

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.06.021

合闸开关选相对容量试验的影响研究

张晋波, 者永祥, 刘浩军, 董 玮, 陈小柯

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要:容量试验中短路电流直流分量的大小直接影响电流过零点的 di/dt 与 TRV,对直流分量的精确控制直接关系到试验质量与效率。容量实验室通常控制 3 台独立的合闸开关分别进行选相合闸以产生满足要求的直流分量。文中运用理论分析方法找出了产生完全对称短路电流和最大非对称短路电流的选相方法,并对一种含有 Y/ Δ 变压器的回路进行了分析,总结了根据电流波形判断合闸开关关合顺序的方法。

关键词: 短路电流; 合闸开关; 选相; 对称; 非对称

Influence of Phase Selection of Making Switch on High Power Test

ZHANG Jinbo, ZHE Yongxiang, LIU Haojun, DONG Wei, CHEN Xiaoke

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The DC component of short-circuit current in high power test affects di/dt and TRV at zero crossing point, and the quality and efficiency of the test depend on accurate control of the DC component. In the high power test, three separate switches are used for phase-selection closing to obtain the required short-circuit current. In this paper, the phase selection methods for respectively generating the fully symmetrical and the maximum asymmetrical short-circuit current are obtained through theory analysis, and the method for setting closing time series according to current waveform is summarized. Besides, a circuit containing Y/ Δ transformer is analyzed.

Key words: short-circuit current; making switch; phase selection; symmetrical current; asymmetrical current

0 引言

GB/T 1984—2014 与 IEC 62271-100—2012 对于验证断路器的短路开断能力进行了规定,直流分量的大小直接影响电流过零点的 di/dt 与 TRV。虽然相关标准对直流分量规定了一定的允许偏差,但标准也规定“在任何情况下,试验站的目标应是标准规定的试验值^[1]”,而且从试验水平与试验质量角度出发,实验室应尽量使直流分量最接近标准的规定值,以保证各个实验室对产品的考核具有尽可能高的一致性。同时,实验室进行预期 TRV 的调试时,直流分量的大小直接影响结果的准确度^[2],这就需要精确控制直流分量。在容量实验室,通过控制 3 台独立的合闸开关分别进行选相合闸以产生直流分量满足要

求的短路电流。合闸开关分散性^[3]及回路的构成方式,决定了不仅需要正确的合闸选相方法,更需要根据已有电流波形对选相进行调整。

受电压等级和试验方式等不同条件的约束,很多短路试验回路需要中间变压器来满足参数要求,而此类变压器往往由 3 台单相变压器组合而成,其高/低压侧绕组可根据需要分别组成 Y/ Δ 、 Δ / Δ 、 Δ /Y^[4-6]等。当出现 Y/ Δ 的变压器组合时,低压侧合闸开关合两相,高压侧就会出现三相电流,对分析调整选相造成困难。文中分析总结了产生完全对称短路电流和最大非对称短路电流的选相方法,并对含有 Y/ Δ 变压器的回路如何判断合闸开关先后顺序进行了分析。通过此类分析,除了对正常试验进行有效调整外,还可以根据实际结果,对合闸开关可能存在的问题进行分析,以保证回路的安全运行。

收稿日期:2017-02-11; 修回日期:2017-03-21

1 短路电流特点与试验回路

三相交流电路中发生三相短路时, 短路电流 i 按照式(1)变化^[7]

$$i = i_{\text{ac}} + i_{\text{dc}} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (1)$$

式(1)中: I_m 为短路电流周期分量的幅值; α 为短路发生瞬间电源电压的相角; R 为每相电路的电阻; L 为电感; φ 为阻抗的功率因数角; ω 为电源的角频率。从式(1)中可以看出, 当 $\sin(\alpha - \varphi) = 1$ 时^[8-13], 短路电流的直流分量最大, 此时 $\alpha = \frac{\pi}{2} \pm n\pi + \varphi$ (n 为整数); 当 $\sin(\alpha - \varphi) = 0$ 时, 短路电流的直流分量为零, 此时 $\alpha = n\pi + \varphi$ (n 为整数)。

理论上, 纯感性回路的功率因数角 $\varphi = \frac{\pi}{2}$, 因此当短路起始时刻位于电源电压相位零点时, 直流分量最大, 短路起始时刻位于峰值时, 直流分量为零。但对于实际的试验回路, 选相时要考虑式(1)中的功率因数角。

在容量实验室, 为了满足选相的需求, 有 3 台独立的单相合闸开关可以分别进行控制, 试验回路见图 1。当进行对称短路电流开断试验时, 三相合闸开关依次合闸, 产生三相对称的短路电流。当进行非对称短路电流开断试验时, 三相合闸开关同时合闸, 产生一组某一相含有最大直流分量的三相短路电流。在实际操作中, 短路试验程序的起始时刻 θ 对应的电压相位及合闸开关的合闸时间是已知的, 需要利用这些已知条件来整定合闸开关动作的触发时刻, 以产生满足试验要求的短路电流。

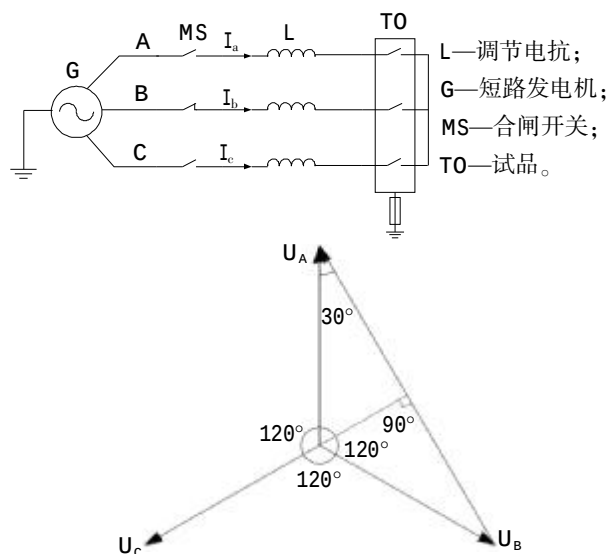


图 1 短路试验原理图与电压矢量图

Fig. 1 Picture for short-circuit test theory and voltage vector

2 对称与非对称短路电流的选相分析

2.1 对称电流

相关标准中要求对称短路电流开断试验中断路器刚分点的直流分量要小于等于 20%^[4], 在实际试验中, 3 台相互独立的合闸开关分别选相合闸, 尽量降低短路电流中的直流分量。假设 B 相合闸开关先预合, 此时并不构成三相回路, 不会产生短路电流, 见图 1。设定在 B 相合闸开关预合之后, A 相合闸开关先合闸, C 相合闸开关随后合闸。为方便分析, 假设回路为纯感性, 则电流的相位滞后电压 90° , 试验程序起始的 θ 时刻对应 A 相电压 U_a 的零点。当 A 相合闸以后, 在 A、B 相之间会流过短路电流 I_a 、 I_b , 且 $I_a = I_b$ 为线电流, 滞后线电压 U_{ab} 90° , 因此若要使线电流 I_a 、 I_b 的直流分量为零, 则需要 A 相合闸开关合在线电压 U_{ab} 的电压峰值处。当 C 相合闸开关合闸后, 电流 I_c 为相电流, 因此要使相电流 I_c 的直流分量为零, 则需要 C 相合闸开关合在相电压 U_c 的峰值。

电压的矢量图见图 1。 U_{ab} 超前 U_a 30° , U_c 超前 U_a 120° ^[14-20]。因此, U_{ab} 的电压峰值对应的时刻为 $\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6} \pm n\pi$ (n 为整数), 起始 θ 时刻后的第 1 个峰值对应的时间点为 3.33 ms。 U_c 的电压峰值对应的时刻为 $\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} \pm n\pi$ (n 为整数), 起始 θ 时刻后的第 1 个峰值对应的时间点为 8.33 ms。

利用 PSCAD 建立图 1 所示的回路, 运用上述时间点进行模拟仿真, 电流波形见图 2。由图 2 可以看出, 三相电流均对称。

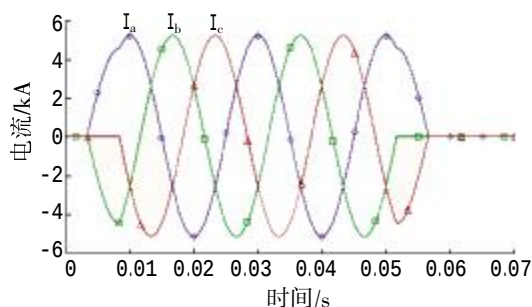


图 2 PSCAD 仿真对称电流波形

Fig. 2 Symmetrical current wave from PSCAD simulation

2.2 非对称电流

根据 GB/T 1984—2014(IEC 62271-100—2012)-6.102.10.1.2 的要求, 三相非对称短路试验对直流分量有严格的要求, 而且在 3 次有效开断过程中要求合闸选相依次向前移动 60° , 因此只有做到三相同时合闸才能使三次短路试验的直流分量都满足标准

的要求。与上述原理相同,若选相使得A相合闸时刻对应A相相电压的零点,即 $\alpha=n\pi$ (n 为整数)时,A相短路电流的直流分量可达理论最大值。但在实际的试验中,根据不同产品参数的要求,可以将选相整定稍微向后调整,使得A相的起始直流分量降低一些。B相预合后A相的第一个电压零点对应的时间点为10 ms。运用此时间点在PSCAD模型中进行仿真,电流波形见图3。为了说明问题,模型中线路为纯感性,因此直流分量未衰减。

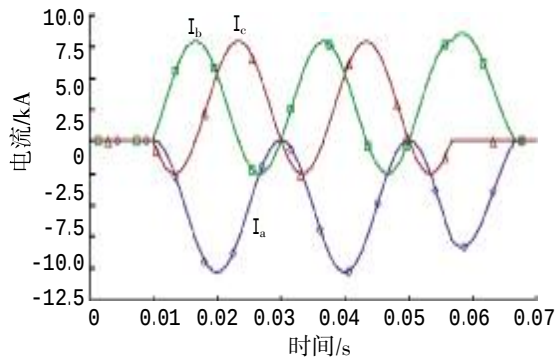


图3 PSCAD 仿真非对称电流波形
Fig. 3 Asymmetrical current wave
from PSCAD simulation

从图3的仿真结果可以看出,A相电流的直流分量达到了理论最大值(此处只说明极端情况,实际试验中需要根据试品所要求的具体参数对选相进行微调)。A、B、C三相相电压的零点之间相差 60° ,因此若要使B相产生最大的直流分量,则合闸选相需向前移动 60° 即3.3 ms,C相依次类推,这也是标准中对于T100a试验要求合闸选相依此前提移 60° 的理论依据。

3 回路中存在Y/Δ变压器时的合闸选相分析

上述无中间变压器的试验选相一般易于控制,但由于冲击发电机本身的输出电压等限制,此类试验的电压一般不会超过15 kV,而24、40.5 kV等电压等级的开关类产品的直接试验则必须采用中间变压器。即使用合成试验,也需要中间变压器以保证电流源回路的安全。

容量实验室一般采用3台独立的单相变压器进行组合,以便对应不同参数的试品进行回路调整,例如Δ/Δ、Δ/Y、Y/Δ等。在实际的试验过程中发现一些特殊的变压器连接型式的合闸选相需要进一步进行分析,如Y/Δ型。

当中间变压器为Y/Δ时,实验过程中发现当原边仅有两相合闸开关合闸时,副边已经产生了三相电流。尤其是非对称短路试验要求三相同时合闸的

条件时,需要根据已有的波形判断各开关的合闸先后顺序,用来指导后续的试验控制和调整。

含有中间Y/Δ变压器的试验原理图见图4(A相先合闸)。假设单台变压器的变比为1:3,由于联接组的型式,3台变压器的总变比为 $1:\sqrt{3}$,变压器原边与副边线圈绕向相同,同名端见图4。阻抗 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为原边线路的总阻抗折算到高压侧的值,由于三相实际线路的长短不同,三相阻抗略有差异,但差别很小,在理论分析时可近似相等,因此设 $Z_1=Z_2=Z_3=Z$ 。B相总是预合相,只要分析A、C相合闸开关的先后顺序即可。

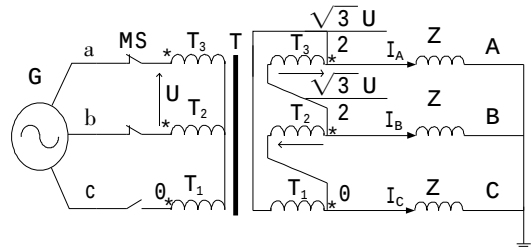


图4 含有中间Y/Δ变压器的试验原理图

Fig. 4 Test theory of circuit with Y/Δ type transformer

3.1 A相比C相先合闸

现分析从A、B相合闸开关合闸后到C相合闸开关合闸前这段时间的短路电流,运用网孔电流法,按照图4所示正方向,对副边的短路电流进行分析:

$$\begin{cases} I_A = \frac{\sqrt{3}U}{4Z} + 0 + 0 = \frac{\sqrt{3}U}{4Z} \\ I_B = -\frac{\sqrt{3}U}{4Z} - \frac{\sqrt{3}U}{4Z} + 0 = -\frac{\sqrt{3}U}{2Z} \\ I_C = 0 + \frac{\sqrt{3}U}{4Z} + 0 = \frac{\sqrt{3}U}{4Z} \end{cases}$$

由计算结果可以看出, $I_B = -2 \times I_A = -2 \times I_C$,即低压侧只合A、B两相时,高压侧会出现三相电流,B相的电流值为A、C两相电流值的两倍,A、C两相电流方向相同,且与B相电流方向相反。

3.2 C相比A相先合闸

现分析从B、C相合闸开关合闸后到A相合闸开关合闸前这段时间的短路电流,运用网孔电流法,规定的正方向见图5(C相先合闸)。对副边的短路电流进行分析:

$$\begin{cases} I_A = 0 + 0 + \frac{\sqrt{3}U}{4Z} = \frac{\sqrt{3}U}{4Z} \\ I_B = 0 + \frac{\sqrt{3}U}{4Z} + 0 = \frac{\sqrt{3}U}{4Z} \\ I_C = 0 - \frac{\sqrt{3}U}{4Z} - \frac{\sqrt{3}U}{4Z} = -\frac{\sqrt{3}U}{2Z} \end{cases}$$

由计算结果可以看出, $I_C = -2 \times I_A = -2 \times I_B$,即低压

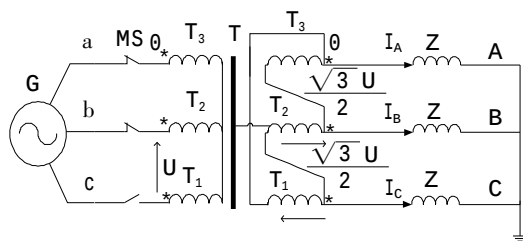


图5 含有中间 Y/Δ 变压器的试验原理图

Fig. 5 Test theory of circuit with Y/Δ type transformer
侧只合 B、C 两相时, 高压侧会出现三相电流, C 相的电流值为 A、B 两相电流值的两倍, A、B 两相电流方向相同, 且与 C 相电流方向相反。

3.3 PSCAD 模拟仿真

运用软件 PSCAD 建立回路图, 对此试验进行模拟仿真, 通过仿真结果来分析短路电流, 设定 B 相合闸开关在 0.005 s 预先合闸, A 相合闸开关在 0.01 s 合闸, C 相合闸开关在 0.015 s 合闸。仿真结果见图 6。

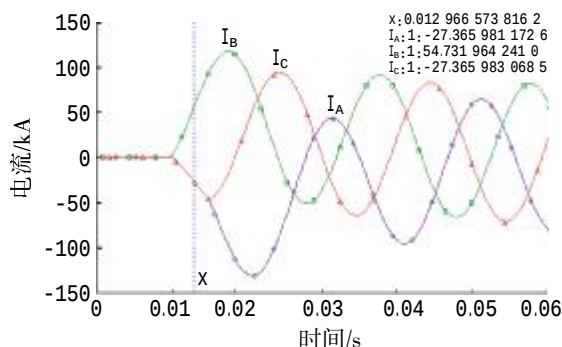


图6 PSCAD 仿真 A 相先合闸的短路电流波形

Fig. 6 Short-circuit current wave with phase A close first from PSCAD simulation

从图 6 所示的仿真结果中可以看出, 在 0.01~0.015 s 之间, 即只有 A、B 两相合闸开关合闸的时候, 高压侧便已出现三相电流。在时间轴上选取一个点来读取三相电流的数值: B 相的电流值为 A、C 两相电流值的两倍, A、C 两相电流方向相同, 且与 B 相电流方向相反。

3.4 结果分析

1) 如果三相短路电流有明显的拐点, 则在 B 相预合的前提下, 从短路电流起始点到拐点的时间差就是 A、C 两相合闸开关合闸先后的时间差;

2) 如果从电流起始到拐点之间的三相电流的关系为 B 相是 A、C 的两倍, A、C 两相电流方向相同与 B 相电流方向相反, 则 C 相落后于 A 相;

3) 如果从电流起始到拐点之间的三相电流的关系为 C 相是 A、B 的两倍, A、B 两相电流方向相同与 C 相电流方向相反, 则 A 相落后于 C 相。

4) 在实施非对称短路电流试验(T100a)时, 可根据上述 3 条结论, 对三相合闸开关的时间控制加以

调整, 以满足试验对于合闸开关三相同步合闸的要求。对于对称短路电流试验, 也可以此为参考来进行选相调整, 从而得到对称短路电流。

实际试验中的一张半电压回路检查的电流波形图见图 7(三相未同时合闸)。从图 7 中可以看出, A、C 两相电流在 0.01 s 至大约 0.013 s 内是重合在一起的, 符合结论 2), 三相没有同时合闸, 且 A 相先于 C 相合闸开关合闸。依据上述原理在图 7 波形基础上进行选相调整而得到正式试验的电流波形图见图 8(三相同时合闸)。

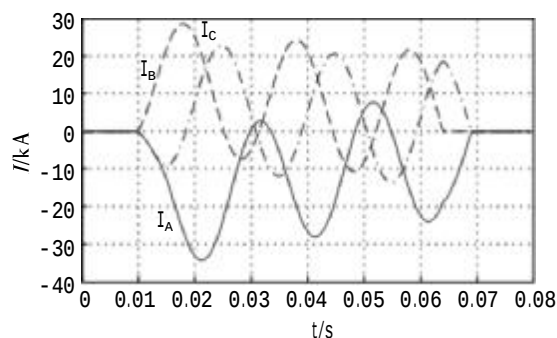


图7 含 Y/Δ 型变压器的回路短路试验电流波形图

Fig. 7 Short-circuit current wave with Y/Δ type transformer

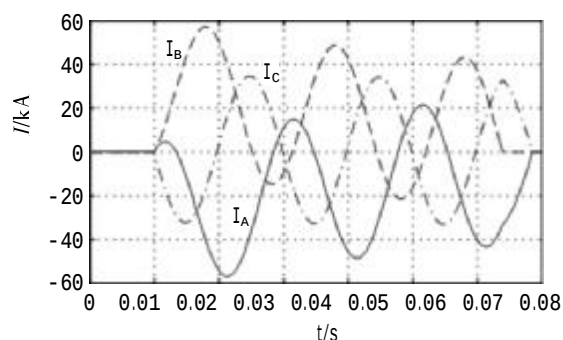


图8 含 Y/Δ 型变压器的回路短路试验电流波形图

Fig. 8 Short-circuit current wave with Y/Δ type transformer

4 结论

文中对容量试验中短路电流直流分量控制的方法进行了分析, 并结合具体试验回路, 得出如下结论:

1) 对于纯感性回路, 电流滞后于电压 90° , 若合闸开关关合在相(线)电压的零点, 则产生含有最大直流分量的非对称相(线)电流。若合闸开关关合在在相(线)电压的峰值, 则产生直流分量为零的对称的相(线)电流;

2) 对含有 Y/Δ 型变压器的试验回路, 其合闸依据仍符合 1) 描述的感性回路电压与电流间的关系, 在需要三相合闸开关同时合闸时, 可以根据已有波形中三相电流之间的关系进行判断并调整选相以使

三相同时合闸。

以上分析结果,对于实验室实施相关试验时的合闸选相控制具有很好的指导意义,同时,当合闸选项未达到预期效果时,通过文中的分析结果,可以快速判断是什么原因导致合闸分散性,便于实验室更好的完成对应的试验。

参考文献:

- [1] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.
LI Guangqi. Transient state analysis of power system[M]. Beijing:China Power Press,2007.
- [2] GB/T 1984—2014 高压交流断路器[S].2014.
GB/T 1984—2014 High-voltage alternating current circuit-breakers[S].2014.
- [3] 阎治安,崔新艺,苏少平.电机学[M].西安:西安交通大学出版社,2006.
YAN Zhi'an, CUI Xinyi, SU Shaoping. Electromechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,2006.
- [4] 邱关源,罗先觉.电路[M].北京:高等教育出版社,2006.
QIU Guanyuan, LUO Xianjue. Electric Circuits[M]. Beijing: Higher Education Press,2006.
- [5] ALEXANDER C K, SADIKU M O. Fundamentals of electric circuits[M]. USA: McGraw-Hill Inc.,2000.
- [6] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breaker [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2000.
- [7] IEC 62271-100—2012 High-voltage switchgear and controlgear-Part 100: High-voltage alternating-current circuit breakers[S].2012.
- [8] SAADAT H. Power system analysis[M]. USA: McGraw-Hill Incorporated,1999.
- [9] BERGEN A R, VITTAL V. Power system analysis[M]. USA: Prentice-Hall Inc.,2000.
- [10] 周守昌.电路原理[M].2版.北京:高等教育出版社,2004.
ZHOU Shouchang. Electric circuit theory[M]. 2nd ed.. Beijing: Higher Education Press,2004.
- [11] 陈有希.电路理论基础[M].3版.北京:高等教育出版社,2004.
CHEN Youxi. Theory of electric circuit[M]. 3rd ed.. Beijing: Higher Education Press,2004
- [12] 邱关源.现代电路理论[M].北京:科学出版社,2001
QIU Guanyuan. Modern theory of electric circuit[M]. Beijing: Science Press,2001
- [13] BOYLESTAD R L. Introductory circuit analysis[M]. 9th ed.. USA: Prentice-Hall Inc.,2000.
- [14] 吴锡龙.电路分析[M].北京:高等教育出版社,2004.
WU Xilong. Analysis of electric circuit[M]. Beijing: Higher Education Press,2004.
- [15] FITZGERALD A E, KINGSLEY C, Jr, UMANS S D. Electric machinery[M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [16] 许实章.电机学[M].北京:机械工业出版社,1995.
XU Shizhang. Electromechanics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,1995.
- [17] 南京工学院.电力系统[M].北京:电力工业出版社,1980.
Nanjing Institute of Technology. Power system[M]. Beijing: Power Industry Press,1980.
- [18] GRAINGER J J, STEVENSON W D. Elements of power system analysis[M]. New York: McGraw-Hill,1994.
- [19] DAS J C. Power system analysis: load flow and harmonics [M]. New York: Marcel Dekker Inc.,2002.
- [20] 何仰赞,温增银.电力系统分析[M].北京:华中科技大学出版社,2005
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power system analysis [M]. Beijing: Huazhong University of Science and Technology Press,2005.

张晋波(1980—),男,硕士研究生,工程师,主要从事高压电器试验与标准方面的研究工作。