

静止变频器系统变压器短路阻抗的算法研究

石祥建¹, 司红建², 闫伟¹, 牟伟¹, 施一峰¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 江苏沙河抽水蓄能发电有限公司, 江苏 溧阳 213333)

摘要:文中通过对静止变频器(SFC)系统的研究,提出一种新的变压器短路阻抗计算方法。该方法利用直流电压和晶闸管换相时间,计算变压器短路阻抗。并在江苏某抽水蓄能电站 SFC 上通过实验验证该方法的正确性,结果表明,该方法计算精度高,方便实用,有较高的应用价值。该方法还适用于直流输电系统、励磁系统中变压器短路阻抗的计算。

关键词:SFC; 变压器; 短路阻抗; 漏感

中图分类号:TM934

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)04-0053-03

静止变频器(SFC)是大中型抽水蓄能电站的重要核心设备,承担抽水蓄能机组抽水工况下的机组启动任务。静止变频器主要由变压器、电抗器、功率桥构成,变压器对 SFC 系统的可靠稳定运行至关重要。短路阻抗是变压器的重要技术指标,它对供电系统的稳定性、对负载的供电质量等都有重要的意义^[1]。短路阻抗还是判断变压器绕组有无变形的重要依据^[2],是工程上核算变压器容量的常用方法^[3,4]。

工程上测量变压器短路阻抗通常有 2 种方法。一是采用变压器短路阻抗测试仪。在系统停运和变压器二次侧短路情况下,使用阻抗测试仪对变压器进行小电流测试。再将测试结果折算到额定电流,计算变压器短路阻抗。事实上,变压器短路阻抗测试仪的输出功率很小,常用的功率范围是输出电压 0~10 V,输出电流 0~10 A。这种用小电流下测得的短路阻抗来代替额定电流下短路阻抗的方式,存在较大的试验误差。按照国标规定测定变压器短路阻抗时,短路电流要大于额定电流的 50%,才认为结果是可靠的。二是变压器短路阻抗标准测试方法。将变压器二次侧短路,在变压器一次侧从 0 V 开始加压,加到高压侧电流为额定电流时,高压侧所加相电压与额定相电压之比的百分数即为变压器的短路阻抗。采用此方法测定变压器短路阻抗,需要配备调压器,变压器容量越大,所需的调压器容量也越大。大容量的调压器体积大,成本高,现场客户很少会专门配备一台大容量调压器,用于测定变压器短路阻抗。这种测定变压器短路阻抗的方法,一般会在变压器制造厂出厂试验时采用。本文通过对 SFC 系统的深入研究,推导出一种新的变压器短路阻抗计算方法。该算法简明清晰,易于理解。使用该方法可在 SFC 系统不停运的情况下,在额定电流或接近额定电流的工况下测量变压器短路阻抗,减少了短路阻抗的测试工作量,提高了短路阻抗的测量精度。

1 算法推导

该算法的核心思想是利用晶闸管换相时间与变压器漏感之间关系来计算变压器漏感,再由变压器漏感计算变压器短路阻抗。更重要的是,计算式中各电气量要方便现场测量,方法易于实施。换相重叠角计算式^[5]:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{\sqrt{2} I_d X_\gamma}{U_l} \quad (1)$$

式(1)中: α 为晶闸管触发角,rad; γ 为晶闸管换相重叠角,rad; I_d 为直流电流,A; U_l 为交流侧线电压,V; X_γ 为变压器短路阻抗有名值, Ω 。

输出直流电压平均值计算式^[5]:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2} U_l}{2\pi} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (2)$$

式(2)中: U_d 为直流电压平均值,V; U_l 为交流侧线电压,V; α 为晶闸管触发角,rad; γ 为晶闸管换相重叠角,rad。

晶闸管换相重叠角 γ 与换相时间 T_γ 关系式:

$$\gamma = 2\pi \times f_1 \times T_\gamma \quad (3)$$

式(2)、式(3)整理后可得:

$$\alpha + \frac{\gamma}{2} = \arccos \left[\frac{\pi \times U_d}{3\sqrt{2} U_l \times \cos(\pi \times f_1 \times T_\gamma)} \right] \quad (4)$$

式(4)中: α 为可控硅触发角,rad; γ 为可控硅换相重叠角,rad; U_d 为直流电压平均值,V; T_γ 为可控硅换相时间,s; U_l 为交流侧线电压,V; f_1 为交流侧电压频率,Hz。

式(1)、式(2)进行和差化积后两式相除整理后可得:

$$L_\gamma = \frac{U_d}{6f_1 \times I_d} \tan\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (5)$$

SFC 运行时,换相重叠角 γ 一般小于 20° ,那么 $r/2 \leq 10^\circ$,即 $r/2 \leq 0.175 \text{ rad}$ 。此时,可近似认为(γ 用弧度制表示):

$$\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \frac{\gamma}{2} \quad (6)$$

由式(3)、式(5)、式(6),整理可得,

$$L_\gamma = \frac{\pi \times U_d \times T_\gamma}{6I_d} \tan\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (7)$$

式(7)中: L_γ 为变压器漏感,H; U_d 为直流电压平均值,V; I_d 为直流电流,A; T_γ 为可控硅换相时间,s; α 为可控硅触发角,rad; γ 为可控硅换相重叠角,rad。

由式(7)得到变压器漏感,在忽略变压器直流等值电阻后,计算变压器短路阻抗。变压器直流等值电阻一般比电抗小很多,工程上计算变压器短路阻抗,忽略直流等值电阻是允许的。变压器短路阻抗百分数 u_k 的计算式如下:

$$u_k = \frac{2\pi \times f_N \times L_\gamma \times S_N}{U_N^2} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中: u_k 为变压器短路阻抗百分数,%; f_N 为50 Hz; L_γ 为变压器漏感,H; U_N 为变压器额定线电压,V; S_N 为变压器额定容量,V·A。

现场测得直流电压 U_d 和晶闸管换相时间 T_γ ,由式(4)、式(7)、式(8)三式联立,即可以得到变压器的短路阻抗值。

2 实验验证

本文在江苏某抽水蓄能电站 SFC 系统上进行变压器短路阻抗算法验证。该抽水蓄能电站有 2 台 50 MW 可逆式发电机组,静止变频器采用法国 Converterteam 公司研制的 SFC 系统,其系统结构如图 1 所示。

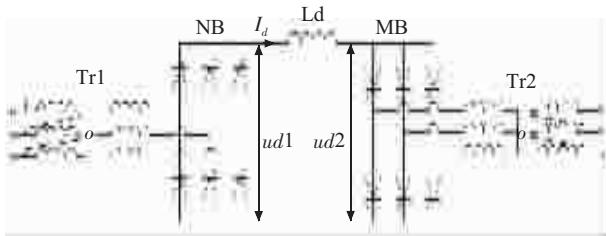


图 1 江苏某抽水蓄能电站 SFC 系统拓扑结构

图 1 中,Tr1 为输入变压器连接到工频 10.5 kV 母线,变压器变比 10.5 kV/1.4 kV,容量 4 MV·A,短路阻抗 9%;NB 为 6 脉动整流桥,Ld 为平波电抗器,MB 为 6 脉动逆变桥,Tr2 为输出变压器,变压器变比 10.5 kV/1.4 kV,容量 4 MV·A,短路阻抗 9%。SFC 系统额定直流电流=1 990 A, U_{d1} 、 U_{d2} 分别为整流桥侧和逆变桥侧直流电压。

现场测量时,通过电阻分压方法测得整流桥侧直流电压平均值和逆变桥侧直流电压平均值,通过示波器查看交流侧电压互感器二次侧波形,测得晶闸管换相时间。整流桥、逆变桥侧交流电压波形如图 2、图 3 所示,图 2、图 3 中电压的跌落是晶闸管换相导致的,电压跌落的时间,即为晶闸管换相时间。

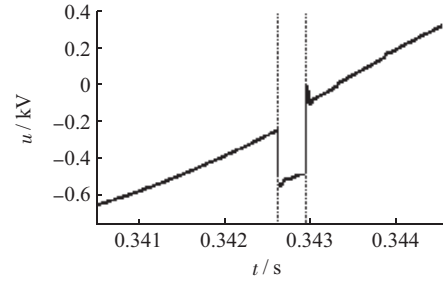


图 2 整流桥交流侧电压波形

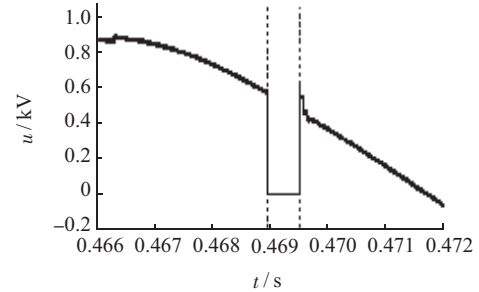


图 3 逆变桥交流侧电压波形

2.1 整流桥侧变压器短路阻抗计算

已知: $I_d=1\ 990\text{ A}$, $U_l=U_N=1\ 400\text{ V}$, $S_N=4\ 000\text{ kV}\cdot\text{A}$, $f_1=f_N=50\text{ Hz}$,变压器变比 10.5 kV/1.4 kV,变压器容量 4 000 kV·A,变压器标称短路阻抗 9%。

测量获得的数据: $U_{d1}=1\ 315\text{ V}$, $T_\gamma=0.36\text{ ms}$ 。由式(4)、式(7)、式(8)计算:

$$\alpha + \frac{\gamma}{2} = \arccos \left[\frac{\pi \times 1\ 315}{3\sqrt{2} \times 1\ 400 \times \cos(\pi \times 50 \times 0.36 / 1\ 000)} \right] = 0.8\text{ rad}$$

$$L_\gamma = \frac{\pi \times 1\ 315 \times 0.36}{6 \times 1\ 990 \times 1\ 000} \tan(0.8) = 0.000\ 128\ 3\text{ H}$$

$$u_k = \frac{2\pi \times 50 \times 0.000\ 128\ 3 \times 4 \times 10^6}{(1\ 400)^2} \times 100\% = 8.23\%$$

输入变压器实际短路阻抗为 9%,通过本方法计算结果为 8.23%。且计算结果满足工程需要。

2.2 逆变桥侧变压器短路阻抗计算

已知: $I_d=1\ 990\text{ A}$, $f_1=45\text{ Hz}$, $U_l=1\ 260\text{ V}$, $U_N=1\ 400\text{ V}$, $S_N=4\ 000\text{ kV}\cdot\text{A}$, $f_N=50\text{ Hz}$,变压器变比为 10.5 kV/1.4 kV,变压器容量为 4 000 kV·A,变压器标称短路阻抗 9%。

测量获得的数据: $U_{d2}=1\ 290\text{ V}$, $T_\gamma=0.52\text{ ms}$ 。由式(4)、式(7)、式(8)计算:

$$\alpha + \frac{\gamma}{2} = \arccos \left[\frac{\pi \times 1\ 290}{3\sqrt{2} \times 1\ 260 \times \cos(\pi \times 45 \times 0.52 / 1\ 000)} \right] = 0.707\text{ rad}$$

$$L_\gamma = \frac{\pi \times 1\ 290 \times 0.52}{6 \times 1\ 990 \times 1\ 000} \tan(0.707) = 0.000\ 150\ 8\text{ H}$$

$$u_k = \frac{2\pi \times 50 \times 0.000\ 150\ 8 \times 4 \times 10^6}{(1\ 400)^2} \times 100\% = 9.67\%$$

输出变压器实际短路阻抗为 9%，通过本方法计算结果为 9.67%。且计算结果满足工程需要。

3 结束语

本文通过对 SFC 系统的研究,提出一种新的变压器短路阻抗计算方法。该方法利用直流电压和晶闸管换相时间,计算变压器短路阻抗。该方法很好地解决了现有变压器短路阻抗测试方法存在的实施成本高、步骤复杂、精度不高等问题。在江苏某抽水蓄能电站 SFC 系统上通过实验验证该方法的正确性。试验结果表明,该方法不仅适用于整流桥侧工频工况下变压器短路阻抗的计算,还适用于逆变桥侧变频工况下变压器短路阻抗的计算。使用该方法计算变压器短路阻抗,不需要静止变频器系统停运,不需要解开变压器接线电缆,只需在静止变频器运行时,测得直流电压及晶闸管换相时间,就能得到准确的变压器短路阻抗值。本文提出的变压器短路阻抗计算方法,不仅适用于 SFC 系统,还适用于直流输电及励磁系统换流变压器短路阻抗的计算,该方法实际上是晶闸管三相全控整流或逆变系统变压器短路阻抗计算的普适方法。

参考文献:

- [1] 赵刚,施围,林海雪. 配电网短路阻抗测量方法的研究[J]. 电工技术杂志,2003(3):29-30,34.
- [2] 吴军,任士焱,程林. 变压器短路电压在线检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(S2):1170-1171.
- [3] 陆佳政,张红先,方针,等. 基于短路阻抗的配电变压器容量测试装置的研究与应用[J]. 电力设备,2008,09(1):45-48.
- [4] 孙恒峰,张扬,季楠,等. 低电压短路试验校核 110 kV 国际变压器容量[J]. 江苏电机工程,2011,30(6):57-59.
- [5] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

作者简介:

- 石祥建(1980),男,江苏徐州人,工程师,从事电力电子在电力系统中的应用研究、工业过程自动控制研究工作;
 司红建(1979),男,江苏南通人,工程师,从事设备技术管理工作;
 闫伟(1981),男,陕西咸阳人,工程师,从事电力电子在电力系统中的应用研究、发电机励磁系统研究工作;
 牟伟(1981),男,四川成都人,工程师,从事发电机励磁系统研究、电力电子在电力系统中的应用研究工作;
 施一峰(1979),男,江苏启东人,工程师,从事发电机励磁系统研究、电力电子在电力系统中的应用研究工作。

Algorithm Study of System Transformer Short Circuit Impedance in Static Frequency Converter

SHI Xiang-jian¹, SI Hong-jian², YAN Wei¹, MU Wei¹, SHI Yi-feng¹

(1. Nanjing NARI-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Shahe Pumped Storage Generation Co. Ltd., Liyang 213333, China)

Abstract: Through the study of Static Frequency Converter (SFC), a new method is proposed to calculate the short circuit impedance of transformer based on the direct voltage and commutated time of thyristor. Besides, experiment was carried out on the static frequency converter in a pumped storage plant of Jiangsu province, verifying the correctness of this method. The test result indicates that the practical method has high precision and the process is convenient, with high application value. The method is also fit for that of HVDC system and excitation system.

Key words: SFC; transformer; short circuit impedance; leakage inductance

下 期 要 目

- 提升特高压电网输电能力的方法
- 10 kV 线路故障引起主变差动保护动作的分析
- 有源滤波器在 6 脉中频炉谐波治理中的应用
- 风电场接地方式与零序保护整定计算
- 大容量冲击发电机短路电流衰减特性
- 换流变压器励磁涌流特性及其对差动保护的影响
- 110 kV 变电所单母线分段接线保护闭锁备自投分析
- 合同能源管理模式在闭式水泵高效节能泵改造上的应用