

DOI: 10.7667/PSPC150369

基于模型识别光伏接入配电网线路纵联保护研究

李育强¹, 宋国兵², 王维庆¹, 晁勤¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 光伏因受外界环境因素影响, 输出功率存在间歇性和波动性。分布式光伏系统接入配电网会导致部分线路电流保护误动、拒动和灵敏度下降问题。在分析分布式光伏接入配电网故障特征的基础上, 基于参数辨识理论对模型识别纵联保护原理进行改进与优化, 提出光伏接入配电网线路保护判据。改进后的模型识别纵联保护方法将线路区外、区内故障均等效为不同的电感电路模型, 根据线路故障时内、外部模型误差大小来区分区内、区外故障。通过 PSACD/EMTDC 仿真验证, 该方法有效克服了光伏接入配电网分支电流的影响并且能够快速、准确地动作, 从而验证了将模型识别纵联保护原理应用在光伏接入配电网线路保护的正确性和有效性。

关键词: 模型识别; 纵联保护; 光伏系统; 配电网; 故障特征

Photovoltaic access to distribution network line pilot protection based on model identification

LI Yuqiang¹, SONG Guobing², WANG Weiqing¹, CHAO Qin¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Photovoltaic power generation is intermittent and fluctuating due to external environmental factors. It will cause the current part of the line protection malfunction and failure to trip and sensitivity decrease when distributed PV system connected to distribution network. Model identification pilot protection principle is improved and optimized based on fault feature of analyzing distributed PV connected to distribution network. Thus the PV connected to the distribution network protection criterion is proposed. In the improved model identification pilot protection method, both the external zone fault and internal zone fault are equivalent to different inductor circuit models; and internal and external faults can be distinguished based on the error values of internal and external model when line is fault. PSACD/EMTDC simulation verifies that the method effectively overcomes the influence of branch current of photovoltaic accessing to distribution network, and can quickly cut off the fault, which validates the correctness and effectiveness of the model identification pilot protection principle used in photovoltaic grid connected.

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

Key words: model identification; pilot protection; photovoltaic system; distribution network; fault feature

0 引言

太阳能是取之不尽用之不竭的可再生能源之一。分布式光伏系统接入配电网(以下简称配网)采取就近接入、本地消纳的原则。光伏系统接入配网后, 配网网架结构由单端供电网络变成双端供电网络, 系统潮流在局部出现双向流动, 在分支电流的影响下, 配网原有部分保护会出现误动甚至拒动的问题, 对配网保护装置的可靠性和灵敏性造成影响。

文献[1]详细分析了含多接入点分布式光伏发电的配电网的谐波传输和放大特性、电压波动和闪变的影响和评估进行了仿真分析。文献[2-5]研究了分布式光伏发电接入配网后的保护方案, 论述了在各种故障下光伏系统对配网短路电流产生助增或削减作用的理论分析方法。文献[6-11]分析了光伏系统由于接入位置、容量和故障点位置的不同对配网线路主保护产生的影响。上述关于光伏接入配网保护方法的研究均取得了阶段性的研究成果, 为今后更加深入研究打下了坚实的基础。但是, 上述文献并未解决由于光伏系统输出功率的波动性和间歇性导

基金项目: 国家自然科学基金项目(51367017, 51267019)

致配网保护装置可靠性和灵敏度下降问题。同时, 光伏系统昼发夜停, 这一点有别于常规电源, 导致配网电流保护动作值难以整定。因此, 研究适用于光伏系统接入配网的保护原理显得尤为重要。模型识别是在网架结构已知的前提下, 利用参数辨识思想识别故障类型的保护方法。利用模型识别纵联保护原理, 将双端电源间线路区内、区外故障均等效为不同的电感电路模型, 通过构建模型误差保护判据, 进行故障切除。通过在 PSCAD/EMTDC 建立仿真模型并进行仿真验证, 该方法能够很好地解决由于光伏系统的接入导致配网保护不能正确动作于故障的问题, 具有良好的适应性。

1 光伏系统接入配网故障特征分析

目前我国配网网架结构以辐射型为主, 潮流单向流动, 线路传输距离较短, 通常配置三段式或两段式电流保护。光伏系统接入配网后, 配网的网络拓扑结构发生变化, 图 1 所示为光伏接入配网网络拓扑图。

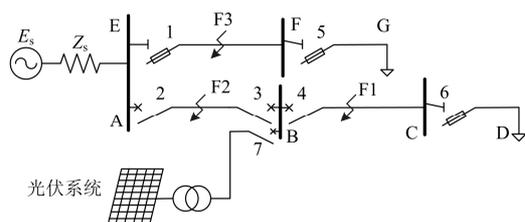


图 1 光伏接入配网拓扑图

Fig. 1 Photovoltaic access to distribution network topology

图 1 中原配网为单电源辐射型网络, 配网电压等级为 10 kV, 在光伏电源接入之前, 该配网为单电源供电模式, 共有四条母线, 分支线路 EG 段配备电流速断和限时电流速断保护, 配备跌落式熔断器与保护相配合。光伏系统经过保护 7 并入配网后, 在光伏系统接入母线上游出口处和接入母线下游出口处, 分别安装保护 3 和保护 4 并与断路器相配合, 保护 3 仅安装电流速断保护同时加装功率方向元件, 保护 2 安装断路器与电流速断保护和限时电流速断保护相配合, 保护 6 安装跌落式熔断器与定时限过电流保护配合。

1.1 线路区内故障特征

为分析光伏接入配网典型故障特征, 分别设置 F1~F3 处发生典型短路故障, 来分析光伏接入配网后的故障特征。

设置线路 AB 段距离 B 母线 F2 点分别发生相间(BC 相)短路和三相短路故障, 对比光伏系统接入前后流过保护 2 的故障电流波形如图 2 所示。

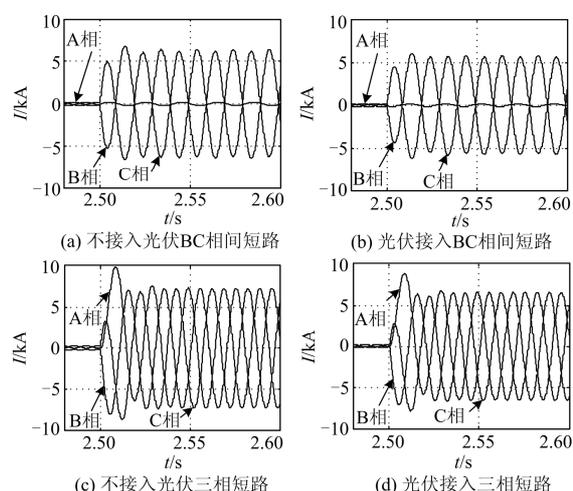


图 2 F2 处短路保护 2 处测得短路电流

Fig. 2 Protection of the 2 measured short-circuit current short circuit in F2

当发生相间(BC 相)相间短路故障时, 故障相电压跌落明显, 非故障相电压基本保持不变, 故障相电流增大为正常电流的 15 倍, 故障电流有衰减趋势, 且相位相反, 从图 2(a)和图 2(b)波形可知, 由于光伏系统的接入, 光伏提供了一部分短路电流, 保护 2 处测得的短路电流下降明显。当发生三相短路, 短路电流波形如图 2(c)和图 2(d)所示, 三相电压降低, 三相电流增大, 短路电流值为故障前 20 倍左右, 且过冲明显约两个周波后趋于稳定, 对比光伏系统接入前后短路电流值可知, 光伏接入后保护 2 测得的短路电流降低。

设置在 AB 线路 50%处发生 BC 相接地短路, 规定电流由母线流向线路为正, 通过改变光伏输出功率大小, 测得的保护 2~保护 3 安装处 B 相短路电流和流过保护 4 的电流如表 1 所示。

表 1 AB 线路 50%处发生 BC 相接地故障

Table 1 BC phase ground fault occurred in 50% of AB line

光伏输出功率/MW	保护 2 电流/kA	保护 3 电流/kA	保护 4 电流/kA
0	6.958	-0.035	0.035
1	6.947	0.05	0.037
2	6.91	0.145	0.039
4	6.851	0.35	0.037
6	6.843	0.413	0.036
8	6.842	0.412	0.037
10	6.791	0.414	0.038
12	6.685	0.413	0.037

从表 1 中 B 相电流值可得, 随着光伏系统注入功率的增加, 上游保护 2 处测得的短路电流值呈下

降趋势。下游保护 4 处由于未流过短路电流，电流值基本不变。保护 3 处测得的短路电流随着光伏输出功率的增大而增大，然而受逆变器限流的影响，光伏系统向短路点提供的短路电流能力有限，短路电流最大值为额定电流的 1.3 倍。

1.2 线路区外故障特征

当线路 BC 段距离 B 母线 F1 处发生相间短路、相间接地故障和三相短路故障，短路电流依然是由系统电源和光伏系统共同提供，光伏系统接入点上游保护 2 处测得的短路电流略微降低，相邻线路 EG 段不受影响。光伏系统接入点下游保护 4 处测得的短路电流增大，随着光伏容量的不断变化，保护 4 在助增电流的作用下灵敏度得到提高，保护范围增大，但是光伏并入配网属于小电源并入大系统，同时受光伏系统逆变器限流作用，光伏向短路点提供的助增电流被限定在额定值的 1.3 倍。

当故障发生在相邻线路 F3 点处，短路电流依旧由系统电源和光伏电源共同提供，作用机理与在 F1 点发生故障相同，光伏系统提供一定的助增电流，但是由于距离较远其值较小。

综合考虑光伏系统接入配网的故障特征及各类继电保护元件工作特性，得到表 2 所示各类型继电保护元件在故障时所受影响。

表 2 光伏系统接入配网各类继电保护元件所受影响

Table 2 Relay protection devices are affected when the photovoltaic system access network

保护元件类型	是否受光伏接入的影响
功率方向元件	否
单端电气量保护元件	是
分相差动选相元件	否
时域算法的差动保护元件	否

综上所述，由光伏系统接入配网的故障特征可知：

光伏系统提供的短路电流将影响原配网电流保护的速动性、选择性。光伏系统接入配网后，所有基于差动原理的保护元件、保护原理仍成立。所有基于单端电气量受光伏电源的接入和系统运行方式的影响，会引起保护误动和拒动。究其导致接入点上游短路电流降低的原因是光伏系统的接入改变了 AB 段线路的潮流分布，应用叠加原理将故障线路分解为正常运行状态和故障状态，正常运行时由于光伏系统的接入分担了部分负荷电流，所以 AB 段线路流过的电流较不接入光伏系统小，故障状态下系统提供短路电流大小不变，所以叠加后保护 2 处测得的短路电流变小，进而导致在接入点上游至系

统电源之间的保护 2 和保护 3 会出现动作值难以整定的问题。

2 模型识别输电线纵联保护原理在光伏接入配网保护实现方法

根据上节光伏系统接入配网故障特征分析可知，相邻线路和光伏接入点下游发生故障时，为了适应助增电流的影响只需调整三段式或两段式电流保护的可靠系数的大小就能实现可靠动作，传统工频量保护可继续使用，缺点是各段的保护范围将缩小。但是当故障发生在系统电源与光伏接入点之间时，受系统潮流分布的影响三段式电流或两段式保护将不能正确动作于故障，需采用能够正确反映故障信息的新保护原理对线路进行保护。

2.1 输电线路内部故障特征模型

考虑到配网线路长度相对较短，线路对地电容可近似忽略，线路可采用 R-L 集中参数模型。内部故障附加状态图如图 3 所示。

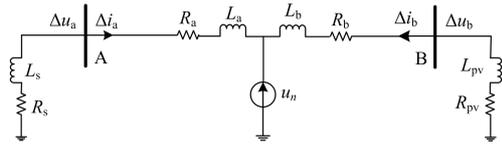


图 3 内部故障附加状态网络图

Fig. 3 Additional state network when internal fault

图 3 中 u_n 为等效故障分量电源， R_s 、 L_s 、 R_{pv} 、 L_{pv} 分别为系统电源和光伏电源的等效电阻和电感， R_a 、 R_b 、 L_a 、 L_b 为线路阻抗参数， Δu_a 、 Δu_b 、 Δi_a 、 Δi_b 分别为 A 母线和 B 母线的电压和电流故障分量。设定电流方向由母线流向被保护线路为正，根据故障附加状态网络可得式(1)、式(2)所示。

$$\Delta u_a = - \left[R_s \Delta i_a + L_s \frac{d\Delta i_a}{dt} \right] \quad (1)$$

$$\Delta u_b = - \left[R_{pv} \Delta i_b + L_{pv} \frac{d\Delta i_b}{dt} \right] \quad (2)$$

定义故障分量差动电流、差动电压如式(3)。

$$\begin{cases} \Delta u_{cd} = \Delta u_a + \Delta u_b \\ \Delta i_{cd} = \Delta i_a + \Delta i_b \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)，同时定义电流分支系数 k_1 和 k_2 可得式(4)。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\Delta i_a}{\Delta i_a + \Delta i_b}, k_2 = \frac{\Delta i_b}{\Delta i_a + \Delta i_b} \\ \Delta u_{cd} = -(k_1 R_s + k_2 R_{pv}) \Delta i_{cd} - (k_1 L_s + k_2 L_{pv}) \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出，当线路 AB 段内部发生故障

时, 可将线路等效为电感电路模式进行识别。

2.2 输电线路外部故障特征模型

当相邻线路或光伏接入点下游发生故障, 线路故障附加状态网络图如图 4 所示。

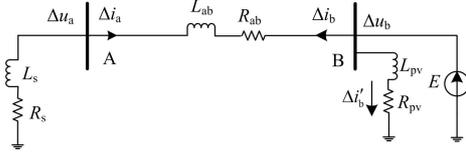


图 4 区外故障附加状态网络图

Fig. 4 Additional state network when an external fault

图 4 中 E 为故障分量等效电源, R_{ab} 、 L_{ab} 为线路阻抗参数, Δu_a 、 Δu_b 、 Δi_a 、 Δi_b 分别为 A 母线和 B 母线侧电压和电流故障分量, R_s 、 L_s 、 R_{pv} 、 L_{pv} 分别为系统电源和光伏电源的电阻和电感。差动电流和差动电压的定义同式(3)。同样规定电流由母线流向被保护线路为正, 根据故障附加状态网络可得:

$$\Delta u_a = - \left[R_s \Delta i_a + L_s \frac{d\Delta i_a}{dt} \right] \quad (5)$$

$$\Delta u_b = \left[R_{pv} \Delta i'_b + L_{pv} \frac{d\Delta i'_b}{dt} \right] \quad (6)$$

定义 $\Delta i_b = k_3 \Delta i'_b$ 可得:

$$\Delta u_b = \left[R_{pv} \frac{\Delta i_b}{k_3} + L_{pv} \frac{d\frac{\Delta i_b}{k_3}}{dt} \right] \quad (7)$$

将式(5)和式(7)代入式(3)可得式(8)。

$$\Delta u_{cd} = (-k_1 R_s + \frac{k_2}{k_3} R_{pv}) \Delta i_{cd} + (-k_1 L_s + \frac{k_2}{k_3} L_{pv}) \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \quad (8)$$

分析式(8)可知, 当线路 AB 区外发生故障时也可将线路区外故障等效为电感电路模型。

综上所述, 区内故障和区外故障均可等效为不同的电感电路模型, 因此, 可统一表达为

$$\Delta u_{cd} = R_{seq} \Delta i_{cd} + L_{seq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \quad (9)$$

式(9)中 R_{seq} 和 L_{seq} 分别表示待辨识的电阻和电感。

2.3 模型误差的定义与保护判据

按照上节将光伏接入配网 AB 段区内和区外均能等效为不同的电感电路模型, 对于线路故障区内和区外故障的识别就转化为对故障模型误差大小的识别。利用参数辨识的思想, 解算实际故障模型的误差, 从而进行故障判别。考虑到光伏发电系统没有惯性环节、电磁暂态较短的特性, 定义区内、区

外电感模型半周波相对误差为式(10)、式(11)。

$$\Delta F_{L1} = \frac{\int_0^T \left| \Delta u_{cd} + R_{seq} \Delta i_{cd} + L_{seq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \right| dt}{\int_0^T \left| \Delta u_{cd} \right| + \left| R_{seq} \Delta i_{cd} + L_{seq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \right| dt} \quad (10)$$

$$\Delta F_{L2} = \frac{\int_0^T \left| \Delta u_{cd} - R_{seq} \Delta i_{cd} - L_{seq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \right| dt}{\int_0^T \left| \Delta u_{cd} \right| + \left| R_{seq} \Delta i_{cd} + L_{seq} \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} \right| dt} \quad (11)$$

式(10)~式(11)中 $T=0.01$ s, 通过分析光伏接入配电网 AB 段区内故障和区外故障模型可知, 模型区分度明显。考虑到光伏在夜间停止发电, 为了增强线路保护的可靠性所以在光伏接入配电网功率出现双向流动的线路两端必须配备电流保护作为模型识别保护的后备保护^[12-15]。

由此可见, 基于模型识别的纵联保护能够很好地解决光伏间歇性、波动性给接入配网带来的保护问题。

2.4 模型识别纵联保护判据的实现方法

基于模型识别的线路纵联保护在实现时分为以下 4 个步骤:

(1) 由线路两端电压电流采样值计算出半周期的故障分量差动电压、差动电流分别为 $\Delta i_{cd}(i+1)$, $\Delta i_{cd}(i+2)$, ..., $\Delta i_{cd}(i+N/2)$; $\Delta u_{cd}(i+1)$, $\Delta u_{cd}(i+2)$, ..., $\Delta u_{cd}(i+N/2)$, N 为一个周期内的采样点数。

(2) 根据已建立的区内、区外故障模型, 选取任意两对故障分量差动电流和差动电压, 采用最小二乘参数识别法即可计算出区内故障与区外故障识别的电阻值和电感值分别为 R_{seq} 、 L_{seq} 。

(3) 将识别到的电阻值、电感值分别代入区内和区外误差模型计算误差大小;

(4) 根据保护判据判别区内故障和区外故障: ① $\Delta F_{L2} < \Delta F_{L1}$ 判定为区外故障, 保护不动作; ② $\Delta F_{L2} > \Delta F_{L1}$ 判定为区内故障, 保护动作。

3 仿真实验

为了验证基于模型识别线路纵联保护原理应用于光伏系统接入配网保护的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 下建立了如图 1 所示光伏系统接入配网模型, 光伏输出功率 4 MW, 逆变器控制采用恒功率 PQ 控制, 使光伏系统以单位功率因数并网, 光伏系统输出电压 0.4 kV, 升压变压器变比 0.4/10, 系统容量 100 MVA, 线路基准电压 10 kV, 系统在最大运行方式下, AB、BC 和 CD 线路长均为 10 km, 线路单位距离阻抗 $Z_1=0.036+j0.38 \Omega$; EF

和 FG 线路长均为 12 km, 线路单位距离阻抗 $Z_2=0.043 2+j0.4 \Omega$ 。负荷采用恒阻抗模型, 最大负荷时每相带有 1 MVA 功率因数 0.9 等效负荷。在 AB 段线路 F2 点处发生三相短路, 仿真波形如图 5 所示。

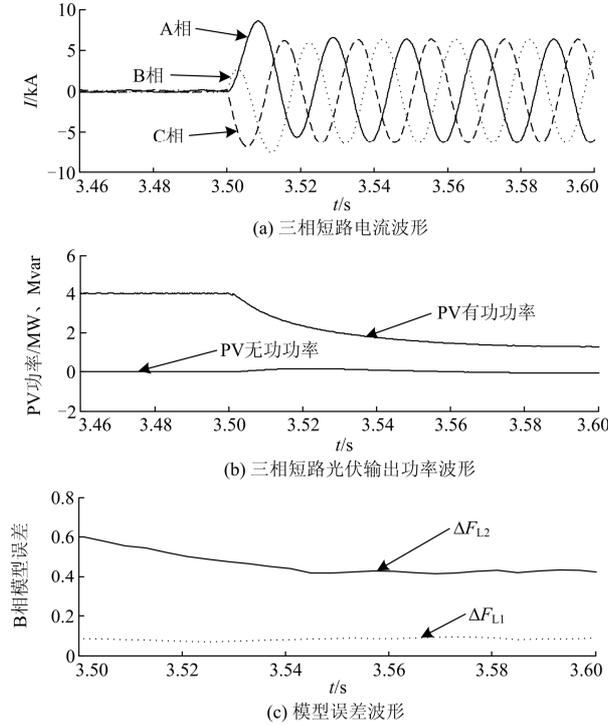


图 5 F2 处短路故障仿真波形

Fig. 5 Short circuit fault simulation waveform in F2

分析图 5 可得, 在 3.5 s 时发生三相短路故障, 模型识别的故障类型与区内故障模型匹配, $\Delta F_{L2} > \Delta F_{L1}$ 。在线路 AB 段区内 F2 处发生其他短路故障, B 相的模型误差仿真数据如表 3 所示。

表 3 区内故障时的仿真结果

Table 3 Simulation results of the internal fault

故障类型	$\overline{\Delta F_{L1}}$	$\overline{\Delta F_{L2}}$
F2 处 ABG 短路	0.156	0.721
F2 处 AB 短路	0.132	0.675

在线路 AB 段区外 F1 和 F3 处发生各类短路故障, B 相的模型误差仿真数据如表 4 所示。

表 4 区外故障时的仿真结果

Table 4 Simulation results when external fault

故障类型	$\overline{\Delta F_{L1}}$	$\overline{\Delta F_{L2}}$
F1 处 ABC 短路	0.587	0.152
F1 处 AB 短路	0.745	0.121
F3 处 AB 短路	0.695	0.157
F3 处 ABG 短路	0.523	0.158

表 3 和表 4 中, $\overline{\Delta F_{L1}}$ 和 $\overline{\Delta F_{L2}}$ 分别是模型识别在半个周波识别误差的平均值, 由表中数据可得区内、区外故障识别值离散度明显, 保护具有良好的整定裕度。

4 结论

在对模型识别理论进行改进与优化的基础上, 提出了光伏系统接入配网线路纵联保护方案, 通过理论分析与实验仿真得出以下结论:

光伏系统接入配网改变了原配网的供电模式, 系统潮流在局部线路出现双向流动, 在不更改保护方案的基础上, 光伏系统接入点上游保护需加装方向原件。

光伏发电属于弱电源系统, 向配网提供短路电流的能力有限, 对传统电流保护的选择性有较大的影响。

对基于模型识别线路纵联保护原理做改进与优化, 将该方法应用于光伏系统接入配网线路保护, 能够很好解决光伏系统易受外界环境影响导致配网保护失去速动性和选择性的问题。同时, 该方法不受由于光伏系统输出功率间歇性和波动性的影响, 具有较强的适应性。

致谢

本文受国家自然科学基金编号(51367017、51267019)的支持, 在此向国家自然科学基金委表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [2] 王志文, 陈来军, 郑天文, 等. 采用搜索保护与差动保护的光伏微电网综合保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 14-19.
WANG Zhiwen, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. A comprehensive protection scheme for photovoltaic microgrid use scan protection and differential protection [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 14-19.
- [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): 1405-1408.

- 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): 1405-1408.
- [4] 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.
- [5] 田果, 黄小莉. 含光伏电源配电网的改进矩阵保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 79-83.
TIAN Guo, HUANG Xiaoli. An improved matrix protection algorithm with distribution network including photovoltaic power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 79-83.
- [6] 王婷, 刘渊, 李凤婷, 等. 光伏 T 接高压配电网电流差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 60-65.
WANG Ting, LIU Yuan, LI Fengting, et al. Research on the current differential protection where PV access to the high voltage distribution network with T-type[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 60-65.
- [7] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [8] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [9] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.
LI Bin, YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose, and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 12-17.
- [10] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [11] 赵鸿飞, 陈伟, 邵方静, 等. 串联补偿型限流器对 10 kV 配电系统的影响研究[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 24-29, 35.
ZHAO Hongfei, CHEN Wei, SHAO Fangjing, et al. Influence of fault current limiter with series compensation on 10 kV distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 24-29, 35.
- [12] 张健康, 索南加乐, 孙成, 等. 基于参数识别的纵联保护在交直流混联电网中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 40(24): 34-39.
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, SUN Cheng, et al. Application of pilot protection based on parameter identification in AC-DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 40(24): 34-39.
- [13] 康忠健, 刘睿莹. 基于阻抗模型故障特征匹配技术的配电网单相接地故障测距研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 40-46.
KANG Zhongjian, LIU Ruiying. A fault location method for single-phase grounding fault in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(8): 40-46.
- [14] 索南加乐, 马超, 康小宁, 等. 利用电流模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 109-116.
SUONAN Jiale, MA Chao, KANG Xiaoning, et al. A novel transmission line pilot protection principle based on current model recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 109-116.
- [15] 索南加乐, 杨铖, 杨忠礼, 等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 30-34.
SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. New type of transmission line pilot protection based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 30-34.

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-12-23

作者简介:

李育强(1977-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光伏并网及继电保护研究; E-mail: 835556737@qq.com

宋国兵(1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向为交、直流电网的继电保护与故障定位;

王维庆(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护与控制、风力发电控制技术。

(编辑 周金梅)