

配电变压器三相负荷不平衡 对变压器损耗影响的实验研究

针对配电变压器三相负荷不平衡对配电变压器内部损耗的影响,进行了变压器Y-Δ接线和Y-Y接线时,变压器损耗随不平衡度变化的两个实验。通过采用三相教学变压器和纯电阻来模拟配电变压器和负载进行仿真实验。仿真实验验证了三相不平衡度为不同值时,对变压器损耗的影响。将测得的数据进行分析,最后得出变压器的损耗随不平衡度变化的规律以及相应结论,并对减少配电变压器的损耗和调整相间负载提供了参考,为研制三相不平衡装置的设计提供了一定的依据。

李 哲 富 巍 董史伟 杜佳良/厦门理工学院电气工程与自动化学院

0 引言

随着社会经济发展和电力市场的逐步放开,建设“自愈、安全、经济和清洁”的坚强智能电网,提供优质的电力与服务尤为重要。配电网的三相不平衡问题日益得到人们的广泛重视。由于负载具有随机性及三相功率因数不对称,会导致低压配电网经常出现三相负荷不平衡现象,轻则导致线路损耗增加,重则影响用电设备的寿命及电网的可靠性^[1-2]。

在电力系统中,配电变压器分布在城市与乡村中,应用在国计民生各个领域。开展配电变压器经济运行很有必要,尤其是对农电变压器的经济运行。在农电系统中,由于农电变压器峰谷差大、负载率过低,轻载和空载运行时间较长及三相不平衡等突出的特点,使变压器运行效率大大降低。

文献[3]讨论了配电变压器在出现三相负荷不平衡时对中性线电流的影响,三相负荷不平衡产生的损耗在低压电网

重损耗中占有一定比例。文献[4]结合了工程实例探讨了提高公用变压器的功率因数、加强就地平衡补偿和减少配电网损耗的措施。文献[5]讨论的是在三角形或无中性线的星形系统中,采用晶闸管控制电抗器与固定电容器相结合(TCR+FC)的方式,同时补偿正序电流中的无功分量和负序电流,以此来补偿三相不平衡负荷。在现实中已经投运的平衡装置,比较好的是锦州电热设计院设计的工频变相器^[6],它是由三相/二相变压器加电容器组合而成,有12个等级,以便与多种容量单相设备配套运行,多用于电气化铁路中。由于这种变压器结构复杂,造价较高,在照明和需要三相的工业用电中较少应用。三相自动平衡器^[6]用于380 V配电网中以实现三相相对平衡,当三相负载的变化未超过允许值时,平衡器不予调整,维持现状,但是这种方法没办法做到完全的三相平衡,负荷切换过程会造成谐波,影响电能质量,对开关切换的可靠性有很高的要求。

所以研究三相负荷不平衡与变压器损耗的关系是非常必要的,可以为减少配电变压器的损耗和调整配电变压器相间负载提供参考,为研制三相不平衡装置的设计提供依据。

1 三相不平衡的危害^[6-9]

三相不平衡运行时会有多种的危害^[6],例如配电变压器在不平衡运行时产生的零序电流^[7]会使其铁箱等附件中发热产生铁损,在三相绕组中产生一定



李 哲/硕士研究生

关键词/Keywords

变压器·
三相不平衡·
损耗·
仿真实验·

的铜损耗, 并会因绝缘过热而加快老化; 三相不平衡会增加线路损耗, 电流不平衡度越大, 线损增量也越大; 对用电设备的影响, 会导致用电设备使用寿命缩短, 加速设备部件更换频率, 增加设备维护的成本; 减少配电变压器出力, 三相负载不平衡度越大, 配电变压器出力减少越多; 降低电动机效率, 由于不平衡电压产生的负序磁场会产生制动作用, 引起电动机输出功率减少, 从而使电动机效率降低; 影响用户供电, 轻则带来不便, 重则造成较大的经济损失。本文实验分析主要考虑的是附加铁损、附加铜损和线损, 以下对附加铁损、附加铜损和线损进行主要分析。

1.1 附加铁损和附加铜损

Y/yn0接线的配电变压器二次侧的零序电流油箱壁中流通, 产生发热而导致铁损。而其零序电阻相比于正序电阻大得多, 则零序电流产生的附加铁损较大。

零序电流功率损耗为

$$\Delta P_{0l} = I_{0l}^2 R_{0l} \quad (1)$$

式中, ΔP_{0l} 、 I_{0l} 和 R_{0l} 分别为零序电流损耗功率、零序电流和零序电阻。

三相不平衡运行时配电变压器三相绕组的总的铜损耗为

$$P_{f1} = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) R_1 \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, P_{f1} 为三相绕组的总损耗, kW; I_a 、 I_b 和 I_c 为三相负荷电流, A; R_1 为变压器二次侧绕组电阻。

三相绕组总铜损耗为

$$P_{f2} = 3[(I_a + I_b + I_c)/3]^2 R_1 \times 10^{-3} \quad (3)$$

附加铜损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_f &= P_{f1} - P_{f2} \\ &= \{[(I_a - I_a)^2 + (I_a - I_c)^2 + (I_b - I_c)^2]/3\} R_1 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4)$$

可知附加铁损和附加铜耗会对配电变压器产生可观的损耗, 对此要引起相应的重视。

1.2 线路损耗

举例计算如下。

假设某三相四线制线路相线电阻为 R , 总负荷为 $3I$, 中性线电阻为 $2R$, 则可知三相平衡时线路

功率损耗为

$$P_b = 3I^2 R \quad (5)$$

同理, 假设相负荷分别为 $2I$ 、 $0.5I$ 和 $0.5I$, 则可知中性线电流为

$$I_N = 2I + \frac{1}{2}I \times \left(\frac{-1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \frac{1}{2}I \times \left(\frac{-1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{3}{2}I \quad (6)$$

则可得功率损耗为

$$P_{\text{unb}} = \left[(2I)^2 + \left(\frac{1}{2}I \right)^2 + \left(\frac{1}{2}I \right)^2 \right] R + \left(\frac{3}{2}I \right)^2 \times 2R = 9I^2 R \quad (7)$$

对比三相平衡时的功率, 功率损耗增加了3倍。

考虑极端情况: 全部负荷由一相供电, 功率损耗是三相平衡时的9倍。

由此可知, 三相不平衡产生的线损是很大的, 所以需要对三相不平衡采取相应的措施, 尽量使三相保持平衡。

2 相间不平衡度^[10]分析

2.1 相间最大负载不平衡度

相间最大负载不平衡度为三相中的最大负载 $S_m(I_m)$ 减去三相的平均负载 $S_\varphi(I_\varphi)$, 除以平均负载 $S_\varphi(I_\varphi)$ 。相间最大负载不平衡系数 F_m 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} F_m &= \frac{S_m - S_\varphi}{S_\varphi} \\ I_m &= \frac{I_m - I_\varphi}{I_\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$S_\varphi = (S_A + S_B + S_C)/3 \quad (9)$$

$$I_\varphi = (I_A + I_B + I_C)/3 \quad (10)$$

由式(8)~式(10)可知, 当 $S_m = 3S_\varphi$, 即($I_m = 3I_\varphi$)时, $F_m = 2$, 不平衡度等于2是相间最大负载不平衡度的上限值; 当 $S_m = S_\varphi$, 即($I_m = I_\varphi$)时, $F_m = 0$, 不平衡度等于0是相间最大负载不平衡度的下限值, 也就是三相负载完全平衡。则相间最大负载不平衡的变化范围是0~2。

2.2 相间最小负载不平衡度

相间最小负载不平衡度为三相中的最小负载

$S_X(I_X)$ 减去三相的平均负载 $S_\varphi(I_\varphi)$ ，除以平均负载 $S_\varphi(I_\varphi)$ 。相间最大负载不平衡系数 F_X 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} F_X &= \frac{S_X - S_\varphi}{S_\varphi} \\ I_X &= \frac{I_X - I_\varphi}{I_\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可知，当 $S_X=0$ ，即 $I_X=0$ 时，不平衡度等于-1，是相间最小负载不平衡度的上限值；当 $S_X=S_\varphi$ ，即 $I_X=I_\varphi$ 时， $F_X=0$ ，不平衡度等于0，是相间最小负载不平衡度的下限值。由上述分析可知，相间最小负载不平衡的变化范围是-1~0。

2.3 相间负载不平衡度

相间负载不平衡度为三相中的最大负载 $S_m(I_m)$ 减去三相的最小负载 $S_X(I_X)$ ，除以平均负载 $S_\varphi(I_\varphi)$ 相间负载不平衡度。相间负载不平衡系数 F_φ 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} F_\varphi &= \frac{S_m - S_X}{S_\varphi} \\ I_\varphi &= \frac{I_m - I_X}{I_\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(12)可知，当 $S_m=3S_\varphi$ ， $I_m=3I_\varphi$ 和 $S_X=0$ ， $I_X=0$ 时， $F_m=3$ ，不平衡度等于3是相间负载不平衡度的上限值；当 $S_m=S_X=S_\varphi$ ，即 $I_m=I_X=I_\varphi$ 时， $F_m=0$ ，不平衡度等于0是相间负载不平衡度的下限值，也就是三相负载完全平衡。由此可见，相间最大负载不平衡的变化范围是0~3。

3 实验研究

3.1 实验条件^[11-12]

为了验证配电变压器三相负荷不平衡对配电变压器内部损耗的影响，利用实验室设备模拟配电变压器工作线路模型，模拟三相负荷在不平衡时，对配电变压器的损耗过程进行分析。低压配电变压器的接线方式一般可分为Y-Δ接线和Y-y0接线。在实验时模拟Y-Δ接线和Y-y0接线方式，分别进行实验测试。负载用纯电阻来代替模拟，考虑到实验条件的限制，没办法使用真实的配电变压器，实验选用教学实验变压器。实验设备相关的信息如表1所示。

3.2 Y-Δ接线变压器损耗不平衡度变化实验

3.2.1 实验模型

做Y-Δ接线变压器损耗不平衡度变化实验，Y-Δ时变压器的接线柱接线如图1所示。搭建变压器模型电路，分别对负载试验、空载实验和短路实验进行实验测试验证。改变参数值进行相应实验分析。

(1) 负载实验

负载实验线路连接图如图2所示。测量数据时，调节各相电阻和调压器保持低压侧负载的总功率为90 W不变，分别读取高压侧功率表、低压侧功率表的读数和低压侧电流的读数；接着用万用表读取高压侧的相电压和低压侧的线电压。

(2) 空载实验

表1 实验设备相关的信息

名称	型号	参数	接线方式	厂家
低压侧功率表	D26-W型	电压端规格：125/250/500 V 电流端规格：0.5/1 A	电压端接250 V档	上海第二电表厂
高压侧功率表	D26/1-W型	电压端规格：75/150/300 V 电流端规格：1/2 A	电压端接300 V档	
滑片电阻器		额定电流：1.5 A；电阻最大值200 Ω		龙海教学仪器厂
JB-3三相教学变压器	TSGC2-15	相数3，频率 50 Hz，电压比：(Δ-Δ接线时) 380/110 V，一次绕组电流：0.65 A，二次绕组电流： 1.82 A，重量 62 kg	根据实验采用不同的接法	
调压器	TSGC2-15	输入电压380 V，输出电压0~430 V，频率50 Hz，输出容量15 kV·A，冷却方式：干式自冷	输入端子：A-B-C 输出端子：a-b-c	浙江正泰电器有限公司

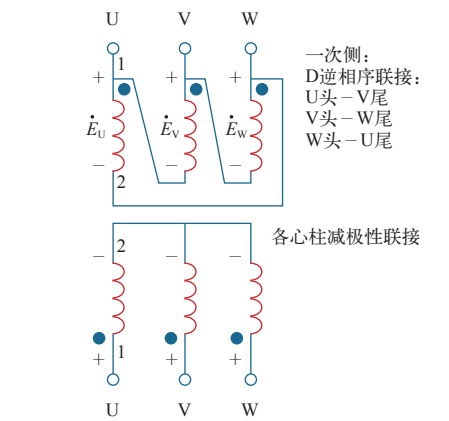


图1 变压器Y-Δ接线时接线柱接线

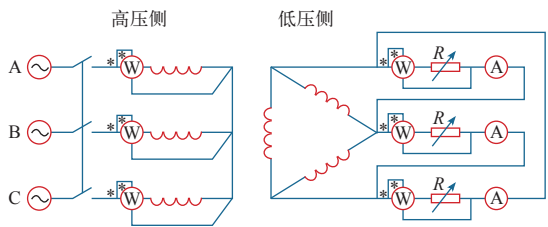


图2 变压器Y-Δ接线负载实验接线图

将三相空载断开做空载实验，模型接线如图3所示。第一步先将高压侧电压调到250 V，记录高压侧的功率和高、低压侧电压。第二步将高压侧电压调到200 V，记录高压侧的功率和高、低压侧电压值。

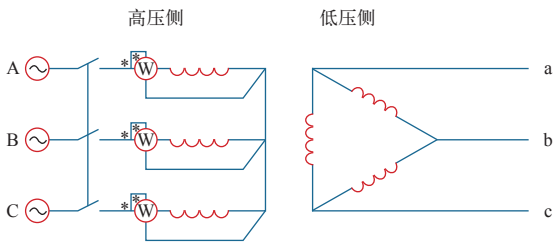


图3 变压器Y-Δ接线空载实验接线图

(3) 短路实验

将低压侧三相短路做短路实验，接线如图4所示。将低压侧的电流调到1.3 A、1 A、0.8 A和0.5 A分别做实验测试，记录高压侧的功率，高、低压侧电压值。

上述实验数据如表2所示。

表2 变压器为Y-Δ接线时实验测得数据表

		负载实验											空载实验		短路实验			
Y-Δ 接线	负载电阻/Ω	A	180	120	51	56	65	45	51	空	51	空	空	空	0	0	0	0
		B	180	180	50	93	180	180	空	50	空	50	空	空	0	0	0	0
		C	180	180	180	188	180	180	180	180	空	空	空	空	0	0	0	0
	高压侧功率/W	A	33	34	42	44	46	51	57	20	72	20	1.5	1	15	10	5	2
		B	33	28	41	34	28	26	18	58	18	72	1.5	1	14.5	10	5	2.5
		C	34	28	26	28	29	29	32	30	21	19	3	2	14.5	10	5	2.5
	高压侧总损耗/W		100	90	109	106	103	106	107	108	111	111	6	4	44	30	15	7
	低压侧功率/W	A	30	34	39	45	50	56	67	0	90	0	0	0	0	0	0	0
		B	30	24	39	30	20	18	0	68	0	90	0	0	0	0	0	0
		C	30	24	13	16	21	18	23	23	0	0	0	0	0	0	0	0
	不平衡度		0	0.4	0.9	1	1	1.3	2.2	2.3	3	3	0	0	0	0	0	0
	变压器损耗/W		10	9	19	16	13	16	17	18	21	21	6	4	44	30	15	7
	低压侧电流/A	A	0.4	0.5	0.9	0.9	0.9	1.1	1.2	0	0	0	0	0	1.26	1	0.8	0.5
		B	0.4	0.3	0.9	0.6	0.3	0.3	0	0	0	1.4	0	0	1.26	1	0.8	0.5
		C	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0	1.23	1	0.8	0.5
	高压侧相电压/V	A	254	224	171	189	210	196	224	222	259	256	250	200	40	34	25	17
		B	253	223	169	188	209	197	224	221	259	254	249	200	40	33	25	17
		C	256	227	172	191	212	198	227	224	263	258	253	202	40	33	25	17
	低压侧相电压/V	A	76	67	49	56	63	58	65	65	79	75	77	61	6	5	3	1
		B	76	67	49	56	62	58	68	66	78	77	76	61	6	5	3	1
		C	76	67	50	55	61	57	67	67	26	77	76	61	7	5	3	1

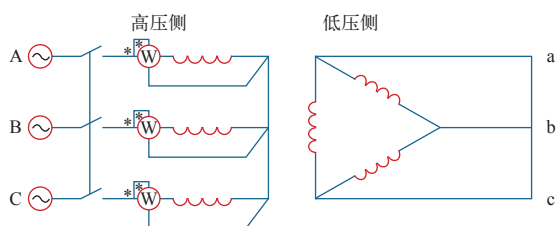


图4 变压器Y-Δ接线短路实验接线图

3.2.2 数据分析

通过对Y-Δ接线变压器损耗不平衡度变化实验数据分析整理，将高压侧功率表的功率减去低压侧功率表的功率，就为变压器的空载损耗、负载损耗和因三相不平衡造成的附加损耗。将这部分功率整理计算，可以得到如表2中的数据。经过对数据进行处理可以得到如图5所示的变压器损耗随不平衡度变化的曲线图。

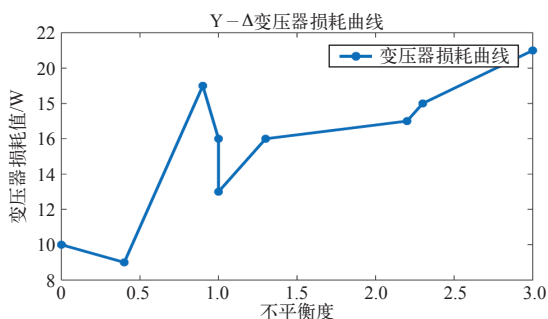


图5 变压器Y-Δ接线时三相不平衡变压器损耗曲线

(1) 注意事项

在测量三相不平衡对变压器损耗影响时，要保持总功率为90 W不变。排除其他条件的干扰，尤其是负载，因此要避免负载不相同带来干扰。

A相降低电阻后，功率通常会增加，意味着B、C相功率降低。因为R减少，电流增大。根据 $P=UI$ ，功率增加了。而电压下降的原因是电流的增加，内阻电压增大，则导致低压侧电压降低。

当高压侧功率电压端接线电压时，在数据整理时，不能将高压侧的功率直接除以 $\sqrt{3}$ 。这是因为只有各相电压为同相位、同频率和等幅值的情况下，线电压等于 $\sqrt{3}$ 倍的相电压。而现在所做的实验，三相电压不是等幅值，这种现象Y-Y接线中尤为明显。所以对数据分析的时候，不能直接对功率乘以或除以 $\sqrt{3}$ 。

在数据分析的时候，为验证数据的正确与否，不能单纯将空载实验和短路实验测得值直接加上电阻消耗的值（即低压侧功率值），和高压侧功率的值进行比较。因为实验本身不是在额定的状态下的。因此要多测几组空载损耗和短路损耗（铜耗）的值，加上相应的电压和电流的空载损耗值和其他损耗值。

不平衡度的计算需用功率的值来计算，而不用电流值。这是因为电流表前十格刻度不明显读出来的值误差较大。

低压侧的功率表接法：应将功率表的电压端直接接到电阻的两端，这样就排除了仪器和线路本身的损耗，从而降低了误差。

(2) 结论分析

在表2中，不平衡增加时，出现变压器损耗下降的情况。举例分析，假设总负载为9个单位，不平衡度为1， P 、 p 分别为一次测量中最大负载和最小负载。 P' 、 p' 为另外一次测量的最大负载和最小负载。

根据不平衡度可以得到以下方程组

$$\begin{cases} 2P + p = 9 \\ \frac{P - p}{3} = 1 \\ 2p' + P' = 9 \\ \frac{P' - p'}{3} = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P = 4 \\ p = 1 \\ P' = 5 \\ p' = 2 \end{cases} \quad (13)$$

从式(13)可至少以看出总负荷为9的单位，负载可以分为(4, 4, 1)和(2, 2, 5)两种分配情况。对于不平衡度为一特定值时，假设不平衡度为1时，解析如下：假设三相负载的总功率为9个单位。 x 、 y 、 z 分别是三相功率值，且 x 最大， z 最小。根据不平衡的概念及条件，可以得到以下方程

$$\begin{cases} x + y + z = 9 \\ \frac{x - z}{3} = 1 \\ x > y > z > 0 \end{cases} \quad (14)$$

根据线性方程组分析，可以得到坐标图如图6所示。

则可知对于不平衡度为1时，负荷分配情况

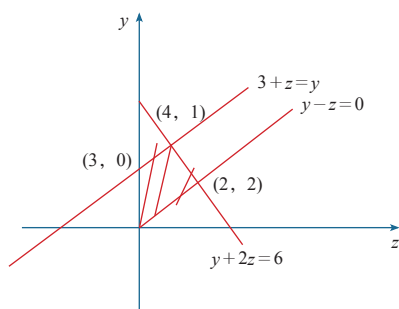


图6 各相负载值满足平衡度为1坐标图

有多种, 变压器损耗值就对应多个, 所以对于同一个不平衡度, 变压器损耗根据不同的分配而不同。这个结论在测得的数据中已得到证明。所以不平衡度为同一个值时, 负载有不同的分配(除了三相平衡这种情况)。不平衡度为0时, 即三相负荷平衡时, 变压器损耗值只有1个。不平衡度为3时, 即两相空载, 一相接负载, 这种情况有3种, 所以变压器损耗值有3个, 但这3个值接近相等。

由图5可以得到, Y-Δ接线方式的变压器三相不平衡时, 其损耗与三相负载不平衡度的关系。随着三相负载不平衡度的增加, 变压器的损耗在趋势上是逐步增大的, 但不是绝对随着不平衡度的增加而增大的。

3.3 Y-Y接线变压器损耗不平衡度变化实验

3.3.1 实验模型

同理, 做Y-Y接线变压器损耗不平衡度变化实验时, 与Y-Δ接线变压器损耗不平衡度变化实验时相同, 搭建电路模拟分析。分别对负载实验、空载实验和短路实验进行测试验证。Y-Y接线变压器的接线柱接线如图7所示, 对变压器模型电路改变参数进行实验分析。

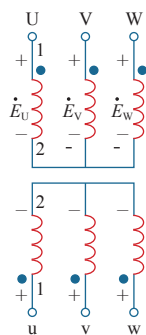


图7 变压器Y-Y接线时接线柱接线

(1) 负载实验

按图8接好负载实验模拟电路图。测量时, 调节电阻和调压器保持低压侧的总功率为90 W不变, 分别记录高压侧、低压侧功率表的读数和低压侧电流表的读数。接着用万用表读取高压侧的相电压和低压侧的线电压。

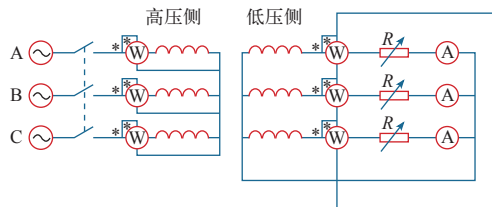


图8 变压器Y-Y0接线负载实验电路图

(2) 空载实验

将三相空载断开做空载模拟实验, 接线如图9所示。将高压侧电压调到250 V, 记录高压侧的功率和高压侧电压。

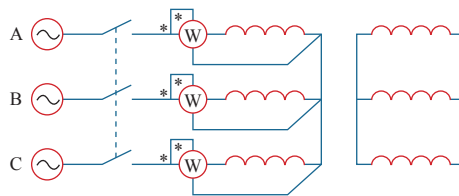


图9 变压器Y-Y接线空载实验电路图

(3) 短路实验

将三相短路如图10所示搭建模型做短路实验, 将低压侧的电流分别调到0.2 A、0.6 A和1 A, 分别记录高压侧的功率和高压侧电压。

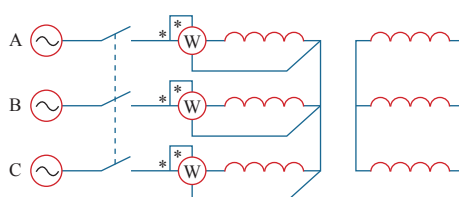


图10 变压器Y-Y接线短路实验电路图

上述实验数据如表3所示。

3.3.2 数据分析

根据实验数据得出损耗曲线如图11所示。分析同上述Y-Δ接线变压器损耗不平衡度变

表3 变压器Y-Y0连接时测得数据表

		负载实验									空载实验		短路实验		
Y-Y0 接线	负载电阻/Ω	A	180	136	65.1	57.4	34.1	34.1	34.1	40.9	空载		0	0	0
		B	180	180	82	180	82	124	180	79.1	空载	空载	0	0	0
		C	180	180	180	180	180	180	180	180	空载	空载	0	0	0
	高压侧功率/W	A	34	36	40	46	45	52	54	20	76	1.5	0.4	4.4	14
		B	34	32	3.9	28	36	31	29	50	16	1.5	0.2	4	14
		C	35	32	28	30	28	30	30	38	28	3	1	5	14
	高压侧总损耗/W		103	100	107	104	112	113	113	108	120	6	1.6	13.4	42
	低压侧功率/W	A	30	35	38	49	45	51	55	0	90	0	0	0	0
		B	31	28	35.5	22	32	25	20	57	0	0	0	0	0
		C	31.5	27	17.5	19	13.5	14.5	15	33.5	0	0	0	0	0
	不平衡度		0.05	0.27	0.68	1	1.04	1.21	1.33	1.89	3	0	0	0	0
	变压器损耗/W		10.5	10.0	16.0	14.0	21.5	22.5	23.0	17.5	30.0	6.0	1.6	13.4	42.0
	低压侧电流/A	A	0.4	0.5	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3	0.0	1.5	0.0	0.2	0.6	1.0
		B	0.4	0.4	0.7	0.3	0.6	0.4	0.3	0.9	0.0	0.0	0.2	0.6	1.0
		C	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.0	0.0	0.3	0.6	1.0
	高压侧相电压/V	A	257	241	187	201	161	171	171	255	243	250	10	25	40
		B	256	242	198	215	187	199	199	243	288	249	11	24	39
		C	259	242	196	202	172	178	178	271	244	250	11	24	40
	低压侧相电压/V	A	77	72	55	58	45	48	49	78	69	76	0	3	6
		B	77	73	58	65	55	59	62	72	80	77	0	3	7
		C	76	71	58	60	50	52	53	80	73	76	0	3	7

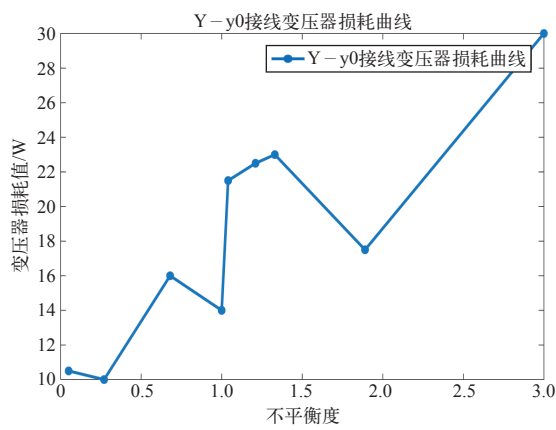


图11 变压器Y-y0连接损耗曲线

化实验数据分析，主要有以下两点。

1) 曲线中出现了不平衡度增加，但变压器损耗有下降的点。在总负荷不变的情况下，由于不同相负荷不同引起的相间不平衡度，变压器的损耗也不同，并且其中有最大值和最小值，三相平衡时最大值和最小值相等。当较小不平衡度对应变压器损耗最大值大于较大不平衡度对应变压器

损耗的最小值，这时就会使变压器损耗曲线下降。

2) 从图11中可以看出，在总负荷不变的情况下，配电变压器的损耗在大趋势上随着不平衡度的增加总体上是增大的。

4 结束语

针对配电变压器三相负荷不平衡对配电变压器内部损耗的影响，经过对配电变压器Y-Δ接线和Y-Y接线时变压器损耗随三相负荷不平衡的影响的两个实验和相应数据分析论证，可以得到以下结论：

1) 在总负荷不变的情况下，变压器的损耗在大趋势上随着不平衡度的增加而增大，但也有不平衡度增加变压器损耗降低的情况。提出了三相负载不平衡度提高不一定使变压器损耗增加的观点，不同的不平衡度可以对应有不同的负荷分配情况。

2) 在相同负载的条件下，配电变压器相间负

载平衡与否, 变压器的空载损耗不变, 但变压器的负载损耗会发生较大的变化。调整变压器相间的不平衡负载, 则降低相间负载不平衡度, 从而可以有效地降低变压器的损耗。

3) 在总负荷不变的情况下, 由于不同相负荷不同引起的相间不平衡度, 变压器的损耗也不同。同一不平衡度, 变压器的损耗值有多个, 并且其中有最大值和最小值, 三相平衡时最大值和最小值相等。当较小不平衡度对应变压器损耗最大值大于较大不平衡度对应变压器损耗的最小值, 这时就会使变压器损耗曲线下降。调整不平衡度即可以一定程度上降低配电变压器损耗。

4) Y- Δ 和Y-Y对比分析: 从数据中可以看出, 在三相不平衡时, 配电变压器Y- Δ 接法比配电变压器Y-y0接法来得更稳定。

对此, 应加强对配电变压器三相负荷的监控, 及时调整负荷, 使三相负荷尽量保持平衡。

因此, 在电网运行中, 应该经常测量三相负荷, 并进行调整, 使之平衡, 将会节能降损、提高电压质量及产生一定的经济效益。

参考文献

- [1] 陈磊, 胡晓菁, 史红辉. 配电变压器三相不平衡解决方案及控制策略 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37 (3): 95-99.
- [2] 赵晋泉, 刘绪, 林昌年, 等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化 [J]. 电力系统自动

化, 2016, 40 (13): 13-18.

- [3] 李萍. 配电变压器三相负荷不平衡对低压线损率的影响 [J]. 黑龙江科技信息, 2009 (29): 62-62.
- [4] 梁志祥. 如何减少配电网三相不平衡运行的配网线损 [J]. 建材技术与应用, 2008 (1): 18-19.
- [5] 罗昭波. 配电变压器三相平衡与无功自动补偿 [J]. 农村电气化, 2007 (7): 52-53.
- [6] 梅岭芳. 配电网的三相平衡 [J]. 工业加热, 2007, 36 (5): 62-63.
- [7] 叶伟杰. 江西电网配电变压器三相不平衡综合治理措施研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [8] 卢永辉. 供配电系统电压三相不平衡问题探讨 [J]. 科技展望, 2015 (5).
- [9] 周恒逸, 齐飞, 毛柳明, 等. 基于SVG调节配电变压器三相不平衡电流的应用研究 [J]. 高压电器, 2016 (5): 48-53.
- [10] 杨云龙, 王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法 [J]. 电网技术, 2004, 28 (8): 73-76.
- [11] 张鹏, 罗建, 吉畅, 等. 低压配电网三相不平衡负载参数的辨识方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (24): 90-95.
- [12] 徐辉. 配电变压器三相负荷不平衡对变压器损耗影响的仿真实验研究 [J]. 华东科技, 2014 (12): 280-281.

(收稿日期: 2017-01-14) EA

(上接第48页)

- [6] 邵苏杰, 郭少勇, 邱雪松, 等. 基于加权队列的无线智能电网通信网采集数据流量调度算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36 (5): 1209-1214.
- [7] 钟士元, 郑蜀江, 李映雪, 等. 基于物联网技术的配电网线路动态扩容方法研究 [J]. 电子技术与软件工程, 2015, 10 (21): 34.
- [8] 褚格林. 通信运营商客户流量业务使用行为意向实证研究 [J]. 系统工程, 2014, 32 (8): 117-126.
- [9] 叶春明, 单洪, 马涛, 等. 面向战场通信业务的

网络流量建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26 (7): 1527-1534.

- [10] 何高峰, 杨明, 罗军舟, 等. Tor匿名通信流量在线识别方法 [J]. 软件学报, 2013, 24 (3): 540-556.
- [11] 张岚, 高鹏, 王澄. 南方电网配电网自动化通信系统的建设 [J]. 电力系统通信, 2010, 31 (11): 20-24.
- [12] 钟元高. 配电网通信系统方案研究 [J]. 电力系统通信, 2008, 29 (12): 42-44.

(收稿日期: 2017-09-17) EA