

基于 MATLAB 的变压器恢复性涌流仿真研究

褚晓锐

(西昌学院工程技术学院, 西昌 615013)

摘要: 旨在研究变压器区外故障被切除后的暂态过程特性, 为变压器差动保护的正确动作提供理论参考。首先从变压器恢复性涌流产生暂态过程进行分析; 其次利用了 MATLAB 中的电力系统模块库(PSB)建立变压器区外故障时恢复性涌流产生的数字仿真模型, 并对恢复性涌流的影响因素和二次谐波进行仿真分析; 最后根据仿真结果分析得到变压器恢复性涌流本身不会引起变压器差动保护误动, 但是由于变压器各侧的电流互感器暂态特性不一致形成的差流, 可能导致差动保护误动的结论。

关键词: 变压器; 恢复性涌流; MATLAB; 仿真

中图分类号: TM41; TM772 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)01-0053-05

Simulation of Transformer Recovery Surge Based on MATLAB

CHU Xiao-rui

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

Abstract: To investigate the transient state of a transformer after clearance of external faults for reliable differential protection, the transient process due to recovery surge of transformer is analyzed, and a simulation model is built by using the power system blockset (PSB) in MATLAB to simulate influencing factors on recovery surge and second harmonics. Simulation results indicate that recovery surge itself dose not cause misoperation of differential protection of transformer, however the differential currents caused by different transient characteristics of the current-transformers at both sides of a transformer may lead to misoperation of differential protection of the transformer.

Key words: transformer; recovery surge; MATLAB; simulation

0 引言

近年来, 变压器差动保护出现多次区外故障切除后误动的现象。长期以来变压器外部故障被切除后电压的恢复过程被认为和变压器空载合闸一致, 实际上变压器在外部故障被切除后的电磁暂态过程有其自身特点^[1-4]。

变压器外部故障切除扰动可按故障电流是否流经变压器分为两种^[5]: 一种是区外故障时故障电流不流过变压器, 见图 1(a); 另一种是故障电流流过变压器, 见图 1(b)。从变压器恢复性涌流产生暂态过程进行分析, 利用 MATLAB 中的电力系统模块库(PSB)按照图 1(b)的系统接线图, 建立仿真模型。

通过对恢复性涌流的影响因素和谐波含量进行数字仿真分析, 并根据仿真结果对恢复性涌流对差动保护的影响进行分析。

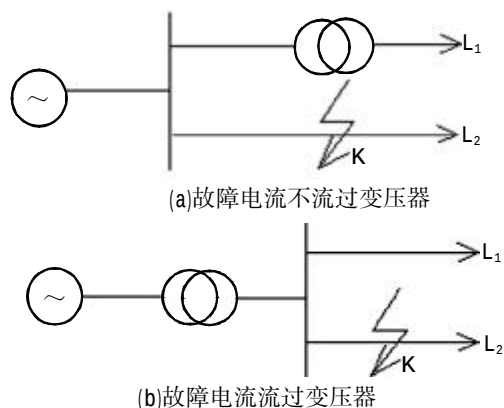


图1 变压器区外故障不同接线示意图

Fig. 1 Sketch of transformer during an external fault

收稿日期: 2011-08-10; 修回日期: 2011-09-13

基金项目: 西昌学院自然科学科研项目(XA0904)。

Project Supported by National Natural Science Scientific Research Project of Xichang College(XA0904).

1 恢复性涌流产生暂态过程分析

单相变压器外部故障时的暂态数学模型^[6-7]见图 2, 令电源电势为

$$U_s = U_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式(1)中: U_m 为电源幅值; ω 为角频率; θ 为初相角。

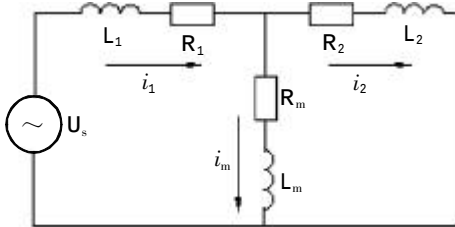


图 2 单相变压器 T 型等效电路

Fig. 2 T equivalent circuit of single-phase transformer

正常运行时, 忽略一次回路的电阻和电抗, 近似认为励磁电势等于电源电势($U_m \approx U_s$), 则变压器铁心中的稳态磁通为 $\psi(t) \approx \sin(\omega t + \theta)$ 。假设在 $t=0$ 时区外发生三相短路故障, 此时二次回路的电阻 R_2 和电抗 X_2 突变为 R_{2K} 和 X_{2K} , 用参数 h 来描述外部故障程度, 如式(2)所示

$$h = |R_{2K} + jX_{2K}| / |R_1 + jX_1 + R_{2K} + jX_{2K}| \quad (2)$$

式(2)中: R_1 和 X_1 是变压器一次回路电阻和电抗(包括系统和变压器一次侧的电阻、电抗); R_{2K} 和 X_{2K} 分别为区外故障时经过归算后的二次回路电阻和电抗(包括负荷和变压器二次侧电阻、电抗)。

不计衰减情况下, 变压器励磁支路的电势为 $U_m \approx hU_s$, 区外故障时铁心磁通应维持不变, 即 $\psi(0_-) = \psi(0_+)$, 那么此时的磁通为

$$\psi(t) \approx h\psi_m \sin(\omega t + \theta) + (1-h)\psi_m \sin\theta$$

在 $t=\tau$ 时外部故障被切除, 电压恢复, 又可近似认为 $U_m \approx U_s$, 且磁通不能突变即 $\psi(\tau_-) = \psi(\tau_+)$, 则变压器此时的磁通为

$$\psi(t) \approx h\psi_m \sin(\omega t + \theta) + \psi_p \quad (3)$$

式(3)中:

$$\psi_p = (1-h)\psi_m [\sin\theta - \sin(\omega\tau + \theta)]$$

即为变压器的偏磁^[8]。正是由于偏磁 ψ_p 的存在, 导致变压器铁心饱和, 产生恢复性涌流。从而可知: 变压器区外发生故障时刻的电势相角 θ 的正弦值 $\sin\theta$ 越大、故障越严重(h 越小)、切除故障时刻的电势相角 $\beta = \omega\tau + \theta$ 的正弦值 $\sin\beta$ 越小, 恢复性涌流就越大。

2 数字仿真

2.1 仿真模型及系统参数简介

根据图 1(b)利用 MATLAB 中的电力系统模块库(PSB)建立数字仿真模型, 见图 3。系统频率为 50 Hz, 电源电压为 220 kV, 变压器容量为 360 MV·A, 变比为 220 kV/35 kV, 采用接线, 饱和特性($i_1=0, \psi_1=0; i_2=0.0024, \psi_2=1.2; i_3=1.0, \psi_3=1.52$)^[9-10]。线路 L_1 为 15 km, L_2 为 50 km, 负荷为 50 MW。变压器主保护采用 15%二次谐波制动的双折线比率制动的差动保护。

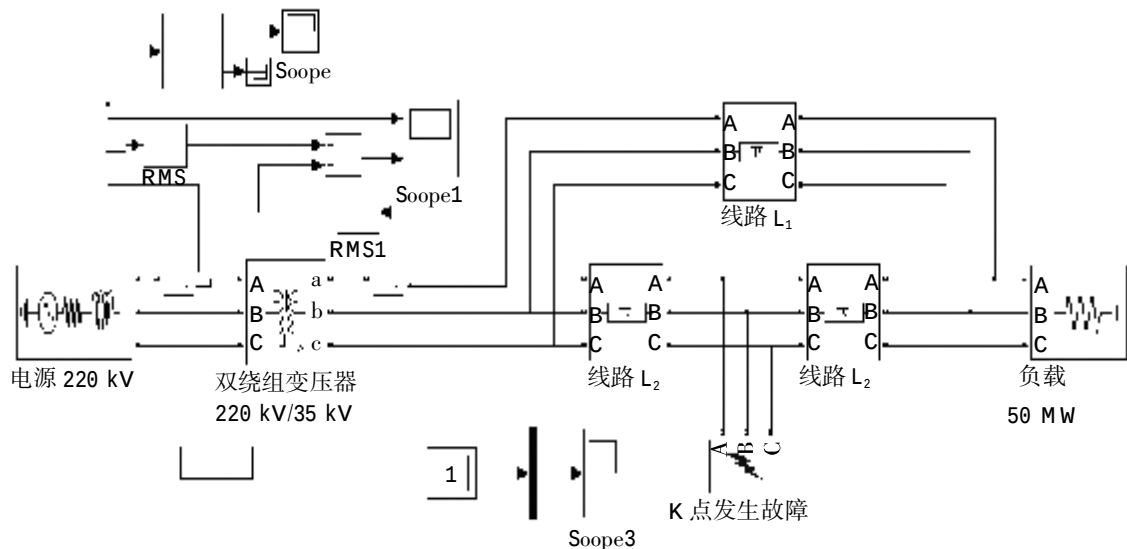


图 3 变压器区外故障仿真模型图

Fig. 3 Simulation model during an external fault

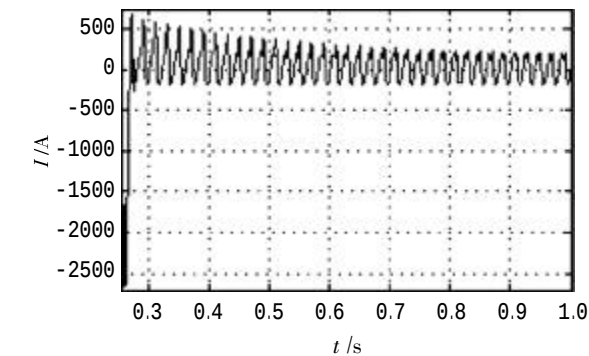
2.2 恢复性涌流的影响因素分析

0.21 s 线路 L_2 的 K 点发生故障, 50 ms 后故障被切除, 发生故障时 A 相的电势相角 $\theta_A=90^\circ$ 和切除

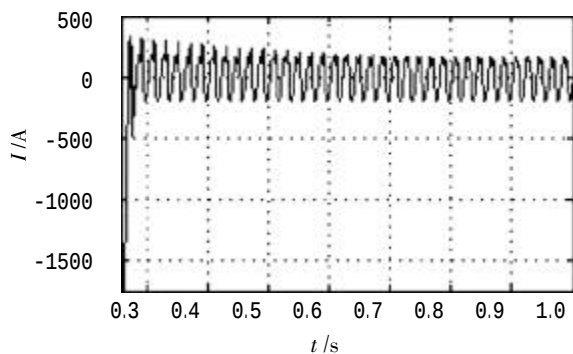
故障时 A 相的电势相角 $\beta_A=-90^\circ$ 。

图 4(a)-(c)分别是故障 K 点与变压器距离占线路 L_2 长度的 0%处、10%处和 50%处时, 发生三相短

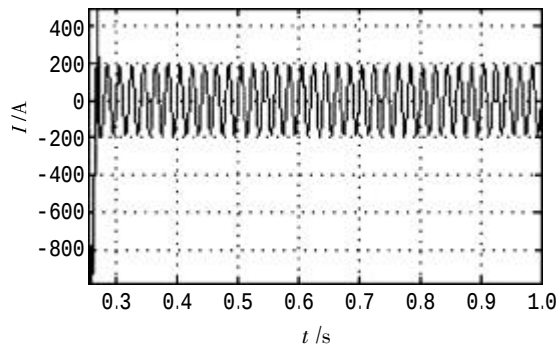
路故障变压器高压侧 A 相的恢复性涌流波形图, 波形时间取为 0.26 s 到 1 s。比较可知, 故障点距变压器越近, 恢复性涌流越大; 反之越小。



(a)故障 K 点距变压器 0%处



(b)故障 K 点距变压器 10%处



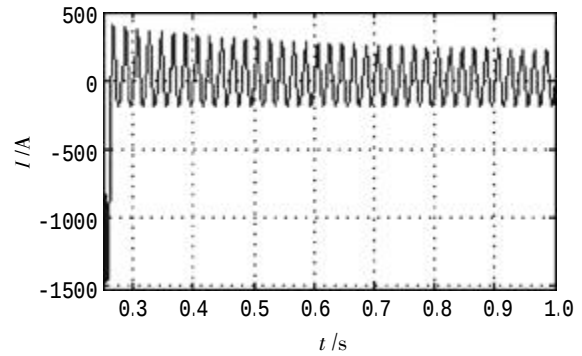
(c)故障 K 点距变压器 50%处

图 4 故障 K 点距变压器不同处 A 相恢复性涌流波形图

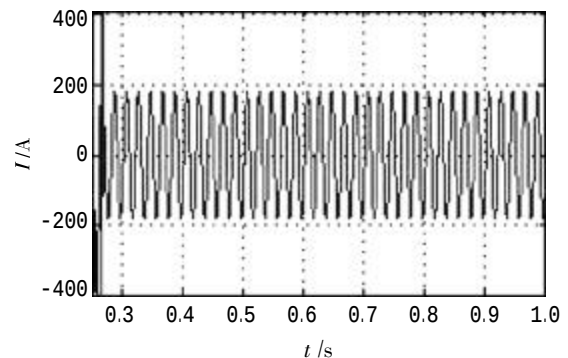
Fig. 4 Sketch of a recovery inrush about different fault points

图 5(a)、(b)分别是变压器区外 K 点发生 AB 相故障、A 相接地故障时变压器高压侧 A 相恢复性涌流波形图, 比较图 4(a)与图 5(a)、(b)可知, 变压器区外故障越严重(h 越小), 恢复性涌流越大; 反之越小。

图 6 (a)、(b) 分别是 K 点发生三相短路故障时 $\theta_A=60^\circ$ 和 $\theta_A=0^\circ$ 的 A 相恢复性涌流波形(故障 K 点距离变压器 0%处, $\beta_A=-90^\circ$)。比较图 4(a)与图 6(a)、(b)可知, 变压器区外发生故障时电势相角的正弦值 $\sin\theta_A$ 越大, 恢复性涌流越大; 反之越小。



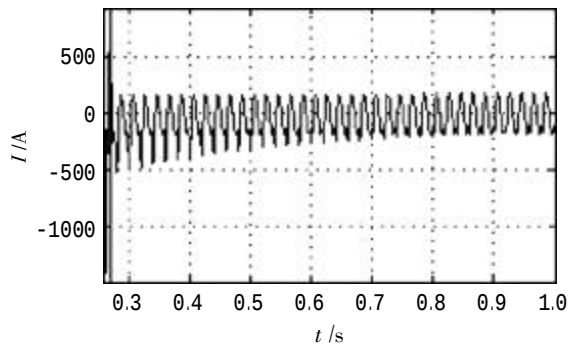
(a)AB 相故障



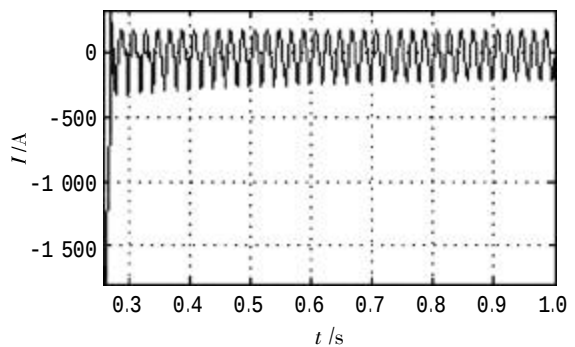
(b)A 相接地故障

图 5 不同故障类型 A 相恢复性涌流波形图

Fig. 5 Sketch of a recovery inrush about different fault types



(a) $\theta_A=60^\circ$ ($\beta_A=-90^\circ$)



(b) $\theta_A=0^\circ$ ($\beta_A=-90^\circ$)

图 6 θ_A 不同时 A 相的恢复性涌流波形图

Fig. 6 Sketch of a recovery inrush about different θ_A

图 7(a)、(b)是分别是 K 点发生三相短路故障被

切除时 $\beta_A=0^\circ$ 和 $\beta_A=-60^\circ$ 的 A 相恢复性涌流波形 (取故障 K 点距离变压器 0% 处, $\theta_A=90^\circ$)。比较图 4(a) 与图 7(a)、(b) 可知, 变压器区外故障被切除时的电势相角 β_A 的正弦值 $\sin\beta_A$ 越小, 恢复性涌流越大; 反之越小。

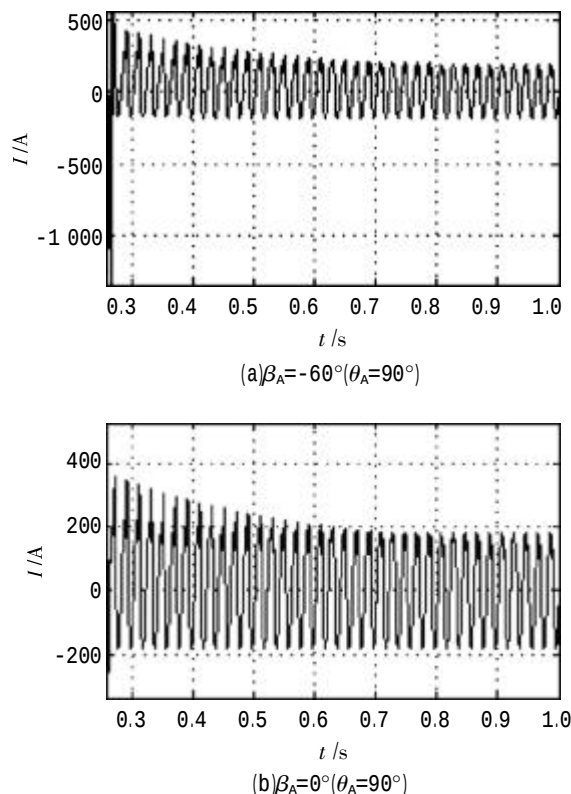


图 7 β_A 不同时 A 相的恢复性涌流波形图

Fig. 7 Sketch of a recovery inrush about different β_A

3 恢复性涌流对差动保护的影响

图 8 是距变压器 0% 处发生三相短路故障 ($\theta_A=90^\circ, \beta_A=-90^\circ$) 发生前后, 高低压侧 A 相电流幅值的差值波形图, 故障被切除恢复过程中的幅值差值与故障前的幅值差值几乎相同, 并且从图 4(a) 可知, 恢复性涌流幅值较小 (与励磁涌流波形相比较), 很难达到差动保护启动判据。

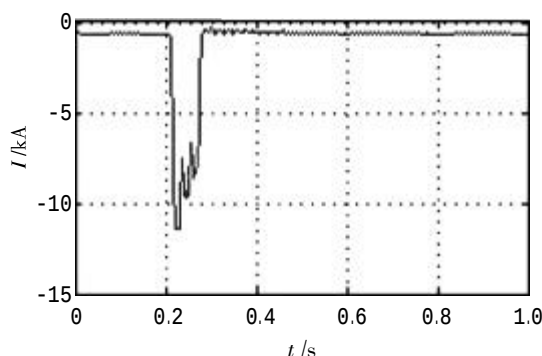


图 8 故障前后高低压侧 A 相电流幅值差值图

Fig. 8 Sketch of differential of a current amplitude

利用 MATLAB/powergui/FFT Analysis 分析恢复性涌流波形中的各次谐波含量, 取 0.26 s 开始的一个周期, 见图 9, 二次谐波含量相当高, 超过 40%, 即使恢复性涌流能达到差动保护起始判据, 二次谐波制动判据也能可靠闭锁。

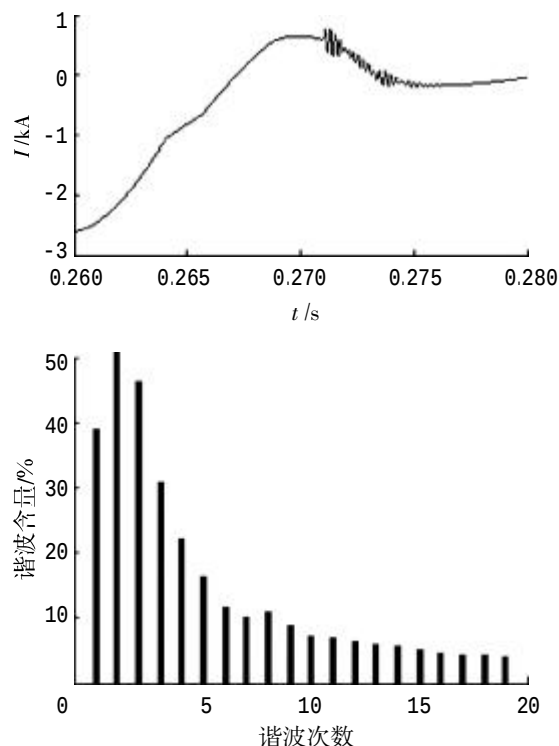


图 9 各次谐波含量图

Fig. 9 Sketch of each harmonic content

近年来变压器区外故障时引起差动保护误动事件屡次发生^[11-12]。由于变压器各侧电流互感器暂态特性不一致引起的差流的存在, 可能导致差流中的二次谐波含量小于整定值, 二次谐波制动判据可能失效。当差流大于差动保护启动值、制动量恢复成正常的负荷电流、二次谐波含量小于整定值的情况下, 区外故障切除后就可能导致差动保护误动。

4 结论

为研究变压器区外故障被切除后的暂态过程特性, 从变压器恢复性涌流产生暂态过程进行分析, 利用 MATLAB 中的电力系统模块库 (PSB) 建立仿真模型, 通过对恢复性涌流的影响因素和谐波含量进行数字仿真分析, 并根据仿真结果对恢复性涌流对差动保护的影响进行探讨, 得到以下结论:

1) 变压器在外部故障切除电流恢复过程中, 正是由于偏磁 ψ_p 和变压器铁心的饱和特性决定着变压器能否产生恢复性涌流。

2) 区外故障点距离变压器越近、故障越严重、发

生故障时电势相角的正弦值越大以及切除故障时的电势相角的正弦值越小,恢复性涌流越大;反之越小。

3)恢复性涌流峰值较小,二次谐波含量相当高,即使涌流达到启动判据,二次谐波制动也能可靠闭锁。

4)恢复性涌流本身不会引起变压器差动保护误动,但是由于变压器各侧的电流互感器暂态特性不一致从而形成差流,可能导致差动保护误动。

参考文献:

- [1] 刘中平,陆于平,袁宇波.变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):41-44.
LIU Zhong-ping, LU Yu-ping, YUAN Yu-bo. Study of transformer recovery inrush after clearance of external faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8):41-44.
- [2] 顾光辉,杨群力.变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究[J]. 节能与环保,2007(11):17-20.
GU Guang-hui, YANG Qun-li. Study on transformer recovery inrush after clearance of external faults [J]. Energy and Environment, 2007(11):17-20.
- [3] 李伟,黄金,方春恩,等.基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器,2010,46(5):9-13.
LI Wei, HUANG Jin, FANG Chun-en, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5):9-13.
- [4] 严屹宏,陈剑云.基于小波分析的变压器励磁涌流和内部故障电流识别[J]. 高压电器,2010,46(12):74-77.
YAN Yi-hong, CHEN Jian-yun. Identification of transformer inrush current and internal fault current on the basis of wavelet analysis [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):74-77.
- [5] 郑文杰,谭卓强,陈斌,等.恢复性涌流对变压器差动保护的影响[J]. 电网与清洁能源,2009,25(10):25-28.
ZHENG Wen-jie, TAN Zhuo-qiang, CHEN Bin, et al. Analysis of the effect of recovery inrush on transformer differential protection[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(10):25-28.
- [6] 李伟. 变压器恢复性涌流对差动保护影响的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
LI Wei. Analysis of the effect of recovery inrush on transformer differential protection[D]. Beijing: North China Electric University, 2008.
- [7] 林湘宁,刘沛.变压器外部故障切除后差动保护误动的机理分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):57-60.
LIN Xiang-ning, LIU Pei. Mechanism analysis of the maloperation of transformer differential protection after external fault clearance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19):57-60.
- [8] 王馨. 变压器差动保护误动机理及防治措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
WANG Xin. Study on mechanism and prevention of transformer differential protection error action[D]. Beijing: North China Electric University, 2007.
- [9] 黄绍平,李永坚.基于 MATLAB 的变压器空载合闸瞬变过程仿真研究[J]. 继电器,2004,32(8):19-21.
HUANG Shao-ping, LI Yong-jian. MATLAB-based simulation of instantaneous change process when transformer no-load switching[J]. Relay, 2004, 32(8):19-21.
- [10] CASORIA S, SYBILLE G, BRUNELLE P. Hysteresis modeling in the MATLAB/power system blockset[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003(63):237-248.
- [11] 游复生. 恢复性涌流引起变压器差动保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(15):85-87.
YOU Fu-sheng. Analysis of the maloperation of transformer differential protection caused by recovery inrush[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15):85-87.
- [12] 姬希军,胡宝峰,刘以军,等.区外故障变压器差动保护误动原因分析及对策[J]. 继电器,2008,36(4):75-78.
JI Xi-jun, HU Bao-feng, LIU Yi-jun, et al. Analysis and solution of misoperation of transformer differential protection when external ground fault occurs[J]. Relay, 2008, 36(4):75-78.

褚晓锐(1977—),男,工学硕士,副教授,主要从事电力系统保护及自动化的教学和研究工作。

(上接第 52 页)

- [18] GAN DE-GANG, LIU FAN, DU LIN, et al. Analysis of water solubility in transformer oil using least square fitting method[C]//2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application. New Orleans: IEEE, 2010: 93-95.
- [19] FOFANA I, BORSI H, GOCKENBACH E. Moisture uptake of mineral oil at different air relative humidity and temperatures[C]// Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria: IEEE, 2000:276-279.

甘德刚(1980—),男,工程师,从事高压电气设备试验与技术研究工作。