

# 基于自适应下垂控制的联网型直流微网 母线电压控制

丁雨,于艾清

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

**摘要:**考虑到通讯和电力电子技术的发展,针对以能量路由器作为与传统电网连接设备的联网型直流微电网,提出一种基于自适应下垂控制方法的直流母线电压控制策略。该策略根据直流母线电压波动范围切换不同单元对电压进行控制,同时采用自适应下垂控制协调本地储能单元,根据各自荷电状态和最大输出能力自动分配负荷功率。该控制策略无需通信,满足各单元即插即用的要求,在不同模式下均有单元参与母线电压控制,保证了直流系统的稳定性。在Matlab/Simulink仿真平台上搭建包含能量路由器的直流微电网系统,对控制方法进行仿真,结果验证了该分布式策略的有效性。

**关键词:**直流微电网;能量路由器;直流母线电压;分层控制;即插即用

**中图分类号:**TM732 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21280

## Grid-connected DC Microgrid Bus Voltage Control Based on Adaptive Droop Control

DING Yu, YU Aiqing

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

**Abstract:** Considering the development of communication and power electronics technology, a DC bus voltage control strategy based on adaptive droop control method for grid-connected DC microgrid with energy router connecting to traditional power grid was proposed. Different units were switched to control the voltage according to the DC bus voltage fluctuation range. At the same time, the adaptive droop control was used to coordinate the local energy storage units to automatically distribute the load power according to the respective states of charge and the maximum output capacities. The control strategy does not need communication to meet the plug and play requirements of each unit. Different units are involved in different modes in the method, which ensures the stability of the system. A DC microgrid with energy router was built on the Matlab/Simulink to simulate the control method. The results verify the effectiveness of the distributed strategy.

**Key words:** DC microgrid; energy router (ER); DC bus voltage; hierarchical control; plug and play

直流微电网通过连接分布式电源和储能为负荷供电<sup>[1]</sup>,采用直流微电网不仅减少了交直流变换装置,降低了成本和不必要的损耗,并且直流电网内不存在频率波动、无功功率损失等问题<sup>[2]</sup>,因此对直流微电网的研究越来越受到关注。

由于分布式能源通常具有一定间歇性、波动性,因此微网系统需要与其他稳定的微网或公共电网相连<sup>[3]</sup>,同时随着通信技术和电力电子技术的发展,未来将形成基于能量路由器(energy rou-

ter, ER)的能源网络,能量路由器作为连接公共电网与微电网的关键设备,能够起到提高分布式能源消纳与电能灵活使用的作用<sup>[4]</sup>。

在微电网的控制方法中,目前主要包括主从控制、对等控制和分层控制<sup>[5]</sup>。文献[6]研究了独立直流微电网在无通信状态下的电压调节问题,采用了多个单元共同参与保持电压稳定,同时满足储能系统的管理需求,但未考虑与大电网相连的情况。文献[7-8]提出了针对直流微电网储能系

**基金项目:**上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

**作者简介:**丁雨(1995—),女,硕士研究生,Email:uyding@163.com

**通讯作者:**于艾清(1981—),女,博士,副教授,硕士生导师,Email:yuaqing@shiep.edu.cn

统的协同控制策略,分别构建了微网自适应下垂控制器,实现了储能单元功率的合理分配及直流微电网的稳定运行。文献[9-10]对带有能量路由器的直流电网提出了减负荷、孤岛、并网等多种工况过渡的控制方法,同时保证了系统的稳定性,但没有涉及储能的荷电状态(state of charge, SOC)情况。

目前,对此类联网型微电网的研究主要集中在作为连接设备的能量路由器拓扑、控制及微网潮流计算,对能源网络之间的能量交互以及系统内各单元的协调控制研究较少。本文针对上述联网型直流微电网,根据直流母线电压波动范围,采用分层结构控制,根据母线电压波动范围划分工作模式,并选择合适的本地单元控制直流母线电压,同时考虑储能单元的输出能力对各储能系统采用自适应下垂控制方法,充分考虑不同SOC状态和不同最大额定功率下的负荷功率分配。通过这种分层控制实现了无通信条件下电网中各单元“即插即用”的要求,最后通过仿真证明所提控制策略的有效性。

## 1 系统结构

### 1.1 直流微电网结构

本文所研究的直流微电网结构如图1所示,包含了分布式发电单元、补偿微网能量缺额、保证微网平衡的储能单元、多类型的负荷单元以及连接直流微电网与交流电网的能量路由器(ER),支持能量在直流微网与外界电网间双向流动。各单元均通过双向DC-DC变换器连接在直流母线上。

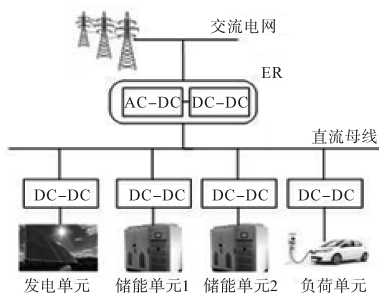


图1 直流微电网结构

Fig.1 DC microgrid structure

### 1.2 能量路由器结构

能量路由器的功能结构如图2所示。从能源角度看,能量路由器承担了不同类型能源的汇总和合理的分配,以满足不同负荷的需求;从网络角度看,能量路由器能及时传送能量控制决策,

收集并传递信息,实现信息和能量的相互作用;从用户角度看,能源互联网会根据不同用户的需求和使用规律,制定合理的能量管理策略,对未来多样化的能源形式也能够提供支持<sup>[11]</sup>。

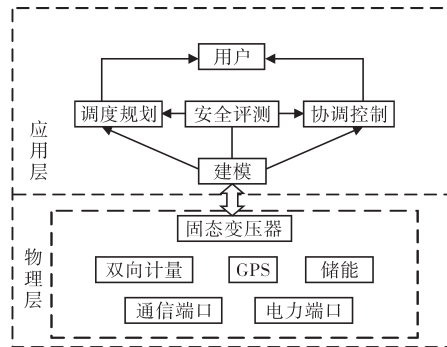


图2 能量路由器结构

Fig.2 ER topology structure

能量路由器的基本物理结构主要分为整流级(AC-DC)、隔离级(DC-DC)和逆变级(DC-AC),本文研究部分主要为直流微网,因此不包括逆变级的研究。通过能量路由器可以实现交流电网与直流微电网之间的功率交换,对系统功率起到平衡作用。

## 2 直流微电网分层控制策略

### 2.1 本地控制层

本地控制主要指对系统内各本地单元的控制,可分为能量控制型和电压控制型<sup>[12]</sup>。能量控制型始终保持自身运行状态,如采用最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)的光伏发电单元。而电压控制型则能自适应调节输出功率,维持功率平衡,如储能单元、能量路由器等。直流系统运行时至少有一个电压型控制器维持稳定。

### 2.2 母线电压控制层

在直流微电网中,系统内有功率失衡时会导致母线电压波动。因此,控制母线电压的稳定通常是保证直流微电网稳定运行的重要目标。

设置直流母线额定电压 $U=380\text{V}$ ,根据直流母线电压的变化量 $\Delta U$ ,将直流母线波动范围的上、下限划分为 $U_{H2}, U_{L2}$ ,分层电压的上、下限划分为 $U_{H1}, U_{L1}$ ,将直流微电网运行模式分为以下工作模式:

1)工作模式1:直流母线额定电压的波动范围 $|\Delta U| < 10\text{V}$ ,即电压在 $(U_{L1}, U_{H1})$ ,此时能量路由器处于备用状态。分布式发电单元按照我国可

再生能源发电最大消纳原则采用MPPT控制,以储能单元为主要控制单元来维持系统的功率和能量在平衡状态。

2)工作模式2:母线电压波动范围为 $10\text{V} < |\Delta U| < 20\text{V}$ 时,微网内发电单元与负荷单元的供需差异波动较大,储能单元可能进入限功率状态,此时可以依靠能量路由器维持直流母线电压稳定。分布式电源依然工作在MPPT模式。

此工作模式下又可细分为两种模式:当母线电压为 $(U_{H1}, U_{H2})$ 时,直流微电网系统内功率过剩,此时可通过能量路由器向交流电网输出能量并控制直流母线电压,定义此时为工作模式2-1;当母线电压为 $(U_{L2}, U_{L1})$ 时,直流微电网系统内缺乏能量,此时交流电网可通过能量路由器向直流微电网提供能量,定义此时为工作模式2-2。

若本地负荷需求无法满足导致母线电压下降得过低时,为维持母线电压稳定,能量路由器采取切负荷工作,直流微网通过能量路由器接收能量。

3)工作模式3:发电过剩导致母线电压范围升高至 $(U_{H2}, U_{H3})$ ,其中 $U_{H3}$ 为直流母线电压波动的最大限制,这是考虑到能量路由器本身的功率限制,可能导致交流电网和能量路由器无法控制直流母线电压。此时分布式发电单元将由MPPT模式切换至降压恒功率模式,以维持系统功率平衡。

### 3 控制系统

#### 3.1 储能单元控制

储能系统在直流微电网中对系统功率平衡和电压稳定起着重要的作用,同时为了保证储能电池的使用寿命,防止过度充放电,设置当储能单元的SOC达到限值时,储能电池停止充电或放电。

传统下垂控制方程表示为

$$U_{\text{ref}i} = U_0 - kP_{\text{ref}i} \quad (1)$$

式中: $U_{\text{ref}i}$ ,  $P_{\text{ref}i}$ 分别为第*i*个储能单元的输出电压和输出有功功率; $U_0$ 为额定母线参考电压值; $k$ 为下垂系数。

由于传统下垂控制不能根据储能单元不同容量进行合理的功率分配,因此考虑对传统下垂控制进行改进,采用基于储能SOC的自适应下垂控制。

改进后的下垂系数表示为

$$k'_i = \begin{cases} k \frac{SOC_i - SOC_{\min}}{SOC_{\max} - SOC_{\min}} & P_{\text{ref}i} < 0 \\ k \frac{SOC_{\max} - SOC_i}{SOC_{\max} - SOC_{\min}} & P_{\text{ref}i} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k'_i$ 为改进后的下垂系数; $SOC_i$ ,  $SOC_{\max}$ ,  $SOC_{\min}$ 分别为储能单元的荷电状态值及其上、下限值。 $P_{\text{ref}i} < 0$ 时储能单元工作在充电模式, $P_{\text{ref}i} > 0$ 时储能单元工作在放电模式。改进后的下垂控制方程则表示为

$$U_{\text{ref}i} = U_0 - k'_i P_{\text{ref}i} \quad (3)$$

以充电模式为例,对于接入同一个电压等级系统,默认各储能单元的输出电压均相等,联合式(2)~式(4)可以得到:

$$P_{\text{ref}1} : P_{\text{ref}2} : \dots : P_{\text{ref}i} = \frac{1}{SOC_1 - SOC_{\min}} : \frac{1}{SOC_2 - SOC_{\min}} : \dots : \frac{1}{SOC_i - SOC_{\min}} \quad (4)$$

图3为双象限下垂曲线。通过式(4)和图3可得,充电模式时, SOC较大的储能单元充电功率较小,放电模式时, SOC较小的储能单元放电较慢,反之亦然。该策略能有效实现储能单元输出功率的合理分配,满足即插即用的要求。

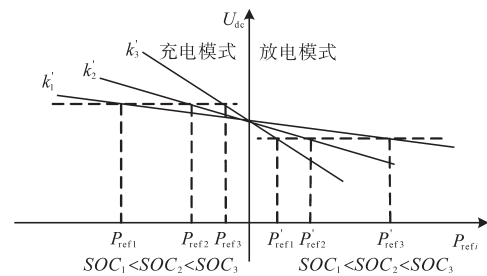


图3 双象限下垂曲线

Fig.3 Curves of the double-quadrant droop control

#### 3.2 能量路由器控制

针对能量路由器的整流级,采用的是双闭环反馈控制策略,保证输出的电压稳定,其中电压环和电流环的双环控制也保证了响应速度。由整流系统的数学模型可知,整流级的电压和电流存在耦合,因此需要设计电压电流解耦模块,实现无静差控制,整流级的建模在此不再赘述<sup>[13]</sup>。系统控制如图4所示,其中, $U_0^*$ ,  $U_0$ 为直流侧电压的参考值和实际采样值; $i_{abc}$ 为交流侧三相输入电流; $i_d, i_q$ 为经过dq变换后的d,q轴电流值; $i_d^*, i_q^*$ 为电流内环d,q轴参考值; $u_d, u_q$ 为交流侧三相输入电压经dq变换后的d,q轴电压值; $u_d^*, u_q^*$ 为内环输出电压值。

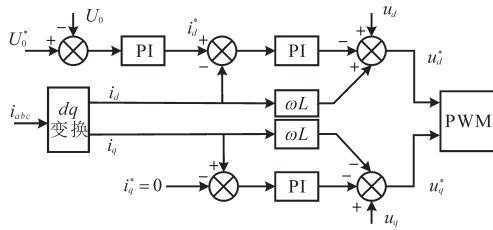


图4 整流级控制

Fig.4 Control of rectifier stage

由于隔离级直接与直流微电网的母线相连,隔离级的主要目标是输出稳定的直流母线电压,因此采用的是双闭环控制,如图5所示。其中,  $U_{dc\_ref}$  为直流母线电压参考值,  $U_{dc}$  为直流母线电压实际值,  $I_{dc\_ref}$  为经电压外环得到的直流侧电流参考值,  $I_{dc}$  为实际电流值。

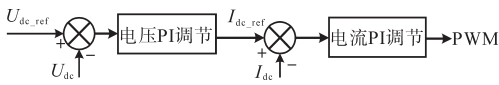


图5 隔离级控制

Fig.5 Control of isolation stage

### 3.3 光伏发电单元控制

当直流微电网工作在模式3时,光伏发电单元存在剩余功率,影响了直流微电网的稳定运行,因此类似于能量路由器控制,将光伏发电单元控制切换至降功率恒压控制。光伏发电单元控制如图6所示。

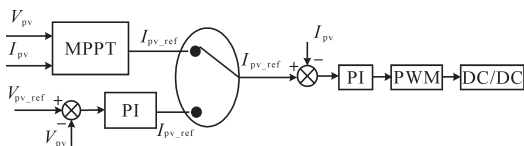


图6 光伏发电单元控制

Fig.6 Control of PV power

图6中,  $V_{pv}$  为光伏发电单元端电压,  $I_{pv}$  为光伏发电单元输出电流,  $I_{pv\_ref}$  为经PI控制得到的参考电流,  $V_{pv\_ref}$  为电压参考值。

## 4 仿真

为了验证所提策略,在 Matlab/Simulink 软件中搭建如图1所示的包含能量路由器的直流微电网模型,仿真模型结构及参数参考文献[13]。其中包含1组分布式光伏发电单元,额定功率15 kW;2组储能单元,储能单元1和储能单元2额定功率分别为3 kW和6 kW,且限制充放电安全限制范围为20%~90%;所有分布式单元通过能量路由器连接至交流大电网,能量路由器额定功率为6 kW。直流微电网额定母线电压设定为380 V,文中划分的电压区间如表1所示。

表1 电压层级区间划分

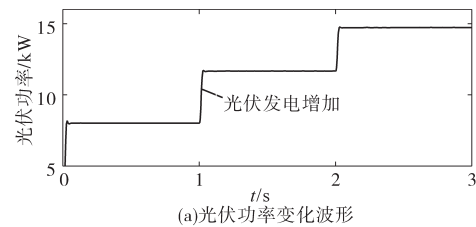
工作模式	电压层级	电压值/V
工作模式1	$(U_{L1}, U_{H1})$	(370, 390)
工作模式2-1	$(U_{H1}, U_{H2})$	(390, 400)
工作模式2-2	$(U_{L2}, U_{L1})$	(360, 370)
工作模式3	$(U_{H2}, U_{H3})$	(400, 410)

### 4.1 光伏出力波动工况下微网运行

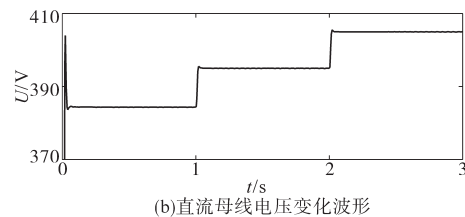
设置系统工作在光伏波动工况下,结果如图7所示。初始状态时,分布式光伏单元发出功率为8 kW,系统中负荷始终为4.5 kW,储能单元工作在充电状态,储能单元功率为3.5 kW, SOC值分别为70%和60%,能量路由器处于待机状态,此时系统运行在工作模式1,直流母线电压为384.4 V。

$t=1$  s时,光伏单元发电功率增大至12.5 kW,直流母线电压上升,储能单元对直流母线电压失去控制作用,此时系统工作在模式2-1内,直流母线电压上升至397.3 V左右。通过能量路由器将系统内剩余的功率传输给交流电网,并控制直流母线电压稳定,光伏系统工作在MPPT模式。

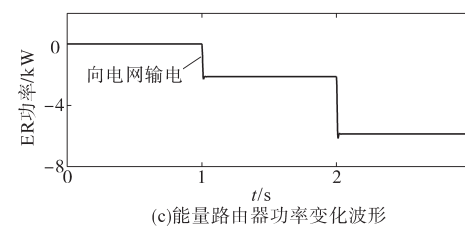
$t=2$  s时,光伏单元发电功率继续增大至14.7 kW,直流母线电压持续升高至408 V,能量路由器继续向电网输出功率,此时能量路由器运行在最大功率状态。光伏单元由MPPT模式切换至恒功率模式,并控制直流母线电压,此时系统



(a)光伏功率变化波形



(b)直流母线电压变化波形



(c)能量路由器功率变化波形

图7 光伏波动工况下直流微电网仿真波形

Fig.7 DC microgrid simulation waveforms of photovoltaic fluctuation condition

运行在工作模式3。

同时,仿真系统的储能单元功率分配如图8所示。当采用改进的自适应下垂控制时, SOC较大的储能单元1承担的输出功率较多,而 SOC较小的储能单元2输出的功率较少,且工作模式切换比较平滑,有利于防止储能单元可能出现的过度充电或过度放电现象,并利于不同 SOC 储能的均衡;而传统的下垂控制没有根据 SOC 自动调整分配储能功率。

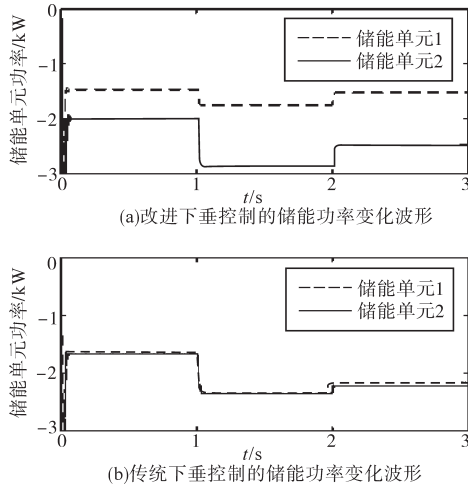


图8 储能单元功率分配

Fig.8 Energy storage units power distribution

#### 4.2 负载波动及电网故障工况下微网运行

设置系统工作在负载波动及电网故障工况下,结果如图9所示。

初始状态时,光伏单元不工作,直流微电网内初始负荷为 12 kW,储能单元以最大功率输出为负荷提供能量,储能单元 1 和单元 2 的 SOC 为 80% 和 70%,同时能量路由器也向微电网传输功率并控制直流母线电压,此时系统运行在工作模式 2-2,直流母线电压约为 366.7 V。

$t=1$  s 时,光伏单元开始出力,输出功率为 13.4 kW,直流母线电压上升至 387 V 左右,此时系统工作在模式 1,能量路由器处于待机,此时由储能单元进行母线电压控制。

$t=2$  s 时,直流微电网系统内负荷功率减少 4 kW,能量路由器将系统内多余功率向交流电网传输,并控制直流母线电压稳定,此时系统工作在工作模式 2-1 下。

$t=3$  s 时,设置交流电网出现故障,能量路由器切断与交流电网的连接,直流微电网运行在孤岛模式。当  $t=3.6$  s 时交流电网恢复正常运行,直流微电网依然能恢复至故障前的运行模式。

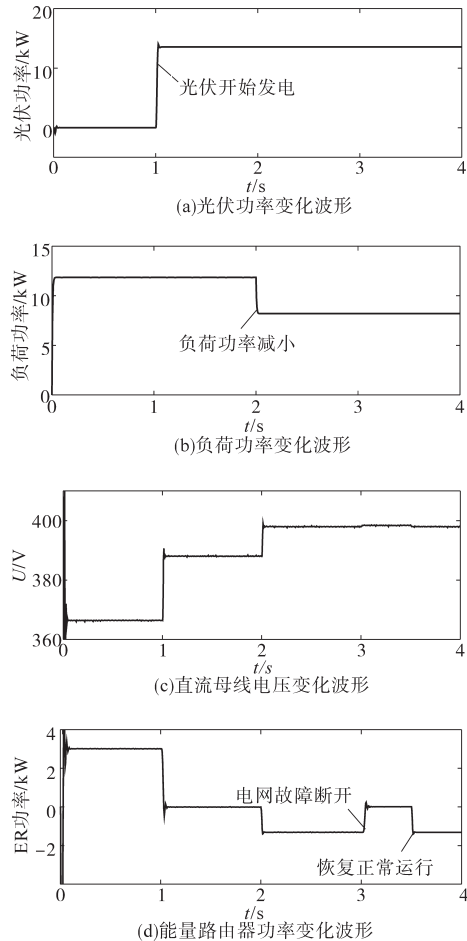


图9 负载波动及电网故障工况下仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms of load fluctuation and power grid fault condition

同时,储能单元的功率如图 10 所示。对比图 10a 和图 10b 也可以看出,改进的自适应下垂控制不仅能应对系统中出现的故障工况,以满足系统的正常供电,并且能够根据不同 SOC 和功率实现不同储能间输出功率的均衡分配。

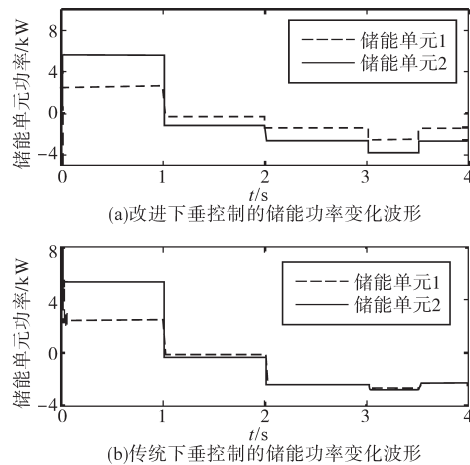


图10 储能单元功率分配

Fig.10 Energy storage units power distribution

## 5 结论

本文针对联网型的直流微电网提出了一种分层控制策略。在母线电压控制层中,根据直流母线电压波动范围划分不同的电压级层,并选择不同单元控制直流母线电压。在本地单元控制层中,针对储能系统采用了一种自适应下垂控制,实现了直流微电网中储能单元功率的合理分配。通过模拟的直流微电网系统,验证了所提策略的有效性。这种控制实现了系统在无通信条件下的分布式分层运行,达到了智能微电网中各单元“即插即用”的要求。

### 参考文献

- [1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
- [2] 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.
- [3] 郭慧,汪飞,张笠君,等. 基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3314-3325.
- [4] 刘凯,陈才学,文军,等. 基于能量分层协调控制的能量路由器[J]. 太阳能学报,2018,39(5):1388-1395.
- [5] 孟海峰,李雁冰,顾庶民,等. 基于分层能量管理的直流微电网控制策略研究[J]. 自动化与仪器仪表,2017(12):147-149.
- [6] Luis E, Zubieta. Power management of a DC bus regulated by multiple energy storage resources[C]//2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), Nuremberg, Germany, 2017, 571-576.
- [7] Zhao Xin, Li Yunwei, Tian Hao, *et al.* Energy management strategy of multiple supercapacitors in a DC microgrid using adaptive virtual impedance[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1174-1185.
- [8] 邓诗蕾,王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(24):40-46.
- [9] Yu Xunwei, She Xu, Ni Xijun, *et al.* System integration and hierarchical power management strategy for a solid-state transformer interfaced microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4414-4425.
- [10] Chen Dong, Lie Xu, Yao Liangzhong, *et al.* DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 637-648.
- [11] 李红伟,朱海荣,颜欣黎,等. 基于教与学模式改进一致性算法的电-气能量流协同优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):17-26.
- [12] 郭力,张绍辉,李霞林,等. 考虑电网分时电价的直流微电网分层协调控制[J]. 电网技术,2016,40(7):1992-2000.
- [13] 侯冰冰. 能源路由器中固态变压器的参数设计与仿真分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.

收稿日期:2019-12-20

修改稿日期:2020-02-11