

# 光伏 T 接高压配电网电流差动保护研究

王婷<sup>1</sup>, 刘渊<sup>1,2</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 贾言争<sup>3</sup>, 何世恩<sup>4</sup>, 李育强<sup>1</sup>

(1. 新疆大学教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;  
2. 国网昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100; 3. 国网哈密供电公司, 新疆 哈密 839000;  
4. 国家电网甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 分析了光伏电站故障电流的特性, 研究了两个目前常用电流差动保护判据应用在光伏 T 接线路上存在的问题。研究表明, 传统 T 接线路差动保护判据不能同时满足内部故障的灵敏性和外部故障的可靠性。结合光伏电源故障电流特点, 提出了适合于光伏 T 接线路电流差动保护的综合判据。对改进后的判据进行了大量的仿真试验, 仿真结果表明, 该判据能满足区内故障时的灵敏性和区外故障时的可靠性, 并且具有很强的抗过渡电阻的能力。

**关键词:** 光伏; T 接线路; 电流差动保护; 综合判据

## Research on the current differential protection where PV access to the high voltage distribution network with T-type

WANG Ting<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1,2</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, JIA Yanzheng<sup>3</sup>, HE Shien<sup>4</sup>, LI Yuqiang<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Changji Power Supply Company, Changji 831100, China;  
3. State Grid Hami Power Supply Company, Hami 839000, China; 4. Wind Power Technology Center, Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The characteristic of fault current of photovoltaic power is analyzed. Research on the problems that two traditional criterions of current differential protection used in photovoltaic T-type line has done and results show that traditional criterions cannot simultaneously meet the sensitivity and reliability. Combining with the characteristic of fault current of photovoltaic power, a synthesis criterion of current differential protection suitable for photovoltaic T-type line is proposed. A lot of simulation has done and simulation results show that the synthesis criterion can not only satisfy the sensitivity and reliability but also has a strong resistance to the fault resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267019 and No. 51367017).

**Key words:** photovoltaic power; T-type line; current differential protection; synthesis criterion

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0060-06

## 0 引言

随着电力负荷的不断增长和电网密度的增加, 输电线路廊道变得非常紧缺, 为了节约建设成本, 光伏T接配电网的实际应用越来越多。大规模光伏电站T接配电网改变了系统的网架结构和潮流分布, 给继电保护带来了挑战, 光伏接入系统保护成为研究热点。文献[1-4]研究了光伏电站接入容量、位置对

电流三段式保护产生的影响。文献[5]提出了以三端故障分量中的电流矢量和作为电流差动保护判据的制动量的新判据。文献[6]提出了以故障分量中电流的最大值作为差动判据制动量的新判据。目前对 T 接线路电流差动保护的研究对象大部分都是常规电源<sup>[7-10]</sup>, 结合光伏特点, 对光伏 T 接线路电流差动保护的研究很少。

本文在分析光伏T接配电网对保护影响的基础上, 研究了目前常用的两种电流差动保护传统判据应用于光伏T接线路存在的问题, 结合光伏电源的特性, 提出了适用于光伏T接线路的综合判据。在

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267019, 51367017); 国家电网科技项目(52272713039Y)

PSCAD中构建光伏T接电网模型, 仿真研究了不同故障位置、不同故障类型下新的电流差动保护综合判据的动作特性, 并探讨了其在过渡电阻情况下的动作特性。

## 1 光伏电站故障电流特性

根据GB/T 19939-2005《光伏系统并网技术要求》, 小型光伏电站当作负荷看待, 应尽量不从电网吸收无功或向电网发出无功, 在电网频率和电压发生异常时应尽快切除。大中型光伏电站当作电源看待, 应具备一定的耐受电网频率和电压异常的能力, 能够为保持电网稳定性提供支撑。按图1所示本文搭建了容量为30 MWp的光伏电站, 最大输出功率为30 MW, 属于大型光伏电站, 作为电源处理。光伏电站升压变高压侧母线处(图1中BUS2)发生A相短路和ABC三相短路, 故障电流如图2所示。同等容量的常规电源在相同地点发生A相短路和ABC三相短路, 故障电流如图3所示。

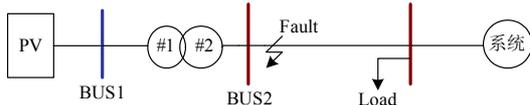


图1 光伏电站的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of photovoltaic power

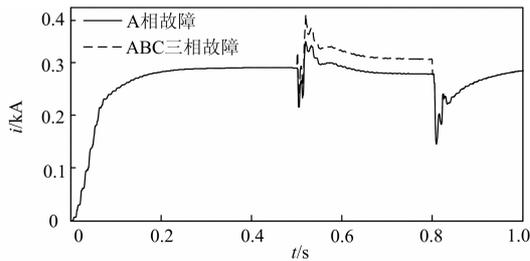


图2 光伏电站的故障电流

Fig. 2 Fault current of photovoltaic power

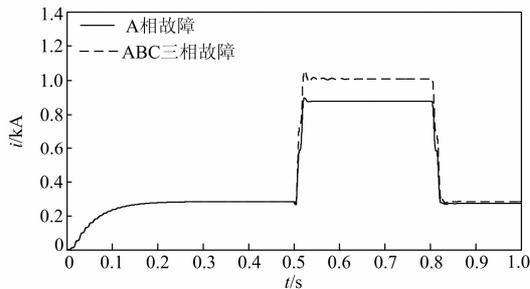


图3 常规电源的故障电流

Fig. 3 Fault current of traditional power

常规电源是依靠叶片的旋转发电, 光伏电站并没有依靠叶片的转动惯量, 而是根据光伏电池板的

能量转换来发电。从图2、图3可知, 光伏电站发生短路时, 短路电流很小, 发生三相故障时, 最大短路电流是正常运行电流的1.3倍, 而常规电源提供的短路电流是其正常电流的几倍甚至是十几倍。大量研究发现光伏电站的故障电流特性和常规电源的故障电流特性存在着很大的差异。本文将结合光伏电站故障电流特性重点研究光伏T接电网电流差动保护。

## 2 传统T接线路保护在光伏T接线路上动作特性分析

根据GB/T 19939-2005《光伏系统并网技术要求》, 光伏电站T接110 kV高压配电网的线路通常配备光纤纵差保护。本文将结合图4分别分析传统差动保护传统判据在光伏T接线路上的动作特性。研究中规定在BUSM、BUSN和BUSP之间的输电线路发生故障为内部故障, 在此之外的线路发生故障为外部故障<sup>[11]</sup>。

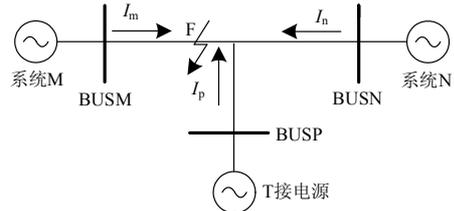


图4 T接线路内部故障时电流流向图

Fig. 4 Flow direction of current when the fault occurs in the line

传统T接线路电流差动保护由辅助判据和单一的主判据组成<sup>[12]</sup>。

$$\text{方案 1: } \begin{cases} \text{辅助判据: } |I_m + I_n + I_p| > I_0 \\ \text{主判据: } |I_{\max} + I_\Sigma| > K_1 |I_{\max} - I_\Sigma| \end{cases} \quad (1)$$

国内外研究者针对T接双端电源也做出了大量研究, 提出新的判据<sup>[13]</sup>。

$$\text{方案 2: } \begin{cases} \text{辅助判据: } |I_m + I_n + I_p| > I_0 \\ \text{主判据: } |I_{\max}| + K_2 |I_\Sigma| \cos \theta > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $I_m$ 为母线M侧的电流值;  $I_n$ 为母线N侧的电流值;  $I_p$ 为母线P侧的电流值;  $I_0$ 为动作的门槛值;  $I_{\max}$ 为 $I_m$ 、 $I_n$ 、 $I_p$ 三端电流的最大值;  $I_\Sigma$ 为其余两端电流矢量和;  $\theta$ 为电流 $I_{\max}$ 与 $I_\Sigma$ 之间的夹角;  $K_1$ 为方案1的制动系数<sup>[14]</sup>;  $K_2$ 为方案2的制动系数。下文将称方案1的主判据为主判据1, 方案2的主判据为主判据2。

### 2.1 传统电流差动保护方案1分析

电流差动保护方案1的主判据1:

$$|I_{\max} + I_\Sigma| > K_1 |I_{\max} - I_\Sigma| \quad (3)$$

令  $|I_{\max}| = n|I_{\Sigma}|$ ，发生内部故障时， $I_{\max}$  与  $I_{\Sigma}$  同向，将  $|I_{\max}| = n|I_{\Sigma}|$  代入主判据1，整理得

$$n + 1 > k_1(n - 1) \quad (4)$$

发生外部故障时， $I_{\max}$  与  $I_{\Sigma}$  反向，即电流  $I_{\max}$  与  $I_{\Sigma}$  之间的夹角  $\theta$  为  $180^\circ$ <sup>[15]</sup>，整理得

$$n - 1 < k_1(n + 1) \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知，主判据1的灵敏性和可靠性由制动系数  $K_1$  决定，为满足灵敏性和可靠性，在发生内、外故障时主判据1的制动系数  $K_1$  的取值范围如表1。

表 1 故障时  $K_1$  取值范围

Table 1 Range of values for  $K_1$

内部故障	外部故障
$K_1 < \frac{n+1}{n-1}$	$K_1 > \frac{n-1}{n+1}$

1) 当 T 接电源为常规能源时，由于常规电源的故障电流为正常运行时的几倍甚至几十倍，当 F 点发生短路时， $I_{\Sigma}$  接近于  $I_{\max}$ ， $n \approx 1$ 。为满足内部故障时的灵敏性和外部故障时的可靠性， $K_1$  取值可取  $0 \sim +\infty$ 。

2) 当 T 接电源为光伏电源时，由于光伏故障电流较小，为正常运行电流的  $1 \sim 1.2$  倍。当两侧系统为常规能源时， $n \gg 1$ ，为满足内部故障的灵敏性， $K_1$  取值要求  $K_1 < 1$ ；为满足外部故障的可靠性， $K_1$  取值要求  $K_1 > 1$ 。因此，当 T 接电源为光伏电源时， $K_1$  取值不能同时满足灵敏性和可靠性。

T 接线路电流差动保护方案1的灵敏性和可靠性由制动系数  $K_1$  决定，由于光伏故障电流较小，方案1应用在光伏 T 接线路上时不能同时满足灵敏性和可靠性。

## 2.2 电流差动保护方案 2 分析

电流差动保护方案2的主判据2

$$|I_{\max}| + K_2 |I_{\Sigma}| \cos \theta > 0 \quad (6)$$

整理主判据2得内部故障时

$$(n + K_2) |I_{\Sigma}| > 0 \quad (7)$$

外部发生故障时

$$(n - K_2) |I_{\Sigma}| < 0 \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可知，T 接线路电流差动保护主判据2的灵敏性和可靠性由制动系数  $K_2$  决定，为满足灵敏性和可靠性，在发生内、外故障时主判据2的制动系数  $K_2$  的取值范围如表2。

表 2 故障时  $K_2$  取值范围

Table 2 Range of values for  $K_2$

内部故障	外部故障
$K_2 > -n$	$K_2 > n$

1) 当 T 接电源为常规能源时，由于常规电源的故障电流为正常运行时的几倍甚至几十倍，当 F 点发生短路时， $I_{\Sigma}$  接近于  $I_{\max}$ ， $n \approx 1$ 。为满足内部故障时的灵敏性和外部故障时的可靠性， $K_2$  取值可取  $-1 \sim 1$ 。

2) 当 T 接电源为光伏电源时，由于光伏电流故障电流较小， $n \gg 1$ ，当  $K_2 > n$  即可满足内部故障时的灵敏性。但在实际运行中，无法确定  $n$  值的范围，因此主判据2在外部故障时的可靠性得不到保证。

T 接线路电流差动保护方案2的灵敏性和可靠性由制动系数  $K_2$  决定，由于光伏故障电流较小，方案2应用在光伏 T 接线路上在外部故障时的可靠性得不到保证。

## 3 光伏 T 接线路电流差动保护综合判据的提出

以上研究表明传统 T 接线路差动保护不能满足光伏 T 接后保护的灵敏性和可靠性，因此需要结合光伏故障电流特点提出新的综合判据，使之既能满足内部故障时的灵敏性，又能满足外部故障时的可靠性。

结合方案1和方案2各自的特点，采用两个主判据和辅助判据共同构成光伏 T 接线路综合判据。为了保证在内部故障时的高灵敏性，主判据2的制动系数  $K_2 > 0$ ；为了确保外部故障时的可靠性，主判据1的制动系数  $K_1 > 1$ 。

综合判据的逻辑关系如图 5 所示。

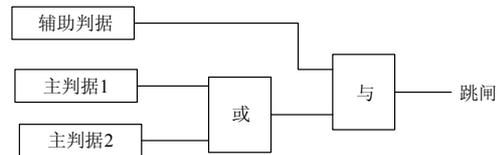


图 5 综合判据的逻辑关系图

Fig. 5 Logical diagram of the synthetic criterion

辅助判据是为了防止线路在充电情况下因装置误动而引起的跳闸，满足辅助判据动作条件时仅启动保护，主判据1和主判据2共同来决定保护是否动作。两个主判据其中一个满足动作条件时，保护就能够动作跳闸。综合判据既满足了内部故障时的高灵敏性又满足了外部故障时的可靠性。

## 4 综合判据在光伏 T 接高压配电网中的应用

结合综合新判据，搭建如图 6 所示的光伏 T 接配网模型，光伏电站 T 接在 110 kV 线路上，输出功率 30 MW。0.5 s 发生故障，故障持续的时间为 0.3 s，通过对故障发生的前一个周期和后一个周期进行数据的采集，仿真研究电流差动保护综合判据

的正确性。

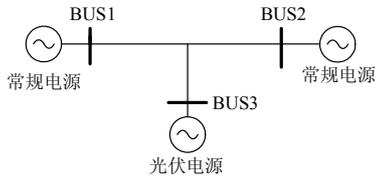


图 6 光伏电站 T 接配网的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of photovoltaic power access to the system with T-type

#### 4.1 不同故障类型下综合判据的动作特性

电流差动保护的线路范围为 BUS1 与 BUS2 之间的线路和 BUS3 与 T 接点之间的线路, 在被保护线路内部发生故障为内部故障, 内部故障点为 T 接点。仿真模型为三端电源系统, 将外部故障点分别放在两端常规电源与 BUS1 和 BUS2 的线路上。

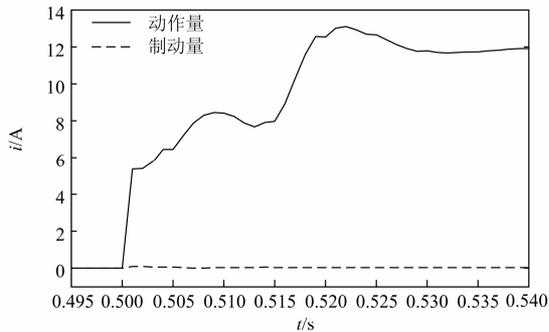
##### 4.1.1 发生内部故障时综合判据的动作特性

当在 T 接点发生单相接地故障和三相接地故障, 主判据 2 和综合判据的动作特性如图 7、图 8。

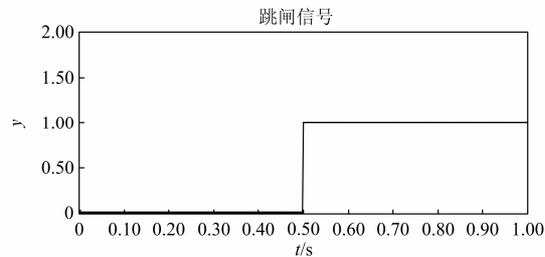
从图 7、图 8 中可以看出, 在内部发生单相接地故障或三相接地故障, 主判据 2 动作量大于制动量, 综合判据在 0.5 s 输出保护动作信号, 保护正确动作。

##### 4.1.2 发生外部故障时综合判据的动作特性

当在母线 1 处发生单相接地故障和三相接地故障, 主判据 1 和综合判据的动作特性如图 9、图 10。

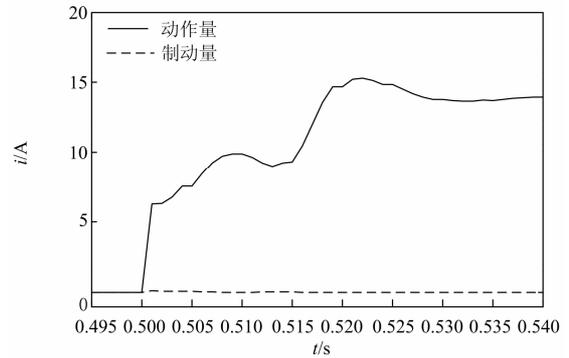


(a) T 接点处发生 A 相故障(主判据2)

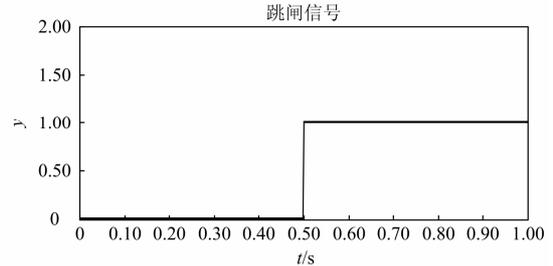


(b) 综合判据的动作信号

图 7 T 接点发生 A 相接地故障时综合判据的动作特性  
Fig. 7 Characteristics of synthetic criterion when the single phase fault occurs in the T-type point



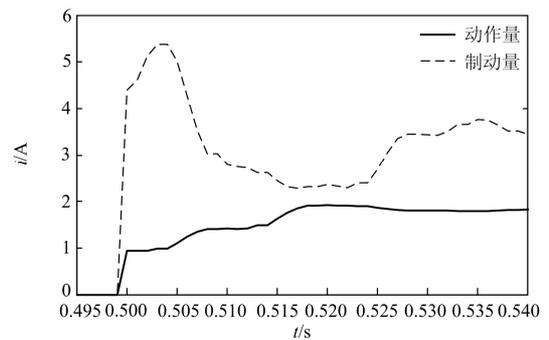
(a) T 接点处发生 ABC 三相故障(主判据2)



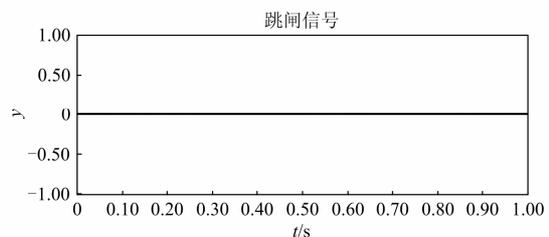
(b) 综合判据的动作信号

图 8 T 接点发生 ABC 三相接地故障时综合判据的动作特性  
Fig. 8 Characteristics of synthetic criterion when the three phases fault occurs in the T-type point

从以上仿真研究中可以看出, 在外部发生单相接地故障或三相接地故障时, 主判据 1 制动量大于动作量, 综合判据的动作信号在发生故障时输出为 0, 在发生外部故障时, 正确不动作。



(a) 母线 1 外侧发生 A 相故障(主判据1)



(b) 综合判据的动作信号

图 9 母线 1 外侧发生 A 相接地故障时综合判据的动作特性  
Fig. 9 Characteristics of synthetic criterion when the single phase fault occurs in outside line

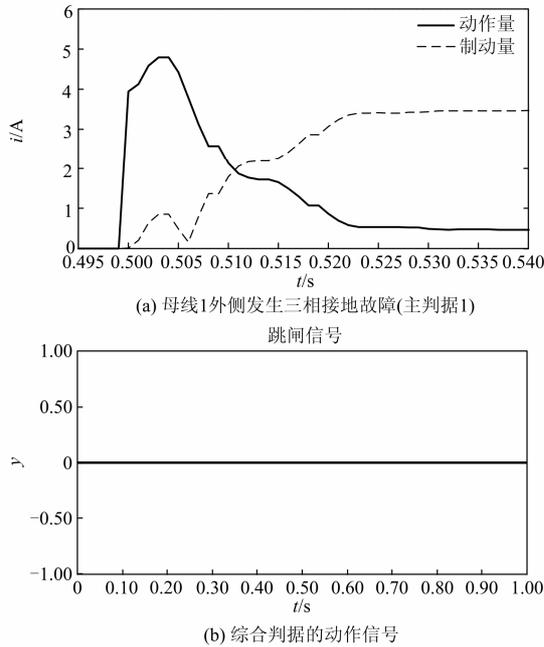


图 10 母线 1 外部发生 ABC 三相接地故障时综合判据的动作特性

Fig. 10 Characteristics of synthetic criterion when the three phases fault occurs in outside line

#### 4.2 不同过渡电阻下综合判据的动作特性

过渡电阻为  $0\ \Omega$  时, 在母线 1 外侧发生 A 相接地故障时, 主判据 1 和综合判据动作特性如图 11、图 12 所示。

从图 11、图 12 可以看出, 在发生外部故障时, 无论过渡电阻为  $0$  或是  $50\ \Omega$  时, 主判据 1 制动量大于动作量, 综合判据能使保护正确不动作, 综合判据具有很强的抗过渡电阻的能力。

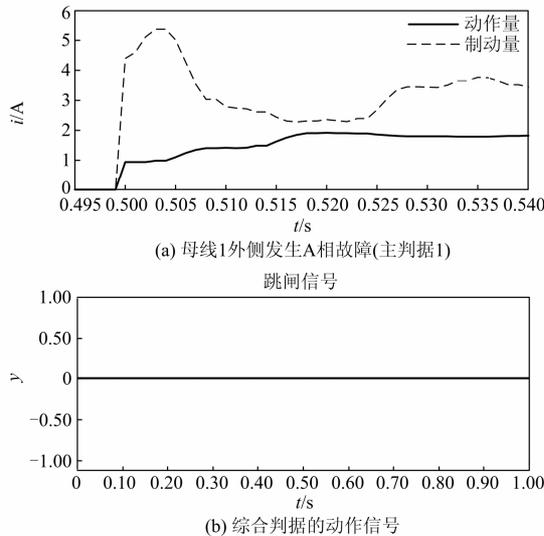


图 11 过渡电阻为  $0\ \Omega$  时电流差动保护动作特性

Fig. 11 Characteristics of zero fault resistance

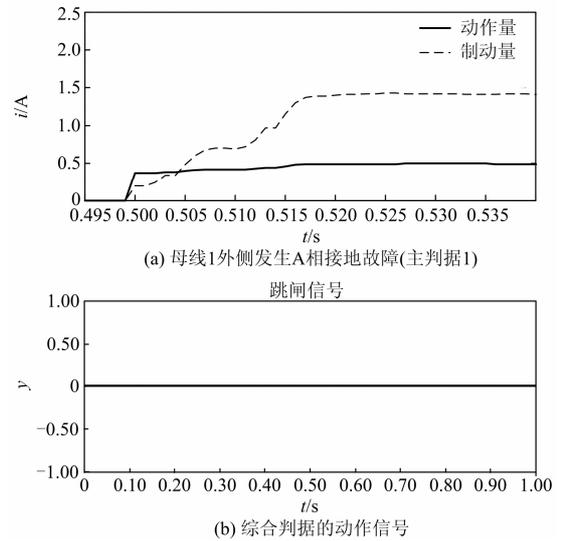


图 12 过渡电阻为  $50\ \Omega$  时电流差动保护动作特性

Fig. 12 Characteristics of  $50\ \Omega$  fault resistance

### 5 结论

分析了传统电流差动保护判据应用在光伏 T 接电路存在的问题: 传统差动保护不能同时满足内部故障时的灵敏性和外部故障时的可靠性。结合光伏电站的特性, 提出了改进的电流差动保护的复合判据, 该判据由一个辅助判据和两个主判据共同组成。改进的复合判据能同时满足内部故障时的灵敏性和外部故障时的可靠性, 并具有很强的抗过渡电阻的能力。

### 参考文献

- [1] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.  
YANG Guohua, YAO Qi. Simulation study of the influence of photovoltaic power on line protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79.
- [2] 王希舟, 陈鑫. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器, 2006, 34(3): 15-19.  
WANG Xizhou, CHEN Xin. Research on the coordination of distributed generation and distribution system protection[J]. Relay, 2006, 34(3): 15-19.
- [3] 石振刚, 王晓蔚, 赵书强. 并网光伏发电系统对配电网线路保护的影响[J]. 华东电力, 2010, 38(9): 1045-1048.  
SHI Zhengang, WANG Xiaowei, ZHAO Shuqiang. Influence of grid connected photovoltaic power system on line protection of distribution network[J]. East China Electric Power, 2010, 38(9): 1045-1048.

- [4] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 81-85.  
SUN Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. A protection scheme for distribution system with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 81-85.
- [5] 刘静, 邵能灵, 李坤. T 型线路电流差动保护研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 58-62.  
LIU Jing, TAI Nengling, LI Shen. Differential current protection of T-type transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 58-62.
- [6] 柳焕章, 李晓华. 新型数字线路电流差动保护原理及其应用[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 74-81.  
LIU Huanzhang, LI Xiaohua. A novel principle of digital current differential protection for transmission line and its application[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 74-81.
- [7] 袁荣湘, 陈德树, 张哲. 高压输电线路新型差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 9-13.  
YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, ZHANG Zhe. Study on a new differential protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 9-13.
- [8] 张振宇, 贺家李, 汪国新, 等. 基于故障分量的方向电流差动保护[J]. 中国电力, 2005, 38(8): 1-6.  
ZHANG Zhenyu, HE Jiali, WANG Guoxin, et al. Directional current differential protection based on fault components[J]. Electric Power, 2005, 38(8): 1-6.
- [9] 陆于平, 李玉海, 李鹏, 等. 差动保护灵敏与启动电流、制动系数和原理之间的关系[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 51-55.  
LU Yuping, LI Yuhai, LI Peng, et al. Discussion on relationship of pick-up current, restrained factor and principles to the differential protection sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 51-55.
- [10] 雷振锋, 李旭, 倪传坤, 等. 关于 T 接线路差动保护应用的特殊问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 57-60.  
LEI Zhenfeng, LI Xu, NI Chuankun, et al. Discussing some special problems about application of teed line differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 57-60.
- [11] 柳焕章, 李晓华. 新型数字线路电流差动保护原理及其应用[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 74-81.  
LIU Huanzhang, LI Xiaohua. A novel principle of digital current differential protection for transmission line and its application[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 74-81.
- [12] 高厚磊, 江世芳. T 接线线路电流纵差保护新判据研究[J]. 继电器, 2001, 29(9): 6-16.  
GAO Houlei, JIANG Shifang. Study on new criterion of current differential protection for Teed lines[J]. Relay, 2001, 29(9): 6-16.
- [13] 李斌, 罗涛, 薄志谦. 基于故障分量的 T 接线线路电流纵差保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 1-7.  
LI Bin, LUO Tao, BO Zhiqian. A novel differential protection criterion based on super-imposed fault component for T-type transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 1-7.
- [14] 罗涛. 基于故障分量的 T 接输电线路电流差动保护的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
LUO Tao. Research on differential protection based on super-imposed fault component for T-type transmission line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [15] 王海港, 董新洲, 薄志谦. 一种灵敏可靠的输电线路电流差动保护判据[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 90-94.  
WANG Haigang, DONG Xinzhou, BO Zhiqian. A sensitive and reliable operational criterion for current differential protection of transmission line[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 90-94.

收稿日期: 2014-09-24; 修回日期: 2015-01-23

作者简介:

王 婷(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护; E-mail: wt19890621@163.com

刘 渊(1988-), 男, 硕士, 从事电力系统继电保护相关工作; E-mail: 522848867@qq.com

李凤婷(1965-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 清华大学电机系高级访问学者, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护。E-mail: xjlft2009@sina.com

(编辑 魏小丽)