

兆瓦级电池储能簇间均衡控制系统关键技术

文/雷健华 郝传统 张勇波
深圳市德兰明海新能源股份有限公司

兆瓦级电池储能在大规模可再生能源并网中发挥重要作用，但电池簇间的不均衡问题已成为制约其性能提升的关键技术难点。叙述了电池簇的耦合方式、均衡控制拓扑及常用拓扑结构。综合考虑成本和性能，重点分析倍压式双有源桥的原理、控制方法及其在电池储能系统中的应用优势，为未来储能系统的发展提供理论支持。

随着全球能源结构的转型和可再生能源的大规模应用，储能技术作为连接可再生能源与电力系统的桥梁，其重要性日益凸显。兆瓦级电池储能系统因其大容量、高效率和高可靠性等优点，在调峰调频、事故备用和可再生能源并网等领域具有广泛的应用前景。然而，随着储能系统容量的增加，电池簇间的均衡问题变得尤为突出。电池簇间的不均衡不仅会导致能量损失、效率下降，还可能引发安全隐患。因此，研究兆瓦级电池储能簇间均衡控制系统的核心技术对于提升储能系统的整体性能和安全性具有重要意义。

兆瓦级电池储能簇间均衡控制系统的关键技术呈现高效化、智能化和集成化的发展趋势。储能系统容量的增加使开发更高效的均衡控制策略和电力电子拓扑，以提高能量传输效率和均衡速度变得至关重要。智能控制算法广泛应用于均衡控制中，通过实时监测电池簇的状态信息，智能算法可以动态调整均衡策略，提高系统的响应速度和适应性。此外，为了降低系统成本和提高可靠性，将均衡控制功能与储能系统其他功能进行集成，可实现系统的紧凑化和模块化。

本文首先介绍了兆瓦级电池储能系统中的电池

簇耦合方式和簇间均衡方法，通过比较不同耦合方式的优缺点，对直流耦合系统的系统结构、常用电力电子拓扑及其控制方法展开综述。由于不同电池簇间功率偏差较大，综合考虑系统器件成本和均衡控制性能，倍压式双有源桥式变换器在兆瓦级电池储能系统中有较好的应用前景。从倍压式双有源桥的基本原理、典型波形和控制方法等方面展开分析，为兆瓦级电池储能系统的发展提出参考建议。

电池簇耦合方式与簇间均衡方法

在兆瓦级电池储能系统中，电池簇之间的耦合方式对于系统的能量管理、效率及稳定性至关重要，常用的耦合方式包括交流耦合和直流耦合。

交流耦合是指电池簇通过交流电网或交流母线进行连接和能量交换，其系统结构如图1a所示。在交流耦合系统中，电池簇输出的直流电首先经过DC/AC逆变器转换为交流电，然后通过交流电网进行传输。交流电网具有较高的灵活性和可扩展性，便于实现电池簇的即插即用。交流电网的维护也相对简单，因为交流电的周期性过零特性使得故障检测和隔离更容易。然而，交流耦合方式

基金项目：深圳市科技研发资金创新创业专项（KJZD20230923112959001）

下的电池簇需要依赖稳定的交流电网进行能量传输，一旦电网出现故障，可能会对整个储能系统造成影响。

直流耦合是指电池簇之间通过直流母线进行连接和能量交换，其系统结构如图1b所示，每个电池簇通过各自的DC/DC变换器并联到直流母线上。直流耦合对电网依赖性低，电池簇可以在没有交流电网的情况下进行能量传输，提高了系统的独立性和可靠性。此外，通过控制DC/DC变换器的升压比，不同电压等级的电池簇可并联至同一母线上，系统的扩展性好。

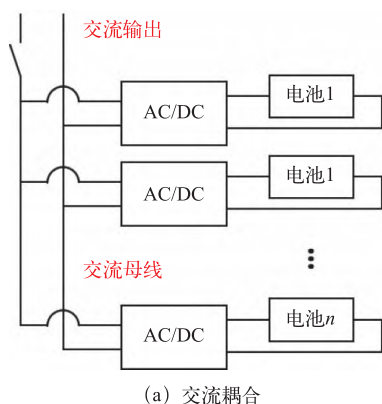
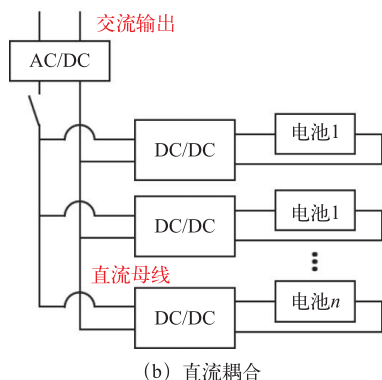


图1 电池簇常用耦合方式

电池簇间的均衡是确保整个系统性能稳定和高效运行的关键。均衡方法的选择直接影响到能量的利用效率、系统的寿命以及安全性。常见的均衡方法可分为被动均衡、主动均衡及智能均衡方法，表1总结了每种方法的原理和特点。本文重点关注直流耦合电池簇中的DC/DC变换器均衡方法，单个电池簇的耦合变换器与均衡变换器可以集成融合为一个单体DC/DC，大大降低了系统的器件成本和控制复杂度。

表1 簇间均衡方法比较

均衡方法	原理	特点
被动均衡	电阻法 将电阻连接到电压较高的电池单体上，使其放电至与其他电池单体电压相近	简单易行，但造成额外的能量损耗和温升，影响电池寿命
	电容法 使用电容器作为中介，将能量从高电压电池单体转移到低电压电池单体	避免了电阻放电时的能量浪费，但电容器参数的选择和故障管理存在较大挑战
主动均衡	DC/DC变换器法 利用DC/DC变换器将能量从高电压电池单体转移到低电压电池单体	效率高，控制灵活，但成本也相对较高。DC/DC的集成化可进一步降低成本
	开关矩阵法 通过开关矩阵连接所有电池单体，通过控制开关实现电池间的能量转移	方法灵活，但控制逻辑较为复杂
智能均衡	模糊逻辑法 监测电池的状态信息，利用模糊逻辑算法动态调整均衡策略	适应不同的工作条件和电池状态，对控制器性能需求较高
	神经网络法 利用神经网络对电池的状态进行预测，并据此调整均衡策略	对于复杂的电池系统具有较好的适应性，对算力要求较高

常用直流耦合均衡DC/DC拓扑

在兆瓦级电池储能系统中，直流耦合均衡DC/DC往往需要将不同的电池端电压变换到统一的直流母线电压，同时也应支持储能电池的充电和放电。因此，DC/DC需要有隔离特性，并且支持能量的双向流动和宽电压比直流变换。常用的直流耦合均衡DC/DC拓扑主要有经典双有源桥式变换器和双向LLC谐振变换器两种，如图2所示。

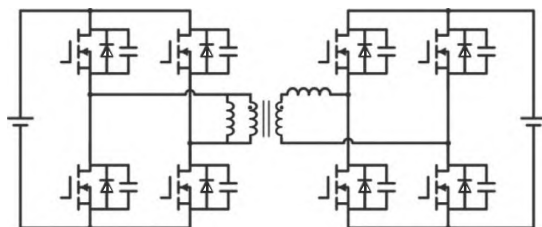
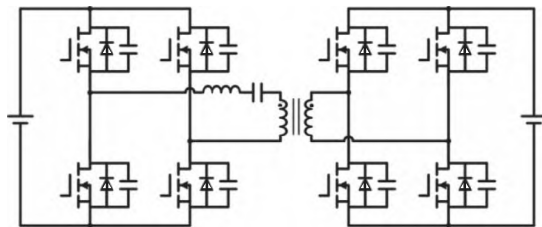


图2 直流耦合电池系统中常用电力电子拓扑

双有源桥 (Dual Active Bridge, DAB) 是一种高效、灵活的电力电子拓扑结构, 广泛应用于各功率等级的直流变换场合。经典DAB由两个H桥8个开关器件组成, 每个H桥都与一个独立的直流电源相连, 其拓扑如图2a所示。通过合理设计变压器参数并调节两个H桥中开关管的占空比和相位差, 可实现能量的双向流动和电压的升降变换。DAB开关损耗小, 能量转换效率高, 特别是在高压大功率的应用场合, 其效率优势更为明显。通过合理的控制策略, DAB变换器可以实现开关管的零电压或零电流开关, 从而减小开关损耗, 提高系统的效率和可靠性。此外, DAB变换器的模块化设计使得其易于扩展和维护, 可以根据实际需要灵活配置变换器的功率和电压等级。

双向LLC谐振变换器是一种结合了串联谐振和并联谐振的电力电子拓扑, 由谐振电感、谐振电容和变压器组成, 其拓扑如图2b所示。与DAB相同, 双向LLC由8个开关器件组成, 在实现高效率的同时, 具有较宽的输入电压范围和较小的体积。当变换器的工作频率与谐振频率相等时, 谐振电感和谐振电容之间发生谐振, 使得变压器电流和电压波形呈现正弦波形态。在谐振过程中, 谐振电容和谐振电感分别起到储存和释放能量的作用, 从而实现电压和电流的变换。LLC谐振变换器以其高效率、宽输入电压范围、输出电压稳定、软开关特性和模块化设计等特点, 在高压大功率的直流变换场合得到了广泛应用。在电池簇间均衡控制中, LLC可以实现快速的能量传输和均衡, 但其成本较高, 且对控制策略相对复杂。

经典DAB和双向LLC均含8个开关器件。兆瓦级电池储能系统由大量的电池簇组成, 器件成本在系统总体成本中占比很大。在保障运行性能和总体效率的前提下, 进一步减少器件数量, 缩小磁性器件的尺寸, 可以有效降低系统成本, 提升功率密度。

电容倍压式双有源桥

电容倍压双有源桥式变换器如图3所示, 变压器一次侧为全桥电路, 与DAB相同; 二次侧为半桥电路, 组成单个DC/DC所需的功率开关数量比经典DAB和双向LLC少两个。此外, 电容倍压双有源桥的变压器二次侧非同名端与两个电容组成的倍压电路相连。在稳定运行时, 电容 C_1 和 C_2 的平均电压为直

流母线电压的一半。在开关 S_5 导通、 S_6 关断时, 变压器二次侧电压 v_s 等于电容 C_1 的电压 V_{C1} , 亦即直流母线电压的一半。因此, 在相同的升压比下, 倍压式DAB所需的变压器二次侧匝数是经典DAB的一半, 大大降低了变压器的尺寸。DC/DC整机的功率密度得到提升, 功率器件和磁性器件成本均得以降低。

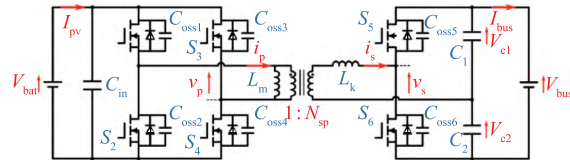


图3 电容倍压双有源桥式变换器

倍压式DAB运行时, 每个桥臂的上下管驱动信号互补, 所有开关信号占空比均为50%, S_1 与 S_4 驱动信号之间的移向角定义为内移向角 (θ_{14}), S_1 与 S_5 驱动信号之间的移向角定义为外移向角 (θ_{15})。内移向角的存在使变压器一次侧电压 v_p 为以电池电压为幅值的三电平波形, 外移向角使二次侧电压为以母线电压的一半为幅值的两电平波形。三电平波形与两电平波形的超前之后相对位置决定了功率传输的方向, 即充电或放电的方向。

不同工作模式下的变压器一次侧、二次侧电压的波形如图4所示。

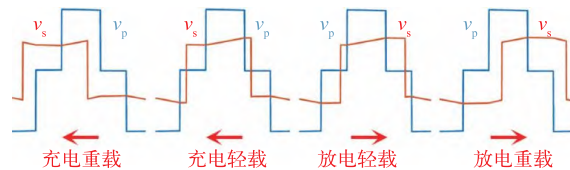


图4 电容倍压双有源桥式变换器在不同工作区间的变压器一次侧、二次侧电压波形

倍压式DAB在每个开关周期内可等效为由 nv_p 、 v_s 和变压器的二次侧等效漏感组成的一阶电感电路。稳态时, 一个开关周期内电流正负对称, 系统参数确定后, 由两个移相角可以推导出半个开关周期内各阶段的电流方程、各节点的电流大小。通过节点电流推导出每个开关周期内的平均功率, 即可得到该开关周期时间点对应的输出瞬时功率。重载和轻载时, 输出功率与两个移相角之间的对应关系为

$$P = \begin{cases} \frac{nV_{bat}V_{bus}[2(\theta_{15}-\theta_{14})-(\theta_{15}-\theta_{14})^2-\theta_{14}^2]}{4f_sL_k}, & \text{重载} \\ \frac{nV_{bat}V_{bus}[2(\theta_{15}-\theta_{14})(1-2\theta_{14})]}{4f_sL_k}, & \text{轻载} \end{cases}$$

根据上式,除移向角 θ_{i4} 和 θ_{i5} 外,开关频率 f_s 也可用于电池充放电瞬时功率的调节,三个控制自由度的应用足以应对大范围的负载功率变化。上述对功率公式的推导验证了倍压式DAB作为直流耦合均衡DC/DC拓扑的可行性。由于其器件成本和功率密度等方面的优势,倍压式DAB相比经典DAB和全桥LLC在兆瓦级电池储能簇间均衡系统的应用更具发展前景。

总结与展望

本文深入探讨了兆瓦级电池储能簇间均衡控制系统的关键技术,包括电池簇的连接方式、常用电力电子拓扑以及均衡控制方式。通过对各种技术的对比分析,提出电容倍压式双有源桥因其器件成本低、负载范围宽和效率高等优点,是解决大容量电池储能直流耦合系统簇间均衡问题的理想方案。随着可再生能源和智能电网的快速发展,兆瓦级电池储能系统的应用前景将更加广阔。因此,研究更为高效、智能的均衡控制技术对于提升储能系统的性能和安全性具有重要意义。未来的研究方向可以包

括以下几个方面:

- 1) 新型电力电子拓扑的研究与开发,以提高能量传输效率和均衡速度。
- 2) 智能控制算法的优化与应用,以实现更为精准和高效的均衡控制。
- 3) 考虑电池老化和故障情况下的均衡控制策略,以提高储能系统的可靠性和稳定性。
- 4) 实际工程应用中的均衡控制系统设计与实现,以验证理论研究的可行性和有效性。EA

参考文献

- [1] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008(7):1-9.
- [2] 丁明,陈忠,苏建徽,等.可再生能源发电中的电池储能系统综述[J].电力系统自动化,2013,37(1):19-25+102.
- [3] 李相俊,王上行,惠东.电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J].电网技术,2017,41(10):3315-3325.

