

两种削弱励磁涌流的方法

李琥,段乃欣,周海洋,施围

(西安交通大学,陕西 西安 710049)

摘要: 合空载电力变压器时会产生数值相当大的励磁涌流,易造成变压器差动保护装置的误动作。针对这一问题,介绍了两种削弱励磁涌流的方法:控制三相合闸时间或在变压器低压侧加装电容器。理论分析和实践均证明这两种方法是行之有效的,但利用控制三相合闸时间来削弱励磁涌流在实际应用中更具有潜力。

关键词: 励磁涌流; 变压器; 控制开关; 电容

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)04-0035-03

1 概述

电力变压器在空载合闸投入电网或外部故障切除后电压恢复时,由于变压器的非线性,会产生数值相当大的励磁涌流,严重情况下其峰值可达额定电流的10到20倍^[1],从而导致变压器保护的误动作。为了解决这一问题,目前变压器的差动保护都采用了或门制动方式,即三相电流中有一相制动,则三相全部制动。这样虽解决了涌流时的误动问题,但当变压器有涌流时,如果发生单相或两相内部故障,差动保护因健全相的涌流制动而不动作。大型变压器时间常数都很长,一般涌流过程超过5s^[2],在发生上述故障时,主保护等到振荡消失才能动作,实际就是拒动。理论分析和动模试验都证实了这种现象。为了保证差动保护装置的正确动作,必须要降低励磁涌流的幅值。目前,削弱励磁涌流的方法主要有两种:控制三相开关合闸时间,或在变压器低压侧并联电容器。本文将对这两种方法的原理、效果一一介绍。

2 控制三相开关合闸时间以削弱励磁涌流

2.1 理论基础

该方法的理论基础是:将变压器看作一个强感性负载,即看作一个非线性电感,当合闸时,变压器上的电压在变压器内部也产生一个磁通,当变压器有剩磁时,合闸后所产生的磁通如果和剩磁极性相同,则变压器内部的总磁通就会随着电压的升高而增加,从而励磁涌流也会随之增加,如果合闸后所产生的磁通和剩磁极性相反,则变压器内部的总磁通就会随着电压的升高而减小,从而削弱了励磁涌流;如果合闸时变压器内无剩磁,则可在合闸角为90°(即电压峰值时)时合闸,这样在变压器内产生的磁

通最小,产生的励磁涌流也最小。在单相变压器中,可以很容易地分析出如下结果。假设单相变压器无漏抗,电源为无穷大,如图1所示:

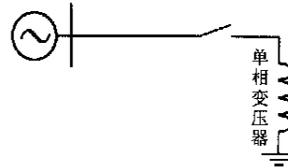


图1 单相变压器空载合闸电路图

Fig.1 A simplified diagram of switching on no-load single-phase transformer

此时有

$$E = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

此处把变压器的基本磁化曲线作折线处理,如图2所示:

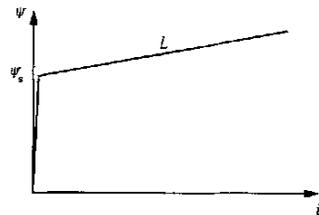


图2 变压器磁化曲线

Fig.2 Magnetization curve of transformer

设 $\alpha < \alpha_s$ 时, $i = 0$, $\alpha > \alpha_s$ 时的电感为 L ,那么当变压器合闸时,可以推导出如下公式

$$I = \frac{1}{L} [U_m \sin(\omega t + \alpha - \frac{\alpha_s}{2}) - U_m \sin(\alpha - \frac{\alpha_s}{2}) - (\psi_r - \psi_s)]^{1/3} \quad (1)$$

其中: α 为接入相位角(合闸角); ψ_r 为变压器剩磁。

从式(1)中可以看出,当 $\alpha = 0$ 时,产生最大的涌流峰值,当 $\alpha = 90^\circ$ 时,励磁涌流的峰值最小。因此,通过控制合闸时间来削弱励磁涌流的幅值是一

种行之有效的办法。

2.2 在三相变压器中的应用

在三相变压器中,尽管三相之间有电磁耦合以及剩磁的影响,但根据三相绕组内的磁通变化规律,通过控制三相开关的合闸时间(即合闸角度),亦可以大幅度降低变压器内的感应磁通,从而削弱励磁涌流的幅值。根据上述思想,以及变压器三相绕组内剩磁的形式,提出了两种合闸策略。

2.2.1 快速合闸策略

即一相先在合闸角度为 90° 时合闸,另外两相在 $1/4$ 工频周期后合闸。这是因为,设三相绕组中均无剩磁,A相先在最优时间,即是在合闸角度为 90° 时合闸,此时在A相绕组中产生的磁通最小,在B、C相中产生幅值为磁通最大值的一半、相位超前A相 180° 的感应磁通,如图3所示,在此时,B、C两相合闸的最佳时间就是在 $1/4$ 工频周期后合闸,这样就保证B、C两相绕组中的磁通在正常范围之内,从而消除或削弱了励磁涌流。

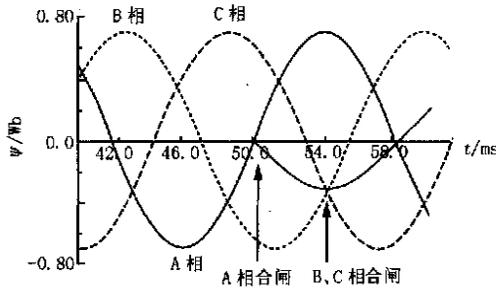


图3 剩磁为零,A相先合闸后三相磁通变化规律

Fig. 3 Prospective and dynamic core flux for each phase without residual flux after A phase closes

该方法适用于三相绕组中剩磁为零,以及三相独立控制合闸的情况。经过仿真计算,实施该策略后,在合闸时间分散度为 0.5 ms 的情况下,励磁涌流的幅值与三相随机合闸相比,减少了 94.4% [4]。

2.2.2 延迟合闸策略

单相先合闸,另外两相在 $2 \sim 3$ 工频周期后合闸。该方法的理论依据是铁芯磁通平衡效应:设A相先合闸,之后在B、C相产生感应磁通,如果两相内的剩磁不同,则内部的感应磁通也不相同,如图4所示。

设 $\phi_c > \phi_b$,则当 ϕ_c 到达饱和点后, ϕ_b 还停在未饱和区,此时由于变压器的非线性, $L_C < L_B$,因此B、C相绕组上电压也不相同, $U_C > U_B$,则在绕组内部,B相绕组内磁通的变化速度要比C相绕组内快,最后,B、C两相内部磁通趋于平衡,同时也消除了剩

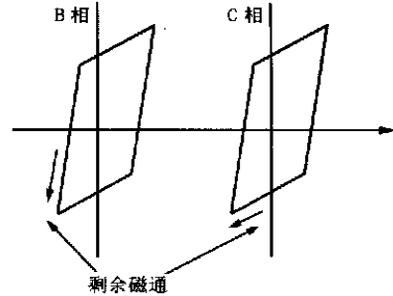


图4 B、C相磁通变化规律

Fig. 4 the dynamic flux curve of B、C phase

磁效应。

该方法适用于已知单相绕组中的剩磁,三相独立合闸的情况。经过仿真计算,实施该策略后,在合闸时间分散度为 1.0 ms 的情况下,励磁涌流的幅值减少幅度为 $85\% \sim 93\%$ [4]。

3 在变压器低压侧并联电容器

励磁涌流是由于变压器内磁通饱和而引起的,如果采取措施限制绕组内磁通达到饱和点,也就达到削弱或消除励磁涌流的目的。在变压器低压侧并联电容器就是基于这种思想提出的,如果在变压器低压侧产生的磁通就和高压侧磁通极性相反,这样就排除了绕组内磁通饱和的可能性 [5]。

该方法的优点是不论控制三相合闸角为多少,均能有效的削弱励磁涌流。缺点在于对电容器电容值的选取,电容值过大或过小均不能满足要求。电容值过大,会使变压器与电容器组合成的系统谐振频率降低,从而使变压器难以被激励;电容值过小,会无法满足削弱励磁涌流的需要。荷兰的 PGEM 公司在 1992 年在一台 $66\text{ MVA}, 150/11\text{ kV}$ 的变压器上做过试验,不同的电容器值下,励磁涌流的峰值如表1所示 [6]。

表1 不同电容值下励磁涌流峰值及二次侧电压

Table 1: Maximum values of the inrush currents and the secondary voltage with different capacitors

电容值/ μF	涌流峰值/A	变压器二次侧电压/p. u.
43.5	675	2.02
27.8	600	2.16
17.8	550	2.20
2.0	850	1.90

从表1可以看出,电容器值不同,励磁涌流的峰值变化很大,故在采取此方法前,必须知道变压器的励磁特性,以便对变压器空合闸时的暂态现象进行

模拟,以选取合适的电容值。

4 结论

本文讨论了两种削弱励磁涌流的方法,两种方法各有优缺点。但是在变压器低压侧并联合适的电容器需要对变压器的励磁特性进行精确模拟,而在实际工程中,要得到一个真实的变压器励磁特性是比较困难的,因此,随着控制开关合闸时间的技术不断发展,第一种方法更有潜力。

参考文献:

- [1] Jesus Rico J, Enrique Acha, Manuel Madrigal. The Study of Inrush Current phenomenon Using Operational Matrices [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2001, 16 (2): 231 - 237.
- [2] 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.

- [3] 王维俭,侯炳蕴.大型机组继电保护基础[M].北京:水利电力出版社,1988.
- [4] John HBrunks, Klaus JFrohlich. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 276 - 285.
- [5] van Riet MIM, Buesink DJW. The advantage of implementing corrective capacitors mounted directly on the low voltage side of a high voltage power transformer. Electricity Distribution, 1993. CIRED.
- [6] Syed Jamil Asghar M. Elimination of inrush current of transformers and distribution lines [J]. Proceedings of the 1996 International Conference on, 1995, 2: 976 - 980.

收稿日期: 2002-07-12; 修回日期: 2002-09-04

作者简介:

李琥(1979-),男,西安交通大学高电压技术教研室硕士生,研究方向为电力系统过电压计算及其防护。

施围(1941-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统过电压防护。

Eliminating inrush current by implementing two methods

LI Hu, DUAN Nai-xin, ZHOU Hai-yang, SHI Wei
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Transformer inrush currents are high magnitude currents generated when switching of no load transformer, and will cause protective relay mis-operation. In order to eliminate inrush currents, two methods are discussed in this paper: by controlled switching and by implementing capacitors mounted directly on the low voltage side of a high voltage power transformer. Both Theoretical considerations and practical considerations can prove the two methods are effective, but the former has more potential in practice.

Key words: inrush current; transformer; controlled switching; capacitor