

500 kV 主变一次通流试验模型及方案的研究

邓洁清, 项巍

(江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 210036)

摘要: 500 kV 主变在电网中的作用非常重要, 其三侧 CT 变比和接线方式较为复杂, 所以在启动试验之前, 进行一次通流试验非常有必要, 可以确保主变电流回路的正确性, 从而进一步保证主变保护装置和电能计量装置的可靠性。先对主变一次通流模型进行分析计算, 然后在此基础上提出主变一次通流方案, 并结合 500 kV 梅里变电站 #3 主变对一次通流方案的具体实施进行详细说明。

关键词: 一次通流试验; 主变模型; 阻抗电压比; 短路损耗

Research of a flow-through test module and scheme for 500 kV transformer

DENG Jie-qing, XIANG Wei

(Jiangsu Electric Power Research Institute Corporation Limited, Nanjing 210036, China)

Abstract: 500 kV transformer is very important in energy power grid, the CT ratio and connection of transformer is complex, so a flow-through test is needed before startup test. It is to ensure right CT circuit connection and furtherly ensure credibility of transformer protection equipment and energy measurement equipment. Firstly, this paper analyses transformer module, then brings out a flow-through scheme, finally explains steps of a flow-through test in Meili substation #3 transformer in detail.

Key words: a flow-through test; transformer module; percent of impedance voltage; short circuit loss

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2008)07-0092-04

0 引言

500 kV 变电站中, 变压器(以下简称主变)是重要的一次设备, 造价昂贵, 承担着传输功率的重要作用。主变保护就是当主变发生故障时, 快速地跳开相应开关切除故障, 最大限度地减少主变所遭受的损坏^[1]。而主变三侧的 CT 变比不尽相同, 再加上主变低压侧绕组为三角形接法, 所以在主变基建安装中, 时有发生主变 CT 变比和二次绕组接入方式的错误, 从而导致保护误动或者电能计量不准。因此基建调试中, 在主变启动试验之前进行一次通流是很有必要的, 本文针对这种情况, 详细地对主变一次通流试验模型和方案进行分析。

1 500 kV 主变模型的建立

目前 500 kV 主变皆为三相三绕组变压器, 其中高中压侧为星形接法, 低压侧为三角形接法。由于一次通流时, 通流电源为三相正序对称电源, 故而只需对主变单相数学模型进行计算。先从双绕组变压器模型计算开始介绍, 进而推广到三绕组变压器

模型的计算。

1.1 双绕组变压器的模型计算

双绕组变压器模型如图 1 所示, 下面将对模型参数计算进行说明:

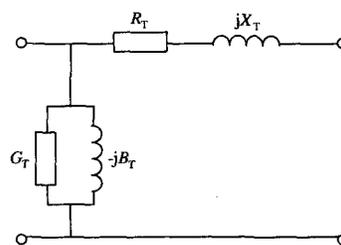


图 1 双绕组变压器单相模型图

Fig.1 Single phase module of double winding transformer

在电力系统计算中, 由于变压器短路损耗(也称为负载损耗) P_k 近似等于额定电流流过变压器时高低绕组中的总铜耗 P_{cu} 。变压器铜耗与电阻之间存在如下关系^[2]:

$$P_k \approx P_{cu} = I_N^2 R_T, \text{ 从而得出:}$$

$$R_T = P_K / I_N^2 \quad (1)$$

其中: I_N 为变压器高压侧额定相电流。

由于大容量变压器的阻抗中以电抗为主, 亦即变压器的电抗和阻抗数值上接近相等, 可近似认为, 变压器的短路电压比 $U_K\%$ (也称为阻抗电压比) 与变压器的电抗如下关系:

$$U_K\% \approx I_N X_T / U_N, \text{ 从而得出:}$$

$$X_T \approx U_K\% U_N / I_N \quad (2)$$

其中: U_N 为变压器高压侧额定相电压。

变压器的励磁支路可以用导纳表示, 其电导 G_T 对应的是变压器的铁耗 P_{Fe} , 因变压器的铁耗近似于变压器的空载损耗 P_0 , 从而可以得出 $G_T \approx P_0 / U_N^2$ 。变压器空载电流 I_0 中流经电纳的部分 I_b 占很大比重, 可以认为 I_b 近似于 I_0 , 从而可以得出 $B_T \approx I_0 / U_N$ 。

1.2 绕组变压器的模型计算

三绕组变压器的模型如图 2 所示, 下面将对模型参数计算进行说明:

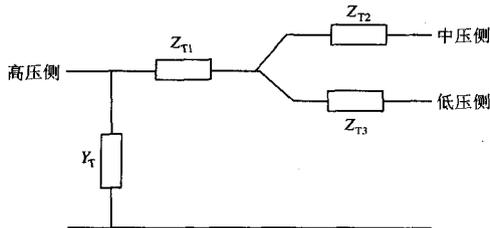


图 2 三绕组变压器单相模型图

Fig.2 Single phase module of three winding transformer

目前已在系统中使用的 500 kV 三绕组变压器高压侧额定容量 S_h 和中压侧额定容量 S_m 相等, 而低压侧额定容量 S_l 较小。制造厂提供的往往是三个绕组两两作短路试验时测得的短路损耗, 但是在作高低压、中低压短路试验时, 短路损耗是以低压侧额定容量作为基准的, 所以在计算中需要将短路损耗归算到高压侧, 具体规算公式如下所示:

$$P_{K(1-3)} = P'_{K(1-3)} \left(\frac{S_h}{S_l} \right)^2$$

其中: $P_{K(1-3)}$ 是以高压侧额定容量为基准的短路损耗, $P'_{K(1-3)}$ 是以低压侧额定容量为基准的短路损耗。

根据已经规算到高压侧的短路损耗计算出变

器各侧的短路损耗, 如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} P_{K1} &= \frac{P_{K(1-2)} + P_{K(1-3)} - P_{K(2-3)}}{2} \\ P_{K2} &= \frac{P_{K(1-2)} + P_{K(2-3)} - P_{K(1-3)}}{2} \\ P_{K3} &= \frac{P_{K(2-3)} + P_{K(1-3)} - P_{K(1-2)}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

然后根据双绕组变压器计算 R_T 的方法计算出三绕组变压各侧的 R_T (R_{T1} 为高压侧电阻, R_{T2} 为中压侧电阻, R_{T3} 为低压侧电阻)。

在计算电抗时, 需要注意的是, 制造厂家提供的短路电压比总是以高压侧额定容量为基准的, 所以就不需要规算了。利用以下公式, 可以得出三绕组变压器各侧的短路电压比:

$$\begin{aligned} U_{K1}\% &= \frac{U_{K(1-2)}\% + U_{K(1-3)}\% - U_{K(2-3)}\%}{2} \\ U_{K2}\% &= \frac{U_{K(1-2)}\% + U_{K(2-3)}\% - U_{K(1-3)}\%}{2} \\ U_{K3}\% &= \frac{U_{K(2-3)}\% + U_{K(1-3)}\% - U_{K(1-2)}\%}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

然后根据双绕组变压器计算电抗 X_T 的方法计算出三绕组变压各侧的电抗 X_T (X_{T1} 为高压侧电抗, X_{T2} 为中压侧电抗, X_{T3} 为低压侧电抗)。至于三绕组变压器导纳的求解方法和双绕组变压器的方法相似。

1.3 梅里变电站 3 号主变模型的建立

梅里变 3 号主变是 ABB 公司制造的三相分体式变压器, 额定容量为 334000/334000/9000kVA,

额定电压为 $\frac{505}{\sqrt{3}} / \frac{230}{\sqrt{3}} / 36$ kV, 额定电流为 $1145.5 / 2515.2 / \frac{4330.3}{\sqrt{3}}$ kA。厂家的试验报告提

供了阻抗电压及负载损耗试验表和空载损耗及空载电流试验表(见表 1)。

从表 1 中可以看出阻抗电压比是以高压侧额定容量为基准的, 其中 $U_{K(1-2)}\%$ 为 14.79、 $U_{K(2-3)}\%$ 为 31.77、 $U_{K(1-3)}\%$ 为 50.63, 根据公式 (4) 可以得出 $U_{K1}\%$ 为 16.825、 $U_{K2}\%$ 为 -2.035、 $U_{K3}\%$ 为 33.805, 而后根据公式 (2) 可以得出 X_{T1} 为 42.84、 X_{T2} 为 -5.182、 X_{T3} 为 86.08。

表 1 阻抗电压及负载损耗测量^[3]

Tab.1 Measurement of impedance voltage and load loss

绕组	短路电压比试验			短路损耗试验		
	施加电 流/A	阻抗 电压 /(%)	参考容 量/MVA	施加 电流 /A	负载 损耗 /kW	参考 容量 /MVA
高压-中压	1145.6	14.79	334	1145.6	419.8	334
中压-低压	2515.2	31.77	334	677.7	113.4	90
高压-低压	1145.6	50.63	334	308	114.9	90

从表 1 中可以看出高压-低压、中压-低压短路损耗是低压侧额定容量为基准的,所以需要规算到高压侧,得出规算后的短路损耗: $P_{K(1-3)}$ 为 1582 kW、 $P_{K(2-3)}$ 为 1561 kW,根据公式 (3) 得出 P_{K1} 为 220.4 kW、 P_{K2} 为 199.4 kW、 P_{K3} 为 199.4 kW、1361.6 kW。而后根据公式 (1) 可以得出 R_{T1} 为 0.167、 R_{T2} 为 0.152、 R_{T3} 为 1.038。

表 2 空载损耗及空载电流测量^[3]

Tab.2 Measurement of no-load loss and no-load current

电压 /V	空载电流 /A	空载损耗/kW
380	0.0378	12.7

从表 2 中的数据可以得出变压器励磁导纳: G_T 为 5.17×10^{-5} 、 B_T 为 7.17×10^{-5} 。根据以上的分析计算可以得出梅里变 3 号主变的模型数据(数据都已折算到高压侧): $Z_{T1} = 0.167 + j42.84$ 、 $Z_{T2} = 0.152 - j5.182$ 、 $Z_{T3} = 1.039 + j86.08$ 、 $Y_T = 5.17 \times 10^{-5} - j7.17 \times 10^{-5}$ 。

2 一次通流方案分析

2.1 一次通流方案概况说明

主变一次通流就是让三相对称电流流过主变三侧的套管 CT、中性点 CT、高压侧独立 CT、中压侧独立 CT,从而验证 CT 变比和二次绕组的接入方式,以保证主变启动试验的顺利进行。这里需要说明的是:由于主变的励磁导纳很小,流过的励磁电流很小,所以一次通流试验可以不需要考虑励磁导纳的影响。一次通流方法和变压器出厂短路试验相似,两两绕组分别进行通流,从而保证主变各侧 CT 全部流过短路电流。为了保证通流时短路阻抗较小,所以选择高压-中压侧通流、中压-低压侧通流。在高压-中压侧通流试验中,通常是在中压侧加电源,将高压侧三相短接构成回路,通过短路电流来校验主变中压侧独立 CT、套管 CT、高压侧套管 CT、中性点 CT 变比和二次绕组极性。电源电压不变的

情况下,在中压侧加电源所得的短路电流要比在高压侧加电源所得的短路电流大,这样可以方便 CT 二次电流的校验。在中压-低压侧通流试验中,通常选择在中压侧电源,将低压侧三相短路构成回路,通过短路电流来校验主变低压侧短路 CT。由于主变低压侧为三角形接法,当主变为三相分体式,则其低压侧套管 CT 流过的短路电流为相电流,而当主变为三相共体式,则其低压侧套管 CT 流过的短路电流为线电流,所以选择在中压侧加电源,这样低压侧 CT 的校验会比较简单,但是这里存在一个问题:主变中压侧流过的短路电流较小,然而中压侧的相关 CT 校验已在高压-中压侧通流试验中完成了,所以这个问题无需考虑。

2.2 梅里变 3 号主变一次通流方案具体说明

梅里变 3 号主变的一次接线图如图 3 所示。

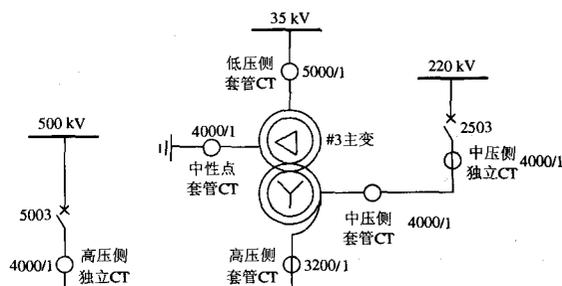


图 3 梅里变 3 号主变一次主接线图

Fig.3 Primary connection of Meili substation #3 transformer

(1) 高压-中压侧通流试验

根据前面的分析,在主变中压侧开关 2503 和独立 CT 之间加 380 V 动力电源(380 V 是线电压),拉开 2503 开关,拉开 5003 开关母线侧闸刀,合上 5003 母线侧地刀,构成电流回路。其折算到高压侧的模型如图 4 所示。

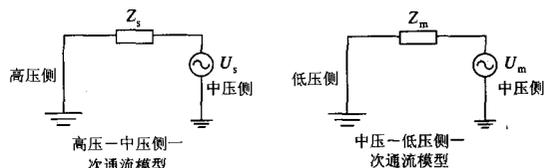


图 4 梅里 3 号主变一次通流模型图

Fig.4 Primary flow-through module of Meili substation #3 transformer

图中 U_s 为中压侧 380 V 动力电源折算到高压侧的相电压值,所以 $U_s = 220 \times 505 / 230 = 483$ V。 Z_s 为高压-中压侧通流折算到高压侧的短路阻抗,可以由两种方法计算得出。方法 1: Z_s 可以由前面已经计算出的主变模型得到,

$$Z_s = Z_{T1} + Z_{T2} = 0.167 + j42.84 + 0.152 -$$

$$j5.182 = 0.319 + j37.66$$

方法 2: 可以通过厂家提供的阻抗电压及负载损耗试验表计算得出, 从 $X_s \times I_{S1} / U_N = U_{K(1-2)} \%$ 可以

推导出 $X_s = \frac{U_{K(1-2)} \% \times U_N}{I_N}$, 其中 U_N 为高压侧额

定相电压 $\frac{505}{\sqrt{3}}$ kV, I_{S1} 为短路电压比试验中高压一

中压侧施加电流 1145 A, 通过计算得出 $X_s = 37.6$ 。

从 $(I_{S2})^2 \times R_s = P_{K(1-2)}$ 可以推导

$$R_s = \frac{P_{K(1-2)}}{(I_N)^2} = \frac{419.8 \times 10^3}{(1145.6)^2} = 0.32, \text{ 其中 } I_{S2} \text{ 为短路}$$

损耗试验中高压一中压侧施加电流 1145 A。通过以上计算得出 $Z_s = 0.32 + j37.6$ 。由此可见, 两种方法计算得出的 Z_s 基本相似。此时高压侧一次电流

$$I_H = \frac{U_s}{Z_s} = \frac{483}{0.32 + j37.6} = 12.8 \text{ A, 高压侧独立 CT}$$

的二次电流值为 3.2 mA, 高压侧套管 CT 的二次电流值为 4 mA。而中压侧一次电流

$$I_M = I_H \times \frac{505}{230} = 28.1 \text{ A, 由于中压侧套管 CT 和}$$

独立 CT 变比都为 4000/1, 所以其二次电流值为 7 mA。由于变压器短路电抗远大于电阻, 所以一次通流电流滞后电压 90 度, 根据此角度, 可以对 CT 二次绕组的接入方式进行检查。

(2) 中压—低压侧通流试验

在主变中压侧开关 2503 和独立 CT 之间加 380 V 动力电源, 合上低压侧母线地刀, 构成电流回路。其折算到中压侧模型如图 4 所示, U_m 为中压侧 380 V 动力电源的相电压值 220 V, Z_m 同样也有两种计算方法, 方法 1: 通过 1.3 计算出的主变模型可以得出折算到高压侧的中压—低压侧短路阻抗 $Z'_m = Z_{T2} + Z_{T3} = 1.191 + j80.898$, 然后将 Z'_m 折

$$\text{算到中压侧即得出 } Z_m = Z'_m \times \left(\frac{505}{230}\right)^2 = 0.25 +$$

$j16.78$ 。方法 2: 可以通过厂家提供的阻抗电压及负载损耗试验表计算得出, 从 $X_m \times I_{m1} / U_{Nm} =$

$$U_{K(2-3)} \% \text{ 可以推导出 } X_m = U_{K(2-3)} \% \times U_{Nm} / I_{m1},$$

其中 U_{Nm} 为中压侧额定相电压 $\frac{230}{\sqrt{3}}$ kV, I_{m1} 为短

路电压比试验中中压—低压侧施加电流 2515 A, 通

过计算得出 $X_m = 16.77$ 。从 $(I_{m2})^2 \times R_m = P_{K(2-3)}$ 可

以推导 $R_m = \frac{P_{K(2-3)}}{(I_{m2})^2} = \frac{113.4 \times 10^3}{(677.7)^2} = 0.25$, 其中

I_{m2} 为短路损耗试验中中压—低压侧施加电流 677.7 A, 从而得出 $Z_m = 0.25 + j16.77$ 。由此可见, 两种方法计算得出的 Z_m 基本相似。此时中压侧一次电流

$$I_m = \frac{U_m}{Z_m} = \frac{220}{0.25 + j16.77} = 13.1 \text{ A, 而低压侧一}$$

次电流 $I_L = I_m \times \frac{230}{\sqrt{3} \times 36} = 48.3 \text{ A}$, 低压侧套管

CT 的二次电流值为 9.7 mA, 同样电流滞后电压 90°。这里还需要说明的是: 如果低压侧有独立 CT, 或者主变为三相共体式变压器, 则其流过的一次电流需要在以上低压侧一次电流的基础上乘以 $\sqrt{3}$ 。

3 总结

通过以上的分析可以看出, 主变一次通流可以方便准确地检查主变电流回路, 有效地保证了主变启动试验顺利进行。但是需要指出的是, 当使用站内 380 V 动力电源作为通流电源时, 电流较小, 这就需要高精度的相位表进行测量, 所以建议最好使用专门的一次通流设备, 以保证一次电流足够大来方便电流二次回路的检查。其他电压等级的主变一次通流方案和 500 kV 主变一次通流类似, 但是在计算主变模型时, 需要注意阻抗电压比和短路损耗的基准。

参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principle of Electrical System's Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
CHEN Heng. Steady State Analysis of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [3] 电力变压器试验报告[Z]. 重庆: ABB 变压器有限公司. Test Paper of 500 kV Transformer[Z]. Chongqing: ABB Transformer Co., Ltd.

收稿日期: 2007-08-14; 修回日期: 2007-09-20

作者简介:

邓洁清 (1977-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护的试验与研究; E-mail: djq0905@163.com

项巍 (1981-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护的试验与研究。