

学习 路长柏等编著 〈干式电力变压器理论与计算〉

一 主绝缘距离确定

依据 GB6450-1986 标准, 10 kV 的干式变压器, 工频 28 kV, 雷电冲击电压 60 kV (峰值)。

当模型的绕组间距离 = 40mm, 高压绕组对铁轭距离 $H = 80\text{mm}$ 时, 其放电电压为 37.9 kV, 裕度为 1.43, 冲击时为 95.4 kV, 裕度为 1.59。

按空气的耐电强度确定主绝缘距离

1 高低压绕组间距离 CZ

空气的耐受电压强度为 0.70~0.85 MV/m 则:

高低压绕组间距离 $\geq U_g/0.70\sim 0.85$

U_g ——高压绕组的试验电压, kV。

由此对 10 kV 的干式变压器, $U_g = 28\text{ kV}$, 则应为 33~40mm。考虑到在雷电冲击电压试验时, 当冲击系数为 2.5, 在冲击电压转换为工频电压时, $60/2.5 = 24\text{ kV}$; $75/2.5 = 30\text{ kV}$ 。

高低压绕组间距离取 40mm 时是相当可靠的。

2 绕组的端绝缘

通常为环氧玻璃布为端绝缘。其耐受电压强度为 1.75 MV/m (方均根值), 当冲击电压取 $75/2.5 = 30\text{ kV}$ 时, $30/1.75 = 17.1\text{mm}$, 因此, 高压端绝缘取 $H_{d1} = 25\text{mm}$, 低压端绝缘取 16mm。

3 端绝缘到铁轭的空气距离 H_{d2}

按能承受高压绕组的试验电压, 此处耐压强度应限于 0.6 MV/m, 故

$$H_{d2} = U_g/0.6 - H_{d1} = 28/0.6 - 25 = 21.7\text{mm}$$

考虑到端部以垫块 (通过压钉) 压紧, 电场会发生畸变, 故应加大空气距离, 取 $H_{d2} = 50\text{ mm}$ 。

4 相间距离 CM

通常等于高低压绕组间距离。

主绝缘距表

额定电压 (kV)	工频试验电压 (kV)	雷电冲击电压 (kV)	C0 (mm)	CZ (mm)	CM (mm)	HY1 (mm)	HY2 (mm)
<1	3	—		—	—	10	—
6	20	40	10	24	24	65~70	65~70
10	28	75	24	30~40	40	80~85	80~85
35	70	170		85	85	115~120	115~120

二 绕组温升计算方法

$$\tau = k \times Q^n \quad (\text{K})$$

$$Q = P / S$$

K, n ——经验系数。 $n = 0.8$

1 饼式绕组温升计算

先算出轴向与水平气道有效散热系数和有效散热面,再按下式计算

外绕组: $\tau = 0.3 \times Q^{0.8}$

内绕组: $\tau = 0.33 \times Q^{0.8}$

2 层式绕组温升计算

按经验公式:

对高压绕组(无气道,只有两个轴向散热面): $K = 0.46$

对高压绕组(有气道,三个以上轴向散热面): $K = 0.56$

对低压绕组(不管有无气道): $K = 0.66$

散热面积—— S : 按实际散热面积,不需计算有效散热面,不考虑气道系数(气道宽度和气道高度的影响)。

欧洲的绕组温升计算方法:

考虑到气道宽度和绕组高度对有效散热的影响,按热交换的热传导和对流、辐射的方式分别进行温升计算。

三 学习讨论

1 关于主绝缘距离

实际上按供电部门的要求,10 kV 的干式变压器,工频 35kV,雷电冲击电压 75 kV (峰值)。

当模型的绕组间距离 = 40mm,高压绕组对铁轭距离 $H = 80\text{mm}$ 时,其放电电压为 37.9 kV,裕度为 1.08,冲击时为 95.4 kV,裕度为 1.272。

按空气的耐电强度确定主绝缘距离

1.1 高低压绕组间距离 CZ

空气的耐受电压强度为 0.70~0.85 MV/m 则:

高低压绕组间距离 $\geq 35/0.70 \sim 0.85$ 则应为 41~50mm。通常各厂家取 38 mm。看来绕组的包封材料的耐压水平(1.75 MV/m)起到了作用.适当增加包封厚度可减少绕组间距离。

1.2 绕组的端绝缘

$35 / 1.75 = 20 \text{ mm}$ 。因此，高压端绝缘取 $Hd1 = 25\text{mm}$ ，低压端绝缘取 16mm 。没有矛盾。

1.3 端绝缘到铁轭的空气距离 $Hd2$

按能承受高压绕组的试验电压，此处耐压强度应限于 0.6 MV/m ，故

$Hd2 = U_g / 0.6 - Hd1 = 35 / 0.6 - 25 = 58 - 25 = 33 \text{ mm}$ 。考虑到端部以垫块（通过压钉）压紧，电场会发生畸变，取 $Hd2 = 50 \text{ mm}$ 。如果不采用压钉装置，取 $Hd2 = 35 \text{ mm}$ 应该没有问题。

1.4 相间距离 CM

通常取 36 mm 。

2 关于主绝缘距离的裕度

教授的实验模型给出的绝缘距离，同时给出了裕度。过去的产品裕度一般取得较大，产品运行的可靠性较高，材料成本也较高。现在的裕度是从制造工艺考虑，保证能通过产品试验就行。因而压缩裕度，降低材料成本。而产品运行的可靠性就比不上过去的产品。这就是现实的矛盾。

3 关于绕组温升计算

由于绕组结构型式和绝缘材料的不同，其计算方法也不尽相同，在很大程度上依赖于实验和经验。于是有各式各样的计算公式出现。书中介绍了两种，一是作者总结出来的经验公式，一是欧洲采用的绕组温升计算方法。我按上述两种公式对同一个计算方案进行温升计算如下：

SC10-315~2500/10

单位：K

容量 kVA	高压绕组（扁线）				低压绕组（铜箔）			
	经验公式	欧洲公式	校正欧洲公式	绕组气道 mm	经验公式	欧洲公式	校正欧洲公式	绕组气道 mm
315	65.10	67.98	70.79	0	77.36	86.97	72.01	0
400	59.51	62.11	67.60	0	74.33	86.46	70.23	0
500	62.53	65.75	78.99	0	103.85	118.25	85.84	0
630	66.73	69.31	76.69	0	91.76	101.76	80.57	0
800	93.35	96.08	92.05	0	77.57	87.69	96.20	15
1000	84.43	87.26	87.92	0	77.59	91.68	83.95	15
1250	94.01	96.15	93.21	0	77.17	90.18	88.87	16
1600	95.92	98.00	98.37	0	91.16	104.13	96.10	16
2000	84.56	91.69	94.15	18	97.52	108.10	99.12	18
2500	87.55	95.62	96.87	18	92.18	104.51	99.41	18

下表列出两种计算温升之差：

单位：K

容量 kVA	高压绕组（扁线）				低压绕组（铜箔）			
	经验公式	欧洲公式	两种算法之差	相差百分数%	经验公式	欧洲公式	两种算法之差	相差百分数%

315	65.10	67.98	2.88	4.22	77.36	86.97	9.61	12.42
400	59.51	62.11	2.6	4.37	74.33	86.46	12.13	16.32
500	62.53	65.75	3.22	5.14	103.85	118.25	14.40	13.86
630	66.73	69.31	2.58	3.86	91.76	101.76	10.00	10.90
800	93.35	96.08	2.73	2.92	77.57	87.69	10.12	13.05
1000	84.43	87.26	2.83	3.35	77.59	91.68	14.09	18.16
1250	94.01	96.15	2.14	2.28	77.17	90.18	13.01	16.86
1600	95.92	98.00	2.08	2.17	91.16	104.13	12.97	14.23
2000	84.56	91.69	7.13	8.43	97.52	108.10	10.58	10.65
2500	87.55	95.62	8.07	9.21	92.18	104.51	12.33	13.38

欧洲的绕组温升计算方法，很细致，但没有考虑其他发热体（铁心和另一个绕组的影响），一般铁心的温升较低，对内绕组有散热作用。所以内绕组的实测温升，比计算值低，绕组温升越高的，实测温升差得越多。为此应进行铁心、内外绕组的温升校正，见表中所列。温升校正程序见附件。

由上表看出，本书经验公式中，高压绕组(无气道,只有两个轴向散热面): $K = 0.46$ ，其计算结果比按欧洲的绕组温升计算方法算出的平均低 3.5%，而高压绕组(有气道,三个以上轴向散热面): $K = 0.56$ ，其计算结果比按欧洲的方法算出的平均低 7.6%。低压绕组(不管有无气道): $K = 0.66$ 者，其计算结果比按欧洲的方法算出的平均低 14%。由此可见经验公式已考虑到了铁心对内绕组有散热作用。

温升对材料成本的影响，主要表现在产品系列中从不需气道到需要气道的容量边界上，当满足其它性能指标而温升不过关时，或者是增加电磁线截面降低铜损；或者是拉高绕组，增加散热面；或者是增加气道，这就要看那种方案材料成本最低了。

此外，还有很多经验公式，如：作者在 2002 年 12 期《变压器》上发表的《绕包绝缘干式变压器的几个问题》中说：

$$\text{高压绕组温升: } \tau_1 = 0.4 \times Q^{0.8}$$

$$\text{低压绕组温升: } \tau_1 = 0.6 \times Q^{0.8}$$

又如有一个程序的公式：

$$\text{高压绕组温升 无气道时: } \tau_1 = 0.43 \times Q^{0.8} + 5$$

$$\text{有气道时: } \tau_1 = 0.51 \times Q^{0.8} + 5$$

$$\text{低压绕组温升} \quad \tau_2 = 0.6 \times Q^{0.8}$$

看来适合某种产品的温升公式，还是要在实验中修正。



