

# 一种基于级联 Buck-Boost 变换器的多储能并联系统及其控制策略设计

苏 适, 栾思平, 罗恩博, 杨 洋

(云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650000)

**摘 要:** 储能单元是直流微电网可靠运行需要解决的关键环节, 传统的双向 Buck-Boost 变换器在电压增益及成本等方面不具有优势, 因此需要新的设计方案。首先, 以基于级联型 Buck-Boost 变换器的储能系统为研究对象, 提出级联 Buck-Boost 变换器作为子模块的系统设计方案; 然后, 通过对级联 Buck-Boost 变换器的工作模态分析, 确定其在 Buck 和 Boost 模式下的电压增益, 并给出调制策略, 同时结合直流微网运行模式, 进一步提出储能系统的整体运行方案, 在不同的工况下采用合适的控制策略来维持微网的可靠运行; 最后, 搭建相关仿真验证了所设计的储能系统和控制方案的有效性。

**关 键 词:** 储能单元; 直流变换器; 下垂控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.008

中图分类号: TM46

文章编号: 1673-9140(2022)03-0070-07

## A multi-storage parallel system based on cascaded Buck-Boost converter and its control strategy design

SU Shi, LUAN Siping, LUO Enbo, YANG Yang

(Electric Power Science Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China)

**Abstract:** Energy storage unit is one of the key factors which can ensure the reliable operation of DC microgrids. Traditional bi-directional Buck-Boost converters have no advantages in voltage gain regulation and the corresponding cost, so a new design scheme is required to make a trade-off between the regulation capability and cost. First, for the energy storage system based on cascaded Buck-Boost converter, this paper proposes a system-level design scheme which uses cascaded Buck-Boost converter as the sub module. Then, the voltage gain regulation of the cascaded Buck-Boost converter in Buck and Boost mode is investigated by analyzing the working mode, and the modulation strategy is proposed for the cascaded Buck-Boost converter. At the same time, with the consideration of the operation mode of DC microgrid, the overall operation strategies of energy storage system are further proposed to enable the storage to adopt the appropriate control strategy to secure the reliable operation of microgrid under different working conditions. Finally, the effectiveness of the designed energy storage system and the control strategy are verified by several simulations.

**Key words:** energy storage system; DC/DC converter; droop control

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-11-26

基金项目: 云南电网有限责任公司电力科学研究院科技项目(0562002018030304ZN00004); 国家自然科学基金(51977067)

通信作者: 罗恩博(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网自动化及新能源并网控制技术研究; E-mail: 214722177@qq.com

随着能源危机和环境问题日益加剧,直流微电网技术作为一种解决手段,在分布式能源接入领域得到了巨大发展。直流微电网优点在于可大量接纳光伏、风力发电等新能源发电,并通过采用相关的协调控制和能量管理等方式实现系统本地运行,同时也可以由变流装置接入大电网实现并网运行<sup>[1-3]</sup>。由于微电网中新能源发电的渗透率较高,间歇性和波动性较大,因此需要大量的储能单元来维持系统的瞬时功率不平衡<sup>[4]</sup>。

典型的直流微电网结构如图 1 所示,其中储能单元通过双向 DC/DC 变换器连接到直流总线上。针对含光伏源的直流微电网系统,文献[5]提出了一种微电网孤岛与并网模式的平滑切换控制方法,实现了微电网在多种运行模式下的不同控制策略的切换;文献[6]提出了一种混合储能控制及系统分层协调控制策略,维持直流微电网功率平衡;文献[7]以直流母线电压为控制目标,详细分析了直流微电网各变流器对母线电压的影响。针对直流微电网,文献[8]提出了一种自适应分级协调控制,用以解决多储能单元接入的荷电状态均衡问题。用于储能单元的双向 DC/DC 变换器可以分为 2 种:隔离型 DC/DC 变换器,常见的有双主动全桥(dual active bridge, DAB)<sup>[9]</sup>、双主动半桥(dual half bridge, DHB)<sup>[10]</sup>等;非隔离型 DC/DC 变换器,有双向 Buck-Boost 变换器<sup>[11]</sup>、级联 Buck-Boost 变换器<sup>[12-13]</sup>等。

DAB 等隔离型变换器在隔离和电压增益等方面上具有优势,但增加的高频变压器会使得变换器的成本变高,目前实际应用比较少。在储能单元的实际使用上,非隔离 DC/DC 变换器的应用越来越广泛。文献[14]采用双向 Buck-Boost 变换器作为直流微电网中的储能单元变换器;文献[11,15]进一步根据直流母线电压设计了不同工作模式,并实现了储能单元在不同运行模式下的自由切换。

双向 Buck-Boost 变换器工作时存在一定的局限性,即任何一种电流流向只能对应一种工作模式(Buck 或 Boost 模式),导致电压增益比较低。但级联 Buck-Boost 变换器相当于 2 个双向 Buck-Boost 变换器级联实现双向升降压变换,在没有这个限制的情况下,可以大大地提高电压增益范围。文献[16]具体分析了级联 Buck-Boost 变换器的多种工

作模式,并给出了软开关优化策略;文献[17-18]分析了级联 Buck-Boost 变换器在不同工作模式下的小信号模型,并根据得到的小信号模型设计了相应的控制器。

本文使用级联 Buck-Boost 变换器作为直流微电网系统储能单元接口变换器,根据直流微电网的实际要求,设计在不同工作模式下变换器的控制策略。首先给出了基于级联 Buck-Boost 变换器的直流微电网储能单元结构;然后结合其工作原理,分析级联 Buck-Boost 变换器的不同工作模式,再根据针对直流微电网的工况确定储能单元的控制策略;最后搭建仿真及硬件平台对所提的设计方案和控制策略进行验证。

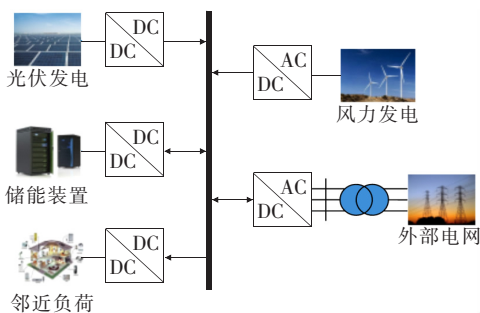


图 1 直流微电网结构

Figure 1 Structure diagram of DC microgrid

## 1 储能单元设计

### 1.1 储能单元整体方案

基于级联 Buck-Boost 变换器的储能单元结构如图 2 所示,储能单元通过级联 Buck-Boost 变换器

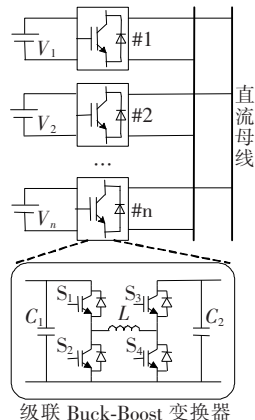


图 2 储能单元结构

Figure 2 Energy storage unit structure

与直流母线连接。同时,为了提高储能端口的容量,将多个模块输出侧并联在直流母线上,一方面增强了储能单元平抑功率波动的能力,另一方面也有利于提高系统的冗余程度和实现储能单元模块化,从而提高系统的稳定性,降低系统维护难度。

## 1.2 子模块工作模态分析

由图2可知,级联 Buck-Boost 变换器由4个开关管  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  和一个电感  $L$  组成,其中  $v_i$  为子模块的输入电压。电压变换器工作时,同一桥臂的2个开关管互补导通,分别记占空比为  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$ 。

实质上级联 Buck-Boost 变换器看成2个双向 Buck-Boost 变换器级联形成,主要有 Boost、Buck 模式。当  $S_1$  一直导通, $S_3$ 、 $S_4$  根据调制信号交替导通,此时 Buck-Boost 变换器工作于 Boost 模式,此时  $v_i < v_o$ ;当  $S_3$  一直导通, $S_1$ 、 $S_2$  由根据调制信号交替导通,此时级联 Buck-Boost 变换器可以工作于 Buck 模式,此时  $v_i > v_o$ 。具体模态分析如图3所示。

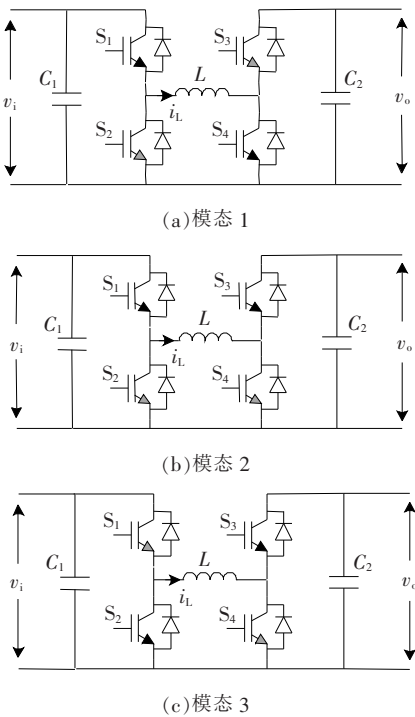


图3 子模块工作模态

Figure 3 Sub-module working modalities

不同模态下,电感电压表达式为

$$L \frac{di_L}{dt} = m_1 v_i - m_2 v_o \quad (1)$$

式中  $m_1$ 、 $m_2$  均为开关状态。 $m_1 = 1$  时,表示  $S_1$

导通, $S_2$  关断; $m_2 = 1$  时,表示  $S_3$  导通, $S_4$  关断。

Boost 模式由模态 1 和 2 组成, $m_1$  一直等于 1,对  $m_2$  周期平均化后可得输入输出稳态关系,即

$$v_o = v_i / d_3 \quad (2)$$

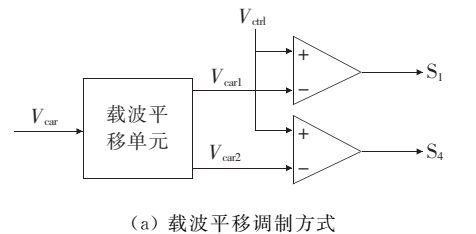
类似的 Buck 模式下输入输出稳态关系,即

$$v_o = v_i d_1 \quad (3)$$

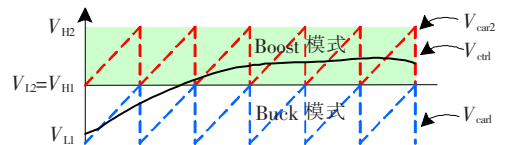
通过上述分析,双向 Buck-Boost 变换器正常工作时只相当于级联 Buck-Boost 变换器一种模式,但级联 Buck/Boost 变换器可以通过确定主控管  $S_1$  和  $S_3$  的状态调整变换器切换升降压状态,从而提高电压增益范围。

就控制复杂性而言,无论在 Buck 还是 Boost 模式, $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  的开关状态都不再完全互补或相等,即左右2个桥臂在 Buck 或 Boost 模式下需要独立的调制,如图4所示。因此为了在 Buck 和 Boost 模式下级联 Buck-Boost 变换器都能正常工作,需要分别设计在 Buck 和 Boost 模式下的调制策略,这会加剧控制系统的复杂程度。本文提出了通过载波平移的方法实现既适用于 Buck 也适用于 Boost 模式的调制方式。

由图4可知,2个载波  $V_{car1}$ 、 $V_{car2}$  上下平移,使 DC/DC 变换器只能处于 Boost、Buck 这2种模式。当控制信号在 Boost 模式区间时, $V_{ctrl}$  恒大于  $V_{car1}$ ,此时  $S_1$  一直导通, $S_3$  和  $S_4$  则根据控制信号调制交替导通;同理,当控制信号在 Buck 模式区间时, $V_{ctrl}$  恒小于  $V_{car2}$ ,此时  $S_3$  一直导通, $S_1$  和  $S_2$  则交替导通。由上述分析可知,当占空比为正或负时,一侧桥臂的占空比自然为 1 或 0,自动实现了 Buck 或 Boost 模式的切换。



(a) 载波平移调制方式



(b) 载波平移调制波形

图4 调制策略

Figure 4 Modulation Strategy

## 2 储能单元控制策略

### 2.1 整体控制策略

直流微电网一般利用 AC/DC 变换器来实现直流母线电压稳压,储能和新能源发电单元只需根据调度指令进行相应的功率或电流输出即可<sup>[19]</sup>。而对于储能模块来说,频繁充放电会导致储能单元寿命受影响,因此当新能源发电单元能够满足系统需求时,储能单元只需根据荷电状态(state of charge, SOC)值进行充放电的选择,即在 SOC 值过高时采用恒流工作模式放电,过低时采用恒流工作模式充电。然而,一旦 AC/DC 变换器发生限流运行、故障退出或者风电/光伏等间歇性电源出力波动过大等问题,将会导致直流微电网功率不平衡的后果,从而致使母线电压持续降低或升高,系统将可能崩溃中止运行。因此,在系统控制中,必须考虑直流微电网中储能单元的有效控制,根据实际工况的输出或者吸收功率情况做出相对应的动作,使直流母线电压保持在允许的稳定运行范围之内。

根据上述分析,将储能单元的工作状态分成以下 3 类。

1) 空闲模式。储能单元既不充电也不放电。

2) 电压模式。储能单元在 AC/DC 单元失控,无法实现直流母线电压稳定时,进行母线电压控制。

3) 电流模式。储能单元在 AC/DC 单元正常运行时,根据实际工况的功率情况做出的恒流充放电对应动作。

不同工作状态的关系如图 5 所示。

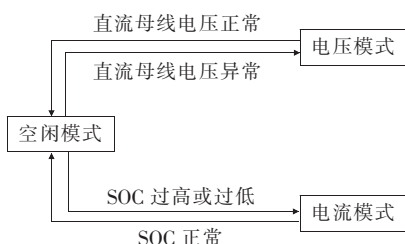


图 5 储能单元工作模式关系

Figure 5 Energy storage unit working mode relationship

在实现工况应用时,在达到系统稳态目标后,直流母线电压会在一定上下限内变化,而不是完全跟随给定参考电压指令<sup>[11]</sup>。如果储能单元工作模式

只是根据直流母线电压瞬时值与指令值的差值来确定,会导致系统在电压工作模式和其他几种工作模式之间发生来回切换现象。这样一方面会导致系统控制的不稳定,另一方面也会导致系统的频繁充放电现象。因此本文通过设定电压工作区间来判断系统工作模式是否需要切换。具体控制策略如图 6 所示。

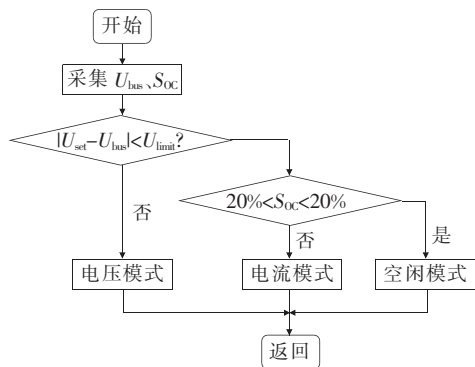


图 6 整体控制策略

Figure 6 Overall control strategy

图 6 中, $U_{bus}$  为直流母线电压检测值, $U_{set}$  为设定值, $U_{limit}$  为偏差区间,只有当  $|U_{bus} - U_{set}|$  超过  $U_{limit}$  时,才认为 AC/DC 变换器出现问题,需要储能单元控制母线电压。如果母线电压在系统允许的范围,此时会根据检测到 SOC 值判断是否需要恒流充放电,然后根据检测的 SOC 状态,来判断是否需要充电和放电。当  $SOC < 0.2$  时,采用恒流控制进行充电;当  $SOC > 0.8$  时,采用恒流控制进行放电;当  $0.2 \leq SOC \leq 0.8$  时,储能单元处于空闲状态。

### 2.2 电压模式和电流模式控制器设计

在电压工作模式下, $n$  个储能单元子模块输出侧直接并联,等效于输出稳定的多个电压源并联。子模块参数或者线路参数差异会导致子模块电流偏差较大,增大器件应力的同时还可能会导致系统的不稳定。本文采用下垂控制方式,将下垂控制加在级联 Buck-Boost 变换器的电压电流双环控制之外,作为控制外环,得到级联 Buck-Boost 变换器输出直流电压参考值,具体控制如图 7 所示。

下垂控制得到指令为

$$V_{set}(i) = V_0 - k_{Droop} \cdot i_o(i) \quad (4)$$

式中  $V_0$  为直流母线电压设定的期望值; $k_{Droop}$  为下垂系数。

实质上,下垂控制相当于增大变换器输出阻抗,使得该阻抗值远超过线缆阻抗以及其他参数,从而保证各储能单元输出电流的均衡<sup>[6]</sup>。相较于主从控制,下垂控制不需要额外的通讯线,更适合于分布式系统。根据 Buck 和 Boost 模式小信号电路数学模型及各级传递函数可以得到系统传递函数及系统特征方程。依据劳斯判据等相关原则可得到系统下垂系数取值范围。同时,由于下垂控制是通过增加变换器输出阻抗来实现不同模块均流,所以导致电压偏差和电流分配精度相互矛盾,如图 8 所示, #1 和 #2 分别为 2 个变换器的输出电流,  $\Delta I_1$ 、 $\Delta I_2$  为 2 个变换器分流偏差。直流电网的电压运行在一个范围内,在不超出正常电压范围时,可适当增加下垂系数提高均流效果。

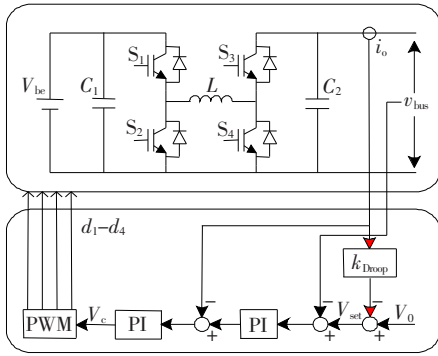
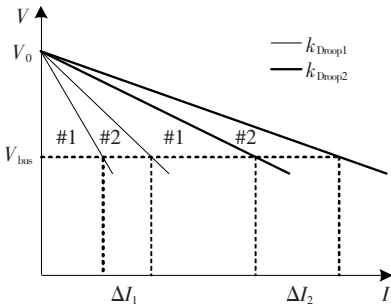


图 7 电压模式控制器

Figure 7 Voltage mode controller

图 8 不同下垂系数下均流效果,  $k_{\text{Droop}1} > k_{\text{Droop}2}$ Figure 8 Current sharing effect under different droop coefficients,  $k_{\text{Droop}1} > k_{\text{Droop}2}$ 

在电流工作模式下,  $n$  个储能单元子模块输出侧直接并联,等效于输出稳定的多个电流源并联,电流工作模式的具体控制如图 9 所示。电流参考值  $I_{\text{set}}$  与变换器当前电流  $i$  比较后,经由 PI 调节器得出值,送至 PWM 模块生成开关管的驱动信号。

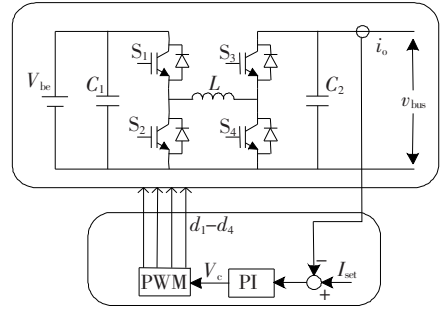


图 9 电流模式控制器

Figure 9 Current mode controller

### 3 仿真实验

为验证本文提出控制策略在实际系统中的可行性,将通过 PSIM 进行仿真实验,仿真中主电路及控制参数如表 1 所示,仿真结果如图 10、11 所示。仿真中采用 2 个有参数差异的子模块并联组成储能单元,验证其在不同模式下控制策略的有效性。

表 1 主电路及控制参数

Table 1 Main circuit and control parameter

参数	单位	数值
输入电压	V	100
输出电压参考值	V	150
2 个子模块电感	mH	1、1.1
子模块电容	mF	0.5
下垂系数	—	0.5
电压控制器	s	0.5+1/0.01
电流控制器	s	2+1/0.01

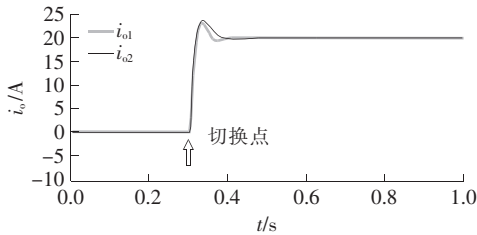
场景 1 当 AC/DC 变换器正常工作 ( $|U_{\text{bus}} - U_{\text{set}}|$  未超过  $U_{\text{limit}}$ )、0.3 s 时,储能单元进行恒流充放电。

由图 10 可知,电流模式下储能单元设置的接入对母线电压的影响可忽略。同时,尽管子模块参数不同,在切换的瞬间不同模块的电流值有所偏差,随后通过 PI 调节器的调节,0.1 s 后不同子模块的电流近似相等,充分说明了控制策略的有效性。

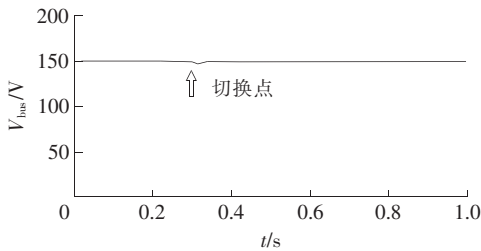
场景 2 当 AC/DC 变换器不能正常工作时 ( $|U_{\text{bus}} - U_{\text{set}}|$  超过  $U_{\text{limit}}$ ),储能单元进入电压模式。

由于 2 个不同子模块间存在参数偏差,即模拟实际工况中线缆阻抗差异较大的情况,而子模块并联在同一直流母线上,势必会造成输出电流不平衡的问题。由图 11 可知,加入的下垂控制使不同子模

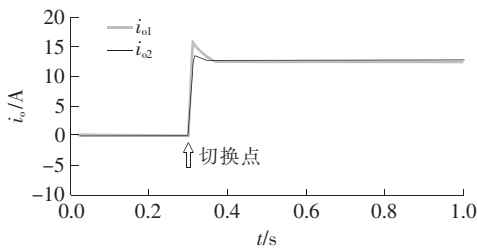
块的电流偏差较小,基本实现了均流的功能(不同子模块参数偏差设置为 10%)。由图 11(b)可知,母线电压与电流模式相比有比较大的下降。在动态性能上,切换的瞬间无论是电压还是电流波形都有一定超调,通过控制器的调节,0.1 s 后达到稳态,充分说明了控制策略的有效性。



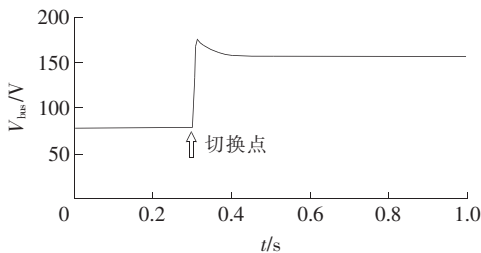
(a)子模块输出电流



(b)母线电压

**图 10** 空闲切换至电流模式运行情况**Figure 10** Current mode operation

(a)子模块输出电流



(b)母线电压

**图 11** 空闲切换至电压模式运行情况**Figure 11** Voltage mode operation

由图 10、11 的仿真结果可知,无论是在电流模式还是电压模式下,系统都能正常工作,说明整体控制策略在不同模式下都能起作用,对系统有良好的支撑作用。

## 4 结语

本文对比分析了常见用于直流微电网储能单元的直流变换器,提出了一种基于级联 Buck-Boost 变换器的设计方案。通过对级联 Buck-Boost 变换器的工作模式分析,得出级联 Buck-Boost 变换器电压增益范围的优势,并给出相应的调制策略。同时根据储能单元在微电网运行时所可能发生的工况确定控制策略,并对其中的电压模式和电流模式进行了详细分析。最后,搭建了相关仿真验证了所提储能单元方案的可行性。

## 参考文献:

- [1] 李波,田纯,倪广魁,等. 基于 JADE 平台的智能配电网自愈系统设计[J]. 智慧电力,2020,48(2):9-16.  
LI Bo, TIAN Chun, NI Guangkui, et al. Design of self-healing system in smart distribution network based on JADE platform[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 9-16.
- [2] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器,2020,56(05):216-222.  
WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling Strategy of wind-hydro-storage micro-grid [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(05): 216-222.
- [3] 丁雨,于艾清,高纯. 基于改进一致性算法的独立光储直流微电网电压稳定能量协调策略[J]. 中国电力, 2022, 55(3):74-79.  
DING Yu, YU Aiqing, GAO Chun. An energy coordination strategy for island DC microgrid with photovoltaic and storage system based on improved consensus algorithm[J]. Electric Power, 2022, 55(3):74-79.
- [4] 陆维,赵兴勇,赵钰彬,等. 孤网模式下交直流混合微电网互联变换器综合下垂控制[J]. 电测与仪表,2020,57(2):101-108.  
LU Wei, ZHAO Xingyong, ZHAO Yubin, et al. Integrated droop control of AC/DC hybrid microgrid interlinking converter in isolated network mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 101-108.
- [5] 张林,郭辉,姚李孝,基于改进蝙蝠算法的微电网优化研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(4):122-126.  
ZHANG Lin, GUO Hui, YAO Lixiao. Research on microgrid optimization based on improved bat algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 122-

- 126.
- [6] 张宇涵,杜贵平,雷雁雄,等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(3):177-188.  
ZHANG Yuhan,DU Guiping,LEI Yanxiong,et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control,2021,49(3):177-188.
- [7] BRYAN J,DUKE R,ROUND S. Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling [C]//Power Engineering Society General Meeting,Denver,USA;IEEE,2004:977-982.
- [8] 米阳,纪宏澎,何星璐,等. 多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1980-1989.  
MI Yang,JI Hongpeng,HE Xingtang,et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(7):1980-1989.
- [9] ZHAO B,YU Q G,SUN W X. Extended-phase-shift control of isolated bidirectional DC-DC converter for power distribution in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(11):4667-4680.
- [10] FAN H F,LI H. High-frequency transformer isolated bidirectional DC-DC converter modules with high efficiency over wide load range for 20 kV · A solid-state transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(12):3599-3608.
- [11] 秦文萍,柳雪松,韩肖清,等. 直流微电网储能系统自动充放电改进控制策略[J]. 电网技术,2014,38(7):1827-1834.  
QIN Wenping,LIU Xuesong,HAN Xiaoqing,et al. An improved control strategy of automatic charging/discharging of energy storage system in DC microgrid[J]. Power System Technology,2014,38(7):1827-1834.
- [12] HYEON-SEOK L,JAE-JUNG Y. High-efficiency bidirectional Buck-Boost converter for photovoltaic and energy storage system in smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019:34(5):4316-4328.
- [13] 任小永,唐钊,阮新波,等. 一种新颖的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报,2008,28(21):15-19.  
REN Xiaoyong,TANG Zhao,RUAN Xinbo,et al. A novel four-switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(21):15-19.
- [14] 吴雨,潘文霞,冯蒙霜,等. 基于混合储能的微电网功率控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(2):109-114+158.  
WU Yu,PAN Wenxia,FENG Mengshuang,et al. Power control strategy for microgrid based on hybrid energy storage system[J]. Journal of Power System and Automation,2013,25(2):109-114+158.
- [15] XU L,CHEN D. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2513-2522.
- [16] WAFFLER S,KOLAR J W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck+boost converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(6):1589-1599.
- [17] AHARON I,KUPERMAN A,SHMILOVITZ D. Analysis of dual-carrier modulator for bidirectional non-inverting Buck-Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(2):840-848.
- [18] ANUN M,ORDONEZ M,ZURBRIGGEN I G,et al. Circular switching surface technique:high-performance constant power load stabilization for electric vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(8):4560-4572.
- [19] 欧阳丽,周丽红,何海斌. 无需互联通信的直流微电网实时功率协调控制策略[J]. 电网技术,2015,39(12):3449-3456.  
OUYANG Li,ZHOU Lihong,HE Haibin. Real-time power coordinated control strategy for DC microgrid without communication[J]. Power System Technology,2015,39(12):3449-3456.
- [20] 肖安南,张蔚翔,张超,等. 含光伏发电与储能的配电网基于源—网—荷互动模式下电压安全最优控制策略[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(2):120-127.  
XIAO Annan,ZHANG Weixiang,ZHANG Chao,et al. Voltage security optimal control strategy of distribution network with PVs and ESs under "Source-Grid-Load" interaction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(2):120-127.