

# 一种新型电气化铁道电能路由器研究

舒泳皓,张长征,王琪

(湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室,湖北 武汉 430068)

**摘要:** 在实现可再生能源发电技术在牵引供电系统得到应用的前提下,针对27.5 kV电气化铁路牵引网中功率调度等问题,提出一种新型电气化铁道电能路由器装置。装置采用81电平变换技术满足电气化铁道供电系统对并网变换器的高压、高电能质量、大功率的需求,采用电压幅值—相角的能量调度方式确保电力机车正常供电及对牵引网的电压支撑,最后通过基于虚拟直流电机控制的储能单元实现能量的削峰填谷及协调控制。通过对新型电气化铁道电能路由器的拓扑结构、技术原理、能量调度计算及控制策略进行理论研究,并对装置进行建模仿真,验证了该电气化铁道电能路由器技术方案的有效性。

**关键词:** 电气化铁道;电能路由器;81电平变换技术;功率调度;削峰填谷

**中图分类号:** TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20819

## Research on a New Electric Power Router for Electrified Railway

SHU Yonghao, ZHANG Changzheng, WANG Qi

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China)

**Abstract:** On the premise of realizing the application of renewable energy power generation in traction power supply system, aimed at the problems of power scheduling and operation cost in the traction network of 27.5 kV electrified railway, a kind of electrified railway energy router device was proposed. The device adopted 81 level converter to realize the high voltage, high power quality and high power demand of grid-connected converter for electrified railway energy supply system. The energy dispatching mode of voltage-phase angle was adopted to ensure the normal power supply of electric locomotive and the voltage support of traction network. At last, based on the energy storage unit controlled by the virtual DC machine, the energy peak cutting and valley filling, coordinated control were realized. Through analyzing the theoretical study of the topology, technical principle, energy scheduling calculation and control strategy of the new electrified railway power router, the modeling and simulation was implemented, and the effectiveness of the electrified railway power router technical solution was verified.

**Key words:** electrified railway; energy router; 81 level conversion technology; power scheduling; peak cutting and valley filling

在当下我国铁道运营发展中,凭借其自身供电便捷、高效率及对环境污染小等特点,电气化铁道已经成为发展的主流<sup>[1]</sup>。但由于电力机车属于大功率阻感类非线性负载,对牵引网的供电需求高,且会使牵引网电压及功率因数降低,对周边电力造成较大影响。因此,在节约能源、减少运营成本的前提下,推出一种能使电气化铁道牵引网与电力机车匹配运行的能量装置,创建一个

高电能质量供电系统是当前电气化铁道发展的热点研究方向<sup>[2]</sup>。

文献[3]的背靠背光伏发电系统既可以对电气化铁道的有功功率进行补充,也能对无功进行补偿。但由于分布式发电不稳定性,会使装置供电不稳定,系统安全性得不到保障,故在实际运用中还需要对系统添加储能部分才能保证牵引网的正常运行。在文献[4]中飞轮储能对电气化

**基金项目:**湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA018)

**作者简介:**舒泳皓(1994—),男,硕士,Email:996716351@qq.com

铁道削峰填谷的研究表明,增加储能部分在提高电气化铁道发电的安全性及稳定性上有很大的实用价值。在文献[5]中,提出一种含超级电容储能的新型铁路功率调节器,不仅实现了削峰填谷,还推动了再生制动能量利用率,不过其工作模式较为复杂,实验条件较为苛刻。为提高系统的运行效率,并网变换器的选择上也具有多样化。在运用至诸如电气化铁道等大功率设备时,二极管钳位型<sup>[6]</sup>、飞跨电容型<sup>[7]</sup>和具有直流电源的H桥级联型<sup>[8]</sup>等多电平变换器都有输出输出电压畸变率低、适用高电压大功率的优势,但其电位平衡难、直流电源过多、控制算法复杂等也是这些传统变换器发展运用被限制的主要因素。

在电气化铁道中,合理的能量控制方式不仅能为电气化铁道牵引网削峰填谷,还可提高牵引网运行的安全性。文献[9]中的电压—频率下垂控制虽然调节灵活度高,但在电气化铁道中由于频率需稳定在工频,故并不适用。文献[10]中设计的虚拟磁链控制方式,以磁链—相角的控制策略有效地避免了传统下垂控制在并网频率上的问题,但其复杂的控制方式及繁多的参数计算使得其难以大力推广。文献[11]基于虚拟电机的控制方式有效解决了削峰填谷的问题,同时还保障了储能的稳定性。从当前普遍的控制策略研究中可以看到,在运用至诸如电气化铁道等实际应用时,装置控制的经济性、复杂性及实用性还需做进一步研究<sup>[12]</sup>。所以针对大功率应用,无论是新能源供能的拓扑结构还是控制方式都还有需要完善的地方。

为推广可再生能源发电在电气化铁道供电系统中的应用,实现能量的削峰填谷、牵引网的电压支撑以及改善传统并网变换器难以适应牵引网电压和容量等级、供能质量低及控制复杂等问题,在文献[13]的直流型电能路由器原理上,本文提出一种适用于电气化铁道的交流电能路由器装置。首先通过对新型电能路由器装置的拓扑结构及81电平变换器的工作方式进行理论分析,再对功率调度参数计算及整体能量控制策略进行了研究,最后利用Matlab/Simulink仿真验证了该新型电能路由器的有效性。

### 1 系统结构

如图1所示,装置主电路拓扑结构由分布式电源变换器(I)、分布式储能变换器(II),直流

母线电容器(III)及81电平变换器(IV)组成。装置利用分布式电源变换器作电能路由器的主要电能供应接口,分布式储能变换器实现牵引网能量的削峰填谷,直流母线电容器实现滤波、直流母线电压支撑以及交直流功率解耦,最后通过81电平变换器实现电能路由器高压、大容量、高电能质量输出。

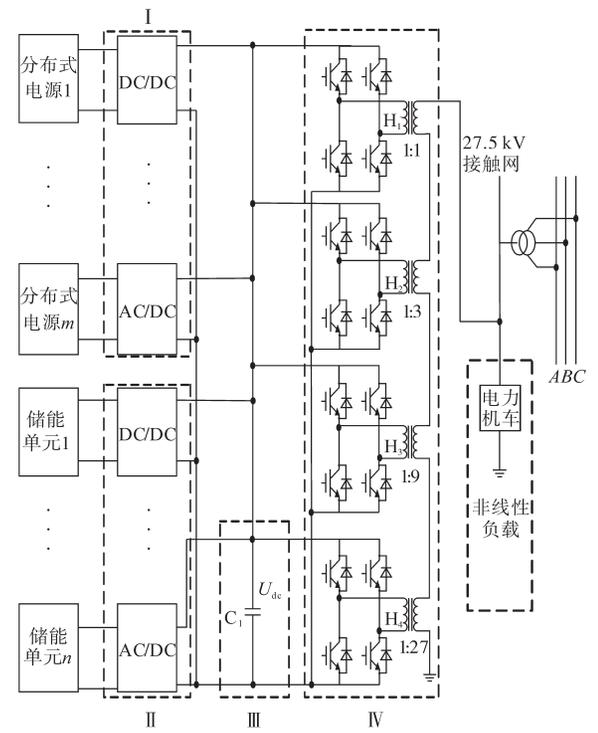


图1 主电路拓扑结构

Fig.1 Main circuit topology

### 2 电能路由器工作原理

#### 2.1 81电平变换器工作原理

电能路由器的81电平变换器是将4组H桥的交流侧输出端连接对应变压器后,再将4组变压器并网侧串联组成。4组变压器的变比从上到下依次为1:1,1:3,1:9,1:27。通过控制各组H桥的通断时间产生对应的电压值,便可得到表1所示的81种电平组合方式<sup>[14]</sup>。

表1 81电平生成方式

Tab.1 81 levels generating method

合成电平数	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>
-40	-U <sub>dc</sub>	-3U <sub>dc</sub>	-9U <sub>dc</sub>	-27U <sub>dc</sub>
-39	0	-3U <sub>dc</sub>	-9U <sub>dc</sub>	-27U <sub>dc</sub>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
39	0	3U <sub>dc</sub>	9U <sub>dc</sub>	27U <sub>dc</sub>
40	U <sub>dc</sub>	3U <sub>dc</sub>	9U <sub>dc</sub>	27U <sub>dc</sub>

图2为电能路由器并网侧输出电压波形。

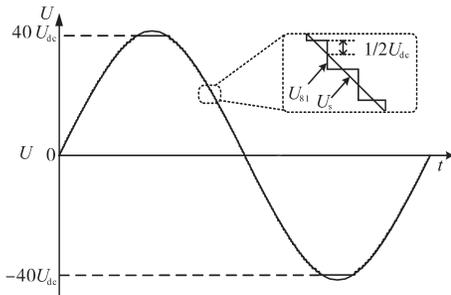


图2 电能路由器并网侧输出电压波形

Fig.2 Output voltage waveform of power router on the grid side

在图2所示的1个牵引网工频周期内,要让电能路由器的输出电压 $U_{s1}$ 满足牵引网的供电质量标准,可把理想状态下的牵引网电压 $U_s$ 均分至81份,使得正弦波可被 $81 \times 2$ 条水平线划分,从过原点的水平线开始,将每两条临近的水平线作与牵引网电压相交的垂直线,取能被牵引网电压平分的垂线为81电平电压的阶梯线,以此类推从而能够得到理想的81电平电压波形,结合表1的电平组合方式,可以推出相应的4组H桥电压波形。假定直流母线电容器的电压为 $U_{dc}$ ,则每格阶梯高度都为 $U_{dc}$ ,电能路由器输出电压 $U_{s1}$ 与直流母线电容器电压 $U_{dc}$ 的关系为

$$U_{s1} = 81U_{dc}/2 \quad (1)$$

由图2可知,牵引网单相交流电压的周期 $T$ 可划分为162个时间段。由于时间的对称性,只需计算出1/4个周期内的40个开关时间即可推导出1个周期的开关时刻 $t_{m+1}$  ( $m=0, 1, 2, \dots, 161$ )为

$$t_{m+1} = T\alpha_m \quad (2)$$

其中

$$\alpha_m = \begin{cases} 0 & m = 0 \\ \frac{1}{2\pi} \arcsin\left(\frac{2m-1}{81}\right) & m = 1, 2, \dots, 40 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2\pi} \arcsin\left(\frac{161-2m}{81}\right) & m = 41, 42, \dots, 80 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \arcsin\left(\frac{2m-161}{81}\right) & m = 81, 82, \dots, 120 \\ 1 - \frac{1}{2\pi} \arcsin\left(\frac{321-2m}{81}\right) & m = 121, 122, \dots, 160 \\ 1 & m = 161 \end{cases}$$

结合表1及式(2),通过FPGA等软件编程设置16个IGBT的作用时间,可使电能路由器输出近似于正弦波的81电平电压<sup>[15]</sup>。

## 2.2 电能路由器功率调度原理

假设81电平变换器输出电压及网侧电压分别为 $U_{s1} \angle \alpha_1$ ,  $U_s \angle \alpha_2$ , 变压器短路阻抗及线路阻抗

的和等效为 $X$ , 传输至电网的有功功率及无功功率分别为 $P, Q$ , 则有功电流和无功电流有效值分别为

$$I_{dp} = \frac{P}{U_s} \quad (3)$$

$$I_{dq} = \frac{Q}{U_s} \quad (4)$$

令 $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ , 故可以近似得到电能路由器对牵引网输出的有功功率及无功功率分别为

$$P \approx \frac{U_{s1} U_s}{X} \sin \alpha \quad (5)$$

$$Q \approx \frac{U_{s1}^2 - U_{s1} U_s}{X} \cos \alpha \quad (6)$$

如图3所示,结合式(3)、式(4),当对含有阻感类非线性负载的机车进行能源供应时,可通过有功电流、无功电流调度的方式来进行调节,而通过式(1)、式(5)、式(6)可知,有功功率主要由81电平变换器输出电压与牵引网电压的相角差 $\alpha$ 来进行调控,无功功率则主要通过电能路由器输出电压与牵引网的电压矢量差 $U$ 来进行调控<sup>[16]</sup>,通过调节 $U_{s1}$ 与负荷电流 $i$ 之间的相位关系,即可使电能路由器处于发电或储能状态,进而实现能量的双向流动,对牵引网的削峰填谷。

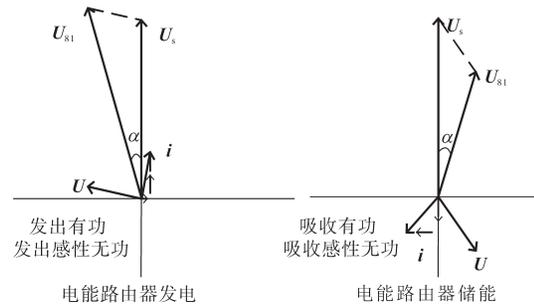


图3 功率调度控制原理

Fig.3 Power scheduling control principle

## 2.3 储能变换器虚拟直流电机控制原理

为实现直流母线电容器的电压稳定及确保电能路由器的平稳运行,采用基于虚拟直流电机控制的分布式储能单元。

依据实际直流电机中相应的两组公式:

$$E = U - IR_a \quad (7)$$

$$E = C_T \Phi \omega \quad (8)$$

式中: $E$ 为直流电机电动势; $C_T$ 为转矩系数; $\Phi$ 为磁通量; $\omega$ 为电机角速度; $R_a$ 为电机电枢总电阻。同时根据电磁功率等于电机电动势与电流的乘积及下式:

$$H\dot{\omega} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (9)$$

式中: $H$ 为电机的惯性常数; $T_m$ 和 $T_c$ 分别为电机电磁转矩及机械转矩; $D$ 为电机系统阻尼; $\omega_0$ 为额定角速度。

由上述式(7)~式(9)及在2.2节中得到的对应相角差 $\alpha$ 及电能路由器输出电压与牵引网的电压差,可推导出如图4所示的基于虚拟直流电机的控制策略<sup>[17]</sup>。

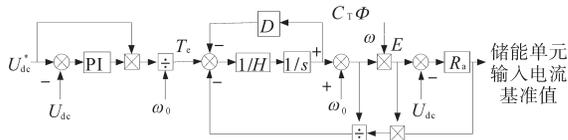


图4 储能单元控制策略

Fig.4 Control strategy of energy storage unit

### 3 电能路由器功率调度控制策略

由2.2节所述的通过所需功率计算出装置提供或吸收的有功电流及无功电流后,利用式(4)和式(5)推算出电能路由器输出电压和同步脉冲角,再利用直流母线电压与 $U_{s1}$ 的比例关系(式(1)),计算出此时需要调度的直流母线电压值,由图4的控制策略,将计算出的值设定为参考值 $U_{dc}^*$ ,通过虚拟直流电机的控制策略,得到储能双向变换器的输入电流基准值 $I_{bref}$ ,通过电流环的闭环控制得到调制波信号,最后利用SPWM调制方法,形成双向DC/DC(或AC/DC)变换器的脉冲信号,实现对直流母线电压的控制,以此构造出电能路由器的幅值调制方案。另一方面,利用已得到的有功电流参考值与实际有功电流作差,将误差信号经PI控制后送入编程移相环节,以此构造出电能路由器输出电压的相位调制方案。通过两者的共同控制实现对牵引网的削峰填谷、功率调度。控制系统总体框图如图5所示。

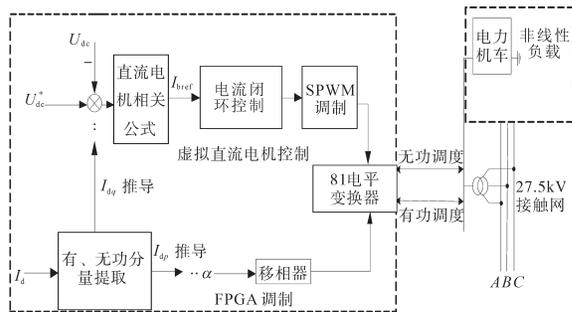


图5 控制系统总体框图

Fig.5 Block diagram of the control system

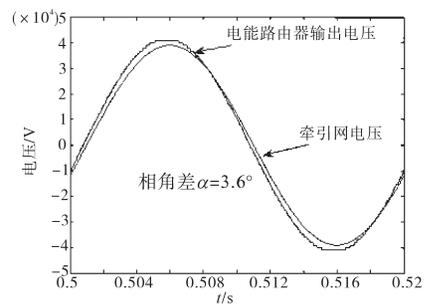
### 4 仿真分析

为了验证该电能路由器在电气化铁道领域

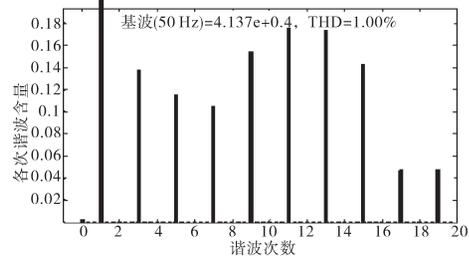
的有效性,本文在Matlab/Simulink仿真平台上建立了仿真模型。分布式发电和分布式储能单元分别采用光伏发电、飞轮储能的仿真模块,其中对飞轮储能模块仿真模型及控制原理在文献[4]中已阐述,此处不再另外说明。储能双向DC/DC变换器单元采用虚拟直流电机控制,实现直流母线电压的稳定,逆变单元采用基于81电平变换技术的H桥结构实现与牵引网的功率交换,削峰填谷。主要仿真参数如下:电气化铁路牵引网电压等级27.5 kV,频率50 Hz;电能路由器变压器变比1:3:9:27,短路阻抗设定为8%;分布式发电单元额定发电量1 MW;分布式储能单元电压600 V;储能单元IGBT开关频率10 kHz;虚拟直流电机控制参数常数 $C_T\Phi, H, D$ 分别为5.1, 2, 20;机车实际所需调度有功功率2.55 MW;机车实际所需调度无功功率1 Mvar;电能路由器储能时额定功率1.41 MV·A。

#### 4.1 机车进站时对应输出波形验证

在机车进站后,通过对电力机车所需功率进行调度,图6a为电能路由器在额定功率供能时,电能路由器与牵引网的电压波形比较,图6b为对电能路由器输出电压进行FFT分析。从图6b中可以看出,输出阶梯波畸变率只有1%,达到了为牵引网输送高质量电能的效果。



(a)输出电压波形比较



(b)电能路由器输出电压畸变率

图6 电能路由器发电状态对应输出波形

Fig.6 Output waveforms of the power router in generation state

图7为光伏发电、储能单元功率变化曲线。

在图7中,0.3 s时机车进站充电,由于负载突

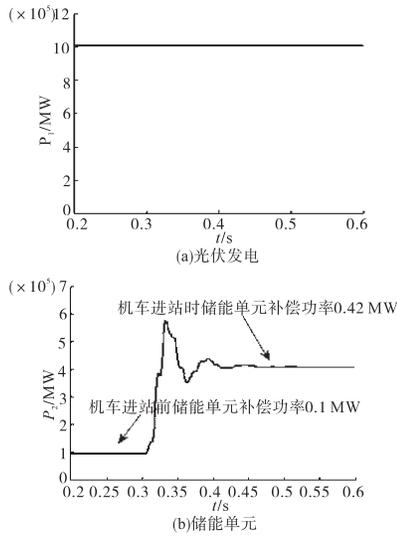


图7 光伏发电、储能单元功率变化曲线  
Fig.7 PV and energy storage unit power curve

变,电能路由器依据所需调度的功率参数,对虚拟直流电机控制的储能单元进行升压及对81电平变换器输出电压进行移相,观察到此时光伏发电单元 $P_1$ 能保持最大功率输出,同时储能单元输出部分 $P_2$ 会随负载突变而变化,二者一同为电力机车输送能量,在保证可再生能源发电稳定性的同时,达到了功率调度的效果。

图8为各种控制策略下直流母线电压变化曲线。

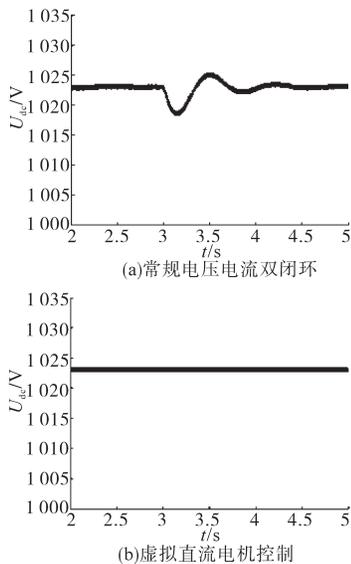


图8 各控制策略下直流母线电压变化曲线  
Fig.8 DC bus voltage curve under each control strategy

在图8中模拟比较了当电能路由器在额定供电状态下,光伏发电出现波动时,直流母线电压的幅值变化。在3s时,分别调整不同储能控制策略下的光伏发电单元光照强度 $S$ ,使其同时

从 $1000\text{ W/m}^2$ 降至 $600\text{ W/m}^2$ ,通过两图对比可看出,在出现波动时,后者波动范围及超调量极小,验证了采用虚拟直流电机控制策略对直流母线电压支撑的稳定性有较大提升,能更好应对可再生资源供电受外部环境影响较大的特点。

当机车进站后,由于自身阻感性的影响,需要向其提供一部分无功功率以维持机车正常运行。图9为电能路由器并网前后,牵引网输出有功、无功功率变换曲线。在0.5s时,电能路由器并网,在为机车供能的同时,也提高了牵引网的功率因数,在参数调度合理的情况下,功率因数可接近1。

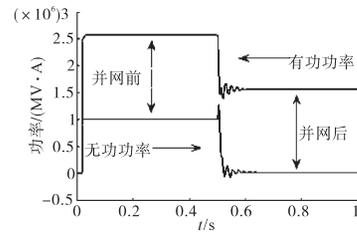


图9 牵引网功率变换曲线  
Fig.9 Power curves of traction network

#### 4.2 机车出站时对应输出波形验证

在机车出站后,可在牵引网处于空载或由于环境因素等引起电能路由器储能不足时,通过对电能路由器所需功率进行储能调度。由调度原理可知电能路由器在额定功率储能时,电能路由器的电压会滞后于电网电压,但其波形及阶梯波畸变率与图6a基本一致。

图10为电能路由器储能状态对应输出波形。

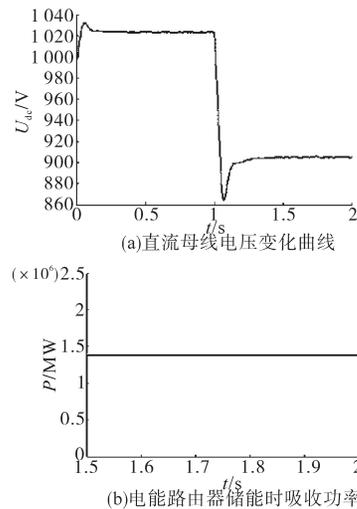


图10 电能路由器储能状态对应输出波形  
Fig.10 Output waveform of power router in energy storage state

图10a所示为在1s时机车出站,对电能路由器进行额定功率储能时的直流母线电压变化情

况。当机车出站后,若出现牵引网容性无功过高或储能装置电力不足的情况时,可由功率调度立即为装置进行充电,进一步验证了系统采用的控制策略使其具有达到新平衡的时间短,调节能力强的特点。图10b为电能路由器在额定功率下进行储能的功率波形图,通过仿真能观察到装置基本达到所需调度功率,实现了能量的削峰填谷、对牵引网在空载时的无功补偿,同时也保障了可再生能源发电的稳定性。

## 5 结论

1)电气化铁道电能路由器采用的81电平逆变器,与传统电气化铁道供能装置采用的多电平逆变器拓扑及调制策略相比,不仅输出电能质量高、成本低,同时开关管所受电压及开关损耗也相对较小,安全性也更有保证。

2)该新型电能路由器能解决传统可再生能源供电系统在电气化铁道的能量供应、电压支撑等问题,同时通过虚拟直流电机控制及幅相控制实现了对牵引网的削峰填谷,在保障了可再生能源发电稳定性的同时,还确保了能量利用效率的最大化。

### 参考文献

[1] 刘鸿宇. 电气化铁道节能技术探讨[J]. 科学技术创新, 2016(12):65.  
 [2] 董军, 陈来红, 刘硕. 利用新能源实现铁路多元发展探讨[J]. 工程建设与设计, 2016(15):171-173.  
 [3] WU Mingliang, WANG Weiying, DENG Wenli, *et al.* Back-to-back PV generation system for electrified railway and its control strategy[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, 2017: 1-6.  
 [4] 王大杰, 陈鹰, 唐英伟. 飞轮储能系统在电气化铁路的应用

与研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5):853-860.  
 [5] 马茜, 郭昕, 罗培, 等. 一种基于超级电容储能系统的新型铁路功率调节器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6):1208-1218.  
 [6] Rojas R, Ohnishi T, Suzuki T. PWM control method for NPC inverters with very small DC-link capacitors[J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 1995, 115(12):1506-1513.  
 [7] 王小峰, 何湘宁, 邓焰. 载波交叠特性PWM方法在飞跨电容多电平逆变器的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10):98-102.  
 [8] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.  
 [9] 张守一. 分布式发电微网系统建模及控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.  
 [10] HU Jiefeng, ZHU Jianguo, Dorrell, *et al.* Virtualflux droop method—a new control strategy of inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):4704-4711.  
 [11] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3541-3550.  
 [12] 钟诚, 王禹夫. 多逆变器下垂协调控制方法综述[J]. 电气自动化, 2017, 39(6):7-10.  
 [13] 陈少霞, 姚钢, 周荔丹, 等. 能源互联网中H桥直流电源路由器的研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7):41-46.  
 [14] Wang Q, Zhang C Z, Shu Y H. Research on a novel power quality conditioner with PV for electrified railway[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 188(1):1-12.  
 [15] 高东辉, 杜少武, 张长征. 改进型混合级联多电平有源电力滤波器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1):40-46.  
 [16] 唐宏伟, 唐杰, 林立. 新型电气化铁路电能质量管理体系[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17):84-91.  
 [17] 崔健, 吕志鹏, 盛万兴. 一种新型虚拟直流电机控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10):3029-3037.

收稿日期:2019-09-04

修改稿日期:2019-11-08

(上接第60页)

调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9):75-81, 207.  
 [8] 张立辉, 辛禾, 李秋燕, 等. 考虑需求响应风光燃储集成虚拟电厂双层随机调度优化模型[J]. 可再生能源, 2017, 35(10):1514-1522.  
 [9] 李星雨, 邱晓燕, 史光耀, 等. 考虑虚拟电厂和分时电价的风光火储系统两阶段优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6):70-77.  
 [10] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3):753-761.  
 [11] 张高, 王旭, 蒋传文, 等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8):2295-2301.  
 [12] 袁桂丽, 陈少梁, 刘颖, 等. 基于分时电价的虚拟电厂经济性

优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(3):826-832.  
 [13] 王天旺, 高赞, 姜孟, 等. 虚拟电厂下计及分布式风电与储能系统的电力系统优化调度[J]. 电力建设, 2016, 37(11):108-114.  
 [14] 吕梦璇, 姜素华, 刘建琴, 等. 含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10):2874-2882.  
 [15] 边晓燕, 杨帅帅, 黄铃燃, 等. 虚拟电厂接入配电网的电力系统调度灵活性研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3):66-71.  
 [16] 刘铠诚, 何桂雄, 郭炳庆. 考虑电价碳价及风功率不确定性的风—火虚拟电厂运行优化策略[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3):99-105.

收稿日期:2019-07-15

修改稿日期:2019-10-27