

一种消除单相变压器励磁涌流的预充磁策略

何小庆, 刘淑萍, 李攀宏, 陈德明, 高仕斌

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 变压器空载合闸或切除故障合闸都伴随着励磁涌流的出现, 励磁涌流的大小受合闸角、剩磁、系统阻抗参数等因素的影响。提出了一种消除单相变压器励磁涌流的策略, 利用预充磁装置改变变压器铁心中的磁通, 当接近极限磁滞回线的剩磁时, 控制断路器的合闸, 从而消除励磁涌流。通过理论推导, 确定了预充磁装置电容大小与电容电压之间的关系、铁心的充磁程度以及对应的相位。最后, 以某单相变压器为例, 利用 Simulink 仿真, 验证了该策略。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 磁滞回线; 剩磁; 预充磁

Eliminating the single-phase transformer inrush current based on pre-magnetizing

HE Xiao-qing, LIU Shu-ping, LI Pan-hong, CHEN De-ming, GAO Shi-bin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Energization of transformer both unload and removal of fault is accompanied with an inrush current, the value of which depends on the angle of the applied voltage, residual flux of the core, the impedance of system and so on. A strategy of eliminating the single-phase transformer inrush current is proposed, which refers to set the transformer residual flux to a known value which is equal to the flux when energization by a pre-magnetizing device, while decreases the inrush current. By theoretical analysis, the relationship between size of capacitor and the voltage, the degree of magnetization of the core and the corresponding phase are determined. Finally, in case of a single-phase transformer, the proposed strategy is verified by Simulink simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134205).

Key words: transformer; inrush current; hysteresis loop; residual flux; pre-magnetizing

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0120-05

0 引言

变压器是电力系统中的重要设备, 是衔接不同电压等级的关键。变压器空载合闸或切除故障, 系统电压恢复过程中都会伴随着励磁涌流现象。励磁涌流的最大值可达到额定电流的 6~8 倍且长达 10 余秒。目前, 电力系统实际应用中应对励磁涌流主要措施是使变压器保护闭锁, 从而让变压器承受励磁涌流的冲击。如此大的电流对变压器的影响堪比故障电流, 对变压器的使用寿命影响更大。同时, 区别励磁涌流和故障电流也成为变压器保护的一个难点问题, 致使变压器保护动作的正确率相比于线路保护和发电机保护较低。此外, 励磁涌流会引起

电力系统谐波过电压, 且对相邻变压器的励磁涌流也有影响^[1]。

而目前国内外学者针对变压器励磁涌流的研究着重于对励磁涌流的识别方法的研究, 如二次谐波制动^[2-4]、间断角原理识别^[5-6]、利用差动电流波形特征识别^[7]、基于励磁阻抗变化的识别法^[8]、基于变压器漏阻抗参数模型的识别方法^[9]等。这些方法都只是从电压、电流量的角度来识别励磁涌流。文献[10]利用磁滞回线识别变压器励磁电感, 虽然从铁磁方面研究励磁涌流, 但是并没有从根本上消除励磁涌流, 因此, 减弱或消除励磁涌流的方法亟待研究。由于单相变压器在牵引供电系统中应用广泛, 本文着重研究单相变压器的励磁涌流消除方法。

本文通过在单相变压器的原边增设预充磁装置, 将单相变压器的铁心剩磁激励到一个已知其极性和大小的参数, 然后将单相变压器接入电网, 有效地消除了励磁涌流。

项目基金: 国家自然科学基金重点项目 (U1134205); 牵引供电自动化关键技术深化研究—铁路牵引变电所智能化技术研究 (2013J003-A)

1 预充磁策略

传统的减小励磁涌流的策略有四种, 虽然从一定程度上减小了励磁涌流, 但是还是存在着一些缺点。

(1) 串电阻。当变压器接入电网时, 在变压器原边串入一个电阻, 就可以增大电阻上的压降, 减小铁心上的电压, 从而削减励磁涌流。虽然这种串电阻策略很简单, 但是对三相变压器的削减效果不明显, 而且需要重新配置一个比较昂贵的智能断路器, 以便及时地将电阻切除^[11]。

(2) 控制断路器合闸角。众所周知, 励磁涌流的出现和断路器合闸角有密切的联系。不考虑剩磁的影响, 合闸角在为 $\pi/2$ 时, 不产生励磁涌流; 当合闸角为零时, 励磁涌流最大。剩磁的大小和方向对励磁涌流也会产生较大的影响, 当剩磁方向和励磁电流的磁通方向一致时, 有助磁作用, 产生较大的励磁涌流, 相反, 当剩磁方向和励磁电流产生的磁通方向相反时, 有消磁作用, 使得励磁涌流变小。所以, 断路器可以选择一个合适的合闸角度, 使得励磁涌流很小。这种策略存在一个缺点, 即必须增设额外设备计算变压器剩磁的大小及极性。

(3) 减小剩磁通。通过外部直流电源来控制变压器虚拟气隙的厚度, 动态的控制变压器的磁阻, 从而削弱励磁涌流^[12]。这种方法的控制系统较为复杂, 不易于实际应用。

(4) 超低频电源。由一个低电压直流电源、控制器和电力开关单元组成的超低频率电源作用于变压器绕组, 有效地使变压器退磁, 来减小励磁涌流^[13]。这种策略虽然新颖, 但是还只限于连接方式为 Δ -Yg 的变压器, 并不具有通用性。

本文采用一种预充磁装置, 其原理图如图 1 所示。它由一个直流电压源 S、开关 K、电容 C、二极管、熔丝和双触点断路器 BC 组成。其工作原理为: 首先, 闭合开关 K, 直流电压源 S 给电容充电, 当电容电压 U_{cap} 和直流电压源电压相等时, 将开关 K 断开。然后, 闭合 BC, 电容 C 和变压器串联谐振, 势必会引起变压器磁通的变化, 当变压器磁通接近正方向最大剩磁或反方向最大剩磁时, 断开 BC, 充磁完成。最后, 在合适的合闸角投切断路器 BC, 将变压器接入电网。其中, 二极管和熔断丝的作用是保护电容。

2 预充磁装置参数确定

由于每次变压器合闸前的剩磁的不同, 磁滞回

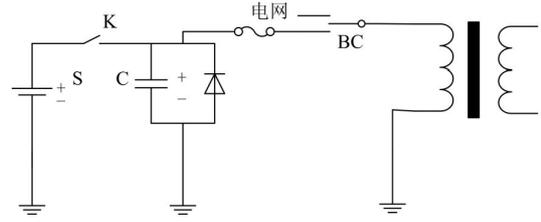


图 1 预充磁装置原理图

Fig. 1 Schematic of pre-magnetizing device

线就会有所区别, 如图 2 所示。综合考虑这个因素, 选取极限磁滞回线作为研究对象, 极限磁滞回线的剩磁为预充磁装置与变压器谐振后的目标磁通, 如图 2 中的 M 点和 N 点。

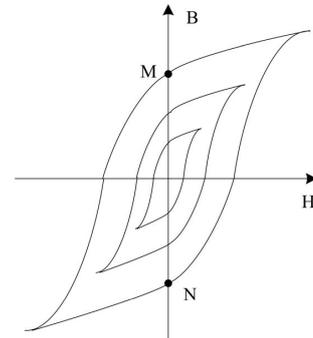


图 2 磁滞曲线

Fig. 2 Hysteresis loop

假定电源电压为 $U = U_m \sin(\omega t)$, 根据变压器原

理

$$U = N \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

则电压超前磁通 90° , 如图 3。积分上式有

$$\psi = -\frac{U_m}{N\omega} \cos(\omega t) \quad (2)$$

取 $\psi_B = \frac{U_m}{N\omega}$, 即可得到 M 点磁通标么值 a 对应的相位为

$$\frac{\psi}{\psi_B} = -\cos \omega t = a \quad (3)$$

$$\omega t = \arccos a \quad (4)$$

结合图 3 磁通量波形, M 点对应 A 点, 相位为 $\pi + \arccos a$ 。同理, 反向剩磁 N 点大小为 b, 对应 B 点, 相位为 $\arccos b$ 。

综上所述, 变压器充磁达到正向剩磁时, BC 的合闸角为 $\pi + \arccos a$, 反向剩磁时, BC 的合闸角为 $\arccos b$ 。

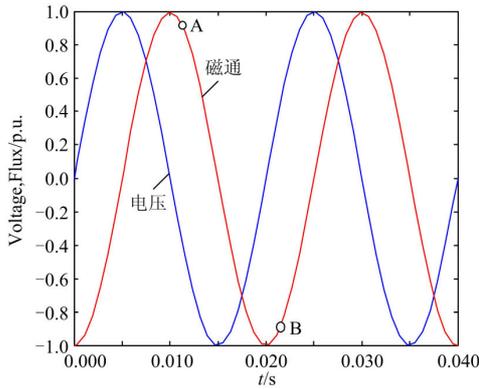


图3 变压器电压和磁通

Fig. 3 Voltage and flux of transformer

考虑变压器合闸时，能量主要消耗在变压器铁心^[14]。理想情况下，在 $T_0/4$ （谐振周期 $T_0 = 2\pi\sqrt{CL_m}$ ， L_m 为变压器励磁电感）内，电容能量 E 全部转移到变压器，全部提供磁滞损耗，则有

$$E = \Delta P T_0 / 4 \quad (5)$$

其中， ΔP 为励磁损耗。电容电压为 U_{cap} 时， E 有

$$E = \frac{CU_{cap}^2}{2} \quad (6)$$

联立上两式，得

$$C = L_m \left(\frac{\pi \Delta P}{U_{cap}^2} \right)^2 \quad (7)$$

通常直流充电电源 U_{cap} 设置为 12 V、36 V 和 48 V 等。

3 Simulink 仿真及结果分析

Simulink 环境下的 PowerSystem 工具箱包含的模块资源丰富，能满足在考虑剩磁情况下的变压器励磁涌流仿真。本文就是基于单相牵引变压器进行仿真，原理图如图 1 所示，这种预充磁装置在单相变压器上应用，也得到了些进展，在后续的文章里再详细介绍。

对于某单相牵引变压器参数^[15]为：额定容量为 1.5 kVA，高压侧电压为 230 V，低压侧电压为 42 V，额定电流为 6.25 A，空载损耗 21 W，空载电流为 0.175 A，短路损耗为 0.31%，短路阻抗 31.3%，漏电抗为 0.035 H，极限磁滞回线剩磁为 0.85 p.u.，计及剩磁的单相牵引变压器空载合闸通过仿真，合闸角为 0 时，其励磁电流如图 4 所示。励磁涌流高达近 11.30 A，是变压器额定电流的 1.8 倍，通过 FFT 分析，二次谐波含量达 34.41%。

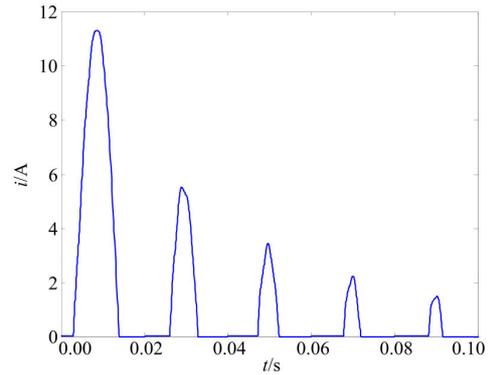
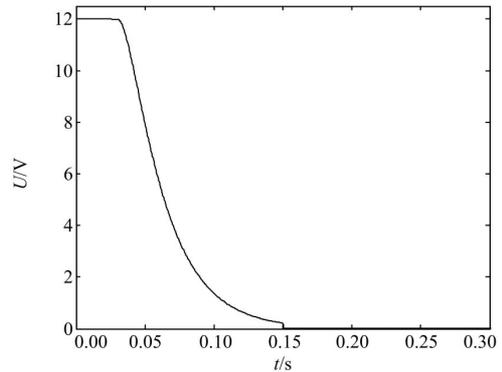


图4 励磁涌流

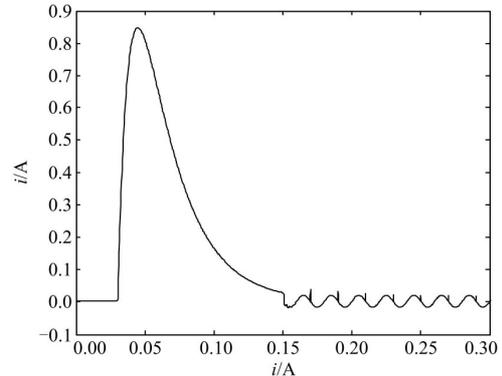
Fig. 4 Inrush current

本文提出的预充磁策略，利用 Simulink 搭建模型仿真，设置直流充电电压为 12 V，电容为 3.3×10^{-3} F。图 5 和图 6 分别为剩磁是 0.8 p.u. 和 0.5 p.u. 时电容两端电压变化波形和变压器原边电流。图 5、图 6 中的 (a) 图均为电容电压的波形，图 5、图 6 中的 (b) 图均为励磁涌流的波形。

对比图 5 和图 6 中的 (a) 图，两个电容电压波形几乎没有什么改变，在 0.15 s 处均为 0。对照图 5、图 6 中的 (b) 图，0~0.15 s 电容给变压器充电，且电流值很小，最大值不到 0.9 A。在 0.15 s 时刻电容



(a) 电容电压



(b) 变压器原边电流

图5 剩磁为 0.8 p.u. 仿真图

Fig. 5 Simulation of 0.8 p.u.

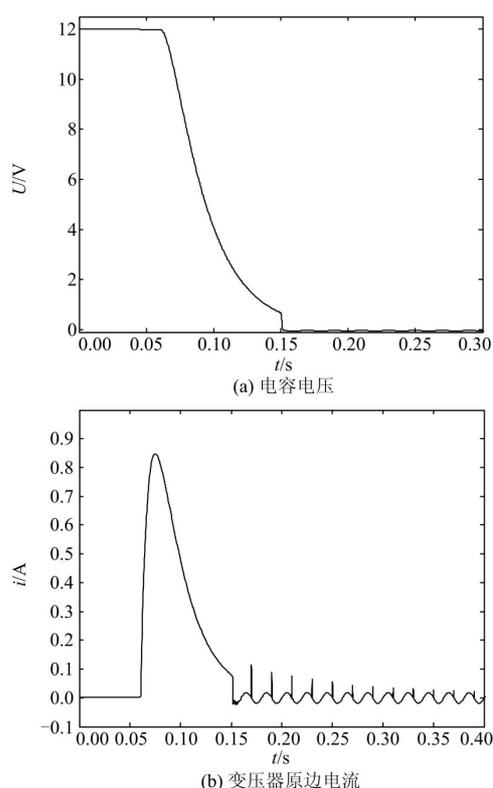


图6 剩磁为0.85 p.u.仿真图

Fig. 6 Simulation of 0.85 p.u.

放电结束, 最大值不到 0.9 A。在 0.15 s 时刻电容放电结束, 切除电容支路, 等到预定的合闸角 210° 或 30° 空载合闸。图 6 (b) 电流虽然有毛刺, 但是毛刺幅值不超过 0.2 A, 可忽略。从仿真波形可看出, 这种策略消除了励磁涌流。

4 结论

本文采用一种消除单相变压器空载合闸或切除故障合闸情况下产生的励磁涌流的策略, 这种策略的核心是预充磁装置。较已经存在的策略, 这种策略不依赖于互感器等测量设备, 充磁装置具有组成元件简单、操作电压低、成本低、易于实现等优点。

本文从磁特性分析励磁涌流产生的原因出发, 通过变压器励磁损耗特点和能量守恒, 确定充磁装置的参数, 结合变压器极限磁滞回线, 分析剩磁规律, 得出极限磁滞回线的剩磁为充磁装置的充磁目标值, 最后确定断路器的合闸角。仿真表明, 这种策略能够消除励磁涌流, 可有效延长变压器使用寿命, 并有望从根本上解决励磁涌流导致差动保护误动的问题。

参考文献

- [1] 韩正庆, 魏建忠, 刘淑萍, 等. 高速铁路两单相变压器组差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 84-89.
HAN Zheng-qing, WEI Jian-zhong, LIU Shu-ping, et al. Study on differential protection scheme for two single-phase transformer units of high-speed railway[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 84-89.
- [2] 王立大, 段周朝. 变压器励磁涌流引起保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 138-140.
WANG Li-da, DUAN Zhou-chao. Mal-operation analysis on magnetic inrush current of power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 138-140.
- [3] 邵德军, 尹项根, 张哲, 等. 改进型二次谐波励磁涌流制动方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 84-88.
SHAO De-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Improved second harmonic restrained method for energizing inrush current[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 84-88.
- [4] 刘小宝, 吴崇昊, 宋艳, 等. 基于二次谐波的自适应制动涌流方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 131-134.
LIU Xiao-bao, WU Chong-hao, SONG Yan, et al. Adaptive secondary harmonic restraint method for inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 131-134.
- [5] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-59.
HU Yu-feng, CHEN De-shu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-59.
- [6] 朱亚明, 郑玉平, 叶峰, 等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(11): 36-40.
ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng, et al. Performance and digital realization of transformer differential relay based on dead angle philosophy[J]. Automation Electric Power Systems, 1996, 20(11): 36-40.
- [7] 韩正庆, 刘淑萍, 高仕斌, 等. 一种基于差动电流波形特征的励磁涌流识别新方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9): 51-54.
HAN Zheng-qing, LIU Shu-ping, GAO Shi-bin, et al. Magnetizing inrush identification based on differential current characteristics[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2007, 27(9): 51-54.
- [8] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94.
ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, ZHU Zhen-fei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94.
- [9] 葛宝明, 苏鹏声, 王祥珩, 等. 基于瞬时励磁电感频率特性判别变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 35-40.
GE Bao-ming, SU Peng-sheng, WANG Xiang-heng, et al. Distinguish inrush currents for transformers using frequency characteristic of instantaneous excitation inductance[J]. Automation Electric Power Systems, 2002, 26(17): 35-40.
- [10] 何源, 李新, 罗建. 利用磁滞回线辨识变压器励磁电感研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 19-23.
HE Yuan, LI Xin, LUO Jian. Distinguishing magnetizing inductance of power transformer based on hysteresis loop[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 19-23.
- [11] 陈艳, 陈小川, 高仕斌. 几种削减变压器励磁涌流的方法[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 282-285.
CHEN Yan, CHEN Xiao-chuan, GAO Shi-bin. several methods to reduce transformer inrush current[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 282-285.
- [12] MOLCRETTE V, KOTNY J L, SWAN J P, et al. Reduction of inrush current in single-phrase transformer using virtual air gap technique[J]. IEEE Trans Mgn, 1998, 34(4): 1192-1194.
- [13] KOVAN B, DE LEON F, CZARKOWSKI D, et al. Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source[J]. IEEE Trans on Power Del, 2011, 26(3): 1563-1570.
- [14] HORISZY J. Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39: 1013-1019.
- [15] 冯存亮, 葛宝明, 毕大强. 三相 V/V 牵引变压器励磁涌流的识别[J]. 铁道学报, 2011, 33(6): 35-39.
FENG Cun-liang, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Identification of magnetizing inrush for three-phase V/V traction transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(6): 35-39.

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-04-09

作者简介:

何小庆(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护; E-mail: xiaoqing1064@126.com

刘淑萍(1979-), 女, 博士研究生, 研究方向为继电保护与变电站综合自动化;

李攀宏(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护。