

一种改进下垂控制的直流微电网多储能运行方法

王超¹, 曹炜¹, 张旭航^{1,2}, 邱春风¹, 陈卫¹, 李芸¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090;

2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200120)

摘要: 基于低速通讯网络, 提出一种改进功率下垂控制的直流微电网多储能运行方法, 实现了荷电状态 (state of charge, SOC) 均衡, 各储能单元间功率的合理分配以及稳定母线电压等三方面的平衡控制。首先, 考虑到直流微网中随着各部分系统状态的不同其运行也有所差异, 根据储能单元以及负荷的状态, 将系统的运行方式分为三种工作模式; 其次, 为了使得各储能单元的 SOC 达到均衡分配的目的, 引入一种根据储能单元 SOC 的大小来修改下垂系数的改进功率下垂控制方法; 通过增加电压偏移量, 有效地减小了直流母线偏差。最后, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型并在 RTDS 搭建实验平台, 仿真及实验结果证明了所提控制策略的有效性和正确性。

关键词: 直流微电网; 下垂控制; 荷电状态; 低速通信

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23324

A Multi-energy Storage Operation Method of DC Microgrid Based on Improved Power Droop Control

WANG Chao¹, CAO Wei¹, ZHANG Xuhan^{1,2}, QIU Chunfeng¹, CHEN Wei¹, LI Yun¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company Economic Technology Research Institute, Shanghai 200120, China)

Abstract: Based on the low-speed communication network, a multi-energy storage operation method of DC microgrid with improved power droop control was proposed so as to realize the balanced control in three aspects: state of charge (SOC) balance, rational power distribution among energy storage units and stable bus voltage. Firstly, considering that the operation of DC microgrid varies with the different system states, the operation mode of the system was divided into three working modes according to the state of energy storage unit and load. Secondly, in order to achieve the purpose of balanced distribution of SOC of each energy storage unit, an improved droop control method was introduced to modify the droop coefficient according to the size of SOC of energy storage unit. By increasing the voltage offset, the DC bus deviation was effectively reduced. Finally, the simulation model was built in Matlab/Simulink and the experimental platform was built in RTDS. The simulation and experimental results prove the effectiveness and correctness of the proposed control strategy.

Key words: DC microgrid; droop control; state of charge (SOC); low-speed communication

化石燃料等传统能源的日渐枯竭推动着以光能、风能为代表的可再生能源的发展, 但由于其间歇性、不确定性的特点, 可再生能源的有效利用受到了极大的限制^[1]。因此微电网作为一种有效的解决方案而备受瞩目。为了保证微电网系统的可靠性与稳定性, 需要在微电网中加入储

能装置, 利用其削峰填谷的特性对分布式能源的不稳定性进行补充^[2]。

微电网可分为交流微电网、直流微电网和混合交直流微电网, 其中直流微电网因为有着控制简单、减少了功率转换级和不需要考虑无功补偿等问题的优点而快速发展^[3-4]。直流微电网有并

基金项目: 国家自然科学基金青年自然基金项目(51807114); 上海电力公司技术咨询项目(SGSHJY00GPJS1900054)

作者简介: 王超(1997—), 男, 硕士, Email: 857324658@qq.com

网和孤岛两种运行模式,本文研究的主要是在孤岛模式下的直流微电网的稳定运行问题^[5-6]。在孤岛模式下,由于直流微电网中分布式电源的随机性和波动性,无法保证系统的稳定性,所以需要在系统中加入储能系统,在平抑波动的同时,维持母线电压的稳定性^[7-8]。同时为了防止因储能单元故障而导致系统崩溃的情况,通常采用多个小储能单元并联接入系统^[9]。

为了防止分布式储能系统过度充放电的同时,兼顾在受到干扰的情况下公共直流母线的稳定,储能系统的荷电状态(state of charge, SOC)的控制策略是重中之重^[10-11]。在直流微电网中,应用下垂控制作为储能系统的控制策略比较常见,然而,传统的下垂控制由于其下垂系数为常数,难以保证储能系统的SOC均衡^[12]。为了克服系统中SOC的均衡分配问题,国内外学者提出了一些改进方法。文献[13]提出了一种以SOC的指数函数来自适应调节各储能单元下垂系数的改进下垂控制方法,从而保证SOC的均衡。但是在储能单元SOC差距较大时会出现环流,造成功率不必要的功率损失。文献[14]通过在功率下垂控制中引入功率标幺值和均衡式电压偏移量保证了功率的精确分配,但是文中用直流恒压源来代替光伏单元和储能单元的做法并不具备现实意义,所得结论有待验证。

基于上述分析,本文针对直流微电网系统的稳定以及各储能单元间的SOC均衡控制,提出了一种基于荷电状态的改进功率下垂控制的直流微电网分级运行控制方法。首先,根据当前储能单元SOC的大小、光伏单元发电功率以及直流负载将系统划分为三种控制模式,分别是恒功率模式,恒压模式1和恒压模式2。各储能单元通过低速通信网络收集各个单元的实时SOC并计算实时的平均SOC,各个单元通过与平均SOC相比较,调节各自储能单元能量的吸收与释放,最终达到各个储能单元SOC均衡的目的。最后在Matlab/Simulink中搭建仿真模型并且在RTDS搭建实验平台,对所提控制策略的正确性进行验证。

1 直流微电网结构及其运行模式

1.1 直流微电网结构

本文所研究的自治直流微电网主要包含以下三个主要的模块,即光伏单元、储能单元、直流

负载。储能单元通过双向DC-DC变换器与公共直流母线相连接,可以实现能量的双向流动;光伏单元和直流负载都是通过单向DC-DC变换器与直流母线相连,具体结构如图1所示。

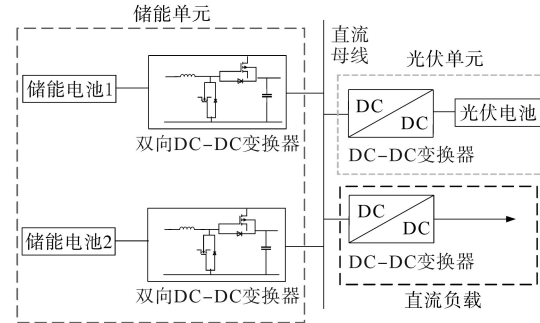


图1 直流微电网结构图

Fig.1 Structure diagram of DC microgrid

由于光伏出力和直流负荷的波动都是无法预测的,所以需要在直流微网系统中加入储能单元来调节系统功率的平衡,稳定直流母线电压,同时为了防止因为某一储能单元故障而导致整个微网系统的崩溃,本文采用多组小容量的储能单元组成整个储能系统,因此各个小储能单元间SOC的均衡分配也显得尤为重要。故本文所探讨的直流微网的实现目标为基于母线电压的稳定和各个储能单元间SOC的均衡分配。

1.2 直流微电网运行模式

本文根据系统的运行状态将直流微网系统分为以下三种运行模式。

恒功率模式:储能单元的SOC的工作范围为20%~90%时,光伏单元运行在最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制模式,储能单元运行于下垂控制模式,公共直流母线电压的稳定通过储能单元的充放电来调节。此阶段储能单元的充放电为本文主要的研究的阶段,即

$$P_{es} = P_{pv} - P_{load} \quad (1)$$

式中: P_{es} 为储能单元输出功率; P_{pv} 为光伏单元发出的功率; P_{load} 为负载功率。

恒压模式1:储能单元SOC的工作范围大于90%时,储能单元处于充电闭锁状态。此时若光伏单元发电量较大,则会出现有功功率过剩的情况,系统功率供过于求,为维持公共直流母线的稳定以及延长储能单元的使用寿命,更改光伏单元的MPPT模式为下垂控制模式。在外界光照和环境温度降低或者负载增加时,储能单元由充电模式转换为放电模式,当储能单元的SOC降低至

式中: R_{esi}^* 为经过修改后的储能单元下垂系数; R_{esi}^0 为下垂系数的初值; ΔR_i 为储能单元下垂系数偏移量。

对于第 i 个储能单元, 当 $P_i > 0$ 时:

$$\Delta R_i = (\overline{SOC} - SOC_i) G_{PI} \quad (11)$$

当 $P_i < 0$ 时:

$$\Delta R_i = (\overline{DOD} - DOD_i) G_{PI} \quad (12)$$

式中: DOD_i 为第 i 个储能单元的放电深度; $\overline{SOC}$ 为任意时刻各个储能单元 SOC 的平均值; SOC_i 为第 i 个储能单元的 SOC ; $\overline{DOD}$ 为各个储能单元 DOD 的平均值。

由式(11)、式(12)可知, 当蓄电池处于放电状态时, SOC 大的储能单元多放电, SOC 小的储能单元少放电; 当蓄电池处于充电状态时, DOD 大的储能单元多充电, DOD 小的储能单元少充电, 最终达到储能单元 SOC 均衡分配的目的, 防止了某个储能单元过度充放电情况的发生。

由上述分析可知, 在各储能单元的荷电状态不一致的情况下, 各储能单元的下垂系数一直处于动态变化之中, 各自的实际功率不再按照其蓄电池的额定功率进行分配, 为了保证各个单元功率的合理分配, 引入虚拟额定功率的概念, 其定义如下:

$$P_{vir} = \frac{\Delta V_{max}}{R_{esi}^*} \quad (13)$$

式中: P_{vir} 为第 i 个储能单元的虚拟额定功率。

结合式(7)、式(9)、式(13), 可得:

$$P_1 R_{es1}^* = P_2 R_{es2}^* = \dots = P_i R_{esi}^* = \dots = P_n R_{esn}^* \quad (14)$$

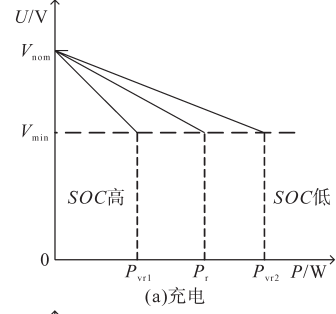
所以, 在改进后的下垂控制中, 储能单元 SOC 不一致时, 其实际输出功率按照各自储能单元的实时下垂系数的反比进行分配, 虚拟额定功率的下垂曲线如图3所示。

根据图3, 当储能系统处于充电状态时, SOC 低的储能单元下垂系数会更小, 获得较多的能量; SOC 高的储能单元下垂系数会更大, 获得较少的能量。当处于放电状态时, SOC 低的储能单元下垂系数会更大, 释放较多的能量; SOC 高的储能单元下垂系数会更小, 释放较少的能量; 最终达到各储能单元 SOC 均衡的目的。

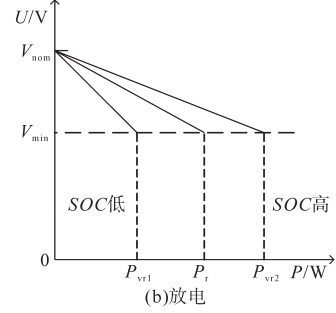
2.3 电压偏移补偿器

为了防止由于虚拟阻抗而引起的母线电压偏移量过大从而导致系统的不稳定, 引入直流母线电压偏移补偿量, 定义如下:

$$\Delta V_{ri} = (V_{nom} - V_{esi}) G_{PI} \quad (15)$$



(a) 充电



(b) 放电

图3 虚拟额定功率下垂曲线

Fig.3 Sagging curves of virtual rated power

式中: ΔV_{ri} 为第 i 个储能单元所需的电压补偿量; V_{esi} 为第 i 个储能单元的实际出口电压。

最终, 直流母线出口电压的参考值表达式为

$$V_{esi}^* = V_{nom} - R_{esi}^* P_{esi} + \Delta V_{ri} \quad (16)$$

式中: P_{esi} 为第 i 个储能单元的实际出口功率。

综上, 储能单元的控制策略框图如图4所示。

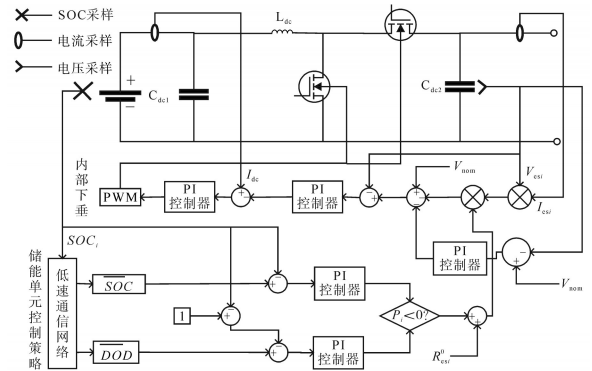


图4 储能单元控制策略框图

Fig.4 The block diagram of energy storage unit control strategy

由图4可知, 储能单元的控制策略分为三个部分, 分别是电压电流双闭环控制, 储能单元荷电状态均衡控制和电压偏移补偿器。通过三者之间的协调配合以及根据储能单元 SOC 和系统负荷状态调节光伏出力, 共同维持直流微电网系统的稳定运行。

3 仿真分析

为了验证本文所提理论的正确性, 采用图1所示的直流微网结构在 Simulink 中搭建仿真

模型。

各个单元的参数设置如下所示:直流母线标准电压 $V_{\text{nom}}=400$ V;直流母线最高允许电压 $V_{\text{max}}=420$ V;直流母线最低允许电压 $V_{\text{min}}=380$ V;光伏单元最大出力 $P_{\text{pvmax}}=3$ kW,恒功率负载 CPL 1.5 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW;储能单元 SOC 上限 90%, 储能单元 SOC 下限 20%;储能单元 1 额定容量 1.5 A·h, 储能单元 2 额定容量 1.5 A·h。

3.1 标准模式下动态性能验证

为了验证在标准模式下本文所提控制方法的正确性,整个仿真时长为 9 s,设置光伏单元出力为 3 kW,两个储能单元初始的 SOC 分别为 50%, 51%,下垂系数的初值都为 0.005。0~3 s 时,负载为 2 kW,3~6 s 时,负载为 4 kW,6~9 s 时,负载为 6 kW。仿真结果如图 5 所示。

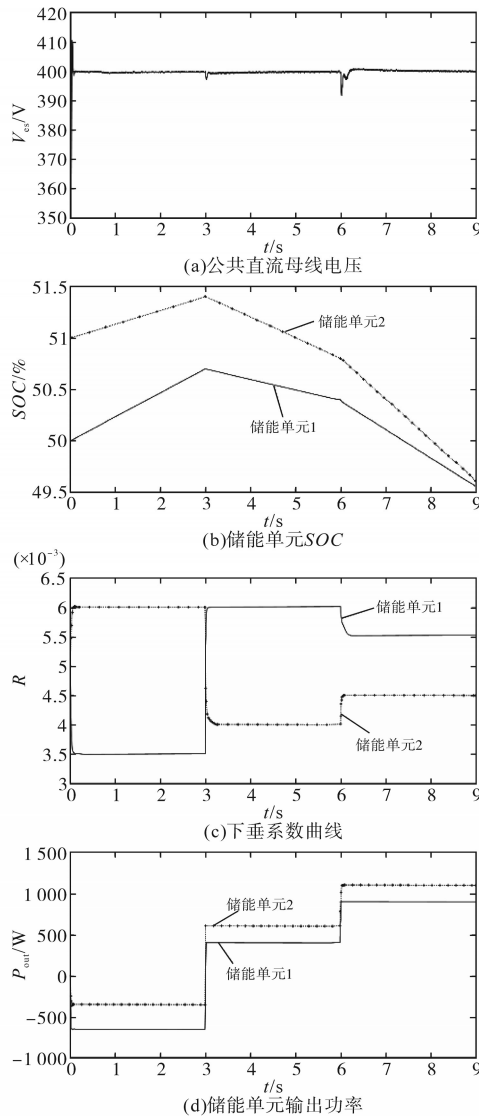


图5 标准模式下仿真曲线

Fig.5 Simulation curves in standard mode

由图 5a、图 5b 可知,在整个仿真过程中,公共直流母线电压可以保持很好的稳定。在 0~3 s 时,光伏出力在满足负载的需求之余,剩余能量由储能单元 1、2 吸收,此时储能单元处于充电状态,由于控制策略的调节, SOC 低的储能单元 1 会吸收更多的能量, SOC 高的储能单元 2 会吸收较少的能量。在 3~6 s 时,由于负载的上升,光伏单元无法满足需求,此时储能系统处于放电状态,同样是由于控制策略的调节, SOC 低的储能单元 1 会释放较少的能量, SOC 高的储能单元 2 会释放较多的能量。在 6~9 s 时,负载进一步变大,系统运行状况与之前类似,此处不多做赘述。总之,由于本文所提控制策略的调节,在仿真结束时,两储能单元的 SOC 已经十分接近,证明所提控制策略的有效性。

由图 5c、图 5d 可知,在 0~3 s 时,储能单元 1 与储能单元 2 的下垂系数的比值大约为 0.003 5/0.006, 即 1/1.71, 它们的输出功率的比值大约为 656.52/350.95, 即 1.87/1, 二者大致成反比分配;在 3~6 s 时,储能单元 1 与储能单元 2 的下垂系数的比值大约为 0.006/0.004, 即 1.50/1, 其输出功率的比值大约 339.65/603.61, 即 1/1.51, 二者基本成反比分配;6~9 s 时,储能单元 1 与储能单元 2 的下垂系数的比值大约为 0.005 5/0.004 5, 即 1.22/1, 其输出功率的比值大约为 901.13/1 104.33, 即 1/1.23, 同样二者基本成反比分配。综上,在整个运行过程中,储能单元的输出功率大致是按照各自的下垂系数成反比分配,进一步证明了所提控制策略的有效性。

3.2 光伏波动下仿真分析

为了检验在光伏波动的情况下系统的稳定性,在仿真模型中设置环境温度为 25 ℃,光照起始强度为 600 W/m²,恒功率负载设置为 1 500 kW,两个储能单元初始的 SOC 分别为 50%, 51%, 为了观察到两储能单元最终达到稳定状态,整个仿真时长设置为 18 s,在 0~6 s 时,接入储能单元 1;在 6~12 s 时,接入储能单元 2,光照强度为 1 000 W/m²;在 12~18 s 时,光照强度为 800 W/m²。仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在整个仿真过程中,直流微电网系统的公共直流母线稳定在 400 V,储能单元一直处于充电状态。在 0~6 s 时,光伏单元的输出功率为 1 679.64 W,储能单元 1 的充电功率为 180.63 W,储能单元 2 未接入,其充电功率为 0 W,

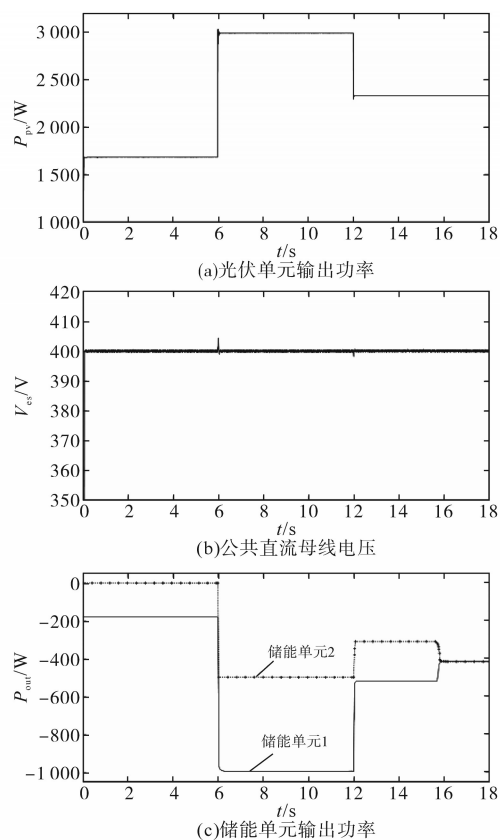


图6 光伏波动仿真曲线

Fig.6 Simulation curves under photovoltaic fluctuation

基本满足供求关系;在6~12 s时,储能单元2接入系统,光伏单元的输出功率为2 990.29 W,储能单元的充电功率按照各自的下垂系数的反比进行分配,分别为994.22 W,497.49 W;在12~18 s时,光伏单元的输出功率为2 329.23 W;在15.73 s之前,两个储能单元的能量流动与第二阶段相似,分别为517.29 W,310.84 W;在15.73 s时,两个储能单元的SOC达到一致。由于储能单元控制策略的调节,此后两个储能单元的充电功率按照各自的额定功率进行分配,即两个储能单元的输出功率会趋于一致,为415.62 W。

4 实验分析

为了验证本文所提改进下垂控制策略的可行性,本文基于RTDS搭建了实验平台对直流独立微电网进行实验分析,实验平台如图7所示。主要参数与仿真参数相同(见第3节)。

本文针对光伏波动的情况下,直流微电网公共直流母线电压能否保持稳定以及各储能单元能否快速到达荷电状态平衡的状态进行了实验验证,图8为各项实验波形图。

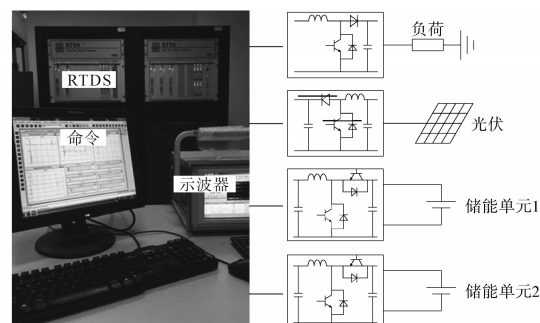


图7 基于RTDS的系统结构图

Fig.7 System structure diagram based on RTDS

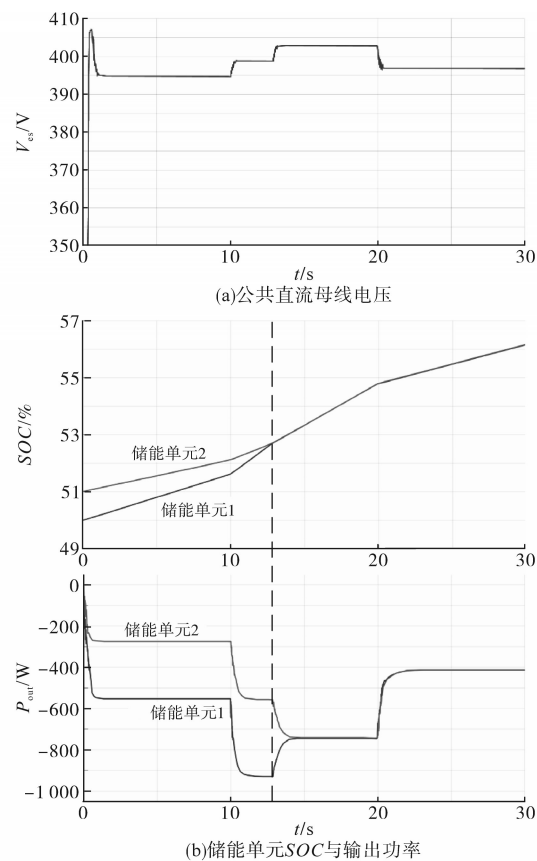


图8 基于RTDS的实验波形图

Fig.8 Experimental waveforms based on RTDS

当光伏单元发出的功率始终大于负荷消耗的功率时,储能单元稳定地处于充电状态。由图8可知,公共直流母线电压能够保持很好的稳定,在额定电压400 V的2.5%的偏差范围内得到有效的调节。实验中储能单元一直处于充电状态,在 T 时刻之前,各个储能单元的输出功率按照各自的下垂系数成反比进行分配。 T 时刻之后,功率进行再分配,此时两个储能单元的SOC达到了均衡状态,所以此后两储能单元的输出功率按照其额定功率进行分配;证明了本文所提控制策略的有效性与可行性。同时由实验结果可知,采用本文所提控制策略时,荷电状态平衡的速度较

快,大约在储能单元SOC增长3%时,两储能单元就达到了均衡状态。

5 结论

针对孤岛模式下直流微电网系统中存在的公共直流母线电压稳定,各储能单元间SOC的均衡控制以及过度充放电问题,提出了一种基于荷电状态的改进功率下垂控制的直流微电网分级运行控制方法。首先依据直流微电网系统的实时状态,将其分成恒功率模式、恒压模式1、恒压模式2等三种运行模式,解决了储能单元的过度充放电问题。其次通过低速通讯网络,将下垂系数的取值与各储能单元的SOC联系起来,以达到储能单元SOC均衡的目的;并且通过引入虚拟额定功率这一概念,实现了储能单元输出功率的合理分配问题。最后搭建模型进行仿真分析和实验验证,结果表明了所提方法的有效性与可行性。

参考文献

- [1] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18,369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(01): 1-18+369.
- [2] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 2804-2815.
- [3] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等.直流微电网下垂控制技术综述[J].中国电机工程学报,2018,38(1):72-84,344.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Review on droop control technology of DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [4] 卢锦玲,张伟,张祥国,等.含混合储能的光伏微电网系统协调控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(8):102-108.
LU Jinlin, ZHANG Wei, ZHANG Xiangguo, et al. Coordinated control strategy of photovoltaic microgrid system with hybrid energy storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 102-108.
- [5] 张弛,曾杰,曾嵘,等.直流孤岛微电网的两级功率协同控制方法[J].电气传动,2019,49(12):58-63.
ZHANG Chi, ZENG Jie, ZENG Rong, et al. Two-stage coordinated power control method for DC isolated microgrid[J]. Electric Drive, 2019, 49(12): 58-63.
- [6] CHEN Y K, WU Y C, SONG C C, et al. Design and implementation of energy management system with fuzzy control for DC microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(4): 1563-1570.
- [7] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Summary of key technologies of DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [8] 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 of DC microgrid based on FO-PI controller[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 96-101.
- [9] 朱晓荣,蔡杰.多储能直流微电网的分布式控制[J].现代电力,2016,33(2):13-21.
ZHU Xiaorong, CAI Jie. Distributed control of multi-energy storage DC microgrid [J]. Modern Power, 2016, 33(2): 13-21.
- [10] 邓凯,赵伟,罗敏,等.适用于光储直流微网的绿色高效电力变换器[J].电气传动,2020,50(9):42-46,71.
DENG Kai, ZHAO Wei, LUO Min, et al. Green and efficient power converter for DC microgrid with optical storage[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 42-46, 71.
- [11] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(4): 2288-2303.
- [12] XIAO J, WANG P, SETYAWAN L. Hierarchical control of hybrid energy storage system in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 4915-4924.
- [13] DIAZ N L, DRAGIČEVIĆ T, VASQUEZ J C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2476-2485.
- [14] 邱春风,曹炜,刘美娜.基于功率下垂特性的直流微电网分布式控制[J].电气传动,2021,51(3):48-54.
QIU Chunfeng, CAO Wei, LIU Meina. Distributed control of DC microgrid based on power droop[J]. Electric Drive, 2021, 51(3): 48-54.

收稿日期:2021-04-07

修改稿日期:2021-06-11