z/U_{1n}) \times 100\%$ 。

阻抗电压百分数 $u_z = \sqrt{u_x^2 + u_r^2}$ 。其中 u_x 为电抗电压百分数; u_r 为电阻电压百分数。中小容量变压器 $u_x/u_r = 1 \sim 5$; 大容量变压器 $u_x/u_r = 10 \sim 15$, 所以大容量变压器的阻抗电压可以用电抗电压表示。

阻抗电压大小与变压器成本和性能、系统稳定和供电质量有关。标准系列电力变压器的阻抗电压如表 7-4 所示。

表 7-4 标准系列电力变压器的阻抗电压

电压等级/kV	6~10	35	60	110	220
阻抗电压/%	4~5.5	6.5~8	8~9	10.5	12~14

稳态短路时所产生的相当于额定容量与参考温度下的损耗为负载损耗 P_f :

$$P_f = \text{最大的一对绕组的电阻损耗 } P_r + \text{附加损耗 } P_{f_0}$$

而 $P_{f_0} = \text{绕组涡流损耗} + \text{并绕导线的环流损耗} + \text{杂散损耗} + \text{引线损耗}$

电阻损耗可用下式表示:

$$P_r = K_r \delta^2 G$$

式中 K_r ——参考温度 75℃时系数, 铜线为 2.4, 铝线为 13.22;

δ ——电流密度(A/mm²);

G ——绕组总重(kg)。

1 600kVA 及以下的二次额定电压 $U_{2n} = 400V$ 的三相变压器, 一般可用表 7-5 中的系数 K_g 来折算 P_f , 则

$$P_f = (100 + K_g)\% P_1$$

表 7-5 附加损耗经验系数 K_g

容量/kVA	≤200	250~315	400~500	630	800~1 000	1 250~1 600
$K_g/\%$	3	5	8	10	12	13

(5) 效率

变压器的效率为输出有功功率与输入有功功率之比的百分数:

$$\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{\text{输出功率}}{\text{输出功率} + \text{空载损耗} + \text{负载损耗}} \times 100\%$$

满负载时

$$\eta = \frac{S_{2n} \cos \varphi_2}{S_{2n} \cos \varphi_2 + P_0 + P_f} \times 100\%$$

在任意负载时(以负载系数 $\beta = I_2/I_{2n}$ 表示)

$$\eta = \frac{\beta S_{2n} \cos \varphi_2}{\beta S_{2n} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_f} \times 100\%$$

当 $\beta = \sqrt{P_0/P_f}$ 时, η 最大。

(6) 电压变动率

变压器负载运行时, 由于有阻抗电压, 二次电压将随负载电流和负载功率因数的改变而改变。变压器电压变动率:

$$\epsilon\% = (U_{2n} - U_2)/U_{2n}\%$$

计算时可用下式:

$$\begin{aligned} \epsilon\% &= \beta(u_1 \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2) + \beta^2(u_x \cos \varphi_2 - u_1 \sin \varphi_2)^2/200 \\ &\approx \beta(u_1 \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2) \end{aligned}$$

当 $\cos \varphi_2 = 1$ 时, $\epsilon = \beta u_x$, 因 $u_x < u_1$, 故 ϵ 最小; 当 $\cos \varphi_2 = 0$ 时, $\epsilon = \beta u_1$, 故 ϵ 最大。

8. 变压器接在直流电源上、低压绕组接在高压电源上、电源改变电压等,情况将怎样?

(1) 变压器接在直流电源上

变压器接直流电源时,绕组中通过直流电流,铁心中产生恒定磁通,而恒定磁通是不随时间变化的,不能在一、二次绕组中感应出电势。二次绕组中没有电势,因此无论它是开路还是短路,均没有电流,从而对一次绕组的电流没有影响。

当直流电压加在单相变压器绕组上时,其稳态直流电流 I_D 等于所加直流电压 U_D 除以二次绕组直流电阻 R ,即 $I_D = U_D/R$ 。

(2) 低压绕组接在高压电源上

一台变压器的额定电压为 220V/110V,如不慎将低压侧 ax 误接到 220V 电源上,则励磁电流将会急剧增大。

因为变压器的端电压由法拉第定律为:

$$U = 4.44fN\Phi_m = 4.44fNB_m A$$

式中, A 为铁心截面; B_m 为磁通密度。两边同除以匝数 N ,则每匝电压 e_1 为:

$$e_1 = U/N = 4.44fB_m A = kB_m$$

也就是说,每匝电压 e_1 和磁通密度 B_m 成正比。当不慎将 110V 绕组接到 220V 电源上时,绕组的每匝电压将增加一倍。另外,磁密也将增大一倍。由图 8-1(a) 的铁心磁化曲线可知,铁心的磁密 B_m 和磁场强度 H 是非线性的关系,且工作磁密一般选在饱和点附近,磁密 B_m 增大到 B'_m 时,磁场强度 H 或励磁电流 I_0 增大到 I'_0 ,铁心过励磁了,将损坏变压器。

(3) 电源电压改变时

一台电压为 6300V/400V、Yyn0 的三相配电变压器,如果想在电源电压为 10000V 上使用,那么就必须改变绕组的匝数。

改变的匝数一定要是高压绕组的匝数,改变低压绕组的匝数是不对的。因为若高压绕组匝数不变,那么每匝电压将增大到原来的 $10000/6300 = 1.59$ 倍,铁心磁密也将增大到原来的 1.59 倍,

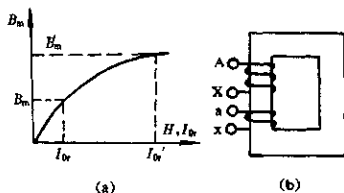


图 8—1 铁心磁化曲线(a)和单相变压器(b)

励磁电流必然是急剧增大,出现过大的过电压与过励磁,铁心的损耗增大,铁心振动严重。

如果低压绕组的匝数 $N_2 = 40$ 匝,则由于匝数比 $N_1/N_2 = U_1/U_2$,高压绕组匝数应改为:

$$N_1 = \frac{U_1}{U_2} N_2 = \frac{10\,000}{400} \times 40 = 1\,000 \text{ 匝}$$

(4) 两绕组串联时

如一台单相变压器电压为 220V/100V,仍如图 8—1(b)所示。设高压侧加 220V 电压,空载励磁电流为 I_0 ,主磁通为 Φ_0 。当 X、a 连在一起, Ax 加 330V 时, Ax 的有效匝数为低压绕组的 3 倍,而所加电压也为低压绕组电压的 3 倍,每匝电压不变;当 X、x 连在一起, Aa 加 110V 时, Aa 的有效匝数为高低压绕组的匝数之差,也就是等于低压绕组的匝数,所以加 110V 时每匝电压也不变。从而主磁通不变。

主磁通不变,励磁安匝 $I_0 N$ 也不变。但是前者匝数增大 3/2 倍,励磁电流仅为原来的 2/3;而后者匝数降低了 1/2,励磁电流为原来的 2 倍。

9. 电源频率对变压器励磁电流、空载损耗、电抗、负载损耗、温升有什么影响? 50Hz 的变压器能当 60Hz 的变压器用吗?

(1) 励磁电流

励磁电流 I_0 由其计算式可知, 正比于频率 f 和磁密 B_m 平方, 即 $I_0 \propto fB_m^2$

而每匝电压: $e_1 = 4.44fB_m A$

当每匝电压不变时, 磁密 B_m 与频率 f 成反比, 即

$$B_m = \frac{e_1}{4.44A} \cdot \frac{1}{f} = \frac{k_1}{f}$$

式中, $k_1 = e_1/4.44A$ 在这里为一常数。所以, 励磁电流和频率的关系是反比关系:

$$I_0 \propto fB_m^2 = f\left(\frac{k_1}{f}\right)^2 = \frac{k_1^2}{f}$$

50Hz 变压器接到 60Hz 电源上去, 如果电压不变, 由于磁密降低, 因此励磁电流为原来的 $50/60 = 0.834$ 倍。

(2) 空载损耗

在工程上, 变压器空载损耗:

$$P_0 = k_2 f^{1.3} B_m^2$$

所以当 B_m 不变时, 空载损耗与频率的 1.3 次方成比例。

由(1)可知, 当电压不变时 $B_m = k_1/f$, 则

$$P_0 = k_2 f^{1.3} (k_1/f)^2 \propto f^{-0.7}$$

50Hz 变压器接到 60Hz 电源上去, 由于磁密降低, 故空载损耗为原来的 $(60/50)^{-0.7} \approx 1.2^{-0.7} = 0.88$ 倍。

(3) 电抗

由变压器电抗 X 公式可知: $X \propto f$ 。50Hz 变压器接到 60Hz 电源上去, 电抗为原来的 $60/50 = 1.2$ 倍。

(4) 负载损耗

负载损耗包括绕组的电阻损耗、涡流损耗和杂散损耗等。电阻损耗与频率无关, 而涡流和杂散损耗与频率平方成正比。

50Hz 变压器接到 60Hz 电源上去, 涡流和杂散损耗为原来的 $(60/50)^2 = 1.44$ 倍。而电阻损耗约占负载损耗 P_i 的 70%, 所以负

载损耗约增加到:

$$P'_l = 70\% P_l + 1.44 \times 30\% P_l = 112\% P_l$$

即负载损耗约为原来的 1.12 倍。

(5) 温升和输出容量

由于空载损耗降低到 0.88 倍,负载损耗增加到 1.12 倍,一般情况下,负载损耗为空载损耗的 4~7 倍,可认为总损耗是增加的。

变压器总损耗增加,温升增加,输出容量要降低。

10. 变压器类产品的正常使用条件有哪些规定? 如不符合正常使用条件,在特殊情况下怎么办?

变压器类产品的正常使用条件是:

- a. 海拔高度不超过 1 000m。
- b. 周围环境空气温度;
最高空气温度不大于 +40℃;
月平均温度不大于 +30℃;
年平均温度不大于 +20℃;
最低空气温度不低于 -25℃(适用于户外变压器);
最低空气温度不低于 -5℃(适用于户内变压器)。
- c. 冷却器入口处水温不大于 +25℃。
- d. 电源的电压波形近似于正弦波形。
- e. 电源电压应三相大致对称。
- f. 安装环境无明显污秽。

如使用条件不符合上述正常使用条件,如周围环境空气温度超过最高空气温度 +40℃,但超过值不大于 10℃,可按以下规定相应降低绕组、铁心和油的温升。

变压器额定容量等于或大于 10MVA 时,按空气温度超过值降低温升;变压器额定容量小于 10MVA 时,空气温度超过值小于或等于 5℃时,相应降低温升 5K,空气温度超过值大于 5℃但不大于 10℃时,相应降低温升 10K。当周围空气温度超过正常使用条件 10℃以上时,或冷却水温超过 +30℃以上时,则由制造厂和用户协商确定各项变压器温升限值。

如变压器运行地点的海拔高度超过 1 000m,但变压器温升试验是在正常海拔地区进行的,则温升限值应在 1 000m 以上每 400m 降 1K(油浸自冷),每 250m 降 1K(油浸风冷或强油风冷)。

变压器运行地点海拔高度超过 1 000m 但不超过 4 000m 时,变压器外绝缘的额定耐受试验电压值应乘以海拔校正系数 K_a 。

$$K_a = \frac{1}{1.1 - H \times 10^{-4}}$$

式中 H ——变压器运行地点海拔高度, m。

(二)铁心与励磁

11. 铁心有什么作用? 铁心是怎样分类的? 铁心对变压器性能有什么影响?

变压器是根据电磁感应原理制造的,磁路是电能转换的媒介。铁心就是变压器的磁路部分,主要作用是导磁,由磁导率很高的冷轧电工钢片(硅钢片)制成。变压器一个绕组通以很小的励磁电流,在铁心中可产生很大的交变磁通,感应出所需要的电势。

另外,铁心是变压器的内部骨架,它的心柱上套装各个绕组,支持着引线、木件、分接开关和其他一些组件。




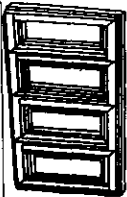
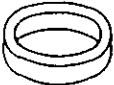

铁心通常可分为壳式和心式两种。壳式铁心一般是水平放置的,铁心截面为矩形,每柱有两旁轭,铁心包围了绕组,所以称壳式。这种铁心的铁心片规格少,铁心紧固方便,漏磁通有闭合回路,附加损耗小。但与其匹配的矩形绕组制造困难,短路时绕组易变形。心式铁心一般是垂直放置的,铁心截面为分级圆柱形,绕组包围心柱,所以称心式。铁心片规格较多,绑扎和夹紧要求较高。但与其匹配的圆筒形绕组制造方便,短路时稳定性好。我国多数厂家目前采用心式铁心。

壳式和心式铁心均有单相和三相之分。单相变压器用单相铁心,三相变压器用三相铁心。一般来说,铁心是由剪切后的铁心片叠积而成的。由于出现了成卷电工钢片,为了充分利用磁性的取向性能,产生了由电工钢带卷绕而成的卷铁心。卷铁心需要在卷

绕机上进行绕制,故不可能做得太大,只适于小型变压器、互感器和调压器。所以,我国现在绝大多数铁心是心式叠积铁心。

常用的心式铁心的结构特征和适用范围如表 11-1 所示。

表 11-1 常用的心式叠铁心和卷铁心的结构特征和适用范围

型 式	图 形	结 构 特 征	适 用 范 围
单相两柱式叠铁心		心柱与铁轭在同一垂直平面内,以交叠方式叠积,两柱均套绕组,以串、并联接线引出。结构简单而紧凑,工艺装备少,但叠积工作量大。它是目前被广泛应用的基本结构	适用于单相的各种变压器和互感器
三相三柱式叠铁心		结构上比上一种多了一个心柱,三柱绕组各自为一相引出。它是三相变压器的典型结构	适用于三相的各种变压器
单相单柱旁轭式叠铁心		中间为心柱,两边为旁轭,轭的截面为心柱截面一半,也称中柱式铁心,附加损耗小。实际上类似单相壳式结构	适用于高压大型变压器、高压试验变压器等
三相三柱旁轭式叠铁心(五柱铁心)		中间为三个心柱,两边旁轭截面为心柱的 $(\frac{1}{2} \sim \frac{1}{\sqrt{3}})$ 。常用于大容量三相变压器中。另外,三相三绕组电压互感器等必须要有旁轭,以作为零序磁通回路等用。三相三柱旁轭式铁心的高度较低,可降低运输高度	适用于三相大容量变压器、三相三绕组电压互感器等
单相环形卷铁心		用带料电工钢片连续卷成,磁通符合轧制方向,导磁性能好,但绕组须用专用设备在其上直接绕制。它是卷铁心最简单的结构	适用于电流互感器、接触式调压器
单相两柱式卷铁心		用不同宽度的电工钢带连续卷成阶梯形截面的两柱式铁心。绕组须用专用设备绕制,所以常把这种铁心切成两半,形成单相C型卷铁心或设计成上铁轭可打开的结构,以便于套装绕组	适用于小型单相变压器和互感器

铁心在励磁时会产生空载损耗,吸收系统的无功能量形成空载电流,铁心会产生温升。对于干式变压器而言,铁心温升会影响低压绕组温升。

铁心在励磁时还会产生噪声,全电压合闸时还会产生励磁涌流。

在要作操作波冲击试验以前的变压器的铁心中有剩磁时,它会影响施加操作波试验电压的波形。剩磁还影响空载损耗值、涌流值。

铁心结构有时对局部放电也会产生影响。因为铁心是一个接地的电极,铁心叠片又是电容性接地。

铁心结构不正确,加工上存在缺陷时,会有多点接地的可能,它是常遇到的一种故障。故铁心必须保证一点接地,以保证运行上的可靠性。

12. 铁心是由哪些部分组成的?

现在最常见的变压器铁心典型结构如图 12—1 所示,它已不

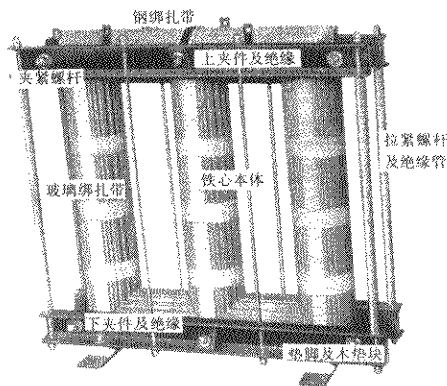


图 12—1 心式三相三柱 200kVA 变压器铁心结构

采用穿心螺杆。铁心除了由电工钢片制成的铁心本体外,还包括其他附属零件,使铁心组成一个整体。现以图 12—1 的中小型油浸式变压器铁心为例,解剖一下铁心的结构。铁心主要由下列部分组成:

铁心 { 铁心本体——磁导体,由电工钢片制成
紧固件——夹件、螺杆、玻璃绑扎带、钢绑扎带和垫块等
绝缘件——夹件绝缘、绝缘管和绝缘垫、接地片和垫脚等

13. 电工钢片牌号有哪些? 它们的电磁性能怎样?

1885 年匈牙利发明的变压器铁心是用钢丝绕制的,而后的变压器铁心是用普通钢片制造的。在 1900 年发现铁中加入硅后,所产生的硅钢的导磁性能可明显提高,出现了热轧电工钢片;在 1934 年得到了经多次冷轧退火,而具有方向性的低损耗冷轧电工钢片;在 1968 年采用特殊无机绝缘涂层,得到了高导磁冷轧电工钢片和电工钢带。因此,变压器目前均采用冷轧电工钢片。为了减小涡流损耗,电工钢片不宜厚,目前常用的电工钢片是 0.30mm, 0.35mm 已趋淘汰,还可用 0.23~0.27mm 厚的电工钢片。厚度越薄,单位损耗越低,叠片系数越小。

我国已经能生产优良的冷轧电工钢带(片),按国家标准《冷轧电工钢带(片)》GB2521—81,国产电工钢带(片)的品种、牌号和电磁性能列于表 13—1。

牌号中符号为:

DQ——冷轧取向电工钢带(片);

G——高磁感应取向电工钢带(片);

符号后数字——50Hz 1.7T 时单位铁损值的 100 倍;

横线后数字——厚度毫米数的 100 倍。

例:DQ133-30 电工钢带是表示冷轧取向电工钢带(片),最大单位铁损 $P_{1.7/50}$ 为 1.33W/kg,厚度为 0.30mm。

为了与国内外以及国内以前使用的冷轧电工钢带(片)的牌号相对照,特列表 13—2,以供参照。

表 13—1 国产冷轧电工钢带(片)的单位损耗和磁感应强度(磁通密度)

品种	牌号	公称厚度 /mm	最大铁损 $P_{17/15}$ /W·kg ⁻¹	最小磁感应 强度 B_{10} /T	密度 /g·cm ⁻³	最小叠 片系数 /%
冷轧取向电工钢带(片)	DQ122G-30	0.30	1.22	1.88	7.65	94
	DQ133G-30		1.33	1.88		
	DQ133-30		1.33	1.79		
	DQ147-30		1.47	1.77		
	DQ162-30		1.62	1.74		
	DQ179-30		1.79	1.71		
	DQ196-30		1.96	1.68		
	DQ126G-35	0.35	1.26	1.88		95
	DQ137G-35		1.37	1.88		
	DQ151-35		1.51	1.77		
	DQ166-35		1.66	1.74		
	DQ183-35		1.83	1.71		
	DQ200-35		2.00	1.68		
	DQ230-35		2.30	1.63		

注: $P_{17/15}$ ——频率 50Hz, 磁感应强度(正弦变化)为 1.7T 下的单位损耗;

B_{10} ——磁场强度为 10A/cm 时, 基本换向磁化曲线上的磁感应强度。

表 13—2 冷轧电工钢带(片)的牌号对照表

种类	国家标准 GB2521—81		日本标准 JISC2553 —78	新日铁 公司 (1975)	原武钢标准 (硅)1—79	部颁标准 YB73—63
取向	DQ122G-30	DQ126G-35		Z8H	Q8G	
	DQ133G-30	DQ137G-35		Z9H	Q9G	
	DQ133-30		G09	Z9	Q09	
	DQ147-30	DQ151-35	G10	Z10	Q10	
	DQ162-30	DQ166-35	G11	Z11	Q11	
	DQ179-30	DQ183-35	G12	Z12	Q12	
	DQ196-30	DQ200-35	G13	Q13	D340	
		DQ230-35	G15	Q15	D330	

为了进一步降低变压器的空载损耗,已研制出非晶合金材料。非晶合金材料主要是铁硼系列合金。其主要优点是损耗可以减小 $2/3 \sim 3/4$,但饱和磁密低,小于 1.5T (特斯拉),且有价格较高的缺点,只能用在小型配电变压器上。

14. 变压器类产品铁心中磁通密度怎样选择?

选择铁心中磁通密度时要考虑下面几个问题。

(1) 电工钢片的材质

磁通密度选得过高,空载电流与空载损耗增长很快。这是因为电工钢片有磁饱和现象,磁通与产生磁通的电流之间不是按线性关系变化的。

电压从零增大时,磁通密度也随之增大。当磁通密度增大到一定程度时,电压继续增加,磁通密度呈饱和状态而增加甚微。因此选用磁通密度的上限应选在饱和点以下,对于油浸式变压器,冷轧电工钢片磁通密度不宜超过 1.75T 。

(2) 运行特点

选择磁通密度时要考虑正常运行和故障运行特点:

a. 正常运行特点。电力变压器要考虑电压超过相应分接电压的 5% ,即过励磁 5% 时在额定容量下能连续运行;也要考虑超过 10% 时在空载下能连续运行。

试验变压器、调压器要保持输出电压波形为正弦波。

高压为中性点不死接地系统的 Y_{yn} 结线的三相变压器,低压侧中线电流近于低压额定电流的 25% 时,由于中性点位移而引起相电压增加(此时任一相的电流在满载时不得超过额定电流)。在电感性负载下,当中线电流为低压额定电流的 25% 时,相电压变化率最高可达 6.9% ,有 6.9% 过励磁。

电压互感器要使误差特性符合要求,用于中性点死接地的电压互感器,当系统为空载运行时要不发生铁磁谐振,并使正常运行时作接地保护用的开口三角两端电压不能太高。

电流互感器要根据选定的安匝数使误差特性符合要求。

这些正常运行特点使磁通密度的选取值,要有不同程度的降

低。

b.故障运行特点。电力变压器在运行中都有短路保护,短路电流只允许很短的持续时间。虽然在单相接地时磁通密度会增加1.39倍(接地系数小于0.8的死接地系统)和1.73倍(不死接地和经小阻抗接地系统),但可按正常运行磁通密度来选用。

Yyn结线三相双绕组变压器以及单相三绕组电压互感器正常运行磁通密度一般要比饱和值降低到50%;三相三绕组五柱式电压互感器因三相有不同的励磁特性,为防止并联谐振过电压,磁通密度还要降低些。

(3)采用的绕组联结组

绕组联结组影响磁通的波形。Yd结线中因三次谐波电流可在d形结线的绕组中成回路,磁通为正弦波,所以感应出的电压是正弦波。Yy结线中,因三次谐波电流无回路,励磁电流就为正弦波,由于电工钢片的饱和特性,使磁通中含有三次谐波分量。磁通的三次谐波分量使磁通变为平顶波,二次感应电压就成尖顶波。但是Yy结线只用于三柱式铁心中,因三次谐波磁通要经过空气构成回路,磁阻很大,故磁通中三次谐波分量不大,磁通仍接近于正弦波,磁通密度可不降低。

用于中性点不死接地系统的35kV及以下的单相电压互感器一般都用V形结线。由于V型结线无三次谐波励磁电流的回路,故磁通中有三次谐波磁通。为保持二次感应电压的波形为正弦波,磁通密度不宜选得太高。

(4)铁心温升

正常运行的磁通密度越高,铁心温升也越高,一般在铁心中加油道或加气道后仍不能降低铁心温升时,要降低正常工作时的磁通密度值,磁通密度值一定要满足这一热特性的要求。

(5)空载噪声

空载噪声与磁通密度有关,降低磁通密度0.1T,空载噪声约可降2~3dB(A)。

考虑上述诸问题后,50Hz时磁通密度的选用值如表14—1所

示。

表 14—1 50Hz 时磁通密度的选用

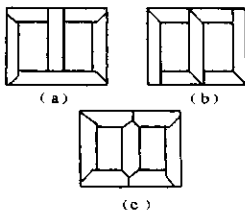
变压器类产品		冷轧电工钢片的磁通密度/T		
电力变压器		1.6 ~ 1.75		
中性点非有效接地系统用三相三绕组电压互感器		0.75 ~ 0.8		
35kV 及以下 V 形接线单相双绕组电压互感器		1.2 ~ 1.4		
中性点非有效接地系统用电压互感器		0.9 ~ 0.95		
中性点有效接地系统用单相三绕组电压互感器		1.15 ~ 1.25		
试验变压器		1.4 ~ 1.5		
干式变压器		每柱容量/kVA		
		5 以下	5 ~ 20	25 及以上
		1.1 ~ 1.3	1.2 ~ 1.4	1.4 ~ 1.5
移圈调压器	干式	1.15 ~ 1.4*		
	油浸式	1.3 ~ 1.6*		
保护电流互感器(相当于额定一次电流时)		2.1/10% 倍数		
平衡电抗器(150Hz)		1.0		

注:* 是热轧电工钢片的磁通密度值,因移圈调压器的磁通都是横向的,一般不用冷轧电工钢片。

15. 铁心片加工有什么特点?

(1) 铁心片的剪切

叠铁心的每一层需用一定形状的铁心片排列而成,常称为“铁心叠片图”,如图 15—1 所示。以前曾采用半直半斜接缝叠片图,现在则多采用全斜接缝叠片图,并正在推广采用阶梯全斜接缝叠片图以减小损耗。叠片图中铁心片形的加工采取合理的工艺。



(a)、(b)半直半斜接缝 (c)全斜接缝

由于目前大多由卷料电工钢片

图 15—1 三相三柱式铁心叠片图

制造铁心,因此不能采用单台普通剪床,而采用自动化流水线生产,以提高生产效率,减少边角余料。

用纵向剪切生产线将卷料电工钢片纵向剪切成各种宽度的带料,如图 15—2 所示。将卷料放在开卷机上,然后送料至滚剪机切成带料,最后由收卷机把带料卷起来。其中缓冲地坑是用来补偿剪切速度和收卷速度的差别。

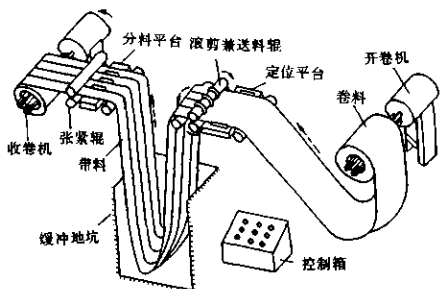


图 15—2 一般的纵向剪切生产线结构

带料剪成各种形状的铁心片,是采用横向剪切生产线,如图 15—3 所示。把纵向剪切好的带料放在开卷机上,然后经进给机构送至生产线上的剪床剪切,即可切成铁心片,再经适当的取片机构和分料机构,使同种铁心片堆放在一起。不同形状的铁心片仅与生产线的剪床形式、安装位置和数量有关。

现在的铁心均采用绑扎结构,很少需要冲孔,但为了获得一定的片形,有时还需冲缺口。

铁心片冲剪时,冲剪力是按下式计算的:

$$\text{斜口剪床的剪切力} = \frac{(\text{钢片厚度})^2 \times \text{钢片剪切应力}}{2 \tan \alpha}, \text{N}$$

式中,电工钢片的剪切应力按极限强度考虑为 300MPa; $\tan \alpha =$ 剪刀

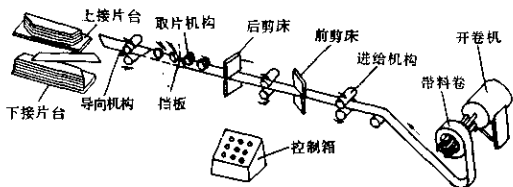


图 15—3 一般的横向剪切生产线结构

闭合高度/剪刀长;钢片厚度单位为 mm。

冲床冲剪力 = 钢片冲剪面积 × 钢片剪切应力

圆孔冲剪力 = 直径 × π × 钢片厚度 × 钢片剪切应力

常用的剪刀、冲模材质是采用铬 12(Cr12)和碳 8(T8)钢。

剪刀、冲模安装时有一定的要点:

剪刀安装的要点是:

- a. 下剪刀要略低于进料水平线;
- b. 上下剪刀要求平行,间隙要均匀一致(用顶丝及垫片调整),间隙厚为 0.005 ~ 0.015mm(0.3 电工钢片);
- c. 剪刀成一直线,不得出现凹凸弧度。

冲模安装的要点是:

- a. 上下冲模要求垂直;
- b. 冲模间隙要均匀一致(用顶丝来调节);
- c. 根据电工钢片的厚度和性能,上下冲模的重合深度要适宜(对于 0.3 电工钢片约 0.15 ~ 0.25mm)。

如果不这样做,其结果是容易啃刀模具,刀模具磨损严重,甚至发生事故。

电工钢片冲剪尺寸超差,会使铁心叠装时产生搭头多、离缝大,不仅叠装操作困难,更重要的是使铁心空载电流明显增加。

电工钢片冲剪后毛刺大,会造成叠片系数降低,即减小铁心实际净截面积,使磁通密度增高,损耗加大。同时也会使片间端部短路,涡流损耗增加。毛刺大还能使心柱薄厚不均,夹不紧,在运行中产生噪声。因此毛刺必须限制在0.03mm以下。

(2)铁心片表面的绝缘

变压器的铁心都在高磁场中运行,电工钢片内磁通密度高、损耗大,所以要涂耐热的漆膜使两片铁心片互相绝缘起来,使涡流只能在一片铁心片内流动,如两片间没有绝缘就等于是一片,涡流损耗就增大四倍。而电流互感器的铁心平常是在低磁场中运行,磁通密度低,损耗不大,一般铁心片表面有氧化膜时,就可以不涂漆了。但漆膜的电阻值也不宜过大,过大对铁心电容接地有影响。

但是,目前取向电工钢片均有无机绝缘涂层,所以变压器铁心片可以不必另行涂漆。为防止剪切口生锈,剪切口处应涂漆。

(3)铁心片的退火

叠铁心的铁心片在剪切、冲孔、甚至传输等过程中,使铁心片产生了内应力,局部地改变了金属的金相结构,降低了磁导率,增加了磁致损耗。对较窄的冷轧电工钢片可经过退火处理以消除应力,较宽的片,因应力影响面积不大一般不需要退火处理。

卷铁心是用带料电工钢片卷制而成的,存在于材料中的机械应力很大,电磁性能受到破坏,增加了铁心损耗。因此,为了消除机械应力,恢复材料本身的电磁性能,必须进行退火处理。

电工钢片消除应力退火温度最高为800℃。

退火过程中铁心片发生氧化,对铁心电磁性能有很坏的影响。不仅能损坏冷轧电工钢片表面的氧化膜,而且对铁心片磁性影响很大,特别是在高磁通密度下影响更坏,使铁心损耗大大增加。这是不允许的,所以退火处理还必需在真空或充氮情况下进行。

16. 铁心装配和检修时应注意什么?

(1)铁心的叠装

大型铁心为了便于起立,可在滚转台上叠装铁心,如图16-1所示;小型铁心则在平台上叠装即可。首先在台上安放好与铁心

柱和铁轭轴线对应的各种支撑物或托架装置。心柱需要绑扎的铁心还要按绑扎距离安放临时夹具的一部分,再安放上下铁轭夹件、绝缘垫块、护板等,然后进行叠片。

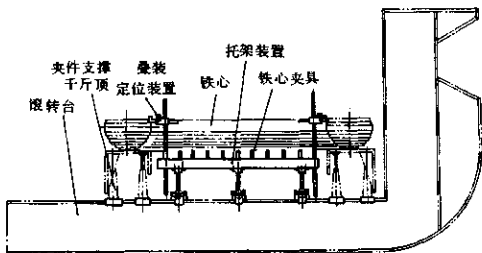


图 16—1 铁心叠装及定位装置使用方法示意图

全斜接缝无孔铁心的叠装要采用定位装置,有外四角和内四角定位法,一般采用内四角定位法。定位装置分为上部定位部分和下部固定部分,中间由柱齿条连成一体。定位部分中垂直的两个可调定位挡块对铁心叠片进行内角定位。每叠完一级调整一次,定位挡块上升一级片厚的高度,同时移动片宽差的一半,固定后进行下级叠装。

一片一叠的叠装工时太大,但是每叠的片数多于三片时,空载损耗与电流要增大,且片的接缝处摩擦力变小,所以铁心叠片时一般都是主级为两片或小级为三片一叠。

要保证铁心尺寸和几何形状在允许偏差内。心柱轴线偏差、柱与轭间局部突出、接缝大小等应按规定偏差控制。铁心叠片间不允许有搭接现象。要注意叠装基础的水平度,每叠 20mm 厚要调整接缝。要注意防止夹件等和叠片相通,避免铁心多点接地。

铁心叠完并检查校正后,在上侧再安放护板、绝缘板和上下铁轭夹件,用绑扎钢带等把铁轭夹紧,用临时夹具把铁心柱夹紧。铁心起立后,装好下面垫脚,并在铁心柱上缠绕玻璃绑带。玻璃绑带

一般用 2840 环氧树脂无纬绑扎粘带(1mm 厚)。控制玻璃粘带的绑扎厚度,固化后需冷却到 60℃ 以下,才能拆去临时夹具。目前已发展到可用半干性粘带来绑扎,铁心夹紧力以 0.1~0.3MPa 为宜。

应该指出,为了减少铁心套绕组时拆上铁轭片的工时,铁心最好不叠上铁轭。

(2) 铁心中油道或气道的设置

因为铁心在运行时有损耗,在铁心片间加油道或气道是为了把损耗产生的热量散走。干式变压器的气道要有足够的宽度才能散热,一般都在 20mm 以上。而且常用黄铜来做,目的是减少铁心的附加损耗。油浸式变压器常用绝缘油道,两侧叠片用接地片连接。

油道是变压器铁心内部的导油路径,为了把热量方便地从油道中传送出来,油道应有一定的方向。三柱和五柱双框铁心油道的方向如图 16—2 所示。



图 16—2 铁心油道方向示意图

(3) 铁心的检查

工艺上规定新产品、出口产品、电压等级为 220kV 及以上产品、容量为 63 000kVA 及以上产品的铁心成品要做空载性能试验。电工钢片材质要求抽试。

大型变压器成品铁心技术检查项目达到合格的标准是:

- a. 绑扎(夹紧)的铁心,紧固可靠;
- b. 接地片插入 2~3 级处,不松动,接地可靠,插入深度 $\geq 80\text{mm}$;
- c. 环氧粘带固化后不能松动,光滑整齐,厚度差值 $\pm 1\text{mm}$,节

距差值 $\pm 10\text{mm}$;

d. 铁心柱倾斜度, 高度小于 2m 时不大于 10mm ; 大于 2m 时为 $4/1000$;

e. 总厚度差为 $+3\text{mm}$ 、 -2mm , 直径差为 $+10\text{mm}$, 离缝参差不齐 $\leq 2\text{mm}$, 方铁与夹件间隙 $4 \sim 13\text{mm}$;

f. 夹件对铁心、绝缘螺杆对铁心和夹件经 2000V (或 2500V 摇表) 耐压 1 分钟合格。

(4) 玻璃粘带绑扎铁心的检修

当检修铁心柱直径为 $\phi 500\text{mm}$ 以上的变压器时, 在玻璃粘带绑扎铁心起立以后, 未套绕组前, 或者当检修变压器需要将绕组全部拆除时 (主要是指要拆除最靠近铁心柱的一个绕组), 应注意下列几点:

a. 要保证地面平坦, 铁心垂直, 避免有任何倾斜。

b. 拆卸上铁轭片时, 要防止铁心变形和向某一侧倾斜。

c. 铁心叠完, 在绕组套入铁心柱之前, 拆卸上铁轭片时事先应用卡具将铁心柱上端夹紧, 然后再拆卸上铁轭片。上铁轭片拆卸完毕后, 再用布带将铁心柱上端的心柱片扎牢, 卸掉卡具, 此时方可把绕组套在铁心柱上。目的是为了防止铁心柱上端的第一箍玻璃粘带在偶然的情况下发生断裂而造成铁心片倾倒事故。

d. 要将旧绕组拆除换新绕组时也要采取上述措施。

17. 铁心为什么要接地? 而又为什么不能多点接地?

铁心及其金属件由于所处的电场位置不同, 产生的电位也不同。当两点电位差达到能够击穿两者之间的绝缘时, 便相互之间产生火花放电。这种放电是断续的, 放电后两点电位相同, 即停止放电; 再产生电位差, 再放电。断续放电的结果使变压器油分解, 并容易将固体绝缘损坏, 导致事故的发生。为了避免上述情况的出现, 铁心及其他金属件 (夹件、绕组压板等) 必须与油箱连接, 然后接地, 使它们同处于等电位 (零电位)。铁心如有穿心螺杆, 由于电容耦合作用, 事实上与铁心等电位, 不必单独接地。

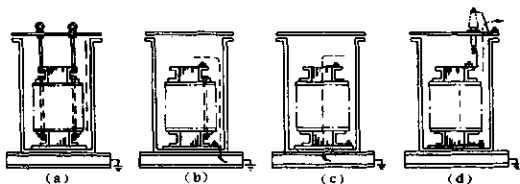
目前, 广泛采用在铁心片间放一铜片的方法接地。尽管每铁

心片间有绝缘膜,仍然可认为整个铁心是电容接地。

铁心如果两点接地,相当于铁心两侧短路,就会产生一定的电流。这个电流导致局部过热,损耗增加,甚至接地片熔断,使铁心产生悬浮电位,这是不允许的。

因此,铁心必须接地,而且必须是一点接地。

为了确保铁心是一点接地,必须采取一定的接地结构方式。铁心接地结构约有如下四种,如图 17—1 所示。



(a)上下夹件间不绝缘而有吊螺杆时 (b)上下夹件间不绝缘时

(c)上下夹件间绝缘时 (d)上下夹件间绝缘而有接地套管时

图 17—1 铁心的接地结构

当上下夹件间不绝缘(有拉螺杆或拉板)时,将 2~3 级处的接地铜片连接到上夹件上,再由上夹件经吊螺杆[见图 17—1(a)]或经地脚螺钉[见图 17—1(b)]接地。

当上下夹件间绝缘时,则必须在上下铁轭的对称位置上各插一接地铜片连接夹件,由上夹件经铁心片至下夹件再接地,如图 17—1(c)。接地片位置之所以要对称,也是避免铁心两点接地。

当采用接地套管时,只需将铁心用接地铜片接到上夹件,并与接地套管相连,铁心也就一点接地了,如图 17—1(d)所示。

在发生两点接地的事故中,主要有以下几种情况:

- 上夹件碰油箱;
- 夹件小托板碰铁心;
- 穿心螺杆钢座套碰铁心;

d. 钢垫脚与铁心之间的绝缘碰破或受潮；

e. 悬浮金属物的影响。

18. 为什么空载电流有谐波分量？它有什么影响？

由于铁心的磁化特性(曲线)是非线性的,所以向变压器上加正弦波形电压时,励磁电流中主要含有奇次谐波的畸变波形。

当变压器一次绕组施加正弦波电压时,那么外施电压将与绕组的感应电势相平衡(忽略不大的绕组压降),绕组的感应电势 E 也将是正弦波,如图 18—1 的第二象限所示。绕组的感应电势与铁心磁密 B 成正比,所以铁心磁通密度也将是正弦形的,互相对应的。但是由于铁心磁化特性是非线性的 $B = f(i_0)$,如图 18—1 第一象限所示,所以由此曲线而得的励磁电流 i_0 波形是非正弦的尖顶波,如图 18—1 第四象限所示。

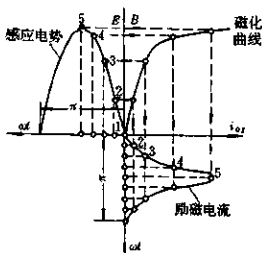


图 18—1 变压器励磁电流波形的图解法

这种励磁电流波形可分解成各奇次谐波分量,如图 18—2 所示。励磁电流是空载电流的分量,所以空载电流也含有奇次谐波。

影响空载电流谐波分量大小的有下列几个因素。

a. 铁心材质的影响。如果电工钢片磁化曲线在工作磁通密度处弯曲大,而磁滞回线所包围的面积又大时,则空载电流畸变程度不等,冷轧电工钢片的各次谐波分量的分散性也就不大,如表

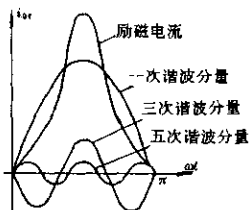


图 18—2 变压器励磁电流及其谐波分量

18—1 所示。

表 18—1 励磁电流谐波分量

谐波分量	冷轧电工钢片
基波(一次)	100%
三次谐波	40% ~ 50%
五次谐波	10% ~ 25%
七次谐波	5% ~ 10%
九次谐波	3% ~ 6%
十一次谐波	1% ~ 3%

b. 磁通密度的影响。表 18—1 中的谐波分量是在铁心磁通未饱和时的数值。如果磁通密度选取过大,励磁电流谐波分量数值又将变化。各次谐波分量大,分散性也大,甚至使五次、七次谐波增加严重。

c. 铁心结构的影响。铁心的结构对空载电流谐波分量的影响是很明显的,卷铁心的影响比叠铁心要小。就叠铁心而言,影响空载电流谐波分量的因素是接缝形式、接缝大小和接缝数目。接缝大或接缝数多的铁心,空载电流谐波分量必大。

那么,变压器空载电流谐波大小有什么意义呢?它可以分析

变压器铁心设计的合理性,但更为主要的是可以为提高供电质量及对线路的保护提供必要的数据。空载电流谐波分量有下列影响。

三次谐波电流的影响。一次为 Y 结线而中性点接地,二次为 d 结线时,三次谐波励磁电流如同零序电流那样在 d 结线中环流,而不在线路电流中出现;一次为 Y 结线而中性点不引出,二次为 d 结线时,三次谐波励磁电流在一次不能流通,但其产生的三次谐波电势被 d 结线短路,三次谐波循环电流在 d 结线中流通,形成必要的磁势使一次电势为正弦波形;一次为 Y 结线而中性点不引出,但又没有其他 d 结线时,三次谐波励磁电流没有通路,感应电势中出现较大的三次谐波电势,中性点电位飘移,各相电势畸变,但是在线电压中三次谐波电势是抵消的。

以上三种结线组合使空载电流的三次谐波分量不产生影响。

一次或二次的 Y 结线中性点接地,但不和电源中性点连接时,二次侧连接输电线等电容性负载而流入电流时,其三次谐波电压就会产生感应性故障,或者产生与三次谐波共振的过电压。即使一次中性点与电源中性点连接,三次谐波电流在两中性点间环流,也有感应故障产生。因此 YNy 或 Yyn 结线组合的变压器有三次谐波电压,应设置一个 d 结线的绕组。

作为例外的是,YNy 或 Yyn 结线组合的变压器铁心是三相三柱式时,因为该铁心对三次谐波磁通不闭合,不易产生三次谐波磁通,电压波形畸变很小。此时,这两种结线组合是可采用的。但是其零序阻抗必大。

19. 变压器空载合闸时为什么有励磁涌流?

当变压器空载投入线路时,励磁电流立即处于瞬变状态的过渡过程,其瞬时峰值可能会超过额定负载电流的几倍,比正常的励磁电流,即变压器的稳态空载电流大几十倍。该暂态电流称励磁涌流。涌流值太大时可能引起继电器的误动作,使变压器不能投入线路。这个涌流的大小,决定于投入变压器时线路电压的相位以及铁心剩磁通的状态。

空载合闸过程主要表现为变压器磁通变化的过渡过程。

当铁心没有剩磁时,如果合闸瞬间电压为最大值,磁通超前电压 90° ,所以磁通为零。此时和合闸前铁心中无磁通一样,磁通不突变,不突变就不会发生过渡过程。如果合闸瞬间电压为零,则磁通为最大值,为使合闸瞬时磁通仍为零,铁心内必形成一个反磁通(直流分量磁通)抵消该瞬时的磁通(稳态磁通),而且大小相等方向相反。这样,合闸瞬时合成磁通是为零了,但在半波后合成磁通则为稳态磁通的 2 倍 ($2\Phi_m$),如图 19—1 所示。

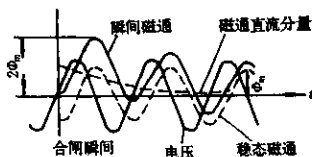


图 19—1 合闸瞬间电压为零时,瞬时磁通增加的波形

这 2 倍的磁通值使铁心大为饱和,由于铁心磁化曲线是非线性的,所以励磁电流很大(比图 18—1 励磁电流更为尖顶的波形)就成为涌流了,如图 19—2 所示。

当铁心有剩磁 Φ_r ,且与第一个半波的磁通方向一致时,则瞬时磁通将增加至 $2\Phi_m + \Phi_r$,励磁涌流将更大。

由于直流分量磁通是衰减的,励磁涌流也衰减,在几个周波内将衰减至正常的稳态励磁电流值,所以对变压器危害不大。

事实上,产生这样大的涌流的可能性很小。这是因为:



图 19—2 空载合闸时励磁涌流的波形

- a. 断路器在电压过零点时投入的可能性很小；
- b. 涌流流通时，外部线路的电压本身要下降；
- c. 剩磁通也不一定与电压变化方向同相，且根据外部线路的状态，还有可能减小。

三相变压器组的三相总有一相要产生过渡现象，因为无论什么瞬间投入都不可避免地要出现涌流。通常心式变压器内侧绕组电抗小，所以由内侧绕组励磁时涌流大。

为了防止继电器误动作，也可在变压器投入后一定的时间内，采用闭锁继电器的方法等。

20. 变压器的噪声是怎样产生的？什么是声级水平及其基准值？

变压器在运行中会有“嗡嗡”的响声，这就是噪声。它主要是由铁心中铁心片的磁致伸缩（带气隙铁心还有电磁力）产生的。此外，绕组间的电磁力、油箱上磁屏蔽的磁致伸缩、油箱传递（包括共振）的振动也引起噪声。

变压器噪声的测量，就是测量其声压级。当然也用声功率级和声强级表示。

(1) 声压级、声功率级和声强级

a. 声压级。声压 P 是介质中某点的声压强度在某一时刻由于声波存在而产生的变化量，其单位为 μPa （微帕）。声压级 L_p （IEC 标准中简称声级）是将待测声压与基准声压 P_0 （ $20\mu\text{Pa}$ ）的比值，取常用对数后乘以 20，以 dB(A) ，即 A 计权分贝表示：

$$L_p = 20 \lg P/P_0, \text{dB(A)}$$

但是，声级计是由：传声器→放大器→衰减器→计权网络→检波→表头而构成的。其中有计权网络（A、B、C、D 四种）模拟人耳的纯音响应，所以测量的声压级是计权声压级。而 A 计权声压级更接近于人耳对噪声的感觉，因此变压器噪声测量中采用 A 计权声压级 L_{pA} ，单位为 dB(A) 。第 i 点测量的 A 计权声压级为 L_{pAi} 。

可是不能以一个 i 点的声压级来衡量变压器的噪声，所以就

得用一个加权平均值,即变压器噪声 A 计权表面声压级 L_{PA} 来表示:

$$\bar{L}_{PA} = 10 \lg \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{PAi}} \right], \text{dB(A)}$$

式中 N ——测量点总数。

b. 声功率级。表示变压器噪声最好是用其能量表示。声功率 W 是指单位时间内垂直通过指定面积的声能量,单位为 W(瓦),因而需再测量表面积 S ,声功率级 L_w 是待测声功率与基准声功率 W_0 (10^{-12} W) 的比值,取常用对数后乘以 10,以 dB 表示:

$$L_w = 10 \lg W / W_0, \text{dB}$$

A 计权声功率级

$$L_{wA} = 10 \lg W_A / W_{A0}, \text{dB(A)}$$

由声压级而得的声功率级

$$L_{wA} = \bar{L}_{PA} - k + 10 \lg S / S_0, \text{dB(A)}$$

式中 S_0 ——基准表面积, $S_0 = 1 \text{ m}^2$;

k ——反射影响的环境校正值。

c. 声强级。表示变压器噪声还用声强级。声强 I 是某一点上单位时间内垂直通过单位面积的声能量,单位为 W/m^2 (瓦/米²)。声强级 L_I 是待测声强与基准声强 I_0 (10^{-12} W/m²) 的比值,取常用对数后乘以 10,以 dB(A) 表示:

$$L_I = 10 \lg I / I_0, \text{dB(A)}$$

同样,也采用 A 计权声强级。

(2) 声级水平

一般的所谓声级水平都是声压级水平的简称。

过去由于声级水平没有列入考核指标之内,随着用电量的增加,变电所接近市区或居民区,环境法又对噪声值在法律上加以限制。所以,变压器对声级水平提出了考核的参数,因此,对声级水平就有进一步的理解。

声级水平是指额定电压与额定频率下变压器处于空载励磁条件时在规定轮廓回线上测得的声压级水平(A)加权值。因为属于空载时的声压级水平,所以目前考核的声压级水平主要是由铁心励磁时产生的磁致伸缩所引起的空载声压级水平。

在工艺良好的前提下,以铁心磁致伸缩为基础而导出的空载噪声声压级计算公式为:

$$L_p = 73 + 20\lg 2f/100 + 20\lg h + 21\lg \epsilon \times 10^{-6}, \text{dB}$$

式中 f ——电网频率,Hz;

h ——铁心柱高,m;

ϵ ——电工钢片的相对伸长。

如以铁心磁密 B 代替相对伸长 ϵ ,则

$$L_p = k_1 + 20\lg h + 20n\lg B, \text{dB}$$

式中 k_1 ——常数,相当于 $73 + 20\lg 2f/100$;

n ——常数,由 B 与 ϵ 的关系而得。

并且认为磁密在 1.4 ~ 1.8T 范围内,磁密每变化 0.1T,噪声变化 2 ~ 3dB。

因此,也认为铁心重量 G 增加一倍,噪声约增 4dB,这样

$$L_p = k_2 + k_3\lg G + 20n\lg B, \text{dB}$$

式中 k_2, k_3 ——常数;

G ——铁心重量,kg。

如果由变压器容量 S 来计算声级,则

$$L_p = k_4 + k_5\lg S + 20n\lg B, \text{dB}$$

式中 k_4, k_5 ——常数;

S ——变压器容量,kVA。

上面公式还有一个简单的形式是:

$$L_w = h + 5\lg S$$

应用这些公式求得的声级水平与实际实测值相比并不都是准确的,只是一个大概的数值。但是,通过这些公式说明了声级可以

有一个限值,它与变压器参数有一定规律可循,配合以测量统计数据,可以得到变压器的声级基本水平。

同时,变压器的容量越来越大,负载电流引起的声级水平就不可忽略了。故目前的标准中对负载电流引起的声级水平也加以规定了。

负载电流在箱壁的磁屏蔽中会产生噪声,负载电流在绕组内也会产生噪声。所以,大容量变压器在满载运行时测得的声级水平为空载与负载下声压级水平之和。当然,两者之和为对数之和,可根据国家标准的公式加以合成。

负载下声级水平值与负载电流大小有关。将来我国国家标准也会对负载下声级水平加以规定。

可利用做温升试验的机会测负载下声级水平值,如不做温升试验,那么也要做负载下声级水平的测量。当然,这主要是对大容量变压器的要求,尤其是大容量发电机用升压主变压器必须进行负载下声级水平测量。

另外,目前所谓低噪声变压器也是指空载电压励磁下(施加电压为额定电压,电源频率为额定频率)测得的声压级 A 加权水平。对大容量变压器而言,真正的低噪声变压器应是额定电压、额定频率并通过额定电流时为低声压级水平。

过励磁运行时,空载下声压级水平会增高,超铭牌容量运行时,负载下声压级水平会增高。变压器的磁通密度越高,铁心中磁致伸缩越大,空载下声压级水平越高。

在变压器周围设隔音墙可降低声压级水平。如将变压器安装在隔音室内更能大幅度地降低声压级水平。

为降低声压级水平,也可从结构与工艺上采取措施而加以解决。如铁心采用阶梯式接缝,叠完铁心后在剪切边缘上用树脂漆粘合,防止铁心的噪声传到箱底,绕组用恒压干燥处理工艺,合理布置磁屏蔽位置并防止磁屏蔽噪声传到箱壁等等。

(三) 绕组与漏磁

21. 绕组有什么作用？绕组是怎样分类的？

变压器的电路部分就是绕组，由电导率较高的铜导线或铝导线绕制而成。绕组应具有足够的绝缘强度、机械强度和耐热能力。

绕组通常分为层式和饼式两种。

绕组的线匝沿其轴向依次排列连续绕制的，称为层式绕组。一般层式绕组每层如筒状，所以由两层组成的绕组称双层圆筒式；由多层组成的称多层圆筒式。

绕组的线匝沿其辐向连续绕制而成一饼(段)，再由许多饼沿轴向排列组成的绕组，称为饼式绕组。它包括连续式、插入电容式和纠结式等。

介于层式和饼式之间的绕组有箱式绕组和螺旋式绕组。箱式绕组形式也如筒状，线匝是沿轴向连续绕制的，一般情况下一匝就是一层，故可属于层式绕组。螺旋式绕组一般为每饼一匝，或两饼、四饼一匝，而各匝又沿轴向连续绕制，但形式是由各饼组成，故可属于饼式绕组。

层式绕组结构紧凑，生产效率高，耐受冲击电压的性能好，但其机械强度差。饼式绕组散热性能好，机械强度高，适用范围大，但其耐受冲击电压的性能差。

变压器绕组的形式细分如下：


- | | | |
|----|---|-----------------------------------|
| 绕组 | { | 圆筒式——单层圆筒式、双层圆筒式、多层圆筒式和分段圆筒式 |
| | | 箱式——一般箱式、分段箱式 |
| | | 连续式——一般连续式、半连续式、纠结连续式 |
| | | 纠结式——普通纠结式和插花纠结式 |
| | | 插入电容式 |
| | | 螺旋式——单螺旋式(单半螺旋式)、双螺旋式(双半螺旋式)和四螺旋式 |
| | | 交错式——由连续式或螺旋式线段交错排列而成 |

其中所谓半连续式、半螺旋式，是油道与纸圈交错分布的连续

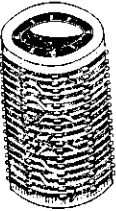

式或螺旋式绕组。

常用的绕组的结构特征和适用范围如表 21—1 所示。

表 21—1 常用绕组的结构特征和适用范围

型式	图形	结构特征	适用范围
圆筒式	 <p>(以多层圆筒式为例)</p>	<p>分单层、双层、多层三种,工艺性好,但端部支撑的稳定性较差。双层圆筒式用 1~6 根扁导线直接在绕线模上并绕而成。多层圆筒式用圆导线(或扁导线)在绝缘筒上绕成。35kV 高压绕组为了使起始电压分布均匀,在绕组内层放置静电屏,与绕组线端相连。层间绝缘为电缆纸或油道。绕组两端有绝缘件填平</p>	<p>双层圆筒式一般用于三相容量为 630kVA 及以下、电压为 1kV 及以下的低压绕组</p> <p>多层圆筒式一般用于三相容量为 630kVA 及以下、电压为 3 - 35kV 的高压绕组</p>
箱式		<p>与多层圆筒式相似,但每一层为一匝,金属箔的宽度等于绕组的高度,空间利用率高,可自动绕制</p>	<p>可用于中小型变压器绕组</p>

续表 21—1

型式	图形	结构特征	适用范围
连续式		<p>机械强度高,散热性能好,但绕制较费工。由1~6根扁导线在撑条上并绕成饼状线段。饼间用油道或用油道和纸圆交错隔开,两端有油道和绝缘圈</p>	<p>可用于三相容量为630kVA及以上,电压为3~110kV的各种绕组</p>
纠结式	<p>(以连续式为例)</p>	<p>与连续式相似,但并绕导线数为绕组实际并联导线数的2倍。为了增大绕组匝间电容,改善冲击电压的分布,其线匝不是依次排列的,而是交叉纠结相联</p>	<p>可用于三相容量为6300kVA及以上、电压为110~500kV的绕组</p>
螺旋式	 <p>(以双螺旋式为例)</p>	<p>外形与连续式相似,其一匝相当于连续式的一饼(单螺旋式)、两饼(双螺旋式)或四饼(四螺旋式)。绕制简便,但由于绕组高度限制,匝数稍多的绕组不能采用</p>	<p>可用于三相容量为800kVA及以上、电压为35kV及以下的大电流绕组和有载调压变压器的调压绕组</p>

22. 什么是绕组的绕向？什么是并联导线的换位？

(1) 绕组的绕向

绕组中电流所产生的磁场方向,以及当磁场变化时绕组中感应电势方向都与绕组的绕向有关。绕组的绕向有左绕向和右绕向两种。

若线匝从起头向绕组中部沿线匝方向是逆时针方向,称左绕向;若沿线匝方向是顺时针方向,称右绕向。在绕线时,操作者面向绕线机,导线由操作者后面进入绕线机的情况下,那么起头在绕线机左侧绕成的绕组称右绕向绕组,起头在绕线机右侧绕成的绕组称左绕向绕组。简单地说,“左起右绕向,右起左绕向”,如图 22—1 所示。左绕向绕组绕制方便,所以绕组一般采用左绕向。

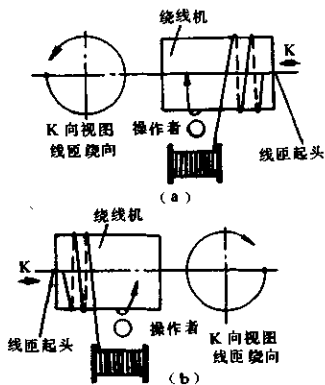


图 22—1 绕组的绕向示意图

一般来说,绕组绕完后绕向是不可改变的。但是,双数层圆筒式绕组和只有一个单饼的绕组,起、完头符号对调,绕向是要改变的。因为这时对起头来讲沿线匝方向改变了。

由变压器原理可知,两柱式单相变压器中一次绕组有一个绕向错了,铁心中不会有磁通;而二次绕组有一个绕向错了,则其并联时为短路,而串联时二次电压为零。一次或者二次绕组绕向错了,将使变压器的联结组发生变化。

三相变压器中一次绕组有一个绕向错了,磁通同样在铁心中不成回路,而一次或二次所有绕组绕向错了,同样也将使变压器的联结组发生变化。

由此可见,变压器中绕组的绕向是不允许绕错的。

一台变压器中各个绕组的绕向并不一定一致,这要视其联结方式而定,例如常见的单相变压器的两柱并联联结时,绕向必然不同,一柱为左绕向,另一柱必为右绕向,如图 22-2 所示。

一个绕组中绕向也不一定一致,如反接法绕组的两部分线段绕向就相反,上下并联的绕组上下两并联支路的绕向也相反,如图 22-3 所示。

(2) 并绕导线的换位

导线内通过电流后,除了电阻损耗外,还有涡流损耗。对于电阻损耗,绕组不管是用单根还是多根导线并联绕制,只要截面相同、长度相等,电阻损耗都是一样的。但是轴向漏磁引起的涡流损耗则与导线厚度有关,厚度增加一倍,涡流损耗增加四倍,因此电流大时就得采用多根导线并联绕制以降低导线的厚度。

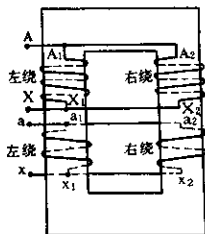
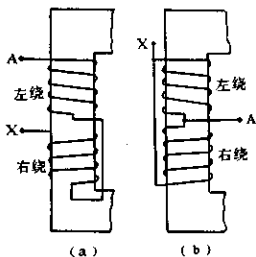


图 22-2 单相变压器两柱绕组并联时的绕向



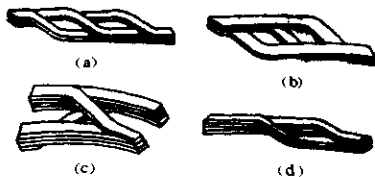
(a) 反接法的绕向

(b) 上下支路并联的绕向

图 22-3 一个绕组中的绕向

多根并联导线(相同截面)中,一般情况下并联导线不一样长,且漏磁场在并联导线中引起的感应电势也不相等,所以必须进行换位(导线互换位置),使各导线的电流输出趋于平衡。

换位一般有三种形式(如图 22—4 所示):



(a)标准换位 (b)标准换位(只用于连续式绕组内侧换位)

(c)交叉换位 (d)分组换位

图 22—4 并联导线的换位形式

标准换位。各根导线依次换位,用于圆筒式、连续式绕组和单螺旋式绕组的中部换位;

交叉换位。用于双螺旋式绕组;

分组换位。用于单螺旋式绕组的特殊换位。

23. 什么是电压比?

标明在变压器铭牌上的电压比是指变压器在空载时的电压比,作为制造厂内判断绕组匝数是否符合规定要求的一个参数。在实际运行中的电压比与负载的类型是容性还是感性、与负载电流大小、与变压器本身参数(如电阻与电感值)有关。电压比是空载电压比的概念而不是实际运行中的电压比。

在标注电压比时,三相变压器要标注线电压的比,如 Yd 联结变压器可标注 121 000V/10 500V,如有分接时,可标注 $(110\ 000 \pm 8 \times 1.25\%)V/10\ 500V$,所标的电压具体值都是指线电压,单位用伏或千伏都可。但对单相变压器而言,就不是标注线电压了,而要标注相电压, Y 联结相电压还必须以线电压被 $\sqrt{3}$ 除来标注。如

$\frac{(110\,000 \pm 8 \times 1.25\%) V}{\sqrt{3}}$ V/10 500V, 其概念是一次侧联结成三相组

时为 Y 联结或 YN 联结, 而二次侧为 d 联结。所以电压比不能随便标注, 要按规定标注出空载时电压比。对三绕组变压器而言, 先标注高压, 再标注中压, 最后标注低压的电压值。

当分接范围正与负范围有不同步, 可分别标注出, 如 $(110\,000^{+10}_{-5} \times 1.25\%) V / (35\,000^{+1}_{-3} \times 2.5\%) V / 10\,500V$ 。

分接电压的具体值是判断分接绕组匝数的参数, 故分接电压可大于系统最高电压 U_m 。如以 $121\,000 \pm 5\% V$ 为例, $121\,000 + 5\% = 127\,050V$, 大于 110kV 级的 $U_m = 126kV$ 值。这表明, 在运行时, 如变压器在最大分接位置, 分接电压为 127 050V, 而加在变压器上各个分接位置的电压不允许大于 126 000V。此电压加在最大分接位置时, 变压器为欠励磁运行, 而加在最小分接位置时 (最小分接电压为 114 950V) 为过励磁运行。过励磁应符合标准规定, 长期空载可过励磁 10%, 长期满载可过励磁 5%。否则应改变分接位置以满足过励磁的规定, 或改变加在各分接位置上的电压。

电压比不一定等于匝数比, 匝数比是实测电压比, 加上标准上允许的偏差后应符合电压比。所以, 电压比还应是空载的标称电压比。与实测电压比之差要符合标准上的允许偏差值。

24. 绕组中常采用哪些措施以改善冲击电压分布? 为什么采用纠结式和内屏蔽式绕组?

(1) 绕组内部过电压保护

变压器运行中常常受到雷电过电压、操作过电压与工频过电压的作用, 所以在绕组上常常采用静电屏、静电环、加强线饼和铝箔屏蔽等内部改善电场分布的措施。

绕组在受到过电压作用时, 由于冲击波的波形陡, 等值频率甚高, 所以冲击电流开始主要从电容通路流过, 而不从电感通路流过。由于绕组对地各点的电容分布关系, 所以通过绕组的冲击电流从头到尾分布很不均匀, 造成电压梯度相差很大。

当变压器采用圆筒式绕组时, 沿整个绕组的冲击电压分布虽

然比连续式绕组好,但往往是第一层的过电压梯度分布比其他层大。为了减弱第一层的过电压梯度,在绕组线端放置静电屏,将第一层导线绕在静电屏上,线端与静电屏出头连在一起引出。加上静电屏后,就改善了绕组对地电容分布,因而降低了第一层的过电压梯度。为避免静电屏的放电,静电屏不应伸出绕组端部。

采用连续式绕组时,变压器在遭到雷电过电压袭击时,沿整个绕组的过电压梯度的分布是不均匀的。绕组端部进线的静电环的作用是改善第一个线饼对地电容分布。静电环也可改善对地的电场分布。

中部进线的变压器绕组,如采用纠结式则可以增加匝间电容,以改善过电压的分布,因绕组中部电场分布是均匀的,所以中部进线的纠结式绕组可以不放置静电环。

尽管人们采取了一些静电保护措施(静电屏、静电环)和改进绕组的结构(纠结、内屏蔽电容等),但绕组的头几匝、头几饼的电压梯度仍然较高。为了使头几匝和头几饼不被击穿,整个绕组又比较经济,所以有时采用加强饼,这就是加强线饼的承受过电压能力。

静电屏与静电环的电极都是用导电材料做的,所以在制造时要注意导电材料之间不可形成短路匝。围成静电屏的导电材料都要在重叠包扎部分垫绝缘,即在静电屏下放一张绝缘纸。静电环中所绕的铜带也要有重叠包扎部分,并垫以绝缘纸,即在起头与末头间垫绝缘纸,因为不垫绝缘纸也会使静电环形成短路匝。

高压绕组的线端与静电环连接的焊接头要用铝箔包扎。这是因为静电环与高压绕组线端要用铜焊连接起来,就连接点来说,尽管工艺上要求锉平砂光,但毕竟还会有凹凸不平之处,这样导体的表面电场的分布是不均匀的。越是尖角的地方,电场分布得越集中,再加上此焊接点多处于离上铁轭较近的地方,更加大了此处的电场强度,因而放电的可能性就更大。为了使此处的电场比较均匀,消灭尖角放电的现象,所以要有与导线等电位的屏蔽铝箔,以屏蔽尖角。

操作方法是先用纸垫条垫平,再用皱纹纸包平整,然后将铝箔平整地包在焊接点上,并使铝箔边离焊接点 40mm 以上,有一边与导线相连。最后按工艺规定在铝箔的外面包上适当厚度的皱纹纸、白布带。要注意的是,包在铝箔外面的绝缘纸沿导线的延伸长度是包扎皱纹纸厚度的 7~10 倍。

110kV 及以上的变压器,一般引线焊接点均需用铝箔屏蔽。

(2) 纠结式和内屏蔽式绕组的应用

纠结式绕组匝间电容大,所以冲击电压分布好。

在其他形式的绕组中(连续式、圆筒式等),匝间工作电压仅差一匝的电压,但纠结式绕组就不是这样。如图 24—1 所示,第 1 号线匝与第 17 号线匝间差 16 匝的电压差,两饼共有 16 个相差 16 匝的电压差;第 2 号线匝与第 17 号线匝间差 15 匝的电压差,两饼共有 14 个相差 15 匝的电压差。当每饼匝数为 n (图中 $n = 16$ 为双数),加在两饼上的电压为 U 、匝间几何电容为 C (饼间电容量小,忽略不计),则线匝 1 与 17 两匝间电压为 $U/2$,储藏的静电量为 $C(U/2)^2/2$,两饼内储藏的能量共有 n 个,所以这一部分的静电能量为 $\frac{n}{2}C\left(\frac{U}{2}\right)^2 = \frac{nCU^2}{8}$;而线匝 2 与 17 的匝电压为 $\frac{U/2}{n}(n-1) = \frac{n-1}{n} \cdot \frac{U}{2}$,储藏的静电能量共有 $n-2$ 个,所以这一部分的静电能量为 $\frac{CU^2}{8n^2}(n^3 - 4n^2 + 5n - 2)$ 。总的静电能量为两部分能量之和,即为 $\frac{CU^2}{8n^2}(2n^3 - 4n^2 + 5n - 2)$ 。如两饼的等值电容用 k_1 表示时,则总

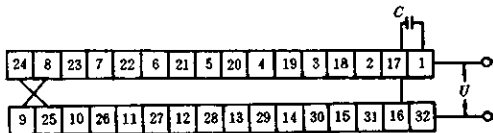


图 24—1 纠结线饼的电容值

静电能量为 $\frac{1}{2} k_1 U^2$, 可得

$$k_1 = \frac{C}{4} (2n - 4 + \frac{5}{n} - \frac{1}{n^2})$$

当 n 较大时, 等值电容可写成:

$$k_1 = \frac{C}{4} (2n - 4) = \frac{C}{2} (n - 2)$$

而每饼为 n 匝的连续式绕组, 两饼的等值电容为:

$$k_2 = \frac{C}{2n}$$

这样, 纠结式绕组等值电容 k_1 比连续式绕组等值电容 k_2 大了 $n(n - 2)$ 倍, 所以大大地改善了冲击电压的分布。

当 n 为单数时, 计算方法与上述相同, 这就是高压变压器要采用纠结式绕组的原因。

内屏蔽绕组就是在连续式绕组中插入了电容线而形成的, 电容线同样起增大匝间电容的作用。由于电容线紧贴着线匝导线, 电容比较大, 所以可以使冲击电流通过导线与电容线间的电容流到电容线上, 又通过电容线流到另一饼的紧贴着它的线匝上去, 起到了增大匝间电容的作用。由此可知, 电容线可以直接埋在线匝间而不与导线连接。因此电容线内无负载电流, 但有涡流损耗。

电容线在工频(50Hz、60Hz)作用下, 由于工频频率很低, 电容线又不与线匝连接, 所以此时电容线不起作用。电容线与线匝间不允许垫垫条, 因为垫条减小了电容线与线匝间的电容, 起不到增大匝间电容的作用。

25. 选择绕组导线时要注意什么? 导线有哪几种? 电流密度应取多少?

(1) 选择导线的注意点

导线规格选择得不好直接影响绕组的性能, 甚至绕不成合格的绕组, 所以应根据性能要求、绕制工艺来选择导线。选择导线要注意下列各点:

a. 导线厚度要适当。太薄的扁导线不易焊接, 太厚的扁导线

会增加涡流损耗(对同心式绕组而言),且绕组直径很小时,如果导线厚度太大会使纸包线的纸开裂。

b.导线宽度要适当。宽度太大不易绕制,尤其在交错式绕组中,宽度大了,涡流损耗大,一般可按表 25—1 选用。

表 25—1 交错式绕组导线的宽度

一个磁势平衡组内饼数	2	3	4	5	6
导线宽度/mm	8~10	6.9~8	5.9~6.4	5.1~6.4	4.4~5.5

c.导线宽度与厚度要有一定比例。圆筒式绕组导线宽与厚之比为 3;螺旋式为 2~4;连续式与纠结式为 2.5~4;换位导线每根为 2~4;整根换位导线总的宽和厚之比要小于 3。总之,比值太大,换位时要变形;比值太小,绕制时要扭转,易于倒塌。

d.圆导线最大直径为 $\phi 2.44\text{mm}$;纸包线最小直径为 $\phi 1\text{mm}$ 。为了提高空间利用系数,节约原材料,所以圆导线最大直径不能超过 $\phi 2.44\text{mm}$;纸包圆导线直径太小时纸包不紧,所以它的直径又不能小于 $\phi 1\text{mm}$ 。

e.导线截面要满足散热、温升、损耗和动热稳定的要求。一根扁导线的截面最大为 60mm^2 ,最小为 5mm^2 ,大于 5.3×12.5 的导线不宜采用。换位导线的每根导线截面不能太大,厚度为 1.56~2.63mm,宽度为 4.4~10.8mm 为宜。

f.电压互感器中一次绕组线径较细,为增加机械强度,第一层用加粗线径的导线绕制。

g.绕组绕制的并联导线根数不宜太多,必要时可采用组合导线。高压圆筒式绕组并绕扁导线根数不能超过 4 根;低压圆筒式不能超过 6 根;连续式不宜超过 4 根;纠结式不宜超过 4 根(特殊情况可为 6 根);换位导线并联根数应为单数,最多 41 根。

h.换位导线或组合导线每盘导线长度要与绕组实际所需的长度相等。线盘直径最好与绕组直径接近。

(2) 导线采用的电磁线种类

变压器绕组采用的电磁线有:漆包线、丝包电磁线和纸包电磁线三种,如表 25—2 所示。

表 25—2 导线的种类型号和名称

种类	型号	名称	工作条件/℃
漆包线 (油浸式用 QQ型,干式 用QZ型)	QQ-1	薄绝缘高强度聚乙烯醇缩醛漆包线	125
	QQ-2	厚绝缘高强度聚乙烯醇缩醛漆包线	125
	QZ-1	薄绝缘高强度聚酯漆包线	130
	QZ-2	厚绝缘高强度聚酯漆包线	130
玻璃丝包 线	QQSBC	单玻璃丝包高强度缩醛漆包圆线	125
	QZSBC	单玻璃丝包高强度聚酯漆包圆线	135
	SBEC	双玻璃丝包圆线	150
	SBECB	双玻璃丝包扁线	150
纸包电磁 线	Z	纸包圆铜线	105
	ZL	纸包圆铝线	105
	ZB	纸包扁铜线	105
	ZLB	纸包扁铝线	105

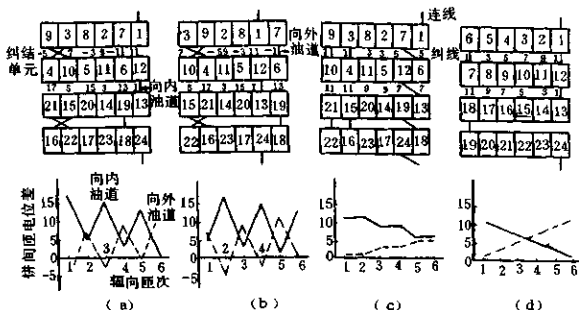
(3) 绕组的电流密度

绕组的电流密度与变压器的负载损耗、温升和二次短路时的动热稳定等有关,通常铝导线的电流密度取 $1.6 \sim 2.1 \text{ A/mm}^2$,铜导线取 $3.0 \sim 3.5 \text{ A/mm}^2$ 。

26. 双饼纠结式绕组线匝连接结构有哪几种?

连续式绕组每饼的线匝是依次连续绕制的,如图 26—1(d)所示。为了增加纵向(匝间)电容,减小对地电容,改善起始冲击电压分布,纠结式绕组饼间线匝是来回交叉绕制的,常用的是以双饼为纠结单元的绕组。双饼纠结式绕组承受冲击电压的薄弱之处,是在饼间最内线匝沿撑条的爬电距离。由于不是油隙距离,绝缘强度是最低的,因此其线匝连接结构就很重要了。

一个每饼匝数为偶数的传统纠结式绕组,如图 26—1(a)所示。它是把外径的第一匝作为连线引出。饼间向外和向内油道的所有对应匝间的电位差标在油道的相应部位上,从左至右:向外油道分别为 -5、7、-3、9、-1、11 的匝电压;向内油道分别为 17、5、



(a)传统纠结式 (b)现行纠结式 (c)不换位纠结式 (d)连续式

图 26—1 纠结式和连续式绕组饼间线匝连接图

15、3、13、1 的匝电压。其向内油道的最内饼间电位差高达 $3n - 1$ 个匝电压。在该图中 $n = 6$ ，因而 $3n - 1 = 3 \times 6 - 1 = 17$ 个匝电压。因此，这种纠结式绕组的连接结构是不合理的。它比同样匝数的连续式绕组在该处的电位差 ($2n - 1 = 11$ 个匝电压) 还要高 (如图 26—1(d) 所示)。因此，这种以外径第一匝作为连线引出的结构只能用于每饼匝数为奇数的情况 (为 $n - 1$ 个匝电压)。

目前均采用图 26—1(b) 所示的绕组，把外径第二匝作为连线引出，其结果使最内饼间电位差降至 $n - 1 = 6 - 1 = 5$ 个匝电压，但换位工艺要难些。

所以，也可采用图 26—1(c) 所示的绕法，连线与纠线之间不换位，仍把外径的第 1 匝作为连线引出，最内饼间电位差和连续式一样为 11 个匝电压。与上种连接结构相比，虽然电位差高些，匝间电位差低些，但饼间电位差不会跳跃变化，且工艺操作没有麻烦。

多根并绕的插花纠结式绕组也有类似的情况。

这里要注意的是，纠线与换位线不能有爬坡现象。

27. 变压器各种绕组的绕制有什么特点?

(1) 圆筒式绕组的绕制特点

多层圆筒式绕组绕制时象纺纱一样,在一层中线匝是依次排列绕制的,一层绕完后依次升层,再一层一层绕完为止。扁导线绕制的双层圆筒式绕组,一般是多根导线并联绕制的,它有两次换位,一次在下层的一半匝数处,另一次在上层的一半匝数处,绕法与多层圆筒式类似。

(2) 螺旋式绕组的绕制特点

多根并联绕制的双层圆筒式(包括连续式)的换位是标准换位,由线盘来的导线束是先顺(逆)时针逐次换位,后逆(顺)时针逐次换位,导线束绞扭不超过 180° ,并绕导线束只要有顺序地排列就可以了。

但是,单螺旋式绕组一共有三次换位,在 $\frac{1}{4}$ (或大于 $\frac{1}{4}$)、 $\frac{3}{4}$ (或小于 $\frac{3}{4}$)、总匝数处分别有一次分组换位,中间 $\frac{1}{2}$ 总匝数处有一次标准换位,左绕向的如图 27—1 所示。第一次分组换位时,上组导线先转换到下面,下组导线后转换到上面,两组导线顺时针绞扭 180° ;到标准换位时,导线又逐根地顺时针绞扭 180° ;到第二次分组换位,两组导线又顺时针绞扭 180° 。这三次同方向换位,总的说来,导线束将绞扭 540° 。虽然其中由于有两次分组换位,不是逐根绞扭,绞扭程度稍差些,但必须在绕制前把导线分组,且与第一次分组换位转换方向相反地预先反绞扭 180° ,如图 27—2(a)所示。

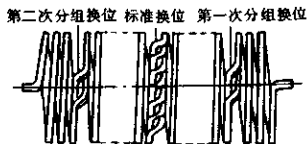
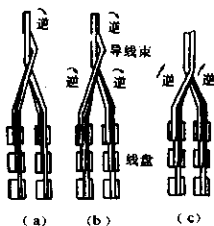


图 27—1 左绕向单螺旋式绕组的换位图



(a)单螺旋式的排列 (b)单螺旋式通常采用的排列 (c)双螺旋式通常采用的排列

图 27—2 左绕向单、双螺旋式绕组绕制前导线束排列顺序
(右绕向的反之)

图中左、右列各自顺序排列，而左列由右列的右侧起放在右列下，两组导线预反绞扭 180° 后，可以较为方便地绕制。

通常，不仅仅只是预先分组反绞扭 180° ，而且还逐根预先反绞扭 180° ，使开始绕制时绞扭大些，但到标准换位后一点儿也不绞扭了，这对方便地进行标准换位大有好处，如图 27—2(b) 所示。图中左、右两列各自预反绞扭 180° ，且左列也由右列的右侧起放在右列下。这是通常采用的预反绞的形式。

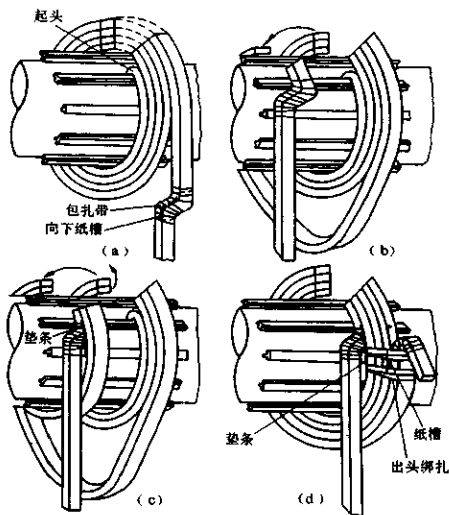
双螺旋式绕组是两列导线并绕的，其换位为交叉换位。其右列导线在绕组外侧面一根一根地换至左列，而左列导线在绕组内侧面一根一根地换至右列，直到左、右两列互换完为止。整个绕组不仅使两列导线间绞扭 180° ，而且每列导线各自逐根绞扭 180° 。同样，为了方便绕制，左、右两列导线各自预反绞扭 180° ，而把左列导线由右列导线上面起放在右列旁预先反绞扭 180° ，如图 27—2(c) 所示。

(3) 连续式绕组的绕制特点

连续式绕组是一段一段(一饼一饼)地绕制的，由里匝向外匝绕制自然是很方便的，由外匝向里匝绕制显然是不能直接进行的。因此它有一种特定的绕制方法。通常把由里向外绕的线段称做“正段”(正饼)，而把由外向里绕的线段称做“反段”(反饼)。连续

式绕组“反段”绕制的方法就是它的绕制特点。

连续式绕组一根导线的绕制和多根导线的绕制类似，而绕组起末头从外径上引出，第一段及以后的单数段均为反段，而所有的双数段均为正段。图 27—3 以一根导线绕制的连续式绕组为例介绍一下第一个反段的绕制过程。第一个反段会绕之后，再绕正段，然后又绕反段，依次下去，整个绕组就会绕制了。



(a)绕临时线段 (b)推倒临时线段 (c)翻叠线段 (d)成正式反段

图 27—3 连续式绕组的“反段”绕制过程

所谓反段的绕制，就是先绕成一个临时线段，然后翻倒，再将线匝进行翻叠，最后成为一个正式的反段的过程。

a. 绕临时线段。如图 27—3(a)所示，将导线的起头固定在绕

线模上,开动绕线机绕成一个临时线段,到规定的匝数(图中为4匝)。然后留出出头长度,进行换位。在换位处包绝缘纸板槽和直纹布带。

b.翻倒临时线段。把绕好的临时线段翻倒且散开,把换位放在两撑条之间固定住位置,如图27—3(b)所示。

c.翻叠线匝。用手将第4、3匝在绕线模上张紧,并在换位处与上匝之间放置一纸板垫条,以加强该处绝缘。垫条长度大于一个撑条间隔,宽度小于导线宽,如图27—3(c)所示。

d.成正式反段。继续翻叠第2匝、第1匝,最后成一正式反段。把线段收紧后,进行绑扎,出头也包好规定绝缘,如图27—3(d)所示。

这样,第一个反段就绕成了。其余反段与第一个反段基本相同,需用过渡的斜形垫,特别是并绕导线多时,斜形垫是一定要采用的。

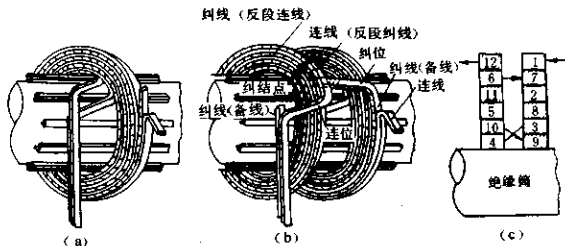
(4) 纠结式绕组的绕制特点

这里以单根绕制、线段(线饼)为偶数段的两个线段为一纠结单元的双段纠结绕组为例,说明一下纠结式绕组的绕制特点。

纠结式绕组是连续式绕组段间线匝纠缠而成。线匝不以自然数列顺序排列,而是在数字相邻的两个线匝中插入一个数字不相邻的线匝,见图27—4(c)的截面放大图。在双段纠结中,实际上它是连续式绕组两段间线匝相互交换,然后串接而成。因此它有一种特定的绕制方法,可以称做备线串接法。

如图27—4(a)所示,除了正常绕制相邻数字线匝的导线(连线、非影线)外,还另外备上一根绕制不相邻数字线匝的导线(纠线、有影线的)。这样,并绕的导线比绕组实际并联的导线增加了一倍。图27—4(a)是换完标准底位、绕完反段的情况。

然后,此两种导线同时并绕成正段,如图27—4(b)所示,正段的连线就是反段的纠线。它换位(连位)后可再备上纠线,进行下一个纠结单元反段的绕制。正段的纠线就是反段的连线,此纠线在绕完后剪断,和反段经换位(纠位)的纠线进行焊接(纠结)。此



(a)反段绕制 (b)正段绕完后,一个绞结单元的情况

(c)一个绞结单元的截面放大图

图 27—4 单根导线、偶数匝线段、双段绞结单元的绕制

时,绞位应在连位的前面,而绞结点应在正段上。

这样,两段线匝交叉、两根不同的导线串接成一个电气通路:反段连线→绕到正段为绞线→经绞位反串接到反段绞线→绕到正段为连线→经连位进行下一个绞结单元的绕制。

由此可知,绞结时必然是两根不同导线始末端串接,方能形成电气通路,而没有短路的线匝,一定要防止绞线形成短路匝。绞结绕组就是这样由一个个绞结单元绕成的。

如果绞结单元中两段为奇数匝,则绕制时有一点不同,绕反段时连线先单独绕一匝,然后备线放在其上齐绕;绕正段时,绞线剪断后,正段连线再单独绕一匝;其他情况和绕制偶数匝时一样。







28. 变压器绕组的排列方式有哪几种?

变压器绕组的排列方式是指其每相中各次绕组的放置位置。绕组的排列方式主要考虑阻抗电压、出线方便和绝缘结构合理等因素。排列方式有同心式和交错式两种。同心式排列的双绕组变压器,一般是低压绕组放在里面,因为它与铁心所需的绝缘距离比较小;高压绕组套在外面,因分接头一般是设置在高压绕组上,出线方便。交错式排列的高、低压绕组是沿高度方向互相交错放置,机械强度好,出线的布置和焊接都较方便,常用于电炉变压器上。

绕组的排列方式见表 28—1。也可采用多个磁势平衡组的排列。

有独立调压绕组的有载调压变压器,如绕组为同心式排列,调压绕组可放在最里面,也可以放在最外面。这两种布置的最大、最小分接时阻抗电压变化是不同的。

表 28—1 常用的绕组排列方式和适用范围

排列方式 与示意图	适用范围	排列方式 与示意图	适用范围
同心式 	用于双绕组变压器;特种变压器当低压绕组电流较大时,为便于出线,低压绕组也可放在外面	双同心式 	用于特大型双绕组变压器,可以减轻重量,便于运输,但此时负载损耗与空载损耗的比值将增大,电工钢片与导线的重量比将减小
同心式 	用于三绕组升压变压器或自耦变压器。当从低压向高压和中压侧送电时,阻抗电压较小	多同心式 	
同心式 	用于三绕组降压变压器或自耦变压器。当电能主要从高压透向中压时阻抗电压较合理	交错式 	用于电炉变压器。图中仅表示了两个磁势平衡组的情况

29. 什么是主磁通? 什么是漏磁通?

当变压器中一个绕组与电源相联后,就会在铁心中产生磁通,在铁心中由于励磁电压产生的磁通叫主磁通,主磁通大小决定于励磁电压的大小。额定电压励磁时产生的主磁通不应使铁心饱和,即此时的磁通密度不应饱和。主磁通是相量,一般用峰值表示。

当变压器中流过负载电流时,就会在绕组周围产生磁通,在绕组中由负载电流产生的磁通叫漏磁通,漏磁通大小取决于负载电流。漏磁通不宜在铁磁材质中通过。漏磁通也是相量,也用峰值表示。

主磁通与漏磁通都是封闭回路,都是相量,但不在同一相位上。主磁通在闭合磁路的铁心中成封闭回路,但在饱和后会溢出铁心成回路,漏磁通在开磁路结构件包括通过部分心柱或磁屏蔽成回路,主磁通与漏磁通在心柱内为相量相加或相减,主磁通在铁心内产生空载损耗,漏磁通在绕组内与结构件内产生附加负载损耗。主磁通与漏磁通在数量上有下列关系:

$$\Phi_s = \frac{u_k\%}{100} \times \Phi_0$$

式中 $u_k\%$ 为变压器阻抗电压百分数, Φ_0 为主磁通, Φ_s 为漏磁通。

30. 绕组的漏磁通是怎样分布的? 产生什么样的电磁力?

(1) 同心式排列时

双同心式排列时漏磁通一般比同心式排列要小,多同心式排列则更为小些,现以双绕组单同心式排列为例,说明漏磁通是怎样分布的。

双绕组中电流方向是相反的,如果低压绕组电流方向向外(用 \odot 表示),高压绕组电流方向向里(用 \otimes 表示),根据右手定则,它们的漏磁通(图中用虚线表示)在两绕组间必然向上,如图30—1所示。

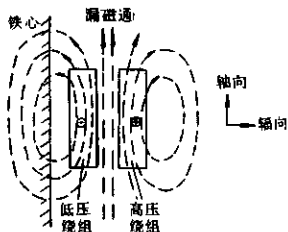


图30—1 双绕组同心式排列的漏磁场

为方便起见,漏磁通可以分为两个分量:轴向(纵向)漏磁通和辐向(横向)漏磁通。

轴向漏磁通是垂直向上的;辐向漏磁通是由于绕组上端漏磁通向外发散,而下端向绕组内侧收拢所产生的水平分量。由左手定则可知:轴向漏磁通产生辐向电磁力,辐向漏磁通产生轴向电磁力,如图30—2所示。

轴向漏磁通使外侧高压绕组产生向外的辐向张力,即高压绕组的直径要增大,圆周方向受拉伸应力,绕组导线必须承受住这个力;反之,轴向漏磁通使内侧低压绕组产生向内的辐向压力,即低压绕组的圆周方向被压缩,设计与制造时要防止该绕组失稳而变形。

辐向漏磁通使高低压绕组均产生向内的轴向压力。该力作为绕组的压缩力,两端导线承受的作用力为最大,对垫块的压缩力是导线上作用力的合力,因此在绕组中部最大。由这些力在导线和垫块中产生的应力,必须限制在允许范围内。用油浸层压纸板制作的垫块的允许压缩应力在 39.2MPa 以下。

另外,由于绕组的高度不同、匝数的不平衡和分接线段切除等所产生的轴向压力和张力类似于交错式排列时的轴向力。

(2) 交错式排列时

绕组为交错式排列时的漏磁通与上述同心式排列不一样,它所产生的漏磁通主要是辐向漏磁通,如图 30—3(a) 所示,而所产生的则主要是轴向力,如图 30—3(b) 所示。

由于高、低压绕组辐向尺寸很接近,匝数分布基本上是匀称的,因此,不但可以忽略轴向漏磁通,而且在正常运行时辐向漏磁通也不大,其所产生的轴向力也不大。图中所示的为两个磁势平衡组的情况。这里所谓的“磁势平衡组”是指磁势大小相等而方向相反的一对或一部分绕组。

31. 变压器短路时短路电流有什么危害?

变压器在运行时二次侧如发生短路,其短路电流是很大的,一

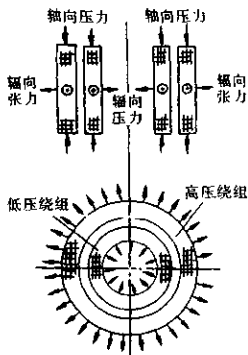


图 30—2 漏磁通产生的辐向力和轴向力

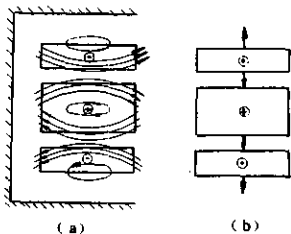


图 30—3 两个磁势平衡组交错式排列绕组的漏磁场和电磁力

一般为额定电流的十几倍到二十几倍。变压器相当于一个阻抗，变压器短路阻抗越小而容量越大时，短路电流倍数越大。由于断路器接受信号与跳闸需要一定的时间，变压器难免要受到短路电流的冲击。

短路电流的最大值与短路瞬间电压的相位角有关。当短路瞬间电压相位角为 $\pi/2$ 时，电流不突变，不突变就不会发生过渡过程，只流过稳态短路电流。当短路瞬间电压相位角为零时，发生最严重的过渡过程，产生直流分量的短路电流。直流分量电流与稳态短路电流叠加，短路电流增大，在半周内瞬时短路电流达到最大值 i_{im} ，如图 31—1 所示。

这个很大的短路电流将对变压器产生较大机械力并使温度升高，对变压器的动热稳定性产生影响。

(1) 电磁力对动稳定性的破坏

在额定电流下，电磁力虽然与电流平方成正比，但还是不太大的。短路时短路电流增加一二十倍后，则电磁力可增加到几百甚至上千倍。根据以上对电磁力的分析，它对绕组的动稳定性将起一定影响。

外绕组承受辐向张力，在短路时有可能使绕组线匝崩断；内绕组受辐向压力，在支撑撑条的支点间导线将产生变形。如果绕组

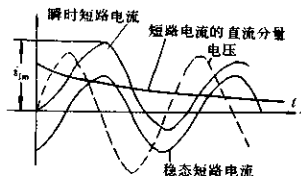


图 31—1 短路瞬间电压为零时短路电流增加的波形

轴向不紧密、导线截面过小、出头固定不牢靠、垫块不密实，在短路电磁力作用下，都可能使绕组变形、松散。压紧装置强度不够时，还可能使绕组轴向紧固破坏。

(2) 发热对热稳定性的破坏

变压器在短路过程中，强大的短路电流使绕组损耗增加。由于绕组电阻损耗与电流平方成正比，所以电阻损耗会增加几百倍，同时温度上升很快，短路时间又很短，热量可以认为没有发散，全用来使绕组升温，如断路器不跳闸，变压器有可能烧毁。

按国家标准，油浸式 A 级绝缘变压器绕组短路时最大允许的平均温度：铜绕组为 250℃，铝绕组为 200℃。按近似计算公式，绕组达到该温度的时间分别为

$$t_{250} = 1.78(u_1\% / j)^2, s$$

$$t_{200} = 0.56(u_1\% / j)^2, s$$

式中 $u_1\%$ ——阻抗电压百分数；

j ——绕组额定电流密度。

例如一台中小型铝绕组变压器， $u_1\% = 4\%$ ，电流密度为 2A/mm²，则

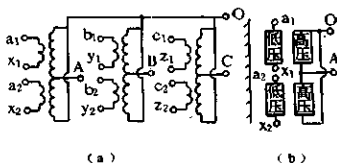
$$t_{200} = 0.56 \times (4/2)^2 = 2.24s$$

大型变压器所需的时间会长些，而断路器跳闸的时间远小于此值，

所以一般情况下短路电流的热稳定是可以满足的。现在低损耗变压器电流密度更小,所以变压器很少有热稳定性问题。

32. 什么是分裂式绕组? 对它有什么要求?

把变压器的低压绕组分裂为两部分,在电气上互不连接。两部分低压绕组分别接在两台发电机上,每台发电机可以单独运行,也可同时运行,一台发电机发生故障退出运行,另一台发电机仍能正常工作。满足上述要求的低压绕组,就称双分裂绕组。每一分裂绕组的容量为变压器容量的一半,绕组的轴向分裂排列方式如图 32—1 所示,也可用辐向分裂排列方式(即低—高一低排列)。



(a) 原理接线图 (b) 每柱绕组排列图

图 32—1 三相双绕组低压轴向双分裂变压器

如低压绕组分裂为三部分,在电气上互不联系,每部分可分别接一台发电机,这样的变压器绕组称三分裂绕组。每一分裂绕组的容量为变压器容量的三分之一。

对分裂绕组有下列几点要求:

a. 升压变压器分裂绕组各支路之间要有足够大的总阻抗。这样,一台发电机有故障时,不致使另一台发电机退出运行。因阻抗大,可限制短路电流分流到另一台发电机中去。

b. 分裂绕组的各个支路与其他不分裂绕组之间的总阻抗要彼此平衡。

c. 三相轴向分裂变压器中,每柱高压绕组必须上下并联,单相变压器可采用两柱高压绕组并联。这样,可使分裂绕组的每一支

路在一个或两个支路断开时仍能运行。运行着的支路要用避雷器保护。

d. 具有同样额定电压的分裂绕组的各个支路也要能并联运行。

e. 分裂绕组各部分与其他绕组之间的绝缘结构应有足够的电气强度。这是因为,当高压绕组上有冲击电压作用后,两个分裂绕组相邻端子间有较大的感应电压。

f. 分裂阻抗电压:单相双分裂绕组的分裂阻抗电压为普通不分裂双绕组阻抗电压的4倍;三相轴向双分裂的分裂阻抗电压为普通双绕组不分裂时阻抗电压的3.5倍左右。分裂式变压器的阻抗电压可按绕组为不分裂时的阻抗电压算法进行计算,得出的阻抗电压值乘以上述的倍数,即为分裂阻抗电压。

g. 分裂变压器要有足够的承受短路电流产生的机械力的能力。

33. 什么是绕组中的主绝缘和纵绝缘? 绕组为什么要真空干燥和浸漆?

(1) 绕组的绝缘

绕组的纸筒、电木筒,绕组端绝缘和静电环与地之间的绝缘为绕组的主绝缘。

导线外包绝缘、圆筒式绕组层绝缘、静电环与线段之间绝缘、线段(层)之间的绝缘等为绕组的纵绝缘。

用圆导线绕制圆筒式绕组时必须用硬质绝缘筒,否则绕制工艺不易解决。但是电木筒的电气强度较差,因此电压在60kV及以上,容量在8000kVA及以上的变压器绕组是绕在撑条上,在器身装配时先围好纸筒,然后将绕组套在纸筒外。特大容量变压器的绕组是绕在厚纸板筒上。

绕组末端绝缘水平比首端低时采用分级绝缘。在分级绝缘中,电压高时首端到铁轭的距离比末端大。饼式绕组的末端线饼内层不用垫绝缘,不加强绝缘,也不放静电环和角环。高压试验变

压器绕组采用分级绝缘,还有利于散热,减小电容。

分级绝缘可以减小绕组的尺寸,简化结构,方便制造,并节约材料。但分级绝缘的变压器一般只允许在 $U_m \geq 126\text{kV}$ 中性点有效接地的系统中使用。

(2)干燥与浸漆

绕组进行干燥处理能使绝缘件中的水分抽出去。这样不仅能提高绝缘件的耐压水平,而且还能使绝缘件收缩到固有的尺寸,从而使绕组的轴向高度和压紧力得到一个真实的、比较合理的数据。

绕组在干燥中应注意:

a. 不要求真空干燥的绕组,允许随同要求真空干燥的绕组进行真空干燥处理;

b. 有电木筒和无电木筒的绕组如装入同一罐内处理时,应按有电木筒绕组处理;

c. 绕组出炉后到浸漆中间不得超过 12h,如超过 12 ~ 16h,需要在 100 ~ 115℃ 下常压干燥 14h,如停放时间更长则需要重新处理。

变压器绕组浸漆常用无溶剂绝缘漆。 $U_m \leq 40.5\text{kV}$ 的绕组要浸漆。

多层圆筒式绕组的层绝缘层数较多,含水量、含气量都比较高。为了排除这些水和气,使漆能浸进去,所以要进行真空压力浸漆。

绕组浸漆的目的是增加绕组的机械强度;但不浸漆可以增加电气强度,有利于绕组的散热,所以高压变压器($U_m \geq 72.5\text{kV}$)绕组不浸漆。

浸漆后的烘焙应在 70 ~ 80℃ 下预热 3h,再升温至 105 ~ 115℃ 维持 14h,圆筒式绕组需维持 18h。

应该注意于式变压器的浸漆特点:船用和湿热带用于式变压器绕组,浸 3 次绝缘漆,最后再喷或浸一次灰漆;一般干式变压器

绕组浸两次绝缘漆。

(四) 绝缘与干燥

34. 什么是变压器的绝缘水平？绝缘水平是怎样分级的？

绝缘水平是变压器能够承受住运行中各种过电压与长期最高工作电压作用的水平，是与保护用避雷器配合的耐受电压的水平。它包括对地与相间两种绝缘水平，取决于设备的最高电压 U_m 。

绕组的所有出线端都具有相同的对地耐受电压时，这种绝缘结构称为全绝缘；绕组的中性点的绝缘水平低于出线端绝缘水平的绕组绝缘结构称为分级绝缘。绕组的绝缘水平见表 34—1 和表 34—2。

表 34—1 电压等级为 3~500kV 变压器绕组出线端的对地绝缘水平

电压等级 /kV	设备最高电压 U_m /kV, 有效值	额定短时工频耐受电压 AC /kV, 有效值	额定雷电冲击耐受电压 U /kV, 峰值		额定操作冲击耐受电压 SI(相到中性点) /kV, 峰值
			全波	截波	
3	3.5	18	40	45	
6	6.9	25	60	65	
10	11.5	35	75	85	
15	17.5	45	105	115	
20	23	55	125	140	
35	40.5	85	200	220	
63	69	140	325	360	
110	126	200	480	530	
220	252	360	850	935	
		390	950	1 050	
330	363	460	1 050	1 175	850
		510	1 175	1 300	950
500	550	630	1 425	1 550	1 050
		680	1 550	1 675	1 175

操作冲击电压试验只在 $U_m \geq 252\text{kV}$ 级进行。为了验证变压器长期运行的可靠性,对 $U_m \geq 72.5\text{kV}$ 的变压器,可引入长时间与短时间感应耐压,并测局部放电量的试验项目。

中性点绝缘水平可见表 34—2。

表 34—2 分级绝缘绕组中性点的绝缘水平

电压等级 /kV	设备最高 电压 U_m /kV,有效值	额定短时工频 耐受电压 AC /kV,有效值	雷电全波和截波冲击 耐受电压 LI /kV,峰值
110	126	95	250
220	252	200	400
330	363	230	550
500*	550	140	325

注: * 经小电抗接地。

35. 变压器绝缘是怎样分类的? 有哪几部分绝缘?

油浸式变压器的绝缘主要分为内绝缘和外绝缘两大类,如下所示:

油浸式 变压器 的绝缘	内绝缘	主绝缘——绕组(或引线)对地之间的绝缘
		纵绝缘——同一绕组各点之间或其相应引线之间的绝缘
	外绝缘	套管本身的外绝缘
		(箱外) 套管间及套管对地间的绝缘

变压器内绝缘结构如图 35—1 所示。

a. 主绝缘。变压器的主绝缘是绕组对铁心、对地和对其他绕组的绝缘,也就是变压器内各有关部件间的绝缘。其中主要是空间距离(油隙),当电压等级高时,油隙中还要放置绝缘件。

内绕组对铁心的绝缘,在低电压时采用酚醛纸筒(电木筒),在高电压时采用软纸筒或硬纸筒,在干式变压器中采用环氧玻璃布筒。

高、低压绕组间在高电压时有一层到几层的软纸筒,形成较小油隙,以增强油的绝缘强度。

电压在 126kV 及以上时,高压绕组端部配置角环作为纵绝缘,

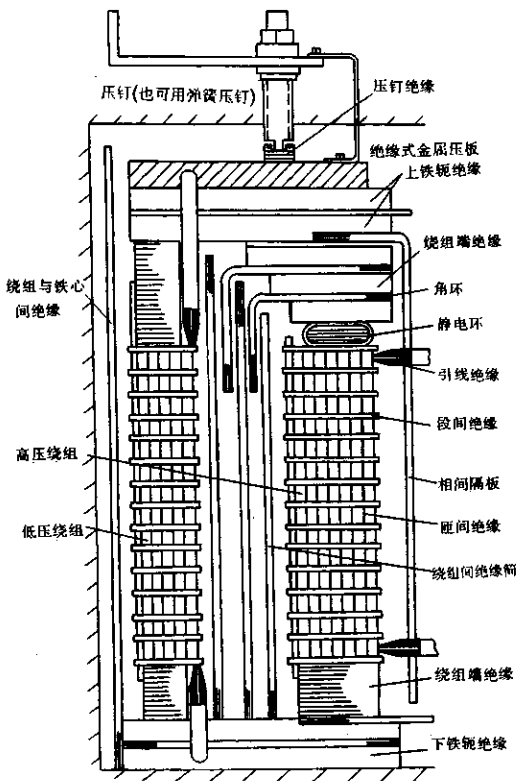


图 35—1 分级绝缘变压器的内绝缘结构

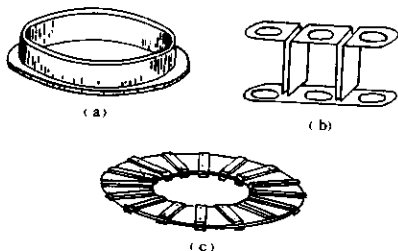
也作为绕组间的主绝缘。

相间绝缘一般是油隙,但高电压时还放置相间隔板或绕组外侧加软纸筒围屏。

绕组和铁轭之间的绝缘为铁轭绝缘。它由垫圈和垫块组成。

铁轭绝缘和铁轭夹件支板之间还有平衡绝缘。小容量变压器则用木垫块或纸垫块代替铁轭绝缘和平衡绝缘。

引线绝缘也可属于主绝缘,它由皱纹纸、电缆纸和白布带等包扎而形成的。特高电压时采用成型绝缘件。常见的变压器主绝缘的绝缘件如图 35—2 所示。



(a)角环(或用分瓣成型角环) (b)相间隔板 (c)铁轭绝缘

图 35—2 常见的变压器主绝缘的绝缘件

b. 纵绝缘。变压器纵绝缘包括匝间绝缘(导线的纸包绝缘、丝包绝缘和漆绝缘)、层间绝缘(层式绕组中的层间电缆纸,或油道等)、饼间绝缘(纸板、垫块和油道等)以及引线彼此之间的绝缘。

36. 变压器各部分绝缘有什么作用? 生产中为什么要注意绝缘件的清洁并防止其变形?

(1) 各部分绝缘的作用

a. 薄纸筒小油隙的作用。变压器油有一特点:当油隙尺寸为 3mm 时,油隙绝缘强度为 141kV/mm;为 6mm 时,则为 101kV/mm。油隙尺寸越大,每毫米绝缘强度越低。因此,在一个油隙中加一张

纸板就能提高油的绝缘强度,油隙分得越小,油绝缘强度越高。这就是用小油隙的理由。

在油与纸的绝缘结构中, δ mm厚的纸板的绝缘强度只相当于0.5 δ mm油隙的绝缘强度。也就是说,在相同的距离下,纸板越厚,绝缘强度就越低。这就是用薄纸筒的理由。

但是,油隙的最小值应由散热条件来确定,一般不小于7mm;而纸筒的厚度最小值应由机械强度来确定,一般最小为3mm,即1.5mm纸板围两层。应当注意,靠近内绕组的油隙应保持7~8mm,靠近外绕组的油隙应保持8~9mm。绕组间主绝缘纸筒之间油隙也可由瓦楞纸板形成。绕组匝绝缘越厚,该油隙绝缘强度越高;绕组油道大引起电场畸变,则绝缘强度低。采用薄纸筒小油隙结构时绕组间距离小了,但也降低了端部电场强度,应加角环或引伸纸筒,且在端部线段内外侧垫纸条。

主绝缘采用薄纸筒小油隙的结构能使绝缘尺寸缩小,节约材料。在相间加隔板,绕组外加围屏,套管外加电木筒也是这个原因,目的都是提高油的绝缘强度。

b.角环的作用。角环也是油屏障的一种,起增加绕组端部到铁轭和绕组端部间的爬电距离的作用。

c.成型绝缘件的作用。成型绝缘件是用湿纸浆直接成型的,因此具有极高的电气性能,可以做成和各种不同电力线相平行的形状,形成极好的油屏障,减少垂直电场的作用。

可以根据需要做成产品要求的厚度,并能实现产品的特殊要求,如实现机械支承和密封,还能实现薄纸筒小油隙的结构。

d.酚醛胶纸筒(电木筒)的作用。油浸式变压器采用酚醛纸筒作绝缘,主要是因为它有较高的机械强度,便于套装。但是这种纸筒的耐压值为:

厚度/mm	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
耐压值/kV	24	28	32	36	40

可见其电气强度较差。这是因为纸筒层间的固化物树脂与纸是不

同的物质,在交界面电场畸变,且有气泡和杂质存在。胶纸的底纸不易被油浸渍,纸纤维的空隙不易被油填满,空气和水分消除不易彻底,且容易吸潮。所以一般只在低电压绕组内采用。

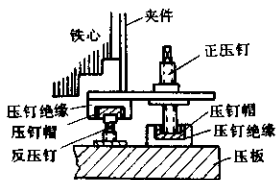


图 36—1 压板上压钉的结构

e. 压钉绝缘的作用。

铁心柱上不能有短路匝,绕组中不能有短路匝,结构件也不能形成短路匝。钢压板(压环)上开一缺口就是这个道理,绝缘压板无缺口。

但是,正压钉都拧在夹件上,反压钉都拧在压板上。如果正压钉下面或反压钉上面不放压钉绝缘,很容易使钢压板短路,即在压板断口处,压板通过正压钉—夹件—正压钉,或反压钉—夹件—反压钉,使钢压板形成短路匝,如图 36—1 所示。

(2) 绝缘件的清洁、变形和开胶

变压器器身进行真空干燥前一定要把灰尘吸掉。在绝缘件上不要用铅笔写字,因为铅笔芯一般是导体;也不要粉用粉笔作标记,因为粉笔是硫酸钙,溶于油中易成油垢;要用蓝铅笔做标记,因为它是非导体,不影响电气强度。

绝缘件的清洁与否对电气强度影响很大。若绝缘件上有粉尘,经过油的冲洗就随油游动起来。因为粉尘中有许多金属粒子,它在电场的作用下,排列成串,形成带电体之间的通路(搭桥),从而破坏了绝缘强度,造成放电。电压越高,粉尘游离越严重,越容易放电。

绝缘件变形的种类有收缩变形和翘曲变形。变形的原因有:

- ①材料本身含水量大;
- ②含水量不均匀,或水分挥发速度不一,收缩快慢不等;
- ③局部受热或局部受潮;
- ④存放的方式和地点不当,如应平放的而采用了立放。

层压绝缘件开胶的原因有：①涂胶量小或胶的浓度不够，使树脂没有足够的粘结力；②温度低或时间短，树脂不能彻底进行固化反应；③压力不足或在粘结过程中压力减少，树脂只是自身固化成膜，而使被粘合面间不能真正粘结；④炉内升温太快，出炉的温度高或冷却太快，内部包含很大热量，失掉压力后和空气急剧接触形成内应力而把粘结层拉开。

37. 绝缘结构尺寸受什么影响？主要绝缘距离有哪些？

(1) 内绝缘尺寸

变压器内绝缘的绝缘强度在很大程度上与其工艺处理有关，即与固体绝缘被油浸透的程度、绝缘干燥的程度、绝缘结构中存留空气多少以及变压器油的净化脱气程度等有关。因此，所有的绝缘尺寸均与一定的工艺处理有关，图 37—1 和表 37—1、表 37—2 只是参考尺寸（油浸式）。如处理工艺或散热要求变动，则这些尺寸可作适当调整。

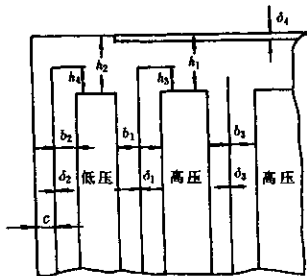


图 37—1 35kV 及以下变压器主绝缘结构尺寸

绝缘结构的尺寸，特别是主绝缘尺寸将直接影响变压器的重量和外形尺寸，以及阻抗电压、损耗等性能数据。绝缘尺寸的依据是国家标准规定的工频试验电压和冲击电压作用下绕组内电压的分布。选取的绝缘结构和数据要具有一定的裕度，以保证变压器

表 37—1 35kV 及以下油浸式变压器低压绕组
对铁心主绝缘参考尺寸

低压绕组电压等级 /kV	绕组 形式	尺寸/mm				高压绕组电压等级 /kV
		b_2	δ_2	h_2	h_4	
0.4	圆筒式	1.0	1.0	15	—	≤10
0.4		1.0	1.0	25	—	15
0.4		1.0	1.0	55	—	35
3.6		9	3.0	25	15	≤10
3.6		9	3.0	30	18	15
3.6、10		10	3.0	55	33	35
15		14	3.0	55	33	35
0.4、3.6	螺旋式 连续式	9.5	3.5	35	20	≤15
0.4、3.6、10		10	3.5	55	33	35
15		14	3.5	55	33	35

注：套装间隙 c 由结构和工艺决定。

表 37—2 35kV 及以下油浸式变压器高压绕组
最小主绝缘参考尺寸

电压等级/kV		≤10		15		35		≤15		35			
绕组形式		圆筒式						连续式					
绕组联结组		Y		D		Y		D		Y或D		Y或D	
尺寸 /mm	b_1	9		13		27		16		27			
	δ_1	2.5		3		4		3.5		4			
	h_1	20		30		70(65)		35		65			
	h_3	8		18		48(43)		20		50			
	δ_4	2		2		2		0		3			
	b_3	8	12	12	15	20	27	17		27			
	δ_3	0	2	0	2	0	3	3		3			

注：括弧中数值是导线为纸包线时数值。

的安全运行，但绝缘裕度过大会使变压器的技术经济指标降低。

绝缘尺寸除了要保证足够的绝缘强度以外,还要考虑最小机械距离与散热的要求。

引线主要绝缘距离如表 37—3 所示。

表 37—3 引线及外部最小绝缘距离/mm

电压等级 /kV	引线主要绝缘距离			空气中最小 绝缘距离
	引线每边绝缘	引线对绕组 纯油距离	绕组对箱壁 纯油距离	
3,6	0	12	10	80
10	0	23	15	125
15	0	30	20	150
35	0,3,6	60,35,25	55	340
110	3,6,10	125,100,80	135	830

注: * 海拔 1 000m 以上时,每升高 1 000m,绝缘距离约增大 15%。

内绝缘中的纵绝缘尺寸则视绕组的结构而定。

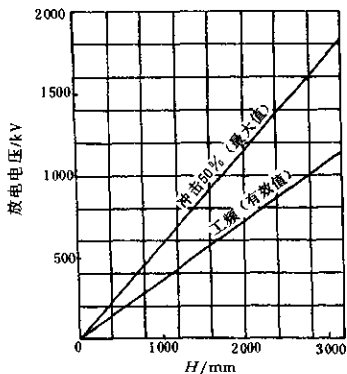


图 37—2 电容式套管外绝缘的工频、冲击 50% 放电电压曲线举例

(2) 外绝缘尺寸

外绝缘尺寸主要是套管的尺寸。套管带电部分之间及其对地之间的空气绝缘距离可参见表 37—3。表中数据为最小外绝缘距离,通常由于瓷套制造与安装时产生偏差,选用时应考虑将表中数据适当放大。其最小绝缘距离见表 37—3,由工频试验电压或由冲击试验电压决定。不同绕组的套管带电部分之间的距离应按两个电压等级中较高的一个选取。两个套管瓷伞之间的距离应不小于表中绝缘距离的 1/3。

另外,220kV 套管绝缘距离是怎样确定的?

由上述可知,电压等级为 35 ~ 110kV 的套管绝缘距离是由工频试验电压或冲击试验电压确定的,220kV 级也是如此。电容式套管外绝缘的工频、冲击 50% 放电电压曲线如图 37—2 所示(假设的)。如果产品的外绝缘工频试验电压为 395kV,全波冲击试验电压为 900kV,则应将试验电压提高 10% 以有裕度,则 $1.1 \times 520 = 572\text{kV}$ 和 $1.1 \times 950 = 1\,045\text{kV}$ 。由图中曲线可知,冲击放电电压高,故以 1 045kV 查曲线。得套管高 $H = 1\,800\text{mm}$,符合国标规定。当然,真正的套管高还要加上瓷套两端夹持部分。

38. 什么是绝缘材料? 共分几级? 变压器为什么常采用油纸绝缘结构? 什么是绝缘材料的电击穿和热击穿?

电阻系数很大,可达 $10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}$,而流过的电流小到可以忽略不计的材料是绝缘材料。

绝缘材料按耐热等级分为七级,即

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
耐热温度/°C	90	105	120	130	155	180	180 以上

变压器中常用的绝缘材料:绝缘纸板和变压器油为 A 级;环氧玻璃布板为 B 级。绝缘材料规格与品种可从材料手册选用。

变压器对绝缘材料的要求主要有:①良好的电气性能,电阻系数要大,耐电压值要高,介电常数越接近油的介电常数越好;②足够的机械强度,在一定力的作用下不发生变形和破坏;③足够的耐

热性能,极小的介质损耗,较高的导热系数;④小的收缩率。

油浸式变压器主要是采用油纸绝缘结构。这是因为油纸绝缘有非常好的电气性能,在短时间的电压作用下,其耐电强度可达50~120kV/mm。另外,材料来源丰富,且制造工艺简单。

绝缘材料的电击穿是这样产生的:当电压作用在绝缘体上,便产生了大量的自由电子。由于自由电子的加速运动产生了大量的动能,动能达到一定值时,便首先产生了局部放电,如动能再加大则造成了绝缘体的破坏。这种现象便称做绝缘材料的电击穿。影响电击穿的因素有:①电场强度的高低,越高越容易造成电击穿;②电压作用的时间,越长越容易产生电击穿;③电压作用的次数,次数多了,电击穿容易发生。

绝缘材料的热击穿是这样产生的:由于绝缘材料温度的增加,介质损耗不断增大,产生了材料的泄漏电流,使材料的温度更为增高。当绝缘材料增加的热量大于散发的热量时则使材料老化,从而造成了材料的烧坏或烧焦。这种现象便称做绝缘材料的热击穿。影响热击穿的因素有:材料周围的温度过高,散热条件不好,绝缘体过厚,材料导热性不好,作用的电压频率高等等。

39. 变压器油有什么作用? 不同牌号的变压器油能混合使用吗? 它有哪些主要指标?

(1) 变压器油的作用

变压器油具有一定的绝缘强度,在油浸式变压器中主要当作绝缘介质使用。其主要指标也是围绕其绝缘性能而制定的。

变压器油的比热也较大,所以它也可当作冷却介质使用。

在有载调压变压器中,有载调压开关内的油有吸收电弧的能力,所以它也能当作熄弧介质使用。

变压器油在运行中变质时会威胁变压器的正常运行,因此要在变压器油箱下部装一油样活门,以便从油样活门中定期放油检验变压器的油质。为保护变压器油,在变压器上加储油柜以吸收因温度变化而引起的油体积变化。变压器储油柜内还有防止油老化用的胶囊,使油不与空气接触。在某些油箱上还装净油器,内装

硅胶或活性氧化铝以吸收运行中油的水分。密封式变压器已趋于不装净油器。

(2)不同牌号变压器油的使用

变压器油有 DB-25 和 DB-45 两种牌号。前者凝固点为 -25°C , 也称 25 号变压器油; 后者凝固点为 -45°C , 也称 45 号变压器油, 可以用于寒冷地区。

变压器油是从石油中提炼出来的, 产地不同的变压器油一般因油基不同而不能混合使用。各地变压器油的油基和工艺过程都不一定相同。变压器油的化学成分为饱和碳氢化合物, 其油基有石蜡基、芳香基、环烷基、混合基等几种。不同油基的油有不同的老化速度, 因此不能混用。混用后的油, 老化速度要加快。同一油基不同油号的油可以混合使用, 凝固点介于原来两种油号之间, 粘度要增高, 而闪点要降低, 酸值要增高, 而耐压强度在用一阶段后要降低。不同工艺过程的油混用后会出现绝缘电阻和吸收比的反常现象。

(3)变压器油的主要指标

a. 粘度。粘度是说明变压器油的流动性的指标。温度越低, 粘度越低, 流动性越大, 变压器的冷却效果越好。当油老化时, 粘度要增加, 冷却效果就差。新油要求在 20°C 时运动粘度不大于 $30 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 恩氏粘度不大于 4.2°E 。

b. 闪点。变压器油在加热到某一温度时, 其蒸气与空气形成的混合物能着火, 这一温度称为闪点。闪点越高, 表明油蒸气挥发越少, 油使用起来越安全, 因此要求闪点不低于 135°C 。如果检验运行中的油, 发现闪点比初始值降低到超过 5°C , 说明油质劣化。油由于匝间短路、局部高温引起劣化时, 会使闪点急剧降低。

c. 酸、碱含量。变压器油中残留的矿物酸和碱, 油氧化而形成的酸, 都可溶于水。这些溶于水的酸和碱会促使油迅速老化, 腐蚀金属和绝缘材料, 降低电气强度, 所以变压器油中不应含有溶于水的酸和碱。

d. 酸价。中和 1g 油中所含自由酸性化合物所必需的氢氧化

钾的 mg 数称为酸价。酸价增大,虽然其他特性尚未改变,但说明油已处于氧化的初始阶段。酸价的大小,可以判断油的老化程度。变压器油的酸价应小于 0.014mgKOH/g 。

e. 机械混合物。变压器油中浮游物、纤维质等称机械混合物。这些混合物可能造成导电的路径影响绝缘强度;也可能覆盖绝缘和堵塞油道而影响散热,所以必须用滤油机等加以净化。

f. 水分。油从空气中吸收潮气,使油中有了水分。水分易和别的元素化合成低分子酸,使耐压水平降低。

g. 油的颜色。变压器油通常是透明亮黄色。运动后的油由于炭质等的影响,会使油色变暗,甚至呈棕色。

h. 电气绝缘强度。油的电气绝缘强度以击穿油层所需的电压计量。用于 35kV 及以上的变压器,油在标准电极间试验时的电气强度在 40kV 以上;用于 $6\sim 35\text{kV}$ 变压器,油的电气强度在 30kV 以上;用于 6kV 以下的变压器,油的电气强度在 25kV 以上。

此外,变压器油与裸导线直接接触,会促使油加速老化。因为铜或铝是加速变压器油老化的触媒剂,所以变压器中的裸引线需涂一层绝缘清漆,以避免金属和油直接接触。

40. 器身绝缘为什么要真空干燥处理?

因为器身中有大量的绝缘纸板,绝缘纸板在空气中容易吸潮,如将潮气带入变压器油中,就会影响变压器油的绝缘强度,因此器身一定要经过干燥处理。

那么,为什么在干燥时还要抽真空呢?这是因为干燥时抽真空可加速干燥的过程。水在标准气压下是 100°C 变成气,所以不抽真空,一定要加热到 100°C 才能达到干燥的目的。如将压力降低到 0.5 气压, 80°C 时就变成气; 0.4 气压时, 75°C 时就变成气; 0.3 气压时, 68°C 时就变成气; 0.2 气压时, 60°C 时就变成气; 0.1 气压时, 45°C 时就变成气; 0.006 气压时, 0°C 就能变成气。因此,器身放在真空罐内真空干燥,当真空罐温度还没有达到很高温度时,水已开始蒸发成气而被抽走了,缩短了干燥时间。

绝缘内含水量(用百分数表示)严重地影响着介质绝缘强度

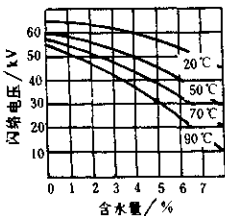


图 40—1 5mm 浸油层压纸板闪络电压与含水量的关系

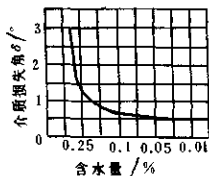


图 40—2 1.6mm 绝缘纸板
介质损失角与含水量
的关系

(闪络电压)、介质损耗和油中的含水量,从而影响绝缘结构尺寸和运行的寿命。

绝缘纸板的含水量与击穿电压的关系如图 40—1 所示。可见,只要含水量为 1% 左右,在不同温度下闪络电压就很高,其变化也小。

绝缘纸板的含水量与介质损失角的关系如图 40—2 所示。可见,当含水量小于 1% 时,介质损失角不但很小,而且趋于平稳。

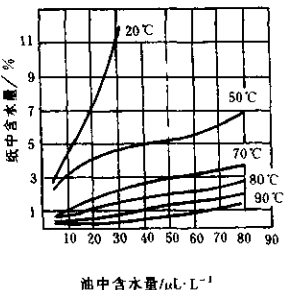


图 40—3 油与纸含水量的平衡曲线

绝缘纸板的含水量与油的含水量(用百万分之一表示)会自动平衡,不同温度有不同的平衡点,它们之间的关系见图 40—3,纸的含水量为 1% 时,油的含水量约为 $15\mu\text{L}/\text{L}$ (80°C)。这可以认为是变压器绝缘中含水量的标准值。当纸的含水量为 2% 时,如果油的含水量大于 $30\mu\text{L}/\text{L}$,承受电压会降低。可以按变压器电压等级,控制绝缘纸中的含水量。

由此可知,为了取得绝缘纸的较低含水量,只有从提高干燥温度和真空度着手,这就是要采用真空干燥的原因。

41. 变压器干燥有哪些方法?

变压器干燥的目的是除去变压器绝缘材料中的水分,增加其绝缘电阻,提高其承受电压。在真空罐中的干燥方法有如下几种。

(1) 加热真空干燥法

加热真空干燥法是靠真空罐周围的蒸气或电加热器,利用空气的对流和辐射来加热变压器的器身,利用传导而使器身内部温度上升。当开始抽真空时,由于水分的蒸发,绝缘内部的温度大幅度下降,仅靠辐射来补充热量不能维持较高的温度。这样,抽真空初期绝缘内部温度可能下降到 50°C ,以后也很难达到 $110\sim 120^{\circ}\text{C}$,因而干燥时间很长,现在已较少采用。

(2) 热风真空干燥法

热风真空干燥法是目前常用的方法,是将 $105\sim 130^{\circ}\text{C}$ 的干燥热空气送入真空罐,用来加热器身,使器身内部均匀受热,并提高温度,以达到蒸发水分的目的。

对于大容量变压器,加热和抽真空需反复交替进行。如先用热风加热 40h ,抽真空 $10\sim 15\text{h}$;再加热 $10\sim 20\text{h}$,抽真空 $10\sim 15\text{h}$,如此反复进行。所反复的次数决定于电压等级,电压等级越高,反复次数越多。这是由于超高压变压器绝缘件多,引线包扎厚,因此油道间隙更小的缘故。

当内部温度升高到一定程度时,水分大量蒸发,油隙中的湿度较大,继续通热风难以进入器身内部,绝缘体温度就会显著下降,热风循环加热效果很小。在此情况下抽真空,降低气压,绝缘件和油隙间的水分得到了较快的蒸发,就可使绝缘体中的水汽浓度下降;达到一定程度时,再次进行热风加热,就可保持变压器内部的温度下降不会太大,且下降后又较快得到恢复,因而得到较好的干燥效果。

真空管路系统联结示意图如图41-1所示。由于真空罐的真空度要求较高($10\sim 133\text{Pa}$),真空管路中应选配二级真空泵。这

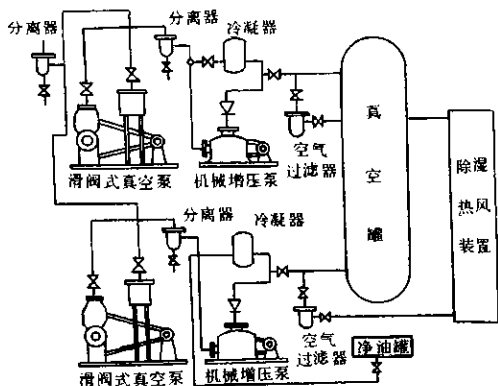


图 41-1 热风真空干燥时真空管路系统联结示意图

样既可达到真空度要求,又可缩短抽真空时间。一般前级泵宜选取 H-9 滑阀式真空泵,后级泵宜选取 ZJ-1200 机械增压泵。为保证整个真空管路系统的密封性,选配各种规格的高真空阀门(GI、GIQ 型)。在抽真空时,为防止潮湿气体进入真空泵凝结成水,特配制冷凝器,泵前泵后配制水油分离器。

为保证送入罐中的热空气为干净空气,泵前配备空气过滤器。

(3) 气相真空干燥法

这种干燥法是采用汽化点高于水的汽化点的有机溶剂作介质,一般是用某种型号的煤油。煤油蒸气通入真空罐内,当与变压器器身接触时,凝结成液体,释放出大量的汽化热来加热器身。气相真空干燥法已在国内得到广泛应用。

当然还有其他一些方法,但原理与以上三种类似。

长期抽真空,如发现真空度仍低,这主要是抽气系统不良造成的。泵油过多或过少、泵油氢化或太脏、机械泵内零件磨损等都是使真空度提不高的原因。另外,真空系统和罐内密封不严也能产生这种现象。

在现场如没有真空罐,则可利用变压器油箱进行真空干燥。如果油箱的强度不够,就不能采用真空干燥法,通常 60kV 及以上电压等级的变压器,其油箱强度可以承受住真空下的机械强度。现场干燥的加热方法有如下几种。

(1) 油箱涡流加热法

油箱涡流加热法是在油箱外表面加石棉等绝热保温层,再绕上导线通以交流电而加热的方法。由于交流电的感应作用,使箱壁产生涡流而发热,从而可使箱内空间的温度升高到 90~110℃,达到干燥的温度。通常电流为 150A 左右,导线截面为 40mm² 左右,电压为 400V 或 220V,缠绕的匝数不宜过多,所组成的磁化绕组应具备有调整的匝数。

(2) 零序电流加热法

该方法是把变压器自身一侧的三相绕组依次串联或并联起来,通入电压为 220V 或 400V 的单相交流电,而其余绕组开路的加热方法,如图 41—2(a)所示。这样,三相铁心的磁通是同向的零序磁通,在三柱心式铁心中(只适用于这种铁心)无回路而经油箱闭

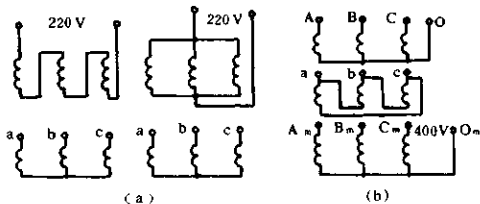


图 41—2 零序电流加热法(a)和零序短路干燥法(b)

合。油箱因涡流发热使保温的箱内空间温度升高,而铁心中也因涡流而发热,通电的绕组也产生热量,均起加热作用。

(3) 零序短路干燥法

三相绕组变压器可以采用零序短路干燥法。如 Yyd 联结的变压器,可在中压加零序电压 400V,其零序电流约为 30% I_0 ,其接线图如图 41—2(b)所示。这种方法使热量集中在器身上,温升较快,油箱发热量小,不需保温,所需功率也小。

(4) 直流辅助干燥法

这种方法是為了弥补现场涡流干燥法速度慢、绕组内外温差大、干燥效果差的缺点。该方法主要是算出等值电阻 R ,电流 I 取变压器额定相电流的 $1/3 \sim 1/4$,则所加直流电压 $U = IR$ 。

采用以上这些方法时油箱底部温度有时较低,箱底常需辅助加热。

除此之外,小型变压器可以在烘房(100℃)内不抽真空进行干燥。

(5) 带电热油循环法

以上这些方法是在变压器停止运行时进行的,既影响供电,又需外来热源,很不经济。为补救此缺点,可采用带电热油循环法。

热油循环的流程如图 41—3 所示。油从变压器下部经滤油机过滤后,由脱气罐顶部进罐中,经静置、脱气、抽真空后从罐底部放出,然后由加压泵打入变压器中。

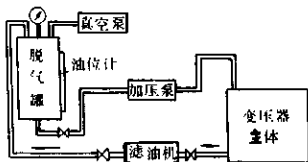


图 41—3 带电热油循环干燥的流程示意图

脱气罐使油扩容静置,气泡溢出,再佐以抽

真空,使油中氧分下降,防止油质劣化。罐内装有两袋硅胶,以便吸附水分。罐内有并联装置的电阻丝,可作为辅助调温,但温度的调整主要是利用散热器或冷却器投运的台数来得到的。油温要低

于极限温度(A级绝缘不超过 105°C)。开始温度不宜过高,以防绝缘电阻降得太低而出现意外。当绝缘电阻上升稳定后干燥就结束了,此时介质损失角正切值和吸收比也应在允许范围内。

(6) 涡流加热、热风真空干燥法

为了提高干燥速度、提高器身温度和油箱内真空度,大型变压器可以采用涡流加热、热风真空干燥,如图41—4所示。

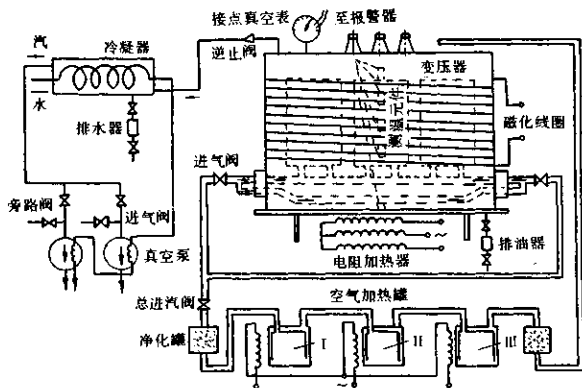


图41—4 变压器涡流加热、热风连续真空干燥示意图

用油箱干燥时,油箱的机械强度会限制真空度的提高,因此在抽真空过程中,必须随时检测油箱变形情况,要求油箱局部最大凹陷尺寸不得超过箱壁厚度的2倍。

油柱保护是按照变压器油箱的真空度的要求换算成油柱的高度进行保护。电接点真空保护可采用带电接点真空表进行保护,当真空度达到允许的极限值时,能发出报警信号,比较可靠。

在干燥变压器过程中,绕组绝缘电阻是先下降后上升的。如在 $90\sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内,绝缘电阻12h保持不变,吸收比或极化指数 >1.3 ;在规定的最高真空度下,绕组温度稳定在额定值下无凝结

水、油的工频耐压不低于 40kV,则可判定变压器干燥完毕。

42. 变压器套管有什么作用? 它有哪些种?

套管的用途是将变压器绕组的出线端引出油箱外部,以便与线路相连接。套管都用瓷套支撑,瓷套外表面做成一圈一圈的伞裙,以增大外绝缘沿面爬电距离。35kV 低电压套管内部不另加绝缘或加一些附加绝缘; $U_n \geq 72.5\text{kV}$ 的套管常采用油纸电容芯子作内绝缘,目前已很少采用胶纸电容芯子。因此,套管可分为复合瓷绝缘式、单体瓷绝缘式、有附加绝缘式、注油式和电容式几种。

各种变压器套管常采用的型号字母排列顺序如下表:

顺序	字母符号和代表的意义
1	B—“变”压器用
2	F—“复”合瓷绝缘式, D—“单”体瓷绝缘式, J—有附“加”绝缘的, R—电“容”式
3	Y—注“油”式, L—穿“缆”式, D—“短”尾, 长尾不表示
4	L—可装电“流”互感器的
5	W—耐污型, 普通型不表示, W 后数字表示爬电比距
6/7	数字/数字—额定电压(kV)/额定电流(A)

例: BRDLW-220/600 表示变压器用 220kV 600A 可装电流互感器的油纸电容耐污式短尾套管。

(1) 复合瓷绝缘式套管

复合瓷绝缘式套管(BF型)额定电压为 1kV 及以下,额定电流为 300~3 000A。套管由上瓷套和下瓷套组成绝缘部分。上瓷套作为径向绝缘和空气侧轴向绝缘,下瓷套作为油侧或空气侧轴向绝缘。导电杆穿过瓷套的中心,并利用导杆下端焊接的定位件和上端的螺母将上下瓷套串压在变压器安装孔周围的箱盖上,如图 42-1(a)所示。

这种套管上部接线头形式有杆式和板式两种;下部接线头形式有一件软接线片、两件软接线片和板式三种。

(2) 单体瓷绝缘式套管

单体瓷绝缘式套管分导杆式(BD型)和穿缆式(BDL型)两种,

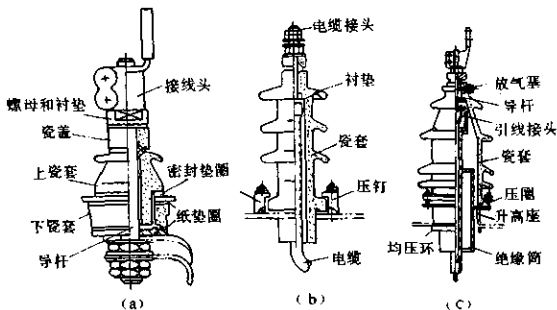


图 42—1 复合瓷绝缘式套管(a)、单体瓷绝缘穿缆式套管(b)以及注油式套管(c)

常用于 20kV 及以下的电压等级中,穿缆式的结构如图 42—1(b)所示。

单体瓷绝缘只有一个瓷套,瓷套中部有固定台以便用压钉卡装在变压器箱盖上。穿缆式瓷套的上部有一固定槽,而导杆式瓷套的下部有一固定槽,以便卡入电缆接头的凸台和导电杆下端定位件,使其不致转动。

(3) 有附加绝缘的套管

有附加绝缘的套管就是单体瓷绝缘式套管上增加了绝缘而形成的。由于单体瓷绝缘套管的径向电场不均匀,瓷套的介电系数大,而空气或变压器油介电系数小,电位主要分布在空气或变压器油上。为了改善电位的分布,需要在导电杆外面套有绝缘管或在电缆上包以 3~4mm 厚的绝缘纸以加强绝缘,以用于 35kV 和 40kV 的电压等级中。在 40kV 套管下部一个瓷伞至安装固定台之间的瓷套外表面涂以半导体漆(含有锌粉或铝粉),改善接地处的电场。

(4) 注油式套管

附加绝缘套管是由变压器油和绝缘筒形成内绝缘。

注油式套管曾用于 60kV 电压等级的小容量变压器及高压试验变压器中,常用连通型结构如图 42—1(c)所示。连通型的结构没有下部瓷套,套管内的油是从变压器油箱内注入,套管下部比较短。

(5) 电容式套管

110kV 及以上电压等级的套管如使用注油式套管,外形尺寸太大,因此需采用由电容分压原理制成的固体绝缘作主绝缘,即用电容芯子。根据电容芯子的材质和制造方法,电容式套管分为胶纸式和油纸式两种。

a. 胶纸电容式套管。胶纸电容式套管的结构如图 42—2(a)所示,其电容芯子由单面胶纸和铝箔加温加压交错卷制成型,经加热硬化后,外表面进行机械加工并浸防潮漆。铝箔在胶纸层间每隔 1~2mm 放一层,形成许多同心圆柱体电容屏,使径向和轴向的电位分布趋向均匀。电容芯子最里屏为零屏,它与导管相连成同电位;最外屏为地屏,经接地小套管安装法兰一起接地。接地套管可供测量套管 $\tan\delta$ 的端子。

胶纸电容式套管的机械压紧方式一般是在中部将锥形环卡入电容芯子的槽内,然后用法兰将锥形环压紧,而头部用卡紧螺杆夹紧,即分段卡装的方式。

b. 油纸电容式套管。油纸电容式套管的径向尺寸比胶纸电容式还小,这是因为油中发生电晕的电压高,因而电容屏间的绝缘厚度可以减薄。但是,油纸电容式套管要求有非常好的密封性能,且其下部必须有瓷套,所以套管下部较长。油纸电容芯子由电缆纸和铝箔加压力交错卷制成型,表面经过机械加工,然后进行真空干燥和真空浸油。

油纸电容式套管完全用串压方式,即在头部用强力弹簧通过导管借底座串压成一个整体。为使套管上下部的油贯通无阻,安装法兰的内壁与电容芯子之间需有一定间隙,所以机械强度不如胶纸电容式好,安装角度不能太大。

油纸电容式套管的局部放电量小,因此要控制局部放电量的

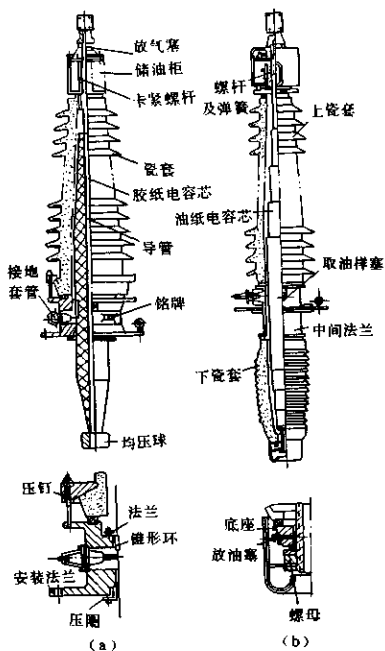


图 42—2 分段卡装式胶纸电容式套管(a)及串装式油纸电容式套管(b)
 变压器常选用油纸电容式套管。

(五) 结线与联结组

43. 什么是变压器绕组的电压相位关系？

变压器的高压、中压和低压绕组之间的电压相位关系，是了解绕组的结线和联结组首先遇到的问题。实际上，它就是两个绕组

电压相量之间夹角的大小,该夹角的名词术语称相位移。

电压的相位关系有两类:一类是一相中不同侧绕组的电压相位关系;另一类是同侧各相间的电压相位关系。所谓同侧绕组是指同是高压绕组,还是同是低压绕组;或者说同是一次绕组,还是同是二次绕组。

(1) 一相中不同侧绕组的电压相位关系

从变压器的基本原理可以知道,同一个相中,高、低压(一二次)侧间的电压相位关系是一致的。就是说不同侧绕组电压同向,感应电势也同向;电压相反,感应电势也相反,因此只要讨论电压相位关系就可以了。而实际上测量的只是电压,所以只有电压相位关系才是有意义的。

为了便于记忆,可以把一相中不同侧绕组的电压相位关系的四种情况,应用乘法的符号法则得出,也就是:

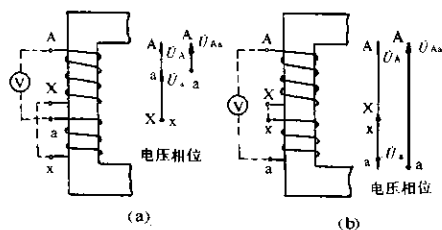
绕组绕向	端子标记	电压方向
+(相同)	+(相同)	+(相同)
-(相反)	+(相同)	-(相反)
+(相同)	-(相反)	-(相反)
-(相反)	-(相反)	+(相同)

这种相位关系可以用试验来证明:如图 43-1(a)所示,把同绕向、同端子标记的高、低压绕组的末端 X、x 连在一起,测量 A、a 之间的电压,可以发现电压表的读数是两个绕组的电压差 $U_{Aa} = U_A - U_a$ 。这表明该种情况下电压相量必然是同向的。如果把端子标记改成相反,如图 43-1(b)所示,则 $U_{Aa} = U_A + U_a$,电压相量必然是相反的。

电压相量方向相同时,相位移 0° (夹角为 0°),通常还称为同极性的或减极性的(测量电压为差值);电压相量方向相反时,相位移为 180° (夹角为 180°),通常还称为反极性的或加极性的(测量电压为和值)。

(2) 同侧各相间的电压相位关系

电力系统常用三相电路,这是由于电源(如发电机)通常是三



(a)同向的,即减极性 (b)相反的,即加极性

图 43—1 一相中不同侧绕组的电压相位关系

相的缘故。电源三相电压之间的相位移是 120° , 变压器三相电压也相差 120° 。三相电压相量的末端交于一点, 如图 43—2(a) 所示; 三相电压相量的首末端相连, 如图 43—2(b) 所示。

A、B、C 三相电压相量的排列是有顺序的, 交变的电压可以用按逆时针旋转的相量来表示, 并假定相量旋转到垂直向上的位置时达最大值。电压相量旋转到垂直向上位置的顺序, 依次是 A、B、C 的称为正相序, 电力系统中均采用正相序。

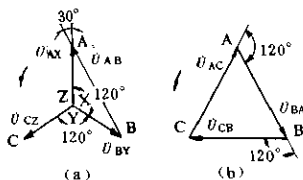


图 43—2 三相电压两种相量图

一相中绕组的出线端对末端电位之差称相电压, 如 U_{AX} 、 U_{BY} 、 U_{CZ} , 相电压的相位移为 120° ; 二相线端之间电位差称线电压, 如 U_{AC} 、 U_{BA} 、 U_{CB} , 线电压相位移也为 120° 。在相、线电压不是同一个时(如图 43—2(a) 所示), 线电压 (U_{AB}) 和相电压 (U_{AX}) 的相位移则为 30° 。

总之, 一相中不同侧绕组的电压相位关系有两种: 相位移为 0°

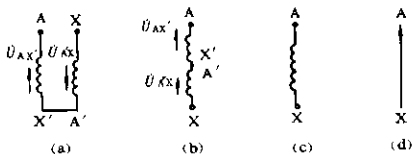
和 180° ; 同侧各相间的电压相位关系有三种: 相电压相位移 120° , 线电压相位移 120° , 线、相电压可有相位移 30° 。

44. 变压器绕组有多少种结线方式? 常用的结线有什么特征?

(1) 绕组结线的种类

变压器绕组的结线方式是指同一电压等级的三个相绕组相间的结线。变压器的结线可按相电压相量画出的绕组展示图图形表示。

单相变压器绕组实际上无结线方式, 它相当于三相变压器中的一相, 只是把两个或多个分绕组结成一个相绕组而已。单相变压器相电压只有一个, 按相电压画出的绕组展示图也只有一种“1”形, 故称“1”形结线, 如图 44—1 所示(图中以高压绕组为例, 中、低压绕组结线方式只是字母标记相应地改变一下)。



(a) 并联的绕组联结图 (b) 串联的绕组联结图

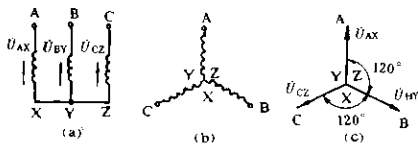
(c) 展示图 (d) 相电压相量图

图 44—1 单相变压器绕组 1 形结线

三相变压器有三个相绕组, 三个相电压, 有两种基本结线方式(Y 形和 D 形), 三种常用结线(还加上 Z 形)。

a. Y 形结线。将三相绕组末端结在一起形成中性点, 展示图为“Y”形, 称星形结线, 用符号 Y 表示, 如图 44—2 所示。在 Y 形结线中, 中性点引出时, 则为 YN 结线, 如图 44—5(a) 所示。

Y 形结线对高压绕组而言最经济, 且具有以下优点: 如有中点可以利用; 允许直接接地或通过阻抗接地; 允许降低中点的绝缘水平(即分级绝缘); 可在每相中点处设分接头, 分接开关也可位于

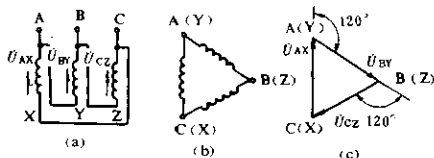


(a) 绕组联结图 (b) 展示图 (c) 相电压相量图

图 44—2 三相变压器绕组 Y 形接线

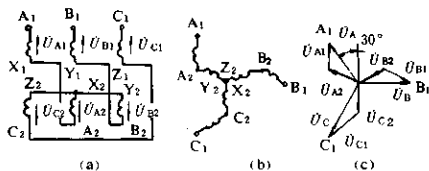
中点处；允许接单相负载，中点可载流等等。

b. D 形接线。将一相绕组的线端与另一相绕组的末端结在一起，展示图为“ Δ ”形，称三角形接线，用符号“D”表示，如图 44—3 所示。但是，三角形接线有两种情况：一种是线端 A 结 Y、B 结 Z、



(a) 绕组联结图 (b) 展示图 (c) 相电压相量图

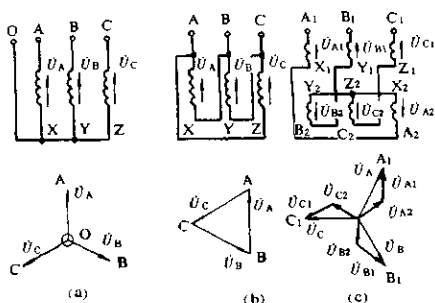
图 44—3 三相变压器绕组右行 D 形接线



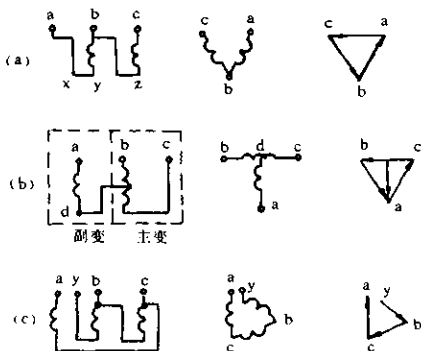
(a) 绕组联结图 (b) 展示图 (c) 相电压相量图

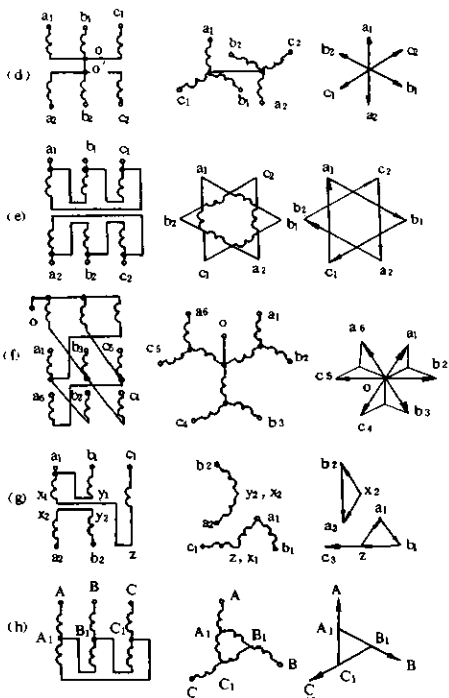
图 44—4 三相变压器绕组右行 Z 形接线

C 结 X, 在绕组联结图中, 由一个绕组的线端向另一个绕组的末端
 巡行时, 联结线的走线方向是自左向右, 称为右行 D 形结线; 另一
 种是 A 结 Z、B 结 X、C 结 Y, 称为左行 D 形结线, 如图 44—5(b) 所
 示。



(a) YN 形结线 (b) 左行 D 形结线 (c) 左行 Z 形结线
 图 44—5 三相变压器绕组常用结线的另一种形式





(a) v形接线 (b) t形接线 (c) 开口 d形接线 (d) y—倒 y
接线 (e) d—倒 d形接线 (f) 双重 z形接线 (g) 特殊 v形接
线 (h) 外延 d形接线

图 44—6 变压器绕组的特殊接线

D形接线具有对大电流低压绕组而言最经济,与Y结绕组配

合使用时可以降低零序阻抗值等优点。

c. Z形结线。三相变压器绕组中还有一种结线是 Z 形结线,它是把每相绕组分成两半,分别套在不同的铁心柱上,然后反串起来组成相绕组,再按星形结线形成特种的星形结线,展示图近于“Z”形,称曲折结线,用符号 Z 表示。同理,图 44—4 为右行 Z 形结线,而图 44—5(c)为左行 Z 形结线。

Z 形结线具有以下优点:允许中点载流的负载且有较低的零序阻抗;可用作接地变压器的结法形成人工中点;可降低系统中电压不平衡(系统中三相负载不平衡时);可作多雷地区使用配电变压器的一种结法等等。

变压器绕组的其他特种结线还有图 44—6 所示的几种。因他们多用于低压绕组,故用小写字母表示。

a. v 形结线。三相输电系统中用两台单相变压器时,或心式三相变压器中只用两相时,常用 v 形结线。

b. t 形结线。t 形结线是两台单相变压器中,副变与主变的中间抽头联结而形成三相供电的结线。如低压为单相独立供电时,也称斯考特结线。

c. 开口 d 形结线。d 形结线中任意一个顶点分开的结线。

d. y—倒 y 结线。是双反星形结线。它是把三相变压器的两部分低压绕组结成极性相反的两个 y 形结线,再把他们的中性点联结而成。

e. d—倒 d 结线。是双反三角形结线。它是把三相变压器的两部分低压绕组结成极性相反的两个 d 形结线。

f. 双重 z 形结线。双重 z 形结线又称叉形结线。把三相变压器低压侧绕组分成三部分,其中一部分与另外两部分分别按右行和左行曲折形联结起来,从而得到一个右行和一个左行的曲折形联结,所以称双重 z 形结线。

g. 特种 v 形结线。特种 v 形结线也称拉普拉斯结线。

h. 外延 d 形结线。外延 d 形结线是 d 形结线和 y 形结线组合而成的结线方式,故也分右行和左行两种。

(2)常用三种结线的特征

a. Y形结线的特征。绕组电流等于线电流,导线截面大,机械强度好;而绕组电压等于线电压的 $1/\sqrt{3}$,匝数和绝缘用量少,导线的填充系数大,且可以做成分级绝缘;由于导线填充系数大,匝间静电电容较高,冲击电压分布均匀;另外中性点可以引出接地,也可以用来实现四线制供电。这种结线的主要缺点是没有三次谐波电流的循环回路。

b. D形结线的特征。D形结线的特征正好与Y形结线的特征相反。

c. Z形结线的特征。Z形结线具有Y形结线的优点,匝数要比Y形结线多15.5%。因为Z形结线虽然没有三次谐波的循环回路,但是即使在铁心中有三次谐波磁通的情况下,由于两个半绕组的三次谐波电压大小相等、方向相反,其线端对中性点间的电压也没有三次谐波电压。

Z形结线的优点还在于:当冲击电流流过绕组时,同一柱上的两个半绕组的磁势大小相等、方向相反。因此Z形结线的绕组遭受冲击电压时,不会感应到另一侧绕组上去。同样也可以消除另一侧遭受冲击过电压时,变换到它本身的过电压。

但是,Z形结线由于两个半绕组的电压相量之间有 30° 的相位移,使相绕组的有效材料用量增加15.5%,从而使得铁窗加大,成本增加,所以只用在低压侧。

45. 什么是绕组的结线组合?常用的结线组合有什么特征?

变压器高、中和低压绕组的结线方式组合在一起就是结线组合。变压器的结线组合是非常重要的,它对变压器的性能、制造成本和运行特性都有很大的影响。常用的结线组合,对于双绕组三相变压器有 Y_y 、 Y_d 和 Y_z ;对于三绕组三相变压器有 Y_{yd} 、 Y_{yy} 、 Y_{ad} 和 Y_{ay} 等。他们的特征如下。

(1) Y_y 结线组合

这种结线组合除具有Y形结线的特征外,对于不同结构的铁心还具有不同的特征。

对于心式变压器时的特征：

a. 由于没有三次谐波电流，磁通中有三次谐波磁通，但不能在铁心中闭合，只能在三个铁心柱中沿同一方向流通，越出铁心经过油及箱体等再回到铁心。由于铁心外的磁阻较大，使三次谐波磁通较小，因此三次谐波电压也不大，通常不超过基波的5%。只是三次谐波磁通将在金属结构件中引起涡流损耗。

b. 可以用四线制给不平衡的负载供电，此时中性点的漂移也不大；两个中性点可以无条件接地。

c. 在额定运行状态下，每相的最大对地电压仅为线电压的 $1/\sqrt{3}$ ，中性点的电压实际上等于零，所以绕组绝缘所承受的电压强度较低。

因此，Yy 接线组合常用于三相心式小容量变压器中。对于三相心式大容量变压器，由于金属结构件中涡流损耗很大，不宜采用。

对于三相壳式变压器或三个单相变压器组的特征：

a. 三次谐波磁通完全在铁心中流通，因此三次谐波电压较大。当铁心最大磁密与心式结构的最佳值相同时，三次谐波电压可达基波的30%~60%，对绕组绝缘极为不利。

b. 在额定运行状态下，每相的最大对地电压也为线电压的 $1/\sqrt{3}$ 。但当铁心最大磁密与心式结构的最佳值相同时，中性点的电压实际上并不等于零。只有在铁心最大磁密不超过磁化曲线的拐点时，中性点的电压才等于零，也只有在这种情况下，才允许中性点接地。

c. 中性点接地，改变了每相线端的三次谐波电压，流过绕组电感的容性电流使三次谐波电压增大，能引起对通信的干扰。如果发电机与变压器一次侧的中性点不连在一起，三次谐波电压也将大到对通信产生干扰。

因此，三相壳式变压器和三个单相变压器组不能采用这种接线组合。

(2) Yd 和 Dy 结线组合

Yd 结线组合适用于各种铁心形式的变压器,其特征为:

a. 由于三次谐波电流可以在二次侧循环流过,因此可以消除三次谐波电压。

b. 一次侧中性点可以引出接地;由于二次侧采用 d 形结线,所以一次侧的中性点是稳定的。

因此,Yd 结线组合主要用于大型降压变压器中。如果采用 Dy 结线组合,其特征与前者相近,但可用于四线制供电的降压变压器和大型升压变压器中。

(3) Yz 结线组合

Yz 结线组合具有 Z 形结线的特征。但用于三相壳式变压器和三个单相变压器组时,当铁心最大磁密与心式结构的最佳值相同时,一次侧和二次侧两个半绕组的三次谐波电压可达基波的 30% ~ 60%,因而二次绕组需增加有效材料用量。因此,这种结线组合最适用于要求防止过电压性能高的小容量心式降压变压器中。

(4) Yyd 和 Ydd 结线组合

Yyd 结线组合适用于各种铁心形式的变压器,其特征为:

a. 由于低压侧采用 d 形结线,所以可以消除三次谐波电压。

b. d 形结线的绕组可以作为主绕组,用于传输容量,也可以仅用于消除三次谐波电压的稳定绕组(不与负载相联)。如果仅用于消除三次谐波电压,那么它的短时热容量应等于主绕组的 1/3。

c. 由于存在 d 形结线的绕组,Y 形结线的中性点是稳定的。

d. 与 Dy 结线组合的双绕组变压器相比,三绕组变压器的 d 形结线的绕组可以增加限制故障电流的能力。其限制能力取决于该绕组与另外两个绕组间的阻抗。

Yyd 结线组合通常用于中、大型变压器。如果采用 Ydd 结线组合,其特征和用途与前者相同。

(5) Yyy 结线组合

这种结线组合存在三次谐波电压,但在三相三柱心式变压器

中,三次谐波电压不超过基波的5%。因此,仅适用三相三柱心式中、大型变压器中,不能用于三相五柱变压器。

(6) Y_{ad}和 Y_{ay} 接线组合

这两种自耦接线组合的特征:Y_{ad}与 Y_{yd}相同;而 Y_{ay}与 Y_{yy}相同。

46. 什么是绕组的联结组? 联结组是怎样确定的?

绕组的联结组是其接线组合加上相位移组别(联结组别或简称组别)而构成的,也就是

$$\text{联结组} = \text{接线组合} + \text{联结组别}$$

绕组的接线组合是十分重要的,上题已阐述过了。联结组别并不重要,只是表明不同侧绕组电压相量的相位关系罢了。但是,联结组别是变压器并联运行的必要条件之一,因此又必须了解它是怎样表示的。

应该指出,工程上规定的联结组标号是从高压向低压顺序排列的,所以在此不用一次、二次绕组,而采用高压、低压绕组。

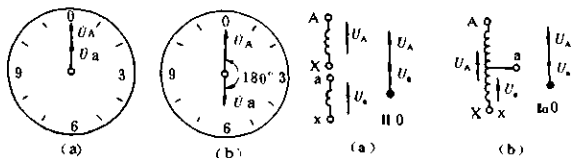
(1) 单相变压器联结组

单相变压器只有一种 I 形接线,所以在双绕组时接线组合有 II 和自耦接线组合 Ia 两种;在三绕组时接线组合有 III 和 IaI 两种。

联结组别是用时钟表示法,即不同侧绕组间电压相量相位移角度,用时钟序数表示。表示时,高压绕组电压相量作分针,取指定 0 点位置;中压或低压绕组电压相量作时针,其相对于高压电压相量相位移所指的小时数就是组别。由于单相变压器不同侧绕组的电压相量相位移为 0° 或 180° ,所以低压电压相量的时针不是指 0 点就是指 6 点,所以单相变压器联结组别只有两种:组别 0 和组别 6,如图 46-1 所示。

一般单相变压器的不同侧绕组的电压相量是同向的,因此组别通常为 0。

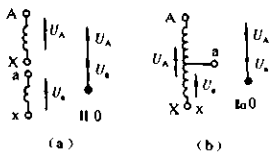
单相双绕组和双绕组自耦变压器的标准联结组为 II0 和 Ia0,如图 46-2 所示;单相三绕组和三绕组自耦变压器的标准联结组为 II0I0 和 Ia0I0,如图 46-3 所示,它是由高、中和高、低两联结组



(a) 相位移 0° 时, 组别 0

(b) 相位移 180° 时, 组别 6

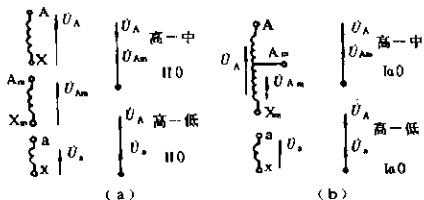
图 46—1 电压相量相位移组别的时钟表示法



(a) 双绕组的 II0

(b) 双绕组自耦的 Ia0

图 46—2 单相双绕组变压器标准联结组



(a) 三绕组的 II0I0 (b) 三绕组自耦的 Ia0I0

图 46—3 单相三绕组变压器标准联结组

组成的。

(2) 三相变压器联结组

常用的三相变压器结线有三种: Y形、D形和 Z形, 而 D形和 Z形结线又有右行和左行之分, 所以其结线组合有 25 种。每一种结线组合中各相高、低压绕组的相位又有相同和相反之分, 而高、低压侧相别又可以不对应。这样, 可以形成 150 种联结组。

尽管绕组的联结组很多, 但是高、低压绕组线电压相位移总是 30° 的倍数, 所以组别只有 $360^\circ \div 30^\circ = 12$ 种。这就是为什么组别用时钟 12 个小时表示的原因。

但是, 三相双绕组变压器标准联结组只有 3 种: Yyn0, Yd11 和

YNd11,其中N,n表示有中性点引出。现以它们为例,说明确定联结组的方法。事实上,后两种联结组是一样的,只是第3种有中性点引出,所以只需以前两种为例。

确定三相双绕组变压器联结组,就是确定其组别,它是通过画高、低压电压相量图而确定的。必须指出,电压相位是以同柱的相电压为基准的。在确定三相变压器联结组时有两种方法,即长期采用的“线电压线端重合法”和“线电压重心重合法”。

a. 线电压线端重合法。

例1:有一Yyn联结组合,如绕组绕向相同、端子标记和对应排列(相别)也相同,其联结组确定的步骤如下:

一是,根据已知条件画出绕组联结图,标出端子标记、相电压正方向(或极性符号)。Yyn联结组合的绕组绕向相同、端子标记相同、相别一致,因此得出其联结图如图46—4(a)所示。

二是,根据联结图、相序和三相相电压的相位移(120°),以同柱相电压为基准,画出高、低压相电压相量图如图46—4(b)所示。

三是,以相电压相量图某一对线端B,b相重合,把低压相电压相量图移到高压的相量图上,如图46—4(c)所示。

四是,画出高、低压某一对应线电压,如 U_{AB} 和 U_{ab} 。认为高压线电压 U_{AB} 指向0点,则Yyn组合的低压线电压 U_{ab} 也指向0点。 U_{ab} 所指的小时数为0,所以组别是0,如图46—4(d)所示。所以得其联结组为Yyn0。

例2:如有Yd联结组合,绕组绕向相同、端子标记相同、相别一

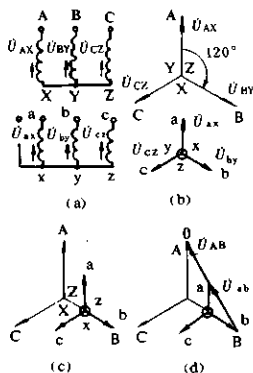


图46—4 确定Yyn0联结组的步骤

致。那么,按上例步骤同样可确定出其组别是 11, 联结组是 Yd11, 如图 46—5(a)至(d)所示。

以此推论,其他结线组合的组别,只要知道他们的绕向、端子标记和相别均可确定。

b. 线电压重心重合法。

用线电压重心重合法确定绕组联结组与前一种方法的差别,在于电压相量图要构成线电压三角形,然后把低压线电压三角形平移到高压线电压三角形上,并使他们重心重合。

然后,把重心到高压线端的相量当作时钟的分针,而把重心到对应的低压线端的相量当作时针,那么后者所指示的小时数就是组别。

下面也举两例,说明线电压重心重合法确定联结组的方法。

例 3: 有一 Yy 结线组合,如绕组绕向相同,相别也相同,但端

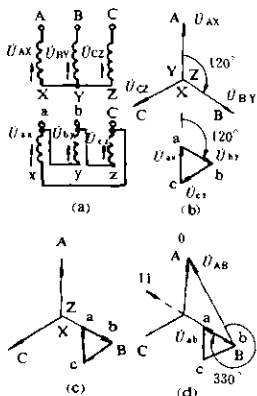


图 46—5 确定 Yd11 联结组的步骤

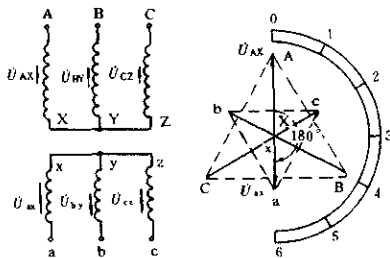


图 46—6 以重心重合法确定 Yy6 联结组

子标记相反,则确定其联结组的方法如图 46—6 所示。

画出其绕组联结图和相电压相量,并把电压相量的线端联成线电压三角形(虚线),平移低压线电压三角形使其与高压线电压三角形重心重合,则 U_{AX} 指向 0 点,而对应的 U_{ax} 指向 6 点,所以联结组为 Yy6。

例 4: 有一 Dy 联结组合,如绕组绕向相同,相别也相同,但端子标记相反,则其联结组可以和例 3 一样确定。得组别为 7,所以联结组为 Dy7,如图 46—7 所示。

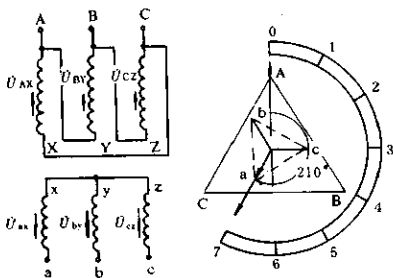


图 46—7 以重心重合法确定 Dy7 联结组

三相三绕组变压器联结组是由高、中和高、低两个联结组组成,图 46—8 为其 YNyn0d11 的标准联结组。

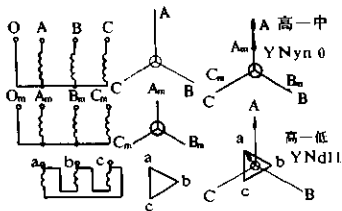


图 46—8 三相三绕组变压器 YNyn0d11 标准联结组

47. Yz 结线组合的变压器为什么防雷性能好?

变压器在运行中常常会遭遇到过电压的作用,对配电变压器来说,主要是遭受雷击过电压的作用。为此,配电变压器采用三点共同接地的防雷保护,即高压侧由阀型避雷器保护,避雷器接地,低压绕组中性点和变压器油箱连在一起接地进行保护。这种保护结构如图 47—1 所示。

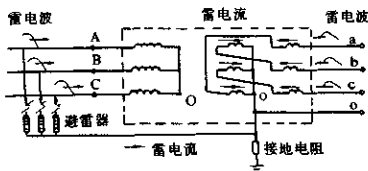


图 47—1 Yzn 结线变压器的防雷保护和高压侧进波的示意图

当高压侧三相进波时,引起避雷器动作放电,避雷器阀片电阻上产生很大的电压降——残压,作用在高压绕组上。此残压是高频电压波,雷电流经高压绕组匝间或饼间电容和对地电容流过,而在高压绕组内产生不均匀的冲击电压分布,这是高压绕组要采取内部过电压保护的原因。但是,高压侧三相进波的问题还不仅在于此,因为避雷器放电时的电流在接地电阻上也产生一个很大的冲击电压降。它通过中线而大部分施加在低压绕组上,在低压绕组内又流过雷电流,由此而产生的零序磁通将匝链于高压绕组上。在高压绕组上产生很高的感应电压,通常称为逆变换过电压。由于是逆变换电压,其方向与残压相反,所以最大值出现在高压中性点上,它的幅值比残压大几倍到几十倍。当侵入避雷器电流为 1000A,接地电阻为 10Ω 时,一般中小型变压器高压绕组中性点电位可达 150kV,往往使其中性点附近被击穿。

当低压侧三相进波时,冲击电压分配在低压绕组和接地电阻

上,侵入的雷电流通过电磁感应,在高压绕组上产生感应电压,通常称为正变换过电压。当进波电压为 10kV 时,高压绕组中性点电位可达 134kV ,同样会使高压绕组绝缘击穿。

因此,不管是正变换过电压,还是逆变换过电压,均是由于低压绕组中有雷电流流过,并在高压绕组中感应出高电压而击坏变压器的。

以上都是对低压绕组为 y 形结线而言的。如果低压绕组为 z 形结线,由于它是把每一铁心柱绕组都分成两半,一柱绕组的上一半和另一柱绕组的下一半反结串联组成一相绕组,各柱下一半的首端联在一起作为中性点的,这样当雷击发生时,无论是由高压侧进波,还是由低压侧进波,因每个铁心柱上的绕组上下两半匝数相等,且下半是反结,所以其中流过的雷电流大小相等,方向相反(见图47-1)。此外,这种绕组的冲击零序阻抗很小,所以雷电流在每一个铁心柱上的总磁势几乎等于零。在高压绕组中就不会产生感应高电压,从而消除了正、逆变换过电压,使高压中性点的电位大为降低。这就是 z 形结线之所以能防止雷击过电压的道理。

值得指出的是,近年来已不断改善了变压器的防雷保护措施,如在配电变压器低压侧也加装低压避雷器或压敏电阻,这样中性点电位被限制在 60kV 以下,耐压水平可达 10kV ,但仍没有根除正、逆变换过电压对变压器的危害。还应指出,低压侧的保护装置还存在一定的问题,如FS-0.5避雷器残压太高;一些压敏电阻热容量小且易损坏;低压磁吹残压避雷器的电弧气体容易把防雨罩冲落而造成进水烧毁。变压器仍然容易受到雷电损坏,因此多雷地区用配电变压器最好还是采用Yzn11系列的变压器。

48. 为什么要限制Yyn0联结组变压器的中线电流不能超过25%的低压额定电流?

Yyn0联结组的三相变压器中线出现电流,说明变压器的低压侧的三相电流不对称。不对称的电流可以分解成正序、负序和零序分量。正序和负序电流的三相相位都相差 120° ,在高、低压绕组中都能流通。它们在铁心中产生的磁通能相互平衡。零序电流三

相同相位,只有中线才能流通,因此低压中线中的电流就是3倍的零序电流 $3I_0$,如图48—1(a)所示,从而在铁心中产生零序磁通。

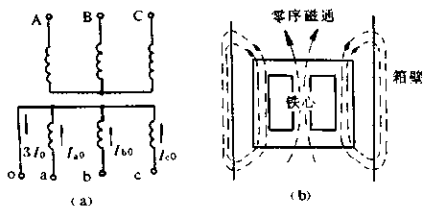


图48—1 Yyn0变压器的零序电流(a)和零序磁通(b)

由于这种变压器的铁心是三柱式的,三个铁心柱中的零序磁通不能在铁心中闭合,但能经过油箱壁等形成通路(如图48—1(b)所示)。虽然磁阻大,零序磁通小,可是在高、低压绕组中总是感应出零序电势。零序电势使中性点发生位移(漂移),使三相相电压不对称,所以中性点位移电压不能太大。

中性点位移电压可以近似用下式计算:

$$u\% = \frac{I\%}{300} u_0\%$$

式中 $u\%$ ——中性点位移电压占相电压的百分数;

$I\%$ ——中线电流占额定低压电流的百分数;

$u_0\%$ ——变压器的零序阻抗电压(50% ~ 85%)。

当 $I\% = 25, u_0\% = 60\%$ 时

$$u\% = \frac{25}{300} \times 60\% = 5\%$$

这就是说,当中线电流为低压额定电流的25%时,中性点位移电压还不太大,可以正常运行。所以,限制中线电流是必须的。

其次,中线电流过大,其产生的零序磁通还会使油箱等发热。

49. Yd11联结组变压器的空载电流为什么不平衡?

Yd联结组合的变压器空载试验时,尽管外施电压三相是对称

的,但三相空载电流却不平衡,且比较明显。最大电流出现于 A 相还是 C 相,视绕组的联结组别而定,Yd11 联结组是 C 相空载电流偏大。

空载电流(主要是励磁电流)与各相的磁路长度成正比,三柱式铁心的 A、C 相与 B 相磁路长之比一般为:

$$k = (H + 2M_0)/H = 2 \sim 3$$

式中, H 是铁心窗高, M_0 是心柱中心距,如图 49—1(a) 所示。因为 A、C 相磁路长,所以

$$I_{a_c} = I_{c_b} > I_{b_a}$$

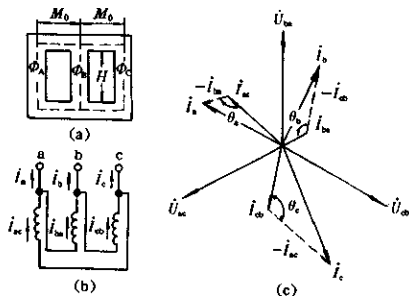


图 49—1 Yd11 联结组变压器的铁心(a)、低压绕组接线图(b)和变压器相量图(c)

又由图 49—1(b)的 d 形接线得:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a_c} - \dot{I}_{b_a}, \dot{I}_b = \dot{I}_{b_a} - \dot{I}_{c_b}, \dot{I}_c = \dot{I}_{c_b} - \dot{I}_{a_c}$$

且设三相相电压相差 120° , 且 $\theta_a = \theta_b = \theta = 120^\circ$, 而铁轭与心柱的单位空载损耗相同, 可以画出图 49—1(c) 所示的相量图。

令 $I_{b_a} = 1$, 则 $I_{a_c} = I_{c_b} = k$, 由余弦定理得:

$$I_a = I_b = \sqrt{k^2 + k + 1}, I_c = k\sqrt{3}$$

分别以 $k = 2$ 和 3 代入上式, 则

$$I_c = (1.31 \sim 1.44) I_a = (1.31 \sim 1.44) I_b$$

当然, $I_c = (1.31 \sim 1.44) I_a = (1.31 \sim 1.44) I_b$

对 110kV 级及以上取上限邻近值, 对 60kV 级及以下取下限邻近值。

50. 一次 10kV 级 Y 形结线的变压器, 改成 6kV 级 D 形结线后, 容量是否要降低?

在三相变压器中, 无论是星形(Y)结线还是三角形(D)结线, 其容量均为线电压 U_L 和线电流 I_L 的 $\sqrt{3}$ 倍, 又均为相电压 U_ϕ 和相电流 I_ϕ 的 3 倍, 即容量:

$$S = \sqrt{3} U_L I_L = 3 U_\phi I_\phi$$

由此可见, 只要相电压和相电流相等, 则容量就不需要降低。

现在由 10kV 的 Y 结线改成 D 形结线后, 相电压不变, 都等于 $10\text{kV}/\sqrt{3}\text{kV}$, 而绕组电流仍然可允许通过原来的相电流, 相电流也不变, 所以容量不降低。

可是, 对于已经制造好的产品, 要不降低容量仍需从结构上加以考虑。现在由 10kV 降到 6kV, 线电压下降了, 所以从线端绝缘上看没有影响; 另外相电流不变, 电阻损耗也不变, 从温升上看也没有影响。改变成三角形结线后, 如果是中性点分接开关, 开关就不能用了; 如果是中部分接开关, 则使用也没有影响。必须注意的是改结后线电流增大 $\sqrt{3}$ 倍, 所以引线电流增大 $\sqrt{3}$ 倍, 引线必须加粗, 套管电流必须加大。如果套管电流的裕度较大, 只需加粗引线, 就能不降低容量运行。

(六) 电压调整与分接开关

51. 电压调整的目的是什么? 怎样进行电压调整?

为了稳定供电电压、控制电力潮流或调节负载电流, 均需对变压器进行电压调整。利用调压器等进行的无级调压只适用于低电压、小容量的场合; 而利用调整发电机励磁、增压变压器、同步补偿机和静电电容器进行调压也受到一定的限制; 因此通常是通过改

变压器的电压比来进行有级调整电压。它是在变压器的某一绕组上设置分接头,当变换分接头时就切去或增加了一部分线匝,从而改变了绕组的匝数比。绕组的匝数比改变了,电压比也就改变了,输出电压也就改变了,这样就达到了调整电压的目的。

在一般情况下是在高压绕组上抽出适当的分接头。因为高压绕组常套在外面,引出分接头方便;高压侧电流小,引出的分接引线和分接开关的载流部分截面小,开关接触部分也较容易解决。

调压方式有无励磁调压和有载调压两种。无励磁调压时,不是变压器二次不带负载,而是一次要与电网断开,在无励磁情况下变换绕组的分接头;有载调压时,变压器二次是在带负载的情况下进行变换绕组分接头的。无论哪种调压方式都可在绕组的中性点、中部和线端改变分接头进行调压。

改变分接头进行调压是在某一范围内按某一级电压的形式改变电压的,国家标准规定的调压方式、范围等如表 51—1 所示。

表 51—1 电力变压器调压方式和范围

方式	额定电压	调压范围	分接间隔	级数	常用调压方式	分接开关
无励磁调压	35kV, 8 000 kVA 以下	$\pm 5\%$	5%	3	中性点调压	中性点调压开关
	35kV, 8 000 kVA 及以上	$\pm 2 \times 2.5\%$	2.5%	5	中部调压	中部调压开关
有载调压	35kV 及以下	$\pm 3 \times 2.5\%$ 或 $\pm 4 \times 2.5\%$	2.5%	7	中性点 线性调压	复合开关
	110kV	$\pm 8 \times 1.25\%$	1.25%	17	中性点 线性或正 反或粗细 调压	复合开关
	220kV	$\pm 8 \times 1.25\%$	1.25%	17	同上	组合开关

52. 什么是恒磁通调压? 什么是变磁通调压?

恒磁通调压一般用于电力变压器与配电变压器的调压。不论

分接开关在哪个位置,不带分接的绕组始终为额定空载电压的调压方式为恒磁通调压。有分接的绕组上每匝所施加的电压与无分接绕组的每匝电压相等的情况就是恒磁通调压。

在恒磁通调压中,每个分接位置的输出容量是等于或小于额定容量,空载损耗值在每个分接位置时都是相等的。每个分接位置的负载损耗与阻抗电压都是不同的。恒磁通调压时分接开关的选用都按最小分接位置时最大分接电流选取,并要考虑过载能力。

对恒磁通调压变压器而言,不是所有运行情况下都是在恒磁通下运行,仍有过励磁与欠励磁的可能。

当分接位置固定时,外施电压高于相应的分接电压时,即每匝电压高于额定匝电压,铁心中即存在过励磁,根据标准规定,恒磁通调压变压器应能在 110% 额定磁通密度下长期空载运行,或在 105% 额定磁通密度下长期在额定电流下运行。系统中无功容量不足,系统电压偏低,会使变压器在欠励磁下运行。在运行中,即使每匝电压保持相同,系统的频率变化时也会引起过励磁与欠励磁。在运行中,如发电机功率不足,系统频率会下降,变压器中磁通密度即增加,使变压器在过励磁条件下运行。

为保持二次侧始终为恒定电压输出,则可利用高压侧加有载调压分接开关来实现。

所以,恒磁通调压只是理论上存在的一种调压方式,在设计上相当于每匝电压在任何分接位置都相同的一种调压方式,在实际运行中,恒磁通调压变压器铁心中磁通密度仍是会变动的。

变磁通调压一般用于整流变压器与电炉变压器。

调压用的分接匝数设在一次侧,而一次输入电压为恒定值。因此,不同分接位置时会产生不同的每匝电压,在铁心中磁通密度也是变量。

$$\text{设额定频率为 } 50\text{Hz}, \Phi = 0.45 \frac{U_1}{N_1 \pm n}$$

式中, U_1 为外施相电压; N_1 为一次主分接匝数; n 为调压匝数。恒定的外施电压加在最少调压匝数的分接位置时,铁心中具有最

高的磁通密度值。二次侧在此分接位置时输出最高电压。

自耦变压器有时采用中点调压方案,此时可选用较低绝缘等级的有载调压分接开关。在自耦变压器的中点调压方案中,会产生过励磁与欠励磁。这是由于调压匝数加在公共绕组上的原因,调压匝数产生的电压,既影响一次电压,又影响二次电压。当自耦变压器的电压比越接近时,过励磁与欠励磁现象越严重。电压比接近的自耦变压器一般不宜选用中点调压方案。

53. 无励磁调压时绕组抽分接头方式有哪几种? 无励磁分接开关有哪几种? 无励磁分接开关是怎样结线的?

无励磁调压常用的绕组抽分接头方式有四种:

a. 三相中性点调压抽头方式(如图 53—1(a)所示);

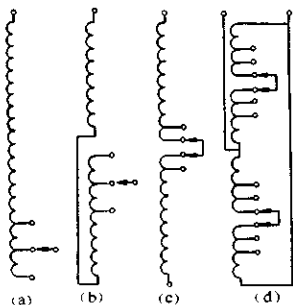


图 53—1 无励磁调压时绕组抽分接头方式

b. 三相中性点“反结”调压抽头方式(如图 53—1(b)所示);

以上两种方式用三相中性点调压的无励磁分接开关。

c. 三相中部调压抽头方式(如图 53—1(c)所示);

d. 三相中部并联调压抽头方式(如图 53—1(d)所示)。

以上两种方式用三相或单相中部调压无励磁分接开关。

无励磁分接开关(或称无载分接开关)是进行无励磁调压的装置。无励磁分接开关须具有:动作灵活可靠、操作方便、一定的电

气强度、良好的动热稳定性能、足够的机械强度和使用寿命、外形尺寸小且便于维护等等。

无励磁分接开关型号字母的含义如下表所示。

字母符号	代表的意义
W	“无”励磁
S	“三”相
D	“单”相
P	盘式
T	条形
L	笼形
罗马字	I、II表示中部调压, III表示中点调压
数字/数字	额定电流(A)/额定电压(kV)

无励磁分接开关有三种：

a. 三相中性点调压无励磁分接开关。这种开关为 WSP III 形式。他们直接固定在变压器的箱盖上, 主要由绝缘盘、动定触头和操动螺母组成, 如图 53—2 所示, 用于 35kV 以下。由于三相 9 个

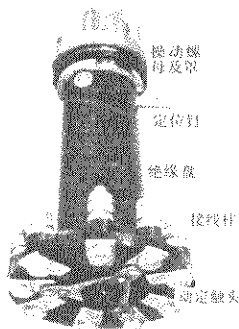


图 53—2 WSP III 型三相无励磁分接开关

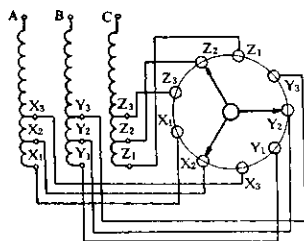


图 53—3 WSP III 型分接开关与三相绕组的接线图

触头均布置在开关下端头,故俗称九头分接开关,其与三相绕组的接线如图 53—3 所示。分接引线分别接到分接开关的定触头上,动触头的三片同时搭接到相差 120° 的三个定触头上形成中性点。

b. 三相中部调压无励磁分接开关。这种开关为 WSL II 型,是夹片式。其典型结构为半笼形水平放置的。这种开关的动、定触头沿水平方向分成三相间隔分布。而每相触头处于同一垂直面上,如图 53—4 所示,用于 60kV 及以下。这种分接开关与三相绕组的接线如图 53—5 所示,动触头使两个相邻定触头接通,从而接

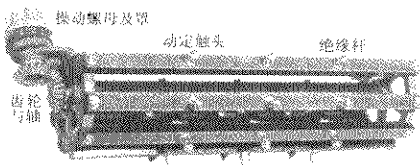


图 53—4 WSL II 型三相无励磁分接开关

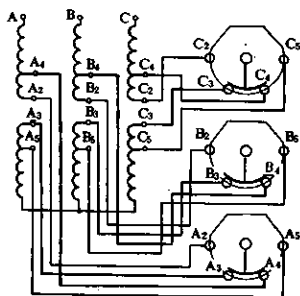
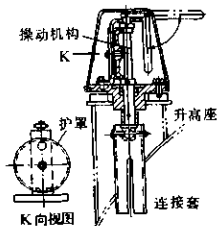


图 53—5 WSL II 型分接开关与三相绕组的接线图
(也有 5 个分接的规格)

通了中部抽分接头的两部分绕组。

WSL II 型三相中部调压无励磁分接开关有两种,分别为 3 个分接及 5 个分接。

10kV 配电变压器还可选三相 WST II 型中部调压无励磁分接开关。所有触头都在一根条上,安装尺寸较小。



c. 单相中部调压无励磁分接开关。这种开关分为 WDT II 型和 WD 型两种。他们的结构特点是操动机构与分接开关本体是分开的。三相变压器用三个单相开关,用于 35kV 以上。

WDT II 型为夹片式,改进后的分接开关及其操动机构如图

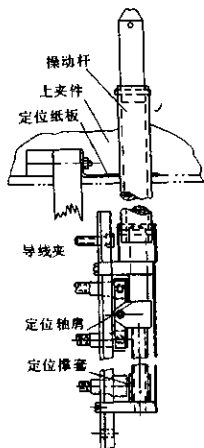


图 53—6 WDT II 型单相无励磁分接开关

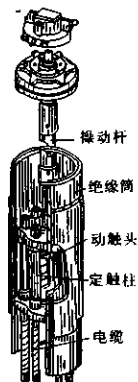


图 53—7 WD 型 220kV 单相无励磁分接开关示意图

53—6 所示。开关的动触头在上下极限工作状态时有定位装置。上极限位置通过绝缘丝杠上的轴肩实现；下极限位置为动触头螺母往下移动撞到绝缘撑套的位置。当对操动机构上的位置指示有怀疑时，可转动手柄到上或下极限位置，即可得到正确的定位。

操动杆先用绝缘锥销固定在分接开关上，操动杆上部由定位纸板固定。上节油箱扣上时，操动杆的锥形头部自行进入开关升高座内。操动机构上槽轮外增设护罩，防止转动手柄时造成槽轮的误动作。

WD 为六柱触头式，旧型 WD 的动触头为环形触头式，如图 53—7 所示。由于环形触头必须采用平面蜗形弹簧，蜗形弹簧的弹力工艺要求高，不易保证，且极易失去弹性，现在已很少生产。新生产的 WD 型分接开关为楔形触头，克服了上述的缺点。

54. 有载分接开关的工作原理是什么？它是怎样构成的？

有载分接开关是保证在不切断负载电流的情况下，由一个分接头切换到另一个分接头的调压装置。有载分接开关型号字母含义，一般用 S 代表三相，Y 代表有载，T 代表线端调压，X 代表中点调压，而用 Z 代表电阻式，F 代表复合式，Z 代表组合式（第一字母）。

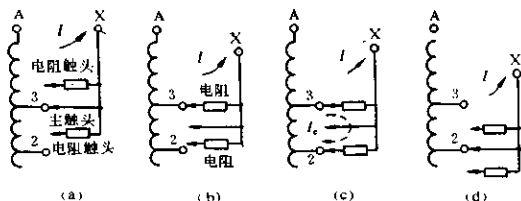
由于有载调压不能停电，在某一瞬间需同时连接两个分接头，因此两个分接头间将被短路，由此产生一很大的循环电流，所以必须接入一个限流阻抗。限流阻抗有两种：用电阻的称为电阻式，用电抗的称为电抗式，现在都采用电阻式。常用的过渡电路为双电阻电路。

（1）有载分接选择开关（复合型）

有载分接选择开关又称复合型有载分接开关。复合型有载分接开关所采用的双电阻过渡电路，如图 54—1 所示。图中（a）是通电主触头接在 3 分接的位置上。其过渡过程如图中（b）、（c）、（d）所示（由分接 3 切换到分接 2）：上耐弧电阻触头接至 3 分接；下耐弧电阻触头接至 2 分接（桥接状态，限制循环电流 I_c ）；通电主触头接至 2 分接，电阻触头断开，过渡过程结束，切换至 2 分接。这

样就可以在不停电的情况下切换分接头,从而改变了电压。这种过渡电路也可采用单电阻电路。

图 54—1 就是有载选择开关的切换分接的过程。因此,这种开关的本体与三相中性点调压无励磁开关是一样的,只是每相多了两个电阻触头罢了。其本体在外形上则常是整笼垂直放置式。



(a) 正常位置 (b) 上电阻触头接通 (c) 过桥位置 (d) 正常位置

图 54—1 双电阻过渡过程之一

除开关本体外,为了实行快速切换,还需要弹簧储能的快速机构,以及需要有驱动机构进行开关的驱动。三个基本部分一般是自上而下分为三层:驱动机构、快速机构(油箱盖)和开关本体(油箱中),如图 54—2 所示。

快速机构的主体是一个强力高储能拉力弹簧。当垂直轴转动时,首先由拨杆将弹簧拉长如图 54—3(a)所示;然后继续转动,弹簧储存足够的位能,当摆杆超越“死点”时,弹簧突然释放,如图 54—3(b)所示,带动摆杆以高速向同一方向回转;这一快速回转运动由摆杆传递给一个拨盘,拨盘又带动了固定在选择开关轴上的槽轮,使它向规定方向旋转一档;于是选择开关轴就以相当于槽轮的角速度快速旋转一个角度,切换一个分接。

驱动机构主要由电动机和减速装置组成。一般是一台三相微型电动机,电动机轴上直接装一个蜗轮以降低转速比。蜗轮轴是垂直方向,经过密封装置后带动下一层的快速机构。

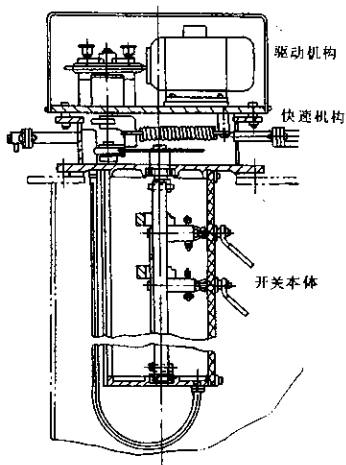
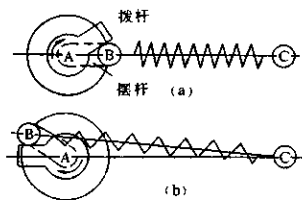


图 54—2 SYXZ 和 SYTZ 型有载选择开关(复合式)



(a) 弹簧开始储能 (b) 过死点开始释放
A、C 为定点; B 为动点。

图 54—3 过死点释放机构之一

(2)有载分接开关(组合式 ZY 型)

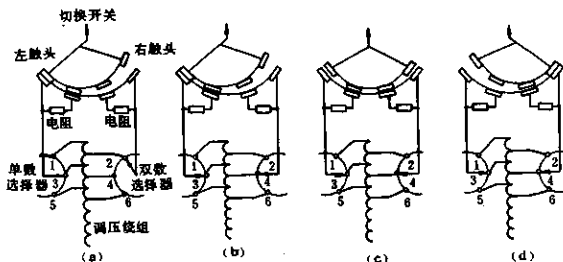
大容量的有载分接开关本体则由切换电流的切换开关和选择分接头的分接选择器组成(故称组合型),如图 54—4 所示。

分接选择器在不带电情况下,使一个分接头在断开前,下一个分接头要先行接入,所以分为单数、双数分接选择器;切换开关在带电切换分接时,要短接(桥接)两个分接头,所以有左、右两组触头以轮流接通,并在其间接入电阻以限制短路环流。左、右两组触头中两边是主触头,中间是电阻触头。

有载组合型分接开关一般也是采用双电阻过渡电路,其切换程序(工作顺序)如图 54—5 所示(由 3 分接切换到 4 分接)。分为:选择(离开 2 分接);选择结束(接通 4 分接);切换(离开左触头);切换结束(接通右触头)四个过程。有时为了增大调压范围还



图 54—4 组合型有载调压分接开关本体



(a)选择 (b)选择结束 (c)切换 (d)切换结束

图 54—5 双电阻有载分接开关的动作用程序(双电阻过渡过程之二)

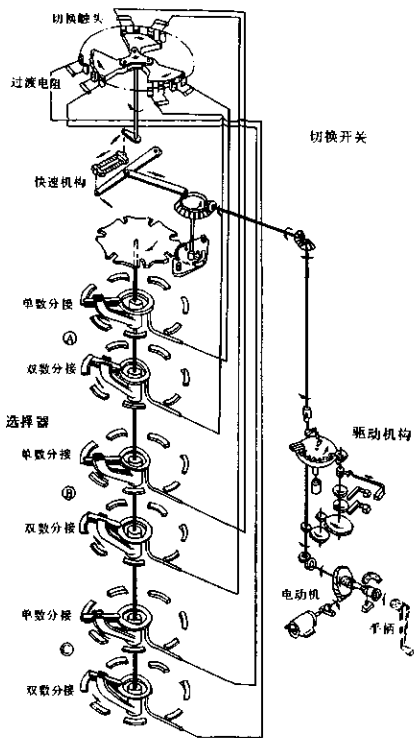


图 54—6 组合型有载调压分接开关结构图

有转换选择器或粗调选择器。

这种有载分接开关的驱动机构一般放在变压器旁侧油箱壁上,快速机构在切换开关中。它的工作原理与上述选择开关的作用相同,具体结构如图 54—6 所示。

有载分接开关中的切换开关,不但有“油中切换,电阻过渡型”,还有“真空中切换,电阻过渡型”。真空中切换型是采用真空触头(真空开关),最适宜用于干式变压器中,圆周运动切换方式真空开关如图 54—7 所示。

另有一种直线运动切换方式的真空

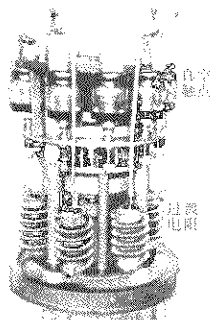


图 54—7 真空触头(触点)式切换开关内部结构

55. 有载调压时绕组抽分接头方式有哪几种? 有载调压分接开关是怎样结线的?

不管有载调压的部位是在绕组的中性点、中部还是端部,常用的绕组抽分接头的方式有如下三种:

- 线性调压抽分接头方式(如图 55—1(a));
- 正反调压抽分接头方式(如图 55—1(b));
- 粗细调压抽分接头方式(如图 55—1(c))。

正反调和粗细调分别还具有转换选择器和粗调选择器。除以上三种方式以外,还有多范围调压抽分接头的方式,常用于特种变压器中。

图 55—1 的绕组抽分接头

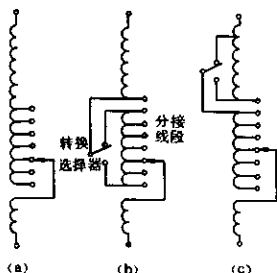


图 55—1 有载调压时绕组抽分接头方式

的方式是表示一相的绕组。当把这样的三相绕组结成 Y 或 D 结线时,就是中部调压方式;把其上部线匝去掉,而结线时,就是线端调压方式;把其下部线匝去掉,而又只结成 Y 形结线时,就是中性点调压方式。

组合型有载选择开关是直接切换的,不分切换和选择,其线性调压结线图如图 55—2 所示。如有转换选择器,可参照图 55—3 (b)、(c)所示。

有载分接开关(复合型)的主要结线图如图 55—3 所示。

图 55—3(a)是不带转换选择器的线性调压结线图,绕组分接头直接接至相应选择器的定触头上。图示为 5 分接接通,经过单数选择器的动触头至切换开关左触头而引出。

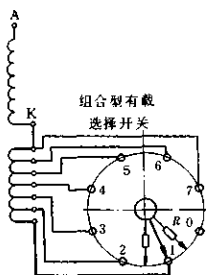
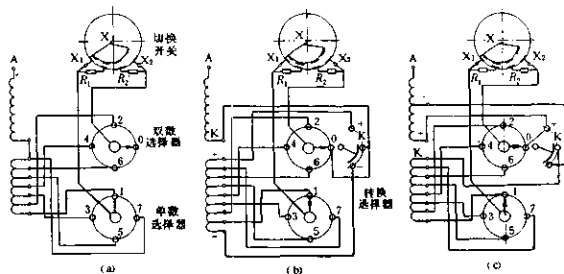


图 55—2 组合型有载调压选择开关与绕组的结线图(只表示一相)

图 55—3(b)是带转换选择器的正反调压结线图。图中调压绕组为 8 段, ± 7 级共 15 级。其特点是主绕组 K 端接至转换选择器的中间定触头上,而调压绕组两端接至转换选择器的两边定触头上。如果把图中调压绕组两端分接线段去掉,而把 1 和 7 分接头同时分别接至转换选择器两边定触头上,很明显,这样可省去两段调压线段,比较经济。但用同一开关的调压级数减少,对应于图 55—3(b)时,调压绕组为 6 段, ± 6 级共 13 级。

图 55—3(c)是带转换选择器的粗细调压结线图。图中细调压绕组为 7 段, ± 7 级共 15 级。其特点是主绕组 +、- 两端接至转换选择器的两边定触头上,调压绕组 K 端接至转换选择器的中间定触头上。如果把图中调压绕组一端分接线段去掉,而把 7 分接头接至转换选择器中间定触头上,也很明显,这样可省去一段调压线段,也比较经济。但用同一开关的调压级数也减少,对应于图



(a)线性调压接线 (b)正反调压接线 (c)粗细调压接线

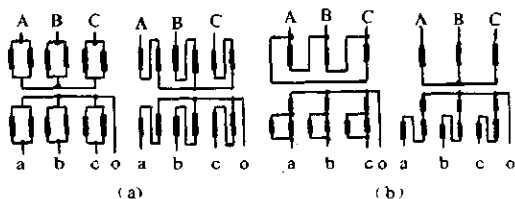
图 55—3 有载调压分接开关(复合型)与绕组的
接线图(只表示一相)

55—3(c)时,调压绕组为 6 段, ± 6 级共 13 级。

56. 什么是调容量变压器、调容量分接开关?

调容量变压器就是在容量降低后,使铁心的磁通密度减小,从而降低空载损耗,在临界负载率下,总损耗可以降低的变压器。

调容量变压器主要有两种形式:串并联调容量型和 Y—D 调容量型,如图 56—1 所示。



(a)串并联型 (b)Y—D型

图 56—1 调容量变压器的形式

(1) 串并联调容型

每相高低压绕组均由两部分绕组组成。并联时,变压器具有额定容量;串联时电流减小 1/2,容量降低为 1/2 额定容量。由每匝电压公式可知,串联时:

$$e_1 = U/N = 4.44/B_m A$$

式中 A 为铁心柱截面,匝数 N 增加一倍, e_1 减小一半,磁密 B_m 也减小一半。由于电工钢片的单位损耗 p_0 一般下降到 1/4 左右,所以空载损耗 P_0 下降到原来的 1/4 左右。

而负载损耗由于导线截面减小一半,电流密度 δ 将增大一倍,由

$$P_f = km\delta^2 G$$

可知,负载损耗 P_f 将增大 4 倍。

这样,绕组并联时总损耗(P_b)和串联时总损耗(P_c)为:

$$P_b = P_0 + \beta^2 P_f$$

$$P_c = \frac{1}{4} P_0 + 4\beta^2 P_f$$

式中 β 为负载率,令 $P_b = P_c$,则得调容量变压器的节电临界负载率:

$$\beta_0 = \sqrt{P_0/4P_f} = 0.5/\sqrt{\alpha}$$

式中 α 等于绕组并联时的 P_f/P_0 ,如 $P_f/P_0 = 3 \sim 4$,则 $\beta_0 = 28.8\% \sim 25\%$ 。这就是说绕组串联后,当负载率约为 25%,即负载降低到约 1/4 时,就可以节省电能。

这种调容量变压器比母子变压器好(大负载用大变压器,小负载用小变压器),空载损耗越大,负载越小,越节约电能。

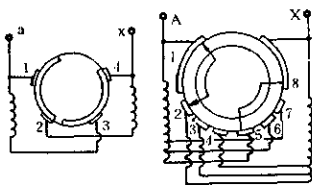
(2) Y—D 调容型

每相高压绕组只有一个,大档容量时三相绕组结成 D 形结线,小档时结成 Y 形结线。低压绕组由三部分组成:一是 27% 匝数的 I 部分,另外两部分 II、III 是 73% 匝数,由两根截面为 I 部分的 1/2 导线并绕而成。大档时 II、III 并联后再与 I 串联;小档时为

三部分绕组串联,降低一半容量,而保持电压比不变,节电临界负载率:

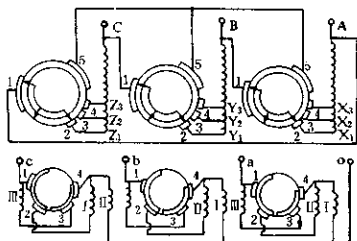
$$\beta_0 = 0.58/\sqrt{a}$$

为了调节容量,又要调整电压,所以调容量变压器需用特殊的调容分接开关,使高低压绕组分接头又可调换。如图 56—2 和图 56—3 所示。



绕组 联结	位置 指示	高压定触头 接通序号	低压定触头 接通序号
并 联	I	1—2,5—8	1—2,3—4
	II	1—3,6—8	1—2,3—4
	III	1—4,7—8	1—2,3—4
串 联	I	2—5	2—3
	II	3—6	2—3
	III	4—7	2—3

图 56—2 串并联型调容开关联结图



高压绕组联结	位置指示	高压定触头接通序号	低压定触头接通序号
D	I	1—2	1—2, 3—4
	II	1—3	1—2, 3—4
	III	1—4	1—2, 3—4
Y	I	2—5	2—3
	II	3—5	2—3
	III	4—5	2—3

图 56—3 Y—D 型调容开关联结图

(七) 发热与冷却

57. 变压器为什么会发热？它的温度是怎样分布的？

变压器在运行时所产生的空载损耗和负载损耗都转变为热能,从而使变压器发热。所发出的热量通过传导、对流和辐射的方式向周围冷却介质散出。一面发热,一面散热,发热大于散热时变压器各部分温度就升高起来,发热与散热平衡时温度就保持一定数值,不再升高了。这时的稳定温度,就是通常所指的变压器各部分的温度。变压器发热越大(损耗越大)、散热越小,则温度越高,需要足够的冷却装置才能将温度降低到允许值。

变压器的热量主要来源于铁心和绕组,而且只有一定的温度差才能散热,所以变压器各部分温度是不一样的。一般来说,绕组的温度最高,铁心的温度次之。对每一部分来说,温度的高低也不一致,均是自下而上逐渐升高的。但在最高处由于散热好些,所以温度也不是最高。油浸自冷变压器各部分的温度分布大致如图 57—1 所示。图中每两条曲线的差值为温度差,温度差就是高温部分对低温部分的温升。

温度的分布中最主要的是最高温度,即最热点的位置,因为它对变压器的绝缘影响最大。变压器最热点一般是在绕组高度方

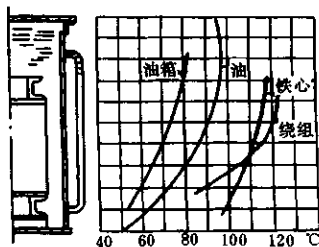


图 57—1 变压器各部分沿高度的温度分布

向的 3/4 处,宽度向外方向的 1/3 处。一般只能测量变压器的顶层油温,以及用电阻法测量绕组的平均温度。

直接测量绕组最热点温度是可以的,目前常采用间接测量的模拟式绕组测温装置,并已在记录方面或冷却器控制方面加以使用。它如图 57—2 所示,在油中设置加热线圈或筒状加热器,借助于电流互感器按负载电流比例通以电流进行加热,并用刻

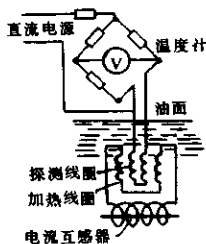


图 57—2 间接式绕组测温装置

度盘式温度计等测量温度。图中采用探测线圈,通过单臂电桥的不平衡电流变化能够读出它的电阻变化。由电阻法求得的绕组平均温度可推测出最热点温度,然后调整电流互感器的电流比就能得到使仪表温度与最热点温度相一致的结果。不过,用这种方法所达到的准确程度,还是难以置信的。

58. 油浸式变压器的油系统是怎样的?

油浸式变压器有几个互相隔离的独立油系统。在油浸式变压器运行时,这些独立油系统内的油是互不相通的,油质与运行工况也不相同,要分别做油中含气色谱分析以判断有无潜在故障。

a. 主体内油系统。与绕组周围的油相通的油系统都是主体内油系统,包括冷却器或散热器内的油,储油柜内的油,35kV 及以下注油式套管内的油。

注油时必须将这个油系统内存储的气体用放气塞放出,一般而言,上述部件都应有各自的放气塞。主体内油主要起绝缘与冷却作用。油还可增加绝缘纸或绝缘纸板的电气强度,在真空注油时,如有些部件不能承受与主体油箱能承受的相同真空强度时,应用临时闸阀隔离,如储油柜与主油箱间的闸阀。冷却器上潜油泵

扬程要够,以免由于负压而吸入空气。这个油系统要有释压装置的保护系统,以排除器身有故障时所产生的压力。

b.有载分接开关切换开关室内的油。这部分油有本身的保护系统,即流动继电器、储油柜、压力释放阀。这个开关室内的油起绝缘与熄灭电弧的作用。油会在切换开关切断负载电流时产生电弧过程中被裂解,为避免这部分易污染的油扩散到主体的油中去,这个油系统要有良好的密封性能,即使在切换过程中产生电弧压力时也要保持密封性能。

有载分接开关切换开关室内的油虽与主体内油隔离,但在真空注油时,为避免破坏切换开关室的密封,应与主体内油同时真空注油,在真空注油时,使这两个系统具有相同的真空度,必要时也应将这个系统的储油柜在抽真空时隔离。为结构上方便,主体的储油柜与切换开关室的储油柜设计成一互相隔离的整体。

c.60kV及以上电压等级的全密封套管内的油。这个油系统内的油主要起绝缘作用,或增加油纸电容式套管内绝缘纸的电气强度。在主体内注油时,应将套管端部接线端子密封好,以免进气。

d.高压出线箱内的油或电气出线箱内的油。三相500kV变压器的高压出线通过波纹绝缘盆式绝缘隔离油系统。这个油系统主要起绝缘作用。

为简化结构,这个油系统也可通过联管与主体内油系统相联,或设计成单独的油系统。

e.在对油浸式变压器进行各种绝缘试验时,首先是放气,通过放气塞释放可能存储的气体,通过各个系统的油中含气色谱分析可预判有无潜在故障。每一油系统都要满足运行的要求,如吸收油膨胀与收缩时油体积的变化,放油用阀门、放气塞、冷却器、散热器与主油箱的隔离阀等。每一油系统都具有良好的密封性能,有载分接开关切换开关室内的油应能单独更换而不放出主体内油,运输时主体内油可放出而充干燥氮气。

即使同一油系统,油基不同的油是不能混用的。

每一油系统应注意在负温时的油特性,如主体内的油在负温时油的粘度大,流动性差,散热性差。有载分接开关切换开关室内的油在负温时会影响切换过程加长,使过渡电阻温升增加。

对超高压油浸式变压器的主体内油系统而言,还应注意油流带电现象,要防止油流带电过渡到油流放电现象。要控制油的电阻率、各部分油速、释放油中电荷的空间等。

59.油浸式变压器的温升限值是怎样得来的?

变压器的温升,对于空气冷却变压器是指测量部分的温度与冷却空气温度之差;对于水冷却变压器是指测量部分的温度与冷却器入口处水温度之差。

变压器运行在海拔高度 1 000m 及以下,而冷却介质温度为下列数值时:

最高气温	+ 40℃
最高日平均气温	+ 30℃
最高年平均气温	+ 20℃
最低气温	- 25℃(适用于户外式变压器)
最低气温	- 5℃(适用于户内式变压器)
水冷却器入口处	+ 25℃

油浸式变压器的绕组、铁心及变压器油的温升不得超过表 59—1 的规定。

表 59—1 油浸式变压器的温升限值

部 位	温升限值/K
绕组:绝缘的耐热等级 A	65(电阻法测量的平均值)
顶层油	55(温度计测量值)
铁心本体	60(油不与大气接触时使相邻绝缘材料不损伤的温升)
油箱及结构件表面	30

为什么规定油浸式变压器的绕组温升限值为 65K? 这是因为绕组温升是根据绕组最热点温度为 98℃而确定的。98℃所产生

的绝缘损坏为正常损坏,而保证变压器正常寿命的年平均气温是 20℃,绕组最热点与平均温度之差为 13℃,所以绕组标准温升限值为:

$$98 - 20 - 13 = 65\text{K}$$

为什么规定油顶层温升限值为 55K? 这是因为油正常运行的最高温度 95℃,最高气温为 40℃,所以油顶层标准温升限值为:

$$95 - 40 = 55\text{K}$$

当本体内的油不与大气接触时油正常运行最高温度为 100℃。

对于冷却方式为强油循环的变压器,为了保证绕组最热点温度不超过 98℃,实际油顶层温升则不应超过 40K。根据国际电工委员会推荐的计算方法:

$$\begin{aligned} \text{绕组最热点温度} &= \text{油顶层温升} + \text{绕组最热点与油顶层的温差} \\ &+ \text{年平均气温} = 40^\circ\text{C} + 38^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} = 98^\circ\text{C} \end{aligned}$$

所以强油冷却变压器的油顶层温升已定为 40K。强油冷却的变压器油顶层温升若按标准 55K 控制,绕组最热点温度将会大于 98℃。运行部门如控制油顶层温度是 85℃,基本上可保证绕组最热点的温度为 98℃。

60. 变压器冷却方式有哪几种? 各种冷却方式有什么特点?

变压器冷却方式是由冷却介质种类及其循环种类标志的。冷却介质种类和循环种类采用的字母代号如表 60—1 所示。

表 60—1 冷却种类的字母代号

冷却介质的种类	矿物油或燃点不大于 300℃ 的合成绝缘液体 燃点大于 300℃ 的绝缘液体 不燃性合成油 气体 水 空气	O K L G W A
循环种类	自然循环 强迫循环(油非导向) 强迫导向油循环	N F D

冷却方式由两个或四个字母代号标志,依次为绕组冷却介质及其循环种类;外部冷却介质及其循环种类。如干式自冷方式表示为AN;油浸自冷方式表示为ONAN等等。

变压器常用的冷却方式有如下几种:

a.干式自冷式(AN)。一般只用于小容量变压器。由于空气比油的冷却作用差,因此电流密度要选得低一些。

b.干式风冷式(AF)。绕组下部设有风道并用冷却风扇吹风,使散热效果提高。

c.油浸自冷式(ONAN)。这种方式维修简单,应用也最广泛。绕组和铁心产生的热量,首先通过虹吸对流作用传到油中,进而传至油箱壁或散热器,再通过辐射和空气对流从油箱外部表面或散热器扩散出去。冷却的油向下流动,在再一次冷却器身后上升而形成自然循环冷却。

d.油浸风冷式(ONAF)。是用风扇向油浸自冷式散热器吹风以提高散热效果的方式。风冷式散热器表面的对流传热率是自冷式的2~3倍,因此,对同一损耗它所需要的冷却面积约为自冷式的一半。对于负载率较低的变压器,只在高峰负载时使用风扇,负载减小时也可以关闭风扇以自冷方式运行。

风扇所需的输入功率只占变压器全部损耗的百分之几。

e.强油自冷式(OFAN)。是将散热器组另行放置在旁侧,在它和油箱本体连接的管路中间安装油泵,使油作强迫循环的一种方式。为了防止噪声或污染等,可将变压器本体安装在户内,而将散热器组安装在户外。散热器因内压变化引起的体积变化较大,因此开动或停止油泵时会因油压变化而使油体积产生变化,同时有与体积变化相对应的油量流入或流出储油柜。这就有可能使气体继电器误动作,为此可根据需要在保护回路中接入一个防止误动作的回路。这种冷却方式国内很少采用。

f.强油风冷式(OFAF)。是在强油自冷式的散热器组上以各种方法安装风扇的冷却方式,但是最广泛采用的是在油箱周围安装强油风冷式冷却装置。强油循环的冷油由潜油泵通过下部油管

打入绕组间带走热量,热油再由上部油管进入冷却器,从而完成强油循环。

油泵及风扇所需能量,也就是辅机损耗,约占全部损耗的5%。为了减少辅机损耗,应根据负载或温度变化情况控制冷却器运行组数。

g.强油水冷式(OFWF)。这种方式与强油风冷式相比只是冷却器有所不同,但以采用另行放置水冷式冷却器的方式为多。

h.强油导向风冷和水冷式(ODAF和ODWF)。强油导向冷却是把冷油直接导向线段,将线段上的热量很快地带走,使绕组最热点温度下降,但绝缘结构较复杂。

油浸式变压器采用强油冷却方式时应注意如下几个问题:

a.油泵与风扇失去供电电源时,变压器就不能运行,即使空载也不行。因此应有两个独立电源供冷却器使用。

b.潜油泵不能有定子与转子扫膛现象,一旦扫膛,金属异物进入绕组会引起击穿事故。油路设计时不能使潜油泵产生负压,有负压时勿吸入空气,否则会影响绝缘强度。

c.强油冷却的油面温升较低,不能以油面温度来判断绕组温升。尤其是强油水冷,绕组温升接近规定限值时,油面温升很低。

d.超高压变压器采用强油冷却时还应防止油流放电现象。在绕组内油路设计时,应防止油的紊流,限制油流速度,选用合适电阻率的油,绝缘件表面要光滑,铁心上应有足够体积使油释放电荷。防止油流带电发展到油流放电。启动冷却器应逐个启动到应投入的冷却器数。

e.选用大容量冷却器时应注意油流不能短路,要使冷却后的油能进入绕组。

f.选用水冷却器时应注意冷却水的水质,水内有杂质易堵住冷却器而影响散热面。水压不能大于油压。

g.强油风冷变压器外有隔墙时,隔墙应离冷却器3m以上,以免干扰空气自由运动。

选用散热器或强油风冷冷却方式时,如停泵可按80%额定容

量运行,如同时停泵停风扇可按 60%额定容量运行。

61. 油浸式与干式吹风冷却变压器冷却方式如何选择?

油浸吹风冷却变压器有两种冷却方式可供选择:油浸吹风冷却(即 ONAF)和油浸自冷(即 ONAN)。一般是 100%额定容量选 ONAF 冷却,67%(或由制造厂规定的其他百分数)额定容量时可选 ONAN 冷却,这是从绕组平均温升与油面顶层温升不超过允许限值来选择冷却方式的。不吹风时,散热效率低,输出容量就低;吹风时,散热器进出口油温差增加,油的虹吸作用增加,散热效率提高,允许提高输出容量。

当按这种原则(即保持温升接近允许限值)选择冷却方式时,负载损耗值都由相应绕组平均温度决定,当较低容量运行时,选用 ONAN 冷却方式,此时风机的损耗节约了。

如果是 67%额定容量及以下时,仍然选用吹风的冷却方式,因散热效率高,绕组平均温升会远低于规定限值。此时,在这种容量运行时的绕组平均温升高,从而相应的实际负载损耗也低,风机的损耗虽没有节约,但实际负载损耗却降低了。因此可从哪个是运行实际损耗为最小来选择吹风方式。

但在额定容量附近运行时,只能是 ONAF 冷却方式运行。

在 ONAF 冷却方式运行时,有时会遇到风机发生故障需要更换或维修,此时应降低输出容量,如输出容量不变,变压器的运行寿命会降低。

各种耐热等级的干式变压器加上吹风冷却时,可以提高变压器的输出容量。

对安装尺寸而言,较小空间可提高所安装的变压器容量 40%~50%。

从允许绕组温升而言,吹风后仍能符合允许温升限值。但从节能角度讲,这是不经济的。这可从下面例子加以说明。

例 1:一台 10kV 级 800kVA 无吹风冷却的干式变压器,其空载损耗为 1500W,负载损耗为 8950W。当启动风机时,由于加强了冷却能力,使这台变压器可以输出 1.4 倍容量,即可输出 1.4×800

= 1 120kVA。

此时,当输出 1 120kVA 时的运行损耗为 $1\ 500 + 1.4^2 \times 8\ 950 = 19\ 042\text{W}$ 。

如果,选用一台 10kV 级 1 250kVA 无吹风冷却的干式变压器,其空载损耗为 2 300W,负载损耗为 11 300W。从额定参数比,似乎 1 250kVA 的损耗限值要大得多,而在相同的输出容量 1 120kVA 运行时,1 250kVA 变压器在 1 120kVA 容量下运行时,其运行损耗为 $2\ 300 + 0.896^2 \times 11\ 300 = 11\ 372\text{W}$ 。

两种不同容量变压器,在不同冷却方式下在输出相同容量时总损耗相差 $19\ 042 - 11\ 372 = 7\ 670\text{W}$ 。

另外,800kVA 干式变压器在吹风冷却时还有风机的消耗功率,阻抗电压也会增加 1.4 倍,这对电压调整率来讲也是不利的。

所以,干式变压器的吹风冷却作为正常运行方式是不经济的,容量越大,总损耗差值也越大。

例 2:10kV 级 10 000kVA 无吹风冷却干式变压器,在吹风冷却时可输出 15 000kVA。与 2 台 8 000kVA 在不吹风冷却时输出 15 000kVA 的损耗对比:

10 000kVA 吹风时输出 15 000kVA 的总损耗: $13\ 850 + 1.5^2 \times 43\ 500 = 111\ 725\text{W}$; 2 台 8 000kVA 不吹风时输出 15 000kVA 的总损耗: $2 \times 13\ 000 + 2 \times 38\ 900 \times 0.9\ 375^2 = 94\ 379\text{W}$, 总损耗相差 17 346W。

故吹风冷却可作为干式变压器的急救超铭牌容量运行的冷却方式。

62. 变压器为什么要采用冷却装置? 冷却装置有哪几种?

变压器损耗大体上是按尺寸的 3 次方、容量的 3/4 次方成比例增加的,而油箱表面积只不过是按尺寸的 2 次方、容量的 2/4 次方成比例增加。因此,变压器只用油箱表面进行散热是不够的,即使容量很小的配电变压器也应在油箱表面上安装散热片、散热管或采用波纹油箱。而对于 2000kVA 以上的容量,则需在油箱周围安装管式或片式散热器。容量为 50MVA 以上时则需采用强油风

冷和强油水冷冷却器。根据不同的容量,应采用不同的冷却装置。

自冷油浸式变压器的油箱,每 1m^2 面积只能散出热量 500W (瓦)左右;采用风冷式散热器时每 1m^2 的散热量提高了,当空气流速为 $1\sim 1.25\text{m/s}$ 时可达 800W 左右;采用强油风冷冷却器,空气流速为 6m/s ,油流量为 $25\sim 40\text{m}^3/\text{h}$ 时,每 1m^2 可散热 $1\ 000\text{W}$ 左右;采用强油水冷却器,水流量为 $12\sim 25\text{m}^3/\text{h}$,油流量为 $25\sim 80\text{m}^3/\text{h}$ 时,每 1m^2 可散热 $10\ 000\text{W}$ 左右。根据不同的损耗,相应采用不同的冷却装置。

油浸式变压器采用的冷却装置有以下几种:

a.片式散热器。片式散热器是空气自然冷却散热器,它是由 1mm 厚的钢板波形冲片经焊接组装而成的。当散热器的片数较少时,可直接焊在箱壁上,用于 $50\sim 200\text{kVA}$ 变压器。用于 $200\sim 6\ 300\text{kVA}$ 变压器上的片式散热器,如图62—1(a)所示。片式散热器又分可膨胀式与非膨胀式两种,前者用于全密封式变压器。

b.管式散热器。管式散热器是由截面为扁圆形的多根管子在上下集油管的侧壁上焊成的。集油管上有放油塞、放气塞等。

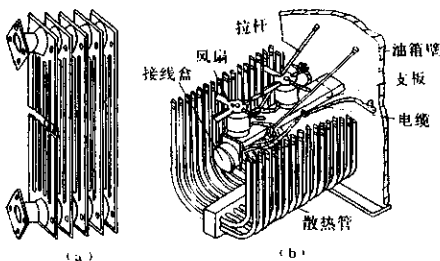


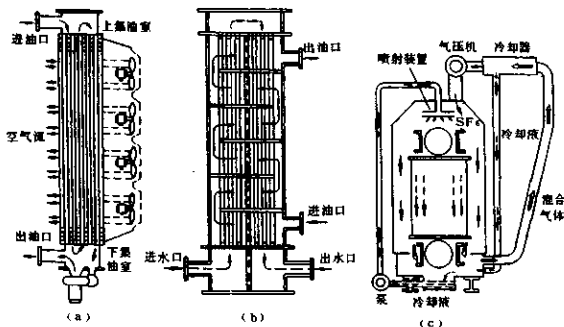
图62—1 片式散热器(a)和风冷管式散热器(b)

它被用于 2 000kVA 及以上的变压器。

c. 风冷管式散热器。它由扁管散热器和风扇装置组成。风扇安装位置在散热器高度方向上 1/3 处。风扇电动机为三相户外防滴式、250W、380V、1 400r/m(转/分)。它被用于 8 000kVA 及以上的变压器。风冷管式散热器的结构如图 62—1(b)所示。

d. 强迫油循环风冷却器。它是用潜油泵强迫油循环,使油与冷却介质空气进行热交换的冷却器,其原理图如图 62—2(a)所示。风冷却器的本体为一组带有螺旋肋片或翅片的金属管,两端各有一个集油室。集油室内焊有隔板,以形成多回路的油循环路径。潜油泵的吸入端直接装在第一个油回路上,吐出端通过装有流动继电器的联管接至第二个油回路。每台风冷却器有分控制箱,每台变压器有总控制箱,这些在大于或等于 50MVA 的变压器上采用。

e. 强迫油循环水冷却器。它是用潜油泵强迫油循环,使油与冷却介质水进行热交换的冷却器,其原理图如图 62—2(b)所示。



(a)风冷却器 (b)水冷却器 (c)蒸发冷却器

图 62—2 冷却器的结构原理图

水冷却器的本体由圆形筒体和水箱构成,筒体中放置冷却铜管,铜管中通入冷却水;沿高度方向有隔板间隔,以改变油流路径,油流曲折在铜管缝隙中边流动边冷却。潜油泵安装在水冷却器的入口侧,使冷却器中的油压大于水压,防止水渗漏入油中。差压继电器装在油回路和水回路之间,每台变压器有总控制箱,这也在大于或等于 50MVA 的变压器上采用。

f. 蒸发冷却器。为提高冷却效率,最近又采用蒸发冷却器,如 SF₆ 绝缘变压器。实用的蒸发冷却方式为喷射式,它是在变压器箱体内充满 SF₆ 气体的情况下,将冷却液碳氟化合物 C₆F₁₀O 喷射到绕组和铁心上,使冷却液汽化而带走大量热量,汽化后的冷却液再经冷却器冷凝又变为冷却液,其冷却方式如图 62—2(c) 所示。

63. 如何看待变压器允许温升?

变压器各个部位有不同的允许温升,不同的运行工况也有不同的允许温升。决定允许温升的因素有:变压器的运行预期寿命、变压器的安全运行、变压器的检测技术。

绕组允许温升:绕组的允许温升是指整个绕组的平均温升,由电阻法测得,允许温升与绝缘耐热等级有关。油浸式变压器属 A 级绝缘,由于传统的绕组温升测量法为电阻法,测得的温升为平均温升,A 级绝缘允许的平均温升为 65K。平均温升与绕组最热点温升之差假使为 13K。在年平均温度为 20℃ 时,A 级绝缘绕组最热点温度为 $20 + 65 + 13 = 98℃$,此时 A 级绝缘具有正常寿命。干式变压器各种绝缘的允许平均温升:A 级为 60K、E 级为 75K、B 级为 80K、F 级为 100K、H 级为 125K、C 级为 150K。冬季绕组温升低于平均温升,绕组可延长寿命;夏季绕组温升高于平均温升,绕组要牺牲寿命。如超铭牌容量运行也要牺牲寿命。如超铭牌容量运行时,油浸式变压器 A 级绝缘绕组最热点温度不能超过 140℃,即使牺牲的寿命不多,也不允许超过 140℃,因超过 140℃ 时油要分解出气体而影响绝缘强度。所以油浸式变压器 A 级绝缘的最热点温度不能超过 140℃ 是从变压器安全运行决定的。

大容量变压器有时有几种冷却方式,例如 ONAN/ONAF,变压

器额定容量一般是指 ONAF 下的允许值,当风扇失去电源后,冷却效率下降,如仍按 ONAF 冷却方式下容量运行时,绕组平均温升必将升高,故变压器在 ONAN 冷却方式下运行时必须降低容量,使绕组平均温升不超过 65K。

另外,双绕组或三绕组变压器中,两个或三个绕组应同时达到相同的温升。当一个绕组达到 65K 平均温升时,另一个或两个绕组温升低于 65K,则这样的设计是不经济的。油浸式变压器油面顶层的温升与几个绕组平均温升同时达到允许温升是最为经济的,即油面顶层温升达到 55K 时(油与空气隔离时为 60K),绕组平均温升达到 65K。在设计阶段,就合理选取每一绕组的电流密度,在保持负载损耗不超过标准值时使各个绕组的温升接近 65K,同时油面顶层也达 55K。但是,这对强油循环的变压器是难以达到的,因强油风冷式变压器的油顶层温升一般为 40K,强油水冷式变压器的油顶层温升一般为 35K。

实际上,油面顶层温升与绕组平均温升很难同时到达极限允许值,因此,一般不能根据油面顶层温升来判断绕组平均温升。这也是大容量变压器既装油面温度指示仪又装绕组热点温度指示仪的原因。如单装油面温度指示仪,有时较难判断绕组平均温升,尤其是强油循环冷却变压器。

在分析变压器温升时还要注意冷却介质的温度。

一般风冷式变压器的冷却介质为空气,水冷变压器冷却介质为水。

当装有封闭母线时,低压套管在封闭母线内的介质虽为空气,但温度为 80℃。所以低压套管用于敞开式时与用于封闭母线内时各有不同的允许温度。一般用于封闭母线内的套管要降低额定电流,因封闭母线内空气温度较高。

由此可知,引线、套管、有载分接开关或无励磁分接开关的允许温升取决于其周围介质的温升。变压器具有一定的超铭牌容量能力,其组件也应具有相同的能力,既有一定的寿命,又不影响安全运行。

前面分析的油面顶层温升与绕组平均温升是指稳态下的温升。有时,在运行中常有瞬时负载的变化,如突然接入较大负载,突然甩负载,此时还应注意温度变化的时间常数。

油的时间常数较大,就是负载变化后,油面温度在较长时间后才能达稳定温升值,而绕组的时间常数较小,绕组平均温度能较快地随着负载的变化而变化。

当负载增加时,不能认为油面温度没有变化,而绕组温度也没有变化。油的时间常数较大,油面温度上升较慢,绕组时间常数较小,绕组温度上升较快。如有绕组温度指示仪,这个指示仪也应有较好的响应时间,时间常数也要很小。

要控制 ONAF 风扇启动就不能靠油面温度指示仪,只能由绕组温度指示仪来实现,或由套管电流互感器来控制。

在变压器中,有时漏磁产生的损耗密度太大时,会产生局部过热。大电流引线附近的箱壁,大电流套管引出处箱盖等处,有时会有局部过热。因局部过热温度而引起油分解出气体是不允许的,这会引引起可靠性的下降。因此要采取措施改变漏磁的途径,采取隔磁措施或在漏磁集中处用不导磁材料。

变压器在运行中,不可避免地会有短路,变压器短路时将流过短路电流,此时,变压器迅速发热。由于短路电流很大,变压器等于在绝热条件下运行而不考虑散热。

A 级绝缘铜导线绕组在短路时的允许温度为 250°C 。

为保持这一温度不超过,要在设计中计算短路电流下许用电流密度,使在允许的持续时间时铜导线不超过 250°C 。

铜导线的机械应力允许值与温度有关,铜导线的工作温度超过,允许应力降低。所以在引伸率为 0.2% 时允许应力应是 250°C 下的许用值。

研究变压器允许温升时,还有几点要引起注意:

a. 有载调压变压器中有载分接开关内的过渡电阻器,应使有载分接开关在连续操作下,电阻器对油温升不超过 350K 。

b. 做温升试验时,外部的热量不要倒流入变压器,如短接引线

电流密度太大就属这种情况的例子。

c. 可在绕组内埋设传感器, 靠光导纤维引出以测绕组热点温度, 这样, 便能测出变压器的超铭牌运行能力。

d. 高海拔处运行的变压器, 应注意高海拔处的散热困难, 但同时高海拔处的周围环境温度会下降, 二者有时可补偿。

e. 干式变压器的铁心温度会影响靠铁心柱绕组的温升。

f. 散热器内不能有剩气没有放出, 散热器上必须要有放气塞, 在温升试验前先放气。

g. 散热器的散热中心比发热中心要高为好。

h. 箱盖下不能有死油区。

i. 散热器或冷却器进入油箱中的油, 要能流入绕组, 不能在绕组外空间短路流通。

j. 温升试验用机组要有足够容量, 必要时可用电容器补偿。温升试验前后油中含气色谱分析是检测有无过热的检测手段, 但温升试验时间要足够长。也可用液相色谱分析检测糠醛含量来判断有无低温过热。

64. 变压器运行寿命是多少? 过负载运行有什么规定?

变压器的寿命取决于绝缘的老化, 而绝缘的老化又主要取决于运行的温度。油浸式变压器在额定负载下, 绕组平均温升为 65°C , 最热点温升为 78°C , 平均环境温度为 20°C , 则最热点温度为 98°C , 在这个温度下变压器可运行 30 年。变压器如果超铭牌容量运行, 则温升会升高, 于是寿命缩短。A 级绝缘变压器寿命是温度每增加 6°C , 寿命减少一半 (即所谓六度定则)。

超铭牌容量运行时间由绕组的最热点温度决定。

a. 正常超铭牌容量运行允许时间。小于 100MVA 的变压器允许有小于 1.5 倍额定电流值的偶发性超铭牌容量运行, 分接开关、套管等组件必须适合此要求。任意负载下过热点温升:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_w \left(\frac{1 + d\beta^2}{1 + d} \right)^2 + (\Delta\theta_c - \Delta\theta_w) \beta^2$$

式中 β —— 负载系数;

d ——负载损耗与空载损耗的比值,假定等于 5;

$\Delta\theta_c$ ——额定最热点温升,假定为 78℃;

$\Delta\theta_w$ ——额定油顶层温升。

$\Delta\theta_w$ 假定等于 55℃(自然循环)和 40℃(强迫循环);

x 假定等于 0.8(自然循环)和 0.9(强迫循环);

y 假定等于 0.9(自然循环)和 1.0(强迫循环);

这样,在不同最热点温度 $\theta_{max} = \Delta\theta_c + 20^\circ\text{C}$ 下,每天允许运行时间 t_1 为:

$\theta_{max}/^\circ\text{C}$	98	104	110	116	122	128	131.5
t_1/h	24	12	6	3	1.5	0.75	0.5

油浸式变压器风扇、油泵和水泵全部切除时,允许带额定负载运行时间 t_2 为:

风冷式	环境温度/℃	-15	-10	0	10	20	30	40
	t_2/h	60	40	16	10	5	3	1/6
强油循环风冷式和水冷式		容量为 125MVA 及以下, $t_2 = 20\text{min}$ 容量为 125MVA 以上, $t_2 = 10\text{min}$						

注:如油面温度尚未达到 80℃,可以继续运行到 80℃,但不应超过 1h。表中, h —— 小时, min —— 分钟。

b. 事故过负载的允许时间 t_3 (估计参考值)为

油浸式	超铭牌容量/%	30	45	60	75	100
	t_3/min	120	80	45	20	10
干式	超铭牌容量/%	20	30	40	50	60
	t_3/min	60	45	32	18	5

(八)运行与维护

65. 什么是变压器的零序阻抗？一般结法的变压器其零序阻抗值各是多少？

变压器运行时，一般有对称运行与不对称运行两类。不对称运行包括事故运行，如单相或两相短路，三相负载不对称等。最不对称是单相负载，配电变压器常有这类负载，低压为 yn 结法时，线与中点间单相负载就是不对称负载。

三相变压器与单相变压器组成的三相组的不对称三相运行情况与作为磁路的铁心结构、绕组的联结有关。

不对称运行条件包括瞬间故障（如单相接地）、瞬间干扰（如三相涌流具有不同的瞬时值）与不对称连续负载，这些不对称运行会引起：

a. 三相对称电压产生的瞬时或连续性损耗，包括绕组与铁心中损耗；

b. 由于瞬时或连续性的不对称负载电流，尤其通过中点的电流，会使电压的稳定性受到影响，如电压不对称、中点电压偏移，会产生漏磁及使铁心励磁。

为使变压器能适应不对称运行的要求，某些铁心结构与绕组联结组的配合是不能选用的，因此，必须对不对称运行作一些分析。

在研究不对称运行条件时，先假设：三相具有同步和正弦的电压，电流与三相具有等值的恒定阻抗或导纳相关联，用线性方程式求解，利用对称分量法进行计算。

将电压、电流与阻抗电压分解为正序、负序与零序三个分量。

正序电压与电流是指逆时针旋转的三个互差 120° 电气角的对称电压与电流分量，旋转顺序为 A、B、C，正常对称负载条件下具有这个正序分量。正序阻抗是正序电流的阻抗。

负序电压与电流是由不对称条件下建立起来的分量，对称运行无此分量，也是逆时针旋转的三个互差 120° 电气角的对称电压

与电流分量,但旋转顺序为 A、B、C。负序阻抗是负序电流的阻抗。

零序电压与电流是单相的分量,是不对称条件下建立起来的剩余分量。零序分量是同相位同幅值。零序阻抗是零序电流的阻抗。

正序分量与负序分量在每一瞬间之和都是零,但零序分量之和不是零,在每一相中的幅值为零序分量的三分之一。

经以上分解后,瞬时值不等于零的不对称量(相量图不对称的星形、三个相量不形成闭合的三角形结法)就可以计算了。

各个分量在实际变压器中的特点:

a. Y 结法(中点绝缘的星形联结,如 10kV 的高压绕组常采用这一结法),因为没有返回的接地导线或中点引出导线,故系统中两个线电流之和必须等于零,按对称分量分解时,只含有正序与负序电流分量,而无零序电流分量存在。

从系统流向角形联结的绕组电流也有这一特性。

b. YN 结法,中点接地时有流向地的中点电流或通过中点引出导线的电流(如配电系统的四线制),系统的相电流就含有零序分量电流;因零序电流分量在三个相中同相同幅值,零序电流分量为中点电流的三分之一。

四线制配电系统的线与地间有单相负载时就属于这一条件。对高压输变电系统而言,一般不带任何较大的中点负载电流,不对称负载一般是指线与线间的负载,可分解为含有负序电流分量,而无零序分量。

c. D 结法,三相角形联结绕组的三个线电压之和为零,由于它是闭合的联结,所以不会含有零序电压分量。但在角结绕组内可有零序循环电流、短路电流的流通,这些电流都是从另一绕组中感应过来的。另一绕组无零序电流分量,角结绕组内也无零序电流分量。有了角结绕组后,零序电流分量可以互相平衡、去磁,最后零序电流安匝可以平衡,降低零序阻抗值。

变压器和电抗器都是静止电器,所以具有正序阻抗等于负序

阻抗的特性,正序阻抗就是变压器的阻抗,因此正序阻抗可在出厂试验时测出,零序阻抗决定于磁路形式、绕组的联结法、绕组相对位置、漏磁的通道。正序阻抗相同的不同变压器可有不同的零序阻抗。如用优质碳素钢(沸腾钢)制成的波纹油箱与普通碳素钢(镇静钢)制成的平板油箱有不同的零序特性,油箱会使零序阻抗增大。有些情况甚至可有非线性的零序阻抗。零序阻抗测量为特殊试验。

对 Yyn 联结组而言,在不对称负载时,只有一侧(yn 侧)有零序电流分量,所以能在铁心中励磁,当铁心为不同结构时,就有不同的零序励磁阻抗(并联零序阻抗):

a. 三相三柱铁心。零序磁通一部分回路是空气,所以磁路的磁阻大,相当于励磁回路的并联零序励磁阻抗较为小些,约为 60% 左右。

b. 三相五柱铁心、三相壳式铁心、单相铁心组成的三相组铁心。零序磁通可在铁心中形成回路,所以磁阻小,并联零序励磁阻抗很大,有时达 10 000%,如零序磁通饱和,还会引起电流畸变。零序磁通感应的零序电压分量会使中点偏移。因此,对 Yyn 结法而言,不宜采用三相五柱铁心、三相壳式铁心。单相变压器也不能采用 Yyn 的三相组联结组。

对 YNd 联结组而言,如在不对称运行时,高压与低压绕组内都可含有零序电流分量,两者可达到安匝平衡,所以零序磁通很小,零序阻抗为串联阻抗,其值约等于 90% ~ 100% 的阻抗电压。铁心结构不影响此零序阻抗值。

下面列出一一般结法的零序阻抗值。

a. YNy, 三相三柱铁心, 高压绕组励磁时零序阻抗典型值为 50% ;

b. Yyn, 三相三柱铁心, 低压绕组励磁时零序阻抗典型值为 60% ;

c. YNyny, 三相三柱铁心, 高压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $a_1 Z_{12}$, a_1 为系数, $0.8 < a_1 < 1$, Z_{12} 为高压与中压间阻抗电压;

d. YNyny, 三相三柱铁心, 中压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $a_2 Z_{12}$, a_2 为系数, $a_1 < a_2 < 1$ 。

e. YNyny, 三相五柱铁心, 高压绕组与中压绕组励磁时, 零序阻抗典型值都是 Z_{12} 。但这种接法的高压与中压中点必须同时接地, 否则, 零序电流分量无法互相平衡。

f. YNd, 三相三柱铁心, 高压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $a_1 Z_{12}$ 。

g. YNd, 三相五柱铁心, 高压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 Z_{12} 。

h. Dyn, 三相三柱铁心, 低压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $a_2 Z_{12}$ 。

i. Dyn, 三相五柱铁心, 低压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 Z_{12} 。

j. YNynd, 三相三柱铁心, 高压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $a_1(Z_1 + Z_2 \parallel Z_3)$, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为高压、中压、低压单一绕组阻抗, 如 $Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{10} - Z_{20})$, $Z_2 \parallel Z_3$ 表示 Z_2 与 Z_3 的并联值, $Z_2 \parallel Z_3 = \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}$ 。中压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为: $a_2(Z_2 + Z_1 \parallel Z_3)$ 。

k. YNynd, 三相五柱铁心, 高压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $Z_1 + Z_2 \parallel Z_3$ 。中压绕组励磁时, 零序阻抗典型值为 $Z_2 + Z_1 \parallel Z_3$ 。

以上典型值中 a_1 、 a_2 是绕组相对位置的系数, 励磁绕组靠近心柱时系数接近于 1。

这里还应注意: 零序励磁并联阻抗与对称运行时励磁阻抗的概念是不同的。

当高压与低压绕组中都有零序电流分量时零序励磁并联阻抗较小, 而励磁电流始终存在, 是电压的函数, 为非线性, 因此励磁阻抗也是非线性值。

66. 变压器并联运行的条件是什么? 不符合条件时能否并联运行?

几台变压器一二次绕组的端子各自分别并联的运行称并联运

行。此时,必须满足以下三个条件。

表 66—1 三相变压器同组联结组的端子变换法

组类	组别	相位移 / °	联结组合	极性	线端排列	组类	组别	相位移 / °	联结组合	极性	线端排列
偶数组 I	0	0	Yy Dd Dz	相 同	A、B、C a、b、c	奇数组 III	11	330	Yd	相 同	A、B、C a、b、c
	4	120			A、B、C c、a、b		3	90	D [*] y		A、B、C c、a、b
	8	240			A、B、C b、c、a		7	210	Yz		A、B、C b、c、a
偶数组 II	6	180	Yy Dd Dz	相 反	A、B、C a、b、c	奇数组 IV	5	150	Yd	相 反	A、B、C a、b、c
	10	300			A、B、C c、a、b		9	270	D [*] y		A、B、C c、a、b
	2	60			A、B、C b、c、a		1	30	Yz		A、B、C b、c、a

注: * 此处 D 形结线为左行结线,其余 D、d、z 形结线均为右行结线。

a. 联结组别相同。联结组别不相同,各变压器二次电压相位不同,起码有 30° 的相位移。此相位差将在并联的变压器间产生循环电流,这是不允许的,所以各并联变压器的组别必须相同。

但是,组别不同的变压器在一定条件下可以改变其线端排列顺序而使其组别相同,再进行并联运行。联结的组别有 12 种,见第(五)节,它们可以分成四组:

偶数组 I : 0、4、8; 偶数组 II : 6、10、2;

奇数组 III : 11、3、7; 奇数组 IV : 5、9、1。

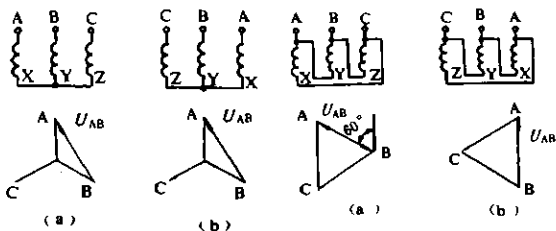
如表 66—1 所示,只改变低压(或高压)端子的排列顺序,则低压

(或高压)相位移 120° ,以相差 4 小时改变组别。这样,可以在同一组中使联结组别变换,组别变换情况为:

偶数组 I: $\overline{1-0 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 1}$; 偶数组 II: $\overline{1-6 \rightarrow 10 \rightarrow 2 \rightarrow 1}$;
奇数组 III: $\overline{1-11 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 1}$; 奇数组 IV: $\overline{1-5 \rightarrow 9 \rightarrow 1 \rightarrow 1}$ 。

要在不同组中变换,就需使高、低压端子同时对应地改变。由于电源的相序不变,对于 Y 形结线对调两个相别,电压相量图是不变的,如图 66—1 所示;对于 D(Z)形结线对调两个相别,原来是右行结线的均变成左行结线,左行结线的线电压比右行结线的线电压顺时针移动 60° ,以相差 2 小时改变组别,如图 66—2 所示。

因此,在偶数组中,高、低压对应改变两个相别,对于 Y_y 组合,电压相量图不变,组别不变;对于 D_d 和 D_z 组合,高、低压电压相量同时顺(或反)时针移动 60° ,组别也不变。在奇数组中, Y_d 、 Y_z 三个组合中,只有一侧为 D 或 Z 形结线,当对应改变两个相别时,电压相量只有一侧移动 60° ,组别必有 2 小时的改变,其组别变换情况对于 Y_d 和 Y_z 组合:



(a) 线端排列 A、B、C

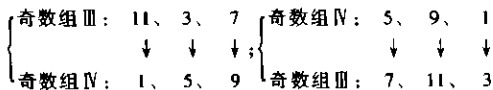
(b) 线端排列 C、B、A

图 66—1 Y 形结线对调两个相别时的联结图和电压相量图

(a) 线端排列 A、B、C

(b) 线端排列 C、B、A

图 66—2 D 形结线对调两个相别时的联结图和电压相量图



总之,在 I ~ IV 各组中,均能在各自组内变换成同一组别;在 III、IV 两奇数组间也可变成相应的组别,以进行并联运行;但 I、II 偶数组间以及偶数和奇数组间均不能变换组别。

b. 额定电压比相同。如果并联运行的各变压器额定电压比不同,二次电压相量间必有电位差引起循环电流,所以不能并联运行;若额定电压比相同,实际电压比在允许偏差范围内($\pm 1\%$ 内),引起的循环电流很小,故可以并联运行。另外,调压范围与每级电压也要相同。

但是,电压比相同而额定电压不一样,如为 3.0kV 与 3.3kV 时,也产生循环电流,所以额定电压不相同的变压器不能并联运行。

c. 额定阻抗电压相同。阻抗电压允许偏差在规定范围内,其实际值是不可能保持相同的,所以即使额定阻抗电压不相同,而实际值又相近(小者正偏差,大者负偏差)的变压器也可并联运行。并联运行变压器所分担的负载与阻抗电压成反比。还应注意极限分接位置阻抗电压也要相同。

67. 三绕组变压器运行的特点是什么?

三绕组变压器每相有三个在电气上为独立的相绕组,有三种不同电压,可用来连接三个不同电压的电网,以代替两台双绕组变压器。

三绕组中每个绕组的容量由运行时的负载分配而定的,负载轻的绕组容量可以小些,以节省材料。标准规定的各绕组的容量见题 3。

三绕组降压变压器的绕组排列方式是这样的(参见题 28),由里到外为:低压绕组 D、中压绕组 Z 和高压绕组 G。高、低压绕组间漏磁空道最大,高、中压绕组间次之,中、低压绕组间最小,因此 110kV 级三绕组变压器对应的阻抗电压通常为 $U_{GD} = 17\%$, $U_{GZ} =$

10.5%, $U_{zd} = 6\%$ 。由于电能主要是由高压向中压传输的,这样的阻抗电压较合理。

三绕组升压变压器的绕组排列为:低压居中,中压在最里面,高压在外面。因此,110kV级三绕组变压器的一般阻抗电压对应为 $U_{cd} = 10.5\%$, $U_{cz} = 17\%$, $U_{zd} = 6\%$ 。由于电能是由低压向高压和中压传输的,其间阻抗电压小是合理的。

68. 变压器过励磁是怎样产生的?它对变压器有什么危害?

变压器过励磁是设计、制造与运行中常遇到的现象。产生过励磁的原因很多,主要为:

a. 铁心结构上原因,目前都采用冷轧晶粒取向硅钢片作为铁心导磁材料,铁心为全斜 45° 接缝的叠片方式,接缝分两处错开并有一搭接距离。在搭接处的截面虽增大了 $\sqrt{2}$ 倍,但有效厚度却少了 $\frac{1}{2}$,故接缝处实际截面还是小了 $\sqrt{2}$,故在接缝处有过励磁,磁通密度大了 $\sqrt{2}$ 倍。因此目前在发展阶梯式接缝,即接缝在六处错开,这样,有效厚度可保持 $\frac{5}{6}$,实际面积是增加了 $\frac{5\sqrt{2}}{6} = 1.18$ 。作为过渡措施,接缝在三处错开,这是因阶梯式接缝需改变剪切线的条件。

b. 恒磁通调压的变压器带有负载时,为保持不同负载下的输出电压为恒定值就必须补偿阻抗压降,必须通过分接位置的变换或增加外施电压。当外施电压大于分接电压时或增加外施电压时会产生过励磁。

c. 自耦变压器采用中点调压方式时,在铁心中有过励磁现象。自耦变压器的电压比越接近,过励磁越严重。一般是电压比大于等于2时的自耦变压器才能采用中点调压方式。

d. 空载变压器在合闸瞬间的过渡过程有过励磁。当铁心中有剩磁通,且在外施电压过零时的瞬间合闸,则过励磁最大,是最不利的空载合闸状态。这是变压器固有特性所引起的瞬时过励磁现象。当 $f = 50\text{Hz}$ 时,在 0.01s 内磁通达最大值。

现正发展电子型电压达峰值时合闸的断路器,以减少合闸瞬间过励磁。

e. 三相三柱式铁心, Yyn0 结法变压器, 由于负载不平衡会引起中点电压浮动, 此时铁心中也会过励磁。

f. 发电机用负载时会在变压器与发电机联结端子上出现过电压, 并引起过励磁。当 $f = 50\text{Hz}$ 时, 磁通可在 0.02s 内达最大值。

g. 在中点接地系统中, 在单相接地故障的异常工况下, 健全相的相电压会增加, 110kV 及以上系统, 此电压会增加 1.3 倍。故障期间, 铁心会过励磁。

h. 当电网频率低于额定频率时, 当感性电压不变时, 频率的降低会引起铁心中磁通的增加, 会有过励磁。

铁心中产生过励磁时会影响:

a. 空载损耗会增加;

b. 变压器的噪声水平将增加;

c. 空载电流中高次谐波含量增加;

d. 涌流会大于空载电流, 引起较大的机械力;

e. 过励磁时杂散磁通会离开主磁路引起结构件中附加损耗;

f. 铁心的温升会增加;

g. 过励磁的同时还有过电压, 绝缘结构应能承受住这一过电压。

因此, 在 IEC 76—1 标准上对过励磁能力有一规定, 在设计时要保证变压器能具有一定的过励磁能力。

在运行中, 要保持一定的过励磁水平。

如不具有过励磁能力或承受较大过励磁能力, 会影响变压器的安全运行。

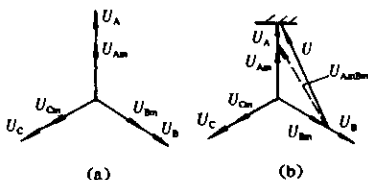
在制造中常采用高频机组作电源是为了铁心中磁通密度为额定值, 如感应试验时一般要采用 100Hz 及以上频率的电源。

69. 自耦变压器为什么只能运行在中点有效接地系统中? 它有哪些运行方式?

自耦变压器是经济的, 且最适宜用作联络变压器, 其正常运行

时的电压相量图见图 69—1(a)。一般情况下,不自耦结线的第三绕组(低压绕组),其容量不超过自耦变压器的电磁容量,通常为额定容量的 50%(当电压比为 2 时,电磁容量等于 50%额定容量)。

自耦变压器中性点如不接地,当高压电网上发生单相接地故障时,在其中压绕组上出现过电压。由图 69—1(b)可见,在 A 相接地时中压 B_m 相对地电压 U 比中压正常线电压 U_{AmBm} 还大。高、中压



(a)正常运行时 (b)A相接地故障时

图 69—1 自耦变压器电压相量图

的电压比越大,过电压倍数越大,如果电压比等于 2,则 $U/U_{Bm} = 2.64$ 。因此自耦变压器的中性点在运行时必须接地,所以只能运行在中点有效接地系统中,即只能运行在 110kV 及以上的电网中。

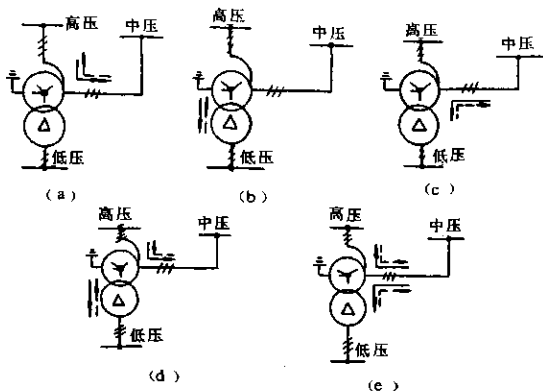
自耦变压器常见的运行方式有以下五种(图 69—2),不同的运行方式所允许的传输容量是不一样的。

a. 高一中运行。这种运行方式的自耦变压器原则上可以按照额定容量运行,但对于升压自耦变压器,由于低压绕组在高、中压绕组之间,低压绕组内始终有附加损耗。

b. 高一低或中—低运行。这两种运行方式所传输的容量由低压绕组容量决定,即所传输的容量不得大于低压绕组的额定容量。

c. 高一中、低运行。这种运行方式最大传输容量不超过高压绕组的额定容量。如果高、低压侧负载功率因数不一样,传输容量可根据功率因数决定。

d. 中—高、低运行。这种运行方式的中压绕组(即公共绕组)内最大允许流过的电流不能超过该绕组的额定电流。当高、低压侧负载功率因数均为 1,如果自耦变压器向低压传输额定电磁容量,则不能向高压传输容量;如果向低压传输容量小于额定电磁容



(a)高一中运行 (b)高一低运行 (c)中一低运行

(d)高一中、低运行 (e)中一高、低运行

图 69-2 自耦变压器的运行方式

量,则可以向高压传输容量。

70. 什么是额定容量? 什么是负载能力?

额定容量是指主分接下视在功率的惯用值。在变压器铭牌上规定的容量就是额定容量,它是指分接开关位于主分接,是额定空载电压、额定电流与相应的相系数的乘积。对三相变压器而言,额定容量等于 $\sqrt{3} \times$ 额定空载线电压 \times 额定线电流,额定容量一般以kVA或MVA表示。额定容量是在规定的整个正常使用寿命期间,如30年,所能连续输出的最大容量。而实际输出容量为有负载时的电压(感性负载时,负载时电压小于额定空载电压)、额定电流与相应相系数的乘积。

对无载调压变压器而言,在-5%的分接位置时,可输出额定容量,低于-5%的分接位置时要降低额定输出容量。

对有载调压变压器而言,一般制造厂都规定在-10%分接位

置时仍可输出额定容量,低于-10%分接位置时降低额定输出容量。

以上都是对恒磁通调压电力变压器或配电变压器而言。对变磁通调压电炉变压器或整流变压器来说,额定容量是指最大输出容量,多数分接位置下输出容量都小于额定容量。

在实际运行时,变压器还有一个负载能力,额定容量决不是变压器的实际负载能力。负载能力是指变压器仅仅在所确认的一定时间间隔内所能够输出的实际容量值。这个容量值是由变压器在所认定的时间间隔内的运行条件而决定,或者由是否损害其正常使用寿命,是否增加其绝缘的自然老化,是否危及变压器的安全运行而决定。负载能力可以超过额定容量,但是负载能力有一上限值,即绕组热点温度不能超过 140°C ,超过 140°C 时会使得绕组热点温度附近的油分解出气体,影响安全运行,绕组热点温度虽未超过 140°C ,油温超过 115°C 时,由于热和电的复合作用,会影响油的许用场强。绕组热点温度超过 98°C 时会影响变压器的正常使用寿命。

当变压器的实际负载能力超过额定容量时,会牺牲变压器的使用寿命。所牺牲的使用寿命,要用低于额定容量运行时所增加的寿命来补偿。在急救超铭牌容量运行时,负载损耗要比额定负载损耗高得多。负载下输出电压要比额定空载电压低得多,效率也差。

自耦变压器的额定容量是指通过容量,真正结构容量比额定容量小得多。自耦变压器的输出容量中仅有一部分是属于电磁感应过去的容量,一部分输出容量是直接通过的。

三绕组变压器的额定容量一般以百分数表示每个绕组的额定容量,如 $100\%/100\%/100\%$ 是指每个绕组都能达到额定容量, $100\%/100\%/60\%$ 是指低压绕组只能达到 60% 额定容量。

自耦变压器的低压绕组一般都达不到额定容量,如以 $100\%/100\%/50\%$ 表示时,低压绕组只能达到 50% 额定容量。

另外,当一台变压器具有几种冷却方式时,额定容量是指最大

容量,改变冷却方式时要改变输出容量。

一台变压器有三种不同冷却工况时,如强迫油循环风冷、油浸风冷、油浸自然冷却方式三种不同冷却工况运行的变压器,相应于每种冷却方式的额定容量以百分数表示时,为100%/80%/60%。强迫油循环风冷时可输出100%额定容量,当冷却泵停运时为油浸风冷下可输出80%额定容量,当冷却泵与冷却风扇都停运时为油浸自冷下仅可输出60%额定容量。不同冷却工况下相应的输出容量与冷却装置结构有关,某些结构的冷却器只能在强迫油循环风冷下运行,泵停用时要较短时间内将输出容量降为零。100%/80%/60%三种不同冷却方式的容量是指散热器式冷却装置加泵与风扇构成。

三种不同冷却工况运行的变压器可具有三个额定容量,但性能参数都以最大额定容量为基准。每种冷却方式的额定容量都以温升不超过规定限值为基准。

71. 变压器有哪些安全保护装置?它们有什么作用?

变压器的安全保护装置除气体继电器外,还有油位计、温度计、安全气道(现在很少采用)、压力释放阀、蝶阀、活门和阀门等。

(1) 油位计

油浸式变压器运行时,油箱内的变压器油由于油温的变化,其体积也随之变化。为了保证变压器的安全运行,常在变压器的储油柜上或变压器箱壁上装有油位计,俗称油表,用以监视油位的变化。

变压器油位计一般有三种:管式油位计、板式油位计和铁磁式油位计。

管式油位计结构如图71-1(a)、(b)所示。大型管式油位计其两端为带孔的座,座间连接一圆形玻璃管,管内放一红色玻璃球,以显示油位。小型管式油位计的管中无玻璃球。

板式油位计安装在油箱箱壁上,如图71-1(c)所示,以油位计的反光镜显示油位,故不明显,多用在矿用变压器上。

管式和板式油位计常年受阳光照射,加速了变压器油的老

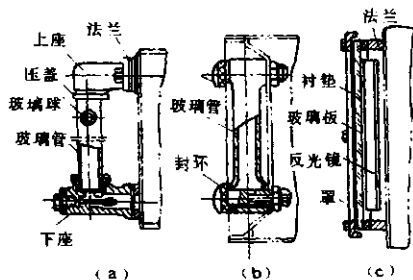


图 71-1 管式油位计(a)、(b)和板式油位计(c)

化,且易于损坏。因此,全密封式储油柜采用的铁磁式油位计如图 71-2 所示。它可以避免管式和板式油位计的缺点。

铁磁式油位计以全密封储油柜中的密封隔膜为感受元件。其连杆与隔膜上稳定板的纹链相连,故连杆随隔膜作垂直升降运动。而连杆

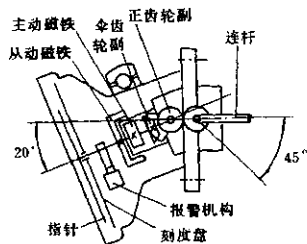


图 71-2 UZF 型铁磁式油位计示意图

另一端又连接表体传动机构,把油面的上下线位移变成连杆绕固定轴的角位移,再通过齿轮副、磁偶(一对磁铁)等传动机构使指针转动,从而间接显示出油位。另有一种浮球式传动机构,型号为 UZB。铁磁式油位计还带有最高和最低油位报警指示装置。

(2)安全气道

安全气道在供电部门俗称防爆筒。这是一种老的保护装置,新设计的变压器已很少采用。当变压器内部发生故障时,大量的气体可冲破安全气道膜(玻璃板),起到保护变压器的作用,如图 71—3 所示。

与普通储油柜配合使用的安全气道上部空间有一联管与储油柜相通,使储油柜和安全气道空间都处于大气压力下,而不使它们之间有压差,以防安全气道误动作。

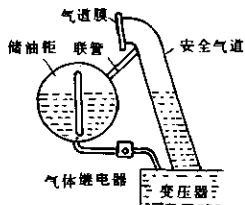


图 71—3 安全气道的安装情况

与隔膜密封式储油柜配合使用的安全气道

和储油柜间也要有联管,使隔膜上部与安全气道空间也同处于同一大气压力下。一般安全气道不宜单独接吸湿器。这样,安全气道不能密封,其中变压器油仍然和大气接触。

(3)压力释放阀

正因为安全气道中变压器油和大气接触,不能满足全密封式变压器的要求,必须采用压力释放阀。压力释放阀安装在变压器油箱盖上或侧壁上。变压器一旦发生故障,油箱内部压力增加到一定值时,由于油的不可压缩性,压力传到压力释放阀而使它动作,将油箱中的压力释放出来,从而保护油箱。压力消失后,压力释放阀又保持密封。

YSF-55 型压力释放阀是由阀座、护盖、弹簧、膜盘、标志杆等组成,并装有接线盒,如图 71—4 所示。当压力释放阀阀腔内的压力达到动作压力时,压力顶起膜盘压缩弹簧使压力释放,同时触动开关接通电源发出信号,动作标志杆升起并突出护盖,表明压力释放阀已经动作过了。当油箱中压力减小到关闭压力时,弹簧带

动膜盘复位密封。由于标志杆仍然留在动作后的位置上,变压器故障排除后由手动复位。

YSF-55型压力释放阀的喷油口径为 $\Phi 132\text{mm}$;动作压力为 $55 \pm 3\text{kPa}$;关闭压力 $> 29.4\text{kPa}$;密封压力 $> 33\text{kPa}$;开启时间不大于 2ms (毫秒)。

喷油口径还有 $\Phi 25$ 、 $\Phi 50$ 、 $\Phi 80$ 三种,动作压力有 15 、 25 、 35 、 55 、 70 、 85kPa 六种可供选用。

为保证阀内承受的静油压力小于阀的关闭压力,储油柜最高油面至压力释放阀的顶部距离不宜太大,一般要小于 2m 。

压力释放阀可直接安装在变压器油箱的平盖、斜盖、升高座或箱壁上,但最大倾斜角度不应大于 45° ,以 $15^\circ \sim 20^\circ$ 为好,为防止喷出的油四处溅飞,可经导流罩向指定方向喷流。变压器装两个压力释放阀时,最好将其安装在油箱长轴的两端。压力释放阀还可带有机电或电气信号装置。

(4) 蝶阀、活门与放气塞

蝶阀是变压器常用的板式阀门。它安装在变压器箱体与散热器、储油柜之间,以便于这些组件的安装与拆卸,其结构如图71-5所示。常用规格有 $\Phi 50$ 、 $\Phi 80$ 、 $\Phi 100$ 、 $\Phi 125$ 与 $\Phi 150$ 五种。

使用时先将罩拧开,用扳手拧动其轴的上端方头,

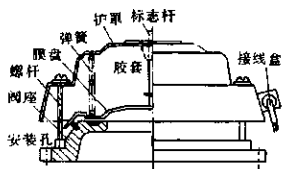


图 71-4 压力释放阀结构

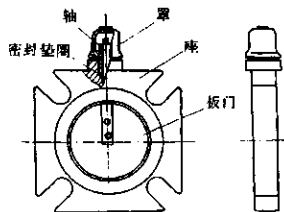


图 71-5 板式蝶阀的结构

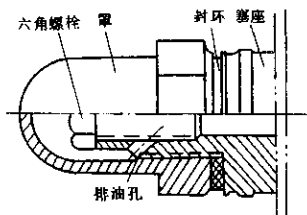


图 71—6 油样活门之一

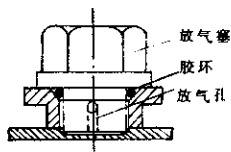


图 71—7 放气塞之一

板门即随之旋开,方头上有一条红色刻线,以示板门开闭的位置。

活门安装在变压器下部,主要用来取油样,小容量变压器还可兼作放油用,其结构之一如图 71—6 所示。使用时先将罩拧开,然后徐徐拧动塞子,使油能从塞座的小孔中放出为止。大容量变压器还可选用闸阀式活门,包括 $\phi 25$ 、 $\phi 50$ 两种规格。

变压器在注油时放气是很重要的,一般是采用放气塞放气。放气塞的结构之一如图 71—7 所示。放气塞内有中心孔和水平孔(放气孔),所以放气时只要拧出一段放气塞,气体就能排出,待气排完而冒出油时应立刻拧紧放气塞。

72. 气体继电器是怎样动作的? 使用时应注意什么?

气体继电器是安装在油浸式变压器(800kVA 及以上)箱盖与储油柜的联管上(参见图 71—3),作内部故障的主要安全保护装置。在内部故障产生的气体或油流作用下,接通信号或跳闸回路,使有关装置发出信号或使变压器从电网中切除。

最初的气体继电器是浮筒(金属或玻璃的)式水银接点结构,如图 72—1 所示。当气体继电器中气体达到一定容积后,油面下降,上浮筒下沉,上水银接点闭合,拉通报警信号回路;当有大量气体突然发生时,油流加速,下浮筒倾倒,下水银接点闭合,接通跳闸回路,切除变压器。

气体继电器与联管连接时采用蝶阀,以便于拆卸和安装。当

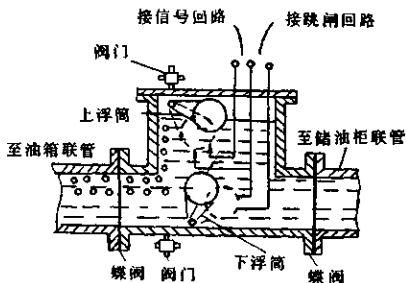


图 72—1 浮筒式气体继电器及其安装形式

储油柜不能承受真空内力时,应用真空阀门将气体继电器与储油柜隔离。

为了提高气体继电器的可靠性,现在采用挡板式多磁力接点结构,如图 72—2 所示(管径为 $\phi 80$ 、 $\phi 50$ 、 $\phi 25$ 三种)。当气体继电器中气体达到一定容积后,开口杯下沉,上磁铁使上干簧接点闭合,接通信号回路;当油流冲动挡板后,下磁铁使下干簧接点闭合,接通跳闸回路。所有干簧接点应有防地震能力。

· 挡板式气体继电器的整定:

改变重锤位置,可调节信号接点动作的气体容积($250 \sim 300 \text{cm}^3$);松动调节杆,改变弹簧长度,可以调整跳闸接点动作的油流速度($\phi 80$ 型为 $0.7 \sim 1.5 \text{m/s}$,出厂整定为 1.0m/s);转动螺杆,可以调节下磁铁与下干簧接点的距离($0.5 \sim 1.0 \text{mm}$)。

挡板式气体继电器的安装检查:

先取出芯子,拆去绑扎带,检查所有紧固螺钉是否松动,开口杯及挡板是否灵活,接点是否可靠开闭等。回装时外壳内必须用变压器油洗净;从嘴子处打进空气,可以检查信号接点动作的可靠性;将罩拧下,按动波纹管,通过控针可以检查跳闸接点的可靠性。

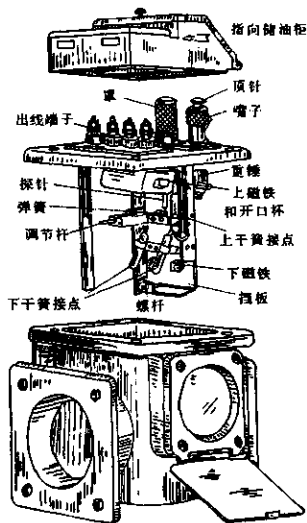


图 72—2 QJ1—30 型挡板式气体继电器

安装完毕后打开蝶阀(或真空阀)充油,打开嘴子处的帽,慢慢松动顶针排气,直至冒油为止。

这种气体继电器的干簧接点不要随便拆卸,其根部引线不得任意弯折。

73. LS-80 型气体继电器流速试验台是怎样使用的?

LS-80 型气体继电器流速试验台结构如图 73—1 所示。该流速试验台可进行流速、气体容积、密封性三次试验。

工作时由潜油泵叶轮旋转产生压力并保持在储压箱中,通过

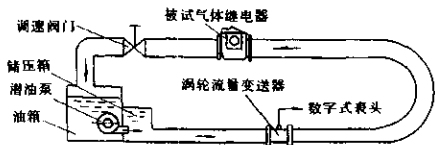


图 73—1 LS-80 型气体继电器流速试验台结构示意图

调速阀门的调节，达到改变流速的目的。流速是用平均流速表示的，故采用涡轮流量变送器进行测量。它通过机—电转换方式，把流速量转换成脉冲信号，通过数字式表头显示出来，读数方便。一般要求在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 下测量流速，在其他温度下测量要校正。

该试验台还附带 $\phi 50$ 口径的管段，可试 QJ1-50 型气体继电器。但门控系数需重新设定，利用说明书上给定的公式，算得的数值乘以 $1/2$ 为门控系数，而流速显示值则要乘以 2，其结果才是实际流速值。流速试验台刚开泵时，管道会发出“咋咋”的响声。这是由于高速油流通过狭小的闸口所造成的“气穴”现象，不是故障。

流速台工作介质是变压器油，变压器油必须清洁，它利用流速台自身的压力进行过滤，还可把管道中、油箱壁上的浮锈冲洗掉。具体做法是打开流速台储压箱盖板，用 $\phi 4$ 的铁丝弯成方框安在排管口处，并用铁丝支好；框上先绷上一个用铜丝钉了滤纸的 80 目铜网；然后盖好储压箱盖，把调速阀门开到最大位置，开动两台潜油泵使油回流，一小时后重换滤纸，一般换 4~5 次滤纸即可。

流速台的常见故障和故障处理方法如表 73—1 所示。

表 73—1 流速台的常见故障及处理方法

常见故障的现象	原因	排除方法
数码管不亮	电源断线, 保险丝断	焊好电源线, 换保险丝
自校时, 显示值为零	石英晶体损坏	换石英晶体
显示数值不稳定, 且出现大于 2.50m/s 的数值; 或管道中油不流动, 但仍有数值显示	接地不良, 屏蔽不好	接好地线, 接好屏蔽线
自校正常, 测试时无数值	涡轮变送器断线	焊好
调速阀门未动, 流速值在一个较小的范围内变化(不超过最大流速值)	涡轮流量计的涡轮有发卡现象	送流量计制造厂修理并重新标定
调速阀门开到最大, 流速低于 1.5m/s, 储压箱最大压力小于 0.7kg/cm ²	潜油泵电机反转	交换潜油泵电机的任意两根相线

74. 变压器有哪些测温装置? 它们有什么作用?

测温装置也就是热保护装置。变压器的寿命取决于变压器的运行温度, 因而重要的问题是监视变压器的油温和绕组温度(绕组温度的监视见题 57)。

为了测量油温一般采用三种温度计。在箱盖上一一般都放置酒精玻璃温度计, 以观察油面温度。玻璃温度计较准确, 但观察不方便, 一定要爬到箱盖附近才能观察到温度值, 尤其是运行中的变压器, 在观察温度时还要注意安全, 避免触电。为了便于观察, 在变压器上还装有信号温度计, 但信号温度计的准确度不如玻璃温度计高。为了能远距离观察油面温度, 在箱盖上还装有电阻式温度计。

信号温度计的结构如图 74—1 所示, 主要包括测温包、压力计和连接两者的毛细管, 也称压力式温度计。它构成一个密闭系统, 系统内充氯甲烷(或丙酮、乙醚)蒸气或饱和液体。当测温包放

在变压器顶盖的一个专用的并灌满变压器油的温度计座内时,随油温变化,氯甲烷的饱和压力增大,则装在油箱外壁的压力计指针偏转,指出温度数值。这种温度计在整定的指针刻度限值位置时,能使电接点把电路接通,发出信号或开启风扇。

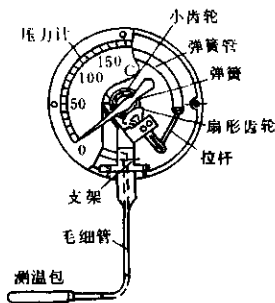


图 74—1 信号温度计结构

电阻温度计是供远方监视变压器上层油温用的。它由铜电阻元件(WGZ)和比率计(ELZ)组成。铜电阻元件用绝缘材料包扎好后放在变压器顶盖的温度计座内;而比率计则安装在电厂或变电所的控制盘上。

ELZ 是使用桥式电路的比率计,如图 74—2 所示。其主要部分是比率计的结构部分,即测量用的电流线圈 x_1 和 x_2 ,由于两个线圈电流比不同,而使指针转动。其他部分是电桥的各个元件,如:

R_1 、 R_2 、 R_3 ($R_2 = R_3$) —— 固定桥臂;

R_4 —— 决定仪表测量范围的电阻;

R_5 —— 补偿 x_1 和 x_2 的电阻值受温度影响的电阻;

R_p —— 平衡电阻,用于消除比率计至铜电阻元件连接导线影响测量值的电阻;

R_6 —— 检查仪表准确性的电阻。

当铜电阻元件的电阻值 R_1 (未知桥臂) 随油温而变化时,破坏电桥平衡, x_1 和 x_2 线圈的电流比变化,指针就可直接指出变压器油温。

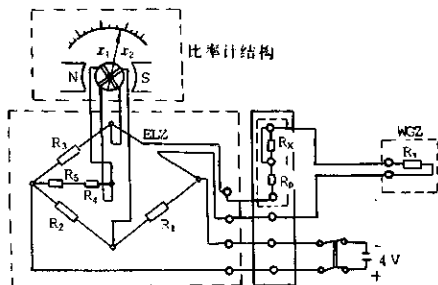


图 74—2 ELZ 型比率计的电阻温度计

75. 变压器有哪些油保护装置？吸湿器和净油器有什么作用？

对变压器油曾用过的保护装置有吸湿器、净油器和储油柜等。它们都是防止油老化的装置，在变压器上的安装位置如图 75—1 所示。

(1) 吸湿器

吸湿器通常与储油柜配合使用，GB 1094.1—1996《电力变压器》国家标准中仍允许使用的一种自由呼吸式储油柜系统吸湿器的内部有吸收剂。吸收剂可以采用硅胶或活性氧化铝。下部带有盛油器，用以清除吸入空气中的杂质和水分，如图 75—2 所示。

吸湿器在安装时应先把运输的盖换下，以与联管法兰相连；后把下罩上的密封垫拆除，以便于空气进入，并在罩内放入油进行油封。

吸收剂为具有强吸附力的球状、棒状或不规则块状的多孔性固体物质。吸收剂种类较多，诸如硅胶（粗、细孔硅胶，粗、细孔球形硅胶或指示剂蓝胶）、活性氧化铝和分子筛等。一般选用硅胶 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 和活性氧化铝 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。

吸收剂的再生采用烘焙方法，利用电热炉、干燥炉和热风炉等

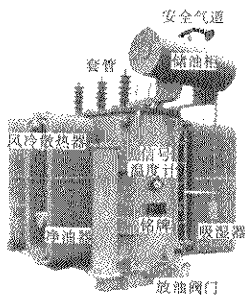


图 75—1 变压器的组件

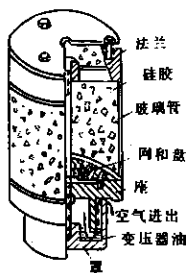


图 75—2 吸湿器的结构

均可。硅胶当其吸附水蒸气或其他有机物饱和后，可加热脱水再生，重复使用，但是每次再生后吸附效率略有降低。不同种类的硅胶，其烘焙温度为：粗孔硅胶 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ ；细孔硅胶 $\leq 250^{\circ}\text{C}$ ；蓝胶硅胶 $\leq 120^{\circ}\text{C}$ 。由于硅胶导热系数甚小，故烘焙时硅胶堆积厚度以 $20 \sim 50\text{mm}$ 为宜。烘焙至硅胶含水量不大于 2% 即可（色泽恢复原色或黄褐色）。

活性氧化铝再生时，是用电热炉把吸附饱和的活性氧化铝加温至 $450 \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，并严格控制温度不高于 500°C ，直至完全恢复白色为止。

(2) 净油器

油浸式变压器用的净油器也是一个充有吸收剂的容器，但是吸收剂在运行时不能变成粉末状。当变压器油流经吸收剂时，油中所带的水分、游离酸和加速绝缘老化的氧化物等皆被吸收，借此使变压器油得到连续再生。净油器可分为两大类：温差环流净油器和强制环流净油器。

a. 温差环流净油器。温差环流净油器设置在油浸自冷及油浸风冷变压器油箱壁上。如图 75—3 的净油器壳体是一个焊接的圆筒，筒中填充吸收剂。这种净油器应具有较大的循环压力及

油循环量,因此要求净油器联管中心距较大。

b. 强制环流净油器。强制环流净油器有强迫油循环的油泵,应用于强油循环冷却的变压器上。一般并联在有压管路上成为油循环支路。强油风冷变压器的净油器吊装在风冷却器的下端,强油水冷变压器的净油器附着于冷却器的筒体侧壁上。

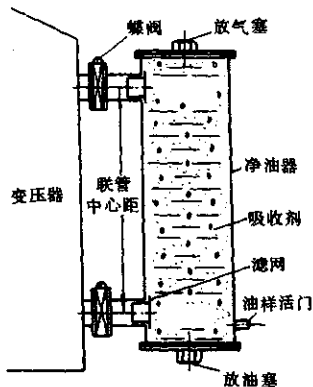


图 75—3 温差环流净油器

图 75—4 所示为吊装在强油风冷却器下端的强制环流净油器,油流方向如图上箭头所示。值得注意的是:由于此净油器只在

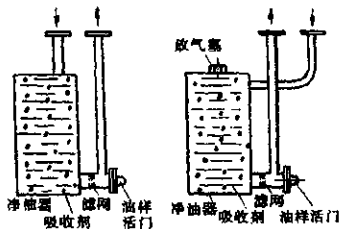


图 75—4 强油风冷却器的强制环流净油器及其规定的油流方向

出口处装有滤网,这就规定了油流方向,安装时不得相反。

至于附着于水冷却器侧壁的强制环流净油器,进出口均设有滤网,以防止吸收剂或其粉末等进入变压器,虽然油流方向可任意改变,但一般油是从净油器的上端进入,而由下端流出。

76. 储油柜有哪几种型式? 密封式储油柜安装时应注意什么?

变压器油温随着负载和周围气温的变化而变化。我国气温范围为 $-30 \sim +40^{\circ}\text{C}$, 油平均温升按 40°C , 则油温变化范围为 $40 + 40 - (-30) = 110^{\circ}\text{C}$, 油的膨胀系数为 0.0007 (每度), 所以油体积的变化为 $0.0007 \times 110 = 0.077 = 7.7\%$ 。目前,除容量很小的变压器外,都装设储油柜。储油柜还使变压器油与空气接触的油面相应地减小了,减缓了油的氧化。此外,由于储油柜中的油温较低,使凝露水或随气体进入柜中的水分绝大部分沉积到柜底部的集污盒中。

目前,储油柜有两种基本型式。一种是普通型储油柜,储油柜中不加装任何防油老化装置,其中油面通过吸湿器而和大气接触,存在着油的氧化问题;另一种是储油柜中加装了防油老化装置的密封式储油柜,柜中吊装有橡胶薄壁胶囊或半圆筒式橡胶隔膜。胶囊或隔膜紧贴附在油面上使油和空气隔离开来,从而防止了油的氧化。

胶囊式储油柜中胶囊内部与大气相通。它有两种结构型式。图 76—1 结构的油位计中的油和储油柜中的油是相通的,故油位计中的油氧化变劣(因油表与大气相通且受阳光的照射)会直接降低储油柜中的油质;图 76—2 结构的储油柜在油位计下端单独装一个油压袋,油压袋中的油与油位计相通仅供指示油位用。虽然油位计中油老化了,但不污染储油柜中的油,防油老化性能好。

隔膜式全密封储油柜如图 76—3 所示。隔膜周边压装在上下柜沿之间,隔膜内侧紧贴在油面上,外侧和大气相通。集聚在隔膜外部的凝露水可通过放水阀排出。这种储油柜采用连杆式铁磁油位计。储油柜下部有一个集气盒,变压器运行中油体积的膨胀和收缩都要经过集气盒使油进入或排出储油柜,而伴随油流中的

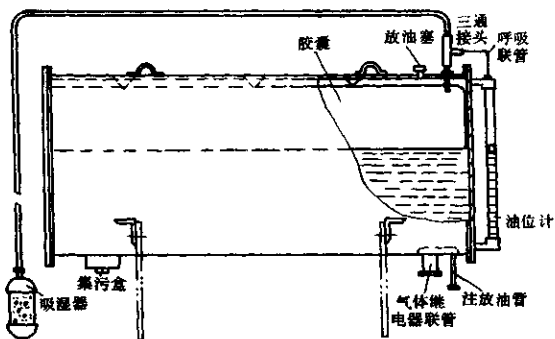


图 76—1 胶囊式储油柜的结构

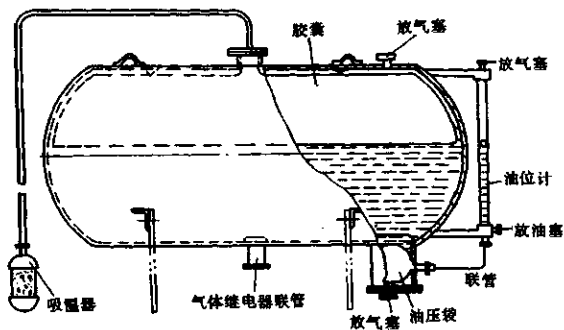


图 76—2 有油压袋的胶囊式储油柜的结构

气体被集聚在集气盒中,不能进入储油柜,从而可避免出现假油面。集气盒上的玻璃板视察窗可观察集气情况,其气体可通过排

气管端头的阀门放出,排气管可引至地面附近。这种储油柜的防油老化和便于安装等方面均优于胶囊式储油柜。

密封式储油柜的安装比普通式储油柜的安装要复杂得多,其程序如下。

胶囊式储油柜(如图 76—1 所示)的安装:

- a. 检查胶囊是否有损伤,清理干净后复装。
- b. 复装储油柜的附件,但油位计上端的呼吸管暂不复装。
- c. 待变压器真空注油完全结束后,复装储油柜与油箱间的联管和气体继电器,因为抽真空时储油柜与油箱是分开的,以免损伤储油柜和胶囊。然后,从油箱上的油门或储油柜上的注、放油管向储油柜中注油,此时应将储油柜上部的放气塞打开,待油从放气塞中溢出时停止注油,关闭放气塞,再从阀门放油至正常油面位置。也可以注至正常油位为止,而从三通接头向胶囊中充气,使之膨胀起来后再关闭放气塞。

d. 最后复装呼吸联管和吸湿器。

有油压袋的胶囊式储油柜(如图 76—2 所示)的安装:

- a. 检查胶囊是否有损伤,清理干净后复装。
- b. 复装其他附件,装好油压袋与油位计间的联管。
- c. 取下油位计顶端的放气塞和油压盒下部带放油塞的盖板。
- d. 用手压扁油压袋(手随着油的注入逐渐抬起),用漏斗从油位计顶端的放气塞孔缓慢地注油,直至注满油压袋并升至油位计中。
- e. 复装油压盒盖板并打开储油柜顶部的放气塞。
- f. 变压器真空注油完全结束后,复装气体继电器及其联管,从油箱上的油门注油,直至油从储油柜上的放气塞中溢出时(油位计的油也应从放气塞中溢出,否则应注油),停止注油并关闭放气塞。然后再从油门放油至油面降到正常位置为止。最后复装吸湿器和油位计的放气塞。

隔膜式全密封储油柜(如图 76—3 所示)的安装:

- a. 检查隔膜是否有损伤,清理干净后复装。

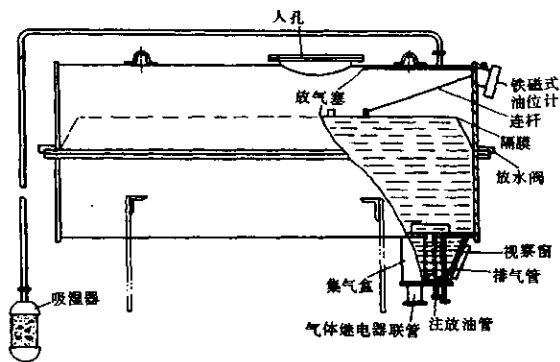


图 76—3 隔膜式全密封储油柜的结构

b. 复装储油柜附件, 复装油位计时将连杆从安装孔伸延至储油柜中, 用绳绑在柜顶内壁上的钩或环上, 暂不与隔膜连接。

c. 变压器真空注油完全结束后复装气体继电器及其联管(当气体继电器联管上有真空阀时, 则可先装气体继电器和联管, 抽真空时将其真空阀门关闭上), 从油箱上的油门或储油柜上的注、放油管注油, 注至正常油位为止。

d. 在变压器注满油静置结束时, 从人孔进入柜中打开隔膜上的放气塞并按压隔膜各处, 使隔膜内侧的气体完全排出, 然后关闭该放气塞。此时会有些油溢出, 应擦净后连接好连杆, 复装人孔盖板。

e. 装有 UZF 型连杆式铁磁油位计的变压器, 提供油位指示牌。牌上油位指示曲线 x 轴为油的温度, y 轴为表盘刻度数。调整油位时根据当时的油温, 参照此曲线即可确定油位计指针位置。

77. 怎样隔离潜油泵产生的金属末?

变压器的强油冷却的潜油泵有很多种, 如轴流式、盘式与一般

潜油泵,但它们会因磨损而产生金属粉末。该金属粉末如果进入变压器本体,后果是严重的。

潜油泵金属粉末是这样产生的:轴承磨损时内外圈将产生云母片状铁末;滚珠与保持架摩擦将产生针状铁末;电机转子与定子摩擦产生极薄的片状铁末;油泵叶轮与泵壳的摩擦产生极细小的铜末;电机烧毁时短路绕组烧断会产生许多珠滴状铜末。轴承磨损和转子被摩擦产生的铁末和绕组烧断产生的铜末都在油泵的自循环油路中;油泵叶轮与泵壳摩擦产生的铜末则在主油路中,如图77-1所示。

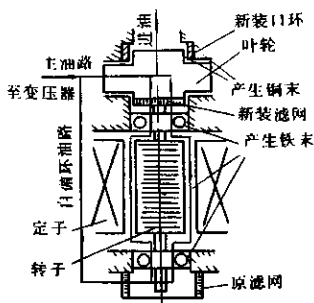


图77-1 以QB型潜油泵为例的油路及产生金属粉末位置示意图

要减少金属末的产生,最好是降低潜油泵的转速。采用四极的低扬程的电机与优质轴承时,电机部分就不易磨损,从而不易产生金属末。特别是对导向冷却的变压器,还可减小流动带电。不然,必须采取适当的方法将金属末隔离起来,保证没有金属末进入变压器。

隔离金属末的方法有:

a. 镶装塑料口环。在叶轮的泵壳处新装口环。口环可以是聚四氟乙烯的,或用环氧玻璃丝棒车制,改变相对摩擦面的物理性

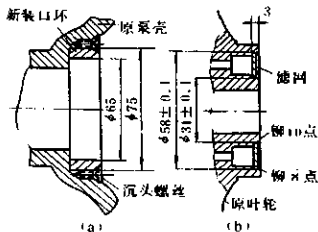


图 77—2 口环(a)和新滤网(b)的装配图

质,以不产生金属末。口环装配图如图 77—2(a)所示。

b. 在叶轮下侧加装滤网,相对隔离潜油泵自循环油路。因原有 6 个 $\phi 5$ 的孔与叶轮上侧进油孔相通,如图 77—2(b)加装一环形滤网,则潜油泵自循环油路中可能产生的铁末就不会被带到主油路中而进入变压器。同时通过主油路落入的杂物也不可能再进入油泵。滤网选用与原进油滤网材料相同的粉末合金网,厚度为 2.5mm。

78. 变压器油怎样带电处理? 有哪些油的再生方法?

变压器的带电滤油脱气的方法很多,这里推荐绝缘油真空滤油机进行带电滤油脱气,并稍加改装就可以很理想地消除运行中油的水分、杂质等。对于变压器油总重在 40t 以下的产品,处理 36 ~ 72h 就能满足要求。

变压器,特别是大容量高电压变压器,当空气混入油中形成气泡后,气泡在强电场作用下会感应一悬浮电位,并对带电导体放电。这不但会使油和固体绝缘分解,而且使气体继电器动作,这是不允许的。因此按图 78—1 做了改装,并增加了 4 个阀门,以便将进出油管内的气体全部排出。

真空滤油机进出油管与变压器连接的原则:a. 为了不影响绕

组的散热,对原来油的循环方式不应改变;b.为了提高滤油效率,进出油管最好分别接在对角线上。如采用两台真空滤油机,则应将进出油管分别放在同一端。不同容量不同冷却方式的油浸式变压器,真空滤油机进出油管的连接示意图如图 78—2 所示。

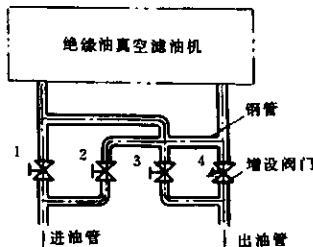


图 78—1 改装后的绝缘油真空滤油机

在滤油过程中的具体要求:a.滤油机排油泵压力保持在 $0.14 \sim 0.16\text{MPa}$; b.真空度保持在 $2.6 \sim 5.3\text{kPa}$; c.油温保持在 60°C 以上。温度低可视具体情况将滤油机的加热器投入 $1 \sim 2$ 组。

具体操作步骤:

a.按滤油管路连接图,凡需关闭的阀门,操作前必须关闭严密。

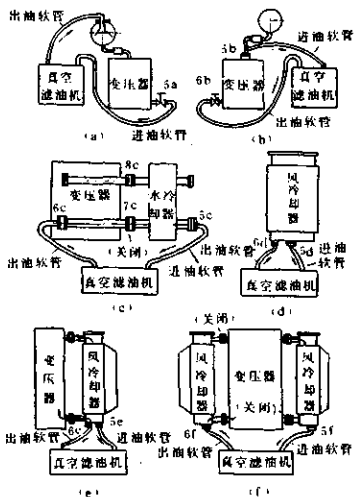
b.先启动滤油机冷却水泵,再启动真空泵。

c.当真空度上升到 21.3kPa 时,开启图 78—2 中的 $5a$ (或 $5b \sim 5f$) 阀门和图 78—1 中的 1 阀门,使变压器油吸入真空室。此时将这段软管中空气全部排出。当滤油机的油面上升到正常位置时再关闭 1 阀门和 $5a$ (或 $5b \sim 5f$) 阀门。

d.启动排油泵,打开 1 和 2 阀门,让油在滤油机本体内循环,以便将滤油机内管路中的气体全部排出, $1 \sim 2$ 分钟后停排油泵并关闭 1 和 2 阀门。

e.开启 $6b$ (或 $6c \sim 6f$) 和 3 阀门,使变压器油吸入真空室,以排出这段油管路中的气体,待滤油机的油面上升到正常位置时将 3 阀门关闭。

f.开启 $5a$ (或 $5b \sim 5f$) 和 1 阀门,待变压器油吸入真空室后,再



(a)中小型的 (b)油浸风冷式的 (c)强油水冷式的

(d)强油风冷式满载时之一 (e)强油风冷式满载时之二 (f)强油风冷式欠载时的

5a,6b——放油阀门 5b——原滤油蝶阀 5c,6c——增设阀门

7c,8c——原有阀门 5d——与潜油泵连接阀门

6d——与流动继电器连接阀门 5e,6e(5f,6f)——与净油器4,5回路相连接的阀门

图 78—2 变压器带电滤油各种管路连接图

启动油泵开启 4 阀门,并调节 1 和 4 阀门的开启程度,以保持油压和油位的稳定。这时带电滤油才算正式开始。

注意事项:

a. 在整个带电滤油脱气过程中, 变压器的气体继电器跳闸回路应改接信号回路, 以防止管路漏气和跑油而引起油开关跳闸造成大面积停电事故。

b. 与滤油机和变压器连接的管路和管接头必须绑扎牢固, 不得有破裂损伤、漏气等现象出现。

c. 对强油风冷和水冷变压器, 被连接的冷却器油泵不得启动。因为其油泵流量太大会使滤油机的加热器胀裂。

d. 油流速度不能过大, 否则会产生流动带电现象, 这对变压器的运行和人身安全都有危害。

e. 对于未参加循环的油, 如冷却器、油泵、储油柜内的油, 应放出过滤并经真空处理才能重新使用。

变压器油如果太差时, 如耐压值在 30kV 及以下、酸值大于 0.5mgKOH/g 时, 则须进行再生。油再生方法一般有三种, 即磷酸三钠法、硫酸—碱—白土法和硅胶再生法。磷酸三钠法工艺简单、设备省、污染小。再生后油质的比较可见表 78—1。

表 78—1 再生油的质量

再生后的 变压器油	酸值 /mgKOH·g ⁻¹	水溶性酸 /pH	界面张力 /N·m ⁻¹	介质损耗率正切 / %
磷酸三钠再生油	0.015	> 5.6	0.032	35℃ 0.20
硫酸—碱—白土再生油	0.019	> 5.6	0.032	35℃ 0.20
硅胶再生油	0.03	> 5.6	0.030	35℃ 0.50
国产 10 号新油	0.01	—	0.038	35℃ 0.08

79. 变压器为什么一定要用避雷器保护? 怎样进行保护?

变压器不用避雷器保护时, 雷电产生的过电压就有可能直接侵入变压器绕组, 从而把绕组击穿。变压器目前采用的避雷器有三种: 阀型避雷器、磁吹阀型避雷器和氧化锌避雷器。

(1) 变压器的避雷器保护

避雷器是保护发电设备和输变电设备最重要的基本元件, 也是决定高压电气设备绝缘水平的基础。它是装在变压器前面的保护装置, 如图 79—1 所示。

阀型避雷器主要由火花间隙和非线性电阻(阀片)两部分组成。当雷电产生的过电压侵袭变压器时,首先要通过避雷器,此时避雷器的火花间隙即行放电,从而限制了变压器绝缘上的

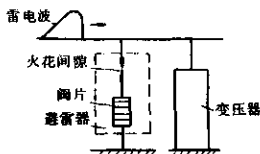


图 79—1 避雷器与变压器的联结图

的过电压值。而在放电过程中,由于非线性电阻具有良好的伏安特性,使避雷器上的残压(即放电电流通过非线性电阻时所造成的电压降幅值)限制在对变压器没有危险的数值以下。残压越低,变压器的绝缘水平也越低。

间隙被击穿以后作用在避雷器上的工频电压也产生一个通过避雷器的工频电流,即伴随电流。因阀片电阻有非线性,它使伴随电流限制在一个很小的数值内,一般在 50A 以下,当其第一次通过零值时即被切断。当过电压过去以后,依靠阀片和间隙的作用,阀型避雷器能够自动地将工频续流切断,使输电系统的工作电压与地隔离,又使避雷器恢复到雷击以前的正常状态。但目前的阀型避雷器还不能完全保护操作过电压。

磁吹阀型避雷器采用磁吹限流间隙,保证了避雷器放电电压稳定性。同时这种间隙本身又具有拉长电弧的特点,产生了相当大的弧压降,增加了避雷器熄弧的可靠性。阀片为高温阀片,所以通流能力大,而冲击电流通过时的残压较低。不但能使变压器的绝缘免受雷电过电压的侵袭,而且还有限制某些类型的操作过电压的能力。

氧化锌避雷器中无间隙,残压更低,超高压变压器已采用这种避雷器保护。

(2) 变压器中性点的避雷器保护

当运行在中点有效接地系统中的变压器中性点没有接地时,应在中性点上装设避雷器;当运行在中点不接地系统中的变压器

中性点也要考虑在中性点上加装避雷器;如中性点经消弧线圈接地,为了消除消弧线圈端部可能出现的过电压,可与消弧线圈并联安装一个避雷器。

(3) 配电变压器低压侧的避雷器保护

配电变压器的低压侧虽为 400V,但也要用相应电压等级的避雷器或压敏电阻来保护,否则在低压侧遭受雷电过电压时容易把高压绕组击穿(参见题 47)。

(4) 自耦变压器出线端的避雷器保护

在其高压侧与中压侧出线端装设避雷器时,要求出线端与避雷器之间不能装设任何刀闸,以防止避雷器与变压器线端断开的可能性。保证在变压器出线端切断时避雷器仍然接在变压器的出线端上,这样可以使得:

a. 在高压侧遭雷击时,防止中压侧在一开始就出现入射波电压;

b. 中压侧遭雷击时,防止在高压侧可能出现的三倍进波电压;

c. 保护进波线端的绝缘。

在低压侧出线端的一相装设避雷器,即可防止低压开路静电感应分量过电压造成的危险。低压为双分裂时,要在每相的分裂绕组上各装一个避雷器。

(5) 三绕组变压器的避雷器保护

三绕组变压器的中压或低压绕组长期处于开路运行时,为了避免静电感应对中、低压绕组绝缘的危害,在中、低压绕组为 Y 形接线时,可将中性点接地;为 D 形接线时,可将任一相线端接地。如经常临时开路运行,则应装设相当于相电压或线电压的避雷器代替中性点或任一相接地。

80. 环境如何影响变压器运行?

(1) 气候环境

a. 海拔高度。

在海拔高度 1 000m 及以下地区使用的变压器可不考虑海拔高度的影响。在海拔高度为 1 000m 以上地区使用的变压器必须

考虑高海拔处的空气比较稀薄,它对变压器的散热与外绝缘的电介质稳定性有影响。

因此,对海拔高度 > 1 000m 的高海拔地区使用的变压器必须在合同上规定产品运行地点的海拔实际高度,以便制造厂考虑变压器的温升限值以及外绝缘的最小空气间隙。一般是加强套管的外绝缘,加大沿面泄漏距离与对地跳电距离,加大套管间与套管对接地部件的空气间隙尺寸。如制造厂位于正常海拔地区,那就可以按降低的温升限值控制高海拔地区变压器的温升限值。

对绕组平均温升限值而言,海拔高度大于 1 000m,油浸自冷每 400m 降 1K,油浸风冷每 250m 降 1K,干式自冷每 500m 降 2.5%,干式风冷降 5%。

如果使用部门提供的高海拔运行地点的环境温度比正常规定的环境温度低,且符合每升高 1 000m 降低 5℃ 及更多时,则认为变压器在高海拔处运行时,由于散热条件降低而使温升增加的影响已由环境温度的降低所补偿。用于高海拔地区变压器在正常海拔制造厂试验时温升限值可不予校正,可在合同上明确这一点。这样,变压器可以更为经济,更为便宜。

油浸式变压器外绝缘距离按每超过 1 000m 以上的 100m 加大 1%,干式变压器每超过 1 000m 以上的 500m 加大额定短时工频耐受电压值 6.25%。

b. 风速。

通常规定在地面以上某一距离在一段时间内的最大风速值。如地面上 10m 处,10min 内为 35m/s 的风速。

风速对套管及装在变压器油箱上的附属设备有影响。对上述的地面上 10m 处,10min 内为 35m/s 的风速而言,对设计在每台变压器上装配的套管、储油柜、散热器或冷却器等附件时,应考虑此风速在机械上的影响。

c. 湿度。

以某一温度下的百分值表示相对湿度。

在高温度下有高相对湿度时,易繁殖霉菌,这些霉菌对油箱表

面的喷漆有影响。另外,高温下的高相对湿度在温度变化时,如温度下降,相对湿度增加,这就易凝成水,使套管的沿面表面电阻下降。高湿度还影响金属的腐蚀。

一般产品应按 25℃ 时相对湿度为 90% 考虑。如有特殊要求,可在合同上注明。

d. 温度。

外围环境温度是指空气自然变化的温度。日外围温度的自然变化规律是正弦形式变化(参见图 80—1)。

年外围温度的自然变化规律是双重正弦函数形式变化(参见图 80—2)。

变压器正常使用条件的温度值:

外围环境温度自然变化最高温度为 40℃;最低温度 -25℃;最热月平均温度 30℃;最高年平均温度 20℃;水冷却器的入口冷却水温额定值为 25℃。

如低压套管位于封闭母线内,高压套管一端伸入 SF₆ 管道内,应在合同中注明这些场合周围介质的温度值,并提供固定法兰、封闭母线中心线等数据。如无特殊说明,封闭母线内周围介质温度按 80℃ 考虑。低压套管允许电流为额定电流的 53%。

运行地区气温超过正常使用条件的温度中任一个值时,绕组平均温升、油顶层温升等温升限值应予降低,对变压器的温升限值应按超过部分的数值减少。

对用于严寒地区使用的变压器可在订货时在合同上注明最低温度值,以便提供与最低温度配合的变压器油。有载分接开关控制箱与冷却器控制箱等应有预热装置。

当冷却水温超过 25℃ 时,也可在合同上标明,以便提供足够散热能力的水冷却器。

温度与安全运行、产品的使用寿命有关。

e. 雾。

雾的浓度(密度)对套管污秽耐压有影响,当雾密 $\leq 2\text{g}/\text{m}^3$ 时,雾密较低,耐受电压仍较高,当雾密 $\geq 3\text{g}/\text{m}^3$ 时,雾的耐受电压几乎

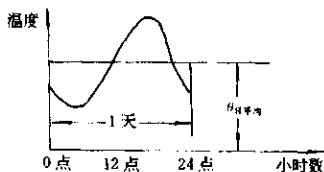


图 80—1 日温度变化曲线

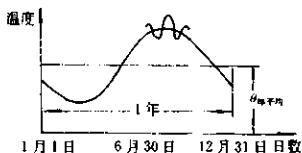


图 80—2 年温度变化曲线

不变,比 $1.0 \sim 1.5 \text{g/m}^3$ 时低 20%。因此重雾地区使用的变压器,应在合同上标明雾密,以便提供防雾伞型并有足够爬电距离的套管。

f. 复冰厚度。

对变压器而言,复冰厚度在 10mm 以下都视为正常使用条件;复冰厚度一般影响有载分接开关的操作,最好是消除复冰后再操作。

g. 多雷地区。

多雷地区使用的变压器应提高试验电压,所有避雷器都尽量靠近变压器高、中与低压侧而安装。可在订货时与制造厂协商多雷地区用变压器的试验电压。对多雷地区使用的配电变压器推荐

Yznll 结法。

h. 日照。

在风速为 0.5m/s 下日照为 0.1W/cm^2 时,对变压器而言,这是正常使用条件。日照辐射能量影响箱盖温升与变压器油顶层温升。强油循环变压器对温升限值无影响。

i. 暴雨。

有暴雨地区,可提请制造厂供应相应泄漏比距,和一定跳距的套管,以防不必要的对地闪络。

(2) 地质环境

主要是考虑变压器能承受地震力。正常使用条件中规定的地面水平加速度小于 0.3g ,垂直加速度小于 0.15g 。当变压器安装地点属地震区时,可在订货时指明变压器应承受住的里氏地震裂度。

对变压器内部结构而言,由于已考虑在运输中已能较好的固定紧,并已能承受短路电流产生的机械应力,因此,变压器内部不受地震裂度的影响。主要是高压与超高压套管连同升高座的耐地震力。

为防止气体继电器在地震时的误动,可供双接点串联连接的干簧式接点的气体继电器,如用户要将小车固定在地基轨道上时,只要在合同中指明可提供特殊的固定装置,以防地震时变压器从轨道上跳出。

里氏地震裂度/度	地面水平加速度/g	地面垂直加速度/g
9	0.4	0.2
8	0.25	0.125
7	0.2	0.1

(3) 生态环境

a. 污染。

污染对套管沿面放电强度和表面喷漆有影响,可根据不同污染水平,选取一定泄漏比的套管。根据国标,共有下列几种泄漏比

可供选用。

0级 14.8mm/kV

I级 16mm/kV, 相当于复盐密度 $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$

II级 20mm/kV, 相当于复盐密度 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$

III级 25mm/kV, 相当于复盐密度 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$

IV级 31mm/kV, 相当于复盐密度 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$

泄漏比是指套管最小公称沿面爬电距离与最高工作电压 U_m

之比。

爬电距离增加时, 跳电距离也应增加, 使爬距/跳距 ≤ 3.5 。

b. 沿海环境。

沿海空气中含有盐雾, 它会影响套管爬距和使金属腐蚀。可用等值盐密量来表示套管必须具有的泄漏比, 已在泄漏比中列出等值盐密。

等值盐密量是指套管绝缘表面上污秽沉淀物的等值氯化钠量。将套管绝缘表面上的全部污秽沉积物以及上述等值盐密量的氯化钠分别溶解在相同体积的蒸馏水中, 它们具有相同的体积电导率, 是化学上的电性能相等的意义上的一种量, 不是指闪络电压相同条件下的相对应盐密。

c. 其他。

霉菌的分泌物会污染油漆, 昆虫会影响风冷却器的散热面(昆虫将散热面堵住)。在平时应用压缩空气清理风冷却器表面与散热面。水冷却时如用海水或水中有悬浮杂质应向制造厂说明。

81. 选用和使用套管时应注意什么?

套管是变压器的载流组件, 对变压器的绝缘性能有直接影响。

选用和使用时应注意:

a. 周围介质温度。用于油浸式变压器的套管, 下部套管位于油中, 下部接线端子的温升与油顶层温升有关。

油浸自冷、油浸风冷的油顶层温升为 55K, 因此, 下部接线端子的允许温升为 15K。

强油风冷的油顶层温升一般为 40K, 下部接线端子的允许温

升可提高到 25K。

强油水冷的油顶层温升更低,为 30K,下部接线端子允许温升为 35K。

b. 电气特性。凡与 GIS 连的套管要能承受住特快瞬变过电压 VFTO,要防止 SF₆ 渗入油中。

对要保证变压器局部放电量时,套管也要保证局部放电量;油纸电容式套管应有电容抽头小套管,以便观测在局部放电量。

注油套管上部要有放气塞,以保持上部能充满油。

要求在套管外部装放电间隙时,要注意放电间隙的截波耐受能力。

大电流油纸电容式套管要保持 I²R 及介质损耗下保证温升,保证绝缘的热稳定。

套管的额定电流要比变压器最大电流大 20%,以保持一定的超铭牌容量运行能力。

穿缆式套管中部穿电缆时,电缆线不能松脱与套管内铜管相碰,以免过热。

c. 套管外部端子应有一定的机械承受能力。

d. 套管外部伞距与伞数。可用大小伞增加泄漏距离,泄漏比的计算是以 U_m 作为分母,不是额定电压。

不能靠增加伞数减少伞间距离的办法增大泄漏比,应使爬电距离与跳电距离之比小于 3.5~4。

e. 要使用两个套管并联时,不能在箱盖下套管的两个下部接线端子并联,只能在外部分联。

f. 大电流套管的箱盖处要隔磁。

g. 套管安装的倾斜角一般不大于 30°,90°安装时绝缘强度要下降。

h. 用于封闭母线内的低压大电流套管要降低额定电流使用,因封闭母线内介质温度较高。

i. 用于高海拔处的套管要增大泄漏距离。

j. $U_n \geq 72.5kV$ 的套管中间法兰上要考虑能装三个套管型电

流互感器。

82. 变压器不对称运行时的对称分量怎样?

变压器的不对称运行主要是指外施电压的不对称与负载不对称的不对称三相系统。如运行中发生单相短路、二相短路,也是不对称运行情况。这一不对称三相系统可用三个对称三相分量表示,即用三相对称分量法来分析或计算,即分解成正序分量、负序分量与零序分量三个对称三相分量。

分析不对称运行特性的正序分量、负序分量与零序分量和空载励磁电流的三个分量既有不同处,也有共同点。主要是相量的旋转频率,不对称运行时三个分量的旋转频率都相同。

分析不对称负载时的关键参数是正序阻抗、负序阻抗与零序阻抗。这些阻抗都是指额定频率与主分接位置时的值。因为变压器属于静止型电器,因此正序阻抗等于负序阻抗,它们的值就是变压器性能参数之一的短路阻抗。

零序阻抗与变压器结法和铁心结构有关。希望零序阻抗小些,这样,允许的负载不平衡程度可大一些。零序阻抗大的变压器要求负载不平衡程度要小些,就是三相负载要更接近于平衡。上面已经说明,零序阻抗是额定频率下的参数(空载励磁电流的零序分量为三次、六次…… $3n$ 次额定频率)。

电力系统也有零序阻抗,零序阻抗中最被关心的是零序电抗。电力系统的零序阻抗与变压器的零序阻抗也有关。电力系统零序电抗的大小影响电力系统中性点绝缘水平。

对于系统最高工作电压 U_m 为 126kV、252kV 的中点有效接地系统而言,接地系数 $\leq 80\%$,对电力系统的零序电抗 X_0 与正序电抗 X_1 而言, $X_0/X_1 \leq 3$ 。变压器的高压绕组一般为 YN 结法,在运行时 YN 的中点可接地也可不接地,中点接地的变压器台数应使电力系统的接地系数 $\leq 80\%$,此时,不接地的 YN 中点电位为

$$U_N = \frac{X_0}{X_1 + X_2 + X_0} \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

当 $X_0 = 3X_1$ 时, $U_N = 0.6 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$, 即中点绝缘水平应按此电压作绝缘配合。

当 $U_m = 126\text{kV}$ 时, $U_N = 43.5\text{kV}$ 。 $U_m = 252\text{kV}$ 时 $U_N = 87\text{kV}$ 。

YN 结法中点不接地时, 无零序回路, 在系统发生单相接地故障时, 健全相的电压为 $0.8U_m$, 此时 0.8 为接地系统。

对 $U_m \leq 72.5\text{kV}$ 的中点绝缘系统而言, 接地系数 $> 80\%$, $X_0 > 3X_1$ 。中点绝缘系统的中点绝缘水平采用线端绝缘水平, 比中点有效接地系统的中点绝缘水平要高。

电力系统的零序阻抗决定中点绝缘水平。

所以, 在变压器结法与铁心结构选择时应注意零序阻抗大小。

对 Y_{yn0} 结法的三相三柱铁心的变压器而言, 零序阻抗约为 $50\% \sim 60\%$; 同一结法的三相五柱铁心的变压器, 零序阻抗约 10% 。因此, 不宜用这一结法, 三相五柱变压器的结法中必须有 d 结法绕组, 以作为零序电流的通道。

对 $YNd11$ 结法变压器而言, 不论铁心为三相三柱还是五柱, 其零序阻抗略小于正序阻抗或略小于短路阻抗。

另外, 还要注意, 在 Y_{yn0} 结法三相三柱铁心变压器中, 零序阻抗还是非线性的。 yn 中零序电流越大, 零序阻抗越小; 变压器容量越大, 零序阻抗的欧姆值越小。 Dyn 结法的零序阻抗则是线性的, 即零序阻抗与零序电流大小无关。

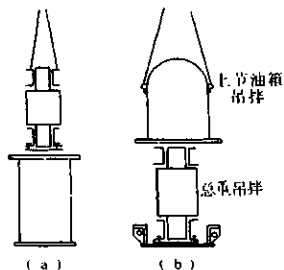
Y_{yn0} 变压器的负载结成 yn 时, 负载侧中点电位会在不对称运行时漂移。不对称运行时, 变压器负载侧中点有电流, 此电流要小于 25% 额定电流, 以限制中点电位的漂移不超过 5% 。中点电位漂移大, 有的相的相电压会升高。中点电位漂移程度与零序阻抗有关。零序阻抗越小, 中点电位漂移就小, 负载不平衡程度就可大些。如 Dyn 结法, 可允许接单相负载, 而 Y_{yn} 结法不允许接单相负载。

(九) 检修与试验

83. 变压器检修时起吊油箱、绕组套装、压板装配等应注意什么？

(1) 起吊油箱

平盖的变压器要检修器身时，一定要用大于器身重量的起吊设备将器身吊出才能检修，如图 83—1(a)所示。为了便于用户不用较大的起重设备来检修变压器器身，15~25t 重的器身，都把油箱做成钟罩式油箱。即使是大型



(a) 吊器身 (b) 吊上节油箱

图 83—1 变压器器身检修

变压器，上节油箱一般也是 15t 左右。钟罩式油箱的变压器要检修时，只要把上节油箱吊起即可，如图 83—1(b)所示。这种变压器铁心如果有下铁轭螺杆时，它的绝缘一定要加强，垫脚绝缘也要加强，因检修时不好更换。

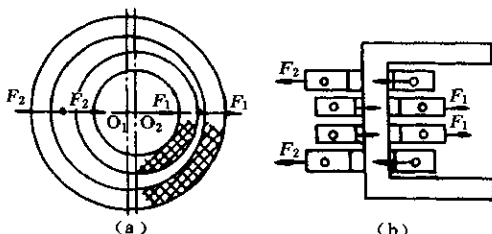
应当注意：在钟罩式油箱中，总重的吊拌一般都在下节油箱上，焊在上节油箱上的吊拌只能吊上节油箱，一般不能吊总重，如有规定者除外。

(2) 绕组套装

a. 绕组套装时必须注意绕向，否则会使磁力线在铁心内成回路得不到保证。中小型三相变压器绕组的绕向一般是相同的，但是单相变压器两柱绕组的绕向就不同，特别是单相三分裂三个铁心柱绕组的绕向，中柱与两旁柱绕组绕向相反。

b. 绕组套装时不能套偏，否则会有如下的影响：绕组套偏后绕组间距离一边缩小，一边增大，外绕组套偏后还使相间距离缩小或

增大,影响了主绝缘的距离。绕组套偏后,绕组两边的斥力 F_1 、 F_2 不等,同心式排列的绕组,使绕组产生趋向同心的力;交错式排列的绕组,使不同心度继续增加,更影响绕组、铁心间距离,如图 83—2 所示。



(a)同心式排列绕组 (b)交错式排列绕组

图 83—2 绕组套偏后的图形

但是,绕组套偏后对阻抗电压没有影响。因为阻抗电压与两绕组间的面积有关,绕组套偏并不使绕组间的面积改变,所以阻抗电压不变。

c. 绕组套装时在高度方向上要对称。根据绝缘的要求,高压绕组对地电压高、距离大,所以高压绕组一般比低压绕组矮一些,另外由于绕组的制造公差,高、低压绕组的高度也会有公差。但在套装时一定要使高、低压绕组几何尺寸中心对齐,否则将会增大轴向电磁力,而这一轴向力还会使高度的差继续扩大(参见题 30)。

d. 在玻璃粘带绑扎的铁心上套装绕组时,必须事先用卡具、绑带等将心柱上端夹紧、绑牢,以防止上端铁心片向两侧倾倒而把粘带胀裂。

应该说明:绕组间最好是预先组合套在一起,然后再将组合整体套装在铁心柱上。这样,可以加速器身装配,减小受潮。

(3) 压板装配

压板装配时要将压板上的压钉同时均匀紧固,不允许先紧一侧,后紧另一侧。分压板结构时,应使所有绕组的几何中心在同一水平上。

当然,箱沿螺栓、套管固定螺钉等也应同时逐个均匀紧固。

84. 60kV 及以上变压器的引线焊接要注意什么?

60kV 及以上变压器的引线焊接前将应焊引线根部用浸水石棉绳缠好,用苫布将绕组盖好,焊药随用随配制,使用时间不能超过 8h。焊后要清除焊药、氧化渣、绝缘烤焦部分、毛刺等。在焊接处包好屏蔽,以防止局部放电。

如果引线为裸铜排,则应涂上一层绝缘清漆,以防加速变压器油的老化。

引线也可用压接或机械连接。

85. 为什么一台变压器上有那么多的放气塞、导气联管? 为什么从油箱下部注油?

变压器的散热器、升高座、储油柜和套管上一般都有放气塞,因为不装放气塞,从油箱下部把油顶上去后,就会在顶部死角窝有气泡,气泡留在变压器内就容易引起放电,气泡留在散热器内会影响油的流动,影响散热效率。

由于散热器、升高座、储油柜等组件在变压器上的安装高度是不同的,结构也不一样,如果只有一个放气塞是不能将气泡全放尽的,因此一般要求每个组件都要有单独的放气塞。

35kV 及以下的套管,其内部的油与油箱内部的油是相通的,因此要求在套管上有一放气塞,在注油时能使套管注满油,并要求储油柜的最低油面线要高于套管的油面。60kV 及以上的套管,其内部的油与油箱内部的油一般是不相通的,因此不必要求储油柜高度与套管高度相配合。

为了在运行中随时地把升高座中的气体导通至气体继电器中,所以各升高座上边缘还焊有导气联管。

如果将变压器油通过储油柜以较大的流速注入箱内时,在变压器油内容易积聚静电。当变压器油粘度较大或夹杂有小固体时,或在干燥的冬天时,静电更容易积聚。静电积聚到一定程度就会发生电火花,所以一般不从上部注油,只有添补油时才从上部进行。

从下面注油时,可将进油管接地,使油靠本身压力慢慢地升高,就能避免静电火花的发生。

注油快结束时及经过静放后均应打开放气塞放气。

86. 油浸式变压器应采用什么密封材料和什么样的密封结构?

油浸式变压器中密封结构的类型多数属于静密封,而密封结构形式是平面对夹式。

(1) 密封材料

选择适合于变压器特点的密封材料是最重要的。与密封材料有关的技术条件是工作介质、工作压力及工作温度。

工作介质主要是变压器油、空气和水;工作压力主要决定于变压器在故障状态下内部产生的稳态压力和变压器在密封试验时所施加的压力(一般组件的试验压力大于变压器本体),一般可取 0.3~0.5MPa;工作温度并不是由变压器正常运行时的最高温度决定的,而是由变压器冬季在露天场所贮存时的最低环境温度和变压器器身利用油箱进行真空干燥处理时的最高温度决定的,一般为 -45~115℃。

目前能够满足这些要求的密封材料主要是丁腈混炼胶。其胶料牌号有 58—421、8143—20、B—9 等。这些胶料的全部物理性能通过了试验,经试用证明其密封性能良好,试验数据如表 86—1 所示。

表 86—1 新胶料的物理机械性能数据

项目及测试条件	性能数据
转动烧焦时间, 120℃	33min 35s
硫化条件 试片(Φ10×10 圆柱体加 5')	160℃×15min
邵氏硬度/度	68
扯断伸长率/%	364
扯断强度/kg·cm ⁻²	166
100%定伸强度/kg·cm ⁻²	33
永久变形/%	4
撕裂强度/kg·cm ⁻²	36
-30℃压缩 20%耐寒系数	0.46
脆性温度/℃	-59
冲击弹性/%	40
热空气老化 120℃×72h K 伸	0.59
空气中恒压永久变形 压缩 30% 100℃×24h/%	26
变压器油中恒压永久变形 压缩 30% 120℃×168h/%	50
变压器油中压缩 30% 应力松弛系数 120℃×168h	0.53
120℃高温扯断强度/kg·cm ⁻²	98
变压器油中 120℃×168h 硬度变化/%	-2
变压器油中热老化 120℃×168h K 伸	0.69
变压器油中热老化 120℃×168h K 扯	0.98
变压器油中体积变化 120℃×168h /%	7.6
汽油+苯的重量变化 室温×24h/%	15.6
拉伸 20% 臭氧老化时间 2.411×10 ⁻⁵ 龟裂时间	15'
变压器油击穿强度 120℃×72h/%	-11.7
密度/kg·dm ⁻³	1.22

注:变压器油中恒压永久变形试验条件的确定:压缩量取 30% 是丁腈橡胶作密封时的最高压缩量,而密封结构设计也多依 30% 为限,所以压缩量取 30%;温度取 120℃ 是根据利用油箱对器身进行真空干燥处理的温度 110±5℃ 的最高温度又加 5℃ 确定的;而加热时间取 168h 是 220kV 级变压器器身利用油箱进行真空干燥处理的时间。

这种新的胶料性能指标比以前使用的胶料性能指标高,比如耐温水平,新胶料是 -59~120℃,而旧胶料脆性温度在 -24~-40℃,最高使用温度是 70~85℃;在变压器油中恒压永久变形量,

新胶料为 50%，而旧胶料为 66% ~ 85%。因此，新胶料作为变压器的密封材料是比较合适的。

(2) 密封件(密封圈)

用于静密封结构的密封件有 O 形断面、D 形断面和矩形断面密封圈，对于较长的密封面还可以用胶条或胶排。从静密封原理上看，这三种断面形状的密封件有如下的优缺点：

a. O 形断面密封圈。它的最大优点是省材料。但是由于它对密封面的光洁度要求至少在 ∇_5 以上，以及它本身的合模缝位置需设在 45° 处，模具制造成本较高，因此除非较小的密封部位（如塞子等）用 O 形断面密封圈外，像法兰盘连接的密封件均不用它。

b. D 形断面密封圈。此种密封圈主要应用于杆件的静密封，其密封结构形式为“填充”式。它有三个密封面，即内径侧、外径侧的上下圆弧面，因此要求它的合模缝位置应设在上下面或有一个是设在外径侧水平面上。这样模具结构比较复杂，制造成本固然要高，同时使用这种密封件对密封面的光洁度要求也得在 ∇_5 以上，所以，除非像套管端部这样比较重要的密封部位采用 D 形断面密封圈外，一般可用 O 形断面密封圈代替它。

c. 矩形断面密封圈。它是变压器上应用量大且面广的密封件。因为它对密封面光洁度要求不高，只要光滑平整即可实现密封，同时模具结构简单，造价也低。惟一的缺点是密封材料消耗稍多。

(3) 密封结构

采用橡胶件进行密封是靠橡胶件的弹力实现的，因此对密封件的压缩量必须加以限制，否则不是压缩后密封件的弹力小，就是压缩量超过橡胶极限压缩量而失去弹力，起不到密封的作用，出现渗漏现象。密封件的压缩量应控制在 20% ~ 30% 的范围内，一般最好是在 30%，但对于径向密封最好是在 23%。

为保证密封件的压缩量，对较大的法兰盘必须实现机械连接，也称硬靠连接，而不用目前广泛采用的弹性连接密封结构。实现机械连接可采用在法兰盘上加沟槽的方法。该法兰盘要有足够的刚度，以防连接后因变形使密封件受力不均匀。同时，装配密封件

时应使密封件及密封面保证洁净。

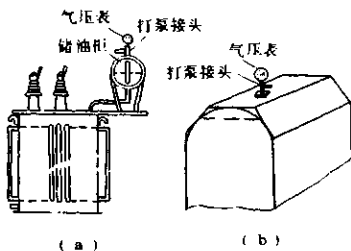
根据上述要求,变压器常见密封结构应如表 86—2 所示。表中 h 为密封圈厚度; ϕ 为密封环直径; k 为限位槽深或限位块高; δ 为密封件压缩量。

表 86—2 变压器的常见密封结构

结构件	典型结构示意图	说明
变压器箱沿与箱盖密封		<p>箱沿要平整,箱里伸出箱沿高等于限位块高</p> $k = \phi - \delta,$ $\delta = 0.30\phi$
各种法兰密封		<p>箱盖增加法兰和管接头法兰</p> $k = h - \delta, \delta = 0.30h$ <p>一般圆形法兰</p> $k = h - \delta, \delta = (0.20 \sim 0.25)h$
瓷套压盖密封		<p>瓷套上压盖与衬垫压紧后闭合</p> $k = \phi - \delta$ $\delta = (0.20 \sim 0.23)\phi$
低压套装式套管		<p>箱盖上增加的双面有限位槽法兰</p> $k = \phi - \delta$ $\delta = 0.30h$
小储油柜油位计密封		<p>加一法兰的限槽</p> $k = h - \delta$ <p>玻璃管限位时</p> $\delta = 0.30\phi$

87. 油浸式变压器怎样进行打泵试漏？

生产和检修油浸式变压器时,当总装完工后必须进行打泵试漏。这里的打泵试漏范围为:容量为 8 000kVA、电压为 35kV 及以下的带储油柜变压器,总装到注好油后一律要进行打泵试漏(如图 87-1(a)所示);容量为 3 150kVA、电压为 60kV 及以上的变压器,拆装到注好油后的打泵试验也可用此方法,以保证运输和存放的质量(如图 87-1(b)所示)。



(a) 装好时 (b) 拆装后

图 87-1 变压器打泵试漏方法

打泵试漏时,在储油柜顶上的塞座处或拆装后的箱顶法兰处,拧上打泵接头,并记下油位计油面位置。操作者左手持风管对着打泵嘴加入干燥的压缩空气,右手将气压表从打泵接头上端向下旋紧,迫使接头与内心产生间隙(即顶开密封面),气体从此进入气压表与储油柜内部。

变压器此时是密封的,所以当变压器装有安全气道时,安全气道膜要用铁板代替,而吸湿器联管法兰改装密封盖板。气体打入柜中后油位计油面徐徐下降,大约下降到 30~40mm 而气压表显示 0.045MPa 的压力时,上旋压力表,使内心与接头达到密封,加气完毕。

当变压器有漏气现象时,从油位计可以看出油逐渐地恢复到

打泵前的位置；当有漏油现象时，油面会下降得更低。

打泵后 8h 内，操作者对渗漏油及漏气处进行补修，然后再加压 4h（拆装产品为 2h），如气压不低于 0.02MPa 而无渗漏油，则认为打泵试漏合格。

在撤泵时，操作者左手堵住气门嘴，拧下气压表顶开密封面，检查余压要不低于 0.02MPa。

对 60kV、110kV 的单根套管打泵试验方法，如图 87—2 所示。这种方法是把打泵接头与压力表联在一起，采用自行车的气门嘴焊在接头上，用压缩空气或打气管加气压均可。

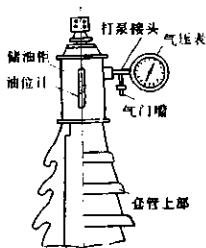


图 87—2 单根套管打泵试验方法

88. 套管软引线的安装有什么方法？

在安装 110kV 及以上的变压器套管时，安装软电缆引线既费工又费时，而且容易造成引线的弯折，甚至有局部断股的现象。为了改变这种状况，提高工作效率，可制作引线的专用工具——引线的拉绳滑轮装置。

首先将 25×25 的角钢弯制成两个高为 350mm 的门型架，再焊接在比套管储油柜外径

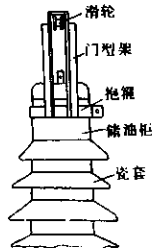


图 88—1 套管软引线的拉绳滑轮装置

大 10~15mm 的抱箍外侧上,并在两个门型架之间的顶端附近装配一个 60×16×20 的滑轮,就构成了引线的拉绳滑轮装置,如图 88—1 所示。

吊装套管时,提前将抱箍套在套管顶部储油柜上,用螺栓紧固抱箍;然后用尼龙绳经过滑轮穿入套管,直至从套管下端露出绳头;当套管吊至安装孔时,将露出的绳头牢固地绑扎在软电缆引线上端,这时可在地面上随着套管的下降而拉动绳子,引线就顺利地垂直穿过套管而到达套管的顶部。这样,引线不致弯曲,既省力又缩短了工时,避免出现因引线不直无法穿过销钉而重新吊装套管的现象。应注意套管内部均压球附近的引线要顺利地进入套管的导管,避免引线打卷现象。

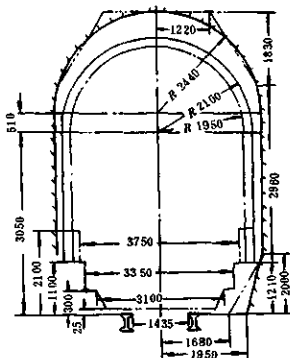
89. 运输时为什么要充氮,又要拆下套管等组件? 真空注油时为什么要把储油柜和安全气道拆除?

大型变压器如果其运输重量已超过运输车的载重量,则须把油放掉进行运输。但是,油放出后油箱内铁心、绕组等就与空气接触了,虽然空气中含有 75% 的氮气,但空气中所含的氮气是有水分的,这些水分如与铁心表面接触,就容易使铁心长锈;如与绕组接触,使绕组吸收水分降低绝缘强度。所以在放油后一般是充入干燥的纯氮气,这样就可以克服上述长锈与绝缘强度下降的缺陷。

充氮运输的变压器运到工地后,应检查氮气的压力,证明箱内确实还有氮气时,要将氮气放出,并立即注满合格的变压器油。放氮气时要注意安全,因人体吸入氮气就有生命危险。在氮气未放尽前,不能进油箱检查器身情况,以免危险。

运输重量可用充氮而降低,但这只能解决运输车的装载问题。此外还要求运输尺寸小于山洞、桥梁,这就需把大型变压器的套管等组件拆下,以满足运输尺寸的要求,图 89—1 为铁路运输标准限界。

在真空注油时,因为储油柜和所装安全气道的机械强度满足不了抽真空的要求,如不拆去会把安全气道的玻璃膜抽坏,使玻璃掉到器身上,也会把储油柜抽坏,所以在真空注油时不能装储油柜



—— 建筑物接近线路 ——— 站内给水煤台及信号机等装置
 - - - - 道岔表示器 ——— 桥梁内部建筑 ——— 隧洞内部建筑

图 89—1 铁路运输标准限界

和安全气道,用盖板临时封死。

90. 变压器能不能带油补漏? 怎样带油补漏?

变压器焊线漏油如何焊修,是变压器运行人员都重视的问题。如果停电放油焊修,变压器器身仍在油箱内,因器身绝缘上已浸透油,油箱内还会残存一部分油气和油,在电弧焊修时因电弧热的作用,油气和油很易燃烧。如果全部拆卸变压器放油焊修,需要较大的拆卸工作量,器身在空气中停留时间过长还要重新干燥处理,油箱内粘有的油要用蒸气冲洗清洁后才能焊修。这样工作量太大,停电时间也太长。

那么,能不能带油补漏呢?

油的燃烧是有条件的,其一是要有一定的温度;其二是要有足够的氧气,二者缺一不可。在装有大量变压器油的油箱上进行补漏时,虽然通过箱壁向油传输大量的热量,但由于箱内的油要对流

散热,热油受大量冷油的包围,高温的油迅速失去热量,在焊接瞬间油箱内紧贴焊接处温度只约在 55℃,且带油补焊时间短促,使油不能燃烧。另外,油箱内无空气,油内也不含氧,所以没有足够的氧去供给油的燃烧。因此控制得当,带油补漏是不会燃烧的。

但是,在补漏过程中漏油处内部虽不易燃烧,但已漏出的油和正漏出的油却极容易燃烧分解,形成强大的气流,使熔滴很难落到漏处;过大的油流还会直接熄灭电弧,使补漏无法进行,这是焊补的主要困难。

其次,燃烧的油烟和油混合在一起,污染了漏处,即使突破气流达到漏处的熔滴也是难以与漏处的金属良好熔合的,影响焊线的致密性,造成渗漏一处变多处。

再其次,是油箱内油的激烈对流传热,使箱壁温度不能上升,漏出的油快速分解使熔滴快速冷却,降低熔滴的熔合能力。

根据以上的困难,为实现带油焊修,可采取以下措施:

a. 根据带油补漏的热量会很快散掉的特点,应采用电弧焊来焊修,不采用气焊。

b. 为防止油流熄灭电弧和妨碍熔滴熔合,可采用石棉绳等物预先将漏处堵死,然后再焊,这样可消除或缩小油流;对不能预先塞死的漏处,如条裂,可一部分一部分地补焊,待漏处归结到一点后,用石棉绳等塞死进行补焊;对厚板上的小漏孔,可先用尖锤捻死后再焊;对微渗处则一般采用电弧快速点离法,烤漏处的四周,令其升温膨胀,抑制油流,然后一举焊成。

为抵制残余油流的分解力,可采用大电弧来补焊,补焊可采用 $\phi 3.2$ 及以下的焊条,电流为每毫米直径 65 ~ 75A。

c. 补焊时由上往下运焊条,要在引弧后一次快速焊死漏处。

d. 焊接速度要快,如漏处较大,最好焊一会后停一会,让油能冷却一下。

e. 最好采用负压带油补焊。用一 2X-0.5 的真空泵,把电机及其底盘去掉,泵轴用手摇把作动力,吸气口做成三通以装真空泵,再用厚壁胶管与储油柜的呼吸口相接,如图 90—1 所示。量出

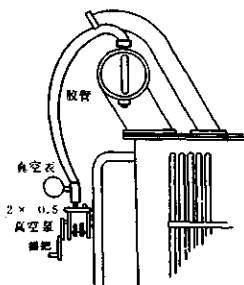


图 90—1 负压带油补漏

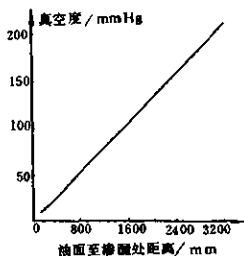


图 90—2 油面至漏点处
距离的真空度

需要补焊处至油面的垂直距离,按图 90—2 查出相应的抽真空度数。电流要选 180A 左右,并把渗漏油处油污用 32-1 型清洗剂擦洗。封闭变压器,转动真空泵摇柄,速度在 50r/min 为好。到达规定真空度后,即可施焊。

负压补漏优点是,不论渗漏处在下部还是在上部,皆可放心操作,易于焊牢。焊接熔化的铁水因负压而向孔隙里流动,也不会发生火灾。

带油补漏是可以的,但要在实践中掌握经验;同时要准备好砂子和泡沫消防器材;附近地面不能有易燃物;易溅进火花处用铁板挡好;补漏点要在油面线下 100~200mm 处;不能长时间施焊,以免箱内压力增高(负压法除外);不能箱内无油时施焊,带油补漏后要油进行过滤,将因带油补漏在油中引起的烃类气体滤掉,以免色谱分析时误判结果。

91. 在现场怎样更换大型变压器的局部线段?

变压器局部匝间短路的线段,有时是可以在现场更换的。

在现场更换局部烧损的线匝时,首先保持场地的清洁,气候要干燥些,然后把故障相的压钉松开。为了防止上部完好的线段往下滑落和更换导线工作的需要,应把故障线段处的距离拉开。为

此采用了4个吊钩,对称地固定在上夹件上,中间用花篮螺钉收紧的办法吊住上部线段。把故障线段完全拆除后,采用了大回环盘绕的方法,由里向外逐匝缠绕。这样不仅不损伤导线绝缘,并且能绕得比较紧实。然后放好垫块,焊好联线,拆除吊钩,拧紧压钉。

在处理过程中油的放出和注入是用真空滤油机进行的。为了脱气,采取半真空注油措施。如果处理整个过程中曾多次吊罩,器身暴露于空气中累计时间较长,可能会受潮,所以应带油短路加热以进行真空干燥,并辅之以滤油。

为了能使大型变压器在运行现场更换局部线段,必须注意:当气体继电器跳闸回路动作后,不可再试送电,以免故障范围扩大,从而失去短期修复的机会。

92. 变压器有哪些常规电气试验? 它们是怎样进行的?

变压器常规电气试验是用以检测其内部故障的,有如下几种:

a. 电压比试验。用于验证电压比,判断绕组匝间或层间有无短路、开关引线有无接错等故障。

b. 绕组电阻测定。判断导线焊接质量是否良好,绕组短路、开关接触不良或引线接错等故障。

c. 绝缘电阻及吸收比 R_{60}/R_{15} 或极化指数测定。用2500V摇表测量60s时的绝缘电阻 R_{60} 与15s时的绝缘电阻 R_{15} ,着重于前后两次所测量数值的比较。它是判断变压器绝缘劣化和受潮程度的灵敏指标。从 R_{60}/R_{15} 或极化指数的比值,还可对绝缘纸板、套管及绕组的局部缺陷或受潮得到表示。

d. $\tan\delta$ 测定。通过介质损耗确定绝缘受潮的程度以及绝缘结构中的缺陷。

e. 油的试验。内部故障会影响油的变化,所以通过油的耐压、 $\tan\delta$ 、酸值、微量水分、油中含气量等试验可间接反映出变压器的内部缺陷。

此外,变压器的耐压试验可用以判断相间和对地的绝缘状况;而空载和负载试验可通过测量值与原始值的比较,以确定绕组有无层间、段间短路等故障。

(1) 电压比试验

电压比试验是测量不同侧绕组所有分接电压的大小,以验证其比值是否等于电压比。它可以与联结组一起用电压比电桥测量,也可以用双电压表测量。前者是用分压器与一对绕组电压平衡而测得电压比;后者一般在低压施加 100V 电压测量高压侧电压而算得电压比,如图 92—1 所示。其电压比 $K = K_V \cdot V_1/V_2$, K_V 为电压互感器电压比。

(2) 绕组电阻测定

采用电桥法和电压降法测定绕组电阻。电阻值在 10Ω 以上用单臂电桥, 10Ω 以下用双臂电桥。用压降法时则以 2~12V 蓄电池作电源,电压表和电流表的接线应直接接在被测绕

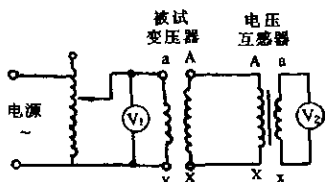
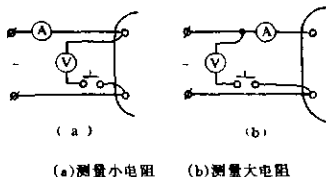


图 92—1 用电压表法测量
电压比原理图

组的端子上,如图 92—2 所示,且待电流稳定后接入电压表,而在切断电源前先切断电压表,所测的电阻值 $R_0 = U/I$ 。

绕组电阻的测量要在绕组温度 θ 与环境温度一致的状态下进行,所通过的电流小于绕组额定电流的 20%,以免发热而引起误差。测量值 R_0 要以温度换算系数 K_θ 换算到参考温度(油浸式变



(a) 测量小电阻 (b) 测量大电阻
图 92—2 用压降法测量绕组电阻的原理图

压器为 75°C ，干式变压器为绝缘耐热等级的绕组平均允许温升加 20°C)。见题 94。

(3) 绝缘电阻及吸收比测定

绝缘电阻 R_{60} 一般用 2500V 、量程 $10000\text{M}\Omega$ 的兆欧表加压 60s 所读取的数值。由于绝缘电阻稳定快慢不同，产品几何尺寸、结构、材质的不同，以及绝缘中含水多少不同，所以 R_{60} 无一标准值。为了概略地限定 R_{60} ，且表示其随温度变化的关系，可给出如图 92—3 所示的 R_{60} 的一般参考下限值，最低不得小于图中 $2/3$ 的数值。

吸收比 R_{60}/R_{15}

是直流加压 60s 和 15s 时的绝缘电阻比值(大型变压器还需进行测量 10min 和 1min 绝缘电阻的比值，即极化指数)。因为任何绝缘体加上直流电压后，所通过的电流由充电、吸收和泄漏三种电流组成，前两种电流是

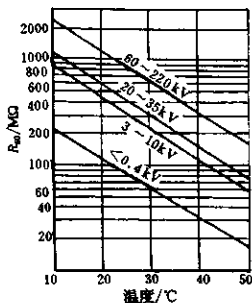


图 92—3 绝缘电阻 R_{60} 的一般下限值及其与温度的关系

衰减的且与绝缘的受潮等有关，所以 R_{60} 与 R_{15} 的值是不一样的。对于 60kV 及以上的产品， $R_{60}/R_{15} > 1.5$ ，否则绝缘有可能受潮。

(4) $\tan\delta$ 的测定

$\tan\delta$ 称做介质损耗率正切。因为绝缘就是介质，在交流电压作用下，不仅有泄漏电阻的损耗，还有介质中的偶极子转动克服周围牵制力和离子的位移因摩擦产生的损耗，这三种损耗称做介质损耗，常用其充电电流或吸收电流的无功分量与总电流的夹角 δ

的正切 $\tan\delta$ 表示。

介质损耗率正切 $\tan\delta\%$ 一般采用平衡电桥的反接法测量,如图 92—4 所示。此时, $\tan\delta\%$ 等于桥臂电容值。 $\tan\delta\%$ 随温度变化的参考上限值如图 92—5 所示。

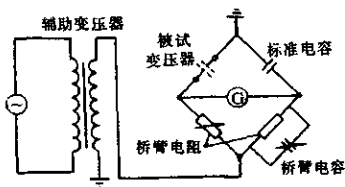


图 92—4 用反接法测量 $\tan\delta\%$ 的接线图

(5) 变压器油的试验

变压器油的耐压试验用 500mm^3 的标准油杯,在 60kV 工频试验器中进行。油杯的黄铜电极直径为 25mm ,表面光洁度 ∇_7 ,电极间距为 2.5mm ,如图 92—6 所示。

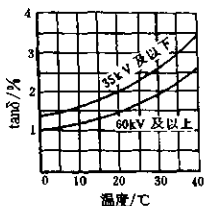


图 92—5 $\tan\delta\%$ 的参考上限值及其与温度的关系

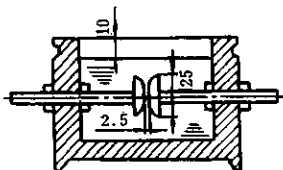


图 92—6 变压器油耐压试验的油杯

将油杯用被试油冲洗三遍以上,然后注入被试油至离杯口 10mm 处,静放 10min 消除气泡。调节调压器,使电压缓慢升高直

至击穿,并记下击穿电压值。共试五次,每次间隔 1min,每次击穿后用干净玻璃棒拨出碳黑。取五次的平均值作为测量值,但最大与最小试验值的偏差不得大于 25%,否则重试。

变压器油酸值的简易测定法是在被试油中添加提取液(酒精),在混合过程中滴入氢氧化钾的中和液,根据指示剂变色时为止的滴入量来测定酸值。

93. 变压器的参数偏差值与使用峰值的参数是如何规定的?

考核变压器性能的参数都由技术条件规定,标准值都有自己的偏差值,偏差值有几种类型:

(1)只规定下限,没有上限,越大越好

- a. 吸收比,绝缘电阻;
- b. 套管间带电距离;
- c. 绝缘承受能力;
- d. 局部放电试验时间与次数,工频耐压试验时间与次数;
- e. 电极表面;
- f. 突发短路试验次数;
- g. 冲击试验次数;
- h. 有载分接开关的电寿命、机械寿命。

(2)只规定上限,没有下限,越小越好

- a. 空载损耗,负载损耗;
- b. 空载电流;
- c. 总损耗;
- d. 绕组与油面顶层温升;
- e. 介质损耗率;
- f. 噪声水平;
- g. 局部放电量;
- h. 绕组热点温升;短路时绕组允许温度;
- i. 过励磁能力;
- j. 油中含水量与含气量、油的带电度;
- k. 测损耗时瓦特表的功率因数。

(3)既规定上限,又规定下限

- a. 阻抗电压;
- b. 电压比;
- c. 冲击电压波形及峰值;
- d. 不平衡电阻。

(4)没有偏差要求的参数

- a. 零序阻抗;
- b. 空载电流谐波分析;
- c. 辅助风扇电机、泵的功率消耗;
- d. 涌流。

(5)允许校正的标准值

- a. 高海拔温升限值;
- b. 非额定电流下测得的阻抗电压与负载损耗(但至少加 50% 额定电流);
- c. 非额定电流或非额定损耗下的温升(但至少加 90% 额定电流);
- d. 用球隙校正感应试验或外施耐压时高压侧电压。

(6)必须精确的量

- a. 试验空载损耗与空载电流时电压波形;
- b. 交流电源的频率。

在判断产品是否合格时,应根据以上要求进行评估。

另外,在变压器的性能参数上,有的采用均方根值,也有不少参数是采用峰值,采用峰值的参数有:

- a. 冲击电压值,包括全波、截波与操作波试验电压;
- b. 励磁涌流;
- c. 磁通密度;
- d. 短路动稳定电流,包括非对称短路电流第一个峰值。

工频试验电压以峰值实测值除以 $\sqrt{2}$ 作为均方根值。当波形畸变时,峰值并不等于 $\sqrt{2}$ 乘以均方根值。如接近饱和磁通密度时,空

载电流峰值与均方根值之比要比 $\sqrt{2}$ 大得多。所以,该用峰值的参数,必须以峰值来考核。

94. 绕组电阻、介质损耗率正切和绝缘电阻与温度有什么关系? 它们还受什么因素的影响?

绕组直流电阻、介质损耗率正切随温度升高而增大,而绝缘电阻则随温度的升高而减小,它们都属于绝缘特性测定。

a. 绕组电阻测量值 R_{θ} 与温度的关系,由温度换算系数 K_{θ} 换算到油浸式变压器 75℃参考温度的公式可见:

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = K_{\theta} R_{\theta}$$

而温度换算系数 $K_{\theta} = \frac{\alpha + 75}{\alpha + \theta}$ 是大于 1 的数值,所以绕组电阻是随温度升高而增大的。其中 θ 为测量时绕组的温度。 α 是导线材料温度系数,铜为 235,铝为 225。

b. 介质损耗率正切 $\tan\delta\%$ 与温度的关系,由它换算到 20℃时的公式可见:

$$\tan\delta\%_{20^{\circ}\text{C}} = K_{\delta} \tan\delta\%$$

温度换算系数 K_{δ} 为:

测量时温度/℃	10	15	20	25	30	35	40
换算系数 K_{δ}	0.75	0.85	1	1.15	1.3	1.5	1.7

温度换算系数 K_{δ} 随温度的升高而增大,也就是 $\tan\delta\%$ 随温度升高而增大。此关系亦可参见图 92—5。

c. 绝缘电阻 R_{θ_1} 与温度的关系由下式可见:

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1} / K_R$$

温度换算系数 K_R 为:

$\theta_2 - \theta_1 / ^{\circ}\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40
换算系数 K_R	1.23	1.5	1.84	2.25	2.27	3.4	4.15	5.1

温度换算系数 K_R 是随温度的升高而增大,但上式中它是在

分母上,也就是绝缘电阻随温度升高而减小。此关系亦可参见图 92--3。

此外,除绕组直流电阻不受其他因素影响外,影响介质损耗率正切增大的因素有:绝缘受潮,绝缘中含气体,浸渍物及油等不均匀或脏污等。影响吸收比 R_{60}/R_{15} 减小的因素也有:器身出炉后在空气中暴露时间长,器身表面不清洁,油箱内壁脏,套管瓷件表面不干净,变压器油不合格,真空处理不当,油过热等。

总之,要使变压器绝缘特性合格,其解决的办法是:缩短器身在空气中的暴露时间,保证器身、油箱内壁和套管瓷件表面的清洁,换油并冲洗器身,重新真空处理等。

95. 校定电压相量关系有哪几种方法? 怎样校定?

电压相量关系校定以前称为联结组别校定。它是通过测量高、低压侧间电压的相位移,来验证其组别的。其测量方法很多,有直流测极性法、交流测电压法和电压比电桥法等。

(1) 直流法

图 95—1 表示用直流测量单相变压器绕组极性的方法。先在高压侧施加 1.5V 干电池或 2~6V 蓄电池的电压,然后在低压侧接通直流电流表。如果一对起端(或末端)分别接电源和仪表的正极(或负极),在电源接通瞬时,仪表指针向正方向偏转的为同极性,向负方向偏转的为反极性。反之亦然。

同极性时组别为 0,联结组为 II0;反极性时组别为 6,联结组为 II6。

电源接通时,不要马上拉开电源。因为接通时仪表指示如是正值,拉开时则是负值,所以要稍等几秒钟,待看清指示后方可拉开电源。

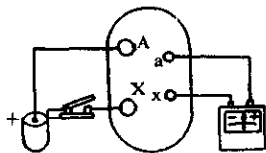


图 95—1 用直流法测量单相变压器的极性

用直流法也可测量三相变压器的极性,从而确定其组别。对

于常用的 $Yy0$ 和 $Yd11$ 联结组,直流表指针的偏转情况为:

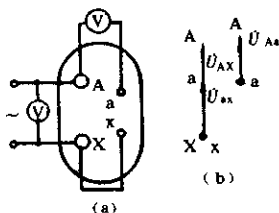
Yy0 联结组				Yd11 联结组			
	AB	BC	AC		AB	BC	AC
ab	+	-	+	ab	+	-	0
bc	-	+	+	bc	0	+	+
ac	+	+	+	ac	+	0	+

对其他联结组也可以列出另一组直流表指针的偏转方向的表来。但用直流法校准三相变压器组别时要测量 9 次,如有一次不对,则组别往往会判错。

(2) 交流法

交流法是从高压侧施加不超过 250V 的单相或三相交流电压,短接任意一对出线端子,测量相应的高、低压电压值。

图 95—2 是用交流法测量单相变压器的联结组别的线路图。如 $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$ (参见图 95—2 (b)), 则表示高、低压电压是同极性的,所以组别为 0,联结组为 0 ;如果 $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$, 则组别为 6,联结组为 116 。



(a) 线路图(X 和 x 短接)

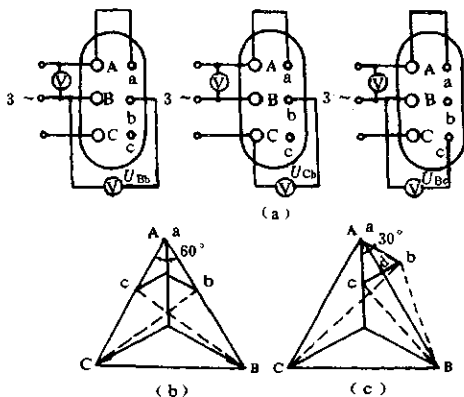
(b) 组别为 0 时电压测量值的关系

图 95—2 用交流法测量单相变压器联结组别

图 95—3 (a)

是用交流法测量三相变压器的三次测量线路,如果测量的电压值和某一组别的计算值相符,就是该组别值。

对于 $Yy0$ 联结组,由相量图 95—3(b)可知:



(a)线路图(A和a短接) (b)Yy0联结组电压测量值的关系

(c)Yd11联结组电压测量值的关系

图 95—3 用交流法测量三相变压器联结组别

如设低压线电压 $U_{ab} = ab = 1$ ($bc = 1, ca = 1$), 则高压线电压 $U_{AB} = AB = KU_{ab} = K$ ($BC = K, CA = K, K$ 为电压比), 于是得:

$$U_{Bb} = Bb = AB - ab = K - 1$$

由 $\triangle Abc$ 得:

$$U_{Cb} = Cb = \sqrt{ab^2 + CA^2 - 2abCA\cos 60^\circ}$$

同理得:

$$U_{Bc} = \sqrt{1 - K + K^2}$$

因为试验时低压线电压不等于 1, 而是 U_s , 如测量的电压值与上述三个计算值乘以 U_s 相等, 则说明其组别为 0。

对于 Yd11 联结组, 由相量图 95—3(c) 可知

$$U_{bb} = \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$$

$$U_{bc} = U_{bb}$$

$$U_{cb} = \sqrt{1 + K^2}$$

如测量值与上述三个计算值乘以 U_s 相等,则说明其组别为 11。

同样,对于其他联结组别的变压器,上述三个测量的电压与线电压比 K 也有确定的关系。

(3)电桥法

电压比电桥实际上是一个标准分压器,如图 95—4 所示。该电桥平衡的条件是:加在变压器高压侧即电桥标准分压器上的电压,经分压后与变压器低压侧电压相等,且高、低压绕组极性相同。

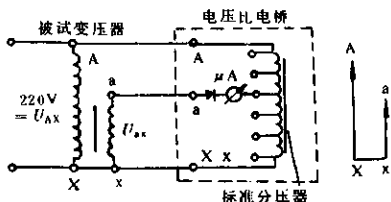


图 95—4 用电桥法测量单相变压器联结组别

(图中所示为联结组 II6 时)

如果图 95—4 经调节后电桥平衡,表明标准分压器上的分电压与 U_{ax} 相等,且高、低压绕组极性相同,故必是组别 0,联结组为 II0;如果电桥调不平衡,而将高压侧端子对调后接电桥方平衡,则必是组别 6,联结组为 II6。

测量三相变压器联结组别时,也使用单相电源,高、低压相对应,三相分别测量。这时电桥就需增加一套专门测量线路,如图 95—5 所示。图中 K_1 、 K_2 是同轴高压电压相序切换开关; K_3 、 K_4 和 K_5 也是同轴开关, K_3 是短接连线开关,而 K_4 、 K_5 是低压电压相序

切换开关; K_6 、 K_7 和 K_8 是同轴联结组别指示开关; TH 是电源分压器。

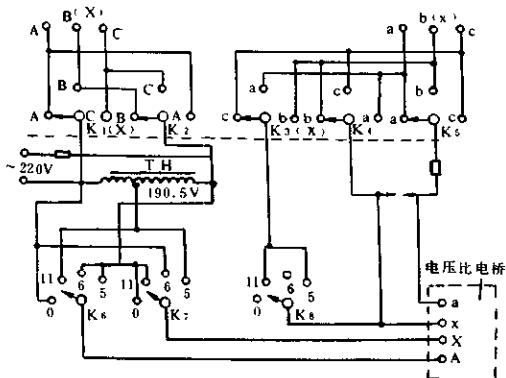


图 95—5 测量联结组别的专门测量线路

在使用时,对于 Yy 接线组合,接在电桥上的电压是高、低相电压的 2 倍(如图 95—6(a)所示),其比值与线电压比相等,也就是:

$$\frac{2U_{AX}}{2U_{ax}} = \frac{U_{AX}}{U_{ax}} = \frac{U_{AB}/\sqrt{3}}{U_{ab}/\sqrt{3}} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$$

所以电桥平衡时,分压器的比率就是线电压比。而对于 Yd 接线组合,接在电桥上的电压分别是高压 2 倍相电压,低压 1 倍线电压,这两个电压之比为:

$$\frac{2U_{AX}}{U_{ab}} = \frac{2U_{AB}/\sqrt{3}}{U_{ab}} = \frac{2U_{AB}}{\sqrt{3}U_{ab}}$$

所以电桥平衡时,分压器的比率是线电压比的 $2/\sqrt{3}$ 。为此必须采用电源分压器 TH,把加在电桥上的电压降为电源电压的 $\sqrt{3}/2$ 。如

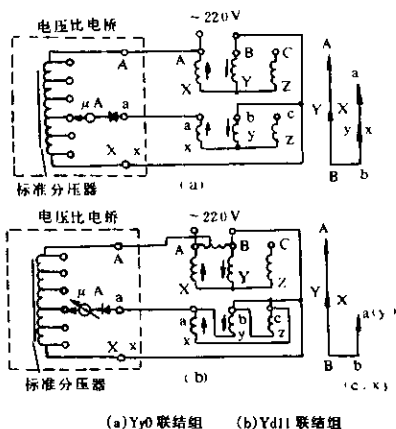


图 95—6 用电桥法测量三相变压器联结组别

电源电压为 220V，则加在电桥上的电压为 $220 \times \sqrt{3}/2 = 190.5V$ 。这样，在校正单相变压器联结组别时，将其高压端子 A、X 对应接到图 95—5 的 A、B(X) 上，低压端子 a、x 对应接到 a、b(x) 上， $K_1 \sim K_3$ 扳至图示位置， $K_6 \sim K_8$ 扳至 0 位置，这时原理校定线路就如图 95—4 所示。

在校正三相变压器 $Yy0$ 联结组别时，对应接好三相高、低压端子， $K_1 \sim K_3$ 扳至图 95—5 所示位置， $K_6 \sim K_8$ 扳至 0 位置。如果电桥在预定的电压比下平衡，说明 A、B 两相高、低压极性正确，这时原理校定线路如图 95—6(a) 所示。再扳动 $K_1 \sim K_3$ 至 C(c) 位置，电桥又平衡，说明 C 相也正确。所以其组别必为 0，而联结组为 $Yy0$ 。

在校正三相变压器 $Yd11$ 联结组别时， $K_1 \sim K_3$ 扳至图 95—5 所示位置， $K_6 \sim K_8$ 扳至 11 位置，接入电源分压器 TH，且 K_9 把 C 相绕组短接，这时原理校定线路如图 95—6(b) 所示。如果电桥在预

定电压比下平衡,而校正 C 相又平衡,则其组别必为 II,联结组为 Yd11。

同理,可校定组别为 6.5 的联结组。至于其他组别可按题 66 的组别变换方法归于 12.6 和 11.5 组别而进行测量。

更详细测试法可见相当的试验标准。

96. 怎样进行阻抗试验和空载试验? 它们为什么要校正?

阻抗试验以前称为短路试验(也就是过去的突发短路试验),它是测量额定电流下的负载损耗和阻抗电压。如果降低电流试验,必须换算到额定电流下的数值。

空载试验是测量额定电压下的空载损耗和空载电流,一般不能降低电压进行试验,施加的电压波形必须是正弦波。

阻抗试验和空载试验原则上可以在任意一侧加压,但是考虑到试验的条件,则阻抗试验应该是低压侧短路、向高压侧加压。这样,试验电流为高压的额定电流,试验电流小,比较能满足,且测量值是高压侧表示的阻抗电压,数值大,比较准确。空载试验应该是高压侧开路,低压侧加压。这样,试验加电压是低压的额定电压,施加电压低,比较能满足,且测量的是低压表示的空载电流,数值大,也比较准确。

这两种试验均有三种方法,即一瓦特表法、两瓦特表法和三瓦特表法。一瓦特表法要测量三次,所以现在趋向于采用三瓦特表法。大容量变压器的二次一般采用三角形结线,用三瓦特表法做空载试验与阻抗试验时,测量误差比两瓦特表小。

用三瓦特法测量的线路如图 96—1 所示。电压加在高压侧是阻抗试验接线;如把电压改为加在低压侧,就变成空载试验接线,所以这两个试验的线路是相同的。

在图 96—1(a)中,电流互感器二次采用 y 形结线,而电压互感器一次中性点不接地,故要求它为全绝缘结构。测量的损耗为三块瓦特表读数的代数和。在图 96—1(b)中,电流互感器二次采用反 d 形结线,测量的损耗为三块瓦特表读数的平均值。

后一种线路的读数大,读数越大,测量误差越小。但是其瓦特

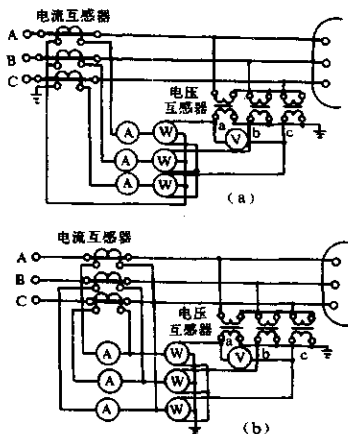


图 96-1 三瓦特法测量负载和空载损耗的两种线路

表的电流比测量线路的电流增大 $\sqrt{3}$ 倍。因此使用时应注意,当瓦特表线圈中电流为 5A 时,互感器二次电流表不应超过 $5\text{A}/\sqrt{3} = 2.9\text{A}$;瓦特表的电流为 2.5A 时,互感器的电流则不应超过 $2.5/\sqrt{3}\text{A} = 1.44\text{A}$ 。

a. 负载损耗的校正。因为负载损耗是由电阻损耗和附加损耗两部分组成的,而阻抗试验一般是在常温下进行的,按照规定要校正到参考温度。负载损耗 P_r 中的电阻损耗 $\sum I^2 R_\theta$ 与电阻温度系数 K_θ 成正比(参见题94),而附加损耗 P_g 与温度系数成反比,因此负载损耗试验值要分电阻和附加损耗,都换算到 75°C ,当附加损耗 $< \frac{1}{2}$ 电阻损耗时,则:

$$P_{75^\circ\text{C}} = K_\theta \sum I^2 R_\theta + P_g / K_\theta$$

当试验频率不等于额定频率时,由于附加损耗中的各部分损

耗与频率的关系各不相同,而且各部分所占的比例也很难分开,不好校正,所以希望阻抗试验时的试验频率为额定频率。如果频率略低于额定值时,只好不予校正。

b. 阻抗电压的校正。阻抗电压按照规定要校正到参考温度和额定频率。阻抗电压由两部分组成:一是有功分量,与电阻温度系数成正比而与频率无关;二是无功分量,与频率成正比而与温度无关。

c. 空载损耗的校正。空载试验中当电压升至额定电压时,由于空载电流为含高次谐波的尖顶波电流。空载试验的电源就带着这种非线性、非正弦的负载。该负载在电源中产生的附加磁通与电源的主磁通叠加,使主磁通畸变,造成电源波形的畸变。

电压波形畸变后,破坏了正弦波的波形因数。铁心中的磁滞损耗与施加电压的平均值有关,而与电压有效值无关;涡流损耗是与有效值的平方有关,而与平均值无关。波形因数改变了,有效值与平均值的数值都发生了变化,所以要校正电压波形对空载损耗的影响。

电压波形的畸变程度要靠平均值电压和有效值电压的数值来分析。常见的磁电式整流的平均值电压表是按方均根值刻度的。当电压方均根值与平均值之比等于 1.11,或方均根值电压表与平均值电压表在数值上相同时,可认为波形是正弦的,否则波形是畸变的。

校正电压波形时以平均值电压表为准施加额定频率下的额定电压 U_n , 平均值电压表读数为 U' , 并记录方均根值电压表读数 U , 空载损耗测量值为 P_n , 则正弦波时的空载损耗:

$$P_0 = P_n(1 + d)$$

式中 $d = (U' - U)/U'$ (d 通常为负数)。

d. 空载电流的校正。测量中,取各相空载电流的平均值。

97. 负载损耗与空载损耗测量时应注意一些什么问题?

同一套图纸在不同生产厂制造变压器时有时损耗实测值相差很悬殊。引起差别的因素很多,包括电源波形、仪表精度、结线等。

为了获得更小的误差,在负载损耗和空载损耗测量时应注意一些问题。

(1) 负载损耗测量

不论是双绕组还是三绕组变压器,只能测量一对绕组的负载损耗,应在额定频率下将近似正弦波的电压施加在一个绕组上,此时,另一绕组短路,其他绕组(如果有的话)开路。但是,对三绕组变压器而言,如果被测的一对绕组位于最里面或最外面,中间绕组在测量负载损耗时开路,测出的负载损耗中将包括中间绕组的涡流损耗,这一损耗属附加损耗,它与温度成反比。

影响负载损耗测量准确度的因素很多,新 IEC76—1 标准已有特殊的要求:“所有用于试验的测量系统应要根据 ISO9001(1987) 标准第 4.11 条表明其具有保证的可追溯性的准确度。”对测量系统准确度的规定,也将在新的 IEC606 中加以说明。所以,首先要保证测量系统的准确度。一般,测量系统的测不准误差要求在 3% 以下。这对负载损耗测量是较难达到的。

要减少负载损耗测量误差,应注意:

a. 电源容量与电压波形

电源容量要能使被试变压器中通过额定电流,GB1094.1—1996 国标中规定,“也可以不小于 50% 额定电流”。这里应注意的是:一般是假设负载损耗与电流平方成正比,但是,当采用非线性材料时,负载损耗不与电流平方成正比,此时应使电源容量能输出变压器所需的 50%~100% 额定电流。

施加于变压器的电压应是阻抗电压,电压波形要近似于正弦波。一般用市电作电源时较难达到这一要求,最好用正弦波电压波形发电机作电源。

对选用的调压器应不使电压波形畸变;对选用的电流互感器应使互感器额定电流接近于施加于变压器符合要求的电流,且测量级准确度应达 0.1 级及以上,最好选用零磁通电流互感器或“双级式”电流互感器保持较小比值差与相位差;对选用的电压互感器应使互感器额定电压接近变压器的阻抗电压,其测量级准确度也

应达到0.1级及以上,使电压互感器保持较小的比值差与相位差。

电源的频率要准,在试验过程中或试验大容量变压器时额定频率不能变化。市电的频率也难满足这一要求,要有仪表监测频率。

所以,在试验报告上要证明:负载损耗确实与负载电流平方成正比;选用的电压互感器电压比、电流互感器的电流比接近于额定值;频率表读数始终为额定值。

b. 试验读数的速度与变压器温度的测定

因为负载损耗值是温度的函数,GB1094.1—1996 国标附录 E 中对负载损耗的温度校正有规定。如测量速度慢,负载损耗产生的温度会使读数不准。

变压器冷态温度时的测量应使变压器在不励磁、不带负载下静放一段时间后,使绕组温度接近室温时方可进行。变压器真空干燥、注油后,绕组温度仍高于室温时,测变压器温度与变压器绕组冷态电阻时,测量结果是不准的。

负载损耗中电阻损耗与温度成正比,所有其他损耗与温度成反比,可照 GB1094.1—1996 国标附录 E 所列公式,将负载损耗测量值换算到参考温度。换算后的负载损耗值才能列入试验报告。

对油浸式变压器,参考温度为 75℃,对于式变压器,参考温度为各绝缘材料温度等级的绕组允许温升加 20℃,如 A 级为 80℃,B 级为 95℃等。

负载损耗的温度校正前,应将电阻损耗与附加损耗先从测出的负载损耗中分离,然后才能作温度校正与参考温度的换算。分离时,电阻损耗应是额定电流平方与实测电阻的乘积,要对低压绕组的电阻测准,测量速度也应快。电阻测量的误差直接影响额定负载损耗的误差。

c. 仪表接线

测量三相变压器负载损耗,有双瓦特表法与三瓦特表法两种。

用双瓦特表法时,双瓦特表读数一般是一块表正读数,另一块表负读数,对低损耗变压器而言,测量误差就很大。读数时有随机

误差,低损耗变压器负载损耗的功率因数很小,低功率因数瓦特表的功率因数会大于负载损耗的功率因数,因此,瓦特表指示的偏转读数很小,读数随机误差很大。因此测量低损耗变压器负载损耗时应采用三瓦特表法接线,三瓦特表读数为相加,瓦特表应用功率转换表(其功率因数为零),这样,读数随机误差可小。

试验报告上要说明选用的瓦特表接法、表的种类。

d. 测量误差与变压器容量的关系

变压器容量越大,负载损耗的功率因数越小,也就是说,测量等值回路的功率因数越小。

所以,测量电力变压器负载损耗的中心问题是如何降低电压与电流测出值的相位差。尤其是大容量变压器, $\cos\varphi$ 越小,引起损耗测量值的误差越大。

e. 传统损耗测量系统相位差对负载损耗误差的影响

传统损耗测量系统中包括电磁式电流与电压互感器,以及电动式瓦特表。

0.1级互感器的相位差允许值约 $\pm 5'$ (电流互感器电流比选得不对时会远大于 $5'$),对大容量变压器而言也会引起不少的测量损耗的误差。可按实际相位差对实测值进行校正。

f. 短路用联结线

短路用联结线的电流密度要低,联结要牢靠,尤其在低压侧短路的联结线。如电流密度较高,联结又不牢,有较大接触电阻,会有附加损耗产生,也是测量损耗的误差。

(2) 空载损耗测量

对同一台变压器而言,空载损耗的测量与负载损耗的测量不同:一是功率因数稍微大些,约为0.1~0.2;二是变压器从电源吸取的空载电流波形严重畸变;三是空载损耗不作温度校正。

空载损耗是在变压器上施加无干扰的正弦波电压(因空载损耗对电压的波形很敏感,所以必须是正弦波电压),其他绕组开路时的损耗。判断满意的正弦波形是方均根值电压表读数与平均值电压表读数的对比。按GB1094.1—1996国标规定,试验电压应按

平均值电压表进行调节,但该表的刻度为具有同一平均值的正弦波形方均根值电压,读数为 U' 。方均根值电压表是与平均值电压表并联,读数为 U 。 $\left| \frac{U' - U}{U'} \right| < 3\%$ 是判断正弦波准则。一般 $U' - U$ 为负值,电压波形必须满足这一准则,空载损耗不作波形校正。

这个判断准则不仅要求试验电源能输出空载正弦波形电压,而且要求电源必须具有低串联阻抗的足够容量,对电源的联结也有些约束。

由于空载电流含有大量高次谐波,波形严重畸变,使发电机磁通波形也随之产生畸变,从而影响输出电压波形,一般的输出电压波形为尖顶波,造成测量空载损耗的误差。当然空载电流波形畸变与施加电压、额定工作磁通密度有关,因此,瓦特表的电压引线或电压互感器越靠近被试变压器越好。这样,既可防止测量系统的损耗进入瓦特表,又可使电压测得更准些。

另外,电源的频率必须保持额定值,否则铁心中磁通密度会变化而影响准确度。

因为空载电流与空载损耗随外加电压而快速增加,所以对电压的测量与电压的调节也是很关键的,应及时读取电压值,一旦达到规定电压时应及时停止调压。这一读数与调压的准确与否,会对空载损耗测量误差产生影响。

另外,新标准中还规定:三相变压器的联结应使加在不同三个相绕组上的电压越接近正弦波越好。这是因为三相三柱变压器的磁路不对称,三相空载电流不平衡,也不对称,使三个相绕组上电压波形不完全相同,所以要求三个相的电压波形尽量接近正弦波,才能减少测量误差。

试验大容量单相变压器时,试验容量的需要(涉及电压波形畸变)和损耗测量常会遇到困难。

另外,测量损耗以前的磁化特性,对空载损耗测量而言是非常敏感的。铁心中剩磁(指在用直流测绕组电阻时达饱和磁密后剩磁,或施加单方向长持续时间冲击后剩磁)会对空载损耗测量值产

生影响。所以,在测空载损耗前要对铁心进行退磁以获得较好结果。

采用传统式测量系统时,适用于负载损耗方面的一些误差来源也适用于空载损耗的测定。如互感器相位差对实测损耗准确度的影响。

空载损耗有时还用作复试项目以检查其它试验是否合格。在冲击试验和温升试验前测出的空载损耗实测值,通常能代表长期运行中的平均损耗水平。而在其他试验后测得的空载损耗值有时较高,这是由于在冲击试验等试验中,硅钢片叠片边缘出现放电所造成的。故此时的测量结果不完全代表运行中的损耗。

为在生产过程中及时检测铁心的性能,对大型变压器常作半成品空载损耗测量,铁心叠完后(不叠上铁轭工艺的变压器无此测量)、绕组套装后都有空载试验项目,测出的空载损耗应比成品空载损耗低才行。一般,这仅是工序间检测,不作为考核合格与否依据,但半成品空载损耗实测值较大时应分析原因并加以解决。大型变压器绕组套装后空气中进行空载试验时,要注意绕组出头间电压 $<20\text{kV}$,以免空气中产生放电,必要时可在高压绕组增加临时套圈,试验时剪断,试验后焊上,或降低施加电压。半成品空载损耗测量主要目的是及时发现问题,避免一旦有问题时全面返工。不是标准要求检测的项目,属于工厂自己的中间检测的项目。

98. 变压器有哪些绝缘试验(耐压试验)? 它们是怎样进行的?

变压器的绝缘试验(以前称耐压试验),包括外施耐压、感应耐压、冲击耐压等试验。

(1) 外施耐压试验

外施耐压试验是对被试变压器加一分钟的工频高压的试验,也曾称工频耐压试验。它是考核不同侧绕组间和绕组对地间的绝缘性能,也就是考核变压器主绝缘的水平,所以只适用于全绝缘变压器。因此,试验时被试变压器的不同侧绕组各自连在一起,一侧绕组施加电压,另一侧绕组接地,其接线图如图 98—1 所示。

外施耐压试验时,在电源电压较低时合闸;试验电源电压达

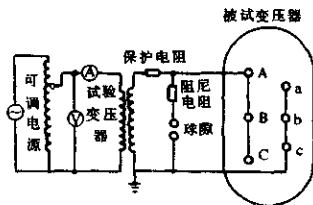


图 98—1 外施耐压试验接线图

到试验电压的 40% 以下时, 升压速度是任意的; 在 40% 以上时, 应以每秒 3% 速度均匀上升; 达到规定电压和持续时间后, 应在 5s 内将电压迅速而均匀地降到试验电压的 25% 以下, 才能切断电源。

(2) 感应耐压试验

全绝缘变压器的感应耐压试验是高压绕组开路, 向低压绕组上施加 100 ~ 250Hz 的两倍额定电压的耐压试验。由于频率增高, 铁心在不饱和时能保证两倍感应电压, 从而试验了绕组匝间、层间和相间的绝缘性能, 即考核了变压器纵绝缘水平。

对于分级绝缘的变压器, 把中性点电压抬高(支撑起来), 就可以考核主绝缘水平了。这样, 感应耐压试验既进行了纵绝缘的试验, 又补救了该种变压器不能做外施耐压试验的不足, 也同时等效地做了外施耐压试验。

分级绝缘的三相变压器的感应耐压试验, 常采用分相感应试验方法, 其接线图如图 98—2 所示。

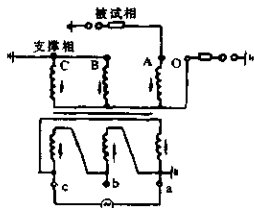


图 98—2 三相变压器分相感应耐压试验接线图
(只示试验 A 相的情况)

将非试的两相(图中 B、C 相)线端并联接地,把中性点 O 抬高到试验电压的 $1/3$ 左右,从而使试验相(图中 A 相)线端达到外施耐压试验的要求,而该试验相绕组的感应电压又达到了感应试验的要求。

如果这样做不能符合试验要求,可以调节分接位置,甚至可以用另一台变压器作支撑变压器来支撑中性点。

新标准中要求感应试验时要测局部放电量、起始与熄灭局部放电电压。

(3) 冲击电压试验

冲击电压试验分雷电冲击试验(包括全波冲击试验和截波冲击试验)和操作波冲击试验。在新编制的 IEC76—3 标准中,对 $U_m \leq 40.5\text{kV}$ 变压器,全波冲击试验和截波冲击试验都是型式试验;对 $U_m \geq 72.5\text{kV}$ 变压器,全波冲击试验是例行试验,截波冲击试验是型式试验;对 $U_m \geq 252\text{kV}$ 变压器,全波、截波和操作波冲击试验均是例行试验。

全波与截波冲击试验是交替进行,一般是负极性,先做一次全波冲击、做两次截波冲击、再做两次全波冲击。因此,需要一个截断装置。

变压器容量较大时,因电容量大而波形不能满足时,应将冲击电压发生器几个级并联运行。

对变压器中点进行冲击试验时,因属三相入波,电容量大,但试验电压一般不高,应将冲击电压发生器几个级并联后加压。

全波电压与截波电压沿绕组不是均匀分布。

试验时,除施加电压的端子外,其他端子全部接地,即高压绕组中点、低压绕组起末端都接地。在冲击试验时,低压绕组中部对铁心柱中部有冲击感应电压,如场强太高,在高压绕组作冲击试验时,会发生低压绕组对心柱的击穿。当采用 H—L—L—H 或 L—H—L 结构时,两个低压绕组联线处也会有冲击感应电压。

冲击试验应注意:一旦产品发生击穿,应防止同时击穿仪表,尤其是截波试验,冲击电流流过接地电阻时会有较大压降,压降太

大,会使仪表击穿,因此,必须注意接地电阻值不能高,一般规定在 0.5Ω 以下。必要时,产品接地可与仪表接地分开。

$U_0 \geq 252\text{kV}$ 的变压器还要进行操作波冲击试验。

操作波试验电压沿绕组按匝数均匀分布,并有感应作用。因此在操作波试验时,每个绕组不能短接,高压绕组、低压绕组只能一点接地。

操作波试验时相间试验电压高于对地试验电压,而全波冲击与截波冲击试验时对地试验电压等于相间试验电压。所以,操作波冲击试验时必须重新接线。

因为操作波冲击电压有感应作用,所以在原则上,操作波冲击试验电压加在高压绕组上与加在低压绕组上都可以,但通常在实际试验时都施加在高压绕组的一个线端上。

操作波冲击试验时,相间试验电压要预测一下,由于电容耦合,相间试验电压会超过规定试验电压。试验时要用电阻降低相间试验电压。

操作波试验电压一般也是负极性的。

操作波冲击试验时,还有一点要注意,即施加电压的线端与相邻相低压绕组间试验电压会超过施加电压。

雷电冲击试验与操作波冲击试验都是逐相进行。

99.局部放电在变压器和互感器中产生的原因是什么?又怎样进行测量?

所谓局部放电,是指在高压电器内部绝缘的局部位置发生的放电。这种放电只存在于绝缘的局部位置,而不会立即形成整个绝缘贯通性的击穿或闪络,故称之为局部放电。

(1)局部放电产生的原因

一般来说,局部放电产生的原因有两种:一是由于结构不合理,使绝缘内部电场分布不均匀,形成局部电场集中,在电场集中的地方,就有可能使油隙或局部固体绝缘局部放电或沿固体绝缘表面放电。二是由于制造和工艺处理不当:如使金属部件带有尖角、毛刺或绝缘混进杂质和局部带有缺陷,这些部位的电场就要发

生畸变而使场强升高造成局部放电;如使绝缘油的含气量过高形成气隙,或含水量过高分解生成氢而形成气隙,这些气隙介电系数低,场强高,从而使气隙首先击穿形成局部放电。

变压器和互感器内产生局部放电的环节,一般是在电场集中和绝缘薄弱的部位。变压器常有:导体与绝缘、绝缘与绝缘搭接缝隙中滞留的气隙放电;引线与绕组接头处油纸绝缘的油隙放电;绕组端部绝缘的油隙放电;匝间绝缘放电;纸板和角环的沿面滑闪放电;各部绝缘中混进金属杂质的周围绝缘放电;地电位的高场强处放电等。高压电流互感器有:各均压屏之间油纸绝缘残存的气隙放电;杂质周围绝缘放电;均压屏端部的气隙或油隙放电;均压金属屏断裂处的油隙放电等。高压电压互感器有:端部绝缘的油隙放电;层间绝缘的气隙或油隙放电等。树脂浇注固体绝缘互感器的放电部位多在固体绝缘中的气泡部位发生。

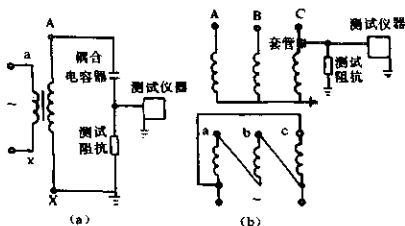
局部放电对绝缘的破坏作用有两种情况:一是放电质点对绝缘的直接轰击造成局部绝缘破坏,逐步扩大,使绝缘击穿;二是放电产生的热、臭氧、氧化氮等活性气体的化学作用,使局部绝缘受到腐蚀,电导增加,最后导致热击穿。通常,电气绝缘的破坏或局部老化,多是从局部放电开始的,它的危害性也就突出地表现在使绝缘寿命降低和影响安全运行。这就是近年来人们对局部放电重视的原因。

变压器和互感器的局部放电测量方法和一定电压下的允许放电水平,在我国标准中已有明确规定,以目前在执行的《电力变压器》标准为依据来做局部放电试验。

(2) 变压器局部放电测量

变压器局部放电的测试采用感应加压方式。试验电压一般要高于试品的额定电压,所以电源频率一般采用 150 ~ 250Hz。单相和三相变压器的测试回路如图 99-1 所示。

局部放电信号多从高压套管末屏引出,若高压套管没有末屏,可用一耦合电容器 C_1 引出信号。在测试阻抗上接一测试仪器,就可在测试仪器上与校正的放电量相比,即可得知局部放电的



(a)单相变压器 (b)三相变压器

图 99—1 变压器局部放电测试回路

电量。

对油浸式变压器的试验程序和允许放电水平按现行国家标准《电力变压器》GB1064.3—85 的规定,其试验程序如图 99—2 所示。图中施加电压 $U_1 = \sqrt{3} U_m$

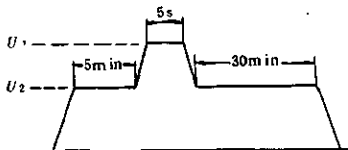


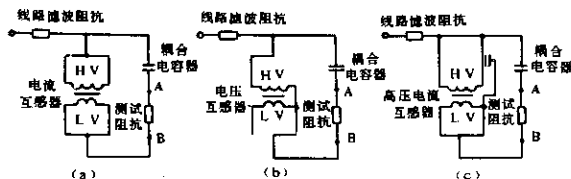
图 99—2 局部放电试验时施加电压的时间程序

$\sqrt{3} = U_m$ 、 $U_2 = 1.5 U_m / \sqrt{3}$ 时,视在局部放电水平 $Q \leq 500 \text{pC}$ (微微库);如果 $U_1 = U_m$,而 $U_2 = 1.3 U_m / \sqrt{3}$ 时,则视在局部放电水平 $Q \leq 300 \text{pC}$ 。其中 U_m 为变压器最大工作线电压。目前我国按 $U_2 = 1.5 U_m / \sqrt{3}$, $Q \leq 500 \text{pC}$ 进行试验。

即将出版的 IEC76—3 新标准中对局部放电试验有更高要求,预加电压将提高,局部放电试验电压 U_2 的持续时间将延长,允许局部放电量将减少,还将增加短时工频感应试验电压在预励磁下,于 U_2 时测局部放电量。

(3) 互感器局部放电测量

互感器分电流互感器和电压互感器两种。它们的测试回路按标准 IEC44—4(1980)规定,如图 99—3(a)、(b)所示。



(a) 电流互感器 (b) 电压互感器 (c) 高压电流互感器

HV——高压绕组 LV——低压绕组

图 99—3 互感器局部放电测试回路

试验时,可以 B 点接地(并联测试回路),放电信号由 A 点引出;也可以 A 点接地(串联测试回路),放电信号由 B 点引出。若电压互感器的高压端 A 和末端 X 的绝缘水平相同,则按图 99—3 (b)回路应对 A 端和 X 端轮流交替各做一次试验。

带有均压屏的高压电流互感器,其测试回路如图 99—3(c)所示。

互感器的试验程序和允许放电水平如表 99—1 所示。

表 99—1 互感器的试验程序和允许放电水平

接地形式	互感器的型式	预加电压 $\geq 10s$	测试电压 $\geq 1min$	绝缘形式	允许放电水平 视在电荷
中性点 非有效接 地系统	电流互感器	$1.3U_m$	$1.1U_m$	液体浸渍 固体	100pC 250pC
	相对地电压 互感器	$1.3U_m$	$\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$	液体浸渍 固体	10pC 50pC
	相对相电压 互感器	$1.3U_m$	$1.1U_m$	液体浸渍 固体	10pC 50pC
中性点 有效接 地系统	电流互感器 和相对地电压 互感器	$0.8 \times 1.3U_m$	$\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$	液体浸渍 固体	10pC 50pC
	相对相电压 互感器	$1.3U_m$	$1.1U_m$	液体浸渍 固体	10pC 50pC

100. 变压器特殊试验项目中的零序阻抗测量、声级测量和空载电流谐波测量是怎样进行的？

(1) 三相变压器零序阻抗测量

计算三相对称短路电流时，可以利用变压器的短路阻抗求得，必要时应按系统短路容量将发电机和输电线路阻抗计入。但计算单相短路电流时，无论是一相与另一相之间的短路，还是一相与中性点（或地）间的短路都要按正序阻抗、负序阻抗或零序阻抗计算单相短路电流。就变压器而言，正序阻抗和负序阻抗完全相同是已知的，而零序阻抗却难以计算，一般用零序电流测量零序阻抗，因为零序电流在三相线路的各相中部是同一相位，所以三相绕组无论是 Y 结线还是 D 结线，可以分别接成并联或串联后用单相励磁方法测量零序阻抗。采用并联法测量时的结线图如图 100—1 所示。

并联法是把二次绕组的三相线端并联起来，并于中性点之间施加单相电压 U ，通过每相绕组的电流可以认为都是 $I/3$ ，即为零序电流 I_0 。因一次侧无电压，铁心中只有二次绕组产生的零序磁通，则零序阻抗：

$$Z_0 = \frac{U_0}{I} = \frac{U}{I/3} = \frac{3U}{I}$$

(2) 声级测量

目前的声级是指空载下变压器的声压级水平。声级水平测量是利用 A 计权声压计距基准发射面一定距离（自冷式或风扇停止

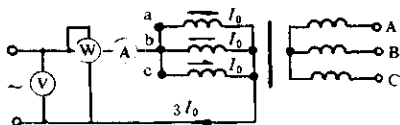


图 100—1 用并联法测量 Y_{yn} 结线组合
变压器零序阻抗的结线图

运行的风冷式是在相隔 $X = 0.3\text{m}$ 处、风冷式相隔 $X = 2\text{m}$ 处) 进行多点的声压级测量。当油箱高度小于 2.5m 时, 在油箱 $1/2$ 高度上放置测量点; 当油箱高度大于 2.5m 时, 则在油箱 $2/3$ 和 $1/3$ 高度上各设测量点。测量点间距 $D \leq 1\text{m}$, 如图 100—2 所示。背景噪声则以 $X = 2\text{m}$, 测量点不少于 4 点的情况下进行测量。

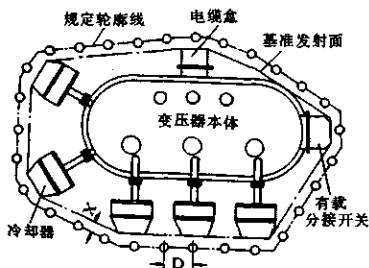


图 100—2 冷却器直接安装在变压器油箱上测量噪声时声级计的位置

根据测量值求得声压级平均值(参见题 20), 然后减去背景噪声校正值的绝对值。该绝对值为:

合成噪声与背景噪声之差/dB	3	4~5	6~8	9~10
背景噪声校正值的绝对值/dB	3	2	1	0.5

(3) 空载电流谐波测量

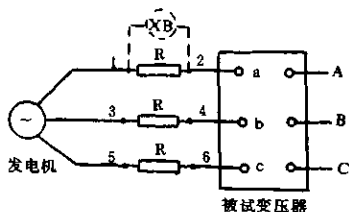
测量空载电流谐波的正确方法, 是以无感电阻 R (线性电阻) 取电压, 用谐波失真仪测量其谐波电压占基波分量的百分数。其取样电压应在额定电压的 0.25% 以下, 使串入 R 后空载损耗值变化不大, 才不影响测量误差。这样:

$$R = UII = 0.25 U_n / i_0 \% I_n$$

式中 U_n 、 I_n ——额定电压和额定电流;

$i_0\%$ ——空载电流百分数。

测量时,将谐波失真仪依次接到图 100—3 的 1 与 2、3 与 4 及 5 与 6 之间,即可分别得出各相的空载电流谐波。既要测出总的谐波量,也要测出各次谐波分量,其中主要是 3、5、7、9、11 各次谐波。因为很可能某一谐波分量值远比总谐波量值大。



XB——谐波失真仪 R——标准无感电阻

图 100—3 正确测量空载电流谐波的线路图

励磁电压除在额定电压下进行测量外,还建议在 90%、95%、105% 及 110% 额定电压下测量。为提供必要的参考数据,谐波测量值应进行记录。测量时失真仪处的悬浮电位,外壳不能接地,应注意安全。

101. 温升试验对变压器有什么好处?

温升试验目前是一次型式试验。

传统的温升试验考核绕组平均温升(用电阻法测)与油顶层温升,如这两项温升实测值没有超过标准中规定的允许温升限值,那么,变压器就被认为是通过了温升试验这项型式试验。

但是随着变压器电压等级的提高,大容量变压器损耗的降低,光纤维式测温装置的出现,油中含气色谱分析技术与液相色谱分析技术的发展,温升试验作为型式试验项目之一的内容要增加了。

在强油循环冷却的超高压变压器中,由于油与绝缘纸板的相对运动,会使油中正负离子分离而产生油流带电现象。如油路设计不好,油的速度、油路绝缘材料的表面粗糙度、油的材质控制不当,如带电趋势、表面张力、含水量、油流带电会发展成油流放电

而形成故障。因为考核变压器的油流带电性能,一般是结合温升试验,在只开泵下与开泵和带电压下测油流带电特性。利用只开泵不带任何电压的试验前后的油中含气色谱分析结果加以判断(备用冷却器的泵一般不开)。在开泵下进行规定的局部放电试验。这两次是模拟运行工况进行的等价试验,在标准上目前还未有这样的要求,但实际上,进行这两次试验是非常有益的。

对大容量变压器而言,还可利用温升试验前后的油中含气色谱分析以发现设计与制造上的一些缺陷,如换位错误和局部过热等。

国际大电网会议已有专门判断准则来发现这些缺陷(国家标准也将有判断准则)。所以,进行这项试验时,温升试验时间要加长,对大容量变压器,一般在48h以上。

目前都在大容量变压器油箱壁上装有各种结构的磁屏蔽,板式、条式、上下垂直装,左右跨相间放。漏磁在磁屏蔽中会产生噪声,即负载噪声,它在空载噪声测试时无法试出,只能在满负载条件下的温升试验中测出,正好冷却装置的噪声也可一并测出。当容量较大,尤其阻抗电压较大时,负载噪声不可忽视。所以,可利用温升试验测变压器的负载噪声。

目前,已有测绕组最热点温度的测温系统,在导线附近放传感器,通过光导纤维传出信号。可埋设一定数量的传感器,在温升试验中测出绕组最热点温度与瞬态温度特性,这对大容量变压器也是有益的。

对强油循环冷却的变压器,还可利用温升试验测出油回路的压降,以检测泵的扬程是否足够,会不会产生负压现象。

温升试验中还要检测油箱壁上有无局部过热,这可利用红外测温仪进行。对大电流套管附近、大电流引线附近可用红外线扫描以检测有无过热。

对特大容量变压器或高阻抗变压器应在器身工序的阶段,通一定百分数额定电流,用红外测温仪检测温度分布,以监视内部结构件的温度分布。

热有时会导致油的分解、纸的老化,既是变压器寿命问题,又涉及变压器安全运行问题。故温升试验内容增加后对变压器可靠性而言是非常有益的。

102. 有载分接开关的工作顺序试验是怎样进行的?

有载分接开关的工作顺序试验是验证开关的选择器和切换开关的动作是否协调,各部位动作的顺序和程序是否达到设计要求的试验。开关的工作顺序试验,是以垂直轴转角计算的,因此又称开关的分离角试验。

有载分接开关是由单数选择器、双数选择器、切换开关组成,有的还有转换选择器。它们之间的协调动作是靠不同形状的槽轮的拨盘和拨钉实现的。开关制造完成后试验其工作顺序时,要把选择器与转换选择器的所有分接定触头用导线连接起来,按图 102—1 的接法,试验变压器三相每个分接位置的选择器分合和切换开关动作时在垂直轴上的转角。

试验时在开关驱动机构输出的垂直轴上(参见图 54—6)固定一个指针,在指针下面驱动机构上放置一个刻有 360° 的与该垂直轴同心的圆盘。刻度盘的直径约 30cm 左右,正、反向均有刻度。

把切换开关里的油放至切换触头以上 2—3cm,以确定切换开关定触头 X_1 、 X_2 , Y_1 、 Y_2 和 Z_1 、 Z_2 的位置,然后按图 102—1 结线。结线时应明了哪块万用表是指双数选择器,哪块表是指单数选择器。万用表的 Ω 档应放在 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 的档上。

现以不带转换选择器的 7 级调压开关的 A 相为例。说明它的动作顺序,如表 102—1 所示。

带有转换选择器的有载分接开关的工作顺序与不带转换选择器的工作顺序大体相同,只是在转换选择器动作时略有区别。转换选择器与选择器是串联的,分离角试验时,选择器“分”的读数是它们中的一个“分”的读数,而选择器“合”的读数是它们同时“合”的最小读数。分离角试验时必须试验其转换选择器与选择器一起动作的分接位置。

表 102—1 7级调压有载分接开关的工作顺序

分接 过 程	单数选择器		。双数选择器		切换开关	
	动作 方向	运行 位置	动作 方向	运行 位置	动作 方向	运行 位置
1	—	1	—	2	单	X ₁
1→2	不动	1	不动	2	单→双	X ₂
2→3	1→3	3	不动	2	双→单	X ₁
3→4	不动	3	2→4	4	单→双	X ₂
4→5	3→5	5	不动	4	双→单	X ₁
5→6	不动	5	4→6	6	单→双	X ₂
6→7	5→7	7	不动	6	双→单	X ₁
7	—	7	—	6	单	X ₁
7→6	不动	7	不动	6	单→双	X ₂
6→5	7→5	5	不动	6	双→单	X ₁
5→4	不动	5	6→4	4	单→双	X ₂
4→3	5→3	3	不动	4	双→单	X ₁
3→2	不动	3	4→2	2	单→双	X ₂
2→1	3→1	1	不动	2	双→单	X ₁

在变压器总装配完成后或现场吊芯检查或大修后试验时,只试验其部分分接位置,验证开关与原始状态是否一致就可以了。例如7级调压开关,正向试验3→4→5;反向试验4→3→2。试验中为了避免齿轮间隙所造成的误差,要超越预测分接位置两个分接,再返回来开始试验。

这项试验要想测量得准

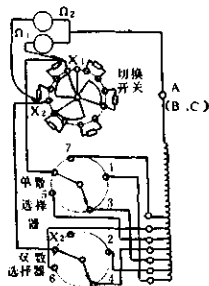


图 102—1 有载分接开关分
离角试验线路

确,必须手柄摇得很慢,且要记录选择器“刚刚”离开和“刚刚”闭合的角度,切换开关要记录打响那一瞬间的角度。选择器相邻触头的边缘距离正反向应该相等;切换开关由单到双数和由双到单数分接位置大面与小面动作的角度差,正向与反向应该相等。它们的角度差应大体与原始数据相等。三相切换开关动作的角度应该相等,即听到的响声是一个。

103. 变压器做各项试验时分接开关应置于何分接位置?

(1) 电压比试验

应在每个分接位置时测定其电压比,并使测量允许偏差符合标准规定要求。

(2) 负载试验

负载试验包括测负载损耗与阻抗电压。新国标要求测最大分接位置、主分接位置、最小分接位置时的负载损耗与阻抗电压,并将测量值换算到参考温度。测量允许偏差要符合标准规定要求。最大与最小分接位置下测负载损耗时,应通以相应的最大与最小分接位置的分接电流。

(3) 空载损耗

一般是在主分接的分接开关位置下,施加额定电压作空载损耗。

对变磁通调压变压器而言,将额定电压加在最小分接位置时将有最大值的空载损耗。同时也要测出主分接位置、最大分接位置时的空载损耗,此时施加的电压都是额定电压。

(4) 工频耐压和绝缘电阻测试

工频耐压试验和绝缘电阻测试与分接位置无关,一般可在主分接下作工频耐压试验和绝缘电阻测试。

(5) 长时与短时感应耐压试验并测局部放电量

感应耐压试验,包括长时感应、短时感应、测局部放电量,一般位于主分接位置。当较高 U_0 绕组达到试验电压,调压范围超过 $\pm 5\%$ 时,也可使开关位于其他分接使较低 U_0 绕组的电压接近其试验电压。

(6) 温升试验

容量小于 2500kVA, 调压范围为 $\pm 5\%$ 的三相配电变压器是在主分接下作温升试验。

容量大于 2500kVA, 调压范围超过 $\pm 5\%$ 的三相变压器应在最小分接位置下(即最大分接电流位置下)作温升试验。

(7) 雷电冲击试验

当绕组具有悬浮的分接匝时会有振荡电压。因此,对三相变压器而言,每个相应有一个不同的分接位置,三个相分别位于最大分接位置、主分接位置、最小分接位置。然后逐相作雷电冲击试验。这样,可验证不同分接位置下绕组能承受雷电冲击的能力。

(8) 操作波冲击试验

一般位于主分接位置作操作波冲击试验。但对线端有载调压自耦变压器而言,当中压线端为 $\pm 8 \times 1.25\%$ 调压范围时,一般会有三个位置都属于主分接位置。如自耦变压器公共绕组与串联绕组是固定匝数,在中压线端另加一调压绕组供调压用时,在不同的三个主分接位置时会在调压绕组悬空端产生不同的正或负极性振荡电压。因此,变压器应耐受住正或负极性振荡电压。

(9) 短路试验

作短路试验时分接开关位置与雷电冲击试验相同,三相变压器的每个相有一分接位置,即三个相分别位于最大分接位置、主分接位置、最小分接位置,然后逐相做短路试验。

以上说明的最大分接位置是指具有最大分接电压的位置,主分接位置是指额定电压的位置,最小分接位置是指具有最小分接电压的位置。

在产品铭牌上,对负载损耗与阻抗电压的实测值并换算到额定条件下的值应标明其相应的分接位置。如最小分接位置的分接容量与额定容量不同而有所下降时,应标明最小分接位置时的分接容量。

在产品出厂时应将分接开关位于工厂规定的分接位置。对有载调压分接开关而言,工厂还应在说明书上告诉用户,开关操动机

构如何与有载分接开关正确位置相联,使操动机构指示的开关位置能符合开关的实际位置。

104. 为什么可从变压器油中溶气来判断变压器类产品的内部故障? 怎样判断?

变压器的常规电气试验虽然能检测和监视其内部故障,但由于受变压器容量、电压、结构形式和制造工艺等影响,仅能用于检测绝缘受潮、损坏等明显的故障,而不能发现局部缺陷以及早期潜伏性的故障。如铁心局部过热、较低能量的电晕放电等。为此,目前对 35kV 及以上主变压器广泛采用油中溶气色谱分析来检测和判断变压器内部故障。

一般情况下,变压器油中是含有溶解气体的。新油含有的气体最大值为 CO — $100\mu\text{L/L}$, CO_2 — $350\mu\text{L/L}$, H_2 — $15\mu\text{L/L}$, CH_4 — $2.5\mu\text{L/L}$ 。运行中的油有少量的一氧化碳和烃类气体。但是,当变压器有内部故障时油中溶气的含量就大不相同了。变压器内部故障时产生的气体及其产生的原因依次为:

氢(H_2)——由电晕放电、油和固体绝缘热分解产生;

一氧化碳(CO)——由固体绝缘受热及热分解产生;

二氧化碳(CO_2)——同上;

烃类气体:

甲烷(CH_4)——由油和固体绝缘热分解、放电产生;

乙烷(C_2H_6)——由固体绝缘热分解、放电产生;

乙烯(C_2H_4)——由高温热点下油和固体绝缘热分解、放电产生;

乙炔(C_2H_2)——由强弧光放电、油和固体绝缘热分解产生。

这样,就可以从变压器中取油样,采用表 104—1 中的脱气方法,用气体色谱分析仪分析出油中气体成分。根据这些气体的含量、特征、组分比值(三比值)和产气速率等方法判断变压器内部故障。

如果设备内部油中产气速率、溶解气体超过表 104—2、表 104—3 所列数值,应引起注意。现以特征气体判断法为例,说明特征气体与故障的关系,如表 104—4 所示。

表 104—1 常用脱气方法

真空法	薄 膜 法		
	饱 和 食 盐 水 法	无搅拌一次脱气	
		带搅拌	一次脱气 多次脱气
	水银托里拆利真空法		
溶解平衡法(机械振荡)			

表 104—2 总烃产气速率注意值

设备型式	开放式	密封式
产气速率/ $\text{ml}\cdot\text{h}^{-1}$	0.25	0.5

表 104—3 油中溶气含量注意值

设备	气体组分	含量/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$
变 压 器 和 电 抗 器	总烃	150
	C_2H_2	5
	H_2	150
互 感 器	总烃	100
	C_2H_2	3 或速率大
	H_2	150
套 管	CH_4	100
	C_2H_2	5
	H_2	500

注:注意值不是划分设备有无故障的惟一标准。

表 104—4 特征气体与变压器内部故障的关系

主要特征气体	故障类型
高浓度 H_2 , 总烃不高, CH_4 为总烃的主要成分, 有微量 C_2H_2	油中电晕或电火花放电
高浓度 C_2H_2 , 总烃和 H_2 较高, C_2H_2 为总烃的主要成分	高温电弧放电
高浓度 C_2H_4 , 总烃较高, 但 C_1H_2 未构成总烃中的主要成分	高温热点或局部高温过热
C_1H_4 、 H_2 、 CO 、 CO_2 的总烃均较高	绝缘局部过热或固体绝缘散热不良
总烃高, H_2 和 C_2H_2 均较高, 而 CO 、 CO_2 均正常	油中裸金属过热并有电弧放电、固体绝缘损伤

产生如表 104—4 故障类型的实际情况为:引线焊接不良, 开关接触不良, 导线有毛刺, 引线有短路, 绕组匝间、层间有短路, 铁心与穿心螺杆短路或有多点接地, 局部过热等等。

此外, 与用油中溶气柜类似的判断变压器内部故障的方法, 是

用气体继电器积聚的气体来判断的方法。不过,它只在变压器内部已有故障时才能判断,而不能发现早期潜伏性故障。通常是以气体继电器中的气体颜色和故障性质的关系来判断变压器内部故障,如表 104—5 所示。

表 104—5 气体继电器中气体颜色和故障性质的关系

气体继电器中气体颜色	内部故障的性质
黄色不易燃的	木质故障
灰白色有臭味、可燃的	纸及纸板故障
灰黑色易燃的	油故障(放电造成分解)

可是,单是以有无颜色,或可燃不可燃来判断变压器故障的性质并不是太可靠的。所以需用气体色谱来分析,但必须注意,在故障初期分解出的气体将与油中溶解的空气相混和,此时聚集在气体继电器中的气体,其成分和故障处的气体成分并不一致,应多取几次气样。

105. 照国标或 IEC 标准试验合格的产品,在运行中是否有足够的可靠性?

有时,有人会认为:凡按国标或 IEC 标准的要求通过所有型式试验、例行试验及特殊试验的产品,在运行中一定会有足够的可靠性。如果经过分析研究,可以得出结论:以上的认识是片面的。多数产品顺利通过各种试验后,运行可靠性是可以保证的,但不是绝对的。其理由如下:

a. 型式试验、例行试验及特殊试验项目对考核产品性能、运行可靠性是必要的。但是,限于试验条件,多数试验项目内容还不能完全模拟运行条件,缺少试验项目的等价性,多数试验项目只能在单应力下进行,不能在复合应力下进行。譬如:

做绝缘试验时,只有高电压的作用,没有电流的作用,没有热效应的影响,强油循环变压器的泵也没有启动。

冲击试验(包括全波冲击、截波冲击、操作波冲击)时,变压器既没有工频电压励磁,又不通过负荷电流。

温升试验时,只有额定电流,所加电压很低,仅为阻抗电压而

不是额定电压,所以没有电压的影响。

在额定条件下运行的变压器是复合应力的作用,有时还要在过励磁与超铭牌容量下运行。

b.有的制造缺陷没有在试验中考验。如产品内有异物,尤其是金属异物。做绝缘性试验时,因油泵未启动,金属异物积存在各个地方。但在运行时,一旦泵一启动,金属异物就会随油漂流过绕组而威胁绝缘强度。如是铁末,它还会在线段间沿电力线分布,在线段间搭桥。

c.有些工况是动态。如油中含水与纸中含水会在运行中按不同温度有不同的平衡点。低温时,油中含水会向纸中迁移;高温时,油会吸取纸中含水而增加其含水量。此时,纸的介电常数会变,电压分布会变。

如果产品内有局部过热(现行温升试验只能检测出绕组的平均温升,无法测出局部过热,有时虽有温升试验前后的油中含气色谱分析,如温升试验时间不长,也较难判断出是否有局部过热),绝缘局部逐渐老化,它会影响绝缘强度。

绕组处理不好,当绕组的高度于运行中有变化时,承受机械力的能力就变差。

绕组中纸包扁导线的匝绝缘包扎不紧,在运行中长期泡于油中,匝绝缘会涨起而堵塞油道。这样,绕组温升就上升,油道堵塞严重时会使温升超过允许值。

d.有的试验工况与运行工况不同。如工厂中做绝缘试验时是零起升压,逐渐降压,而运行时是全电压合闸,全电压切断。

e.有的运行工况无法考核。如承受地震能力,短时热容量试验(目前都是由计算法验证),大容量变压器的突发短路试验;三绕组变压器中,单一绕组向两个绕组送电,或两个绕组向一个绕组送电。

f.有的产品会遇到特殊的运行工况。如与GIS相联的变压器会遭到特快瞬变过电压(VFTO)的作用,这一过电压没有相应的试验项目对它验证。与GIS相联的变压器的密封不良,SF₆会渗入变

压器而引起放电。

变压器遭到磁暴作用而偏励磁,引起过大的励磁电流。三相断路器不是同步的切断,从而影响中点绝缘水平。

特大的雾会影响外绝缘。暴风雨也影响外绝缘。

综上所述,变压器应不断完善其试验项目,尽量增加其等价性。只要有利于提高变压器运行可靠性的试验项目,应尽量列入技术条件或标准。另外,应改善制造环境、改进加工工艺,加强外观与协作件检查,提高结构的合理性,从多方面提高产品的运行可靠性。

当然,以上工作做好了,又通过型式试验、例行试验与特殊试验,产品运行可靠性就有更多保证。

(十)特种变压器

106. 特种变压器是怎样分类的? 它的型号含义有什么特征?

特种变压器一般是按用途分类的,其分类约如表 106—1 所示;特种变压器产品的型号表示法是在电力变压器产品型号的基础上多标注了按标准规定的特征字母,也如表 106—1 所示。

表 106—1 特种变压器分类和型号表示法

分 类	用 途	特征字母
整流变压器	交直流电能变换	Z
附平衡电抗器		K
电炉变压器	电能与热能变换	H
附串联电抗器		K
电阻炉变压器		ZU
试验变压器	高压试验用	Y
矿用变压器	矿井下配电用	K
船用变压器	船舶配电用	S
中频变压器	1 000 ~ 8 000Hz 交流系统用	R
大电流变压器	大电流试验用	D

特种变压器型号举例:

例 1. ZSFZ - 16 000/60 表示三相风冷有载调压、额定容量

16 000kVA、高压额定电压 60kV 整流变压器。

例 2. HSSPK—12 000/35 表示三相水冷强迫油循环附电抗器、额定容量 12 000kVA、高压额定电压 35kV 电炉变压器。

107. 干式变压器有哪几种型式？有什么特点？

干式变压器与油浸变压器的主要差别是冷却介质的不同。干式变压器的铁心和绕组都不浸在任何绝缘液体中，它的冷却介质为空气，一般用于安全防火要求较高的场合。小容量、低电压的特种变压器，为了便于制造和维护，也做成干式的。干式变压器主要有下列几种型式：

a. 开启式。是常用的型式，其器身与大气相连通，适用于比较干燥而洁净的室内环境（环境温度为 +20℃ 时，相对湿度不超过 85%）。目前，电压在 35kV 以下，空气自冷式容量可过 10 000kVA，对更大容量的变压器，一般用吹风冷却，空气风冷式容量可达 16 000kVA。

b. 封闭式。与外部大气不相连通，可用于更为恶劣的环境。由于密封、散热条件差，目前主要用于矿用隔爆型变压器。也可充以 0.2~0.3MPa 压力的六氟化硫，并加以强迫循环，则变压器的绝缘和散热能力可和油浸式相比拟，适用于高电压的产品。不过，这时的干式变压器就是气体绝缘变压器了。

c. 浇注式。用有填料或无填料环氧树脂或其他树脂浇注作为主绝缘，结构简单、体积小，适用于较小容量产品。

d. 绕包式。用浸有环氧树脂的玻璃丝作为主绝缘。单台容量也不大。

干式变压器有如下特点：

由于空气的绝缘强度和散热性能都比油差，以空气作绝缘的干式变压器的有效材料消耗比油浸式为多，所以电力变压器只有在地下铁道、公共建筑物、车间内部或水电站等防火要求较高的场所才使用干式。

以空气作绝缘的干式变压器也应能承受住冲击电压试验。

干式变压器绕组绝缘可以采用 A、E、B、F、H 级，常用 E 级和 H 级。

干式变压器还可装在外壳内。

108. 什么是整流变压器？它的技术参数是怎样决定的？

变流分整流、逆变和变频三种方式。整流的用途最为广泛。整流变压器可用于电化、牵引、传动、直流输电、电镀、励磁、充电、串级调速以及静电除尘等各行各业。

工业用直流电源大部分是由交流经晶闸管(以前是汞弧整流器、硅整流器)而得到的,为晶闸管提供电源的变压器就是整流变压器。整流变压器的作用有两点:①将电网的高电压降低到相当于直流电压的数值;②将电源的相数转变为整流需要的相数(3相、6相、12相或更多相数,如72相)。

整流变压器的一次侧接交流电网,称为网侧;二次侧接晶闸管,称为阀侧。整流变压器不同于电力变压器之处在于:①电流波形不是正弦波。这是由于晶闸管各臂的电流波形为断续的近似矩形波所影响的。②根据整流装置的要求,整流变压器阀侧有多种特殊的结线,如双反星形、双反三角形、双重曲折形(见题44)等。


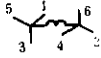
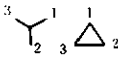


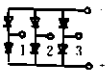
要了解整流变压器,主要是要知道怎样将直流的技术参数等效地换算到整流变压器的技术参数(交流)。有了整流变压器的技术参数后,它就与普通电力变压器相同了。

采用晶闸管时,单相的常采用单相桥式整流电路;三相电压较低(整流电压 $\leq 250\text{V}$)的常采用双反Y形带或不带平衡电抗器6相半波整流电路;三相电压较高的常采用三相桥式整流电路。但当输出功率在40kW以下的中小功率硅整流设备,均宜采用三相桥式整流电路,从发展观点看,三相桥式整流电路还可形成6相、12相以至于48相及以上的整流电路。一些常用简单整流电路联结方式和变压器的基本参数如表108-1所示。

表中, U_0 ——空载整流电压; I_d ——额定直流电流; U_d ——额定直流电压; P_d ——额定直流输出功率; K ——电压比。

由表可见,空载整流电压 U_0 如用户未提出是需要计算的。有了 U_0 之后,则整流变压器的技术参数就可按表中相应的公式求得了。

表 108—1 常用整流电路联结方式和变压器的基本参数

电联结方式		单相桥式	双 Y 带 平衡电抗器	三相桥式
网侧绕组相数		1	3	3
网侧绕组相数		1	2 × 3	3
网侧绕组接线		Y	y 或 d	y 或 d
网侧绕组接线				
整流元件联结方式				
网 侧 (二 次 侧)	线电压 U_1	$\frac{U_{\infty}}{0.9}$	$\frac{U_{\infty}}{0.675}$	$\frac{U_{\infty}}{1.35}$
	线电流 I_1	I_d	$0.289 I_d$	$0.816 I_d$
	容量 S_1	$1.11 P_d$	$1.48 P_d$	$1.045 P_d$
网 侧 (二 次 侧)	线电压 U_L	$K \frac{U_{\infty}}{0.9}$	$K \frac{U_{\infty}}{0.675}$	$K \frac{U_{\infty}}{1.35}$
	线电流 I_L	$\frac{I_d}{K}$	$0.408 \frac{I_d}{K}$	$0.816 \frac{I_d}{K}$
	容量 S_L	$1.11 P_d$	$1.045 P_d$	$1.045 P_d$
每值容量 S_T		$1.11 P_d$	$1.26 P_d$	$1.045 P_d$
电抗压降折算系数 K_x		0.707	0.5	0.5

下面以一常用的三相桥式硅整流电路的整流变压器为例,列出按整流的额定直流输出电压 U_d 和额定直流电流 I_d , 确定 U_{ω} 的方法。如果 $U_d = 800\text{V}$, $I_d = 5\,500\text{A}$, 一次电压 $U_1 = 35 \pm 5\% \text{ kV}$ 且为 Y 结线, 二次侧为 d 形结线, 其求取 U_{ω} 的步骤如下。

a. 直流额定输出功率:

$$P_d = U_d I_d \times 10^{-3} = 800 \times 5\,500 \times 10^{-3} = 4\,400 \text{ kW}$$

b. 变压器一次容量。由表 108—1 中关系式估算, 用带撇的符号表示估算值:

$$S_L' = 1.045 P_d = 1.045 \times 4\,400 = 4\,600 \text{ kVA}$$

c. 变压器负载损耗。负载损耗估算值可取下列数值:

S_L' (kVA) 分别为 < 500 , $500 \sim 800$, $800 \sim 2\,000$, $2\,000 \sim 8\,000$, $> 8\,000$ 时, 相应负载损耗估算值分别为:

$$P_L' (\text{W}) \quad 30S_L' \quad 25S_L' \quad 20S_L' \quad 15S_L' \quad 10S_L'$$

所以 $P_L' = 15S_L' = 15 \times 4\,600 = 69\,000 \text{ W}$

d. 变压器电阻压降:

$$\Delta U_r' = P_L' / I_d = 69\,000 / 5\,500 = 12.5 \text{ V}$$

e. 晶闸管电压降取:

$$\Delta U_z = 5 \text{ V}$$

f. 感抗压降百分数:

$$u_L \% = K_x u_x \%$$

式中, 电抗压降折算系数 K_x 如表 108—1 最后一行所列, 而电抗压降百分数如无特殊要求时可按图 108—1 选取。由此可得 $K_x = 0.5$, $u_x \% = 10\%$ 。这样:

$$u_L \% = 0.5 \times 10\% = 5\%$$

g. 空载整流电压:

$$U_{\omega} = \frac{U_d + \Delta U_r' + \Delta U_z}{1 - u_L \%} = \frac{800 + 12.5 + 5}{1 - 5/100} = 860 \text{ V}$$

其余技术参数按表中公式求出。但还应根据结线的不同, 以线电压、线电流求出相电压、相电流, 再进行变压器的计算。

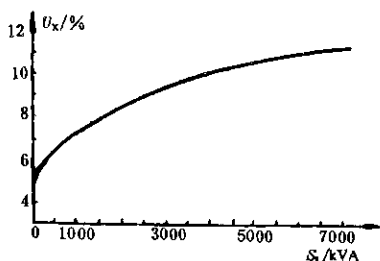


图 108—1 电抗电压 u_x % 与一次容量 S_L 的关系

109. 什么是炼钢电弧炉变压器？它是怎样调节电压和阻抗的？

电炉变压器的种类很多，有三相炼钢电炉用、三相矿热炉用、单相电弧炉用、电阻炉用、盐浴炉用、单相石墨化炉用、工频感应炉用和电渣重熔用电炉变压器。其中，炼钢电弧炉是主要的一种。

炼钢电弧炉变压器与一般电炉变压器一样，二次电压为数十伏至数百伏，并要求能在较大范围内调节，二次电流往往达数千至数万安。另外，又要适合冶炼过程中的三个时期。在熔化期需要功率大，变压器要有经常承受一定倍数短路电流的能力。由于炉料熔化时会造成电极间短路，故要增大电抗，限制短路电流倍数。在氧化期和还原期，所需功率减小，而且不易短路，电抗应减小。

中小容量炼钢电弧炉变压器绕组排列方式是高低压线段交错排列的，如图 109—1 右图所示。通常高压绕组为连续式，低压绕组为螺旋式。交错式绕组漏磁方向都是横向的，不能在同段的并联导线内感应不同的电势，不在并联导线之间引起循环电流，所以并联导线间可不用绝缘。这种交错式绕组可以采用直绕式或套装式，视绕制工艺而定。

既然炼钢电弧炉需要调节电压和改变阻抗，那么采用什么方

法呢？

(1) 调压方法

电炉的热惯性大，暂时停电不影响其正常工作，所以中小型电炉变压器常用无励磁调压。当然也可采用电动无励磁调压或有载调压，以提高生产率。

炼钢电弧炉变压器分接开关的特点是除完成分接变换外，还能作 D—Y 的变换。D—Y 变换是一种经济调压方式，从 D 结线改变为 Y 结线，就能将二次电压降低到原来的 $1/\sqrt{3}$ 。

(2) 阻抗的变换

炼钢电弧炉变压器是高低压绕组交错排列的，每对高低压线段组成一个磁势平衡组，图 109—1 右图为四个磁势平衡组。磁势平衡组数对电抗电压影响很大，如表 109—1 所示。磁势平衡组数越少，漏磁越大，电抗电压越大。如果在调节电压改变匝数时，又能改变磁势平衡组数，则电抗电压就改变了，中小型炼钢电弧炉变压器就是采取改变磁势平衡组数，而改变电抗电压的。如果电抗要求更大，则需串入或切除电抗器来改变电抗。大型炼钢电弧炉变压器就是用后一种方法。

表 109—1 磁势平衡组数与电抗电压的关系

电 抗 电 压 $u_x\%$		磁势平衡组数
高压 10kV	高压 35kV	
26 ~ 18	30 ~ 20	2
12 ~ 7	14 ~ 9	4
7 ~ 5	9 ~ 6	6
< 5	< 6	8

调节电压并改变电抗的具体方法举例如下。

图 109—1 是额定容量为 650 ~ 3 200kVA 改变磁势平衡组数的炼钢电弧炉变压器结线图。这是可供考虑的一种结构。

以 HS—1 250/6.3 变压器为例，其所得的低压电压和阻抗电压数据，如表 109—2 所示。

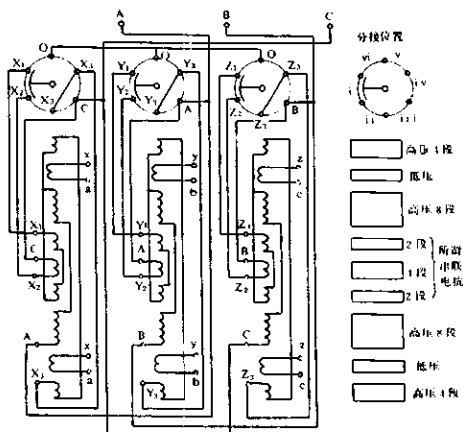


图 109—1 炼钢电弧炉变压器调压变抗的接线图

表 109—2 1250kVA 炼钢电弧炉变压器的低压电压和阻抗电压

分接开关位置	i	ii	iii	iv	v
低压电压/V	210	180	210	210	121
高压绕组接线	D	D	D	D	Y
阻抗电压/%	25	16	10.6	10.6	18.3

分接开关在 i 位置

X_1 、 Y_1 、 Z_1 分别与 X_2 、 Y_2 、 Z_2 短结，则高压各相中 AX_1 与 X_2C 、 BY_1 与 Y_2A 、 CZ_1 与 Z_2B 串联后组成 D 形接线，仅低压绕组内侧的全部高压线段投入运行，所以低压电压高，且是两组磁势平衡组，所以阻抗大，见表 109—2。

分接开关在 ii 位置

X_2 、 Y_2 、 Z_2 分别与 X_3 、 Y_3 、 Z_3 短结，则 AX_3 与 X_2C 、 BY_3 与 Y_2A 、 CZ_3 与 Z_2B 串联后组成 D 形接线，仅高压绕组中间的两相邻部分

未投入运行,所以低压电压低,而且四组磁势平衡组阻抗小。

分接开关在 iii 和 iv 位置

只是低压绕组两侧高压线段投入运行, D 形接线, 低压电压高; 四组磁势平衡组, 阻抗小。

分接开关在 v 位置

各相高压绕组运行线段与 iii 和 iv 位置相同, 但变为 Y 形接线, 低压电压降低 $\sqrt{3}$ 倍, 阻抗电压增大 $\sqrt{3}$ 倍。

分接开关在 vi 位置应是虚设位置, 因有 121V 一级存在可用于炼钢还原期。

由此, 可得高电压大小阻抗两级(开关 i 和 iii、iv 位置)、中电压中阻抗一级(开关 ii 位置), 低电压中阻抗一级(开关 v 位置), 见表 109—2。这样, 高电压大阻抗一级用于炼钢熔化期, 高电压小阻抗一级用于氧化期, 其余两级可选用于还原期。

串联电抗器中小型炼钢电弧炉变压器的调压接线图如图 109—2 所示。同样可得高电压带抗、高电压脱抗和低电压脱抗各级, 以适合炼钢的要求。

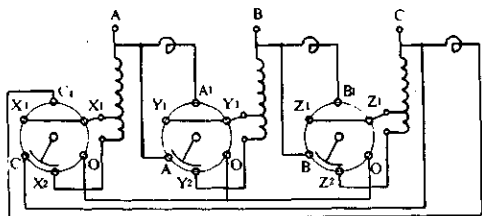


图 109—2 附串联电抗器炼钢电弧炉变压器调压变抗的接线图

110. 试验变压器有什么特点? 它有哪些种?

试验变压器是对各种电工产品和绝缘材料进行工频耐压试验的变压器, 也称高压试验变压器。其特点:

- 电压高。单台的额定电压为 50kV、100kV、150kV、250kV、

500kV、750kV。在额定电压下应无局部放电量。

b. 电流小。试验变压器的额定电流实际上是被试品的电容电流, 所以一般小于 1A。作外绝缘试验时, 常要求 4A。

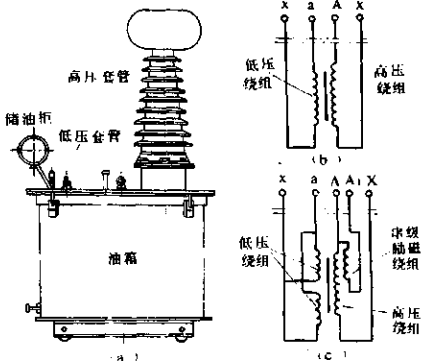
c. 工作时间短。因被试产品的耐压时间短(1min 或 5min), 所以工作时间一般在半小时以内。

d. 电压波形要求高。通常采用发电机组供电, 采用滤波器滤波, 而变压器本身的磁密不宜高。

试验变压器的型式有四种: 单套管式、绝缘筒式、双套管式和串级(串联)式。

(1) 单套管式

单套管式是单高压套管式, 如图 110—1 所示。其高压二次绕组的高压 A 端用高压套管引出, X 端接地或用低压套管引出, 对地按全绝缘。有串级励磁绕组时, 高压绕组 A 端与其 A_1 端从同一高压套管中引出。低压绕组 ax 在最里面, 有时高、低压绕组间有测量绕组。测量绕组的外面有接地电屏, 以保证人身和仪表的



(a) 外形 (b) 接线原理图 (c) 有串级励磁绕组的接线原理图

图 110—1 单套管式试验变压器

安全。铁心为单相单柱旁轭式。

(2) 绝缘筒式

绝缘筒式一般用于户内,它是用绝缘筒(酚醛纸筒或环氧玻璃纤维筒)代替油箱和高压套管,如图 110—2 所示。其铁心为单相双柱式,带二分之一高电压,需用绝缘支撑板对地绝缘,并横向放置。高压绕组高压端 A 与金属上盖连在一起,接地端 X 以及低压绕组的两端 a、x 从底座引出。这种结构体积小、重量轻,常用于 250kV 及以下的产品。

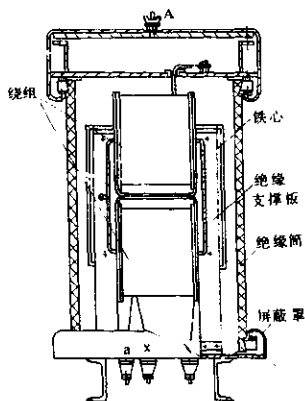


图 110—2 绝缘筒式试验变压器

(3) 双套管式和一般串级式

双套管式常用来进行串级联结,其单独使用时为双套管式。

串级式是将两台或多台双套管式试验变压器的高压绕组首尾串联而成。每台产品的绕组在左铁心柱上由里向外依次为平衡绕组、高压绕组和低压绕组;在右铁心柱上为平衡绕组、高压绕组和串级励磁绕组(最后一台没有)。铁心和油箱与两柱高压绕组连线相连,也为 $1/2$ 高电压。后一台的低压绕组由前一台的串级励磁绕组供电,使后一台电位提高。图 110—3 所示的为两台串级式,输出电压为 $2U_1$ 。串级式一般不超过三级,串级后高压额定电压可达 $3 \times 750\text{kV}$ 。

(4) 串联谐振式

用于电缆和大型电机试验、外绝缘污秽试验、线路电晕试验等项目的试验变压器,电流大(4~10A)而使用时间长,因此需采用串

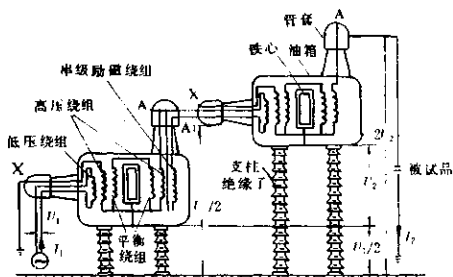


图 110—3 两台串级式试验变压器

联谐振式试验变压器,以降低变压器的实际容量,减小馈电(输入)功率,使其减小到输出功率的 $1/7 \sim 1/10$ 。其接线原理如图 110—4 所示,它是根据被试品的电容量,同步调节动圈式可调电抗器的电

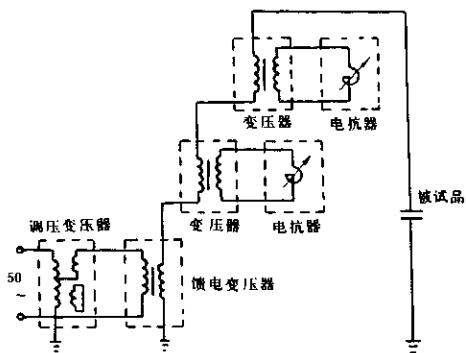


图 110—4 两台串联谐振式试验变压器

感,从而改变试验变压器的电感值,使之与被试品电容量相匹配,在工频时达到谐振。谐振时的试验变压器的总电压为被试品的试验电压。馈电变压器的电压通过动圈式调压变压器调节,其电压值和其从电网所汲取的功率,取决于谐振回路的品质因数,因此它比谐振容量小得多。

111. 矿用变压器有哪几种? 矿用隔爆型移动变电站有什么特点?

矿用变压器一共有三种:

(1) 矿用一般型变压器

矿用一般型变压器可装在有煤尘和沼气而无爆炸危险的场所,供电力拖动和照明用。

这种变压器为油浸式,基本结构与电力变压器相同,但箱壁两侧焊有电缆盒,一次和二次是用电缆线引出的。一次侧设有无励磁调压,调压范围 $\pm 5\%$,二次绕组引出六个端子,可以进行Y—D改结,得到690V/400V或1200V/690V。

为适应矿井下使用,要求变压器结构坚固,外形低矮。变压器不带储油柜,油箱内油面以上留有适当的空间,以防箱盖上的通气孔堵塞时箱内产生过大的压力。油箱的机械强度应能承受98kPa的压力而不发生永久变形。箱盖内侧要采取防止水冷凝的措施。

(2) 矿用隔爆小型变压器

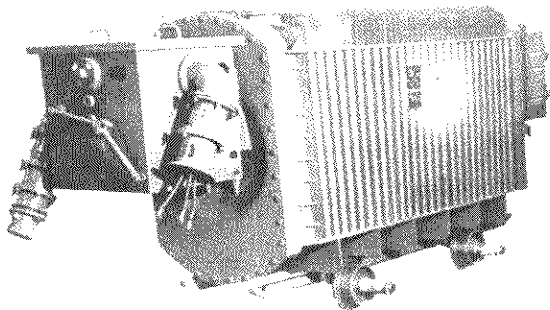
矿用隔爆型变压器用于煤矿中有爆炸危险的场所。这种变压器都制成干式密封式。箱壳的全部接合面均按隔爆要求制作,应能承受784kPa的内部压力。

照明用小型变压器的电缆通过出线套引出。出线套内设置橡胶垫圈,电缆穿过此垫圈,旋紧出线套后,垫圈即压紧电缆以确保密封。箱壳上焊有拖撬,可供水平放置和拖动,也可直立放置。

(3) 矿用隔爆型移动变电站

容量为100kVA以上的隔爆型变压器,常与隔爆型开关箱组合成隔爆型移动变电站。移动变电站如图111—1所示。

低压馈电开关和高压负荷开关的外壳均用钢板焊接制成。



左—高压负荷开关 中—隔爆干式变压器 右—低压馈电开关

图 111—1 矿用隔爆型移动变电站

它们分别与干式变压器两端高低压箱盖上的出线盒箱沿用螺栓连接固定,其接合处为隔爆面。

a. 隔爆干式变压器。隔爆变压器的一次绕组有 -4% 、 -8% 的分接头,箱内有接线板作为分接变换用。二次电压可以做成 400V 、 690V 或 1200V (只能有一种电压)。箱底有带滚轮(可拆卸的)的拖撬,供设备移动用。

为适应坑道运输,要求隔爆变压器的高度低,宽度小。 100kVA 及以上的隔爆变压器通常为 H 级绝缘。为了限制变压器箱壳内上部空腔的温度,在器身上安装一个热敏温度继电器。当温度超过允许温度时,由热敏温度继电器接通控制线路,并发出信号。

b. 低压馈电开关。低压馈电开关的隔爆箱体内存有自动空气开关、电源隔离开关、漏电保护单元和各种控制设备。它具有失压、短路、过载、漏电、机械联锁和网络电容补偿等保护系统。

低压馈电开关的前门为平面止口式,可用凸轮手柄机构灵活提起,使前门移出止口限位,并可围绕箱体右侧铰链转动至完全打开位置。前门与空气开关手柄和电源开关手柄设有可靠的机械联锁装置,确保在断电后前门才能打开。前门上部有电压表、电流表、照明灯和馈电开关状态信号灯(红、黄、绿);下部有复位、补偿

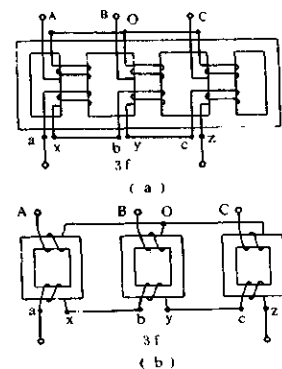
和试验三个按钮,前门左侧设有隔爆接线箱,在接线箱的正面有两个电力电缆引出装置;下面有两个控制电缆引出装置。自动空气开关手柄安装在前门右侧,它的分、合操作由正面的状态信号显示(黄灯为分、绿灯为合),而电源隔离开关手柄则按其指示操作即可。

c. 高压负荷开关。高压隔爆箱内安装一台高压负荷开关,在箱体左右两侧各设置一个矿用隔爆型高压电缆连接器,高压电源引线通过连接器引入箱体内。箱体后侧指示箭所指分、合位置是表示开关所处的状态;后侧还设有急停按钮,撤动此按钮可以切断上一级电源。箱体上盖与高压负荷开关之间有机械联锁,即箱体上盖打开后,联锁机构发出信号,使上一级配电装置的断路器分闸,且分闸后不能合闸。高压负荷开关和低压馈电开关之间设有电气联锁,以便保证移动变电站的供、断电程序,即先合高压,后合低压;先断低压,后断高压。

112. 三倍频变压器的原理是什么? 它怎样用于感应耐压试验?

三倍频变压器主要是用来做小容量变压器类产品的感应耐压试验的设备。当没有数倍频发电机或发电机容量太小时,制作一台三倍频变压器进行试验还是可以的。

三倍频变压器是一个三相五柱变压器,或者是由三个单相变压器组成的变压器组,见图112—1。一次绕组结成星形,二次绕组结成开口三角形。当一次施加对称三相电压时,如果铁心已达饱和,那末在



(a) 三相五柱式 (b) 三个单相变压器组

图 112—1 三倍频变压器

铁心中将产生平顶波磁通,该磁通可以分解出基波和三次谐波磁通(其他高次谐波分量小,忽略不计),从而在二次分别感应出基波和三次谐波电势。在二次三角形开口处三相基波电压相量和为零,而三次谐波电压(同向的)为三相三次谐波电压的代数和,所以有三次谐波电流输出。这就是三倍频变压器的原理。

如果铁心做成三柱式,则三次谐波磁通在铁心中没有回路,必须经空气和油箱构成回路,使二次绕组中感应出的三次谐波电势很小,所以三柱式铁心是不能做三倍频变压器的。

三倍频变压器运行时,一次接调压器,二次接负载。调节一次电压,使二次输出的三次谐波电压升高,来达到试验需要的电压。实验证明,三倍频变压器运行时,负载对三次谐波电压波形影响不大。

三次谐波电压分量(占相电压的百分量)和空载电流是随磁密的提高而增加的,如表 112—1 所示。磁通饱和以后,三次谐波电压分量虽仍有一些增加,可是空载电流(主要是励磁电流)却上升很快。为了得到较高的三次谐波,磁密应取得高些,如 1.8T,波形畸变也不严重,只是效率差些。这对短时运行的试验变压器是可以的。

表 112—1 三次谐波电压和空载电流与磁密的关系

电源电压 /V	空载电流 /A	磁通密度 /T	三次谐波电压分量 /%
280	7.6	1.31	36.7
320	17	1.46	44.0
340	30	1.55	46.5
360	48	1.62	49.1
380	69	1.68	51.5
400	100	1.72	52.0
420	145	1.78	53.2

三倍频变压器最适合试验中性点分级绝缘的变压器,如图 112—2 所示。因为三倍频变压器运行时感性无功损耗较大(励磁

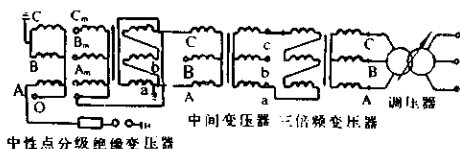


图 112—2 三倍频变压器对中性点分级绝缘
变压器(A相)做感应耐压试验

电流大),而中性点分级绝缘变压器感应耐压试验时呈容性,对提高三倍频变压器一次功率因数是有利的。虽然如此,三倍频变压器在运行时还是需要采用电容补偿,改善调压器的运行条件。一般来说是在负载侧并联电容好,并联电容可小些,以免产生谐振。

用三倍频变压器试验全绝缘变压器,每台需做两次,在 AB 和 BC 加压,如图 112—3 所示。试验电压为相电压的 4 倍。



图 112—3 三倍频变压器对全绝缘变
压器(A、B相)做感应耐压试验

三倍频
变压器对电压
互感器进行感
应耐压试验时
(图 112—4),
用单相调压法
试验的负载始
终呈容性,输
出波形稍差,

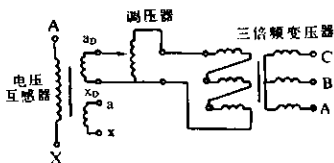


图 112—4 单相调压法对电压互
感器做感应耐压试验

但无谐振现象,输出电压稳定,一般可以不加补偿(220kV级除外)。而用三相调压法试验时恰恰相反,因此建议采用单相调压法进行试验。

113. 中频变压器的结构有什么特点? 什么样的铁氧体可用于中频变压器?

中频变压器的作用是将中频发生器(如可控硅中频电源、中频发电机或电子管振荡器等)的电源电压变换成淬火感应线圈或其他装置所需要的电压。

中频变压器一般为干式、水内冷却。当高频电流通过导体时,由于集肤效应和邻近效应的影响,导体截面上的电流分布是不均匀的。电流在铜内的集肤深度为:

$$\delta = 71\sqrt{f}, \text{cm}$$

所以其一次和二次绕组均以矩形空心铜管绕制,管内通水冷却。电流密度的选择与水流量有关。绕组可绕成圆筒式或饼式,二次电流较大时也可用铜板焊成圆筒式绕组。铜管应能承受 490kPa、5min 的压力试验,铜板焊的绕组则应能承受 196kPa、5min 的压力试验而无漏水现象。当一次和二次绕组均为饼式时,两者交叠排列;用圆筒式时,则同心排列。

铁心用 0.2mm 或更薄的具有较低单位损耗的电工钢片叠成。容量不大时,也可用非晶合金制成铁心。由于中频远高于工频,铁心中将产生很大的涡流和磁滞损耗,所以磁通密度不能太高。当使用频率为 2500Hz 时,磁密取 0.75T 及以下;当频率为 8000Hz 时,取 0.3T 及以下。且铁心的叠片间需适当放置焊有矩形空心铜管的散热片,采用水内冷结构。散热片用 1mm 厚的铜板制成,周围焊以方铜管,两相邻散热片间的叠片厚度一般在 15mm 左右。

如果采用高饱和、单位损耗低、耐潮湿和抗热老化的铁氧体作铁心的材料,就可以降低铁心的温升。新型的锰锌铁氧体 Mn—Zn—4000 就是其中的一种。其参数为:

配方: Fe_2O_3 : MnO : ZnO 为 52 ~ 54: 25 ~ 30: 17 ~ 23mol%, 另加其他成分;

粉料密度:1.138g/cm³;成形密度:2.96g/cm³;粒度:120目;

粘合剂:聚乙烯醇14%;烧结后密度:4.78g/cm³;成形压力:40~50MPa;成形件烧结后的收缩率:18%;烧结温度:1100~1300℃。

这种铁氧体为干法生产。在批量生产中,可在链条式烧结炉中烧结成形。但就质量而言,以沉淀湿法生产、在真空炉内烧结成形为佳。

为了减小励磁电流,铁心可采用叠装、搭接结构,并用环氧树脂拌铁氧体粉末将缝隙填满。考虑到铁氧体的气孔率较高(0.1%~10%),须将铁心作浸漆处理,提高防潮性能。这样,1000kVA变压器的铁氧体铁心与电工钢片铁心相比,空载损耗降低4.2kW,仅为原值的7%,而励磁电流只增加4.2A,为原值的1.72倍,铁心不用水冷就可满足温升要求。

114. 接地变压器有什么作用?它有什么特点?

三相电网各相导线之间及各相对地之间,沿导线全长都分布有电容。当电网中性点不是死接地时,单相接地相的对地电压为零,另外两相的对地电压值升高到 $\sqrt{3}$ 倍。相电压升高并未超过按线电压设计的绝缘强度,但是会导致其对地电容的增加。单相接地时,电容电流为正常运行时一相对地电容电流的3倍。

当该电容电流较大时,较易引起间歇电弧,对电网的电感和电容的振荡回路产生过电压,其值可达2.5~3倍的相电压。电网电压越高,由其引起的过电压危险越大。因此只有60kV以下供电系统的中性点才可不接地,因为它们的单相接地电容电流不大。否则,应通过接地变压器将中性点经阻抗接地。

当变电站主变压器一侧(如10kV侧)为三角形或星形结线,当单相相对地电容电流较大时,由于没有中性点可接地,则需要采用一台接地变压器(曲折形结线的电抗器)使电网形成人为中性点,以便经消弧线圈接地,如图114-1所示。使电网具有人为中性点,这就是接地变压器的作用。

在电网正常运行时,接地变压器承受电网的对称电压,仅流

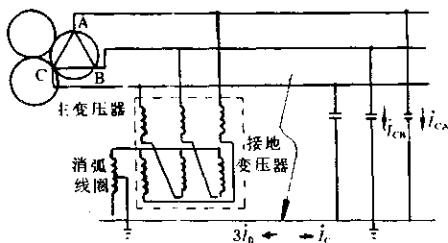


图 114—1 电网经人为中性点(接地变压器)接地

过很小的励磁电流,处于空载运行状态,其中性点对地电位差为零(忽略消弧线圈的中性点位移电压),此时消弧线圈内没有电流流过。

图 114—1 中如 C 相对地短路时,三相不对称分解出来的零序电压在接地变压器三相绕组中产生大小相等、相位相同的零序电流,汇合后流经消弧线圈入地。其作用与消弧线圈一样(参见题 178),即它所产生的感性电流补偿了接地电容电流,消除了接地点的电弧。

接地变压器主要特点是:

a. 这种变压器一般没有二次绕组,考虑到各铁心柱上的磁势平衡,绕组采用曲折形结线。由于是短时有负载运行,电流密度可选大些。

b. 这种变压器在电网正常运行时,长期处于空载状态,空载损耗应尽可能小些,在电网电压允许升高的范围内,其铁心也要处于不饱和状态;接地变压器与消弧线圈连接使用,为了保持线性特性,也要求避免磁路饱和,所以,铁心的磁通密度要取小些。

c. 流过这种变压器绕组的负载电流是零序电流,所以变压器的零序阻抗是较重要的,一般每相零序阻抗的不平衡度要小于 1%。

115. 船用变压器有什么特点？

船用变压器用于船舶照明和配电。要求产品能防潮、防霉、防盐雾并能耐受强烈的冲击和振动。通常容量较小的多采用环氧树脂浇注式，较大的则采用干式开启式。

用浇注式结构时，单相变压器多采用卷铁心和矩形绕组；三相则采用叠积式铁心和圆形绕组。绕组绕好套装后，用环氧树脂浇注，其出线端子也一起浇出，然后在其表面按要求涂规定的防护漆。容量稍大时，为了便于冷却，绕组间可设置气道，外表面还可做成瓦楞形。

二、互感器

(一)电压互感器

116. 什么是电压互感器？它与变压器相比有什么不同？

电压互感器是将电力系统的高电压变换成标准的低电压(例如 100V 或 $100\sqrt{3}$ V)的电器。它与测量仪表配合时可测量电压和电能,与继电器配合时则可对电力系统进行继电保护。同时,它使测量仪表和继电保护装置标准化、小型化,并与高电压隔离。

电压互感器有电磁式与电容式之分。电磁式电压互感器实际上就是一种小容量、大电压比的降压变压器,因而其基本原理与变压器无任何区别。它的一次绕组与线路并联,一次绕组的额定电压与线路电压一致,最基本的接线图如图 116-1 所示。

但是,电压互感器与变压器毕竟有所不同,因为它的主要功能是传递电压信息,而不是输送电能。它有以下两个特点:

a. 电压互感器二次回路的负荷是一些高阻抗的测量仪表和继电保护装置的电压线圈,二次电流很小,因而内阻压降很小,所以二次电压基本上就等于二次电势,即相当于变压器的空载运行状态。

b. 电压互感器二次绕组不能短路运行。因为电压互感器要求变换电压准确,通常内阻抗很小,短路阻抗压

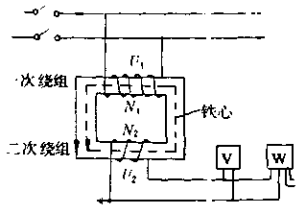


图 116-1 电压互感器基本电路

降很小。二次短路时电流剧增,电压互感器有烧坏的危险。

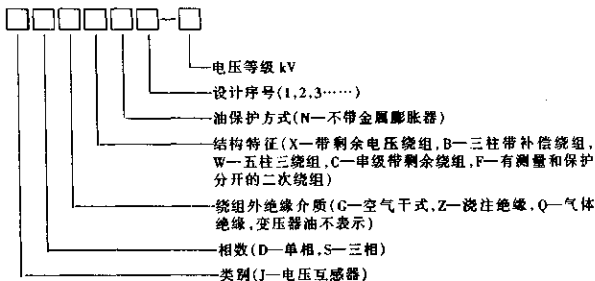
此外,由于电压互感器一次侧与线路直接联结,其二次侧绕组必须接地,以免在线路发生故障时,因二次绕组上感应出高电压而危及仪表、继电器和人身安全。一般以中性点接地,若无中性点则一般采用 b 相接地。

117. 电压互感器是怎样分类的? 三绕组、高电压的电压互感器有何结构特点?

电压互感器种类很多,大致可分为以下几类:

- 按相数分有单相和三相电压互感器;
- 按绕组数分有双绕组、三绕组及四绕组电压互感器;
- 按安装场所分有户内与户外用电压互感器;
- 按绝缘介质分有干式、油浸式和气体绝缘电压互感器。

一般情况下,从互感器产品型号就可看出该互感器的类别。根据机械部关于《变压器类产品型号编制办法》的标准规定,电压互感器型号表示如下:



例如: JDZ6-10 单相环氧树脂浇注绝缘,设计序号为 6 的 10kV 级电压互感器。

JDX1-110 单相油浸式带剩余电压绕组,设计序号为 1 的 110kV 级电压互感器。

国内,额定电压 20kV 及以下电压互感器一般为户内单相或三相环氧树脂浇注绝缘结构,35kV 级及以上电压互感器为户外单相

油浸式。

(1) 三绕组电压互感器的结构特点

专供测量用的电压互感器,国内一般都采用单相双绕组结构,其一次绕组接在相与相间,可以单相使用,也可以用两台互感器结成“V”形而测量三相系统的电压与电能。其典型结构如图 117-1 (JDZ-10 型电压互感器外形)所示。此类互感器一次绕组的两端具有相同的绝缘水平。此类互感器也称不接地互感器。

为适应三相电力系统广泛采用的单相接地故障保护,电压互感器通常做成单相三绕组结构。所谓“三绕组”,即互感器除了有一次绕组和二次绕组外,还有一个剩余电压绕组。使用时三台单相电压互感器结成三相组,二次绕组结成星形,剩余电压绕组结成开口三角,其原理接线见第 120 题图 120-1(a)。正常运行时,开口三角端电压接近零,当系统发生单相接地故障时,开口三角两端产生一零序电压,使继电保护装置发出信号。此类互感器的一次绕组高压端(A 端)具有规定的绝缘水平,另一端(N 端)接地,绝缘要求较低。其典型结构如图 117-2 所示(JDX6-35 型电压互感器

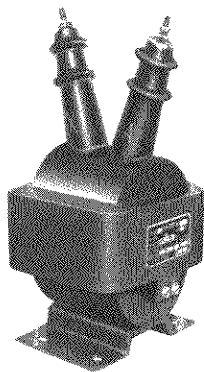


图 117-1 JDZ-10 电压互感器

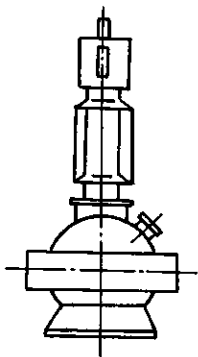


图 117-2 JDX6-35 电压互感器

器外形)。此种电感器也称接地互感器。我国 35kV 及以下电压互感器双绕组和三绕组结构并存,但 35kV 以上则通常均为单相三绕组结构。

(2) 高电压电压互感器的结构特点

当前,国内 63kV 及以上电磁式电压互感器普遍采用串级式,其结构与串级式试验变压器极为相似。串级式电压互感器由底座、器身、瓷套、储油柜与膨胀器等部分组成,瓷套既作外绝缘,又做油箱用。110kV 串级式电压互感器外形如图 117—3 所示。

所谓串级式就是将互感器承受的全电压分成几个较低电压的部分(级)串接,例如 63kV、110kV 分成 2 级串接,而 220kV 则分成 4 级串接。4 级串级式电压互感器的原理如图 117—4 所示。由图可见,每一级绕组只承受 1/4 的电压,各铁心均带

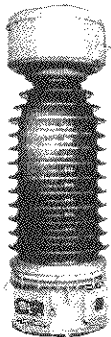


图 117—3 110kV 串级式电压互感器

而下逐渐降低。因此,每级绕组的绝缘负担大大减轻。

串级式电压互感器一次绕组采用宝塔形结构。平衡绕组靠近铁心柱,并与铁心同电位,其作用在于使上下两铁心柱保持磁势平衡并传递能量。四级及以上串接的电压互感器还有连耦绕组,在一次绕组外面,其作用是保持上下两铁心的磁势平衡并传递能量。

串级式电压互感器的铁心是带电位的,因此要用绝缘支架支撑在瓷箱内。两级串级式电压互感器的器身结构如图 117—5。绝缘支架的材质既要保证有良好的电气性能,又要有很高的机械强度。

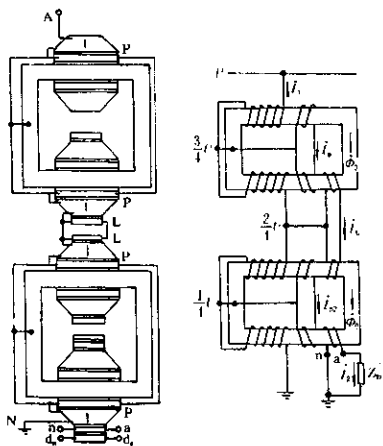


图 117—4 4 级串级式电压互感器原理图

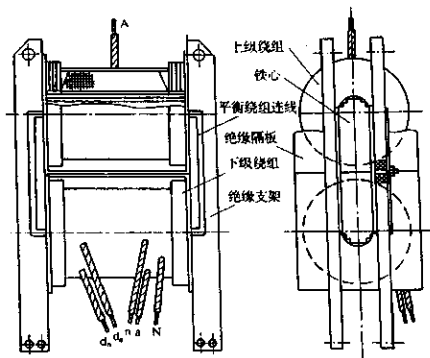


图 117—5 两级串级式电压互感器器身结构

118. 电压互感器有哪些主要技术要求？

电压互感器在规定的运行环境及运行条件下，按照国家标准 GB1207—86《电压互感器》的规定，其主要技术要求如下：

(1) 设备额定电压及额定一次电压

设备额定电压与电压互感器运行时的系统额定电压相同，即 0.38kV, 3kV, 6kV, 10kV, 15kV, 20kV, 35kV, 63kV, 110kV, 220kV, 330kV, 500kV。电压互感器的额定一次电压是指运行时一次绕组所承受的电压，用在相与相之间的单相电压互感器及三相电压互感器，其额定一次电压与上述设备额定电压相同；用在相与地间的电压互感器，其额定一次电压为上述电压值的 $1/\sqrt{3}$ 。

(2) 额定二次电压

额定二次电压是作为互感器性能基准的二次电压值。对于三相电压互感器及相与相间联结用的电压互感器，其额定二次电压为 100V；对于相与地联结的电压互感器，其额定二次电压为 $100/\sqrt{3}$ V。

用于接地保护的电压互感器，其剩余电压绕组的额定电压视互感器所接的系统状况而定，对中性点有效接地系统为 100V，对中性点非有效接地系统为 $100/3$ V。这是由于在系统发生单相接地故障时，其开口三角端电压必须保证 100V 而确定的。

IEC186 标准所规定的额定二次电压值较多，有 100V, 110V, 115V, 120V, 200V, 230V。

(3) 额定电压比

额定电压比为互感器性能基准的额定一次电压与额定二次电压之比。通常互感器技术文件及产品铭牌上并不表示此比值，而是用一斜横线表示其比式，分子为额定一次电压值，分母为额定二次电压值。

(4) 额定输出(过去俗称额定容量)或额定负荷

额定输出即互感器在额定二次电压下接有额定负荷时供给二次回路的功率，以 VA 值表示。国标规定的标准额定输出值有：

10VA, 15VA, 25VA, 30VA, 50VA, 75VA, 100VA, 150VA, 200VA, 250VA, 300VA, 400VA, 500VA, 1 000VA。标准额定输出所规定的功率因数为 0.8(滞后)。

IEC186 标准所规定的额定输出标准值最高为 500VA。

互感器的铭牌上还标有极限输出的数值。极限输出的数值由互感器长期工作发热的温升决定,不规定准确等级。这是由于互感器在额定输出下实际温升较低,而在某些场合下互感器不要求电源设备工作时所要求的准确度。

(5) 准确级及误差限值

电压互感器和变压器一样,一次电压变换到二次电压时,由于励磁电流和负荷电流在绕组中产生压降,所以,二次电压折算一次侧与一次电压比较,数量大小及相位都有差别,即互感器出现了误差。在数值上的误差称电压误差,在相位上的差别称相位差。电压误差(f)定义如下:

$$f = \frac{K_n U_2 - U_1}{U_1} \times 100, \%$$

式中 K_n ——额定电压比;

U_2 ——实际二次电压;

U_1 ——实际一次电压。

相位差(δ)即二次电压相量与一次电压相量的相角之差,当二次电压相量超前一次电压相量时,相位差为正,反之为负。

误差性能是电压互感器的主要技术要求。标准上以准确级来衡量其优劣。准确级标称以在额定电压下规定的最大允许电压误差百分数来表示。例如 0.2 级即在额定电压下最大允许电压误差为 0.2%。国家标准 GB1207—86 规定的标准准确级测量用电压互感器有 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3 级;保护用电压互感器有 3P, 6P 级(P——表示保护, 3 及 6 表示在规定电压范围内电压误差的百分数)。各标准准确级的误差限值及其所规定的电压范围与输出范围如表 118—1 所示。

表 118—1 标准准确级的误差限值

准确级	电压误差/± %	相位差	
		/± (°)	/± crad(厘弧度)
0.1	0.1	5	0.15
0.2	0.2	10	0.3
0.5	0.5	20	0.6
1	1.0	40	1.2
3	3.0	不规定	不规定
3P	3.0	120	3.5
6P	6.0	240	7.0

表中测量级误差限值规定的电压范围为 80% ~ 120% 额定一次电压,输出范围为 25% ~ 100% 额定输出。保护级误差限值规定电压范围为 5% 额定一次电压到额定电压数(见第 6 项)相对应的电压,输出范围为 25% ~ 100% 额定输出,当电压在 2% 额定一次电压时,电压误差与相位差限值为表列数值的两倍。

(6) 额定电压因数

额定电压因数是在规定时间内能满足互感器温升要求及准确级要求的最大电压与额定一次电压的比值。它与系统最高电压及接地方式有关。对用于中性点有效接地系统,其标准值为 1.2 倍连续,1.5 倍 30s;对用于中性点非有效接地系统,其标准值为 1.2 倍连续,1.9 倍 8h。

额定电压因数是对接地保护用电压互感器的一项重要技术要求,它是在系统发生单相接地故障时互感器发出可靠信号及其本身经过热、过励磁、过电压而不损坏的可靠保证。

(7) 温升限值

与其他电器一样,标准对互感器的温升限值(包括长期运行及在额定电压因数对应的电压下运行)。对于电压互感器,因为要保证误差要求,铁心中的磁通密度很低,导线的电流密度也较小,所以实际温升都不高,一般不会超过所规定的限值。

(8) 短路承受能力

电压互感器在运行中不允许二次短路,但是为防止二次回路发生偶然的短路事故,要求互感器具有一定的短路承受能力。国标规定,当互感器在额定电压下励磁时应能承受 $1s$ 外部短路的机械效应和热效应而无损伤。

119. 为改善电压互感器误差特性可采用什么补偿方法?

在电压互感器的设计中,往往采用一些误差补偿方法来改善误差特性,以满足高准确级的要求,甚至降低材料消耗。误差补偿方法很多,但通常用的是匝数补偿和串联绕组补偿。三相三柱式电压互感器还可采用所谓Z形结线补偿,但现在这种互感器很少见。

(1) 匝数补偿

这种方法是最普遍采用的。其原理是在较小的范围内改变绕组的匝电势来改变二次电势。因为设计上都是预先选定了额定一次匝数,即确定了额定匝电势,当适当减少一次匝数时,就提高了匝电势,二次电势也就增加了,即二次电压提高了,从而减少了误差(未补偿的电压互感器的电压误差是负的,即实际二次电压值小于额定二次电压值)。

设减匝前的每匝电势为:

$$e_m = \frac{U_{1n}}{N_{1n}}$$

减匝后的每匝电势为 $e_1 = \frac{U_{1n}}{N_1}$, 显然,每匝电势增加的百分数就是二次电压增加的百分数,用百分数表示的电压误差补偿值为:

$$\begin{aligned} f_b &= \frac{e_1 - e_m}{e_m} \times 100 = \frac{e_m \frac{N_{1n}}{N_1} - e_m}{e_m} \times 100 \\ &= \frac{N_{1n} - N_1}{N_1} \times 100 = \frac{N_b}{N_1} \times 100 \end{aligned}$$

式中 U_{1n} —— 额定一次电压;

N_{1n} ——额定一次匝数；

N_b ——补偿匝数，即应减去的匝数。

因 N_b 一般很小，实际一次匝数 N_1 与额定一次匝数 N_{1n} 的差别很小，因此通常用 N_{1n} 代替 N_1 ，即误差补偿值按下式计算

$$f_b = \frac{N_b}{N_{1n}} \times 100$$

按照以上原理，增加二次匝数，即实际二次匝数大于额定二次匝数，二次电压也增加，同样对电压误差起补偿作用。但是由于二次匝数很小，调整二次匝数所引起的电压变化百分数很大，很难达到预期目的，所以一般不采取改变二次匝数的办法。

匝数补偿计算式还可写成

$$f_b = \frac{K_{12} N_{2n} - N_1}{K_{12} N_{2n}} \times 100$$

式中 K_{12} ——额定电压比；

N_{2n} ——额定二次匝数。

如果已知需要补偿值，则一次绕组应减少的匝数可按下式计算

$$\Delta N_1 = \frac{f_b(\%)}{100} K_{12} \cdot N_{2n}$$

(2) 串联绕组补偿

串联绕组补偿的原理是在二次回路串联一附加电势，以增大或减小二次端电压，其原理接线如图 119—1 所示。在环形铁心上绕有适当匝数的补偿绕组，由电压互感器铁心上的附加绕组（一匝）供电，再将二次绕组的引线穿过环形铁心。由图可见，二次感应电势为主电势 E_2' 与环形铁心绕组之一匝电势之代数和。改变补偿绕组的匝数即可得到不同电压补偿值，改变二次引线穿过环形铁心的方向可改变补偿值的正负。

串联绕组补偿方法特别适用于油箱式电压互感器类产品，一般它与匝数补偿方法同时使用，即可得到更好的补偿效果。

匝数补偿和串联绕组补偿都只对电压误差起补偿作用，对相位差不起作用，但在电力用电压互感器中，其相位差一般都容易满

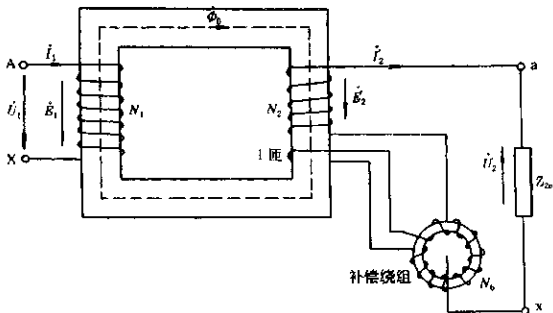


图 119—1 串联绕组误差补偿原理接线图

足规定限值的要求,不需要对相位进行补偿。

120. 电压互感器有哪些接线方式? 各有什么特点?

电压互感器的接线方式根据继电保护装置和测量电压的要求而不同。电压互感器的接线方式也与变压器类似,其所不同的是,它们大都是由单相产品联结而成的,有如下几种。

国标和 IEC 标准中绕组的端子标志有所不同,这里仍用国标。端子标志对比如表 120—1 所示。

表 120—1 IEC 标准和国标端子标志对比

IEC 标准端子标志	国标的端子标志
单相不接地互感器为 A, B; a, b	单相不接地互感器为 A, X; a, x
单相接地互感器为 A, N; a, n; d _a , d _n	单相接地互感器为 AN, an; d _a , d _n
三相 A, B, C, N; a, b, c, n; d _a , d _n	三相未规定

(1) II 接线组合

这种接线组合就是用一台单相电压互感器的接线,只适用于需要线电压的情况,可接入电压表、频率表的电压线圈和电压继电器等。

(2) V_v 接线组合

这是采用两台单相电压互感器联结而成, V_v 接线可以测出三个线电压。适用于只需测量线电压而不测量相电压的一切场合。也就是仅用于中性点非有效接地的系统中, 用来连接三相功率表、电压表、继电器等。

(3) Y_{yn} 接线组合

这种接线采用三台单相电压互感器或三相心式电压互感器联结而成, 可以满足仪表和继电保护装置测线电压和相电压的要求。

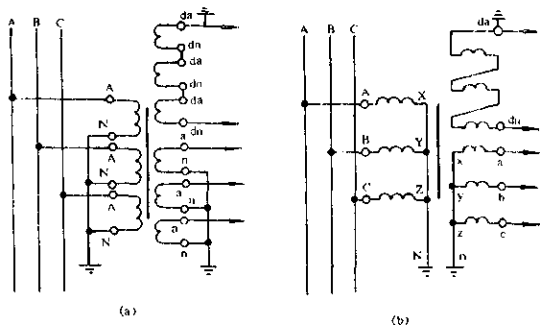
这种接线一次侧中性点不接地, 其一次绕组接的是相线对中性点的电压, 而不是对地的电压。系统单相接地时接地相为地电压, 但对中性点仍为相电压; 二次侧也仍为相电压, 测量不出对地电压来, 因此用它来供电给绝缘检查电压表, 也反映不出系统接地来。

Y_{yn} 接线组合也用于中性点不接地或经小阻抗接地的系统中。

(4) YNy_{nd} 开口的接线组合

这种接线采用三台单相三绕组电压互感器或三相三绕组五柱铁心电压互感器联结而成。其二次绕组既可以测量线电压和相电压, 并且结成开口三角形的零序电压绕组又能进行绝缘监视和供单相接地保护之用, 其接线图如图 120—1 所示。

电压互感器剩余电压绕组组成的开口三角形接线是反映零序电压的。开口三角形两端与继电器电压线圈相接。正常运行时, 系统的三相电压对称, 零序电压绕组上感应电压三相之和为零或很小, 一旦系统发生单相接地故障时, 会出现一个零序电压。零序电压作用到继电器上, 引起继电器动作, 而且一次侧中性点能引出, 从而对系统起到保护作用, 监视交流系统各相对地绝缘。绕组出现零序电压, 铁心就会有零序磁通。这和三倍频变压器一样, 为了提供零序磁通回路, 这种互感器必须做成三个单相的三相组, 或三相五柱式铁心的电压互感器。



(a) 三台单相电压互感器 (b) 三相五柱式电压互感器
图 120—1 YNynd 开口绕线组合的电压互感器接线

如果这种结线的三相电压互感器做成三柱式,零序磁通只能以空隙、油箱等为回路,将引起很大的零序空载电流,长期维持下去会使电压互感器过热,使一次绕组烧毁。所以,这样的互感器一次的中性点是不能引出的,也不能作为三绕组电压互感器。

121. 同型号电压互感器接线时为什么要注意极性?

这里仅以两台电压互感器结成 V 形结线为例,说明必须注意其极性的问题。

当电压互感器一次和二次绕组结成 V_v 结线后,仅一次侧通电是不会发生事故的,因为在二次开路状态下,一次绕组联结不会发生极性问题。如图 121—1(a)所示,既可以是 A—X—A—X 联结,也可以是 A—X—X—A 联结,这是由于它们各自有独立的磁路,即使在一次侧通电时间再长,也不会发生事故。但是,如果是 A—X—X—A 联结,二次侧一旦接入负荷,不超过 30min 就可能发生爆炸。

这是因为极性正确时,如图 121—1(b)所示,其二次侧电压相

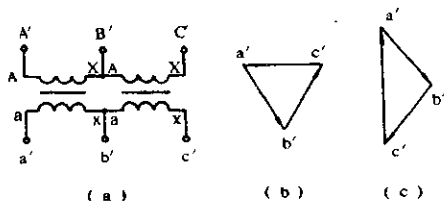


图 121-1 两台电压互感器的 Vv 形接线及二次电压相量图

量是平衡的。若四个绕组中只要有一个极性接错了,就会出现如图 121-1(c)所示的电压相量,必有一相电压要扩大 $\sqrt{3}$ 倍,它引起的大电流同时流经两个二次绕组,所以两台电压互感器的二次绕组会全部烧坏。同时在一次侧也要引起一次电流的增加,所以一次绕组也将烧坏。如果箱盖上兼作出气螺栓的注油塞没有拧松,烧坏时高温引起气体膨胀无法自由逸出,将使箱底炸掉。

因此若将两台同型号的电压互感器结成 Vv 接线使用时,必须注意:

a. 极性要正确。正确的结法是一次侧 A—X—A—X 联结,二次侧也是 a—x—a—x 联结;

b. 凡是带有 $\sqrt{3}$ 电压比的电压互感器不能结成 V 形使用。如 6kV 的线路,就不能用 $6000/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}$ 的规格;

c. 凡电压在 10kV 及以下的油浸式电压互感器,使用前应将箱盖上的放气螺栓下的橡皮垫圈拿掉,并拧松放气螺栓,让气体自由逸出,防止事故的扩大。

因此,电压互感器在使用前须测量其极性,如同变压器一样。

122. 电压互感器为什么会发生铁磁谐振? 防止铁磁谐振有什么措施?

电压互感器是一个非线性的电感元件,它与系统线路对地电

容构成一个电容电感并联回路,如图 122—1 所示。当系统运行状态发生变化时,有可能使电压互感器的感抗和线路对地容抗相等,即处于谐振状态。谐振状态通常是在中性点非有效接地系统中,由于某些操作和接地故障及其他电冲击而导致电压互感器铁心饱和而出现,所以称铁磁谐振。铁磁谐振会产生过电压和过电流,一般过电压不会太高,往往是产生分频(即 $1/2$ 、 $1/3$ 工频)谐振,铁心深度饱和,互感器绕组因励磁电流过大而烧毁。

在中性点有效接地系统中,有时个别变压器中点也不接地,在此发生单相接地故障时,互感器也可能发生铁磁谐振现象。这正是某些用于中性点有效接地系统中的 220kV 电压互感器也有因铁磁谐振而被烧坏的原因。

另外,220kV 电力系统中广泛应用带有断口电容的少油断路器,在断路器处于断开状态时,其断口电容正与电压互感器的非线性电感形成串联回路,如图 122—2 所示。在一定条件下,此回路也会发生串联谐振。谐振产生的过电压和过电流也危及互感器的安全。

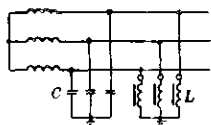


图 122—1 电压互感器与系统对地电容并联回路示意图

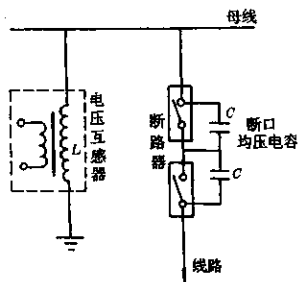


图 122—2 电压互感器与断路器断口电容串联示意图

铁磁谐振必须在一定的条件下而发生,一般有以下几点:

- a. 中性点非有效接地系统;
- b. 振荡回路中的损耗足够小(实际上谐振发生在系统空载或轻载时);
- c. 电感的非线性程度足够大;
- d. 有一定的激发条件,即系统有某种电压、电流的冲击,如开、合闸,瞬间短路又消除等。

防止谐振的措施一般有:

- a. 适当降低电压互感器的磁通密度,使铁心有较好的伏—安特性;
- b. 回路参数合理配合,如根据已知电压互感器的伏—安特性(即电感值),控制线路的对地电容,即选择合适的送电距离;
- c. 附加阻尼装置,如在开口三角端接入一合适的阻尼电阻,以抑制谐振的发生。

123. 电压互感器的误差是怎样测量的?

电压互感器的误差试验一般都用标准互感器和互感器误差检验器组成的比较法进行,试验线路如图 123—1 和图 123—2 所示。

当标准电压互感器的准确级比被试互感器高两级,其实际误

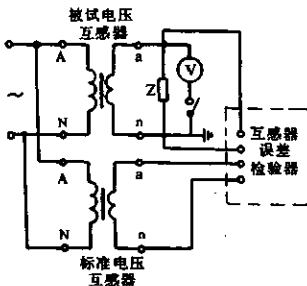


图 123—1 单相电压互感器误差试验接线图

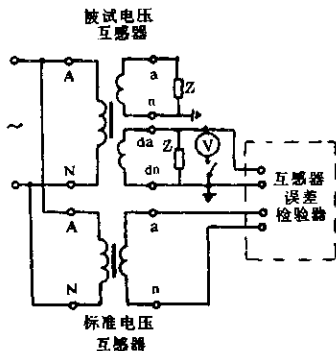


图 123—2 剩余电压绕组误差试验接线图

差小于被试互感器允许误差的 $1/5$ 时,标准互感器的误差一般可略去不计,检验器的读数就是被试互感器的误差。

试验时,在一次绕组上施加额定频率正弦波的指定电压,被试互感器二次绕组接规定的负荷。外壳或油箱以及运行中应接地的各绕组端子都必须可靠接地。

对于单相三绕组电压互感器,测量二次绕组误差时,剩余电压绕组应开路;测量剩余电压绕组误差时,二次绕组应接规定的负荷。

对于单相四绕组电压互感器,测量某绕组的误差时,其余各绕组应按产品技术要求接规定的负荷。

124. 为什么要测量串级式电压互感器的介质损耗率 ($\tan\delta$)? 怎样测量?

在 117 题已经提出,串级式电压互感器的绝缘支架除要求有较高的机械强度外,还要有良好的电气性能。绝缘支架的耐电强度,如击穿电压、沿面爬电强度等均在产品的耐压试验项目中得到考核,但其介质损耗率则要有特殊的试验方能检验。实践证明,绝

缘支架介质损耗率的大小直接影响串级式电压互感器的运行安全。80年代初以前,曾经因绝缘支架的介质损耗率未曾控制而多次在运行时发生恶性事故。经分析验证证明,其事故的主要原因是支架本身的介质损耗率过高。后来,研究并采用了介质损耗率较低的材料,并且规定了试验方法。因此,从80年代中期以来,无论产品出厂和运行都应进行互感器介质损耗率的测量。

串级式电压互感器介质损耗率测量接线如图124—1所示。该方法一般称末端屏蔽法。测量时产品底座对地绝缘,绝缘电阻应大于1000MΩ。

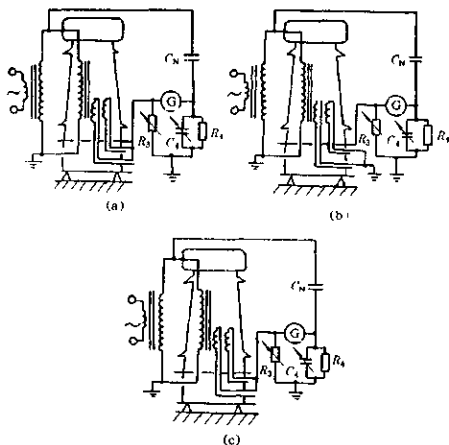
串级式电压互感器介质损耗率($\tan\delta$)包括整体、绝缘支架及一次对二次绕组等三部分。例行试验一般规定测量整体与绝缘支架,运行预防性试验则三部分都应进行,以查找绝缘薄弱部位。绝缘支架的介损也可以通过整体和一次对二次的测量而间接计算得到。设测量整体的介损为 $\tan\delta_{1x}$,电容为 C_{1x} (见图124—1(a)),测量一次对二次的介损为 $\tan\delta_{2x}$,电容为 C_{2x} (见图124—1(c)),则绝缘支架的介损和电容可按下式计算:

$$\tan\delta_{3x} = \frac{C_{1x}\tan\delta_{1x} - C_{2x}\tan\delta_{2x}}{C_{1x} - C_{2x}}$$

$$C = nC_n \frac{R_2}{R_3}$$

n 为串级式电压互感器的串级级数,对于220kV, $n=4$;对于63~110kV, $n=2$ 。末端屏蔽法测量串级式电压互感器的 $\tan\delta$,由于其电容量太小,使用通用的 QS_3 型电桥时须在 R_3 电阻臂上并联一合适的电阻以提高测量灵敏度。另外,也由于互感器本身的电容量小,互感器外绝缘的泄漏电流对测量结果有较大的影响,因此测量时要尽量避免其影响,同时要对环境温度和相对湿度的影响对实测值加以校正。根据大量的实测数据的统计分析,得出串级式电压互感器的介损与温度和相对湿度的换算关系如表124—1所列。

通常,串级式电压互感器介质损耗率测量时施加电压为



(a)测量整体 (b)测量绝缘支架 (c)测量一次对二次绕组

图 124—1 末端屏蔽法测量串级式电压互感器介质损耗率接线图

10kV, 在环境温度 20℃ 及相对湿度 60% ~ 70% 时整体介损控制在 1.5% 以下, 绝缘支架介损控制在 3% 以下。

表 124—1 串级式电压互感器 $\tan\delta$ 与温度、相对湿度关系换算系数

环境温度/℃		5	10	15	20	25	30	35	40
换算系数	相对湿度小于 60%	0.58	0.70	0.84	1.0	1.19	1.43	1.69	2.04
	相对湿度小于 70%	0.67	0.78	0.90	1.0	1.19	1.43	1.69	2.04

125. 高电压电压互感器为什么测量和保护要有分开的绕组?

早先, 用于接地保护的高电压单相三相绕组电压互感器, 其二次绕组回路接有测量仪表和继电保护装置。由于二次回路负荷电流造成的二次线路压降大, 实际测量仪表所测量的误差大, 不能保证测量精度。随着计算用测量仪表的精度提高, 希望减少线路压

降,提高测量准确度。因此,需要测量仪表特别是计费用仪表应有独立的回路,即互感器应有两个二次绕组,一个专对测量仪表供电,另一个专对继电保护装置供电。这样,测量回路的负荷电流大大减小,二次线路的压降减小,提高了测量精度。这种互感器称为有测量和保护分开二次绕组的电压互感器,亦称单相四绕组电压互感器。80年代末期以来,这种互感器得到了广泛的应用。

126. 什么是油箱式电压互感器? 它有何特点?

油箱式电压互感器是铁心处于地电位的单级式结构,是为区别于铁心带处在高电位的串级瓷箱式结构而命名。油箱式电压互感器外形结构和单相变压器极为相似,器身处于油箱中,高压引线与变压器套管类似,63kV及以上通常为电容型,其绕组结构及外形如图126—1和126—2所示。

油箱式电压互感器摒弃了串级式电压互感器因阻抗大而难于提高准确级及绝缘支架材质不良容易造成运行安全隐患的缺点,但其电容型绝缘制造工艺较复杂且手工操作量大的不足制约了它的迅速发展与应用。目前,国内都还处于小批量生产,但国际上某些国家如瑞典、德国等生产量较大。

油箱式电压互感器一般都做成单相四绕组式结构,准确级可达0.2级以上,且额定输出比串级式大得多,同时材料成本也比串级式大为降低。

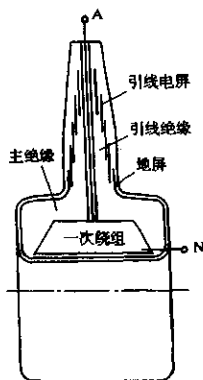


图 126—1 油箱式电压互感器绕组结构

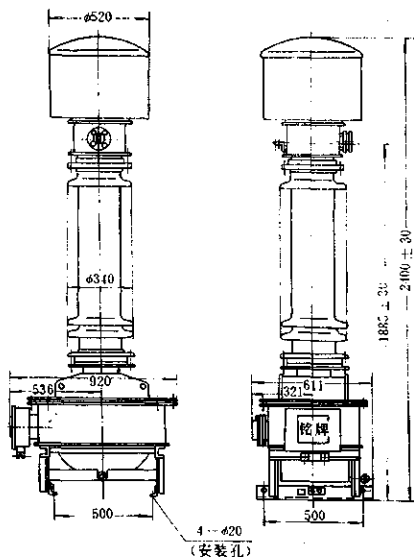


图 126—2 油箱式电压互感器的外形

127. 高压互感器的防潮、防油劣化需要采取什么措施？

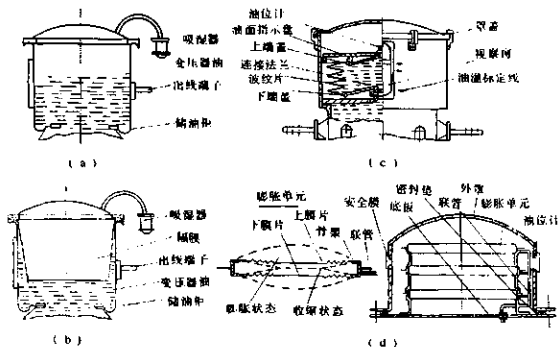
63kV 及以上油浸式互感器(包括电压互感器与电流互感器)的变压器油性能直接影响其运行可靠性,油劣化的速度则直接影响其使用寿命。运行中的变压器油性能降低的主要原因是油受潮和氧化。因此为防止油受潮及劣化,制造厂对互感器油密封结构需采取可靠的措施。

早先,普遍采用开启式结构,即产品内部直接与大气相通,为防止大气潮气进入产品内,在顶部进出空气的通道上装有内部充满硅胶的吸湿器,用以吸收空气中的部分潮气,如图 127—1(a)所示。这种结构的缺点是硅胶吸湿能力有限,尽管运行规则中规定硅胶失效

后要更换,但实际上更换不可能及时,产品受潮现象严重。同时,因油与大气直接接触,油因氧化而劣化,使用寿命很短。这种结构尽管有结构简单,产品内不会出现过高的正压和负压等优点,但因油受潮和氧化的致命弱点未曾改善,运行可靠性很低而被淘汰。

后来,为防止油氧化,将油膨胀空腔加一合成橡胶制成隔膜(做成囊状),如图127-1(b)所示。这种结构减少了油氧化和受潮的机会,但由于产品在“呼吸”过程中隔膜囊上部往往积有较大的冷凝水,而隔膜囊长期上下浮动受折后易开裂,致使冷凝水直接进入产品内,产品受潮严重甚至酿成突发性绝缘击穿事故。

现代,从根本上解决了油受潮与劣化的措施是采用金属膨胀器全密封结构。金属膨胀器是一个弹性元件,它能完全补偿变压器油因温度变化的体积变化,产品内经常保持微正压。金属膨胀器有波纹式和盒式等多种结构,如图127-1(c)、(d)所示。波纹式金属膨胀器由不锈钢板压制成波纹片经焊接而成,外罩设有油位视察窗,可以清楚观察油位变化情况,产品内部经常保持39.2kPa



(a)开启式结构 (b)隔膜密封结构

(c)波纹片式膨胀器结构 (d)盒式膨胀器结构

图127-1 高压油浸式互感器的密封结构

左右的微正压。盒式膨胀器由若干个固定在骨架上的膨胀盒组成,膨胀盒由不锈钢板压成波纹的两膜片焊接而成。由于使用上的需要,盒式膨胀器有内充油式和外充油式之分。外充油式大都用在既做膨胀器使用又兼做散热器用的场合。盒式膨胀器特别适用于放倒运输的产品。

盒式膨胀器油位指示需要有特殊的机构实现,也可以用压力表指示产品内的压力以表现膨胀器膨胀体积的大小。

金属膨胀器全密封结构以其独特的功能深受制造者和使用部门的欢迎。所以,现代互感器已全部推广采用。

国内还曾经采用过充氮全密封结构,即在产品膨胀空腔内充以一定压力的氮气而后密封。从原理上讲,这种措施也完全杜绝了油受潮与氧化,但实际上氮气容易泄漏,往往不能维持内部正压力,而可能出现负压,产生大气进入产品内部的危害。因此,目前该结构也已被膨胀器所取代。

128. 什么是电容式电压互感器?

330kV 及以上超高压输变电系统通常都采用电容式电压互感器。自 80 年代中期以来,220kV 电力系统也开始采用,甚至 110kV 系统也有应用的趋势。这种电压互感器的工作原理是由电容分压器将系统电压降至一较低的中间电压(10~20kV),再经中间电压互感器得到所需电压互感器的技术参数。其主要结构部件

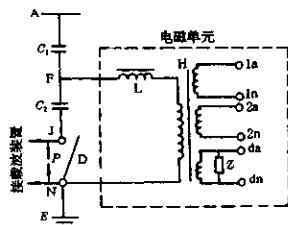


图 128—1 电容式电压互感器原理接线图

为电容分压器(C_1, C_2)、调谐电抗器 L、中间电压互感器 H 及阻尼装置 Z,原理接线图如图 128—1 所示。调谐电抗器、中间电压互感器和阻尼装置统称为电磁单元。

电容分压器是由主电容器 C_1 和分压电容器 C_2 组成。 C_1 和 C_2 的电容量根据分压比而定。因为两个电容串联,电压分配与其电容的大小成反比,当 C_2 电容量比 C_1 大到一定比例时, C_2 上的电压就可按比例得到比线路电压小得多的一个中间电压,其值为

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} U (U \text{ 为线路对地电压})。$$

调谐电抗器是为保证中间电压互感器上的电压完全等于电容分压器所分得的电压。从等效发电机原理可知(设无调谐电抗器),电容分压器上的电压作为中间电压互感器的电源,其内阻抗是很大的,其值为 $1/\omega(C_1 + C_2)$,因此,中间电压互感器不能正确变换线路电压。利用电抗和容抗处于谐振状态,则其内阻抗可近似于 0。据此,电容式电压互感器的等值电路如图 128—2 所示。

阻尼装置是为消除电磁单元的铁磁谐振而放置的。大家知道,任何由电容和带铁心的非线性电感回路都可能发生铁磁谐振。电容式电压互感器的电磁单元正具备此条件。当一次侧突然加压或二次侧短路又消除,中间电压互感器将产生磁饱和,励磁电感减小,使回路固有频率上升到电网频率的 $\frac{1}{7}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{1}{3}$,可能出现某一次谐波的振荡,常见的是 $\frac{1}{3}$ 次谐波振荡。伴随谐波振荡所出现的过电压可达 2~3 倍额定电压。这种过电压,一是给二次仪表和继电保护装置传递一虚假的信号,二是过电压和随之产生的过电流危及绝缘。因此必须采取阻尼装置,抑制或消除这种铁磁谐振的发生。阻尼装置就是一个起开关作用的元件加上阻尼电阻的总称。一般接在剩余电压绕组回路上。

电容式电压互感器的技术要求除了电磁式电压互感器的要求外,还有两项特殊的要求,即铁磁谐振和暂态响应的要求。暂态响

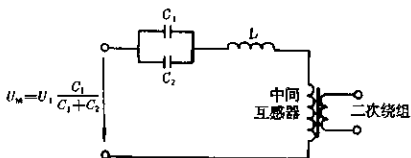


图 128—2 电容式电压互感器的等值电路

应规定当一次侧发生对地短路时,二次侧电压衰减特性。因为在短路瞬间,电容器和电抗器及中间电压互感器所储存的能量要经过 R、L、C 回路释放,其间将可能出现振荡衰减或指数衰减过程。若残余电压过高,衰减速度过慢,将会造成继电保护拒动或延时动作而使系统保护可靠性降低。标准规定:“高电压端子在额定电压下发生对地短路后,二次输出电压应在额定频率的一个周波内降低到短路前电压峰值的 10% 以下。”

电容式电压互感器按电容分压器与电磁单元的组合方式通常有两种结构,一种是分立式,另一种是整体式。分立式是电容分压器和电磁单元分别为独立的元件并分开安装;整体式则是两者组装为一元件安装。现在,一般都采用整体式。

电容式电压互感器与电磁式电压互感器比较,由于电容式电压互感器可兼做载波通讯用而使电力建设总成本下降,同时也由于承受高压的耦合电容器的内部电场分布均匀而具有较好的耐冲击能力,绝缘可靠性较高。正因如此,330kV 及以上超高压电力系统照例都采用电容式电压互感器。另外,电容式电压互感器是通过电容分压器与电网连接,它不会像电磁式电压互感器那样与断路器断口电容产生铁磁谐振(电容式电压互感器内部的铁磁谐振不会影响到一次侧,同时产品本身已采取措施可有效地消除铁磁谐振),220kV 系统采用电容式电压互感器日趋增加正是取其这个优点。电容式电压互感器的不足之处是,其准确级及额定输出的提高比电磁式电压互感器要困难些。

(二) 电流互感器

129. 什么是电流互感器？它与变压器相比有什么不同？

电流互感器是将高压系统中的电流或低压系统中的大电流，变成标准的小电流(5A 或 1A)的电器。它与测量仪表相配合时，则可测量电力系统的电流和电能，与继电器配合时，则可对电力系统进行保护。同时，也使测量仪表和继电保护装置标准化、小型化，并与高电压隔离。

电流互感器是接近于短路运行的变压器，其基本原理与变压器没有多大的差别，只是取其电流的变换罢了。它的一次绕组应与线路串联，额定一次电流等于线路的实际电流，如图 129—1 所示。

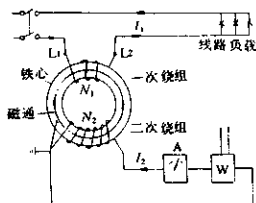


图 129—1 电流互感器的基本电路

但是，电流互感器是与变压器有所不同的，有以下两个特点：

a. 电流互感器二次回路的负荷是电流表或继电器的电流线圈(如图 129—1 所示)，阻抗小，相当于变压器的短路运行。而一次电流由线路的负荷决定，不由二次电流决定。因此，二次电流几乎不受二次负荷的影响，只随一次电流的改变而变化，所以能测量电流，且具有一定的准确度。

b. 电流互感器二次绕组绝对不允许开路运行。这是因为二次电流对一次电流产生的磁通是去磁的，一次电流一部分用以平衡二次电流，另一部分是励磁电流。如果二次开路，则一次电流全部是励磁电流，铁心过饱和(磁通为平顶波)，产生很高的电势(尖顶波)，从而产生很高的电压，极不安全。同时铁损也增加，有烧环的

可能,所以它不能开路运行。

此外,电流互感器与电压互感器一样,二次侧一端必须接地,以防止一、二次之间绝缘击穿时危及仪表和人身的安全。对于差动保护电流回路一般由保护盘经端子排接地,其他电流回路则在配电装置端子箱内经端子排接地。电流互感器二次侧只允许有一点接地,否则在两接地点间形成分流回路,继电器就不能动作了。

130. 电流互感器是怎样分类的? 结构上有何特点?

电流互感器种类很多,大致可分为如下几种类型:

(1)按绕组外绝缘介质分有

a. 一般干式:绝缘介质为一般干式绝缘材料或浸渍绝缘纤维材料等;

b. 浇注式:绝缘介质为环氧树脂加填料浇注成型固体;

c. 油浸式:绝缘介质为变压器油或油浸纸;

d. 气体式:绝缘介质为 SF₆ 气体等。

(2)按绝缘结构形式分(通常指油浸式)

a. 链形:绝缘纸连续缠绕在一次绕组和二次绕组上或全部绕在一次绕组上,且一次和二次绕组交链或“链形”(俗称“8”字形)。

b. 电容均压型:绝缘全部缠绕在一次绕组或二次绕组上,绝缘内由若干过电容屏分成多个电容层而形成电场分布均匀的绝缘结构。电容均压型绝缘结构按绕组形状又为“U”形、正立吊环形、倒立吊环形、电容型绝缘。

(3)按一次绕组结构形式分有

a. 绕线式:用普通导线卷制后再套在铁心上;

b. 母线式:以线路的母线作为一次绕组;

c. 单匝式:一次绕组只一匝;

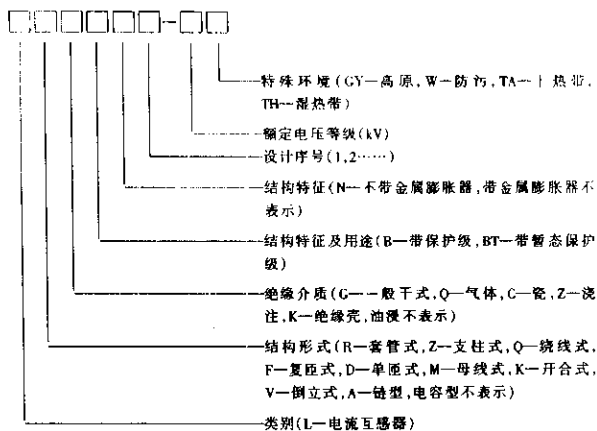
d. 复匝式:一次为多匝;

e. 套管式(装入式):互感器无一次绕组,以变压器或其他电器的导体作一次绕组。

(4)按安装方式(通常指 35kV 及以下干式互感器)分有贯穿式(亦称穿插式)和支柱式。

(5)按使用场所分有户内装置、户外装置、高原型、防污型及干热带与湿热带等型。

电流互感器各种分类及其结构特征基本上能在产品型号中反映出来。产品型号由字母和数字组成,表示方法如下:



例如 LMZ-20 表示母线式浇注绝缘,额定电压为 20kV 级电流互感器。

LB-220 表示带保护级户外装置一般地区用油浸电容型,额定电压为 220kV 级电流互感器。

35kV 以下电流互感器一般为户内环氧树脂浇注绝缘结构,35~500kV 一般为户外油浸式结构。10kV 级电流互感器有绕线式、母线式、单匝和多匝式、支柱式与贯穿式等结构。母线式及多匝贯穿式电流互感器外形如图 130—1、图 130—2 所示。

35~63kV 级电流互感器一般采用链形绝缘结构,110kV 及以上大都采用“U”形电容型绝缘结构,个别也采用正立吊环电容型,其器身结构如图 130—3 所示。

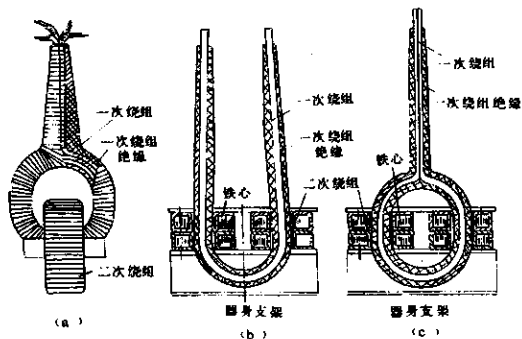
户外高压电流互感器通常采用瓷套作外绝缘,带金属膨胀器

图 130—1 LM2-0.5 母线式
浇注电流互感器

图 130—2 LFZ-10 复匝贯穿式
浇注电流互感器

全密封,同时具有多个二次绕组。

浇注绝缘电流互感器过去往往采用半浇注式结构(对于多匝式,铁心外露在空气中),80年代中期以来,开始向全浇注式发展(即铁心也在浇注体内)。全浇注式的特点是产品体积小、外观好且运行可靠性高。



(a)一次绕组为链形 (b)一次绕组为“U”字形 (c)一次绕组为正立吊环形

图 130—3 高压电流互感器的器身结构

电容均压型绝缘电流互感器中,“U”形用得最普遍,主要是这种结构绝缘包扎工艺性较好,生产效率高,但产品的体积、重量比正立吊环形要大些。正立吊环绝缘结构的特点是体积和重量小,有较好的经济指标,但其绝缘包扎工艺较为复杂,在国内未曾发展。随着工艺技术的不断提高,这种结构也有发展的趋势。倒立吊环形电流互感器则因独具特色,近年来国内已开始开发应用(参见第139题)。

131. 电流互感器有哪些主要技术要求?

电流互感器在规定的使用环境和运行条件下,主要技术要求如下:

(1) 额定电压

电流互感器的额定电压是指互感器一次绕组所接线路的线电压,不是一次绕组两端的承受电压,只是标志一次绕组对二次及地的绝缘水平的基准技术数据。

(2) 额定一次电流

额定一次电流是决定互感器误差性能和温升的一个技术要求,它取决于系统的额定电流。额定一次电流的标准值有(单位:A):

1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 160(150), 200, 315(300), 400, 500, 630(600), 800(750), 1 000, 1 250(1 200), 1 600(1 500), 2 000, 2 500, 3 150(3 000), 4 000, 5 000, 6 300(6 000), 8 000(7 500), 10 000, 12 500(12 000), 16 000(15 000), 20 000, 25 000。

(3) 额定二次电流

额定二次电流的标准值为1A和5A。IEC标准还规定有2A的。它取决于二次设备的标准化。

(4) 额定电流比

额定电流比是额定一次电流与额定二次电流之比,一般不以其比值表示,而是写成比式,例如150A/5A等。

(5) 额定连续热电流

额定连续热电流是指一次绕组连续流过的而不使互感器温升超过规定限值的电流。通常互感器的额定一次电流即是额定连续

热电流,但在某些情况下,额定连续热电流须大于额定一次电流。

(6) 额定负荷(或额定输出)

额定负荷是规定互感器准确级的二次回路阻抗,以伏安数表示,它是二次回路在规定功率因数和额定二次电流下所汲取的视在功率。

在规定的额定负荷下互感器所供给二次回路的视在功率(在规定功率因数下以伏安数表示)称额定输出(俗称额定容量)。额定负荷以伏安表示时与额定输出相等。额定输出的标准值有:

5VA, 10VA, 15VA, 20VA, 25VA, 30VA, 40VA, 50VA, 60VA, 80VA, 100VA。

IEC 标准规定的标准值规格较少,只有 2.5VA, 5VA, 10VA, 15VA, 30VA, 主要是国外的继电器与仪表的消耗功率比我国小得多的缘故。

(7) 测量准确级及其误差限值

电流互感器在变换电流时,由于有励磁电流产生而必然出现误差,这个误差包括电流比值误差和相位差两部分。电流比值误差也称电流误差,电流误差以百分数表示,其定义如下式:

$$f = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} \times 100, \%$$

式中 K_n ——额定电流比;

I_2 ——实际二次电流;

I_1 ——实际一次电流。

若 $K_n I_2 > I_1$, 则 f 为正值,反之为负值。

相位差即二次电流与一次电流两相量之间的差。当二次电流相量超前一次电流相量,则相位差为正值,反之为负值。

衡量电流互感器的误差大小及性能的优劣之一是准确级。准确级是在规定的条件下不超过规定误差限值的一个等级。测量用电流互感器准确级是以在额定电流下所规定的电流误差的百分数来标称的。国家标准所规定的标准准确级有 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3, 5 级。还有特殊使用要求的准确级有 0.2S 和 0.5S 级。各标准准确

级所规定的条件及误差限值如表 131—1 所列。

表 131—1 各标准准确度所规定的条件及误差限值

准确度	额定电流百分数 /%	误差限值		额定输出 (S_n) 变化范围
		电流误差 \pm (%)	相位差 \pm (°)	
0.1	5	0.4	15	$(25\% - 100\%) S_n$
	20	0.2	8	
	100 - 120	0.1	5	
0.2	5	0.75	30	$(25\% - 100\%) S_n$
	20	0.35	15	
	100 - 120	0.2	10	
0.5	5	1.5	90	$(25\% - 100\%) S_n$
	20	0.75	45	
	100 - 120	0.5	30	
1	5	3	180	$(25\% - 100\%) S_n$
	20	1.5	90	
	100 - 120	1.0	60	
3	50 - 120	3.0	不规定	$(50\% - 100\%) S_n$
5	50 - 120	5.0	不规定	$(50\% - 100\%) S_n$
0.2S	1	0.75	30	$(25\% - 100\%) S_n$
	5	0.35	15	
	20	0.2	10	
	100 - 120	0.2	10	
0.5S	1	1.5	90	$(25\% - 100\%) S_n$
	5	0.75	45	
	20	0.5	30	
	100 - 120	0.5	30	

注:1. 二次负荷的下限值为 2.5VA (对于额定二次电流 5A)。

2. 0.2S 和 0.5S 级用于额定二次电流为 5A 者。

(8) 保护准确级及其误差限值

电流互感器除承担着电力系统的电流与电能测量外,最重要的任务是在系统发生故障时传递电流信息给继电保护装置而切除故障。前者是在系统正常运行时即互感器在额定电流下工作;后者则在过电流下工作。由于在过电流情况下,互感器铁心磁密较高,且磁通波形、励磁电流波形畸变较大,所以二次电流中的谐波含量较大,对继电器动作不利。为此,保护准确级误差的定义不能用电流的相量来表示,只能用电流的有效值来表征。国家标准和 IEC 标准都规定为复合误差,其定义如下式:

$$\epsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_2 - i_1)^2 dt}$$

式中 I_1 ——一次电流有效值;
 i_1, i_2 ——、二次电流瞬时值;
 T ——一个周期的时间;
 K_n ——额定电流比值。

保护准确级用准确限值系数电流下的复合误差的百分数及其后加以字母“P”(表示保护)来标称。保护用互感器的标准准确级有 5P 和 10P。

准确限值系数即能满足规定复合误差要求的最大一次电流与额定一次电流的比值。准确限值系数的标准值为 5, 10, 15, 20, 30。通常,在产品铭牌上或技术文件中将准确级及其相应的准确限值系数合起来书写,例如 5P20, 表示在准确限值系数为 20 的条件下复合误差限值为 5%。

保护准确级的误差限值如表 131—2 所列。

表 131—2 保护准确级的误差限值

准确级	电流误差 ± (%) (在额定一次电流时)	相位差 (') (在额定一次电流时)	复合误差 (%) (在额定准确限值 一次电流时)
5P	1	60	5
10P	3	—	10

过去的国家标准,保护用电流互感器曾经是规定 10% 倍数——在规定的额定负荷下电流互感器的电流误差为 -10% 时,一次电流对额定一次电流的倍数。其准确级标称为 B 级。显然,由于 P 级规定的是复合误差,限制了二次电流中的谐波含量,另外,即使电流各量都为正弦波,则按相量图求解即得复合误差为电流误差和相位差(以弧度值表示)的相量和,如此,P 级比只规定电流误差的 B 级要求要严格,即提高了互感器性能,使继电保护更加可靠。

(9) 短时热电流与动稳定电流

电流互感器是串联在线路上的,当发生短路故障时线路电流比额定电流大很多倍,这样大的电流通过互感器,一方面产生热效应,另一方面产生机械效应(电动力),所以电流互感器必须具有承受这些效应的能力。互感器受这些效应的能力是用短时热电流和额定动稳定电流的大小来表征的。

在 1s 内所能承受且无损伤的一次电流有效值,称为额定短时热电流。能承受电磁力的作用而无电的或机械损伤的一次电流峰值,称做额定动稳定电流。一般,额定动稳定电流值为短时热电流的 2.5 倍。

实际,在电力系统中往往要求互感器具有承受 1s 以上的短时热电流的能力。由于短时发热过程可视为绝热过程,因此大于 1s 的短时热电流可按 $I^2 t$ 相等原则来换算成额定短时(1s)热电流值,但是其额定动稳定电流仍为大于 1s 时的动稳定电流值。例如,电流互感器要求承受 3s 50kA 的短时热电流,动稳定电流 125kA,则其额定短时(1s)热电流值为 $\sqrt{3} \times 50\text{kA}$ 。此时动稳定电流值仍为 125kA。

(10) 仪表保安系数(FS)

电流互感器测量二次绕组回路通常所接仪表的过载能力是有限的,仪表精度越高,过载能力越小。因此,必须规定测量二次绕组的过电流特性,使测量仪表不致在过电流下烧坏或机械损伤。国家标准和 IEC 标准对此用仪表保安系数来表示。

额定仪表保安电流与额定一次电流的比值称为仪表保安系数。额定仪表保安电流即测量用互感器在二次额定负荷时,其复合误差不小于10%的最小一次电流值。

仪表保安系数越小,对仪表安全越有利。仪表保安系数通常为5.10。

电流互感器还有其他技术要求,如绝缘水平、局部放电水平等,它们的具体要求在有关标准中有规定。电流互感器的国家标准GB1208—87基本上等效采用了IEC185标准,因此国家标准与IEC标准的差别不大。

132. 怎样减小电流互感器的误差? 采用什么补偿方法?

电流互感器的误差是由励磁电流造成的,计算误差的基本解析式如下:

$$f_1 = \frac{-(IN)_0}{(IN)_1} \sin(\alpha + \varphi) \times 100, \% \quad (132-1)$$

$$\delta_1 = \frac{(IN)_0}{(IN)_1} \cos(\alpha + \varphi) \times 3440 (') \quad (132-2)$$

式中 f_1 —— 电流误差, %;
 δ_1 —— 相位差 (');
 $(IN)_0$ —— 励磁磁势;
 $(IN)_1$ —— 一次磁势;
 α —— 二次回路阻抗角;
 φ —— 铁心材料损耗角。

根据公式 132—1 和公式 132—2, 还可用互感器的结构参数和二次负载参数来表达如下:

$$f_1 = \frac{-I_2 Z_2 L_C}{2\pi f \mu A_C N_{2a} (IN)_1} \sin(\alpha + \varphi) \times 100 \quad (132-3)$$

$$\delta_1 = \frac{I_2 Z_2 L_C}{2\pi f \mu A_C N_{2a} (IN)_1} \cos(\alpha + \varphi) \times 3440 \quad (132-4)$$

式中 I_2 —— 二次电流;
 Z_2 —— 二次回路总阻抗;

- L_c ——铁心磁路长度；
 f ——频率；
 μ ——铁心材料导磁率；
 A_c ——铁心截面；
 N_{2n} ——额定二次绕组匝数；
 $(IN)_1$ ——一次磁势。

由式(132—3)和式(132—4)可以看出,影响误差的因素很多,其中如二次回路总阻抗主要取决于二次负荷的大小,显然,要减少误差就要减少二次负荷,因此,要根据使用情况规定合理的二次负荷值。对于互感器本身,减少误差的途径主要是选择合适的一次磁势即一次安匝,增大铁心截面,且选用导磁率较好的硅钢片,同时设法减少铁心磁路长度。这些结构参数往往要有互感器总的经济技术指标来决定选取。

减少误差的另一途径是采用一些误差补偿方法。误差补偿方法有很多,电力用互感器较为普遍采用的方法有匝数补偿、磁分路补偿、小铁心补偿、短路匝补偿等四种。

(1) 匝数补偿

减少二次绕组的匝数,即增大了二次电流,因而产生一正的误差补偿值,以补偿负误差(任何互感器没有补偿前,电流误差总是负的,相位差总是正的)。误差补偿值按下式计算:

$$f_s = \frac{N_b}{N_{2n}} \times 100, \%$$

式中 N_b ——补偿匝数,即减去的二次绕组匝数;

N_{2n} ——二次绕组额定匝数。

当二次绕组额定匝数较小时,减少一匝补偿值太大,这时往往采用分数匝补偿。分数匝补偿常用以下几种方法来实现。

a. 多根导线并绕

二次绕组用两根或多根相同截面的导线并绕,其中一根导线比额定匝数少绕一匝,此时误差补偿为:

$$f_b = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{N_{2n}} \times 100, \%$$

式中 n ——导线根数, 一般 n 为 2 或 3, 导线数量为 3 时绕制不太方便。

也可以用不同截面的多根导线并绕, 这时误差补偿值按下式计算:

$$f_b = \frac{1}{N_{2n}} \cdot \frac{r_b}{r_a + r_b} \times 100, \%$$

式中 r_b ——少绕一匝的导线电阻;

r_a ——绕满 N_{2n} 匝的导线电阻。

可以看出, 用多根不同截面的导线并绕, 可以实现调整所需的补偿值。

b. 用双铁心或铁心端面钻孔

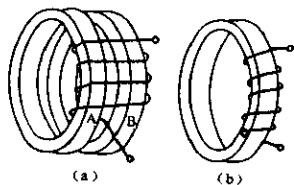
众所周知, 一个绕组的电气匝数, 是由导线穿过铁心内窗孔及其所包围铁心的截面多少来决定的。如图

132—1 (a) 所示, 设导线最

后一匝只绕在铁心 A 上, 其截面为 S_A , 则这个二次绕组的匝数为

$[(N_{2n} - 1) + \frac{S_A}{S_A + S_B}]$ (S_B 为另一铁心截面), 则其误差补偿值为:

$$f_b = \frac{N_b}{N_{2n}} \times 100 = \frac{N_{2n} - [(N_{2n} - 1) + \frac{S_A}{S_A + S_B}]}{N_{2n}} \times 100$$



(a) 双铁心法 (b) 铁心钻孔法

图 132—1 分数匝补偿的两种结构

$$= \frac{1 - \frac{S_A}{S_A + S_B}}{N_{2n}} \times 100 = \frac{1}{N_{2n}} \times \frac{S_B}{S_A + S_B} \times 100$$

实际应用中,由于两铁心磁性能可能相差较大,从而使实际的误差补偿值偏离上式计算值较远。

在铁心端面适当位置钻孔,则二次绕组导线最后一匝(或开头一匝)从孔中穿过,如图 132—1(b),亦得到分数匝补偿。设少绕一匝的那部分铁心(图 132—1(b)所示的孔内侧部分)截面为 S_b ,磁路长度为 L_b ,整个铁心的截面为 S ,磁路长度为 L ,则其误差补偿值为:

$$f_b = \frac{1}{N_{2n}} \times \frac{S_b}{S} \times \frac{L}{L_b} \times 100, \%$$

通常,匝数补偿只对电流误差起补偿作用,对相位差不补偿。但在某些情况下,如补偿匝数太多,或少绕一匝的铁心截面太大,减匝补偿后铁心磁密将增大到不能忽略的值时,铁心励磁电流的增加也较为明显,则再不能认为匝数补偿能对相位起补偿作用,此时以上简单的误差补偿计算式也不适用。

(2) 磁分路补偿

匝数补偿值不随一次电流而变化,因此只能平移误差曲线。采用磁分路补偿则可以使误差随电流变化曲线拉平一些,即在小电流时,误差补偿值较大,而在 100% ~ 120% 额定电流时误差补偿较小。磁分路补偿最初应用于叠片方形铁心,后来也用到圆环形铁心。叠片方形铁心磁分路的结构如图 132—2 所示。磁分路由几片硅钢片式普通薄钢板制成。在有磁分路的铁心柱上(称为上铁心柱)装

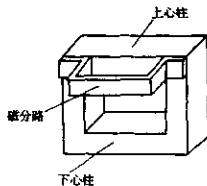


图 132—2 磁分路结构示意图

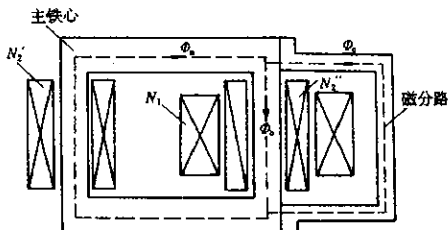


图 132—3 磁分路补偿原理

有一次绕组和一部分二次绕组,无磁分路的铁心柱上(称为下铁心柱)只有另一部分二次绕组,两部分二次绕组(匝数不等)串联连接引出,其绕组布置如图 132—3 所示。磁分路补偿的原理,就是由于两铁心柱的磁势不平衡而产生的磁通通过磁分路,因而使两铁心柱内的磁通的大小和相位都不等(Φ_1 和 Φ_2 的相量不等),两铁心柱上磁通的励磁安匝也不相等,这样,它们的合成量就减少,从而使电流误差和相位差均得到减小。显然,可以利用磁分路磁化特性的非线性特性,适当选择磁分路的磁路长度和截面等参数,就可使误差曲线拉平。通常,这些参数的选择原则是,在较小一次电流时,磁分路处于高导磁率区段工作,磁阻较小,补偿效果明显;当一次电流接近或达到额定值时,磁分路趋于饱和,导磁率低,磁阻大,补偿值大大减小。磁分路的截面对电流误差的补偿效果影响很明显,不同磁分路厚度的电流误差曲线如图 132—4 所示。

在圆环形铁心中,磁分路也是环状的,故称圆环磁分路,圆环磁分路补偿结构如图 132—5 所示。先在主铁心绕所需补偿匝数(N_0),然后外套磁分路片,再继续磁分路和主铁心上绕线至规定二次绕组的匝数。圆环磁分路的参数,如补偿匝数 N_0 、截面与磁路长度等的选择原则同叠片铁心磁分路相同,但通常磁分路的片宽与主铁心片宽相同。

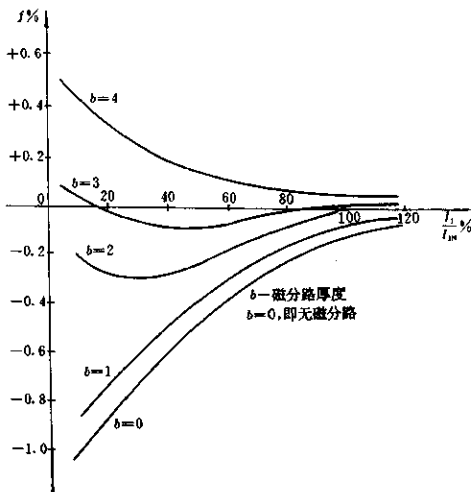


图 132—4 磁分路截面对电流误差的影响

由于圆环形铁心在电流互感器中应用较广,所以圆环磁分路补偿方法应用也很普遍,但多应用在低压互感器中。

由于磁分路的磁性受退火工艺的约束较大,因此,理论计算的准确度较差,实际应用中现场调整磁分路参数是较频繁的。

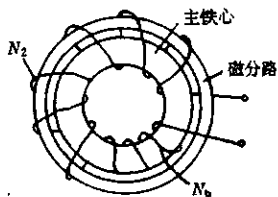


图 132—5 圆环磁分路补偿

(3) 小铁心补偿

在叠片方形铁心的磁分路补偿结构中,如果把磁分路的截面加大,同时使磁路与主铁心隔离,这时磁分路成为一个独立磁路的铁心,这就是小铁心补偿,其结构如图 132—6 所示。

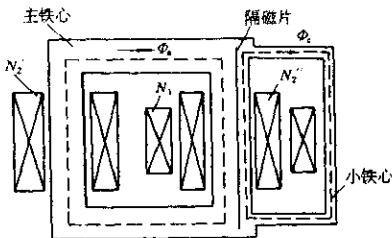


图 132—6 小铁心补偿结构示意图

小铁心补偿的原理基本上同磁分路补偿相同,由于主铁心和小铁心之间有非磁性间隙,上铁心柱主漏磁通在小铁心内流通,因其磁阻小,而漏磁通值较大,而下铁心柱的漏磁通是经非磁性间隙由小铁心闭合,因磁阻大,所以其值很小。因此实际上主铁心中磁通 Φ_0 , 是没有小铁心补偿时的主磁通 Φ_0 与有小铁心补偿时上柱漏磁通的相量和,其励磁安匝减少因而减少了误差。小铁心补偿的各参数选择原则上与磁分路补偿相同,只是补偿值较大,铁心截面要比磁分路补偿大些。在结构设计中要注意的是,小铁心与主铁心的机械夹持零件要采用非导磁材料,如铝或铜质螺栓等。小铁心补偿也广泛用于环形铁心上。

(4) 短路匝补偿

在电流互感器的铁心上用导线绕 1~2 匝,绕组两端短接,就构成短路匝补偿。短路匝补偿的原理,因短路绕组的短路电流同二次绕组电流一样是去磁磁势,所以磁势平衡方程式中增加了一个去磁磁势(短路绕组的电流与匝数的乘积),即互感器又增加了

一个误差分量,使互感器的电流误差和相位差都得到补偿。显然,这个误差补偿值对电流误差不起好作用,而使负误差越来越大,对相位差则起好的补偿作用。因此,短路匝补偿一般只在特殊需要补偿相位差的时候才采用。现代互感器普遍采用优质冷轧硅钢片,相位差一般不会太大,所以很少采用。

短路匝补偿往往与磁分路补偿或小铁心补偿方法一起使用,以得到满意的补偿效果。

13. 电流互感器的极性是怎样规定的? 怎样检查?

电流互感器的极性就是指一次绕组和二次绕组的端子标志,也就是指两个绕组之间电流方向的关系。

国家标准 GB1208—87 关于电流互感器的端子标志是这样规定的:用字母 L 表示一次绕组出线端子,字母 K 表示二次绕组出线端子,例如 $L_1 - L_2$ 、 $K_1 - K_2$,其极性关系为标有 L_1 和 K_1 的各出线端子在同一瞬间具有同一极性。

所谓同一极性,即当电流都同时从两个端子进入绕组,他们所产生的磁通方向是一致的。所以说,这种端子标志的规定实质上就是以往标准所规定的减极性,即一次电流从 L_1 端进入绕组,二次电流从 K_1 端流出经外部回路至 K_2 端进入绕组,两者所产生的磁通方向相反。

端子标志是电流互感器使用中结线正确的保证,极性有错,将使互感器结线错误,会造成仪表及继电保护不能正常工作;同时,制造上只有极性正确才能进行误差试验。因此,电流互感器的端子标志必须检查正确。

电流互感器的端子标志检验,也即极性检查,常采用以下两种方法。这些方法与变压器极性的测定方法是一致的。

a. 直流法

按图 133—1 结线,将适当小量程的直流电流表(0.1~2A)接至被测产品的二次出线端,在一次施加 1.5V 直流电压,使对应端正负相同。如果在直流电源接通瞬间,电流表的指针向正的方向转,则证明极性正确,否则极性错误。

b. 比较法

利用已知极性正确的标准电流互感器与被测品对照而检查极性即称比较法。检查时,将标准互感器和被试互感器按误差试验接线方法结好,当在升流过程中发现误差检验器的极性指示灯没有指示,则说明被试互感器的端子标志正确。

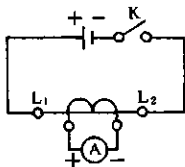


图 133—1 直流法检查极性接线图

直流法使用很方便,所需仪器也简单,所以广泛应用于互感器装配过程中。

134. 电流互感器的误差(测量准确级)是怎样测量的?

电流互感器误差用比较法测量,即被试互感器和标准电流互感器的二次电流同时输入到误差检验器(误差电桥)上比较,其原理接线如图 134—1 所示。标准互感器与被试互感器的电流比应相同,自身准确级至少应比被试互感器规定准确级高两级,被试互

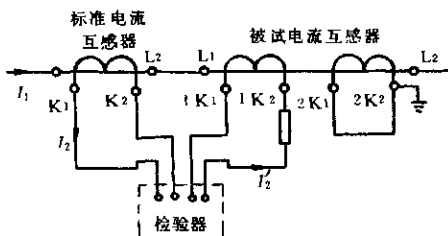


图 134—1 电流互感器误差测量原理接线图

感器所接负荷的偏差不应超过 $\pm 3\%$ 。

误差试验前应先检查互感器的极性并进行退磁。退磁可按互感器的具体情况采用大负荷退磁法或强磁场退磁法。

误差检验器以前国产的有 HE5 或 HE6 型,目前已发展到 HE18 型,可测量 0.2 级互感器的误差。

互感器的实际误差除了由误差检验器所读出的误差外,还应包括标准互感器的自身误差及检验器等设备的误差,按下式计算总的电流误差($\sum f$)和相位差($\sum \delta$):

$$\sum f = f_0 + f_x - \Delta f$$

$$\sum \delta = \delta_0 + \delta_x / 50 - \Delta \delta$$

式中 f_0, δ_0 ——标准电流互感器的电流误差和相位差;

f_x, δ_x ——误差检验器上读出的电流误差和相位差;

$\Delta f, \Delta \delta$ ——检验器的电流误差和相位差;

f ——电源频率。

对于准确级 3、5 级,也允许采用双电流表法测量,即在标准互感器和被测互感器二次回路内各接电流表,用以测量二次电流来计算误差。

135. “U”形电流互感器的二次绕组是怎样排列的?为什么?

“U”形电流互感器的二次绕组套装在“U”字形一次绕组的两“腿”下部,早先,如 220kV 电流互感器的四个二次绕组排列如图 135—1(a)所示,各二次绕组的用途如图 135—1(b)所示。这种排列方式存在一个弊端,就是互感器本身在“K”处发生绝缘击穿事故(实际往往是这样),可能引起母线差动保护动作,把本来是线路事故扩大为母线事故,扩大了停电范围。为了避免这种事故,后来二次绕组的排列顺序改进了,如图 135—2 所示。这样改进后,无论是互感器绝缘在 K 处击穿,还是外绝缘发生闪络,都可以由距离保护动作,只是本线路停电,完全避免了事故的扩大。

为方便使用者做二次接线,“U”形电流互感器油箱上的接线盒内均装有二次绕组排列顺序的说明牌。

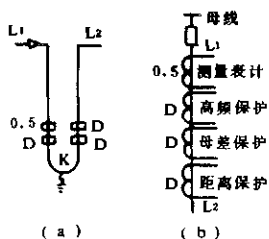


图 135—1 改进前 220kV 电流互感器二次绕组排列顺序 (a) 和继电保护接线图 (b)

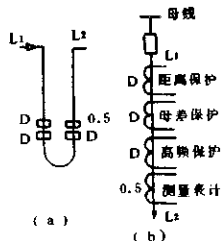


图 135—2 改进后 220kV 电流互感器二次绕组排列顺序 (a) 和继电保护接线图 (b)

136. 套管式电流互感器有何特点？变压器内怎样配置？

套管式电流互感器也称装入式电流互感器，它可安装在变压器或其他电器的引出套管上。套管式电流互感器的特点是无一次绕组，套管的导杆就成了互感器的一次绕组，结构上就只是外装电流互感器的一个二次绕组。变压器套管电流互感器的安装如图 136—1 所示。

由于套管式电流互感器无一次绕组，互感器的一次匝数是固定的，没有选择余地，所以电流比较小的套管式电流互感器的准确度的提高受到限制。例如，一般情况下，200/5A 及以下不可能做到 1

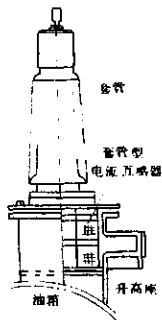


图 136—1 套管式电流互感器的安装

级,600/5A 以上才有可能做到 0.5 级,1 200/5A 以上方可做到 0.2 级。如果电流比小到 100/5A 以下则根本不可能有什么准确级可言。这就是说,套管电流互感器一般不能做计费用。当然,如果采取一些特殊的措施及使用高导磁材料有可能把准确级提高一些,但结构上的复杂或材料成本的昂贵可能难以为人们所接受。

另外,由于变压器的负载往往是逐期变化的,为了测量的准确度,套管电流互感器往往有多个抽头而可改变电流比,通常电流比为 1~4 个,但是抽头电流比的准确度及其二次负荷等都要降低。

变压器上套管电流互感器的配置大致是这样的:

电压 60kV、容量为 8MVA 及以上,电压 110kV、容量为 16MVA 及以上变压器,在高压侧的每相套管上装三台,其中一台供测量用,两台供继电保护用。电压为 220kV、容量在 20MVA 以上的三绕组变压器,其高压侧(220kV)和中压侧(110kV)套管上均装三台,一台供测量用,两台供继电保护用。供中性有效接地系统用变压器,如 220kV 侧和 110kV 侧的中性点套管上也均装 1 台套管式电流互感器。

套管式电流互感器的型号为 LR - × × × 及 LRB - × × ×,“× × ×”表示额定电压等级,B——表示“保护”用。例如 LRB - 220 为 220kV 保护用套管式电流互感器。

137. 220kV 及以上电流互感器为何要装一次绕组过电压保护器?

电流互感器在电力线路上运行中一次绕组要经受大气过电压、操作过电压及工频瞬时过电压的作用。因此,一次绕组匝间绝缘应有一定的绝缘强度,220kV 及以上系统,普遍全线设有大气过电压保护措施,因此大气过电压波侵入互感器一次绕组所产生的过电压幅值对绕组匝间绝缘(产品一次绕组匝间绝缘短时工频耐压 4kV)一般没有多大威胁,但是,在某些操作过电压下,例如利用隔离开关投切空载母线,或电容式电压互感器所产生的过电压,可能大大超过互感器一次绕组的绝缘水平。1984 年我国第一条国产设备建设的锦州—辽阳 500kV 线路进行调试时,用 GW6 - 500

型隔离开关投、切 310m 长的空载母线, 及用 GW7-500 型隔离开关投切 500kV 电容式电压互感器, 其高频振荡电流达 3.6kA (频率为 140kHz), 该电流通过电源侧 500kV 电流互感器 (电感量为 18.2 μ H, 未装过电压保护器) 所造成的过电压达 57.6kV, 使互感器一次出线 L_1 侧的小瓷套闪络。为保护一次绕组匝间绝缘, 在 L_1 、 L_2 两端加装氧化锌避雷器, 经再一次投切操作, 互感器小瓷套无闪络, 且避雷间隙已动作。这足以证明, 该氧化锌避雷器起到保护操作过电压的作用。

1985 年修订国家标准时, 电力部门提出, 除 500kV 电网外, 220kV、330kV 电网也同样有上述这种操作, 而且曾发现 220kV 电压互感器一次绕组导电杆 (L_1 端) 与储油柜的内壁之间有放电痕迹, 经分析亦是此类操作过电压所致。因此, 在 GB1208-87 标准中明确规定: “额定电压 220kV 及以上的互感器, 应在一次出线端子间加装过电压保护器”。

根据锦州—辽阳 500kV 线路调试时的试验结果, 经研制, 过电压保护的基本参数为:

参考电压 (直流 1mA 时的电压) 1 270 ~ 1 560V;

泄漏电流 (75% 直流参考电压下) $\leq 10\mu$ A;

5kA 残压 (8/20 μ s 冲击波) $\leq 3 200$ V;

10kA 残压 (8/20 μ s 冲击波) $\leq 3 900$ V;

2ms 方波 (峰值) 600A, 不小于 20 次;

通流容量 18/40 μ s 冲击电流 (峰值) 10kA, 不小于 20 次。

由以上技术参数可知, 该过电压保护器无论大气过电压还是操作过电压, 都能对一次匝

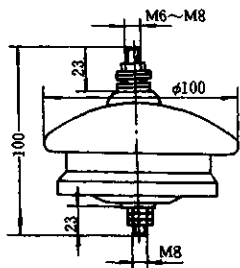


图 137-1 ZB-1.0 氧化锌过电压保护器

间绝缘起保护作用。

该电压保护器型号为 ZB—1.0, 其外形尺寸如图 137—1 所示。

138. 什么是电流互感器的暂态特性? 有何要求?

在超高压电力系统中, 为保持系统的稳定性, 系统出现故障时应快速切除故障, 即要求继电保护高速动作, 一般要求在系统短路事故发生后 2 个周波内继电器动作, 给断路器发出指令。由于超高压系统一次电路时间常数较大, 短路电流直流分量衰减较慢, 因此, 电流互感器此时工作在一次电流的过渡过程中。保护用电流互感器在一次电流的暂态过程中的误差特性即称为电流互感器的暂态特性。500kV 电力系统对电流互感器的暂态特性有严格的要求, 目前, 对 220kV 及以下电网(不与 500kV 电网联网的)的互感器还没有暂态特性的要求。

普通电流互感器, 由于短路一次电流中含有直流分量, 电流波形如图 138—1(a) 所示, 在暂态过程中, 电流互感器铁心中磁密很高而饱和, 励磁电流很大且波形畸变, 误差很大, 不能使继电保护

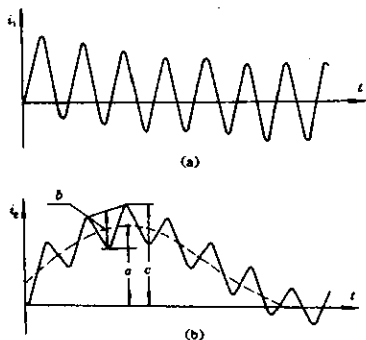


图 138—1 一次电流 i_1 (a) 与误差电流 i_2 (b) 波形

对于 TPX、TPY, $\epsilon = C$; 对于 TPZ, $\epsilon_m' = b/2$ 。

正确动作。因此,有暂态特性要求的互感器与普通互感器是大不相同的。暂态特性互感器最主要的特点是:铁心截面比普通互感器要大一个倍数,一般在 15 ~ 20 倍,同时大都要在铁心中设置一定的非磁性间隙。因此暂态特性互感器的体积和成本比普通互感器要大得多,且制造工艺更复杂些。

对暂态特性电流互感器的误差要求,IEC44—6(1992)《保护用电流互感器暂态特性技术要求》规定有四个准确级:TPS、TPX、TPY、TPZ。其中“TP”表示暂态保护,其后面的字母表示误差特性分级。各准确级定义如下:

TPS级:低漏磁电流互感器,其性能由二次励磁特性和匝比误差限值规定。无剩磁限值。

TPX级:准确限值规定为在指定的暂态工作循环中的峰值瞬时误差。无剩磁限值。

TPY级:准确限值规定为在指定的暂态工作循环中的峰值瞬时误差。剩磁通不超过饱和磁密的 10%。

TPZ级:准确限值规定为在指定的二次回路时间常数下和具有最大直流偏移的单次通电时的峰值瞬时交流分量误差。无直流分量的误差限值要求。剩磁通实际上可以忽略。

暂态励磁电流(即误差电流)的波形如图 138—1(b)所示。TPX、TPY 及 TPZ 级误差定义用图示中线段表示更为直观。

暂态准确级通常在下列条件下满足规定的误差要求。

a. 一次电流衰减时间常数 T_p 。

b. 对称短路电流系数 K_{ssc} ,即系统稳态短路电流对额定电流的比值。

c. 一次电流偏移量,一般为全偏移,即在 $t = 0$ 时直流分量值与交流分量值相等。

d. 规定的工作循环(C-0 或 C-0-C-0)。

在 C-0 中即单次通电,为 $C - t'(t_{d1}') - 0$ 。

在 C-0-C-0 中,即双次通电为 $C - t'(t_{d1}') - t_{tr} - C - t''(t_{d1}'') - 0$ 。

其中 t' ——第一次通电时间; t'' ——第二次通电时间; t_{dL}' 、 t_{dL}'' ——第一次和第二次保持规定准确度的时间。 t_{dL}' (t_{dL}'') 一般为继电保护动作时间,有时也包括断路器切断电流所需的时间(即 $t_{dL}' = t'$, $t_{dL}'' = t''$); t_b ——两次通电中的无电流间隙时间。

e. 额定输出, $\cos\phi$ 一般为 0.9~1.0。

各暂态准确级的误差限值如表 138—1 所列。

互感器的匝数比应为 $1/K_n$ (K_n ——额定电流比),匝数比的误差不超过 0.25%。

在规定条件下,二次励磁极限电压 U_{dL} 不应小于规定值。此电压应为其幅值增大 10% 时致使励磁电流峰值的增加不超过 100%。同时在 U_{dL} 下励磁电流峰值不应超过规定值。如未规定时,则在任何情况下励磁电流应不超过折算到二次侧的短时热电流值的 10%。

表 138—1 误差限值

准确级	在额定一次电流下		在准确限值条件下
	比值差 ± (%)	相位差 ($'$)	最大峰值瞬时误差 (%)
TPX	0.5	± 30	$\epsilon = 10$
TPY	1	± 60	$\epsilon = 10$
TPZ	1	180 ± 18	$\epsilon_{ac} = 10$

由使用条件规定的二次励磁极限电压,通常按下式计算:

$$U_{dL} \geq KK_{SSC}(R_{ct} + R_b)I_m$$

式中 K ——面积系数;

R_{ct} ——二次绕组电阻(折算到 75℃);

R_b ——二次负荷电阻;

I_m ——额定二次电流。

TPS 和 TPX 级互感器的铁心为连续圆环形,不设非磁性间隙(即气隙)。由于未限制剩磁,它们不宜用于有双工作循环要求的继电保护。TPY 和 TPZ 级电流互感器的铁心中要设置一定气隙,

其相对气隙长度(气隙长度占铁心平均磁路长度的百分数)通常为 0.05% ~ 0.2%。TPZ 级的气隙要比 TPY 级的大些。由于铁心设置气隙后,铁心的导磁率在一定范围内恒定,即铁心的励磁特性是线性的,故这两种互感器也称线性互感器。

在相同的技术要求下,铁心截面的大小大致是:TPX 级最大,TPY 级次之,TPZ 级最小。尽管 TPZ 级铁心截面小,但因其相位差有严格的偏差要求,其结构设计及工艺控制是较为麻烦的。

暂态互感器的各准确级需与不同动作原理的保护装置相匹配,根据国内继电保护装置的动作用理,电力系统普遍采用 TPY 级暂态互感器,TPZ 级只在个别线路使用。

139. 什么是 SF₆ 互感器?

SF₆ 互感器是以 SF₆ 绝缘气体做绝缘介质的新型互感器。SF₆ 互感器比油浸式互感器结构简单、工艺过程简化、生产周期短、运行安全可靠、维护工作量小等优点,因此,现代 SF₆ 互感器得到很快的发展。

SF₆ 互感器分两大类,一类是配 SF₆ 全封闭组合电器(GIS)的互感器,另一类是独立式 SF₆ 互感器。前者发展较早,后者起步较晚。

GIS 用 SF₆ 电流互感器实际上是一种套管式互感器,无一次绕组,不承受主绝缘,只是互感器所使用的一些绝缘材料需耐 SF₆ 气体的腐蚀,且不影响 SF₆ 气体的绝缘性能而已。目前其绝缘材料一般为以三氧化二铝为填料的环氧树脂浇注成型固体,或者为粘胶聚酯薄膜,或其他不受 SF₆ 气体腐蚀的绕包绝缘。

独立式 SF₆ 电流互感器通常为倒立式,外形如图 139—1 所示。

GIS 用 SF₆ 电压互感器为单级,一次绕组,双柱式叠片铁心,器身装在一罐体内,高压引线通过一盒式绝缘子与封闭电器的母线相连,互感器外形如图 139—2 所示。

独立式 SF₆ 电压互感器与 GIS 用 SF₆ 电压互感器除了增加高压引线套管外,其他结构基本相同,如图 139—3 所示。

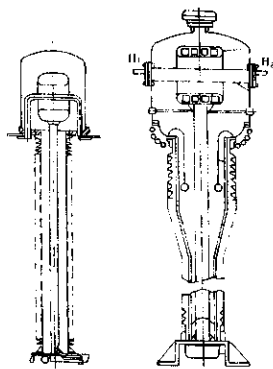


图 139—1 独立式 SF₆ 电流互感器

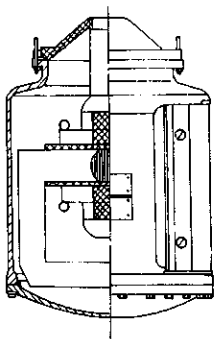


图 139—2 GIS 用 SF₆ 电压互感器

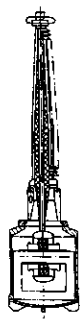


图 139—3 独立式 SF₆ 电压互感器

SF_6 气体是一种无色、无味、无嗅、无毒的具有良好绝缘强度的气体,同时其灭弧性能最佳,所以 SF_6 气体最先用在高压断路器上,后用在全封闭电站中。 SF_6 气体的绝缘强度与气体压力、气体中含水量有关。气体压力高,含水量低,则绝缘强度高。用于互感器中时, SF_6 气体压力一般选为 0.3 ~ 0.4MPa。 SF_6 气体在高温电弧作用下会分解出一些有害物质,一般有亚硫酸氟(SOF_2)、硫酸氟(SO_2F_2)、四氟化碳(CF_4)、氢氟酸(HF)、四氟化硫(SF_4)、三氟化铝(AlF_3)、六氟化钨(WF_6)等,这些物质对金属、陶瓷、玻璃等都有腐蚀作用,有的对人体健康有害。因此,必须控制其分解物的浓度。

根据 SF_6 气体的以上特点,设计制造 SF_6 互感器应注意以下几点:

- a. 不能用纤维性固体绝缘材料,因为这种材料极易造成气体放电;
- b. 所有高压电极及接地零部件的表面要有较大的曲率半径,以降低表面电场强度,提高放电电压,必要时需在电极间增加屏蔽电极,以改善电场;
- c. 绝缘件要排除在电场之外,要有可靠的屏蔽措施;
- d. 机加工零部件表面粗糙度要适当,应尽量避免表面微小的突出;
- e. 绝缘体表面要光滑,防止表面滑闪放电;
- f. 密封要可靠,防止气体泄漏,一般年漏气量控制在 0.3% 以下。

其中最关键的技术,一是电极形状及屏蔽措施,二是密封结构。为选择合理的电极形状,一般要进行严格的电场计算,以控制各个部位电场强度值。密封结构包括密封材料及密封面的加工。密封材料通常用乙丙橡胶,密封垫的断面以“O”形居多,密封面加工要光滑平整,且尺寸公差要严格控制,装配时配以密封胶以增强密封可靠性。焊缝要无微孔、无裂纹,并应做 X 射线检查。

另外, SF₆ 互感器的制作场所环境条件要求很高, 一般应控制日降尘量、温度及湿度等, 同时要保持有一定正压值。为此, 互感器生产厂房应有空气调节、过滤和除湿设备。

SF₆ 互感器内的气体有专用的充气设备充入和抽出, SF₆ 气体的泄漏量须用检漏仪检测。

与其他绝缘型式的互感器一样, SF₆ 互感器的器身必须经真空干燥处理, 而且采用封闭式处理方式, 即器身装入外壳后再真空干燥, 处理后即充入 SF₆ 气体, 进行性能试验。

为确保 SF₆ 互感器运行安全, 互感器应装有防爆装置, 当产品内因故障而压力升高至超过高压安全值时, 防爆装置自行释压, 避免爆炸事故。

独立式 SF₆ 互感器的绝缘子通常要用高强度电瓷制造。为更安全可靠, 目前国外已在研制并应用硅橡胶绝缘子。这种绝缘子是由耐机械冲击, 耐内压很高的绝缘筒外壁铺硅橡胶伞裙而成。因伞裙做得很薄, 风吹雨淋均可把其上的污尘除净, 所以这种绝缘子防污性能很好。

140. 什么是倒立式电流互感器? 有何特点?

在第 130 题中已经提到, 倒立式电流互感器是一种电容均压型绝缘结构的互感器。通常电流互感器的二次绕组处于下部油箱中, 主绝缘置于一次绕组或一、二次绕组上, 此称正立式; 而带有主绝缘的二次绕组处于上部的电流互感器称为倒立式。

倒立式电流互感器与正立式电流互感器比较有许多优点: 当一次电流较大时, 容易解决温升问题; 当一次电流较小时, 容易实现高准确度, 且可满足大的短路电流倍数的要求; 外绝缘瓷套径向尺寸小, 制造工艺性较好; 不存在“U”形一次绕组绝缘处在油箱底部的环部绝缘容易受潮的薄弱环节, 运行可靠性较高。同时, 倒立式电流互感器易于和单级式电压互感器组装, 促进组合式互感器的发展。

倒立式电流互感器的外形如图 140—1, 国内 35 ~ 220kV 级倒

立式互感器均已应用于电力系统中,正在向500kV级发展。

倒立式互感器的结构有以下特点:

a. 主绝缘为倒立吊环形电均压结构。该结构的环部电极形状是由多个二次绕组组合的断面所决定,其尺寸一般比正立吊环形或“U”形大得多。220kV四绕组倒立式互感器的二次绕组组合断面如图140—2所示。二次绕组通常用圆管托

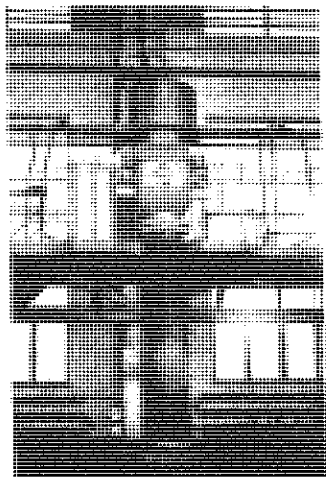


图 140—1 LVB—220 倒立式电流互感器

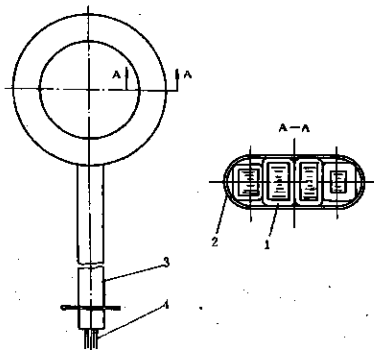


图 140—2 LVB—220 电流互感器二次绕组组合断面

架支撑,所有二次绕组引线均由管中引出到下部底座。

b. 一次绕组结构一般有两种形式,当一次电流较大时,一次绕组为穿过二次绕组中心的管形或矩形母线,当一次电流较小时,一次绕组则可用软铜绞线均匀地绕在二次绕组上。无论哪种形式,一次绕组对二次绕组,其磁场是对称的,因此一、二次绕组的漏磁很小,即倒立式互感器可做成低漏磁型互感器。另外,这种结构的一次绕组电动力小,互感器具有较高的动稳定性能。

c. 瓷套的形状通常是直圆筒形,且径向尺寸比正立式小得多,易于制造。但由于上部重量大,产品重心高,为适应放倒运输或满足一定的耐地震要求,瓷套的抗弯强度要求高,一般要用高强度电瓷制造。

绝缘包扎工艺是制造倒立式电流互感器的关键技术。由于环部内外径尺寸相差大,按通常的连续包缠绝缘纸的方法,则圆环内外侧的绝缘厚度相差很大,这不但造成结构布置的困难,而且电场畸变。因此,为改善电场,也便于结构布置,需在连续包缠绝缘纸的同时,在外侧加垫附加绝缘层以减少内外绝缘厚度的差别。在环部与直线部分交接的“T”形地带同样需要采取加垫绝缘,使绝缘基本上连续,不致发生绝缘的薄弱环节。

倒立式电流互感器“头重脚轻”,其抗地震能力不如正立式好。但是,经计算以及用直接法进行振动试验,结果表明,220kV级倒立式电流互感器可承受水平振动加速度 $0.3g$ 的正弦三周波的振动而无损伤。因此,倒立式电流互感器用于一般震级地区是安全的。

141. 什么是剩余电流互感器?

剩余电流互感器是在中性点非有效接地系统中,与接地继电器等构成单相接地保护装置。系统正常运行时,通过剩余电流互感器一次绕组中的三相电流相量和等于零。此时剩余电流互感器处于非工作状态。

由图 141-1 中可见,当 T 点发生单相接地故障时,通过互感器的剩余电流等于相电容电流的三倍,保护装置可靠地动作。所

以剩余电流互感器的二次电流是继电器的整定电流,此时一次电流是一次最小动作电流,如表 141—1 所示。

剩余电流互感器的结构可分为电缆式和母线式两种,如图 141—2 所示。

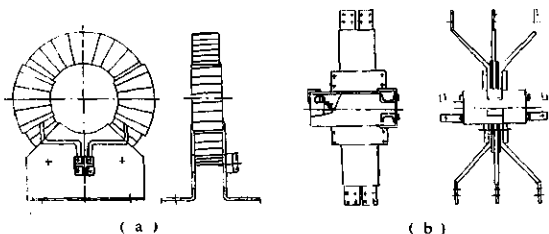
电缆式剩余电流互感器的二次绕组沿铁心对称布置,电缆从铁心窗口穿过,窗口尺寸按电缆外径及根数确定。



图 141—1 剩余电流互感器的工作原理

表 141—1 剩余电流互感器一次最小动作电流

型式	母线式	电缆式
继电器型号	DD11/60	DL11/0.2
整定电流 I_2 /mA	30	100
一次最小动作电流/A	2.4	1.3, 1.8, 3



(a) 电缆式 (b) 母线式

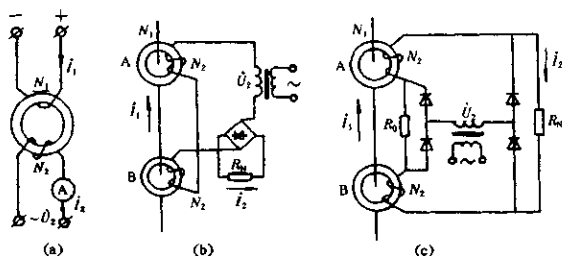
图 141—2 剩余电流互感器的结构

母线型剩余电流互感器的一次绕组是用层压板夹紧组成的三相母线组,从矩形叠积式铁心窗口穿过,铁心的两柱分别套上匝数相同串联或并联的两个二次绕组,其联结应与继电器线圈相一致。

142. 直流互感器的的工作原理是怎样的？

直流互感器的工作原理就是饱和电抗器的原理。不过，其一次绕组相当于饱和电抗器的直流控制绕组，而二次绕组则相当于其交流绕组。

如图 142-1(a) 所示，铁心上一次绕组 N_1 通过直流电流 I_1 ，而二次绕组 N_2 接交流电压 U_2 。当改变电流 I_1 时，由于铁心中磁导率的改变，绕组 N_2 的总阻抗改变，从而改变了取自交流网络的电流 I_2 。这是直流互感器的基本原理。



(a) 原理图 (b) 串联线路 (c) 并联线路

图 142-1 直流互感器的基本线路

但是这样的结构还不同于直流互感器，因为交流电流 I_2 仅在一个半波周期的时间内与被测量的直流电流 I_1 成比例。

通常直流互感器用两个相同的铁心(A、B)，铁心上的一次和二次绕组的结法为，在交流电压 U_2 的一个半波周期内，一个铁心中的直流磁通与交流磁通方向相同，另一个铁心中交、直流磁通方向则相反；在下个半波周期内两铁心中磁通作用相反，见图 142-1(b)、(c)。两个铁心轮换工作，直流互感器在整个周期连续工作，且由于交流绕组的相反联结，两个一次直流绕组中交流电势相反，相互抵消了。

直流互感器二次电流 I_2 ，可以用直接接在二次回路的电磁式电流表测量。但二次电流常用桥式固体整流器整流，则可用磁电式有等距刻度的电流表测量，灵敏度高而损耗小。

直流互感器有串联、并联两种基本线路。串联线路还可以在二次

图 142—2 BLZ 型直流电流互感器外形

侧加中间交流互感器，然后整流，使之具有二级电流比，便于测量大电流。图 142—2 所示为 BLZ 型直流电流互感器外形。

防磁补偿式直流互感器是采用串联反接线路，在增加的铁心上，加防磁补偿绕组。

三、调压器

(一)概述

143. 调压器是怎样分类的?

调压器又称电压调整器。它是一类可以在较大范围内平滑无级地调节负载电压的交流电器,被广泛地应用于各种需要连续调节电压的场合。

调压器的形式除可分成单相、三相,干式和油浸式外,主要是按结构分类。常见的调压器有变压器型和电机型两种。变压器型有接触调压器、移圈调压器和磁性调压器三种;电机型是感应调压器。

这四种调压器的主要用途和特点如表 143—1 所示。

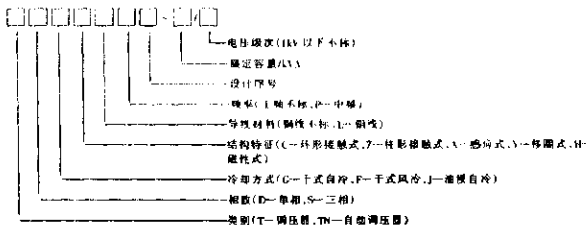
表 143—1 各种形式调压器的主要用途和特点

形式	容量和电压范围	主要用途	特点
接触调压器	环式 0.1 ~ 30kVA 500V 以下	实验室、小型工业电炉、电讯设备、家用电器等	效率高、波形及调压特性好、体积小、重量轻
	柱式 10 ~ 100kVA 500V 以下	工业、农业、国防、科研通用调压设备,特别适用于对波形要求高的科学试验场合	波形畸变率小、效率高、噪声小、调压速度快、重量轻,具有自动回零装置
移圈调压器	25 ~ 2 250kVA 10kV 及以下	与试验变压器和中小型整流设备等配套	调压范围大,效率较低,空载电流较大
磁性调压器	50 ~ 1 000kVA 10kV 及以下	用于低电压大电流输出,如盐浴炉、电子轰击炉等配套	无传动机构,调压范围随负载而变化,非额定运行时波形差
感应调压器	10 ~ 1 900kVA 10kV 及以下	一般试验电源,发电机励磁系统、工业电炉、试验变压器及中小型整流设备等配套	调压范围大,波形及调压特性较好,制造工艺与电机相似,比其他几种调压器复杂一些

采用上述各种形式特殊设计的调压器作为执行元件,配以相应的控制器均可组成该形式的自动调压器。

随着晶闸管(可控硅元件)的发展,可控硅调压器、可控硅调功器也得到广泛的应用。这类产品属于晶闸管交流电力控制器。由于它们在很多场合(如调光、控温)可以替代部分一般调压器,因而可控硅调压器、调功器也是调压器的一种形式,即电子型调压器。

调压器产品型号表示方法如下:



调压器的电工图形符号如表 143—2 所示。

表 143—2 调压器的电工图形符号

说 明	图形符号	
	形式 I	形式 II
可连续调节电压的单相接触调压器		
单相感应调压器		
三相感应调压器		

注:移圈调压器、磁芯调压器在标准中未作规定。

调压器产品型号举例:

例 1. TSZ - 100 表示 100kVA 三相油浸自冷柱式接触调压器。

例 2. TSFA - 630 表示 630kVA 三相干式风冷感应调压器。

例 3. TNSA - 1 000/6 表示 1 000kVA 三相 6kV 级油浸自冷感应自动调压器。

144. 调压器的主要技术数据和额定容量等级有哪些?

调压器在规定的使用环境和运行条件下,主要技术数据一般都标在铭牌上,它们包括:额定容量、相数、频率、额定输入电压、额定输出电压、额定输出电流、绝缘等级、油重(仅对油浸自冷式)、总重等。自动调压器还标有额定输出电压稳定精度,控制器分开安装的产品还标有所配控制器型号。

我国调压器的额定容量等级是按 $\sqrt[3]{10}$ 倍数增加的 R20 容量系列。1 000kVA 及以下的容量等级(kVA)为:0.1(0.15)、0.2、0.3、0.5、1(1.5)、2.0、2.5、3.0、3.5、4.5、5.6、6.3(6)、7.8、9、10、11、12.5、14、16(15)、18、20、22.5、25、28、31.5(30)、35、40、45、50、56、63、70、80、90、100、110、125、140、160(150)、180、200、225、250、280、315(300)、350、400、450、500、560、630、700、800、900、1 000。

一般调压器额定输出容量:

$$\text{单相 } P = U_2 I_2 \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

$$\text{三相 } P = \sqrt{3} U_2 I_2 \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

式中 U_2 ——对于接触调压器,表示输出电流为零时的最大额定输出电压;对于感应调压器,表示负载功率因数为 0.8(滞后)和额定输出电流时的最大额定输出电压;对于移圈调压器、磁性调压器,表示当负载功率因数为 1.0 和额定输出电流时的最大额定输出电压;三相时为线电压, V;

I_2 ——额定输出电流, A。

一般调压器在调压范围内是不能以恒定功率输出的。调压器

铭牌上所标称的额定输出电流指的是输出电流最大允许值。当调压器输出电压在整个调压范围内变化时,其输出电流不能大于这一额定值。也就是功率输出必然小于额定输出容量,输出电压越小,输出功率也越小。必须指出,在各类调压器的标准中,一般都规定有短时过负载能力,在这种条件下,输出电流是允许短时超过铭牌的标称电流值的。

(二)接触调压器

145. 接触调压器的工作原理怎样?

接触调压器是借助于一组可滑动或滚动的电刷在一绕组的磨光导电表面上接触位置的改变,如图 145—2 所示,而实现将一不可调的电压 U_1 转变为一直连续而平滑可调的电压 U_2 。它的电磁原理与自耦变压器相同。

环式与柱式接触调压器的外形如图 145—1 所示,它们的接线原理如图 145—2 所示。

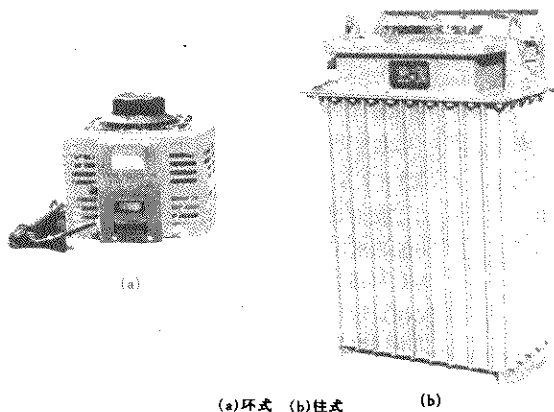
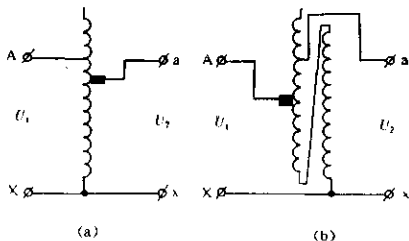


图 145—1 接触调压器



(a) 单层 (b) 双层

图 145—2 接触调压器接线原理图

146. 接触调压器的结构有哪些特点？

(1) 铁心

接触调压器的铁心有两种形式：一种为环式，用电工钢带卷制经退火处理而成；另一种为柱式，如同变压器铁心一样，用电工钢片剪切叠积而成，单相壳式，三相三柱式。

(2) 绕组

接触调压器的绕组有单层与多层之分。单层作调压用，如图 145—2(a) 所示，电压调节范围大，全绕组的线匝磨光导电表面均能与电刷接触。多层作稳压用，如图 145—2(b) 所示，电压调节范围小，绕组最外一层线匝的磨光导电表面能与电刷接触。环式铁心的绕组采用专用绕线机直接绕在绝缘的铁心上。柱上铁心的绕组采用成型模绕制而成，再套装在铁心柱上。

(3) 电刷

接触调压器的电刷结构形式有滑动接触电刷与滚动接触电刷两种，如图 146—1 所示。滑动接触电刷在绕组线匝的磨光导电表面上滑动接触，接触面积大，接触电阻小，电刷磨损量大；滚动接触电刷在绕组线匝的磨光导电表面上滚动接触，接触面积小，接触电阻大，电刷磨损量小。



(a)滑动接触 (b)滚动接触

图 146—1 接触调压器的电刷接触形式

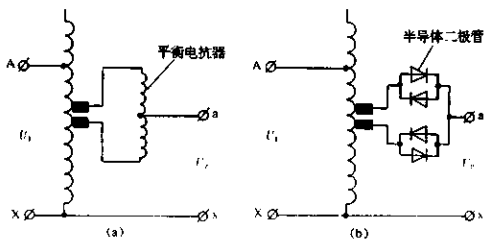
接触调压器容量较小时,绕组匝电压不大于 0.9V,采用电化石墨电刷,材质为 D308。电刷在滑动或滚动方向的宽度必须大于相邻两导线磨面间的绝缘间隙,又以不短路相邻三根导线(即两匝)为好,因为电刷短匝造成的环流损耗,是影响触点温度的重要因素。但在匝电压较低或导线较细的情况下,考虑到电刷的机械强度,可适当增加电刷宽度。接触调压器容量较大时,绕组匝电压大于 0.9V,采用紫铜石墨电刷,材质为 J105。因其电阻系数甚小,一块电刷的宽度不能有短匝的状况,因此它的宽度不能大于相邻两导线磨面间的绝缘间隙。为了保证输出电压的连续可调,必须采用两组电刷交替输出,并在两组电刷间连接平衡电抗器或半导体两极管,如图 146—2(a)、(b)所示,以减小或消除两组电刷间环流。

平整光洁的接触表面,能增加电刷与绕组导线的有效接触导电面积,降低触点温度,此外还能减少电刷在调节过程中的磨损量,延长接触调压器的使用寿命。

接触调压器的电刷与绕组磨面接触不良时,会引起触点温度过高,使导线磨面发生高温氧化。氧化层继续加剧触点过热,产生恶性循环,直至接触部位的绕组绝缘烧坏。影响触点温度的主要因素有电刷材料的选用、电刷压力的大小、电刷与绕组磨面的接触状况等。

采用 D308 电化石墨电刷时,应注意材料层压方向,利用层压方向电阻系数大的特点来限制匝间短路环流,如图 146—3 所示。

一块电刷的压力在 5 ~ 10N 左右。接触压力太小会引起接触



(a)平衡电抗器联结 (b)半导体二极管联结

· 图 146—2 紫铜石墨电刷联结形式

电压降增大,电刷损耗增大,造成触点过热,且在电刷调节过程中容易产生火花,严重的火花会灼蚀绕组磨光表面;压力太大则电刷磨损严重,而且由电刷短匝造成的电刷损耗明显增大。因此,电刷与绕组磨面的接触好坏直接关系到接触调压器的使用寿命。



图 146—3 电刷短匝及其层压方向

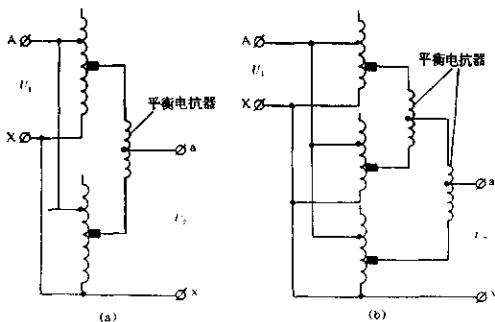
147. 接触调压器有哪几种接线方式?

(1)单相接触调压器

单相接触调压器的接线方式一般均为正接,即一次侧通过绕组抽头输入,二次侧通过电刷输出。

环式接触调压器一个环式铁心为一个单元。一个单元的最大容量一般为 10kVA,大于 10kVA 的单相容量,往往采用几个单元同轴叠装并联成一体,同步转动。单元之间的输出电压差值不大于 3V,并在各单元电刷组之间串联一平衡电抗器,如图 147—1(a)、(b)所示。

柱式接触调压器一个铁心为一个单元。一个单元的最大容量一般为 35kVA,绕组两侧电刷组间的电压差不大于 3V,并串联一平衡电抗器,如图 147—2 所示。大于 35kVA 的单相容量,采用



(a) 两单元并联 (b) 三单元并联
图 147—1 单相接触调压器并联

几个单元并联为一体,同步调节,单元间电压差不大于 3V,并在各单元电刷组间串联一平衡电抗器,见图 147—1。

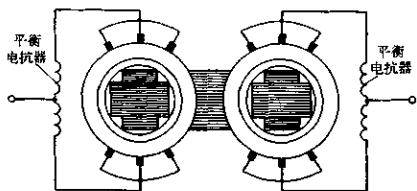


图 147—2 柱式接触调压器绕组两侧电刷组并联

(2) 三相接触调压器

环式三相接触调压器是采用三个单元同轴叠装而成,结成三相星形。三个相的电刷组应同步转动,相间电压不平衡度控制在 3V 以内。

柱式三相接触调压器如同三相变压器一样,三个心柱的绕组

结成三相星形,三相电刷组同步滑动或滚动,相间电压不平衡度也控制在3V内。

148. 接触调压器应怎样运行与维护保养?

(1) 运行

一般地说,两台及以上同容量同规格的接触调压器在未采取下列措施前,不能并联运行。应采取的措施有:①各台调压器应联动同步调节;②两台调压器间输出电压差不大于3V;③每两台间应串联平衡电抗器,以限制环流,如图147-1所示。

接触调压器在使用中,如遇本地电压过低或过高,可根据具体情况在绕组上抽出几个头,接在一端子上板上。使用时,可根据当时电网电压波动情况选择一适当端子输入,即可得到原有输出电压的可调范围。

如遇特殊情况,接触调压器可以短时过负载。过负载20%,允许运行60min;过负载40%,允许30min;过负载60%,允许5min。

(2) 维护与保养

接触调压器不用时,应放在干燥、无腐蚀性气体的场合。使用前应检查绕组对地绝缘电阻是否正常,各电刷的刷握应在刷架的配合孔内滚动自如,不能有卡死现象。使用期间应保持绕组磨面处的清洁,经常清除磨面处的尘埃。由电刷磨损或火花引起的绕组磨面上的石墨粉迹,可用少量汽油或酒精擦拭。当电刷火花严重灼蚀绕组磨面时,可用00号细砂布轻轻打磨磨面,重新修正电刷与绕组磨面的配合。电刷严重磨损时,应按原有规格重新调换。

(三) 移圈调压器

149. 移圈调压器的工作原理怎样?

移圈调压器的电磁原理与结构和一般变压器相似。它是由组装在同一铁心柱上下两端且一次匝数相等的两个变压器反向串联而成,通过铁心窗口上下形成各自的磁路,如图149-1和图149-2所示。铁心柱上端的一个变压器称主变压器,可以是自耦式或双圈式,一次绕组 N_1 称主绕组,一端与电源X联结,二次绕

组与负载联结。铁心柱下端的一个变压器称辅助变压器，双圈式，一次绕组 N_1' 称辅助绕组（与 N_1 反向串结），一端与电源 A 联结，二次绕组 N_3 自身短路，称动绕组。

通过动绕组 N_3 沿铁心柱上下移动，改变 U_1 在 N_1 、 N_1' 上的电压分配，以调节输出电压 U_2 。当 N_3 与 N_1 位置完全重合时，主变压器形成一个如同二次短路的变压器，绕组 N_1' 相当于一个电抗器。此时，反映在 N_1 上的阻抗最小， N_1' 上的阻抗最大，电源电压 U_1 在 N_1 上的压降最小，在 N_1' 上的压降最大，因此输出电压 U_2 为最小值。

反之，当 N_3 与 N_1' 位置完全重合时， U_2 为最大值。

N_3 移动在这两个极限位置之间时， U_2 将从最小值平滑无级地变化至最大

图 149—1 单相移相调压器器身

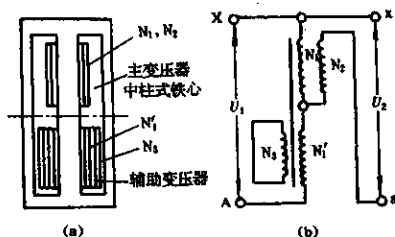


图 149—2 单相移相调压器结构和典型接线图

值,从而达到调节负载电压的目的。

150. 移圈调压器的绕组联结组有哪几种?

(1) 等压自耦联结组

如图 150—1(a) 所示。它适用于二次空载电压最大值 $U_{20\max} \leq U_1$ 的场合。

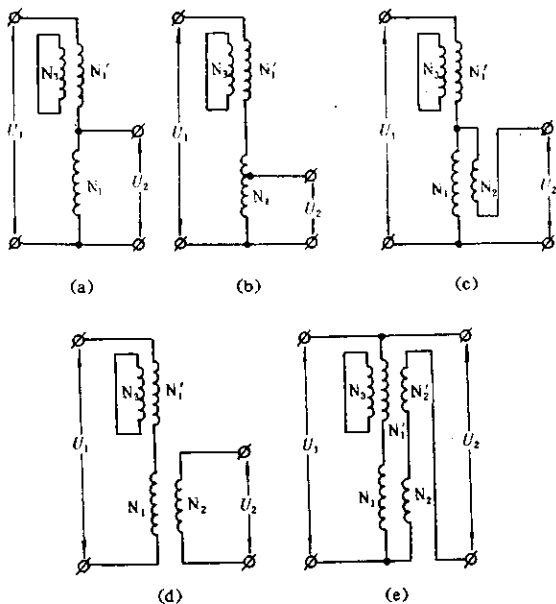


图 150—1 移圈调压器绕组联结组

(2) 降压自耦联结组

· 如图 150—1(b) 所示。它适用于 $U_{20\max} < U_1$ 的场合。

(3) 升压自耦联结组

如图 150—1(c) 所示。它适用于 $U_{2\max} > U_2$ 的场合。

(4) 双圈联结组

如图 150—1(d) 所示。它适用于低电压大电流或一二次要求隔离的场合。

(5) 熄压联结组

如图 150—1(e) 所示。它适用于当 U_1 波动在较大范围时, 要求负载电压 U_2 稳定在一定精度的场合, 作自动调压器的主回路用。

大容量单相移圈调压器可以采用以上某一联结组的三台并联而得。三相移圈调压器则采用以上某一联结组的三台结成星形而得。

151. 移圈调压器的调压阻抗特性是怎样的?

当动绕组 N_2 与辅绕组 N_1' 完全重合时 ($S = 1$), 调压器总阻抗 $U, \%$ 等于这两个变压器阻抗之和, 数值较小; 动绕组与主绕组完全重合时 ($S = 0$), 总阻抗等于一个三绕组变压器与一个带铁心的电感阻抗之和, 数值大, 其百分值大于 200%, 如图 151—1 所示。因此, 当移圈调压器应用在较低的输出电压时, 如负载突然断开, 调压器的空载输出电压会突然升高很多, 有时甚至烧坏仪表, 这点在使用时应予以注意。

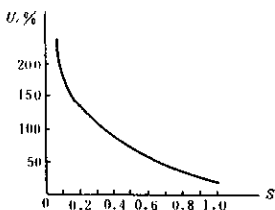


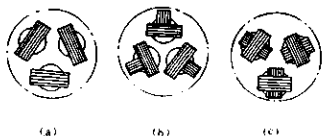
图 151—1 移圈调压器调压阻抗特性

152. 移圈调压器的结构有什么特点?

(1) 铁心

移圈调压器主磁通的磁路与变压器不同, 它具有铁心窗口气隙, 主磁通的磁势几乎全部降落在窗口气隙上。为了降低移圈调

压器的空载电流,必须降低窗口气隙磁密,所以移圈调压器的铁心总是制成壳式的,有两旁轭式、三旁轭式和四旁轭式,如图 152-1 所示。



(a) 两旁轭式 (b) 三旁轭式 (c) 四旁轭式

图 152-1 移圈调压器三铁心平面布置图

(2) 绕组

移圈调压器的主磁通是通过窗口气隙横向穿过绕组的导线,其漏磁通是纵向、横向穿过绕组的导线,从而引起涡流损耗,而且主要是主磁通的影响。因此应尽量减小绕组轴向导线尺寸,减少绕组轴向导线并联根数,多根并绕时,尽可能做到轴向和辐向的完全换位。

(3) 结构件

移圈调压器存在着纵向、横向漏磁通,加之主磁通又通过铁心窗口气隙;由于主磁通和漏磁通存在于铁心外的空间内,将在动绕组的结构件中产生涡流损耗;为此,这一部分结构件的材料应该采用非磁性材料,以减少涡流损耗。

(4) 主绕组与辅绕组在铁心柱上的位置

一般地说其位置与调压器的散热有关。同变压器一样,总是要求产品的发热中心要低,散热中心要高。根据这一原则,主变压器无论是自耦联结还是双圈联结,在额定情况下主变压器与辅变压器比较,哪个总损耗大,哪个就置于铁心柱的下方。

除此之外,在结构上还有以下特点:

a. 为了尽量减小空载电流,绕组要薄而高,因而铁心瘦长,机械强度下降,所以要加强铁心夹件的机械强度。

b. 动绕组夹紧件应牢固无松动, 纵横两个方向的金属夹件不能自身短路, 否则将损坏调压器。

c. 传动动绕组的长螺杆必须有足够的机械刚度, 螺杆与支架螺母必须配合良好, 否则动绕组部件容易振动发声, 导致调压器无法正常运行。

d. 油浸式 1000kVA 以上的移圈调压器, 油箱壁必须设置电磁屏蔽, 以抑制横向主磁通和漏磁通的影响

153. 移圈调压器常见故障和维护要点有哪些?

动绕组及其部件是移圈调压器结构中最不稳定的部分。最常见的故障是动绕组使用日久, 短路接点处松脱或夹紧件松动, 将会引起调压器工作不正常、输出电压不稳定、调节不灵活, 甚至卡死、产生振动噪声等。凡发生上述故障, 只要认真检查这一部分的动绕组短路接点、夹紧零件松紧情况、螺杆与支架螺母的磨损及配合情况, 故障就可以顺利排除。

调压器上的减速器也是日常维护的重点。减速器应经常保持清洁润滑, 当使用日久发现传动噪声增大时应及时进行调整或更新零部件, 还应经常检查传动部分的上下限位开关及限位件的可靠性。当限位开关失灵后, 很容易使动绕组超调而卡死, 这时最好用手动反向调节动绕组, 使其恢复灵活性, 并修复限位开关。

(四) 磁性调压器

154. 磁性调压器的工作原理是什么?

磁性调压器是饱和电抗器(以下简称电抗器)与变压器的有机组合。电抗器主要用来调节变压器的输入电压, 而变压器则将可调的输入电压升高或降低到负载所需要的任意电压值。

电抗器与变压器之间既有电的联系, 又有磁的联系, 其结构类似于一般电力变压器, 不像其他类型调压器具有机械传动装置或调节电压的可动触点。这种调压器特别适用于高压输出或低压大电流输出的场合。盐浴炉、电子轰击炉、高压静电除尘装置等调压电源已广泛采用这种调压器。

磁性调压器的工作原理如图 154—1 所示。图中 G、K 分别为电抗器的交流工作绕组和直流控制绕组， B_1 、 B_2 为变压器的一次绕组和二次绕组。绕组 G 与 B_1 串联联结，使电抗器与变压器之间构成电的联系。

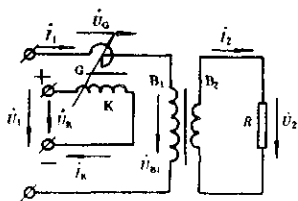


图 154—1 磁性调压器工作原理图

当磁性调压器输入端接上电压 U_1 ，输出端接上额定负载电阻 R 时，若直流控制电流 $I_k = 0$ ，则电抗器铁心不受直流磁化，交流有效磁导率最大，此时反映在绕组 G 上的阻抗比变压器的一次总阻抗大得多。因此电源电压 U_1 基本上分配在绕组 G 上，而变压器一次侧电压 U_{B1} 却很小，这时可以得到负载电压的下限值 U_{2min} 。

逐渐增大 I_k ，由于电抗器铁心受到不同程度的直流磁化，交流有效磁导率逐渐减小，因此电压 U_{B1} 和负载电压 U_2 逐渐增大。如果 I_k 达到额定值 I_{k0} ，电抗器铁心就被直流高度磁化而饱和，交流有效磁导率变得最小，电抗器的阻抗与变压器的一次总阻抗相比也为最小。因此电压 U_1 基本上分配在绕组 B_1 上，此时负载电压 U_2 可达最大值 U_{2max} 。

155. 单相磁性调压器的结构有什么特点？

(1) 铁心结构

单相磁性调压器铁心可以看成由内外两个双柱铁心拼合而成。铁心柱截面同变压器一样，一般也为多级梯形结构。如图 155—1 所示，图中 Φ_B 为变压器的磁通， Φ_G 、 Φ_K 分别为电抗器的交流磁通和直流磁通。一般为变压器用内双柱铁心，其中流通磁通 Φ_B ；电抗器用外双柱铁心，其中流通直流磁通 Φ_K ；由于该电抗器比一般电抗器少两个铁心柱，于是借助变压器铁心柱才能构成它的交流磁回路，以流通交流磁通 Φ_G ，这样使电抗器与变压器之

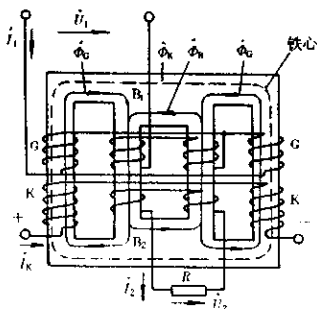


图 155—1 单相磁性调压器的铁心结构、绕组布置及接线原理图

间构成磁的联系。

(2) 绕组布置

单相磁性调压器的绕组布置也如图 155—1 所示。一般将变压器一二次绕组 B_1 、 B_2 分别套装在两个内铁心柱上, 而将电抗器交流工作绕组 G 、直流控制绕组 K 分别套装在两外铁心柱上, 反之亦可。但是, 将变压器绕组套装在两内铁心柱上具有较多的优点:

- 变压器平均磁路长度短, 磁性调压器额定运行时的空载损耗和空载电流小;
- 输出为低电压大电流时, 低压侧绕组的联结线和引出线短, 便于加工制造和降低负载损耗;
- 电抗器交流工作绕组 G 的平均匝长短, 其交流工作电压变化大, 有利于扩大负载电压的调节范围;
- 当变压器采用自耦联结时, 绕组占用窗口面积小。

(3) 绕组联结

a. 变压器两柱一二次绕组 B_1 、 B_2 各自串联。当一、二次电压接近时, 也可采用自耦联结。由于变压器两柱内分别通过的磁通以及绕组 B_1 、 B_2 内的感应电势的相位和幅值是不相同的 ($I_K = 0$

时,差异最大),因此变压器两柱绕组不可并联。

b.电抗器两柱交流工作绕组 G 既可结成串联,又可结成并联,然后与 B_1 串联。结成串联时,调压时间常数可以小到 $(1/10)s$ 以下;结成并联时,由于绕组 G 组成的闭合回路去磁作用,使时间常数大为增加,但此时直流控制回路的偶次谐波分量却因此而显著地减小。

c.电抗器两柱直流控制绕组 K 仅可结成串联。为降低单柱绕组 K 内基波感应电势的大小,最好将两柱绕组逐次分层交错串联。

各绕组的极性联结应使绕组 B_1 、 B_2 按变压器原理工作,使绕组 G 和 K 按电抗器原理工作。电抗器两柱的交直流磁势在一柱中如果方向相同,在另一个柱中方向则必须相反。各绕组联结后,应使各磁通符合于图 155—1 所示的方向。

156. 三相磁性调压器有几种结构形式?

三相磁性调压器有如下几种结构形式:

a. 将三台单相磁性调压器组装成三相磁性调压器:

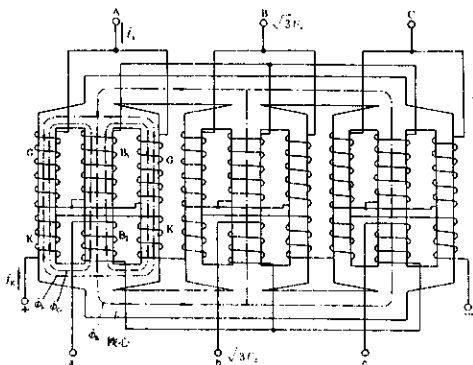


图 156—1 三相磁性调压器的铁心结构、绕组布置及接线原理图

b. 由三相饱和电抗器和三相变压器组装成一体；

c. 将三相磁性调压器的电抗器、变压器的铁心和绕组有机地结合成一体，如图 156—1 所示。

157. 磁性调压器的调压特性与负载外特性有何特点？

磁性调压器的调压特性曲线如图 157—1 所示。从图中可以看出，其输出电压 U_2 不仅随直流控制电流 I_k 的大小而变化，并且也随负载电阻的大小而变化，当负载电阻 $R = \infty$ （即空载状态）时，它的调压范围最小。如果加大电抗器交流工作绕组 G 与变压器一次绕组 B₁ 的匝数比，可以扩大磁性调压器的空载调压范围；如果降低电抗器在无直流磁化情况下的磁密，则可以扩大负载电压的调节范围。

磁性调压器的负载外特性具有理想的下坠负载外特性，如图 157—2 所示。

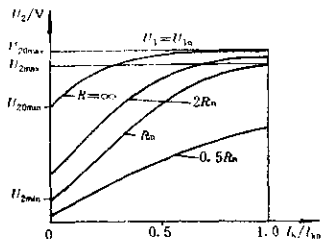


图 157—1 磁性调压器调压曲线

当直流控制电流 I_k 为额定值 I_{kn} 时，即使调压器二次侧短路，其短

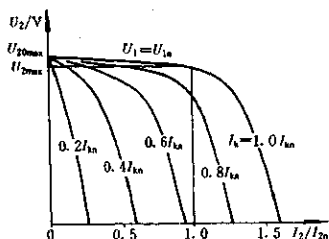


图 157—2 磁性调压器负载外特性

路电流也不会超过额定输出电流 I_{2n} 的两倍,因此磁性调压器可以用作恒流负载的电源,尤其适用于负载容易短路的情况。

158. 磁性调压器怎样用于闭环控制系统?

磁性调压器常被用作自动控温、自动稳压及自动稳流等系统中的执行元件。其自动控温典型系统,如图 158-1 所示。

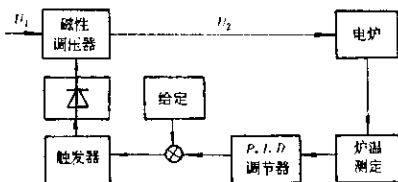


图 158-1 磁性调压器自动控温系统示意图

159. 磁性调压器的使用与维修应注意些什么?

(1) 使用

组成磁性调压器的电抗器部分实为一可调电感,它的直流控制安匝基本上与交流安匝相等。由于直流控制电源容量较小,一般不大于 5kVA,直流控制电流也小,不大于 40A,因此,直流控制匝数很多,常为交流匝数的几倍至几十倍。当直流控制开关合与开的瞬间,谐波感应电势很大,有时可能高达千伏,易于损坏直流控制系统的仪表等元器件以及人身安全。使用时,应使整个控制系统有良好接地,并在直流控制绕组的两个出线端子“+”、“-”间接入一个串联的电容与电阻,以抑制谐波感应电势。

(2) 维修

一般地说,磁性调压器的绕组 B_1 、 B_2 和 G 不易损坏。如果在使用中,直流控制绕组被击穿或烧坏,说明谐波感应电势较高,不安全。修理时,可增大直流控制电流,减少直流控制匝数,使其乘积仍然等于原有的直流控制安匝数。

(五) 感应调压器

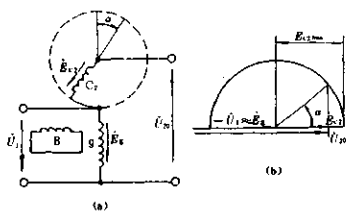
160. 感应调压器的工作原理是什么？

感应调压器是一种在结构上类似于绕线式异步电机，而在能量转换关系上类似于变压器的特种电器设备。感应调压器的定、转子绕组联结犹如变压器的一次绕组联结一样，可以联结成自耦或双耦。它的极数一般采用两极，以节省原材料，提高产品容量和效率，产品容量大于2000kVA，考虑工艺因素，常采用四级。电压等级为10kV及以下。

感应调压器借助于手轮或伺服电机通过传动机构带动其转子，使其定、转子产生相对角位移，从而改变定、转子绕组感应电势的相位（三相感应调压器）或幅值（单相感应调压器），以达到无级、平滑地调节负载电压的目的。与电机和变压器一样，感应调压器也有单、三相之分。

(1) 单相感应调压器的调压原理

单相感应调压器的定、转子绕组间为自耦联结，调压原理如图160—1所示。



(a) 接线图 (b) 电压相量图

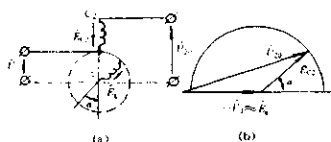
图 160—1 单相感应调压器调压原理图

公共绕组 g 一般为定子绕组，二次串联绕组 C_2 一般为转子绕组。接入电压 U_1 后，绕组 g 的励磁磁势在定、转子气隙中产生

单相脉动磁场,分别在绕组 g 、 C_2 中感应出电势 E_g 和 E_{C_2} 。当绕组 g 和 C_2 的轴线重合时, E_{C_2} 达到最大值 U_{C_2max} 。当转子作角位移 α (电角度) 时,即可调节空载输出电压 U_{20} ,并按 $U_{20} \approx U_1 + E_{C_2max} \cos \alpha$ 变化。为了降低当绕组 g 与 C_2 轴线不重合时,负载电流在 C_2 中引起的感抗,在绕组 g 所在铁心上设置一补偿绕组 B ,绕组 g 、 B 的轴线相互垂直。

(2) 三相感应调压器的调压原理

三相感应调压器定、转子绕组为自耦星形联结,调压原理如图 160-2 所示(仅表示一相)。



(a) 接线图 (b) 电压相量图

图 160-2 三相感应调压器调压原理图

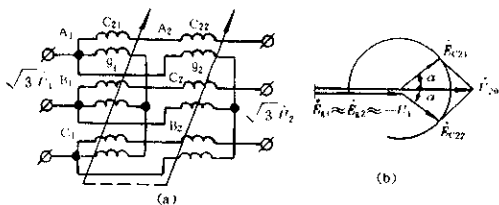
公共绕组 g 为转子绕组,二次串联绕组 C_2 为定子绕组。接入电压 U_1 后,绕组 g 的励磁磁势在定、转子气隙中产生三相旋转磁场,并以同步转速切割绕组 g 和 C_2 ,分别在两绕组中感应出电势 E_g 和 E_{C_2} 。当转子作角位移 α (电角度) 时,即可调节空载输出电压 U_{20} ,并按 $U_{20} \approx \sqrt{U_1^2 + E_{C_2}^2} + 2U_1 E_{C_2} \cos \alpha$ 变化。

(3) 双三相感应调压器的调压原理

在忽略感应调压器阻抗压降的情况下,单相感应调压器的空载输出电压 U_{20} 与输入电压 U_1 间的相位相同,并与角位移 α 的变化无关(见图 160-1),而三相感应调压器的则与之相反, U_{20} 与 U_1 之间的相位仅当 $\alpha = 0$ 时相同, $\alpha > 0$ 时,则不相同(见图 160-2)。双三相感应调压器正是克服这一缺陷的产品。

双三相感应调压器是将两个相同的三相感应调压器的定、转

子同装在一个机壳和转轴上构成的。两个公共绕组 g_1 和 g_2 并联，且相序相反，两个串联绕组 C_{21} 、 C_{22} 同极性串联，如图 160—3 所示。当转子向任何一个方向作角位移 α 时，空载输出电压 U_{20} 则始终与输入电压 U_1 同相位。



(a) 接线图 (b) 电压相量图

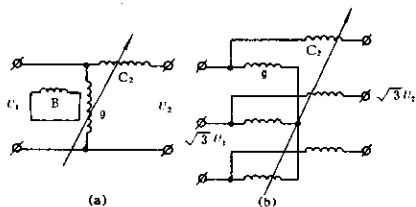
图 160—3 双三相感应调压器调压原理图

161. 感应调压器采用哪些绕组联结组？

单、三相感应调压器的绕组联结组有如下四种：

(1) 等压自耦联结组

等压自耦联结组如图 161—1 所示。其中单相感应调压器的绕组 g 、 B 置于定子上， C_2 置于转子上；三相感应调压器的绕组 g



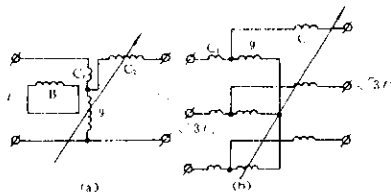
(a) 单相 (b) 三相

图 161—1 单、三相感应调压器等压自耦联结组

置于转子上, C_2 置于定子上。等压自耦联结组的空载输出电压 U_{20} 的调节范围为 $0 \leq U_{20} \leq 2U_1$ 。

(2) 降压自耦联结组

降压自耦联结组如图 161—2 所示。单、三相感应调压器的绕组 g 、 C_1 、 B 置于定子上, C_2 置于转子上。降压自耦联结组的空载输出电压 U_{20} 的调节范围为 $0 \leq U_{20} \leq 2U_1$ 。

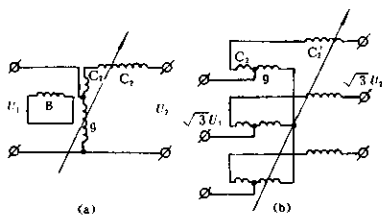


(a) 单相 (b) 三相

图 161—2 单、三相感应调压器降压自耦联结组

(3) 升压自耦联结组

升压自耦联结组如图 161—3 所示。单、三相感应调压器的绕组 g 、 B 、 C_2' 置于定子上, C_2 置于转子上。升压自耦联结组的空载



(a) 单相 (b) 三相

图 161—3 单、三相感应调压器升压自耦联结组

输出电压 U_{20} 的调节范围为 $0 \sim U_{20\max} > 2U_1$ 。

(4) 双圈联结组

双圈联结组如图 161—4 所示。单、三相感应调压器的绕组 C_1 、 C_2' 、 B 置于定子上, C_2 置于转子上。双圈联结组的空载输出电压 U_{20} 的调节范围为 $U_{20} = 0 \sim U_2$ 。

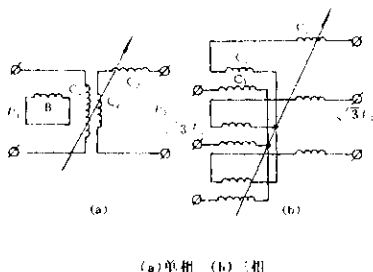


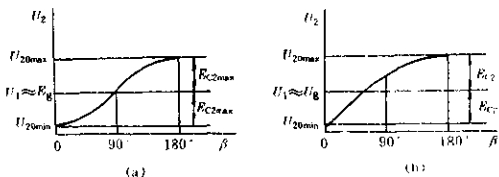
图 161—4 单、三相感应调压器双圈联结组

162. 感应调压器的输出电压正弦性与调压特性是怎样的?

感应调压器的定、转子铁心有槽和齿的存在,使得定转子气隙中的磁势与磁场分布达不到理想状态,因此,在定、转子绕组的感应电势中存在着 5、7 次谐波,影响输出电压的正弦性。如果采取以下措施,消除或削弱 5、7 次谐波,输出电压波形的正弦性畸变率可以达到 $\leq 3\%$ 。

- 选取的定、转子绕组节距,应当等于或近于 $5/6$;
- 选取的定、转子每极每相槽数应为整数;
- 选取的定、转子槽配合,应使定、转子每极每相槽数相差 1;
- 选取的定、转子气隙中的磁密,不应大于 0.65T ;
- 适当增大气隙长度。

单、三相感应调压器输出电压的调压特性曲线如图 162—1 所示。图中, $U_{20} = f(\beta)$ 、 $U_2 = f(\beta)$ 分别表示感应调压器的空载、负载输出电压特性曲线, $\beta = 180^\circ - \alpha$, α 为转子的角位移(电角



(a) 单相 (b) 三相

图 162—1 感应调压器的调压曲线

度)。 $U_{20} = f(\beta)$ 的曲线方程为单相 $U_{20} \approx U_1 + E_{i(20)}$ ， $\cos(180 - \alpha)$

三相 $U_{20} \approx \sqrt{U_1^2 + E_{i2}^2 + 2U_1 E_{i2} \cos(180 - \alpha)}$ 。由于感应调压器的定、转子绕组存在有电阻抗与电感抗， $U_1 = f(\beta)$ 特性曲线稍低于 $U_{20} = f(\beta)$ 特性曲线。

163. 感应调压器的结构有什么特点？

(1) 感应调压器的组成

感应调压器主要由器身、传动控制系统和散热系统三大部分组成。器身主要由定子、转子、底座和面板等部件组成。其外形如图 163—1 所示。

(2) 绕组形式

感应调压器的绕组形式主要有单层绕组、双层绕组和四层绕组三种。

单层同心式绕组有软型和硬型之分。软型多用于中小容量的单相感应调压器和三相小容量感应调压器；硬型则用于较大容量的感应调压器。

单层交叉式绕组为软型绕组，多用于小容量三相感应调压器。

叠绕组有软型和硬型之分，也有单层、双层和四层之分。软型双层多用于三相中小容量，硬型双层多用于三相大容量。硬型单层则用于单相大容量。硬型四层多用于三相大容量，绕组为双圈

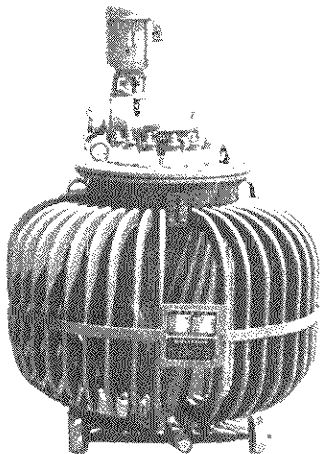


图 16.3—1 油浸自冷感应调压器外形

联结组。

(3) 定、转子铁心槽型与槽配合

感应调压器的定、转子铁心槽型有半闭口圆底槽与开口槽之分。半闭口圆底槽多用于单、三相中小容量软型绕组；开口槽则多用于单、三相大容量硬型绕组。

单、三相感应调压器的定、转子槽的配合，用于二极时一般取 18/12、24/18、30/24、36/30，用于四极时取 48/36、60/48。

(4) 出线方式

目前感应调压器的出线方式有三种。

第一种是采用复合瓷套管出线，这种出线方式加工简单，安装与接线都比较方便，普遍应用于低压油浸自冷调压器；第二种是采用铜排出线，这种出线方式加工工序比较复杂，工时多，常应用于低压大电流调压器；第三种是采用电缆直接出线，这种出线方式加工比较简单，但对电缆要求高，常用于高压油浸调压器，低压干式自冷调压器也有采用。

(5) 装配方式

感应调压器一般均为立式结构,具有以下优点:

a. 可合理安排油道、风道和气道,有助于冷却介质的冷热交换循环,为定、转子绕组提供较好的散热条件。

b. 立式结构有较宽敞的面板,为减速度器安装及出线等提供了适宜的位置。

c. 装配较方便,也便于维修拆装。

d. 产品安装时占地面积较小

(6) 冷却方式

a. 干式自冷。由于散热条件的限制,一般用于额定输出容量为 20kVA 及以下产品,适合于环境干净的情况,尤其适合于车、船等颠簸流动场所控制设备的配套电源

b. 油浸自冷。应用比较广泛,对环境条件要求较低,特别适用于有腐蚀性气体,湿度较高的环境中,使用寿命较长。产品额定输出容量为 10 ~ 1 500kVA。

c. 强迫风冷。常用于不允许有油类存在的场合,如采矿井下调压设备等。产品额定输出容量为 200 ~ 1 900kVA。

164. 感应调压器的选用、安装、运行与维修要注意什么?

(1) 选用

a. 根据需要使用的环境条件来选用不同冷却方式的感应调压器。

b. 选用的感应调压器的额定输出电流要大于或等于负载所需的最大电流,调压范围要接近和满足负载的需要。如果调压范围大大超过实际所需的范围,就将浪费一定的容量。

c. 选择容量要求略大于所需要的容量。

d. 应尽量选用标准产品。

(2) 安装与检查

a. 感应调压器在预定地点就位后,接地螺钉应良好接地。

b. 绕组对地、绕组之间(双圈式)的绝缘电阻(用 500V 兆欧表),对油浸自冷式调压器应不小于出厂值的 70%(折算到出厂温

度),其他冷却方式应不低于 $10M\Omega$,否则应进行干燥处理。

c. 感应调压器成套出厂时,除调压器外尚附有电控元器件,如按钮开关、接触器和电磁开关等。将电控元器件安装在易于操作的地位,并正确地联结好电控元器件与调压器面板上的电控接线排。

d. 电动控制时,感应调压器的升、降压方向应与指示牌一致,否则应对调伺服电动机的任意两相输入线。当输出电压调至上下两个极限时,对应的限位开关应动作,切断伺服电动机的电源。

e. 带散热器油箱的油浸自冷感应调压器,其散热器上下端阀门应开启。

f. 强迫风冷感应调压器的风机转动方向应与指示牌一致,否则应对调风机的任意两相输入线。

g. 检查电源电压应与感应调压器铭牌上的额定输入电压相同。

h. 将感应调压器的输入端接至电源控制开关,输出端接至负载控制开关。

i. 调压器输入端加额定电压,输出端开路,应无异常响声及振动。空载输出电压应正常可调。运行两小时后,如无异常情况发生,方可进入负载运行。

(3) 运行

a. 感应调压器应尽量避免在最高输出电压,满载情况下直接投入运行。因为在此情况下,投入运行的瞬间会产生过电流,使转子产生很大转矩,对传动机构有冲击作用,容易损伤蜗轮组件和使绕组变形。

b. 风机停转时,感应调压器应停止运行,以防烧毁产品。

c. 当油面温度已达 90°C 时,如果环境温度大于或等于 35°C ,调压器可以继续运行;如果环境温度比 35°C 小得多,则应停止运行。因为油面温升标准值为 55°C ,其与油面温度和环境温度三者之间应符合如下的关系:

$$\text{油面温升} = \text{油面温度} - \text{环境温度}$$

当环境温度比 35℃ 小得多时,油面温升就超过 55℃ 很多,说明感应调压器总损耗超过正常损耗范围,应停止运行,查明损耗增加的原因。

d. 感应调压器在绕组温度接近室温情况下,短时间地超过额定输出电流使用时,允许过载能力如下:

过载/%	25	50	75	100
不超过/min	120	60	20	10

e. 感应调压器不能并联运行。同一容量、同一规格的感应调压器由于生产过程中的各种制造误差,造成它们的调压特性曲线不完全相同,输出电压下限值也不相同。另外,要保证两台调压器电压值同步上升、同步下降是很难做到的,因此如果并联,两者的输出并联回路中将形成一电位差,在回路中产生一环流,故不能并联运行。

f. 三相负载不平衡时,只要每相电流不超过额定电流,感应调压器仍然可以运行。但由于负载不平衡,造成调压器的电路、磁路不平衡,容易引起调压器振动、发响。另外,由于内部阻抗电压降的存在,当各相负载电流严重不平衡时,三相输出电压不平衡度就会增加,因此应尽可能使三相负载分配均衡些。

(4) 维修

在维修感应调压器时,应按下列程序进行拆卸:

a. 干式自冷产品,拆掉外罩和上盖部件后,用起吊设备吊出转子部件,然后就可以拆下定子部件。

b. 油浸自冷产品,先用起吊设备将器身吊出油箱,拆掉上盖部件;再用起吊设备吊出转子部件,然后就可以拆下定子部件。

c. 强迫风冷产品,拆掉风扇、上盖部件后,拧下机身紧固螺栓,用起吊设备吊出定子部件,然后再吊出转子部件。

应该注意,在拆定子、转子部件时,必须记好各个接线位置,以便维修好后按原来的位置与程序装置,否则蜗轮组件有可能失调而失去原有的功能。

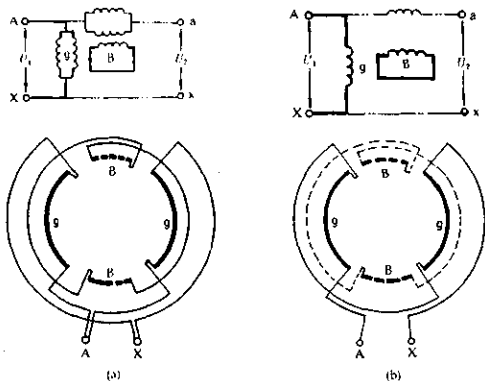
感应调压器在使用过程中如发现绕组绝缘电阻过低时,应进行热烘处理。一般采用下列方法之一:

a. 将产品送进烘房干燥处理(油浸式只限于器身干燥),温度不超过 120°C , 并有良好的通风条件,直至绝缘电阻符合要求为止;

b. 将产品输出端短接,输入端通过另一调压设备施加 10% 左右的额定输入电压,测量输出端短路电流使其稍低于额定输出电流,此时进行热烘,直至绕组绝缘电阻符合要求为止。

感应调压器的定、转子绕组在使用中烧坏后,可拆下原有线圈,根据原有线圈的技术数据:导线规格与并联根数、线圈匝数、线圈节距、线圈形式与尺寸,绕制新线圈并嵌入定、转子铁心槽内。绕组的联结方法,应按不同的原有联结组根据下列各图进行联结。

a. 单相等压自耦联结组。定子绕组联结如图 164-1 所示,转子绕组联结如图 164-2 所示。



(a) 两绕组串联 (b) 两绕组并联

图 164-1 单相感应调压器等压自耦联结组定子绕组联结图

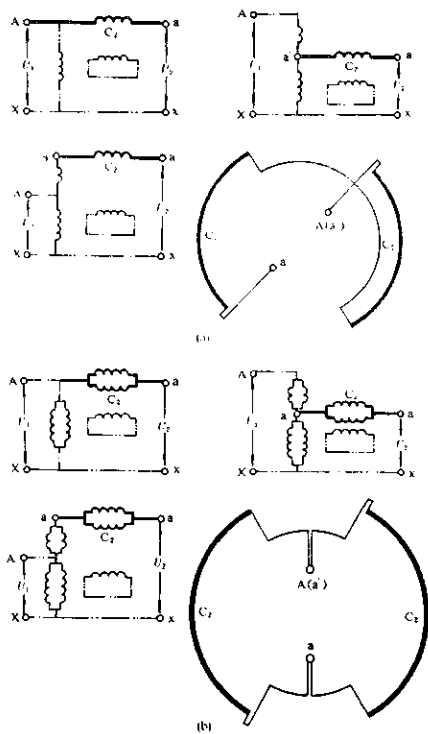
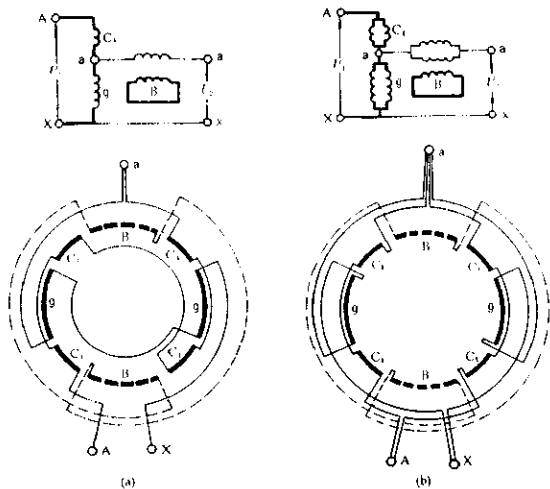


图 164—2 单相感应调压器等压、降压、升压
自耦联结组转子绕组联结图

b. 单相降压自耦联结组。定子绕组联结如图 164-3 所示。转子绕组联结如图 164-2 所示。



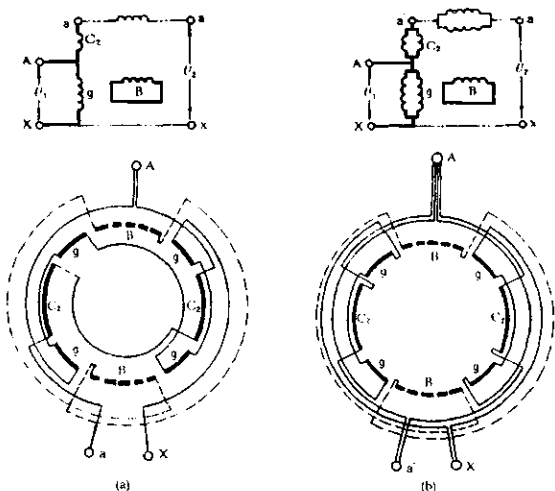
(a) 两极串联 (b) 两极并联

图 164-3 单相感应调压器降压自耦联结组定子绕组联结图

c. 单相升压自耦联结组。定子绕组联结按图 164-4, 转子绕组联结如图 164-2 所示。

d. 三相等压自耦联结组。定子绕组两极串联联结按图 164-5, 转子绕组两极串联联结如图 164-6 所示; 定子绕组两级并联联结如图 164-7 所示, 转子绕组两极并联联结如图 164-8 所示。

e. 三相降压自耦联结组。定子绕组两极串联联结如图 164-9



(a) 两极串联 (b) 两极并联
**图 164—4 单相感应调压器升压自耦
 联结组定子绕组联结图**

所示,转子绕组两极串联联结如图 164—10 所示;定子绕组两极并联联结如图 164—11 所示,转子绕组两极并联联结如图 164—12 所示。

f. 三相升压自耦联结组。定子绕组两极串联联结按图 164—13,转子绕组两极串联联结按图 164—10;定子绕组两极并联联结按图 164—14,转子绕组两极并联联结按图 164—12。

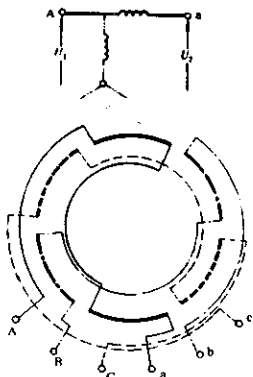


图 164—5 三相感应调压器等压自耦联结组定子绕组两极串联联结图

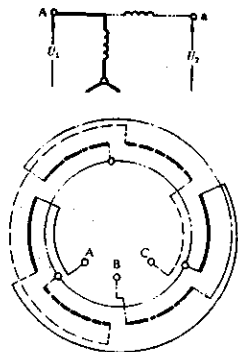


图 164—6 三相感应调压器等压自耦联结组转子绕组两极串联联结图

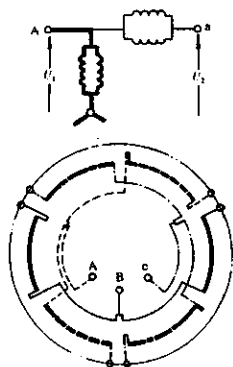


图 164—7 三相感应调压器等压自耦联结组定子绕组两极并联联结图

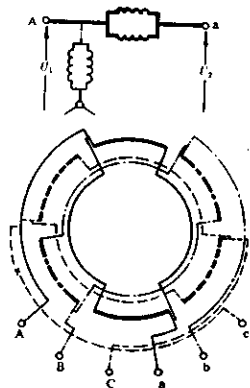


图 164—8 三相感应调压器等压自耦联结组转子绕组两极并联联结图

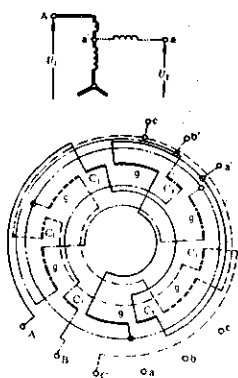


图 164—9 三相感应调压器降压
自耦联结组定子绕组
两极串联联结图

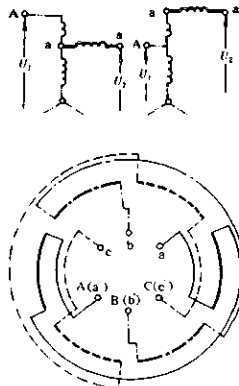


图 164—10 三相感应调压器升压
自耦联结组转子绕组
两极串联联结图

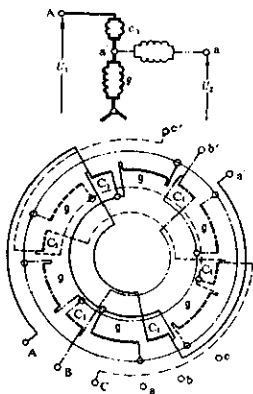


图 164—11 三相感应调压器降压
自耦联结组定子绕组
两极并联联结图

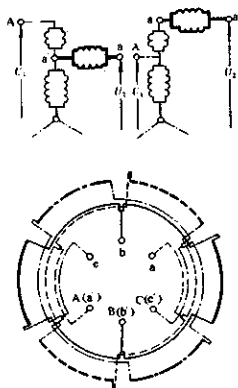


图 164—12 三相感应调压器降压、
升压自耦联结组转子
绕组两极并联联结图

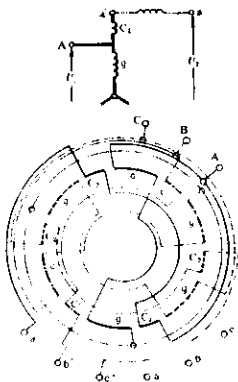


图 164—13 三相感应调压器升压
自耦联结组定子绕组
两极串联联结图

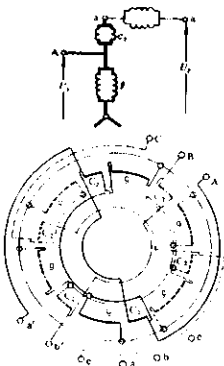


图 164—14 三相感应调压器升压
自耦联结组定子绕组
两极并联联结图

(六) 自动调压器

165. 自动调压器有哪些类型？各有什么特点？

自动调压器是一种稳定交流电源电压的装置。它是由特殊设计的调压器 T 和控制器 K 组成的一个闭环控制系统，如图 165—1 所示。

调压器 T 是系统的执行元件，它配备了伺服电动机及其传动机构。当电源电压或负载电流波动引起调压器输出电压变动且偏离稳定精度范围时，控制器 K 的测量环节从调压器的输出测得信号，与给定环节比较，检出差值并放大，然后指令伺服电动机回路动作，伺

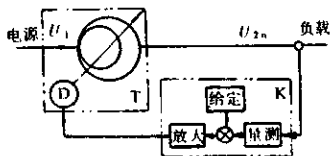


图 165—1 自动调压器方框图

服电动机运转,重新把输出电压调节到额定值的精度范围内。

目前常见的自动调压器有感应自动调压器和接触自动调压器两大类。

(1) 感应自动调压器

感应自动调压器有干式、油浸两种冷却方式,它具有一般感应调压器的特点。额定输出容量,干式的 6.3 ~ 63kVA,油浸的 10 ~ 4 000kVA,更大的容量也可以制造。输入电压额定变动范围一般有 $\pm 20\%$ 、 $\pm \frac{10}{20}\%$ 、 $\pm \frac{10}{15}\%$ 和 $\pm 10\%$ 等几种,最高稳压精度为 $\pm 1\%$ 。

感应自动调压器输出容量大、相对体积小,是目前任何其他类型的稳压器难以比拟的。此外,它还具有主回路无触点、寿命长、负载类型不限和维修简单等特点。它被广泛地应用于工业、通讯、科研等部门作为专用设备的大容量前级稳压电源。

(2) 接触自动调压器

接触自动调压器分环式与柱式两种。环式接触自动调压器一般为干式自冷,额定输出容量在 50kVA 以下,输入电压额定变动范围有 $\pm \frac{10}{20}\%$ 和 $\pm \frac{10}{15}\%$ 等几种,最高稳压精度为 $\pm 1\%$ 。柱式接触自动调压器有干式自冷与油浸自冷两种冷却方式,额定输出容量为 125 ~ 1 000kVA,输入电压额定变动范围为 $\pm 20\%$,稳压精度调节范围为 $\pm 1\% \sim \pm 5\%$ 。

接触自动调压器的突出优点是输出电压波形正弦性畸变率相当小,效率高,其次还有体积小、重量轻、功率因数高等特点。

为什么一般调压器不宜作为自动调压器的执行元件?这是因为一般规格的调压器配上相应的控制器有很多不宜之处:

a. 由于自动调压器输入电压允许在一定范围内变化,当电网电压向上波动越大时,一般规格调压器的磁路就越饱和,这样调压器的空载损耗、空载电流就会大幅度增大,造成效率、功率因数大幅度下降。

b. 一般规格调压器的输出电压较高,作为自动调压器执行元件,其容量不能充分利用。对于输出电压为 0 ~ 650V、0 ~ 500V 的感应调压器,经常运行在输出电压为 380V 的位置,阻抗电压很大,

将直接影响自动调压器的调节特性及反应时间。

166. 自动调压器有哪些主要性能指标？

自动调压器有稳压精度、输出电压波形正弦性畸变率(简称波形畸变率)、反应时间和效率等四项主要性能指标。

稳压精度是输入电压在额定范围内变化时,输出电压实际值与额定值之差占额定值的百分数;波形畸变率指输出电压波形除基波外,其余各次谐波电压有效值的均方根值相对于基波电压有效值的百分数;反应时间指自动调压器正常运行时,由于输入电压突然变动,输出电压相应波动后回复到额定值的精度范围内所需要的时间;效率指额定输出容量乘以负载功率因数相对于总损耗与额定输出容量乘以负载功率因数之和的百分数。感应和接触两类自动调压器的主要性能指标如表 166—1 所示。

表 166—1 自动调压器的主要性能指标

项目	感应自动调压器	接触自动调压器
稳压精度/%	最高 ± 1	最高 ± 1
波形畸变率/%	≤ 3	≤ 1
反应时间/s	≤ 15	$\leq 1.5 \sim 4$
效率/%	95 ~ 99	98.4 ~ 99.4

167. 自动调压器有哪些常见的控制系统

自动调压器常见的控制方式有两种:

(1) 有触点控制系统

图 167—1 是感应自动调压器的有触点控制系统方框图。

自动调压器运行在正常状态下,当某种因素造成输出电压升高(或降低)并超出稳压精度范围时,量测环节得到电压信号,经整流滤波后与直流基准电压相比较,所得信号触发降压(或升压)晶体开关,使降压(或升压)继电器动作,接触器吸合,伺服电动机运转,从而使输出电压回复至额定值的精度范围内。

有触点控制系统简单可靠、稳压精度等性能指标均能满足要求,成本又低,目前被广泛应用。

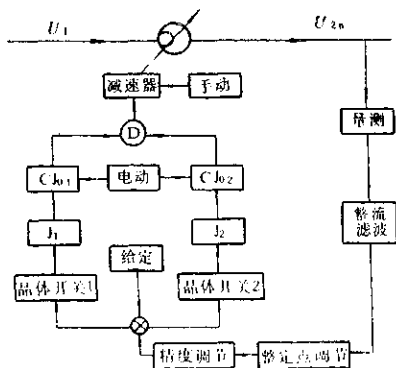


图 167-1 感应自动调压器的有触点控制系统方框图

(2) 无触点控制系统

图 167-2 是精密型接触自动调压器控制系统方框图。该系统把信号取样与基准电压比较后,送到差分放大器放大。放大器按极性正负输出信号分别控制两个触发环节,通过小可控硅放

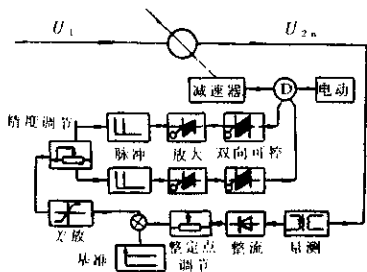


图 167-2 精密型接触自动调压器控制系统方框图

后再触发双向可控硅,接通两相交流伺服电动机控制回路使其正转或反转。

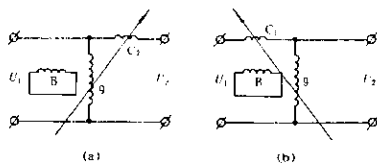
除了可采用上述的通断控制外,还可以实现连续自动控制。其控制量、反应时间可随偏差量的大小而变化。为了提高系统的稳定性,还可增设测速发电机增加速度负反馈。该系统无触点,寿命长,调速范围大,可获得较高的调节质量,但制造成本高,维修复杂,仅在一些要求较高的场合采用。

为了提高自动调压器运行的可靠性,控制系统中常采用的保护环节有:①调压器升降压限位开关及其报警信号环节;②蜗轮传动机械弹性限位装置;③减压器过负荷保险销装置;④主回路过负载保护自动开关;⑤电动控制环节;⑥控制系统失控保护环节;⑦过调压敏电阻保护环节;⑧自动程序合闸控制环节。

168. 感应和接触自动调压器有哪些常用的主回路?

(1) 感应自动调压器主回路

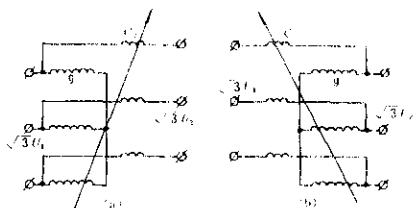
感应自动调压器主回路是一台调压范围较小、绕组等压自耦联结的感应调压器。主回路有正、反接两种形式,分别如图 168-1、图 168-2 所示。



(a) 正接 (b) 反接

图 168-1 单相感应自动调压器主回路

a. 正接。负载稳定正常运行的自动调压器,采用正接时串联绕组中电流保持不变,但空载损耗和空载电流却随输入电压的升降而增减。一般在输入电压下限值时,总损耗最小,效率最高。因此若采用地区的电网电压经常偏低,选用正接显然使调压器平均



(a)正接 (b)反接

图 168-2 三相感应自动调压器主回路

运行效率提高。

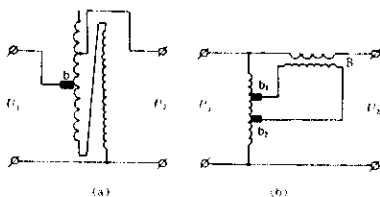
b. 反接。由于输出电压稳定在额定值的精度范围内，空载损耗和空载电流基本保持不变，但串联绕组的电流却随输入电压的升降而减增。一般在输入电压为上限值时，空载损耗较小，效率较高。因此反接法较适宜于电网电压经常偏高的地区使用。

对同一台感应自动调压器，采用反接法时输入电压允许波动范围大些，但输出容量较小；采用正接法时情况则相反。例如一台采用反接法的 100kVA 输入电压范围 $\pm 20\%$ 的自动调压器，如果改用正接法，则输出容量增加到 140kVA，输入电压范围减少为 $\pm 10\%$ 。可见正、反接法的选择，应按用户需要和电网的实际情况全面权衡其利弊。

(2) 接触自动调压器主回路

接触自动调压器常用的主回路有两种形式，如图 168-3(a)、(b)所示。

a. 如图 168-3(a)所示的形式，常用于容量较小的接触自动调压器。绕组分为内、外两层，绕在内层的为不可调节部分，绕在外层的为可调节部分。电刷 b 与外层部分接触。随着电源电压 U_1 升降不断波动，电刷 b 也不断左右或上下移动，始终保持绕组的匝电压不变，将输出电压 U_2 稳定在一定精度范围内。



(a)反接 (b)带串联变压器

图 168—3 接触自动调压器主回路

b. 如图 168—3(b) 所示的形式, 常用于容量较大的接触自动调压器。它是采用接触调压器 T 带串联变压器 B 的方案。当电源电压 U_1 向下波动时, 电刷 b_1 、 b_2 各向反方向移动, 在串联变压器 B 中产生一感应电势 $+\Delta U$, 使输出电压 U_2 恢复到额定值精度内; 反之, 与 U_1 向上波动时, 电刷 b_1 、 b_2 各向另一个方向反向移动, 在串联变压器 B 中产生一感应电势 $-\Delta U$, 使 U_2 恢复到额定值精度内。采用此方案, 接触自动调压器的输出容量可提高约两倍, 并可提高系统的稳压精度和稳定性。

169. 自动调压器怎样选型、使用和运行?

(1) 选型

主要问题是确定输入电压变动范围。因为输入电压变动范围越大, 自动调压器的实际容量越大, 体积越大, 成本越高。当机座一定时, 变动范围增加一倍, 其输出容量就减少一半。用户选型时, 应根据当地电网电压波动的实际情况, 选择合适的输入电压变动范围, 这将有利于降低设备的一次投资和使用成本。

(2) 使用

a. 应合理选择规格, 严格防止过电流。感应自动调压器遭受过电流冲击时, 其减速器的保险销可能被切断。

b. 应正确整定稳压精度。避免由于精度过高而引起自动调节振荡。在精度不需太高的场合, 应尽量采用低精度运行, 这样可大

大延长继电器、接触器和电机的寿命。

c. 对机械传动部分应定期加注润滑油脂,并除去污垢,以保证运转良好。

d. 电刷与绕组接触表面应定期选用适当硬度的棕刷刷去灰尘和碳刷磨损微粒,以保证电刷的良好接触。

e. 对控制系统中的电磁继电器、接触器触点,应定期保养,定期更换。这是提高自动调压器运行可靠性的有效措施。

(3) 运行

电网电压实际波动超出自动调压器额定范围时应停止运行,因为这时自动控制系统力图把输出电压调整到额定值,势必使调压器调节到极限位置,造成限位开关动作,伺服电动机停转,并发出信号或报警。在此情况下,自动调压器已不可能把输出电压稳定在额定值范围内,这时应切断自动控制环节。如主回路需要继续运行,由于这时调压器相当于升压(或降压)变压器,所以其输出电压将正比于电网电压的波动值。

三相感应自动调压器能带单相负载运行。但应在订货时向制造厂提出要求,把三相三线制改为三相四线制引出中性线端子。若干单相负载应根据容量大小和使用情况,合理分配到每相中去,原则上应使三相负载尽量保持平衡。如三相负载严重不平衡,将可能导致自动调压器运行时产生较大的振动和响声。

四、电抗器

170. 电抗器是怎样分类的？电抗器有什么用途？

电抗器在线路中是用作限流、稳流、无功补偿、移相与滤波的一种电感元件，用途十分广泛。电抗器根据铁心的型式可分为三类：

a. 空心电抗器。这种电抗器只有绕组而无铁心，实质上就是一个空心的电感线圈。如线路中用的限流电抗器（包括分裂电抗器）、断路器、低压开关和接触器等型式试验用的试验电抗器以及串联在高压输电线路中的阻波器，常采用这种结构形式。

b. 带气隙的铁心电抗器。其磁路是一个带气隙的铁心，带气隙的铁心柱外面套有绕组。如补偿容性电流的并联电抗器、消除持续电流的消弧线圈、大型电机的降压启动电抗器、整流电路中的平波电抗器与电炉变压器匹配的电抗器、三相电流均衡用的电抗器，常采用这种带气隙的铁心型式。

c. 铁心电抗器。其磁路是一个闭合的铁心。如双Y联结的整流线路中用的平衡电抗器、调压和调功率用的饱和电抗器、动圈式的谐振电抗器等产品，常采用这种铁心型式。

各种产品用下列字母来代表其特征。

限流电抗器	NK	平波电抗器	LK
分裂电抗器	FK	启动电抗器	QK
并联和饱和电抗器	BK	串联电抗器	CK
消弧线圈	X		

空心电抗器由于没有铁心，所以不存在饱和现象。它的电抗值在绕组匝数、形状以及频率不变的情况下，始终是一个常数，不随其中通过电流的大小而改变。由于没有铁心，绕组中通过单位

电流所产生的磁通较小,所以这种电抗器的电感(电抗)值较小,体积较大,耗用材料较多。

铁心电抗器由于有了高磁导率的铁心,所以绕组中通过单位电流时产生的磁通较多,即它的电感(电抗)值较大,在相同容量的情况下,其体积要比空心式为小。铁心电抗器的电抗可以用下式表示:

$$X = \omega N^2 S \mu \mu_0 / l$$

不难看出,在给定的电抗器情况下,角频率 ω 、匝数 N 、磁路截面 S 、平均磁路长 l 以及空气磁导率 μ_0 都是不变的。但是铁心的磁导率 μ 却是随电抗器通过的电流的改变而改变的,从而电抗 X 也随电流而变化。

铁心磁导率 μ 是非线性的。对铁心电抗器的非线性如果不给予充分注意的话,那么将在使用中带来很大的不便。例如与电弧炉变压器相匹配的串联电抗器,在使用中因短路而通过数倍的额定电流时,其电抗值将下降许多倍,因而将失去其限流作用。为此,这些电抗器铁心需带气隙,且在额定电流下的磁通密度不能取得过高,以避免在短路情况下出现过饱和。

此外,铁心电抗器的电抗值也很难算准。这是因为电抗值除了是频率和绕组尺寸的函数外,还与磁导体的材质、加工工艺有极大的关系。

带气隙的铁心电抗器之所以应用较为广泛,是因为综合了上述两种电抗器的优点:当磁通密度取得不太高时,电抗值基本上不随电流大小而改变,或改变较小,体积也较小。

171. 两台完全相同的电抗器串联或并联时的电抗值是否是 2 倍关系?

如果两台电抗器相距较远,以致于相互间没有磁的联系时,那么串联或并联时是 2 倍的关系;如果相距较近,以致于相互间有影响即有互感时,便不是 2 倍的关系了。

一个给定参数的电抗器的电感值可以用下式计算,并求出其毫亨数为:

$$L_1 = \frac{8N^2 d_p^2 \times 10^{-5}}{3d_p + 9h + 10b} = \frac{8 \times 29.5^2 \times 114^2 \times 10^{-5}}{3 \times 114 + 9 \times 45 + 10 \times 40}$$

$$= 0.79\text{mH}$$

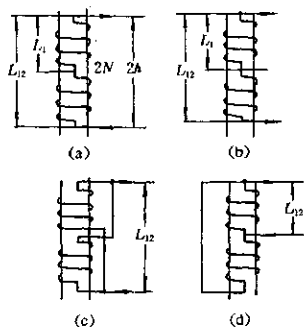
式中, N 为匝数; d_p 为绕组平均直径, cm; h 为绕组高, cm; b 为绕组厚, cm。

如果两台这样的电抗器叠放在一起串联联结, 且两个绕组中电流所产生的磁场是相互加强时(如图 171—1(a)所示), 此时串联总电感值为:

$$L_{12} = \frac{8 \times (2N)^2 d_p^2 \times 10^{-5}}{3d_p + 9 \times (2h) + 10b} = 2.33\text{mH}$$

不难看出, 此时的电感值既不是 2 倍, 也不是 4 倍。之所以会这样, 是因为每个绕组内除了有自身绕组电流产生的磁通外, 还有另一电抗器绕组电流产生的磁通, 即所谓互感的影响。这两台电抗器的总电感值还可以用下式进行计算, 并且其结果也应该是:

$$L_{12} = 2(L_1 + M_{12}) = 2.33\text{mH}$$



(a)、(b)串联联结时 (c)、(d)并联联结时

图 171—1 两台相同电抗器的串、并联结

从上式可解出互感值 $M_{12} = 0.375\text{mH}$ 。

如果两台电抗器串联后磁场是相互减弱的,则 M_{12} 应该是负值(如图 171-1(b)),此时串联总电感值为:

$$L_{12} = 2(L_1 - M_{12}) = 2 \times (0.79 - 0.375) = 0.83\text{mH}$$

而此时其中的一个电感为:

$$L_1 = \frac{L_{12}}{2} = \frac{0.83}{2} = 0.415\text{mH}$$

如果两台电抗器并联,且电流产生的磁场是相互加强的(如图 171-1(c)所示),此时并联总电感值为:

$$\begin{aligned} L_{12} &= \frac{L_1 L_2 - M_{12}^2}{L_1 + L_2 - 2M_{12}} = \frac{L_1 + M_{12}}{2} = \frac{0.79 + 0.375}{2} \\ &= 0.582\text{mH} \end{aligned}$$

如果同样是并联,但磁场是相互减弱的(如图 171-1(d)所示),此时并联总电感值为:

$$\begin{aligned} L_{12} &= \frac{L_1 L_2 - M_{12}^2}{L_1 + L_2 + 2M_{12}} = \frac{L_1 - M_{12}}{2} = \frac{0.79 - 0.375}{2} \\ &= 0.207\text{mH} \end{aligned}$$

172. 电抗器的容量、电抗压降百分数、电感的毫亨数和稳定短路电流是怎样表示的?

a. 三相电抗器的容量(kvar—千乏)用下式表示:

$$S_n = 3I_n^2 u_x \% \times 10^{-3}, \text{kvar}$$

式中 I_n ——额定电流, A;

$u_x \%$ ——电抗压降百分数。

b. 电抗压降百分数是在额定电流下,电抗器两端电压降(ΔU)和额定相电压($U_n/\sqrt{3}$)之比的百分数,即

$$u_x \% = \frac{\Delta U \times 100}{U_n/\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}\Delta U \times 100}{U_n} \%$$

c. 电抗压降百分数和电感的毫亨数(L_n)的关系可通过下列各式推导出来:

因 $X_k = 2\pi fL_n \times 10^{-3}$, 当 $f = 50\text{Hz}$ 时,

$$X_k = 2 \times 3.14 \times 50L_n \times 10^{-3} = 0.314L_n$$

则 $\Delta U = X_k I_n = 0.314I_n L_n$

如忽略导线中的电阻, 则

$$u_k\% = \sqrt{3} \Delta U \times 100 / U_n = 54.4I_n L_n / U_n\%$$

所以 $L_n = \frac{U_n u_k\%}{54.4I_n}$

d. 电抗器的稳定短路电流可通过下列各式推导出来:

$$I_k = \frac{U_n / \sqrt{3}}{X_k} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \times 2\pi f L_n \times 10^{-3}}$$

当 $f = 50\text{Hz}$, 则 $I_k = U_n / 0.544L_n$

将 $L_n = \frac{U_n u_k\%}{54.4I_n}$ 代入并整理得

$$I_k = 100I_n / u_k\%$$

173. 铁心材料、气隙和磁通密度对铁心电抗器有什么影响?

a. 一台铁心电抗器的绕组匝数不变, 铁心材料由热轧电工钢片改为冷轧电工钢片后, 电抗值会发生变化, 但情况不一。因为铁心在同样的磁通密度下, 冷轧电工钢片的磁导率比热轧的为高。对于不带气隙的铁心电抗器, 电抗值和磁导率成正比, 所以热轧钢片改为冷轧时电抗值将升高; 对于带有气隙的铁心电抗器, 在绕组参数给定的情况下, 其电抗值的大小主要是由气隙大小决定的。由于气隙磁阻最大, 在产生同样磁通的情况下需要最多的磁动势, 所以铁心材料由热轧改为冷轧后, 电抗值提高甚微, 但饱和磁通密度有变化, 在铁心中磁通密度较低时更是如此。

b. 在带气隙的铁心中, 主磁通通过铁心柱的气隙时, 由边缘效应而向外扩散(如图 173—1(a)所示), 从而造成附加损耗。这种边缘磁通中很大一部分垂直于铁心段的侧面进入铁心柱, 因而在铁心片中产生很大的涡流损耗。为了减少这种损耗, 就要尽量减小每个气隙的高度, 使它保持在 10mm 以下。还要减小每个铁心

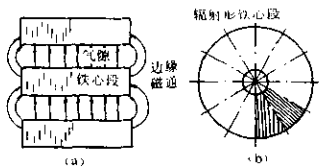


图 173—1 铁心气隙结构(a)和辐射形铁心段(b)

段的高度,使它不超过 50mm 为宜。

较大型的铁心电抗器应采用图 173—1(b)所示的辐射形铁心段,使得扩散的边缘磁通在进入铁心段时,沿着整个铁心圆的四周却能保证和铁心片的端面垂直,从而把涡流损耗减到最小。

c. 选择铁心电抗器的磁通密度时应考虑运行时间、振动、噪声、温升和损耗等。

例如,启动电抗器或者消弧线圈,因其运行时间短,铁心损耗虽然大些,铁心温升也不致过高,所以其磁通密度可以取得高些。但此时铁心片的振动和噪声却随磁通密度成平方关系而增大。由此可见,选取磁通密度时对上述因素必须综合考虑。

d. 为了减小铁心电抗器的振动和噪声,需采用适当的压紧结构,以使铁心和绕组都能压紧。

这样,在绕组和铁心柱之间要采用撑板撑紧,以保证绕组辐向不移动,并使每个铁心段都互相垂直同心。至于绕组和铁心的轴向紧固要采用拉杆和压钉结构,如图 173—2 所示。

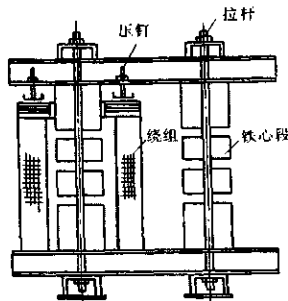


图 173—2 铁心电抗器的压紧结构

此时,通过拉杆可以将铁心段固紧,使铁心成为一个整体。然后又通过压钉将绕组紧固。但应注意漏磁对拉杆的影响。

174. 限流电抗器有哪几种? 有什么用途? 如何安装?

电路中所有用作感抗的自感线圈,包括具有定值的感抗,其基本功能是限制电力设备的短路电流,且短路时能保持母线电压于一定水平,这种电器称为限流电抗器。通常安装在出线端或母线间,如图 174—1(a)所示。

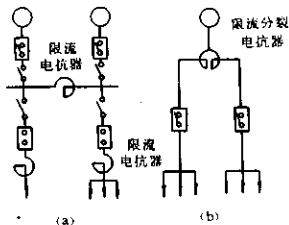


图 174—1 线路中的限流电抗器(a)和限流分裂电抗器(b)

限流电抗器分三种:混凝土柱式电抗器(NKS或NK-SL)、分裂电抗器(FK)和油浸电抗器(XKSJ)。

限流电抗器的型号是这样表示的,例如 NKSL-10-600-5,表示铝电缆混凝土柱式电抗器、电压 10kV、电流 600A、阻抗电压百分数为 5%。此外,混凝土柱式电抗器还标注首尾两出线端沿圆周的角度。

(1) 混凝土柱式电抗器

20kV 及以下、150~3000A 的限流电抗器,常做成空心的混凝土结构。绕组绕好后用混凝土浇筑而成牢固的整体,故曾称水泥电抗器。这种结构制造简单、成本低、运行可靠、维护方便、属于户内装置,如图 174—2 所示。

这种电抗器都做成单相。组成三相组时有下列三种排列方式,如图 174—3 所示。

三相垂直排列和两重一并排列时,B 相绕组绕向要与 A、C 相反,这样可以减少相间支撑绝缘子的拉伸力。如果 B 相绕组绕向不相反,则当电流相角为 60° 时(如图 174—4(a)所示),A、B 相绕组间排斥力最大,其力大小与下式成正比:

$$F_1 \propto (\sin 60^\circ \times \sqrt{2} I)^2 \\ = 1.5 I^2$$

而当相角为 150° 时, A、B 相绕组间吸引力最大, 其力大小与下式成正比:

$$F_2 \propto (\sin 150^\circ \times \sqrt{2} I)^2 \\ = 0.5 I^2$$

可见 A、B 相绕组间排斥力(支撑绝缘子的拉伸力)为吸引力(支撑绝缘子的压缩力)的 3 倍。

如果 B 相绕组绕向相反, 由图 174—4(b)可知, 支撑绝缘子所受的压缩力为拉伸力的 3 倍。

由于支撑绝缘子属脆性材料, 其抗压强度远比抗拉强度高得多。B 相绕组反绕后, 可将支撑绝缘子的抗拉强度缩小 3 倍。不管是 A、B 间的, 还是 B、C 间的绝缘子均是如此。

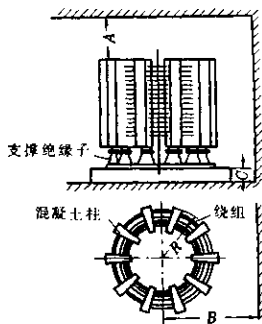
(2) 分裂电抗器

带中间抽头的混凝土柱式电抗器称分裂电抗器。分裂电抗器使用时, 中间抽头接电源, 首末端接负载, 如图 174—1(b)所示。

正常工作时, 分裂电抗器的上下两支路电流方向相反, 而绕组绕向却又相同, 此时互感为负值, 使得每个支路的有效电感很小, 压降也很小。如果下支路所接线路短路, 则其电流急剧增大, 而上支路电流仍很小, 使得对下支路互感可以忽略。下支路有效电感很大, 仍有显著的限流作用。

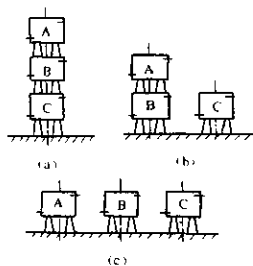
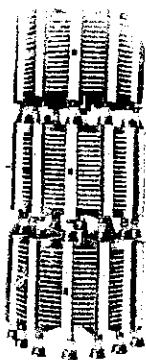
(3) 油浸式限流电抗器

35kV 的限流电抗器, 一般做成夹装、油浸式、户外装置, 油箱



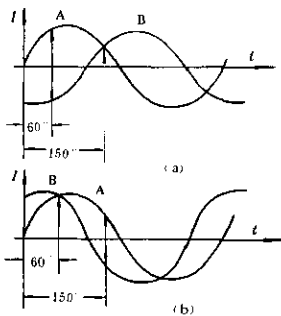
$$A = R - 130\text{mm}; B = 2R - 120\text{mm}; \\ C = R - 325\text{mm}$$

图 174—2 混凝土柱式电抗器的结构与安装



垂直排列的实况 (a)垂直排列 (b)两重一并排列 (c)水平排列

图 174—3 混凝土柱式电抗器的排列方式



(a)B 相绕组绕向不相反 (b)B 相绕组绕向相反

图 174—4 电抗器垂直或两重一并排列时 A、B 相的电流波形

内壁加磁分路或电磁屏蔽,用以减少箱壁的损耗和发热,其结构如

图 174—5 所示。

限流电抗器安装时对周围环境有要求。空心电抗器附近如果有磁导体的话,将使电抗值升高。在正常情况下:电抗器的磁通在空气中形成回路,但安装场所的屋顶、墙壁、地面如有钢铁等磁性材料存在,会在其中引起发热,所以混凝土柱式电抗器安装时,对屋顶、四壁和地面应保持一定距离,如图 174—2 所示。

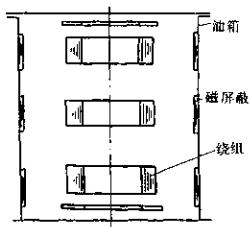


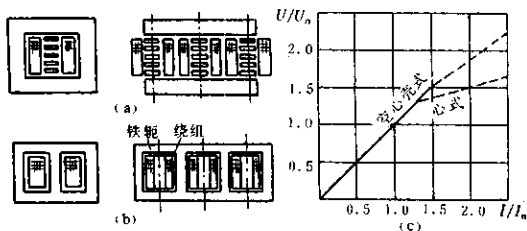
图 174—5 35kV 油浸式限流电抗器

175. 什么是并联电抗器? 在结构上有什么特点?

并联电抗器是超高压线路上作补偿用的铁心电抗器(心式带气隙)。在 330kV 及以上的超高压输电系统中应用较广,补偿输电线的电容电流,防止线端电压的升高。从而使线路的传输能力和输电线的效率都能提高,并使系统的操作过电压有所降低。

并联电抗器一般为心式结构,如图 175—1(a)所示;有时也做成空心壳式结构(绕组内没有铁心),如图 175—1(b)所示。这两种结构各有不同的饱和特性,如图 175—1(c)所示。心式结构通常在 120% ~ 130% 额定电压以下是线性的,饱和以后的增量电感值约为额定电压下电感值的 20% ~ 35%;空心壳式结构至少在 150% 额定电压下还是线性的,饱和以后的增量电感值约为额定电压下电感值的 60% ~ 70%。

壳式电抗器与心式的相比,还有制造简单、结构上容易压紧、噪声和振动小等优点。又因铁轭屏蔽了绕组,故外部漏磁通小,油箱和其他结构件中的附加损耗也小。但是壳式结构绕组内无铁心,磁通密度低,欲达到一定电抗值则要比心式多用铜线,重量要增加。另外,壳式绕组中通过的辐向漏磁分量很大,绕组中附加损耗增加。

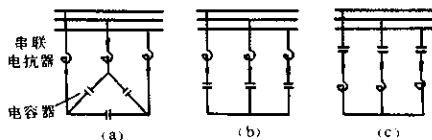


(a)单相、三相心式 (b)单相、三相空心壳式 (c)两种结构的饱和特性
图 175—1 并联电抗器的结构和饱和特性

大容量电抗器的自然振动频率低,易与气隙中脉动频率一致,会产生机械共振。因此,在设计并联电抗器时要注意考虑结构问题,如果做成油浸式时对振动有阻尼作用,也可免于共振。

176. 什么是串联电抗器? 它有什么用途?

目前在一次变电站内如果要对系统进行补充超前无功容量时,则可采用并联补偿电容器和并联补偿成套装置。为了降低电力电容器组投切过程中的涌流倍数和抑制电网的高次谐波,需在并联补偿装置中使用串联电抗器。图 176—1 是高压电力电容器和串联电抗器的几种常用的接线方式。



(a)、(b)电容器为 D 和 Y 形接线,电抗器串结在网路和电容器间
(c)电抗器为 Y 形接线,电容器串结在网路和电抗器间
图 176—1 电力电容器和串联电抗器的接线

在并联补偿电容器组回路中,串入电抗器后,还能抑制电容器支路的高次谐波,降低操作过电压,在一定程度上限制电容器投入和切除时的电流。

串联电抗器为带气隙的铁心电抗器,产品型号有两种:CKS(三相)和CKD(单相)。其容量等级如表 176—1 所示。长期使用最大电流为额定电流的 1.35 倍,因此产品温升应按长期使用最大电流设计。

表 176—1 电力电容器用串联电抗器的容量等级

额定电压 /kV	电容器 组容量 /kVA	串联电抗器单台容量 /kvar		额定电压 /kV	电容器 组容量 /kVA	三相串联电抗器 单台容量/kvar
		单相	三相			
63	5 000	100	300	10.5	3 000	180
	7 500	150	450		4 000	240
	10 000	200	600		5 000	300
	15 000	300	900		6 000	360
	20 000	400	1 200		7 500	450
35	5 000	100	300	6.3	10 000	600
	7 500	150	450		1 000	60
	10 000	200	600		1 500	90
	15 000	300	900		2 000	120
	20 000	400	1 200		2 500	150
10.5	1 000		60	3 000	180	
	1 500		90	4 000	240	
	2 000		120	5 000	300	
	2 500		150			

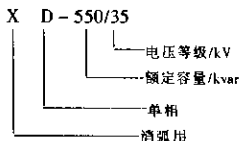
注:额定容量的允差为+10%。

177. 什么是消弧线圈? 其系列基本参数怎样?

消弧线圈实质上是一个单相铁心电抗器,接于 6~60kV 电力系统的中性点和大地之间(10kV 级是接在接地变压器中点与大地之间)。当线路一相对地因大气过电压而发生闪络时,消弧线圈中

产生电感电流,抵消接地故障点的电容电流,使故障点电弧迅速熄灭。

消弧线圈型号是这样表示的,例如 550kvar、35kV 的消弧线圈表示如下:



消弧线圈系列的基本参数如表 177—1 所列。

表 177—1 消弧线圈系列的基本参数

型 号	容量/kvar	电压/V	电流/A
XD - 44/6	22.75 ~ 45.5	$1.05 \times 6\,000/\sqrt{3}$	6.25 ~ 12.5
XD—87.5/6	45.5 ~ 91	同上	12.5 ~ 25
XD—175/6	91 ~ 182	同上	25 ~ 50
XD—350/6	182 ~ 364	同上	50 ~ 100
XD—700/6	364 ~ 728	同上	100 ~ 200
XD—1 400/6	728 ~ 1 455	同上	200 ~ 400
XD—300/10	151 ~ 303	$1.05 \times 10\,000/\sqrt{3}$	25 ~ 50
XD—600/10	303 ~ 606	同上	50 ~ 100
XD—1 200/10	606 ~ 1 212	同上	100 ~ 200
XD—275/35	139 ~ 278	$1.1 \times 35\,000/\sqrt{3}$	6.25 ~ 12.5
XD—550/35	278 ~ 556	同上	12.5 ~ 25
XD—1 100/35	556 ~ 1 112	同上	25 ~ 50
XD—2 200/35	1 112 ~ 2 223	同上	50 ~ 100
XD—700/44	350 ~ 700	$1.1 \times 44\,000/\sqrt{3}$	12.5 ~ 25
XD—1 400/44	700 ~ 1 400	同上	20 ~ 50
XD—950/60	476 ~ 953	$1.1 \times 60\,000/\sqrt{3}$	12.5 ~ 25
XD—1 900/60	953 ~ 1 906	同上	25 ~ 50
XD—3 800/60	1 906 ~ 3 811	同上	50 ~ 100

消弧线圈运行时有很大的漏磁通,漏磁场附近的金属体会因感应涡流而发热,故铁心所用拉螺杆最好采用不导磁体,以减小损耗,减少发热。

消弧线圈两柱上的绕组并联时,由于两柱的气隙可能会不完全相同,即两柱绕组的阻抗可能不同,这样就可能在两柱间产生循环电流。从此观点出发,最好还是串联。但串联时绕组各点对地电位不同,如取相同对地绝缘距离,则明显浪费;如取不同绝缘距离,则结构又较麻烦。

178. 消弧线圈为什么能消除电弧? 有的消弧线圈为什么还装有一副绕组? 分级绝缘消弧线圈怎样做感应耐压试验?

非直接接地系统中,变压器绕组为Y结线的中性点经过消弧线圈接地。当发生一相接地故障时,消弧线圈产生电感电流,抵消由于线路对地电容产生的电容电流,从而消除因电容电流存在而引起故障点的电弧持续,避免故障范围扩大,提高电力系统供电的可靠性。图178—1中在d点发生C相接地后,A、B两相的相电压升高为线电压,对地电容电流为 $I_{CA} = I_{CB} = \sqrt{3} \times 2\pi f C_U \Phi$ 。在故障点d的电容电流 $I_C = I_{CA} + I_{CB}$, $I_C = 3 \times 2\pi f C_U \Phi$,通常,通过消弧线圈的电感电流 I_L 稍大于 I_C ,此时故障点d的故障电流接近于零,因而接地故障产生的电弧自然就熄灭了。

消弧线圈有分接头,通过分接头的变换可以使消弧线圈有不同的阻抗值。与消弧线圈相连接的电力系统的对地电容常常改变,例如系统中网路的长短、并联支路数的变更,就会带来对地电容的改变,也就是故障时电容电流 I_C 会改变,所以消弧线圈的电感电流 I_L 必须相应改变。

标准中规定,60kV等级的消弧线圈中要装有一电压为6.6kV,电流分别为300A、600A、1200A的副绕组,以备查找接地故障用,如图178—2所示。接地后,将副绕组经电阻箱短接,使电容电感回路中增加些电阻分量,然后用功率继电器进行测量。

但这种方法的使用已经成为历史了。目前广泛采用的是所

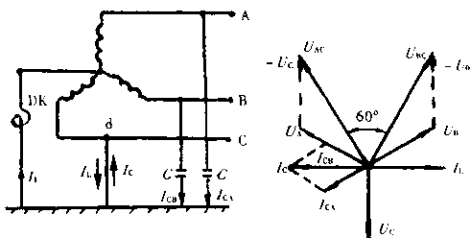


图 178—1 变压器 C 相接地时电容电流和相量图

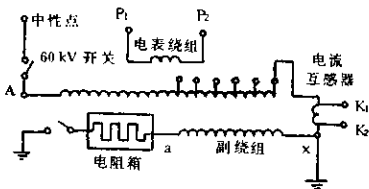


图 178—2 带有副绕组的消弧线圈

谓点面法，即逐条线路拉闸法，故不少制造厂因副绕组没有什么用途而将其取消了。

消弧线圈在使用时末端是接地的，因此这种产品本不需要全绝缘结构。但是过去由于绝缘试验问题解决不了，国内各制造厂家采取了许多不尽合理的办法。例如：

- a. 不做感应耐压试验，不考核纵绝缘；
- b. 绕组采用全绝缘结构，而末端用小套管引出，耐压前先把末端引线自套管中拆出，耐压试验后再行接入；
- c. 35kV 及以下产品的绕组和套管均采用全绝缘。

从上述这些办法中不难看出，这样做既不能保证产品质量，又在材料和工时上造成很大浪费。可以把消弧线圈的绕组和套管

部分,均采用分级绝缘结构,并采用图 178—3 所提供的办法做产品的主、纵绝缘试验,这样上面所列的缺陷可全部得到消除。

产品的末端用 10kV 套管引出。试验时另用一台支撑变压器将消弧线圈末端支撑到 35kV,此时消弧线圈的分接开关接到最多匝数分接头,并在消弧线圈两端施加 100Hz 的电压。其电压数值按下列各式选取。

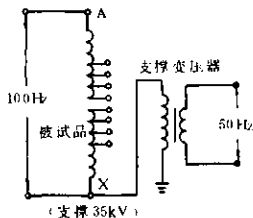


图 178—3 分级绝缘消弧线圈的感应耐压试验

对于 60kV 的消弧线圈:

$$U = (60 \times 1.1\sqrt{3}) \times \sqrt{2} \times 1.95 = 105\text{kV}$$

对于 35kV 的消弧线圈:

$$U = (35 \times 1.1\sqrt{3}) \times \sqrt{2} \times 1.59 = 50\text{kV}$$

上列各式中的 $\sqrt{2}$ 均为消弧线圈最大匝数与最小匝数之比(近似值);1.95、1.59 为试验时感应电压与额定电压之比(≤ 2)。

上面各感应电压加上支撑电压刚好为产品被试电压,即:

60kV 产品为 $105 + 35 = 140\text{kV}$

35kV 产品为 $50 + 35 = 85\text{kV}$

对于 6~10kV 级的消弧线圈来说,由于电压级次较低,绕组和套管均选用 10kV 全绝缘即可。这样试验简单,材料也不浪费。

35kV 及以下消弧线圈在各分接位置下允许连续工作时间为:

分接位置(1分接电流最小)	1	2	3	4	5
允许连续工作时间/h	长期	长期	8	4	2

179. 什么是启动电抗器? 启动电抗器有什么作用?

启动电抗器用于大型交流电动机降压启动。启动时电抗器与电动机串联,以减小电动机的启动电流;启动后将电抗器从电网中切除。其结线图如图 179—1 所示。

启动电抗器的连续工作时间不得超过2min。2min后应停止运行,待完全冷却后,才能再次投入。

启动电抗器的基本参数应根据电动机的全电压启动电流和要求降压的百分数来确定,如表179—1所示。若电动机的额定电流为 I_0 ,当全电压启动时,启动

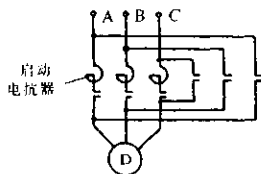


图 179—1 启动电抗器降压启动接线图

表 179—1 三相启动电抗器规格表

启动电抗器 型 号	型式容量 /kvar	线路额定电压 /kV	启动容量 /kvar	启动相电流 /A	每相额定电抗 /Ω
QKS-320/6	320	6	320	100	10.7
			320	180	3.3
			322	320	1.05
QKS-560/6	560	6	510	100	17
			554	180	5.7
			585	320	1.9
			565	560	0.6
QKS-1 000/6	1 000	6	970	180	10
			1 010	320	3.3
			990	560	1.05
			1 050	1 000	0.35
QKS-1 800/6	1 800	6	1 750	320	5.7
			1 690	560	1.8
			1 770	750	1.05
			1 800	1 000	0.6
			1 910	1 350	0.35
QKS-3 200/6	3 200	6	3 010	560	3.2
			3 040	750	1.8
			3 150	1 000	1.05
			3 280	1 350	0.6
QKS-5 600/6	5 600	6	4 050	560	4.3
			5 400	750	3.2
			5 400	1 000	1.8

电流为额定电流的 K_D 倍。如果要求降压到全电压的 $s\%$ 时启动, 则电抗器的额定相电流可按式确定(按电动机参数不随电压降低而改变考虑):

$$I_n = K_D I_D s / 100, \text{A}$$

电抗器的额定电抗值:

$$X = \frac{(1 - s/100) U / \sqrt{3}}{I_n}, \Omega$$

式中 U ——电动机的额定线电压, V。

通常启动电抗器还带有一个电抗值为额定电抗值 85% 的分接头。

启动电抗器的额定容量:

$$S = 3 I_n^2 X \times 10^{-3}, \text{kvar}$$

由于这类电抗器的工作时间很短, 设计时磁通密度和电流密度均可选得很高。因为安匝多, 铁心中总间隙很大, 虽然在较高的磁通密度下工作, 间隙磁阻仍占总磁阻的主要部分。

180. 什么是饱和电抗器? 应用在哪些地方? 有什么特点?

饱和电抗器是磁放大器的一种, 或者说是磁放大器的主要组成部分。它是利用铁磁材料的饱和特性, 以较小的直流功率改变交流绕组的电抗数值, 来控制较大的交流功率的一种电器, 因而也可看成是一个可控电抗器(可控电抗器是正在发展的一种新型电抗器, 如可控消弧线圈与可控并联电抗器等)。

通常把无反馈的磁放大器称之为饱和电抗器, 但习惯上又常常把串有整流元件的自饱和式磁放大器中的电抗器也称之为饱和电抗器。这里, 前者可称为扼流式饱和电抗器, 后者则称为自饱和式饱和电抗器, 而笼统地全称为饱和电抗器。

饱和电抗器常应用在: 调节电炉和各种电热装置; 调节照明; 用于电弧焊接装置; 均匀调节电压; 限制短路电流的电抗器; 作为可调节 $\cos\varphi$ 的试验负载; 用作稳定交流电压; 使用于电机调速方面以及作为无触点的继电器等。

扼流式饱和电抗器作为功率调节用时, 串联在变压器一次绕

组中,如图 180—1 所示。电压一般有 400V、6 000V 和 10 000V 等。在电源电压 U 一定时,改变直流控制电流 I_k 时,可使输出电压 U_1 在一定范围内变化。为了消除电抗器产生的三次谐波电流(三铁心式),通常设置一个短路绕组,其安匝数等于直流控制安匝数的 40%。

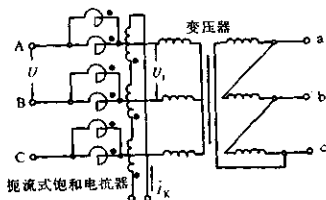


图 180—1 扼流式饱和电抗器作为变压器功率调节的接线

自饱和式饱和电抗器可串在整流变压器的二次回路里,作为均匀调节整流变压器的直流输出电压之用,如图 180—2 所示。为了改善饱和电抗器的工作点,往往绕有匝数为控制绕组匝数 1/2 的偏移绕组,并通有直流控制电流。

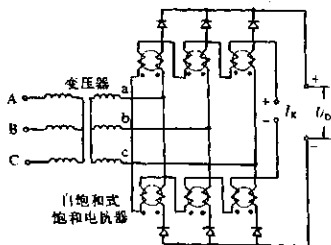


图 180—2 自饱和式饱和电抗器作为整流变压器直流输出电压调节的接线

饱和电抗器用来调节电压时有如下特点：

饱和电抗器可以在带电情况下连续无级平滑均匀地调节交流电压。但它不象感应调压器那样，制造时要求精度高，结构上又有转动部分；也不象移圈调压器那样笨重，那样高噪声、高损耗。与多抽头电抗器相比，在同样的调节范围内，具有带电无级均匀调节的特点。

饱和电抗器也有其不够理想的地方。一是需要增加一套直流电源装置；二是在线路中造成无功损耗；三是有一定的惯性（动作时间与动作信号相比要滞后一段时间）。

181. 饱和电抗器的原理怎样？铁心结构有何特点？什么是电抗变化倍数和交直流同时磁化曲线？

(1) 饱和电抗器的原理

通常饱和电抗器在使用时是与负载电阻串联后再接于交流电源上的。饱和电抗器实质上是一个可变电感，但其电感值的变化由直流电流所控制。电感值的变化会引起回路中电流的变化，因而在饱和电抗器的两端以及负载电阻两端上的电压降也随之发生变化。

饱和电抗器的基本原理是利用铁磁材料的交流有效磁导率随直流磁场大小而变化的特性，以改变交流绕组的电抗值。

如果在图 181—1(a) 的铁心上放有交流绕组和直流绕组，其交流绕组与负载 R 串联后接于交流供电电源，直流绕组上则加有直流控制电压 U_k 。此直流控制电压可以由前级磁放大器的输出得到，也可以由小型自耦调压器经二极管整流而来。当两个绕组分别通以交流电流 I 和直流控制电流 I_k 时，铁心就处于交变磁通和恒定磁通的合成作用下，此时铁心中交流磁导率 μ 和交流绕组的电抗 X 随直流电流 I_k 的改变而改变，图 181—1(b) 给出了这一变化的关系曲线。

饱和电抗器交流绕组的电抗值与交流磁导率成正比：

$$X = \frac{\omega N^2 A \mu \mu_0}{l}, \text{H}$$

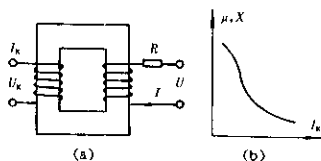


图 181-1 饱和电抗器的结构原理(a)与控制特性(b)

式中, N 为饱和电抗器交流绕组匝数; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$; A 为铁心柱截面积, cm^2 ; l 为磁路平均长, cm ; μ 为交流磁导率。

在铁心尺寸和绕组匝数固定不变的情况下, 交流绕组的电抗 X 与铁心交流磁导率 μ 成正比。当直流电流 I_k 增加时, μ 减小, X 随之成比例减小。因此, 一个闭合铁心在交直流磁场共同作用下, 可以借助于改变直流电流的办法, 以达到改变交流绕组电抗和回路中电流的目的。

但是, 实际上不采用单铁心形式的饱和电抗器。这是因为当交流绕组通过电流时会在铁心中产生一交变磁通, 此磁通会在直流绕组中感应出交变电势。这样交流绕组和直流绕组之间的关系就如同变压器一、二次绕组之间的关系一样, 破坏了直流电源的正常工作。

此外, 单个双柱式铁心的交流绕组中的电流波形会发生很大的畸变, 使之不对称于时间轴。图 181-2 给出了这一变化情况。图中的交流磁感应(磁通密度)、磁场强度是在直流磁场强度为零时对时间的变化关系, 是对称于时间轴的。有直流磁场强度作用后, 对应于 B_k 的交直流合成的磁场强度就不对称于时间轴了, 这显然是所不希望的。

(2) 饱和电抗器的铁心型式

常用的饱和电抗器的铁心为双铁心型式, 图 181-3(a) 为其中

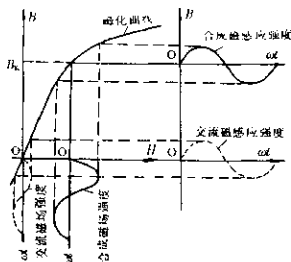


图 181—2 单相饱和电抗器磁感应和磁场强度曲线

一种结线,即交流绕组并联结线(还有交流绕组串联结线)。此图基本上消除了单个双柱铁心的两个缺点。

图 181—3(b)给出了这种双铁心的磁场强度曲线。图中左侧部分的实线曲线表示第一个和第二个双柱铁心中的磁通曲线 $\Phi_1(t)$ 和 $\Phi_2(t)$, 而虚线则表示没有直流励磁时的磁通曲线 $\Phi_0(t)$ 。从这些曲线上各点引一些水平线与磁化曲线相交,那么这些交点的横坐标就是在该时刻各个铁心的磁场强度。将两个磁场强度相加,就得出总的磁场强度对时间的关系曲线。

从图 181—3(b)曲线可以看出第一二个铁心磁场强度 $I_1 N_1$ 和 $I_2 N_2$ 都由于铁心饱和而发生畸变。每个曲线波形均包含奇次和偶次谐波分量。但总的磁场强度 $IN = I_1 N_1 + I_2 N_2$ 却只含有奇次谐波分量,消除了偶次谐波分量,曲线完全对称于时间轴。

单相双铁心饱和电抗器的铁心和绕组的布置如图 181—4 所示。

如图 181—5 所示的三相六铁心式饱和电抗器,由三个单相双铁心饱和电抗器组成。而三相三铁心式饱和电抗器由三个单相单铁心饱和电抗器组成,不过每个铁心应为单柱旁轭式。这样三个铁心中磁通的波形相同而相位彼此相差 120° ,由此使直流绕组

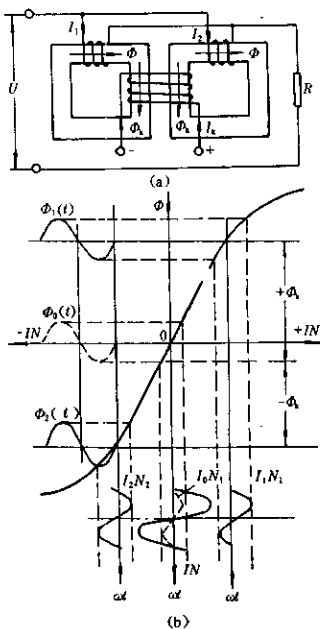
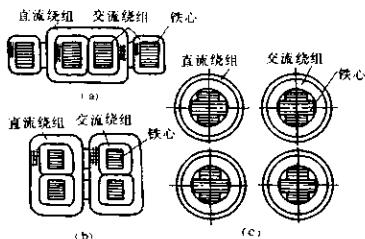


图 181—3 双铁心饱和电抗器的接线图(a)及其磁场强度曲线(b)

中感应产生的基电势互相抵消,只剩下三次谐波分量,而加设一个包绕三个铁心的短路绕组,使三次谐波电流在其中流通,又削弱了三次谐波对直流控制回路的影响。

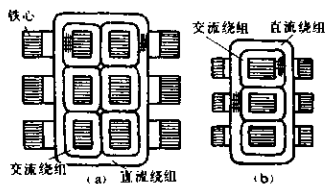
饱和电抗器交直流绕组的绕向和联结方法要遵守两条基本原则:

- a. 在一个双柱式铁心中,如果在某一瞬间一个铁心中交直流



(a)、(b)两铁心相邻心柱上有一公共直流绕组 (c)两铁心各有直流绕组

图 181—4 双铁心单相饱和电抗器的结构



(a)六铁心式 (b)三铁心式

图 181—5 三相饱和电抗器的结构

磁通方向相同的话,必须使得另一铁心中交直流磁通方向相反;

b. 必须使得两个双柱铁心的交流磁通在直流绕组中产生的感应电势能互相抵消。

饱和电抗器直流绕组和交流绕组的功率比约为 1% ~ 5%。可见,在饱和电抗器中是可以用较小的直流功率来控制较大的交流功率的。

(3)饱和电抗器的电抗变化倍数

饱和电抗器是一个可变电抗器,在电抗变化范围内,电抗值是

连续可调的。它的电抗变化倍数等于它的电压变化倍数和电流变化倍数的乘积。

饱和电抗器的电压变化倍数和电流变化倍数是由饱和电抗器的下列两个极端运行情况下的参数计算而来的。第一种情况,当饱和电抗器直流绕组和直流电源断开时,交流绕组施以额定电压 U ,交流绕组中流一小电流 I_0 。第二种情况,当饱和电抗器直流绕组通以额定电流,交流绕组两端电压从零开始逐渐升高直到 U_K 值时,刚好交流绕组中电流达到额定电流 I_n 。此两种极限状态的数值之比,即:

$$I_n/I_0 = K_I \text{ 为电流变化倍数}$$

$$U/U_K = K_U \text{ 为电压变化倍数}$$

假设一饱和电抗器的两种极端状况的四个数据分别为 $U = 100\text{V}$, $I_0 = 10\text{A}$, $U_K = 10\text{V}$, $I_n = 100\text{A}$,此时:

$$K_I = I_n/I_0 = 100/10 = 10$$

$$K_U = U/U_K = 100/10 = 10$$

即电压变化倍数和电流变化倍数均为 10。

而当 $U = 100\text{V}$, $I_0 = 10\text{A}$ 时,交流绕组的电抗为 $100/10 = 10\Omega$;但当 $U_K = 10\text{V}$, $I_n = 100\text{A}$ 时,电抗为 $10/100 = 0.1\Omega$,即电抗变化倍数为:

$$10/0.1 = 100 = K_I K_U$$

(4)饱和电抗器的交直流同时磁化曲线

交直流同时磁化曲线是计算饱和电抗器的主要依据,是在设计饱和电抗器时,用与实际产品相同材质、相同结构、相同工艺的模型,在交直流磁场的共同作用下所绘出的一组磁化曲线簇,见图 181—6。

图 181—6 中横坐标为交流磁场强度 H ,纵坐标为交流磁感应强度 B 。第一条磁化曲线为直流场强等于零时绘制的,最后一条为直流场强最大时所绘制的。随着直流场强的增加,交流磁化曲线由左向右逐渐移动。

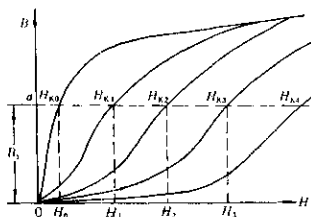


图 181—6 交直流同时磁化曲线簇

如果在图 181—6 的纵坐标轴上选取 $B_1 = a$ 作平行于横坐标轴的直线,与曲线簇相交于 $H_{k0} \sim H_{k4}$ 各点。很明显,各点的水平投影即为交流磁场强度 $H_0 \sim H_4$ 。

如果在交直流同时磁化曲线上画一些与横坐标平行的直线,则这些直线与交直流同时磁化曲线簇相交时将得出许多交点。每一个交点对应着一对 H_k 和 H 值,

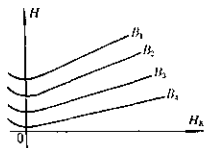


图 181—7 交流场强与直流场强的关系

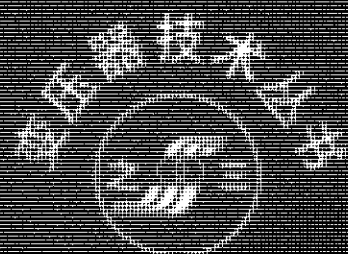
从而可以画出交流场强和直流场强的关系曲线,如图 181—7 所示。从该图中可以很直观地看出,饱和电抗器直流场强增加时,交流场强也跟着增加,而交流绕组的阻抗在减小。

变压器技术丛书之三

新编变压器实用技术问答

主 编:朱英浩
副主编:计宏伟
郑时伊

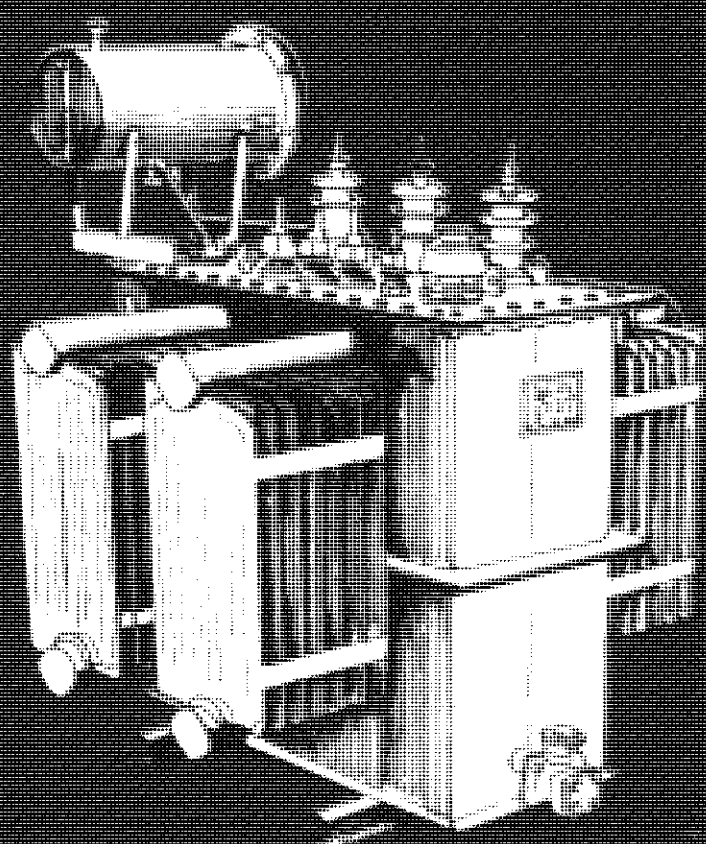
辽宁科学技术出版社
·沈阳·



新编

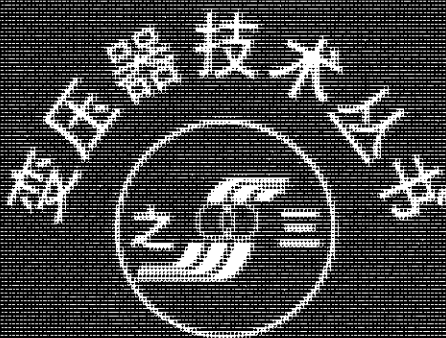
变压器实用技术问答

主 编 朱英浩
副主编 计宏伟
李时伊

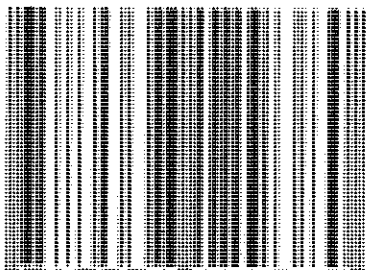


辽宁科学技术出版社

责任编辑 柯岚 苗郁



ISBN 7-5381-2938-3



9 787538 129380 >

内 容 提 要

本书对变压器类四大产品(变压器、互感器、调压器和电抗器)的原理、结构、制造和应用、运行、维修等方面的知识以问答的形式做了完整的介绍。全书共分四章 181 个问题,立题新颖醒目,解答通俗易懂。既有概念上的解释,又有工作上的经验总结,是一本实用性很强的技术读物。

本书对从事变压器类产品制造和运行、维护、检修的人员最为适用,对与变压器相关专业的工程技术人员和大中专院校师生也有一定的参考价值。

前 言

辽宁科学技术出版社于1986年出版的,由《变压器》杂志编辑部编写的《变压器实用技术问答》一书,深受读者欢迎,印刷两次,发行两万多册,早已销售一空,脱销多年。近年来广大读者纷纷来信,希望我们能够根据变压器行业发展的情况和变压器技术的进步,重新编写一本变压器实用技术问答的书籍。

应辽宁科学技术出版社之约,我们在《变压器实用技术问答》的基础上,组织变压器行业内的有关专家编写了这本《新编变压器实用技术问答》。

近十几年来,变压器行业坚持改革开放,大力推进技术进步,产品质量和技术水平都有较大的提高,产品门类和品种也有较快的发展,为我国的电力工业和社会主义现代化建设做出了应有的贡献。但是我们也应当看到,我国变压器行业的整体技术水平与国际先进水平相比,还有一定差距,产品的发展也还跟不上国民经济蓬勃发展的需要,因此我们还应下大力气掌握、开发和应用新技术,提高各类人员的业务素质。如果《新编变压器实用技术问答》一书能在这方面起到一定作用,我们将会感到十分欣慰。

《新编变压器实用技术问答》对变压器类四大产品(变压器、互感器、调压器和电抗器)的原理、结构、制造和应用、运行、维修等方面的知识以问答的形式作了完整的介绍。全书共分四章181个问题,凡能包括的内容尽量收录进去。本书立题实用醒目,有针对性;解答简明扼要,通俗易懂。各题之中层次分明,条理清楚;各题之间承上启下,互为贯通。书中引用的一些数据图表和所采用的术语尽量符合国家标准和IEC国际电工委员会标准。

本书由朱英浩(中国工程院院士,沈阳变压器研究所总工程师,教授级高级工程师)任主编,计宏伟(沈阳变压器研究所常务副所长,高级工程师)、郑时伊(前《变压器》杂志主编,编审)任副主

编。参加编写的人员有：王振武、安作平、应百川、蓝灵书、何明光、才永全诸同志。

本书在编写过程中得到沈阳变压器研究所所长于海年同志的支持和关怀，得到《变压器》杂志编辑部同仁的大力帮助，在此一并表示诚挚的感谢。

书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

1998年11月

图书在版编目(CIP)数据

新编变压器实用技术问答/朱英浩主编. —沈阳:辽宁科学技术出版社,1999.7

ISBN 7-5381-2938-3

I.新… II.朱… III.变压器-技术-问答 IV.TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 21212 号

10481/02

辽宁科学技术出版社出版

(沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮政编码 110003)

沈阳市北陵印刷厂印刷 辽宁省新华书店发行

开本:850×1168 毫米 1/32 字数:340 千字 印张:12 $\frac{3}{4}$

印数:5001-8000

1999 年 7 月第 1 版

2001 年 1 月第 2 次印刷

责任编辑:枫 岚 苗 郁

版式设计:于 浪

封面设计:庄庆芳

责任校对:王春茹

插 图:刘天元

定价:40.00 元

邮购咨询电话:(024)23284502