

# 高弹性电网下新能源消纳研究

黄健<sup>1</sup>, 樊国旗<sup>1</sup>, 季克勤<sup>1</sup>, 陈梓翰<sup>1</sup>, 郑庆<sup>1</sup>, 胡济恒<sup>1</sup>, 蒋轶澄<sup>2</sup>, 潘伟东<sup>1</sup>

(1. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321001; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:**为制定新能源合理性发展战略,文中提出了一种高弹性电网下新能源消纳方法。首先,分析了新能源并网影响;然后,构建了高弹性电网下新能源消纳框架,通过电源、电网和负荷方面协调调度,提升新能源消纳能力,并提出多种新能源消纳项目;最后,通过案例仿真采用“移动变压器”和退役电池接入方案减小等效负荷峰谷差,提高系统调节能力,通过移动变压器灵敏性分析得到退役电池最佳配置容量,结果证明了所提方法对新能源消纳的促进作用。

**关键词:**高弹性电网;新能源消纳;移动变压器

**中图分类号:**TM 615 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)02-0012-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220203

## Research on Renewable Energy Accommodation under Highly-resilient Power Grid

HUANG Jian<sup>1</sup>, FAN Guoqi<sup>1</sup>, JI Keqin<sup>1</sup>, CHEN Zihan<sup>1</sup>, ZHENG Qing<sup>1</sup>, HU Jiheng<sup>1</sup>,  
JIANG Yicheng<sup>2</sup>, PAN Weidong<sup>1</sup>

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to formulate the rational development strategy of renewable energy, a method of renewable energy accommodation under highly-resilient power grid is proposed. Firstly, the impact of renewable energy integration is analyzed, and then a framework for renewable energy accommodation under highly-resilient power grid is established. The capacity of renewable energy accommodation is improved by the coordinated dispatch of power supply, grid and load, and a variety of renewable energy accommodation projects are proposed. Finally, the "mobile transformer" and the retired battery access program are adopted to reduce the equivalent load peak-valley difference and to improve the ability of system adjustment. The optimal configuration capacity of the retired battery is obtained through the sensitivity analysis of mobile transformer, and the actual calculation examples show that the proposed method can promote the renewable energy accommodation.

**Key words:** highly-resilient power grid; renewable energy accommodation; mobile transformer

## 0 引言

新能源是引导未来经济社会发展的重要力量<sup>[1-3]</sup>,但是由于新能源间歇性、随机性特点也对电力系统带来巨大调峰压力<sup>[4-5]</sup>。

由于目前新能源功率预测误差较大,不能满足实际工程需要,因此不能制定出可靠的发电计划,而

且系统需要增加备用来平抑新能源波动性和解决功率预测精度低的问题。发电、用电需要保持实时平衡,即需要保证总发电功率和负荷用电功率相等;而新能源不具备随电网波动的自适应调频能力,因此需要保留较大规模的常规电源来保持发用电功率实时平衡。原有电网潮流一般呈辐射状,电压沿潮流方向降低。随着新能源的接入,原有线路出现功率减轻甚至潮流反向现象,导致电压抬升甚至出现电压超标问题,因此需要安装无功补偿装置并需按照线路功率采取不同的控制策略。高弹性电网具有高承

**基金项目:**国家电网有限公司科技项目“超高占比新能源电网发电控制系统与运行控制策略研究”(XT71-18-041)

载、高互动、高效能等特点,能够解决能源协调调度、能源生产和消费、能源供应和使用的时空转换问题。

文献[6]构建高弹性电网评价体系,缓解电网建设中保障安全、追求低碳和降低成本的三角矛盾。文献[7]研究高弹性电网应用场景,为实际电网应用提供指导价值。文献[8]通过需求侧响应提高高弹性电网建设能力。文献[9]提出退役电池综合利用方法,通过能量管理系统并解决了退役电池存在的容量和功率不相同问题,增加退役电池梯次利用效益,推动高弹性电网建设发展。

然而,上述文献多关注于高弹性电网框架或评价体系,没有或者单一对实际高弹性电网案例进行研究。因此,下面建立了源-网-荷协调调度消纳框架多方面促进新能源消纳,提出多个新能源消纳模式,并通过实际算例验证所提高弹性电网新能源消纳的有效性。

## 1 高弹性电网新能源消纳框架

“源随荷动”的平衡原则可以适应负荷预测较为准确的传统电网;随着新能源大规模并网,需要建设高弹性电网通过“源荷互动”的平衡原则适应“源荷”双端不确定性。不同于传统电网仅改变火电机组出力应对不确定性的方式,高弹性电网采用源-网-荷协调调度,应对电网源荷不确定性。

传统电网	多元融合高弹性电网
平衡原则	平衡原则
源随荷动	源荷互动
关键因素	关键因素
常规电源	源-网-荷

图1 传统电网与高弹性电网区别

“源”为电源侧,通过提高电源调节能力应对新能源不确定性影响。采用火电机组灵活性改造降低最小技术出力、自备电厂调峰及水电站库容优化调度,增加新能源消纳空间;改造火电机组灵活性,可以提高爬坡能力,应对新能源功率快速波动,减少新能源限电。

“网”为电网侧,通过补强网架结构或者优化运行方式提高电网传输能力,促进新能源消纳。主要通过跨区通道建设提高电网互济能力;补强薄弱线

路提高电力输送能力;优化电网运行方式提高断面传输功率。

“荷”为负荷侧,通过需求侧响应应对新能源波动性。需求侧响应主要通过长时间尺度峰谷电价改变用户用电行为间接改变负荷大小,成本较低;通过短时间尺度直接控制可控负荷改变负荷大小,成本较高。

## 2 高弹性电网新能源消纳模式

### 2.1 退役电池梯次利用储能

负荷低谷时为退役电池充电储能,相当于“填谷”负荷,增大电网低谷最小负荷,获取“填谷”收益;负荷高峰时退役电池放电,相当于“削峰”负荷,减小电网高峰最大负荷,获得“削峰”收益。

退役电池梯次利用储能主要分为分布式退役电池储能和集中式退役电池储能<sup>[10]</sup>。集中式退役电池储能分为电源侧退役电池储能、电网侧退役电池储能和负荷侧退役电池储能,其中:电源侧退役电池储能为新能源与储能结合,提高新能源预测功率,平滑新能源出力,减少新能源接入对系统峰谷特性影响;电网侧退役电池储能主要作用为削峰填谷,提高电网调节能力,减少电网投资,促进新能源消纳利用;负荷侧退役电池储能主要分布在楼宇和工业园区以及供电能力薄弱点,可以减轻用户用电费用,并提高供电能力。分布式退役电池储能选取电价差较大的工业用户,在电价低谷时退役电池存储电量,电价高峰时退役电池放电减少电网用电,从而降低用户电费支出。

### 2.2 新型综合能源站

新型综合能源站在原来变电站的基础上,升级建设成为构建能源互联网基础的多功能枢纽型综合能源站,包含变电站、电力数据中心站、储能站、天然气分布式能源站、充电站<sup>[11]</sup>。

变电站仍然为电压转换和电能分配的功能。电力数据中心站包含:I类,为面向电网数据,包括调度、通信、电网运行及管理、营业服务数据以及储能站、充电站等数据;II类,为衍生数据,面向电网和用户;III类,为分布式存储和运算中心的数据,面向地区政府和行业。储能站主要应用有3个方面:1)作为电力数据中心备用电源,当数据中心供电中断时,替代不间断电源UPS为数据中心设备提供电能;

2) 参与“削峰填谷”,利用峰谷电价降低数据中心支出电费,同时为电网提供调峰功能,提高供电能力和供电可靠性;3) 作为事故备用容量,当发生故障时,作为应急电源供电。天然气分布式能源站以天然气为燃料,通过冷热电联供等方式提高能源利用率,在负荷中心就近实现现代能源供应方式,具有清洁、环保、灵活布置、利用效率高等优点。充电桩利用分时电价、储能电价等价格引导电动汽车用户有序充电,并为电网提供调峰、储能等辅助服务,既可以增强电网安全性和稳定性,又可以降低车主用车费用。

### 2.3 多能互补协调调度园区

多能互补协调调度园区主要建立在工业园区和产业园区,结合分布式能源、火电机组及其他能源装置,满足用户冷、热、电、气多种需求,解决原有系统资源利用率和自愈能力差、系统整体稳定性低和缺少协调性的问题<sup>[12]</sup>,同时可以抑制新能源的波动性和间歇性,提高新能源利用率。

多能互补协调调度园区主要由供电子模块、供热子模块、供冷气模块、供气子模块构成,典型多能互补协调调度园区如图 2 所示。当新能源发电功率较大时,多余电能用于制氢、制冷和制热;当新能源发电功率较小时,增大供热子模块发电功率并利用供气子模块发电。

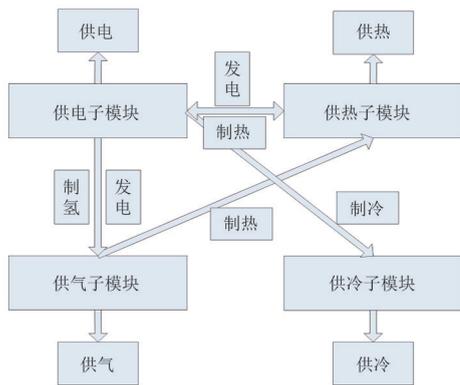


图 2 典型多能互补协调调度园区

## 3 案例仿真

### 3.1 案例模型

某旅游景点专线用户,其供电所变压器参数  $3000 \text{ kVA} \times 2$ ,原有间隔如图 3 所示。目前,最大负荷为  $5800 \text{ kW}$ ,近年来负荷增长迅速,预计最大负荷将达到  $7600 \text{ kW}$ ,其预测典型负荷序列如图 4 所示。

按照原有电网发展规划,需要扩建供电所,其所需成本巨大,且需审批和建设时间较长。这里通过高弹性电网规划方案,在供电所原有间隔基础上,通过在  $10 \text{ kV}$  待用间隔 1 接入“移动变压器”,并在  $10 \text{ kV}$  待用间隔 1 低压  $380 \text{ V}$  接入退役电池及新能源光伏,光伏组容量为  $12 \text{ kVA}$ ,拟接入 100 组(其典型功率序列如图 4 所示)增加电能供给,减少负荷增长对电网带来的巨大压力。

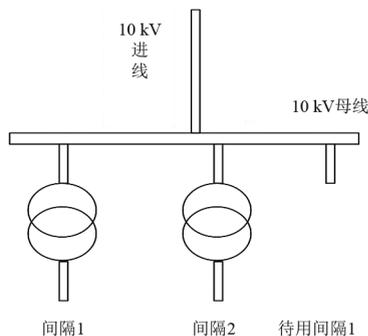


图 3 供电所供电间隔

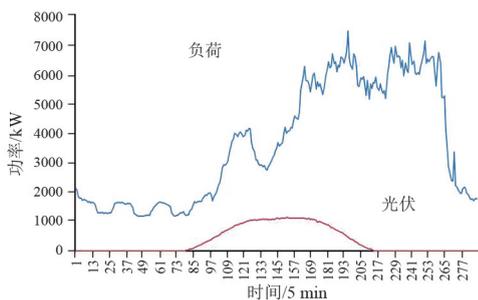


图 4 预测典型负荷序列和典型光伏序列

### 3.2 约束条件

原规划方案供电功率平衡约束为

$$P_{\text{原变},t} + P_{\text{扩变},t} = P_{1,t} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{原变},t}$  为原供电所变压器功率;  $P_{\text{扩变},t}$  为扩建供电所变压器功率;  $P_{1,t}$  为负荷功率。

高弹性电网规划方案供电功率平衡约束为

$$P_{\text{原变},t} + \sigma P_{\text{移变},t} + P_{N,t} = P_{1,t} + \varepsilon P_{\text{退役,C(F)},t} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{移变},t}$  为移动变压器功率;  $P_{N,t}$  为新能源功率;  $P_{\text{退役,C(F)},t}$  为退役电池充(放)电功率,充电功率记为正,放电功率记为负;  $\sigma$  为配置移动变压器系数;  $\varepsilon$  为配置退役电池系数。退役电池充(放)电功率约束为

$$\left| P_{\text{退役,C(F)},t}^{\min} \right| \leq \left| P_{\text{退役,C(F)},t} \right| \leq \left| P_{\text{退役,C(F)},t}^{\max} \right| \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{退役,C(F)},t}^{\min}$  和  $P_{\text{退役,C(F)},t}^{\max}$  分别为退役电池充(放)电最大、最小功率。

退役电池电量  $E_{\text{退役},t}$  约束为

$$E_{\text{退役}}^{\min} \leq E_{\text{退役},t} \leq E_{\text{退役}}^{\max} \quad (4)$$

式中,  $E_{\text{退役}}^{\min}$  和  $E_{\text{退役}}^{\max}$  分别为退役电池充(放)电最大、最小电量,分别为0.1和0.9倍退役电池容量。

退役电池电量状态为

$$E_{S,t+1} = E_{S,t} + \eta_C \cdot P_{S,S,C,t} - \eta_F \cdot P_{S,S,F,t} \quad (5)$$

式中:  $\eta_C$  和  $\eta_F$  分别为退役电池充放电系数,均取0.95。

等效负荷  $P_{1,\text{等效},t}$  为负荷减去新能源的值,如果该系统中接入退役电池,则负荷为通过退役电池充(放)电优化后的负荷。

$$P_{1,\text{等效},t} = P_{1,t} + P_{\text{退役},C(F),t} - P_{N,t} \quad (6)$$

等效负荷峰谷差为

$$P_{1,\text{等效},v} = P_{1,\text{等效},\max} - P_{1,\text{等效},\min} \quad (7)$$

式中:  $P_{1,\text{等效},v}$  为等效负荷峰谷差;  $P_{1,\text{等效},\max}$  为最大等效负荷;  $P_{1,\text{等效},\min}$  为最小等效负荷。

### 3.3 仿真计算

按照原规划方案,需扩建变压器参数为2000 kVA,此时供电解决方案如图5所示。

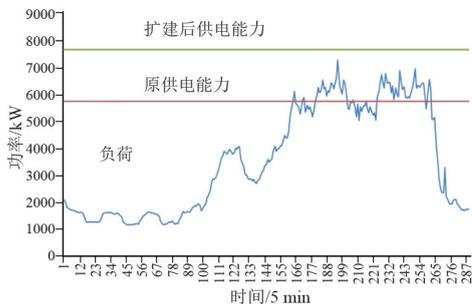


图5 原规划方案供电解决方案

按照高弹性电网规划方案,选移动变压器参数分别为500 kVA和1000 kVA,结合退役电池供电,选取移动变压器参数分别为500 kVA和1000 kVA时的退役电池,如图6所示。

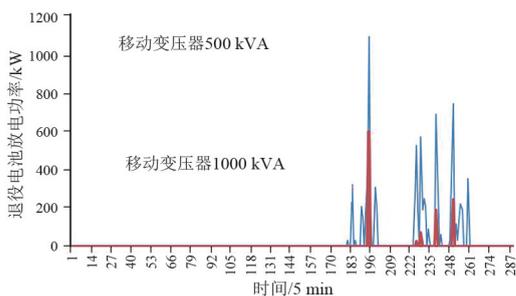


图6 高弹性电网供电解决方案

由图6可知,选取移动变压器参数量分别为500 kVA和1000 kVA时的退役电池放电最大功率

为1100 kW和600 kW,放电电量分别为1727 kWh和228 kWh,则对应退役电池容量至少为1818 kVA和240 kVA,此时对应退役电池可以选取1150 kW/2300 kWh,和650 kW/1300 kWh。

采用原规划方案扩建2000 kVA变压器和采用高弹性电网规划方案选取500 kVA和1000 kVA时接入光伏后等效负荷如图7所示。



图7 不同接入方案下等效负荷对比

由图7可知,采用3种不同接入方案下最大等效负荷分别为7249 kW、6330 kW和6449 kW,最小等效负荷分别为1202 kW、1557 kW和1448 kW;等效负荷峰谷差为6047 kW、4773 kW和5051 kW。采用高弹性电网规划方案,可减小等效负荷峰谷差,接入500 kVA和1000 kVA移动变压器方案可以分别减小1274 kW和996 kW,其中接入500 kVA移动变压器方案减小等效负荷峰谷差更多,多减小278 kW。

高弹性电网规划方案不仅主要体现在其调峰能力上,在建设方面将“移动变压器”作为“能源插座”可以解决之前规划不能满足当前电力增长过快的需求也体现出成本优势。该“能源插座”通过电网接入安全评估和调试即可投入运行,避免新建变压器审批和土建时间过长问题。以节约审批和土建时间2个月为例,该地区负荷损失成本按照负荷参与需求侧响应4元/kWh计算,则该段时间内损失可达68.2万元;按照浙江省1 kWh产生GDP为13.37元计算,则可减少损失228.02万元。如果每千瓦时产生的GDP更高,带来的经济损失更大。

### 3.4 移动变压器接入参数灵敏性分析

选取接入不同参数移动变压器,退役电池对应的放电电量和放电最大功率如图8所示。

由图8可知,随着接入不同参数移动变压器,退役电池放电电量和最大放电功率不断降低,放电电量降低更快。

由于原供电能力为6000 kW,需要解决负荷增长后功率大于6000 kW的部分,因此统计负荷功率

大于 6000 kW 的分布,并得到如图 9 所示的负荷大于 6000 kW 持续负荷功率和负荷功率概率分布。

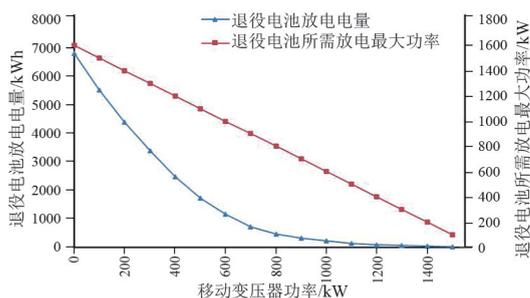


图 8 接入不同参数移动变压器的退役电池对应的放电电量和最大放电功率对比

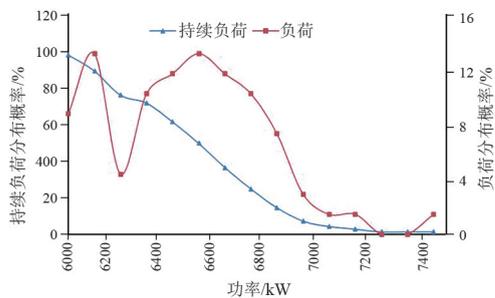


图 9 负荷大于 6000 kW 持续负荷功率和负荷功率概率分布

由图 9 可知,负荷功率主要分布在 6000~6800 kW 区间,因此随着移动变压器在该区间接入功率增加,需要配合移动变压器供电的退役电池放电电量降低更快;此外由持续负荷功率和负荷功率概率分布可知,在负荷分布集中区间采用移动变压器供电,在负荷分布较少区间采用退役电池供电,可以更好地解决电量问题,进而验证了所提高弹性电网方法采用移动变压器和退役电池共同供电的有效性。

退役电池容量和额定放电功率处于 2:1 的数量关系,则对应的退役电池容量、移动变压器参数和退役电池所需的最大放电功率如图 10 所示。

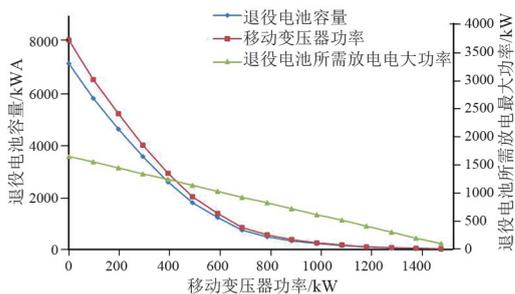


图 10 退役电池容量、移动变压器参数和退役电池所需最大放电功率对比

由图 10 可知,退役电池容量和额定功率数值符合 2:1 关系且接近所需最大放电功率的移动变压器选取容量为 300~500 kVA。选取移动变压器参数分别为 300 kVA、400 kVA、500 kVA 时退役电池选取 1800 kW/3600 kVA、1350 kW/2700 kVA 和 1150 kW/2300 kVA,其中退役电池选取 1350 kW/2700 kVA 时,所需最大放电功率为 1300 kW,最接近最大放电功率。

## 4 结论

新能源的发展有助于“碳中和”目标的实现,但是新能源并网会对电网的调峰和电压两方面带来影响。上面针对新能源对电网带来的挑战,提出高弹性电网下“源-网-荷”新能源消纳框架,并结合地区实际特点,提出退役电池梯次利用、靠近用能大户和新型综合能源站等方案,促进新能源消纳的同时,促进“碳中和”目标实现。

通过实际算例,利用高弹性电网规划方案,避免了传统规划方案建造费用高、审批和建设时间长的缺点。通过在待用间隔接入“移动变压器”和退役电池,可以实现电网模块化建设和“即插即用”功能,并可以减少等效负荷峰谷差。

## 参考文献

- [1] 叶强,胥威汀,汪伟,等.“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [2] 樊国旗,刘桂龙,樊国伟,等.大规模虚拟储能模式平抑新能源功率预测误差研究[J].四川电力技术,2021,44(2):19-23.
- [3] 张家军,陈杰,常喜强,等.基于 EMD 与模型预测控制算法的风电功率平抑[J].四川电力技术,2021,44(2):38-42.
- [4] 任景,薛晨,马晓伟,等.源荷联动调峰辅助服务市场两阶段模型[J].电力系统自动化,2021,45(18):94-102.
- [5] 贺海磊,张彦涛,孙骁强,等.考虑频率安全约束的西北电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4753-4762.
- [6] 尹积军,夏清.能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J].中国电机工程学报,2021,41(2):486-497.
- [7] 周兵凯,杨晓峰,李继成,等.多元融合高弹性电网关键技术综述[J].浙江电力,2020,39(12):35-43.

- [8] Zhenglong He, Shuai Jiang, Na An, et al. Self-healing isocyanate microcapsules for efficient restoration of fracture damage of polyurethane and epoxy resins [J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54: 8262–8275.
- [9] 王雪梅, 车晓刚, 李勇迪, 等. 超疏水防紫外双功能水性织物涂层的制备及性能研究 [J]. *涂料工业*, 2019, 49(9): 1–6.
- [10] Lenyang Lv, Peiyan Guo, Gang Liu, et al. Light induced self-healing in concrete using novel cementitious capsules containing UV curable adhesive [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2020, 105: 103445.
- [11] Donggyu Kim, Hee Jung Park, Kee Yoon Lee. Study on curing behaviors of epoxy acrylates by UV with and without aromatic component [J]. *Macromolecular Research*, 2015, 23(10): 944–951.
- [12] Fengze Jiang, Dietmar Drummer. Curing Kinetic Analysis of Acrylate Photopolymer for Additive Manufacturing by Photo-DSC [J]. *Polymers*, 2020, 12(5): 1080.
- [13] 刘春, 赵昱, 谢五喜, 等. GAP/Al 复合体系界面相互作用的分子动力学模拟研究 [J]. *化工新型材料*, 2018, 46(2): 186–189.
- [14] Tran Chien Dong, Manh Hung Ha, Truc Vy Do, et al. Crosslinking process, mechanical and antibacterial properties of UV-curable acrylate/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Ag nanocomposite coating [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 139: 105325.
- [15] Ye Chan Kim, Sungyong Hong, Hanna Sun, et al. UV-curing kinetics and performance development of in situ curable 3D printing materials [J]. *European Polymer Journal*, 2017, 93: 140–147.
- [16] Pingan Zhang, Jianmin Yuan, Aimin Pang, et al. A novel UV-curing liner for NEPE propellant: Insight from molecular simulations [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 195: 108087.
- [17] MaSanori Koyama, Masamitsu Shirai, Hiroaki Kawata, et al. Computational study on UV curing characteristics in nanoimprint lithography: Stochastic simulation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(6S1): 06GL03.
- [18] Hao Wen, Xiaoxing Zhang, Rong Xia, et al. Decomposition Characteristics of SF<sub>6</sub> under Flashover Discharge on the Epoxy Resin Surface [J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1408.
- [19] Abolfazl Alizadeh Sahraei, Abdol Hadi Mokarizadeh, Daniel George, et al. Insights into interphase thickness characterization for graphene/epoxy nanocomposites: A molecular dynamics simulation [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2019, 21(36): 19890–19903.
- [20] Afshin Golzar, Hamid Modarress, Sepideh Amjad-Iranagh. Separation of gases by using pristine, composite and nanocomposite polymeric membranes: A molecular dynamics simulation study [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 539: 238–256.
- [21] Zhonglin Luo, Jianwen Jiang. Molecular dynamics and dissipative particle dynamics simulations for the miscibility of poly(ethylene oxide)/poly(vinyl chloride) blends [J]. *Polymer*, 2019, 51: 291–299.
- [22] Ting Sun, Jijun Xiao, Qiang Liu, et al. Comparative study on structure, energetic and mechanical properties of a ε-CL-20/HMX cocrystal and its composite with molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(34): 13898–13904.

#### 作者简介:

邵千秋(1991),男,博士,研究方向为电工新材料。

(收稿日期:2021-09-26)

(上接第 16 页)

- [8] 陈吉奂, 刘强, 李磊, 等. 国网浙江电力高弹性电网需求响应的探索和实践 [J]. *电力需求侧管理*, 2020, 22(6): 75–79.
- [9] 樊国旗, 吕盼, 樊国伟, 等. 退役电池梯次利用对新能源消纳影响的研究 [J]. *浙江电力*, 2021, 40(3): 121–126.
- [10] 许欣慧, 舒征宇, 李世春. 基于退役电池在多储能场景下梯次利用的经济运行研究 [J]. *智慧电力*, 2020, 48(12): 58–64.
- [11] 谢哲, 汤红卫, 韩新阳, 等. 基于 Stackelberg 多站融合双寡头利润分配机制研究 [J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4009–4015.
- [12] 渠敬涛. 基于多能互补的综合能源系统规划案例分析 [J]. *电工技术*, 2020(24): 43–46.

#### 作者简介:

黄健(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

樊国旗(1993),男,硕士,研究方向为电力系统调度及新能源消纳。  
(收稿日期:2021-08-06)