

基于逆变器直流侧电流控制的微网无幅差控制

解 东, 杨欢红, 丁宇涛, 王 洁

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要:在储能系统作为主电源的微网中, 储能系统的输出特性直接影响微网的电能质量。当储能系统输出不能快速调节时, 将出现微网电能质量不满足要求的问题。传统的 V/f 控制策略采用无功-电压下垂控制策略, 在孤岛运行时存在电压偏移, 会影响微网整体的电能质量, 且在下垂控制中下垂系数参数选取难免会出现误调节问题。为解决这些问题, 该文探讨逆变器直流侧和交流侧电量的关系, 在实施储能逆变器控制策略的基础上加入直流电流控制, 解决电压偏移以及误调节问题, 达到微电网无幅差控制的目的。最后, 使用 PSCAD 软件搭建风光储微网模型进行仿真检验, 证明控制策略的有效性。

关 键 词:微网; 双方式; 电压偏移; 直流电流控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.014 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2020)04-0107-07

Non-amplitude difference control of microgrid based on DC-side current control of inverter

XIE Dong, YANG Huanhong, DING Yutao, WANG Jie

(Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the microgrid with the energy storage system as the main power source, the output characteristics of the energy storage system directly affect the power quality of the microgrid. When the output of the energy storage system can not be adjusted quickly, the problem occurs that the power quality of the microgrid does not meet the requirements. The traditional V/f control strategy adopts the reactive-voltage droop control strategy. When the island is running, there is a voltage offset, which will affect the overall power quality of the microgrid. And in the droop control, the droop coefficient parameter selection inevitably leads to misadjustment. In order to solve these problems, this paper discusses the relationship between the DC and AC power of the inverter. Based on the implementation of the control strategy of the energy storage inverter, DC current control is added to solve the problem of voltage offset and misadjustment to achieve non-amplitude difference control of microgrid. Finally, the PSCAD software is used to build the wind and solar storage micro-grid model for simulation and verification, proving the effectiveness of the control strategy.

Key words: microgrid; dual mode; voltage offset; DC current control

随着能源危机和环境问题的日益突出, 电能长距离传输带来的投资巨大、损耗严重、电能质量下降以及安全性、可靠性降低等一系列问题都不利于电能的有效利用。分布式发电具有较高的灵活性、经

济性等诸多优点,因而得到了迅速、广泛的应用^[1]。目前,分布式电源的并网逐渐增多,对配电网造成了冲击,降低了配电网的可靠性,加大了电力系统保护和实时调度的难度。微网是由微电源、负荷和储能共同构成的网络架构,微网汲取分布式发电优点,并且减少了对配电网的影响,解决了分布式发电对配电网造成的冲击影响,微网发电是一种高效利用分布式能源的方式^[2]。

微网运行的关键在于逆变器控制,它包括主从式、对等式以及分层式控制3种类型^[3-9]。控制的目的是:确保母线在断开、并入大电网时,电能质量不会出现明显的下降,使微网和配网能够更加平稳的转换,达到即插即用的效果。很多学者都进行了这方面的研究,取得了一系列的成果。文献[10-11]指出以电压幅值反馈量对无功下垂控制给予补偿。然而这种方法需要用到复杂的控制环,引入了补偿系数,导致参数的确定变得更加困难。文献[12]指出首先检测直流电压,然后移动下垂特性曲线,调整下垂控制平衡工作点。但这种方法选择工作点更难,并且电压稳态误差较为明显。文献[13]对三折线变斜率下垂控制进行优化,但并未解决稳态误差这一问题。

该文首先探讨储能系统逆变器直流侧和交流侧电量二者的关系,指出在模式转换时对直流侧电流进行控制,从而改善蓄电池的输出特性,利用控制环调节直流侧电流,避免产生电压稳态误差,从根本上解决下垂控制误调节问题,确保2种方式的高效、平稳转换。

1 微网系统整体架构

随着各种微源的不断涌现,使得微网架构多样化且复杂程度也不同。如图1所示,微网架构中采用了交流式母线,逆变器交流侧和公共节点均和其相连,负荷侧布置的开关控制和数据采集系统会把采集到的负荷功率、电流反馈给微网控制中心,后者释放指令给前者,从而对负荷的状态进行有效的控制。微源和储能配置的开关控制和数据采集系统把采集到的各种数据反馈至控制中心,接收并执行后者的指令,从而调整运行方式以及参数。微网控制中心利用信息过程执行协调控制、优化管理等一系

列的任务,具体原则:按照微网的运行现状确定是否断开与电网的连接或是并入;根据电能调度方案和电力市场价格信息,对公共连接点的潮流进行控制;基于负荷特性对微网中的单元进行控制,满足重要用户对电能质量的要求;依据经济消耗少原则协调微源的输出,减少能源消耗。

为了使微网在不同种方式及工作方式转换的暂态过程中母线电压和频率满足电能质量要求,需要对主电源逆变器采取控制措施,保证重要负荷的持续不断供电。为了确保关键负荷能够得到稳定的电能供应,负荷和主电源处在同一个回路里,在并网网的那一刻,确保关键负荷的平稳转换,另外主电源功率输出和关键负荷容量配置也非常关键,以确保二者的功率能够快速平衡。

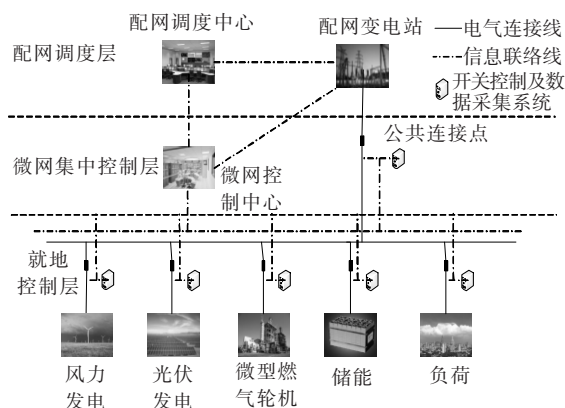


图1 风光储柴微网架构

Figure 1 Scenery firewood storage microgrid architecture

2 储能逆变器的控制及其原理

依据微网不同的工作方式需要不同的控制方式相对应,该文采取基于主从控制的微网控制方式。当微网工作在并网方式时,微网中的微源及储能电源采取P/Q控制方式;当工作在离网方式时,主逆变器采取V/f加入直流侧电流的控制方式,其他微源逆变器采取P/Q控制方式。

2.1 直流侧电流与交流电压的关系

储能逆变器主电路结构如图2(a)所示,借鉴逆变器直流交流侧的电量方程关系^[14-15],给出储能逆变器加入直流侧电流的控制交流电压原理。

当微网离网稳态运行时,光伏和风机按照

MPPT 最大功率跟踪输出,分析 A 相交直流侧电量关系, U_a 参考角度为 0,则有

$$\left(\frac{\dot{s}_{PV}}{3\dot{u}_a}\right)^* + \left(\frac{\dot{s}_{WT}}{3\dot{u}_a}\right)^* + \left(\frac{\dot{s}_{Battery}}{3\dot{u}_a}\right)^* = \left(\frac{\dot{s}_{Load}}{3\dot{u}_a}\right)^* \quad (1)$$

式中 \dot{s}_{PV} 、 \dot{s}_{WT} 分别为光伏和风机的功率; \dot{s}_{Load} 为负荷功率。其中,

$$\left(\frac{\dot{s}_{Battery}}{3\dot{u}_a}\right)^* = \dot{i}_{Oa} \quad (2)$$

根据图 2(a),由式(1)、(2)可得基波电压:

$$\dot{u}_1 = \dot{u}_a + \begin{pmatrix} \dot{i}_{Oa} + \frac{\dot{u}_a}{1} j(\omega L + R) \\ -j\frac{1}{\omega C} \end{pmatrix} \quad (3)$$

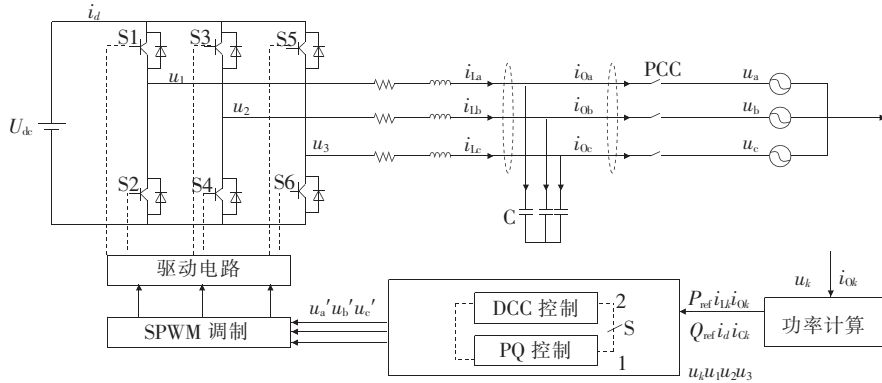
由文献[14]得到逆变器模型的交直流量方程式:

$$i_d = \frac{3}{8} m^2 u_d \sqrt{\frac{1 + \rho^2 - 2\rho \cos \theta}{R^2 + (\omega L)^2}} [\cos(\theta + \varphi) - e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega t + \theta + \varphi)] \quad (4)$$

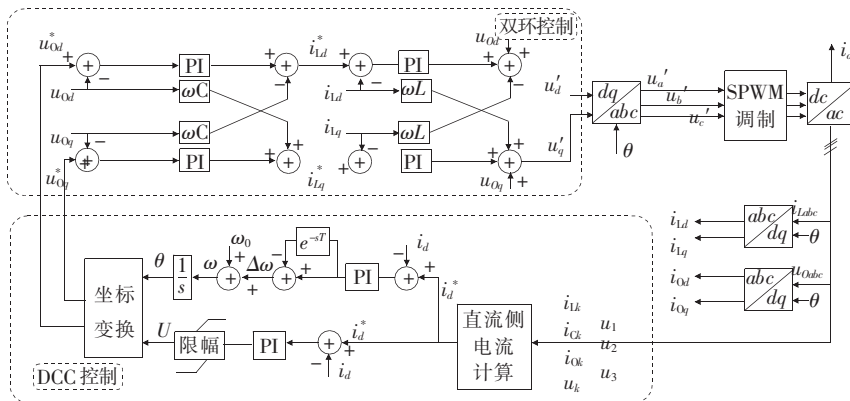
$$\rho = \frac{U_a}{U_1} = \frac{2U_a}{u_d}, m = \frac{2U_1}{u_d} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 R 为电阻; ρ 为交流反电势幅度因数; m 为 PWM 逆变器的调制因数; U_1 为电压 u_1 基波电压峰值; U_a 为交流电源 u_a 基波电压峰值; θ 为电压 u_1 与 u_a 之间的夹角; φ 为 u_a 、 i_1 之间的夹角; τ 为时间常数,与直流电流暂态波动有关。

根据并网转离网及离网方程式(1)~(3),再结合式(4)、(5)可求得稳态直流电流参考值 i_{dref} 。如图 2(b)所示,当微网并网转离网运行功率不平衡及离网运行时负荷有所波动时,基于功率暂态波动变化率和负荷实时功率平衡,预设主逆变器直流暂态电流参考值 i_{dref} ,并与测量值 i_d 对比;利用 PI 调整整定值,并定义幅度为正数作为参考电压 U ;再基于直流电流的 PI 调节值调整 i_{dref}^* ,分析直流侧电流 i_d 与交流侧逆变器输出基波电压的关系,通过对直流电流的控制,实现微网的并网转离网及离网 2 种方式的稳定运行。



(a) 储能逆变器结构



(b) DCC 控制结构框图

图 2 储能逆变器结构及其控制框图

Figure 2 Energy storage inverter structure and its control block diagram

2.2 直流侧电流与交流频率的关系

依据储能逆变器电路结构(图2(a))、直流侧电流与有功功率的关系,并参考同步发电机的转子运动方程,给出加入直流控制交流频率的原理。

忽略阻尼成分时同步发电机的转子运动方程:

$$P_e - P_m = J\omega \frac{d\omega}{dt} \approx J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

式中 P_m 和 P_e 分别为同步发电机的机械、电磁功率; ω_0 为电网同步角速度; J 为转动惯量。

稳态时直流侧有功功率:

$$\begin{aligned} P &= u_d i_d \\ P - P_R &= P_1 \end{aligned} \quad (10)$$

其中, P_R 为电阻 R (图2(a))所需的有功功率 P_1 流向微网的有功功率。

通过分析逆变器两侧有功功率的关系,可以得到频率控制图(图2(b)),将 i_{dref} 与测量值 i_d 对比后经 PI 调解得到的整定值与该整定值的滞后差值作为 $\Delta\omega$ 参与频率的控制。

3 微网工作方式的无缝转换

微网有并网和离网 2 种工作方式,需对这 2 种方式及 2 种方式的转换进行控制环设计,实现 2 种工作方式的无缝转换。

3.1 DCC 控制策略原理分析

在微网并网时主逆变器工作在 P/Q 控制策略下,离网时工作在加入直流侧电流控制的 V/f 方式下,2 种方式共用一个电流内环,根据直流侧与交流侧的电量关系可知,基于直流侧电流的无幅差控制能够实现并网与离网方式的无缝转换。当离网运行时,根据光伏风机的出力并实时跟踪负荷侧功率,确定参考值 i_{dref} ,实现离网的稳态运行。

图2(a)中当开关 S 选择闭合在 1 时,微网工作在 P/Q 方式下,有功、无功的参考指令 P_{ref} 、 Q_{ref} 与实际值比较,经过 PI 调解作为内环电流的参考信号,实现了有功和无功的给定输出。当开关 S 选择 1 转到 2 时,实现了并网方式转换到离网方式,在 DCC 控制方式下经过直流电流 PI 调解后的信号生成三相电压信号,并对进行 dq 分解后作为双环控制外环电压的参考指令信号 U_{dref} 和 U_{qref} 与实际经过 dq 分解后的值进行比较,经 PI 调解后作为内环电流的参考信号。P/Q 和 DCC 控制方式共用一个电流内环,完成了 2 种方式的无缝转换。

3.2 离网/并网方式的转换

当控制中心释放并网指令至主逆变器后,微网交流母线电压的幅值、相位与配电网之间存在偏差,当偏差在不允许的范围之内并入配电网时,会对配电网产生冲击影响,导致离网/并网方式的转换失败。

如图3所示,在频率控制上加入相位角预同步控制,在电压控制上加入并网幅值的控制,完成离网到并网的无缝转换。相位角幅值与同步原理为

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + \Delta\omega_{syn} = \omega_0 + \frac{K_\omega}{s}(\theta_g - \theta) \\ U = U_0 + \Delta U_{syn} = U_0 + \frac{K_U}{s}(U_g - U) \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\Delta\omega_{syn}$ 为叠加在 ω_0 上的相位同步信号; ΔU_{syn} 为叠加在 U 上的幅值同步信号; K_ω 、 K_U 分别为相位、幅值的积分系数。

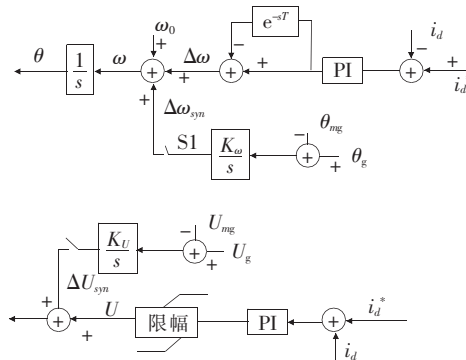


图3 同步控制框图

Figure 3 Block diagram of synchronous control

在开关 S1 连接的情况下控制策略进入预同步过程,预同步信号叠加到控制信号上,使微网的幅值和相位逐渐逼近配电网电压幅值和相位,当同步到允许偏差的范围时,公共连接点开关闭合,主逆变器由 DCC 控制方式转换到 P/Q 控制方式,完成预同步并网的过程。

4 仿真验证及分析

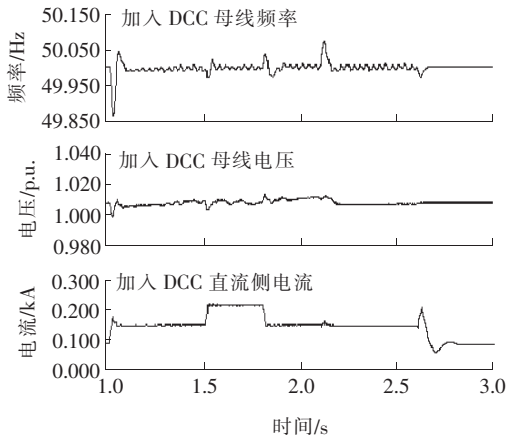
为检验策略的实用性,利用 PSCAD 创建微网仿真模型(图3)。模型的相关参数:光伏电源容量为 160 kW,风力发电电源容量为 200 kW,蓄电池容量为 100 Ah,额定电压为 1.8 kV,额定放电率为 0.3 C,负荷功率为 $0.6 + j0.3$ MV·A,母线三相电压有效值为 0.38 kV。

0~1 s 时间段内微网仿真工作在并网方式下,

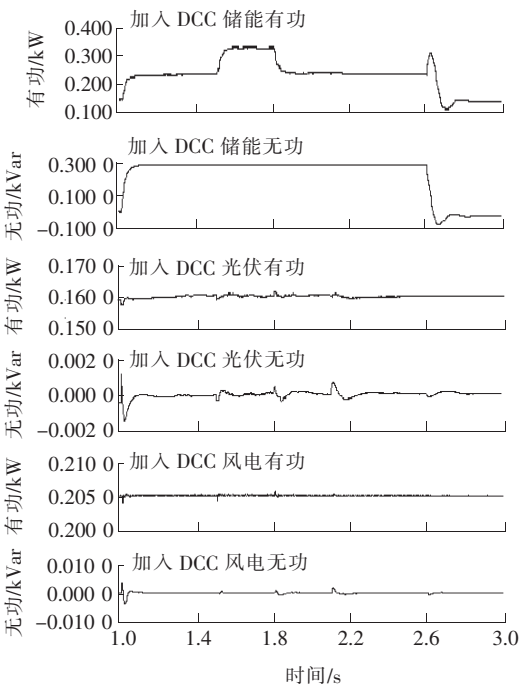
微源和储能电池均采用 P/Q 控制,转换发生的时间点为 1 s 时,蓄电池逆变器由 P/Q 控制转换成带 DCC 的 V/f 控制;1~2.6 s 时间段内微网仿真工作在离网方式,1.5 s 时负荷发生变动,有功增加 0.09 MW,1.8 s 时负荷减小 0.09 MW,2.1 s 时并网预同步,2.6 s 时并网。

4.1 并网转离网方式

在微网运行过程中,非计划孤岛对电网的稳定运行有较大的影响,因此,微网逆变器必须具备从并网向孤网方式平滑转换的能力。在 1 s 时仿真由并网转离网。仿真运行电量数据如图 4 所示,由图 4



(a) 母线电压、频率、直流侧电流



(b) 储能、光伏和风机单元有功、无功输出

图 4 仿真运行电量数据

Figure 4 Simulation running energy data

(a)可以看出,加入 DCC 控制策略由并网转离网时母线电压幅值和频率波动小、时间短,运行到稳态时几乎无电压幅值偏移,证明对直流侧电流和交流侧电压之间关系进行理论分析的正确性。图 4(b)为各微源运行过程中有功、无功的出力状况,可以看出光伏和风机出力稳定,储能根据控制策略的改变调整出力情况。

4.2 孤网方式

根据图 4(a)可知,1.5 s 时负荷增加 0.09 MW,1.8 s 时负荷减小 0.09 MW。负荷变动时三相电压电流波形如图 5 所示,无论是增加还是减小负荷,电压幅值偏差均不超过 $\pm 1\%$,稳态后几乎无电压偏移,证明了理论分析的正确性。

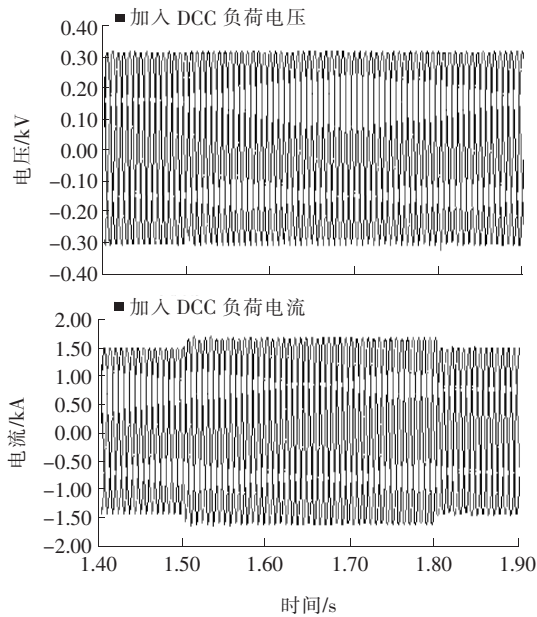


图 5 负荷变动时电压和电流的波形

Figure 5 Waveforms of voltage and current when load changes

4.3 并网预同步

在并网前,交流母线电压的幅值、相位与电网电压的幅值、相位应完全一致,或其幅值、相位差不超过特定范围,否则并网就会对配网造成明显的冲击^[16-17]。按照预同步环节调节主逆变器输出电压相位、幅值、频率,使其和配网的对应参数保持一致,再进行并网操作。2.6 s 时逆变器进行并网操作后的波形如图 6 所示,对仿真结果进行分析可知,并网后电流波动并不大,能够实现安全并网。

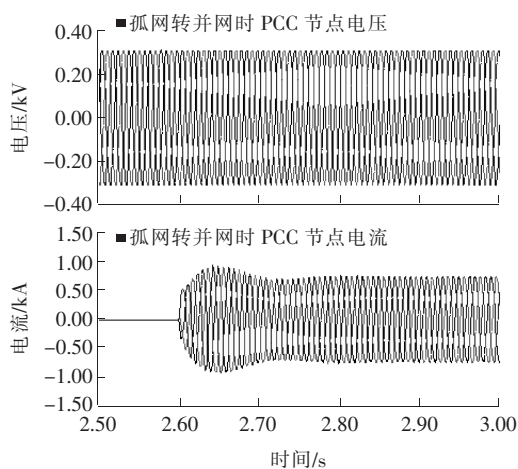


图6 逆变器预同步并网波形

Figure 6 Inverter pre-synchronized grid-connected waveform

4.4 电流参考值与输出值

如图7所示,1 s时微电网控制模式切换到加DCC的V/f控制,修正后的参考值 i_{dref} 经过PI调解后能够作为三相电压幅值的输入信号,验证了理论分析和控制环设计的合理性。

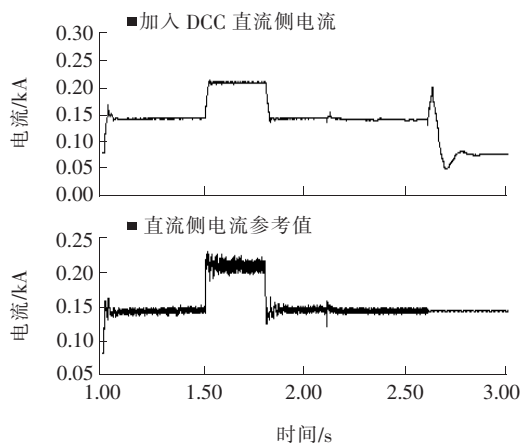


图7 直流侧电流实际输出值与参考值

Figure 7 Actual output value and reference value of DC side current

5 结语

对于主逆变器无功—电压下垂控制方式的缺陷和不足,该文设计出一种逆变器电流控制方式,与下垂控制方式相比,提出的方法具有2点优势:

1)通过加入控制策略,消除了微网孤岛运行时电压存在的稳态偏差。

2)控制环调节直流侧电流,弥补了文献[10-11]参数难以确定和误调节的缺陷。搭建仿真模型对新的控制策略进行验证,结果表明新策略是完全可行且有效的。

参考文献:

- [1] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报,2014,29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [2] 文浩,惠宇翔. 基于DIgSILENT软件的微电网平滑切换的研究[J]. 智慧电力,2018,46(1):33-37.
WEN Hao, HUI Yuxiang. Research on microgrid smooth switching based on DIgSILENT software [J]. Smart Power, 2018, 46(1): 33-37.
- [3] 聂志强,梁晖,罗浩,等. 基于非线性下垂控制的单模式微网并/离网无缝切换技术[J]. 电网技术,2016,40(5): 1371-1378.
NIE Zhiqiang, LIANG Hui, LUO Hao, et al. Single mode-grid-connected/islanded microgrid seamless transition based on nonlinear droop control technology [J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1371-1378.
- [4] 张雪松,赵波,李鹏,等. 基于多层控制的微电网运行模式无缝切换策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(9): 179-184+199.
ZHANG Xuesong, ZHAO Bo, LI Peng, et al. Seamless switching strategies for microgrid based on multi-layer control architecture [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 179-184+199.
- [5] 郭通,李燕青,全年,等. 基于自调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(2): 77-82+91.
GUO Tong, LI Yanqing, TONG Nian, et al. Control strategy of micro-grid based on self-adjustable droop coefficient [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 77-82+91.
- [6] 支娜,张辉. 直流微电网改进分级控制策略研究[J]. 高电压技术,2016,42(4):1316-1325.
ZHI Na, ZHANG Hui. Improved hierarchical control-strategy for DC microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1316-1325.
- [7] 宋绍剑,阳喜,刘斌,等. 基于电网阻抗的并网逆变器准比例谐振控制[J]. 中国电力,2019,52(12): 90-96.

- SONG Shaojian, YANG Xi, LIU Bin, et al. Quasi-proportional resonance control of grid-connected inverter based on grid impedance[J]. *Electric Power*, 2019, 52(12): 90-96.
- [8] 李昊,王杰. 基于虚拟同步发电机技术的改进微网下垂控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(2): 11-19.
- LI Hao, WANG Jie. Modified droop control based on virtual synchronous generator[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(2): 11-19.
- [9] 鲍薇,胡学浩,李光辉,等. 基于同步电压源的微电网分层控制策略设计[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(23): 20-26.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Synchronous voltage source based design of hierarchical control strategy for microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(23): 20-26.
- [10] 柏管,陈卓,刘飞. 基于自调节下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 120-126.
- BAI Guan, CHEN Zhuo, LIU Fei. Parallel operation technology of distributed generation based on self-regulation droop control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 120-126.
- [11] 李山,叶鹏. 一种改进的微电网并联逆变器下垂控制策略[J]. *沈阳工程学院学报:自然科学版*, 2016, 12(4): 289-296.
- LI Shan, YE Peng. An improved droop control strategy for parallel inverters in micro grid[J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science*, 2016, 12(4): 289-296.
- [12] 芦思晨,潘再平. 无储能风电微网系统的下垂控制策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(18): 169-175.
- LU Sichen, PAN Zaiping. Droop control strategy of windpower microgrid system without energy storage device[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(18): 169-175.
- [13] 郭权利,苑舜,周春阳,等. 基于模糊控制的微网平滑切换控制策略的研究[J]. *高电压技术*, 2015, 41(10): 3281-3287.
- GUO Quanli, YUAN Shun, ZHOU Chunyang, et al. Research on control strategy of smooth switching between microgrid and distribution network based on fuzzy principle[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(10): 3281-3287.
- [14] 张加胜,张磊. 四象限变流器的一种统一性建模及分析方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 39-44.
- ZHANG Jiasheng, ZHANG Lei. Research on a general unified modeling and analysis approach of 4-quadrant converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 39-44.
- [15] 张加胜,张磊. PWM逆变器的直流侧等效模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(4): 103-107.
- ZHANG Jiasheng, ZHANG Lei. Research on the DC-side equivalent model of PWM inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(4): 103-107.
- [16] Chen L J, Mei S W. An integrated control and protection system for photovoltaic microgrids[J]. *CSEE Journal of Power & Energy Systems*, 2015, 1(1): 36-42.
- [17] Mohamed A R I, Adwan A A. Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(2): 352-362.