

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.008

直流微网蓄电池-SMES混合储能系统容量配置方法

Capacity configuration method for a battery-SMES hybrid energy storage system in a DC microgrid

乔力晖,李明澈*,张睿,方宗杰

QIAO Lihui, LI Mingche*, ZHANG Rui, FANG Zongjie

(兰州交通大学 新能源与动力工程学院,兰州 730070)

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

摘要:配置混合储能系统(HESS)可以有效减轻光伏发电输出功率波动性对直流微网的安全可靠运行带来的不利影响。为了更好地利用超导磁储能(SMES)响应速度快、功率密度高、效率高、可以无损储存电能等优点,基于与蓄电池组合而成的HESS的互补特性提出了以提高HESS经济性为目标的能量管理策略。对蓄电池-SMES HESS建立系统全生命周期成本(LCC)模型及其约束条件。对HESS进行容量优化配置可以有效降低系统成本,在满足系统功率要求的前提下,将最小LCC作为目标函数,通过引入加速因子的粒子群算法对系统容量进行配置,并结合算例建立微网模型,验证所提容量配置策略的有效性。

关键词:光伏发电;直流微网;混合储能系统;超导磁储能;容量配置;蓄电池

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2023)09-0059-06

Abstract: The configuration of a hybrid energy storage system (HESS) can effectively mitigate the adverse effects of PV power output volatility on the safe and reliable operation of a DC microgrid. In order to make better use of the advantages of superconducting magnetic storage (SMES), such as fast response, high power density, high efficiency and the ability to store electricity without energy loss, an energy management strategy is proposed based on the complementarity of a HESS in a battery pack, to improve the economy of HESSs. Then, life cycle cost (LCC) model and its constraints are proposed. The capacity optimization configuration of the HESS can effectively reduce its system cost. Under the premise of satisfying the power requirements on the system, with the LCC as the objective function, the configuration of the HESS is obtained by particle swarm optimization with acceleration coefficients. The effectiveness of the proposed capacity allocation strategy is verified by a case in a microgrid.

Keywords: photovoltaic power generation; DC microgrid; hybrid energy storage system; superconducting magnetic energy storage; capacity configuration; battery

0 引言

随着化石能源的大量使用,由碳硫氧化物引起的环境问题日趋严重,开发利用新能源和提高可再生能源的效率已成为全球电力发展的重点^[1]。目前,国际能源形势由于化石燃料的大量使用、常规能源的日益短缺以及全球环境的严重恶化等因素已经受到了明显的影响^[2]。当前,很多国家都在努

力寻找和开发能够取代传统能源的清洁能源,以缓解对常规化石能源的依赖^[3]。在这种新的发展形势下,世界各地的学者们对可再生能源的开发和利用进行了大量研究。太阳能作为新能源的典型代表,光伏发电的输出功率受到环境的影响较为严重,对电网供电质量和系统稳定运行产生了明显影响^[4-5]。为了减小功率波动对微电网的冲击,提高微电网的电能质量和运行稳定性,微电网的储能系统需要更加灵活的控制策略^[5]。选择有效的能量管理策略来优化其性能,平滑能量波动,保证电网运行稳定的同时降低成本,已成为直流微电网中混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS)的研究热

基金项目:甘肃省青年科技基金计划(20JR10RA263);兰州交通大学青年基金项目(636006)
Gansu Youth Science and Technology Fund Program (20JR10RA263); Lanzhou Jiaotong University Youth Fund Project(636006)

点^[6]。当前的任意一种储能技术还不能同时满足高功率密度、高能量密度、长寿命、安全性和技术成熟度等诸多条件,因此 HESS 也随之进入学者的视野。其中,超导磁储能(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)具有效率高、响应快、几乎无损耗等优点,与蓄电池相结合组成蓄电池-SMES 的 HESS 可以充分发挥这 2 种类型的优势,实现优势互补。

SMES 储能能够有效提高电力系统的安全性,对于可再生能源发电不连续、不稳定也具有良好的改善效果。为了保证系统直流母线的电压稳定性,需要对 HESS 进行有效而准确的控制。目前针对这一问题已经有了一定的研究成果。文献[7]在分析电力系统的拓扑结构和基本组成的基础上,给出了基于层次控制理论的电力平衡控制方法,并利用遗传算法的模糊控制实现了对蓄电池和 SMES 功率的合理分配。文献[8]针对分布式系统间歇波动的求解,采用了基于比例积分(PI)控制器的控制策略和实时母线电压 PI 控制,由此得到脉冲宽度调制(PWM)信号,实现了蓄电池与 SMES 独立控制,由此实现了系统内分布式微源的动态补偿。文献[9]提出了一种可以用于风力发电和储能的基于超导储能的双馈异步风力发电机(DFIG)励磁系统,有利于提高 DFIG 无功功率能力。同时可使最高器件温度下降,有利于避免绝缘栅双极型晶体管(IGBT)因超温故障而产生的不利影响,但这也可能使它的故障频率提高。文献[10]将 SMES-蓄电池储能系统(SMES-BESS) HESS 应用于波浪能发电。通过利用 SMES 对电力系统的高频功率波动进行补偿,蓄电池对低频的波动进行补偿,实现对电网或负荷的稳定供电。文献[11]对 SMES-电池 HESS 建立了哈密顿模型,提出了一种新的基于端口受控哈密顿(PCH)模式的 HESS 的控制方法以改善系统的输出性能。研究了基于经验模态分解、模糊控制和先进控制的分级控制策略,以保证风力发电的高效并网。文献[12]通过在不同工况下分时分步地接入 SMES 和蓄电池储能单元对系统中的不平衡功率进行动态补偿,仿真结果表明混合储能存储装置对电网电压的稳定性有一定的改善效果,但忽略了 SMES 对电网电压波动的缓冲功能。在研究了 SMES-BESS HESS 在微电网中的应用后,为了更好地发挥蓄电池以及 SMES 的优点,提高系统的灵活性及运行寿命,本文利用 HESS 对光伏直流微网中的不平衡功率进行补偿。不同类型的能量储存技术在性能和经济性上有很大的差异。在进行储能系统容量配置时,既要确保系统的安全、稳定,又要兼顾到储能和微电网的经济运行。现有 HESS 的容

量配置可分为 2 类:一是以确保电力供应的稳定性为目标,二是以确保储能系统的成本效益为目标。文献[13]采用带有自适应惯性权重的粒子群算法来优化解决风光发电的 HESS 的多目标函数,寻找满足系统要求的最优解。文献[14]在分析负荷特性需求的基础上,分析了储能元件的拉贡曲线并提出了基于成本分析的 HESS 配置方案。文献[15]提出了在考虑极端条件微电网集群的主储能系统和子微网储能系统中不同储能系统的容量分配方法。文献[16]针对混合可再生能源(HRE)系统建立了一个基于可重构片上系统(RSOC)的功率模型,并提出了相应的容量配置策略。结果表明,经过储能系统的调节,混合能源系统的电力冗余和电力短缺大大减少。在直流微电网中引入 HESS 对提高新能源的利用率有很好的促进作用,但是 HESS 的成本也是影响其发展的重要一环,因此需要寻找一种既可以满足系统响应需求,又可以降低 HESS 成本的配置策略。但是,上述容量配置方法仅以保障系统的可靠运行为最终目的,很可能导致配置结果的偏差,这可能会提高能源的消耗,使能源的利用率下降,对整个系统的经济运行产生负面影响。因此还需要寻找合适的 HESS 容量配置方案,在满足系统稳定运行的基础上降低 HESS 的成本,提高经济性。而目前包含 SMES 储能的容量配置方法并不多,本文的研究也对含 SMES 的 HESS 的工程应用提供了支持。

1 HESS 容量配置策略

1.1 光伏直流微电网系统结构

含混合储能的典型光伏直流微电网系统结构如图 1 所示。光伏发电模块通过 Boost 电路与直流母线相连,采用最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制策略中的电导增量法来提高太阳能的利用率,也可切换为恒压控制。为了实现双向的能量流动,蓄电池、SMES 分别经过双向直流/直流(DC/DC)变换器与直流母线相连,同时直流负载通过 DC/DC 变换器连接到直流母线,交流负载通过直流/交流(DC/AC)变换器连接到直流母线。当需要减载时,根据负荷的重要性确定切除顺序。

图 1 中: P_{PV} 为光伏单元输出功率; P_{bat} 和 P_{SC} 分别为锂电池和 SMES 吸收和输出功率; P_{HESS} 为 HESS 输出和吸收功率; P_{Load} 为负荷功率。各单元间功率满足平衡关系,即

$$P_{Load} - P_{PV} = P_{bat} + P_{SC}, \quad (1)$$

$$P_{HESS} = P_{bat} + P_{SC}, \quad (2)$$

式中: P_{bat} 和 P_{SC} 根据输出和吸收为正或负。

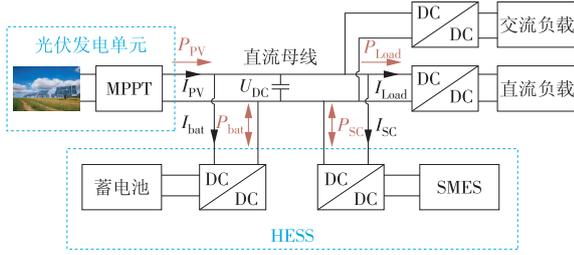


图1 直流微电网结构

Fig. 1 DC microgrid architecture

1.2 目标函数

在直流微电网中,直流母线电压是反映系统功率平衡的唯一指标^[17]。由于光伏发电受到温度、光照等环境条件的影响,以及微电网负荷的变化等都会导致系统电压的不稳定,在实际应用中难以满足电能质量稳定性和可靠性的要求,因此需要储能系统进行调节,保持功率的平衡和母线电压的稳定,提高光伏系统的运行稳定性。

HESS的目标函数即全生命周期成本(Life Cost Cycle, LCC),它可以看作在设备的生命周期内,设计、制造、安装、调试、维护和处置所产生的全部费用之和^[18]。为了降低HESS的成本,需要建立包含HESS安装、更换及维护成本的目标函数。

其中设备安装成本为

$$C_0 = n_{bp}P_b + n_{bc}C_b + n_{scp}P_{sc} + n_{sc}C_{sc}, \quad (3)$$

式中: P_b, C_b 为蓄电池的额定功率和额定容量; P_{sc}, C_{sc} 为SMES的额定功率和额定容量; n_{bp}, n_{bc} 为蓄电池的功率单价和容量单价; n_{scp}, n_{sc} 为SMES的功率单价和容量单价。

设备更换成本为

$$C_1 = q_b(n_{bp}P_b + n_{bc}C_b) + q_{sc}(n_{scp}P_{sc} + n_{sc}C_{sc}), \quad (4)$$

式中: q_b 和 q_{sc} 为蓄电池和SMES的设备更换系数。一般情况下,SMES基本可以看作 $q_{sc}=0$ 。

设备维护成本为

$$C_2 = Y(m_b C_b + m_{sc} C_{sc}), \quad (5)$$

式中: m_b 和 m_{sc} 分别为蓄电池和SMES的维护系数; Y 为设备工作时间。HESS的目标函数为最小成本,即

$$C = \min\left(\frac{C_0 + C_1 + C_2}{Y}\right). \quad (6)$$

蓄电池的额定和最小储能为

$$E_{bn} = \frac{N_b C_b U_b}{10^6}, \quad (7)$$

$$E_{b\min} = \frac{N_b C_b U_b (1 - D_{od})}{10^6}, \quad (8)$$

式中: U_b 为蓄电池的额定电压; D_{od} 为最大放电深度。

SMES的额定和最小储能为

$$E_{scn} = \frac{0.5 N_{sc} C_{sc} U_{sc\max}^2}{3.6 \times 10^9}, \quad (9)$$

$$E_{sc\min} = \frac{0.5 N_{sc} C_{sc} U_{sc\min}^2 (1 - D_{od})}{3.6 \times 10^9}. \quad (10)$$

1.3 约束条件

微电网的负荷缺电率定义为负荷的缺电量与负荷总需求量之比

$$f_{LPSP} = \frac{\sum_{k=1}^K E_{lps}(k)}{\sum_{k=1}^K E_L(k)}, \quad (11)$$

$$\Delta E = E_{pv}(k)\eta_c - E_L(k), \quad (12)$$

式中: $E_{pv}(k), E_L(k)$ 分别为 k 时刻光伏发电电量和负荷的耗电量; η_c 为逆变器的功率转换效率。

当光伏发电量满足负荷需求时, $\Delta E \geq 0$,储能系统充电,蓄电池和SMES的充电量为

$$\begin{cases} E_b(k) = E_b(k-1) + E_{bc}(k)\eta_{bc} \\ E_{sc}(k) = E_{sc}(k-1) + E_{sc}(k)\eta_{sc} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: η_{bc}, η_{sc} 分别为蓄电池和SMES的充电效率。

当光伏发电量不能满足负荷需求时, $\Delta E < 0$,储能系统放电,其放电量为

$$\begin{cases} E_b(k) = E_b(k-1) - E_{bd}(k)\eta_{bd} \\ E_{sc}(k) = E_{sc}(k-1) - E_{scd}(k)\eta_{scd} \end{cases}, \quad (14)$$

式中: η_{bd}, η_{scd} 分别为蓄电池和SMES的放电效率。

负荷缺电率是体现系统供电可靠性的特征之一,因此负荷的缺电率必须限定在一定范围内才能保障系统供电稳定,即

$$f_{LPSP} \leq f_{LPSP\max}, \quad (15)$$

式中: $f_{LPSP\max}$ 为系统允许的最大负荷缺电率。

储能系统的储能约束条件为

$$\begin{cases} E_{b\min} < E_b(k) < E_{bn} \\ E_{sc\min} < E_{sc}(k) < E_{scn} \end{cases}. \quad (16)$$

1.4 容量配置方法

粒子群算法是一种迭代优化工具,适用于对系统进行容量分配的最优设计,在简单性、稳定性、准确性和快速收敛方面优于其他智能算法。为了提高标准粒子群算法的收敛性能,在速度进化方程中引入惯性权重 ω ^[19],引入惯性权重因子的粒子群优化算法速度公式为

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k), \quad (17)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} k, \quad (18)$$

式中: V_{id}^k 为粒子速度; c_1, c_2 为加速因子; r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

由于粒子群算法是一种基于种群的搜索算法,寻找全局最优需要检测种群中的每一个点,这也会导致速度缓慢的问题^[20-22]。在初始搜索中使用加速因子可以使粒子快速分布在搜索空间中,这增加了

粒子的多样性,加快了对最佳点的搜索

$$c_1 = c_{1s} + k(c_{1e} - c_{1s})/k_{max}, \quad (19)$$

$$c_2 = c_{2s} + k(c_{2e} - c_{2s})/k_{max}, \quad (20)$$

式中: c_{1e}, c_{2e} 分别为 c_1, c_2 的终值; c_{1s}, c_{2s} 分别为 c_1, c_2 的初值; k 为当前迭代次数; k_{max} 为最大迭代次数。

1.5 仿真结果及分析

某地1年的光伏发电量和负荷消耗量如图2所示。设定逆变器的效率 η_e 为0.95,系统供电缺电率0.05。HESS参数见表1。

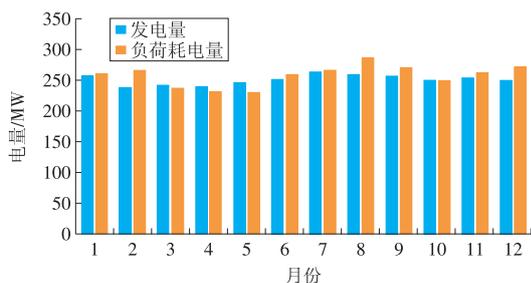


图2 光伏发电量和负荷消耗量

Fig. 2 Photovoltaic power generation and consumption

表1 HESS参数

Table 1 Parameters of the HESS

项目	蓄电池	SMES
额定电压/V	200	1 200
额定容量/(A·h)	50.0	2.5
充电效率	0.80	0.99
放电效率	0.80	0.99
放电深度	0.8	—
运行系数	0.10	0.01
维护系数	0.02	—
循环次数	1 500	—
处理系数	0.08	0.02

1.5.1 标准粒子群算法

设置该种群数量为100,最大进化代数为500, $c_1=c_2=2$ 。对HESS容量配置采用传统粒子群算法的结果如图3所示。

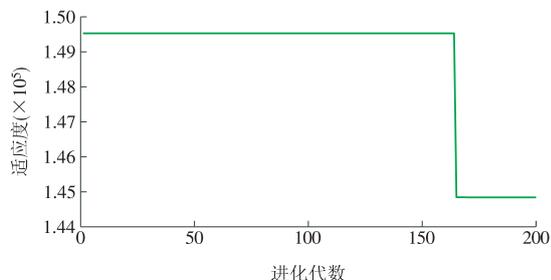


图3 采用标准粒子群算法结果

Fig. 3 Particle swarm algorithm results

仿真结果表明,采用标准粒子群算法时大约180代才能寻找到最优解。采用标准粒子群算法的容量配置结果见表2。

表2 标准粒子群算法容量配置结果

Table 2 Particle swarm algorithm capacity configuration results

优化参数	配置结果
蓄电池/个	388 640
SMES/个	41 360
f_{LPS}	0.036 1
最小成本/元	1 647 200

1.5.2 加速因子的粒子群算法

对HESS容量配置采用加速因子的粒子群算的结果如图4所示。由图可知,采用加速因子的粒子群算法可以更快地找到最优解,大约只需要20代。采用加速因子的粒子群算法的容量配置结果见表3。

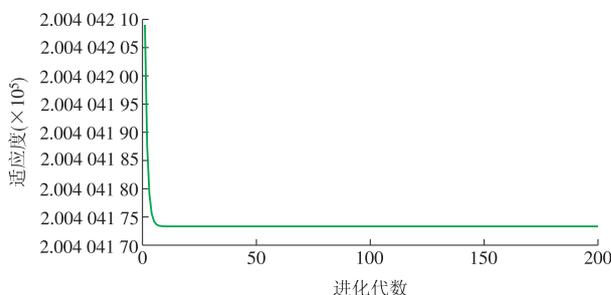


图4 采用加速因子的粒子群算法结果

Fig. 4 Results of particle swarm algorithms using acceleration factors

表3 采用加速因子的粒子群算法容量配置结果

Table 3 Capacity allocation results of particle swarm optimization with acceleration coefficients

优化参数	配置结果
蓄电池/个	348 470
SMES/个	19 910
f_{LPS}	0.036 0
最小成本/元	1 470 700

从容量配置结果来看,该方法也可以降低HESS的LCC,有利于提高HESS的经济效益。

随着加速因子 c_1 与 c_2 的变化,HESS的配置结果也随之改变。现对加速因子作如下变化。

(1)当 $c_1 \leq 2, c_2 > 2$ 时,仿真结果如图5a所示。

(2)当 $c_1 > 2, c_2 \leq 2$ 时,仿真结果如图5b所示。

改变加速因子的粒子群算法容量配置结果见表4。

对以上仿真结果进行比较不难看出,当 c_1 增大且 c_2 减小时,收敛速度较其他大小的加速因子更快,能够更快找到最优解;当 c_1 减小且 c_2 增大时,HESS的LCC最低。

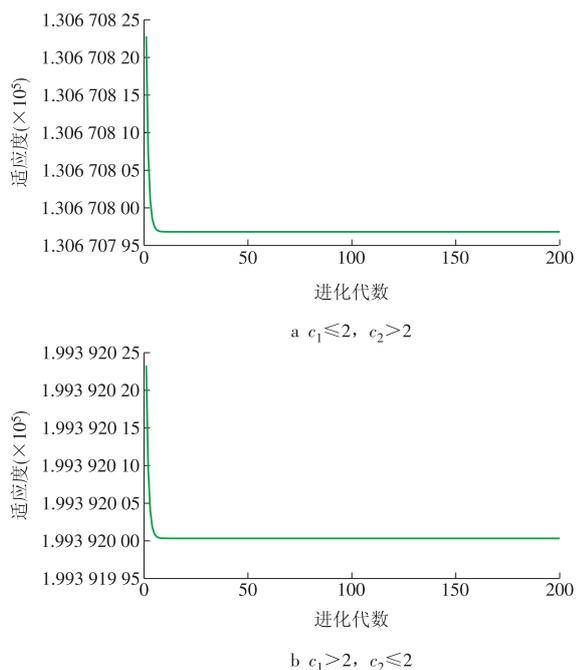


图 5 改变加速因子的粒子群算法结果

Fig. 5 Results of particle swarm optimization with varying acceleration coefficients

表 4 改变加速因子的粒子群算法容量配置结果
Table 4 Capacity allocation results of particle swarm optimization with varying acceleration coefficients

优化参数	$c_1 \leq 2, c_2 > 2$	$c_1 > 2, c_2 \leq 2$
蓄电池/个	336 580	347 590
SMES/个	17 910	16 010
f_{LSP}	0.036 1	0.036 0
最小成本/元	1 420 100	1 465 700

2 结论

本文对 SMES 组成的 HESS 进行研究并将其应用于光伏直流微网。针对光伏直流微电网中 BESS-SMES 的 HESS 的容量配置方法进行研究, 得出了以下结论。

(1) 采用粒子群算法对光伏直流微电网的蓄电池-SMES 的 HESS 进行容量配置, 对光伏直流微电网 HESS 的全生命周期进行分析, 建立了包含设备安装费用、更换费用以及维护费用的目标函数, 采用表征供电可靠性的负荷缺电率作为约束条件, 引入加速因子的粒子群算法提高了算法的收敛性, 加快了收敛速度。

(2) 通过 Matlab/Simulink 建立模型并结合算例进行仿真分析, 验证了所提容量配置策略的可行性和有效性。通过对不同的加速因子大小进行对比可以看出, 处于不同范围的加速因子对收敛速度的加快效果不同, 但都提高了收敛速度并降低了系统成本, 其中当 $c_1 \leq 2, c_2 > 2$ 时系统的 LCC 最低。相较于

采用标准粒子群算法的容量配置结果降低约 13.79%。

(3) 超导储能目前可用于风光发电等随机性强的间歇式新能源。采用 SMES 组成的 HESS 可以提高新能源的并网性能, 对提高改善电能质量也有积极影响。通过对其进行容量配置, 可有效降低采用 SMES 储能的成本, 对其工程应用有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 李祥山, 杨晓东, 张有兵, 等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 198-204.
LI Xiangshan, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 198-204.

[2] 李春曦, 王佳, 叶学民, 等. 我国新能源发展现状及前景[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(4): 1-8.
LI Chunxi, WANG Jia, YE Xuemin, et al. Development and prospects of new energy in China [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(4): 1-8.

[3] 韩芳. 我国可再生能源发展现状及前景展望[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 137-140.
HAN Fang. Development status and prospect of renewable energy in China [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(4): 137-140.

[4] 于国星, 侯睿, 汪任潇, 等. 孤岛微网分层分布式频率调节及功率优化控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 53-60.
YU Guoxing, HOU Rui, WANG Renxiao, et al. Hierarchical distributed frequency regulation and power optimization control for islanded microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 53-60.

[5] 孙广宇, 李永丽, 靳伟, 等. 基于三相多功能逆变器的微电网电能质量综合治理策略[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1211-1219.
SUN Guangyu, LI Yongli, JIN Wei, et al. A comprehensive power quality control strategy for microgrid based on three-phase multi-function inverters [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1211-1219.

[6] 邹见效, 戴碧蓉, 彭超, 等. 基于荷电状态分级优化的混合储能风电功率平抑方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 1-6.
ZOU Jianxiao, DAI Birong, PENG Chao, et al. Wind power smoothing method using hybrid energy storage system based on SOC hierarchical optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 1-6.

[7] 李凯, 秦文萍, 张海涛, 等. 含混合储能的微电网能量管

- 理系统控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 85-91.
- LI Kai, QIN Wenping, ZHANG Haitao, et al. Control strategy for microgrid energy management system including hybrid energy storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2016, 28(10): 85-91.
- [8]周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
- ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [9]WANG S, TANG Y J, SHI J, et al. Design and advanced control strategies of a hybrid energy storage system for the grid integration of wind power generations [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(2): 89-98.
- [10]KALIYAPPAN K, SUTHA S, KATHIRVEL R. Smes based DFIG generator reactive power improvement using SVPWM [J]. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications, 2014, 3(4): 51-66.
- [11]NIE Z, XIAO X, KANG Q, et al. SMES-battery energy storage system for conditioning outputs from direct drive linear wave energy converters [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5000705.
- [12]LIN X, LEI Y. Coordinated control strategies for SMES-battery hybrid energy storage systems [J]. IEEE Access, 2017, 5: 23452-23465.
- [13]杨芳华, 刘娇, 陈浩, 等. 超导-蓄电池混合储能装置接入配电网对电压稳定性的影响[J]. 电力学报, 2014, 29(3): 211-214.
- YANG Fanghua, LIU Jiao, CHEN Hao, et al. Influence of superconducting magnetic-battery energy storage hybrid energy storage connected to distribution on voltage stability [J]. Journal of Electric Power, 2014, 29(3): 211-214.
- [14]谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.
- TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 7-14.
- [15]李成, 杨秀, 张美霞, 等. 基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 20-24.
- LI Cheng, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Optimal configuration scheme for hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries based on cost analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 20-24.
- [16]田培根, 肖曦, 丁若星, 等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 168-173.
- TIAN Peigen, XIAO Xi, DING Ruoxing, et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi - microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 168-173.
- [17]LI G L, YUAN B F, GE M, et al. Capacity configuration optimization of a hybrid renewable energy system with hydrogen storage [J]. International Journal of Green Energy, 2022, 19(14): 1583-1599.
- [18]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.
- LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: An overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [19]杨国华, 朱向芬, 马玉娟, 等. 基于改进粒子群算法的混合储能系统容量优化[J]. 电测与仪表, 2015, 52(23): 1-5, 10.
- YANG Guohua, ZHU Xiangfen, MA Yujuan, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage based on improved PSO algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(23): 1-5, 10.
- [20]王东风, 孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1552-1561.
- WANG Dongfeng, MENG Li. Performance analysis and parameter selection of PSO algorithms[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(10): 1552-1561.
- [21]温港成, 石鑫, 张怡, 等. 考虑设备变工况特性的园区综合能源系统两阶段规划优化方法研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 1-11.
- WEN Gangcheng, SHI Xin, ZHANG Yi, et al. Research on two - stage planning optimization approach for community integrated energy systems considering off - design conditions[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10): 1-11.
- [22]王义, 杨志伟, 吴坡, 等. 计及高比例分布式光伏能源接入的配电网状态估计[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 12-18.
- WANG Yi, YANG Zhiwei, WU Po, et al. State estimation for the distribution network with high - proportion distributed photovoltaic energy [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(10): 12-18.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2023-01-02;修回日期:2023-04-20
 上网日期:2023-05-06;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

乔力暉(1998),女,在读硕士研究生,从事混合储能系统协调控制方面的研究,1569153093@qq.com;

李明澈*(1987),男,副教授,博士,从事微电网协调控制方面的研究,mcli@mail.lzjtu.cn。

*为通信作者。