

一起励磁涌流引起后备保护误动作的分析及探讨

黄晶晶

(广州供电局有限公司, 广州 510620)

摘要: 分析了一起 220 kV 新建变电站变压器投产空充过程中励磁涌流引起后备保护误动的实际案例, 建立了变压器空载合闸的等效电路模型, 推导了变压器磁通微分方程并阐述励磁涌流产生的机理, 分析了影响涌流幅值和衰减的因素, 得出了励磁涌流衰减较慢时可能会引起变压器后备保护误动的结论。该结论得到了实际录波数据的验证, 针对性地提出了后备保护增加励磁涌流判据和电压闭锁条件、合理安排系统运行方式来避免励磁涌流衰减过慢等应对措施。

关键词: 励磁涌流; 后备保护; 衰减; 录波

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2014)01-0106-05

Analysis and Discussion on a Maloperation of Transformer Backup Protection Caused by Inrush Current

HUANG Jingjing

(Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: In order to study the effect of inrush current to the backup protection of transformer, a maloperation of transformer backup protection is presented in this paper, which is caused by inrush current emerged during the no-load switching of the new transformer in a 220 kV substation. The equivalent circuit model of the no-load switching transformer is established which derives the differential equation of the transformer magnetic flux. The mechanism of inrush current and the factors related to amplitude and attenuation are analyzed. Then some conclusions are presented. The theoretical results are verified by the real fault recorder data. According to the slow attenuation of inrush current, some measures are proposed to avoid the maloperation of backup protection, which have been verified in practice.

Key words: inrush current; backup protection; attenuation; fault recorder data

变压器作为电力系统的主要设备, 其正常运行对电力系统安全稳定至关重要。励磁涌流是影响变压器空载合闸的重要因素。目前的研究主要是关注鉴别励磁涌流的特征以及防止励磁涌流引起差动保护误动^[1-7]。这些研究对防止差动保护误动起到很好的效果, 并已在电力系统得到广泛应用。而在电力系统实际运行中, 在某些系统工况下, 产生的励磁涌流幅值大, 并且衰减较为缓慢, 会对变压器和系统其它设备的后备保护产生影响。由励磁涌流引

起变压器后备保护误动作的事故时有发生。而目前对励磁涌流衰减问题的研究与分析的文献还比较少。本文针对近期发生的一起变压器空载充电时后备保护误动案例, 进行了理论分析推导, 并结合故障录波数据和保护的实际行动情况, 分析出误动原因, 并提出了一些防范措施。

1 运行方式

变压器空载充电时的运行方式如图 1 所示。220 kV 某新建变电站, 按计划于 2013 年 12 月 28 日晚间, 对该站#1、#2 变压器进行充电试验。因 220 kV 线路尚未完成建设, 不具备从 220 kV 侧充电的条件, 故采用从变压器 110 kV 侧向变压器充电的方式。

收稿日期: 2014-10-01

作者简介: 黄晶晶(1983), 女, 福建福州人, 工程师, 硕士, 主要从事继电保护及其自动化运行检修维护工作(e-mail) hjj_zju_dq@163.com。

如图1所示，220 kV 甲站经 110 kV L1 线向该新建站的 110 kV 5M 母线供电。110 kV 乙站经 110 kV L3 线向 110 kV 6M 供电。并且 220 kV 甲站与 110 kV 乙站通过 110 kV L2 线路相连。L1、L2、L3 的线路长度分别为 5.410 km、5.034 km、0.778 km。充电时，线路断路器、母联断路器均闭合。

对#1 变进行了4次充电、#2 变进行了3次充电，涌流情况及保护动作情况，分别如表1和表2所示。

#1 主变第1、2次充电时正常。第3、4次充电，后备保护均动作跳闸。从表1可知，励磁涌流幅值很大，远大于保护动作值，半波衰减时间长，

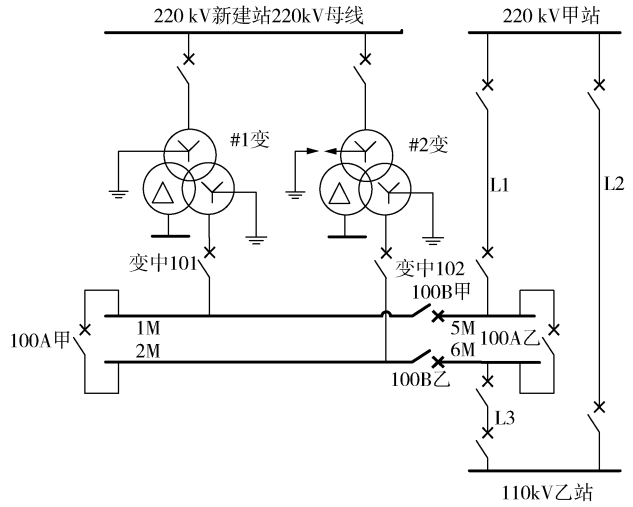


图1 220 kV 某基建站送电测试时的运行方式

Fig. 1 The System Operation Mode of a 220 kV Substation

表1 #1 变测试结果汇总

Table 1 The Test Results of #1 Transformer

#1 主变 充电时刻	涌流		保护动作情况				
	涌流峰 值/A	半波衰减 时间/s					
19: 16: 50	3 300	0.32	无				
21: 38: 11	1 400	0.38	无				
22: 18: 19	6 900	0.24	主一保护过流 I段 t2 时限动作	动作值 0.625 A(937.5 A)	动作时间 514 ms	方向元件退出	复压元件退出
			主二保护过流 I段 t2 时限动作	动作值 0.607 A(910.5 A)	动作时间 505 ms	方向元件退出	复压元件退出
22: 31: 36	5 900	0.23	100A 甲零序 过流 I段动作	动作值 0.81 A(972 A)	动作时间 200 ms		
			100B 乙零序 过流 I段动作	动作值 0.81 A(972 A)	动作时间 200 ms		

注：动作值的括号内为一次值。

表2 #2 变测试结果汇总

Table 2 The test Results of #2 Transformer

#2 主变 充电时刻	涌流		保护动作情况				
	涌流峰 值/A	半波衰减 时间/s					
20: 18: 55	4 300	0.34	100A 甲零序过流 II 段动作	动作值 0.39 A(468 A)	动作时间 600 ms		
			100B 乙零序过流 II 段动作	动作值 0.4 A(480 A)	动作时间 600 ms		
22: 03: 39	4 300	0.32	100A 甲零序过流 II 段动作	动作值 0.36 A(432 A)	动作时间 1 000 ms		
			100B 乙零序过流 II 段动作	动作值 0.36 A(432 A)	动作时间 1 000 ms		
22: 27: 14	6 700	0.24	主一保护过流 I 段 t2 时限动作	动作值 0.625 A(937.5 A)	动作时间 505 ms		
			主二保护过流 I 段 t2 时限动作	动作值 0.611 A(916.5 A)	动作时间 507 ms		

注：动作值的括号内为一次值。

且在主变充电时主变后备保护方向和复压闭锁元件未投入,母联/分段保护不经复压闭锁,经延时保护正确动作。

#2 主变 3 次充电励磁涌流值都很大,且半波衰减时间长,3 次充电后备保护均动作。

2 励磁涌流产生及衰减分析

为简单起见,下面以主变压器的单相为例,简要分析空充时励磁涌流产生的机理。

如图 2 所示为主变单相 110 kV 侧空充的电路模型, U_s 为等效的 110 kV 侧无穷大电源, L_s 、 R_s 为 110 kV 系统等效电感和电阻, QF 为主变 110 kV 侧断路器, $L_{1,\sigma}$ 为变压器一次侧漏感, $R_{1,\sigma}$ 为一次侧串联电阻,等于变压器 110 kV 侧线圈的直流电阻, $L_{1,m}$ 为变压器励磁电感。

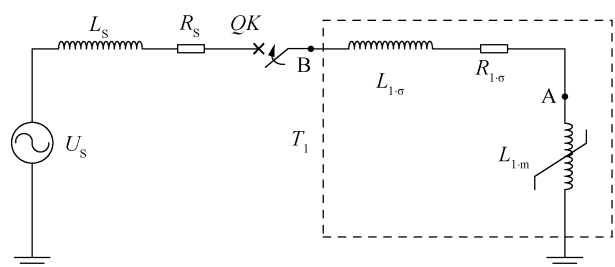


图 2 主变单相空载合闸等效模型

Fig. 2 The Equivalent Model of Single Phase Transformer Charging

设变压器 T_1 在 $t=0$ 时刻合闸,电压合闸角为 α ,则原边回路电压方程为:

$$U_s(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

其中 $R = R_s + R_{1,\sigma}$ 为回路电阻。 Φ 为原边回路总磁通,满足

$$\begin{aligned} \Phi &= (L_s + L_{1,\sigma})i + \Phi_T \\ &= (L_s + L_{1,\sigma} + L_{1,m})i = Li \end{aligned} \quad (2)$$

Φ_T 为变压器铁芯磁通,可等效为励磁电感 $L_{1,m}$ 产生的磁通。即 $\Phi_T = L_{1,m}i$ 。实际上, $L_{1,m}$ 是一个非线性电感,其值按照变压器励磁曲线计算得到,为了定性分析励磁涌流暂态过程,暂且使用近似直线特性,即把 $L_{1,m}$ 当成一个线性电感简化处理。将 $i = \frac{\Phi}{L}$ 代入微分方程(1),得到以磁链 Φ 为变量的微分方程:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = \frac{R}{L}\Phi + \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

解此微分方程得:

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [\Phi_r - \Phi_m \sin(\alpha - \varphi)]e^{-t/\tau} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{L_s + L_{1,\sigma} + L_{1,m}}{R_s + R_{1,\sigma}} \quad (5)$$

式中, Φ_m 为稳态磁通幅值且满足 $\Phi_m = LU_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, Φ_r 铁心剩磁通, τ 为变压器一次侧空载合闸回路时间常数, $\varphi = \arctan(\omega L/R)$ 。

由式(4)可知,变压器的暂态磁链 Φ 由稳态交流分量和暂态直流分量两部分组成。稳态交流分量的幅值是固定的,若暂态直流分量足够大,则会使变压器铁芯产生较大的偏磁而进入饱和状态,使 $L_{1,m}$ 急剧减小,产生励磁涌流。

暂态直流分量的大小与空载合闸时电压初相角、剩磁的大小和方向、变压器空载合闸回路的阻抗角度 φ 有关。且励磁涌流的衰减的速度取决于时间常数 τ ,若回路的电感 L 越大,电阻 R 越小,则衰减时间越长。

该新建站在正常运行方式下,由 L2 与 L1 线、L3 线并列运行供电。忽略系统阻抗和变压器阻抗中的电阻分量^[8],令系统电抗和变压器电抗为 jX_s 。

令 110 kV 线路每公里长度的电阻为 R_0 ,电抗为 X_0 。则 L2 与 L1 线、L3 线并联时的等效阻抗为 $2.8(R_0 + jX_0)$ 。

则在正常运行方式下,变压器合闸总阻抗为:

$$Z = 2.8R_0 + j(2.8X_0 + X_s) \quad (6)$$

励磁涌流的衰减时间常数为:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{2.8X_0 + X_s}{2.8R_0} = \frac{X_0 + \frac{X_s}{2.8}}{R_0} \quad (7)$$

在 2014 年 1 月 3 日进行该站第 2 次启动时,将 L3 线新建站侧开关断开为热备用,新建站仅经 L1 线供电,此时,线路的阻抗值为 $5.41(R_0 + jX_0)$,变压器合闸总阻抗为:

$$Z' = 5.41R_0 + j(5.41X_0 + X_s)$$

励磁涌流的衰减时间常数为:

$$\begin{aligned} \tau' &= \frac{L}{R} = \frac{5.41X_0 + X_s}{5.41R_0} \\ &= \frac{X_0 + \frac{X_s}{5.41}}{R_0} \end{aligned} \quad (8)$$

比较式(7)和式(8),可知 $\tau' < \tau$ 。

由此可见，在第 2 次启动时，时间常数减小，励磁涌流衰减速度明显快于第 1 次。第 1 次启动时由 L2 与 L1 线、L3 线并列运行供电，实际录波波形如图 3 所示，#1 主变励磁涌流半波衰减时间 t_1 为 0.2 ~ 0.3 s，第 2 次启动时，仅经 L1 线供电，实际录波波形如图 4 所示，#1 主变励磁涌流的半波衰减时间 t_2 为 0.1 ~ 0.2 s， $t_2 < t_1$ 验证了前面的结论。

从表 1 可知，由于励磁涌流幅值很大，远大于保护动作值，当半波衰减时间大于后备保护整定时间且满足复压闭锁条件时，经延时后备保护动作。

3 应对措施

针对上述主变启动时，励磁涌流大且励磁涌流衰减缓慢导致后备保护误动作，提出以下防范措施：

1) 在保证保护灵敏度的前提下，在后备保护中增加励磁涌流判别，防止励磁涌流导致的保护误动作。

2) 由于励磁涌流对系统电压影响较小，而发生短路故障时，电压会有明显的下降，可引入电压闭锁元件，有效区分励磁涌流和短路故障。

3) 在变电站主变送电时，合理调整运行方式，应尽量避免来自同一电源侧的两条线路并列运行，以防止励磁涌流衰减过慢。

4 结论

本文从一起典型的变电站主变充电时后备保护误动作事件出发，根据励磁涌流产生及衰减的原理，透彻分析导致此次涌流大及衰减时间长的原因，并提出了三种切实可行的防范措施。

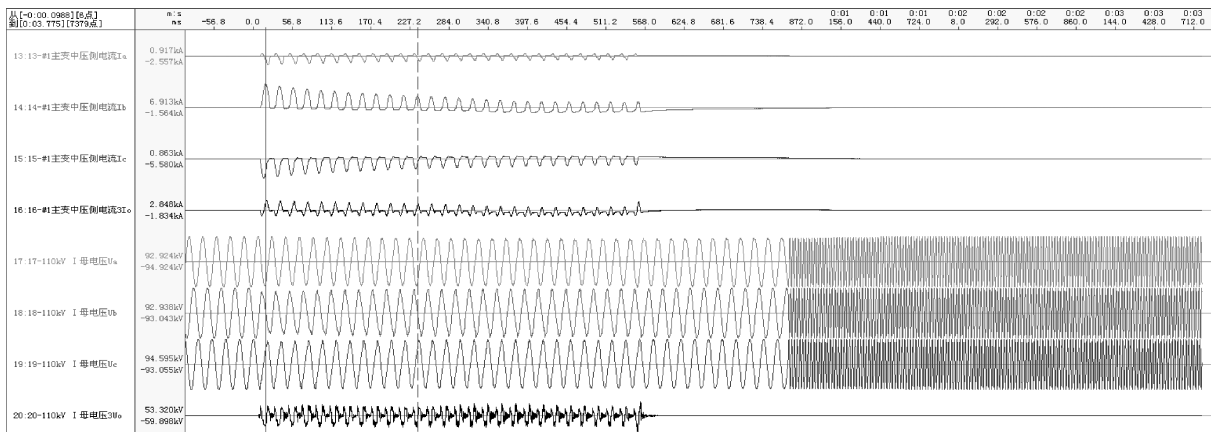


图 3 #1 主变充电励磁涌流 (2013 年 12 月 28 日)

Fig. 3 The Inrush Current of #1 Transformer Charging (Dec. 28, 2013)

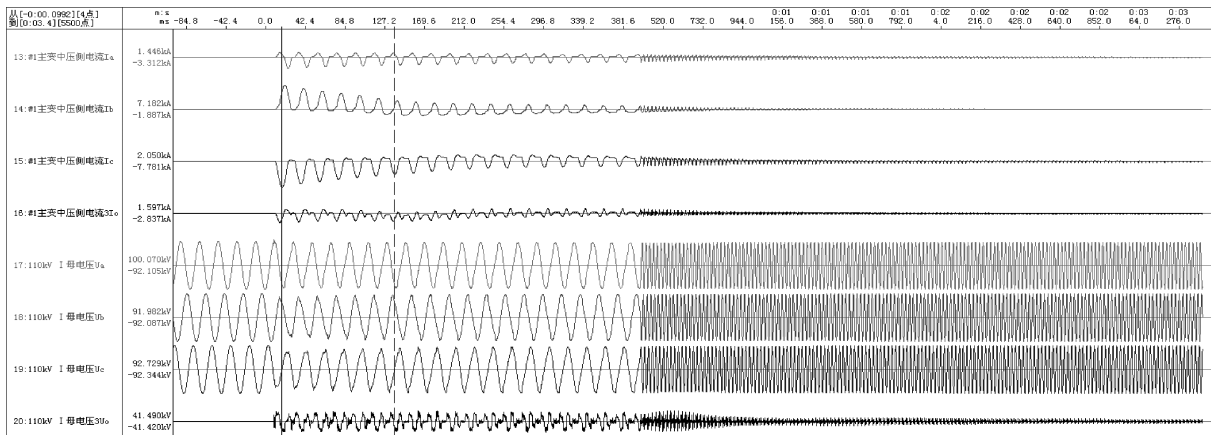


图 4 #1 主变充电励磁涌流 (2014 年 1 月 3 日)

Fig. 4 The Inrush Current of #1 Transformer Charging (Jan. 3, 2014)

参考文献:

- [1] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 98 - 105.
HUANG Jiadong, LUO Weiqiang. New Algorithm to Identify Inrush Current Based on Improved Mathematical Morphology [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 98 - 105.
- [2] 马静, 王增平, 吴颀. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166 - 171.
MA Jing, WANG Zengping, WU Jie. A Novel Method to Rapidly Identify Inrush Current and Internal Fault Current Based on Variation Characteristic of Fundamental Current Amplitude [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 166 - 171.
- [3] 郑涛, 张婕, 高旭. 一起特高压变压器的差动保护误动分析及防范措施 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 92 - 97.
ZHENG Tao, ZHANG Jie, GAO Xu. Analysis on a Mal-operation of Differential Protection for Ultra-high Voltage Transformer and Its Countermeasure [J]. Automation of Electric Power Systems. 2011, 35(18): 92 - 97.
- [4] 承文新, 刘志超. 变压器差动保护涌流制动原理分析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 90 - 92.
CHENG Wenxin, LIU Zhichao. Analysis of Inrush Restraint

- Theory for Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 90 - 92.
- [5] 金恩淑, 刘丽丽, 姜龙澈, 等. 变压器电流差动保护改进方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 47 - 51.
JIN Enshu, LIU Lili, JIANG Longzhe, et al. An Improved Method of Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems. 2008, 32(9): 47 - 51.
- [6] 赵萍. 一起主变差动保护误动实例分析及对策探讨 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 104 - 107.
ZHAO Ping. Analysis and Countermeasures on a Case of Mal-Operation of Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 104 - 107.
- [7] 郑涛, 曹志辉. 基于模糊逻辑的变压器励磁涌流二次谐波闭锁方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 61 - 65.
ZHENG Tao, CAO Zhihui. Scheme for Second Harmonic Block of Magnetizing Inrush Current in Transformers Based on Fuzzy Logic [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 61 - 65.
- [8] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power System Analysis [M]. 3rd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

(责任编辑 黄肇和)

(上接第 105 页 Continued from Page 105)

自动化通信系统可靠性不高的现状出发, 以人工的方式补全缺失遥信量进而快速实现故障定位, 从而达到减小停电时间, 提高可靠性的目的。

参考文献:

- [1] 陈竟成, 徐德超, 于尔铿. 配电网故障恢复系统 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 46 - 50.
CHEN Jingcheng, XU Dechao, YU Erkeng. Distribution Fault Detection, Isolation and Restoration System in a Distribution Management System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 46 - 50.
- [2] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1985.
- [3] 熊文, 武鹏, 余浩斌. 基于负荷测录系统的配电网状态估计 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 84 - 87.
XIONG Wen, WU Peng, YU Haobin. State Estimation of Distribution Network by the Load Monitor System [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 84 - 87.
- [4] 周苏荃. 新息图法拓扑错误辨识 [J]. 电力系统自动化,

- 2000, 24(4): 23 - 27.
ZHOU Suquan. An Innovation Graph Approach to Topology Error Identification [J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(4): 23 - 27.
- [5] 周苏荃, 柳焯. 负荷突变、拓扑错误和坏数据三者交叠的识别问题 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 6 - 10.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. The Identification of Three Simultaneous Anomalies of Sudden Load Change and Topology Error and Bad Data [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 6 - 10.
- [6] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 基于故障投诉电话信息的配电网故障定位粗糙集方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(1): 64 - 66.
SHU Hongchun, SUN Xiangfei, SI Dajun. A Rough Set Approach to Distribution Network Fault Location Based on Fault Complain Call Information [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 64 - 66.
- [7] MESUT E B, WU F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401 - 1407.

(责任编辑 黄肇和)