

基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究

沃建栋¹, 郑涛², 万磊³, 柳维衡²

(1. 金华电业局, 浙江 金华 321000; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;
3. 山东电力集团超高压公司, 山东 济南 250000)

摘要: 现有处理励磁涌流的主要措施是采用数学方法对其进行特征识别, 防止继电保护装置误动, 而励磁涌流引起的其他危害却无法避免。介绍了控制合闸策略的基本理论, 对延时合闸策略和瞬时合闸策略的方法进行了说明, 并提出了故障后变压器空投的合闸方案, 有效地抑制了励磁涌流的产生。在考虑铁芯剩磁的情况下, 通过仿真实验分别依据两种合闸策略对变压器进行空载合闸, 仿真结果表明: 该方法可大幅减小励磁涌流的冲击, 使变压器迅速进入稳态。

关键词: 励磁涌流; 控制策略; 抑制方法; 剩磁; 分相控制

Study on inrush current suppression method based on the breaker control strategy

WO Jian-dong¹, ZHENG Tao², WAN Lei³, LIU Wei-heng²

(1. Jinhua Electric Power Bureau, Jinhua 321000, China;
2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, Ministry of Education, Beijing 102206, China; 3. Shandong Ultra-high Voltage Company, Jinan 250000, China)

Abstract: In order to prevent the mal-operation of protective relays, the current major countermeasures are to recognize inrush currents based on the mathematical methods. Damages to other aspects caused by inrush current can not be avoided. This paper introduces basic theory of the breaker control strategy, illustrates methods of delayed switching strategy and rapid switching strategy, and proposes the closing scheme of transformer after fault, which can eliminate the occurrence of inrush currents effectively. Simulations of transformer switching on with no-load under different core residual flux conditions have been done. Simulation results indicate that these strategies can greatly reduce the impact of inrush current so that transformers enter into steady-state operation rapidly.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No.50607006).

Key words: inrush current; control strategy; suppressing method; residual flux; individual phase control

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0032-05

0 引言

由于变压器铁芯磁通的饱和及铁芯材料的非线性特性, 电力变压器在空载合闸投入电网时会产生幅值相当大的励磁涌流, 由此可能导致变压器差动保护误动作, 同时造成绕组变形, 从而减少变压器寿命。励磁涌流含有多个谐波成分及直流分量, 这将会降低电力系统供电质量, 同时涌流中的高次谐波对连接到电力系统中的敏感电力电子器件有极强的破坏作用。

文献[1]提出了一种采用中性点串接电阻来限

制变压器励磁涌流的方法, 但不管是从参数的整定还是装置的机械实现方面, 该方法都存在较大的困难, 并且不能完全消除励磁涌流。文献[2]通过监测电压波形的峰值来控制变压器的合闸角度, 但是这种方法的缺陷在于假设变压器的剩磁为零, 与实际情况不符, 而且变压器在剩磁较大的情况下空载合闸依然会产生很大的励磁涌流。随着特高压电网的建设, 系统中大容量变压器也日益增多。大型变压器时间常数都很长, 一般涌流过程超过5s^[3], 当变压器空载合闸于内部故障情况下, 保护会延时动作, 因而会给系统的安全稳定运行带来更严重的危害。在这种情况下, 研究消除励磁涌流的方法有着更为重要的意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50607006)

合闸控制策略, 其基本思想是预期磁通与剩磁相等, 理论上这种方法是能够完全消除励磁涌流的。本文针对大容量变压器广泛采用分相控制开关的前提条件, 通过仿真试验依据控制策略来对变压器分相合闸, 并对不同铁芯剩磁情况下的合闸方案进行分析。

1 理论基础

变压器空载合闸时, 原边绕组的外施电压突然增加, 基于磁链守恒定理, 该绕组在磁路中将产生单极性的偏磁以抵制磁链突变, 如偏磁极性恰好和变压器原来的剩磁极性相同时, 就可能因偏磁与剩磁和稳态磁通叠加而导致磁路饱和, 产生幅值可与短路电流比拟的励磁涌流。由于偏磁的极性及数值是可以通过选择外施电压合闸相位角进行控制的, 因此, 如果能掌握变压器上次断电时磁路中的剩磁极性, 就完全可以通过控制变压器空投时电源电压的合闸相位角, 实现让偏磁与剩磁极性相反, 从而彻底消除励磁涌流。

以单相变压器为例, 设合闸时刻铁芯中的剩磁为 Φ_r , 回路电压方程^[4]为:

$$N_1 \frac{d\Phi}{dt} + R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = U_m \sin(\omega t + a) \quad (1)$$

式中: N_1 、 R_1 、 L_1 分别为原边绕组的匝数及电阻和漏电感; Φ 为其交链的总磁通; a 为变压器投入运行时电压的初相角。忽略原边绕组的电阻和漏抗, 式 (1) 可改写为:

$$N_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_m \sin(\omega t + a) \quad (2)$$

则有

$$\Phi = -\frac{U_m}{\omega N_1} \cos(\omega t + a) + A = \Phi_s + \Phi' \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出变压器原边绕组加上电源后在磁路中的总磁通 Φ 有两个分量, 即稳态磁通 Φ_s 和暂态磁通 Φ' 。式中 $U_m/\omega N_1$ 项为常数, 定义为稳态磁通幅值 Φ_m , A 为暂态磁通 Φ' 的幅值。 A 可由合闸时刻 ($t=0$) 的初始条件确定, 即 $t=0$ 前后瞬间磁通相等, 等于磁路中的原剩磁 Φ_r 。将 $t=0$ 代入式 (3) 中得到: $A = \Phi_r + \Phi_m \cos a$, 因而式 (3) 又可写成:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + a) + (\Phi_r + \Phi_m \cos a) \quad (4)$$

式 (4) 表达了在外施电压相位角为 a 时, 变压器合闸瞬间磁路中的磁通组成, $-\Phi_m \cos(\omega t + a)$ 是稳态磁通分量 Φ_s , 即电压源在变压器中产生的预期

磁通; $\Phi_m \cos a$ 为基于磁链守恒定律平衡合闸瞬间的稳态磁通 Φ_s 产生的偏磁 Φ_p , Φ_p 的初始值与 $t=0$ 时预期磁通的瞬时值相等, 但极性相反。由式 (4) 可知, 通过控制合闸时刻电压相位初始相位角 a , 当剩磁与 $t=0$ 时刻的预期磁通相等时, 有 $\Phi_r + \Phi_m \cos a = 0$, 就可消除铁芯的不对称磁通, 使得变压器在空载合闸时不产生励磁涌流, 迅速进入稳态运行。这就是控制合闸策略所依据的基本原理, 如图 1 所示。

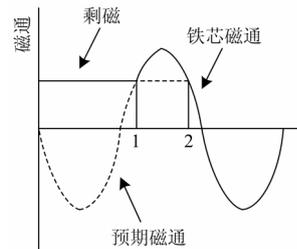


图 1 单相变压器的最佳合闸时刻 (1) 和 (2)

Fig.1 Optimal switching time (1) and (2) of a single phase transformer

2 合闸控制策略

对于单相变压器和各相铁芯磁路互不影响的三相变压器而言, 可以很好地应用预期磁通与铁芯剩磁相等的原则控制空载合闸, 消除涌流。然而系统中实际应用的三相变压器大多采用 Y/ Δ 接线方式, 因而使得三相之间存在一定的电磁耦合。对于采用 Y/ Δ 接线方式的三相变压器, 当一相合闸之后, 因为各相磁路之间存在耦合, 其他相的剩磁将不再保持静止不变, 而表现为暂态变化的磁通, 称之为“动态磁通”。图 2 给出了典型的大容量变压器所采用的 Yd 联接结构图。

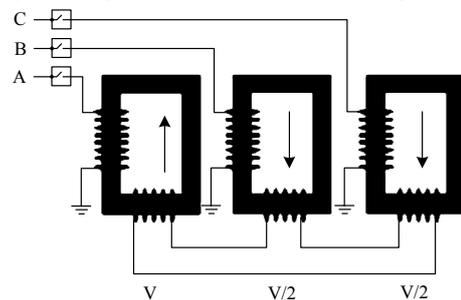


图 2 Yd 联接方式的变压器

Fig.2 Transformer with connection style of Yd

假设变压器的三相剩磁均为零, 由于三相预期磁通依次滞后 120° , 所以不能同时合闸。首先合闸相 (简称“首合相”) 的最佳合闸时刻是在预期磁通为零时, 即电压幅值最大的时刻。在

图 2 中，例如 A 相首先合闸之后，将在 B, C 相的二次绕组产生同样幅值和相位的电压，其幅值为 A 相二次侧绕组电压的 1/2，相位相差 180°。因此，B、C 相产生相同的动态磁通，其相位滞后 A 相磁通 180°。B、C 相的最佳合闸时刻出现在 A 相合闸之后 1/4 个周期，在该时刻，B、C 相的动态磁通分别与其预期磁通相等，如图 3 所示。

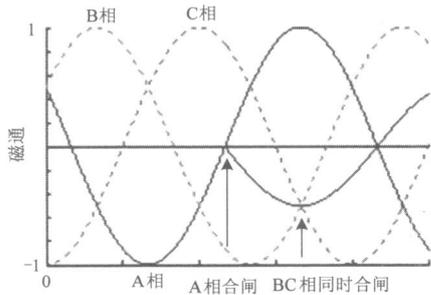


图 3 变压器在剩磁为零时合闸的预期磁通和动态磁通
Fig.3 Prospective and dynamic core flux when transformer switching without residual flux

2.1 延迟合闸策略

在实际情况下，大多数变压器三相剩磁之和为零，但并非每相剩磁同时为零。假设 B、C 两相内的原始剩磁关系为 $\phi_{rc} > \phi_{rb}$ ，则 A 相在最佳合闸相位合闸后，B、C 两相的感应磁通从各自的剩磁开始在同一方向上沿其磁滞回线运动。当 ϕ_c 达到饱和区后， ϕ_b 仍处于线性区，由于变压器铁芯的非线性，此暂态过程中的 $L_c \ll L_b$ (L_b, L_c 分别为 B、C 相的等效电感)，因此 B、C 两相绕组上的感应电势也不同，于是有 $U_c < U_b$ ，此时 B 相的内部磁通将迅速增加，使得 B、C 两相铁芯磁通很快趋于平衡，消除两相之间剩磁的差别，这种现象被称为“磁通平衡效应”。此后三相的磁通分布情况与三相剩磁为零时一相合闸之后的情况类似，如图 4 所示，图中 ϕ_{Db} 和 ϕ_{Dc} 分别

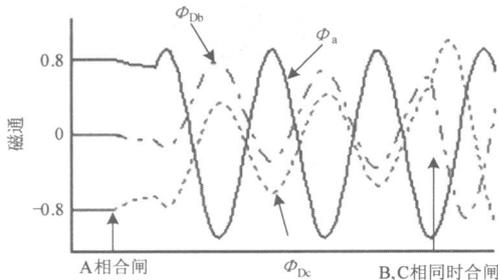


图 4 采用延时合闸策略时的动态磁通变化情况
Fig.4 Variation of dynamic core flux when delayed switching strategy is applied

表示 A 相合闸之后 B、C 相的动态磁通。因此，延迟合闸策略表述为：一相在其最佳时刻合闸后，经过铁芯磁通的平衡效应，约 2~3 个工频周期，然后选择在首合闸相的电压过零时刻（即磁通达到峰值时刻）对另外两相同时合闸。

2.2 快速合闸策略

通常典型的剩磁分布情况为一相剩磁为零，另外两相剩磁之和为零^[5]。假设 A 相的剩磁为 0，B、C 相的剩磁分别为 $0.8\phi_m$ ， $-0.8\phi_m$ ，A 相在其电压峰值时刻合闸。由于三相剩磁之和与预期磁通之和都为零，所以动态感应磁通和预期磁通在每周期有两个时刻相等，图 5 给出了这种情况下动态磁通和预期磁通的分布情况。快速合闸策略可表述为：一相合闸之后，另外两相在其动态磁通与预期磁通相等的时刻迅速合闸，在图 5 中表示为，A 相在 M 点合闸之后，B、C 相同时在 N 点合闸，三相在一个周期内完成合闸操作。

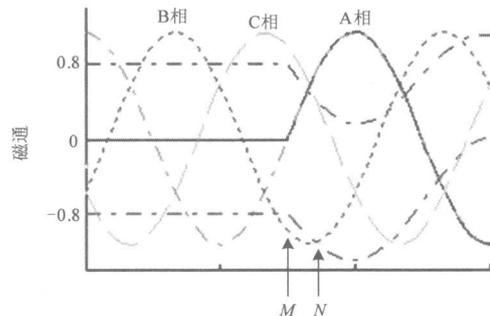


图 5 采用快速合闸策略时的预期磁通和动态磁通变化情况
Fig.5 Variation of prospective and dynamic core flux when rapid switching strategy is applied

3 剩磁计算

无论是应用延迟合闸策略，还是快速合闸策略，剩磁计算都是一个非常重要的环节。上述两种控制策略是在基于剩磁已知的情况下进行的。到目前为止，静止磁场是难以测量的，但是在不同的情况下，可通过适当的处理办法解决剩磁的测量问题。

(1) 变压器首次投入运行时，三相的剩磁情况无规律可循。此时可通过直流去磁法或交流去磁法^[6]消除变压器三相的铁芯剩磁，然后在电压峰值时刻对首相合闸，再经过 1/4 周期后对另外两相同时合闸。通过这样的处理方法回避了对剩磁的计算，同时也可达到消除涌流的效果。

(2) 变压器因为检修或变换运行方式而退出运行。此时认为变压器在退出运行之前，电压波形是不发生畸变的。假设变压器的电压为

$U = U_m \sin(\omega t + a)$, 根据 $U = N \cdot d\Phi / dt$ 得出 $\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + a)$, 如果变压器退出运行时刻为 t_0 , 可以根据退出运行时刻 t_0 得出变压器的剩磁, 作为下次合闸计算最优合闸时刻的依据。

(3) 变压器发生三相短路故障时, 此时三相磁通依然是对称分布的。可通过记录断路器跳开时刻的相位角, 再选择在相同相位角三相同步合闸, 便可满足三相剩磁与预期磁通分别相等的条件, 抑制涌流的产生; 当变压器因为不对称故障被保护切除时, 例如 AB 相间故障, 此时可认为正常相 C 的电压不受影响, 该相的磁通波形基本不变, 如图 6 所示。则可以通过计算正常相 C 的剩磁, 并把正常相 C 作为下次合闸的首合相, 然后根据延时合闸策略来对另外两相合闸, 便可达到消除励磁涌流的目的。

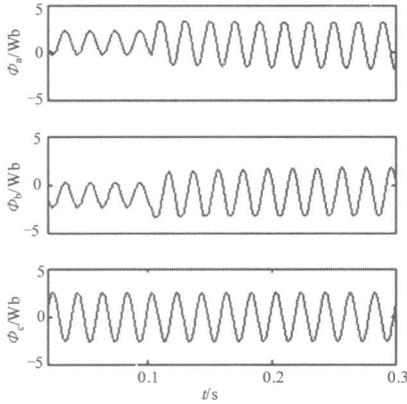


图 6 AB 相间故障时变压器三相磁通变化情况

Fig.6 Variation of three phase core flux during AB inter-phase fault

此外, 应该指出, 变压器断电后留在三相磁路中的剩磁在正常情况下是不会衰减消失的, 更不会改变极性。只有在变压器铁芯受到高于材料居里点的高温作用后剩磁才会衰减或消失, 但一般的电站现场不会出现这种情况^[7]。因此, 对于长期处于备用状态的变压器而言, 根据上次退出运行时刻投入运行就可以消除涌流。

4 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 建立试验仿真模型, 对上述两种控制合闸策略限制涌流的效果进行仿真比较。试验模型中的变压器容量为 250 MVA, 额定电压为 500 kV/220 kV, A、B、C 三相的剩磁分别为 $0, 0.8\Phi_m, -0.8\Phi_m$ 。

在没有控制的情况下变压器空载合闸典型的励磁涌流波形见图 7 (a), 考虑到合闸时刻的随机性,

在无控制的情况下, 在一个周波内等时间间隔地进行 10 次随机合闸操作, 所得三相励磁涌流峰值随合闸时间的变化关系见图 7 (b)。

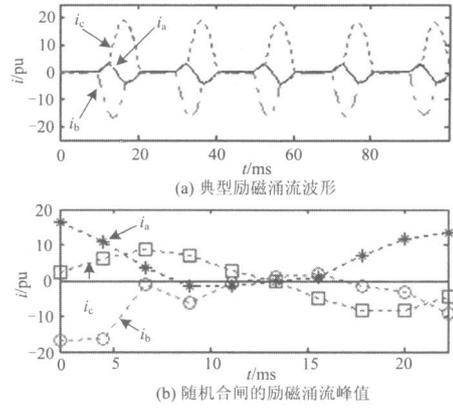


图 7 随机合闸产生的励磁涌流

Fig.7 The inrush currents generated by random energizing

当采用延时合闸策略对变压器采用空载合闸时, 首先, A 相选择在电压峰值时刻投入, 经过 2 个周波之后, 同时在电压过零时刻投入 B、C 相, 该过程的励磁电流波形如图 8 (a) 所示。

在应用快速合闸策略的过程中, 合闸时刻的选取方法如下: 根据预期磁通与铁芯剩磁相等的原则, 先对 A 相进行合闸, 则有

$$\Phi_{ra} = \Phi_a = -\Phi_m \cos(\omega t_0 + a)$$

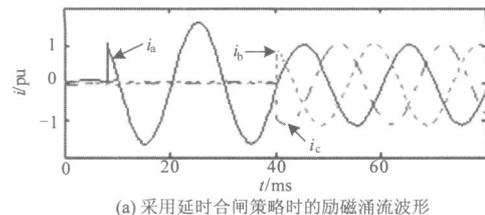
求出 t_0 , 即为 A 相的合闸时间。此时 B、C 相铁芯的剩磁为动态磁通, 经过几个周期之后, 在 A 相磁通的作用下, B、C 相的磁通应该相等, 其值为 $1/2 \cdot \Phi_m \cos(\omega t + a)$, 根据磁链守恒定律, 得出合闸之后 B 相的动态磁通为

$$\Phi_{rb} = 1/2 \Phi_m \cos(\omega t_0 + a) + 1/2 \Phi_m \cos(\omega t + a)$$

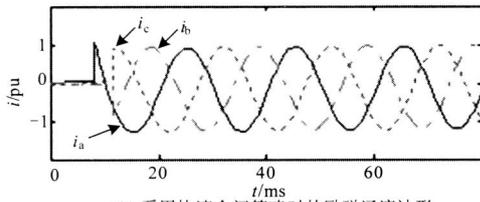
C 相的动态磁通为

$$\Phi_{rc} = -1/2 \Phi_m \cos(\omega t_0 + a) + 1/2 \Phi_m \cos(\omega t + a)$$

然后通过动态磁通与预期磁通相等的原则来分别求取 B、C 相的最佳合闸时刻。由于磁通平衡效应的的时间很短, 采用这种处理方法可近似得到 B、C 相快速合闸的时间。快速合闸策略合闸得到的励磁电流如图 8 (b)。



(a) 采用延时合闸策略时的励磁涌流波形



(b) 采用快速合闸策略时的励磁涌流波形

图 8 采用控制策略时的励磁涌流波形

Fig.8 Inrush currents when control strategy is adopted

通过比较图 7 和图 8 的仿真波形发现，通过控制策略合闸之后，励磁涌流得到极大的削减，仿真结果表明了该方法可有效抑制励磁涌流幅值及其暂态过程。

5 结论

本文介绍了控制合闸策略的基本思想及应用方法，并通过仿真试验证实了该方法可有效抑制励磁涌流，使变压器空载投入之后迅速进入稳态运行，同时还得出以下结论：

(1) 延迟合闸策略和快速合闸策略都要求开关能够分相操作，因此仅适合于采用分相开关的大容量变压器。此外，应用快速合闸策略必须已知三相的剩磁，并且后两相的合闸时刻难以确定。而延迟合闸策略只须已知一相的剩磁，另外两相可选择在电压过零时刻合闸，所以，延迟合闸策略能够得到更广泛的应用。

(2) 到目前为止，计算剩磁主要是通过通过对电压积分得到。然而，对于变压器首次投入运行，以及因故障而导致电压波形突变的情况，对电压积分的方法无法求得剩磁。因此，在这些情况下，控制合闸策略尚不能得到最佳的涌流抑制效果。

参考文献

[1] Cui Yu, Abdulsalam S G, Chen Shiuming, et al. A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction—part I: simulation and

experimental results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20 (2): 943-949.

[2] Moraw G, Richter W, Hutegger H, et al. Point-on-wave controlled switching of high voltage circuit breakers[J]. CIGRÉ Session, 1988, 13 (2): 1-6.

[3] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (4): 42-46.

SUN Zhi-jie, CHEN Yun-lun. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (4): 42-46.

[4] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 1989.

WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. The theoretical foundation of large scale generator-transformer set relay protection[M]. Second edition. Beijing: China Electric Power Press, 1989.

[5] Brunke J H. Elimination of transient inrush currents when energizing unloaded power transformers[D]. ETH Zurich, 1998.

[6] 薛敏. 现场去磁法在变压器局放试验中的作用[J]. 华东电力, 2003, 8 (10): 85-86.

XUE Min. The role of field demagnetization in the partial discharge test of transformer[J]. East China Electric Power, 2003, 8 (10): 85-86.

[7] 叶念国. 抑制变压器励磁涌流的新方法[C]. //中国电力系统保护与控制学术研讨会论文集. 2006: 767-772.

YE Nian-guo. A new way suppress excitation inrush of transformer[C]. //China Electric Power System Protection and Control Symposium Proceedings. 2006: 767-772.

收稿日期: 2009-11-27; 修回日期: 2010-01-22

作者简介:

沃建栋 (1976-), 男, 硕士, 从事继电保护专业技术管理工作;

郑涛 (1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与仿真. E-mail: zhengtao_sf@126.com

(上接第 31 页 continued from page 31)

[22] Morton K W, Mayers D F. Numerical solution of partial differential equations[M]. Cambridge: Cambridge University, 2005.

[23] 彭仿麟. 数学物理方程的 MATLAB 解法与可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2009-12-31

作者简介:

王德林 (1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统运行、稳定与控制的研究; E-mail: dlwang@yahoo.cn

王小艳 (1964-), 女, 高级工程师, 讲师, 主要从事电工、电力系统分析方面的理论与应用研究。