

电池热管理系统的调频混合控制策略研究

何翔 白显圣 周渠铖

上海勘测设计研究院有限公司 上海 200335

摘要: 本文旨在研究电池热管理系统的调频混合控制策略,以解决电池簇间环流问题。目前我国电化学储能电池系统的架构一般是多级架构,其中电池簇之间存在压差,导致环流问题的产生。环流会导致电池簇的充放电不均匀,造成电池容量损失和温度升高,进而加速电池衰减,降低电池系统的可用容量。本文提出了一种通过电池管理系统(BMS)策略和系统结合的调频混合控制策略,来抑制电池簇间的环流问题,同时不增加系统成本。具体而言,该策略结合了频率调节和混合控制的方法,通过调节电池簇的充放电速率和电流分配比例,使得电池簇间的电流均匀分布,减少环流的发生。通过实验验证和仿真分析,结果表明,所提出的调频混合控制策略能够有效地抑制电池簇间的环流问题,提高电池系统的可用容量和安全性。

关键词: 电池热管理; 调频混合控制; BMS; 减少环流; 控制策略

Study on hybrid control strategy of frequency modulation for battery thermal management system

Xiang He, Xiansheng Bai, Qucheng Zhou

Shanghai Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200335

Abstract: This paper aims to investigate a frequency-mixing control strategy for battery thermal management systems to address inter-cluster loop currents in electrochemical energy storage systems. In current architectures of electrochemical energy storage battery systems in China, multi-level structures are commonly used, resulting in pressure differences between battery clusters, which give rise to loop current issues. Loop currents can lead to uneven charge and discharge among battery clusters, causing capacity loss and temperature elevation, subsequently accelerating battery degradation and reducing the available capacity of the battery system. This paper introduces a frequency-mixing control strategy that combines battery management system (BMS) strategies with system-level control to suppress inter-cluster loop currents without increasing system costs. Specifically, the strategy combines frequency regulation with mixed control methods by adjusting the charge/discharge rates and current distribution ratios among battery clusters, ensuring even current distribution and reducing loop currents. Experimental verification and simulation analysis demonstrate that the proposed frequency-mixing control strategy effectively mitigates inter-cluster loop current issues, enhancing the available capacity and safety of the battery system.

Keywords: Battery Thermal Management; Frequency Modulation Hybrid Control; BMS; Reduce Circulation; Control Strategy

作者简介:

- 1.何翔(1994.07.12-),男,汉,湖南长沙,大学本科,助理工程师,研究方向:电气工程及电化学储能方向。
- 2.白显圣(1997.10.23-),男,苗族,重庆市彭水县,大学本科,助理工程师,研究方向:新能源及储能方向。
- 3.周渠铖(1996.11.27-),男,汉,浙江湖州,硕士研究生,助理工程师,研究方向:电力电子。

引言:

电化学储能电池系统在能源储存和供应方面扮演着至关重要的角色,为电力行业的可持续发展提供了可靠的技术支持。由于其具有高比功率、高功率密度等特点,因此被广泛应用于电动汽车和电网调峰领域中。然而,电池簇之间的压差现象会引发环流问题,从而对电池系统的性能和可靠性产生负面影响。本文主要针对不同类型的锂离子动力电池进行分析与研究,并对其内部环流形成机理进行探讨。由于环流问题的存在,电池簇之间的充放电不平衡,导致电池容量损失和温度上升,从而加速电池衰减,降低电池系统的可用容量。如果环流严重的话,甚至可能引起整个电池组失效。此外,环流问题的存在将导致系统的能源消耗增加,从而降低系统的运行效率。为了减少电池系统中由于环流而引起的损耗,需要在电池组内加入额外的均衡电路来对电池进行均衡。因此,在解决电池簇间环流问题的过程中,优化电池系统的性能和可靠性是至关重要的。

一、电池热管理系统概述

1. 电池系统架构和问题描述

为确保电池在安全温度范围内运行,同时提高电池的寿命和性能,电池热管理系统被设计用于控制和维持电池系统的温度。随着电动汽车技术发展,电池系统也向大功率化方向不断推进。电池系统的典型架构包括电池簇、电池管理系统(BMS)、热管理系统和控制系统,这些系统共同构成了一个完整的系统框架,以确保电池的高效稳定运行。电池簇分为单节电池簇与多节电池簇两类。多个电池单体组成的电池簇,在BMS的监测和管理下得以有效运行。热管理系统负责调节电池组中各电池之间以及各个电池组内部的温差^[1]。控制系统用于根据电池组内每个单体的电压和电流来确定是否需要冷却或者加热。电池系统的状态监测和热管理策略的实施,均由控制系统负责。由于采用了电池组并联技术,电池簇能提供高功率密度,因此能够实现更多的能量输出,从而提高整个电动汽车动力系统的效率。然而,在电池系统中,存在一个至关重要的难题,即电池簇之间的环流现象。电池簇之间存在着相互关联的电路连接关系,其中包括电阻、电感以及电容等元件。当电池簇之间的电势差异存在时,会引发电流在电池簇之间流动,从而形成一个环流系统。由于环流的作用,使得电池组内各个单体电池产生相互排斥现象。由于环流问题的存在,电池簇之间的充放电不平衡,导致电池容量损失和温度上升,从而加速电池衰减,降低电池系统的可用容量和使用寿命^[2]。

2. 电池簇间环流问题的影响和挑战

电池系统的性能和可靠性会受到电池簇间环流问题的显著影响,这种影响主要体现在多个方面:

(1) 由于环流问题,电池簇之间的充放电不平衡,从而导致电池容量的减少。这样做将导致电池系统的可用容量减少,从而缩短电池的使用寿命。

(2) 当环流问题出现时,电池簇的温度会随之上升,从而进一步加速电池的衰减速度。在高温环境下,电池的使用寿命会缩短,从而降低电池系统的可靠性和安全性,这是一个不容忽视的问题。

(3) 随着环流问题的不断加剧,电池系统的能源消耗将不断攀升,从而导致系统效率的不断下降。电池簇之间的环流所带来的能量损失,不仅会增加系统的运行成本,还会对其性能产生负面影响^[3]。

在解决电池簇间环流问题的过程中,所面临着一系列挑战如下:

(1) 传统的解决方案,如增加电流限制和采用电流隔离器等措施,可能会对系统的成本产生负面影响,从而降低系统的经济效益。

(2) 实施复杂:某些解决方案所需的硬件和控制策略相当繁琐,从而增加了系统实施的复杂度和难度。

因此,探索一种经济实用的混合调频控制方案,以解决电池簇间环流问题,具有重要的研究价值和实际应用前景。

二、相关技术

1. 电池管理系统(BMS)的概述

电池管理系统(BMS)是一种用于监测、控制和保护电池系统的关键技术。BMS通过采集和分析电池的电流、电压、温度等参数,实时监测电池的状态,并根据需要控制电池的充放电过程,以保证电池的安全运行和延长电池的寿命。

BMS通常包括硬件和软件两部分。硬件部分包括传感器、电池管理单元(BMU)、电池保护单元(BPU)等组件,用于采集和处理电池参数。软件部分则负责数据处理、状态估计和控制算法的实现。

2. 环流问题的现有解决方案

目前,解决电池簇间环流问题的方法主要包括以下几种:

(1) 增加电流限制:通过增加电池簇之间的电流限制,限制环流的发生。这种方法可以有效地减少环流问题,但会增加系统的成本和复杂性。

(2) 增加电流隔离器:通过增加电流隔离器,将电池簇之间的电流隔离,避免环流的发生。这种方法可以

有效地解决环流问题, 但会增加系统的成本和能耗。

(3) 动态电流分配: 通过动态调整电池簇的充放电速率和电流分配比例, 实现电池簇间的动态平衡, 减少环流的产生。这种方法可以在不增加系统成本的情况下解决环流问题, 但需要合理的控制策略和算法。

3. 调频混合控制策略的理论基础

调频混合控制策略是一种结合了频率调节和混合控制的方法, 用于抑制电池簇间的环流问题。频率调节是指通过调整电池簇的充放电速率, 使得电池簇之间的电流均匀分布, 减少环流的发生。通过控制充放电速率, 可以使得电池簇之间的电流保持平衡, 减少环流的产生。混合控制是指通过调节电流分配比例, 使得电池簇之间的电流分布更加均匀, 进一步减少环流的产生。通过合理的电流分配比例, 可以使得电池簇之间的电流分布更加均匀, 减少环流的发生。调频混合控制策略基于以上原理, 通过合理的调节充放电速率和电流分配比例, 实现电池簇间的动态平衡, 从而抑制环流的产生。该策略具有实施简单、经济实用的特点, 对于解决电池簇间环流问题具有重要的理论基础^[4]。

三、调频混合控制策略设计

1. 控制策略整体框架

在频率偏差变化率和频率偏差方面, 虚拟惯性和虚拟下垂都表现出了明显的抑制作用, 因此在任何时刻, 这两种因素都会同时形成储能出力, 以充分发挥它们在调频方面的优势。由于各个单体电池在物理上并不独立, 因此其内部也存在着一定程度的相互关联关系, 这些联系使得整个电池组成为一个多电网络。尽管储能在调频方面的功效远胜于传统机组, 但其装机容量微小、造价高昂, 一旦发生过充过放, 将会极大地缩短其使用寿命。因此为了保证储能系统的长期安全运行, 必须将其从整个电力系统内移除, 而这必然导致电网调度成本增加并影响电力市场交易结果。通过调整储能调频死区的SOC状态, 实现了对其进行有效的调节。基于上述理念, 我

们提出了一种调频策略, 该策略不仅考虑了储能SOC的自恢复功能, 而且在调频过程中采用了基于权重因子的调频控制和调频死区储能SOC的自恢复控制, 总体控制框架如图1所示。

2. 基于权重因子的调频控制方法

在电网频率偏差超过储能调频死区的情况下, 采用虚拟惯性权重因子 ω_1 和虚拟下垂权重因子 ω_2 来调整虚拟惯性和虚拟下垂对储能出力的占比, 从而形成多种不同的调频控制方式, 以提高一次调频的效果。为了提高电网运行效率和降低系统损耗, 需要合理地确定储能调频死区内各参数的取值范围。该理论的核心思想在于, 无论何时, 能量储存和输出都是由虚拟的惯性和虚拟下垂所构成的, 如式(1)所示:

$$\begin{cases} \Delta W_e = -\omega_1 \cdot \Delta W_{me} - \omega_2 \cdot \Delta W_{ke} \\ \Delta W_{me} = me \cdot d\Delta f \\ \Delta W_{ke} = ke \cdot \Delta f \end{cases} \quad (1)$$

在式(1)中:

- ΔW_e —— 储能调频输出;
- ΔW_{me} —— 虚拟惯性输出;
- ΔW_{ke} —— 虚拟下垂输出力;
- me —— 是虚拟惯性系数;
- ke —— 是一种虚拟下垂系数;
- Δf —— 频率偏差;
- $d\Delta f$ —— 频率偏差变化率;
- ω_1 —— 虚拟惯性权重因子;
- ω_2 —— 虚拟下垂权重因子。

ω_1 与 ω_2 所代表的是 ΔW_{me} 与 ΔW_{ke} 在 ΔW_e 中所占比例的不同。当系统发生低频振荡时, 通过调节虚拟阻尼可以实现对电网电压幅值和相位进行有效控制。在整个调频过程中, $\omega_1 + \omega_2$ 的值始终保持不变, 始终为1。

由于虚拟惯性控制对于 $d\Delta f$ 有很好的抑制作用, 虚拟下垂控制对于 Δf 有很好的抑制作用, 因此 $d\Delta f$ 大虚拟惯性输出比重应较大, Δf 大虚拟下垂输出比重应较高。为了实现此目标, 将 ω_1 和 ω_2 定义为 Δf 函数, 以便在频率偏差的情况下自动进行调整。

3. 日前调度计划和电网调频极限分析

综合考虑电网风电消纳能力的限制以及风速对风电场发电量的影响, 调度中心可以用来编制日前调度出力计划(以下简称调度计划)来协调电网中各种发电资源发电量, 见图2。电压跌落程度到达某一数值后系统会发生振荡现象。调度中心依据式(2), 综合风电场预测出力, 负荷预测出力及传统机组出力数据, 拟定风电场与传统机组调度方案, 使电网功率均衡。

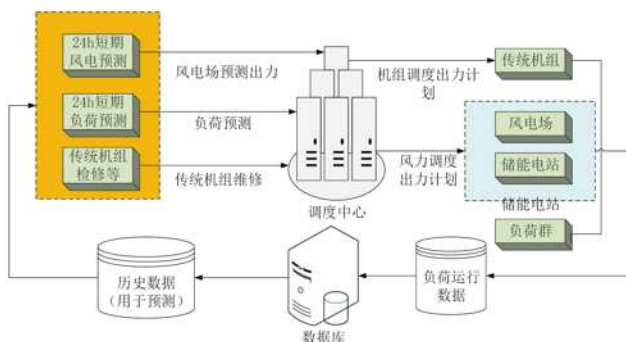


图1 一次调频控制整体框图

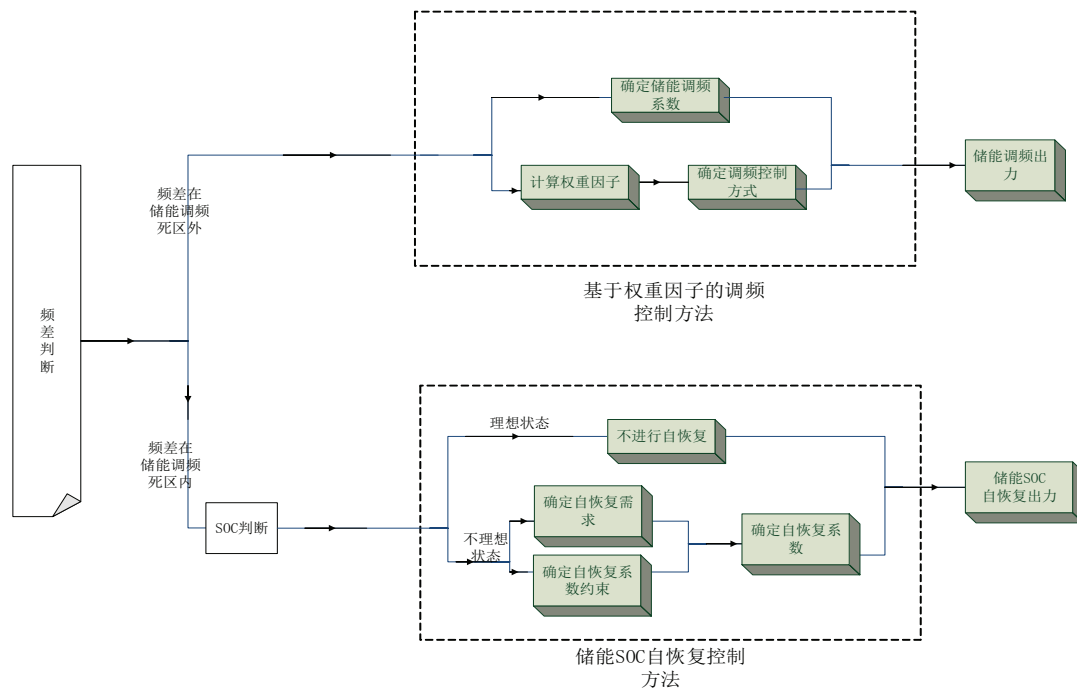


图2 调度计划形成示意图

$$W_i^P + W_i^T = W_i^L \quad (2)$$

其中 W_i^P 、 W_i^T 和 W_i^L 分别是风电场 t 时调度计划的输出、传统机组调度计划的输出以及负荷预测的输出。

按照图2, 由于风电区别于火电, 输出功率存在随机性, 间歇性及波动性, 导致风电出力受多种因素的影响, 导致电网调度人员难以准确评估风电出力及作出相应的决策。在“优先利用清洁能源接入互联网”的原则下, 调度中心可以通过降低常规机组的出力来提高风电上网功率。为此, 文中将风电场日前预测出力作为调度出力计划进行研究, 认为风电全部预测出力满足调度要求。

4. 电网调频极限分析

由于风电出力随机性对电网频率有不利影响, 风电波动被认为是负荷波动, 风电波动和常规负荷波动共同构成等效负荷波动, 并引入调频极限以描述电网极限调频能力。这个极限的定义是: 传统机组只有在传统电源参与调频的情况下, 才能使电网频率维持在允许波动范围内所能承受的等效负荷波动的最大值。传统机组等效负荷波动大于调频极限后, 调频能力不足以均衡等效负荷波动量而造成调频功率短缺和频率偏差超出电网允许范围。因此, 需要研究出一种能兼顾系统调频裕度和等效负荷在各种运行模式下变化之间的关系, 以达到判断调频极限目的。从调频极限的定义来看, 调频极限的计算就是以区域电网可承受等效负荷波动最大为目标的计算方法, 以等效负荷为基础的调频特性分析实际运行时,

可以根据系统运行方式和负荷曲线判断区域电网能否达到调频要求, 从而确定采取哪种调频调节方式。

四、结论

综上所述, 环流问题会导致电池簇之间的充放电不均匀, 造成电池容量损失和温度升高, 进而加速电池衰减, 降低电池系统的可用容量。此外, 环流问题还会增加系统的能耗, 降低系统的效率。因此, 解决电池簇间环流问题对于提高电池系统的性能和可靠性具有重要意义。具体而言, 该策略结合了频率调节和混合控制的方法, 通过调节电池簇的充放电速率和电流分配比例, 使得电池簇间的电流均匀分布, 减少环流的发生。该调频混合控制策略具有实施简单、经济实用的特点, 不需要增加额外的系统成本。

参考文献:

- [1]刘炜, 陆存豪, 徐晶, AMMARUL Hasan. 电池模组冷却用池沸腾传热技术研究进展[J]. 电池, 2023, 53(3): 338-341.
- [2]李睿, 王铁. 基于双向并联液冷道的电池热仿真与优化[J]. 车辆与动力技术, 2023(2): 14-19.
- [3]姚东升, 周耀丹, 张志芸, 秦志东, 刘永亮, 郭凤刚, 张健, 刘尹. 大功率质子交换膜燃料电池系统热管理控制策略研究[J]. 汽车文摘, 2023(7): 36-39.
- [4]陈皓, 赵福云, 谭志成, 姚奕合. 锂离子电池液冷管路优化[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(5): 44-51.