

DOI: 10.7667/PSPC171561

含光伏电站的并网系统线路故障测距研究

李召兄¹, 吴丽¹, 吴兴全¹, 李政², 曾燕婷², 卢继平²

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;
2. 重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 含有基于正序控制的光伏电站并网系统在发生单相短路故障时, 对光伏电站外部和内部故障两种情形分别进行研究, 提出了各自适应的故障测距算法。针对光伏电站外部故障, 仅利用光伏电站对端系统的电气量信息, 推导出了故障距离的解析表达式, 该方法不受对端系统阻抗变化的影响。对于光伏电站内部汇集线路故障, 利用双端系统的电气量信息, 推导出故障距离的解析表达式, 不存在伪根问题, 计算量小, 无需搜索和迭代, 鲁棒性强。MATLAB 仿真结果表明, 在光伏电站外部和内部故障两种情况下, 所提方法均能够有效定位故障点, 且不受过渡电阻的影响, 测距精度高。

关键词: 故障测距; 正序控制; 光伏电站; 汇集线路; 过渡电阻

Line fault location of the grid-connected system with photovoltaic plant

LI Zhaoxiong¹, WU Li¹, WU Xingquan¹, LI Zheng², ZENG Yanting², LU Jiping²

(1. China Energy Engineering Corporation Limited Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 730050, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the single-phase grounding short-circuit fault of photovoltaic grid-connected station based on positive-sequence control, this paper studies internal faults and external faults of photovoltaic plant respectively and proposes their adaptive fault location algorithms. For the external fault of the photovoltaic plant, this method only uses the electrical information of the opposite end system of the photovoltaic plant to get the analytical expression of the fault distance, which is not affected by the impedance change of the opposite end system. For the internal faults on the collector line of a photovoltaic plant, it uses the electrical information of the systems at both ends to obtain an analytical expression of the fault distance. The method has the advantage of no false roots and no need to search and iterate, and the calculation amount is small and the robustness is strong. The simulation results of MATLAB show that the proposed method can effectively locate the fault point in the two cases of external and internal faults of the PV power plant, is not affected by the transition resistance, and the ranging accuracy is high.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577018).

Key words: fault location; positive sequence control; photovoltaic plant; collector line; transition resistance

0 引言

输电线路精确的故障定位可以极大地缩短检修人员的巡线时间, 对电力系统的安全稳定和经济运

行具有十分重要的意义^[1-2]。因此, 故障测距算法成为国内外研究的热点。

现有的故障测距算法从原理上可以分为故障分析法、行波法^[3-4]和智能测距算法^[5-6], 从信息来源可分为单端量法^[7-9]和双端量法^[10-11]。行波法稳定性好、可靠性高, 但仍存在故障点反射波的识别和标定不准确的缺点。智能测距算法将智能算法应用于故障测距, 创新性高, 但测距原理有待完善, 还未得到推广应用。单端量法从原理上无法消除对端

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51577018); 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司科技项目资助(G-2015-11-18-01); 高等学校学科创新引智计划(“111”计划)资助项目(B08036)

系统阻抗变化和过渡电阻带来的影响。双端量测距算法虽然可以消除对端系统阻抗变化带来的影响, 但一般存在伪根问题^[12-13], 即使利用搜索法来避免伪根问题, 但是测距精度受到迭代步长和迭代次数等因素的影响, 较高的测距精度的代价是大量的计算, 存在测距精度和测距快速性此消彼长的矛盾^[14]。

目前针对含光伏电站并网系统的故障测距研究的文章还非常少, 文献^[15]将测点对应的节点负序电压方程与压缩感知理论结合, 提出了一种故障定位算法, 定位精度较高, 但在构成节点负序电压方程时对节点负序阻抗矩阵的精度要求较高, 在光伏汇集站容量较大时, 汇集系统节点众多, 实现精确测量阻抗矩阵的难度较大。

在电力系统短路中, 单相接地短路故障的几率最大, 占输电线路故障总数的80%左右。随着电力系统的发展, 风电场、光伏电站等新能源的并网容量不断增大。因此, 本文对含光伏电站的并网系统的单相短路接地故障测距方法进行研究。基于正序控制策略的光伏电站^[16], 在光伏电站外部发生故障时, 仅利用光伏电站对端系统的信息即可实现精确的故障测距, 并给出故障距离解析表达式, 故障距离不受过渡电阻的影响; 在光伏电站内部发生故障时, 利用两端的信息, 推导出站内故障的故障距离解析表达式, 有着计算量小、故障距离不受过渡电阻影响的优点。

1 基本原理

1.1 光伏电站外故障测距

含光伏电站的并网系统在光伏电站外发生单相接地故障的故障示意图如图 1 所示。

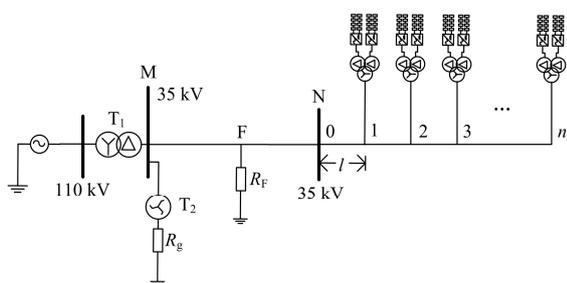


图 1 光伏电站外故障示意图

Fig. 1 Diagram of the external fault of the photovoltaic plant

图 1 中, 单相接地故障点为 F, 过渡电阻为 R_F , 35/110 kV 升压变压器 T_1 的低压侧母线经接地变 T_2 接地。假设线路 MN 的 A 相发生单相接地故障, 由对称分量法可知, A 相 M 侧母线电压可表示为

$$\dot{U}_{mA} = \dot{I}_{m1} Z_1 l_x + \dot{I}_{m2} Z_2 l_x + \dot{I}_{m0} Z_0 l_x + 3\dot{I}_0 R_F \quad (1)$$

式中: \dot{U}_{mA} 为 M 侧母线 A 相电压; \dot{I}_{mj} ($j=1, 2, 0$) 为 M 侧的序电流分量, 1、2、0 分别表示正序、负序和零序; Z_j ($j=1, 2, 0$) 为线路 MN 的单位距离序阻抗, 1、2、0 分别表示正序、负序和零序; \dot{I}_0 为流过过渡电阻的零序电流; l_x 为故障距离, 即 l_{mf} 。

由于光伏电站采用正序控制策略^[15], 则 N 侧母线流向过渡电阻的零序电流为零, 则有

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{m0} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$\dot{U}_{mA} = \sum_{j=0}^2 \dot{I}_{mj} Z_j l_x + 3\dot{I}_{m0} R_F \quad (3)$$

可令

$$\begin{cases} I_{mj} = a_j + jb_j (j=1, 2, 0) \\ Z_j = r_j + jx_j (j=1, 2, 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中, a_j 、 b_j 、 r_j 、 x_j 为常实数。

过渡电阻只考虑纯电阻情况, 则 R_F 为实数。取式(3)的实部和虚部分别相等, 可解出故障距离 l_x 的解析式

$$l_x = \frac{\text{Im}(\dot{U}_{mA})a_0 - \text{Re}(\dot{U}_{mA})b_0}{a_0 \sum_{j=0}^2 (a_j x_j + b_j r_j) - b_0 \sum_{j=0}^2 (a_j r_j - b_j x_j)} \quad (5)$$

式中: $\text{Re}(\dot{U}_{mA})$ 为 A 相电压 \dot{U}_{mA} 的实部; $\text{Im}(\dot{U}_{mA})$ 为 A 相电压 \dot{U}_{mA} 的虚部。

由式(5)可知, 故障距离 l_x 的解析表达式与过渡电阻 R_F 无关。

1.2 光伏电站内故障测距

含光伏电站的并网系统在光伏电站内汇集线路上发生单相接地故障的故障示意图如图 2 所示。

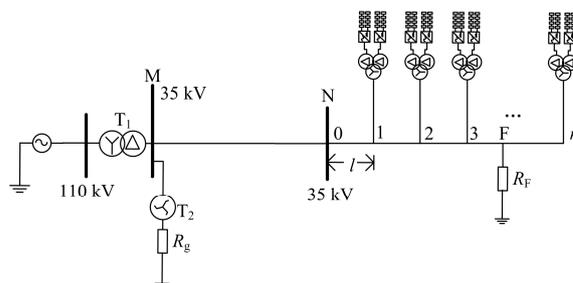


图 2 光伏电站内故障示意图

Fig. 2 Diagram of internal fault of the photovoltaic plant

如图 2 所示, 定义: “0-1”段为第 1 段, “1-2”段为第 2 段, 则 “ $k-(k+1)$ ”段为第 $(k+1)$ 段 ($k=1, \dots, n-1$)。假设光伏电站内部第 $(k+1)$ 段 A 相 F 点发生单相接地故障。由于光伏电站采用正序控制策略, 则光伏电站内各光伏发电单元输出的负序电流、零序

电流均为零, 则 A 相 M 侧母线电压可表示为

$$\begin{cases} \dot{U}_{m_A} = \dot{U}_1 + \dot{I}_{m_2} Z_2 l_x + \dot{I}_{m_0} Z_0 l_x + 3\dot{I}_{m_0} R_F \\ \dot{U}_1 = \dot{I}_{m_1} Z_1 (l_{mn} + l) + [(\dot{I}_{m_1} + \dot{I}_{TA1}) Z_1 l + \\ (\dot{I}_{m_1} + \dot{I}_{TA1} + \dot{I}_{TA2}) Z_1 l + (\dot{I}_{m_1} + \dot{I}_{TA1} + \\ \dot{I}_{TA2} + \dots + \dot{I}_{TA(k-1)}) Z_1 l + \dots + (\dot{I}_{m_1} + \dot{I}_{TA1} + \\ \dot{I}_{TA2} + \dots + \dot{I}_{TAk}) Z_1 (l_x - l_{mn} - kl)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: \dot{U}_{m_A} 为 M 侧母线 A 相电压; \dot{I}_{mj} ($j=1, 2, 0$) 为 M 侧的序电流分量, 1、2、0 分别表示正序、负序和零序; Z_j ($j=1, 2, 0$) 为线路 MN 的单位距离序阻抗, 1、2、0 分别表示正序、负序和零序; \dot{I}_0 为

$$l_x = \frac{\text{Im}(\dot{U})a_0 - \text{Re}(\dot{U})b_0}{a_0[\sum_{j=0}^2(a_j x_j + b_j r_j) + \sum_{i=1}^k(c_{i1} x_1 + d_{i1} r_1)] - b_0[\sum_{j=0}^2(a_j r_j - b_j x_j) + \sum_{i=1}^k(c_{i1} r_1 - d_{i1} x_1)]} \quad (8)$$

式中: $\text{Re}(\dot{U})$ 为电压 \dot{U} 的实部; $\text{Im}(\dot{U})$ 为电压 \dot{U} 的虚部。电压相量 \dot{U} 满足式(9)。

$$\begin{aligned} \dot{U} = \dot{U}_{m_A} + (I_{TA1} + I_{TA2} + \dots + I_{TAk}) Z_1 (l_{mn} + kl) - \\ [(k-1)I_{TA1} + (k-2)I_{TA2} + \dots + I_{TA(k-1)}] Z_1 l \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)可知, 故障距离 l_x 的解析表达式与过渡电阻 R_F 无关。

显然, 本节所提的故障测距算法未将“0-1”段包含在内, 若“0-1”段发生单相短路故障时, 故障测距方法同 1.1 节。

1.3 故障“段”判断

针对图 1、图 2 所示的系统, 在未确定准确故障距离时无法判断故障发生“段”, 本文将介绍基于所提故障测距算法的故障“段”判定方法。具体步骤如下:

1) 假设故障发生在“M-1”支路(“M-N”段和“0-1”段的总称), 利用式(5)计算故障距离 l_x , 若 $l_x \leq (l_{mn} + l)$, 则判定故障发生在“M-1”段, 否则转步骤 2)。

2) 利用式(8)分别计算 $k=1, k=2, \dots, k=n-1$ 时的故障距离 l_x , 若满足 $[l_{mn} + kl] < l_x \leq [l_{mn} + (k+1)l]$, 则故障发生在第“ $k-(k+1)$ ”段($k=1, \dots, n-1$)。

2 算例分析

对含 10 MW 光伏电站的并网系统进行仿真, 以验证本文测距方法的正确性和精确度。系统故障模型如图 3 所示。

表 1 列出了在光伏电站外各处以不同过渡电阻发生单相短路接地故障时的故障测距结果。由表 1 可

流过渡电阻的零序电流; l_x 为故障距离, 即 l_{mj} ; l 为各光伏发电单元之间的距离; \dot{I}_{TAk} 为第 k 个光伏逆变器输出的正序电流, 需要同步测量信息。

可令

$$\begin{cases} \dot{I}_{mj} = a_j + jb_j (j=1, 2, 0) \\ \dot{I}_{TAk} = c_{k1} + jd_{k1} (k=1, 2, \dots, n-1) \\ Z_j = r_j + jx_j (j=1, 2, 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a_j, b_j, r_j, x_j, c_k, d_k$ 为常实数。

取式(6)的实部和虚部分别相等, 可解出故障距离 l_x 的解析式如式(8)。

知, 本文方法能对光伏电站外部故障实现精确测距, 且测距精度不受过渡电阻的影响, 最大测距误差仅为 0.24%。

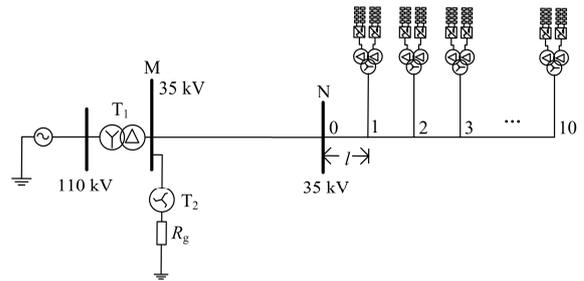


图 3 含光伏电站并网系统仿真模型
Fig. 3 Simulation model of the grid-connected system with photovoltaic plant

表 1 过渡电阻对光伏电站外故障测距的影响

Table 1 Influence of the transition resistance to the external fault location of the photovoltaic plant

过渡电阻/ Ω	测距结果/km				最大误差/%
	10	15	20	25	
100	10.03	15.02	20.05	24.96	0.20
50	10.02	14.99	20.04	25.01	0.16
10	10.04	15.06	20.03	25.03	0.24
0.1	10.03	15.04	20.02	25.01	0.16

表 2 列出了在光伏电站内各处发生单相短路接地故障时的故障测距结果, 过渡电阻为 100 Ω 。(联络线路 $l_{mn}=25$ km, 光伏汇集线每段长度 $l=0.3$ km) 0-1 段: 25.00~25.30 km; 1-2 段: 25.30~25.60 km; 2-3 段: 25.60~25.90 km; 3-4 段: 25.90~26.20 km; 4-5 段: 26.20~26.50 km; 5-6 段: 26.50~26.80 km;

6-7 段: 26.80~27.10 km; 7-8 段: 27.10~27.40 km;
8-9 段: 27.40~27.70 km; 9-10 段: 27.70~28.00 km)

表 2 光伏电站内各段发生故障时的测距结果

Table 2 Internal fault location results of each section of the photovoltaic plant

故障段	故障距离/km	测距结果/km	定位段	最大误差/%
0-1	25.10	25.10	0-1	0.00
	25.20	25.20	0-1	0.00
1-2	25.40	25.400 2	1-2	0.00
	25.50	25.500 1	1-2	0.00
2-3	25.70	25.692 2	2-3	0.03
	25.80	25.792 1	2-3	0.03
3-4	26.00	25.976 7	3-4	0.09
	26.10	26.076 6	3-4	0.09
4-5	26.30	26.254 3	4-5	0.17
	26.40	26.354 1	4-5	0.17
5-6	26.60	26.525 4	5-6	0.28
	26.70	26.625 2	5-6	0.28
6-7	26.90	26.790 5	5-6	0.41
	27.00	26.890 2	6-7	0.41
7-8	27.20	27.049 9	6-7	0.55
	27.30	26.149 6	7-8	0.55
8-9	27.50	27.304 1	7-8	0.71
	27.60	27.403 7	8-9	0.71
9-10	27.80	27.553 3	8-9	0.89
	27.90	27.652 9	8-9	0.89

表 2 结果表明, 本文方法对于光伏电站内汇集线上任意“段”发生单相短路接地故障, 整体测距精度很高, 可以较为精确定位到大部分区段, 在汇集线路末端区段, 故障测距误差增大, 可能定位到相邻区段, 考虑到站内实际接线距离基本为 300 m 以内, 这样的误差并不会给故障清除带来大的影响。

表 3 列出了本文方法在光伏电站内部汇集线路某区段上发生单相短路接地故障时, 不同过渡电阻下的测距结果。

表 3 过渡电阻对光伏电站内故障测距的影响
($l_{mn}=25$ km, $l=0.3$ km)

Table 3 Influence of the transition resistance to the internal fault location of the photovoltaic plant ($l_{mn}=25$ km, $l=0.3$ km)

过渡电阻/ Ω	测距结果/km(区段)				
	25.50 (1-2)	26.10 (3-4)	26.60 (5-6)	27.20 (7-8)	27.80 (9-10)
100	25.500 1 (1-2)	26.076 6 (3-4)	26.525 4 (5-6)	27.049 9 (6-7)	27.553 3 (8-9)
50	25.500 1 (1-2)	26.082 7 (3-4)	26.544 0 (5-6)	27.085 6 (6-7)	27.609 2 (8-9)
10	25.500 1 (1-2)	26.086 5 (3-4)	26.555 8 (5-6)	27.108 5 (7-8)	27.645 6 (8-9)
0.1	25.500 1 (1-2)	26.087 1 (3-4)	26.557 5 (5-6)	27.111 7 (7-8)	27.650 7 (8-9)

由表 3 可以看出, 在光伏电站内部汇集线路上发生故障时, 在不同过渡电阻条件下, 本文所提测距算法的测距效果基本不受过渡电阻的影响, 测距结果的微小误差是由不同过渡电阻时的暂态过程不同引起的。

3 结论

本文结合实际光伏电站内光伏逆变器的控制策略, 利用光伏发电单元只输出正序电流的特点, 提出了一种含光伏电站的并网系统故障测距方法, 具有以下几个特点:

1) 在光伏电站内部汇集线路和外部联络线路发生单相接地故障时, 均得出了故障距离的解析表达式, 无需迭代搜索, 计算量小。

2) 测距结果不受过渡电阻的影响, 测距精度高。

3) 含光伏电站的并网系统为双端电源系统, 在光伏电站外故障时, 仅依靠光伏电站对端系统的测量信息就可实现精确的故障测距。

综上所述, 本文所提方法不受光伏系统故障电流的影响, 且计算量小、测距精度高、可用于在线实时计算, 具有较高的工程实用价值。

参考文献

- [1] 邹浩, 于仲安, 吴彪, 等. 同塔四回输电线路双端故障测距实用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 111-116.
ZOU Hao, YU Zhongan, WU Biao, et al. A new method of fault location with two-terminal data for four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 111-116.
- [2] 姚旭, 程蓉, 崔力心, 等. 面向智能变电站的输电线路综合故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 40-45.
YAO Xu, CHENG Rong, CUI Lixin, et al. Study of comprehensive transmission line fault location method for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 40-45.
- [3] 徐伟宗, 唐昆明. 基于导数法的故障行波波头识别改进法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 198-202.
XU Weizong, TANG Kunming. An improving derivation algorithm to recognize wave heads of fault generated traveling waves[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 198-202.
- [4] 潘超, 王泽忠, 郑庆. 输电线路故障暂态行波的复域分析法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 26-29.
PAN Chao, WANG Zezhong, ZHENG Qing. Analysis on transient traveling wave in complex domain for

- transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 26-29.
- [5] 束洪春, 邬乾晋, 张广斌, 等. 神经网络的单端行波故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 85-92. SHU Hongchun, WU Qianjin, ZHANG Guangbin, et al. Single terminal traveling wave fault location method based on ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 85-92.
- [6] 鲁文, 徐晨亮, 丁孝华, 等. 一种考虑分布电容的模糊故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 57-60. LU Wen, XU Chenliang, DING Xiaohua, et al. Fuzzy algorithm for fault location with the distributed capacitor taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 57-60.
- [7] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 9-14. SUONAN Jiale, WANG Zengchao, KANG Xiaoning, et al. One-terminal fault location based on parameter identification of linear differential equation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14.
- [8] 许飞, 董新洲, 王宾, 等. 新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 37-42. XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. A novel fault location algorithm of single terminal electric quantity combination for transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 37-42.
- [9] 徐高, 龚庆武, 李勋, 等. 基于原子分解和行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 133-138. XU Gao, GONG Qingwu, LI Xun, et al. Single-terminal fault location based on atomic decomposition and natural frequency of traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 133-138.
- [10] 王海港, 谢民, 孙月琴, 等. 输电线路双端故障测距时域算法实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 142-147. WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 142-147.
- [11] 宋振红, 张举, 唐杰. 一种基于双端电压相量测量的故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 27-29. SONG Zhenhong, ZHANG Ju, TANG Jie. A new method of fault location based on two-terminal voltage phases measurements[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 27-29.
- [12] 辛振涛, 尚德基, 尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器, 2005, 33(6): 36-38. XIN Zhentao, SHANG Deji, YIN Xianggen. False root and its modification for two terminal fault location[J]. Relay, 2005, 33(6): 36-38.
- [13] 姜宪国, 李博通, 张云柯, 等. 基于电压序量变化量的超高压混合线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3578-3583. JIANG Xianguo, LI Botong, ZHANG Yunke, et al. A fault location method for extra-high voltage mixed lines based on variation of sequence voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3578-3583.
- [14] 全玉生, 王晓蓉, 杨敏中, 等. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和新算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 28-32. QUAN Yusheng, WANG Xiaorong, YANG Minzhong, et al. Two new algorithms and their robustness for two-terminal fault location on HV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 28-32.
- [15] 贾科, 顾晨杰, 毕天姝, 等. 基于压缩感知技术的大型光伏电站汇集系统故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3480-3489. JIA Ke, GU Chenjie, BI Tianshu, et al. Research on the compressive sensing based fault location within the collection system of a large-scale photovoltaic power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3480-3489.
- [16] 习伟, 张哲, 陈卫, 等. 光伏逆变器短路特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 70-75. XI Wei, ZHANG Zhe, CHEN Wei, et al. Research on fault characteristic of the PV inverter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 70-75.

收稿日期: 2017-10-23; 修回日期: 2017-12-18

作者简介:

李召兄(1984—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统一次规划设计及电网运行分析; E-mail: 3590005@qq.com

吴丽(1984—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置研究。E-mail: 70413@163.com

(编辑 张爱琴)