

考虑分布式电源接入的配电网电流保护配置及整定方案

何明¹, 杨琪¹, 陈虹静¹, 吴穹², 王利平¹

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要: 分布式电源的故障电流具有非线性、间歇性的特点, 给配电网中的传统三段式电流保护的整定与配合带来了挑战。针对该问题, 文中分析了逆变型分布式电源的控制策略及故障特征, 并结合正序故障附加网络提出了一种适用于含分布式电源配电网的电流保护整定方案。该方案利用自适应保护的思想设计了正序电流速断主保护, 两侧过流继电器分别作为对侧末端故障时的近后备保护; 最后, 由定时限过电流保护作为全线路的远后备保护。基于PSCAD的仿真验证表明, 所提方案在发生不同类型、不同位置的故障时均能可靠、准确地识别故障。

关键词: 配电网; 电流保护; 自适应定值; 后备保护; 分布式电源

中图分类号: TM 771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)06-07-06

DOI: 12.16527/j.issn.1003-6954.20210602

Overcurrent Protection Configuration and Setting Scheme for Distribution Network Considering Distributed Generation Supply Access

He Ming¹, Yang Qi¹, Chen Hongjing¹, Wu Qiong², Wang Liping¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The fault current of distributed generation is non-linear and intermittent, which brings challenges to the setting and coordination of the traditional three-stage overcurrent protection in distribution networks. Aiming at this problem, the control strategy and fault characteristics of inverter-based distributed generation are analyzed, and combined with the positive sequence fault additional network, an overcurrent protection setting scheme suitable for the distribution networks with distributed generation is proposed. The scheme firstly uses the idea of adaptive protection to design the main protection setting method, and then the overcurrent relays on both sides are used as the near back-up protection for the faults occurring near the other terminal, and finally the definite time overcurrent protection is used as the far back-up protection for the entire line. Simulation results based on PSCAD show that the proposed scheme can reliably and accurately identify the faults with different types and locations.

Key words: distribution network; overcurrent protection; adaptive setting value; back-up protection; distributed generation

0 引言

分布式电源(distributed generation, DG)是指分散就地接入配电网的小容量电源^[1]。DG是利用太阳能、风能等可再生能源的重要途径,近年来已成为世界各国发展与推广的重点^[2]。然而, DG就地接入改变了配电网馈线中短路电流的大小和方向,使配电网中传统的电流保护难以适用;另外, DG的故

障电流具有非线性、间歇性的特点,进一步加剧了保护整定与配合的难度^[3]。若无法解决继电保护的问题,则无法在配电网中进一步提高DG渗透率^[4-5]。因此,研究适用于含DG配电网的保护方案具有重要意义。

近年来,专家学者已针对含DG的配电网提出了许多保护方案,主要可分为两类。第一类方案是采用需要通信通道的纵联差动类保护^[6-12]。该类保护通过两端或多端的电气信息进行故障区段定

位,具有较高的准确性且受 DG 出力变化的影响较小。然而纵联差动类保护需要建设通信通道,这将增加配电网保护的成;另外当通信通道故障时,该类保护将会失灵,因此必须配有其他保护方法作为后备保护。第二类方案是无需通信的无通道保护^[13-19]。该类保护一般在方向性电流/距离保护的基础上,根据 DG 的故障特性和网络拓扑结构自适应调整保护定值。文献[16]提出了一种基于戴维南等效参数动态计算的自适应保护。文献[17]提出了一种基于故障复合序网的自适应正序电流速断保护。文献[18]提出了一种基于高斯迭代求解的自适应电流速断保护。文献[19]提出了一种基于复合故障补偿因子的反时限电流保护。上述保护方案不依赖通信通道,易于实现,但并未考虑主保护与后备保护间的配合问题。由于 DG 出力的间歇性,为保证主保护选择性而选取的整定值会降低后备保护的保护区。

针对上述问题,通过分析 DG 故障特征提出了一种考虑 DG 接入的配电网电流保护整定方案。

1 分布式电源故障特征分析

根据并网方式, DG 可分为电机类和逆变类两种类型^[11]。考虑到逆变类 DG 的故障特征分析更为复杂,且是光伏、风电等可再生能源并网的主流方式,因此以逆变类 DG 为主要研究对象。

图 1 为以光伏电源为例的逆变类分布式电源结构与控制策略示意图。图中: U 和 I 为逆变器的直流侧输入电压与电流; C 为直流母线等值电容; R 和 L 分别为交流侧等效电阻与电感; u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为交流侧的相电压和相电流。三相电压、电流经过 dq 变换后实现对逆变型分布式电源输出的

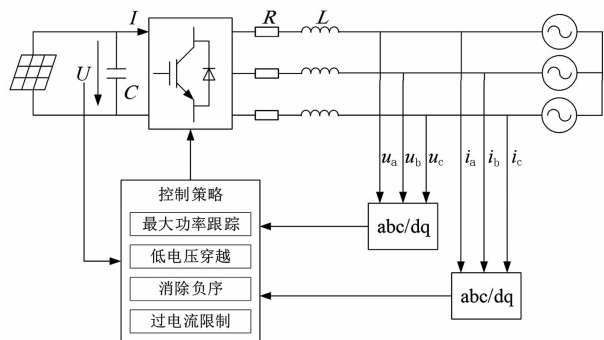


图 1 逆变类分布式电源结构与控制策略

控制。逆变类 DG 的主要控制策略包括最大功率跟踪、低电压穿越、消除负序和过电流限制等。

在正常运行条件下, DG 采用最大功率跟踪控制以实现有功出力最大化。当电网发生故障时,低电压穿越控制策略要求 DG 根据并网点电压的跌落系数优先输出无功电流,此时 DG 输出的无功电流 I_q 为

$$I_q = \begin{cases} 0 & \gamma > 0.9 \\ K \cdot (0.9 - \gamma) I_N & 0.2 \leq \gamma \leq 0.9 \\ 1.2 \cdot I_N & \gamma < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K 为低电压支撑系数,一般要求不低于 1.5; γ 为并网点电压跌落系数,其值等于故障后电压与故障前电压的幅值比; I_N 为额定输出电流。

故障条件下,为了维持系统有功功率的平衡,分布式电源也需要发出更多的有功电流。然而,由于逆变器中的电力电子器件无法承受较大的电流,逆变类 DG 采用过电流限制的控制策略,通常规定其输出短路电流的幅值不能超过额定电流的 1.2 倍。因此逆变类 DG 输出的有功电流 I_d 可表示为

$$I_d = \min \left[\sqrt{I_{\max}^2 - I_q^2}, \frac{P_{\text{ref}}}{U_{\text{PCC}}} \right] \quad (2)$$

式中: I_{\max} 为逆变类 DG 输出电流的幅值上限; P_{ref} 为 DG 的参考有功功率; U_{PCC} 为故障后 DG 并网点处的电压幅值。

根据式(1)、式(2)可得出,故障后逆变类 DG 短路电流的幅值和相角分别为:

$$I_{\text{DG}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{I_q}{I_d} \quad (4)$$

由式(1)一式(4)可以看出,逆变类 DG 故障电流的幅值和相位由 I_d 和 I_q 的幅值决定,而 I_d 和 I_q 与 DG 并网点的电压有关。由于故障后电压跌落的大小受故障位置、故障类型、过渡电阻等多种因素的影响,逆变类 DG 输出的短路电流具有明显的随机性、非线性的特征,与传统电源存在较大差异。

2 考虑分布式电源接入的配电网保护方案

传统的配电网电流保护通常仅在各区段的首端

配置保护。然而,对于含 DG 配电网中位于 DG 上游的区段,必须在两端配置保护,如图 2 所示。

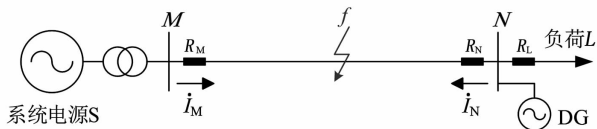


图 2 含 DG 接入的配电网

下面以图 2 中的区段 MN 为例分析含 DG 配电网的保护整定方案。需要指出,研究对象为中国配电网中主流的中性点非直接接地(不接地、经谐振接地)系统,其单相接地时故障电流不明显且系统仍被允许短时运行^[20],因此所研究的电流保护配置及整定方案仅针对相间短路。

2.1 基于自适应正序电流速断保护的主保护方案

由前述分析可知,逆变类 DG 采用消除负序的控制策略,仅输出正序电流,因此以正序电流构造电流保护方案。自适应电流速断保护可根据电网的运行方式和故障类型对保护定值进行在线实时整定,相较于普通电流速断保护具有更大的保护范围。现有的自适应电流速断保护的整定方法如式(5)所示。

$$I_Z = \left| \frac{K_k \cdot K_f \cdot E_s}{Z_s + Z_L} \right| \quad (5)$$

式中: K_k 为可靠系数,取 1.2; K_f 为故障系数,三相短路和两相短路时分别为 1 和 0.866; Z_s 和 Z_L 分别为系统和被保护线路的等值阻抗; E_s 为系统等值电势的幅值,可按式(6)整定。

$$E_s = |\dot{U}_p + \dot{I}_p Z_s| \quad (6)$$

式中, \dot{U}_p 和 \dot{I}_p 分别为保护安装处的正序电压和正序电流。

上述自适应电流保护整定方案并未考虑 DG 的接入。对于含逆变类 DG 的配电网,DG 短路电流的非线性与间歇性将使馈线中的短路电流存在较大的随机性;另外,DG 上游区段中系统侧(首端)保护与 DG 侧(末端)保护处的电流变化规律也存在差异。因此,仍采用式(5)所示的整定方案可能导致速断保护失去选择性,需要提出新的自适应电流速断保护方案。

在图 2 所示的含 DG 配电网中,若发生两相短路故障,此时正序故障附加网络如图 3 所示。

图 3 中: \dot{U}_M 和 \dot{I}_M 分别为系统侧保护 R_M 处的正序电压和正序电流; α 为故障位置系数,其值等于故障点到母线 M 的距离与馈线 MN 总长度的比。

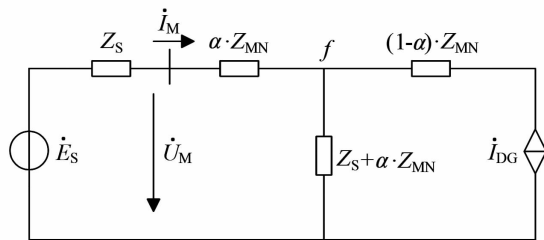


图 3 两相短路故障时的正序故障附加网络
由图 3 可得 \dot{I}_M 的表达式为

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{U}_M - \dot{I}_{DG}(Z_s + \alpha \cdot Z_{MN})}{Z_s + 2\alpha \cdot Z_{MN}} \quad (7)$$

由于逆变类 DG 受过电流限制控制策略的影响,其可提供的短路电流远小于系统电源,因此可将其忽略。 R_M 处的自适应正序电流速断保护可按照式(8)整定。

$$I_{MZ} = \left| \frac{K_k \cdot \dot{U}_M}{Z_s + 2\alpha \cdot Z_{MN}} \right| \quad (8)$$

对于 DG 侧的保护 R_N ,为了便于分析,可将正序故障附加网络中故障点左侧的部分合并,得到简化后的附加网络如图 4 所示。

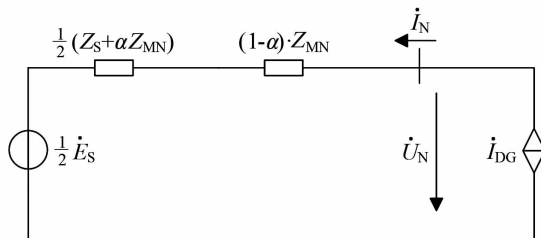


图 4 两相短路故障时的正序故障简化附加网络

图 4 中, \dot{U}_N 和 \dot{I}_N 分别为保护 R_N 处的正序电压和正序电流。由图 4 可得

$$\dot{U}_M - \frac{1}{2} \dot{E}_s = \frac{1}{2} \dot{I}_N \cdot [Z_s + (1 + \alpha) \cdot Z_{MN}] \quad (9)$$

为优先保证选择性, R_N 处的自适应正序电流速断保护可按照式(10)整定。

$$I_{NZ} = \left| \frac{K_k \cdot (2\dot{U}_N - \dot{E}_s)}{Z_s + 2Z_{MN}} \right| \quad (10)$$

发生三相短路故障时,正序故障附加网络中的附加阻抗为 0,此时两侧保护安装处的正序电压 \dot{U}_i 和正序电流 \dot{I}_i 存在式(11)关系。

$$\dot{U}_r = I_r \cdot Z_{rf} \quad (11)$$

式中, Z_{rf} 为保护安装处到故障点的等值阻抗。

因此, 对于三相短路故障, 两侧的自适应正序电流速断保护均可按照式(12)整定。

$$I_Z = \left| \frac{K_k \cdot \dot{U}_r}{Z_{MN}} \right| \quad (12)$$

2.2 线路末端故障时的近后备保护方案

由于电流速断保护不能覆盖线路全长, 因此必须配有能够检测线路末端故障的后备保护^[20]。为避免 DG 接入对传统电流保护配合的影响, 采用两侧过流互为近后备保护的方法, 如图 5 所示。

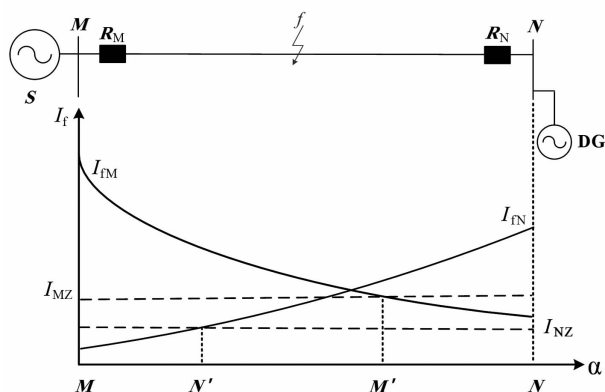


图 5 近后备保护方案原理

图 5 中, I_{IM} 、 I_{IN} 分别表示保护 R_M 和 R_N 处的短路电流曲线(不考虑故障类型), I_{MZ} 、 I_{NZ} 分别表示保护 R_M 和 R_N 处的自适应正序电流速断保护整定值。对于保护 R_M , 主保护的保护区投影在横轴上为 MM' ; 保护 R_N 主保护的保护区为 NN' 。若 MM' 、 NN' 和被保护线路 MN 满足式(13), 则两侧的主保护可互为对侧的近后备保护。

$$MN \subset (MM' \cap NN') \quad (13)$$

近后备保护的具体方案为: 若某侧保护判断故障发生在主保护的保护区内, 则视为区内故障, 控制对应断路器跳闸并向对侧发送区内故障命令; 若某侧主保护未动作但受到对侧的动作命令, 则也视为发生区内故障。由于两侧之间的命令信号所需的通信量极小且对延时的要求很低, 通过现有无线网络即可实现该功能, 无需建设通信通道。

2.3 基于定时限过电流保护的远后备保护方案

对于含 DG 配电网中可能发生的绝大多数故障, 所提出的主-后备保护方案均能正确、可靠地识别。在此背景下, 远后备保护仅作为最不利情况下的备选

方案, 因此可以适当扩大保护范围并延长动作时限。所提方案中, 在每条出线的首端采用基于定时限的过电流保护作为远后备保护, 保护定值按躲过最大负荷电流且覆盖整条馈线全长整定。为了与主保护有所区分, 远后备保护可设置 0.5 s 的延时。

3 仿真分析

3.1 仿真模型参数

为验证所提保护整定方案在各种故障条件下的有效性, 利用 PSCAD 搭建了如图 6 所示的含 DG 配电网模型。该模型的基准电压为 10.5 kV, 系统基准容量为 100 MVA; DG 的额定容量为 4 MVA, 低穿电压支撑系数为 1.5; 线路和负荷参数与文献[17]中的模型一致。仿真以馈线段 B_1B_2 作为故障区段, 研究在不同故障距离发生不同故障类型时保护 R_1 和 R_2 的动作情况。

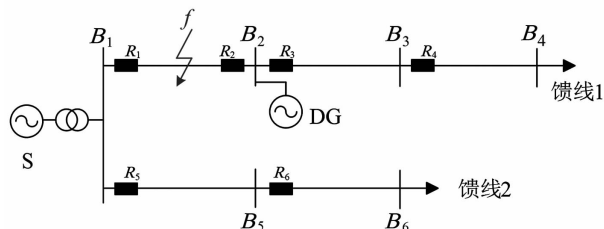


图 6 含 DG 接入的配电网模型

3.2 两相短路时的仿真结果

当 f 点发生两相短路故障, 保护 R_1 和 R_2 分别按式(8)和式(10)确定自适应电流速断保护的整定值。当 f 点位于馈线段 B_1B_2 中的不同位置时, 保护 R_1 和 R_2 处的电流测量值和计算整定值如表 1 所示。

表 1 f 点发生两相短路故障时的电流仿真结果

故障位置系数	测量值/A		整定值/A	
	R_1	R_2	R_1	R_2
0.1	6410	146.3	1859	182.9
0.2	5474	146.6	1970	174.4
0.3	4659	147.0	2064	166.5
0.4	3960	147.5	2141	159.0
0.5	3367	148.1	2204	151.8
0.6	2961	149.0	2252	145.2
0.7	2689	149.9	2289	138.7
0.8	2386	160.9	2318	132.3
0.9	2145	151.8	2339	126.0

按表 1 中数据绘制电流测量值与整定值曲线,保护 R_1 和 R_2 处的曲线分别如图 7、图 8 所示。

由图 7 可以看出,故障位置系数 α 为 0.8 时,电流的测量值仍大于整定值,因此两相短路故障发生时, R_1 的保护范围能够覆盖被保护线路首端的 80%;同理,由图 8 可以看出, R_2 的保护范围能够覆盖被保护线路末端的 40%。由于二者的保护范围覆盖了被保护线路的全长,因此所提的近后备方案能够在主保护拒动时正确识别区内故障。

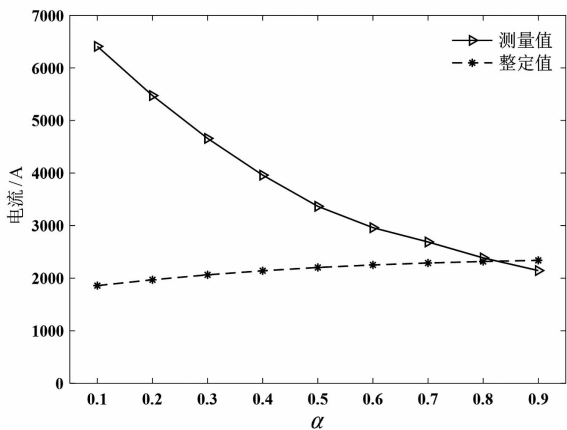


图 7 两相短路时保护 R_1 处的电流测量值与整定值曲线

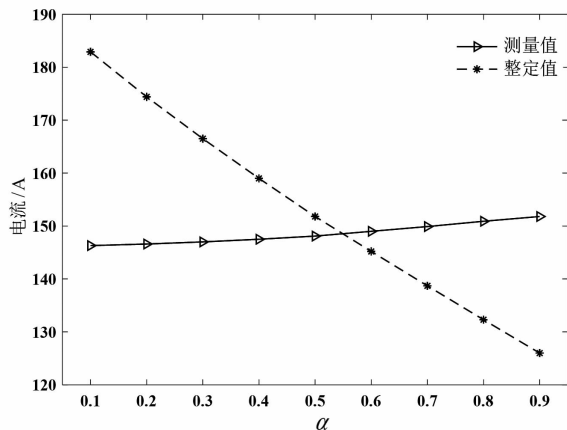


图 8 两相短路时保护 R_2 处的电流测量值与整定值曲线

3.3 三相短路时的仿真结果

当 f 点发生三相短路故障,保护 R_1 和 R_2 均按照式 (12) 确定自适应电流速断保护的整定值。当 f 点位于馈线段 B_1B_2 中的不同位置时,保护 R_1 和 R_2 处的电流测量值和计算整定值如表 2 所示。

由表 2 可以看出,对于三相短路故障,使用所提主保护方案时 R_1 的保护范围能够覆盖被保护线路首端的 80%, R_2 的保护范围能够覆盖被保护线路末端的 40%。因此,所提的主-后备保护方案在被保护线路任何位置发生故障时均能正确动作。

表 2 f 点发生三相短路故障时的电流仿真结果

故障位置系数	测量值/A		整定值/A	
	R_1	R_2	R_1	R_2
0.1	12 692	267.7	3384	332.9
0.2	10 844	271.2	3625	320.2
0.3	9239	274.9	3839	309.7
0.4	7856	278.8	4025	298.9
0.5	6683	282.9	4188	288.4
0.6	5884	287.6	4301	278.8
0.7	5343	292.3	4418	269.1
0.8	4720	295.3	4531	259.3
0.9	4283	302.1	4626	249.4

3.4 馈线末端故障时远后备保护的仿真结果

仿真采用定时限过流保护作为最不利情况下的远后备保护。以馈线 1 为例,保护 R_1 处配置保护整条线路全长的远后备保护。远后备保护的整定值可设为正常情况下最大负荷电流的两倍,此时保护 R_1 的整定值为 240 A。在馈线 1 的末端(母线 B_4)设置两相短路和三相短路时 R_1 处的测量电流分别为 1 027.5 A 和 2 044.7 A,均远大于远后备保护的整定值。因此以定时限过流保护构造的远后备能够可靠保护线路全长。

4 结 论

针对 DG 的非线性和间歇性对配电网电流保护的整定配合带来的挑战,分析了逆变类 DG 的控制策略及故障特征,并结合正序故障附加网络提出了一种适用于含 DG 配电网的电流保护整定方案。该方案包括基于自适应正序电流速断保护的主保护、基于两侧信息互为后备的近后备保护和基于定时限过流保护的远后备保护。基于 PSCAD 的仿真实验表明,所提方案能够很好地适用于含 DG 的配电网,主-后备保护方案的配合可实现对 DG 接入点上游线路全长的可靠保护。

参考文献

[1] 董逸超,王守相,闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术,2019,43(7):2258-2266.
 [2] 盛万兴,吴鸣,季宇,等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2175-2186.

- [3] 何正友,李波,廖凯,等. 新形态城市电网保护与控制关键技术[J]. 中国电机工程学报,2020,40(19): 6193-6207.
- [4] V Telukunta, J Pradhan, A Agrawal, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017,3(4):365-379.
- [5] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017,41(24):184-192.
- [6] 杨晶晶,林凡勤,周成瀚,等. 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 116-123.
- [7] Han Bowen, Li Haifeng, Wang Gang, et al. A Virtual Multi-Terminal Current Differential Protection Scheme for Distribution Networks With Inverter-Interfaced Distributed Generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018, 9(5):5418-5413.
- [8] Zhang Fan, Mu Longhua. A Fault Detection Method of Microgrids With Grid-Connected Inverter Interfaced Distributed Generators Based on the PQ Control Strategy [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4816-4826.
- [9] Nikhil Kumar Sharma, Subhransu Ranjan Samantaray. PMU Assisted Integrated Impedance Angle-Based Microgrid Protection Scheme [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(1):183-193.
- [10] Chen Guobin, Liu Yiqing, Yang Qifang. Impedance Differential Protection for Active Distribution Network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020,35(1):25-36.
- [11] 周成瀚,邹贵彬,杜肖功,等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112.
- [12] 魏东辉,于舜尧,房俊龙. 基于综合序电流的含光伏电源配电网纵联保护方案[J]. 太阳能学报,2021, 42(7):185-192.
- [13] 邓超平,唐志军,张曦,等. 一种新型的微网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 38-43.
- [14] Harikrishna Muda, Premalata Jena. Superimposed Adaptive Sequence Current Based Microgrid Protection: A New Technique [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(2):757-767.
- [15] Jia Ke, Gu Chenjie, Xuan Zhenwen, et al. Fault Characteristics Analysis and Line Protection Design Within a Large-Scale Photovoltaic Power Plant [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(5):4099-4108.
- [16] Shaofei Shen, Da Lin, Hui Fang Wang, et al. An Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With DGs Based on Optimized Thevenin Equivalent Parameters Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(1):411-419.
- [17] 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.
- [18] 曾德辉,王钢,郭敬梅,等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017,41(12):86-92.
- [19] 曹喆,季亮,常潇,等. 基于复合故障补偿因子的微电网反时限电流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(20):133-140.
- [20] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010:14-32.

作者简介:

何明(1972),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力调控运行;

杨琪(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力系统及其自动化工作;

陈虹静(1988),女,硕士,高级工程师,从事电力系统及其自动化工作;

吴穹(1988),男,硕士,高级工程师,从事电力系统及其自动化工作;

王利平(1972),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统及其自动化工作。

(收稿日期:2021-09-13)

欢迎投稿 欢迎订阅