

DOI: 10.7667/PSPC160116

# 苏州电网并网分布式电源防孤岛的继电保护控制策略研究

范永宇<sup>1</sup>, 潘琪<sup>1</sup>, 姜臻<sup>2</sup>, 吴锋<sup>1</sup>

(1. 江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215000; 2. 广东电网公司珠海供电局, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 目前孤岛检测和防孤岛策略主要是基于并网分布式电源的特性而设计, 而鲜有以孤岛发生时公用电网的电气特性为核心的继电保护防孤岛策略的研究。为了找到一种利用公用电网继电保护防孤岛的新方法, 结合苏州电网, 通过对孤岛形成机理的分析, 找出了孤岛发生前后零序电压的变化规律。进而基于零序电压的变化规律设计了公用电网防孤岛的继电保护控制策略。数值仿真及苏州电网的防孤岛实例验证了该并网分布式电源防孤岛的继电保护控制策略的有效性。结果表明, 该控制策略具有较高可靠性和实用前景。

**关键词:** 并网分布式电源; 零序电压; 控制策略; 公用电网继电保护; 防孤岛

## Research on the relay protection control strategy for anti-islanding of distributed generator connected to the power grid of Suzhou

FAN Yongyu<sup>1</sup>, PAN Qi<sup>1</sup>, JIANG Zhen<sup>2</sup>, WU Feng<sup>1</sup>

(1. Suzhou Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Suzhou 215000, China;

2. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** The present study on islanding and anti-islanding is mainly based on the characteristic of the distributed generator, however there is few research on anti-islanding by relay protection based on the electrical characteristics of the public power grid when islanding occurs. In order to find a new method which is using public power grid relay protection for anti-islanding, the analysis of the formation of islanding in Suzhou power grid is given, and the changing regulation of the zero-sequence voltage is then found. So the relay protection of public power grid for anti-islanding can be designed with zero-sequence voltage. The relay protection for anti-islanding of distributed generator is proved reasonable both by the simulation on PSCAD and the practical application of the strategy in power grid of Suzhou. The study proves that the relay protection strategy has high reliability and practical prospect.

**Key words:** distributed generator connected to power grid; zero-sequence voltage; control strategy; relay protection of public power grid; anti-islanding

## 0 引言

分布式电源主要是指接入 35 kV 及以下电压等级的小型电源, 包括同步电机、感应电机、变流器等类型。孤岛现象是指电网失压时, 并网分布式电源仍保持对失压电网中的某一部分线路继续供电的状态, 因此, 它又可分为非计划性孤岛和计划性孤岛。其中, 非计划性孤岛现象是指非计划、不受控地发生孤岛现象。而防孤岛就是防止非计划性孤岛现象的发生<sup>[1]</sup>。

苏州电网的分布式电源可以分为两类, 一类是传统能源, 因容量较之主力电厂小, 遂通过 110 kV 馈供主变的中低压侧并网; 另一类是近年来发展迅

速的风能、太阳能等新能源。孤岛现象是分布式电源并网后给电网带来的一个主要问题, 其危害非常大。一是孤岛内的电压、频率不稳定, 将会对孤岛内电气设备造成损害; 二是孤岛使得失压后的电网仍然带电, 对电网检修人员人身安全造成威胁; 三是对于跳闸的 110 kV 线路配备的检无压重合闸而言, 孤岛维持的失压电网电压使得上一级 110 kV 线路重合闸动作失败, 降低了供电可靠性。因此, 非常有必要通过一定的策略防止电网孤岛的发生<sup>[2]</sup>。

对于小型并网分布式电源, 应具备快速检测孤岛并立即断开与电网连接的能力; 对于大中型并网分布式电源, 公用电网继电保护装置必须保障公用电网故障时切除并网分布式电源, 分布式电源可不

设置防孤岛保护<sup>[3]</sup>。

目前, 孤岛检测和防止的研究较多, 比如电网端检测法和逆变器端检测法, 其中逆变器端检测法又有主动法和被动法<sup>[4-6]</sup>。而对于公用电网切除并网分布式电源的继电保护方法却鲜有研究。对于并网分布式电源的继电保护技术又几乎都是探讨关于分布式电源并网后对公用电网继电保护的影响, 亦未提出一种通过公用电网继电保护防孤岛的方法<sup>[7-9]</sup>。

本文将结合苏州电网并网分布式电源的现状和特点, 从孤岛发生的机理入手, 分析孤岛发生前后 110 kV 线路电压互感器采集到的零序电压  $3U_0$  的变化规律, 进而设计了一种防孤岛的继电保护控制策略。该策略可在孤岛发生时可靠且灵敏地切除并网分布式电源, 从而达到防孤岛的目的。数值仿真及苏州电网的孤岛实例验证了该并网分布式电源防孤岛的继电保护控制策略。结果表明, 该控制策略具有较高可靠性和实用前景。

## 1 孤岛发生机理

### 1.1 并网分布式电源系统结构

苏州电网并网分布式电源系统有 2 个电源侧。一侧是通过 10 kV、20 kV、35 kV 电压等级并网于 110 kV 主变的中、低压侧的分布式电源, 另一侧则是通过一条 110 kV 线路对主变高压侧供电的系统电源。如图 1 所示。

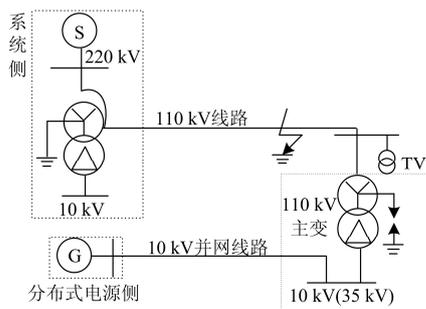


图 1 苏州电网并网分布式电源系统结构图

Fig. 1 Structure of distributed generators connected to power grid of Suzhou

当 110 kV 线路发生单相接地故障时, 保护动作跳闸, 系统侧电源失去。此时, 若分布式电源对失压电网继续供电, 则形成孤岛。

苏州电网 110 kV 主变均采用 Y/Δ 接线方式, 其特点是 Δ 侧属于小接地电流系统, 而 Y 侧属于大接地电流系统。由图 1 可以看出, 孤岛发生前, 110 kV 线路电压互感器(TV)所处的系统为大接地电流系统。孤岛发生后, 由于失去了系统侧电源的主变中性点, 此时线路电压互感器所处系统变为小接地

电流系统。孤岛发生前后, 两种系统在单相接地故障发生时, 电气特性存在明显区别。

采用三台单相三绕组接线的电压互感器如图 2 所示, 其绕组额定电压如表 1 所示<sup>[10]</sup>。其中辅助绕组可以采集到系统的零序电压  $3U_0$ 。

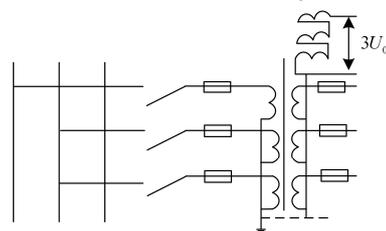


图 2 三台单相三绕组电压互感器接线

Fig. 2 TV connection of three three-coil inductors

表 1 电压互感器绕组额定电压

Table 1 Rated voltage of TV

额定电压/kV		
一次绕组	二次绕组	辅助(剩余)绕组
$110/\sqrt{3}$	$0.1/\sqrt{3}$	0.1

### 1.2 零序电压变化规律

大、小接地电流系统发生金属性单相接地故障时, 忽略对地电容, 则电压互感器辅助绕组采集到的电压相量图如图 3 所示。

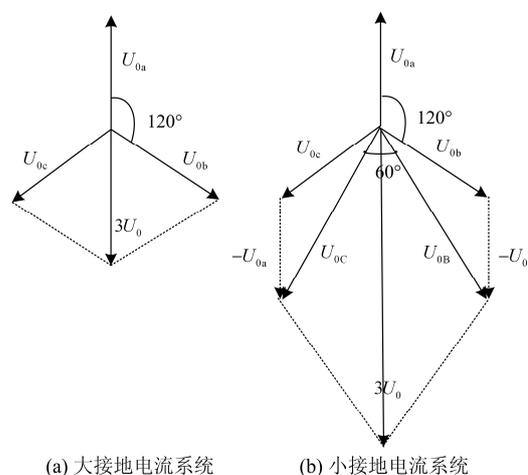


图 3 大、小接地电流系统单相接地故障零序电压相量图

Fig. 3 Zero-sequence voltage phasor diagram with single phase grounding in ground neutral system & low ground current system

图 3(a)是孤岛发生前系统单相接地故障电压相量图, 此时系统为大电流接地系统。故障发生前, 三相电压对称, 不存在零序分量, 开口三角形电压  $3U_0$  为 0。系统发生单相接地故障时(假设为 A 相), 假设接地阻抗为 0, 则 A 相电压变为 0, B、C 两相

电压幅值为 100V，相角差为 120°，此时

$$3U_0 = 100 \times \cos 60^\circ \times 2 = 100 \text{ V} \quad (1)$$

考虑到实际电网单相接地故障接地阻抗的影响，结合图 3 相量图可知， $3U_0$  的幅值范围应为

$$0 < 3U_0 \leq 100 \text{ V} \quad (2)$$

图 2(b)是孤岛发生后系统单相接地故障电压相量图，此时系统由大接地电流系统变为小接地电流系统。这是因为系统侧电源失去后，并网分布式电源对失压电网继续供电所形成的孤岛同时失去了系统侧接地中性点。此时的单相接地故障仍然存在，仍然假设故障相为 A 相，接地阻抗为 0，结合相量图，此时三相电压为

$$U_{0A} = U_{0a} + (-U_{0a}) = 0 \quad (3)$$

$$U_{0B} = U_{0b} + (-U_{0a}) = U_{0ba} \quad (4)$$

$$U_{0C} = U_{0c} + (-U_{0a}) = U_{0ca} \quad (5)$$

由式(3)、式(4)、式(5)可知，A 相电压为 0，B、C 相电压幅值增大了  $\sqrt{3}$  倍，即  $100\sqrt{3}$  V，夹角由原来的 120° 变为了 60°，此时

$$3U_0 = 100\sqrt{3} \times \cos 30^\circ \times 2 = 300 \text{ V} \quad (6)$$

仍然考虑实际电网单相接地的接地阻抗的影响，并结合相量图，则  $3U_0$  的幅值范围应为

$$0 < 3U_0 \leq 300 \text{ V} \quad (7)$$

由式(1)、式(6)可知，并网分布式电源系统发生单相接地故障时，孤岛发生前、后，由于系统由大接地电流系统变为小接地电流系统，假设金属性接地，则零序电压  $3U_0$  的理论值从 100 V 上升至 300 V。零序电压对孤岛具有良好的灵敏性和辨识度。因此，可以将零序电压作为并网分布式电源防孤岛控制策略的控制变量。

## 2 公用电网防孤岛继电保护控制策略

### 2.1 保护的基本构成

公用电网防孤岛继电保护借助 110 kV 线路原有的电压互感器，以其辅助绕组采集的零序电压  $3U_0$  作为输入信号，构成过量继电保护<sup>[11]</sup>，即通过测量  $3U_0$  的幅值，当其大于整定值时，保护即动作。

为了增强可靠性，保护设置了 2 段时限。I 时限动作切除并网线路。I 时限动作后，若并网线路开关拒动，孤岛仍然存在，则 II 时限即动作将分布式电源并网的主变各侧开关跳开。

保护是以零序电压为孤岛判据，动作将并网分布式电源与系统解列，因此将其称为零序电压解列保护。

### 2.2 保护整定值

由式(6)可知，孤岛发生后的  $3U_0$  在接地阻抗为

0 时，最大可以达到 300 V。而实际的单相接地都带有一定的接地电阻，难以达到 300 V。结合文献<sup>[11]</sup>对灵敏度的规定，使得保护动作值满足灵敏度  $K_{lm} \geq 1.5$ ，则

$$U_{op} = 3U_0 / K_{lm} \leq 200 \text{ V} \quad (8)$$

取灵敏度  $K_{lm} = 1.5$ ，将保护动作值整定为 200 V。

苏州电网 110 kV 线路重合闸时间通常为 2 s，孤岛切除时间应在重合闸动作之前；另外 IEEE Std.1557 规定孤岛运行时间不能超过 2 s<sup>[2,12]</sup>。基于以上 2 方面的因素，将保护 I 时限时间整定为 0.2 s。II 时限一方面要满足时间小于 2 s 的要求，另一方面要在 I 时限的基础上有一个延时  $\Delta t$ ，与 I 时限配合。根据文献<sup>[11]</sup>， $\Delta t$  一般取 0.3~0.6 s。取  $\Delta t = 0.3$  s。则 II 时限整定为

$$t_{op}^{II} = t_{op}^I + \Delta t = 0.5 \text{ s} \quad (9)$$

零压解列保护的整定值如表 2 所示。

表 2 保护整定值

Table 2 Setting values of relay protection

动作值( $3U_0$ )	I 时限( $t_{op}^I$ )	II 时限( $t_{op}^{II}$ )
200 V	0.2 s	0.5 s

### 2.3 保护动作逻辑

为了清晰的表述防孤岛控制策略<sup>[13-14]</sup>的过程，结合上文的保护整定值，将其用流程图表述，如图 4 所示。

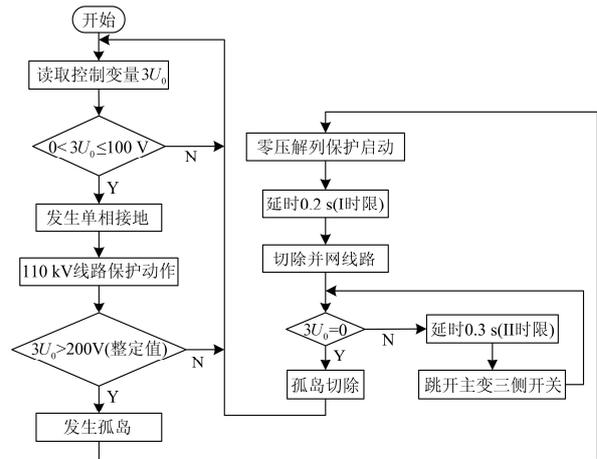


图 4 防孤岛流程图

Fig. 4 Flowchart of anti-islanding

控制策略具有以下特点：(a)保护采用 I、II 段时限进行配合，增强了可靠性；(b)保护适用于系统发生单相接地故障的情况，而电力系统各种短路故障中，单相故障占大多数，约为总短路数的 65%<sup>[15-16]</sup>~90%<sup>[11]</sup>，因此保护仍具有较强的实用性。

### 3 仿真分析及实例分析

#### 3.1 仿真分析

将图 1 所示的系统在 PSCAD 上搭建起仿真算例<sup>[17-18]</sup>。仿真模型的系统侧电源采用恒功率电源模型, 由理想电源与固定内阻抗串联模拟。分布式电源则采用一台等值异步电机模型。线路采用  $\pi$  型等值模型, 变压器采用 T 型等值模型。

仿真算例设置了 110 kV 线路发生单相接地, 故障相为 A 相。110 kV 线路保护动作, 开关跳闸, 导致系统电源失去。后分布式电源对失压电网继续供电, 形成孤岛。根据图 4 的流程图, 仿真设置的具体时间节点如下(为了更好的研究孤岛形成前后的电压特性, 仿真算例将故障持续时间设定为 0.2 s, 实际 110 kV 线路发生单相接地故障, 通常以 0s 时限切除):

1)  $t=0.3$  s 时, 110 kV 线路发生单相接地故障, 故障相为 A 相。

2)  $t=0.5$  s 时, 故障持续了 0.2 s 后, 110 kV 线路保护动作, 开关跳闸, 系统侧电源失去。

3)  $0.5$  s  $< t < 0.7$  s, 分布式电源对失压电网继续供电, 形成孤岛。

4)  $t=0.7$  s 时, 零序电压解列保护动作, 切除并网线路, 消除孤岛。

仿真算例得到的单相接地故障发生前后以及孤岛现象发生前后的零序电压  $3U_0$  的曲线如图 5 所示。

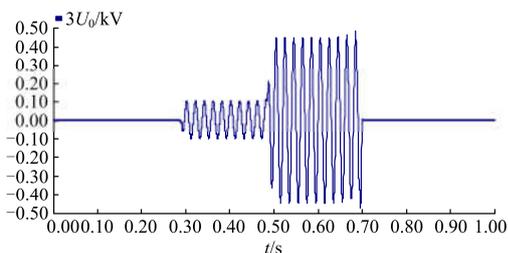


图 5 零序电压曲线图

Fig. 5 Characteristic curves of zero-sequence voltage

结合图 4 的流程图和图 5 的零序电压曲线图可知, 系统发生单相接地故障后, 零序电压上升至 100V 左右。后 110 kV 线路保护动作跳闸, 分布式电源继续对失压电网供电, 形成孤岛, 此时零序电压上升至 300V 左右, 达到了零压解列保护的整定值 200V, 保护动作切除并网线路, 零序电压降为 0, 孤岛消除。

为更全面地考察故障点位置和接地阻抗对控制策略的影响, 仿真算例设置了多个故障点, 并根据苏州电网实际运行经验任意设置了几个接地阻抗, 仿真得到的零序电压有效值如表 3 所示。

表 3 不同故障点和接地阻抗下的零序电压(有效值)

Table 3 Zero-sequence voltage (RMS) at different fault

location & ground impedance			
故障点(%)	$3U_0/V$	接地阻抗/ $\Omega$	$3U_0/V$
20%	295	1.2	296
40%	297	2.6	294
80%	294	4.4	292
90%	296	5.7	292

由表 3 可以看出, 故障点位置以及实际电网通常的接地阻抗对  $3U_0$  的影响比较小, 并未使得控制策略失效, 保护仍然能够识别孤岛并将其切除。

仿真结果表明: 控制策略对防孤岛具有良好的灵敏度和可靠性, 对故障点位置和接地阻抗具有较好的适应性。

#### 3.2 实例分析

控制策略在实际电网中的应用取得了预期的效果, 本节选取苏州电网一起并网分布式电源防孤岛的实例, 截取了故障发生过程中苏州电网控制中心 D5000 系统上采集到零序电压  $3U_0$ , 如图 6 所示。

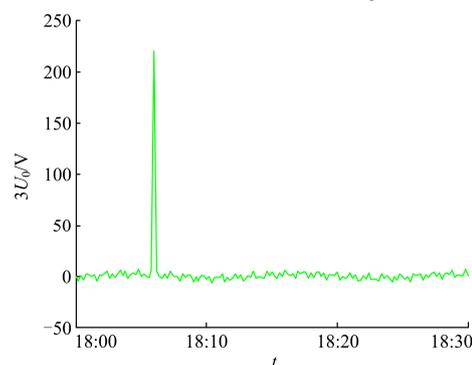


图 6 零序电压曲线图

Fig. 6 Characteristic curves of zero-sequence voltage

由图 6 可见, 孤岛发生的瞬间, 零序电压有一个明显的跃升, 大约在 220V。之后零序电压解列保护动作, 将孤岛破坏。这表明, 实际电网运行过程中, 控制策略能够很好的防止并网分布式电源孤岛现象的发生。

### 4 结论

本文从孤岛发生的机理入手, 分析孤岛发生前后系统零序电压的变化规律, 进而设计了防孤岛的继电保护控制策略, 即零压解列保护。该策略可在孤岛发生时可靠且灵敏地切除并网分布式电源, 从而达到防孤岛的目的。数值仿真及苏州电网的孤岛实例验证了该控制策略的可靠性和实用前景。但是, 该策略仅适用于单相接地故障造成的孤岛问题, 对

于其他类型的故障不能起到防孤岛的作用，可在后续工作中予以进一步研究。

参考文献

[1] 国家电网公司企业标准. Q/GDW 480—2010 分布式电源接入电网技术规定[S]. 北京：国家电网公司，2010.  
State Grid Enterprise Standard. Q/GDW 480-2010 technical rule for distributed resources connected to power grid[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2010.

[2] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-104.  
YUAN Chao, WU Gang, ZENG Xiangjun, et al. Protection technology for distributed generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 99-104.

[3] 国家电网公司企业标准. Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京：国家电网公司，2011.  
State Grid Enterprise Standard. Q/GDW 617-2011 technical rule for photovoltaic power station connected to power grid[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2011.

[4] 张瑞叶, 张少如, 王平军, 等. 一种新的主动孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 74-79.  
ZHANG Ruiye, ZHANG Shaoru, WANG Pingjun, et al. A new active island detection method based on a novel disturbance way[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 74-79.

[5] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.  
CHENG Qiming, WANG Yingfei, CHENG Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.

[6] 甘忠, 李正天. 一种新的分布式发电孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 123-127, 138.  
GAN Zhong, LI Zhengtian. A novel islanding detection method of distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 123-127, 138.

[7] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.  
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5.

[8] 金结红, 余晓东. 光伏并网系统反孤岛控制策略研究[J]. 通信电源技术, 2008, 25(6): 20-22.  
JIN Jiehong, YU Xiaodong. Research on anti-islanding control schemes for PV grid-connected system[J]. Telecom Power Technology, 2008, 25(6): 20-22.

[9] 杨萍. 应对地区小电源并网大系统电网保护的完善措施[J]. 电气传动自动化, 2010, 32(3): 62-63, 47.  
YANG Ping. Perfect protection measures of small power grid system[J]. Electric Drive Automation, 2010, 32(3):

62-63, 47.

[10] 万千云, 赵智勇, 万英. 电力系统运行技术[M]. 北京：中国电力出版社, 2007.

[11] 尹项根, 曾克娥. 电力系统继电保护原理与应用[M]. 武汉：华中科技大学出版社, 2001.

[12] IEEE Standards Coordinating Committee 21. IEEE Std. 1547. IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S].

[13] 刘辉, 魏岩岩, 汪旒, 等. 电动汽车入网调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 90-95.  
LIU Hui, WEI Yanyan, WANG Ni, et al. V2G control for EVs participating in primary frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 90-95.

[14] 刘志坚, 梁宁, 宋琪, 等. 含小水电群的风-水-火地区电网旋转备用协调优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 21-29.  
LIU Zhijian, LIANG Ning, SONG Qi, et al. Research of spinning reserve coordination optimization strategy in the wind-hydro-thermal area power grid containing small hydropower group[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 21-29.

[15] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉：华中科技大学出版社, 2002.

[16] 熊信银, 张步涵. 电力系统工程基础[M]. 武汉：华中科技大学出版社, 2003.

[17] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.  
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.

[18] 蔡云峰, 徐洋, 潘琪. 基于自定义模型的变压器纵差动保护 PSCAD 仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 118-122.  
CAI Yunfeng, XU Yang, PAN Qi. PSCAD simulation of transformer longitudinal differential protection based on custom model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 118-122.

收稿日期：2016-07-31； 修回日期：2016-08-25

作者简介：

范永宇(1986-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护、运行控制; E-mail: flysky71@126.com

潘琪(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及管理;

姜臻(1986-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 张爱琴)