

变功率跟踪轨迹的光伏并网低电压穿越策略

颜湘武, 赵佳乐

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 提出了一种新型的变功率跟踪轨迹的低电压穿越控制策略。通过电压跌落幅度的前馈控制对功率跟踪轨迹进行调节, 实时改变光伏电池端电压, 进而快速有效地控制光伏电池功率的输出, 实现逆变器两侧功率的平衡; 通过与并网逆变器的协同控制, 保证逆变器并网输出电流在不越限的前提下, 为电网提供尽可能多的有功功率和无功功率, 最大限度地支持电网电压的恢复, 实现了光伏并网系统的零电压穿越。通过在不同光照强度和温度条件下对多种场景的仿真模拟, 验证了所提控制策略的有效性。与传统控制策略相比, 采用该策略不需要添加额外的设备, 不仅实现了系统的安全、稳定运行, 而且降低了光伏发电系统的成本, 更具实用性。

关键词: 低电压穿越; 光伏发电系统; 变功率跟踪轨迹; 电压恢复

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.029

0 引言

随着光伏并网规模的不断增大, 光伏发电系统的安全稳定运行对电网的影响已不容忽视。当电网发生短时故障时, 机组的大规模脱网会严重影响电网电压和频率的稳定性, 威胁电网的安全、稳定运行, 甚至可能使局部电网崩溃, 引起较大面积供电中断, 因此电网要求光伏发电机组像传统常规机组一样具备一定的低电压穿越 LVRT(Low-Voltage Ride-Through)能力^[1-3]。国家标准《光伏发电站接入电力系统技术规定》中指出了光伏发电站应满足的低电压穿越要求: 并网点电压跌至 0 时, 光伏发电站应能不脱网连续运行 0.15 s; 并网点电压跌至低电压穿越能力要求范围以下时, 光伏发电站可以从电网切出。此外, 该规定还要求光伏电站应充分利用并网逆变器的无功容量及其调节作用, 发挥其动态无功支撑能力^[4-5]。

当电网电压发生暂降时, 往往会导致并网电流突增, 正常情况下电流会被限制在电流上限, 则有功率输出会受限。因为光伏电池发出的能量仍然保持在最大功率点不变, 所以多余的能量会堆积在直流母线电容上, 导致直流母线电压突增, 如何处理这部分多余的能量成为能否实现低电压穿越的关键。此外, 调节逆变器无功功率控制, 可以有助于电网电压的快速恢复, 这也是低电压穿越过程中不可忽视的

一部分。

在现有的低电压穿越策略中, 绝大多数都是通过改变系统拓扑或增加附加设备来实现低电压穿越。文献[6-8]中提出的直流母线处并联卸荷电阻法是其中最常用的一种方法。在故障期间, 卸荷电阻消耗光伏电池发出的多余能量来保持逆变器两侧功率的平衡, 限制直流侧电压的升高以及交流侧并网电流的过流, 从而满足低电压穿越的要求, 但这种方法并未考虑逆变器无功电流对电压恢复的支撑作用, 而且添加并联卸荷电阻不仅增加了成本, 其产生的大量热量也会影响并网系统的安全稳定。文献[9-11]提出了基于超级电容储能的低电压穿越策略, 利用超级电容固有的快速充放电特点, 实现低电压故障过程中对有功功率的控制, 超级电容在直流母线电压超过给定值时吸收多余的能量, 平衡逆变器两侧的能量, 抑制直流侧电压的上升。但增加超级电容会大幅增加装置的硬件成本, 使系统控制变得复杂, 增大了不确定性, 而且超级电容设备体积巨大, 给其安装和维护带来了很大不便。文献[12-13]针对单级光伏系统提出了基于 PQ 理论和 PR 控制方法的低电压穿越策略, 虽然实验验证了方法的有效性, 但是只考虑了电压发生较小幅度跌落的情况, 没有考虑更加严重的故障情况, 而且此方法只适用于单级光伏系统, 不能应用于目前使用比较普遍的两级式三相光伏并网系统。文献[14]提出了通过检测电网电压跌落信号, 将正常状态下逆变器的恒功率双闭环控制切换至故障状态下的恒并网电流单闭环控制的低电压穿越策略, 虽然这能保证并网电流不过流, 但由于故障状态下缺少直流母线电压外环控制, 因此该方法不能保证直流母线电压的稳定性, 直流母线会出现过电压。而且光伏发电系统的运行特性与环境因素以及电网电压的跌落幅度密切相关, 上述方法均没

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-06-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015-AA050603); 河北省科技计划项目(15214307D); 国家电网公司科技项目(SGTYHT/14-JS-188)

Project supported by the National High Technology R&D Program of China(863 Program)(2015AA050603), the Science and Technology Program of Hebei Province(15214307D) and the Science and Technology Program of SGCC(SGTYHT/14-JS-188)

有验证在不同环境条件和不同电压跌落幅度下策略的可行性,且没有分析在面对零电压穿越这种最严重的情况时系统的运行情况。

本文针对两级式三相光伏并网系统,在不增加上述所提到的并联卸荷电阻和超级电容等附属设备的前提下,保持原有系统结构配置,提出了一种变功率跟踪轨迹 VPPT(Variable Power Point Tracking)的光伏发电系统低电压穿越策略。当电网电压发生跌落时,通过电压跌落幅度的前馈对功率跟踪轨迹进行调节来控制光伏电池端电压,减少其发出的能量,结合逆变器的直接电流控制,快速平衡逆变器两侧的功率,使直流母线电压保持稳定,并使得并网输出电流不过流;通过改进逆变器的控制策略,根据电压跌落幅度的不同发出一定的无功功率来支持电网电压恢复;通过不同环境条件下多种模式的仿真分析可知,采用变功率跟踪轨迹的低电压穿越控制策略能够在提高系统稳定性和经济性的前提下,很好地实现光伏并网系统的低电压穿越功能。

1 两级式三相光伏并网系统模型

如图 1 所示,一个完整的两级式三相光伏并网系统应包括光伏电池、Boost 电路、逆变器和控制系统等部分。控制系统由 Boost 电路控制和逆变器控制两部分组成,Boost 部分控制光伏电池的输出功率并将电压抬升到一个合适的数值以便逆变器能够正常工作;逆变器部分通过电压电流双闭环控制直流母线电压并向电网侧输送其所需的电流。下文将具体介绍这些部分的模型。

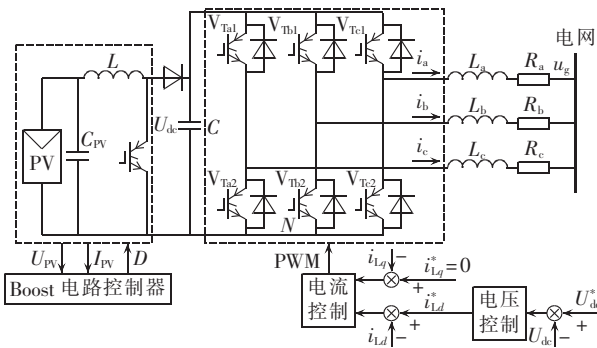


图 1 两级式三相光伏并网系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of two-stage three-phase PV system

1.1 光伏电池模型

光伏电池模型如图 2 所示,理想情况下串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 可以忽略不计,光伏电池输出电流表达式为:

$$I_{PV} = I_{sc} - I_{D0} [e^{qU_{PV}/(AKT)} - 1] \quad (1)$$

其中, I_{sc} 为光生电流,其大小与光照强度和温度有关,理想情况下其值等于短路电流; I_{D0} 为二极管饱和电

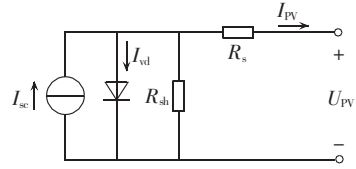


图 2 光伏电池模型

Fig.2 Model of PV cell

流; q 为电子电荷, $q = 1.6029 \times 10^{-19} \text{ C}$; A 为二极管的理想因子; K 为 Boltzman 系数, $K = 1.3819 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为光伏模块的结温。光伏电池的输出电流 I_{PV} 是关于光伏电池端电压 U_{PV} 的函数。

在保证一定精确度的前提下,光伏电池的输出电流如式(2)所示。

$$I_{PV} = I_{sc} \{ 1 - C_1 [e^{U_{PV}/(C_2 U_{oc})} - 1] \} \quad (2)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-U_m/(C_2 U_{oc})} \quad (3)$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1}$$

其中, U_m 和 I_m 分别为最大功率点电压和电流; U_{oc} 为开路电压; I_{sc} 为短路电流。

根据上述光伏电池的数学模型,可以得到在不同环境影响下的光伏特性变化情况。正常情况下,光伏电池的输出功率曲线是以最大功率点为极值的单峰值曲线;在不同光照强度和温度情况下,Boost 电路通过最大功率点跟踪策略可使得光伏电池工作在最大功率点。

1.2 并网逆变器的数学模型

在 dq 旋转坐标系下,并网逆变器的数学模型可以表示为:

$$\begin{aligned} L \frac{di_{Ld}}{dt} + Ri_{Ld} - \omega Li_{Lq} &= d_d U_{dc} - u_{gd} \\ L \frac{di_{Lq}}{dt} + Ri_{Lq} + \omega Li_{Ld} &= d_q U_{dc} - u_{gq} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} &= \frac{U_{dc}}{R} - \frac{3}{2} (d_d i_{Ld} + d_q i_{Lq}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $i_L = i_{Ld} + j i_{Lq}$ 为并网逆变器的输出电流矢量; $d = d_d + j d_q$ 为开关函数矢量, d_d, d_q 分别为开关函数在 d, q 轴上的分量; $u_g = u_{gd} + j u_{gq}$ 为电网电压矢量; L 和 R 分别为逆变器侧电感和电阻值; C 为直流侧电容值; ω 为角频率; U_{dc} 为直流侧电压。

2 变功率跟踪轨迹的低电压穿越策略

传统的低电压穿越策略中通常保持光伏电池始终工作在最大功率点处,而只对光伏系统的拓扑结构进行改进或增加辅助设备来消耗故障期间多余的有功功率,不仅花费巨大,而且对系统稳定性也有一定的影响。本文提出的变功率跟踪轨迹的低电压穿越策略通过在故障期间对光伏电池的功率跟踪轨迹进行调节,改变光伏电池端电压,从源头上减少了多余

的无功电流支撑以及有功电流与无功电流之间的关系,故障时并网逆变器 d 轴有功电流给定值应为:

$$i_{Ld}^* = i_{dref} P_{ratio} \quad (8)$$

其中, $P_{ratio} = \sqrt{1 - Q_{ratio}^2}$ 为有功电流与逆变器额定电流的比例系数。

3 仿真验证

在 MATLAB/Simulink 中建立一个容量为 5 kW 的两级式三相光伏并网系统的仿真模型,验证所提控制策略的可行性。仿真系统中的光伏电池参数如下:最大功率 $P_{max}=125$ W,最大功率点电压 $U_m=35.4$ V,最大功率点电流 $I_m=4.95$ A,开路电压 $U_{oc}=44.2$ V,短路电流 $I_{sc}=5.29$ A,串联数 $N_s=10$,并联数 $N_p=4$ 。仿真系统中的并网环节参数如下:电网电压幅值 $U_g=380$ V,直流母线电压 $U_{dc}=800$ V,电网频率 $f=50$ Hz,并网 LC 滤波器中 $L=0.005$ H 且 $R=0.01$ Ω ,直流母线电容 $C=4.7 \times 10^{-4}$ F,逆变器开关频率 $f=2$ kHz,Boost 电路电感 $L_B=0.1$ mH,Boost 电路开关频率 $f_B=2$ kHz,PI_LVRT 中 $K_{p1}=0.143$ 且 $K_{i1}=0.45$,PI_Boost 中 $K_{p2}=2$ 且 $K_{i2}=0.3$,有功功率环 PI 中 $K_{p3}=45$ 且 $K_{i3}=2500$,无功功率环 PI 中 $K_{p4}=45$ 且 $K_{i4}=2500$,电压环 PI 中 $K_{p5}=0.4$ 且 $K_{i5}=61$ 。

仿真模拟了光伏测试标准环境条件(光照强度 S 为 1000 W/m²,温度 T 为 25 $^{\circ}$ C)和非标准环境条件(光照强度 S 为 700 W/m²,温度 T 为 20 $^{\circ}$ C)2 种不同环境条件下,电网电压发生不同幅度跌落,采用本文提出的变功率跟踪轨迹的低电压穿越策略时系统的工作情况。

为了充分验证变功率跟踪轨迹的低电压穿越策略的可行性,仿真结果从并网电压 U 、并网电流 I 、输出有功功率 P 、输出无功功率 Q 、直流母线电压 U_{dc} 以及光伏电池端电压 U_{pv} 这 6 个关键观测量展示了低电压穿越过程中系统运行状态的动态变化过程。

3.1 标准环境条件下低电压穿越的过渡过程

图 5 反映的是光伏测量标准条件情况下,电网电压发生不同幅度跌落时,光伏发电系统的运行变化情况。图 5 左侧部分显示的是 $0.6 \sim 0.8$ s 电压跌落至额定电压的 70% 时的仿真结果,电压跌落持续时间为 0.2 s。可以看出并网电流只在跌落开始和跌落结束时有波动,但其幅值未超出限定电流的 1.1 倍,在标准范围之内,因此不会因为并网电流过流而损坏器件或触动保护使断路器关断。在跌落开始和结束的状态转换过程中直流母线电压有少许波动,但在整个故障过程中基本保持在参考电压 800 V 附近。在电压跌落期间,系统发出的有功功率由额定功率 5000 W 降低为 2800 W 左右,无功功率由 0 var 增加至 2050 var,与利用标准中要求提供的无功电流值和跟踪电

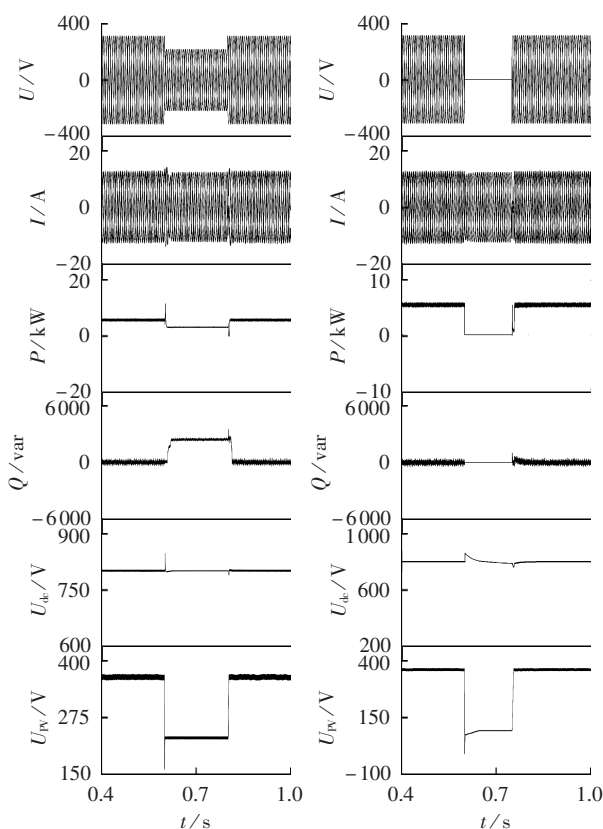


图 5 标准环境条件下光伏系统面对不同程度电压跌落时的仿真结果

Fig.5 Simulative results of PV system for different degrees of voltage drop in STC

网电压计算得到的功率基本相同。在故障阶段,光伏电池的端电压降低至 230 V 左右,光伏电池发出的功率减少,跌落状态结束时,光伏电池端电压又迅速恢复到跌落前的值。

图 5 右侧部分为 $0.6 \sim 0.75$ s 电网电压降至 0 时的情况,持续时间为 150 ms,是电网发生最严重故障的情况。可以看出用本文所提策略时,光伏系统可以保持 150 ms 不脱网,此时并网电流除了在状态转换时有波动,基本仍然保持在额定值,直流母线电压也没有越限,实现了零电压穿越,满足了国家电网的要求。根据低电压穿越要求中规定的对无功电流的需求,当电网电压低于额定值的 50% 时,并网电流应全部为无功电流,即 100% 无功电流,由于有功电流与无功电流的关系,有功电流应为 0 。因此当电网电压降至 0 时,并网电流 100% 为无功电流,有功电流降至 0 ,而由于此时电网电压为 0 ,因此有功功率和无功功率应如图 5 右侧部分所示均降至 0 。故障期间,光伏电池端电压降至 100 V 左右,当系统电压恢复时,光伏电池端电压也随之恢复。

3.2 非标准环境条件下低电压穿越的过渡过程

考虑到光照强度和温度等环境因素对光伏电池运行状态的影响,采用本文所提的策略在非标准环境条件(光照强度 S 为 700 W/m²,温度 T 为 20 $^{\circ}$ C)下的

仿真结果如图 6 所示。

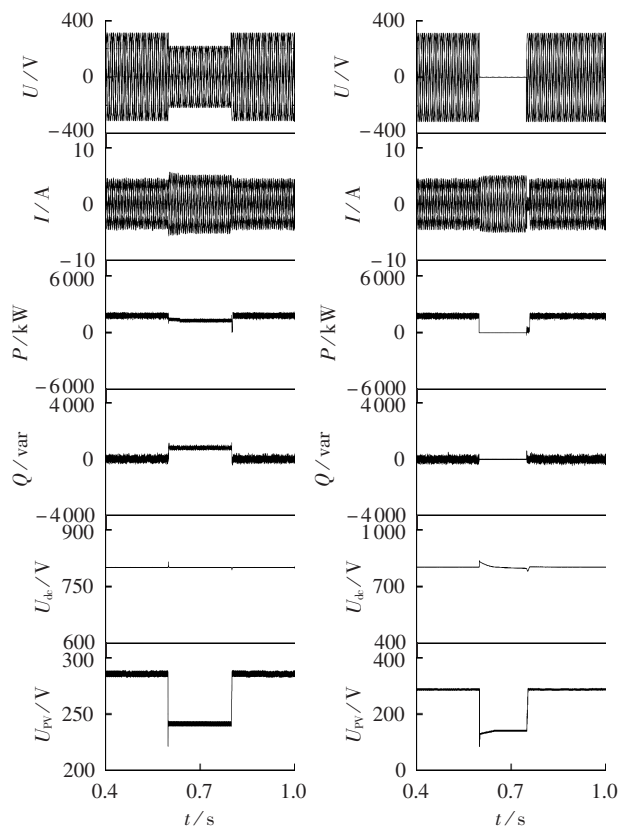


图 6 非标准环境条件下光伏系统面对不同程度电压降落时的仿真结果

Fig.6 Simulative results of PV system for different degrees of voltage drop in NSTC

图 6 左侧部分为 0.6~0.8 s 电网电压跌落至 70% 额定电压时系统的运行情况。可以发现运用本文所提的控制策略,光伏系统在非标准环境下仍然可以很好地实现低电压穿越,并可以按上文所述的需求提供一定的无功功率来支撑电网电压的恢复。图 6 右侧部分为 0.6~0.75 s 电网电压跌落至 0 时系统运行状态,此时系统可以保持 150 ms 不脱网连续运行,实现零电压穿越,并能为电网提供 100% 的无功电流支撑。

仿真结果验证了不同环境因素下和不同电压跌落幅度下本文所提策略的可行性,在不需要添加附加设备的情况下采用本文所提策略便可以很好地实现光伏系统的低电压穿越,甚至是零电压穿越。

4 结论

本文针对两级式三相光伏并网系统在电网电压发生三相对称跌落时的低电压穿越过程进行了相关研究,在不改变两级式三相光伏并网系统原有配置和不添加附加设备的前提下,提出了一种新型的变功率跟踪轨迹的低电压穿越控制策略,通过电压跌落幅度的前馈对功率跟踪轨迹进行调节来改变光伏电池端电压,进而快速有效地控制光伏电池功率的

输出,保证逆变器两侧功率的平衡,准确有效地抑制直流母线电压升高,维持直流母线电压稳定。通过并网逆变器的协同控制,在使并网输出电流不越限的前提下,为电网提供尽可能多的有功功率支撑的同时,还会发出一定的无功功率,最大限度地支持电网电压的恢复,最终实现了光伏并网系统的低电压穿越,甚至是零电压穿越。与传统控制策略相比,采用本文所提策略不需要添加额外的设备,提高了光伏发电系统的经济性。

参考文献:

- [1] 周林,邵念彬. 大型光伏电站无功电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 116-122.
ZHOU Lin, SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 116-122.
- [2] 杨丽君,张广超,吕雪姣,等. 考虑可控负荷的含分布式电源配电网短时故障供电恢复[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 11-17.
YANG Lijun, ZHANG Guangchao, LÜ Xuejiao, et al. Power restoration considering controllable load for short-time fault of distribution network with DGs [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 11-17.
- [3] 李升,卫志宏,孙国强,等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 17-23.
LI Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 17-23.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规范: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [5] 谭会征,李永丽,陈晓龙,等. 带低电压穿越特性的逆变型分布式电源对配电网短路电流的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 31-37.
TAN Huizheng, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Reactive voltage control partitioning based on power network pilot node identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 31-37.
- [6] 周稳,毕大强,戴瑜兴,等. 新能源发电低电压穿越的 VSG 实验平台研制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 107-111.
ZHOU Wen, BI Daqiang, DAI Yuxing, et al. Design of VSG test bed for LVRT of renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 107-111.
- [7] ARYA J, SAINI L M. Single stage single phase solar inverter with improved fault ride through capability [C]//2014 IEEE 6th India International Conference Power Electronics (IICPE). Kurukshetra, India: IEEE, 2014: 1-5.
- [8] 李生虎,安锐,孙琪. 基于串联制动电阻的生物能同步发电机组低电压穿越研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 1-6.
LI Shenghu, AN Rui, SUN Qi. SBR-based LVRT of synchronous generators in biomass power plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 1-6.
- [9] 刘耀远,曾成碧,李庭敏,等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 77-82.
LIU Yaoyuan, ZENG Chengbi, LI Tingmin, et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor [J]. Power System Protection and Con-

- trol,2014,42(13):77-82.
- [10] SHEN Yangwu,KE Deping,QIAO Wei,et al. Transient reconfiguration and coordinated control for power converters to enhance the LVRT of a DFIG wind turbine with an energy storage device[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2015,30(4):1679-1690.
- [11] 刘巨,姚伟,侯云鹤,等. 一种储能改善低电压穿越期间风电场注入电流特性的致稳策略[J]. 电工技术学报,2016,31(14):93-103.
- LIU Ju,YAO Wei,HOU Yunhe,et al. Stability control for improving the characteristic of wind farm injection current during low voltage ride-through using energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(14):93-103.
- [12] YANG Yonghui,FREDE B,ZHOU Zhixiang,et al. Benchmarking of grid fault modes in single-phase grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Industry Application,2013,49(5):2167-2176.
- [13] 郭小强,刘文钊. 谐波不平衡电网电压情况下三相并网逆变器故障穿越控制研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(10):1-7.
- GUO Xiaoqiang,LIU Wenzhao. Fault ride through control of three-phase grid-connected inverter under harmonic and unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(10):1-7.
- [14] WEN Gang,CHEN Yu,ZHONG Zhihao,et al. Dynamic voltage and current assignment strategies of nine-switch-converter-based DFIG wind power system for Low-Voltage Ride-Through (LVRT) under symmetrical grid voltage dip[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2016,52(4):3422-3434.
- [15] ESPINOZA N,BONGIORNO M,CARLSON O. Novel LVRT testing method for wind turbines using flexible VSC technology [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015,6(3):1140-1149.
- [16] 李少华,王秀丽,李泰,等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1849-1858.
- LI Shaohua,WANG Xiuli,LI Tai,et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):1849-1858.

作者简介:



颜湘武

颜湘武(1965—),男,湖南醴陵人,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统、电力电子高效变换以及新型储能与节能(**E-mail**: xiangwu@163.com);

赵佳乐(1992—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为光伏发电与并网技术(**E-mail**: zjlncpu@126.com)。

LVRT strategy of grid-connected photovoltaic system with variable power point tracking

YAN Xiangwu,ZHAO Jiale

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,
Baoding 071003,China)

Abstract: A control strategy of LVRT(Low-Voltage Ride-Through) is presented for the two-stage three-phase PV(Photo Voltaic) system with VPPT(Variable Power Point Tracking),which adopts the feed-forward control of voltage dip depth to regulate the power tracking trajectory for changing the voltage of PV cell to effectively control its power output for balancing the power between two sides of inverter,and applies the coordinated control with the grid-connecting inverter to supply as much active and reactive powers as possible to grid for fully supporting the grid voltage recovery to realize the ZVRT(Zero-Voltage Ride-Through) of grid-connected PV system without any limit violation of grid-connecting current. Multi-scenario simulation for different illumination intensities and site temperatures proves the effectiveness of the proposed strategy. Compared with traditional strategies,the practical strategy proposed,without any additional equipment,realizes the safe and stable system operation and reduces the system cost.

Key words: low-voltage ride-through; photovoltaic generation system; variable power point tracking; voltage recovery