



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 121978536 A

(43) 申请公布日 2026. 05. 05

(21) 申请号 202610229782.9

(22) 申请日 2026.02.26

(71) 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

申请人 大连融科储能集团股份有限公司

(72) 发明人 陈磊 王世宇 蹇傲霖 吴静波

赵都 徐世龙 徐飞 闵勇 郝玲

(74) 专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司

公司 11002

专利代理师 周磊

(51) Int. Cl.

G01R 31/367 (2019.01)

G01R 31/378 (2019.01)

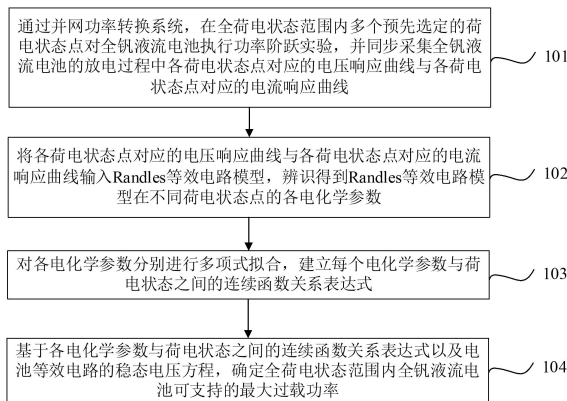
权利要求书3页 说明书18页 附图2页

## (54) 发明名称

全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置

## (57) 摘要

本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置,该方法包括:通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个荷电状态点对电池执行功率阶跃实验,并同步采集电池放电过程中各荷电状态点对应的电压响应曲线与电流响应曲线;将各荷电状态点对应的电压响应曲线与电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到各电化学参数;对各电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;基于各连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率。本发明实现了全钒液流电池功率过载能力的精确、连续且可预测的评估。



1. 一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,包括:

通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

2. 根据权利要求1所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,包括:

针对任一所述荷电状态点,通过所述并网功率转换系统将并网输出功率以预设速度提升至预设额定值,以使所述全钒液流电池的放电功率发生阶跃式增加。

3. 根据权利要求1所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数,包括:

基于各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线,获取各所述荷电状态点对应的电压与电流数据;

构建以所述Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题;所述Randles等效电路模型为包含串联欧姆电阻、以及由电荷转移电阻与双电层电容并联构成的RC环路的一阶等效电路模型;

基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对所述优化问题进行迭代求解,通过最小化所述均方根误差,确定模型参数的最优估计值;所述模型参数的最优估计值表征辨识得到的各所述电化学参数。

4. 根据权利要求3所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述构建以所述Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题,包括:

确定待优化的模型参数向量,所述待优化的模型参数向量中至少包括欧姆电阻、电荷转移电阻及双电层电容;

建立目标函数;所述目标函数被配置为在给定所述模型参数向量下,计算所述模型预测电压序列与所述实测电压序列之间的均方根误差;所述模型预测电压序列为基于所述模型参数向量及实测电流序列,通过求解所述Randles等效电路模型对应的微分方程得到的。

5. 根据权利要求3所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对所述优化问题进行迭代求

解,通过最小化所述均方根误差,确定模型参数的最优估计值,包括:

生成所述优化算法的初始候选解集合;

在每一次迭代中,对当前候选解集合中的每一个候选解执行如下步骤:利用所述候选解代表的模型参数值及实测电流数据,进行电路模型仿真,得到所述候选解对应的模型预测电压;计算所述候选解对应的模型预测电压与实测电压的误差,作为所述候选解的适应度值;根据各所述候选解的适应度值更新所述当前候选解集合,生成下一次迭代的候选解;所述实测电流数据和所述实测电压基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据确定;

在满足迭代终止条件的情况下,将适应度值最高的所述候选解对应的模型参数值确定为所述模型参数的最优估计值。

6. 根据权利要求1-5任一项所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式,包括:

针对任一所述电化学参数,从一次多项式开始进行拟合,计算当前多项式的决定系数;

在满足预设条件的情况下,增加多项式次数并重新进行拟合;所述预设条件为所述当前多项式的决定系数小于预设精度阈值且当前多项式次数未达到预设最高次数;

在不满足所述预设条件的情况下,停止拟合并选取决定系数最大的多项式作为所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式。

7. 根据权利要求6所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述预设精度阈值为0.9,所述预设最高次数为三次。

8. 根据权利要求1-5任一项所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率,包括:

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式,结合所述稳态电压方程以及预设的电池最低安全电压限制,计算并输出所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

9. 根据权利要求8所述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,其特征在于,所述电池最低安全电压限制根据全钒液流电池单体的电化学特性与长期运行寿命要求确定。

10. 一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置,其特征在于,包括:

数据采集模块,用于通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

参数辨识模块,用于将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

多项式拟合模块,用于对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

最大过载功率计算模块,用于基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池

可支持的最大过载功率。

## 全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电化学储能系统技术领域,尤其涉及一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置。

### 背景技术

[0002] 随着可再生能源渗透率持续提升,电网对储能系统快速功率响应与过载能力的需求日益增强。全钒液流电池因其功率与容量解耦、寿命长、安全性高等优势,被广泛应用于调频、调峰、构网型主动支撑等场景。然而,全钒液流电池的电化学特性决定了电池在不同荷电状态(State of Charge, SOC)下内阻、开路电压等电化学参数存在显著差异,导致全钒液流电池可承受的过载功率具有强SOC依赖性。

[0003] 当前,多数液流电池系统在功率调度与保护策略设计中仍采用固定功率限值或经验安全裕度,这种方法在低SOC或高SOC工况下可能导致:

(1) 保守运行:限制系统动态响应能力,降低储能利用率;

(2) 风险运行:低估内阻上升或电压跌落风险,引发电池过放、析氢、膜损伤等不可逆损害,从而威胁系统安全。

[0004] 因而,亟需一种有效的技术方案以解决上述技术问题。

### 发明内容

[0005] 本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置,本发明实现了全钒液流电池功率过载能力的精确、连续且可预测的评估,有助于提升液流电池系统在复杂工况下的安全性与动态响应性能。

[0006] 第一方面,本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,该方法包括如下步骤:

通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0007] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶

跃实验,包括:

针对任一所述荷电状态点,通过所述并网功率转换系统将并网输出功率以预设速度提升至预设额定值,以使所述全钒液流电池的放电功率发生阶跃式增加。

[0008] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数,包括:

基于各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线,获取各所述荷电状态点对应的电压与电流数据;

构建以所述Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题;所述Randles等效电路模型为包含串联欧姆电阻、以及由电荷转移电阻与双电层电容并联构成的RC环路的一阶等效电路模型;

基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对所述优化问题进行迭代求解,通过最小化所述均方根误差,确定模型参数的最优估计值;所述模型参数的最优估计值表征辨识得到的各所述电化学参数。

[0009] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述构建以所述Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题,包括:

确定待优化的模型参数向量,所述待优化的模型参数向量中至少包括欧姆电阻、电荷转移电阻及双电层电容;

建立目标函数;所述目标函数被配置为在给定所述模型参数向量下,计算所述模型预测电压序列与所述实测电压序列之间的均方根误差;所述模型预测电压序列为基于所述模型参数向量及实测电流序列,通过求解所述Randles等效电路模型对应的微分方程得到的。

[0010] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对所述优化问题进行迭代求解,通过最小化所述均方根误差,确定模型参数的最优估计值,包括:

生成所述优化算法的初始候选解集合;

在每一次迭代中,对当前候选解集合中的每一个候选解执行如下步骤:利用所述候选解代表的模型参数值及实测电流数据,进行电路模型仿真,得到所述候选解对应的模型预测电压;计算所述候选解对应的模型预测电压与实测电压的误差,作为所述候选解的适应度值;根据各所述候选解的适应度值更新所述当前候选解集合,生成下一次迭代的候选解;所述实测电流数据和所述实测电压基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据确定;

在满足迭代终止条件的情况下,将适应度值最高的所述候选解对应的模型参数值确定为所述模型参数的最优估计值。

[0011] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系

表达式,包括:

针对任一所述电化学参数,从一次多项式开始进行拟合,计算当前多项式的决定系数;

在满足预设条件的情况下,增加多项式次数并重新进行拟合;所述预设条件为所述当前多项式的决定系数小于预设精度阈值且当前多项式次数未达到预设最高次数;

在不满足所述预设条件的情况下,停止拟合并选取决定系数最大的多项式作为所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式。

[0012] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述预设精度阈值为0.9,所述预设最高次数为三次。

[0013] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率,包括:

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式,结合所述稳态电压方程以及预设的电池最低安全电压限制,计算并输出所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0014] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述电池最低安全电压限制根据全钒液流电池单体的电化学特性与长期运行寿命要求确定。

[0015] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率用最大过载功率能力曲线表示;所述方法还包括:

根据所述最大过载功率能力曲线与实时监测的所述全钒液流电池的当前荷电状态,确定第一电流限值;所述第一电流限值用于确保电池端口电压不低于最低安全电压限制;

获取基于变流器自身器件安全与并网规范要求的第二电流限值;

在所述变流器的运行控制中,采用所述第一电流限值与所述第二电流限值中的较小值作为最终执行的输出电流限制值,以实现与所述全钒液流电池过载安全与所述变流器运行安全的双重保护。

[0016] 根据本发明提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,所述方法还包括:

基于所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率,生成所述全钒液流电池在不同实时荷电状态下的功率调度建议或过载保护阈值。

[0017] 第二方面,本发明还提供一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置,该装置包括如下模块:

数据采集模块,用于通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

参数辨识模块,用于将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

多项式拟合模块,用于对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

最大过载功率计算模块,用于基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0018] 第三方面,本发明还提供一种电子设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现如上述任一种所述全钒液流电池的功率过载能力评估方法。

[0019] 第四方面,本发明还提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现如上述任一种所述全钒液流电池的功率过载能力评估方法。

[0020] 第五方面,本发明还提供一种计算机程序产品,包括计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如上述任一种所述全钒液流电池的功率过载能力评估方法。

[0021] 本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置,首先通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集全钒液流电池的放电过程中各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线;然后,将各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到Randles等效电路模型在不同荷电状态点的各电化学参数;进一步地,对各电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;进而,基于各电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0022] 本发明通过在典型SOC点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,测量得到电压电流曲线,结合Randles模型进行等效参数(电化学参数)辨识,通过多项式拟合构建得到等效参数(电化学参数)与SOC的连续映射关系,进而基于电路稳态方程评估全SOC范围内全钒液流电池的功率过载能力。本发明不依赖经验阈值,物理意义明确,可实现全钒液流电池功率过载能力的精确、连续且可预测的评估,有助于提升液流电池系统在复杂工况下的安全性与动态响应性能。

## 附图说明

[0023] 为了更清楚地说明本发明或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0024] 图1是本发明提供的全钒液流电池的功率过载能力评估方法的流程示意图。

[0025] 图2是本发明提供的全钒液流电池的Randles等效电路模型的示意图。

[0026] 图3是本发明提供的全钒液流电池的功率过载能力评估装置的结构示意图。

[0027] 图4是本发明提供的电子设备的结构示意图。

## 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,下面将结合本发明中的附图,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述,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。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作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] 本申请的说明书和权利要求书中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的术语在适当情况下可以互换,以便本申请的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施,且“第一”、“第二”所区别的对象通常为一类,并不限定对象的个数,例如第一节点可以是一个,也可以是多个。此外,说明书以及权利要求中“和/或”表示所连接对象的至少其中之一,字符“/”一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。

[0030] 为解决现有技术中的上述问题,本发明提出一种基于多SOC点实验辨识与参数-SOC连续建模的全钒液流电池功率过载能力评估方法,具体地,提供一种面向全钒液流电池(Vanadium Redox Flow Battery, VRFB)系统的功率过载能力量化评估方法,适用于电池在不同荷电状态SOC下动态极限功率边界的准确建模与安全阈值整定,可为储能系统功率调度、过载保护策略制定及系统级动态响应能力设计提供科学依据。

[0031] 下面结合图1至图4描述本发明的全钒液流电池的功率过载能力评估方法和装置。

[0032] 图1是本发明提供的全钒液流电池的功率过载能力评估方法的流程示意图,如图1所示,该方法包括如下:

步骤101、通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集全钒液流电池的放电过程中各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线。

[0033] 具体地,本发明的执行主体为电子设备,本发明实施例提供的方法旨在准确量化全钒液流电池在不同荷电状态(SOC)下可承受的功率过载极限。

[0034] 首先,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点(例如典型SOC点,包括20%、40%、60%、80%)分别对全钒液流电池执行功率阶跃实验。其中,所述功率阶跃实验中,功率提升速率由并网功率转换系统(Power Conversion System, PCS)控制,以模拟真实系统功率突增工况。

[0035] 实际应用中,通过电池的并网功率转换系统(PCS)快速提升并网输出功率至预设额定值,并且,同步采集电池放电过程中的电压与电流响应曲线,数据采样率如设置为大于等于100Sa/s(样本/秒)。

[0036] 步骤102、将各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到Randles等效电路模型在不同荷电状态点的各电学化学参数。

[0037] 具体地,在得到各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线之后,将采集的各荷电状态点的电压与电流数据(不同荷电状态的电压电流曲线)输入Randles等效电路模型中,辨识所有SOC点下的电学化学参数。其中,电学化学参数包括:开路电压 $U_{oc}$ 、欧姆电阻 $R_0$ 、电荷转移电阻 $R_{ct}$ 及双电层电容 $C_{dl}$ 等关键电学化学参数。其中,开路电压 $U_{oc}$ 辨识值为扰动前电压数据平均值,欧姆电阻 $R_0$ 、电荷转移电阻 $R_{ct}$ 及双电层电容 $C_{dl}$ 的初始

值为(0.1欧姆 $\Omega$ ,0.1欧姆 $\Omega$ ,0.1法拉F),电容电压初值 $U_{cd10}=0$ 。

[0038] 其中,Randles等效电路模型提供了物理拓扑,用电路(电阻、电容)的特定连接方式,形象地描述了全钒液流电池内部的物理和电化学过程。图2是本发明提供的全钒液流电池的Randles等效电路模型的示意图,如图2所示,该模型由一个直流电压源、一个欧姆电阻以及一个RC并联网路串联而成,其输出端连接至电网侧,用于模拟电池在并网放电过程中的外特性。 $U_{oc}$ 代表电池的开路电压,串联一个欧姆电阻 $R_0$ ,RC并联网路包括电荷转移电阻 $R_{ct}$ 以及双电层电容 $C_{dl}$ 。

[0039] 实际应用中,可以基于电化学参数的初始值以及电压电流曲线,对Randles等效电路模型对应的RC一阶微分方程进行求解,RC一阶微分方程是描述该模型中RC并联支路动态行为的精确数学法则。RC一阶微分方程将电路拓扑翻译成了可进行数值计算和分析的数学语言。具体地,通过欧姆电阻 $R_0$ 、电荷转移电阻 $R_{ct}$ 及双电层电容 $C_{dl}$ 的参数迭代对RC一阶微分方程的残差进行最小化,最终辨识得到不同荷电状态点的各电化学参数。

[0040] 步骤103、对各电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式。

[0041] 具体地,在得到各电化学参数之后,继而结合各电化学参数欧姆电阻 $R_0$ 、电荷转移电阻 $R_{ct}$ 及双电层电容 $C_{dl}$ 在不同SOC状态下的辨识值,进行从一次多项式到三次多项式之间的多项式拟合,得到每个电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式。

[0042] 最终输出,例如 $R_0(SOC)$ 、 $R_{ct}(SOC)$ 、 $C_{dl}(SOC)$ 等效电路参数(电化学参数)与SOC的连续函数关系表达式。

[0043] 步骤104、基于各电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0044] 具体地,结合电路稳态方程与预设的电池最低安全电压约束条件 $U_{min}$ 计算全SOC范围内电池可支持的最大过载功率 $P_{max}(SOC)$ ,实现过载能力的连续量化评估。

[0045] 具体计算方式为:结合 $U_{oc}$ 、 $R_0$ 、 $R_{ct}$ 与SOC的关系,以及 $U_{min}$ 固定参数,根据公式(1)可以计算出电池极限过载电流 $I_{max}$ 与SOC的关系,进而根据公式(2)可以计算出电池极限过载功率 $P_{max}$ 。

$$[0046] \quad I_{max} = \frac{U_{oc} - U_{min}}{R_0 + R_{ct}} \quad (1)$$

$$P_{max} = U_{min} I_{max} \quad (2)$$

其中, $I_{max}$ 表示电池极限过载电流, $U_{min}$ 表示预设的电池最低安全电压限制, $U_{oc}$ 表示开路电压, $R_0$ 表示欧姆电阻, $R_{ct}$ 表示电荷转移电阻, $P_{max}$ 表示电池极限过载功率。

[0047] 示例性地,给出一套具体系统参数,一套全钒液流电池系统额定功率10kW,由30个电池单体串联而成,电池最低安全电压约束条件 $U_{min}$ 为30V。具体的实施步骤包括如下:

(1) 在电池SOC=20%、40%、60%、80%处分别设定并网PCS功率指令值为10kW(千瓦),设定示波器采样率为1kSa/s(千样本每秒),对扰动前后各50s(秒)的电池电压和电流进行录波,共保存8条数据曲线。

[0048] (2) 根据不同SOC的实验曲线,结合电池Randles等效电路模型进行参数辨识, $U_{oc}$ 辨识值为扰动前电压数据平均值,指定 $R_0$ 、 $R_{ct}$ 、 $C_{dl}$ 的初始值为(0.1 $\Omega$ ,0.1 $\Omega$ ,0.1F),电容电压

初值 $U_{cd10}=0$ ,通过最小化RC一阶微分方程残差得到等效电路参数 $R_0$ 、 $R_{ct}$ 、 $C_{dl}$ 的辨识值。

[0049] (3) 结合等效电路参数 $R_0$ 、 $R_{ct}$ 、 $C_{dl}$ 在不同SOC状态下的辨识值,进行从一次多项式到三次多项式之间的多项式拟合,得到 $R_0(SOC)$ 、 $R_{ct}(SOC)$ 、 $C_{dl}(SOC)$ 等效电路参数与SOC的函数表达式。

[0050] (4) 根据上述公式(1)和公式(2)计算不同SOC状态下的电池极限过载电流 $I_{max}(SOC)$ 和极限过载功率 $P_{max}(SOC)$ 。

[0051] 本实施例提供的方法,首先通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集全钒液流电池的放电过程中各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线;然后,将各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到Randles等效电路模型在不同荷电状态点的各电化学参数;进一步地,对各电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;进而,基于各电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0052] 本发明通过在典型SOC点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,测量得到电压电流曲线,结合Randles模型进行等效参数(电化学参数)辨识,通过多项式拟合构建得到等效参数(电化学参数)与SOC的连续映射关系,进而基于电路稳态方程评估全SOC范围内全钒液流电池的功率过载能力。本发明不依赖经验阈值,物理意义明确,可实现全钒液流电池功率过载能力的精确、连续且可预测的评估,有助于提升液流电池系统在复杂工况下的安全性与动态响应性能。

[0053] 需要说明的是,本申请每一个实施方式可以自由组合、调换顺序或者单独执行,并不需要依靠或依赖固定的执行顺序。

[0054] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,包括:

针对任一荷电状态点,通过并网功率转换系统将并网输出功率以预设速度提升至预设额定值,以使全钒液流电池的放电功率发生阶跃式增加。

[0055] 具体地,在一些实施例中,步骤101对全钒液流电池执行功率阶跃实验通过如下步骤实现,包括:

其中,并网功率转换系统PCS,是连接储能电池与交流电网之间的核心电力电子设备。在本发明中,PCS是功率阶跃实验的唯一可操作的执行器。

[0056] 实际应用中,通过向PCS发送精确的功率控制指令来间接实现电池“以某种速率增加功率”。PCS通过快速调节其内部的电力电子开关器件(如IGBT),来改变其输出功率,从而迫使与之直接连接的电池做出对应的功率响应。具体地,PCS的核心控制器,通常基于数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)或现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA),在接到指令后,其电流控制环会立即动作,计算出一个新的、更大的电流指令值,并通过脉宽调制(PWM)快速驱动IGBT等开关管,使PCS交流侧的输出电流(和功率)严格跟踪指令。

[0057] 根据能量守恒定律,PCS交流侧输出的功率必须由其直流侧输入。因此,当PCS交流

侧功率骤增时,它必须同步地、等量地从其直流侧,即从全钒液流电池,汲取相应的电功率。这导致流过电池的放电电流在极短时间内急剧增加,从而使电池的放电功率发生了一个“阶跃式”的、近乎瞬时的增加。这正是实验所需要的“功率阶跃扰动”。

[0058] 进而,在PCS动作的同时,通过高精度的数据采集装置(如示波器或高速采集卡)以不低于100样本/秒的速率,同步记录电池两端的电压和流过电池的电流,即可形成不同荷电状态下的电压曲线和电流曲线。

[0059] 本实施例提供的方法,通过精准控制PCS这个“功率阀门”的快速开合,在电网侧制造一个功率需求阶跃,从而在电池侧激发出一个可观测、可测量的电化学动态响应。该方法巧妙地将一个复杂的电化学测试,转化为一个标准、可控的电力电子控制动作。

[0060] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,将各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到Randles等效电路模型在不同荷电状态点的各电化学参数,包括:

基于各荷电状态点对应的电压响应曲线与各荷电状态点对应的电流响应曲线,获取各荷电状态点对应的电压与电流数据;

构建以Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题;Randles等效电路模型为包含串联欧姆电阻、以及由电荷转移电阻与双电层电容并联构成的RC环路的一阶等效电路模型;

采用优化算法对优化问题进行迭代求解,通过最小化均方根误差,确定模型参数的最优估计值;模型参数的最优估计值表征辨识得到的各电化学参数。

[0061] 具体地,在一些实施例中,步骤102辨识得到Randles等效电路模型在不同荷电状态点的各电化学参数,通过如下步骤实现,包括:

首先将辨识电化学参数的过程构建为一个以模型参数为优化变量、以模型输出与实测数据偏差为目标函数的非线性优化问题。

[0062] 其中,Randles等效电路模型为包含串联欧姆电阻、以及由电荷转移电阻与双电层电容并联构成的RC环路的一阶等效电路模型。Randles模型通常表示如下:

电压方程表示如下:

$$U(t) = U_{oc} - I(t) * R_0 - U_c(t) \quad (3)$$

RC环路微分方程:

$$dU_c/dt = I(t) / C_{dl} - U_c(t) / (R_{ct} * C_{dl}) \quad (4)$$

其中, $U(t)$ 、 $I(t)$ 表示在时间 $t$ 测量得到的电池端电压和电流(模型的输入),待辨识参数包括开路电压 $U_{oc}$ 、欧姆电阻 $R_0$ ,电荷转移电阻 $R_{ct}$ ,双电层电容 $C_{dl}$ , $U_c(t)$ 是RC环路电容两端的电压,是一个内部状态变量。

[0063] 实际应用中,将参数辨识问题形式化为一个优化问题包括如下:确定优化变量(决策变量)以及目标函数。优化变量(决策变量)如需要寻找的参数向量 $\theta = [R_0, R_{ct}, C_{dl}, U_{oc}]$ 。 $U_{oc}$ 通常也可直接从扰动前稳态电压取平均获得,从而减少优化变量)。目标函数 $F(\theta)$ 用于衡量模型输出与实测数据之间的误差。例如均方根误差。优化问题的目标就是找到一组参数 $\theta^*$ ,使得目标函数 $F(\theta)$ 最小化。

[0064] 进一步地,则基于各荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对优化问题进行迭代求解,通过最小化均方根误差,确定模型参数的最优估计值,也即,辨识得到的

各电化学参数。

[0065] 本实施例提供的方法,将对Randles等效电路模型进行参数辨识转换为一个优化问题,从而采用优化算法通过迭代寻优最小化模型输出与实测数据之间的误差,从而确定模型参数,保证了辨识的客观性和精度。

[0066] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,构建以Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题,包括:

确定待优化的模型参数向量,待优化的模型参数向量中至少包括欧姆电阻、电荷转移电阻及双电层电容;

建立目标函数;目标函数被配置为在给定模型参数向量下,计算模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差;模型预测电压序列为基于模型参数向量及实测电流序列,通过求解Randles等效电路模型对应的微分方程得到的。

[0067] 具体地,先确定优化变量(决策变量),也即,确定需要寻找的参数向量 $\theta=[R_0, R_{ct}, C_{dl}, U_{oc}]$ 。(U<sub>oc</sub>通常也可直接从扰动前稳态电压取平均获得,从而减少优化变量)。因此,优化变量表示为 $\theta=[R_0, R_{ct}, C_{dl}]$ 。

[0068] 然后,确定目标函数,例如均方根误差。目标函数表示如下:

$$F(\theta) = \sqrt{\text{mean}((U_{\text{measured}}(t) - U_{\text{model}}(t, \theta))^2)} \quad (5)$$

其中,F( $\theta$ )表示以 $\theta$ 为优化变量的目标函数,U<sub>measured</sub>(t)表示采集的实测电压序列,U<sub>model</sub>(t,  $\theta$ )表示使用当前参数 $\theta$ 和实测电流I(t),通过求解上述微分方程计算出的模型预测电压序列。

[0069] 本实施例提供的方法,将对Randles等效电路模型进行参数辨识转换为一个优化问题,方便求解,提高辨识的客观性和精度。

[0070] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,基于各荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对优化问题进行迭代求解,通过最小化均方根误差,确定模型参数的最优估计值,包括:

生成优化算法的初始候选解集合;

在每一次迭代中,对当前候选解集合中的每一个候选解执行如下步骤:利用候选解代表的模型参数值及实测电流数据,进行电路模型仿真,得到候选解对应的模型预测电压;计算候选解对应的模型预测电压与实测电压的误差,作为候选解的适应度值;根据各候选解的适应度值更新当前候选解集合,生成下一次迭代的候选解;所述实测电流数据和所述实测电压基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据确定;

在满足迭代终止条件的情况下,将适应度值最高的候选解对应的模型参数值确定为模型参数的最优估计值。

[0071] 具体地,在一些实施例中,采用优化算法对优化问题进行迭代求解的过程包括如下步骤:

(1) 初始化步骤:生成优化算法的初始候选解集合。其中,候选解集合中的每个候选解代表一个模型参数向量 $\theta$ ,其中至少包括欧姆电阻R<sub>0</sub>、电荷转移电阻R<sub>ct</sub>及双电层电容C<sub>dl</sub>,初始候选解集合包括模型参数向量 $\theta$ 的初始值。

[0072] (2) 迭代评估以及更新步骤:在每一次迭代中,对当前候选解集合中的每一个候选

解执行如下步骤:

前向计算子步骤:利用候选解代表的模型参数值及实测电流数据,进行电路模型仿真,得到候选解对应的模型预测电压。具体地,在该前向计算子步骤中,通过数值积分方法求解Randles等效电路模型的一阶微分方程,获得候选解对应的模型预测电压。

[0073] 适应度评价子步骤:计算候选解对应的模型预测电压与实测电压的误差,作为候选解的适应度值。

[0074] 更新步骤:根据各候选解的适应度值更新当前候选解集合,生成下一次迭代的候选解。

[0075] (3) 终止与输出步骤:在满足迭代终止条件的情况下,将适应度值最高的候选解对应的模型参数值确定为模型参数的最优估计值,作为辨识结果输出。迭代终止条件如大于等于预设迭代次数,或者,满足最小均方根误差。

[0076] 所述优化算法为群体智能优化算法,群体智能优化算法为粒子群优化算法或者遗传算法。在所述群体智能优化算法为粒子群优化算法的情况下,所述候选解集合为粒子群,每个候选解为一个粒子的位置,所述适应度值为该粒子的适应度;所述更新步骤依据粒子个体历史最优位置和群体全局最优位置来更新粒子的速度和位置。在群体智能优化算法为遗传算法的情况下,所述候选解集合为种群,每个候选解为一个个体,所述适应度值为该个体的适应度;所述更新步骤包括根据适应度进行选择、交叉和变异操作以产生新一代种群。

[0077] 下面以粒子群算法(Particle Swarm Optimization,PSO)为例,详细说明如何用PSO算法解决优化问题:

第一步:初始化

设置PSO参数:粒子数量(如50)、最大迭代次数、惯性权重等。

[0078] 为每个待辨识参数( $R_0, R_{ct}, C_{dl}$ ) 设定合理的物理范围。

[0079] 生成初始粒子群:在预设的参数范围内,随机生成N个粒子。每个粒子的位置 $X_i$ 代表一组参数猜测值 $[R_{0i}, R_{ct_i}, C_{dli}]$ ,同时为其随机初始化一个速度 $V_i$ 。

[0080] 每个粒子记录其个体历史最优位置 $P_{best_i}$ 和对应的最优适应度值(即最小目标函数值)。全局记录整个粒子群的全局最优位置 $G_{best}$ 。

[0081] 第二步:迭代循环(对于每一次迭代)

对于粒子群中的每一个粒子i:

1、模型求解(前向计算):

输入:该粒子当前位置 $X_i$ (即一组参数)和实测的电流数据 $I(t)$ 。

[0082] 过程:利用 $X_i$ 中的参数,数值求解Randles模型的微分方程(例如使用欧拉法、龙格-库塔法),计算出从实验开始到结束的整个时间序列的模型预测电压 $U_{model_i}(t)$ 。

[0083] 输出:预测电压序列 $U_{model_i}(t)$ 。

[0084] 2、计算适应度(评估):

将预测电压 $U_{model_i}(t)$ 与实测电压 $U_{measured}(t)$ 进行比较。

[0085] 计算该粒子的适应度值,即目标函数值 $F(X_i) = RMSE(U_{model_i}, U_{measured})$ 。

[0086] 3、更新个体与全局最优:

比较当前适应度 $F(X_i)$ 与该粒子历史最优适应度 $F(P_{best_i})$ 。如果 $F(X_i) < F(P_{best_i})$ ,则更新 $P_{best_i} = X_i$ 。

[0087] 4、更新粒子状态(移动):

根据PSO的速度-位置更新公式,计算粒子新的速度  $V_{i_{new}}$  和新的位置  $X_{i_{new}}$ 。确保  $X_{i_{new}}$  不超出参数预设的物理边界。

[0088] 第三步:终止与输出

重复第二步,直到达到最大迭代次数,或全局最优适应度值的变化小于某个阈值。

[0089] 迭代结束后,全局最优位置  $G_{best}$  即为辨识得到的最优参数集  $[R_0^*, R_{ct}^*, C_{dl}^*]$ 。

[0090] 此时的全局最优适应度值  $F(G_{best})$  代表了模型拟合的最佳精度。

[0091] 本实施例提供的方法,通过优化算法自动地、系统地搜索参数空间,寻找能使动态模型输出与复杂暂态实测数据最匹配的那组电化学参数,从而避免了手动试错,并保证了辨识的客观性和精度。

[0092] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,对各电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式,包括:

针对任一电化学参数,从一次多项式开始进行拟合,计算当前多项式的决定系数;

在满足预设条件的情况下,增加多项式次数并重新进行拟合;预设条件为当前多项式的决定系数小于预设精度阈值且当前多项式次数未达到预设最高次数;

在不满足预设条件的情况下,停止拟合并选取决定系数最大的多项式作为电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式。

[0093] 具体地,在一些实施例中,步骤103通过如下方式实现,包括:

以对某一个等效参数(电化学参数  $R_0$ ) 进行拟合举例:

从一次多项式开始进行拟合,首先计算当前多项式的决定系数  $R^2$ 。决定系数  $R^2$  是衡量一个回归模型(如多项式)拟合优度的核心指标,也即,用于评判这个多项式函数拟合得好不好。决定系数  $R^2$  的核心公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (6)$$

其中,  $R^2$  为决定系数,  $SS_{res}$  为残差平方和,衡量该电化学参数的模型预测值(如SOC为40%时的  $R_0$  预测值)与该电化学参数的真实值(如用拟合的多项式公式在SOC为40%处计算的  $R_0$  值)之间的差异,  $SS_{tot}$  为总平方和,衡量真实数据(如用拟合的多项式公式在SOC为40%处计算的  $R_0$  值)自身围绕所有真实值均值的离散程度。

[0094] 然后根据当前多项式的决定系数  $R^2$  确定拟合效果以及下一步决策:

若  $R^2 = 1$ : 表示完美拟合。模型解释了数据所有的变异。

[0095] 若  $R^2 = 0$ : 模型拟合效果等于直接用平均值预测。模型没有提供任何优于平均值的解释力。

[0096] 若  $0 < R^2 < 1$ :  $R^2$  值越接近1,表示模型解释的数据变异比例越高,拟合效果越好。

[0097] 若  $R^2 < 0$ : 仅在模型拟合极差,比直接用平均值预测还要糟糕时出现(表示模型完全错误)。

[0098] 在当前多项式的决定系数  $R^2$  小于预设精度阈值(如  $R^2 < 0.9$ ) 且当前多项式次数未达到预设最高次数(如多项式次数  $< 3$ ) 的情况下,增加多项式次数并重新进行拟合,例如继续增加1的多项式次数。

[0099] 反之,若不满足上述条件则停止拟合,取以上过程中决定系数 $R^2$ 最大的多项式作为该参数的拟合结果,以建立该电化学参数与SOC之间的连续函数关系表达式。

[0100] 本实施例提供的方法,对不同SOC辨识所得各电化学参数与SOC的关系分别进行多项式拟合,建立其与SOC之间的连续函数关系表达式,之后便可以结合电路稳态电压方程与预设的电池最低安全电压约束条件,求解全SOC范围内电池可支持的最大过载功率 $P_{\max}$ (SOC),实现电池功率过载能力的精确、连续且可预测的评估。

[0101] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,预设精度阈值为0.9,预设最高次数为三次。

[0102] 在一些实施例中,预设精度阈值为0.9,预设最高次数为三次。预设精度阈值和预设最高次数可以根据实际需要确定。预设精度阈值越大,预设最高次数越高,表明对模型拟合效果要求更高。

[0103] 本实施例提供的方法,为整个“电化学参数-SOC关系建模”步骤构建了一个具有明确技术判断标准的自动化收敛机制,保证了拟合精度下限、防止模型过度复杂(过拟合),以及实现建模过程自动化与客观化。该策略能自动产生一个在拟合精度、模型简洁性和物理合理性三者之间达到最佳平衡的“电化学参数-SOC”连续模型。这个模型是后续精确计算全SOC范围内最大过载功率 $P_{\max}$ (SOC)的可靠数学基础,从而从根本上提升了整个评估方法的准确性、安全性和工程实用价值。

[0104] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,基于各电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率,包括:

基于各电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式,结合稳态电压方程以及预设的电池最低安全电压限制,计算并输出全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0105] 具体地,在一些实施例中,预设的电池最低安全电压限制 $U_{\min}$ 根据全钒液流电池单体的电化学特性与长期运行寿命要求确定。例如,一套全钒液流电池系统额定功率10kW(千瓦),由30个电池单体串联而成,电池最低安全电压约束条件电池最低安全电压限制 $U_{\min}$ 为30V(伏)。

[0106] 实际应用中,计算并输出全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率通过如下步骤实现:结合电路稳态电压方程 $U = U_{oc} - I(R_0 + R_{ct})$ 与预设的电池最低安全电压约束条件(预设的电池最低安全电压限制) $U_{\min}$ ,求解全SOC范围内电池可支持的最大过载功率 $P_{\max}$ (SOC),实现过载能力的连续量化评估。具体计算方式为:结合 $U_{oc}$ 、 $R_0$ 、 $R_{ct}$ 与SOC的关系,以及 $U_{\min}$ 固定参数,根据公式(1)可以计算出电池极限过载电流 $I_{\max}$ 与SOC的关系,进而根据公式(2)可以计算出电池极限过载功率 $P_{\max}$ 。

$$[0107] \quad I_{\max} = \frac{U_{oc} - U_{\min}}{R_0 + R_{ct}} \quad (1)$$

$$P_{\max} = U_{\min} I_{\max} \quad (2)$$

其中, $I_{\max}$ 表示电池极限过载电流, $U_{\min}$ 表示预设的电池最低安全电压限制, $U_{oc}$ 表示开路电压, $R_0$ 表示欧姆电阻, $R_{ct}$ 表示电荷转移电阻, $P_{\max}$ 表示电池极限过载功率。

[0108] 本实施例提供的方法,结合电路稳态电压方程与预设的电池最低安全电压约束条件,求解全SOC范围内电池可支持的最大过载功率 $P_{\max}$ (SOC),实现了过载能力的连续量化评估。

[0109] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率用最大过载功率能力曲线表示;方法还包括:

根据最大过载功率能力曲线与实时监测的全钒液流电池的当前荷电状态,确定第一电流限值;第一电流限值用于确保电池端口电压不低于最低安全电压限制;

获取基于变流器自身器件安全与并网规范要求的第二电流限值;

在变流器的运行控制中,采用第一电流限值与第二电流限值中的较小值作为最终执行的输出电流限制值,以实现全钒液流电池过载安全与变流器运行安全的双重保护。

[0110] 具体地,所述方法还包括双重保护的步骤:

首先根据全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率(最大过载功率能力曲线)与实时监测的全钒液流电池的当前荷电状态,确定第一电流限值。

[0111] 这个步骤是一个涉及查询、计算与安全应用的动态过程,核心在于将功率边界转换为电流边界。其中,第一电流限值用于确保电池端口电压不低于最低安全电压限制,基本原理基于电功率公式 $P=U \times I$ ,其中 $P$ 表示功率, $U$ 表示电压, $I$ 表示电流。因此,电流限值由功率限值除以一个电压参数得到。实现的关键在于电压参数的选取,通常电压参数采用实时端口电压、电池的额定电压或者当前SOC对应的开路电压。

[0112] 实际应用中,首先获取所述全钒液流电池的最大过载功率能力曲线 $P_{\max}$ (SOC),实时监测所述电池的当前荷电状态 $SOC_{act}$ ,然后基于 $P_{\max}$ (SOC)和 $SOC_{act}$ 即可确定当前允许的最大过载功率值 $P_{\max\_act}$ ;进而,根据当前允许的最大过载功率值 $P_{\max\_act}$ 与一电压参数,计算得到所述第一电流限值 $I_{limit1}$ 。

[0113] 然后获取基于变流器自身器件安全与并网规范要求的第二电流限值 $I_{limit2}$ 。变流器自身安全由其核心功率器件的最大允许通流能力、散热系统设计限值等硬件特性决定。并网规范要求由并网点电网规程、标准或协议规定,通常为最大允许注入电流,以确保电网安全稳定。

[0114] 最终,在变流器的运行控制中,采用第一电流限值 $I_{limit1}$ 与第二电流限值 $I_{limit2}$ 中的较小值作为最终执行的输出电流限制值,以实现全钒液流电池过载安全与变流器运行安全的双重保护。也即,将表征电池内部电化学安全边界的动态限值( $I_{limit1}$ ),与保障电力电子装置及电网安全的静态/规则限值( $I_{limit2}$ )进行实时比较,并取二者中更严格者作为最终执行指令。

[0115] 本实施例提供的方法,创造性地提出将基于变流器自身器件安全与并网规范要求的第二电流限值与电池模型计算的动态限值相结合,构成“双重限流”这一新的控制决策方法,从而同时守护了电池本体和电力变换系统两个层面的安全,提升了整个储能系统的综合可靠性。本方法可为全钒液流电池系统设计、保护策略制定及功率调度提供科学依据,有助于提升系统安全性与动态响应能力。

[0116] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估方法,方法还包括:

基于全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率,生成全钒液流电池在不同实时荷电状态下的功率调度建议或过载保护阈值。

[0117] 具体地,在一些实施例中,所述方法还包括:

在生成全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率 $P_{\max}$  (SOC) 之后,可以进一步基于全荷电状态范围内全钒液流电池可支持的最大过载功率,生成全钒液流电池在不同实时荷电状态下的功率调度建议或过载保护阈值。

[0118] 其中,功率调度建议是指向储能系统的能量管理系统 (EMS) 或上层调度中心提供的、关于当前及未来短时间内电池可安全输出的功率范围参考值。是一种指导性、前瞻性的信号,用于优化系统的充放电计划,确保电池在安全边界内响应电网需求。具体内容与形式例如实时可调用功率、功率调节裕度、未来功率能力预测等。

[0119] 实际应用中,应用场景如:当电网需要储能系统提供调频备用时,EMS可查询当前 $P_{\max}$  (SOC),判断是否有足够的备用容量可供调用。又例如,在制定日前或实时发电计划时,将 $P_{\max}$  (SOC) 作为约束条件,避免安排超过电池安全能力的出力计划。

[0120] 过载保护阈值是指设置在电池管理系统 (BMS) 或功率转换系统 (PCS) 保护回路中的、用于触发紧急动作 (如限功率、跳闸) 的硬性安全限值。是一种强制性、实时性的防护手段,当检测到功率或电流超过该阈值时立即动作,防止电池受损。具体内容与形式包括:

功率保护阈值:直接以 $P_{\max}$  (SOC) 作为阈值,当实时放电功率超过此值时,触发降功率或停机保护。

[0121] 电流保护阈值:如之前所述,将 $P_{\max}$  (SOC) 转换为电流限值,作为电流环的限幅值或保护定值。

[0122] 电压保护阈值:通过 $P_{\max}$  (SOC) 和模型可反推出最低允许电压,也可作为电压保护参考。

[0123] 实际应用中,应用场景如:在PCS的电流控制环中,将电流限值作为动态限幅值,确保输出电流不会导致电池过载。又例如,在BMS中,设置功率过载报警和跳闸阈值,当实测功率超过 $P_{\max}$  (SOC) 一定时间或幅度后,发出警报或切断电路。

[0124] 本实施例提供的方法,体现了从“评估模型”到“运行优化”与“安全防护”的双重应用,提升了实用性。

[0125] 下面对本发明提供的全钒液流电池的功率过载能力评估装置进行描述,下文描述的全钒液流电池的功率过载能力评估装置与上文描述的全钒液流电池的功率过载能力评估方法可相互对应参照。

[0126] 图3是本发明提供的全钒液流电池的功率过载能力评估装置的结构示意图,如图3所示,该全钒液流电池的功率过载能力评估装置300包括如下模块:

数据采集模块310,用于通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

参数辨识模块320,用于将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

多项式拟合模块330,用于对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

最大过载功率计算模块340,用于基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续

函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0127] 本发明通过在典型SOC点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,测量得到电压电流曲线,结合Randles模型进行等效参数(电化学参数)辨识,通过多项式拟合构建得到等效参数(电化学参数)与SOC的连续映射关系,进而基于电路稳态方程评估全SOC范围内全钒液流电池的功率过载能力。本发明不依赖经验阈值,物理意义明确,可实现全钒液流电池功率过载能力的精确、连续且可预测的评估,有助于提升液流电池系统在复杂工况下的安全性与动态响应性能。

[0128] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300,所述数据采集模块310,具体用于:

针对任一所述荷电状态点,通过所述并网功率转换系统将并网输出功率以预设速度提升至预设额定值,以使所述全钒液流电池的放电功率发生阶跃式增加。

[0129] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300,所述参数辨识模块320,具体用于:

基于各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线,获取各所述荷电状态点对应的电压与电流数据;

构建以所述Randles等效电路模型的模型参数为优化变量、以模型预测电压序列与实测电压序列之间的均方根误差为目标函数的优化问题;所述Randles等效电路模型为包含串联欧姆电阻、以及由电荷转移电阻与双电层电容并联构成的RC环路的一阶等效电路模型;

基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据,采用优化算法对所述优化问题进行迭代求解,通过最小化所述均方根误差,确定模型参数的最优估计值;所述模型参数的最优估计值表征辨识得到的各所述电化学参数。

[0130] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300,所述参数辨识模块320,还用于:

确定待优化的模型参数向量,所述待优化的模型参数向量中至少包括欧姆电阻、电荷转移电阻及双电层电容;

建立目标函数;所述目标函数被配置为在给定所述模型参数向量下,计算所述模型预测电压序列与所述实测电压序列之间的均方根误差;所述模型预测电压序列为基于所述模型参数向量及实测电流序列,通过求解所述Randles等效电路模型对应的微分方程得到的。

[0131] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300,所述参数辨识模块320,还用于:

生成所述优化算法的初始候选解集合;

在每一次迭代中,对当前候选解集合中的每一个候选解执行如下步骤:利用所述候选解代表的模型参数值及实测电流数据,进行电路模型仿真,得到所述候选解对应的模型预测电压;计算所述候选解对应的模型预测电压与实测电压的误差,作为所述候选解的适应度值;根据各所述候选解的适应度值更新所述当前候选解集合,生成下一次迭代的候选解;所述实测电流数据和所述实测电压基于各所述荷电状态点对应的电压与电流数据确

定；

在满足迭代终止条件的情况下，将适应度值最高的所述候选解对应的模型参数值确定为所述模型参数的最优估计值。

[0132] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300，所述多项式拟合模块330，具体用于：

针对任一所述电化学参数，从一次多项式开始进行拟合，计算当前多项式的决定系数；

在满足预设条件的情况下，增加多项式次数并重新进行拟合；所述预设条件为所述当前多项式的决定系数小于预设精度阈值且当前多项式次数未达到预设最高次数；

在不满足所述预设条件的情况下，停止拟合并选取决定系数最大的多项式作为所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式。

[0133] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300，所述预设精度阈值为0.9，所述预设最高次数为三次。

[0134] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300，所述最大过载功率计算模块340，具体用于：

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式，结合所述稳态电压方程以及预设的电池最低安全电压限制，计算并输出所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0135] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300，所述电池最低安全电压限制根据全钒液流电池单体的电化学特性与长期运行寿命要求确定。

[0136] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300，所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率用最大过载功率能力曲线表示；所述装置还包括双重保护模块；

所述双重保护模块，用于：

根据所述最大过载功率能力曲线与实时监测的所述全钒液流电池的当前荷电状态，确定第一电流限值；所述第一电流限值用于确保电池端口电压不低于最低安全电压限制；

获取基于变流器自身器件安全与并网规范要求的第二电流限值；

在所述变流器的运行控制中，采用所述第一电流限值与所述第二电流限值中的较小值作为最终执行的输出电流限制值，以实现与所述全钒液流电池过载安全与所述变流器运行安全的双重保护。

[0137] 根据本发明提供的一种全钒液流电池的功率过载能力评估装置300，所述装置还包括功率调度模块；

所述功率调度模块，用于：

基于所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率，生成所述全钒液流电池在不同实时荷电状态下的功率调度建议或过载保护阈值。

[0138] 图4是本发明提供的电子设备的结构示意图，如图4所示，该电子设备可以包括：处理器(processor)410、通信接口(Communications Interface)420、存储器(memory)430和通信总线440，其中，处理器410，通信接口420，存储器430通过通信总线440完成相互间的通

信。处理器410可以调用存储器430中的逻辑指令,以执行全钒液流电池的功率过载能力评估方法,该方法包括:

通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0139] 此外,上述的存储器430中的逻辑指令可以通过软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM, Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM, Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0140] 另一方面,本发明还提供一种计算机程序产品,所述计算机程序产品包括计算机程序,计算机程序可存储在非暂态计算机可读存储介质上,所述计算机程序被处理器执行时,计算机能够执行上述各方法所提供的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,该方法包括:

通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0141] 又一方面,本发明还提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现以执行上述各方法提供的全钒液流电池的功率过载能力评估方法,该方法包括:

通过并网功率转换系统,在全荷电状态范围内多个预先选定的荷电状态点对全钒液流电池执行功率阶跃实验,并同步采集所述全钒液流电池的放电过程中各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线;

将各所述荷电状态点对应的电压响应曲线与各所述荷电状态点对应的电流响应曲线输入Randles等效电路模型,辨识得到所述Randles等效电路模型在不同所述荷电状态点的各电化学参数;

对各所述电化学参数分别进行多项式拟合,建立每个所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式;

基于各所述电化学参数与荷电状态之间的连续函数关系表达式以及电池等效电路的稳态电压方程,确定所述全荷电状态范围内所述全钒液流电池可支持的最大过载功率。

[0142] 以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0143] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备)执行各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0144] 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,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

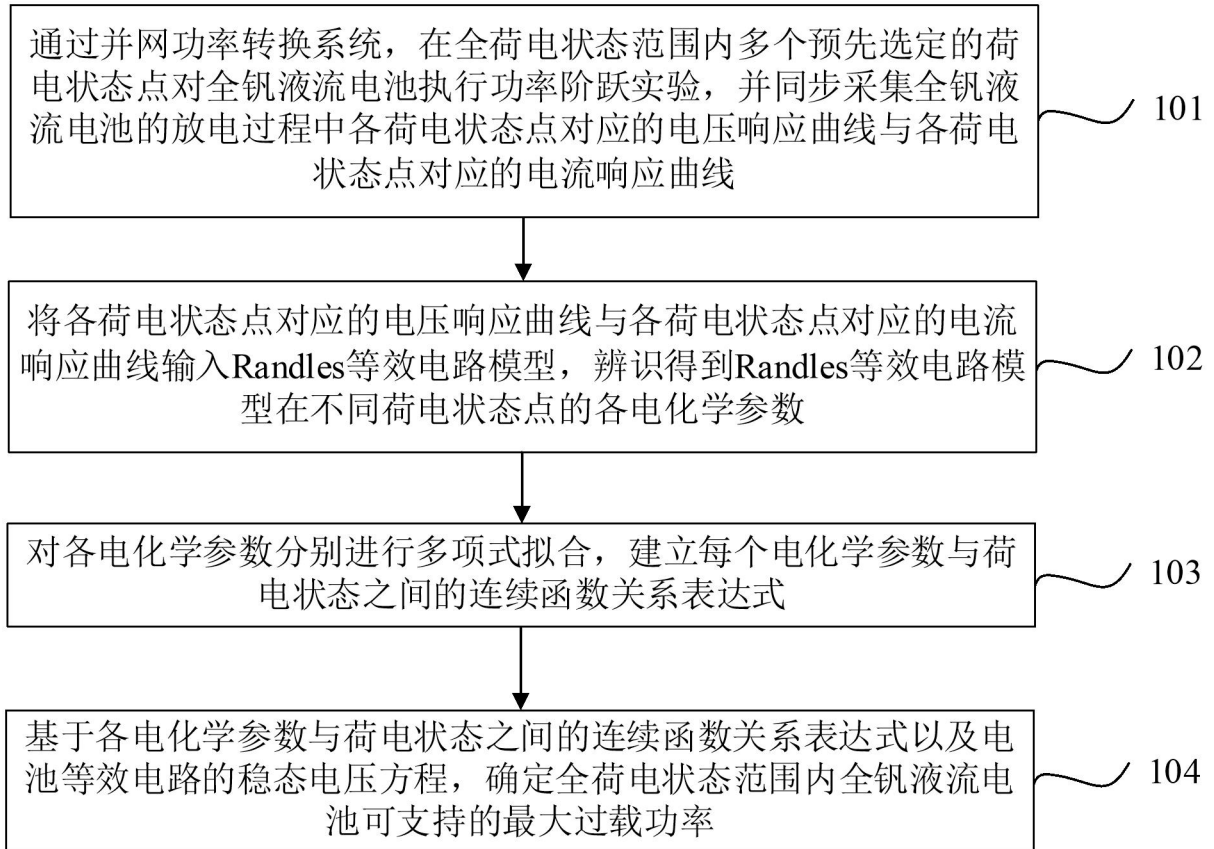


图1

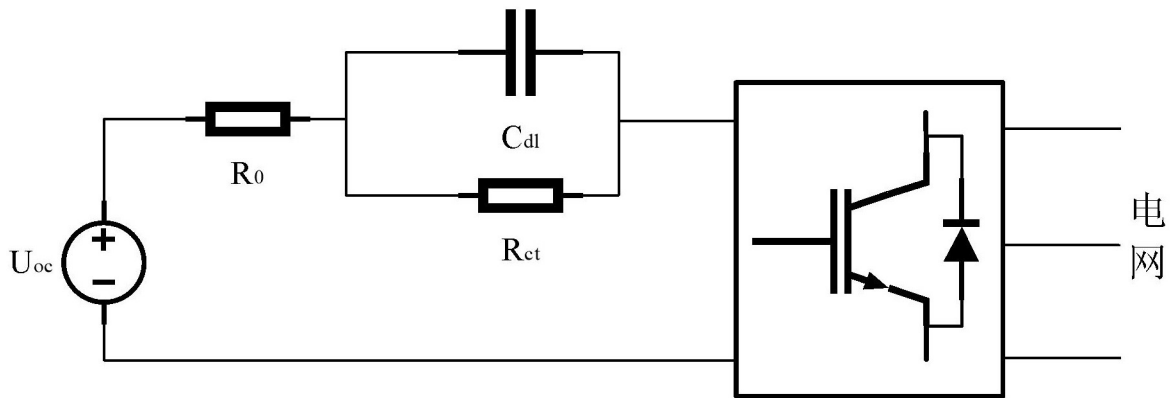


图2

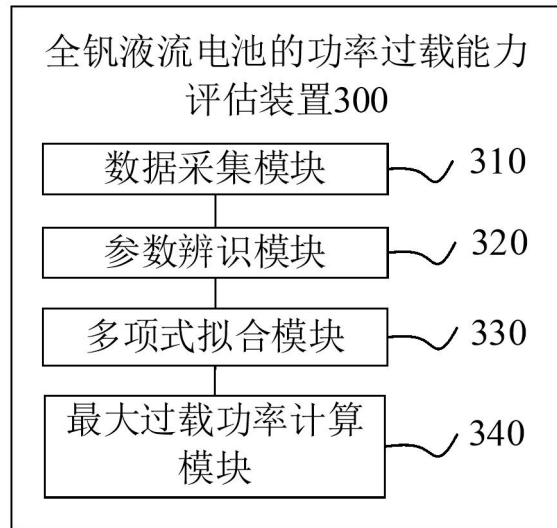


图3

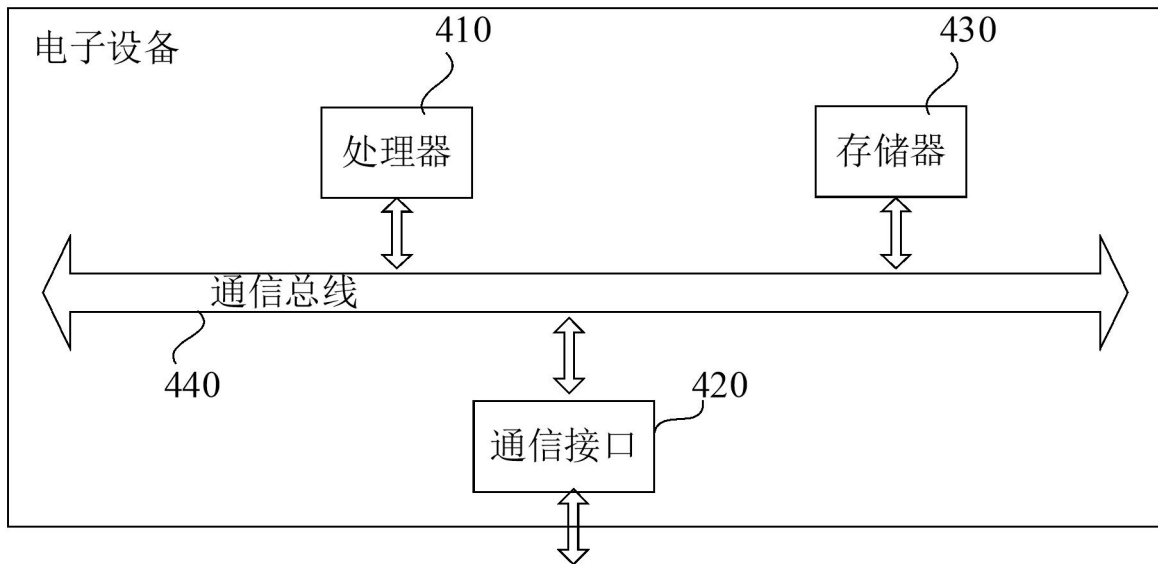


图4