

进展与评述

基于电力调频的串联锂离子电池组均衡技术分析

李佳娜^{1,2}, 刘丹丹^{2,3}, 朱峰², 谢晨², 侯洋⁴, 陈永翀^{2,3}

(¹中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; ²中国科学院电工研究所, 北京 100190; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴北京好风光储能技术有限公司, 北京 100085)

摘要:近年来, 锂离子电池在储能电站调频领域得到了飞速发展。为满足调频电站的电压和功率要求, 需将大量电池单体进行串联, 如此产生的电池组串联不一致性问题, 以及调频过程中高倍率和频繁切换充放电状态对不一致性程度的加剧, 严重影响电池组的使用寿命和安全性能。针对上述问题, 本文基于调频储能串联锂离子电池模组不一致性问题的形成原因, 归纳分析用于改善电池组串联不一致性问题的均衡技术和均衡策略。其中, 均衡拓扑结构按能量流向角度进行分类梳理, 均衡控制策略则基于均衡的不同目标进行优劣分析。在此基础上对锂离子调频电池模组均衡技术的发展趋势进行展望。

关键词: 调频储能; 串联电池组; 高倍率; 不一致性; 均衡技术

doi: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0011

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2019) 03-468-09

Analysis of equalization technology of series lithium-ion battery pack based on power frequency modulation

LI Jiana^{1,2}, LIU Dandan^{2,3}, ZHU Feng², XIE Chen², HOU Yang⁴, CHEN Yongchong^{2,3}

(¹School of Mechanical Electronic Information and engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; ²Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Beijing HAWAGA Power Storage Technology Company Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Lithium-ion batteries have gained rapid development in the field of frequency regulation of energy storage power stations. In order to meet the voltage and power requirements of the frequency modulation power station, a large number of battery cells need to be connected in series, then battery cells imbalance problem may occur. Moreover, the high rate and frequent switching of the charge and discharge state of battery packs in the frequency modulation process increase the degree of inconsistency, which seriously affects the cycle life and safety performance of the battery packs. In view of the problems mentioned above, this paper summarizes the causes of the inconsistency problem of series-connected lithium-ion battery packs, and evaluates the strategies which are used to improve the consistency of the battery packs. Among them, the balancing topologies are sorted according to the energy flow, while the balancing strategies are based on the different objectives. On this basis, the development trend of equalization technology for lithium-ion frequency modulation battery packs is prospected.

Key words: frequency modulation energy storage; series-connected lithium-ion battery packs; high rate; inconsistency; equalization technology

收稿日期: 2019-02-12; 修改稿日期: 2019-03-24。

基金项目: 国家自然科学基金(51707181、51707188), 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(L172044)。

第一作者: 李佳娜(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为储能电池系统技术, E-mail: jianalee@mail.iee.ac.cn; 联系人: 陈永翀, 研究员, 研究方向为新型储能材料与电池技术, E-mail: ycchen@mail.iee.ac.cn。

近年来,风电、光伏等本身不具备调频能力的新能源并网比重不断增加,造成电网调频容量不足^[1-3]。储能电池具有快速功率响应能力,且储能电池本身不受电网频率影响,可以避免电力系统中一次调频与二次调频相互冲突及反调的现象,具有很好的调频效果,使得储能电池系统在电力系统调频领域中的应用价值逐步彰显^[4-9]。

储能电池在调频领域的应用中成组电压为400~800 V,锂离子电池单体的标称电压为3.2~4.2 V,因而储能电站电池串联数量多达几百节。随着电池组使用时间的增加,电池单体之间由工厂生产过程中产生的微小差异被不断放大,从而导致严重的电池组不一致性问题^[10-11]。此外,储能电池响应调频指令时需进行高倍率充放电及频繁切换充放电状态,导致电池组的不一致问题进一步加剧,从而使电池组的整体性能恶化^[12-13]。一方面导致最大可用容量的减少,示意图如图1所示^[14],另一方面导致电池组使用寿命缩短以及产生电池组爆炸、火灾等安全性失控隐患^[15-16]。如图1(b)所示,在充放电过程中,电池组还未达到充放电截止电压之前,某些容量较小的电池已达到自身充放电截止电压而发生过充或过放,从而影响电池组性能,进而导致整个电池组失效,这也是目前储能电站寿命远不如锂离子单体电池寿命长的主要原因。

针对上述问题,本文首先对基于电力调频的串联锂离子电池组不一致性问题的形成原因进行分类,再将相应的代表性改善措施进行归纳,并从效果上进行对比分析。之后重点综述可主动控制电池组不一致性的更为有效的均衡管理技术,并从能量流向的角度和基于均衡的不同目标分别对种类繁多、性能特点各异的均衡结构和均衡策略进行分类梳理以及优劣分析,展望储能调频应用下均衡管理技术的发展趋势。

1 基于电力调频的电池组不一致性成因及改善方法

电池组产生不一致性问题的原因是多方面的。通过调研总结,本文认为基于电力调频的串联锂离子电池的不一致性问题成因可分为四个方面:生产制造工艺、电池老化、使用环境以及使用工况。生产制造工艺是指锂离子电池在混料搅拌、涂布和辊压等过程中产生的不可避免的微小差异^[17];电池老化是指串联锂离子电池在调频静置过程中因自放电率不同及调频使用时容量衰减率不同导

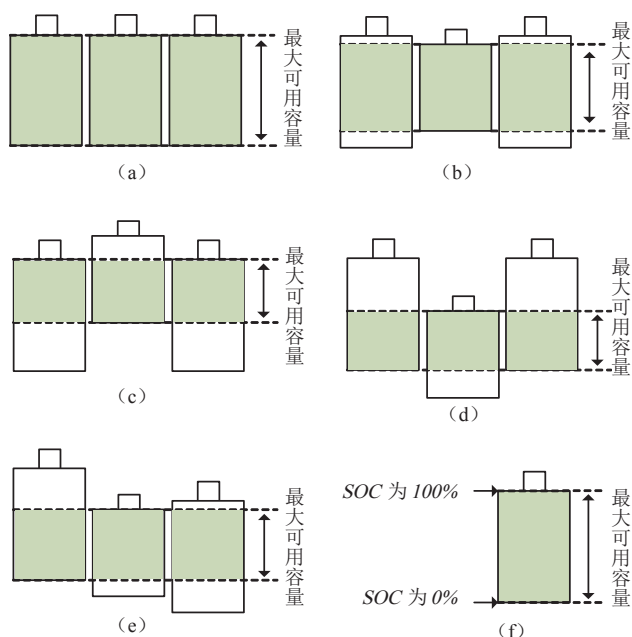


图1 电池组不一致性可用容量分析^[14]:
(a) 电池组一致情形; (b~e) 电池组不一致情形;
(f) 电池荷电状态描述

Fig.1 The analysis of available capacity based on battery cells imbalance^[14]

致的电池老化程度不同而产生的差异;使用环境是指串联锂离子电池组在密封下导致温度、湿度等不同而产生差异^[18];使用工况则是指串联锂离子电池组在调频使用过程中不同充放电倍率、充放电截止电压、充放电状态频繁切换等工况下产生的差异。本文从以上四个成因入手将分别对应的可降低不一致性的方法归纳如下。①电池制造工艺和电池分选方面:尽量确保混料搅拌过程中的分散均匀性,涂布过程中极片厚度、质量的稳定和均匀性,以及辊压过程中极片厚度的均匀性^[19-20];在锂离子电池串联成组之前,采用静态电压法、静态容量法、内阻匹配法、充放电特性曲线匹配法等电池分选方法筛选性能更为接近的电池用作调频模组^[21]。②非工作状态电池老化维护管理方面:定期对调频模组进行老化维护检测;在断开调频使用时,对调频模组中性能极差的电池单体进行更换或单独充电;对长期静置的调频模组进行小电流充电维护,促使锂离子电池组自身的均衡和性能恢复^[22]。③使用环境管理方面:保证锂离子电池组在调频使用中环境温度、湿度等的一致性。④电池组调频使用工况管理方面:在输出功率允许的情况下,尽量使电池组在相对较小的倍率下进行充放电工作;控制调频电池组SOC控制在20%~80%范围内,使电池组在电压平稳区工作^[23-24];适当降低充电截止电压,升高

放电截止电压,使调频电池组避免过充过放;以及采用双储能电池系统进行调频使用的方式,降低储能系统充放电的频繁切换程度,提高电池组的一致性^[13]。

在以上降低不一致性的方法中,电池制造工艺和电池分选仅提高调频电池组初始状态的一致性,电池老化维护管理只针对非工作状态下调频模组,而使用环境和使用工况管理也只能减缓电池组在调频应用过程中不一致性恶化的速度。

因此,在现有的制造工艺水平限制下,主要还应采用更为有效地均衡管理技术对电池组进行主动控制,以提高基于电力调频的串联锂离子电池组在静置状态及使用状态下的不一致性问题。目前锂离子串联电池组均衡管理技术主要应用于小容量蓄电池组、电动汽车动力电池及储能电站等应用场景,针对储能调频电池的均衡管理研究还比较少,因此本文针对现有锂离子串联电池组均衡管理技术并结合电力调频的特点,从均衡拓扑结构和均衡策略两部分对基于电力调频的锂离子串联电池组均衡管理技术的适用性进行综述分析。

2 均衡拓扑结构

常用的均衡拓扑结构可分为两种:能量耗散型拓扑和非能量耗散型拓扑^[25-27],如图2所示。其中能量耗散型拓扑主要指电阻均衡拓扑结构,即在电池组放电时利用电阻消耗电池电量进行均衡。由于电阻会带来热损耗问题,一般均衡电流小、均衡时间长,不适用于兆瓦级大规模储能调频电站串联锂离子电池组均衡。非能量耗散型拓扑结构主要通过电容、电感、变压器等储能元件作为媒介转移电池间的电量,是大规模储能调频电站串联锂离子电池组均衡技术的发展趋势。目前,国内外对非能量耗散型拓扑结构做了大量的研究,下文将从能量的流向角度对非能量耗散型均衡结构进行分类梳理。

2.1 单体间能量转移型

单体间能量转移型均衡拓扑结构是指将串联锂离子电池组中一节电量高的电池单体通过储能单元将电量转移到另一节电量低的电池单体,分为相邻单体间能量转移和任意单体间能量转移两种形式^[28-29]。

通常来讲,相邻单体间能量转移型均衡拓扑结构存在电池组两端传递路径长的问题,且电池组中原本不需要进行均衡的电池单体被多次无用充放电,影响电池单体的使用寿命,具有均衡时间长和

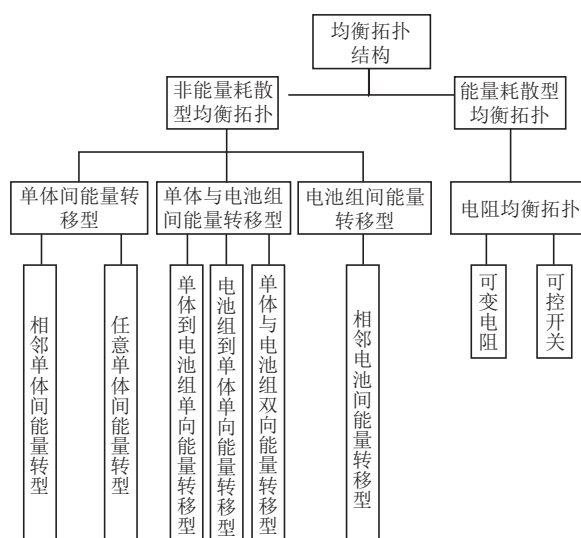


图2 均衡拓扑结构分类

Fig.2 Classification of conventional cell balancing circuits

开关损耗大的缺点,使其在兆瓦级储能调频电站串联锂离子电池组均衡管理的应用受限。

任意单体间能量转移型均衡拓扑结构可有效解决相邻单体间能量转移型拓扑能量传递路径长的问题,具有均衡效率高的优点^[29]。SHANG等^[30]设计了基于Boost DC-DC变换器和LC准谐振变换器的任意单体间能量转移型拓扑结构,如图3所示。此结构通过Boost DC-DC变换器实现零电压开关并增大均衡电流以及LC准谐振变换器实现零电流开关,满足低成本和小体积的同时还具有低功率损耗的优点,适用于小规模储能调频电站均衡管理。采用多个任意单体间能量转移型拓扑结构进行分层控制可以增加一次均衡过程的电池数量,但成本会大大增加,控制也会更复杂,用于大规模储能电站串联锂离子电池组均衡管理缺乏经济性。

2.2 单体与电池组间能量转移型

单体与电池组间能量转移型均衡拓扑结构在一次均衡过程中可实现一节电池与整个电池组之间的能量传递,在大规模储能调频电站应用场合具有均衡速度快的优势。但此类拓扑在均衡过程中由电量最高的单体电池传递电量给整个电池组时,电池组中部分电量较高的电池单体原本应该释放电量却增加了自身的电量,导致了反向均衡的现象,因此还需逐步改进。单体与电池组间能量转移型均衡拓扑结构包括三种类型:单体到电池组单向能量转移型、电池组到单体单向能量转移型以及单体与电池组双向能量转移型。

2.2.1 单体到电池组单向能量转移型

比较典型的单体到电池组单向能量转移型均衡拓扑结构如图4所示。在每个电池与电池组中其余电池之间应用一个 Buck-Boost 均衡模块, 可实现将任意一节电池的电量传递到电池组内其余电池中, 具有均衡速度快的优点, 但使用变换器数量多, 不易于软开关的实现, 具有成本太高以及开关损耗大的缺点^[31]。李锐华等^[32]在图4基础上提出的基于 Buck-Boost 的双层拓扑结构, 将电池组分为上下两个电池组模块, 并添加一个 Buck-Boost 均衡模块作为第二层均衡, 以实现上下两个电池模块之间电量的传递, 如图5所示。虽然新的拓扑结构均衡速度提高了近一倍, 但均衡功率小且成本更高, 且只能在充电或静置下进行有效均衡, 在放电情况下无法对电量最低的单体进行控制, 易发生过放电的危险, 更适用于调频电池组中某一电池单体电量高于组内其余电池且组内其余电池的电量处

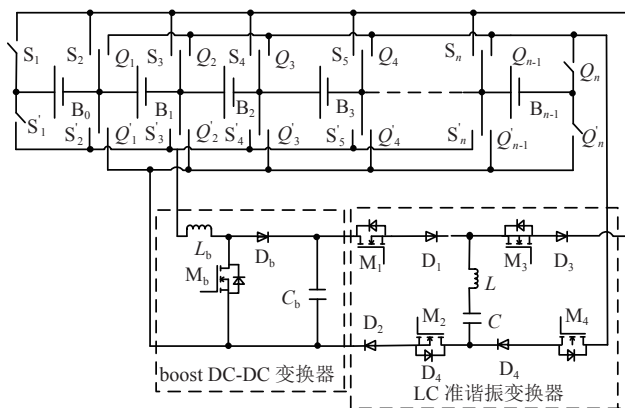


图3 基于 Boost 和 LC 准谐振变换器的任意单体间能量转移型拓扑结构^[30]

Fig.3 The structure of direct cell-to-cell equalizer based on Boost and Quasi-Resonant LC converter^[30]

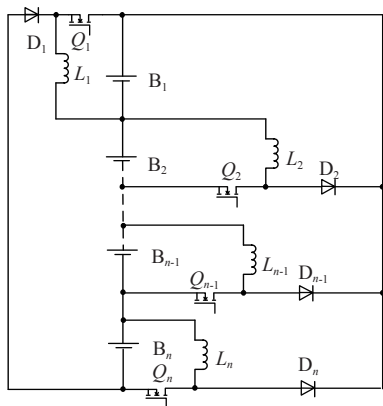


图4 基于 Buck-Boost 的单体到电池组单向能量转移型拓扑结构^[31]

Fig.4 The structure of cell-to-pack equalizer based on Buck-Boost converter^[31]

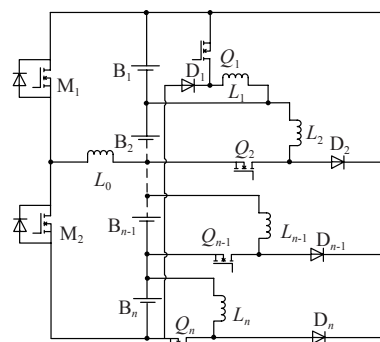


图5 基于 Buck-Boost 的单体到电池组单向能量转移型双层拓扑结构^[32]

Fig.5 The structure of cell-to-pack equalizer with double tier based on Buck-Boost converter^[32]

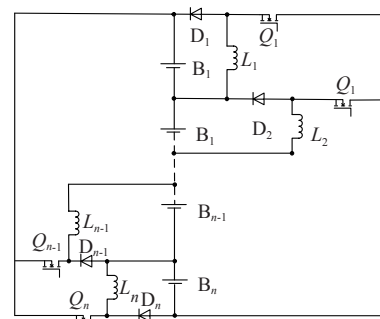


图6 基于 Buck-Boost 变换器的电池组到单体单向能量转移型拓扑结构^[33]

Fig.6 The structure of pack-to-cell equalizer based on Buck-Boost converter^[33]

于一致的情形。

2.2.2 电池组到单体单向能量转移型

电池组到单体单向能量转移型均衡拓扑结构通过将整个电池组的电量转移到电量最低的电池单体的方式进行均衡, 如图6所示^[33]。图7为 SHANG 等^[34]提出的基于双 LC 准谐振变换器的结构拓扑, 采用 LC 准谐振变换器实现软开关, 同时将整个电池组分为两个电池模块 (B_{10} - B_{13} 和 B_{20} - B_{23}), 可以将整个电池模块的电量传递到另一电池模块中电量最低的电池单体, 具有体积小和均衡电流大的优点, 但实现均衡的整体控制比较复杂。另外, 此类拓扑在充电过程中无法将电量最高的单体电池的电量进行转移, 易出现过充问题, 适合于调频电池组中某一电池单体电量低于组内其余电池且组内其余电池电量一致的情形。

2.2.3 单体与电池组双向能量转移型

单体与电池组双向能量转移型结合了电池组到单体和单体与电池组的两种单向能量转移型均衡方式, 可同时解决过充和过放问题。刘红锐等^[35]

提出一种基于 Cuk 斩波电路的双层桥臂的均衡拓扑,如图 8 所示。此拓扑结构能实现单体与电池组双向能量转移,且能提供连续的均衡电流,降低均衡器本身对电池组性能带来的影响,但缺点是硬开关损耗大,影响均衡效率。LI 等^[36]提出了基于 Buck-Boost 和双向 LC 谐振变换器的均衡拓扑,如图 9 所示。此拓扑结构中 Buck-Boost 变换器在 Buck 模式下实现电池组电量转移到电量最低的电池,均衡效率为 72.5%,在 Boost 模式下实现电量最高电池单体的电量转移到电池组,均衡效率为 93%。此外, Buck-Boost 变换器可实现零电压开关,双向 LC 谐振变换器实现零电流开关,具有体积小、开关损耗低的优点。在大规模储能调频电站应用中,此类均衡拓扑结构可以在电池组进行充放电跟踪调频指令过程中快速提高串联锂离子电池组的一致性,提高电池组的最大可用容量和使用寿命,但存在反向均衡的缺点。

2.3 电池组间能量转移型

电池组间能量转移型均衡拓扑是将部分电量较高的电池的电量传递给电池组内电量较低的部分电池,兼具均衡速度快和均衡效率高的优点,是大规模储能调频电站均衡管理的未来发展趋势,目前的主要问题在于开关数量较多,控制方式复杂,相关研究尚处于起步阶段。

ZHOU 等^[37]采用双向电感变换器设计了电池组间能量转移型均衡拓扑结构,如图 10 所示。此拓扑结构用于 N 节电池单体串联而成的锂离子电池组,实现电池组内上部分的 n 节电池与下部分 $N-n$ 节电池电量的双向传递,其中 $0 < n < N$ 。该结构具有扩展性好的优点,但变换器及开关使用数量多且硬开关损耗大。CUI 等^[38]提出了基于 LC 矩阵变换器的均衡拓扑结构,如图 11 所示。此拓扑结构可实现将电池组中两节电量较高的相邻电池中的电量传递到电池组内另外两节电量较低的相邻电池中,并且采用 LC 矩阵变换器实现软开关,减少开关损耗,均衡效率可达 75.2%~99.2%,均衡过程中需要同时开启 4 个选择开关才能选中相邻两节目标电池,控制复杂、线路可靠性偏低。此外,以上两种均衡方式仍然可能出现单体与电池组间能量转移型中反向均衡的问题。

通过对上述均衡方法的总结分析,本文认为电池组间任意多节电池能量转移型均衡结构可以在解决反向均衡的问题的同时,兼顾均衡速度,这方面拓扑结构具有重要研究价值,对未来大规模串联

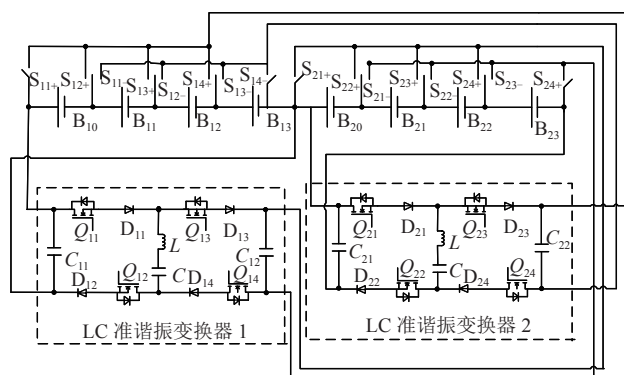


图 7 基于双 LC 准谐振变换器的电池组到单体单向能量转移型拓扑结构^[34]

Fig.7 The structure of pack-to-cell equalizer based on double Quasi-Resonant LC converter^[34]

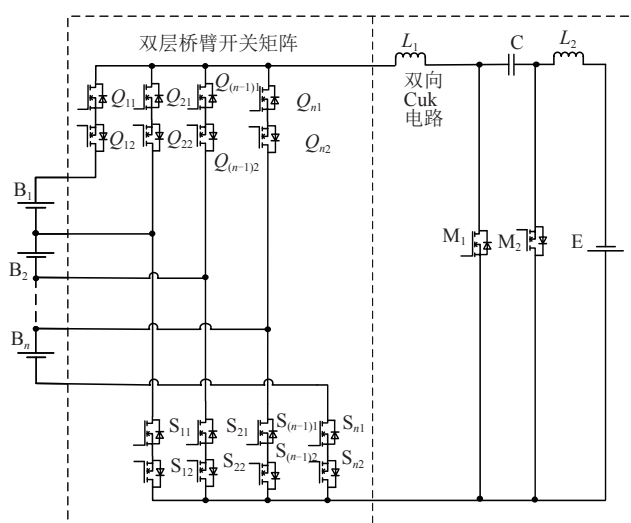


图 8 基于 Cuk 斩波电路的双层桥臂的单体与电池组双向能量转移型均衡拓扑^[35]

Fig.8 The structure of cell-to-pack-to-cell equalizer with double tier based on Cuk chopper converter^[35]

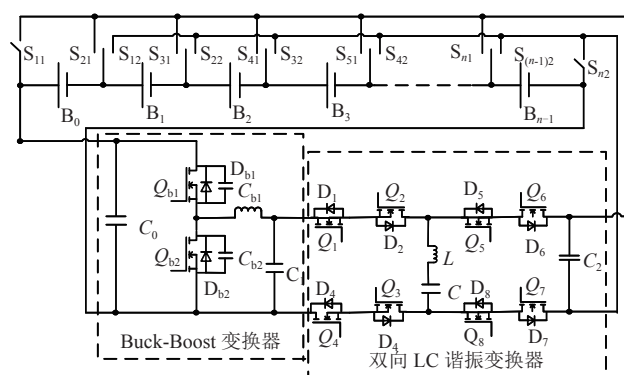


图 9 基于 Buck-Boost 和双向 LC 谐振变换器的能量转移型均衡拓扑^[36]

Fig.9 The structure of pack-to-cell-to-pack equalizer based on Buck-Boost and bidirectional LC resonant converter^[36]

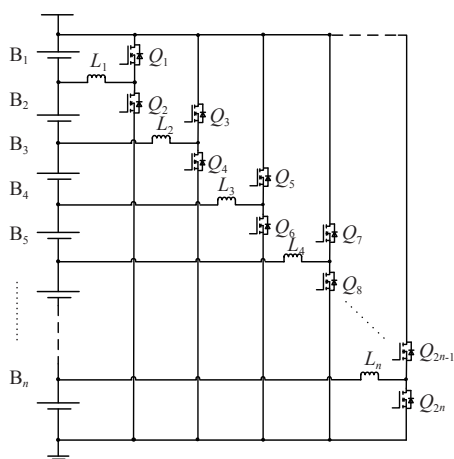


图 10 基于双向电感变换器的均衡拓扑^[37]
Fig.10 The structure of cell(s)-to-cell (s) equalizer based on bidirectional inductor converter^[37]

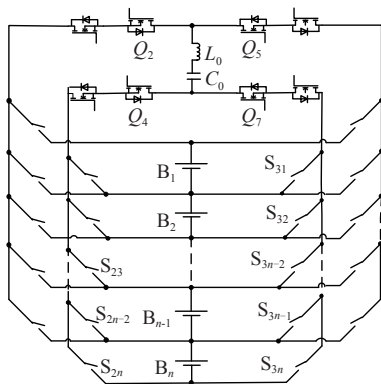


图 11 基于 LC 矩阵变换器的均衡拓扑^[38]
Fig.11 The structure of cells-to-cells equalizer based on LC matrix converter^[38]

锂离子电池均衡管理具有重要意义。

3 均衡策略

串联锂离子电池组的不一致性参数包括电压、容量、SOC、温度、内阻等，选择合适的参数作为均衡目标，需要考虑该参数在该应用场景下是否为主要影响参数，且此参数实现均衡时能否避免电池组中单体过充过放，能否有效提高电池组性能寿命以及增加电池组的可用容量。

3.1 以电压为均衡目标

单体电压是影响串联锂离子电池组整体性能的重要因素之一，以电压为均衡目标的均衡策略已得到广泛应用^[39-41]。电压均衡法通过在线采集电压作为均衡判据，具有易于实现和控制简单的优点，但电池组电压易受电池本身参数和工况的影响，出现均衡判断不稳定的问题，导致均衡对象来回交

换, 增加均衡器的负担, 可能导致串联锂离子电池组的一致性更差^[42]。此外, 某些电池 (如磷酸铁锂电池、钛酸锂电池) 电压在 SOC 为 10%~90% 区域存在平稳区, 即在此区域电压几乎不变而电池电量可能相差很大, 从而导致均衡目标失效^[43]。目前, 对于调频储能电站, 储能电池组一般初始设置为 50% SOC, 在 20%~80% SOC 之间进行高倍率浅充浅放, 以电压为均衡目标的均衡策略则不适用此场景。

3.2 以容量为均衡目标

采用以容量为均衡目标的均衡策略,可避免以电压为均衡目标的均衡策略中的过均衡以及电池组可用容量利用率低等问题,实现电池组的容量利用率最大化^[44-46]。马泽宇等^[14]针对储能电站削峰填谷应用场景提出在电池组充电结束后静置10min进行均衡容量计算,并以此容量差作为下次充电的均衡判据。该方法只需要容量差值和充电电流值即可计算出均衡时间,具有控制简单的优点,但由于电池组容量只能在静置条件下获得,因而以容量为均衡目标的控制策略无法进行在线均衡。这类均衡策略可用于光伏发电侧夜间不需要参与调频的储能电站,但不适用于电网侧无长时间静置的大规模储能调频电站均衡管理。

3.3 以 SOC 为均衡目标

SOC 是电压、容量和内阻等的综合表征, 以 SOC 为均衡目标的均衡策略不仅可以避免因均衡判据失效导致的过均衡问题, 还可以有效提高容量利用率, 且可实现在线均衡, 能满足大规模储能电站调频的均衡需求, 是目前均衡控制策略的主流。但 SOC 的估计需要复杂的电路, 工程量较大, 且由于电池组不一致性的问题, 每节电池进行 SOC 估计时都需要进行参数识别^[47-49]。此外, SOC 的估计精度, 也是 SOC 均衡法有效均衡的重要指标和技术难点。

3.4 以多个参数为均衡目标

上文讨论的均衡策略,只考虑了单一参数的均衡,未考虑电池组的不一致性参数之间复杂的耦合关系。以多个参数作为均衡目标的策略可以同时满足电池组电压、SOC 以及温度等的均衡管理,有效避免均衡目标失效以及反向均衡,是未来储能调频电池均衡策略的发展趋势。LI 等^[50]提出以 SOC、温度和容量衰减率作为均衡控制目标的均衡策略,通过对 SOC、温度和容量衰减率按权重形

成综合均衡评价指标,对电池组的均衡电流进行控制。该均衡策略可以有效缩减SOC、温度以及容量衰减率的极差,但策略的实现需要电流预测、SOC估计以及容量衰减估计等模块,控制方式复杂。此外,温度、SOC、容量衰减率的权重系数确定仍需进一步研究。

4 结 论

本文分别从能量流向和均衡控制目标对现有应用于电动汽车动力电池以及储能电站等场合的串联锂离子电池组不同均衡拓扑及控制策略进行了分类综述,并结合基于调频的储能电池的高倍率浅充浅放以及充放电状态频繁切换的特点,对储能调频电站电池组均衡的适用性进行了分析。对目前兆瓦级大规模储能调频电站串联锂离子电池组的均衡技术发展趋势有如下建议。

(1) 目前单体与电池组双向能量转移型均衡拓扑结构中均衡效率可达72%~93%,应用最为广泛,而电池组间相邻两节能量转移型拓扑结构中均衡效率高达75%~99%。在均衡过程中提高一次均衡过程中均衡目标电池的节数和任意均衡目标电池的可选择性可缓解反向现象,提高均衡效率和均衡速度。在未来尤其是电池组间任意多节电池能量转移型均衡拓扑结构具有重要研究价值,对兆瓦级大规模储能调频电站均衡管理具有重要意义。

(2) 在均衡策略方面,由于电池组的参数相互耦合,关系复杂,应与实际应用紧密结合,针对不同的应用场合选择合适的参数作为均衡一致性评价标准。选择多个参数作为均衡目标的均衡策略可有效避免均衡目标失效,相比于以单一参数作为均衡目标的均衡策略更为可靠,能更好的适用于电力调频储能电池均衡,但其控制过程复杂、技术要求更高,有待进一步研究。

(3) 均衡拓扑结构应尽量减少电气元件和开关的使用数量,降低成本和控制的复杂度以及减少元器件发生事故的的概率,降低均衡拓扑结构本身给储能电站寿命带来的影响。此外,在兆瓦级的储能调频电站均衡管理过程中,要求均衡电流大,均衡过程会产生较大的损耗,软开关可以减少开关损耗,提高均衡效率,避免电磁干扰以及减小体积,是均衡拓扑结构的发展趋势。但在未来大容量电池的发展下,提高电池本体的一致性才是延长储能电站使用寿命的首要方向。

参 考 文 献

- [1] 田书,程浩忠,曾平良,等.基于调频层面的风电弃风分析[J].电工技术学报,2015,30(7):18-26.
TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Analysis on wind power curtailment at frequency adjustment level[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 18-26.
- [2] 陈永翀.储能电池技术多元化发展探讨[J].中华新能源,2018:36-41.
CHEN Yongchong. Discussion on diversified development of energy storage battery technology[J]. China New Energy Review, 2018: 36-41.
- [3] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.大规模储能电源参与电网调频研究综述[J].电力系统保护与控制,2016,44(7):145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [4] 宋永,黄继军,黄际元,等.储能电池参与电网快速调频的场景分析[J].电气应用,2017,36(11):52-56.
SONG Yong, HUANG Jijun, HUANG Jiyuan, et al. Scene analysis of energy storage battery participating in rapid frequency modulation of power grid[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(11): 52-56.
- [5] 杨水丽,李建林,李蓓,等.电池储能系统参与电网调频的优势分析[J].电网与清洁能源,2013,29(2):43-47.
YANG Shuili, LI Jianlin, LI Bei, et al. Advantages of battery energy storage system for frequency regulation[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2013, 29(2): 43-47.
- [6] 孙峰,曾辉,邵宝珠,等.澳大利亚100MW储能运行分析及对中国的启示[J].电力系统自动化,2018,42:1-7.
SUN Feng, ZENG Hui, SHAO Baozhu, et al. Analysis of Australian 100MW storage operation and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42: 1-7.
- [7] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等.国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J].电力系统自动化,2017,41(11):8-16.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16.
- [8] 陈永翀.中国储能产业与技术发展的问题与建议[J].高科技与产业化,2016,4:42-45.
CHEN Yongchong. Issues and suggestions on China's energy storage industry and technology development[J]. High-Technology & Commercialization, 2016, 4: 42-45.
- [9] 陈永翀.发展储能电池技术首先要厘清基本概念[J].中国战略新兴产业,2017,23:96-96.
CHEN Yongchong. The development of energy storage battery technology must first clarify the basic concepts[J]. China Strategic Emerging Industry, 2017, 23: 96-96.
- [10] 隋欣,张晓虎,陈永翀,等.基于等效电路模型的串联电池组不一致分布特征仿真分析[J].电工电能新技术,2018(9):24-32.
SUI Xin, ZHANG Xiaohu, CHEN Yongchong, et al. Simulation analysis of the inconsistency distribution characteristics of series battery based on equivalent circuit model[J]. Advanced Technology of

- Electrical Engineering and Energy, 2018(9): 24-32.
- [11] 范刘洋, 汪可友, 张宝群, 等. 考虑电池组不一致性的储能系统建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 3: 110-115.
- FAN Liuyang, WANG Keyou, ZHANG Baoqun, et al. Modeling and simulation of battery energy storage system considering intrinsic inconsistency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 3: 110-115.
- [12] 牟春华, 兀鹏越, 孙钢虎, 等. 火电机组与储能系统联合自动发电控制调频技术及应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 29-34.
- MOU Chunhua, WU Pengyue, SUN Ganghu, et al. AGC frequency modulation technology and application for combination of thermal power unit and energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 29-34.
- [13] 林莉, 金鑫, 朱丽云, 等. 考虑充放电能量不均衡的双电池系统状态评估与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 128-134.
- LIN Li, JIN Xin, ZHU Liyun, et al. State evaluation and control strategy of dual-battery system considering unbalance of charging and discharging energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 128-134.
- [14] 马泽宇, 姜久春, 文锋, 等. 用于储能系统的梯次利用锂电池组均衡策略设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 106-111.
- MA Zeyu, JIANG Jiuchun, WEN Feng, et al. Design of equilibrium strategy of echelon use Li-ion battery pack for energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 106-111.
- [15] 王震坡, 孙逢春, 林程, 等. 不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 577-580.
- WANG Zhenpo, SUN Fengchun, LIN Cheng, et al. An analysis on the influence of inconsistencies upon the service life of power battery packs[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 577-580.
- [16] UNO M, TANAKA K. Influence of high-frequency charge-discharge cycling induced by cell voltage equalizers on the life performance of lithium-ion cells[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1505-1515.
- [17] 郑岳久. 车用锂离子动力电池组的一致性研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- ZHENG Yuejiu. Study on cell variations of Lithium-ion power battery packs in electric vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [18] 杨帆. 锂离子电池组不一致性及其弥补措施[J]. 汽车电器, 2014(5): 37-40.
- YANG Fan. Inconformity of Li battery pack and remedial measures[J]. Auto Electric Parts, 2014(5): 37-40.
- [19] 罗雨, 王耀玲, 李丽华, 等. 锂电池制片工艺对电池一致性的影响[J]. 电源技术, 2013, 37(10): 1757-1759.
- LUO Yu, WANG Yaoling, LI Lihua, et al. Influence of preparation techniques upon uniformity of lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(10): 1757-1759.
- [20] 罗宇. 动力锂离子电池制备工艺对一致性影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- LUO Yu. Study on the influence of the preparation process upon the uniformity of the power lithium-ion batteries[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [21] 王莉, 谢乐琼, 张干, 等. 锂离子电池一致性筛选研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(2): 194-202.
- WANG Li, XIE Leqiong, ZHANG Gan, et al. Research progress in the consistency screening of Li-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 194-202.
- [22] 李娜, 白恺, 董建明, 等. 梯次利用电池储能系统一致性维护方法研究[J]. 中外能源, 2017, 22(4): 89-96.
- LI Na, BAI Kai, DONG Jianming, et al. Research on consistency maintenance method for echelon use battery energy storage system[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(4): 89-96.
- [23] 李娜, 白恺, 陈豪, 等. 磷酸铁锂电池均衡技术综述[J]. 华北电力技术, 2012, 2: 60-65.
- LI Na, BAI Kai, CHEN Hao, et al. Summary of equalization for LiFePO₄ Li-ion batteries[J]. North China Electric Power, 2012, 2: 60-65.
- [24] KIM C H, KIM M Y, PARK H S, et al. A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3764-3774.
- [25] DAOWD M, OMAR N, BOSSCHE P V D, et al. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation//Vehicle Power & Propulsion Conference[C]//Chicago, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2011: 1-7.
- [26] GALLARDO L J, ROMERO C E, MILANES M, et al. Battery equalization active methods[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246(3): 934-949.
- [27] 孙庆. 基于模糊综合评价体系的动力电池组均衡方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- SUN Qing. Research on equilibrium method of power battery based on fuzzy comprehensive evaluation system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [28] PHUNG T H, CREBIER J, CHUREAU A, et al. Optimized structure for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(9): 4603-4613.
- [29] PARK S H, KIM T S, PARK J S, et al. A new buck-boost type battery equalizer[C]//2009 IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, Washington DC, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2009: 1246-1250.
- [30] SHANG Y L, ZHANG C, CUI N, et al. A cell-to-cell battery equalizer with zero-current switching and zero-voltage gap based on quasi-resonant LC converter and boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3731-3747.
- [31] MA Y, ZHU G R, QIU S, et al. Lithium-ion battery cells voltage equalization using optimized circuit parameters and control Strategy[C]//2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC 2013). Beijing, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2013: 119-203.
- [32] 李锐华, 李冀, 胡波, 等. 基于 Buck-Boost 变换器的磷酸铁锂电池串联电压均衡优化策略[J]. 电气技术, 2018, 19(3): 1-7.
- LI Yuehua, LI Ji, HU Bo, et al. Voltage equalization optimization strategy for LiFePO₄ series-connected battery packs based on Buck-Boost converter[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(3): 1-7.
- [33] 何少佳. 磷酸铁锂动力电池组主动均衡关键问题研究[D]. 武汉: 武

- 汉理工大学, 2015.
- HE Shaojia. Research on the key issues about active equalization system of LiFeO_4 power battery pack[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [34] SHANG Y L, ZHANG C, CUI N, et al. A crossed pack-to-cell equalizer based on quasi-resonant LC converter with adaptive fuzzy logic equalization control for series-connected lithium-ion battery strings[C]//Applied Power Electronics Conference & Exposition. Charlotte, North Carolina, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2015: 1685-1692.
- [35] 刘红锐, 杜春峰, 陈仕龙, 等. 一种基于 Cuk 斩波电路的双向双层桥臂的蓄电池组均衡器的研究[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 142-147.
- LIU Hongrui, DU Chunfeng, CHEN Shilong, et al. Research on bidirectional battery pack equalizer with double deck based on Cuk chopper circuit[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 142-147.
- [36] LI Z, SHANG Y L, DUAN B, et al. A pack-to-cell-to-pack battery equalizer with soft-switching based on buck-boost and bidirectional LC resonant converters[C]//Energy Conversion Congress & Exposition//Cincinnati, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2017: 1-7.
- [37] ZHOU Z, SHANG Y L, DUAN B, et al. An any-cell(s)-to-any-cell(s)equalizer based on bidirectional inductor converters for series connected battery string[C]//Industrial Electronics & Applications. Hefei, China: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2016: 2511-2515.
- [38] CUI N, SHANG Y, ZHANG Q, et al. A direct multi-cells-to-multi-cells equalizer based on LC matrix converter for series-connected battery strings[C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC 2018). San Antonio, TX, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE), 2018: 680-683.
- [39] DENG F, CHEN Z. A control method for voltage balancing in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(1): 66-76.
- [40] AKAGI H, HATADA T. Voltage balancing control for a three-level diode-clamped converter in a medium-voltage transformerless hybrid active filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 571-579.
- [41] UNO M, TANAKA K. Single-switch cell voltage equalizer using multistacked buck-boost converters operating in discontinuous conduction mode for series-connected energy storage cells[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8): 3635-3645.
- [42] 李索宇. 动力锂电池组均衡技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- LI Suoyu. Research on consistency maintenance method for echelon use battery energy storage system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [43] KIM J, SHIN J, CHUN C, et al. Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(1): 411-424.
- [44] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 1. Equalization based on remaining charging capacity estimation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247(2): 676-686.
- [45] EINHORN M, GUERLSCHMID W, BLOCHBERGER T, et al. A current equalization method for serially connected battery cells using a single power converter for each cell[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(9): 4227-4237.
- [46] 王立业, 王丽芳, 刘伟龙. 基于容量差的电动汽车主动均衡控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(11): 44-50.
- WANG Liye, WANG Lifang, LIU Weilong. Research on active balance control strategy of electric vehicle based on capacity difference[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(11): 44-50.
- [47] 隋欣, 陈永翀, 张晓虎, 等. 基于改进滑模观测器的锂离子电池荷电状态估计方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(12): 73-82.
- SUI Xin, CHEN Yongchong, ZHANG Xiaohu, et al. Improved sliding mode observer for state of charge estimation of lithium-ion battery[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(12): 73-82.
- [48] 杨海学, 张继业, 张晗. 基于改进 Sage-Husa 的自适应无迹卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(1): 30-35.
- YANG Haixue, ZHANG Jiye, ZHANG Han. States of charge estimation of lithium-ion battery based on improved Sage-Husa adaptive unscented Kalman filters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(1): 30-35.
- [49] 荣雅君, 杨伟, 牛欢, 等. 基于 BP-EKF 算法的电动汽车电池管理系统 SOC 精准估计[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(9): 22-28.
- RONG Yajun, YANG Wei, NIU Huan, et al. Accurate estimation of SOC value of electric vehicle battery based on EKF algorithm optimized by BP neural network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(9): 22-28.
- [50] LI W, KANG L, GUO X, et al. Multi-objective predictive balancing control of battery packs based on predictive current[J]. Energies, 2016, 9(4): doi: <https://doi.org/10.3390/en9040298>.