

DOI: 10.7667/PSPC161477

含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护

张润坤, 王宝华

(南京理工大学, 江苏 南京 210000)

摘要: 在配电网发生故障的情况下, 具有低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力的光伏电源(PV)的输出电流与 PV 容量、故障类型以及故障位置等因素密切相关, 这给配电网电流保护的整定带来了很大困难。分析了 PV 的低电压穿越运行特性及控制策略, 给出了含 PV 配电网的故障分析方法。并结合含 PV 配电网故障时短路电流的特点, 分析了现有配电网自适应电流速断保护存在的问题, 针对 PV 只输出正序电流这一特点, 提出了一种适用于多个 PV 接入的配电网自适应正序电流速断保护。利用 PSCAD 建立了一个 10 kV 配电系统模型, 仿真验证了该保护的正确性。

关键词: 光伏电源; 低电压穿越; 配电网; 故障特性; 自适应电流保护; 整定

An adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV

ZHANG Runkun, WANG Baohua

(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210000, China)

Abstract: In the case of distribution network failure, the output current of photovoltaic power plants which have capability of low voltage ride-through (LVRT) is closely related to the PV capacity, fault type and fault location. It brings great difficulties to the current protection of distribution network. The characteristics and control strategies of low voltage ride-through of PV are analyzed. A fault analysis method of distribution network with PV is proposed. Based on the failure characteristics of distribution network with PV, the problem of adaptive current instantaneous trip protection in distribution network is analyzed. Because PV only output positive sequence current, an adaptive positive-sequence current instantaneous trip protection for distribution network with PV is put forward. A 10 kV model of distribution network is established by using PSCAD, verifying the correctness of the protection.

Key words: photovoltaic; LVRT; distribution network; failure characteristics; adaptive current protection; setting

0 引言

太阳能是一种清洁的可再生能源, 近年来, 我国光伏发电技术得到了快速的发展和广泛的应用。然而, 随着接入配电网的 PV 容量越来越大, 光伏发电对配电网继电保护的影响变得不容忽视^[1-3]。自适应电流保护是基于本地信息的保护方案, 与基于通信的保护相比, 基于本地信息的保护不会受到通信可靠性的影响^[4-5]。因此, 有必要研究适用于含 PV 配电网的自适应电流保护。文献[6]研究了含逆变型分布式电源配电网的自适应电流速断保护, 对原有的自适应电流速断保护整定表达式中的等值阻抗和等值电势进行了重新定义, 使保护性能得到了改善, 但没有考虑光伏电源等逆变型分布式电源的低电压穿越特性; 文献[7]在此基础上考虑了光伏发电系统

等逆变型分布式电源接入配电网时具有的低电压穿越特性, 进一步优化了含 IIDG 的配电网自适应电流速断保护, 但只是分析了单 DG 接入的情况。

本文结合含光伏发电系统的低电压穿越特性, 分析了含多个 PV 的配电网故障特性, 对含 PV 配电网的自适应电流保护进行了改进。

1 光伏并网系统的低电压穿越控制策略

根据《光伏电站接入电网技术规范》^[8], 光伏并网系统需具备 LVRT 能力, 即当光伏电站并网点的电压因故障或扰动而发生跌落时, 为了避免光伏系统脱网引起电网运行情况的进一步恶化, PV 需保证不脱网连续运行。

文献[9]通过对光伏并网逆变器进行电压定向矢量控制, 实现了有功和无功的解耦, 从而提出了

基于电压定向矢量控制的 LVRT 控制策略。文献[10-12]提出了光伏并网系统在电网对称故障和不对称故障时实现低电压穿越的控制策略。

为了满足并网规程提出的无功支撑要求,当配电网发生故障导致光伏电源并网点电压下降时,光伏电源必须增加其无功电流输出以支撑电网电压。光伏并网逆变器通常采用双闭环控制策略,即功率—电压外环和电流内环的逆变器控制策略,当并网点的正序电压 U_s 跌落到 90% 以下时,改变光伏逆变器的控制策略,断开电压外环,直接在电流内环给定有功、无功电流参考值 I_d^* 和 I_q^* ,其中无功电流参考值 I_q^* 应满足^[13]

$$I_q^* = \begin{cases} 0 & U_s > 0.9 \\ K_1(0.9 - U_s)I_N & 0.2 < U_s < 0.9 \\ K_2I_N & U_s < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_s 为并网点电压的标幺值; I_N 为光伏发电系统的额定电流; K_1 和 K_2 为比例系数,取值需满足 $K_1 \geq 1.5$, $K_2 \geq 1.05$, K_1 通常取 2, K_2 通常取 1.2。

在电压跌落时,光伏逆变器交流侧的电流不能超过额定电流的 1.2 倍,因此可得到 $I_d^2 + I_q^2 \leq (1.2I_N)^2$ 。为了使光伏电源在不过流的情况下继续向电网提供一定有功功率,有功电流参考值 I_d^* 取 I_{d0}^* 和 $\sqrt{1.2^2 - (I_q^*)^2}$ 之间的较小值。其中 I_{d0}^* 为故障前光伏逆变器电流内环中有功电流的参考值。

2 含 PV 配电网的故障特性分析

2.1 PV 的短路计算模型

由于 PV 通常采用基于电压正序分量的控制策略^[14-15],在配电网发生故障时,PV 交流侧输出的电流中只存在正序电流分量。由式(1)可知,光伏电源输出的无功电流随着并网点电压的变化而变化。因此,在分析含 PV 配电网的故障特性时,可以将 PV 等效为受控正序电流源。

在正常情况下,光伏并网系统以额定功率运行,即有功电流输出 $I_d = I_N$,无功电流参考值为 0。在电压跌落时,交流侧电流不超过额定电流的 1.2 倍,即 $I_d^2 + I_q^2 \leq (1.2I_N)^2$ 。当 $I_d = I_N$ 时,允许输出的最大无功电流为

$$I_q = \sqrt{(1.2I_N)^2 - I_N^2} = 0.66I_N \quad (2)$$

由式(1)可知,当并网点电压跌落在 $0.9U_N$ 以上时,光伏电源仅输出有功电流,额定运行时有功电流输出 $I_d = I_N$;当并网点电压跌落在 $0.2U_N$ 以下时,光伏电源只输出无功电流,即 $I_d = 0$;当并网点电

压跌落在 $0.2U_N$ 以上 $0.9U_N$ 以下时,光伏电源既有有功电流输出也有无功电流输出。

由式(2)可知,若保证有功电流 I_d 不降低,则无功电流最大为 $0.66I_N$,由式(1)可得,此时并网点的电压跌落深度为

$$\Delta U = \frac{0.66I_N}{K_1I_N} = 0.33U_N \quad (3)$$

此时并网点电压为 $0.57U_N$,即当并网点电压跌落到 $0.57U_N$ 以下时,光伏电源输出的有功电流 I_d 必须降低。因此,当并网点电压跌落在 $0.2U_N$ 以上且 $0.57U_N$ 以下时,减小有功电流输出以满足并网电流幅值要求,由于交流侧电流不超过额定电流的 1.2 倍,可令有功电流为

$$I_d = \sqrt{(1.2I_N)^2 - I_q^2} \quad (4)$$

故障前 PV 额定运行时,由式(1)、式(3)和式(4)可得出故障时 PV 输出的有功电流和无功电流应满足:

- 1) $U_1 > 0.9U_N$ 时, $I_d = I_N$, $I_q = 0$;
- 2) $0.57U_N < U_1 \leq 0.9U_N$ 时, $I_d = I_N$, $I_q = 2\left(0.9 - \frac{U_1}{U_N}\right)I_N$;
- 3) $0.2U_N \leq U_1 \leq 0.57U_N$ 时, $I_d = \sqrt{(1.2I_N)^2 - I_q^2}$, $I_q = 2\left(0.9 - \frac{U_1}{U_N}\right)I_N$;
- 4) $U_1 < 0.2U_N$ 时, $I_d = 0$, $I_q = 1.2I_N$ 。

由此可得出故障时 PV 输出的正序电流 I_1 与并网点正序电压 U_1 之间的关系,即 PV 的等效短路计算模型可表示为

- 1) $U_1 > 0.9U_N$ 时, $I_1 = I_N$, $\varphi_w = 0$;
- 2) $0.57U_N < U_1 \leq 0.9U_N$ 时,

$$I_1 = \sqrt{4\left(0.9 - \frac{U_1}{U_N}\right)^2 I_N^2 + I_N^2},$$

$$\varphi_w = \arctan \left[2\left(0.9 - \frac{U_1}{U_N}\right) / 1 \right];$$

- 3) $0.2U_N \leq U_1 \leq 0.57U_N$ 时, $I_1 = 1.2I_N$,

$$\varphi_w = \arctan \left[2\left(0.9 - \frac{U_1}{U_N}\right) / \sqrt{1.2^2 - 4\left(0.9 - \frac{U_1}{U_N}\right)^2} \right];$$

- 4) $U_1 < 0.2U_N$ 时, $I_1 = 1.2I_N$, $\varphi_w = 90^\circ$ 。

其中, φ_w 为 U_1 与 I_1 之间的相角差。

2.2 适用于 PV 接入的电网短路电流计算方法

由 2.1 节得到的 PV 等效短路计算模型可知, PV 在电网故障时可以等效为压控电流源, 对于含多个 PV 的配电网, 可列出其故障节点方程为

$$\mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_{S-f} \\ \dot{U}_{PV1-f} \\ \dot{U}_{PV2-f} \\ \vdots \\ \dot{U}_{PVn-f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{S-f} \\ \dot{I}_{PV1-f} \\ \dot{I}_{PV2-f} \\ \vdots \\ \dot{I}_{PVn-f} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{Y} 为系统节点导纳矩阵; \dot{U}_{S-f} 和 \dot{U}_{PVi-f} 分别为系统母线处和第 $i(1 \leq i \leq n)$ 个 PV 接入点处的故障电压; \dot{I}_{S-f} 和 \dot{I}_{PVi-f} 分别为系统和 PV 提供的故障电流。

该方程组无法通过线性变换而直接求解, 可采用迭代修正的求解方法, 迭代方程为

$$\mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_{S-f}^{(k)} \\ \dot{U}_{PV1-f}^{(k)} \\ \dot{U}_{PV2-f}^{(k)} \\ \vdots \\ \dot{U}_{PVn-f}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{S-f} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_{PV1-f}^{(k-1)} \\ \dot{I}_{PV2-f}^{(k-1)} \\ \vdots \\ \dot{I}_{PVn-f}^{(k-1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.1 节得到的 PV 故障电流计算模型既为修正方程。收敛判据为

$$\max |\dot{U}_{i-f}^{(k)} - \dot{U}_{i-f}^{(k+1)}| < \varepsilon \quad (7)$$

将 PV 额定电流 \dot{I}_{PVn0} 作为故障电流的迭代初值 $\dot{I}_{PVn-f}^{(0)}$, 则迭代修正过程如图 1 所示。

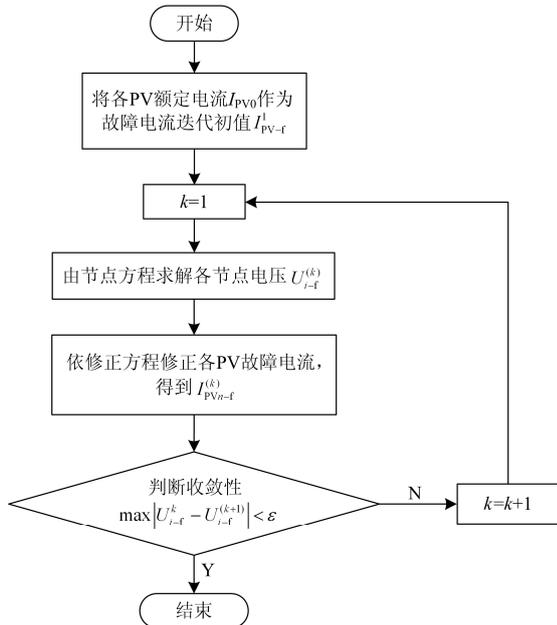


图 1 迭代修正流程图

Fig. 1 Flow chart of iterative correction

3 含 PV 配电网的自适应正序电流速断保护

3.1 已有自适应电流保护存在的问题

已有的自适应电流速断保护的基本思想是: 根据系统当前的运行状态和故障类型对保护定值进行实时在线整定, 其电流整定值 I_{ZDZ} 需躲过被保护线路末端发生短路时的短路电流。

$$I_{ZDZ} = \left| \frac{K_k K_d \dot{E}_s}{Z_s + Z_L} \right| \quad (8)$$

式中: \dot{E}_s 为系统等值相电势; Z_s 为系统等值阻抗; Z_L 为被保护线路阻抗; K_d 为故障类型系数; K_k 为可靠系数。

现有的自适应电流速断保护整定方法没有考虑 PV 接入的情况, 对于含有 PV 的配电网, 这种整定方法可能遇到一些问题。

以图 2 所示的含双 PV 的配电系统为例。PV 的接入会导致潮流方向的不确定性, 为了实现保护的选择性, PV 上游的每一条线路两端都应装设一个带方向元件的保护装置。如图 2 所示, 在 PV 的上游线路 AB、BC 两端均需加装断路器, 并配置方向元件。而在 PV 下游的线路只需装设一个保护装置以节省投资。

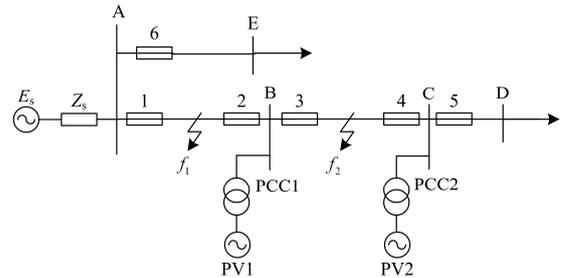


图 2 含 PV 的配电网

Fig. 2 A distribution network with PV

当保护背侧接有 PV 时, 在计算等值阻抗时会受到 PV 输出故障电流的影响, 导致实际的保护背侧阻抗无法正确地计算, 保护背侧的等值电势也同样无法根据已知的故障点信息求出。

当系统发生相间短路故障时, 式(8)中的故障类型系数 K_d 取 $\sqrt{3}/2$, 然而对于含 PV 的配电网, 两相短路故障的短路电流并不是同一位置发生三相短路时流过保护的短路电流的 $\sqrt{3}/2$ 倍。文献[14]以一个简单电网结构为例对含光伏电源的配电网故障电流特性进行了分析, 通过其分析结果可看出, 对于含 PV 的配电网两相短路与三相短路的故障电流不满足 $\sqrt{3}/2$ 倍的关系。因此式(8)中的故障系数不再适用, 若仍取原有的故障系数对保护进行整定, 则保护可能会误动或者拒动。

表 1 BC 两相短路时保护 3 的仿真结果
Table 1 Simulation results of protection 3 for BC two-phase short-circuit

| P_N / MW | α | $I_{3\text{DZ}} / \text{A}$ | $I_3^{(1)} / \text{A}$ | |
|-------------------|----------|-----------------------------|------------------------|------|
| | | | 计算值 | 仿真值 |
| 1 | 0.2 | 1073 | 2246 | 2258 |
| | 0.5 | 1203 | 1719 | 1721 |
| | 0.8 | 1306 | 1399 | 1398 |
| 5 | 0.2 | 1096 | 2245 | 2249 |
| | 0.5 | 1279 | 1703 | 1712 |
| | 0.8 | 1388 | 1401 | 1395 |
| 10 | 0.2 | 1116 | 2201 | 2200 |
| | 0.5 | 1345 | 1673 | 1662 |
| | 0.8 | 1425 | 1355 | 1337 |

表 2 BC 两相短路时保护 4 的仿真结果
Table 2 Simulation results of protection 4 for BC two-phase short-circuit

| P_N / MW | α | $I_{4\text{DZ}} / \text{A}$ | $I_4^{(1)} / \text{A}$ | |
|-------------------|----------|-----------------------------|------------------------|-----|
| | | | 计算值 | 仿真值 |
| 1 | 0.2 | 123 | 103 | 99 |
| | 0.5 | 97 | 100 | 98 |
| | 0.8 | 87 | 101 | 99 |
| 5 | 0.2 | 342 | 349 | 351 |
| | 0.5 | 328 | 356 | 355 |
| | 0.8 | 302 | 353 | 359 |
| 10 | 0.2 | 702 | 721 | 716 |
| | 0.5 | 667 | 726 | 725 |
| | 0.8 | 550 | 733 | 734 |

以 PV 容量 10 MW 为例, 计算保护 3 的传统电流速断保护定值。当 BC 末端发生三相短路故障时, 流过保护 3 的电流为 936 A, 保护 3 的电流速断保护定值为 $I_{3\text{DZ}} = K_k I_d = 1.2 \times 936 = 1123.2 \text{ A}$ 。在 $\alpha=0.2$ 处发生 BC 相间短路故障时, 流过故障相的电流 $I_B = 772 \text{ A}$, $I_C = 668 \text{ A}$, 保护 3 不会动作, 该保护的灵敏度无法满足要求。对于保护 4, 若按原有的自适应电流速断保护原则整定, 在线路末端发生两相短路故障时, 保护 4 的定值将超出了流过保护 4 的故障电流, 即保护范围超出线路全长, 该保护失去选择性。综上可知, 本文提出的自适应正序电流速断保护在两相短路的情况下可较好的改善保护性能。

2) 当 f_2 点处发生三相短路故障时, 改变 PV 的容量和比例系数 α , 所得的仿真结果如表 3、表 4 所示。

由表 3、表 4 可知, 三相短路故障时, 保护 3 和保护 4 均能够正确地动作, 保护范围恒为 83.3%, 不受其他因素的影响。与系统发生两相相间短路故

障时一样, 保护 3 和保护 4 的正序电流整定值均能够根据 PV 容量和故障位置的变化而自适应改变其定值。保护范围内发生故障时, 各个保护均能有选择性地切除故障。

表 3 三相短路时保护 3 的仿真结果
Table 3 Simulation results of protection 3 for three-phase short-circuit

| P_N / MW | α | $I_{3\text{DZ}} / \text{A}$ | $I_3^{(1)} / \text{A}$ | |
|-------------------|----------|-----------------------------|------------------------|------|
| | | | 计算值 | 仿真值 |
| 1 | 0.8 | 2496 | 2599 | 2590 |
| | 0.9 | 2635 | 2532 | 2431 |
| 5 | 0.8 | 2488 | 2599 | 2581 |
| | 0.9 | 2638 | 2435 | 2434 |
| 10 | 0.8 | 2495 | 2593 | 2589 |
| | 0.9 | 2664 | 2455 | 2457 |

表 4 三相短路时保护 4 的仿真结果
Table 4 Simulation results of protection 4 for three-phase short-circuit

| P_N / MW | α | $I_{4\text{DZ}} / \text{A}$ | $I_4^{(1)} / \text{A}$ | |
|-------------------|----------|-----------------------------|------------------------|------|
| | | | 计算值 | 仿真值 |
| 1 | 0.1 | 96 | 91 | 93 |
| | 0.2 | 85 | 89 | 93 |
| 5 | 0.1 | 449 | 433 | 435 |
| | 0.2 | 400 | 440 | 437 |
| 10 | 0.1 | 1062 | 1016 | 1001 |
| | 0.2 | 843 | 894 | 896 |

综上可知, 在两相短路和三相短路故障情况下, 本文提出的自适应正序电流速断保护与原有的电流速断保护相比有较好的性能。

5 结论

越来越多的 PV 接入配电网, 使得含 PV 配电网的故障特性和传统配电网有很大的不同, 给配电网电流保护的整定带来了困难。已有的自适应电流速断保护不能适应 PV 接入配电网后的故障特性, 为保证保护的选择性和灵敏性, 本文分析了不同位置处发生不同类型故障时, 保护安装处的正序电压和流过保护的电流之间的关系, 并研究了适用于含 PV 配电网的自适应正序电流保护。仿真验证结果表明, 不管在两相短路还是三相短路情况下该保护均能正确动作, 并能较好地改善保护的性能。

参考文献

- [1] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research

- on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [2] 王秀莲, 胡广, 毕大强. 光伏低电压穿越期间无功补偿对差动保护灵敏度的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 51-56.
WANG Xiulian, HU Guang, BI Daqiang, et al. Impact analysis of reactive power compensation on sensitivity of differential protection during the low voltage ride-through of photovoltaic systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 51-56.
- [2] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.
- [3] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备 LVRT 能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 61-67.
LI Yuqiang, WANG Zhiwen, WANG Weiqing, et al. Influence of PV with LVRT capability access to distribution network on automatic reclosing and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 61-67.
- [4] 李乃永, 梁军, 赵义术, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.
LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu, et al. Protection schemes for distribution network considering the randomness of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 33-38.
- [5] 孔凡坊, 吴军基, 叶学勇, 等. 自适应电流保护方案的仿真研究[J]. 继电器, 2008, 36(4): 10-14.
KONG Fanfang, WU Junji, YE Xueyong, et al. Research of auto-adaptive current protection simulation[J]. Relay, 2008, 36(4): 10-14.
- [6] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
SUN Jingdiao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.
- [7] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 107-112.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 107-112.
- [8] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规范: Q/GDW617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [9] 张明光, 陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [10] 韩贤岁, 刘其辉. 对称和不对称故障下的并网光伏逆变器低电压穿越研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 113-118.
HAN Xiansui, LIU Qihui. Low voltage ride through under balance fault and unbalance fault for grid-connected PV inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(9): 113-118.
- [11] 肖伸平, 曾钰, 赵培哲. 改进干扰观测法在光伏发电系统 MPPT 中的应用[J]. 新型工业化, 2014, 4(4): 45-50, 57.
XIAO Shenping, ZENG Yu, ZHAO Peizhe. An improved perturbation and observation method for photovoltaic power generation system[J]. The Journal of New Industrialization, 2014, 4(4): 45-50, 57.
- [12] 王京保, 曾国宏, 荆龙. 电压不对称故障下光伏逆变器低电压穿越技术[J]. 电气传动, 2013, 43(12): 24-27.
WANG Jingbao, ZENG Guohong, JING Long. Low voltage ride through technology of photovoltaic inverter under voltage asymmetric fault[J]. Electric Drive, 2013, 43(12): 24-27.
- [13] 光伏发电接入电力系统技术规范: GB/T19964—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [14] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74, 13.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- [15] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.

收稿日期: 2016-09-08; 修回日期: 2017-03-08

作者简介:

张润坤(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 653480922@qq.com

(编辑 姜新丽)