

[变压器]

变压器短路阻抗带电检测理论技术研究

文/广州供电局有限公司电力试验研究院 王海靖 王勇 覃煜 莫文雄 张行 顾春晖 范伟男

变压器作为电力系统中的一个重要组件，其安全运行对于保证电网的可靠性意义重大。随着电力系统的发展，对发、输和供电的可靠性要求越来越高。同时，随着在线监测、模式识别和计算机信息处理技术的发展，电气设备从现行的计划检修向状态检修转变，已成为必然趋势。对电力设备进行在线监测是实现状态检修的基础和基本条件。

双绕组变压器短路电抗的在线监测

变压器短路阻抗是指变压器的负载阻抗为零时，变压器内部的等效阻抗。当发生变压器短路故障时，短路电抗也势必会发生变化。如果发现变压器短路电抗值的变化超过了某个限值，那么就应该考虑运行中的变压器的绕组因为短路故障的发生而产生的绕组变形。

图1为双绕组变压器“T”形等效电路图。为简便起见，以下讨论中变压器的各参数以及一次、二次电压电流均采用标么值。其中一次漏阻抗 $Z_1=R_1+jX_1$ ，二次漏阻抗 $Z_2=R_2+jX_2$ ，励磁阻抗 $Z_m=R_m+jX_m$ ，短路电抗 $Z_m=R_m+jX_m$ 。

假设

$$DU = \dot{U}_1 - (-\dot{U}_2') = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2' Z_2' = Z_1 \dot{I}_m - (Z_1 + Z_2') \dot{I}_2' \quad (1)$$

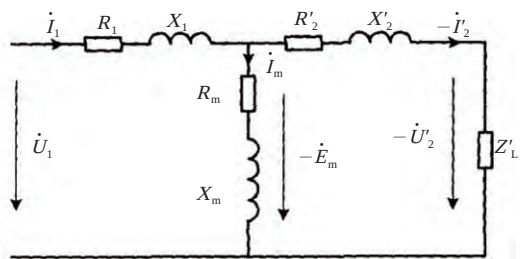


图1 双绕组变压器等效电路图

设 α 是 $\dot{I}_m$ 和 $-\dot{I}_2'$ 的夹角，那么 DU 的垂直于 $-\dot{I}_2'$ 的分量 DU_q 为

$$DU_q = (X_1 + X_2') \dot{I}_2' + (X_1 \cos \alpha - R_1 \sin \alpha) \dot{I}_m = X_{sh} \dot{I}_2' + (X_1 \cos \alpha - R_1 \sin \alpha) \dot{I}_m \quad (2)$$

由于 α 的存在，测量 DU_q 和 $\dot{I}_2$ 并不能算得 X_{sh} 。但是，考虑到励磁电流 $\dot{I}_m$ 垂直正比于 $\dot{E}_m$ 。在负载的情况下， $\dot{I}_m$ 也近似垂直正比于 $\dot{U}_1$ 。

在式(1)的右边有一项是 $Z_1 \dot{I}_m$ ，它表示励磁电流在一次漏阻抗上的压降。需要想办法消除该项，也就是补偿励磁电流在一次阻抗上的压降。

短路电抗为

$$X_{sh} = \left[\dot{U}_1 / K_{TJ} - (-\dot{U}_2' / \dot{I}_2') \right] \sin \Phi_{sh} \quad (3)$$

其中， Φ_{sh} 是电压向量 $\dot{U}_1 / K_{TJ} - (-\dot{U}_2')$ 和 $-\dot{I}_2'$ 的夹角，也就是短路阻抗的阻抗角。只需要做一次空载试验，就可以得出系数 $K_{TJ} = U_1 / U_2'$ 。

调节系数 K_{TJ} 与 Z_1 有关，所以，如果变压器一次侧有不同分接头，那么一定要记下不同分接位置下对应的调节系数。

三绕组变压器短路电抗的在线监测

1. 三绕组变压器的基本方程式

三绕组变压器绕组的布置图如图2所示。

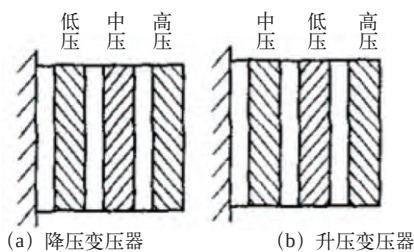


图2 三绕组变压器绕组的布置

(1) 磁动势方程

图3为三绕组变压器负载运行时的示意图。根据全电流定律，磁动势方程为 $\dot{F}_m = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 + \dot{F}_3$ 即 $\dot{I}_m = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ ，忽略励磁后 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0$ 。

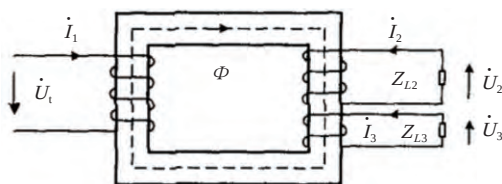


图3 三绕组变压器绕组的布置

(2) 电动势方程

三绕组变压器磁场的分布比较复杂，有由三个磁动势 $\dot{F}_1$ 、 $\dot{F}_2$ 、 $\dot{F}_3$ 联合产生的沿铁心闭合并与三个绕组同时交链的互感磁通或主磁通；有仅与一个绕组交链而与其他两个绕组不交链的主要沿非铁磁材料闭合的各绕组的自感漏磁通；还有仅与两个绕组交链而不与第三个绕组交链的主要沿非铁磁材料闭合的互感漏磁通。因此，为了更简便得到电动势方程式，采用耦合电路的方法，利用各绕组的自感和两绕组的互感列出微分方程式。此时，无论自感和互感都是与各绕组交链的全部磁通相对应，而不把主磁通和漏磁通分开。

通过电动势方程求得

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - (-\dot{U}'_2) = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) - \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_2) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{U}_1 - (-\dot{U}'_3) = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) - \dot{I}'_3(R'_3 + jX'_3) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}'_3 Z'_3 \end{cases} \quad (4)$$

每一个电抗所对应的磁通包含了主磁通和漏磁通，随之每一个电抗都是共同的励磁电抗加上一个自己特有的漏电抗。但是在每个等效电抗的表达式中，都是两个加的两个减的，因此励磁电抗便彼此抵消了，剩下的全是漏电抗。由此可见，等效电抗 X_1 、 X'_2 、 X'_3 具有漏电抗的性质，是不变的常数。

2. 三绕组变压器等效电路和折算法

三绕组变压器的简化等效电路图如图4所示。

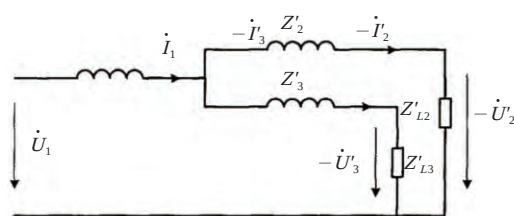


图4 三绕组变压器的简化等效电路图

由图知，三绕组变压器中，两个二次绕组之间是相互影响的，任意一个二次绕组的电压变化不仅取决于本绕组负载电流大小性质，而且与另外一个二次绕组中负载电流的大小及性质有关。因为一次电流 $\dot{I}_1$ 是由两个二次电流 $\dot{I}_2$ 和 $\dot{I}_3$ 决定的 $[\dot{I}_1 = -(\dot{I}_2 + \dot{I}_3)]$ ，因此一次漏阻抗压降 $\dot{I}_1 Z_1$ 的变化直接影响二次电压。

每个绕组的自感与其匝数的平方成正比，而两个绕组之间的互感与两个绕组匝数的乘积成正比。

3. 三绕组变压器短路电抗在线测量的基本原理

大容量三绕组变压器，励磁电流非常小，可以忽略励磁支路，如图3当变压器处于运行状态时，只要测出变压器三侧的电压以及电流，并将其折算到一次侧得出

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - (-\dot{U}'_2) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{U}_1 - (-\dot{U}'_3) = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}'_3 Z'_3 \end{cases} \quad (5)$$

而上式为不定方程组，所以需再增加两个工况数目，即

$$\begin{cases} \dot{U}_{1-} - (-\dot{U}'_{2-}) = \dot{I}_{1-} Z_1 - \dot{I}'_{2-} Z'_2 \\ \dot{U}_{1-} - (-\dot{U}'_{3-}) = \dot{I}_{1-} Z_1 - \dot{I}'_{3-} Z'_3 \end{cases} \quad (6)$$

由此组成一个超定方程组，通过松弛迭代法、矩阵变换等寻求 Z_1 、 Z'_2 和 Z'_3 的最小二乘解。

结束语

通过采用补偿励磁电流的方法，分析了双绕组变压器短路电抗的在线监测方法，从理论上证明了这一方法具有较好的精度。对于三绕组变压器，首先推导出其等效电路图，然后由两个工况下变压器三个绕组的电压电流，运用超松弛迭代法计算其短路电抗。通过MATLAB仿真，证明了其可行性。以上计算变压器短路电抗的方法是基于变压器的相电压和相电流，所以，变压器三相不对称的情况下，短路电抗的在线测量准确度不受影响。EA

(收稿日期：2018.10.02)

(编辑：朱金凤)