

光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略

张明光, 陈晓婧

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为提高光伏并网发电系统的低电压穿越能力, 提出一种基于电压定向矢量控制的低电压穿越(Low Voltage Ride-Through, LVRT)控制策略。该策略对光伏逆变器进行电压定向矢量控制, 实现有功和无功功率解耦, 在电网电压跌落期间, 采用直流卸荷电路稳定直流侧电压, 根据电压的跌落深度补偿一定的无功功率以支撑电压恢复。通过PSCAD/EMTDC软件对采取LVRT控制策略前后的各电气量进行比较分析, 结果表明, 采用该策略光伏发电系统可以在电压跌落时保持并网运行, 并补偿一定的无功功率以恢复并网点电压, 实现低电压穿越。

关键词: 光伏并网发电系统; 电压定向矢量控制; 光伏逆变器; 有功和无功功率解耦; LVRT

A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system

ZHANG Ming-guang, CHEN Xiao-jing

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To improve the low voltage ride-through capability of grid-connected photovoltaic (PV) system, A LVRT control strategy based on voltage oriented vector control is proposed. In the strategy, the voltage oriented vector control for the PV inverter is proposed to realize active and reactive power decoupling control. During the grid voltage sags, the unloading circuit are used to make DC voltage stable, and provide reactive power to support voltage recovery according to the depth of grid voltage sags. The PSCAD/EMDC software is used to compare and analyze each electric parameters before and after LVRT control. The results of simulation show the proposed strategy can make PV power system connected to the grid, provide reactive power to support voltage, and realize LVRT.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71203082).

Key words: grid-connected PV system; voltage oriented vector control; PV inverter; active and reactive power decoupling; LVRT

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0028-06

0 引言

太阳能作为一种取之不竭用之不尽的能源, 其发电市场发展迅猛^[1], 光伏并网技术已成为研究的焦点^[2-3]。其中低电压穿越技术被认为是光伏并网发电控制技术上的最大挑战之一^[4]。

在风电领域, 对低电压穿越控制技术的研究比较多。文献[5]对各种适合于变速恒频双馈异步风力发电系统的低电压穿越技术进行了评价, 并指出了优化方向。针对双馈式风电机组, 文献[6]应用滑动模态控制方法设计了LVRT控制策略; 文献[7]提出了一种新型的转子侧变流器LVRT的控制策略。对于电网故障情况下永磁直驱风电机组文献[8]采用

双脉宽调制变换器的低电压穿越运行控制方案。然而, 目前对光伏低电压穿越的研究成果相对较少, 文献[9]基于实时数字仿真器(RTDS)提出了一种光伏发电系统LVRT实时数字仿真方案, 设计了光伏并网逆变器在三相电网电压正常和对称跌落两种运行工况的LVRT控制策略。

本文在上述研究的基础上, 提出了一种基于电压定向矢量控制的LVRT控制策略。该策略对光伏并网逆变器进行电压定向矢量控制, 实现有功和无功解耦, 在电网电压跌落期间, 增加卸荷电路抑制直流侧电压波动, 根据电网电压的跌落深度补偿一定的无功功率以支撑电压恢复。最后通过在仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型来验证提出的控制策略。

基金项目: 国家自然科学基金项目(71203082)

1 低电压穿越的要求

低电压穿越 LVRT, 指在光伏并网点电压跌落的时候, 光伏设备能够保持并网。甚至向电网提供一定的无功功率, 支持电网恢复, 直到电网恢复正常, 从而“穿越”这个低电压时间(区域)。

我国国家电网公司推出的《光伏电站接入电网技术规范(试行)》中对大中型光伏电站在电网故障时的 LVRT 能力制定了相关标准^[10], 如图 1 所示。

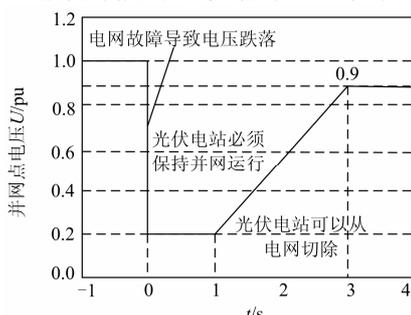


图 1 大中型光伏电站的低电压穿越能力要求

Fig. 1 LVRT requirements of the large and medium-sized PV power stations

当光伏并网点电压在图 1 中电压轮廓线及以下的区域内时, 光伏电站必须保证不间断并网运行, 并网点电压在电压轮廓线以下时, 允许光伏电站停止向电网线路送电。

以德国、丹麦、意大利、西班牙为首的许多国家已经制定了并网时的低电压穿越要求。其中德国的 E.ON 标准^[11]中还规定了低电压穿越期间所需无功电流的百分比和电压跌落深度的关系, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出电压跌落期间光伏发电系统必须提供无功电流, 当电压跌落深度为 50%~90% 时, 光伏并网系统需有线性输出的无功电流; 当电网的电压跌落深度小于 50% 时, 需提供 100% 的无功电流。

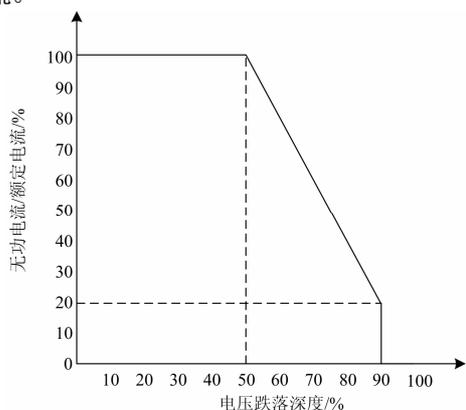


图 2 低电压穿越期间所需的无功电流的百分比

Fig. 2 The required percentage of reactive current during the LVRT

2 低电压穿越的控制技术

2.1 光伏并网逆变器的数学模型及其控制策略

光伏并网逆变器是光伏发电系统中的核心部件, 主要将光伏电池板输出的直流电逆变为交流电并馈入电网。图 3 为光伏并网逆变器的等效电路。图中 e_x 为电网侧相电压, i_x 为并网电流, u_x 为逆变器交流侧输出相电压, $x = a, b, c$; U_{dc} 为直流侧电压; R 为逆变器输出线路电阻; L 为滤波器的等值电感, C 为直流侧电容。

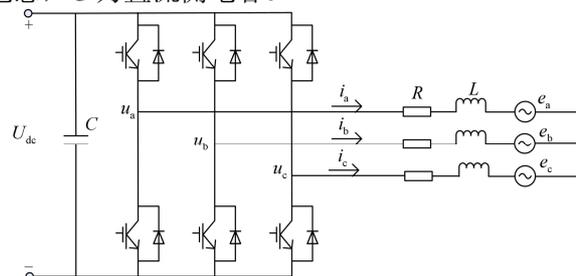


图 3 光伏逆变器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of PV inverter

根据图 3 由基尔霍夫定律得出并网逆变器输出侧的电压方程为

$$u_x = L \frac{di_x}{dt} + Ri_x + e_x \quad (1)$$

在三相逆变器的并网控制中, 基于电网电压定向矢量的双闭环控制策略具有稳态无误差跟踪、动态响应快、有功无功可独立解耦控制等优点。一般电压定向矢量控制采用电流内环、电压外环的控制结构。为了控制器设计的方便, 我们需要将控制对象从交流分量均转换成直流量, 即在同步旋转坐标系下进行逆变器的控制。

根据坐标变换理论, 将逆变器输出侧的三相电压经过 PARK 变换得出逆变器在两相旋转坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = e_d - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\ u_q = e_q - Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 为逆变器输出侧电压的 dq 分量; e_d 、 e_q 为电网电压的 dq 分量; i_d 、 i_q 为并网电流的 dq 分量; ω 为电网角频率。

电压定向矢量控制是将 dq 旋转坐标系的 d 轴坐标与电网电压合成空间矢量 E 定于同一轴线上, 坐标系的 q 轴坐标则与 E 保持垂直。此时电网电压在两相 dq 旋转坐标系下的 d、q 轴分量分别为 $e_d = E$, $e_q = 0$ 。从而得出光伏并网逆变器在 dq 坐

标下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = E - \omega Li_q + Ri_d \\ u_q = \omega Li_d + Ri_q \end{cases} \quad (3)$$

三相光伏并网逆变器在两相同步旋转坐标系下的电压定向矢量控制框图如图 4 所示, 图中 U_{dc_ref} 为逆变器通过 MPPT (最大功率跟踪) 算法得到的直流侧电压参考值; i_d^* 、 i_q^* 分别为 i_d 、 i_q 的电流给定值。

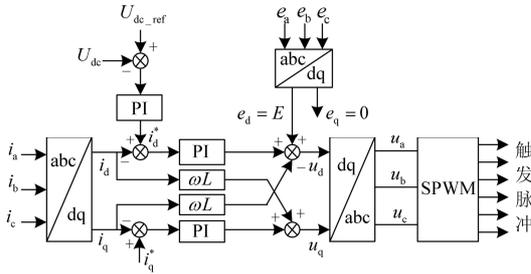


图 4 逆变器电压定向矢量控制框图

Fig. 4 Voltage oriented vector control for the PV inverter

根据瞬时无功理论^[12], dq 坐标系下逆变器输出的有功功率 P 和无功功率 Q 的表达式如式 (4) 所示。从图 4 和式 (4) 中可知, i_d 和 i_q 分别与 P 和 Q 成线性比例关系。通过控制有功电流 i_d 和无功电流 i_q , 就可以分别控制逆变器输出的有功功率和无功功率, 这就实现了有功功率与无功功率的解耦, 为光伏并网发电系统的低电压穿越研究建立了基础。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) = \frac{3}{2} E i_d \\ Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q) = -\frac{3}{2} E i_q \end{cases} \quad (4)$$

2.2 电压跌落时直流电压波动抑制方法

当电网发生故障引起电压跌落时, 在直流侧增加卸荷电路^[13], 如图 5 所示。由卸荷电路消耗直流侧电容上多余能量, 有效抑制直流侧电压波动, 提高光伏并网发电系统的低电压运行能力。

直流卸荷电路由半导体功率器件和卸荷电阻 R_d 串联构成。卸荷电路控制器控制卸荷电路的投入或切出。图 6 是卸荷电路控制器的原理图。卸荷电路控制器通过检测光伏电池板输出的功率 P_{pv} 、光伏逆变器输出的功率 P_g 和直流侧电压 U_{dc} , 判断是否需要投入直流侧卸荷电路。

当电网电压发生跌落时, 通过计算 $P_{pv} - P_g$ 得到功率偏差 ΔP , 然后对 ΔP 进行判断, 当 $\Delta P \leq \Delta P_{max}$ 时, 不需要投入直流侧卸荷电路; 当 $\Delta P > \Delta P_{max}$ 时,

投入卸荷电路, 对 ΔP 进行 PI 调节, 输出 PWM 信号控制功率器件的占空比。当 ΔP 重新满足小于 ΔP_{max} 时, 切出卸荷电路。直流侧电压 U_{dc} 作为辅助的判断条件, 当直流侧电压升高至 U_{dc_max} 时, 完全投入卸荷电路; 当直流侧电压降至 U_{dc_max} 以下时, 切出卸荷电路。

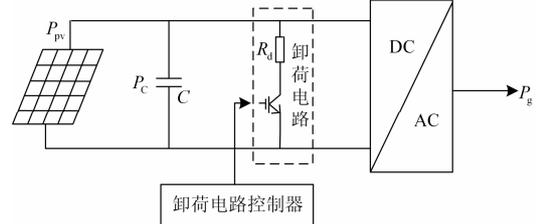


图 5 卸荷电路结构图

Fig. 5 Structure chart of unloading circuit

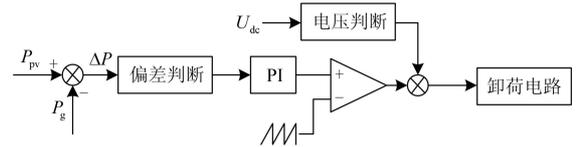


图 6 卸荷电路控制器的原理图

Fig. 6 Logic diagram of unloading circuit controller

2.3 LVRT 控制策略

在电网电压跌落期间, 光伏并网逆变器不仅要保持并网状态, 而且需要逆变器根据电网电压来实现有功和无功功率的协调控制^[14], 发出一定的无功功率, 从而支持电网电压恢复, 实现低电压穿越。

当电网电压正常时, 逆变器要实现有功优先的最大功率跟踪控制, 即优先满足有功电流, 有功电流给定值 i_d^* 由图 4 中的电压外环获得, 逆变器通过最大功率跟踪 (MPPT) 算法得到 U_{dc_ref} , 该参考值与直流侧电压 U_{dc} 之间的误差信号经过 PI 调节得到 i_d^* ; 当电网电压发生跌落时, 由于光伏并网逆变器的限流作用, 若继续执行有功优先控制, 则逆变器仅处于功率限幅状态, 无法对系统提供无功支持, 因此采用无功优先控制。

无功优先控制中, 先根据式 (6) 得到所需的无功电流给定值 i_q^* , 然后根据逆变器输出电流不能超过额定电流的 1.1 倍^[15] 的规定, 得出 i_d^* 如式 (5) 所示。式中, i_N 为电网的额定电流。

$$i_d^* \leq \sqrt{(1.1i_N)^2 - (i_q^*)^2} \quad (5)$$

当电网电压发生跌落时, 要根据电网电压跌落的深度来调节逆变器的无功电流给定值 i_q^* , 改善电压跌落情况, 进而提高光伏并网发电系统的低电压

穿越能力。

根据图 2, 低电压穿越期间所需的无功电流百分比的表达式如式 (6) 所示。

$$\begin{cases} \frac{i_q^*}{I_N} = 0, & \frac{U}{U_N} > 0.9 \\ \frac{i_q^*}{I_N} = -2\frac{U}{U_N} + 2, & 0.5 < \frac{U}{U_N} \leq 0.9 \\ \frac{i_q^*}{I_N} = 1, & \frac{U}{U_N} \leq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_q^* 为所需的无功电流; U_N 、 I_N 分别为电网的额定电压、电流; U 为跌落之后测得的电网电压有效值。在电网电压发生跌落时, 可以根据式 (6) 得出跌落深度和无功电流之间的关系。光伏并网发电系统的 LVRT 控制流程图如图 7 所示。

当电网电压发生跌落时, 根据图 7 中所示的步骤光伏逆变器提供无功给电网, 让电压恢复, 实现低电压穿越。

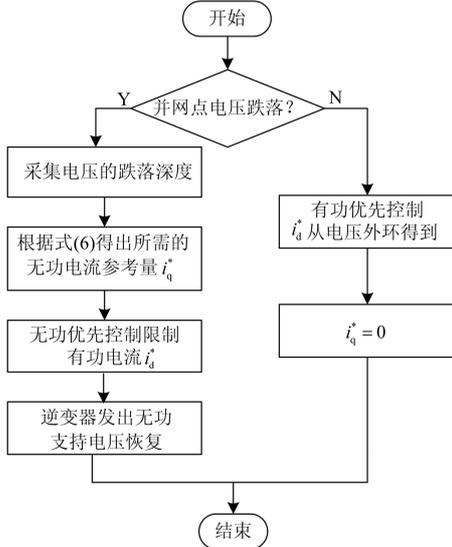


图 7 LVRT 控制流程图

Fig. 7 Flowchart of LVRT control

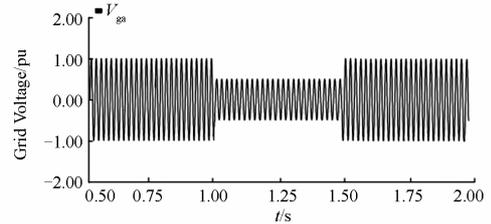
3 仿真验证

本文采用仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建额定功率为 3 MW 的光伏并网发电系统, 对前面提出的 LVRT 控制策略的可行性和正确性进行仿真验证。具体的参数如表 1 所示。

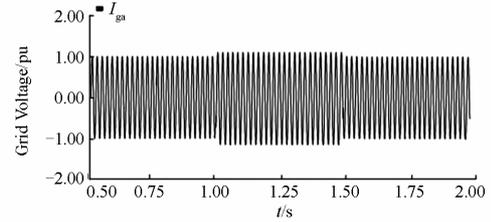
光伏并网发电系统在 1.00 s 时发生三相对称故障, 电网电压发生跌落, 故障于 1.50 s 时清除。电压跌落期间采取 LVRT 控制前电网 a 相电压、逆变器输出 a 相电流、有功和无功功率、直流侧电压的波形如图 8 所示, 采取 LVRT 控制后的波形如图 9 所示。

表 1 系统参数设置

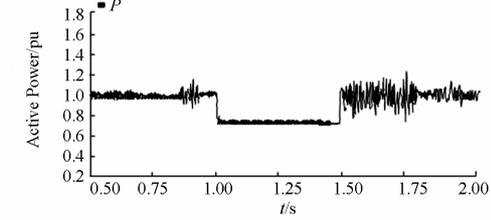
参数	取值
交流电网电压	20 kV
交流电网频率	50 Hz
直流侧给定电压	4.2 kV
直流侧卸荷电阻	26 Ω
直流侧滤波电容	3 000 μF
逆变器侧滤波电感	5 mH
电网跌落方式	三相对称跌落
跌落持续时间	0.5 s



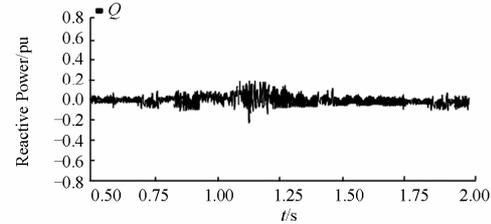
(a) 电网 a 相电压



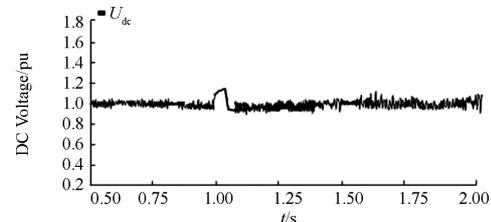
(b) 逆变器输出 a 相电流



(c) 逆变器输出有功功率



(d) 逆变器输出无功功率



(e) 直流侧电压

图 8 采取 LVRT 控制前的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform before LVRT control

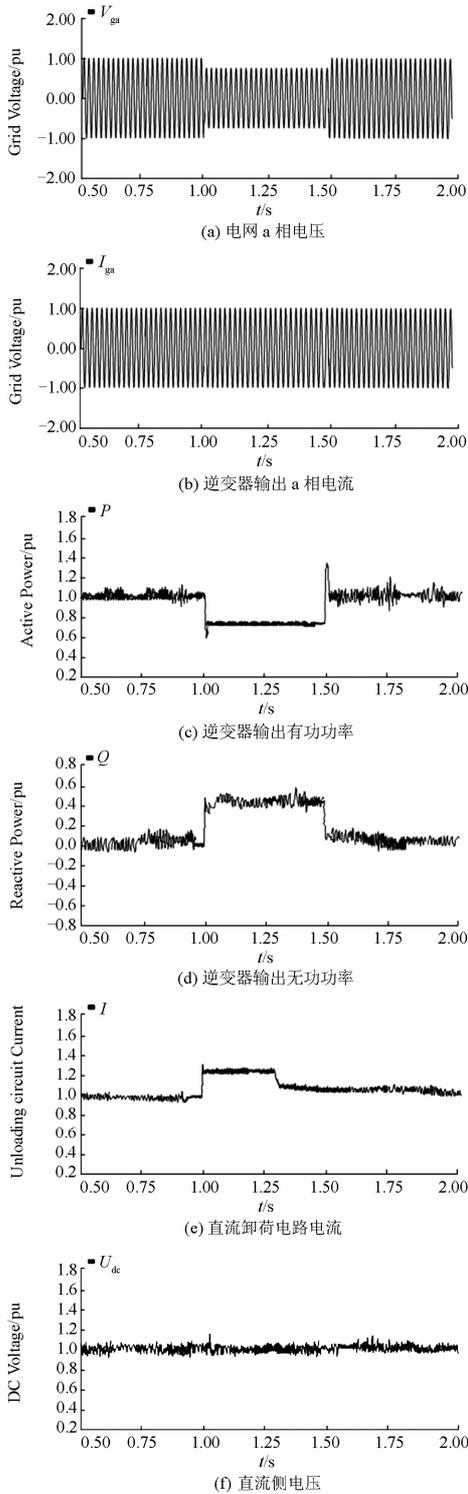


图9 采取 LVRT 控制后的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform after LVRT control

由图 8(a)和图 9(a)可知, 采取 LVRT 控制前电网电压跌落到 0.5 p.u., 采取 LVRT 控制后电网电压跌落到 0.75 p.u., 显然并网点电压得到了一定程度

的恢复。图 8(b)和图 9(b)中, 当电网电压发生跌落时, 采取 LVRT 控制前, 逆变器输出的电流会骤然增大, 这样就使得电流超过了额定电流的 1.1 倍, 导致光伏并网逆变器脱网运行; 采取 LVRT 控制后, 限制电流上升, 逆变器输出的电流在故障期间保持平稳, 能很好地限制在额定电流的 1.1 倍以内, 从而保护了逆变器的电力电子器件, 逆变器保持并网运行。从图 8(c)、图 8(d)和图 9(c)、图 9(d)中可知逆变器输出的有功功率在电压跌落时减小了, 逆变器还要在电压跌落期间向电网发送一定的无功功率, 根据电网电压的跌落深度发出相应的无功, 逆变器实现了有功和无功功率的协调控制; 在电网电压跌落期间, 逆变器进行无功优先控制, 根据图 2 可知, 光伏并网发电系统需有线性输出的无功电流, 输出的无功功率 $Q = i_q \cdot U$ 就会增大, 所以图 9(d)中逆变器输出的无功功率在电压跌落期间增大了, 在一定程度上支撑了电网电压的恢复。由图 9(e)可知, 电网电压跌落导致直流侧功率不平衡, 需投入直流卸荷电路, 卸荷电阻消耗直流侧电容上堆积的能量, 卸荷电路的电流增大, 随着能量的消耗, 卸荷电路的电流逐渐地减小, 当不平衡功率小于给定值时, 切出卸荷电路。由图 9(f)可知, 累积在直流侧电容上的不平衡功率由卸荷电路消耗, 从而抑制直流侧电压波动。

仿真结果显示光伏并网发电系统采取 LVRT 控制之后, 可以抑制逆变器输出的电流增大, 保持逆变器并网运行, 可以保持直流侧电压的稳定, 另外, 逆变器可以根据电压的跌落深度输出一定的无功功率, 从而使电压得以恢复。

4 结论

通过对光伏并网发电系统中的关键部件光伏并网逆变器的电压定向矢量控制, 实现了有功和无功的解耦, 在此基础上提出了 LVRT 控制策略。通过比较采取 LVRT 控制前和采取 LVRT 控制后的仿真波形, 在电网故障引起电压跌落期间, 卸荷电路抑制直流侧电压波动, LVRT 控制能使逆变器输出的电流保持平稳过渡, 光伏发电系统能够保持并网运行, 并能补偿一定的无功功率, 帮助电网快速摆脱故障恢复正常运行电压。本文为大型光伏发电系统的并网运行提供了理论依据。下一步将对电网发生不对称故障时的低电压穿越控制技术进行研究分析。

参考文献

[1] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析-光伏电站专题[J]. 电力系统保护

- 与控制, 2010, 38(18): 104-110.
- YANG De-zhou, WANG Li-ping, ZHANG Jun, et al. Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics—photovoltaic plant thematic[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.
- [2] 盛四清, 侯磊, 范辉, 等. 光伏电站接入孤立电网的动态建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 127-131.
- SHENG Si-qing, HOU Lei, FAN Hui, et al. Analysis on dynamic modeling and stability of isolated grid with photovoltaic station connected[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 127-131.
- [3] 张浙波, 刘建政, 梅红明. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 242-246.
- ZHANG Zhe-bo, LIU Jian-zheng, MEI Hong-ming. Study of reactive power compensation characteristics on a three-phase double-stage grid-connected photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 242-246.
- [4] MA Lin, LIAO Hua, LI Jing. Analysis of Chinese photovoltaic generation system low voltage ride through characters[C] // 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, 2012.
- [5] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
- HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [6] 李国庆, 钱叶牛, 刘序. 基于滑动模态控制的双馈风电机组低电压穿越控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 6-11.
- LI Guo-qing, QIAN Ye-niu, LIU Xu. Research on low voltage ride through control strategies for doubly fed induction generator based on sliding mode control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 6-11.
- [7] 蔚兰, 陈国呈, 宋小亮, 等. 一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 171-175.
- YU Lan, CHEN Guo-cheng, SONG Xiao-liang, et al. A low voltage ride-through of strategy for doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 171-175.
- [8] 姚骏, 廖勇. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-95.
- YAO Jun, LIAO Yong. A control strategy of low voltage ride-through for permanent magnet direct driven wind turbine under voltage fault condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-95.
- [9] 郑飞, 张军军. 基于 RTDS 的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 19-24.
- ZHENG Fei, ZHANG Jun-jun. The modeling and control strategy of low voltage ride-through for photovoltaic (PV) power systems based on RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 19-24.
- [10] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规范(试行)[S]. 2009.
- [11] WU Yong-shi, CHANG Chia-his, CHEN Yaow-ming, et al. The current control of PV inverter for low voltage ride through[C] // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
- [12] AKAGI H, WATANABE E H, AREDES M. 瞬时功率理论及其在电力调节中的应用[M]. 侯彦娥, 贾笑明, 党兰学, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009: 12-35.
- [13] 安志龙. 光伏并网控制策略与低电压穿越技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- AN Zhi-long. Research on the integration control strategy and low voltage ride-through technology of grid-connected[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [14] 李和明, 董淑慧, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
- LI He-ming, DONG Shu-hui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [15] 陈波, 朱晓东. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 8-11.
- CHEN Bo, ZHU Xiao-dong. Strategy for reactive control in low voltage ride-through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 8-11.

收稿日期: 2013-08-17; 修回日期: 2013-10-24

作者简介:

张明光(1971-), 男, 通信作者, 硕士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为电力系统自动化、变电站综合自动化等;

陈晓婧(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网发电技术. E-mail: chenxiaojing0723@163.com