

基于氢-超级电容混合储能平抑新能源接入轨道交通牵引供电系统功率波动研究

龚坤坤

华东交通大学, 中国·陕西 安康 330013

摘要: 为解决新能源接入引发的轨道交通牵引供电系统功率波动, 本文构建氢-超级电容混合储能容量优化框架: 先经经验模态分析统计系统原始功率及储能需承载的波动分量, 以功率波动率量化平抑效果, 将满足置信水平的输出功率作为储能额定功率基准; 再用自适应平滑算法优化超级电容容量与电解槽制氢功率, 确保波动抑制效果; 进而构建融合超级电容荷电状态约束、电解槽功率边界及总功率波动目标的多尺度协调控制策略, 动态调节能量交互实现功率精准分配。实际数据仿真验证表明, 该方法可抑制波动, 同时保障混合储能的稳定性与经济性。

关键词: 氢储能; 混合储能; 波动平抑; 能量管理策略

Research on mitigating power fluctuations in rail transit traction power supply systems by integrating hydrogen-supercapacitor hybrid energy storage for renewable energy integration

Gong Kunkun

East China Jiaotong University, China Shaanxi Ankang 330013

Abstract: In order to solve the power fluctuation of rail transit traction power supply system caused by new energy access, this paper constructs a hydrogen-supercapacitor hybrid energy storage capacity optimization framework: first, the original power of the system and the fluctuation component to be carried by energy storage are calculated by empirical modal analysis, and the flattening effect is quantified by the power fluctuation rate, and the output power that meets the confidence level is used as the rated power benchmark for energy storage. The adaptive smoothing algorithm is used to optimize the supercapacitor capacity and electrolyzer hydrogen production power to ensure the wave suppression effect. Then, a multi-scale coordinated control strategy integrating supercapacitor state of charge constraints, electrolyzer power boundaries and total power fluctuation targets is constructed to dynamically adjust energy interaction to achieve precise power distribution. Actual data simulation verification shows that the proposed method can suppress fluctuations while ensuring the stability and economy of hybrid energy storage.

Keywords: Hydrogen energy storage; Hybrid energy storage; Stabilization of fluctuations; Energy management strategy

0 引言

在双碳目标与科技发展推动下, 轨道交通快速发展并推进绿色转型, 新型混合储能系统成为国家能源发展需求。氢能因清洁低碳等特性加速发展, 超级电容则具快速响应与高功率密度优势, 本文采用超级电容协同的电-氢混合储能系统, 以实现轨道交通牵引供电系统输出功率精准调控。储能系统运行需满足两方面约束: 一是在达成功率波动抑制目标的同时优化容量配置经济性; 二是建立混合储能单元动态功率分配机制, 避免设备过充过放。现有研究存在不足: 容量配置多为单目标优化, 未兼顾波动抑制与经济性; 功率调控依赖经验调参, 易引发控制滞后。为此,

本文采用超级电容-氢混合储能, 借功率型-能量型介质互补实现出力平滑, 开发基于经验模态分解的平抑效能评估体系, 设计基于荷电状态的动态协调控制策略, 实现两者功率精准分配。

1 电解制氢-超级电容混合储能系统功率选择与容量配置

针对轨道交通牵引供电系统的功率波动问题, 提出了电-氢 HESS 协调运行框架, 如图 1 所示。

将储能系统直接接入轨道交通牵引供电系统, 使得其输出功率符合相关规定, 减少功率波动对轨道交通系统运行稳定性的影响。

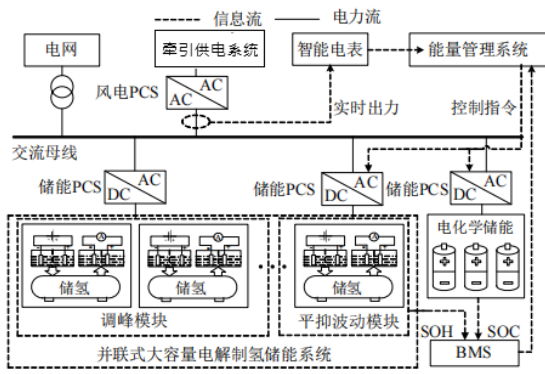


图1 电-氢 HESS 协调运行框架

1.1 混合储能系统额定功率选择

本文基于经济学和最大限度的满足平抑功率波动的实际而言，采用混合储能系统的输出功率 $P_s(t)$ 开展概率统计分析，并采用正态分布对其进行拟和，进而得到拟合曲线所对应的均值与标准差^[1]。其输出功率 $P_s(t)$ 为

$$P_s(t) = P_w(t) - P_{g-ref}(t) \quad (1)$$

式中： $P_s(t)$ - t 时刻混合储能系统的输出功率

$P_w(t)$ - t 时刻供电系统原始出力

$P_{g-ref}(t)$ -在满足输出功率的标准下，经过自适应滑动平均滤波下得到的功率参考值。

不同置信水平下储能系统的额定输出功率 $PN(p)$ 为

$$PN(p) = \max\{\mu - z_p\sigma, \mu + z_p\sigma\} \quad (2)$$

式中： P - 置信水平

z_p - 在不同置信水平下对应的分位数

根据资料显示波动平抑效果与储能系统容量呈现一种线性关系，当储能容量越大时，波动的平抑效果越好^[2]。

通过并网功率波动率 $\delta(t)$ 来检测安装混合储能系统后轨道交通供电系统功率波动的平抑效果，其功率波动率为

$$\delta(t) = \frac{|P_g(t+1) - P_g(t)|}{P_{rate}} \quad (3)$$

式中： $P_g(t)$ - 安装储能系统后的功率

P_{rate} - 供电系统的额定功率

将所有时刻通过计算得到的功率波动率设置为一组离散随机变量。设满足平抑要求的波动量上限为 δ_{max} ，则其波动率在波动限值范围内的概率分布函数为

$$F(\delta_{max}) = P\{\delta(t) \leq \delta_{max}\} = \sum_{\omega \leq \delta_{max}} P(\omega) \quad (4)$$

式中， $F(\delta_{max})$ - 功率波动率 $\delta(t)$ 在限值 δ_{max} 的概率分布函数

$P(\omega)$ - $\delta(t) = \omega$ 时对应的概率

ω - 任意实数

当设置置信水平为 k 时，轨道交通供电系统功率波动量

在波动限值范围内的概率分布函数为 $F_k(\delta_{max})$ ，则当置信水平变化为 q 时，相应的概率变化量 ΔF_k 为

$$\Delta F_k = F_q(\delta_{max}) - F_k(\delta_{max}) \quad (5)$$

$F_q(\delta_{max})$ 置信水平为 q 时的并网波动量在波动限值范围内的概率分布函数； k, q 均为 $0 \sim 1$ 的任意正实数。

1.2 混合储能系统额定容量

基于电解槽与超级电容在功率吸收上的特性差异——电解槽擅长处理低频功率，而超级电容更适用于高频功率的吸收^[3]，本研究采用移动平均滤波（MAF）算法对混合储能系统的总功率指令 $P_s(t)$ 进行进一步分配。具体而言，通过 MAF 算法提取出的低频功率成分被指定为电解槽的输入功率 $P_{el}(t)$ ，而超级电容的功率指令 $P_{sc}(t)$ 则通过总功率 $P_s(t)$ 与电解槽功率 $P_{el}(t)$ 的差值计算得出^[4]。考虑到在吸收等量电能的情况下，电解槽的运行成本显著低于超级电容，为提升混合储能系统的整体经济效益，需尽可能缩减超级电容的配置容量。鉴于此，在应用 MAF 算法进行功率分配时，可通过调整滑动窗口的宽度来优化超级电容的功率输出，确保其容量达到最小化，从而实现系统经济性的最大化。

将全年储能总体功率指令序列 T 划分为 K 个充放电周期，则 1 个周期内超级电容的额定容量为

$$E(t) = E(t-1) + \begin{cases} P_{sc}(t)\eta_c\Delta t, P_{sc}(t) \geq 0 \\ \frac{P_{sc}(t)}{\eta_d}\Delta t, P_{sc}(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{sc}^i = \frac{\max(E(t))}{S_{scmax} - S_{scmin}} \quad (7)$$

2 混合储能系统运行控制策略

借助 MAF 算法虽能将储能系统出力分解为理论上的分配值，但在实际运行场景下，超级研究以超级电容的荷电状态为关键切入点，针对性地设计了一套适用于混合储能系统的电容的实际输出功率会受到其自身荷电状态（SOC）的严格限制。基于此实际情况，本协调运行控制策略。

本文针对碱性电解槽的运行特性，创新性地提出了一种电-氢混合储能系统（HESS）的能量管理策略。该策略通过强化电化学储能装置（如超级电容或电池）与氢储能系统（依托碱性电解槽制氢及储氢技术）之间的协同互补机制，有效解决了碱性电解槽在低功率工况下运行效率低下的问题。该能量管理策略的设计遵循两大核心原则：

鉴于电化学储能在维持系统稳定运行方面发挥着至关重要的作用，本策略着重强调需尽力维持电化学储能的荷

电状态 (SOC) 处于中间水平区间。如此安排, 可确保电化学储能装置具备充裕的功率调节能力与容量储备空间, 从而有效平抑系统运行过程中的功率波动, 保障供电质量。

本策略确立了以氢储能作为主要储能方式、电化学储能作为辅助储能方式的总体架构。在具体实施时, 于电化学储能 SOC 区间划分中创新性地引入了电解槽启动对应荷电状态 (SOCEL) 与电解槽关断对应荷电状态 (SOCFC) 这两个关键分割点。通过这一设计, 一方面能够有效避免电化学储能因过度充放电而造成的设备损耗与寿命缩短; 另一方面, 可充分利用电化学储能的快速响应特性, 为电解槽的安全稳定运行提供坚实保障。

在本策略框架下, 其具高灵活性与协同支撑能力: 可主动放电支撑电解槽低功率制氢, 还能强制启动电解槽以延长运行、提升可再生能源消纳; 策略创新性引入燃料电池与电化学储能的双向能量交互, 当电化学储能 SOC 低于阈值且系统需放电时, 燃料电池切换至充电模式补给能量, 既确保 SOC 合理以维持功率调节能力, 又提升了混合储能系统的整体效率与可靠性。

3 案例分析

3.1 混合储能系统额定功率确定及容量配置

以轨道交通牵引供电系统的实际数据为基础, 配置氢能和超级电容储能容量。将功率波动量的限值最为分界线, 计算得到混合储能系统的分量。

利用 MATLAB 计算, 根据能量管理策略, 配置策略如表 1 所示。

表1 容量配置结果

| 场景 | 电化学储能功率 / MW | 电化学储能容量 / (MWh) | 电解槽功率 / MW | 储氢罐容量 / m ³ | 燃料电池功率 / MW |
|-------------|--------------|-----------------|------------|------------------------|-------------|
| 场景1: 传统策略 | 83.79 | 44.6 | 80.33 | 3565.46 | 95.27 |
| 场景2: 能量管理策略 | 33.52 | 159.45 | 71.16 | 6410.35 | 99.4 |

在场景 2 中, 更强调以氢储能为主体, 电化学储能只承担辅助任务。氢储能作为容量型储能, 尽管配置的容量更大, 但由于其容量成本较低

3.2 混合储能系统运行控制策略分析

场景 1 下混合储能系统 (HESS) 对风电功率波动的平抑效果如图 2 所示。具体而言:

图 2(a) 展示了 HESS 功率分配任务的动态调整过程, 其中橙黄色曲线代表经验模态分解 (EMD) 处理后重构得到的 HESS 总功率指令, 该曲线反映了系统根据风电波动特性优化后的储能功率需求; 蓝色曲线则表示经 HESS 实

际平抑后的输出功率分量, 其平滑特性验证了混合储能系统对原始功率指令的有效调节能力。

图 2(b) 通过量化对比揭示了平抑策略对并网功率波动越限的改善效果: 橙黄色曲线刻画了平抑前风电功率波动超出电网允许范围的频次与幅度, 而蓝色曲线则对应实施 HESS 平抑后的波动越限情况。对比结果表明, 本策略使并网功率波动越限时间占比显著降低, 验证了混合储能系统在提升风电并网稳定性方面的有效性。

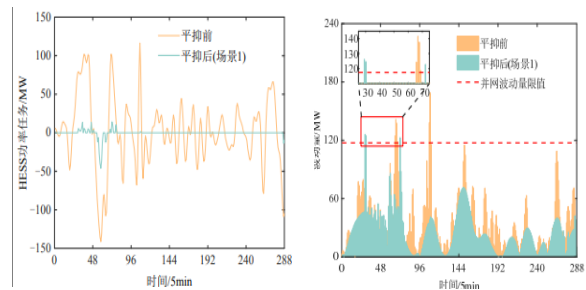


图2 场景 1 平抑波动效果

场景 2 的平抑风电波动效果如图 3 所示。

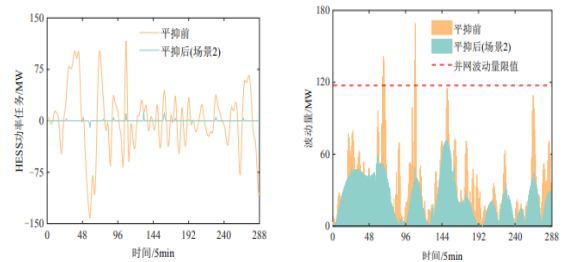


图3 场景2平抑功率波动效果

图 3(a) 量化分析显示, 本文能量管理策略下, 混合储能系统功率补偿性能显著提升 (接近完全补偿), 欠补偿量仅 7.24 MW · h, 较场景 1 降 73.8%, 验证了策略对功率分配精度的提升。

图 3(b) 时序波动显示, 平抑后的并网风电功率波动均满足电网接入限值, 无越限, 证明了分层协调控制策略在抑制波动、保障电能质量上的可行性与有效性。

4 结语

对比传统的控制策略, 本文提出一种分层次分阶段的控制策略, 该策略在混合储能系统中表现出显著优势。一是能量管理策略能在保风电波动平抑效果的前提下, 有效降低了混合储能系统的容量配置成本, 实现了经济性与技术性的双重优化, 从而优化功率分配机制。二是有效提升了可再生能源对于混合储能系统功率波动的跟踪补偿能力。

从系统设计层面分析, 能量管理策略通过氢储能与电化学储能的协同调度, 创新性地构建了电-氢混合储能互补运行框架, 既提高了碱性电解槽制氢系统的利用率, 又

使电化学储能装置长期运行于 " 浅充浅放 " 的理想工况区间内。此种运行模式不仅延长了锂离子电池等电化学储能元件的循环寿命, 又充足保留的功率调节机制阈值。

目前的能量管理策略还未充分挖掘到氢能的长期储能特性, 而策略的调节机制还具有一定的局限性。后续研究应充分探索氢能容量配置优化方法, 探索基于多时间尺度协调的能量管理策略, 实现更大空间尺度上轨道交通牵引供电系统功率波动与混合储能系统的精准匹配。

参考文献:

[1] 于芑, 赵瑜, 周玮等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011,

39(24):6.DOI:10.3969/j.issn.1674-3415.2011.24.006.

[2] 朱星旭. 平抑风电功率波动的混合储能控制策略研究[D]. 东北电力大学, 2014.

[3] 胡俊. 轨道交通牵引供电系统直流母线保护的研究与设计[D]. 北京交通大学[2025-07-23]. DOI:10.7666/d.y1963236.

[4] 王立天, 赖峰. 轨道交通牵引供电系统安全运维技术研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(zk2).

作者简介: 龚坤坤 (2001.06-), 男, 汉族, 陕西省安康市人, 研究生, 华东交通大学, 研究方向: 轨道交通。