

储能系统离网启动的控制策略研究

张超,邱晗,李哲,刘博畅,张宝顺,厉成元

(天津电气科学研究院有限公司,天津 300180)

摘要:提出了一种储能系统离网启动的控制策略,可以满足 MW 级储能电站中所有储能变流器平稳快速地进入离网运行状态,建立离网电网。通过离网控制装置提供统一的离网电网相位角和使能信号,实现多台储能变流器快速进入离网运行。离网启动时,可以存在两种方式,一种是零启升压,另一种是无缝切换,以满足用户不同的应用需求。

关键词:储能变流器;离网控制装置;零启升压;无缝切换

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23666

Research on Off-grid Start-up Control Strategy of Energy Storage System

ZHANG Chao, QIU Han, LI Zhe, LIU Bochang, Zhang Baoshun, LI Chengyuan

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

Abstract: A control strategy of off-grid start-up of energy storage system (ESS) was proposed, which can make all power converter systems (PCSs) entered off-grid mode smoothly and quickly in MW level battery energy storage power station, and make off-grid voltage set up. The unified off-grid phase angle and enable signal were provided by off-grid control box to realize that multiple PCSs can be entered to off-grid mode quickly. During off-grid start-up, there are two ways to meet the different application needs of all users, one is raising voltage from zero, the other is seamless switch.

Key words: power converter system (PCS); off-grid control box; raising voltage from zero; seamless switch

2019年7月1日,发改委发布了《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》,提出了加强先进储能技术的研发,同时攻克关键技术难点,使我国储能技术水平在5到10年甚至更长时间处于国际领先。在所有储能技术中,针对电化学储能的突破最为明显,将成为未来储能技术的主要增长点,另一方面电化学储能中的锂离子电池的成本在不断下降,技术也更加成熟,所有使用锂电池的储能系统将得到广泛应用。这类储能系统已经开始大规模地应用于电力系统,尤其在一带一路的国家和地区中,存在很多孤立的中小型电网,这种电网负荷波动大,电网质量不好,存在电网不稳定甚至电网崩溃等因素,所以就更需要锂电池储能系统来调节电网质量、平抑负荷波动、保证孤岛运行,而且一般要求储能系统配置

到 MW 级甚至要到几十 MW 等较大规模。当这种孤立电网出现电网崩溃等问题时,就要求 MW 级甚至几十 MW 的储能系统同步地、快速地切入离网运行或作为应急电源提供一定时间的厂用电完成发电机组的启动。储能系统进入离网运行的关键,就是文献[1]提到的储能变流器(power converter system, PCS)从 P/Q 模式切换到 V/F 模式,并且切换过程电流和电压平缓,无明显冲击。针对该问题,文献[2]提出一种相位预同步的控制器状态跟随方法,该方法实现了离网到并网的平滑切换;文献[3]提出将 V/F 控制器输出与 P/Q 控制器的输出设计为一个负反馈作为 V/F 控制器的输入,使得切换前 V/F 控制器时刻跟随 P/Q 控制器的输出,可以满足单台储能变流器的切换;文献[4-5]提出多机并联离网运行的参数设

基金项目:中国机械设备工业股份有限公司科技成果转化项目(CMEC-KJZH-2018-02)

作者简介:张超(1982—),男,本科,高级工程师,Email: zhangchao@tried.com.cn

计和采用下垂控制功率均分方法。

本文结合以上文献介绍了一种储能离网启动的控制策略,可以满足几十台甚至上百台储能变流器平稳快速地切换到离网运行状态或者完成变压器的零启升压,建立离网电压。该控制策略与其他方法相比,具有控制实现容易、支持多台并联的储能变流器同时无缝切换及离网启动等优点。采用此策略的储能系统中,所有储能变流器均为相同的频率和相角,避免了多机之间由于频率不同而产生的相互震荡以及其造成的功率分配不均等问题,同时建立的离网电压稳定可靠。

1 设计的基本原理

1.1 三相电压锁相环PLL

储能系统一般由双向储能变流器(PCS)、蓄电池(一般为锂电池)及电池管理系统(battery management system, BMS)、公共接入点(point of common coupling, PCC)、升压变压器等组成,其中PCS为其核心执行系统,其一般由支撑电容、DC/AC功率变换单元、LCL滤波器组成,如图1所示。PCS主要功能是通过DC/AC变换,对蓄电池进行充、放电,使蓄电池能量和电网的能量进行交换。

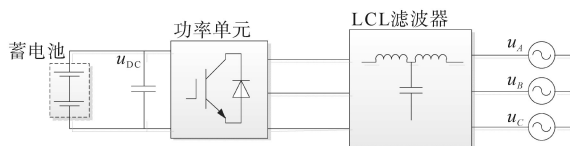


图1 双向储能变流器系统图

Fig.1 The system schematic of power converter system (PCS)

当储能变流器并网运行时,通过电网侧电压进行定向,本设计采用锁相环(phase locked loop, PLL)技术。

假设三相电压对称,且不考虑谐波,三相电压信号为

$$\begin{cases} u_A = U_m \cos \gamma \\ u_B = U_m \cos(\gamma - 120^\circ) \\ u_C = U_m \cos(\gamma + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_A, u_B, u_C 为电网A,B,C三相电压; U_m 为电压幅值; γ 为电角度。

三相电压矢量可以用一个空间旋转矢量的在三个静止坐标系的投影表示,这个表示三相电压的矢量称作通用矢量。则电网电压 u_A, u_B, u_C 可以表示为通用矢量 U ,如图2所示。

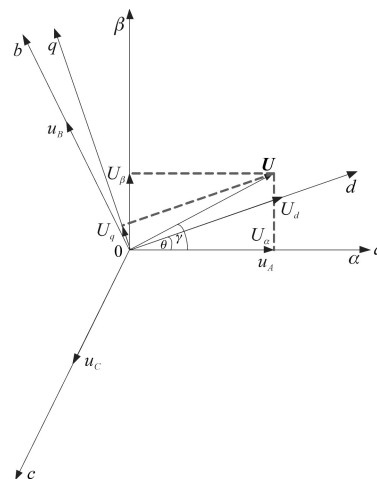


图2 三相电压矢量关系图

Fig.2 The diagram of three phase voltage vector

图2中, γ 为 U 和 α 轴(α 轴)的夹角, θ 为 α 轴(α 轴)和 d 轴的夹角。

对通用矢量 U 做等量 $3/2$ 变换,得到等效两相虚拟正交静止坐标系变量信号:

$$\begin{cases} U_\alpha = U_m \cos \gamma = u_A \\ U_\beta = U_m \sin \gamma = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_B - u_C) \end{cases} \quad (2)$$

再将静止坐标系变换到旋转坐标系,得到等效虚拟正交同步旋转 $d-q$ 坐标系变量信号:

$$\begin{cases} U_d = U_\alpha \cos \theta + U_\beta \sin \theta \\ U_q = -U_\alpha \sin \theta + U_\beta \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)中,得:

$$\begin{cases} U_d = U_m \cos(\gamma - \theta) \\ U_q = U_m \sin(\gamma - \theta) \end{cases} \quad (4)$$

当稳态下,满足 $\gamma - \theta = 0$,即

$$\begin{cases} U_d = U_m \\ U_q = 0 \end{cases} \quad (5)$$

通用矢量 U 与有功分量 U_d 重合,无功分量 U_q 为零, $d-q$ 旋转坐标系以角速度旋转,这样就实现了对电网电压矢量的定向。

1.2 相位角生成控制

三相交流电压经过 $d-q$ 变换后得到的 U_q 分量,通过PI调节器,调节 U_q 输出为角速度 $\Delta\omega$,如图3所示。

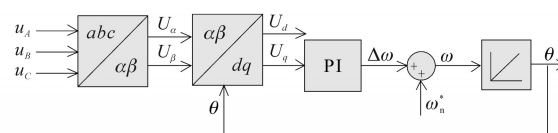


图3 并网电网相位角控制框图

Fig.3 Control block diagram of on-grid phase angle

图3中:

$$\omega = \Delta\omega + \omega_n^* \quad (6)$$

其中

$$\omega_n^* = 2\pi f \quad f = 50 \text{ Hz}$$

ω 再经过积分器输出为相位角 θ ,该角度即对应于三相电压的频率和相位。

储能变流器离网运行时,离网电压主要由幅值和频率决定。幅值通过PCS的交流电压环控制,频率则由两种离网启动方式来确定,一种是零启升压模式,另一种是由并网无缝切入离网模式。零启升压模式由于没有初始电网,电网需要通过PCS控制电压以软启的形式建立,所以离网使能信号直接控制相位角 θ 从零开始积分启动。无缝切换时,当PCS收到离网信号后,将 $\Delta\omega$ 置零,从该位置进行积分得到相位角 θ 。该方式可以保证相位角不会发生较大突变,从而使PCS由并网状态切入离网时,不会出现过流、过载、电压突变等故障,造成离网电网启动失败,无法建立,如图4所示。

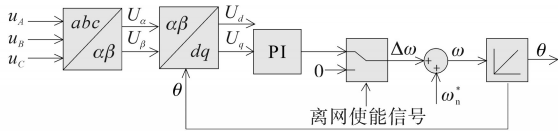


图4 离网电网相位角控制图

Fig.4 Control block diagram of off-grid phase angle

2 系统功能实现

2.1 离网控制硬件实现

大功率 MW 级锂电池储能系统项目中,500 kW 储能变流器每 5 台作为 1 组,并联接到一台升压变压器上。当系统运行于并网状态时,5 台 PCS 每台通过电流环(P/Q 模式)独立控制,可以通过能量管理系统(energy management system, EMS)对单台 PCS 进行充、放电控制,同时实现对整个电网系统的能量调度和控制。当系统离网运行时,每组的首台 PCS 采用虚拟阻抗控制的离网电压环(V/F 模式)技术,控制离网电压的幅值,并将主站电流环参数通过内部高速通讯传送到组内其余 4 台,实现功率的平衡分配,如图 5 所示。

采用该离网启动控制策略设计了一种离网控制装置。该装置主要用于提供离网相位角和离网使能信号。离网控制装置设计有 2 套控制器,实现离网相位角输出冗余控制,主控制器和备用控制器同时生成完全相同的离网相位角同

步信号,如图 5 所示。

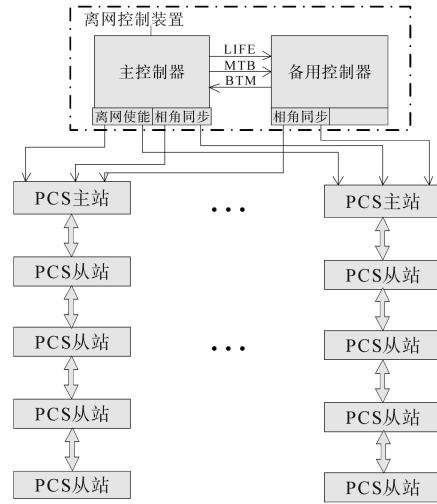


图5 储能系统离网通讯示意图

Fig.5 The communication schematic diagram of off-grid ESS

2.2 离网控制装置算法实现

2.2.1 主控制器相位角同步生成

图 6 所示为主站相角同步信号生成框图。控制器核心 CPU 采用 FPGA 芯片,其基础时钟为 40 MHz,所有算法实现都在 FPGA 中完成。主站相角同步信号生成模块主要由三部分组成: A1~A6 为独立生成相角同步信号的模块; A7 和 A8 为通过 PLL 运算后生成的相角同步信号的模块; A9~A19 为两种信号切换选择部分的模块。具体的,当主控板检测电网有电且没有离网使能信号时,离网控制装置使用 PLL 运算出来的相位角 θ 生成同步信号并发送;当进入离网运行或者没有电网时,离网控制装置使用自身独立生成的相位角发送同步信号。

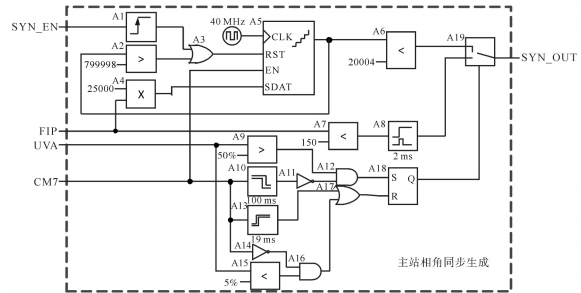


图6 主站相角同步信号生成框图

Fig.6 The block diagram of synchronous signal generation for main PCS phase angle

2.2.2 备用控制器相位角信号处理

备用控制器一方面发送与主控制器相同同步信号,另一方面生成主站断电恢复后的同步信号,备用控制器将原有同步信号发送给主控制器,完成主控制器的正常接入。因主控制器的切

入不会造成相角突变,引起系统崩溃,所以增加备用同步主站功能。该功能包括主站生命信号生成、备用给主站发送同步信号、主站启动延时输出同步信号三部分模块。

主站生命信号生成模块如图7所示。主站生成一个周期为20 ms的高电平、宽度为500 μ s的脉冲波形。

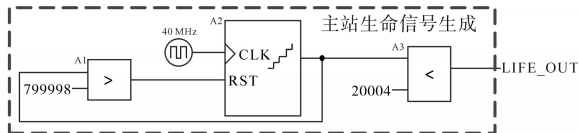


图7 主站生命信号生成框图

Fig.7 The diagram of life signal generation for main PCS

备用控制器发送主控制器同步信号模块,如图8所示。A1~A3对生命信号进行20 ms计数,A4~A7计20 ms周期脉冲的个数为6个,A8~A15在主站故障恢复后,生成一个1 s的单稳脉冲,A16和A17在该单稳脉冲存在期间发送同步信号给主站。

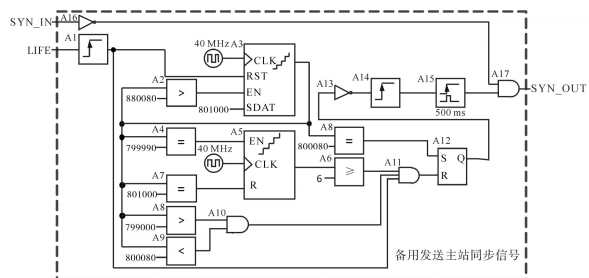


图8 备用PCS发送主站PCS相角信号框图

Fig.8 The phase angle signal from standby PCS to main PCS

2.2.3 信号时序图

下图为主站和备用进行切换时,各个信号的时序波形图。

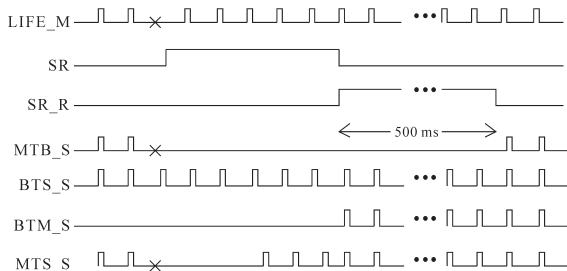


图9 相角信号时序图

Fig.9 The timing diagram of phase angle

3 试验验证

3.1 零启升压功能

3.1.1 零启升压流程

当外界电网没电,PCS投入离网运行状态时,建立离网电网。大功率高压变压器励磁对PCS

的冲击一般为额定容量的5~10倍,PCS不能承受如此大的冲击,势必造成PCS过流故障,所以需要
对变压器进行空载励磁并通过零启建立电压。当PCS软启结束后,离网电网建立完成,即可以接入一定数量的负载,满足一段时间的厂用电,但需要注意电池的容量和使用时间。

3.1.2 零启升压试验

在天津电气科学研究院有限公司的微网实验室中搭建试验平台,采用2组共4台500 kW储能变流器,每组1台主机和1台从机。试验测试两组PCS同时启动进行零启升压。通过离网控制装置的光纤同步发送同步相角信号和离网使能信号给每组主机PCS。主机接收到离网使能信号后将该信号同时下发给该组中的从机,完成该组中所有2台PCS的启动。在实验室模拟的试验平台如图10所示。

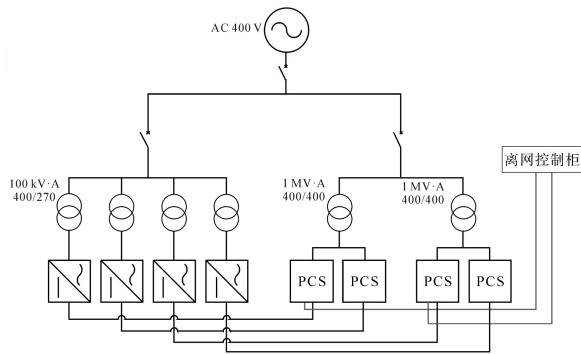


图 10 零启升压试验平台示意图

Fig.10 The experiment platform for raising voltage from zero

两组4台PCS零启升压启动过程的波形如图11、图12所示。图中,第4通道为电压信号,第1,2,3通道为电流信号。在启动过程中电压平滑无波动,幅值为400 V,启动时间约为11 s;平稳运行时,电压波形平稳可靠,无任何畸变,电压谐波满足国家标准。

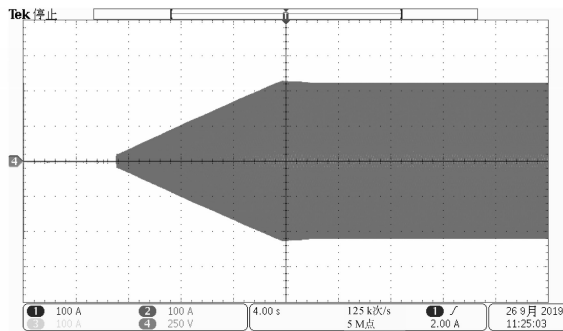


图 11 零启升压主站启动波形图

Fig.11 The waveforms of raising voltage from zero

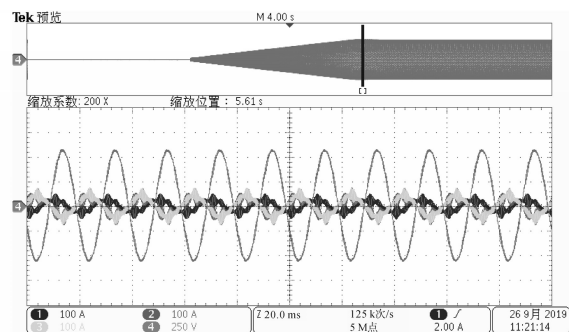


图12 零启升压平稳运行波形图

Fig.12 The waveforms of raising voltage from zero for running

3.2 无缝切换功能

3.2.1 无缝切换离网使能选择

离网使能信号可以通过几种方式产生,一种是由EMS给定检测35 kV电网故障;或者由EMS检测35 kV开关状态得到;另一种是直接从离网控制装置检测35 kV高压柜PT和CT信号;或者直接将35 kV开关状态引入。以上方式需要结合现场实际环境以及工况做出最优的选择,以达到最快地检测到离网状态。

3.2.2 无缝切换试验

如图13所示,在天津电气科学研究院有限公司的微网实验室中搭建无缝切换实验平台。采用2组共4台500 kW储能变流器,每组1台主机和1台从机。该试验平台中K1为接触器,可以通过控制自动闭合和断开。当电网正常时,电网给负载提供能量,PCS空载运行。断开K1开关后,系统进入离网运行状态。离网控制柜检测到K1开关断开,给PCS发送离网使能信号,PCS接收到离网使能后由P/Q模式切换到V/F模式,使用离网控制装置发送的相角同步信号生成自身相角,幅值按照并网时刻幅值建立离网电压,给负载提供功率。

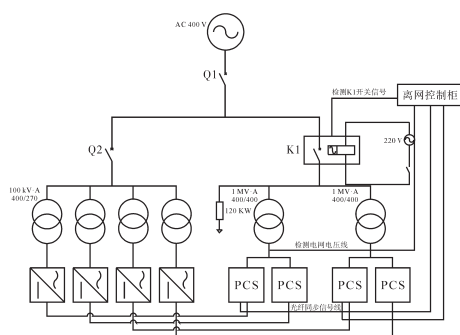


图13 无缝切换试验平台示意图

Fig.13 The experiment platform for seamless switching

两台主站PCS同时无缝切入离网运行时的波形如图14所示。

图14中,第2、3通道为电流信号,第4通道为

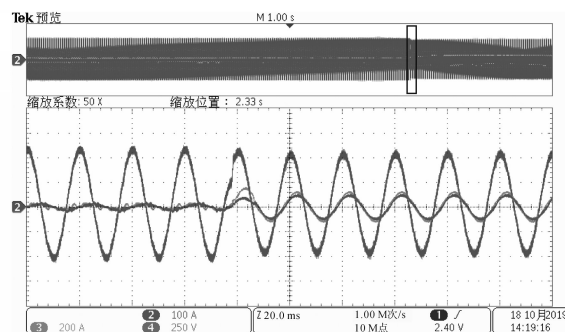


图14 无缝切换波形图

Fig.14 The waveforms of seamless switching

电压信号。从波形可以看出两台PCS电流均流性较好,切换过程小于5 ms且无明显冲击和过流等。

4 结论

基于该控制策略研发的储能系统同时支持两种工作模式,零启升压和无缝切换。该系统的成功研发可以解决孤网和电网不稳定地区的短时用电和紧急用电。该方案成功应用在印尼某钢厂55 MW/55 MW·h的锂电池储能项目中,在因地震等原因造成的停电事故中,该系统提供备用电源,在保障设备检修及钢厂日常用电方面发挥积极作用。这种大型厂矿现场,一般用电负荷较大,几十台甚至上百台储能变流器同步进入离网运行状态,可以快速地完成离网电网的建立,为用户提供了有力的电力保证。综上,该设计用于大规模MW级储能电站,会产生较好的用户体验和较大收益。

参考文献

- [1] 李超,赵志刚.基于储能变流器的微电网并/离网无缝切换的研究[J].山东工业技术,2017,(19):168.
Li Chao, Zhao Zhigang. Research on seamless switching of microgrid on/off grid based on power converter system[J]. Shandong Industrial Technology, 2017, (19): 168.
- [2] 朱作滨,黄绍平,李振兴,等.微电网储能变流器离网/并网切换控制策略研究[J].电气工程学报,2019,14(2): 92-96.
Zhu Zuobin, Huang Shaoping, Li Zhenxing, et al. Research on off grid / grid switching control strategy of micro-grid power converter system [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(2): 92-96.
- [3] 谢毓广,罗亚桥,郑国强,等.储能变流器多机并联离网启动方式研究[J].电气应用,2016,35(10):79-82.
Xie Yuguang, Luo Yaqiao, Zheng Guoqiang, et al. Research on

(下转第67页)

- condary voltage regulation system of DC microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 10-18.
- [2] Sangwongwanich A, Yang Y, Blaabjerg F. High-performance constant power generation in grid-connected power systems [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2016, 31(3): 1822-1825.
- [3] Tafti H D, Maswood A I, Konstantinou G. A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems [J]. IEEE Trans. Power Electron., 2018, 33(5): 4088-4101.
- [4] Dehkordi N M, Sadati N. Distributed robust finitetime secondary voltage and frequency control of islanded microgrids[J]. IEEE Trans. Power Syst., 2017, 32, (5): 3648-3659.
- [5] Nutkani I U, Loh P C. Decentralized economic dispatch scheme with online power reserve for microgrids [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2017, 8(1): 139-148.
- [6] Xia Y, Peng Y, Wei W. Triple droop control method for AC microgrids [J]. IET Power Electron., 2017, 10(13): 1705-1713.
- [7] John B, Ghosh A, Zare F. Load sharing in medium voltage islanded microgrids with advanced angle droop control [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2018, 9(6): 6461-6469.
- [8] Nutkani I U, Peng W. Secondary droop for frequency and voltage restoration in microgrids[C]//European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, 2015: 1-7.
- [9] Guo F, Wen C, Mao J, *et al.* Distributed secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter-based microgrids[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, 62(7): 4355-4364.
- [10] Bouzid A M, Sicard P. Secondary voltage and frequency restoration control of droop-controlled inverter based microgrids[C]//IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE), 2017: 1-6.
- [11] Solanki A, Nasiri A. A new framework for microgrid management: virtual droop control [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2016, 7(2): 554-566.
- [12] Zhang H, Kim S. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1749-1761.
- [13] Schiffer J, Seel T. Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 96-109.
- [14] Yang Z, Xiang J, Li Y. Distributed consensus-based supply demand balance algorithm for economic dispatch problem in a smart grid with switching graph[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2017, 64(2): 1600-1610.
- [15] 王伟,徐燕芬. 适用于功率突变的MTDC系统改进下垂控制[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 59-64.
Wang Wei, Xu Yanfen. Improved droop control strategy for MTDC system suitable for changed active power[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 59-64.
- [16] 杨旭红,尹聪. 基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.
Yang Xuhong, Yin Cong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode [J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [17] Anand S, Fernandes B G. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2017, 28(4): 1900-1913.

收稿日期:2020-12-06

修改稿日期:2021-01-18

(上接第60页)

- off-grid starting mode of multi-parallel of power converter system [J]. Electrotechnical Application, 2016, 35(10): 79-82.
- [4] 甘江华,陈世峰,曹智慧,等. 微电网双模式可并联储能变流器主回路参数优化设计[J]. 电器与能效管理技术, 2017, (18): 84-88.
Gan Jianghua, Chen Shifeng, Cao Zhihui, *et al.* Design of main circuit parameters for dual mode parallel energy storage converter in micro-grid system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017, (18): 84-88.
- [5] 杨苹,许志荣,郑群儒,等. 微电网平滑切换中变流器的控制策略仿真研究[J]. 可再生资源, 2015, 33(11): 1625-1631.
Yang Ping, Xu Zhirong, Zheng Qunru, *et al.* Simulation research on control strategy of converter in microgrid smooth switching [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(11): 1625-1631.

收稿日期:2021-06-17

修改稿日期:2021-09-06