

doi: 10.7690/bgzd.2014.05.016

# 变压器和应涌流对继电保护的影响及对策研究

褚晓锐

(西昌学院工程技术学院, 四川 西昌 615013)

**摘要:** 针对变压器空载合闸或外部故障切除后电压恢复期间, 可能会产生相关继电保护误动作问题, 对变压器和应涌流对继电保护的影响及对策进行研究。分析变压器和应涌流产生的机理, 利用 Matlab/Simulink 对变压器和应涌流进行仿真分析, 探讨和应涌流对继电保护的影响, 并提出防止继电保护误动作的解决策略。该研究可为相关继电保护研究提供参考。

**关键词:** 和应涌流; 继电保护; 误动作; 影响; 对策

**中图分类号:** TP211 **文献标志码:** A

## Research on Influence and Countermeasure of Transformer Sympathetic Inrush on Relay Protection

Chu Xiaorui

(School of Engineering & Technology, Xichang College, Xichang 615013, China)

**Abstract:** In view of no-load closing or removal of external faults of the transformer in voltage recovery period, it may lead to malfunction problems of related differential protection, researches on influences and countermeasures of transformer sympathetic inrush on relay protection. Analysis of transformer sympathetic inrush generation mechanism and simulation analysis of transformer sympathetic inrush base on Matlab/Simulink, discussion on influences of transformer sympathetic inrush on relay protection and appropriate countermeasures of anti-malfunction of relay protection were proposed. This research provides reference to research of related relay protection.

**Keywords:** sympathetic inrush; relay protection; malfunction; influence; countermeasure

### 0 引言

变压器是电力系统中重要主设备之一, 其运行状态直接关系电力系统能否安全、稳定和可靠地运行<sup>[1]</sup>。空载合闸或外部故障切除后的变压器在电压恢复期间, 可能会在相邻变压器产生和应涌流, 从而引起相关继电保护装置误动作的现象, 近年来引起了科技人员的广泛关注和重视<sup>[2]</sup>; 因此, 笔者研究了变压器和应涌流对继电保护的影响和对策。

### 1 变压器和应涌流产生机理

在系统恢复初期, 2 台双绕组变压器 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 处于并联状态, 变压器 T<sub>1</sub> 处于空载运行, 变压器 T<sub>2</sub> 待合闸状态。图 1 为变压器 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 电气连接图, 图 2 为等效电路图。在此忽略变压器一次和二次线圈绕组电阻和线路电阻及电容<sup>[3]</sup>。

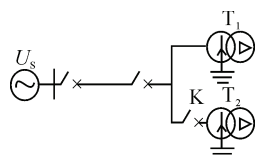


图 1 2 台变压器并联和应涌流电气连接

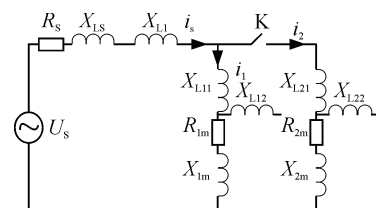


图 2 2 台变压器并联等效电路

$U_s$  是系统等效电源,  $R_s$  和  $L_s$  分别为系统侧的电阻与电感;  $X_{L1}$  是线路电抗,  $X_{L11}$ 、 $X_{L12}$  和  $X_{L1m}$  分别是变压器 T<sub>1</sub> 的一次绕组、二次绕组的漏电抗和励磁电抗,  $X_{L21}$ 、 $X_{L2m}$  分别是变压器 T<sub>2</sub> 的一次绕组漏电抗和励磁电抗,  $R_{1m}$ 、 $R_{2m}$  分别是变压器 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 的励磁电阻, 令  $L_1=L_{11}+L_{1m}$ ,  $L_2=L_{21}+L_{2m}$ 。

设系统电源电压为  $U_s(t)=U_m\sin(\omega t+\alpha)$ ,  $U_m$  为电源电压幅值,  $\alpha$  为合闸角。分析得到以下结果:

$$\begin{cases} R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + R_{1m} i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \\ R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_{2m} i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \\ i_s = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-12-15; 修回日期: 2014-01-06

基金项目: 四川省教育厅青年基金资助项目(11ZB112)

作者简介: 褚晓锐(1977—), 男, 四川人, 工学硕士, 副教授, 从事电力系统及其自动化研究。

式中  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  为变压器 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 的磁链。

假定  $R_{1m}=R_{2m}=R$ ,  $L_1=L_2=L$ 。然后利用拉普拉斯变换, 就可以得到:

$$\psi_1(t) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] \exp\left(\frac{R + 2R_s}{L + 2L_s} t\right) + \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \quad (2)$$

$$\psi_2(t) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] \exp\left(-\frac{R + 2R_s}{L + 2L_s} t\right) - \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \quad (3)$$

其中:  $Z = [(R + 2R_s)^2 + (L + 2L_s + 2L_l)^2]^{1/2}$ ;  $\theta = \arctan[\omega(L + 2L_s + 2L_l) / (R + 2R_s)]$ ;  $\psi_1(0)$ 、 $\psi_2(0)$  分别为 T<sub>1</sub> 初始磁链和 T<sub>2</sub> 的初始磁链。

重写电压方程如下:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = U_s - (R_s + R_1)i_1 - R_s i_2 \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = U_s - R_s i_1 - (R_s + R_2)i_2 \quad (5)$$

由图 2 得:

$$U_1 = U_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} - L_l \frac{di_s}{dt} \quad (6)$$

考虑到  $U_s(t)$  为对称周期函数, 分别对式 (4)、式 (5) 两等式两边进行一个周期积分得:

$$\Delta\psi_1 = -\int_t^{t+T} (R_s + R_1)i_1(t)dt - \int_t^{t+T} R_s i_2(t)dt \quad (7)$$

$$\Delta\psi_2 = -\int_t^{t+T} R_s i_1(t)dt - \int_t^{t+T} (R_s + R_2)i_2(t)dt \quad (8)$$

从式 (8) 可以分析得到变压器 T<sub>2</sub> 的磁链以单台变压器空载投入时的变化规律, 从式 (7) 发现 T<sub>2</sub> 该阶段磁链的变化量主要由  $i_2$  中的非周期分量造成的, 每周磁链增量是式 (7) 的第 2 部分:

$$\Delta\psi_1 = -\int_t^{t+T} R_s i_2(t)dt \quad (9)$$

根据式 (2) 和式 (3)  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  有 2 个直流衰减分量和 1 个相同的稳态分量, 第 2 个符号相同, 而第 1 个符号相反。T<sub>1</sub> 中的偏磁和 T<sub>2</sub> 中的偏磁反向, 即 T<sub>1</sub> 进入负向饱和时, T<sub>2</sub> 进入正向饱和。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 交替进入最深度饱和, 从而  $i_1$ 、 $i_2$  的峰值相隔半个周期交错出现。由于  $\psi_1$  的增加有限, 当  $\Delta\psi_1=0$  时,  $\psi_1$  负向达到最大,  $i_1$  也达最大, 此后  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  进入各自

的衰减阶段。由式 (7) 知,  $i_1$  达到最大值的临界条件为:

$$\int_t^{t+T} (R_s + R_1)i_1(t)dt = -\int_t^{t+T} R_s i_2(t)dt \quad (10)$$

在 T<sub>1</sub> 出现和应涌流  $i_1$  后, 根据  $i_s = i_1 + i_2$ , 考虑  $i_1$  和  $i_2$  波形特点, 发现  $i_s$  波形具有对称性质, 由式 (7)、式 (8) 得:

$$\Delta\psi_1 = -\int_t^{t+T} R_1 i_1(t)dt \quad (11)$$

$$\Delta\psi_2 = -\int_t^{t+T} R_2 i_2(t)dt \quad (12)$$

其中,  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  按式 (11)、式 (12) 的值进行衰减, 因为没有系统阻尼, 基本按照常数  $L_1/R_1$  和  $L_2/R_2$  进行衰减, 所以衰减时间延长, 和应涌流比变压器励磁涌流持续时间要长<sup>[4]</sup>。

合闸变压器随机空载合闸, 因为合闸角不同而造成合闸变压器产生偏磁, 磁通的瞬变使合闸变压器产生励磁涌流, 励磁涌流又引起系统电流突变, 突变的系统电流经系统和线路阻抗会导致两变压器并联公共点处的电压下降, 引起运行变压器磁链突变, 所以导致在运行变压器上产生和应涌流<sup>[5]</sup>。

## 2 和应涌流仿真

2 台变压器 Y/Δ 连接, 额定视在功率  $S_N=6\ 300$  kVA, 额定频率  $f_N=50$  Hz, 原边和副边额定电压  $U_{1N}/U_{2N}=35$  kV/10.5 kV。按图 1 中各元件的连接方式及参数, 在 Matlab/Simulink 应用环境中, 建立仿真模型, 得到并联和应涌流仿真波形, 如图 3。

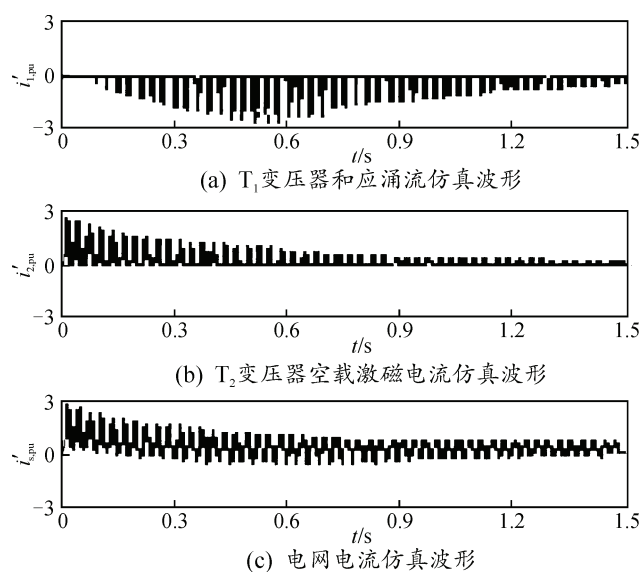


图 3 2 台变压器并联和应涌流仿真波形

图 3 中,  $i'_{1,pu}$ 、 $i'_{2,pu}$  和  $i_{s,pu}$  分别是  $i'_1$ 、 $i'_2$  和  $i_s$  的标

么值(其基准值为变压器的空载电流)。 $i_2$ 和 $i_1'$ 偏离时间轴的不同侧,所以二者的相位是相反的,仿真结果与理论分析一致。

### 3 变压器和应涌流对继电保护影响

#### 3.1 对变压器差动保护影响

变压器在空载合闸或外部故障切除后电压恢复时,由于变压器铁芯饱和导致产生的励磁涌流是变压器差动保护误动作的一个重要方面<sup>[2]</sup>。在实际应用中,对于励磁涌流主要是通过二次谐波制动判据和间断角原理来闭锁变压器差动保护,但这些措施对和应涌流效果并不显著<sup>[4]</sup>。因为和应涌流中的二次谐波的最大值比和应涌流出现的时间要晚一些,这样就有可能存在差电流中基波含量大于差动保护的整定值,由于二次谐波含量小于谐波制动比,而造成差动保护误动作。

由于变压器合闸后的暂态过程负序电压平均值的比值会发生突变,将该突变时刻近似作为变压器的合闸时刻,通过检测差电流出现时刻与差电流的状态,利用平均值突变时刻与差电流出现时刻存在时间差的特点,检测和应涌流的发生,以此闭锁和应涌流引起的保护误动作<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 对变压器零序电流保护影响

零序电流保护整定值通常较低,保护较为灵敏。对于单台变压器励磁涌流产生的零序电流,其衰减较快,可以通过延时,达到躲过其不利影响。当和应涌流出现时,由于衰减速度缓慢,情况会发生变化。当变压器中性点接地、空载运行时,零序电流保护存在误动作可能<sup>[7]</sup>。

三相非对称和应涌流中谐波电流成分含量较高,非对称的谐波电流是零序分量产生的主要原因。由于和应涌流衰减较缓慢,不对称的谐波电流零序分量持续时间较长,可以在零序电流保护中加入零序涌流鉴别环节来防止保护误动作;由于零序涌流中二次谐波含量较高,可以通过二次谐波制动来防止保护误动作;若不可避免,在系统方式允许下,分开空载变压器的中性点接地开关来防止保护误动作<sup>[8]</sup>。

#### 3.3 对上级线路零序电流保护的影响

中性点接地的变压器,在涌流发生后,一般会产生产生零序电流,和应涌流出现后,零序电流衰减速度缓慢,同时使上级线路的零序电流也逐渐增大,

持续时间较长,对于依靠延时来躲涌流的零序电流保护影响较大,容易造成零序电流保护误动作<sup>[6]</sup>。通常考虑提高保护的整定值,但会使继电保护灵敏度下降。保护增加涌流鉴别环节,由于零序波形趋于对称,二次谐波含量几乎为零,但此时奇次谐波含量较高,特别三次谐波较高,可以考虑采用二次和三次谐波的综合谐波制动方案<sup>[8]</sup>。

#### 3.4 对变压器过电流保护影响

变压器过电流保护的电流整定值按躲过最大负荷电流整定,时间定值按逐级配合原则整定,是依靠时间来躲励磁涌流,通常对单台变压器的励磁涌流制动作用显著,但对和应涌流可能会失去制动效果。当和应涌流出现时,幅值逐渐增大,甚至达到额定电流的6~10倍,对于过电流保护,通过提高电流定值大小躲过和应涌流较困难,由于和应涌流衰减较慢,持续时间较长,难以避开和应涌流的影响,造成变压器过电流保护误动作<sup>[7]</sup>。由于变压器产生和应涌流后,对系统电压影响较小,当变压器发生故障时,系统电压会降低,因此可考虑引入低电压闭锁元件,来防止变压器过电流保护误动作<sup>[9]</sup>。

#### 3.5 对上级线路过电流保护影响

当1台变压器空载合闸运行后,同一母线相邻变压器会产生和应涌流,此时系统进线电流为各台变压器涌流之和,和应涌流与空投变压器励磁涌流方向相反、交替出现、衰减速度变慢,导致进线电流基波幅值变大,衰减较普通涌流变慢,而且电流波形趋于对称,二次谐波也有所降低,对于通过二次谐波制动或时间元件来躲励磁涌流的过电流保护,可能造成保护误动。但和应涌流对电源线路上的总电流的大小影响一般不大,常常采用电流整定值躲变压器励磁涌流的保护,也能躲和应涌流。所以考虑根据实际情况正确估计和应涌流发生时流过的最大电流,采用适当整定过电流保护整定值或增设低电压闭锁元件,防止上级线路过电流保护误动作<sup>[5]</sup>。

#### 3.6 对发电机差动保护影响

变压器空载合闸产生的和应涌流,可能会造成相邻发电机差动保护误动作。提高保护整定值或降低二次谐波制动比,将发电机差动保护整定值提高,对电流互感器特性试验、电流互感器精度和二次回路负载能否满足误差要求等方面措施,用以减小和应涌流造成相邻发电机差动保护误动作<sup>[10-11]</sup>。

## 4 结语

通过理论分析变压器和应涌流产生机理, 利用 Matlab/Simulink 仿真变压器和应涌流, 探讨了和应涌流对变压器差动保护、变压器零序电流保护、上级线路零序电流保护、变压器过电流保护、上级线路过电流保护和发电机差动保护的影响, 为防止各种误动作提出了相应的解决对策。

### 参考文献:

- [1] 褚晓锐. 基于可靠性的电力变压器差动保护误动作原因及对策研究[J]. 贵州电力技术, 2010, 13(3): 51-54.
- [2] 龚薇, 刘俊勇. 电网恢复初期和应涌流产生机理及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 44-49.
- [3] 褚晓锐. 基于 Matlab 的变压器恢复性涌流仿真研究[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 53-57.

\*\*\*\*\*

(上接第 49 页)

当前, 可以选择医院、场站、仓库等既有较高技术含量, 又有一定管理规模的单位进行试点, 积极探索相关后勤保障网链的应用模式。并在试点的基础上逐步扩大物联网技术在军队危机事件应急救援物资保障网链中的使用。物联网的价值在于形成一个宽泛的网, 而不是单一的物; 因此, 有必要建立一个能够遍及全军的信息管理平台。通过建设全军范围物联网技术的后勤保障网链, 实现对全军后勤物资保障信息数据的采集、交换、处理和分配使用, 达到对后勤物资的实时感知、资产可视、准确配送, 最终实现精确保障。

4) 加强人才队伍建设。人才队伍建设始终是军队各项建设的基础, 基于物联网技术的应急救援物资保障网链建设也不例外。在人才培养方面, 要贯彻军民融合思想, 充分利用社会资源, 培养既懂军事后勤, 又懂信息技术的军地通用人才。针对目前物联网建设的特殊要求, 一是加强人才培养力度。在军队和地方开设物联网技术人才培养的专业和学科, 全方位培养物联网技术的人才, 为未来物联网技术在物资保障网链建设打造一支军地通用的人才队伍。二是要建立人才激励机制。要想真正引进来, 保留住, 使用好人才, 必须要用环境凝聚人才, 用感情吸引人才, 用岗位造就人才, 要牢固树立用信息化建设标准去识才用才的理念, 大胆地使用一些有专业特长的后勤官兵, 并为他们创造良好的生长空间, 以此来发挥人才的辐射作用。三是完善激励机制, 对成绩优秀、工作突出的人才在晋职晋衔、

- [4] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 影响变压器和应涌流的各种因素[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 78-85.
- [5] 武万才, 边疆, 吴志勇. 变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 112-115.
- [6] 赵紫萍. 变压器和应涌流及中性点零序电流分量仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 56-60.
- [7] 毕大强, 孙叶. 变压器中性点接地方式对和应涌流产生的影响分析[J]. 继电器, 2007, 35(20): 7-12.
- [8] 朱维璐, 闫彩红, 刘智敏. 电力变压器和应涌流的产生机理及影响因素[J]. 高电压技术, 2010, 26(2): 380-384.
- [9] 赵萍, 徐华. 和应涌流引起的差动保护误动分析及对策探讨[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1198-1201.
- [10] 王洪诚, 陈刚, 王钰涵, 等. 基于线性模型的开关磁阻电机控制系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 70-73.
- [11] 罗勇, 王奕, 孙浩波. 和应涌流引起发电机差动保护误动原因分析及其改进措施[J]. 广东电力, 2011, 24(4): 42-45.

立功受奖上给予优先考虑, 激发后勤信息化人才的内在动力, 鼓励他们敢为人先, 开拓进取, 逐步形成“人尽其才, 才尽其用”的良好氛围。

## 5 结束语

物联网作为一项新兴技术, 以其独特的优势在感知与反应后勤中发挥着重要的作用。笔者通过分析物联网的特点、功能优势, 结合危机事件应急救援物资保障需求实际, 提出了基于物联网技术的军队应急救援物资保障网链的构建, 并对关键问题进行了探讨, 有一定的参考价值。目前, 物联网在保障领域仍处于理论研究和试验阶段, 距离实际应用还存在一定距离。相信随着不断的探索和建设, 物联网必将对未来军队后勤产生深远影响。

### 参考文献:

- [1] 王道伟, 荆博, 聂昕阳. 军事后勤[M]. 北京: 蓝天出版社, 2011: 272-276.
- [2] 黄桂田, 龚六堂, 张全升. 中国物联网发展报告[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2011: 1-5.
- [3] 潘清, 胡欣杰, 张晓清. 网络中心战装备体系[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 239-243.
- [4] 董连山. 基于信息系统的体系作战研究[M]. 北京: 国防大学出版社, 2012: 34-37.
- [5] 伍继宏. 精确化装备保障[M]. 北京: 解放军出版社, 2009: 40-42.
- [6] 李瑛译. 感知与反应后勤[J]. 外国军事后勤, 2006(1): 45-54.
- [7] 贾绍文, 林典雄, 王春雷, 等. 装备保障远程技术支持系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(1): 21-23.