

分布式发电电压协调控制策略研究

李恒真¹, 谢志文¹, 吴树鸿¹, 范心明¹, 刘志陆¹, 赵 阳²

(1. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 本文研究了 50 kW 分布式发电电压自治装置的控制策略, 其原理是采用并网运行时的电网频率和电网电压作为支撑, 根据输入输出功率、直流侧电压或充放电电流在 AC/DC 侧设计了恒压控制器、恒流控制器、Vf 控制器, 在 DC/DC 侧设计了恒压控制器、恒流控制器。本文搭建了试验平台对分布式发电电压自治装置进行测试, 感性无功降低电压实验和容性无功升高电压实验的结果表明, 该装置具有良好的无功变化抗扰度。直流母线电压稳定性测试实验结果表明, 该装置的电压具有良好的稳定性。

[关键词] 分布式发电, 电压自治控制, 装置试验

[中图分类号] TM461; TN03 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2016)04-0028-06

Research on Autonomous Control Strategies for Distributed Generation Voltage

Li Hengzhen¹, Xie Zhiwen¹, Wu Shuhong¹, Fan Xinming¹, Liu Zhilu¹, Zhao Yang²

(1. Foshan Power Supply Bureau of China Southern Power Grid, Foshan 528000, China)

(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The paper designs effective control strategies for the autonomous device of 50 kW distributed generation voltage. On the support of the power frequency and network voltage in grid-connected operation, the author puts constant voltage controllers, constant current controllers and VF controllers on AC/DC side in the light of input & output power, DC side voltage or charging & discharging current, and puts constant pressure controllers and constant current controllers on DC/DC side. The paper builds a testing platform to conduct actual measurements of the autonomous device of distributed generation voltage under the control strategies designed here. The inductive reactive voltage derating experiment and capacitive reactive voltage boosting experiment have proven that the device possesses fine noise immunity of reactive power variation, and the stability test of DC-bus voltage has proven that the device's voltage is highly stable.

Key words: distributed generation, autonomous control of voltage, device's test

在全球传统能源稀缺压力下, 分布式新能源在各国得到大力发展。分布式发电优点良多, 但与传统能源相比, 也有新的技术难关。不论是风力发电、光伏发电还是地热发电、潮汐发电等分布式发电, 都有一个相同的特点, 即电压不稳定, 从而影响分布式发电的供电质量^[1-2]。为了攻克这一技术难题, 近年来国内外在微电网并网的控制策略上做了细致研究。文献[3-5]研究了分布式发电并网运行时静态电压稳定特性及维持电压稳定的控制策略。文献[6-8]研究了电压突变或切换运行模式时分布式发电电压自适应的控制策略。

本文在前人研究的基础上, 研制了一款 50 kW 分布式发电电压自治装置, 并对分布式发电电压控制策略进一步进行了研究与验证。针对本文研制的电压自治装置, 本文分别在 AC/DC 侧和 DC/DC 侧设计了直流恒压、恒流控制器、V/f 控制器, 并搭建试验测试平台, 对控制器的实际效果进行性能测试。

1 分布式发电电压自治装置的拓扑结构

本文研制的是一款 50 kW 分布式发电电压自治装置, 其拓扑结构如图 1 所示, 该装置可分为 DC/DC

收稿日期: 2016-10-11.

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJQQ20152031).

通讯联系人: 赵阳, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

变换侧、DC/AC 变换侧以及直流母线三部分. 其中 DC/DC 低压侧由三条独立支路组成,各支路均采用非隔离型双向 DC/DC 变换拓扑,可直接与光伏、储能单元相连并且根据需求进行恒压、恒流控制;DC/AC 变换侧采用两电平三相半桥拓扑结构,在系统并网运行时交流侧与电网相连 DC/AC 进行功率控制,系统离网运行时进行恒压恒频控制,为负荷提供稳定的交流电源. 分布式发电电压自治装置 DC/DC 变换高压侧与 DC/AC 变换直流侧通过直流母线相连,直流母线电压的稳定性直接影响系统的稳定性.

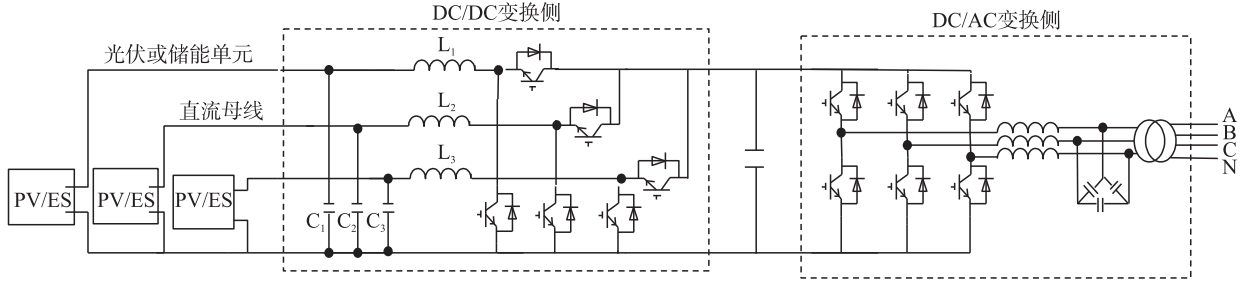


图1 分布式发电电压自治装置拓扑

Fig. 1 Topology of distributed generation voltage self-autonomous device

2 控制策略设计

2.1 AC/DC 侧控制策略

并网运行时,直接采用电网频率和电压作为支撑,可根据需要对输入输出功率、直流侧电压或充放电电流进行有效控制.

(1) 直流侧恒压控制

AC/DC 直流侧恒压控制的目的是使储能系统直流母线电压维持在参考值左右. 外环采用直流电压 PI 调节,维持电池电压的恒定. 电压给定值为储能电池允许的电压值,电压实际值由测量元件直接测得直流母线电压. 恒压控制框图如图2所示,图中 V_{ref} 为直流电压参考值, V_{dc} 为直流电压实测值.

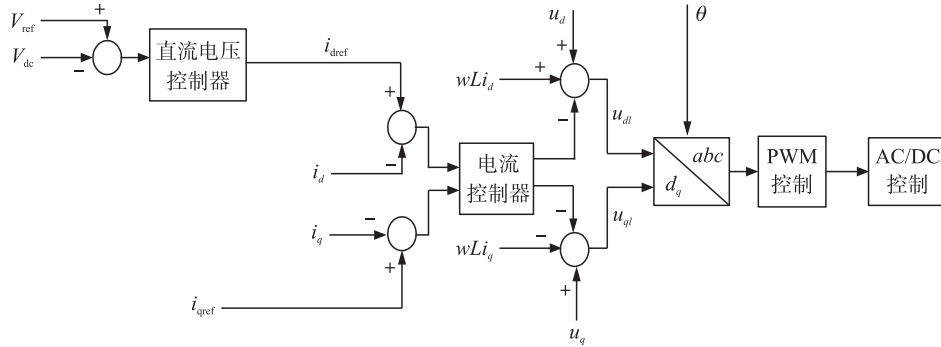


图2 AC/DC 恒压控制框图

Fig. 2 The block diagram of AC/DC constant voltage control

电流内环无功电流的参考值由有功电流参考值和功率因数求取:

$$i_{qref} = \frac{\sqrt{(1-\lambda^2)}}{\lambda} \cdot i_{dref}, \quad (1)$$

式中, λ 为功率因素. 直流电压参考值 V_{ref} 与实际测量值 V_{dc} 之间的差值在 PI 调节器作用下,为逆变器输出 d 轴电流提供参考 i_{dref} . 输出电流参考值 i_d 和电流实际值 i_q 的差值在 PI 调节器作用下,为逆变器输出电压提供参考分量. 同时,根据逆变器出口滤波电感参数 L ,计算 dq 轴电压耦合分量 wLi_d 、 wLi_q ,通过叠加,得到逆变器输出电压参考值 u_{dl} 、 u_{ql} ,再经过坐标变换,将其转化为三相 abc 坐标分量,对电压自治装置进行控制.

(2) 直流侧恒流控制

电压自治装置直流侧恒流控制的目的是使储能系统直流母线电流维持在参考值左右. 外环采用直流

电流 PI 调节,维持储能电池输入/输出电流的恒定. 电流给定值必须在储能电池允许范围内,实际值由测量元件直接测得. 恒流控制框图如图 3 所示,图中 I_{ref} 为直流电流参考值, I_{dc} 为直流电流实测值.

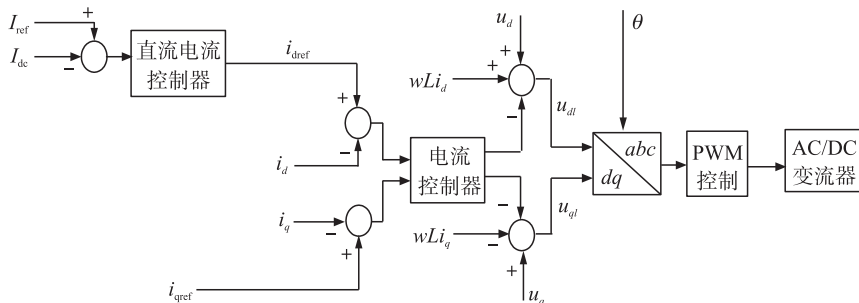


图 3 恒流控制框图

Fig. 3 The block diagram of constant current control

(3) 电压/频率(V/f)控制

一体化装置离网运行时,独立为负荷供电,通常采用 V/f 控制方法,控制交流侧的电压和频率为系统提供稳定的电压和频率支撑. V/f 控制的基本思想是无论储能系统的输出功率如何变化,其出口电压的幅值和频率均不会发生变化.

本文采用电压电流双闭环控制,如图 4 所示,以输出电压为外环控制,滤波电感电流为内环控制. 图中, u_{ref} 为给定电压参考值, u_{dref} 、 u_{qref} 分别为电压参考值 dq 的分量, i_{dref} 、 i_{qref} 分别为交流侧电流 dq 轴分量的参考值, i_d 、 i_q 分别为交流侧电流 dq 轴分量的实际值, v_d 、 v_q 分别为逆变器输出电压 dq 轴分量的实际值, v_{sd} 、 v_{sq} 分别为逆变器输出电压 dq 轴分量的参考值, L_s 为交流侧耦合电感, f 为给定频率指令, ω 为角频率, θ 为电压相位角.

该控制策略,在电压闭环的基础上,增加了电流内环,实现了既对输出电压有效值进行控制,又对输出电流的波形进行控制. 电压外环控制为交流侧提供电压支撑,电感电流内环控制能够快速跟踪负荷变化,以提高动态响应速度.

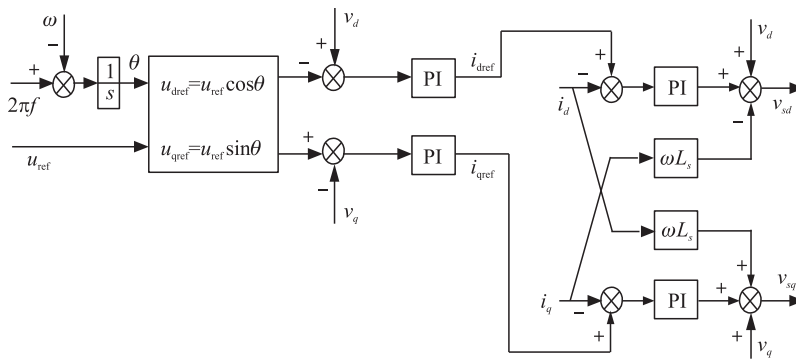


图 4 电压电流双闭环控制框图

Fig. 4 The block diagram of voltage and current double closed-loop control

2.2 DC/DC 侧控制策略

(1) 恒压控制

DC/DC 恒压控制根据控制点电压不同能够实现对低压侧或高压侧的恒压控制,是进行母线电压稳定控制和 MPPT 功能的基础. DC/DC 的恒压控制框图如图 5 所示, V_{ref} 、 V_{dc} 分别为直流母线电压参考值和实测值, I_{ref} 、 I_{dc} 分别为直流储能装置侧充放电电流的参考值和实测值.

其控制原理如下:直流母线电压参考值 V_{ref} 与实际测量值 V_{dc} 之间的差值在 PI 调节器作用下,为 DC/DC 侧充放电电流提供参考值 I_{ref} . 其中,当 $V_{\text{ref}} > V_{\text{dc}}$ 时放电,使母线电压升高;当 $V_{\text{ref}} < V_{\text{dc}}$ 时充电,使母线电压下降. 直流充放电电流参考值 I_{ref} 和实际值 I_{dc} 的差值在 PI 调节器作用下,输出调制度,和三角载波相比较进行占空比调节,输出控制脉冲. 为使充放电切换过程较平滑,一般采用两个控制器并行,根据电压差值控制充放电脉冲的切换,对 DC/DC 变换器进行控制.

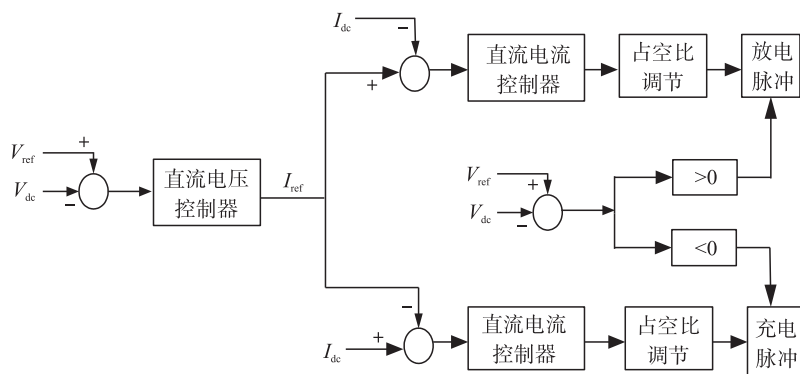


图 5 DC/DC 的恒压控制框图

Fig. 5 The block diagram of DC/DC constant voltage control

(2) 恒流控制

DC/DC 恒流控制能够实现对所接入储能电池的充放电,保证电池电量维持在一定范围内以便于系统在离网状态下运行. DC/DC 的恒流控制框图如图 6 所示, I_{ref} 、 I_{dc} 分别为直流储能装置侧充放电电流的参考值和实测值. 其控制原理如下:直流储能侧充放电电流参考值 I_{ref} 与实际测量值 I_{dc} 之间的差值在 PI 调节器作用下,输出调制度,和三角载波相比较进行占空比调节,输出控制脉冲. 其中,当电流参考值 $I_{ref} > 0$ 时,储能系统放电;当电流参考值 $I_{ref} < 0$ 时,储能系统充电. 为使充放电切换过程较平滑,一般采用两个控制器并行,根据电流参考值的符号控制充放电脉冲的切换,对 DC/DC 变换器进行控制.

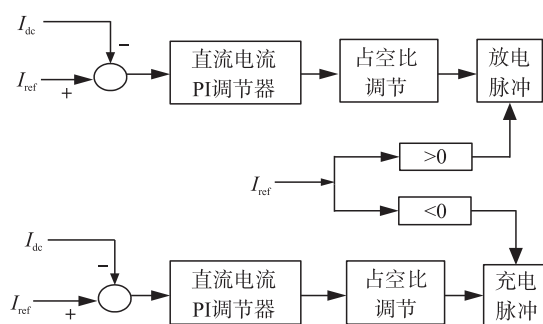


图 6 DC/DC 侧恒流控制框图

Fig. 6 The block diagram of DC/DC side constant current control

3 实验测试平台与测试结果分析

3.1 分布式发电电压自治装置实验测试平台

为实现对电压自治装置的各项功能测试,并对所提出控制策略的可行性进行验证,搭建了如图 7 所示的实验测试平台,平台包含:120 kW 光伏模拟器、60 kWh 铁锂电池、100 kWh 铅酸电池、100 kVA 电网模拟器、50 kVA 分布式发电电压自治装置、100 kVA 交流可调负荷. 电压自治装置直流侧包含 3 个独立支路分别与光

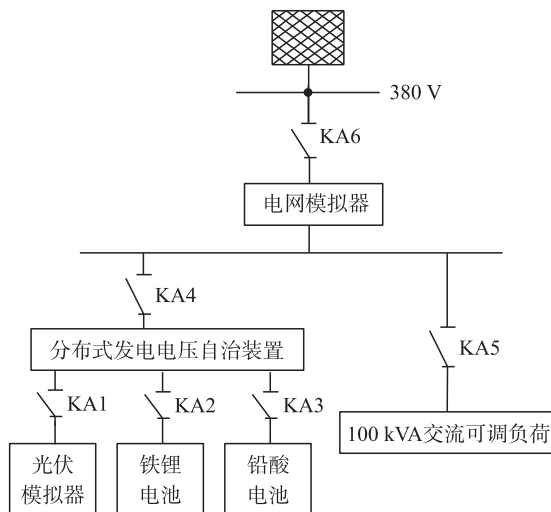


图 7 电压自治装置试验测试平台

Fig. 7 The testing platform of voltage autonomous device experiment

伏模拟器、铁锂电池、铅酸电池相连,交流侧与电网模拟器相连. 基于该试验平台能够实现对分布式发电电压自治装置直流母线电压稳定性测试、MPPT 功能测试以及分布式光伏/储能协调运行控制测试.

3.2 实验测试

(1) 网侧电压调节功能测试

如图 8 所示为正常情况下电压波形,此时电压幅值为额定的 220 V,后面在电压出现降低或升高时,通过无功功率调节分布式储能系统内部电压水平.

①感性无功降低电压实验

当系统中分布式发电功率较大或系统容性负荷较重,导致系统电压升高至 230 V,通过发出感性无功进行调节电压. 图 9 为发出 10 kvar 感性无功时电压变化情况,电压由 230 V 降低至 225 V. 图 10 为发出 20 kvar 感性无功时电压变化情况,电压由 230 V 降低至 220 V. 可以看出,随着无功功率的变化幅度的增加,电压的变化幅度也随之增加.

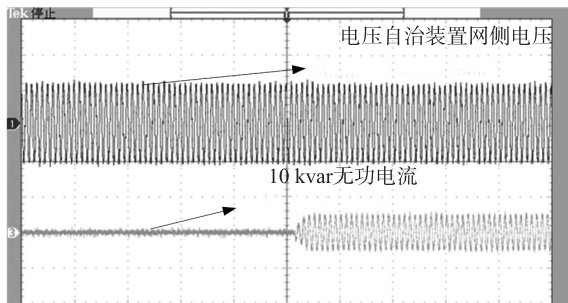


图 9 发出 10 kvar 无功时电压变化情况

Fig. 9 The voltage changes while issued 10 kvar reactive power

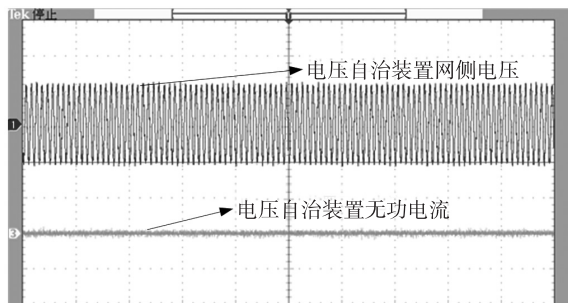


图 8 正常情况下电压电流波形

Fig. 8 Voltage and current waveforms under normal circumstances

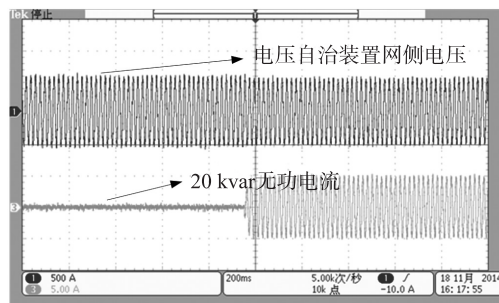


图 10 发出 20 kvar 无功时电压变化情况

Fig. 10 The voltage changes while issued 20 kvar reactive power

②容性无功升高电压实验

当系统中感性负荷较重,导致系统电压降低至 210 V,通过发出容性无功的来调节电压. 图 11 为发出容性无功即-10 kvar 时电压变化情况,电压由 210 V 升高至 215 V. 图 12 为发出容性无功即-20 kvar 时电压变化情况,电压由 210 V 升高至 220 V. 可以看出,随着无功功率的变化幅度的增加,电压的变化幅度也随之增加.

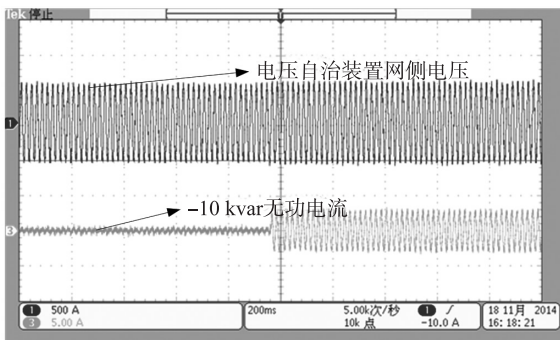


图 11 发出-10 kvar 无功时电压变化情况

Fig. 11 The voltage changes while issued -10 kvar reactive power

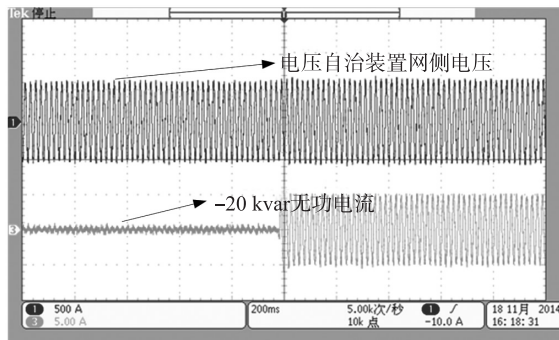


图 12 发出-20 kvar 无功时电压变化情况

Fig. 12 The voltage changes while issued -20 kvar reactive power

(2) 直流母线电压稳定性测试

电压自治装置回路 2、回路 3 分别与铁锂电池、铅酸电池相连,两回路进行变系数下垂控制,确保直流母线电压的稳定性. 从图 13 中可以看出当回路 2 启动控制输出电压为 800 V 后启动回路 3 对输出侧电压

没有冲击,回路2电流仍基本为0,并未引起环流.图14为空载到20 kW放电时波形,稳定时间约为40 ms,回路2电流约有15 A超调,稳定时间约为20 ms.此外根据实际检测数据可以计算出回路2的输出功率,基本为总输出的一半,实现了功率均分.

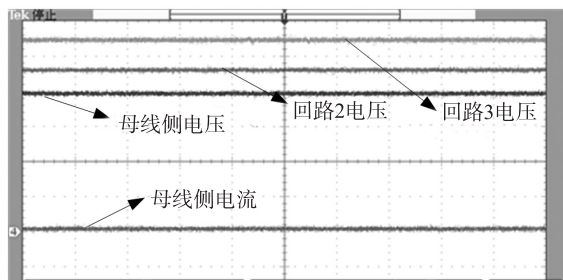


图13 两回路下垂控制空载运行

Fig. 13 Two-circuit droop control no-load operation

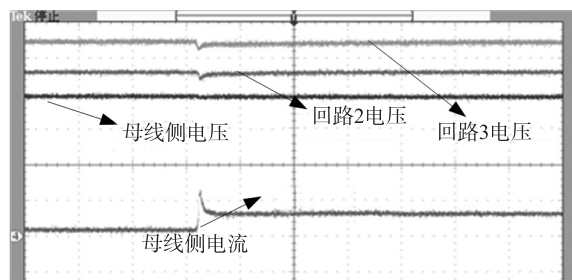


图14 回路2均分输出10kW

Fig. 14 On average output 10KW in circuit 2

4 结语

本文针对50 kW分布式发电电压自治装置,采用并网运行时的电网频率和电网电压作为支撑,根据输入输出功率、直流侧电压或充放电电流在AC/DC侧和DC/DC侧设计分布进行了控制策略研究和设计,并搭建了试验平台进行测试.实验结果表明,本文所研制的电压自治装置可使分布式发电系统并网运行或独立运行时具有稳定的电压,且在感性无功降低时和容性无功升高时使得电压稳定在允许范围内波动,验证了本文提出的控制策略的有效性与实用性.

[参考文献] (References)

- [1] 郜登科,姜建国,张宇华. 使用电压-相角下垂控制的微电网控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):29-34. GAO D K,JIANG J G,ZHANG Y H. Design of microgrid control strategy using voltage amplitude and phase angle droop control[J]. Automation of electric power systems,2012,36(5):29-34.(in Chinese)
- [2] 陈树勇,鲍海,吴春洋,等. 分布式光伏发电并网功率直接控制方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):6-11. CHEN S Y,BAO H,WU C Y,et al. Direct grid-tie power control method for distributed photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(10):6-11.(in Chinese)
- [3] 李题印,韩永强,胡晓琴,等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):8-13. LI T Y,HAN Y Q,HU X Q,et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power system protection and control,2014,42(12):8-13.(in Chinese)
- [4] 孟明,原亚宁,郭明伟. 直流微电网并网运行协调控制策略研究[J]. 黑龙江电力,2014,36(4):291-295. MENG M,YUAN Y N,GUO M W. Research on grid-connected coordinated control strategy for DC micro-network[J]. Heilongjiang electric power,2014,36(4):291-295.(in Chinese)
- [5] 方景辉,温镇. 分布式光伏就地适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(23):49-55. FANG J H,WEN Z. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power system protection and control,2015,43(23):49-55.(in Chinese)
- [6] 成林俞,戴瑜兴,刘红,等. 分布式光伏并网逆变器自适应控制策略[J]. 电力电子技术,2015,49(7):27-29. CHENG L Y,DAI Y X,LIU H,et al. An adaptive control strategy for distributed photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power electronics,2015,49(7):27-29.(in Chinese)
- [7] 曹鑫辉,孙耀杰,林燕丹. 分布式电源逆变器的低电压跌落控制策略[J]. 复旦学报(自然科学版),2014,53(1):71-76. CAO X H,SUN Y J,LIN Y D. Control strategies for inverters of the micro source under voltage dips[J]. Journal of fudan university(natural science),2014,53(1):71-76.(in Chinese)
- [8] 晋鹏娟,赵兴勇,梁元元. 光伏发电双模式运行无缝切换控制策略研究[J]. 现代电力,2014,31(2):55-59. JIN P J,ZHAO X Y,LIANG Y Y. Research on seamless switching control strategy of PV generation system with dual-mode operation[J]. Modern electric power,2014,31(2):55-59.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]