

变压器匝间短路建模及其实际应用

杨理才¹, 孙结中¹, 刘蔚², 周卫¹, 秦楷¹

(1. 广西电网公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 针对变压器匝间短路问题, 提出将短路绕组等效成两个不同绕组的思路, 并以三绕组变压器低压侧匝间短路为例进行建模, 首先把发生短路的三绕组变压器等效为四绕组变压器, 然后推导变压器的中低压侧电压公式。根据公式不仅可以计算短路信息, 还证明了中低压侧电压都有明显降低, 且低压绕组电压降低更严重。利用建立的模型, 对广西电网某 220 kV 变压器匝间短路事故进行 Matlab 仿真分析, 仿真曲线及短路匝数判断与实际录波波形及检查结果吻合, 验证了模型的正确性。
关键词: 匝间短路; 等效建模; 事故分析; Matlab 仿真; 故障录波

Transformer inter-turn short circuit modeling and its application

YANG Li-cai¹, SUN Jie-zhong¹, LIU Wei², ZHOU Wei¹, QIN Kai¹

(1. Guangxi Grid Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Aiming at transformer inter-turn short problem, this paper presents an idea which is equivalent the shorted winding to two different windings. The modeling of equivalence is proposed with the low voltage side inter-turn short of three windings as an example. First, the shorted three-winding transformer is equivalent to a four-winding transformer. Then a formula in the middle and low voltage sides is derived, according to which shorted information is calculated and the decrease of middle and low voltage sides is deduced and the latter decreases more seriously. The model is applied successfully to the simulation and analysis of the Guangxi power grid 220 kV transformer inter-turn short circuit by MATLAB, the simulation curve and result of analysis are coincide with examination results and recorded curve, which verify the correctness of the model.

Key words: inter-turn short circuit; equivalent modeling; fault analysis; MATLAB simulation; fault recorder

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0140-06

0 引言

匝间短路是变压器常见的内部故障, 一般由于内部线圈之间的绝缘漆破损, 导致绕组匝间导通^[1]。匝间短路的故障电流在变压器内部流过, 外部电流互感器通常无明显反应。如果变压器重瓦斯保护动作正确, 且对故障录波分析表明没有内部相间或接地故障, 则基本可以断定为内部发生匝间短路。对于降压变压器, 假设电源侧发生匝间短路, 被短路的绕组不再流过一次电流, 电源侧等效匝数减少, 变比下降, 由于电源侧电压视为恒定, 导致负荷侧电压升高。相反, 如果负荷侧匝间短路, 则负荷侧电压下降, 负荷电流下降。

由于无功补偿、站用电等需要, 目前电网广泛采用三绕组及以上的变压器, 多绕组变压器某一负荷侧发生匝间短路时, 由于各个绕组之间相互耦合, 不仅仅故障侧电压会降低, 非故障负荷侧的电压也

会降低, 事故案例也证明了这一点。发生匝间短路前后变压器外接负荷的阻抗不变, 负荷电流与母线电压成正比, 但如果绕组接成三角形, 发生匝间短路时三角形内部可能有零序电流分量, 利用负荷电流不一定能计算出绕组电流, 而对于负荷侧没有多主变并列运行的情况, 可以根据母线电压计算出各绕组电压, 因此分析绕组电压比分析电流更具备可行性。而目前国内外的研究很少分析匝间短路的电压影响^[1-3], 变压器内部故障分析计算仍然是继电保护的研究重点^[4-5]。

本文以三绕组降压变压器为例, 分析低压绕组匝间短路的特点, 建立了等效模型, 推导了故障后电压公式, 通过公式不仅可以计算出故障信息, 还证明了相对于非故障的中压侧, 发生故障的低压侧电压下降更严重。最后, 本文引用了一个实例, 通过本文公式成功判断了某次匝间短路事故的短路点, 并采用 Matlab 仿真了该实例, 仿真结果证明了

公式正确且具备实用价值。

1 匝间短路建模

1.1 负荷侧匝间短路等效电路

以三绕组降压变压器低压绕组发生匝间短路为例进行分析, 假设中压侧带负载为 Z_{L2} , 低压侧带负载 Z_{L3} , 在低压绕组发生匝间短路, 短路电阻为 R' , 假设短路的匝数与总匝数的比值为 m ($0 < m < 1$), 变压器各侧感抗包括绕组自感和互感, 设总感抗分别为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 , 高中压变比 k_{12} , 高低压变比 k_{13} , 电源电压为 U , 高压侧输电线路阻抗为 Z_{line1} 。因为匝间短路会改变变压器的变比, 所以文中全部采用有名值进行计算。

单独考虑低压绕组, 低压侧把被短路的绕组和未被短路的绕组分别视为两个不同的带内阻的电源, 则低压侧的电路图如图 1 所示。

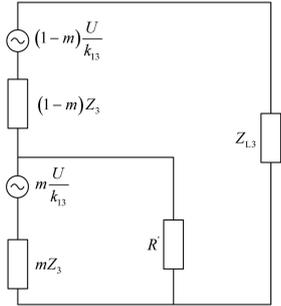


图 1 变压器低压绕组匝间短路图

Fig. 1 Diagram of inter-turn short circuit of transformer low-voltage winding

应用叠加定理^[6], 将负荷电流全部等效到一次侧。

1) 先假设图 1 中被短路绕组的感应电压为零, 则在未被短路绕组中产生的感应电流等效到一次侧为

$$I'_{3n} = \frac{1}{k_{13}/(1-m)} \frac{U/[k_{13}/(1-m)]}{(R' \parallel mZ_3) + Z_{L3} + (1-m)Z_3} \quad (1)$$

2) 再假设图 1 中未被短路绕组的感应电压为零, 则在被短路绕组中产生的感应电流等效到一次侧为

$$I'_{3m} = \frac{1}{k_{13}/m} \frac{U/(k_{13}/m)}{(R' \parallel (Z_{L3} + (1-m)Z_3)) + mZ_3} \quad (2)$$

3) 根据叠加定理, 低压侧发生匝间短路后, 低压侧电流折算到一次侧为

$$I'_3 = I'_{3n} + I'_{3m} = \frac{U}{(k_{13}/m)^2 \{R' \parallel (Z_{L3} + (1-m)Z_3) + mZ_3\}} + \frac{U}{(k_{13}/(1-m))^2 [(R' \parallel mZ_3) + Z_{L3} + (1-m)Z_3]} \quad (3)$$

式 (3) 明显为两并联电路的电流, 所以低压绕组发生匝间短路时, 三绕组变压器等效到一次侧的电路图如图 2 所示。

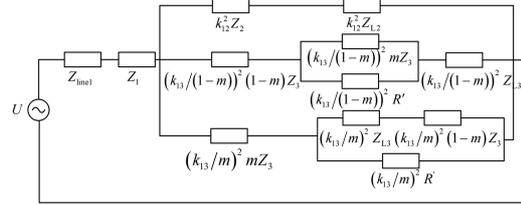


图 2 三绕组变压器匝间短路等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of three-winding transformer inter-turn short circuit

从图 2 中可以看出, 低压绕组匝间短路, 中压侧、非故障低压侧、故障电压侧三个负荷侧等效阻抗并联, 被短路的低压绕组和未被短路的低压绕组分别等效为独立的两个绕组, 变比分别为 k_{13}/m 和 $k_{13}/(1-m)$, 三绕组变压器视为四绕组变压器, 包括高压侧、中压侧、被短路的低压侧和未被短路的低压侧。

1.2 故障后的电压降

故障前后中低压侧输出电压分别为 Z_{L2} 、 Z_{L3} 两端的电压, 为了方便计算, 对图 2 中的并联电路的大阻抗和串联电路的小阻抗进行了适当的忽略, 把图 2 简化为如图 3 所示。

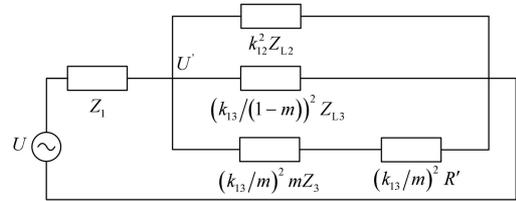


图 3 三绕组变压器低压绕组匝间短路简化图

Fig. 3 Reduced figure of three-winding transformer inter-turn short circuit

计算故障后变压器等效电路图的中心点电压, 中心点电压 U' 为

$$U' = U \cdot f(m, R') \quad (4)$$

其中,

$f(m, R')=1-\frac{Z_1}{(k_{13}/m)^2(mZ_3+R')\parallel(k_{13}/(1-m))^2Z_{L3}\parallel k_{12}^2Z_{L2}+Z_1}$
故障后, 中低压侧的电压为负载两端的电压。

$$U'_2=(1-\eta'_2)\frac{U}{k_{12}}f(m, R') \quad (5)$$

$$U'_3=(1-\eta'_3)\frac{U}{k_{13}/(1-m)}f(m, R')$$

其中, $\eta'_2=\frac{Z_2}{Z_{L2}+Z_2}$, $\eta'_3=\frac{(1-m)Z_3+mZ_3\parallel R'}{Z_{L3}+(1-m)Z_3+mZ_3\parallel R'}$, 分别为变压器中低压侧绕组感抗压降比。

事故前后中低压侧的电压下降比例 ΔU_2 、 ΔU_3 满足

$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= (U_2 - U'_2)/U_2 = 1 - [f(m, R')(1 - \eta'_2)] \quad (6) \\ \Delta U_3 &= (U_3 - U'_3)/U_3 = 1 - (1 - m)[f(m, R')(1 - \eta'_3)] \end{aligned}$$

其中, U_2 、 U_3 为事故前的中低压侧电压。

式(6)中只包括两个未知数 m 和 R' , 负载参数在故障前后不发生变化, 可以取故障前的计算值, 变压器参数同样取故障前的参数, 可以从变压器铭牌给定的值计算得到, 代入式(6)可以计算出 m 和 R' 。

令 $m=0$, $R'=\infty$, 图2中低压绕组只有一个等效阻抗 $k_{13}^2Z_{L3}$, 变为事故前的三绕组等效图^[7-9], 满足

$$\frac{U_2}{1-\eta_2}k_{12}=\frac{U_3}{1-\eta_3}k_{13} \quad (7)$$

其中: $\eta_2=\eta'_2=\frac{Z_2}{Z_{L2}+Z_2}$; $\eta_3=\frac{Z_3}{Z_{L3}+Z_3}$ 。

对式(6)和式(7)进行进一步推导, 分析中低压绕组压降比的大小关系为

$$\begin{aligned} \frac{1-\Delta U_3}{1-\Delta U_2} &= (1-m)\frac{(1-\eta'_3)}{(1-\eta'_2)} = \\ &= \frac{(1-m)(Z_{L3}+Z_3)}{Z_{L3}+(1-m)Z_3+mZ_3\parallel R'} = \\ &= 1 - \frac{mZ_{L3}+mZ_3\parallel R'}{Z_{L3}+(1-m)Z_3+mZ_3\parallel R'} < 1 \end{aligned} \quad (8)$$

从式(8)可以得出 $\Delta U_3 > \Delta U_2$, 低压侧绕组压降比例相对更大。上述推理与绕组的接线方式无关, 如果故障发生在中压侧, 交换上述公式中的中低压侧参数, 结论类似。

因此, 三绕组变压器负荷侧匝间短路时, 两负荷侧电压都会下降, 且短路绕组的电压下降比相对于另一负荷侧更大。

2 典型应用

广西电网某 220 kV 变电站为单主变运行, 主变容量 150 MVA, 三侧额定电压分别为 220 kV/110 kV/10 kV, 接线方式为 Yg/Yg0/D11, 高压侧为电源侧, 中压侧 110 kV 侧接负荷, 低压侧接 10 kV 配网及电容补偿。某日发生主变重瓦斯动作跳主变三侧事故, 变压器油色谱分析表明内部发生严重故障, 而主变电气量保护均未出口, 分析故障录波排除了主变内部出现相间或接地故障, 初步判断为内部发生了匝间短路。

分析故障录波图可得: 故障开始时间大约在录波中的 -60 ms 处, 在约 +30 ms 处达到稳定, 在约 +200 ms 处电气量突降为零, 判断此时重瓦斯保护跳三侧开关。

下面以 -80 ms、60 ms 处的电气量分别代表故障前、后。由于低压侧为三角形出线, 采集到的电压为相电压, 将相电压转为线电压, 也就是绕组电压为

$$\begin{cases} U_{3a} = U_{3AC} = U_{3A} - U_{3C} \\ U_{3b} = U_{3AB} = U_{3B} - U_{3A} \\ U_{3c} = U_{3BC} = U_{3C} - U_{3B} \end{cases} \quad (9)$$

经过转换得到故障前、故障后稳态的各绕组电压有效值如表 1 所示。

表 1 故障前后变压器各绕组电压有效值

Table 1 The windings voltage RMS of before and after the transformer fault

	故障前电压/kV	故障后电压/V	电压变化/%
高 A	134.89	134.14	-0.56
高 B	134.68	132.92	-1.31
高 C	134.26	133.83	-0.32
中 A	67.39	65.61	-2.64
中 B	66.41	59.49	-10.4
中 C	66.23	64.47	-2.66
低 AC	10.53	10.16	-3.51
低 AB	10.21	8.58	-16.0
低 BC	10.26	9.85	-4.00

从表 1 可以看出, 电压下降最严重的两个绕组为: 中压侧 B 相电压下降为 $\Delta U_2 = 0.10$, 低压侧 B 相绕组电压也就是低压侧 AB 线电压下降为 $\Delta U_3 = 0.16$ 。根据上文推导的结论可知: 低压侧 B 相绕组电压下降最大, 中压侧 B 相绕组电压下降略小, 则故障为低压绕组 B 相匝间短路。把变压器参数和故障前的负载阻抗等代入式(6)可以计算出 m

≈ 0.05 , $R' \approx 0.6 \Omega$ 。变压器返厂后吊罩检查发现低压侧 B 相绕组发生了匝间短路, 短路匝数也基本符合计算值, 事故绕组照片如图 4 所示。

3 Matlab 仿真

Matlab 的 Simulink 功能有专门针对电力系统仿真分析的模块^[10-12], 利用该模块对上述事故进行仿真分析, 仿真电路图如图 5 所示, 三绕组变压器采



图 4 事故绕组照片

Fig. 4 Photo of accidental winding

用三个独立的变压器模型, 其中 B 相低压绕组设有分接开关, 其中的 1/20 的绕组引出后接可控开关 Breaker, 开关闭合等效为匝间短路。

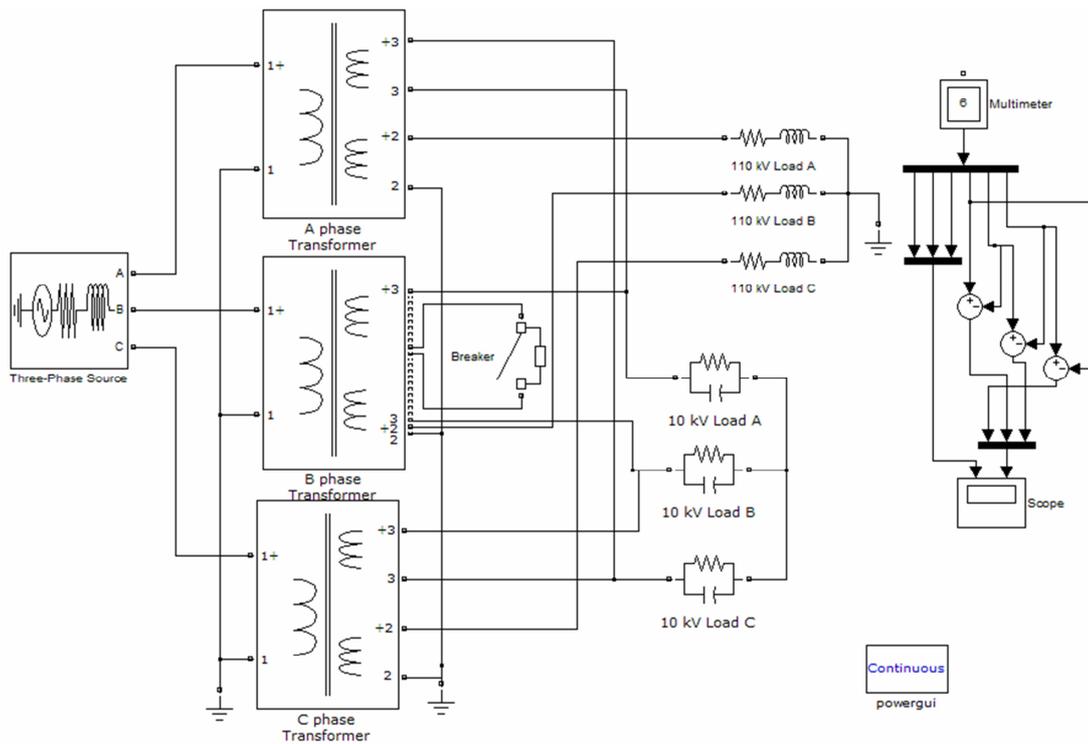


图 5 Matlab 仿真三绕组变压器匝间短路图

Fig. 5 Simulation figure of three winding transformer inter-turn short circuit with Matlab

本文参照实际参数对上文的事故实例进行仿真, 具体参数如下: 变压器接线方式为 Yg/Yg0/D11, 额定容量为 150 MVA, 高中低三侧短路电压为 15.26%, -1.14%, 9.51%, 绕组电阻标幺值取 0.005, 不考虑变压器饱和。系统短路容量 5 000 MVA, 110 kV 侧有功负荷 60 MW, 无功负荷 10 MVar, 低压侧有功负荷 1 MW, 无功补偿 12 MVar。Breaker 闭合时阻抗即短路阻抗 0.1 Ω 。仿真 $t=0.04$ 时, 发生 $m=0.05$ 的 B 相匝间短路, 中低压侧仿真波形如图 6 所示。

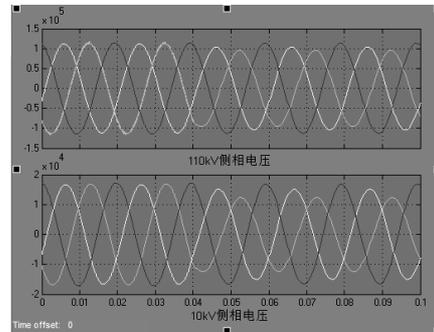


图 6 仿真电压波形图

Fig. 6 Voltage oscillogram of simulation

从录波可以看出：电压下降最明显的为中压侧 B 相电压下降 8.7%，低压侧 AB 线电压也就是 B 相绕组电压下降 14.62%，其余各电压都有不同程度的下降，详情如表 2 所示。仿真结果吻合故障录波，进一步验证上文公式推导正确且具备实用价值。

表 2 Matlab 仿真电压幅值与故障录波对比

Table 2 Amplitude of Matlab simulation voltage contrast with fault recorder

	Matlab 仿真			故障录波		
	故障前 幅值/kV	故障后 幅值/kV	电压变化/%	故障前 幅值/kV	故障后 幅值/kV	电压变化/%
中 A	65.82	63.51	-3.51	67.39	65.61	-2.64
中 B	66.40	60.62	-8.70	66.41	59.49	-10.40
中 C	67.55	66.40	-1.71	66.23	64.47	-2.66
低 AC	9.81	9.53	-2.94	10.53	10.16	-3.51
低 AB	9.87	8.43	-14.62	10.21	8.58	-16.00
低 BC	10.10	9.93	-1.71	10.26	9.85	-4.00

4 结论

多绕组变压器某一负荷侧匝间短路将导致所有的负荷侧电压、电流下降，而对于三角形接线绕组匝间短路，内部存在零序电流，绕组内部电流无法通过外部电流计算得知，因而分析变压器匝间短路时，取各侧的电压值更具备可行性。本文通过采用叠加定理，把发生短路的变压器绕组等效为两个不同变比的绕组。以三绕组变压器低压侧匝间短路为例，推导了变压器负荷侧匝间短路可以等效为增加一个绕组的变压器，并在三绕组变压器等效模型的基础上建立了三绕组变压器负荷侧匝间短路模型，进一步推导了匝间短路后各侧电压的计算公式。文中还引入了一个实例进行分析，且通过 Matlab 仿真该实例，仿真结果和故障录波都与文中模型的结论相吻合，表明本文提出的模型有效且具备实用价值。

故障录波是故障过程的真实记录，是故障分析的第一手资料。本文提出的模型为变压器匝间短路故障分析提供了理论支撑，根据本文模型的结论，可以直接通过故障录波，方便快捷找出故障点。本文中建模思路对于分析各种匝间短路具有一般性，可以广泛应用于各种发电机、变压器的匝间短路建模及故障分析，简化了变压器内部故障分析计算。

参考文献

[1] WANG Hang, BUTLER K L. Modeling transformers with internal incipient faults[J]. IEEE Trans on Power

- Delivery, 2002, 17(2): 500-509.
- [2] 张超, 夏立, 吴正国, 等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征传递规律[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 52-57.
- ZHANG Chao, XIA Li, WU Zheng-guo, et al. Transfer law of fault characteristics of interturn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 52-57.
- [3] 尹金良, 朱永利, 俞国勤, 等. 基于高斯过程分类器的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.
- YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Fault diagnosis of transformers based on Gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.
- [4] 王雪, 王增平. 基于广义基波功率的新型变压器主保护方案[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 191-198.
- WANG Xue, WANG Zeng-ping. Novel transformer main protection scheme based on generalized fundamental power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 191-198.
- [5] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-16.
- WANG Zeng-ping, JIANG Xian-guo, ZHANG Zhi-chao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-16.
- [6] 邱关源. 电路[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- QIU Guan-yuan. Circuit[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [7] 陈卫, 陈德树, 尹项根, 等. 基于零序幅值比较的电抗器匝间保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 41-45.
- CHEN Wei, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen, et al. Investigation of shunt reactor interturn protection based on zero sequence magnitude comparison[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(4): 41-45.
- [8] 毕大强, 王祥珩, 王维俭. 基于测量阻抗变化的并联电抗器小匝间短路保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 57-60.
- BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, WANG Wei-jian. Measured impedance based shunt reactor protection against small inter-turn fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 57-60.
- [9] 陈清玉, 罗隆福, 许加柱, 等. 感应滤波器对新型换流

- 变压器短路阻抗的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 27-33.
- TRAN T N, LUO Long-fu, XU Jia-zhu, et al. Influence of inductive filters on short-circuit impedances of new converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 27-33.
- [10] 索南加乐, 许立强, 焦在滨. 三相多芯柱变压器暂态仿真新模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 57-62.
- SUONAN Jia-le, XU Li-qiang, JIAO Zai-bin. New transient simulation model of three-phase multi-legged transformer[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 57-62.
- [11] 张丽丽, 王新超. 短路电磁暂态过程对距离保护影响的仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 35-39.
- ZHANG Li-li, WANG Xin-chao. Simulation analysis of the impact on distance protection caused by short-circuit electromagnetic transient process[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 35-39.
- [12] 李晓庆, 陈尔奎, 纪志成. 基于 MATLAB 单相变压器的仿真建模及特性分析[J]. 变压器, 2005, 42(3): 8-12.
- LI Xiao-qing, CHEN Er-kui, JI Zhi-cheng. Simulation modelling and characteristic analysis of single-phase transformer based on MATLAB[J]. Transformer, 2005, 42(3): 8-12.

收稿日期: 2013-07-11; 修回日期: 2013-08-26

作者简介:

杨理才(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事继电保护和电力系统自动化相关工作; E-mail: ylc6618@163.com

孙结中(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统过电压的试验、研究工作;

刘蔚(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输配电分析和计算工作。