

电力变压器对称励磁涌流的仿真研究

吕伶俐¹, 罗建¹, 黄正炫¹, 欧祖国²

(1. 重庆大学电气学院, 重庆 400044; 2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400041)

摘要: 电力变压器的励磁涌流判别一直都是变压器电流差动保护的主要任务。对于电力变压器的对称励磁涌流, 目前还是一个棘手的问题。应用 ATP 平台对三相变压器的对称励磁涌流进行仿真分析研究, 得出在三相变压器 Y, d 联结时, 适当改变系统电源电压合闸角, 各相将轮流出现对称励磁涌流的情况, 且对于每一项来说, 合闸角不同, 其对称涌流波形不同。除此之外, 剩磁对对称涌流波形亦有影响。该对称励磁涌流的仿真分析研究将有助于电力变压器励磁涌流判别方法的研究。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 对称励磁涌流; ATP; 剩磁

Simulation and analysis of the inrush of power transformer

Lü Li-ting¹, LUO Jian¹, HUANG Zheng-xuan¹, OU Zu-guo²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing New Century Electric Co., Ltd, Chongqing 400041, China)

Abstract: The discrimination of the inrush of power transformer is still the main duty of the current differential protection of transformer. The symmetric inrush of power transformer is a complex problem recently. This paper simulates and analyses the symmetric inrush of three-phases transformer by the ATP. It concludes that when the transformer is the Y,d connection, according to adjusting the switch angle of the system properly there would be a symmetric inrush occurring in every phase by turns. At the same time, as to each phase, if the switch angle is different, the wave would be different. Furthermore, remanence may affect the wave as well. The simulation and analysis are helpful for the research on how to discriminate the inrush.

Key words: transformer; inrush; symmetric inrush; ATP; remanence

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)05-0004-03

0 引言

电力变压器的主保护一直以电流差动保护为主, 其理论基础是基尔霍夫电流定律。当变压器出现励磁涌流时, 由于励磁涌流是单侧注入电流, 其幅值又很大, 因此会造成电流差动保护误动。长期以来, 专家和学者提出了许多励磁涌流的判别方法, 如二次谐波、间断角、波形对称等方法^[1,2]。对于偏向时间轴一侧的励磁涌流, 以上方法是可行有效的, 并得到了大量的实际应用。但是, 对于以时间轴对称的励磁涌流, 以上方法的判断有效性显然降低, 甚至处于无能为力的状态。为了应对和解决这一问题, 有必要就电力变压器的对称励磁涌流进行研究。目前, 一些文献已就电力变压器的对称励磁涌流进行了一定的研究, 文献[1]给出了对称励磁涌流的波形, 并对其形成条件做了分析。文献[3]给出了对称励磁涌流的仿真波形。

本文采用 ATP 程序, 就电力变压器的对称励磁涌流, 进行仿真分析研究, 得出对称励磁涌流的波形, 并对对称励磁涌流的特点及产生的条件进行相应的分析。ATP 仿真程序是一种基于 EMTTP 的电力系统仿真计算程序。

1 对称励磁涌流的仿真模型

为了构建电力变压器对称励磁涌流的 ATP 仿真模型^[4,5], 本文首先建立了一个单相变压器励磁涌流的 ATP 仿真电路(见图 1)。

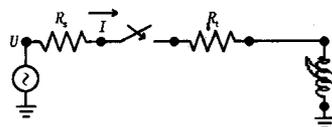


图 1 单相变压器空载合闸 ATP 仿真电路图

Fig.1 ATP model of single-phase transformer

Switching-on without load

在图 1 中, R_s 和 R_t 分别表示电源内阻和变压器阻值, I 为变压器端口电流, 非线性电感为 ATP 的 96 型非线性电感元件, 它通过分段线性电感模拟变压器铁心的饱和特性。在图 1 中, 原边漏感被忽略, 副边回路为开路状态。

在单相变压器励磁涌流的 ATP 仿真电路的基础上, 本文构建了三相变压器对称励磁涌流的 ATP 仿真电路^[6] (见图 2)。由于三相变压器对称励磁涌流的出现与三相变压器副边回路的接法相关^[1], 因此在图 2 中, 三相变压器为 Y, d 联结。在图 2 中, 采用 ATP 中的 RLC 元件来进行变压器负载的仿真, 并将负载取到无穷大。下面将对图 2 的三相变压器 ATP 仿真电路进行对称励磁涌流的仿真分析研究。

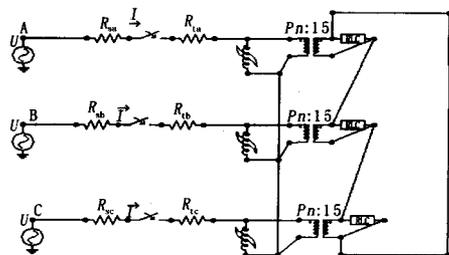


图 2 三相变压器 Y, d 联结的 ATP 模型

Fig.2 ATP model of three-phase transformer Y,d connection

2 对称励磁涌流的仿真分析

对于 Y, d 联结的三相变压器, 因为变压器二次侧为 d 接线, 当一次侧 (Y 接线) 空载合闸时, 一次侧三相绕组的励磁涌流中没有三次谐波电流, 因而主磁通和二次侧 d 接线绕组感应电动势中必有三次谐波, d 绕组中必将形成三次谐波环流。因此在这台变压器的一次侧空载合闸时, 励磁电流将由一次侧绕组电流与二次侧绕组三次谐波电流共同组成。

在分析中, A、B、C 三相电源电压分别是:

$$u_a = 110\sin(100\pi t) \quad u_b = 110\sin(100\pi t - \frac{2}{3}\pi) \quad u_c = 110\sin(100\pi t - \frac{4}{3}\pi)$$

(单位: kV), 且每相 R_s 为 1Ω 、 R_t 为 4Ω , 变压器变比为 10:1。

在 $t=0$ s 时, 也就是在 A 相电源电压过零点时, 三相变压器空载合闸, 得到三相变压器的各相励磁电流, 见图 3 所示。从图 3 可见, 此情况下的 A、B、C 相电流都为励磁涌流, 且 A 相励磁涌流最大幅值可达 700 A, B、C 两相励磁涌流最大幅值可达 400 A, A 相励磁涌流完全偏于时间轴一侧, B、C 两相励磁涌流偏于时间轴一侧, 另一侧有少许励磁

涌流, 其最大幅值达 100 A。

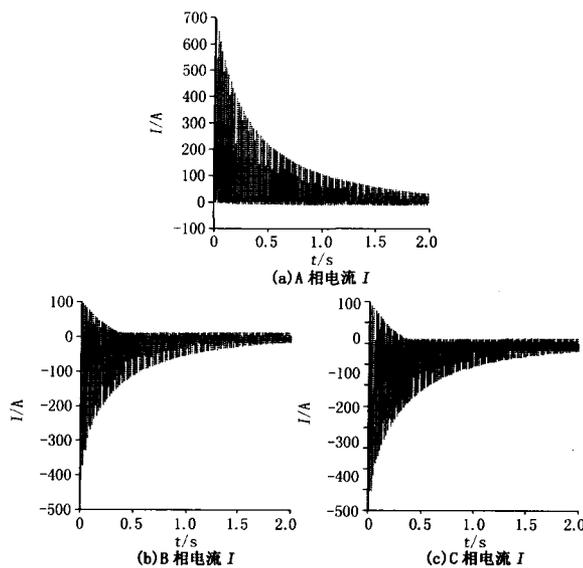


图 3 三相变压器 Y, d 联结 0 s 合闸时电流 I 的情况
Fig.3 Situation of three-phase transformer Y,d connection switching-on at original point of the time axes

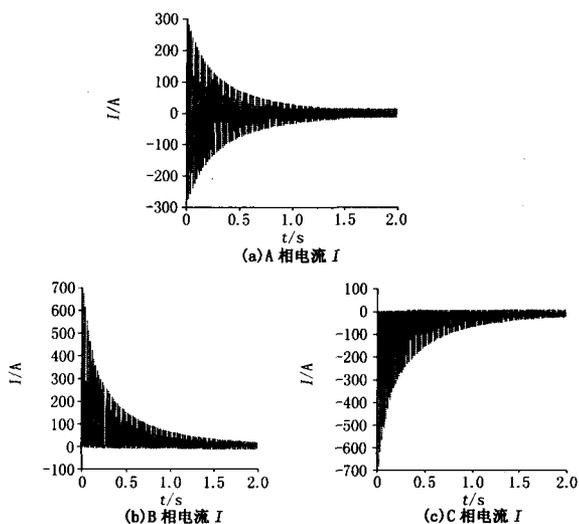


图 4 三相变压器 Y, d 联结 0.005 s 合闸时电流 I 的情况
Fig.4 Situation of three-phase transformer Y,d connection switching-on at 0.05 second

在 $t=0.005$ s 时, 也就是在 A 相电源电压达到波峰时, 三相变压器空载合闸, 得到三相变压器的各相励磁电流, 见图 4 所示。从图 4 可见, A 相电流为完全对称励磁涌流, 最大幅值可达 300 A; B、C 两相电流为偏于时间轴一侧的励磁涌流, 最大幅值可达 700 A。

在 $t=0.010$ s 时, 也就是在 A 相电源电压过零点时, 三相变压器空载合闸, 得到三相变压器的各

相励磁电流,其波形类同图 3,只是电流相位相反。

在 $t=0.015\text{ s}$ 时,也就是在 A 相电源电压达到波谷时,三相变压器空载合闸,得到三相变压器的各相励磁电流,其波形类同图 4,只是电流相位相反。

对于 B 相电源电压,在 $t=0.0067\text{ s}$ (过零点), $t=0.0117\text{ s}$ (波峰), $t=0.0167\text{ s}$ (过零点), $t=0.0017\text{ s}$ (波谷) 时,三相变压器空载合闸,可得到三相变压器的各相励磁电流,其波形类同 A 相电源电压的各种情况。

对于 C 相电源电压,在 $t=0.0033\text{ s}$ (过零点), $t=0.0083\text{ s}$ (波谷), $t=0.0133\text{ s}$ (过零点), $t=0.0183\text{ s}$ (波峰) 时,三相变压器空载合闸,可得到三相变压器的各相励磁电流,其波形也类同 A 相电源电压的各种情况。

由以上仿真分析可知,合闸时间正好是某相电源电压经过波峰或波谷的时间时,这一相励磁电流就会出现完全对称励磁涌流,且对称励磁涌流的最大幅值(300 A)小于偏于时间轴一侧励磁涌流的最大幅值(700 A)。这是由于当 Y, d 联结的变压器一次侧空载合闸时,励磁电流将由一次侧绕组电流与二次侧绕组三次谐波电流共同组成,若二次侧绕组三次谐波电流足够大时,变压器铁心将出现饱和状态,由于这种饱和状态出现在时间轴的两侧,故产生的励磁涌流波形呈对称特性。图 5 给出了放大的对称励磁涌流波形,从图 5 可看出,对称励磁涌流的上下波形几乎对称,有一定的间断区间,但波峰时的对称励磁涌流波形与波谷时的对称励磁涌流波形有一定的区别。

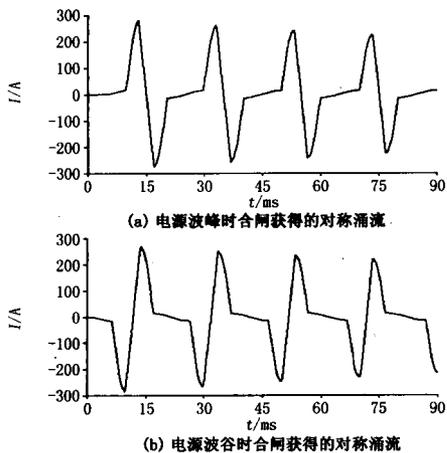


图 5 对称励磁涌流波形的放大
Fig.5 Amplified waves of the inrush

本文还就改变剩磁对变压器对称励磁涌流的

影响进行了研究。增加正向剩磁 50T,其 A 相励磁涌流达到最对称的合闸时间是 $t=0.004\text{ s}$;增加反向相同的剩磁-50 T,其 A 相励磁涌流达到最对称的合闸时间是 $t=0.006\text{ s}$ 。图 6 给出了改变剩磁后 A 相的对称励磁涌流波形。从图 6 可看出,对称励磁涌流的波形已处于不完全对称状态,这显然是变压器剩磁的作用。

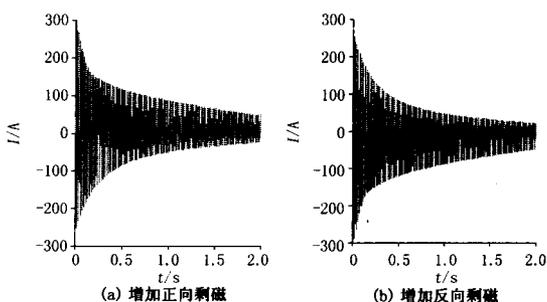


图 6 改变剩磁后 A 相的对称涌流
Fig.6 Symmetric inrush of phase A of after altering the remanence

3 结论

在仿真分析研究中,本文得出了以下几点结论。

- (1) Y, d 联结的三相变压器在空载合闸时,有可能出现对称励磁涌流的现象;
- (2) 如果系统合闸时间正好是某相电源电压达到波峰或者波谷的时间,那么该相的励磁涌流会达到完全对称;
- (3) 对称励磁涌流的最大幅值小于偏于时间轴一侧励磁涌流的最大幅值;
- (4) 在电源电压经过波峰时合闸所得到的对称涌流波形与在电源电压经过波谷时合闸所产生的对称涌流波形有一定的区别;
- (5) 改变剩磁,也会改变各相涌流达到比较对称的所需要的合闸时间,并且其幅值也会发生明显的变化。

在实际中,对称励磁涌流波形有时是客观存在的,这将使一些励磁涌流判断方法严重失效。为了应对这种情况,有必要研究新的变压器励磁涌流判断方法。

参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(下转第 12 页 continued on page 12)

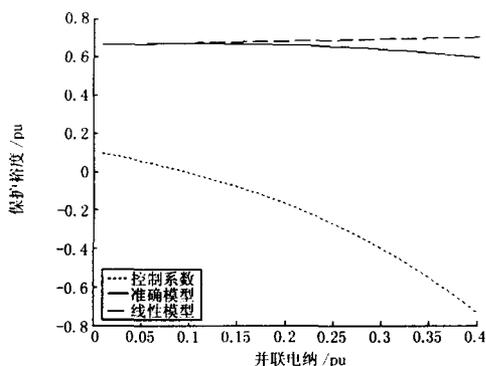


图8 节点7补偿时保护动作裕度

Fig.8 Operation margin of mho relay on line 7-9 with SVC installed at bus 7

4 结论

本文基于距离三段保护动作特性,研究了可控并补装置对输电网络的安全性能的影响。将阻抗继电器的动作裕度定义为节点电压的函数,展开得到其对节点电压和节点功率的函数,实现对保护动作的潮流控制。将可控并补装置并联电纳对距离三段保护动作裕度的灵敏度系数定义控制系数,判断可控并补对距离三段动作特性的影响。将算法应用于IEEE 14节点系统,得到以下结论:

(1) 保护动作裕度对节点电压、节点功率等扰动量的灵敏度系数,描述了由于距离三段保护不合理动作引起的输电网络脆弱性。

(2) 当保护动作裕度较小,保护可能误动时,基于控制系数的线性模型可以模拟 SVC 的快速控

制,计算误差极小。

(3) 对于不同线路的距离三段保护, SVC 并联补偿可能存在正面或者负面影响,可根据控制系数的符号予以快速判断。

参考文献

- [1] Horowitz S H, Phadke A G. Third Zone Revisited [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 23-29.
- [2] Marttila R J. Effect of Transmission Line Loading on the Performance Characteristics of Polyphase Distance Relay Elements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 1466-1474.
- [3] Tamronglak S, Horowitz S H, Phadke A G, et al. Anatomy of Power System Blackouts: Preventive Relaying Strategies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 708-715.
- [4] 赵自刚, 张洪, 赵春雷. 美加大停电后关于继电保护的一些思考[J]. 继电器, 2004, 32(21): 76-79. ZHAO Zi-gang, ZHANG Hong, ZHAO Chun-lei. Reflection of Protection Relay After the Great 8.14 Power Failure of America and Canada[J]. Relay, 2004, 32(21): 76-79.
- [5] 李生虎. 线路距离III段保护动作裕度的节点功率控制算法[J]. 电力系统自动化, 2006,30(16):31-35,84. LI Sheng-hu. Power Injection Control to Operation Margin of Zone 3 Impedance Relay on Transmission Lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16) :31-35,84.

收稿日期: 2006-08-27; 修回日期: 2006-11-18

作者简介:

李生虎(1974-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全分析与控制、电力系统可靠性、柔性输配电技术。
E-mail: lishenghu2004@hotmail.com

(上接第6页 continued from page 6)

- WANG Wei-jian. The Principle and Application of Relaying Protection of Electrical Main Equipments[M]. Beijing: Cina Electric Power Press, 2002.
- [2] 陈生贵,等. 电力系统继电保护[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003. CHEN Sheng-gui, et al. The Relaying Protection of Electric Power System[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2003.
 - [3] Yacamini R, Bronzeado H. Transformer Inrush Calculations Using a Coupled Electromagnetic Model[J]. IEEE Proceedings, 1994, 141(6): 491-498.
 - [4] 李英超,等. 电力变压器励磁涌流和故障电流的仿真研究[J]. 继电器, 2002, 30(6): 29-32. LI Ying-chao, et al. The Emulation and Analysis of the Inrush and Malfunction Current of Power Transformer[J]. Relay, 2002, 30(6): 29-32.
 - [5] 王雪,等. 电力变压器励磁涌流和故障电流的仿真研究

[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 11-14.

- WANG Xue, et al. The Emulation and Analysis of the Inrush and Malfunction Current of Power Transformer[J]. High Voltage Electric Apparatus, 2003, 39(6): 11-14.
- [6] 符杨,等. 计及铁心动态磁化特性的三相变压器励磁涌流的仿真研究[J]. 变压器, 1997, 34(9): 4-11. FU Yang, et al. The Emulation and Analysis of the Inrush of Three Phases Transformer Considering the Saturation of Iron Core[J]. Transformer, 1997, 34(9): 14-11.

收稿日期: 2006-09-08; 修回日期: 2006-12-01

作者简介:

吕俐婷(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: hzonx@yahoo.com.cn
罗建(1960-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统自动化、电力系统继电保护。