

# 碳足迹强约束下的混合储能微电网 分布式协调控制算法

曹敏<sup>1</sup>, 俞文瑾<sup>2</sup>, 白泽洋<sup>1</sup>, 弋欣<sup>2</sup>, 巨健<sup>1</sup>

(1. 国网陕西省电力有限公司, 陕西 西安 710051;

2. 国网陕西省电力有限公司营销服务中心(计量中心), 陕西 西安 710051)

**摘要:** 为保证混合储能微电网在碳足迹强约束下, 实现碳排放量最小、混合储能系统功率优化分配, 提出碳足迹强约束下的混合储能微电网分布式协调控制算法。基于混合能源的全生命周期碳足迹, 构建碳排放量最小化、混合能源最佳定容的混合储能微电网分布式协调控制目标函数, 并确定约束条件; 在此基础上, 结合混合储能微电网的不确定特性改写目标函数, 形成 min-max 两阶段分布鲁棒优化协调控制模型; 采用列与约束生成算法求解该模型, 获取目标函数的最优解。测试结果显示: 该方法应用后, 碳足迹系数的结果均低于 9.0, 超级电容的功率分配结果为 4.8 MW 左右, 网损电量和最大电压偏差的最高值分别 0.42 MW·h 和 0.067 V, 间接和直接两种碳排放量显著下降, 有效提升了混合储能系统的荷电状态。

**关键词:** 碳足迹强约束; 混合储能; 微电网; 分布式; 协调控制; 碳足迹系数

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24534

## Distributed Coordinated Control Algorithm for Hybrid Energy Storage Microgrid Constrained by Carbon Footprint

CAO Min<sup>1</sup>, YU Wenjin<sup>2</sup>, BAI Zeyang<sup>1</sup>, YI Xin<sup>2</sup>, JU Jian<sup>1</sup>

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710051, Shaanxi, China;

2. State Grid Shaanxi Marketing Service Center (Metrology Center), Xi'an 710051, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to ensure the minimum carbon emission and optimal power distribution of the hybrid energy storage microgrid under the constraint of carbon footprint, a distributed coordinated control algorithm of the hybrid energy storage microgrid under the constraint of carbon footprint was proposed. Based on the whole life carbon footprint of mixed energy, the distributed coordinated control objective function of hybrid energy storage microgrid with minimum carbon emissions and optimal constant volume of mixed energy was constructed, and the constraint conditions were determined. On this basis, combining with the uncertain characteristics of hybrid energy storage microgrid, the objective function was rewritten to form a two-stage brodding optimization and coordination control model. Adopting column and constraint generation algorithm to solve the model, obtain the optimal solution of the objective function. The test results show that, after the application of this method, the carbon footprint coefficient is lower than 9.0, the power distribution result of ultracapacitor is about 4.8 MW, the maximum value of network loss power and maximum voltage deviation is 0.42 MW·h and 0.067 V respectively. The indirect and direct carbon emissions are significantly reduced, and the charged state of the hybrid energy storage system is effectively improved.

**Key words:** carbon footprint constraint; mixed energy storage; micro power grid; distributed; coordinated control; carbon footprint coefficient

微电网是实现新型能源发电的一种新型电网形式, 是电力系统中解决分布式能源发电并网

运行的重要形式。混合储能微电网由多种能源机组、控制器、储能系统、变流器等多个部分组

**作者简介:** 曹敏(1980—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力营销、电力需求侧管理、综合能源、市场化交易等,

Email: fanxiouty@163.com

成<sup>[1]</sup>,主要包含集合能量型和功率型两种储能系统,具有更好的应用性能,可有效解决短时的频繁功率波动现象<sup>[2]</sup>,提升储能系统的生命周期,同时保证电能质量。但是各个分布式能源在运行过程中,相互之间的协调控制和调度尤为重要,直接影响微电网的运行情况<sup>[3]</sup>。降低碳排放、实现电力能源绿色低碳发展是电力系统建设和发展的核心目标,但是可再生能源具有显著的波动性和随机性<sup>[4]</sup>,对可再生能源的利用和发展造成一定限制。因此,如何实现碳作用最小、可再生能源使用最佳,成为混合储能微电网分布式协调优化控制的主要研究核心。文献[5-6]为实现相关控制,分别采用一致性算法和基于分层控制的相关协调控制方法,但是上述方法在应用过程中,对于碳足迹强约束考虑较少。

因此,本文研究碳足迹强约束下的混合储能微电网分布式协调控制算法,创新性地提出基于混合能源的全生命碳足迹,构建碳排放量最小化、混合能源最佳定容的混合储能微电网分布式协调控制目标函数;结合混合储能微电网的不确定特性改写目标函数,形成 min-max 两阶段分布鲁棒优化协调控制模型,最终获取目标函数的最优解;充分考虑碳排放情况,结合碳足迹强约束,针对混合储能微电网实行协调控制。

## 1 混合储能微电网分布式协调控制

### 1.1 混合能源的全生命碳足迹

碳足迹是依据混合能源的全生命周期中各个阶段对应的二氧化碳的排放源,预测和分析整体碳排放量。结合混合能源的使用情况<sup>[7]</sup>,建立混合储能微电网分布式协调控制模型。

碳排放量一般通过经济活动数据,计算排放系数,计算温室效应潜能、总的排放获得,碳足迹是分析碳排放量的有效途径,其可充分结合二氧化碳直接和间接的排放情况,分析整体排放量。本文采用生命周期法,进行混合能源的碳足迹的测算。目前混合储能微电网中引入量较大的是光伏、风机以及水能,除此之外,还有天然气能和核能,形成水电、风电、核电等电力能源链,这些电力能源链在发电过程中,虽然产生的碳排放极小,但是从混合能源的整体生命周期分析,任何能源在混合能源链中,均会产生不同程度的碳排放。

1)混合能源电力链总排放量 $C$ 的计算公式为

$$C = C_{tp} + C_{hp} + C_{np} + C_{wp} = \overline{CEC} \cdot \sum (E_{tp} + E_{hp} + E_{np} + E_{wp}) \quad (1)$$

式中: $\overline{CEC}$ 为平均碳排放系数; $C_{tp}, C_{hp}, C_{np}, C_{wp}$ 分别为火电、水电、核电、风电的碳排放量; $E_{tp}, E_{hp}, E_{np}, E_{wp}$ 分别为火电、水电、核电、风电的消耗量。

2)碳汇端能力。固碳是土地覆被的生态服务功能,通过林地、草地、耕地和水域的平均净初级生产力和面积,可计算得出我国整体平均净初级生产力和面积,其计算公式为

$$\overline{NPP}_{na} = \frac{\psi}{A} = \frac{\sum (A_j \cdot NPP_j)}{\sum A_j} \quad (2)$$

式中: $\overline{NPP}_{na}$ 为全国平均净初级生产力; $\psi$ 为碳吸收总量,对应土地覆被; $A_j$ 为总面积,对应主要土地覆被; $NPP_j$ 为第 $j$ 类土地的净初级生产力。

3)混合能源碳足迹。依据混合能源电力链总排放量和碳汇端能力<sup>[8]</sup>,可计算混合能源的碳足迹 $\eta$ ,其计算公式为

$$\eta = \frac{C}{NPP_{na}} \quad (3)$$

混合能源的碳足迹多样性系数计算公式为

$$\eta_{ep} = \sum (\eta_{tp}/\eta_{tp}, \eta_{hp}/\eta_{hp}, \eta_{np}/\eta_{np}, \eta_{wp}/\eta_{wp}) \quad (4)$$

式中: $\eta_{tp}, \eta_{hp}, \eta_{np}, \eta_{wp}$ 分别为火电、水电、核电、风电的碳足迹系数。

### 1.2 混合储能微电网分布式协调控制模型

#### 1.2.1 混合储能微电网分布式协调控制目标函数

针对上述碳足迹的计算和分析结果,并结合混合储能的微电网功率优化分配需求<sup>[9]</sup>,建立目标函数,分别是碳排放量最小化和混合储能系统功率优化分配,两个目标函数公式为

$$\min(f_1) = f_{CO_2} + f_{ins} \quad (5)$$

$$\min(f_2) = \sum_{t=1}^{T_0} |P_{BT(t)}|^2 = \sum_{t=1}^{T_0} |P_{HESS(t)} - P_{SC(t)}|^2 \quad (6)$$

其中

$$f_{CO_2} = \sum_{t=1}^T [k_{sub} \eta_{ep} \sum_{j \in \Omega^{sub}} P_{jt}^{sub} + (k_{\Gamma} \eta_{ep} \sum_{j \in \Omega^{\Gamma}} P_{jt}^{\Gamma})]$$

$$f_{ins} = \frac{\gamma^{\Gamma}(1 + \gamma^{\Gamma})}{(1 + \gamma^{\Gamma}) - 1} \sum_{j \in \Omega^{\Gamma}} (a_0^{\Gamma} \mu_j^{\Gamma} + a_1^{\Gamma} S_j^{\Gamma})$$

式中: $f_{CO_2}, f_{ins}$ 分别为典型日的碳排放量和混合能源设备全生命周期内的碳排放量; $\gamma^{\Gamma}$ 为耗损率; $\mu_j^{\Gamma}$ 为协调分配变化量; $\Omega^{\Gamma}$ 为支路集合; $S_j^{\Gamma}$ 为节点 $j$ 处接入的可再生能源站容量; $a_0^{\Gamma}, a_1^{\Gamma}$ 为出力负荷功率允许的最大波动偏差; $k_{sub}, k_{\Gamma}$ 分别为充、放电效率; $P_{HESS(t)}, P_{BT(t)}, P_{SC(t)}$ 为在 $t$ 时段内平抑功率、

功率分配值三者依次对应的混合储能、蓄电池以及超级电容; $T_0$ 为时段数。

### 1.2.2 混合储能微电网分布式协调控制约束条件

1) 功率约束。在  $t$  时段内, 蓄电池和超级电容的功率分配值不可大于其最大功率  $P_{BT}$  和  $P_{SC}$ , 公式为

$$\begin{cases} -P_{BT} \leq P_{BT(t)} \leq P_{BT} \\ -P_{SC} \leq P_{SC(t)} \leq P_{SC} \end{cases} \quad (7)$$

令  $T_{lifetime}$  为蓄电池的生命周期, 在分布式协调控制过程中, 为确定  $T_{lifetime}$ , 需结合蓄电池的寿命损耗结果、储能系统的年使用概率系数完成<sup>[10]</sup>, 其计算公式为

$$T_{lifetime} = \frac{N_{cfl}(1)}{N_{T_0}(T_{max}/T_0) \times 365\lambda} \quad (8)$$

式中:  $\lambda$  为年利用率;  $T_{max}$  为最大采样时段;  $N_{T_0}$  为蓄电池在  $T_{max}$  内的寿命损耗;  $N_{cfl}$  为循环寿命。

2) 可再生能源配置容量约束如下:

$$S_{j'}^r \leq S_{j',max}^r \quad (9)$$

$$\sum_{j' \in \Omega} S_{j'}^r = S_{\Sigma}^r \quad \forall t, \forall j' \in \Omega^r \quad (10)$$

$$\sum_{j' \in \Omega} \mu_{j'}^r \leq N_{max}^r \quad (11)$$

式中:  $N_{max}^r, S_{j',max}^r$  分别为微电网接入、节点  $j'$  处接入的可再生能源电站最大数量;  $S_{\Sigma}^r$  为可再生能源并网总容量。

3) 可再生能源运行功率约束如下:

$$\begin{cases} P_{j',t}^r = S_{j'}^r \tilde{P}_{j',t}^r \\ -P_{j',t}^r \tan \varphi^r \leq Q_{j',t}^r \leq P_{j',t}^r \tan \varphi^r \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\tilde{P}_{j',t}^r$  为在  $t$  时段内单位容量可再生能源出力, 属于不确定变量;  $P_{j',t}^r$  为可再生能源实际出力;  $\varphi^r$  为功率因数角, 对应最小功率, 处于可再生能源安全运行状态下。

### 1.2.3 分布式鲁棒优化协调控制模型

由于混合储能微电网中接入多种能源, 因此存在明显的不确定性<sup>[11]</sup>, 为保证协调控制效果, 本文对  $\min(f_1)$  和  $\min(f_2)$  进行改写, 写成 min-max 两阶段分布鲁棒优化协调控制模型, 即

$$\min_{u, S} [ \max_{\tilde{P}_{i,t} \in \Omega_i} (f_{CO_2} + f_{ins}) ] \quad (13)$$

$$\min_{u, S} \{ \max_{\tilde{P}_{i,t} \in \Omega_i} [ \sum_{t=1}^T k_{sub} \eta_{sub} \sum_{j' \in \Omega^{sub}} P_{j',t}^{sub} + (k_{\Gamma} \eta \cdot \sum_{j' \in \Omega^r} P_{j',t}^r) ] \} \quad (14)$$

式中:  $u, S$  分别为混合能源的接入情况矩阵和对容量矩阵;  $\tilde{P}_{i,t}$  为在  $t$  时段内混合储能的出力不确定波动变量;  $\Omega_i$  为模糊集, 由  $\tilde{P}_{i,t}$  的概率分布组成。

建立两阶段分布鲁棒优化协调控制模型。第1阶段是以混合能源接入位置、配置容量为决策变量, 确定最小碳排放量为目标函数后, 采用优化计算可得出混合能源站的并网点和对应的配置容量<sup>[12]</sup>; 第2阶段是以混合能源电站的  $\tilde{P}_{i,t}$  为决策变量, 在其波动范围内, 获取混合能源微电网在典型日中, 碳排放量最大时的  $\tilde{P}_{i,t}$  出力场景, 定义其为混合能源出力不确定波动范围内<sup>[13]</sup>的极端恶劣场景。对第1阶段和第2阶段实行交替迭代求解, 即可得出  $\tilde{P}_{i,t}$  的不确定范围内, 满足目标需求的最优分布式协调控制方案, 即为碳排放量最小、混合能源定容最佳方案, 实现混合储能系统功率优化分配, 降低网损。

### 1.3 分布式鲁棒优化协调控制模型求解

针对式(13)和式(14)的分布式鲁棒优化协调控制模型, 本文采用列与约束生成算法对其进行求解。该方法将求解的目标函数实行分解, 将每个目标函数均形成主、子两个问题, 并将两者实行交替求解<sup>[14]</sup>, 以此获取目标函数的最优解, 该求解步骤如下:

步骤1: 给定一组  $\tilde{P}_{i,t}$  的取值, 将其定义为初始的最恶劣场景; 确定两个目标函数的上、下界, 分别用  $UB_1 = +\infty$  和  $UB_2 = +\infty, LB_1 = -\infty$  和  $LB_2 = -\infty$  表示,  $k = 1$ 。

步骤2: 依据上述确定的最恶劣场景, 完成两个主问题求解, 获取其最优解; 新的下界采用主问题的目标函数值描述。

步骤3: 依据1.2小节的最优求解结果, 求解对应的子问题<sup>[15]</sup>, 并得出目标函数值结果以及最恶劣场景下  $\tilde{P}_{i,t}$  的取值, 并在此基础上完成上界更新。

步骤4: 设定求解算法的收敛阈值  $\varepsilon$ , 如果上界值和下界值之间的差不大于  $\varepsilon$ , 则停止迭代, 返回最优解  $x_k^*$  和  $y_k^*$ ; 否则增加变量  $y^{k+1}$  和如下约束:

$$\begin{cases} \alpha \geq c^T y^{k+1} \\ Dy^{k+1} \geq d \\ Ky^{k+1} = 0 \\ Fx + Gy^{k+1} \geq h \\ I_u y^{k+1} = \tilde{P}_{i,t}^* \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\alpha$  为目标函数值;  $k$  为迭代次数;  $c^T$  为系数列向量, 对应目标函数;  $d, h$  均为常数列向量;  $D, K, F, G, I_u$  均为系数矩阵, 对应碳足迹约束下的变量;  $\tilde{P}_{i,t}^*$  为最恶劣场景下  $\tilde{P}_{i,t}$  的取值。

## 2 测试分析

为了测试本文方法在混合储能微电网分布式协调控制中的应用效果,将本文方法应用于某混合储能微电网中,结构如图1所示。

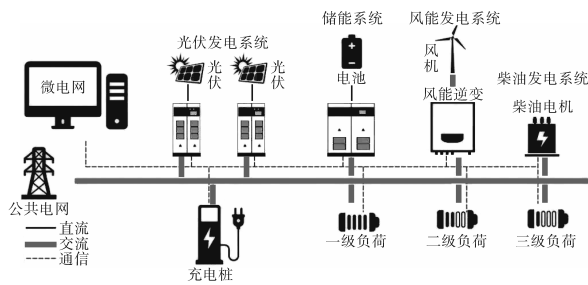


图1 某混合储能微电网结构

Fig.1 Structure of a hybrid energy storage microgrid

图1中的光伏系统为并网光伏系统,由太阳能电池方阵、蓄电池组、充放电控制器、逆变器、交流配电柜、太阳跟踪控制系统等设备组成。该风能发电系统的主要设备为风机,风机体积庞大,具有传动系统、变桨、偏航系统以及其他辅助设备电路。储能系统克服在能量供应和需求之间的时间性或者局部性的差异,可以储存多余的热能、动能、电能、位能、化学能等,调节能量的输出容量、输出地点、输出时间。

直流侧和交流侧的分布式电源额定发电功率分别为3.5 kW和5 kW,蓄电池额定容量为4.5 kW,交流电压为380 V/50 Hz,直流和交流负荷总功率为0~3 kW,其他参数详细情况如下:混合储能最大充、放电功率为5.5 MW,混合储能额定容量为10 MW·h,混合储能的荷电状态上、下限分别为1和0,并网约束波动率7.5%,碳足迹系数上限为9,并网容量上限为9。

为衡量本文方法对混合储能微电网中碳排放量的计算效果,获取混合能源微电网中的各个可再生能源,在生命周期的各个环节中产生的碳排放比例结果,如图2所示。

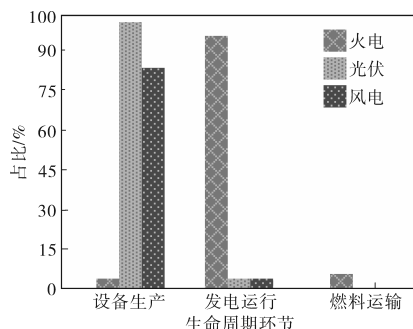


图2 可再生能源碳排放比例结果

Fig.2 Carbon emission ratio of renewable energy

依据图2的测试结果可知:本文方法具备混合储能微电网中,各个可再生能源在生命周期的各个环节中,产生的碳排放的计算能力能够获取碳排放占比结果。在设备生成环节中,光伏和风电的碳排放占比最多;在发电运行环节中,火电的碳排放占比最多。因此,本文方法具有良好的碳排放计算能力,为混合储能微电网的分布式协同控制提供约束依据。

为衡量本文方法的应用效果,获取本文方法在不同时段和不同的出力情况下碳足迹系数结果,并将结果与约束结果进行对比,以此判断本文方法的应用效果,如图3所示。

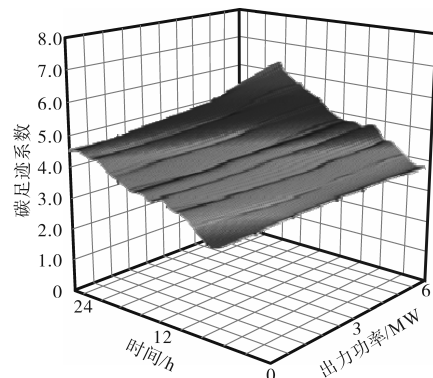


图3 碳足迹系数结果

Fig.3 Carbon footprint coefficient results

依据图3的测试结果可知:在不同的时段内,随着出力功率的逐渐增加,采用本文方法进行混合储能微电网分布式协调控制后,碳足迹系数的结果均低于9.0,处于约束结果范围内。因此,本文方法具有良好的协调控制效果,能够保证碳排放量最小化,满足应用需求。

为进一步验证本文方法的应用效果,获取本文方法进行分布式协调控制后,在某个时段内,随着能源利用率的不断变化,超级电容器的功率分配结果(最大功率5 MW)如图4所示。

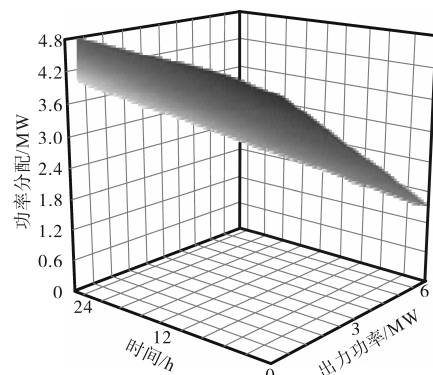


图4 超级电容器的功率分配结果

Fig.4 Power distribution result of supercapacitor

依据图4的测试结果可知:随着能源利用率的不断变化,超级电容器的功率分配结果均在其实际位置的最大功率范围内,最大值为4.8 MW左右。因此,本文方法的应用效果良好,能够满足混合储能系统运行的功率目标。

为衡量本文方法对于混合能源定容的优化配置效果,测试本文方法在不同的负荷波动下混合能源微电网的网损电量和最大电压偏差,两个指标的期望结果低于0.55 MW·h和0.075 V,测试结果如表1所示。

表1 混合能源定容的优化配置效果

Tab.1 Optimized configuration effect of hybrid energy constant capacity

负荷波动程度/%	网损电量/(MW·h)	最大电压偏差/V
5	0.22	0.045
10	0.29	0.048
15	0.34	0.051
20	0.29	0.054
25	0.33	0.056
30	0.37	0.059
35	0.36	0.061
40	0.42	0.063
45	0.39	0.065
50	0.40	0.067

依据表1的测试结果可知:本文方法应用后,可确定最佳的混合能源定容配置方案,电网的网损电量和最大电压偏差的最高值分别0.42 MW·h和0.067 V,能够保证电能的利用程度,同时保证电压的稳定。

为验证本文方法的应用性,获取本文方法应用后,混合储能微电网运行过程中,在不同的功率输出下,间接和直接两种碳排放结果如表2所示。

表2 间接和直接两种碳排放量

Tab.2 Indirect and direct carbon emissions

输出功率/ MW	控制前		控制后	
	间接碳排 放量/万吨	直接碳排 放量/万吨	间接碳排 放量/万吨	直接碳排 放量/万吨
12	227.5	217.7	96.9	89.6
20	230.5	224.3	104.2	90.2
30	227.6	225.1	111.5	88.6
40	225.8	219.6	106.2	92.4
50	230.3	222.8	104.7	95.6
60	222.9	220.6	111.3	98.3
70	220.4	221.4	107.2	101.1
80	236.2	227.4	112.0	100.6
90	233.3	222.6	113.3	99.4
100	234.1	225.5	104.7	102.2

依据表2的测试结果可知:本文方法应用前,随着功率输出的逐渐增加,混合储能微电网在运行过程中,间接和直接两种碳排放量结果均较高,最高值分别达到236.2万吨和227.4万吨;经过本文方法控制后,在不同的输出功率下,间接和直接两种碳排放量的结果显著下降,其最高值为113.3万吨和102.2万吨。因此,本文方法应用性良好,能够有效降低碳排放量。

为了更直观地验证本文方法的应用性,获取本文方法应用后,混合储能系统在运行过程中的功率波动结果,以此衡量本文方法应用后,对混合储能系统的平抑效果,如图5所示。除此之外,获取混合储能系统的荷电状态,以此衡量本文方法应用后,对储能系统的生命周期的提升能力,结果如图6所示。

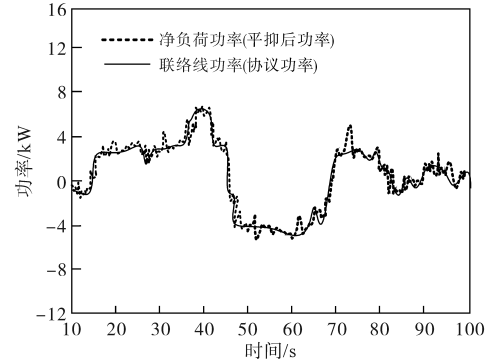


图5 混合储能系统的平抑效果

Fig.5 Stabilization effect of hybrid energy storage system

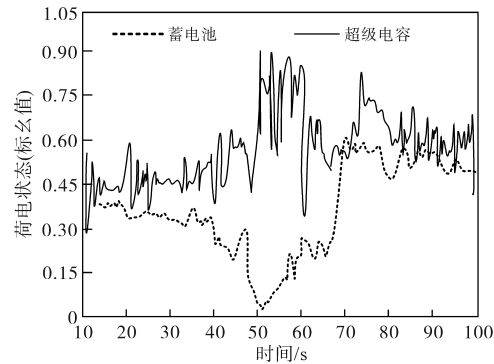


图6 储能系统的生命周期的提升能力

Fig.6 Life cycle improvement capacity of energy storage system

依据图5和图6的测试结果可知,本文方法应用后,能够有效控制各个可再生能源的净负荷功率波动;可有效降低线路的功率峰谷差,以此提升混合储能微电网的运行稳定性,具有良好的混合储能系统的平抑效果;混合储能总功率中的高频部分通过超级电容承担,低频部分通过蓄电池承担,以此充分结合蓄电池充电变化较慢、超级电容充放电功率变化较快的特点,提升了蓄电

池的生命周期,有效提升了混合储能系统的荷电状态。

### 3 结论

为提升混合储能微电网稳定运行,实现最小碳排放量,本文提出碳足迹强约束下的混合储能微电网分布式协调控制算法,该算法以碳排放量最小为目标,进行混合储能微电网的协调控制。测试结果显示:本文方法的应用效果良好,能够完成各个可再生能源在生命周期的各个环节中产生的碳排放计算;具有良好的协调控制效果,降低了混合储能微电网的碳排放量,有效提升了混合储能系统的荷电状态。

#### 参考文献

- [1] 杨挺,姜含,侯显丞,等. 基于计算负荷时-空双维迁移的互联多数据中心碳中和调控方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 164-177.  
YANG Ting, JIANG Han, HOU Yucheng, et al. Study on carbon neutrality regulation method of interconnected multi-data-center based on spatio-temporal dual-dimensional computing load migration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 164-177.
- [2] 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 Jinling, ZHANG Wei, ZHANG Xiangguo, et al. Coordinated control strategy for photovoltaic micro-grid system with hybrid energy-storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 102-108.
- [3] 张弛,曾杰,张威,等. 含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略[J]. 现代电力, 2020, 37(1): 74-82.  
ZHANG Chi, ZENG Jie, ZHANG Wei, et al. Multi-time scale coordination control strategy of isolated microgrid with hybrid energy storage[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1): 74-82.
- [4] 何后裕,何华琴,王骞,等. 考虑碳足迹与交易的分布式光伏发电成本分摊[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 85-92.  
HE Houyu, HE Huaqin, WANG Qian, et al. Cost sharing of distributed photovoltaic power generation considering carbon footprint and transactions[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 85-92.
- [5] 张步云,王晋宁,梁定康,等. 采用一致性算法的自治微电网群分布式储能优化控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1705-1713.  
ZHANG Buyun, WANG Jinning, LIANG Dingkang, et al. Optimization control strategy of distributed energy storage in autonomous microgrid cluster on consensus algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1705-1713.
- [6] 朱洋艳,王致杰,王鸿,等. 基于分层控制的微电网混合储能协调优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 235-242.  
ZHU Yangyan, WANG Zhijie, WANG Hong, et al. Research on hierarchical control of micro power grid hybrid energy storage coordination optimization strategy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 235-242.
- [7] 郭玲娟,魏斌,韩肖清,等. 基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 527-537.  
GUO Lingjuan, WEI Bin, HAN Xiaoqing, et al. Capacity optimal configuration of hybrid energy storage in hybrid AC/DC micro-grid based on ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 527-537.
- [8] 刘志坚,李晓磊,梁宁,等. 基于前馈自抗扰的光伏微电网混合储能控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 96-104.  
LIU Zhijian, LI Xiaolei, LIANG Ning, et al. Control strategy of hybrid energy storage for photovoltaic microgrid applying feed-forward active disturbance rejection[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 96-104.
- [9] 郭伟,赵洪山. 基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1140-1151.  
GUO Wei, ZHAO Hongshan. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1140-1151.
- [10] 李成善,陈奥博,程杉,等. 基于生态博弈的含云储能微电网多智能体协调优化调度[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 166-177.  
LI Xianshan, CHEN Aobo, CHENG Shan, et al. Multi-agent coordination and optimal dispatch of microgrid with CES based on ecological game[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 166-177.
- [11] 于会群,张晓丹,李增峰,等. 基于电能质量等级的孤岛微电网分层控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 68-75.  
YU Huiqun, ZHANG Xiaodan, LI Zengfeng, et al. Research on hierarchical control strategy of island micro-grid based on power quality grades[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 68-75.
- [12] 汤旻安,刘锡麟. 基于二阶变滤波时间常数的微网混合储能功率分配策略[J]. 可再生能源, 2022, 40(4): 550-557.  
TANG Min'an, LIU Xilin. Hybrid energy storage power allocation strategy for microgrid based on second-order variable filter time constant[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(4): 550-557.
- [13] 曹浪恒,郑峰,林祥群,等. 计及储能混合控制算法的微电网运行模式无缝切换控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 1-11.  
CAO Langheng, ZHENG Feng, LIN Xiangqun, et al. Research on seamless switching control strategy of micro-grid operation mode considering hybrid control algorithm of energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 1-11.

(下转第96页)

105-108.  
 HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. The simulation research on the characteristic of fault current of doubly-fed induction generator[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2009, 37(9): 105-108.

[4] 赵宏博, 汤海雁, 张文亮, 等. 双馈风电机组零电压穿越暂态特性分析及综合控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1422-1430.  
 ZHAO Hongbo, TANG Haiyan, ZHANG Wenliang, et al. Transient characteristics research and integrated control strategy of DFIG for zero voltage ride through[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1422-1430.

[5] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.  
 BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.

[6] 肖繁, 张哲, 尹项根, 等. 含双馈风电机组的电力系统故障计算方法研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 14-23.  
 XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. The fault calculation method of power systems including doubly-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 14-23.

[7] 孙丽玲, 尹思杰. 计及Crowbar投入时间影响的双馈感应风力发电暂态全过程研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(6): 9-15.  
 SUN Liling, YIN Sijie. Research on transient full process of doubly-fed induction generator considering Crowbar protection insertion[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(6): 9-15.

[8] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.

[9] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.  
 LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.

[10] 段建东, 崔帅帅, 刘吴骥, 等. 基于电流频率差的有源配电网线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2927-2934.  
 DUAN Jiandong, CUI Shuaishuai, LIU Wuji, et al. Line protection based on current frequency difference for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2927-2934.

[11] 段建东, 陈童, 尚迪, 等. 基于电流衰减因子的含DFIG配电网线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1915-1924.  
 DUAN Jiandong, CHEN Tong, SHANG Di, et al. Current attenuation factor based line protection scheme for distribution network of DFIG wind power integration system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1915-1924.

[12] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3580-3585.  
 SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3580-3585.

[13] 马静, 刘静. 基于故障稳态分量的含DG配电网自适应方向电流保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 1-9.  
 MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.

[14] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.  
 BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019, 2216.

收稿日期: 2022-11-01

修改稿日期: 2022-12-07

(上接第21页)

[14] 王民华, 李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 215-220.  
 WANG Minhua, LI Fengxia. Study on control strategy of hybrid energy storage used in stabilization power fluctuation of microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 215-220.

[15] 杨彦杰, 陈雨若, 唐圣学. 基于神经网络的混合储能系统能量管理策略[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 88-92.  
 YANG Yanjie, CHEN Yuruo, TANG Shengxue. Energy management mode of hybrid energy storage system based on neural network algorithm[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 88-92.

收稿日期: 2022-08-03

修改稿日期: 2022-10-26