



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 121124280 A

(43) 申请公布日 2025. 12. 12

(21) 申请号 202511249421.2

(22) 申请日 2025.09.03

(71) 申请人 中节能(察布查尔)太阳能科技有限公司

地址 830000 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州察布查尔锡伯自治县第六社区查鲁盖东街2-4-22号楼302室

申请人 新疆大学  
新疆新能源研究所有限责任公司  
大连融科储能技术发展有限公司

(72) 发明人 李翠 孔繁荣 雍建华 黄维庆  
杨擘 林闽 王晓丽 孟伟巍  
陈朝阳 修强 吴静波 李阳  
刘义 陶媛媛 秦岭 朱相连  
王勇 贾银辉 海连心 李斌  
郝雪峰 张强生

(74) 专利代理机构 北京知己知识产权代理有限公司 41132

专利代理师 季发军

(51) Int. Cl.  
H02J 7/00 (2006.01)

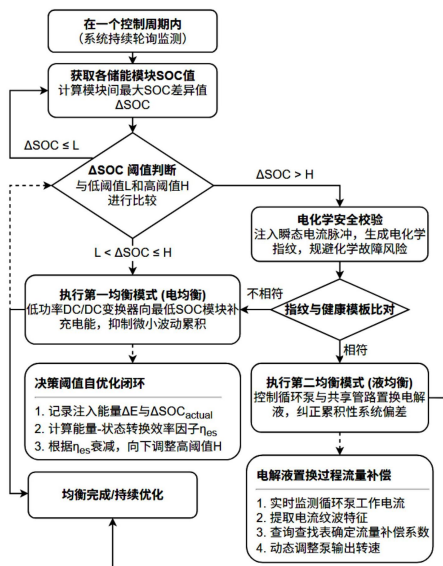
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法

(57) 摘要

本发明属于电力系统储能控制领域,公开一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,包括:在控制周期内获取各储能模块的荷电状态并计算最大差异值;依据该差异值与低阈值和高阈值的比较结果,选择性地执行第一均衡模式或第二均衡模式,其中,仅在差异值超过高阈值并且通过一项前置的电化学安全校验时,才授权执行第二均衡模式,本发明通过建立一种分阶段诊断与模式切换的控制规程,并为高风险的均衡模式强制关联了前置安全校验,从而将预防性维护与纠正性处置相结合,在消除均衡维护性停机的同时,从而规避了因不当操作引发灾难性化学故障的风险,提升了储能系统的运行可用性与内在安全性。



1. 一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,包括:

步骤a,在控制周期内获取各储能模块的荷电状态SOC值,并且计算模块间的最大SOC差异值 $\Delta SOC$ ;

步骤b,将 $\Delta SOC$ 与低阈值L和高阈值H进行比较,其中L小于H;

步骤c,当 $\Delta SOC$ 大于L并且小于等于H时,执行第一均衡模式,该第一均衡模式控制直流侧的低功率DC/DC变换器向SOC值最低的模块补充电能;

步骤d,当 $\Delta SOC$ 大于H时,则在执行第二均衡模式之前,必须执行一项电化学安全校验步骤,该电化学安全校验步骤利用低功率DC/DC变换器向将要混合的电解液注入瞬态电流脉冲,并且采集由瞬态电流脉冲引发的瞬态电压响应,以生成电化学指纹;

步骤e,将电化学指纹与健康指纹模板进行比对,并且仅在电化学指纹的响应特征与健康指纹模板的响应特征相符时,才授权执行第二均衡模式,该第二均衡模式在储能模块运行状态下,控制各模块的电解液循环泵与共享的公共回流管路,实现高SOC模块电解液向低SOC模块的置换。

2. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,步骤e中执行第二均衡模式的具体方式为:控制SOC值最低模块的电解液循环泵将其一部分电解液排入共享的公共回流管路,并且同时控制SOC值最高模块的电解液循环泵从共享的公共回流管路中抽取电解液。

3. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,在步骤e中执行第二均衡模式期间,该方法还包括:实时监测电解液循环泵的工作电流信号,并且提取工作电流信号在频率范围内的幅值作为电流纹波特征;基于电流纹波特征,查询记录了电流纹波特征与流量补偿系数之间映射关系的查找表,以确定流量补偿系数;并且根据流量补偿系数,对电解液循环泵的输出转速进行调整。

4. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,步骤d中瞬态电流脉冲为一方波脉冲;步骤e中,电化学指纹的响应特征与健康指纹模板的响应特征相符的判定规则为:判断瞬态电压响应曲线,在瞬态电压响应曲线未出现幅值超过门限的振荡时,判定为相符。

5. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,该方法还包括:步骤a在执行步骤c的第一均衡模式期间,记录注入的能量总量 $\Delta E$ 以及对应模块SOC值的提升量 $\Delta SOC_{actual}$ ;b周期性地计算能量-状态转换效率因子 $\eta_{es}$ ,其中 $\eta_{es} = \frac{\Delta SOC_{actual}}{\Delta E}$ ,并且根据能量-状态转换效率因子 $\eta_{es}$ 相对于其初始值的衰减比例,向下调整高阈值H的取值。

6. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,步骤b中,低阈值L的取值范围为百分之零点五至百分之二,高阈值H的初始取值范围为百分之五至百分之八。

7. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,步骤e中,当电化学指纹的响应特征与健康指纹模板的响应特征不相符时,则禁止执行第二均衡模式,并且自动转为执行步骤c的第一均衡模式。

8. 根据权利要求1所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在

于,共享的公共回流管路通过由控制器控制的电磁阀与各储能模块的电解液循环回路选择性连通。

9.根据权利要求5所述的一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其特征在于,高阈值H的向下调整,在其每一调整周期内的调整量,不超过其当前取值的百分之五。

## 一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,属于电力系统储能技术领域。

### 背景技术

[0002] 在电网级全钒液流电池储能系统的长期运行中,维持各储能模块间荷电状态即SOC的一致性,是保障系统整体可用容量与运行安全的基础共识,为此,业界已形成两种主流的技术路径,其一是通过在模块间或模块与直流母线间部署DC/DC变换器进行电能的灵活调度,其二则是通过泵阀管路系统对各模块的电解液进行物理混合。

[0003] 然而,当储能系统进入大规模长周期商业化运营的现实情境时,上述两种看似成熟的路径,其各自为了维系自身优势而付出的隐性代价便逐渐凸显,并共同指向一个长期被业界默认接受的设计困境,电均衡方式,其优势在于响应快速且控制灵活,但变换器自身的硬件成本能量转换损耗以及在大规模系统中应对显著SOC差异时的低效率,使其更像是一种修补工具,难以承担大规模能量转移的经济性要求;与此相对,液均衡方式虽能实现能量的无损转移,但其执行过程往往需要系统停机或依赖于复杂的旁路管阀,对系统可用率造成直接影响,其过程的缓慢性也决定了它无法应对运行中高频出现的微小SOC漂移;因此,单纯增强任一路径的能力,例如,试图通过提升电均衡系统的功率来应对大差异,会使其成本与损耗的代价被不成比例地放大,而试图使液均衡系统更复杂化以追求更快的响应,则会进一步恶化系统的可靠性与部署成本。

[0004] 分析可见,现有技术路径的局限在于,其试图用一种静态的单一物理属性的均衡手段,去解决一个在时间尺度上动态演化,且同时包含高频微扰与低频累积偏差双重特性的复杂问题,具体而言,现有技术主要存在以下几方面的不足:1、均衡工具的物理特性与待解决问题的多时间尺度特征之间存在根本性的错配,导致在整个系统生命周期中,不存在任何一个阶段可以让单一均衡方式实现全局最优;2、缺乏一种能够对SOC差异所处演化阶段进行有效识别,并据此调用与之相适应物理干预手段的决策机制,使得均衡操作始终处于一种高射炮打蚊子或杯水车薪的低效状态,因此,如何建立一种能够自主诊断SOC差异的阶段性特征,并以最低的系统代价,在最恰当的时机,调用物理属性最匹配的均衡手段进行时序协同干预的全新储能模块主动均衡控制方法,成为本发明所要解决的技术问题。

### 发明内容

[0005] 本发明提供一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,其主要目的在于解决现有均衡方法因其静态单一的物理属性而无法有效适应SOC差异动态演化特征,从而导致的均衡效能与成本难以兼顾的问题。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,用于全钒液流电池,包括:

[0007] 步骤a,在控制周期内获取各储能模块的荷电状态SOC值,并且计算模块间的最大

SOC差异值  $\Delta$  SOC;

[0008] 步骤b,将  $\Delta$  SOC与低阈值L和高阈值H进行比较,其中L小于H;

[0009] 步骤c,当  $\Delta$  SOC大于L并且小于等于H时,执行第一均衡模式,该第一均衡模式控制直流侧的低功率DC/DC变换器向SOC值最低的模块补充电能;

[0010] 步骤d,当  $\Delta$  SOC大于H时,则在执行第二均衡模式之前,必须执行一项电化学安全校验步骤,该电化学安全校验步骤利用低功率DC/DC变换器向将要混合的电解液注入瞬态电流脉冲,并且采集由瞬态电流脉冲引发的瞬态电压响应,以生成电化学指纹;

[0011] 步骤e,将电化学指纹与健康指纹模板进行比对,并且仅在电化学指纹的响应特征与健康指纹模板的响应特征相符时,才授权执行第二均衡模式,该第二均衡模式在储能模块运行状态下,控制各模块的电解液循环泵与共享的公共回流管路,实现高SOC模块电解液向低SOC模块的置换。

[0012] 优选的,步骤e中执行第二均衡模式的具体方式为:控制SOC值最低模块的电解液循环泵将其一部分电解液排入共享的公共回流管路,并且同时控制SOC值最高模块的电解液循环泵从共享的公共回流管路中抽取电解液。

[0013] 优选的,在步骤e中执行第二均衡模式期间,该方法还包括:实时监测电解液循环泵的工作电流信号,并且提取工作电流信号在频率范围内的幅值作为电流纹波特征;基于电流纹波特征,查询记录了电流纹波特征与流量补偿系数之间映射关系的查找表,以确定流量补偿系数;并且根据流量补偿系数,对电解液循环泵的输出转速进行调整。

[0014] 优选的,步骤d中瞬态电流脉冲为一方波脉冲;步骤e中,电化学指纹的响应特征与健康指纹模板的响应特征相符的判定规则为:判断瞬态电压响应曲线,在瞬态电压响应曲线未出现幅值超过门限的振荡时,判定为相符。

[0015] 优选的,该方法还包括:步骤a在执行步骤c的第一均衡模式期间,记录注入的能量总量  $\Delta E$ 以及对应模块SOC值的提升量  $\Delta SOC_{\text{actual}}$ ;b周期性地计算能量-状态转换效率因子  $\eta_{\text{es}}$ ,其中  $\eta_{\text{es}} = \frac{\Delta SOC_{\text{actual}}}{\Delta E}$ ,并且根据能量-状态转换效率因子  $\eta_{\text{es}}$  相对于其初始值的衰减比例,向下调整高阈值H的取值。

[0016] 优选的,步骤b中,低阈值L的取值范围为百分之零点五至百分之二,高阈值H的初始取值范围为百分之五至百分之八。

[0017] 优选的,步骤e中,当电化学指纹的响应特征与健康指纹模板的响应特征不相符时,则禁止执行第二均衡模式,并且自动转为执行步骤c的第一均衡模式。

[0018] 优选的,查找表在设备出厂标定阶段生成,或者在现场运行中通过自学习算法生成。

[0019] 优选的,共享的公共回流管路通过由控制器控制的电磁阀与各储能模块的电解液循环回路选择性连通。

[0020] 优选的,高阈值H的向下调整,在其每一调整周期内的调整量,不超过其当前取值的百分之五。

[0021] 相比于现有技术,本发明的有益效果是:

[0022] 1、本发明提供了一种储能模块的主动均衡控制方法,该方法首先持续监测各模块间的荷电状态差异量值,当该差异处于较低的第一阈值范围内时,启用一个低功率的电能

补充方式,持续对状态最低的模块进行定向能量注入,此过程平抑了运行中随机产生的微小状态波动,使其难以累积;仅当差异越过较高的第二阈值,表明已形成系统性偏差时,方法才切换至电解液置换均衡方式,通过控制模块自身的循环泵与共享管路,进行大规模的物质转移以纠正偏差,这一双重机制的设立,使得系统对不同演化阶段的状态失衡具备了不同的响应方式,日常运行中的高频微扰被低成本的能量调度所吸收,避免了为应对此类扰动而频繁启动大规模物质转移所带来的系统扰动与损耗,而根本性的偏差累积问题则保留了物质均衡的处置手段,形成了一种预防性维护与纠正性处置相分离的系统健康管理路径。

[0023] 2、本发明的方法还利用前述的低功率电能补充部件,向待混合的电解液施加一个瞬时电信号,并同步采集其电压响应特征,该特征可表征电解液当前的微观化学稳定性;同时,在电解液置换过程中,实时监测循环泵的工作电流信号,并从中提取可反映流体粘度变化的纹波特征,这两个步骤使得均衡控制的决策与执行,不再仅仅依赖于宏观的荷电状态差异,而是进一步获得了对均衡过程物理与化学边界条件的实时洞察,均衡操作的发起,取决于化学稳定性的前置判断,避免了因混合劣化的电解液而引发系统物理故障的风险;均衡操作的执行,则根据流体粘度的实时变化对泵的输出进行动态补偿,维持了均衡过程在不同环境温度下的有效性,通过这种方式,将两个在传统认知中属于离线的需要借助专用仪器才能感知的化学与物理特性,内化为了均衡流程自身的一部分,使均衡操作具备了过程自检与环境自适应的能力。

[0024] 3、本发明的方法在执行微扰动抑制均衡模式期间,还会记录每次定向能量注入的电量值,以及该注入行为所对应的目标模块荷电状态的实际变化量,通过计算这两个物理量的比值,可以得到一个表征该模块能量-状态转换效率的指标,该指标随着电池的长期运行,其变化趋势直接反映了电池健康状态的衰减过程,控制器基于该效率指标的长期变化,对前述用于在两种均衡模式间进行切换的第二阈值进行动态的缓慢的向下调整,这就在系统中建立了一个运行行为与决策逻辑之间的自优化闭环:系统日常的均衡维护动作,其本身就成为了一次对自身健康状态的无感探测;而探测得到的老化信息,又反过来调整了系统应对大偏差的敏感度,使均衡策略能够在电池的全生命周期中,伴随其性能的演化而自行调整,始终保持在与电池当前健康状态相适应的工作点上。

## 附图说明

[0025] 图1为本发明分阶段自优化均衡控制策略流程图;

[0026] 图2为本发明均衡策略下系统可用容量维持效果对比图;

[0027] 图3为本发明闭环自优化均衡控制系统架构示意图。

## 具体实施方式

[0028] 为使本发明的目的技术方案和优点更加清楚,下面将对本发明的技术方案进行详细的描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例,需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合,基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0029] 本发明公开了一种基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法,该方法建立在一个分阶段诊断与模式切换的控制规程上,该规程首先实时获取各储能模块的荷电状态并计算模块间的最大SOC差异值 $\Delta SOC$ ,随后依据该 $\Delta SOC$ 与一个低阈值L和一个高阈值H的比较结果,选择性地执行第一均衡模式或第二均衡模式;其中,第一均衡模式利用低功率电能补充的方式持续抑制运行中产生的微小状态波动,而第二均衡模式则通过电解液置换的方式纠正已形成的累积性系统偏差,并且,第二均衡模式的执行被关联了一项前置的电化学安全校验步骤,用以规避因不当混合操作引发化学故障的风险;在并网运行的全钒液流电池储能系统中,各储能模块因制造公差流场分布不均以及离子交换膜性能非均匀衰减等因素,会产生持续的SOC漂移,为应对此项挑战,本发明的方法被配置为在一个预设的控制周期内,由中央控制器轮询各个储能模块的电池管理单元,获取每一个模块的实时SOC值,并基于采集到的全组数据,计算出当前周期内整个电池簇的最大SOC值与最小SOC值,两者的差值即被定义为最大SOC差异值 $\Delta SOC$ ;该 $\Delta SOC$ 值作为量化系统失衡程度的指标,是后续所有均衡决策的基础输入,此规程使系统能够对自身状态的失衡程度进行持续的定量的监测。

[0030] 鉴于不同量级的 $\Delta SOC$ 对应不同的问题性质,系统采用双阈值比较逻辑以调用相适应的物理干预方式,该逻辑中的低阈值L和高阈值H的确立,基于对系统运行成本与均衡效益的技术权衡;其中,L的取值范围设定于百分之零点五至百分之二,其设定依据在于该值需高于系统SOC传感器的测量噪声与固有误差,以避免控制器对无意义的随机波动做出响应;而H的初始取值范围则设定于百分之五至百分之八,其依据在于当 $\Delta SOC$ 超过此范围时,表明系统中已出现难以通过小功率电能调度在经济有效的时间内纠正的累积性偏差,此时需要切换至更高效的均衡方式,因此,该H值构成了系统在两种均衡模式间进行切换的决策依据;相应地,当控制器判定 $L < \Delta SOC \leq H$ 时,系统自动执行第一均衡模式,在该模式下,控制器将激活一个部署在直流侧的低功率DC/DC变换器,并控制其从直流母线取电,将一股补充电能,定向注入到该控制周期内被识别为SOC值最低的储能模块中;此过程在不中断储能系统正常充放电任务的条件下持续进行,通过对失衡趋势的早期干预,抑制了微小状态波动的累积。

[0031] 当长期运行等因素使得 $\Delta SOC$ 最终越过高阈值H时,系统则准备切换至第二均衡模式,但在执行该模式之前,必须先执行一项电化学安全校验步骤,该步骤利用第一均衡模式中低功率DC/DC变换器,向将要进行混合的电解液注入一个瞬态的形态为方波脉冲的电流信号,同时,控制器以高采样率同步采集由该电流脉冲引发的瞬态电压响应曲线,该曲线被定义为表征当前电解液微观化学稳定性的电化学指纹;系统会将实时采集的电化学指纹与一个在设备健康状态下预存的健康指纹模板进行比对,其判定规则被设定为:判断瞬态电压响应曲线是否出现幅值超过预设门限的振荡,若响应曲线呈现光滑的衰减特征,则判定为与健康指纹模板相符;若电解液中存在微量悬浮晶核或处于析出临界状态,其对高频电脉冲的响应会在曲线上表现为可识别的振荡;仅在电化学指纹与健康指纹模板相符时,控制器才授权执行第二均衡模式,若不相符,则禁止执行第二均衡模式,并自动转为执行第一均衡模式,由此,在执行大规模物质转移之前对化学稳定性进行前置判断,规避了因混合劣化电解液而引发物理故障的风险。

[0032] 在通过电化学安全校验之后,第二均衡模式被执行,该模式通过控制各模块自身

的电解液循环泵与一个共享的公共回流管路实现电解液置换,具体实现方式为:控制器通过控制与各储能模块的电解液循环回路选择性连通的电磁阀,将SOC值最低模块排出的部分电解液导入共享的公共回流管路,与此同时,控制SOC值最高模块从共享的公共回流管路中抽取电解液;如此,在无需额外增设主循环泵且不影响系统运行的状态下,构建了一个物质置换闭环,实现了能量的直接物质转移,规避了电能转换过程中的损耗;为应对低温等环境变化可能导致的电解液粘度增加,进而影响电解液置换流量精确性的问题,在执行第二均衡模式期间,该方法还被配置为实时监测电解液循环泵的工作电流信号,并提取该工作电流信号在特定频率范围内的幅值作为电流纹波特征;基于该电流纹波特征,查询一个记录了电流纹波特征与流量补偿系数之间映射关系的查找表,以确定一个流量补偿系数,并根据该系数对电解液循环泵的输出转速进行调整,查找表在设备出厂标定阶段生成,或者在现场运行中通过自学习算法生成,此举维持了均衡过程在不同工况下的有效性。

[0033] 电化学安全校验步骤中瞬态电流脉冲的参数在标定规程中被确定,其中电流幅值  $I_{pulse}$  的取值范围为储能模块额定容量倍率的0.05C至0.2C,其最终值被设定为在该范围内能够使瞬态电压响应的信噪比高于20dB的最小值,脉冲宽度  $t_{pulse}$  的取值范围为50毫秒至500毫秒,其最终值被设定为能够完整采集到健康电解液双电层充电及初期浓差极化响应所需的最短时间;所述电解液置换过程流量补偿所依据的电流纹波特征,具体是指通过快速傅里叶变换(FFT)算法,对实时采集的循环泵工作电流信号进行处理后,所提取的与泵电机转速对应的基波频率  $f_{base}$  的幅值  $A_{f_{base}}$ ;为使均衡策略能够在电池的全生命周期中自适应调整,本发明还建立了一个运行行为与决策逻辑之间的闭环调节机制,该机制在执行第一均衡模式期间,记录每次定向能量注入的电量总值  $\Delta E$ ,以及该注入行为对应的目标模块荷电状态的实际变化量  $\Delta SOC_{actual}$ ;控制器周期性地利用这两个物理量计算一个能量-状态转换效率因子  $\eta_{es}$ ,其计算公式为  $\eta_{es} = \frac{\Delta SOC_{actual}}{\Delta E}$ ,该  $\eta_{es}$  因子反映了注入的电能转化为有效化学储能的比例,其随电池长期运行的衰减趋势体现了电池健康状态的衰退过程;据此,控制器根据  $\eta_{es}$  相对于其初始值的衰减比例,向下调整高阈值H的取值,为保证调整过程的稳定性,在其每一调整周期内的调整量,被限制为不超过其当前取值的百分之五,系统在执行日常均衡维护的同时,即完成了对自身健康状态的探测,而探测得到的老化信息,又反过来调整了系统均衡策略的敏感度。

[0034] 高阈值H的自优化调整规程被周期性地执行,其核心是依据能量-状态转换效率因子  $\eta_{es}$  的衰减比例来更新高阈值H的取值,具体的,更新后的高阈值  $H_{new}$  通过以下公式计算得出:  $H_{new} = H_{initial} \times \left( k \cdot \frac{\eta_{es,current}}{\eta_{es,initial}} + (1 - k) \right)$ ,其中  $H_{initial}$  为高阈值的初始设定值,  $\eta_{es,initial}$  为系统健康状态下的初始效率因子,  $\eta_{es,current}$  为当前计算周期的效率因子,而k则是一个预设的且取值范围在0至1之间的无量纲数,即衰减敏感度系数,用以调节H值随  $\eta_{es}$  衰减的跟踪速率;并且,在该规程的最后一步,将计算出的  $H_{new}$  与当前的H值进行比较,若单次调整的绝对变化量超过当前H值的百分之五,则本次的实际调整量被限定为当前H值的百分之五。

[0035] 实施例1:在一个为平抑大规模光伏发电并网波动而配置的百兆瓦级全钒液流电池储能电站中,该电站已连续运行超过两年并用于执行削峰填谷及电网调频任务,在近期的性能评估中,该储能系统的实际可用容量相较于额定设计值已下降超过百分之十五,其

具体表现为,在执行满功率深度充放电调度时,部分储能模块会因率先触及充电电压上限或放电电压下限,而导致整个电池簇提前终止能量吞吐,此状况已影响该电站的合同能源调度能力;为应对此工况,该储能系统部署了上述所公开的主动均衡控制方法,在控制系统接管后的一个运行周内,控制器通过持续监测识别出各储能模块间的最大SOC差异值 $\Delta SOC$ 在百分之三至百分之四的区间内波动,该波动幅值超过了设定为百分之二的低阈值L,但未触及初始设定为百分之七的高阈值H,因此,系统持续自动执行第一均衡模式,利用低功率DC/DC变换器对每日运行中SOC最低的模块进行定向的能量补充;此一阶段的运行,抑制了因日常充放电不一致性所导致的高频SOC漂移的进一步累积,使得储能系统在执行常规调频等任务时,其响应一致性得到维持,并规避了因均衡维护而执行计划性停机的需要。

[0036] 随着季节变化,电网对储能电站下达了连续数日的深度能量时移指令,在此期间,由于长时间高倍率循环,部分模块的性能衰减差异被放大,导致 $\Delta SOC$ 在一个充电末期攀升至百分之七点五,该值已超过高阈值H,系统判定需执行第二均衡模式以纠正此系统性偏差;在该模式的泵阀动作实际执行之前,一项前置的电化学安全校验步骤被触发,校验系统利用低功率DC/DC变换器向待混合的电解液注入瞬态电流脉冲,所采集的瞬态电压响应呈现出超过门限的振荡特征,系统据此判定当前电解液因经历过度的电化应力而处于微观不稳定状态,若混合则存在析出风险,因此,控制器中止了本次第二均衡模式的执行,并自动转为执行功率有所提升的第一均衡模式,同时向运维系统发出预警;在后续数个缓和的充放-放电循环后,电解液化学状态趋于稳定,此时 $\Delta SOC$ 仍维持在百分之七以上,系统再次触发第二均衡模式的执行流程,这一次,前置电化学安全校验步骤所获取的电化学指纹与健康指纹模板比对相符,控制器随即授权执行电解液置换,通过调度相关模块的循环泵与共享的公共回流管路。

[0037] 在不影响电站并网运行的前提下,完成了高低SOC模块间的电解液置换,在数小时的均衡过程后, $\Delta SOC$ 被重新抑制至百分之三以下,储能电站的可用容量得到恢复,在后续的长期运行中,控制器利用第一均衡模式的执行过程,对电池健康状态进行伴随式诊断,在每次执行电能注入后,均记录注入能量 $\Delta E$ 与对应模块的 $\Delta SOC_{actual}$ ,并周期性地计算能量-状态转换效率因子 $\eta_{es}$ ;在为期一年的数据追踪中,系统观测到 $\eta_{es}$ 的平均值相对其初始值下降了约百分之十,此数据表明电池系统的整体健康状态出现了可量化的衰减,作为响应,控制系统依据 $\eta_{es}$ 的变化比例,将高阈值H的取值从初始的百分之七,向下调整至百分之六.三,此一调整使得系统对于较大SOC差异的响应更为灵敏,能够在电池老化的背景下,更早地介入纠正性处置,以维持其全生命周期的性能;该储能电站的均衡控制不再是一个静态的基于固定阈值的开环指令系统,而转变为一个能够依据运行历史与内部状态进行闭环自调整的规程,其不同均衡模式之间的切换与协同,以及决策参数的动态演化,共同作用以应对一个在时间尺度上动态变化的系统失衡问题。

[0038] 实施例2:为定量验证本发明主动均衡控制方法在维持储能系统可用容量方面的技术效果,搭建了一个由八个独立的千瓦级全钒液流电池储能模块组成的硬件在环仿真测试平台,该平台包含中央控制器、各模块电池管理单元、循环泵、电磁阀、共享的公共回流管路以及一个与直流母线相连的低功率DC/DC变换器,能够完整复现具体实施方式中控制逻辑与物理执行过程,试验中,设置一个采用本发明双模态自适应均衡控制方法的试验组,以及一个采用仅在SOC差异超过固定高阈值后执行停机全混液操作的对照组;试验开始前,将

两组试验系统中的所有储能模块充电至SOC为95%的初始一致状态,随后,通过对每个组内的四个模块进行不同程度的单独放电,在每个组内构建一个初始最大SOC差异值 $\Delta$  SOC为10%的失衡状态,该状态用以模拟储能系统长期运行后产生的不一致性;整个试验过程执行200个加速循环的充放电测试,并在每个循环中向各模块注入一个均值为零方差为0.01%的随机SOC扰动,用以模拟实际运行中微小不确定因素的持续累积效应,试验期间,以1s为控制周期持续监测各模块的SOC,并每20个循环执行一次全系统的标准容量测试,以获取当前时刻的系统实际可用容量。

[0039] 在整个测试过程中,若将对照组的系统可用容量随循环次数的变化进行观察,可看到一条初始缓慢后加速下降的轨迹,至第80个循环时,其可用容量已由初始的90.2%下降至85.3%,此时 $\Delta$  SOC已累积至14.8%,在第82个循环后,因执行了长达6小时的停机混液维护,其可用容量出现一个断点式的跃升,恢复至96.2%,但随后便再次进入新一轮的下降通道,至测试终点第200个循环时可用容量跌落至92.3%;与此相对,试验组的可用容量轨迹则呈现出在初始快速恢复后,长期维持在高位的平稳状态,系统在初始阶段通过在线的电解液置换,于4小时内便将可用容量从90.2%提升至98.1%,并在后续整个测试周期内,其容量值始终维持在97.1%以上,最大 $\Delta$  SOC亦被持续抑制在5%以下,需要指出的是,试验组在整个测试周期内累计均衡停机时间为0小时。

[0040] 此数据差异的内在机理在于,试验组所采用的双模态控制方式,通过第一均衡模式持续地对冲了系统运行中产生的高频微小不平衡,阻止了其向大的系统性偏差演化,从而维持了系统健康,而对照组的单一阈值停机维护方式,是一种被动的补救式的措施,其无法抑制偏差的日常累积过程,导致系统在绝大部分时间内均工作在非优化的状态;试验结果证实,本发明控制方法,通过建立分阶段自适应的均衡规程,能够在不影响储能系统可用率的前提下,将各模块间的SOC差异持续抑制在一个较低的范围,从而维持了系统整体的可用容量。

[0041] 实施例3:本实施例结合图1至图3,对基于SOC差异的储能模块主动均衡控制方法说明,如图1所示,该流程在一个持续轮询监测的控制周期内启动,首先获取各储能模块的荷电状态SOC值并计算出模块间的最大SOC差异值 $\Delta$  SOC,随后将该 $\Delta$  SOC值与预设的低阈值L和高阈值H进行阈值判断比较,当 $\Delta$  SOC $\leq$ L时,系统维持监测而不执行均衡动作,当 $L < \Delta$  SOC $\leq$ H时,则执行第一均衡模式即电均衡,通过低功率DC/DC变换器向SOC值最低的模块补充充电能,以抑制微小波动的累积,当 $\Delta$  SOC $>$ H时,则必须先执行一项电化学安全校验,通过向电解液注入瞬态电流脉冲以生成电化学指纹,并将该指纹与健康模板进行比对,若比对不相符,则转为执行第一均衡模式,若比对相符,则授权执行第二均衡模式即液均衡,通过控制循环泵与共享管路置换电解液,以纠正累积性的系统偏差,在执行第一均衡模式后,系统进入决策阈值自优化闭环,通过记录注入能量 $\Delta$  E与实际状态提升量 $\Delta$  SOC<sub>actual</sub>,计算能量-状态转换效率因子 $\eta_{es}$ ,并根据该因子的衰减趋势向下调整高阈值H;在执行第二均衡模式的过程中,系统并行执行电解液置换过程流量补偿,通过实时监测循环泵工作电流并提取电流纹波特征,查询查找表以确定流量补偿系数,进而动态调整泵的输出转速,最终在均衡完成后持续进行优化。

[0042] 如图2所示,该图的横坐标为充放电循环次数,纵坐标为系统可用容量的百分比,图中实线代表采用本发明双模态控制的试验组,其系统可用容量在初始阶段快速从约90%

提升至98%以上后,在整个200次的循环测试周期内始终平稳地维持在97%以上的高位,虚线则代表采用传统停机混液方法的对照组,其系统可用容量从初始状态持续下降,在第82个循环时跌至约85%后,因执行停机维护而断点式跃升至约96%,但随后便再次进入新一轮的下降通道,至测试终点时已跌落至94%以下,此对比表明,本发明方法能够将系统可用容量在整个测试周期内维持在较高水平。

[0043] 如图3所示,其中,储能模块向1.0监测并计算SOC差异功能块提供各模块的实时SOC值,该功能块依据均衡阈值库中的低阈值与高阈值计算出最大SOC差异值,并传递给2.0分析差异并决策功能块,决策功能块根据差异分析结果,分别发出第一均衡模式指令或第二均衡模式预指令,第一均衡模式指令驱动3.0执行电均衡功能块,该功能块向DC/DC变换器发出电能补充控制信号,并将注入能量与SOC变化量记入均衡过程日志,第二均衡模式预指令则启动4.0执行安全校验功能块,该功能块调取健康指纹模板的数据进行比对,若校验未通过则向功能块3.0发出指令,若校验通过则向5.0执行液均衡功能块发出指令,该功能块随即向电解液泵与阀发出液路通断与转速控制信号,最终,均衡过程日志中的历史数据被6.0周期性优化均衡阈值功能块用于计算,其产生的更新后的高阈值被写回均衡阈值库,从而形成一个完整的闭环自优化控制系统。

[0044] 实施例4:在一个全钒液流电池储能模块出厂前的标定与测试流程中,为确保其控制系统内部署的电化学安全校验及流量补偿功能具备明确的性能基准,需要对控制算法所依赖的部分模型与参数进行生成与配置,此过程将控制逻辑所需的部分参数,通过一个工程规程转化为与特定硬件系统相对应的嵌入式数据;该流程在一个配备有外部流量计多点温度传感器以及可编程环境温控舱的测试台上进行,首先,向待标定的储能模块中注入经成分分析的SOC为50%处于25°C恒温状态下的电解液,控制器在此基准状态下,执行电化学安全校验步骤,即通过低功率DC/DC变换器向电解液注入方波电流脉冲,并以1MHz的采样率记录其瞬态电压响应,此操作重复执行50次,并将采集到的50条响应曲线进行平均化处理以消除随机噪声干扰,所生成的平均曲线即被固化为该模块的健康指纹模板并存储于控制器内存中;与此同时,分析这50条原始响应曲线在脉冲结束后的弛豫阶段的电压波动幅值,计算其最大值为 $V_{noise\_max}$ ,进而,用于判断电化学指纹是否异常的振荡幅值门限,被设定为 $V_{noise\_max}$ 的8倍,该系数的选择是在信号处理的信噪比要求与故障检测的灵敏度之间进行权衡后确定的。

[0045] 随后,流程进入对流量补偿查找表的标定阶段,测试台的环境温控舱以5°C为步进,驱动电解液温度从-5°C遍历至40°C,在每一个温度稳定点上,控制器以额定转速的10%为步进,控制电解液循环泵的转速从20%变化至100%,在每一个稳定的转速下,系统同步记录两个数据:由外部流量计测得的实际管路流量值,以及由控制器通过数字信号处理算法从泵的工作电流信号中提取的电流纹波特征值;通过此遍历过程,系统获得了一系列在不同温度与转速下,电流纹波特征值与实际流量值的一一对应数据对,这些数据对被组织成一个二维查找表并烧录至控制器中,如此,在实际运行时,控制器便可通过实时监测电流纹波这一电学量,并结合已知的电解液温度,查询此查找表以获取对泵当前实际输出流量的补偿系数;在完成了上述标定规程后,该储能模块的控制器中便包含了基于本次物理标定结果的一套参数集,其中包括用于化学安全前置判断的健康指纹模板与振荡判定门限,以及用于在不同环境温度下维持均衡过程有效性的流量补偿模型,该模块由此能够在无外

部流量传感器支持的情况下,依靠自身电学信号进行状态感知与运行调整。

[0046] 实施例5:在一个已并网连续运行24个月的全钒液流电池储能系统中,为对控制系统内各储能模块的荷电状态SOC估算模型的参数进行周期性校准,以计入电池因长期循环而产生的容量衰减与电化学特性漂移,系统执行了一次预设的标定规程,该规程的触发条件为系统累计运行时间达到维护周期,或监测到任一模块的能量-状态转换效率因子 $\eta_{es}$ 在连续多个计算周期内低于其初始值的特定比例。

[0047] 该标定规程启动后,控制器在一个电网负荷的低谷期,将整个储能系统以0.1C的低倍率恒流充电至充电截止电压并静置至各模块端电压稳定,此刻记为SOC100%的基准点;随后,系统以相同的0.1C倍率恒流放电至放电截止电压,并在该过程中累计所有模块实际释放的总安时数,此数值被用作对当前全系统实际可用容量的更新;在放电过程中的多个预设状态点,控制器暂停放电并进行静置,待各模块开路电压稳定后,记录下一组包含当前累计放出安时数与稳定开路电压的数据对,这些数据对被用于更新存储于各模块电池管理单元内部的SOC-OCV曲线,从而完成了对SOC估算模型核心参数的重标定,使得后续用于计算能量-状态转换效率因子 $\eta_{es}$ 的 $\Delta SOC_{actual}$ 值,能够基于更新后的模型参数进行估算。

[0048] 实施例6:在一个新部署的全钒液流电池储能系统投入商业运行前的现场调试阶段,为给主动均衡控制方法中的低阈值L与高阈值H设定与当前场站工况及硬件噪声水平相适应的初始值,系统执行了一套参数寻优规程,该规程首先在储能系统完成初始充电并处于静态待机状态时,由中央控制器以高频次连续采集所有储能模块的SOC读数并计算 $\Delta SOC$ 值,持续监测1小时,通过对该时间段内采集到的 $\Delta SOC$ 序列数据进行统计分析,计算出其标准差 $\sigma_{\Delta SOC}$ ,该值反映了当前系统整体的传感器与通讯链路的固有噪声水平,进而,低阈值L的初始值被设定为3倍 $\sigma_{\Delta SOC}$ ,以使后续的第一均衡模式避免对系统噪声产生响应。

[0049] 随后,规程进入对高阈值H的寻优阶段,其目标在于寻找第一均衡模式的经济运行边界点,控制器首先对特定模块进行微小放电,在系统内构建一个 $\Delta SOC$ 为2%的初始状态,接着,激活第一均衡模式并记录将其 $\Delta SOC$ 从2%降至1%所需的能量消耗 $E_{elec}$ ;此过程被重复执行,初始 $\Delta SOC$ 以1%为步进依次设定为3%、4%直至10%,系统由此获得了一组描述不同 $\Delta SOC$ 水平下,单位 $\Delta SOC$ 降幅所对应的能量消耗 $E_{elec}$ 的数据点,通过分析这组数据,可观察到 $E_{elec}$ 在 $\Delta SOC$ 较低时增长平缓,但超过某一区间后其增长斜率增大,该斜率的拐点被识别为第一均衡模式经济性的边界,据此,高阈值H的初始值被设定在该拐点对应的 $\Delta SOC$ 数值,从而将两种均衡模式的切换点,锚定在一个由当前系统实测效率曲线确定的工作点上。

[0050] 对于本领域技术人员而言,显然本发明不限于上述示范性实施例的细节,而且在不背离本发明的精神或基本特征的情况下,能够以其他的具体形式实现本发明。

[0051] 最后应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或等同替换,而不脱离本发明技术方案的精神和范围。

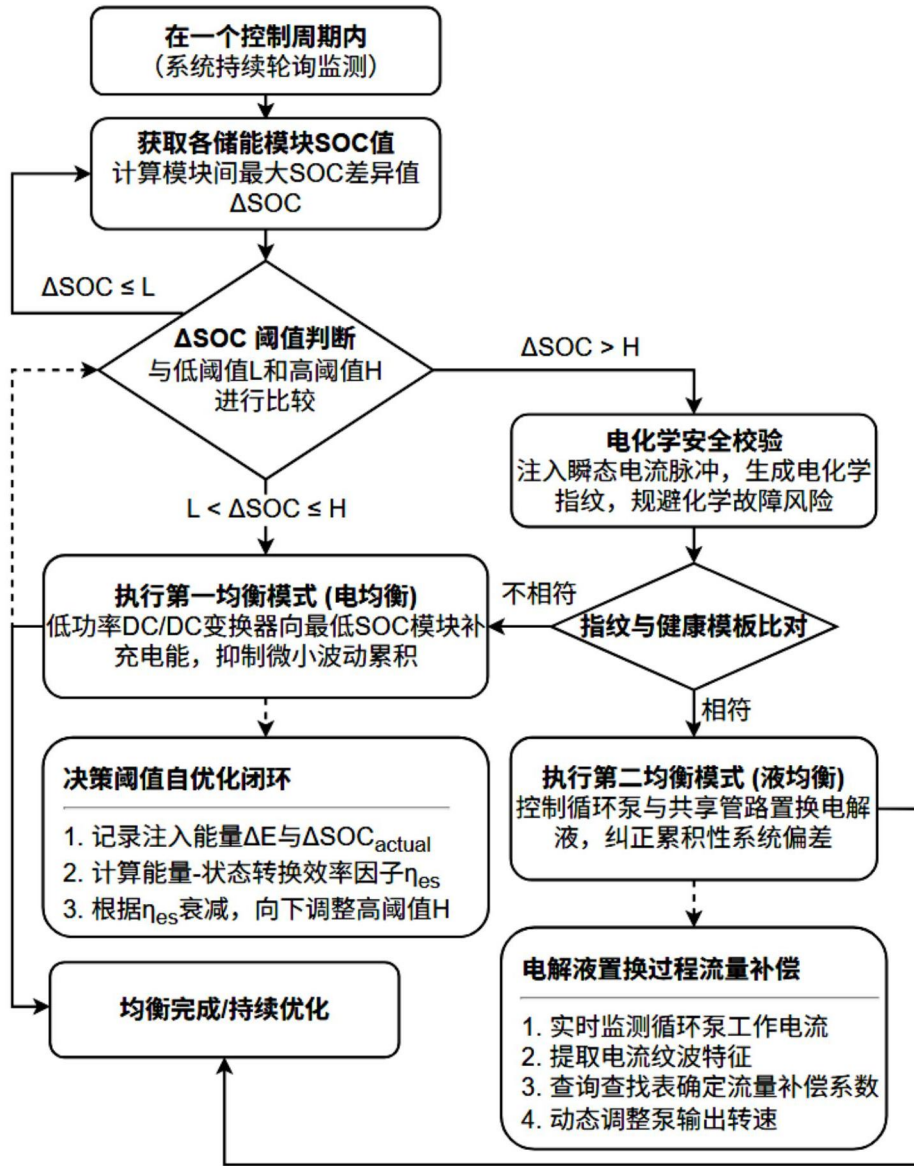


图1

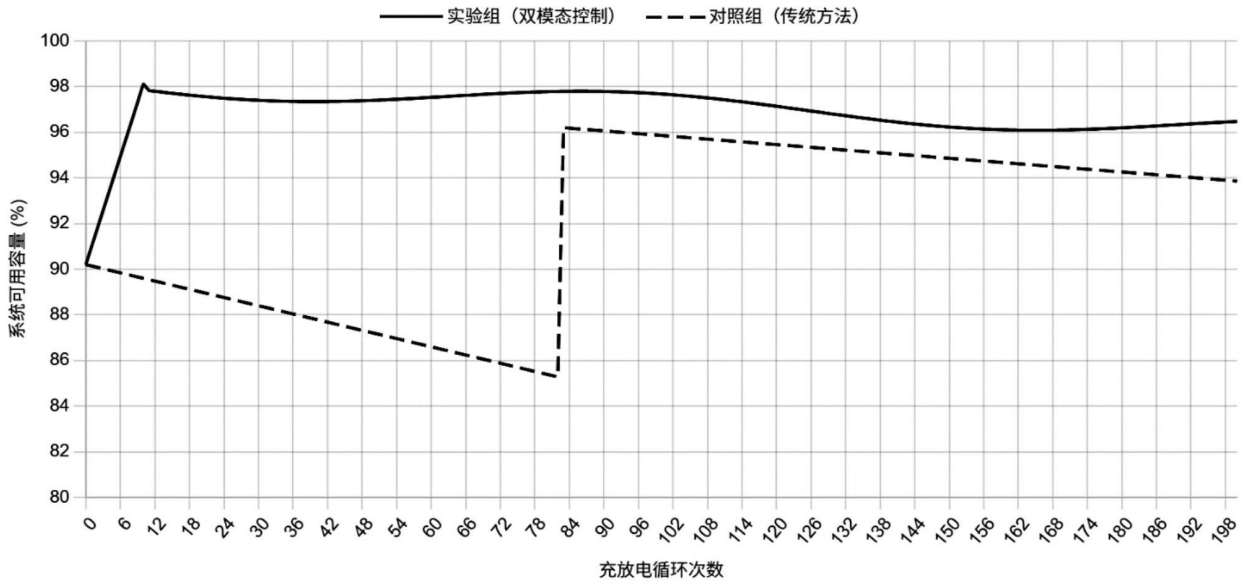


图2

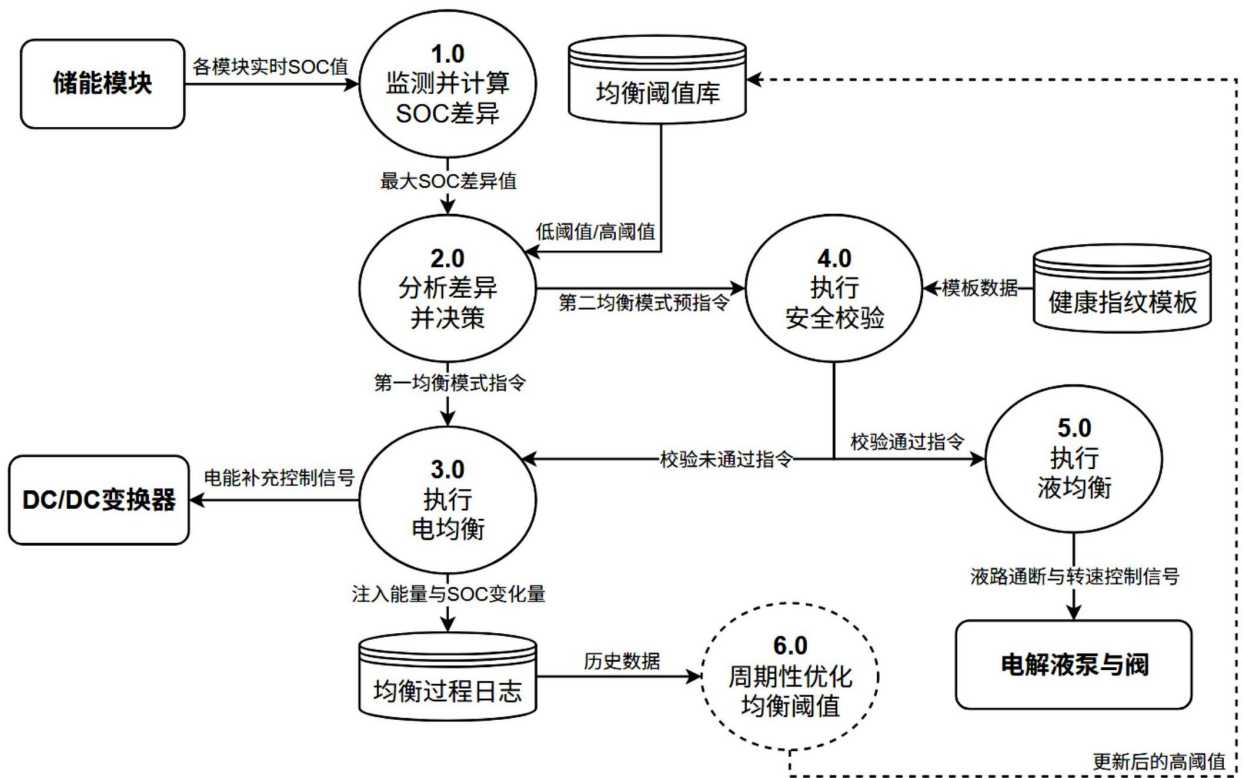


图3