

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200564

大型光伏电站并网暂态特性研究

刘轶, 王景钢

(国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了准确研究光伏系统故障暂态特性, 根据光伏发电系统具有随机性和间歇性的特点, 研究了光伏系统送出线上发生不同故障类型的暂态过程。针对电网电压对称跌落和不对称跌落情况, 提出了不同情况下的控制策略, 得到了相应的控制目标。基于提出的控制策略和搭建的光伏模型, 针对不同故障类型, 模拟了光伏电站馈出的功率、电压和电流的暂态过程。仿真结果表明, 光伏系统的故障暂态特性主要受控制策略影响, 与传统发电机模型有较大区别, 对光伏并网以及送出线保护具有重要的现实意义和理论意义。

关键词: 电流保护; 故障特性; 保护整定; 风力发电机

Analysis of transient characteristics when large-scale photovoltaics are connected to a power system

LIU Yi, WANG Jinggang

(State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To accurately study the fault transient characteristics of a photovoltaic system, given the random and intermittent characteristics of a photovoltaic power generation system, the transient process of different faults on the tie-line of a photovoltaic system is analyzed. For power system voltage symmetrical and asymmetrical dropping, different control strategies are proposed under different circumstances. Then the corresponding control targets are obtained. Based on the proposed control strategies and the established photovoltaic models, aiming at different faults, we simulate the transient process of power, voltage and current from the photovoltaic side. The simulation results demonstrate that the transient process is really influenced by the control strategy and quite different from traditional generators. This has important practical and theoretical significance on tie-line protection, as well as the incorporation of photovoltaics in the power grid.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52100218000U).

Key words: current protection; fault characteristic; protection setting; wind driven generator

0 引言

光伏发电作为目前可再生能源的主要利用形式之一^[1], 具有随机性和间歇性的特点, 其运行机理和常规发电机组存在较大差异, 大规模光伏电站并网势必会对电力系统的安全稳定运行带来严峻的挑战^[2]。

正确获取光伏系统的故障电流特征, 是研究光伏电站大规模接入电网后继电保护动作行为的基础^[2-5]。相比于传统的内电势串联内阻抗的电源等值模型, 光伏电源由于与逆变器的工作情况、故障穿

越特性、故障控制策略等因素相关, 其故障过程的分析更为复杂。

国内外学者已针对光伏控制策略和并网故障特性开展了相应的研究^[3-10]。文献[3]通过负序电流指令补偿, 在低电压穿越过程中, 实现了对直流母线电压的稳定控制。文献[4]通过仿真分析, 指出当电压跌落程度较轻时, 光伏系统可等效为一个恒功率源; 电压跌落较严重时, 可等效为恒流源。文献[5]基于虚拟同步机技术, 通过三项锁相环切换模块, 确保了故障时光伏电源良好的故障穿越能力。文献[6]中的仿真表明, 故障时光伏电源输出电流相位与电压跌落程度有关。文献[7]在文献[6]的基础上, 将逆变器无功电流整合到节点电压函数, 由此

将光伏系统等效为受控电流源。文献[8]指出故障时光伏运行条件和电网电压跌落程度决定了故障电流幅值大小, 并且故障电流的相位与电压跌落程度有关。文献[9-10]分别从抑制电网有功、无功和负序电流的角度, 提出了不对称故障下光伏逆变器的控制策略。

根据现有文献对光伏系统控制策略的研究, 本文研究了电网发生故障时, 电压对称跌落和不对称跌落相应的控制策略, 基于某实际电力系统, 结合仿真分别研究了当送出线发生不同类型故障时在光伏电站侧的暂态特性, 分析结果对指导光伏电站并网和保护配置具有重要的现实意义。

1 光伏电站故障控制策略分析

目前, 低电压穿越(LVRT)策略包括多种, 主要有平衡总输出电流^[11-13]、恒定电磁转矩^[14], 恒定系统输出有功功率^[15]以及恒定发电系统无功功率的控制策略^[16]。相应地, 国内也出台了相应的国家标准。当送出线发生不同类型故障时, 为应对电网电压对称跌落和不对称跌落, 均应制定相应的控制策略。

1.1 电网电压对称跌落时的控制策略

根据 LVRT 期间的无功电流要求, 逆变器应首先满足并网所需的无功电流, 而其剩余的电流容量用于有功功率的输出^[17-20]。由于光伏逆变器有功功率的输出能力减少, PV 阵列输出的功率不能全部送至电网, 会抬高直流母线电压; 但根据光伏阵列的 P-V 曲线可知, 当直流母线电压升高后, 光伏阵列将不再工作于最大功率点, 从而降低了光伏阵列的输出功率, 能够防止直流母线电压持续升高。由此可见, 在电网电压跌落期间, 单级式光伏电站 PV 阵列输出功率和逆变器输出功率能够重新平衡在一个新的直流电压上^[20-22]。极端情况下, 光伏逆变器的有功输出为 0, 此时应使 PV 阵列的输出功率为 0, 而根据光伏阵列的 P-V 曲线可知, 当 PV 阵列工作于其开路电压时, 其输出的功率即可减小至 0, 且根据光伏阵列的设计, 其开路电压小于逆变器的最大工作直流电压, 系统依然能够平衡在新的直流电压上。

1.2 电网电压不对称跌落时的控制策略

根据故障穿越要求, 光伏并网逆变器在故障穿越过程中可选取的控制目标包括抑制电网负序电流、抑制逆变器的无功功率二倍频波动和有功功率二倍频波动三个方面^[23-24]。

目标① 抑制电网负序电流。

为抑制逆变器输出电流的负序分量, 则逆变器负序电流参考值如式(1)所示。

$$i_d'^{-*} = i_q'^{-*} = 0 \quad (1)$$

式中, $i_d'^{-*}$ 和 $i_q'^{-*}$ 分别为逆变器 d 轴和 q 轴负序电流参考值。

以目标①为控制目的时, 逆变器可以输出三相对称电流, 但有功、无功存在二倍频波动。

目标② 抑制逆变器无功功率波动。

为抑制输出无功波动, 设定光伏电站输出的有功和无功功率平均值 P_0 和 Q_0 为给定值, 其无功二倍频波动分量幅值为 0, 忽略其有功二倍频波动分量, 并计及 $e_q^+ = 0$, 可得负序电流参考值如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_d'^{-*} = \frac{e_d^- i_d^{+*} + e_q^- i_q^{+*}}{e_d^+} \\ i_q'^{-*} = \frac{e_q^- i_d^{+*} + e_d^- i_q^{+*}}{e_d^+} \end{cases} \quad (2)$$

式中: e_d^- 和 e_q^- 分别为逆变器 d 轴和 q 轴负序电压; e_d^+ 为 d 轴正序电压; i_d^{+*} 和 i_q^{+*} 分别为逆变器 d 轴和 q 轴正序电流。

以目标②为控制目的时, 逆变器输出无功无波动, 但有功存在二倍频波动, 并且电流含有负序分量。

目标③ 抑制逆变器有功功率二倍频波动。

为抑制输出有功波动, 设定光伏电站输出的有功和无功功率平均值 P_0 和 Q_0 为给定值, 其有功二倍频波动分量幅值为 0, 忽略无功二倍频波动分量, 并计及 $e_q^+ = 0$, 可得负序电流参考值如式(3)所示。

$$\begin{cases} i_d'^{-*} = -\frac{e_d^- i_d^{+*} + e_q^- i_q^{+*}}{e_d^+} \\ i_q'^{-*} = \frac{-e_q^- i_d^{+*} + e_d^- i_q^{+*}}{e_d^+} \end{cases} \quad (3)$$

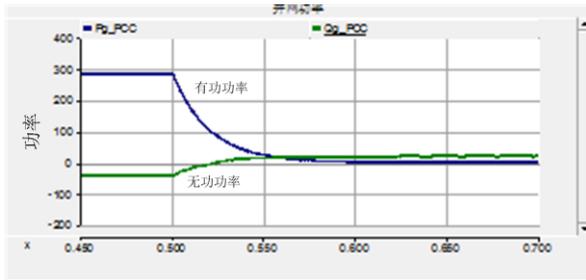
以目标③为控制目的时, 逆变器输出有功无波动, 但无功存在二倍频波动, 并且电流含有负序分量。

2 并网暂态特性仿真分析

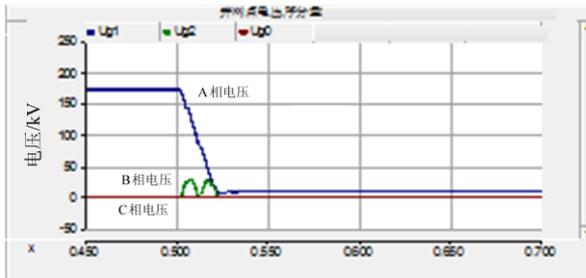
由于光伏电站故障时馈出的电压、电流和功率受其故障控制策略的影响较大, 并且其故障后的电压和电流的解析表达式较为复杂, 限于篇幅, 本文着重从仿真分析的角度, 对光伏并网暂态特性进行研究。根据本文第 1 节对光伏电站故障控制策略的研究, 本节结合某实际电网模型, 对送出线上发生三相对称、单相接地、两相短路接地和两相短路不接地的故障暂态特性进行仿真分析。

2.1 三相对称短路故障特性分析

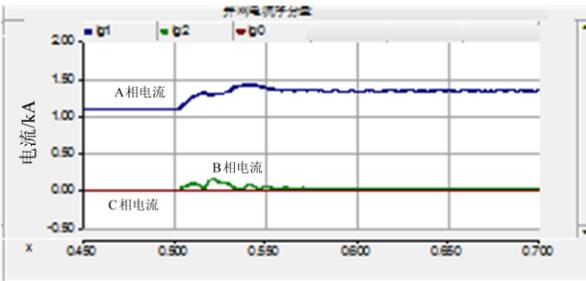
正常运行时，等值光照强度设为 960 W/m^2 ， 0.5 s 时刻，假设在光伏电站的送出线中点处发生三相短路故障，光伏电站馈出的功率、电压和电流暂态特性曲线分别如图 1 所示。图 1 中，有功功率和无功功率的坐标单位为 MW 和 Mvar，电压为 kV，电流为 kA，下同。



(a) 光伏电站侧有功和无功功率



(b) 光伏电站侧电压序分量



(c) 光伏电站侧电流序分量

图 1 三相对称短路故障的仿真结果

Fig. 1 Simulation results of three phase short circuit fault

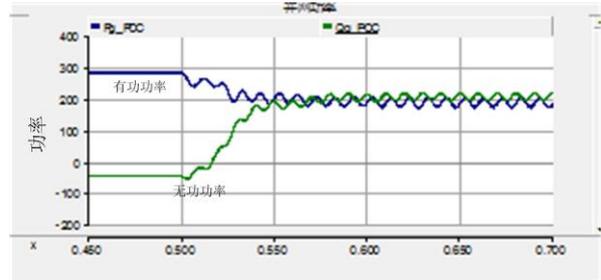
从图 1(a)可以看出，当发生三相短路时，光伏电站输出的有功功率迅速减少，此外，为支撑电网电压，会向外发出无功功率；图 1(b)和图 1(c)中，在对称故障下，光伏电站侧电压没有负序电压和零序电压；在电流方面，由于逆变器的限流控制作用，输出的故障电流约为 1.2 倍额定电流，几乎不含直流分量，且暂态过程较短，与传统发电机有较大的区别。

以上对三相对称短路故障的仿真结果，验证了

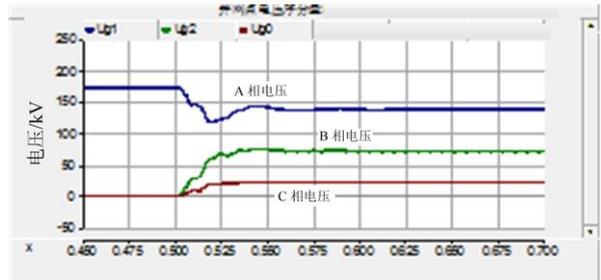
1.1 节中电网电压对称跌落时控制策略的有效性。

2.2 单相接地不对称故障特性仿真分析

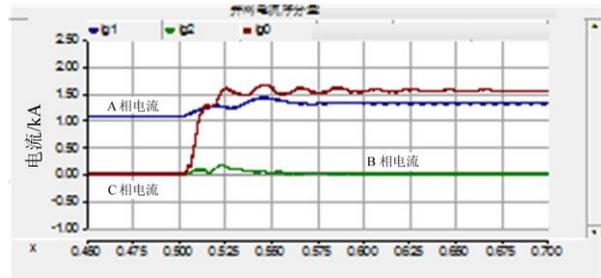
逆变器采用抑制电网负序电流的控制策略，假设 0.5 s 时刻光伏电站送出线中点发生 A 相接地短路故障，光伏电站馈出的功率、电压和电流暂态特性曲线分别如图 2 所示。



(a) 光伏电站侧有功和无功功率



(b) 光伏电站侧电压序分量



(c) 光伏电站侧电流序分量

图 2 单相接地短路故障的仿真结果

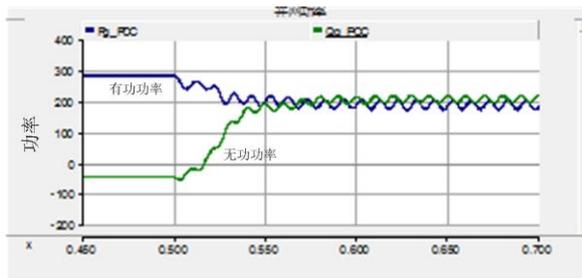
Fig. 2 Simulation results of single phase grounding short circuit fault

从图 2(a)可以看出，当发生 A 相接地短路时，光伏电站输出的有功功率减少，为支撑电网电压，会向外发出无功功率，并含有二倍频波动；图 2(b)和图 2(c)中，光伏电站侧 A 相电压骤降，B、C 相电压略微增大。从而使光伏电站侧电流的负序分量很小，基本只包含正序分量和零序分量。同时由于逆变器的限流控制作用，故障电流约为 1.2 倍额定电流。由此可见，当发生单相接地故障时，光伏电站侧的故障特性与传统发电机有较大的区别。

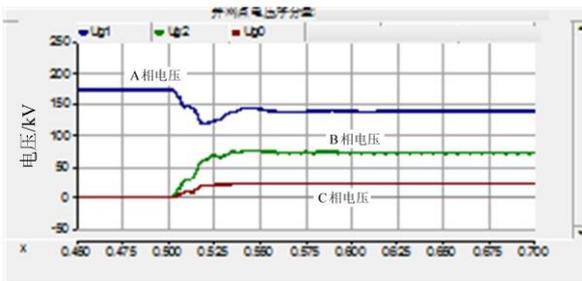
2.3 两相接地短路故障特性分析

逆变器采用抑制电网负序电流的控制策略, 假设 0.5 s 时刻光伏电站送出线中点发生 BC 相接地短路故障, 光伏电站馈出的功率、电压和电流暂态特性曲线分别如图 3 所示。

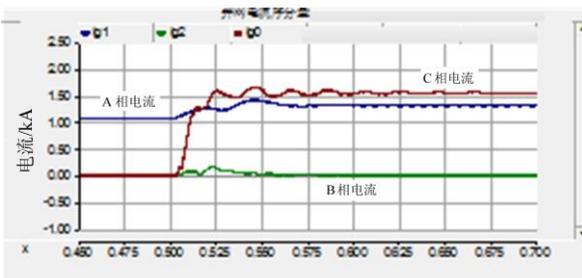
从图 3(a)可以看出, 当发生 BC 相接地短路时, 光伏电站输出的有功功率减少, 并发出无功功率, 从而支撑电网电压, 输出的有功和无功均含有二倍频波动; 图 3(b)和图 3(c)中, 光伏电站侧故障相电压骤降, 非故障相电压幅值基本保持不变。由于逆变器采用抑制电网负序电流的控制策略, 光伏电站侧电流负序分量很小, 基本只含正序分量和零序分量。同时由于逆变器的限流控制作用, 光伏电站输出的正序故障电流约为 1.2 倍额定电流。由此可见, 在发生两相接地短路故障时, 光伏电站侧的故障特性与传统发电机有较大的区别。



(a) 光伏电站侧有功和无功功率



(b) 光伏电站侧电压序分量



(c) 光伏电站侧电流序分量

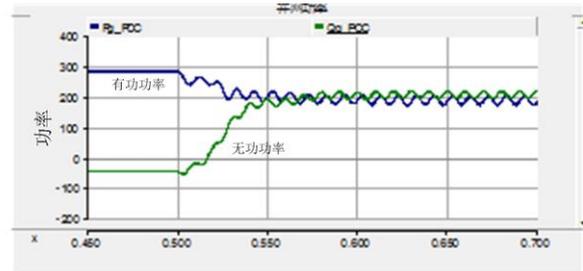
图 3 两相接地短路故障的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of two phase grounding short circuit fault

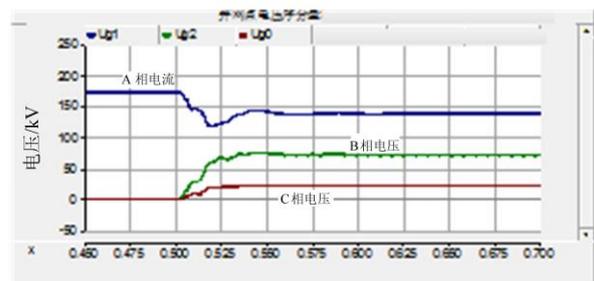
2.4 两相短路故障特性分析

光伏逆变器采用抑制电网负序电流的控制策略, 假设 0.5 s 时刻光伏电站送出线中点发生 BC 相不接地短路故障, 光伏电站馈出的功率、电压和电流暂态特性曲线分别如图 4 所示。

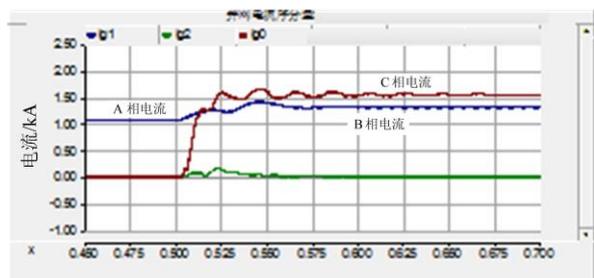
从图 4(a)可以看出, 当送出线发生 BC 相不接地短路时, 光伏电站输出的有功功率减少, 并发出无功功率, 以支撑电网电压, 输出的有功和无功均含有二倍频波动; 图 4(b)和图 4(c)中, 光伏电站侧故障相电压骤降, 非故障相电压略微增大。由于逆变器采用抑制电网负序电流的控制策略, 光伏电站侧电流负序分量很小, 只包含正序分量。由于逆变器的限流控制作用, 光伏电站侧故障电流约为 1.2 倍额定电流。由此可见当发生两相不接地短路故障时, 光伏电站侧的故障特性与传统发电机有较大的区别。



(a) 光伏电站侧有功和无功功率



(b) 光伏电站侧电压序分量



(c) 光伏电站侧电流序分量

图 4 两相不接地短路故障的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of two phase ungrounded short circuit fault

综上所述,当大规模并网光伏电站的送出线发生不同类型故障时,其故障暂态特征总结如表1所示。

表1 光伏电站并网故障暂态特征

Table 1 Transient fault characteristics of PV stations

故障类型	电压			电流			暂态过程
	U_+	U_-	U_0	I_+	I_-	I_0	
ABC	有	0	0	$1.2I_N$	0	0	短暂
AG ABG	有	有	有	$1.2I_N$	0	有	短暂
AB	有	有		$1.2I_N$	0	0	短暂

3 结论

本文以光伏系统在电网电压对称跌落和不对称跌落时的控制策略为基础,结合仿真模型,在送出线上模拟了不同故障类型,重点研究了故障时光伏电站侧的暂态特性,研究成果对光伏电站并网以及光伏电站送出线上的保护配置具有重要意义。本文研究得出的主要结论如下:

1) 当送出线发生三相对称故障时,光伏电站侧的电压、电流均只含正序分量;故障电流仅约为1.2倍额定电流,且暂态过程较短,基本不含衰减的直流量。

2) 当送出线发生不对称接地短路故障时,光伏电站侧电流基本不含负序分量,只包含正序分量和零序分量,正序故障电流幅值仅约为1.2倍额定电流。

3) 当送出线发生不对称不接地短路故障时,光伏电站侧电流基本不含负序分量,只包含正序分量,故障电流幅值约为1.2倍额定电流。

参考文献

- [1] HAUE M M, WOLFES P. A review of high PV penetrations in LV distribution networks: present status, impacts and mitigation measures[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62(3): 1195-1208.
- [2] 江浪. 多源信息融合的配电网故障诊断[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
JIANG Lang. Fault diagnosis method of distribution network based on multi-source information fusion technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [3] 韩奕, 张东霞. 含逆变型分布式电源的微网故障特征分析[J]. *电网技术*, 2011, 35(10): 147-152.
HAN Yi, ZHANG Dongxia. Fault analysis of micro-grid composed by inverter-based distributed generations[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(10): 147-152.
- [4] SHANG Liqun, ZHU Weiwei, LI Pengwei, et al. Maximum power point tracking of PV system under partial shading conditions through flower pollination algorithm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(4): 400-406. DOI: 10.1186/s41601-018-0111-3.
- [5] MIRHOSSEINI M, POU J, AGELIDIS V G. Single- and two-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plants with ride-through capability under grid faults[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(3): 1150-1159.
- [6] CHATTOPADHYAY S, DUBEY R, BHADURI S, et al. Correlating infrared thermography with electrical degradation of PV modules inspected in all-India survey of photovoltaic module reliability[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 8(6): 1800-1808.
- [7] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(8): 1-10.
- [8] 祁万春, 王荃荃, 陈庆珠, 等. 计及电压稳定的含高比例光伏电源电网 FACTS 优化配置[J]. *可再生能源*, 2019, 37(12): 1786-1793.
QI Wanchun, WANG Quanquan, CHEN Qingzhu, et al. FACTS optimal configuration of high proportion photovoltaic power grid considering voltage stability[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(12): 1786-1793.
- [9] 郑艳文, 李永东, 柴建云, 等. 不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(15): 89-93.
ZHENG Yanwen, LI Yongdong, CHAI Jianyun, et al. Research on control strategy for doubly-fed generation system under unbalanced voltage condition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(15): 89-93.
- [10] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 20(22): 29-36.
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 20(22): 29-36.
- [11] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(28): 114-121.
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(28): 114-121.
- [12] 李艳红, 王兴兴. 光储充综合能源系统设计与优化[J]. *华电技术*, 2019, 41(11): 76-79.

- LI Yanhong, WANG Xingxing. Design and optimization of optical storage and charging integrated energy system[J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(11): 76-79.
- [13] 王宏胜, 章玮, 胡家兵, 等. 电网电压不对称故障条件下DFIG风电机组控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(4): 97-102.
- WANG Hongsheng, ZHANG Wei, HU Jiabing, et al. A control strategy for doubly-fed induction generator wind turbines under asymmetrical grid voltage conditions caused by faults[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(4): 97-102.
- [14] 胡胜, 林新春, 康勇, 等. 一种双馈风力发电机在电网电压不平衡条件下的改进控制策略[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(7): 21-29.
- HU Sheng, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. An improved control strategy of doubly-fed induction generator under grid voltage unbalance[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(7): 21-29.
- [15] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变换器的协同控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(9): 97-104.
- HU Jiabing, HE Yikang, WANG Hongsheng, et al. Coordinated control of grid-and rotor-side converters of doubly-fed induction generator under unbalanced network voltage conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(9): 97-104.
- [16] 黎燕, 史向月, 向鹏. 带容错逆变器的孤岛微网系统及其稳定性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(23): 82-91.
- LI Yan, SHI Xiangyue, XIANG Peng. Islanding microgrid system with fault tolerant inverter and its stability[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(23): 82-91.
- [17] 张鑫, 赖伟坚, 林泽宏, 等. 光伏逆变器无源分数阶滑动模态控制器设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(24): 145-153.
- ZHANG Xin, LAI Weijian, LIN Zehong, et al. Design of passive fractional sliding mode controller for photovoltaic inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(24): 145-153.
- [18] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变器分布式电源的配电网故障分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(4): 555-561.
- PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generation based on PQ control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 555-561.
- [19] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(12): 101-107.
- ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(12): 101-107.
- [20] 赵晨睿, 葛磊蛟, 陈超, 等. 高功率密度分布式光伏接入配电网多目标电能质量治理方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(2): 166-171.
- ZHAO Chenrui, GE Leijiao, CHEN Chao, et al. Multi-objective power quality control method for distribution network with high power density distributed PV[J]. *Power Capacitors and Reactive Power Compensation*, 2019, 40(2): 166-171.
- [21] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于参数识别光伏接入配电网永久性故障判别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(16): 1-7.
- LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault discrimination method for photovoltaic access distribution network based on parameter recognition[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(16): 1-7.
- [22] CHEN Sizhe, CHEUNG N C, WONG K C, et al. Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(2): 356-368.
- [23] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 84-91.
- WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascade inverter for grid connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 84-91.
- [24] 游云峰, 李媛, 方番, 等. 级联多电平准 Z 源逆变器的无差拍并网控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(17): 48-53.
- YOU Yunfeng, LI Yuan, FANG Fan, et al. Deadbeat grid-connected control strategy of quasi-Z-source cascaded multilevel inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 48-53.

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-07-29

作者简介:

刘 轶(1980—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度控制、风险管控及系统运行管理工作; E-mail: xitongchu@126.com

王景钢(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度控制、风险管控及系统运行管理工作。

(编辑 张爱琴)