

# 基于虚拟阻抗的二次滤波功率分频控制方法

杨朝雯, 杨国朝, 刘建军, 王宏伟, 白辛雨

(国网天津市电力公司城东供电分公司, 天津 300250)

**摘要:**提出了一种基于虚拟阻抗的二次滤波功率分频控制方法,通过构建虚拟电容环和虚拟电感-电阻环来搭建隐形高通滤波器和隐形低通滤波器以实现不同储能单元对不同频段功率波动的补偿。首先介绍了直流微网分层控制体系,然后阐述了谐振型LCLC三端口直流母线电压控制器的工作原理以及拓扑特点,最后详细分析了所提虚拟阻抗二次滤波功率分频控制方法。

**关键词:**谐振型LCLC三端口变换器;直流微网;分层控制;二次滤波;虚拟阻抗

**中图分类号:**TM46 TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22530

## The Power Dividing Frequency Control of Second Order Filtering Based on Virtual Impedances

YANG Zhaowen, YANG Guochao, LIU Jianjun, WANG Hongwei, BAI Xinyu

(State Grid Tianjin Chengdong Electric Power Supply Company, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** A second order filtering power dividing frequency control strategy based on virtual impedance was proposed. The different frequency power compensation among different storage units by building invisible pass filters was achieved. The invisible pass filters including high pass filter and low pass filters were constructed by virtual capacitance loop and virtual inductance-resistance loop. Firstly, hierarchical control system of DC microgrid was introduced. Secondly, the operation and topology of LCLC resonant three-port converter were introduced. Finally, the proposed power dividing frequency control strategy of second order filtering based on virtual impedances was analyzed in detail.

**Key words:** LCLC resonant three-port converter; DC microgrid; hierarchical control; second order filtering; virtual impedance

随着世界能源的日益紧缺,分布式发电成为解决能源危机的重要方法。分布式发电包括风力发电、光伏发电等方式,具有绿色清洁、可持续等优点<sup>[1-3]</sup>。但同时分布式电源发出的功率也具有间歇性、随机性以及波动大的缺点<sup>[4]</sup>。为了解决上述问题,使分布式发电发出的功率满足并网要求,需将分布式发电系统和储能单元通过微网的方式接入电网。

微网包括直流微网和交流微网。直流微网的稳定运行依赖于直流母线电压的稳定。相对于交流微网而言,直流微网供电效率更高,控制更方便,运行更稳定<sup>[5]</sup>。但是直流微网的惯性较低,无法快速对母线电压波动进行抑制。因此一般采用下垂控制来增大微网的惯性,根据储能装

置荷电状态(state of charge, SOC)或微电源出力的不同改变下垂系数,从而将负载电流合理地分配给各供电单元(微电源、储能装置)。具体的下垂控制框图如图1所示。

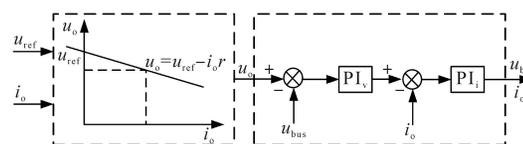


图1 直流微网下垂控制框图

Fig.1 The control diagram of droop control in DC microgrid

图1中,  $u_{ref}$  为母线电压初始给定值,  $i_o$  为负载电流,  $r$  为下垂系数,  $u_{bus}$  为母线电压值。

储能单元通过电力电子变换器与直流母线相连,将下垂曲线加在变换器的闭环控制之外,

基金项目:天津电力科技项目:基于柔性开关的交直流配用电系统研究(KJ20-1-09)

作者简介:杨朝雯(1995—),女,本科,助理工程师,Email:155235858@qq.com

作为控制外环,得到变换器母线电压给定值 $u_o$ ,再进行变换器闭环PI控制<sup>[6]</sup>。

储能单元用于平抑微网内的功率,实现功率的削峰填谷。通过引入储能装置,分布式发电系统的电能质量以及可靠性得到提升,也降低了分布式发电的投资成本。

常用的储能装置包括超级电容储能、蓄电池储能等。超级电容具有快速充放电、循环寿命长等特点,可以满足补偿高频功率的需要。蓄电池具有能量密度大的特点,可以满足补偿低频功率的需要<sup>[7-9]</sup>。超级电容和蓄电池混合储能系统充分发挥了功率型储能与能量型储能互补的优势,有效提高了混合储能系统的性能<sup>[10-12]</sup>。

为了实现上述目标,需对功率进行分频控制,区分高低频功率以方便储能单元进行补偿<sup>[13]</sup>。许多混合储能控制算法基于集中控制方式的滤波器实现,即微网波动功率被高通滤波器(high pass filter, HPF)和低通滤波器(low pass filter, LPF)分成高频分量和低频分量,然后分别作为超级电容控制环和蓄电池控制环的功率给定信号。然而,上述方法需要中央控制器并且对通信的要求较高,可能会造成通信延迟和通信失败,也不利于直流微网的扩展<sup>[1]</sup>。其原理图如图2所示。

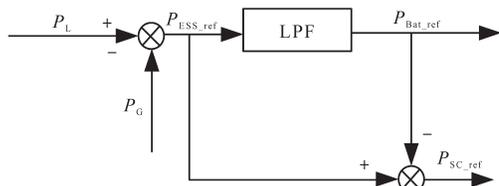


图2 基于集中控制方式的功率分频控制原理框图

Fig.2 Schematic diagram of power dividing frequency control based on centralized control

图2中, $P_L$ 为负载功率, $P_G$ 为分布式发电功率, $P_{ESS\_ref}$ 为混合储能系统补偿功率, $P_{Bat\_ref}$ 为蓄电池低频给定功率, $P_{SC\_ref}$ 为超级电容高频给定功率。

为了提高直流微网系统的可靠性,不依靠通信,仅需本地信息的分布式控制方式受到广泛关注。基于虚拟阻抗的功率分频控制是其中一种方式。即保证系统对超级电容具有足够快的响应速度,对蓄电池具有较慢的响应速度,从而形成一个隐形的高通滤波器和一个隐形的低通滤波器,以实现超级电容对高频功率的补偿,蓄电池对低频功率的补偿。蓄电池和超级电容均运行在电压控制模式以维持母线电压稳定。文献[14]提出了一种分布式虚拟阻抗控制方法,HPF

和LPF分别结合比例电压控制器生成高低频电流给定信号。文献[15]提出了一种分频协调控制策略,通过母线电压的反馈来提取功率波动,利用直流母线电压环和超级电容环设置高通滤波器、带通滤波器和低通滤波器三个隐形滤波器。其中母线功率波动的高、中、低频分量依次由母线电容、超级电容和蓄电池响应。

DC-DC变换器是连接储能装置和直流母线的中介,可分为储能单元单独接入直流母线或者通过多端口的形式接入直流母线。为了便于集成控制并提高效率,可通过谐振型三端口将混合储能系统与直流母线相连。

本文在第1节介绍了直流微网分层控制体系;第2节介绍了LCLC多谐振三端口变换器的工作原理以及拓扑特点;第3节详细分析了基于虚拟阻抗的二次滤波功率分频控制方法。

## 1 直流微网分层控制体系

为了提高储能单元的寿命以及经济性,并使混合储能互补优势最大化,需对直流微网进行分层控制<sup>[16-17]</sup>。根据对通信需求的不同,可分为本地信息控制和网络通信协调控制,具体的控制框图如图3所示。从图3中可以看到,直流微网的分层控制包括利用本地信息的底层控制以及依赖于通信协调的中层控制和顶层控制<sup>[18]</sup>。母线电压控制用于稳定直流母线电压以维持直流微网的稳定运行<sup>[19]</sup>。负载电压控制主要为了维持直流微网接入负荷的电压稳定。同时为了最大程度地发挥分布式发电的优势,对微电源进行最大功率跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)和输出电压控制<sup>[20]</sup>。中层控制主要对各单元进行功率控制和保护,包括分布式电源优化控制和混合储能优化控制。顶层控制主要负责微电网的经济可靠运行。

各单元功率控制和保护框图如图4所示。其中应将分布式发电功率采用下垂控制合理分配到各分布式发电单元<sup>[21-22]</sup>。将储能单元需提供的功率利用高通滤波和低通滤波的方式分为高频功率和低频功率,分别由超级电容和蓄电池进行补偿。同时也需要对混合储能单元进行保护,防止蓄电池过充过放以及限制超级电容的最大充放电功率,以延长混合储能系统的使用寿命<sup>[23]</sup>。同时为了充分发挥混合储能系统的互补优势,应使储能单元之间协调配合,维持储能单元SOC恒

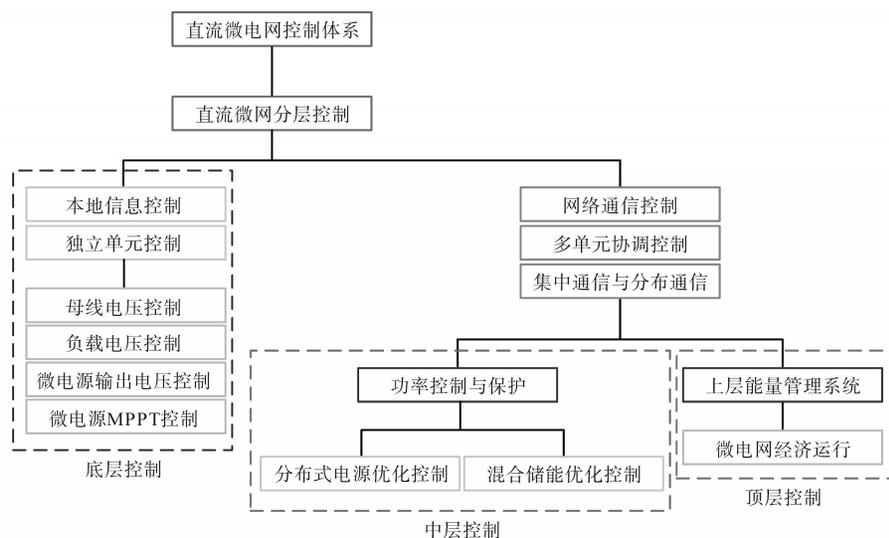


图3 直流微网分层控制框图

Fig.3 The hierarchical control block diagram of DC microgrid

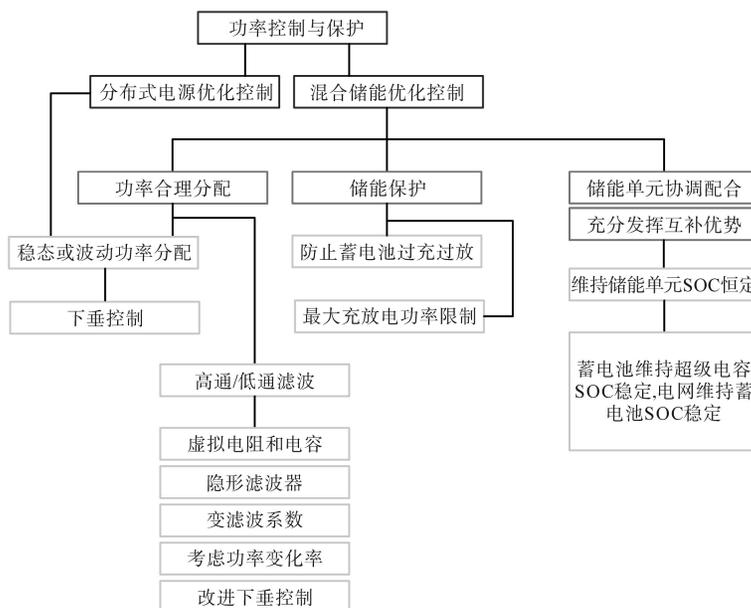


图4 各单元功率控制与保护框图

Fig.4 The block diagram of power control and protection for each unit

定。一般的方法是利用蓄电池维持超级电容SOC恒定,利用电网维持蓄电池SOC恒定<sup>[24]</sup>。

## 2 LCLC 多谐振三端口拓扑

谐振型 LCLC 多谐振三端口拓扑<sup>[25]</sup>如图 5 所示,其中  $C_{p1}, L_{p1}, C_{r1}, L_{r1}$  和  $C_{p2}, L_{p2}, C_{r2}, L_{r2}$  分别构成 LCLC 谐振腔。

多谐振腔阻抗为

$$Z = -j \frac{(L_r C_r L_p C_p) \omega^4 - (L_p C_p + L_r C_r + L_p C_r) \omega^2 + 1}{\omega C_r - (C_r L_p C_p) \omega^3} \quad (1)$$

通过合理的谐振腔参数配置,使谐振腔可以

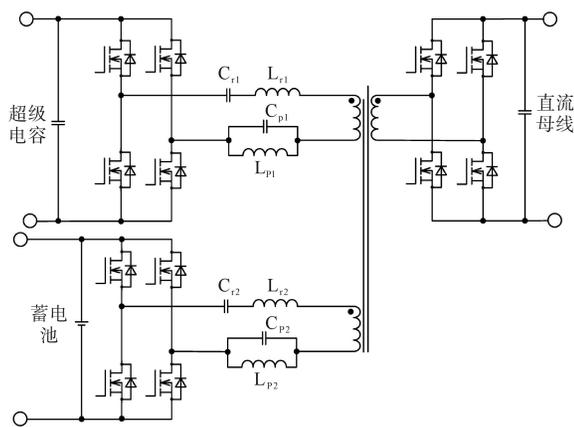


图5 LCLC多谐振三端口拓扑

Fig.5 Multi-resonant LCLC three-port topology

完全传递基波和三次谐波能量以提高变换器效率和电流利用率,对二次谐波能量完全抑制以减小谐振腔环流损耗。当谐振腔电流频率分别为 $\omega_r, 2\omega_r, 3\omega_r$ 时的谐振腔阻抗 $Z_1, Z_2, Z_3$ 分别为

$$\begin{cases} Z_1 = -j \frac{(L_r C_r L_p C_p) \omega_r^4 - (L_p C_p + L_r C_r + L_p C_r) \omega_r^2 + 1}{\omega_r C_r - (C_r L_p C_p) \omega_r^3} \\ Z_2 = -j \frac{16(L_r C_r L_p C_p) \omega_r^4 - 4(L_p C_p + L_r C_r + L_p C_r) \omega_r^2 + 1}{2\omega_r C_r - 8(C_r L_p C_p) \omega_r^3} \\ Z_3 = -j \frac{81(L_r C_r L_p C_p) \omega_r^4 - 9(L_p C_p + L_r C_r + L_p C_r) \omega_r^2 + 1}{3\omega_r C_r - 27(C_r L_p C_p) \omega_r^3} \end{cases} \quad (2)$$

令 $Z_1=Z_3=0, Z_2=\infty$ ,可得谐振腔参数之间的关系为

$$\begin{cases} C_r = \frac{5}{3} C_p \\ L_r = \frac{16}{15} L_p \\ 4\omega_r^2 = 1/(C_p L_p) \end{cases} \quad (3)$$

谐振腔电流仿真波形如图6所示,由于谐振腔传递了基波和三次谐波能量,谐振腔电流 $i_r$ 为马鞍波。可见通过合理的谐振腔参数配置可以提高LCLC多谐振三端口的电流利用率。

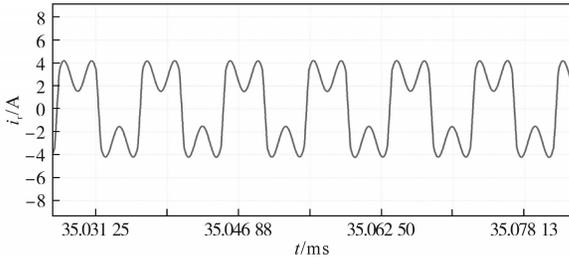


图6 谐振腔电流仿真波形

Fig.6 Simulation waveform of resonant current

### 3 基于虚拟阻抗的二次滤波功率分频控制方法

将混合储能提供的功率进行分频控制,超级电容补偿高频功率,蓄电池补偿低频功率。本文提出了一种基于虚拟阻抗的二次滤波功率分频控制方法,控制框图如图7所示。

图7中, $u_{ob}$ 为蓄电池端口控制环路输出值, $u_{oc}$ 为超级电容端口控制环路输出值, $r$ 为蓄电池内阻。 $C$ 与 $L$ 分别为虚拟电容和虚拟电感, $R$ 为虚拟电阻。 $i_{bat}$ 为蓄电池输出电流, $i_{sc}$ 为超级电容输出电流, $u_{oc1}$ 为超级电容控制环母线电压给定值, $u_{ob1}$ 为蓄电池控制环母线电压给定值。

在蓄电池端口的控制环路中包含虚拟电感-

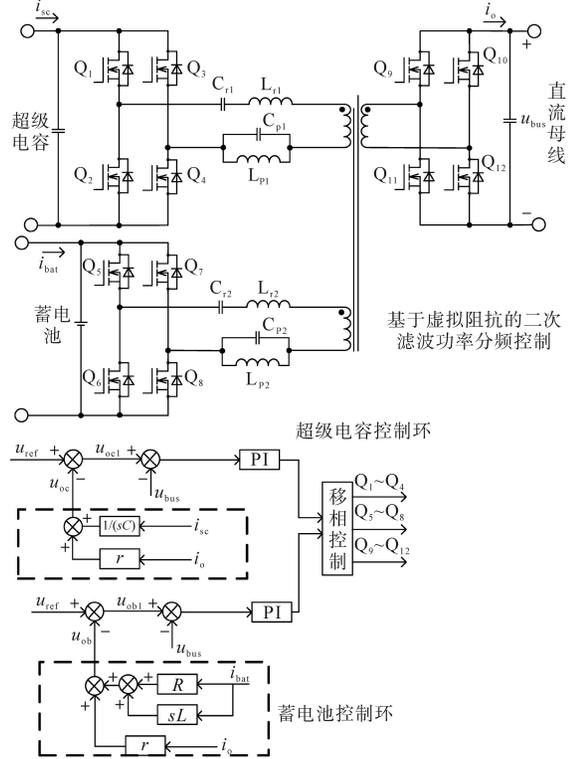


图7 基于二次滤波控制方法的LCLC多谐振三端口原理图

Fig.7 The schematic diagram of LCLC multi-resonant three-port converter based on the second order filtering control

电阻控制环以及母线电压下垂控制环。其中,虚拟电感-电阻控制环用于提取蓄电池电流 $i_{bat}$ 中的高频分量,作为负反馈信号加入到母线电压控制环中:

$$u_{ob} = i_o r + (R + sL) i_{bat} \quad (4)$$

同理,在超级电容端口的控制环路中包含虚拟电容控制环以及母线电压下垂控制环。其中,虚拟电容控制环用于提取超级电容电流 $i_{sc}$ 中的低频分量,作为负反馈信号加入到母线电压控制环中:

$$u_{oc} = i_o r + i_{sc} / (sC) \quad (5)$$

当母线电压稳定时:

$$u_{oc} = u_{ob} = i_o r \quad (6)$$

为了进一步分析,根据文献[26-27],建立图7的等效电路图,如图8所示。图8中 $U_R = i_o (R_L + r)$ ,  $i_{E_{ss}} = i_{bat} + i_{sc}$ ,其中 $R_L$ 为负载电阻。

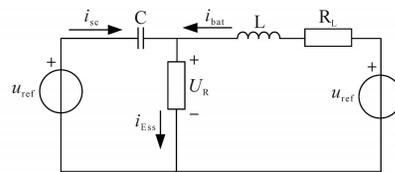


图8 基于虚拟阻抗的二次滤波控制等效电路

Fig.8 The equivalent circuit of second order filtering control based on virtual impedance

根据电路原理可得:

$$\begin{cases} i_{sc} = \frac{CLs^2 + CRs}{CLs^2 + CRs + 1} i_{Ess} = Z_a i_{Ess} \\ i_{bat} = \frac{1}{CLs^2 + CRs + 1} i_{Ess} = Z_b i_{Ess} \end{cases} \quad (7)$$

$Z_a$ 与 $Z_b$ 的频率特性如图9所示。可见 $Z_a$ 为高通滤波器, $Z_b$ 为低通滤波器。超级电容和蓄电池分别补偿功率波动的高频分量和低频分量,实现了混合储能对不同频段功率的补偿。

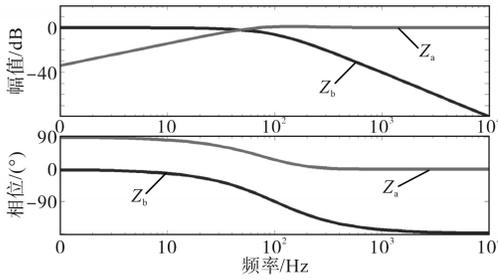


图9  $Z_a$ 与 $Z_b$ 的频率特性

Fig.9 The frequency characteristics of  $Z_a$  and  $Z_b$

## 4 结论

本文针对直流微网的应用,首先阐述了直流微网分层控制体系,同时采用LCLC多谐振三端口拓扑将混合储能系统接入直流母线,并说明了通过合理的参数配置可以使三端口传递基波和三次谐波能量,提高电流利用率和效率。最后详细分析了所提到的虚拟阻抗二次滤波功率分频控制方法,实现了混合储能对不同频段功率的补偿。

### 参考文献

[1] Xu Qianwen, Hu Xiaolei, Wang Peng, *et al.* A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7):5930-5941.

[2] Lin Pengfeng, Wang Peng, Xiao Jianfang, *et al.* An integral droop for transient power allocation and output impedance shaping of hybrid energy storage system in DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7):6262-6277.

[3] Sathish Kumar Kollimalla, Mahesh K Mishra, Abhisek Ukil, *et al.* DC grid voltage regulation using new HESS control strategy [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 772-781.

[4] Mayank Baranwal, Alireza Askarian, Srinivasa Salapaka, *et al.* A distributed architecture for robust and optimal control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4):3082-3092.

[5] 邓凯, 赵伟, 罗敏, 等. 适用于光储充直流微网的绿色高效电力变换器[J]. 电气传动, 2020, 50(9):42-47.

Deng Kai, Zhao Wei, Luo Min, *et al.* Power converter with green converting and high efficiency for PV-storage-charging DC microgrid[J]. Electric Drive, 2020, 50(9):42-47.

[6] 谭超, 乐周美, 杨哲, 等. 基于FO-PI控制器的直流微网母线电压控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5):96-101.

Tan Chao, Le Zhoumei, Yang Zhe, *et al.* Bus voltage control strategy for DC microgrid based on FO-PI controller [J]. Electric Drive, 2020, 50(5):96-101.

[7] Jing Wenlong, Lai Chanhung, Wong Shung Hui Wallace, *et al.* Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(4):461-469.

[8] Zhou Haihua, Tanmoy Bhattacharya, Duong Tran, *et al.* Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930.

[9] 郭力, 李霞林, 王成山. 计及非线性因素的混合供能系统协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 32(25):60-69.

Guo Li, Li Xialin, Wang Chengshan. Coordinated control of hybrid power supply systems considering non-linear factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 32(25):60-69.

[10] Shen Junyi, Alireza Khaligh. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3):223-231.

[11] 程志江, 李永东, 谢永流, 等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10):2739-2745.

Cheng Zhijiang, Li Yongdong, Xie Yongliu, *et al.* Control strategy for hybrid energy storage of photovoltaic generation microgrid system with super capacitor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10):2739-2745.

[12] 张宋杰, 秦文萍, 任春光, 等. 双极性直流微电网混合储能系统协调控制策略[J]. 高压技术, 2018, 44(8):2761-2768.

Zhang Songjie, Qin Wenping, Ren Chunguang, *et al.* Control strategy for hybrid energy storage system in bipolar-type DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8):2761-2768.

[13] 王艾萌, 黄浦东. 考虑负载变化率的混合储能分频控制优化策略[J]. 现代电力, 2018, 35(4):80-86.

Wang Aimeng, Huang Pudong. An optimal frequency division control for hybrid energy storage considering the change rate of the load[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(4):80-86.

[14] Gu Yunjie, Li Wuhua, He Xiangning, *et al.* Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC Microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4):2328-2337.

[15] 李武华, 徐驰, 禹红斌, 等. 直流微网系统中混合储能分频协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14):84-92.

- Li Wuhua, Xu Chi, Yu Hongbin, *et al.* Frequency dividing coordinated control strategy for hybrid energy storage system of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14):84-92.
- [16] 王成山,李微,王议锋,等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):84-97.  
Wang Chengshan, Li Wei, Wang Yifeng, *et al.* DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):84-97.
- [17] 李武华,顾云杰,王宇翔,等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9):156-163.  
Li Wuhua, Gu Yunjie, Wang Yuxiang, *et al.* Control architecture and hierarchy division for renewable energy DC microgrid[J]. Automation of Power Electric Systems, 2015, 39(9):156-163.
- [18] 杨少帅,罗萍萍. 带混合储能的光伏并网系统功率协调控制策略研究[J]. 现代电力, 2019, 36(1):37-44.  
Yang Shaoshuai, Luo Pingping. Research on power coordination control strategy of photovoltaic grid-connected system with hybrid energy storage[J]. Modern of Electric Power, 2019, 36(1):37-44.
- [19] 孟润泉,刘家赢,文波,等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7):2186-2193.  
Meng Runquan, Liu Jiaying, Wen Bo, *et al.* Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7):2186-2193.
- [20] 王建萍,潘庭龙. 风光储微网系统孤岛运行控制策略研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(12):1804-1810.  
Wang Jianping, Pan Tinglong. Research on control strategy in island mode of wind-PV-ES hybrid microgrid system[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(12):1804-1810.
- [21] 韩继业,李勇,曹一家,等. 基于模块化多电平型固态变压器的新型直流微网架构及其控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(3):733-740.  
Han Jiye, Li Yong, Cao Yijia, *et al.* A new DC microgrid architecture based on MMC-SST and its control strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(3):733-740.
- [22] 杨捷,金新民,杨晓亮,等. 交直流混合微网功率控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(1):29-39.  
Yang Jie, Jin Xinmin, Yang Xiaoliang, *et al.* Overview on power control technologies in hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):29-39.
- [23] 李学斌,刘建伟. 采用二阶滤波的混合储能系统实时功率分配方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5):1650-1657.  
Li Xuebin, Liu Jianwei. Hybrid energy storage system real-time power distribution method adopting second-order filtering[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1650-1657.
- [24] 田春光,田利,李德鑫,等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14):75-83.  
Tian Chunguang, Tian Li, Li Dexin, *et al.* Control strategy for tracking the output power of photovoltaic power generation based on hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14):75-83.
- [25] Wang Chengshan, Li Wei, Wang Yifeng, *et al.* A high-efficiency isolated LCLC multi-resonant three-port bidirectional DC-DC converter[J]. Energies, 2017, 1(1):1-22.
- [26] Wang Panbao, Lu Xiaonan, Wang Wei, *et al.* Frequency division based coordinated control of three-port converter interfaced hybrid energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Access, 2018, 6(1):25389-25398.
- [27] 江晨,曾国宏,吴学智,等. 双极性直流微网的分层控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8):2217-2222.  
Jiang Chen, Zeng Guohong, Wu Xuezhi, *et al.* Hierarchical control strategy of bipolar-type DC microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(8):2217-2222.

收稿日期:2020-10-12

修改稿日期:2020-11-03