

多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究

傅伟, 赵莉华, 梁勇, 何祥龙, 牛中伟

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 以单台变压器合闸励磁涌流原理为基础, 结合变压器在实际操作中的情况, 进一步研究多台变压器的合闸涌流。根据多台变压器空载合闸的特点提出了增加系统阻抗和串联电容器的方法。通过对比增加系统阻抗后变压器之间磁链变化分析了其对励磁涌流的影响并介绍了选择最佳阻抗值的方法。最后结合仿真软件 Matlab 仿真了多台变压器同时合闸的励磁涌流并与加载单一电阻方案和电阻加电容器方案的励磁涌流大小进行对比。仿真结果表明, 这种抑制方案有效地抑制了多台变压器的励磁涌流。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 多台并联; 系统阻抗; 电容器; 抑制方案

Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures

FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, HE Xianglong, NIU Zhongwei

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Taking no-load closing inrush current theory of a single transformer as a foundation, combined with the transformer of the situation in practice, this paper further studies transformer group inrush current. Based on transformer group no-load closing characteristics, it proposes to increase the system impedance and capacitors. Through contrasting the flux changes between the transformer before/after increasing system impedance, it analyzes its impact on the inrush current and describes a method to select the best impedance values. Finally, no-load closing inrush current of transformer group simultaneously switch-on is simulated by using Matlab, and its value is compared with inrush current value of the scheme of installing single resistor and the scheme of both installing resistor and capacitor. Simulation results show that this suppression scheme effectively suppresses the transformer group inrush current.

Key words: transformer; inrush current; multiple parallel; system impedance; capacitors; suppression measures

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0028-06

0 引言

变压器是电力系统中重要的设备, 它是否安全运行直接关系到整个系统的稳定^[1]。合闸励磁涌流引起的变压器保护装置误动是影响变压器安全运行的一个重要的问题之一^[2], 所以寻求一个好的保护方案就显得尤其重要。国内外学者在励磁涌流的机理、励磁涌流的鉴别方法以及单台变压器空载合闸涌流的抑制上取得了一定的成果^[3-4], 但这些研究主要是针对单台合闸励磁涌流, 而很少讨论多台变压器同时空载合闸产生励磁涌流及不同影响因数下励磁涌流的变化情况, 与之相对应的抑制方法就更少了。

本文就多台变压器合闸产生涌流的原理进行分析, 正由于多台变压器在产生涌流的时候会受到变压器与变压器之间的相互影响, 通过理论分析得出

磁链的变化情况可知多台变压器合闸电流的变化情况及其影响其大小的因数, 再通过软件仿真进行验证, 根据得到的结论提出较单台变压器更适合的多台变压器电阻抑制方案。根据抑制方案的理论选择电阻的合适值。最后通过仿真实验验证了该抑制方案在多台变压器合闸情况下抑制涌流的有效性。

1 涌流产生的原理^[5]

为了方便讨论, 选取单相变压器对空载合闸的励磁涌流产生的原理进行分析, 理论分析中发现产生励磁涌流的根本原因是变压器空载合闸时变压器铁心饱和。图1是单相变压器空载合闸的等效电路图。

由图1的单相变压器等效电路根据基尔霍夫定律可得

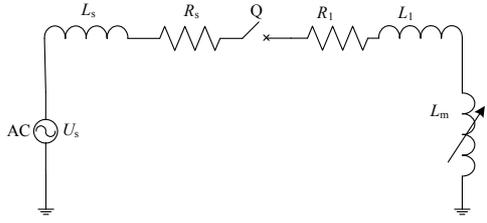


图1 单相变压器空载合闸的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a single-phase transformer load switching

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

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

式中, U_s 是电源电压。

$$\psi = (L_s + L_1 + L_m)i = Li$$

$$R = R_s + R_1$$

式(1)可以等同表示为

$$U_s = U_m \sin(\omega t + \alpha) = R \frac{\psi}{L} + \frac{d\psi}{dt} \quad (2)$$

解微分方程(2)得

$$\psi(t) = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + \alpha(\psi_\sigma + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中: $-\psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$; ψ_σ 为剩磁; $\tau = \frac{L}{R}$ 。

假设合闸角 $\alpha = 0$, 由式(3)可以得到在经过半个周期后变压器中的磁通将出现最大值。

$$\psi(t) \approx 2\psi_m + \psi_\sigma$$

再由变压器的励磁曲线特性可以得到在磁通饱和后电流迅速增加, 从而产生励磁涌流。励磁涌流波形偏向时间轴一侧, 具有间断角。在第一个周期达到最大值, 以后慢慢衰减至稳态运行情况。经 Matlab 仿真得到的结果如图 2 所示。

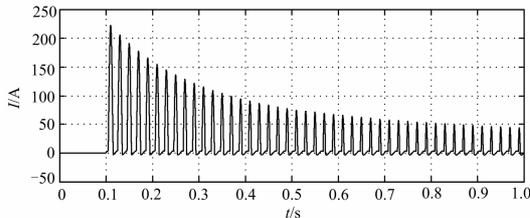


图2 一台变压器空载合闸励磁涌流波形

Fig. 2 A no-load switching transformers inrush current waveform

2 多台变压器励磁涌流的分析

多台变压器同时合闸电路如图 3 所示。这里以四台并联为例, 图中 L_s 、 R_s 为系统等效电感和电

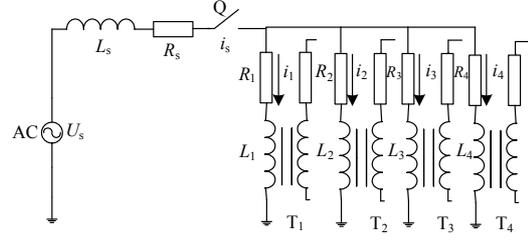


图3 多台变压器同时合闸电路

Fig. 3 Circuit of several transformers simultaneous switch on

阻, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为变压器 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的电阻和电感。随意选择一台变压器来分析它的磁链关系, 这里选择变压器 T_1 。它的磁链关系式如式(4)所示。

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

在不考虑剩磁的情况下, 一个周期的磁链变化情况为

$$\psi_1(2\pi) - \psi_1(0) = \int_0^{2\pi} U_s(\theta) d\theta - \int_0^{2\pi} R_s i_s(\theta) d\theta - \int_0^{2\pi} R_1 i_1(\theta) d\theta \quad (5)$$

一个周期的变化量为

$$\Delta\psi_1 = -\int_0^{2\pi} (R_s i_s + R_1 i_1) d\theta \quad (6)$$

设 i_k 为其他支路的电流之和, 为

$$i_k = i_2 + i_3 + i_4 = i_s - i_1$$

可以将式(6)改写成

$$\Delta\psi_1 = -\int_0^{2\pi} [(R_s + R_1) i_1 + (i_2 + i_3 + i_4) R_s] d\theta \quad (7)$$

假设合闸时产生励磁涌流的方向为正, 那么由式(6)可知 $\Delta\psi_1 < 0$ 。各个变压器的主磁链都大于零, 而变压器的周期变量 $\Delta\psi < 0$, 这是由于系统电阻 R_s 和变压器励磁电阻 R_i ($i=1,2,3,4$) 使变压器的饱和程度降低造成的。

在式(7)中: 第一部分是由第 i ($i=1,2,3,4$) 台变压器自身涌流在系统阻抗及变压器内部阻抗上的作用所导致; 第二部分是同时合闸的相邻变压器涌流在系统阻抗上作用所导致。由此可见, 系统阻抗使得并联变压器之间磁链相互作用。变压器群中一次性合闸变压器越多, 系统阻抗产生的减弱作用就越强。得到的结论就是随着空载合闸变压器的数量增加, 每台变压器的峰值较单台合闸的峰值越小。对四台并联变压器进行 Matlab 仿真^[6-10], 变压器选定的参数为: 额定容量 $S_N = 1$ MVA, 额定电压比为:

$\frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{1 \text{ kV}}{400 \text{ V}}$, 一次回路参数为 $L_1 = 0.008 \text{ p.u.}$,
 $R_1 = 0.2 \text{ p.u.}$.

得到仿真结果如图 4 所示, 四台变压器空载合闸的峰值电流为 614 A, 也就是说平均每台的电流为 153.5 A, 比图 2 的单台励磁涌流 222 A 要小很多。

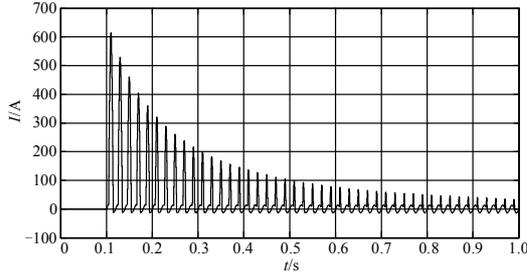


图 4 四台并联变压器空载合闸励磁总电流
 Fig. 4 Total inrush current of four parallel load switching transformers

为了更加形象地看出变压器台数和合闸涌流的关系, 给出图 5。由图 5 可知仿真的结果与理论分析相符合, 证明了在多台变压器同时合闸的时候系统电阻的存在使得变压器之间的磁链相互影响从而导致了多台变压器合闸励磁涌流中每台的励磁涌流峰值比单台合闸励磁涌流要小, 而且随着变压器数量的增加这两个值之间的差值就会越来越大。

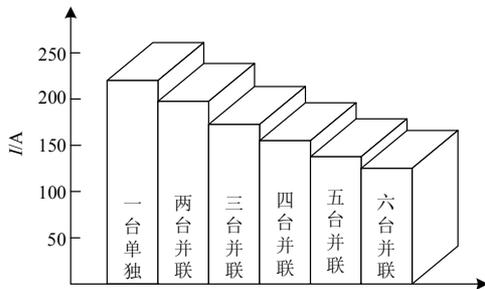


图 5 变压器的电流变化趋势
 Fig. 5 Current trends of transformer

3 影响多台励磁涌流峰值大小的因素

国内外的试验研究及实践结果表明励磁涌流的波形与铁芯的结构型式、铁芯的磁化特性及绕组的连接方式等因素有关。对于已经完成设计或已经制造出来的具体产品, 由于上述诸因素都已确定, 励磁涌流的波形基本上也就确定了。

3.1 变压器的合闸相角

由于合闸励磁涌流与合闸时的瞬时磁通密切相关, 于是由式(3)可以得到

当 $\alpha = 0^\circ$ 时,

$$\psi_1(t) = -\psi_m \cos \omega t + (\psi_\sigma + \psi_m) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

此种合闸方式会导致变压器中磁通为最大值 $\psi(t) \approx 2\psi_m + \psi_\sigma$, 此种情况会导致最大的励磁涌流。

当 $\alpha = 90^\circ$ 时

$$\psi_2(t) = -\psi_m \sin \omega t + \psi_\sigma e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

此种合闸方式的情况是最有利的方式, 如果忽略剩磁那么变压器直接建立稳态磁通, 没有励磁涌流的产生。

3.2 并联变压器的个数

随着变压器个数的增加总的励磁涌流增加是毋庸置疑的, 但每个变压器的励磁涌流是如何变化的, 正如第 2 节中分析的 $\Delta\psi_1$ 的减少分为两部分。第一部分是每台变压器自身涌流在系统阻抗及变压器内部阻抗上的作用所导致; 第二部分是同时合闸的相邻变压器涌流在系统阻抗上作用所导致。也就是说变压器群中一次性合闸变压器越多, 系统阻抗产生的减弱作用就越强。

由此得出了随着变压器的增加每个变压器的励磁涌流是逐渐减小的, Matlab 的仿真也得到同样的结论, 证明了分析的正确性。

4 多台变压器励磁涌流的抑制措施

从上一章节的分析可知多台变压器存在一个系统电阻对每台变压器磁链的相互影响从而减小励磁涌流的峰值^[11-12], 所以根据这个理论提出了主电路上加电阻的方案。

根据式(7), 有

$$\Delta\psi_1 = -\int_0^{2\pi} [(R_s + R_1)i_1 + (i_2 + i_3 + i_4)R_s] d\theta$$

加上电阻 R_z 后得到式(10)。

$$\Delta\psi_1 = -\int_0^{2\pi} [(R_s + R_1 + R_z)i_1 + (i_2 + i_3 + i_4)(R_s + R_z)] d\theta \quad (10)$$

可以看到在式子的前后都起到了减小 $\Delta\psi_1$ 的作用, 这样就减小了涌流峰值的作用。如图 6, R_z 并联开关 K 在变压器合闸时断开, 这样 R_z 接入电路起到了抑制涌流的作用, 在一段时间后电流小于一定安全值以后开关 K 再闭合, 切除 R_z , 不至于主线路上的电阻过大而消耗能量。

图 7 是加保护方案过后主电路的电流变化波形, 可以看到当开关 K 闭合后把 R_z 短路依然会有涌流的产生, 这样电阻 R_z 选取过大就会产生过大的短路涌流, 因此就要选择合适的电阻使得合闸涌流和短路涌流被抑制在同一合理值之下。

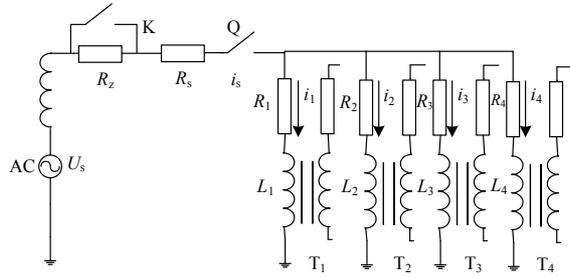


图6 加装系统电阻的多台变压器合闸电路

Fig. 6 Switching-on circuit of transformers group installing system resistance

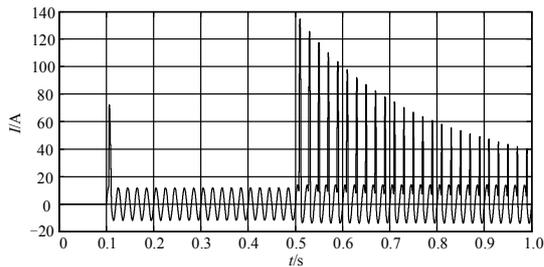
图7 加电阻方案的电流波形图($R_z=100$)

Fig. 7 Current waveform of scheme of increasing the resistance

接下来主要问题就是怎样找到这个合理的阻值, 首先分析开关 K 在最后闭合时刻的磁链, 设在闭合开关 K 时, 变压器中的暂态分量已经完全衰减, 只剩稳态分量。此时磁链如式(11)所示。

$$\psi'(t) = -\psi'_m \cos(\omega t + \alpha') + [-\psi_m \cos(\omega t_1 + \alpha) + \psi'_m \cos \alpha] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

由式(11)可以看出在 K 闭合后, 暂态磁通最大值为

$$\psi'_m - \psi_m = \frac{LU}{\sqrt{(R_s + R_i)^2 + (\omega L)^2}} - \frac{LU}{\sqrt{(R_s + R_z + R_i)^2 + (\omega L)^2}} \quad (12)$$

式中, R_i 表示任意一个变压器自己内部电阻。

由式(12)可以得知如果加入的电阻 R_z 过大就会导致闭合 K 后的磁通过大, 导致很大的短路电流, 所以只有当 K 闭合后的磁通和合闸时刻的磁通相等才能得到一个最合适的电阻把电流抑制在一个最小的值。

$$R_z = \sqrt{4(R_s + R_i)^2 + 3(\omega L)^2} - R_s - R_i \quad (13)$$

利用式(13)计算出的电阻 $R_z=65$, 再利用 Matlab 仿真得到的结果如图 8 所示, 可以看到其依然产生了短路电压, 但是其合闸励磁涌流和短路电流相等, 这样就把最大电流限制在了最小, 其效率可以达到 85% 左右, 避免了线路因为变压器的涌流而产生保护电路的误动。

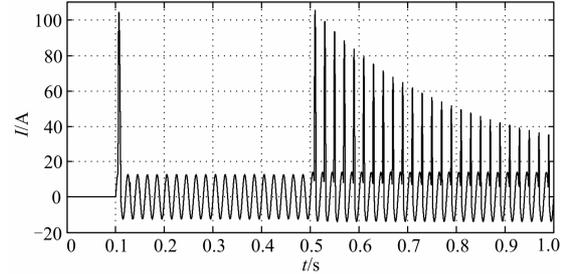
图8 加电阻方案的电流波形图($R_z=65$)

Fig. 8 Current waveform of scheme of increasing resistor

由于单纯的电阻方案比较单一, 在精度要求较高的系统中, 励磁涌流还是达不到指标。因此本文在加装合闸电阻的同时提出了系统线路上加装电容器的方案。将 ψ_m 作以下变换

$$\psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{\frac{R^2}{L^2} + \omega^2}} \quad (14)$$

由式(14)可以看出磁通量的最大值与电感成正比, 适当地减少电感可以有效地减小磁通量的最大值, 再由式(11)我们发现暂态分量的指数因子 $\tau = \frac{L}{R}$, 减小电感的值在变压器合闸时可以起到抑制合闸涌流作用, 同时还可以加快磁通暂态分量的衰减速度, 这两方面都有利于变压器空载合闸涌流抑制, 由于电容器是电感的对偶原件, 多在主系统中加入合适值的电容器, 可以进一步地抑制合闸涌流。

利用加装电阻和电容器组合方案的 Matlab 仿真波形如图 9 所示。

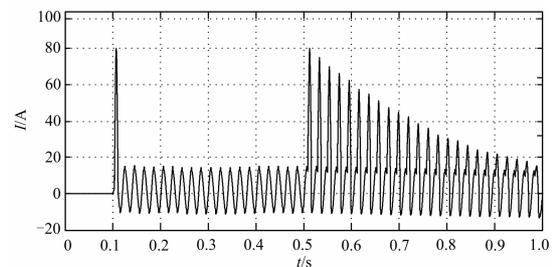


图9 加装电阻和电容器的励磁涌流

Fig. 9 Inrush current of installing both resistor and capacitor

将图 9 波形与图 8 进行对比得到励磁涌的大小

进一步减小,而且在合上开关 K 切除电阻后的电流衰减速度也明显加快。

在 3.1 节中讲到励磁涌流与开关合闸相位角密切相关,合闸瞬间电压的相位角不同可能导致励磁涌流的巨大差别,如图 10 所示分别给出了没加装励磁涌流抑制装置电流,加装电阻抑制装置电流和加载电阻和电容器组合电流的最大值随着合闸相位角的变化。从图 10 中可以看出,相比于没有加装抑制装置其他两种方案电流的最大值和波动都很小。尤其是加载电阻和电容方案最为优越,且一直保持在一个系统可以接受的值范围之内。

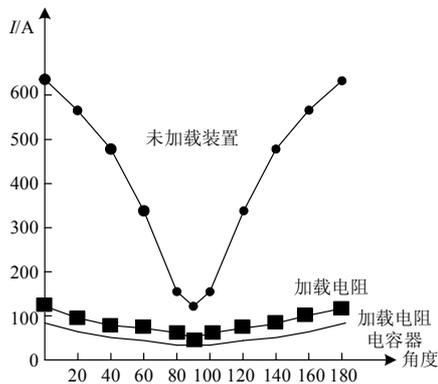


图 10 加装置前后最大电流随角度的变化

Fig. 10 Maximum current vs angle before and after installing the device

5 总结

本文通过分析空载合闸变压器的等效电路图,分析了变压器内部磁链的变化规律,说明了励磁涌流的产生机理,并且推导多台变压器同时合闸的情况,再根据多台变压器励磁涌流的特点提出了加装系统阻值的解决方案。通过合闸时刻与短路时刻的磁链关系得出了最合适的阻值。最后分析磁通的表达式及系统本身的特点提出加装电阻和电容器组合的励磁涌流抑制方案。最后通过 Matlab 仿真验证了该措施有效地抑制了励磁涌流并优于单一电阻方案。本文主要是把单台的变压器合闸推导到多台变压器不同合闸方式的情况,这些情况更加符合现场实际,在以后进一步的研究中可以以这些理论为基础提出解决方案。

参考文献

[1] 吴清华,张彼德.空载变压器的励磁涌流研究[J].电

力学报,2010,25(1):37-39.

WU Qinghua, ZHANG Bide. No-load transformer inrush current research[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(1): 37-39.

[2] 王雪,王增平.变压器电压差动保护方法研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(4):67-72.

WANG Xue, WANG Zengping. Research on the method of transformer voltage differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 67-72.

[3] 公茂法,夏文华,李国亮,等.变压器和应涌流和励磁涌流识别新判据[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):139-143.

GONG Maofa, XIA Wenhua, LI Guoliang, et al. New judgment to identify sympathetic inrush and inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 139-143.

[4] 马静,吴劫,马磊,等.变压器空载合闸漏感参数识别方法[J].电网技术,2011,35(5):194-198.

MA Jing, WU Jie, MA Lei, et al. Recognition of transformer leakage inductance during its no-load closing[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 194-198.

[5] 郝治国,张保会,褚云龙,等.变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J].高压电器,2005,41(2):81-84.

HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong, et al. Study on inrush current restraining technology when energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84.

[6] 王雪,王增平,徐岩.电力变压器励磁涌流和故障电流的仿真研究[J].高压电器,2007,39(6):11-16.

WANG Xue, WANG Zengping, XU Yan. Research on simulation of magnetic inrush and fault current for power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 39(6): 11-16.

[7] 何越,熊元新,姜山,等.变压器空载合闸励磁涌流的仿真分析研究[J].电力学报,2010,35(10):33-36.

HE Yue, XIONG Yuanxin, JIANG Shan, et al. Simulation analysis of load switching transformer inrush current[J]. Journal of Electric Power, 2010, 35(10): 33-36.

[8] 朱翊,房大中,王庆平.考虑变压器励磁非线性的电

- 磁暂态仿真算法[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 116-120.
- ZHU Yi, FANG Dazhong, WANG Qingping. An approach for electromagnetic transient simulation of power transformers with nonlinear exciting branch[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 116-120.
- [9] 黄金, 方春恩, 李天辉, 等. 计及剩磁的变压器励磁涌流的仿真研究[J]. 变压器, 2009, 46(11): 40-43.
- HUANG Jin, FANG Chunen, LI Tianhui, et al. Simulation research on transformer inrush current in consideration of remnant magnetic flux[J]. Transformer, 2009, 46(11): 40-43.
- [10] 许加柱, 白俊锋, 罗隆福, 等. FCC-HVDC 换流变压器三相差动保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 115-120.
- XU Jiazhu, BAI Junfeng, LUO Longfu, et al. Simulation studies of three-phase differential protection of the converter transformer of FCC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 115-120.
- [11] 吴佐民, 全恒立, 杜永红, 等. 串联合闸电阻的变压器励磁涌流抑制策略研究[J]. 电器应用, 2011, 15(8): 56-60.
- WU Zuomin, QUAN Hengli, DU Yonghong, et al. Closing resistor in series with the transformer inrush current suppression strategy research[J]. Electrotechnical Application, 2011, 15(8): 56-60.
- [12] 朱河, 徐文远, 田立军, 等. 利用中性点电阻削弱变压器励磁涌流[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 61-66.
- ZHU He, XU Wenyuan, TIAN Lijun, et al. New method for mitigating magnetic inrush current of transformer by neutral grounding resistor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 61-66.

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-05-04

作者简介:

傅伟(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护和电力电子在电力系统中的应用;
E-mail: 651015772@qq.com

赵莉华(1968-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子技术 in 电力系统中的应用, 新能源等。