

考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统容量优化配置

张育维,胡海涛,耿安琪,陈俊宇,葛银波,王 科

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:随着我国电气化铁路的快速发展,能耗问题日益突出,极大影响了铁路的运营效益。为提升铁路的经济效益,通过混合储能系统实现再生制动能量的回收利用,在此基础上,提出了一种考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统能量管理策略,通过控制储能的充放电阈值实现对铁路负荷的削峰填谷。基于此能量管理策略建立电气化铁路混合储能系统全寿命周期的经济性优化模型,以储能充放电阈值与容量配置参数为优化变量,以全寿命周期的最大净收益为优化目标,对混合储能系统经济性进行优化。采用改进的粒子群优化算法求解具体算例。通过算例分析与方案对比,验证了所提方法的有效性。

关键词:电气化铁路;削峰填谷;混合储能系统;容量配置

中图分类号:U 224;TM 922

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202207012

0 引言

我国电气化铁路能耗问题随着运营里程的快速增长而日益严重。据统计,在2021年,全国铁路总耗电量达到了 7.87×10^{10} kW·h。电气化铁路作为电网最大单体负荷,其电费支出已成为主要运营支出之一。

电气化铁路采取两部制电价政策,包括基本电费和电度电费。其中,基本电费可按变压器容量和负荷最大需量2种方式计算,电度电费则由铁路每月的实际耗电量决定。牵引负荷峰值有功功率不仅关系到牵引变压器容量和最大需量,还关系到总耗电量,因此,对负荷进行削峰可以有效降低基本电费和电度电费的支出。此外,新型动车组/电力机车(后文统一用列车指代具备再生制动功能的电力机车和动车组)在制动过程中优先采用再生制动方式,产生了大量的再生制动能量^[1],若能对其进行合理利用,则可有效降低铁路耗电量,降低电度电费支出。

铁路负荷有功功率的正与负分别代表列车消耗电能与返送再生制动能量2种情况,将正有功功率中的高峰功率定义为铁路负荷的“峰”,将负有功功率(再生制动功率)定义为铁路负荷的“谷”。储能系统可通过放电为牵引变压器分担部分高峰负荷,起到削峰作用,并在负荷低谷时回收再生制动能量起

到填谷作用。因此,采用储能系统对铁路负荷进行削峰填谷是实现电气化铁路节支降耗的有效方案。

对于利用储能系统实现负荷的削峰填谷,现有研究主要集中在电网领域,其通过控制储能的充放电实现电网负荷的峰值功率削减^[2-3],利用峰谷电价差,通过“低储高发”降低用电成本。目前,电气化铁路领域中利用储能进行负荷削峰填谷的研究较少,已有文献分别以飞轮^[4]和超级电容^[5-6]为单一储能介质研究了对铁路负荷的削峰填谷。然而单一储能介质难以兼顾电气化铁路功率大、能量高的负荷特点。对此,混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)可兼顾能量密度和功率密度的要求^[7],相较于单一介质储能系统,可以获得更高的经济效益。

合理的容量配置是充分发挥混合储能系统经济效益的关键。在电气化铁路领域,已有文献研究了含再生制动能量利用及电能质量治理功能的超级电容储能系统的容量配置优化^[8];文献[9]通过进行容量优化配置,指出电气化铁路超级电容储能系统的经济性不理想,说明了超级电容的单位容量成本是制约系统经济性的最主要因素。

对于混合储能系统在电气化铁路中的配置优化,文献[10]进行了单一储能和混合储能在电气化铁路中的最优配置求解,对比说明了混合储能具有良好的经济效益。文献[11-12]以西班牙高速铁路数据为算例,通过对储能系统进行详细的建模,对比了不同配置下混合储能的运行效果,说明了在合理的配置下,混合储能能够为铁路实现节支降耗以及新能源的消纳。混合储能系统能量管理策略与容量配置具有耦合关系^[7],二者均对混合储能系统运行效果产生重要影响。上述文献仅关注储能容量配置,未考虑将能量管理策略参数与容量配置共同优化。

针对以上问题,本文提出一种考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统能量管理策略,以能量管

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-05-26

在线出版日期:2022-07-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52077179);国家自然科学基金青年项目(52107126);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682021ZTPY065)

Project supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China(52077179),the Youth Project of National Natural Science Foundation of China(52107126) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2682021ZTPY065)

理策略中的储能充放电阈值和储能容量配置参数为优化变量,以全寿命周期内最大净收益为优化目标,采用改进的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法对实际算例进行求解,通过分析与对比,验证了所提方法的有效性。

1 电气化铁路混合储能系统

1.1 系统拓扑

电气化铁路混合储能系统由铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC)及混合储能单元组成,其拓扑结构如图1所示。

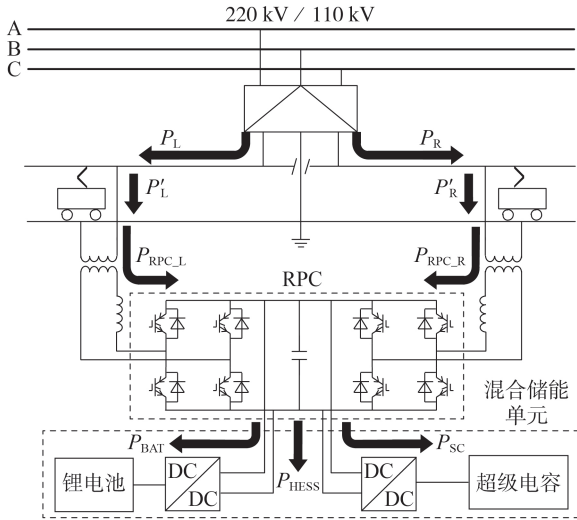


图1 电气化铁路混合储能系统拓扑

Fig.1 Topology of HESS for electrified railway

RPC由2组单相四象限变流器背靠背连接,交流侧通过降压变压器跨接在牵引变电所两侧供电臂上,通过控制RPC潮流可实现两侧供电臂能量互通。混合储能单元由双向DC-DC和锂电池、超级电容构成。双向DC-DC连接RPC的中间直流环节与储能介质,可根据牵引负荷的运行工况,控制其工作状态,进而实现储能介质的充放电。

1.2 系统工作原理

若规定图1中箭头方向为功率流动正方向,可得供电臂处的功率关系为:

$$P'_L + P'_R = P_L + P_R + P_{HESS} \quad (1)$$

式中: P'_L 、 P'_R 分别为经混合储能系统动作后,牵引变电所左、右供电臂的有功功率; P_L 、 P_R 分别为牵引变电所左、右供电臂原负荷功率; P_{HESS} 为混合储能单元的输出功率,规定储能充电时功率为正,放电时功率为负。

当牵引变电所某一供电臂存在再生制动能量时,优先通过RPC将这部分能量转移到另一供电臂加以利用,剩余再生制动能量再由混合储能单元加以吸收。在理想情况下,可实现左、右供电臂有功

率平衡,平衡后的左、右供电臂功率均为 P_{out} ,即:

$$P_{out} = \frac{P_L + P_R + P_{HESS}}{2} \quad (2)$$

再生制动能量的消纳需通过RPC进行功率转移,左、右供电臂转移功率 P_{RPC_L} 、 P_{RPC_R} 分别为:

$$\begin{cases} P_{RPC_L} = P_L - P_{out} \\ P_{RPC_R} = P_R - P_{out} \end{cases} \quad (3)$$

在经过混合储能系统动作后,左、右供电臂的有功功率表达式分别为:

$$\begin{cases} P'_L = P_L - P_{RPC_L} \\ P'_R = P_R - P_{RPC_R} \end{cases} \quad (4)$$

锂电池的功率 P_{BAT} 与超级电容的功率 P_{SC} 之和为混合储能单元的输出功率,即:

$$P_{HESS} = P_{BAT} + P_{SC} \quad (5)$$

2 考虑削峰填谷的混合储能能量管理策略

为充分发挥锂电池、超级电容各自的性能优势,本文提出了一种考虑削峰填谷的能量管理策略:设定锂电池的充放电阈值,借助电池的大容量,实现对“峰”“谷”区间内幅值较大的负荷的削减,并以此减少电池的循环次数,延长使用寿命。由超级电容响应剩余幅值小、波动快的负荷,发挥其循环寿命长的优势,提高再生制动能量利用率。

图2为混合储能系统削峰填谷示意图。图中: P_{max} 、 P_{min} 分别为铁路负荷有功功率的最大值和最小值; P_{dis} 、 P_{ch} 分别为锂电池的放电、充电阈值。当铁路负荷有功功率 $P(t)$ 分别处于以下3个区域时,混合储能有不同的工作情况。

1)区域1: $P_{dis} \leq P(t) \leq P_{max}$,锂电池结合功率、容量约束进行放电,再由超级电容承担功率补足工作,实现削峰。

2)区域2: $P_{ch} < P(t) < P_{dis}$,锂电池不动作,完全由超级电容对此区域中幅值小、波动快的功率进行响应。

3)区域3: $P_{min} \leq P(t) \leq P_{ch}$,锂电池结合功率、容量约束进行充电,再由超级电容承担功率补足工作,实现填谷。

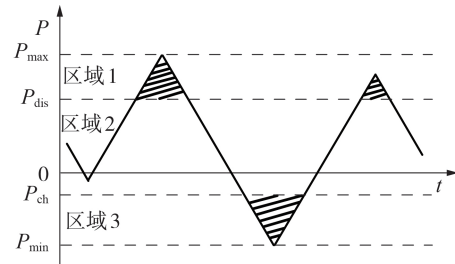


图2 混合储能系统削峰填谷示意图

Fig.2 Schematic diagram of peak load shifting of HESS

综上所述,锂电池在不同情况下的期望功率 $P_{BAT}^{exp}(t)$ 可表示为:

$$P_{\text{BAT}}^{\text{exp}}(t) = \begin{cases} -\min(P_{\text{BAT}}^{\text{N}}, P(t), E_{\text{BAT}}^{\text{sto}}(t)) & P_{\text{dis}} \leq P(t) \leq P_{\text{max}} \\ 0 & P_{\text{ch}} < P(t) < P_{\text{dis}} \\ \min(P_{\text{BAT}}^{\text{N}}, -P(t), E_{\text{BAT}}^{\text{rem}}(t)) & P_{\text{min}} \leq P(t) \leq P_{\text{ch}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{BAT}}^{\text{N}}$ 为电池额定功率; $E_{\text{BAT}}^{\text{sto}}(t)$ 、 $E_{\text{BAT}}^{\text{rem}}(t)$ 分别为当前时刻锂电池已存储能量和剩余存储空间。

超级电容的期望功率 $P_{\text{SC}}^{\text{exp}}(t)$ 为:

$$P_{\text{SC}}^{\text{exp}}(t) = \begin{cases} -\min(P_{\text{SC}}^{\text{N}}, P_{\text{rem}}(t), E_{\text{SC}}^{\text{sto}}(t)) & P_{\text{rem}}(t) > 0 \\ 0 & P_{\text{rem}}(t) = 0 \\ \min(P_{\text{SC}}^{\text{N}}, -P_{\text{rem}}(t), E_{\text{SC}}^{\text{rem}}(t)) & P_{\text{rem}}(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{\text{rem}}(t) = P(t) + P_{\text{BAT}}^{\text{exp}}(t) \quad (8)$$

式中: P_{SC}^{N} 为超级电容额定功率; $E_{\text{SC}}^{\text{sto}}(t)$ 、 $E_{\text{SC}}^{\text{rem}}(t)$ 分别为当前时刻超级电容已存储能量和剩余存储空间; $P_{\text{rem}}(t)$ 为经电池响应后, 该牵引变电所剩余的有功功率。

混合储能期望功率计算流程图见附录 A 图 A1。

混合储能单元的充放电需通过 RPC 的功率转移来实现, 而 RPC 的转移功率不得超过其额定功率 $P_{\text{RPC}}^{\text{N}}$, 如式(9)所示, 需据此修正储能期望功率, 计算出锂电池与超级电容的参考功率 $P_{\text{BAT}}^{\text{ref}}(t)$ 、 $P_{\text{SC}}^{\text{ref}}(t)$ 。

$$\begin{cases} P_{\text{RPC_L}}(t) \leq P_{\text{RPC}}^{\text{N}} \\ P_{\text{RPC_R}}(t) \leq P_{\text{RPC}}^{\text{N}} \end{cases} \quad (9)$$

锂电池与超级电容的数学模型为:

$$\begin{cases} S_{\text{SOC}}^{\text{SC}}(t) = S_{\text{SOC}}^{\text{SC}}(t-1) + \frac{P_{\text{SC}}^{\text{ref}}(t) \eta_{\text{SC}} \Delta t}{E_{\text{SC}}^{\text{N}}} \\ S_{\text{SOC}}^{\text{BAT}}(t) = S_{\text{SOC}}^{\text{BAT}}(t-1) + \frac{P_{\text{BAT}}^{\text{ref}}(t) \eta_{\text{BAT}} \Delta t}{E_{\text{BAT}}^{\text{N}}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $S_{\text{SOC}}^{\text{SC}}(t)$ 和 $S_{\text{SOC}}^{\text{SC}}(t-1)$ 分别为超级电容当前时刻和上一个统计时刻的荷电状态(state of charge, SOC); $S_{\text{SOC}}^{\text{BAT}}(t)$ 和 $S_{\text{SOC}}^{\text{BAT}}(t-1)$ 分别为锂电池当前时刻和上一个统计时刻的 SOC; η_{SC} 和 η_{BAT} 分别为超级电容和锂电池的充放电效率; Δt 为储能调度时间周期。

3 混合储能系统容量优化模型

3.1 混合储能全寿命周期成本模型

设混合储能系统全寿命周期为 Y 年, 其成本模型如下。

1) 超级电容购置成本 C_1 。

$$C_1 = C_{\text{PSC}} P_{\text{SC}}^{\text{N}} \quad (11)$$

式中: C_{PSC} 为超级电容的单位功率购置成本, 所用超级电容每 1 MW 的额定功率对应 10 kW·h 的额定容量^[13]。

2) 锂电池购置成本 C_2 。

$$C_2 = C_{\text{EBAT}} E_{\text{BAT}}^{\text{N}} + C_{\text{PBAT}} P_{\text{BAT}}^{\text{N}} \quad (12)$$

式中: C_{EBAT} 、 C_{PBAT} 分别为锂电池的单位容量购置成本和单位功率购置成本; $E_{\text{BAT}}^{\text{N}}$ 为锂电池额定容量。

3) RPC 设备购置成本 C_3 。

$$C_3 = C_{\text{RPC}} P_{\text{RPC}}^{\text{N}} \quad (13)$$

式中: C_{RPC} 为单位功率的 RPC 所对应的设备购置成本。

4) 系统配套设备购置成本 C_4 , 包括 DC-DC 设备购置成本和系统集成成本。

$$C_4 = C_{\text{bop}} (P_{\text{SC}}^{\text{N}} + P_{\text{BAT}}^{\text{N}}) \quad (14)$$

式中: C_{bop} 为系统的单位功率配套设备购置成本。

5) 锂电池维护成本 C_5 。

$$C_5 = C_{\text{om}} E_{\text{BAT}}^{\text{N}} \quad (15)$$

式中: C_{om} 为锂电池单位容量维护成本。

6) 占地成本 C_6 。

$$C_6 = C_{\text{land}} (E_{\text{SC}}^{\text{N}} + E_{\text{BAT}}^{\text{N}}) \quad (16)$$

式中: C_{land} 为当地地价; E_{SC}^{N} 为超级电容额定容量。占地成本由储能单元的额定容量决定, 本文按 100 m² / (MW·h) 来计算。

7) 锂电池替换成本 C_7 。

$$C_7 = (C_{\text{EBAT}} E_{\text{BAT}}^{\text{N}} + C_{\text{PBAT}} P_{\text{BAT}}^{\text{N}}) N \quad (17)$$

式中: N 为在全寿命周期内锂电池的替换次数。

超级电容循环寿命远高于锂电池, 故本文仅考虑锂电池的替换成本。本文采用雨流计数法和等效循环寿命法^[14], 将不同放电深度对应的循环次数 T 折算到全充全放下的等效循环次数 $T(1)$ 并求和, 根据此计算锂电池的等效循环寿命 T_{BAT} , 以此计算出 N 。

$$\begin{cases} T_{\text{BAT}} = T(1) / \sum T \\ N = Y / T_{\text{BAT}} \end{cases} \quad (18)$$

综上所述, 混合储能的总成本 C_{total} 为:

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^7 C_i \quad (19)$$

3.2 混合储能收益模型

混合储能系统收益模型如下。

1) 电度电费收益 I_1 。

$$I_1 = 365 Y I_{\text{ele}} E_{\text{save}} \quad (20)$$

式中: I_{ele} 为电度电费单价; E_{save} 为加装混合储能系统后每日节省的电能。通过回收利用牵引供电系统中的再生制动能量可减少电能消耗, 减少铁路电度电费开支。

2) 基本电费收益 I_2 。

$$\begin{cases} I_2 = 12 Y I_{\text{bas}} \Delta E_{\text{dem}} \\ \Delta E_{\text{dem}} = E_{\text{dem}}^{\text{before}} - E_{\text{dem}}^{\text{after}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: I_{bas} 为单位最大需量电价; ΔE_{dem} 为混合储能系统带来的最大需量削减量; $E_{\text{dem}}^{\text{before}}$ 、 $E_{\text{dem}}^{\text{after}}$ 分别为加装混合储能系统前、后的最大需量。本文按最大需量方式计算基本电费。

3) 附加电费收益 I_3 。

$$I_3 = 365 Y I_{\text{add}} E_{\text{save}} \quad (22)$$

式中: I_{add} 为附加电费单价。

4)回收残值收益 I_4 。

$$I_4 = I_{\text{res}}(C_1 + C_2 + C_7) \quad (23)$$

式中: I_{res} 为回收残值率。混合储能系统中所用的超级电容和锂电池在混合储能系统寿命结束后仍有回收再利用的价值,称为回收残值。

综上,混合储能系统带来的总收益 I_{total} 为:

$$I_{\text{total}} = \sum_{n=1}^4 I_n \quad (24)$$

3.3 混合储能系统容量配置优化模型

本文以全寿命周期内混合储能系统的最大收益为目标函数,将锂电池、超级电容的功率与容量配置,RPC设备的功率配置,以及锂电池充、放电启动阈值作为优化变量进行求解,如式(25)所示。

$$\begin{cases} \max I = I_{\text{total}} - C_{\text{total}} = \\ f(P_{\text{SC}}^{\text{N}}, P_{\text{BAT}}^{\text{N}}, E_{\text{BAT}}^{\text{N}}, P_{\text{RPC}}^{\text{N}}, P_{\text{dis}}, P_{\text{ch}}) \\ \text{s.t. } \begin{cases} S_{\text{SOCmin}}^{\text{BAT}} \leq S_{\text{SOC}}^{\text{BAT}} \leq S_{\text{SOCmax}}^{\text{BAT}} \\ S_{\text{SOCmin}}^{\text{SC}} \leq S_{\text{SOC}}^{\text{SC}} \leq S_{\text{SOCmax}}^{\text{SC}} \\ 0 \leq P_{\text{dis}} \leq P_{\text{max}} \\ P_{\text{min}} \leq P_{\text{ch}} \leq 0 \\ P_{\text{BAT}} P_{\text{SC}} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $S_{\text{SOCmax}}^{\text{BAT}}$ 、 $S_{\text{SOCmin}}^{\text{BAT}}$ 与 $S_{\text{SOCmax}}^{\text{SC}}$ 、 $S_{\text{SOCmin}}^{\text{SC}}$ 分别为锂电池与超级电容的正常SOC上、下限。

PSO算法具有收敛性好、鲁棒性强等特点,在优化问题的求解中得到广泛应用^[15]。但惯性权重 w 的数值影响算法的搜索能力,为此,本文采用惯性权重自适应变化的改进PSO算法,变化规则如下。

设粒子 i 的适应度为 f_i ,当代所有粒子的最优适应度为 f_m ,当代所有粒子的平均适应度为 f_{avg} 。求得当代中个体适应度优于平均适应度的优质粒子平均适应度为 f'_{avg} 。

1)当 f_i 优于 f'_{avg} 时,有:

$$w_i = w_i - (w_i - w_{\text{min}}) \left| \frac{f_i - f'_{\text{avg}}}{f_m - f'_{\text{avg}}} \right| \quad (26)$$

式中: w_{min} 为惯性权重最小值。认为满足该情况的粒子为优等粒子,减小其惯性权重,从而减小其搜索范围。

2)当 f_i 优于 f_{avg} 但劣于 f'_{avg} 时,有:

$$w_i = w_i \quad (27)$$

认为满足该情况的粒子为普通粒子,不改变其惯性权重。

3)当 f_i 劣于 f_{avg} 时,有:

$$w_i = 1.5 - \frac{1}{1 + k_1 \exp(-k_2 |f_m - f'_{\text{avg}}|)} \quad (28)$$

式中: k_1 、 k_2 为惯性权重调节参数。认为满足该情况的粒子为劣等粒子,增大其惯性权重,从而扩大其搜索范围。

此外,为了进一步避免算法求解结果陷入局部

最优,本文借鉴遗传算法中的思想,对粒子设定位置变异系数。优化流程图见附录A图A2。

综上所述,本文对混合储能系统采取的总体优化策略如图3所示。

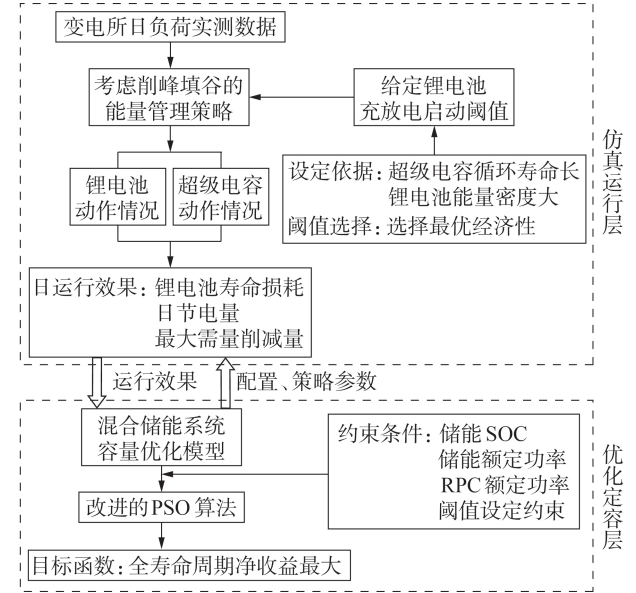


图3 混合储能系统优化策略

Fig.3 Optimization strategy of HESS

4 算例分析

4.1 参数设置

选取我国某重载铁路牵引变电所24h内的实测数据进行算例分析。实测数据采样间隔为1s。该牵引变电所24h内的三相侧有功功率波动曲线见附录A图A3,期间最大牵引负荷功率为30.25MW,最大再生制动功率为17.65MW,在测试时间内返回电网的再生制动能量多达17529.03kW·h,最大需量高达17.38MW。

本文使用文献[16]中的磷酸铁锂电池的循环寿命数据进行雨流计数法的等效寿命计算。

优化算例中使用的各项参数见附录A表A1^[13,16]。优化算法中各个参数的设定见附录A表A2。

4.2 仿真结果分析

为了更好地评估混合储能的经济效益,本文进一步计算了混合储能全寿命周期中的内部收益率(internal rate of return, IRR)。其经济含义是:项目在此折现率下,在全寿命周期内收支相抵,可通过式(29)求得。

$$\sum_{y=1}^Y (C_{ly} - C_{oy})(1 + I_{\text{IRR}})^{-y} = 0 \quad (29)$$

式中: $C_{ly} - C_{oy}$ 为项目第 y 年的现金流; I_{IRR} 为内部收益率,电力行业一般取为8%^[17]。

求解得出的最优经济性下的各参数配置情况与

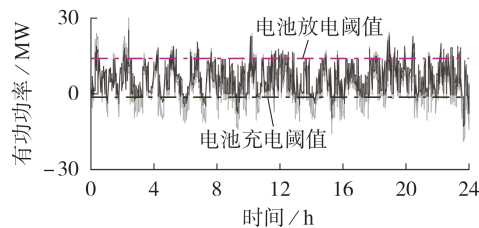
运行效果如表1所示。

表1 混合储能系统优化结果
Table 1 Optimization results of HESS

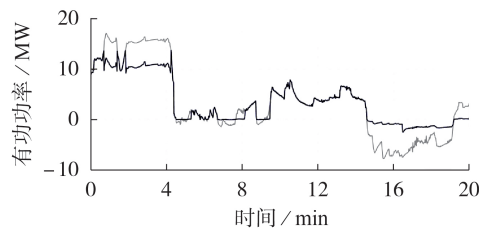
类别	参数	数值
优化变量	超级电容额定功率 P_{SC}^N / MW	3.791
	超级电容额定容量 E_{SC}^N / (kW·h)	37.91
	锂电池额定功率 P_{BAT}^N / MW	5.842
	锂电池额定容量 E_{BAT}^N / (kW·h)	4056.8
	RPC额定功率 P_{RPC}^N / MW	14.127
	放电启动功率 P_{dis} / MW	14.049
	充电启动功率 P_{ch} / MW	-1
运行效果	再生制动能量利用 / [(kW·h)·d ⁻¹]	12093.98
	最大功率削减量 / MW	4.97
	最大需量削减量 / MW	3.5
	净收益 / 万元	2409.8
	内部收益率 / %	12.05

由优化结果可知,混合储能系统在其全寿命周期内能获得的最大净收益为2409.8万元,对应的内部收益率为12.05%,显著高于电力行业的常规取值,即在此配置下的混合储能系统能够收获良好的经济效益。

图4为加装混合储能系统前、后,牵引变电所三相侧有功功率的变化情况。由图可见,加装储能后,正、反向有功功率得到了削减,当有功功率超过/低于本文设定的电池放电/充电阈值时,功率削减效果明显,实现了显著的削峰填谷效果,验证了本文所提策略的有效性。



(a) 三相有功功率曲线



(b) 三相侧有功功率局部放大图

—— 无储能, —— 有储能

图4 加装混合储能系统前、后的系统能量变化

Fig.4 Change of system energy with and without HESS

图5为混合储能的工作情况。从图中可以看到,锂电池的SOC维持在0.2~0.8之间,超级电容的SOC维持在0.05~0.95之间,均在给定的健康区间内工作。此外,超级电容的SOC波动情况远比锂电池频繁,符合本文通过设定锂电池的充放电阈值来减

少其SOC波动,从而延长其使用寿命的预期。

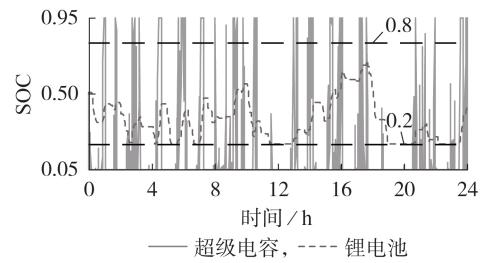


图5 混合储能系统SOC

Fig.5 SOC of HESS

为进一步说明本文所提能量管理策略的有效性,截取当三相侧有功功率分别处于区域1—3时,混合储能系统的工作情况,对比图见附录A图A4。

混合储能系统中的RPC可实现牵引变电所左、右供电臂的功率流通,实现两臂功率平衡,相应效果见附录A图A5。

4.3 方案对比

将本文方案与3种不同的储能方案进行对比。方案1为文献[18]的以滑动平均滤波为能量管理策略的混合储能方案,以其滤波参数和容量配置作为优化变量;方案2、3分别为同时优化容量配置与充放电阈值的单一锂电池储能和单一超级电容储能。4种储能方案均以系统全寿命周期最大净收益为优化目标,优化对比结果见图6。4种储能方案最优配置下的效果如表2所示。

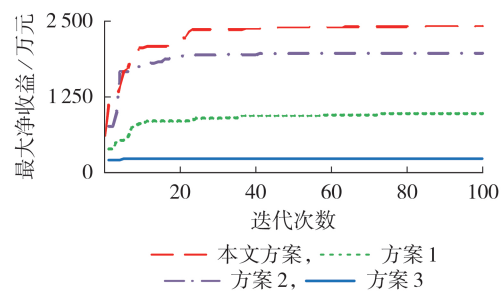


图6 4种储能方案的优化结果

Fig.6 Optimization results of four energy storage schemes

表2 4种储能方案效果对比

Table 2 Effect comparison of four energy storage schemes

储能方案	再生制动能量利用率 / %	峰值功率削减量 / MW	最大需量削减量 / MW	净收益 / 万元
本文方案	68.99	4.97	3.50	2409.8
方案1	60.76	0	0	976.9
方案2	65.08	1.99	3.35	1970.9
方案3	26.39	0	0	219.5

对比方案1可知,以滑动平均滤波为能量管理策略的混合储能系统无法适用于电气化铁路的应用

场景,主要原因是该策略带来的延时使得储能无法在铁路负荷达到峰、谷区间时及时响应,造成系统削峰填谷效果不理想。对比方案2、3可知:单一锂电池储能受制于其循环寿命短、功率密度小的劣势,作为单一储能介质使用时会由于更换次数多而影响系统经济效益;单一超级电容储能受制于其能量密度小的劣势,存储电量有限,所存储电量在负荷峰值到来前已全部释放,无法实现削峰效果;二者作为单一储能介质时效果明显劣于混合储能。由此可见,本文所提用于削峰填谷的混合储能方案在运行效益上优于其他方案。

5 结论

针对电气化铁路混合储能系统,本文提出了一种考虑削峰填谷的能量管理策略,并将能量管理策略参数与容量配置共同优化,以全寿命周期内的最大净收益为目标,建立了电气化铁路混合储能经济性优化模型,通过基于某重载铁路实测数据的算例分析,得出以下结论。

1)在本文所提能量分配策略下电气化铁路混合储能系统能很好地发挥削峰填谷的效果,实现再生制动能量的高效利用和最大功率的显著削减。最优配置下的再生制动能量利用率高达68.99%,最大需量削减达到3.5 MW。

2)基于本文选取的实测数据,在最优配置下,混合储能系统在全寿命周期内的净收益可以达到2409.8万元,对应的内部收益率达到12.05%,具备良好的经济效益。这验证了通过电气化铁路混合储能系统实现铁路节支降耗的可行性和有效性。

混合储能系统在电气化铁路中的应用,依赖于实际线路情况。本文的算例分析是基于某重载铁路实测数据进行的,不同线路的负荷存在差异,但可采用与本文相同的容量配置方法和经济性模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 黄文龙,胡海涛,陈俊宇,等. 枢纽型牵引变电所再生制动能量利用系统能量管理及控制策略[J]. 电工技术学报,2021,36(3):588-598.
HUANG Wenlong, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Energy management and control strategy of regenerative braking energy utilization system in hub traction substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3):588-598.
- [2] 尚璠,邵能灵,刘琦,等. 采用区间控制的蓄电池储能电站调峰运行控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(16):221-229.
SHANG Jin, TAI Nengling, LIU Qi, et al. Load shifting scheme of battery energy storage system based on interval controlling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16):221-229.
- [3] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等. 计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):128-140.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):128-140.
- [4] 李群湛,王喜军,黄小红,等. 电气化铁路飞轮储能技术研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(7):2025-2032.
LI Qunzhan, WANG Xijun, HUANG Xiaohong, et al. Research on flywheel energy storage technology for electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7):2025-2032.
- [5] LUO P, LI Q R, ZHOU Y, et al. Multi-application strategy based on railway static power conditioner with energy storage system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4):2140-2152.
- [6] CHEN J Y, HU H T, GE Y B, et al. An energy storage system for recycling the regenerative braking energy in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1):320-330.
- [7] 何俊强,师长立,马明,等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):157-167.
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):157-167.
- [8] CHEN J Y, HU H T, GE Y B, et al. Techno-economic model-based capacity design approach for railway power conditioner-based energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 63(5):4730-4741.
- [9] 郭明亮,王世彦. 面向电气化铁路的超级电容储能系统经济性研究[J]. 分布式能源,2020,5(1):9-15.
WU Mingliang, WANG Shiyan. Economic research on super-capacitor energy system for electrified railway[J]. Distributed Energy, 2020, 5(1):9-15.
- [10] 袁佳歆,曲锴,郑先锋,等. 高速铁路混合储能系统容量优化研究[J]. 电工技术学报,2021,36(19):4161-4169,4182.
YUAN Jiaxin, QU Kai, ZHENG Xianfeng, et al. Optimizing research on hybrid energy storage system of high speed railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19):4161-4169,4182.
- [11] JOSE A A, ANTONIO J S R, SEBASTIAN T. Optimal operation of electric railways with renewable energy and electric storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):993-1001.
- [12] SEBASTIAN T, ANTONIO J S R, JOSE A A, et al. Optimal sizing of energy storage for regenerative braking in electric railway systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3):1492-1500.
- [13] 胡海涛,陈俊宇,葛银波,等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):246-256,391.
HU Haitao, CHEN Junyu, GE Yinbo, et al. Research on regenerative braking energy storage and utilization technology for high-speed railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1):246-256,391.
- [14] 韩晓娟,程成,籍天明,等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):91-97.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):91-97.
- [15] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):11-19.
QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power sys-

- tem considering large-scale wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [16] 李相俊, 马锐, 王上行, 等. 考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 62-70.
LI Xiangjun, MA Rui, WANG Shangxing, et al. Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 62-70.
- [17] 郭明亮. 分时电价政策下电气化铁路储能的经济性[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 191-197.
WU Mingliang. Economy of energy storage in electrified railway under time-of-use price policy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 191-197.
- [18] 田明杰, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于多端口DC/DC变换器的混合储能系统自适应能量控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3378-3385.
TIAN Mingjie, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Adaptive

energy control strategy for hybrid energy storage system based on multiport DC/DC converters [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3378-3385.

作者简介:



张育维

张育维(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电气化铁路储能系统容量配置(E-mail: zhang_yuweiv@163.com);

胡海涛(1987—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为牵引供电系统稳定性与供电品质(E-mail: hht@swjtu.edu.cn);

耿安琪(1998—),男,博士研究生,主要研究方向为电化学储能系统阻抗特性与安全评估(E-mail: gaq981223@163.com)。

(编辑 李莉)

Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for electrified railway considering peak load shifting

ZHANG Yuwei, HU Haitao, GENG Anqi, CHEN Junyu, GE Yinbo, WANG Ke

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The rapid development of Chinese electrified railway leads to the critical energy consumption issue, which greatly affects the railway operational benefits. To improve the economic benefits, the recovery and utilization of regenerative braking energy are realized through the hybrid energy storage system. On this basis, an energy management strategy for the electrified railway hybrid energy storage system considering peak load shifting is proposed, which achieves the peak load shifting for railway load by controlling the charging and discharging threshold of energy storage devices. Based on the proposed energy management strategy, an economic optimization model for the full life cycle of the electrified railway hybrid energy storage system is established. This model takes the charging and discharging thresholds and the capacity configuration parameters as the optimization variables, and the maximum net income throughout the full life cycle as the optimization objective, so as to optimize the economy of hybrid energy storage system. The improved particle swarm optimization algorithm is used to solve a specific case. The effectiveness of the proposed method is verified by the case study and the comparison analysis with other schemes.

Key words: electrified railway; peak load shifting; hybrid energy storage system; capacity configuration

附录 A

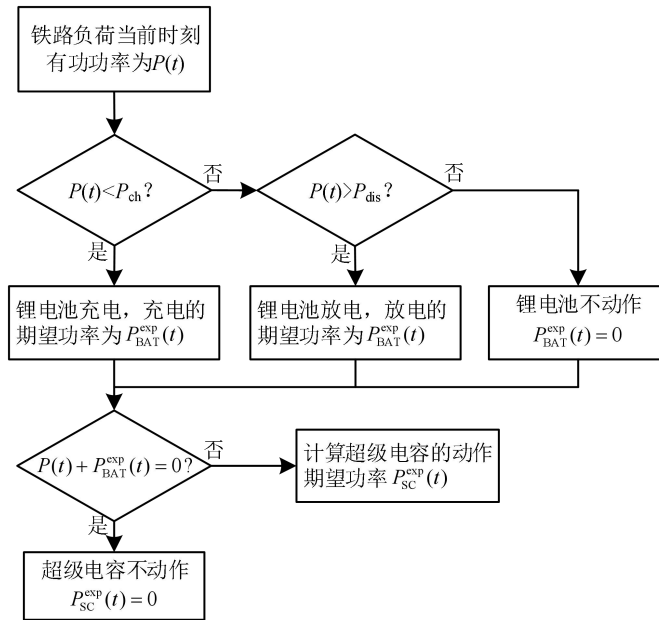


图 A1 混合储能期望功率计算流程

Fig.A1 Expected power calculation process of hybrid energy storage

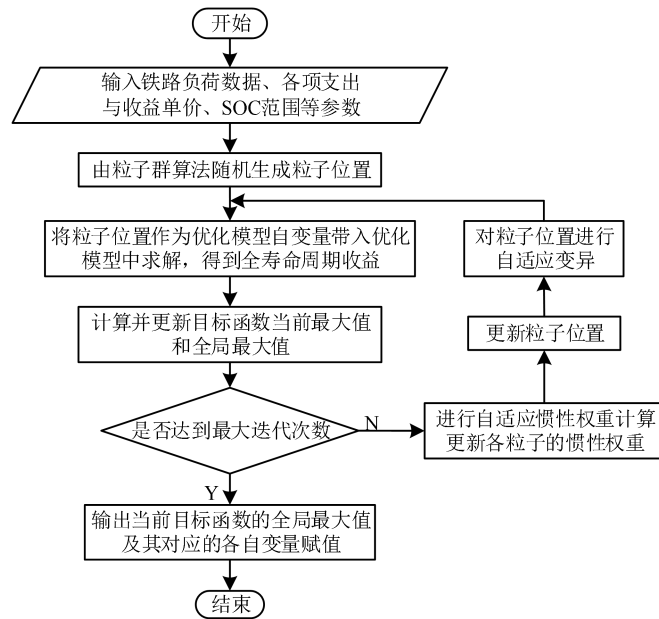


图 A2 优化模型求解流程

Fig.A2 Solving process of optimization model

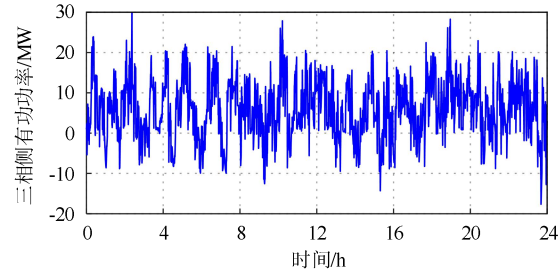


图 A3 牵引变电所实测数据

Fig.A3 Measured data of traction substation

表 A1 系统仿真参数

Table A1 Simulation parameters of system

类别	参数	数值
超级电容	荷电状态 S_{SOC}^{SC}	0.05~0.95
	单价 $C_{PSC}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$ 或[万元·(10kW·h) ⁻¹]	80
	充放电效率	0.95
	荷电状态 S_{SOC}^{BAT}	0.2~0.8
锂电池	功率单价 $C_{PBAT}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	1000
	容量单价 $C_{EBAT}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	1200
	充放电效率	0.85
	RPC 单价 $C_{RPC}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	46
支出参数	配套设备单价 $C_{bop}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	20
	电池维护单价 $C_{om}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1} \cdot \text{月}^{-1}]$	0.1
	土地价格 $C_{land}/(\text{万元} \cdot \text{m}^{-2})$	1
	电度电费 $I_{ele}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.57
收益参数	基本电费(以需量计) $I_{bas}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{月}^{-1})$	40
	附加电费 $I_{add}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.1
系统	全寿命周期 Y/a	15

表 A2 粒子群优化算法参数

Table A2 Parameters of PSO algorithm

参数	数值	参数	数值
粒子个数	50	加速常数 2	1.5
迭代次数	100	惯性权重最小值 w_{min}	0.4
初始惯性权重	0.6	惯性权重调节参数 k_1	1.5
加速常数 1	1.5	惯性权重调节参数 k_2	0.3

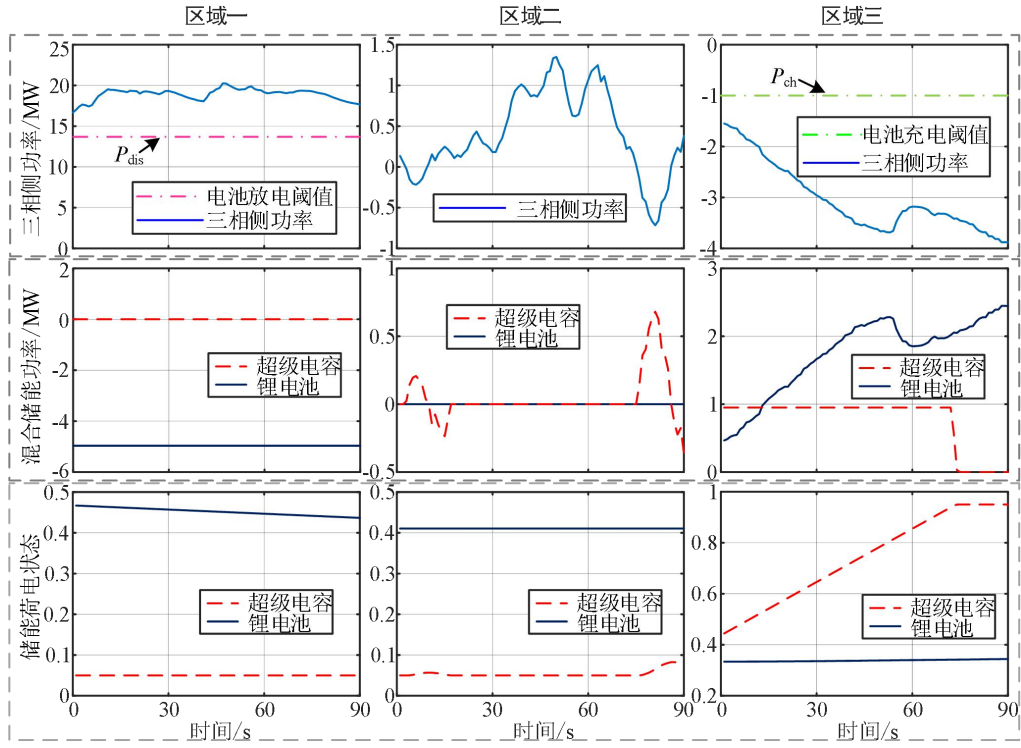


图 A4 混合储能工作情况

Fig.A4 Power fluctuation of HESS

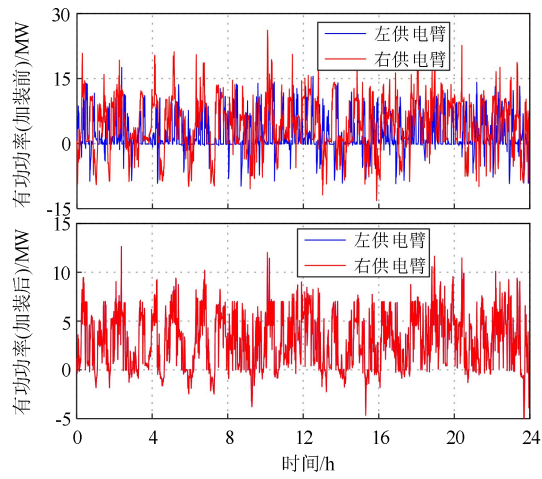


图 A5 左、右供电臂功率

Fig.A5 Power of left and right power supply arm