

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.017

并网光伏系统低电压穿越策略综述*

黄显斌¹, 林 达¹, 王慧芳^{1*}, 吴 涛²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州, 310027; 2. 冀北电力科学研究所, 北京 100045)

摘要:针对光伏电源大规模接入电网后引起的电网稳定问题,对国内外电网故障时光伏低压穿越策略的研究成果进行了梳理与总结。首先分析了目前我国国家对光伏低电压穿越能力的要求以及实现途径;然后分别阐述了外加辅助设备和逆变器控制两大策略具体实现低电压穿越的各种方式以及发展情况;再对两大类穿越策略以及各种实现方式的优缺点进行了分析和总结,并为光伏低电压穿越策略的后续研究提供了建议和参考。研究表明,上述两类低压穿越策略可以按实际情况单独或配合使用,这样能更经济有效的实现光伏的低电压穿越。

关键词:光伏系统;低电压穿越;综述

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0589-07

Review of low voltage ride through strategy in grid-connected photovoltaic system

HUANG Xian-bin¹, LIN Da¹, WANG Hui-fang¹, WU Tao²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: Aiming at solving stability problems of the power grid when large-scale Photovoltaic is connected. it is very necessary to reorganize and summarize the research results on Photovoltaic low voltage ride through strategies while a power failure from home and abroad. Firstly, current requirements on Photovoltaic power low voltage ride-through capability in China and the approaches to achieve them are analyzed. Secondly, concrete approaches to achieve low voltage ride through and their developments are elaborated respectively with two strategies which are additional auxiliary equipment and inverter control. Then the advantages and disadvantages of the two ride-through strategies and their approaches are analyzed and summarized. This paper provides suggestions and references for further study on Photovoltaic power low voltage ride through strategies. Finally, The results indicate that Both types of low voltage ride through strategies can be used either alone or combined according to the actual situation in order to be more effective and economical.

Key words: photovoltaic system; low voltage ride through(LVRT); review

0 引 言

随着社会的发展,能源需求与日俱增,但化石能源的储备有限,因此可再生能源成为大家关注的重点。光伏作为一种公认的清洁可再生能源,装机容量逐年

递增^[1]。随着光伏渗透率增加,光伏接入点电压跌落后再不能简单地切除光伏,否则可能会导致故障范围扩大^[2]。在此背景下,我国的光伏发电站低电压穿越检测技术规程对光伏电站低电压穿越能力提出了明确要求。光伏低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)

收稿日期:2015-12-07

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-14-075)

作者简介:黄显斌(1990-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护与控制方面的研究. E-mail:xianbinhuang@foxmail.com

通信联系人:王慧芳,女,副教授,硕士生导师. E-mail:huifangwang@zju.edu.cn

是指当电网发生故障或扰动以后造成光伏并网点电压跌落,光伏电站能在一定的电压跌落范围和时间内保证不脱网连续运行,并提供动态无功功率来提高并网点电压^[3]。同时,光伏并网点电压跌落会给光伏设备带来一系列动态过程,如出现过电压、过电流和功率波动等,严重危害光伏设备本身及其控制系统的安全运行^[4],因此有必要研究光伏低电压穿越策略。

目前光伏低电压穿越策略的研究已经取得了不少研究成果。本研究对光伏低电压穿越策略各方面取得的主要技术成果进行梳理和综述,对今后还需要解决的问题提出自己的看法。

1 光伏低电压穿越要求

我国对光伏低电压穿越最新要求是当电力系统发生故障时,光伏并网点电压跌落到图 1 中折线以下时,光伏可以被切除退出运行,否则保持并网运行^[5]。

如图 1 所示, V_{pec} 为光伏接入点电压标幺值,在故障发生后 0~2 s 需要光伏具有低压穿越能力,即使光伏并网点电压跌落到 0,光伏也要并网运行 150 ms。

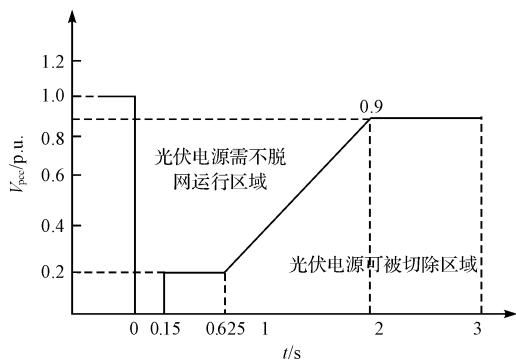


图 1 光伏低电压穿越要求

目前光伏实现低电压穿越主要有两大类途径:

①通过外加辅助设备;②通过光伏逆变器控制策略来实现。它们的特点及实现方式都不同,以下分别对这两类方式进行分析。

2 外加辅助设备策略

外加辅助设备有 3 种方式实现:①直流侧增设辅助设备;②交流侧增设辅助设备;③增设储能设备。

2.1 直流侧增设辅助设备

通过两级并网的光伏,在低电压穿越的时候,可以在逆变器直流侧加装卸负荷设备^[6-7]。其实现方式如图 2 所示,当电网电压跌落时,系统通过卸负载控制来实现直流电压的稳定,进而实现光伏的低电压穿越。

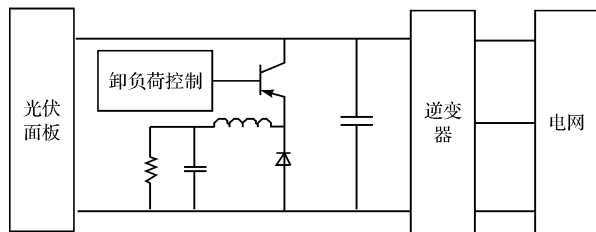


图 2 直流侧辅助设备低电压穿越策略

光伏在进行低电压穿越时,由于交流侧电压跌落,如果不改变逆变器有功功率输入,会导致有功电流快速增大,进而导致逆变器保护动作而退出电网运行。为维持其并网运行,在直流侧通过卸负荷控制动态调整输入有功大小,实现光伏的有功平衡,从而实现光伏的低电压穿越。

2.2 交流侧增设辅助设备

除了在直流侧添加辅助设备外,也可以在交流侧增加辅助设备来实现光伏低电压穿越^[8]。其实现方式如图 3 所示,在光伏与电网间串联一个动态电阻,通过控制动态制动电阻来实现光伏的低电压穿越。

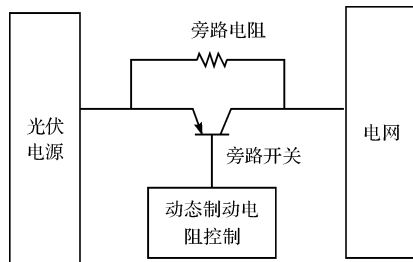


图 3 交流侧辅助设备低电压穿越策略

当检测到电网侧电压跌落,本研究根据跌落程度控制旁路开关的打开和闭合。低电压穿越时,光伏输出的有功不变,通过旁路开关的闭合可以把一部分有功消耗在旁路电阻上,从而实现光伏的低电压穿越。

以上两种辅助设备都是在低电压穿越时通过消耗光伏面板产生的多余有功功率,减少光伏对电网的有功输出,从而实现不脱网运行。

2.3 增设储能设备

除了消耗电网电压跌落时多余的有功功率,也可以通过增设储能设备来实现光伏的低电压穿越。一般情况下储能设备分两种,一种是超级电容,一种是储能电池。

其实现方式的示意图如图 4 所示。

增设的储能电池是并联在逆变器交流侧。通过光伏和储能电池协调控制来实现光伏的低电压穿越^[9]。在电压跌落时通过储能电池吸收光伏系统冗余的能量,同时储能电池也可以向电网注入无功功率。而增

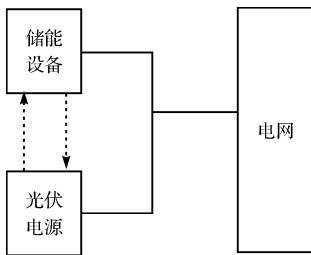


图4 增设储能设备低电压穿越策略

设的超级电容是并联在逆变器直流侧^[10-12]。在电网电压跌落时,超级电容吸收直流侧冗余能量,维持直流侧电压平衡,从而实现光伏的低电压穿越。

3 逆变器控制策略

更多学者研究通过改进光伏并网逆变器控制策略来实现光伏的低电压穿越,其实现方式为:当检测到电压跌落时,在保证逆变器安全运行的约束下,按控制目标重新分配光伏有功功率和无功功率的输出。逆变器控制方式主要有PI控制、PR控制和预测电流控制。

3.1 PI控制

大量学者提取逆变器交流侧正序电压和电流对逆变器进行控制^[13-22],通过对电压电流的坐标变换,实现逆变器有功和无功解耦控制^[23]。

其控制框图如图5所示。

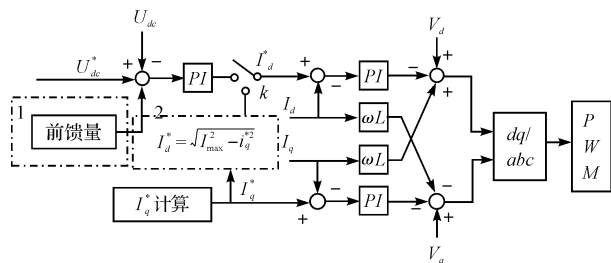


图5 正序PI控制框图

其低电压穿越控制可以通过开关 K 选择 dq 轴电流设定值 I_{dq}^* 来实现^[24]。当检测到电网电压跌落,根据并网电压跌落情况^[25]或者无功功率^[26]设置 q 轴电流参考值 I_q^* ,再根据图中虚线框1所示考虑逆变器容量限制设置 d 轴电流参考值 I_d^* 。该方法参数少易于调试和实现,但系统控制速度较慢,系统交流电流可能由于调节器设计不合适而出现超限,造成系统不稳定或故障^[27],因此如图中虚线框2中所示,有学者在 d 轴外环引入负荷电流和直流电压等前馈量,加快系统电流对扰动的响应,同时保持直流侧电压稳定^[28]。

上述方法都只针对三相电压对称跌落,而电网电压不对称跌落也是一种常见情况,上述方法不能有效

地实现电压不对称跌落的低电压穿越。在不对称电压跌落时,根据对称分量法可知电网中会存在负序分量,如果对其不采取相应的控制措施,会在电网产生有功和无功的二倍频波动,严重影响逆变器的稳定运行和电网的电能质量^[29],严重时甚至可能导致光伏因过电流脱网^[30]。

因此在电压不对称跌落时需要负序分量进行单独控制,通过结构完全对称的正、负序旋转坐标系对正、负序电流独立进行控制^[31-32]。

控制框图如图6所示。

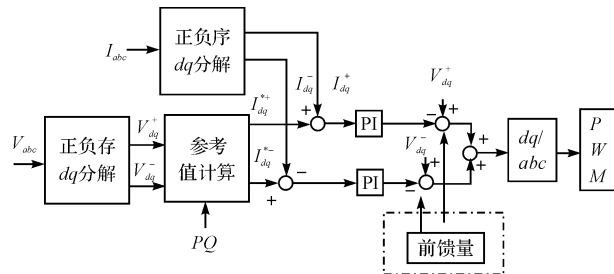


图6 正负序PI控制框图

在低电压穿越时,常见的控制目标有3种:保证三相输出电流平衡、消除有功波动和消除无功波动。根据不同的控制目标,可以计算不同正负序电流参考值 I_{dq}^{*+} 和 I_{dq}^{*-} ,另外采用瞬时值或平均值来计算,也会影响到控制的目标效果^[33]。

上述控制都未考虑滤波电容电感的影响,在大容量光伏并网条件下,LCL滤波器可显著降低滤波电感设计值,减小系统的体积和损耗,但存在谐振问题。为解决这个问题,本研究引入滤波电容电流作为前馈量,如图6中虚线框中所示,可以防止谐振并保证逆变效率^[34-35]。

此外,正、负序PI控制虽然可以实现对负序电流的控制,但是前提是对电压电流进行正、负序分离。也就是说,正、负序PI控制的效果很大程度上受正负序分离方法的准确性和快速性影响。常用的正负序分离方法及缺点如表1所示。

表1 正、负序分离方法及缺点

正、负序分离方法	缺点
滤波器分离	滤波器的延时较大
陷波器分离	性能好坏受参数影响
T/4 延时法	抗扰动性较差
解耦法	有延时,抗扰动差
二阶广义积分器	有 T/4 时间延时

为准确快速地进行正负序分离,有学者提出准无延迟正负序分离算法^[36],从而提高正负序PI控制动态响应速度。

正负序 PI 控制虽然能有效地抑制直流侧波动、交流侧有功无功波动和满足逆变器安全运行约束^[37-38]，但是其控制参数多，不利于调试，且控制效果受正负序分离方法延时影响。为简化控制方法，文献[39]通过基波负序电压前馈控制策略和改进逆变器的开关函数来消除不对称故障时的负序基波电压和三次谐波，但是其不能实现直流侧电压稳定。为进一步简化控制方法，有很多学者用比例谐振(PR)控制来实现光伏的低电压穿越控制。

3.2 PR 控制

PR 控制是由一个比例环节和一个谐振环节组成。PR 控制器被认为是对交流信号控制的“比例积分器”。在静止坐标系中利用 PR 控制能够实现对交流信号的零稳态误差控制。对三相并网逆变器利用 PR 控制时，由于在 $\alpha\beta$ 坐标系中可以完成控制目标，控制步骤减少，无需转换到 dq 坐标系中，与此同时不需要进行解耦控制。PR 控制的引入大大简化了系统的控制，且有效减小了基于正负序 PI 控制算法引入的系统延时^[40]。采用 PR 控制的典型框图^[41]如图 7 所示。

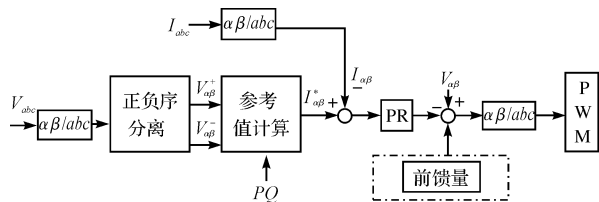


图 7 典型 PR 控制框图

为了进一步提高静止坐标系控制对于电网电压突变的抗干扰能力、降低过电流，本研究在已有静止坐标系比例谐振控制的基础上，引入了采用带有比例系数的正序网压前馈控制方法^[42]，如图 7 中虚线框所示。由于大容量光伏并网多采用 LCL 滤波，本研究引入电容电流反馈，采取多环控制方式，通过对逆变器直流侧电压和网侧电压的分开控制实现对谐振点的抑制^[43]。以上改进都是在 PR 控制上进行的，能提高并网稳定性或抑制谐振。

理想的 PR 控制在控制器对谐振点处信号具有无限大增益，非谐振点处信号几乎无增益作用，但电网电压频率允许 ± 0.5 Hz 的波动，同时考虑其对模拟器件的参数精度和数字系统精度要求很高，所以有学者采用更容易实现的准 PR 控制实现光伏低电压穿越^[44]。

3.3 预测电流控制

预测电流控制(predictive current control, PCC)就

是强迫逆变器输出电流在一个开关周期内跟随一个预先给定的电流参考值变化^[45]，因其具有良好的动静态特性，近年来广泛地应用于逆变器控制。

常用的预测电流控制有无差拍电流控制(dead-beat predictive current control, DPCC)^[46]和模型预测电流控制(model predictive current control, MPCC)^[47-48]。无差拍电流控制是当开关频率较高时，根据光伏系统的状态方程和输出的反馈电流信号推算出下一个控制周期逆变器的开关时间，使得下一个开关周期的给定电流信号和实际电流信号误差为零。其典型控制框图^[49]如图 8 所示。

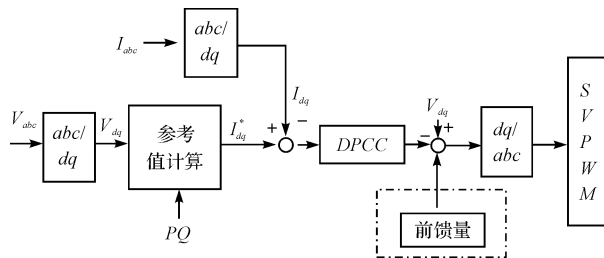


图 8 典型无差拍电流预测控制框图

通过增加电网电压前馈环节^[50]可以抑制或消除电网中的谐波，如图 8 中虚线框所示。但上述控制方式主要针对光伏网侧发生三相对称电压跌落。对不对称电网电压跌落，基于电压空间矢量调制(SVM)，可以实现正序负序电流的精确控制^[51]。其控制框图如图 9 所示。

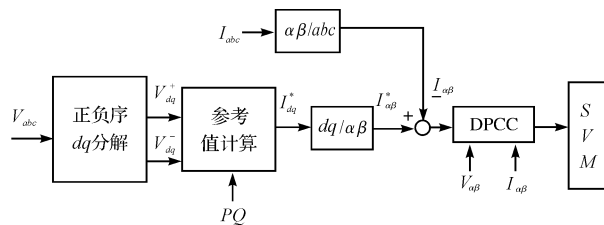


图 9 基于 SVM 无差拍电流预测控制

模型预测控制首先要建立一个能预测将来行为的系统模型。通常构造一个价值函数来预测将来行为，选择下一个采样周期的最佳变量作为控制变量使这个价值函数达到最小值^[52]。该控制方法具备实时性好与精度高的优点，其控制框图如图 10 所示。

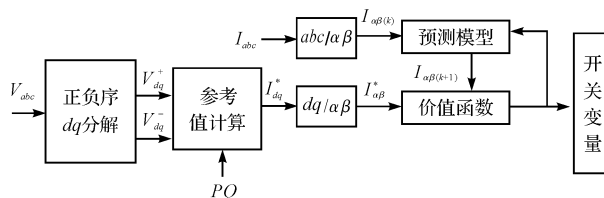


图 10 模型电流预测控制框图

不对称电压跌落时,该控制能实现抑制有功功率波动和消除负序电流等多目标的控制,提高输出电流质量,且动态响应快。除此之外,该控制不需要对网侧的电流进行、正负序分离,从而减小电流在该过程中产生的延时和误差。虽然模型电流预测控制具有上述众多优点但由于价值函数选取方式不同,可能存在逆变器开关频率不固定的缺陷^[53-54]。

光伏低电压穿越时,预测电流控制策略相对传统的PI和PR控制策略具有更良好的静态特性,但现阶段研究并未考虑光伏并网滤波器对其控制效果的影响。

表2 不同光伏低电压穿越策略的优缺点

低电压穿越策略		优点	缺点
外加辅助设备	直流侧卸负荷	有效稳定直流侧电压	消耗多余的冗余功率、不经济
	交流侧动态电阻	简单有效的实现低电压穿越	增设额外硬件、增加成本
	储能设备 超级电容 储能电池	平稳直流侧电压、储存能量 可提供大量无功支持、储存多余有功功率	
逆变器控制	传统PI控制	控制简单易实现、控制参数少	只适合电压对称跌落、响应速度慢、参数影响大
	正负序PI控制	能抑制有功无功二倍频波动、能消除负序电流	控制复杂、算法实现难度大、在线运算量大
	PR控制	无静差调节、无需dq变换、无耦合、易实现低次谐波补偿、有效消除谐波	模拟器件的参数精度和数字系统精度要求高、只对固定频率有效
	PCC DPPC MPCC	可不需对电流正负序分解、实时性好、精度高、并未考虑滤波电路对自适应性强、鲁棒性强	存在固定时滞 系统的影晌 逆变器开关频率不固定

由此可见,光伏低电压穿越问题尚未完全妥善解决,还有较大研究空间。下面给出几个问题的研究建议,供同行参考:

- (1) 如何实现电网不对称电压跌落时同时抑制有功波动,无功波动,电流畸变问题,提高电能质量;
- (2) 如何充分合理利用逆变器无功输出能力,以实现电压提供支持作用;
- (3) 如何分析并提高光伏电站内多台逆变器协同低电压穿越能力;
- (4) 基于电流预测控制的低电压穿越策略较传统控制有明显优势,但在大容量光伏并网多采用LCL滤波,如何消除滤波电路的谐振问题。

5 结束语

本研究总结了现有的光伏低电压穿越策略,对这些策略进行了详细的介绍与分析,比较和总结了不同低电压穿越策略的优缺点并提出了还需解决的问题。

随着电网发展,光伏低电压穿越策略一般优先选择逆变器控制策略,一是节约成本,二是能通过控制策略在不增加硬件的情况下为故障电网提供无功支撑。然而考虑到逆变器容量限制,在有功功率输出不变时,光伏提供的无功补偿能力有限^[55],如果低电压穿越时降低有功功率输出是可以提高无功输出能力,但需要

4 光伏 LVRT 策略优、缺点及研究建议

采用外加辅助设备电压穿越,其明显的优点是对逆变器控制要求不高,实现简单;其最大缺点是要增添硬件设备,增加投资成本。而采用改进逆变器控制策略实现低电压穿越,不一定需要增加硬件成本,同时还能在电网电压跌落时提供一定的无功功率,对电网电压起支撑作用。不同光伏低电压穿越策略的优缺点如表2所示。

增加相应控制策略或增设相应外部设备。由此可见,两类低电压穿越策略可以按实际情况单独或配合使用,这样能更经济有效地实现光伏的低电压穿越^[56]。本研究为后续具体实现并改进光伏低电压穿越策略提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 许洪华. 中国光伏发电技术发展研究[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 77-81.
- [2] 战杰,董存,张彦,等. MW级光伏电站建模及其并网对配电网的影响分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2011, 14(1): 1-6.
- [3] 漆汉宏,王晓娜,魏艳君,等. 消除有功振荡的改进低电压穿越方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 416-423.
- [4] 甄晓亚,尹忠东,王云飞,等. 太阳能发电低电压穿越技术综述[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 65-68.
- [5] 国家电网公司. Q/GDW-2011 光伏电站接入电网技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2011.
- [6] 张明光,陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
- [7] 蔡长青,胡金. 光伏电站直流侧提高LVRT能力的电压控制方法[J]. 农村电气化, 2015(6): 50-51.
- [8] 朱洪江,刘江涛,马君豪,等. 利用串联制动电阻提高光伏系统并网的低电压穿越能力[J]. 电力学报, 2015, 30(4): 328-333.

- [9] 范柱烽,毕大强,任先文,等.光储微电网的低电压穿越控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):6-12.
- [10] 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.
- [11] 舒大松,黄挚雄,康伦,等.基于超级电容储能的光伏并网低电压穿越研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(8):60-64.
- [12] 刘珊.光伏发电系统低电压穿越技术的研究[D].湘潭:湘潭大学机械工程学院,2014.
- [13] 施向前,耿乙文,黄尊臣,等.光伏电站低电压穿越技术研究[J].电测与仪表,2015,52(8):61-66.
- [14] 郑飞,张建军,丁明昌.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.
- [15] 王京保,曾国宏,荆龙,等.光伏并网逆变器及其低电压穿越技术[J].低压电器,2012(17):26-30.
- [16] 赵贵龙.三相光伏并网逆变系统低电压穿越技术的研究[D].淮南:安徽理工大学机械工程学院,2015.
- [17] 叶小晖,刘涛,宋新立,等.适用于全过程动态仿真的光伏电站有功控制模型[J].电网技术,2015,39(3):587-593.
- [18] 黄旭召,陈丽娟,王致杰,等.并网光伏发电系统低压穿越暂态特性研究[J].电力学报,2015,30(4):287-292.
- [19] 法军义.光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J].城市建筑,2014,11(1):136.
- [20] 杨舟,杨滔,马成斌,等.基于直流母线电压控制的大功率光伏逆变器的低电压穿越的实现[J].装备机械,2014(2):14-19.
- [21] 贺敬,王顺来,张梅,等.光伏发电站低电压穿越特性仿真研究[J].电气应用,2014,33(23):32-40.
- [22] 袁晓玲,宋鹏飞,范发靖,等.光伏逆变器低电压穿越控制策略[J].电力电子技术,2013,41(3):67-69.
- [23] 党克,郑玉浩,胡金,等.光伏逆变器漏电流消除及其LVRT控制研究[J].电力电子技术,2015,49(8):6-8.
- [24] 王巨波,鲍伟,徐文丽.基于RTDS的光伏发电系统对称跌落低电压穿越无功控制策略[J].华东电力,2014,42(6):1098-1103.
- [25] 潘国清,曾德辉,王钢,等.含PQ控制逆变型分布式的配电网故障分析方法[J].中国电机工程学报,2014,34(4):555-561.
- [26] 陈波,朱晓东,朱凌志,等.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):6-12.
- [27] 张雅静,郑琼林,卢远宏,等.光伏并网逆变器低电压穿越优化设计研究[J].太阳能学报,2013,34(6):984-990.
- [28] 张雅静,郑琼林,马亮,等.采用双环控制的光伏并网逆变器低电压穿越[J].电工技术学报,2013,28(12):136-141.
- [29] 陈亚爱,刘劲东,周京华,等.光伏并网发电系统的低电压穿越技术[J].电源技术,2014,38(6):1095-1098.
- [30] 郭培健,伍丰林,田凯,等.基于电压前馈的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J].电气传动,2013,43(2):31-35.
- [31] 翦志强,司徒琴.三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(14):1-5.
- [32] 韩贤岁,刘其辉.对称和不对称故障下的并网光伏逆变器低电压穿越研究[J].电测与仪表,2015,52(9):113-118.
- [33] CASTILLAM, MIRETJ, LUISSOSA J Grid-fault control scheme for three-phase photovoltaic inverters with adjustable power quality characteristics [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2010, 25(12): 2930-2940.
- [34] 周皓.三电平光伏并网逆变器拓扑结构及控制策略的研究[D].北京:北京科技大学机械工程学院,2015.
- [35] 周京华,刘劲东,陈亚爱,等.大功率光伏逆变器的低电压穿越控制[J].电网技术,2013,(37):1799-1807.
- [36] 王芸,曹广忠.基于一种快速变量正负序分离方法的不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J].太阳能学报,2014,35(9):1607-1613.
- [37] Rodriguez P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2007, 54(5): 258-2592.
- [38] Miret J, Castilla M, Camacho A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2012, 27(10): 4262-4270.

(下转第 601 页)

本文引用格式:

黄显斌,林达,王慧芳,等.并网光伏系统低电压穿越策略综述[J].机电工程,2016,33(5):589-594,601.

HUANG Xian-bin, LIN Da, WANG Hui-fang, et al. Review of low voltage ride through strategy in grid-connected photovoltaic system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(5): 589-594, 601.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>