

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.004

基于事件驱动的液流电池控制系统实现方式

练润哲, 董树锋

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:液流电池具有充放电循环次数大、容量高及寿命长等优点,是长时大规模储能的理想选择,但是其复杂的结构对电池控制系统的要求较高,传统开发方式难以满足其多样的控制需求,因此提出精准度更高、实时性更好的基于事件驱动技术的液流电池控制系统开发方法。首先针对液流电池稳定性需求高、内部损耗大等问题,提出了主/辅助电堆协同架构,并对该架构系统进行建模分析;然后基于事件驱动技术对控制系统进行模块化设计,包括柔性充放电控制、辅助电堆参与的黑启动控制、基于卡尔曼滤波的电池荷电状态(state of charge, SOC)估计等;最后搭建半实物仿真平台,对所提架构和策略进行验证,证明了该架构和策略能提高系统的能量转换效率和稳定性。

关键词:液流电池;事件驱动;储能;柔性充放电控制;卡尔曼滤波;电池荷电状态(SOC)估计;黑启动

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0032-09

0 引言

在“碳达峰、碳中和”战略背景下,新能源装机容量快速上升,使得面向高渗透新能源接入与消纳的储能技术愈发重要^[1-2]。而在众多储能技术中,液流电池凭借其充放电循环次数大、容量高、寿命长等特点,在长时大规模的储能应用中有着良好的发展前景^[3]。相较于锂电池,液流电池在中长时储能场景下具有更高的能量保持率,且在经济性上由于电极、电解液能再生循环使用,而具有更低的生命周期价格^[4]。此外液流电池还具备低自放电、短时间高过载等优点^[5-7],相比其他电化学储能更加安全可靠。据预测,2030年前后液流电池的装机容量或将超过锂电池,发展潜力巨大^[8]。

但相比其他电化学储能技术,液流电池结构更为复杂,控制难度大。对此,国内外学者展开了大量有关液流电池控制系统设计的研究。文献[9]面向兆瓦级全钒液流电池,建立包括黑启动、充放电控制等过程的全生命周期电池管理系统,但其输出方式较为单一,导致整体能量转换效率较低。文献[10]提出液流电池控制系统模块化的硬件结构,为控制策略模块化开发提供基础,但对控制策略涉及较少。文献[11]总结液流电池应用于电网的要求,强调对电池荷电状态(state of charge, SOC)和电池健康状态(state of health, SOH)进行监测的重要性,但目前工程上对两者检测的精度较低。综上所述发现,液流电池控制环节众多,且为提高能量转换效率,需要更复杂的控制策略。针对复杂控制系

统,若采用传统的时间驱动的触发执行机制,则可能会因为数据体量大而影响控制策略执行的准确性。所以,研究液流电池控制系统的稳定且高效开发方式具有重要意义。

对此,文中提出基于事件驱动的液流电池控制系统开发方式。事件驱动是指某一事件出现,将触发系统动作,使得系统整体或部分的状态发生改变^[12-13]。将事件驱动应用于控制系统中,其触发机制是通过协程监测测点变化,当出现测点变化满足所设定的条件后转入进程执行动作。采用事件驱动技术,可以使控制系统具备以下优点:用于监测的协程能够实时监测测点变化,使得控制具备高精度和实时性;与时间驱动机制下的周期采样相比,事件驱动能有效地降低数据发送率,从而减小计算机处理器占有率,提高系统运行效率^[14];事件驱动机制保证各策略间的执行互不干扰,使得控制系统更为有序协调。

文中首先提出一种主/辅助电堆协同的液流电池系统架构,并对电堆进行建模;然后基于事件驱动技术进行模块化设计,提出更高效安全的主/辅助电堆协同的柔性充放电控制、误差更小的基于卡尔曼滤波的SOC估计以及可靠性更高的黑启动策略;最后搭建半实物仿真平台对所提架构和策略的有效性进行验证。

1 液流电池系统建模

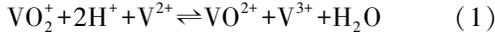
1.1 主/辅助电堆协同的液流电池系统架构

液流电池主要由反应电堆和电解液储罐组成,基本原理如下:正、负电解液分别储存于2种储罐中,由电解液泵运送至电堆并在电极处发生式(1)

收稿日期:2023-10-12;修回日期:2023-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077193)

所示氧化还原反应(以全钒液流电池为例),反应后流回储罐。同时电堆电极接外部电路,实现电能的输出^[15-16]。



为提高稳定性和灵活性,基于上述原理提出主/辅助电堆协同运行的系统架构,如图1所示。其中PCS为储能变流器;DC-DC为直流转换器。

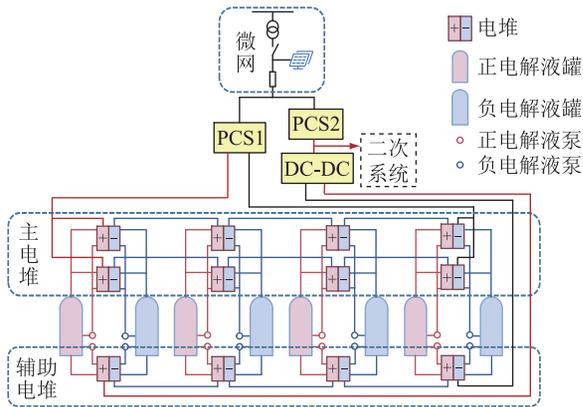


图1 液流电池系统架构

Fig.1 Flow battery system architecture

该架构的核心为主电堆和辅助电堆,其中主电堆由8个子电堆串联组成(以获得更大的额定电压、电流),辅助电堆由4个子电堆串联组成。两者区别在于辅助电堆的体量、输出功率较小,电堆电极损耗较低。

架构的电气部分。由DC-DC装置和PCS实现电堆与微网的连接^[17]。其中主电堆的直流输出通过PCS转为交流输出接入微网;而辅助电堆先通过DC-DC装置供电于二次系统(使辅助电堆在一定功率波动范围内都能给二次系统提供稳定电压),然后通过PCS接入微网。该架构中的二次系统包括电池管理系统、系统监测、告警保护装置等设备,是系统重要组成部分。

架构的机械部分。主/辅助电堆共用正负电解液储罐(便于电池SOC计算),分别由1对主电解液泵和1对辅助电解液泵连接至相应电堆,实现电解液的循环运输。

应用辅助电堆有如下优势。

(1) 通过制定主/辅助电堆协同的充放电策略,提高能量转换效率。当充放电功率较大时,主电堆与辅助电堆共同工作;当充放电功率较小时,主电堆关闭,仅有辅助电堆工作。由于辅助电堆的内部损耗更小且关闭了主电解液泵等设备,系统整体电能损耗降低。

(2) 辅助电堆通过DC-DC装置与二次系统相连,与外电网协同供电,使二次系统具有更高的稳

定性和供电可靠性。

(3) 短期内作为备用电源辅助黑启动。辅助电堆设置一定的容量余度,当系统故障或电池容量低于一定值时,关闭主电堆,仅有辅助电堆低功率输出维持必要的二次系统运行,以确保短期故障后系统的快速恢复运行。

1.2 基于Thevenin等效电路的电堆模型

基于1.1节所述架构,首先对电堆进行建模。文中在Thevenin等效电路模型基础上,补充考虑支路电流损耗的影响^[18-19],得到如图2所示的等效电路。

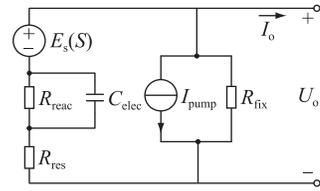


图2 液流电池电堆等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of flow battery stack

图2中, U_o 、 I_o 分别为输出电压与电流; $E_s(S)$ 为电堆电动势, S 为电池SOC; R_{reac} 为阻碍电荷运动的电池内阻; R_{res} 为其他电阻损耗; C_{elec} 为体现电池充放电切换的动态响应特性的电容; I_{pump} 、 R_{fix} 分别为外部损耗中的泵损和固定损耗。图2所示等效电路能较好地反映液流电池各方面的性能、损耗,兼顾稳态和暂态特性。

液流电池电堆由多个单体电极对串联堆叠而成,其中单体电极对的电动势 E_0 的计算公式可根据化学反应方程式和能斯特方程^[20]得到:

$$E_0 = E_{\phi} + 2RT_f \ln(S/(1-S))/F \quad (2)$$

式中: E_{ϕ} 为标准电动势,在浓度1 mol/L的标况下取1.225 V; R 为摩尔气体常数; T_f 为电解液的热力学温度; F 为法拉第常数。基于单体电极对电动势可以进一步得到电堆电动势 $E_s = N_c E_0$,其中 N_c 为电极对串联堆叠数。

电池内阻 R_{reac} 大小受SOC和 N_c 影响,根据实验资料^[18]进行多项式拟合可得式(3)。同时温度会影响电池内阻,故加入温度修正系数 K_T ,其计算如式(4)所示,其中 T_s 为电堆电极的摄氏温度。

$$R_{\text{reac}} = N_c (0.0669S^3 - 0.0873S^2 + 0.0622S) \quad (3)$$

$$K_T = 0.000516(T_s - 19.8)^2 - 0.00896(T_s - 19.8) + 1 \quad (4)$$

电堆外部损耗中的泵损大小随着电堆输出功率变化而变化,约为输出功率的4%。其余参数可取为: $R_{\text{fix}} = 37 \text{ W}$, $R_{\text{res}} = 0.03N_c \text{ W}$, $C_{\text{elec}} = 0.15 \text{ F}$ 。

2 基于事件驱动的控制系统的实现

2.1 控制系统架构

基于事件驱动设计的控制策略由自身所定义事件独立触发,其事件触发条件由协程实时监测,而事件触发后的具体策略动作在进程中执行,因此不存在策略间相互干扰的问题,具有更好的实时性和精准度,且在高计算负载下仍具备良好的运行效率。这种可靠性更强的策略执行机制,使控制系统能够进行模块化开发^[21]。模块化设计流程如下:首先,制定各模块控制策略的具体内容,明确执行条件和动作步骤;然后,将触发策略执行的条件表示为具体的判断表达式;最后,将策略按逻辑顺序分解为一系列节点与动作,完成策略开发。

文中将液流电池控制系统划分为黑启动、系统运行和系统关机模块。系统运行模块包括充放电控制、系统监测等子模块,其中充放电控制是系统储能、功率交换的核心,该模块需要 PCS、电解液泵等装置协调运行;而系统监测模块是数据的来源,其精度关系到控制的准确性,其中 SOC 是电池控制的重要依据,因此提出误差更小的卡尔曼滤波估计;而告警保护模块能提高系统稳定性。控制系统架构如图 3 所示,并根据该架构对控制系统进行模块化开发,文中主要对核心的 3 个策略进行说明。

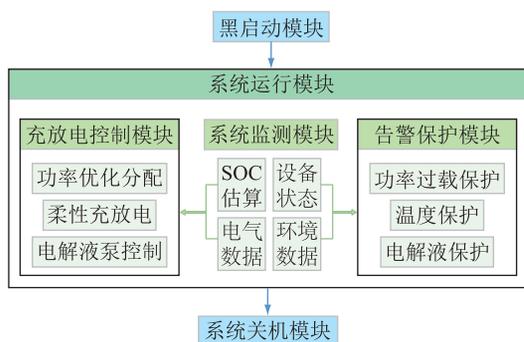


图 3 控制系统架构

Fig.3 Architecture of the control system

2.2 主/辅助电堆协同的柔性充放电控制策略

2.2.1 主/辅助电堆功率分配控制

为提高能量转换效率,在传统结构下加入辅助电堆,使系统在不同输出功率、容量下能优化调整运行模式。具体策略如下。

(1) 判断系统状态。系统状态分为大功率输出和低功率输出(或容量不足)2 个状态。容量根据二次系统待机所需电量设置。输出功率界限 P_L 由辅助电堆额定功率 P_{aux} 与二次系统功率 P_{sec} 确定。

$$P_L = \alpha P_{aux} - P_{sec} \quad (5)$$

式中: α 为裕量系数,可取 0.8,用来表示功率扰动导致辅助电堆过载。

(2) 功率输出 P_{out} 大于 P_L 。主电堆和辅助电堆同时工作,由于液流电池电堆输出功率大小取决于电极材料与数量,假设 2 种电堆电极材料相同,数量比为 $n_a:n_b$,则按如下策略进行功率分配。

放电模式下,主电堆功率:

$$P_1 = n_a(P_{out} + P_{sec}) / (n_a + n_b) \quad (6)$$

辅助电堆功率:

$$P_2 = n_b(P_{out} + P_{sec}) / (n_a + n_b) \quad (7)$$

充电模式下,主电堆功率:

$$P_1 = n_a P_{out} / (n_a + n_b) \quad (8)$$

辅助电堆功率:

$$P_2 = n_b P_{out} / (n_a + n_b) \quad (9)$$

其中二次系统由外网供电。

(3) 功率输出 P_{out} 低于 P_L 或容量不足。该状态下关闭主电堆,仅运行辅助电堆。

放电模式下,容量充足时辅助电堆功率:

$$P_2 = P_{out} + P_{sec} \quad (10)$$

容量不足时系统不向外供电并发告警信号,二次系统由辅助电堆供电并切除不必要负荷。充电模式下,外网同时供电二次系统和辅助电堆。

2.2.2 柔性充放电控制

柔性充放电是根据电池信息、电网状况等因素,动态调整电池输出模式的控制策略。在液流电池中,需根据 SOC、电堆电压等数据切换输出模式,以提高电池寿命与运行效率^[22-23]。文中采用“恒功率-恒压-涓流”3 种模式切换的充放电策略。

(1) 正常运行时,即电堆电压、SOC 在正常范围内,按上级系统下发总功率 P_{tot} 进行充放电。

(2) SOC 值超过上下限时,转为涓流模式运行^[24]。该状态下电池容量接近饱和,电解液电导率下降导致内阻升高,故转为涓流模式以减少电池损耗,并防止过充或过放对电池的损伤。

(3) 电堆电压超过上下限时,转为恒压输出,以防止过压或欠压情况对电堆的损伤。

具体模式切换判断表达式为:

$$\begin{cases} P_{ch} = P_{tot} & S \leq 0.8 \\ I_{ch} = I_{min} & S > 0.8 \\ U_{ch} = U_{high} & U > U_{high} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{disch} = P_{tot} & S \geq 0.2 \\ I_{disch} = -I_{min} & S < 0.2 \\ U_{disch} = U_{low} & U < U_{low} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{ch} 为充电时电堆设置输出功率; I_{ch} 为充电时电堆设置输出电流; U_{ch} 为充电时电堆设置输出电

压; I_{\min} 为涓流值, 该值远低于正常运行时的电流值; P_{disch} 为放电时电堆设置输出功率; I_{disch} 为放电时电堆设置输出电流; U_{disch} 为放电时电堆设置输出电压; U 为电堆测得电压; U_{high} 、 U_{low} 分别为电堆电压上、下限。

采用事件驱动技术设计上述策略, 将事件触发表达式定义为:

$$|P_{\text{tot}}| > \varepsilon P_R \quad (13)$$

式中: P_R 为系统额定输出功率; ε 为零偏系数, 以避免系统运行中功率浮动产生的误触发。触发后驱动的动作流程如图 4 所示。图 4 中 ε 可取较小值 1%; I_{set1} 、 I_{set2} 分别为主电堆和辅助电堆设置输出电流; U_{s1} 、 U_{s2} 分别为主电堆和辅助电堆测得电压。

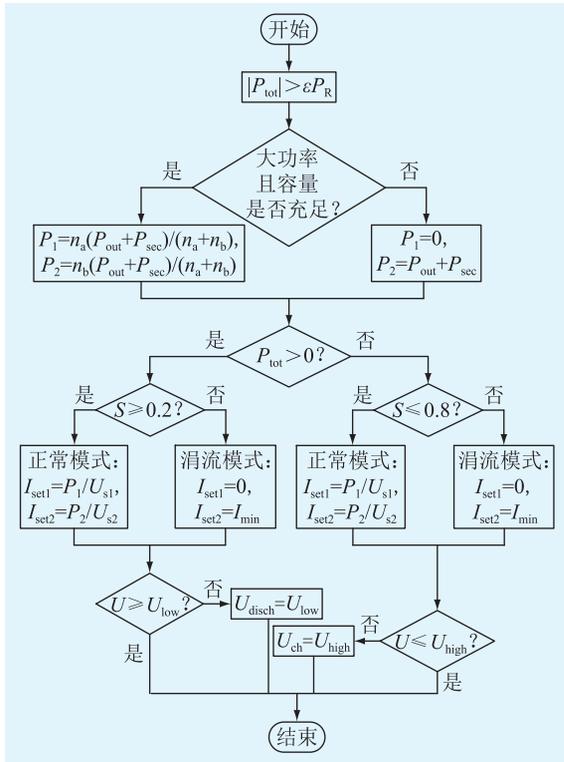


图 4 主/辅助电堆协同的柔性充放电控制策略流程

Fig.4 Flow chart of flexible charge-discharge control with main-auxiliary stacks synergistic

2.3 基于卡尔曼滤波算法的 SOC 估计

SOC 是液流电池充放电策略制定和安全运行的主要参考状态。传统 SOC 估计方法有安时积分法和开路电压法, 但都存在一定局限^[25]。为兼顾精度和成本, 文中提出基于卡尔曼滤波的 SOC 估计。

卡尔曼滤波的主要思想为利用观测值对状态预测估计进行修正, 从而较好地抑制噪音对系统状态估算的影响, 其主要流程如图 5 所示。

首先根据液流电池模型推断先验估计值, 但由于存在噪音, 该估计值并不精确; 然后根据观测结果与估算值之间的偏差进行最小均方差计算, 获得

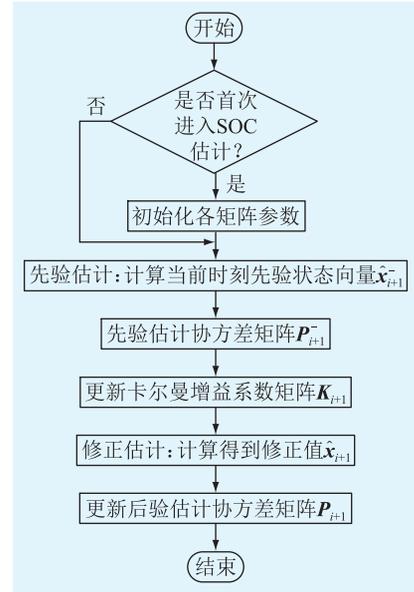


图 5 卡尔曼滤波算法流程

Fig.5 Flow chart of Kalman filtering algorithm

两者权重; 最后将两者结果加权计算得到目标值^[26]。根据卡尔曼滤波理论制定 SOC 估计算法如下。

(1) 形成测量方程和观测方程。基于液流电池等效电路, 状态量 x 选取为电堆电动势 E_s 、 R_{reac} 两端电压 U_1 及 R_{res} 两端电压 U_2 ; 观测量 y 选取为输出电压 U_o ; 输入量 u 选取为输出电流 I_o 与泵损电流 I_{pump} 。

由图 2 所示等效电路和式(1)可得测量方程:

$$\begin{bmatrix} E_s(i+1) \\ U_1(i+1) \\ U_2(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - T/(R_{\text{reac}} C_{\text{elec}}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s(i) \\ U_1(i) \\ U_2(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -mT/C_N & -1.5mT/C_N \\ T/C_{\text{elec}} & 1.5T/C_{\text{elec}} \\ R_{\text{res}} & R_{\text{res}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_{\text{pump}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: i 为迭代次数; C_N 为液流电池的额定容量; m 为式(2)线性拟合后的一次项系数; T 为仿真步长。

观测方程如下:

$$U_o(i+1) = E_s(i) - U_1(i) - U_2(i) + \Delta U_o \quad (15)$$

式中: ΔU_o 为输出电压的观测误差。

(2) 先验估计。根据式(14)得到该时刻先验状态向量 \hat{x}_{i+1} , 即向量 $(E_s(i+1), U_1(i+1), U_2(i+1))$ 。

(3) 先验估计协方差矩阵 P_{i+1}^- 。

$$P_{i+1}^- = A P_i S^T + Q \quad (16)$$

式中: P_i 为第 i 次迭代的后验估计协方差矩阵; A 为式(14)中状态变量的系数矩阵; Q 为系统噪声协方

差矩阵,取 $\begin{bmatrix} 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \times 10^{-8} \end{bmatrix}$ 。

(4) 更新卡尔曼增益系数矩阵 K_{i+1} 。

$$K_{i+1} = P_{i+1}^- H^T (HP_{i+1}^- H^T + B)^{-1} \quad (17)$$

式中: $H = (1, -1, -1)$; B 为观测噪声协方差,取 0.001。

(5) 修正估计得到 \hat{x}_{i+1} 。

$$\hat{x}_{i+1} = \hat{x}_{i+1}^- + K_{i+1}(y_{i+1} - H\hat{x}_{i+1}^-) \quad (18)$$

式中: y_{i+1} 为第 $i+1$ 次迭代时刻观测量。

(6) 更新后验估计协方差矩阵 P_{i+1} 。

$$P_{i+1} = (I - K_{i+1}H)P_{i+1}^- \quad (19)$$

式中: I 为单位矩阵。

2.4 辅助电堆参与的黑启动策略

黑启动是指系统不依赖外电网,通过系统中具有自启动能力的发电设备,实现整个系统运行恢复。与其他储能电池不同,液流电池的运行必须依赖电解液泵等用电设备的运转,因此无法直接启动运行,而需要特定的黑启动策略^[27]。为提高液流电池黑启动速度与稳定性,提出辅助电堆参与的黑启动策略,控制流程如下。

(1) 系统自检。状态监测模块检查系统各关键设备能否参与黑启动,并根据电池容量确定黑启动电源。当容量充足时由辅助电堆主要供电,不足时由备用电源作为黑启动电源。

(2) 辅助电堆启动。由备用电源启动辅助电堆电解液泵以及 PCS 装置,完成启动后备用电源退出,由辅助电堆对系统进行供电。

(3) 主电堆启动。主电堆黑启动模块根据电池容量和充放电功率确定是否运行。确定运行后投入二次系统其余负荷,并启动主电堆电解液泵来启动主电堆,系统进入正常运行状态。

采用事件驱动技术设计上述策略,可以将事件触发表达式定为“下发系统黑启动使能信号”,后续驱动执行的动作流程如图 6 所示。

2.5 策略的事件驱动实现

(1) 确定策略的触发事件。事件驱动的触发表达式所涉测点由协程监测得到,当测点变化满足表达式时,事件触发驱动策略运行。综上所述策略内容,可将触发事件类型大致分为输出交互类事件、运行控制类事件和安全性事件。输出交互类事件包括上级系统的功率调度指令、并网指令等,如柔性充放电控制触发事件为式(13);运行控制类事件包括设备控制指令、状态监测指令等,如电解液泵运行的触发事件为电堆输出电流大于 0;安全性事

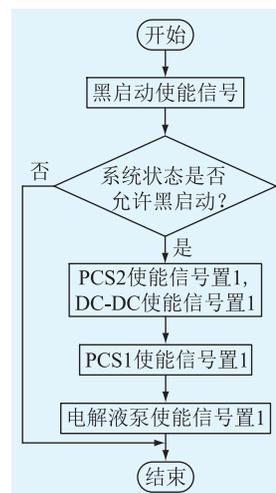


图 6 辅助电堆参与的黑启动流程

Fig.6 Flow chart of black start-up with auxiliary stacks 件包括温度越限、电堆电压越限等,如储罐温度保护触发事件为储罐测量温度超过设定警告值。同时,为保证策略不被反复触发,根据控制需求设置触发周期,如 SOC 估计的控制周期设置为 2 s。

(2) 将策略按逻辑顺序分解为一系列节点事件与动作。节点事件与触发事件类似,动作即事件触发后执行的指令动作,完成分解后按标准化格式进行配置即可实现策略开发。由于各策略间的触发执行相互独立,所以上述策略组合后便形成液流电池控制系统,适合模块化开发。

3 液流电池控制系统半实物仿真

由于液流电池全实物试验存在建设成本高、开发周期长等问题,为验证提出的液流电池系统架构和控制策略的有效性和准确性,建立半实物仿真平台进行实验分析,其架构如图 7 所示。

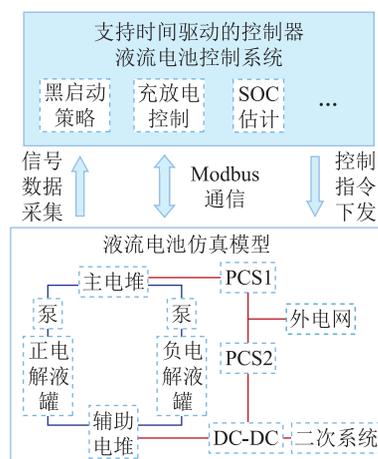


图 7 半实物仿真架构

Fig.7 Architecture of the semi-physical simulation

控制系统由支持事件驱动的控制器实现,并按

架构分模块开发控制策略;液流电池模型基于 Simulink 开发,并通过 Real-time 工具箱实现实时仿真,使模型运行时间与真实时间一致以提高实验可信度。仿真模型包括主/辅助电堆协同架构的液流电池模型、PCS 与外网等,控制系统通过 Modbus 协议采集系统电压、电流等信号,经策略处理后下发指令至仿真模型以实现控制。

控制器和仿真计算机通过以太网连接,由 Modbus 协议完成数据与控制指令的交互。半实物仿真设备如图 8 所示。

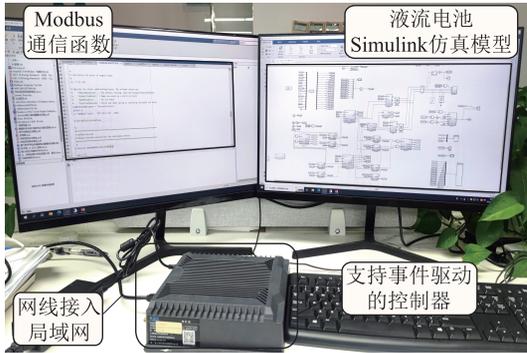


图 8 半实物仿真设备

Fig.8 Semi-physical simulation equipment

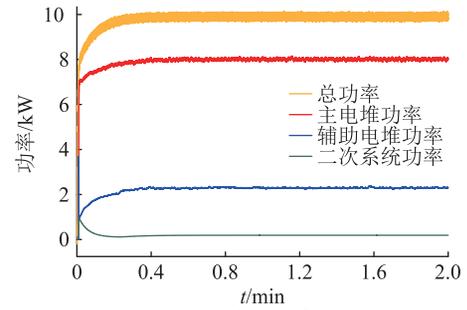
3.1 主/辅助电堆协同的柔性充放电控制

基于上述半实物仿真平台,为验证主/辅助电堆功率分配策略,设置液流电池不同充放电输出功率,如图 9 所示。

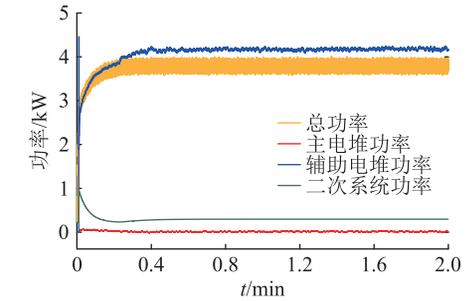
分析上述仿真结果可得,当放电模式,设置总功率为 10 kW 时,液流电池向外电网输出总功率基本稳定在 10 kW,而二次系统用电为 0.5 kW,两者用电总功率由主/辅助电堆按电极数量比 8:2 分配输出;而当放电模式,设置总功率为 4 kW(低功率)时,液流电池向外电网输出总功率基本稳定在 4 kW,而二次系统用电为 0.5 kW,两者用电总功率由辅助电堆提供,主电堆关闭;当充电模式,设置总功率为 10 kW 时,主/辅助电堆充电功率分别为 8 kW 与 2 kW,而二次系统用电为 0.5 kW,三者功率全部由外电网供电;而充电模式,设置总功率为 4 kW(低功率)时,主电堆关闭,外电网全部向辅助电堆和二次系统供电。

同时注意到系统总功率输出波动较各电堆更大,其主要原因为 PCS 的相关控制存在滞后性与调节误差,特别在功率输出较小时更为明显。而二次系统除刚启动时有尖峰,其余时刻波动较小,可见有较好的稳定性。

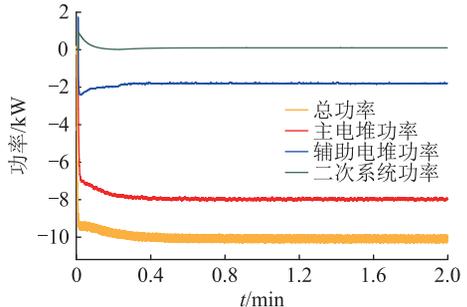
为验证主/辅助电堆协同的架构能降低电能损耗,提高能量转换效率,设置液流电池以 4 kW(低功



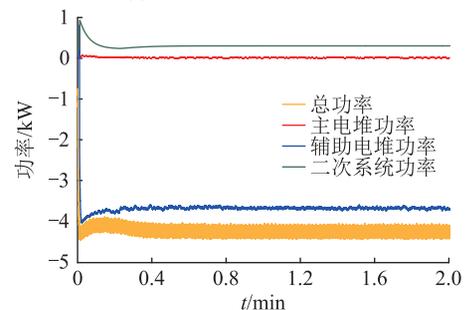
(a) 放电模式,总功率 $P=10$ kW



(b) 放电模式,总功率 $P=4$ kW



(c) 充电模式,总功率 $P=10$ kW



(d) 充电模式,总功率 $P=4$ kW

图 9 液流电池输出功率分配

Fig.9 Distribution of flow battery output power

率)放电, SOC 从 0.8 放电至 0.4, 计算总放电电量, 并对比相同输出条件下传统单类电堆架构的总放电电量, 该架构仅将辅助电堆替代为主电堆, 结果如图 10 所示。

同时对低功率充放电(4 kW, SOC 从 0.4 充电至 0.8 或 0.8 放电至 0.4)和大功率充放电(10 kW, SOC 从 0.4 充电至 0.8 或 0.8 放电至 0.4)工况进行仿真验证, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 在低功率模式下, 由于主/辅助电堆协同架构能根据输出功率关启主电堆及相关电解液泵等装置, 其能量转换效率高于传统架构; 而大

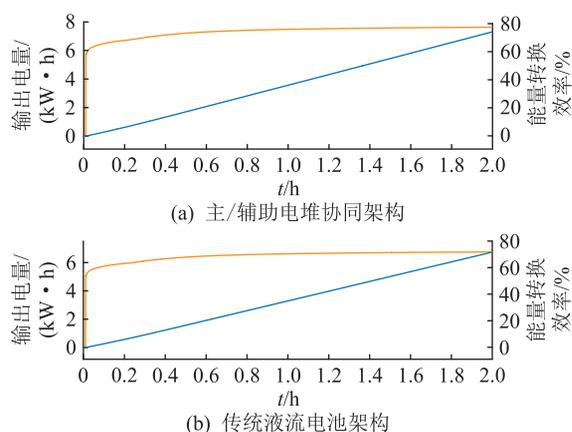


图 10 2 种架构低功率下的能量转换效率

Fig.10 Energy conversion efficiency of the two architectures at low power

表 1 2 种架构的各工况能量转换效率

Table 1 Energy conversion efficiency of the two architectures under different working conditions %

架构	低功率 放电效率	低功率 充电效率	大功率 放电效率	大功率 充电效率
主/辅助电堆协同架构	77.9	77.0	79.2	77.5
传统架构	72.5	71.8	79.0	78.2

功率模式两者效率相近。可见主/辅助电堆协同架构能较好提高能量转换效率。

为验证柔性充放电策略,设置正常恒功率充放电功率为 20 kW,电堆最大电压为 2 350 V,涓流电流 $I_{min} = 5$ A,运行结果如图 11 所示。

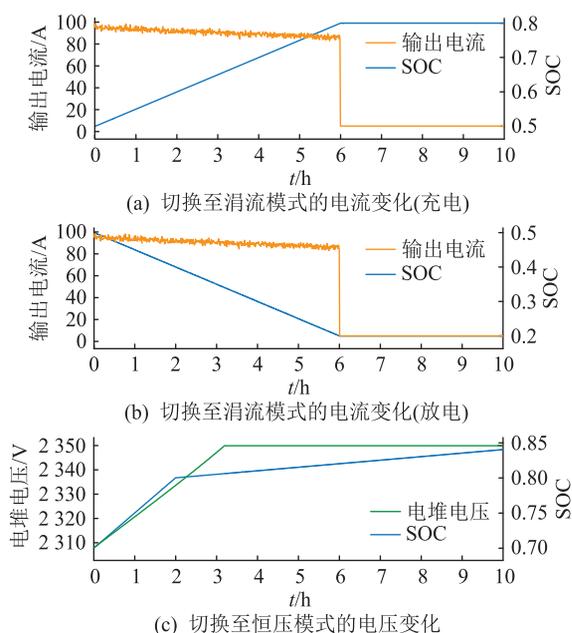


图 11 柔性充放电策略仿真结果

Fig.11 Simulation results of flexible charge-discharge strategy

正常运行时系统恒功率输出,SOC 升高导致电

压增大、输出电流逐渐减小,同时由于 PCS 的相关控制存在一定滞后性与误差,故存在较大噪声。当 SOC 值超过上限时,转为涓流模式,系统以 5 A 大小恒电流输出,由于电流控制精度高,噪声影响小。观察 SOC 值可见转为涓流模式后 SOC 上升较慢,起到防止过度充电的作用。同理放电时转为涓流模式起到防止过度放电的作用。同时当电堆电压超过一定值时,转为额定电压输出,起到防止过压的作用。

3.2 基于卡尔曼滤波算法的 SOC 估计

对卡尔曼滤波估计 SOC 进行仿真验证,运行结果如图 12 所示。

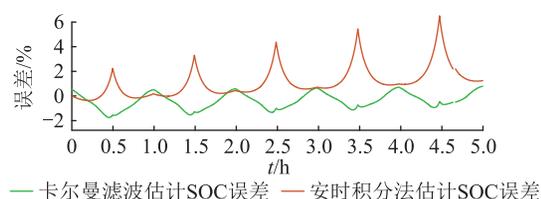


图 12 卡尔曼滤波与安时积分法估计 SOC 结果
Fig.12 Estimation of SOC by Kalman filtering and current integration method

由仿真结果可知,单个充放电周期内,安时积分法的误差有明显的方向性(即符号恒为正),且在深度放电时达到极大值,这是由于在单个充电或放电过程中电流方向不变使误差累计增加,同时因 2 个过程的电流方向相反而呈现先增后减规律;而卡尔曼滤波估计法的误差则在零值附近波动,由此可见卡尔曼滤波法误差随电池放电程度影响较小。在多个周期中,安时积分法误差逐渐增大,最大误差达 6%左右,而卡尔曼滤波法累积误差现象不明显,最大误差在 2%左右。

然而由于仿真实验不存在测量误差等影响,主要误差来自电堆电势的线性化处理,因此较实际情况偏小,但对比 2 种方法仿真结果,卡尔曼滤波估计 SOC 的精度更高。

4 结论

为提高液流电池系统的运行效率和可靠性,文中提出基于事件驱动技术的实现方法以及相关系统架构、控制策略。根据实验仿真结果,可得到如下结论:

(1) 由半实物仿真实验运行结果可知,事件驱动实现的控制系统实时性高,多策略间控制精确度高,能够正确有序完成各控制目标。

(2) 在系统运行效率上,主/辅助电堆协同架构相较传统架构具有更高的能量转换效率,特别是在

低功率模式下。

(3) 针对 SOC 等关键运行数据检测,卡尔曼滤波法具有更高精度,且受电池放电程度与误差累积的影响更小。

文中所开发控制系统的控制对象为仿真模型,与实际工程相比较为简化,控制策略体系未完善,然而模型仿真为工程应用提供开发基础,对于液流电池系统落地有重大意义。

参考文献:

- [1] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2016,31(14):1-10,20.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10, 20.
- [2] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 张华民,张宇,刘宗浩,等. 液流储能电池技术研究进展[J]. 化学进展,2009,21(11):2333-2340.
ZHANG Huamin, ZHANG Yu, LIU Zonghao, et al. Redox flow battery technology[J]. Progress in Chemistry, 2009, 21(11): 2333-2340.
- [4] 袁治章,刘宗浩,李先锋. 液流电池储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(9):2944-2958.
YUAN Zhizhang, LIU Zonghao, LI Xianfeng. Research progress of flow battery technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2944-2958.
- [5] 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.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25, 102.
- [6] 刘素琴,黄可龙,刘又年,等. 储能钒液流电池研发热点及前景[J]. 电池,2005,35(5):356-359.
LIU Suqin, HUANG Kelong, LIU Younian, et al. The development and research progress in a energy storage unit-the vanadium redox flow battery[J]. Battery Bimonthly, 2005, 35(5): 356-359.
- [7] 唐昇,严川伟. 液流电池模拟仿真研究现状与展望[J]. 储能科学与技术,2022,11(9):2866-2878.
TANG Ao, YAN Chuanwei. Modelling and simulation of flow batteries: recent progress and prospects[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2866-2878.
- [8] 张华民. 全钒液流电池的技术进展、不同储能时长系统的价格分析及展望[J]. 储能科学与技术,2022,11(9):2772-2780.
ZHANG Huamin. Development, cost analysis considering various durations, and advancement of vanadium flow batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2772-2780.
- [9] 吴雨森. 全钒液流电池 SOC 及能量管理系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
WU Yusen. Research on SOC estimation and energy management system of all vanadium redox flow battery[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [10] 李峰. 适用于液流电池储能系统的电池管理系统[J]. 上海电气技术,2021,14(2):54-56.
LI Feng. Battery management system suitable for flow battery energy storage system[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2021, 14(2): 54-56.
- [11] LAWDER M T, SUTHAR B, NORTHROP P W C, et al. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(6): 1014-1030.
- [12] 黄植,刘东,陈冠宏,等. 基于事件驱动的配电信息物理连锁故障演化机理[J]. 电力工程技术,2022,41(3):2-13.
HUANG Zhi, LIU Dong, CHEN Guanhong, et al. The evolution mechanism of the cyber-physical cascading failure of power distribution system based on event-driven[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 2-13.
- [13] 董树锋,刘灵冲,唐坤杰,等. 基于 Simulink 和低代码控制器的储能控制实验教学方法[J]. 储能科学与技术,2022,11(7):2386-2397.
DONG Shufeng, LIU Lingchong, TANG Kunjie, et al. The teaching method of energy storage control experiment based on Simulink and low-code controller[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2386-2397.
- [14] 沈斌斌,王之伟,池庆国,等. 事件驱动控制系统下的新型触发机制[J]. 控制工程,2022,29(8):1429-1436.
SHEN Binbin, WANG Zhiwei, CHI Qingguo, et al. New triggering mechanism for event-driven control system[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(8): 1429-1436.
- [15] 房茂霖,张英,乔琳,等. 铁铬液流电池技术的研究进展[J]. 储能科学与技术,2022,11(5):1358-1367.
FANG Maolin, ZHANG Ying, QIAO Lin, et al. Research progress of iron-chromium flow batteries technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1358-1367.
- [16] XIONG B Y, ZHAO J Y, LI J B. Modeling of an all-vanadium redox flow battery and optimization of flow rates[C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2013: 1-5.
- [17] 余洋,王孟云,张瑞丰,等. 基于反推控制的储能系统并网变流器直接 PQ 控制策略[J]. 电力科学与工程,2021,37(10):11-17.
YU Yang, WANG Mengyun, ZHANG Ruifeng, et al. Direct PQ-control strategy for grid-connected inverter of energy storage system based on backstepping control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(10): 11-17.
- [18] 王亚光,王秋源,陆继明,等. 大容量液流电池系统数学模

- 型与仿真[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 72-78.
- WANG Yaguang, WANG Qiuyuan, LU Jiming, et al. Mathematical model of LCFBS and simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 72-78.
- [19] 谢克桓, 李传常, 陈荐, 等. 全钒液流电池储能仿真模型及荷电状态监测方法研究[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 2363-2372.
- XIE Kehuan, LI Chuanchang, CHEN Jian, et al. Simulation model advances in vanadium redox flow battery energy storage and monitoring method for state of charge[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(6): 2363-2372.
- [20] 王湘明, 李庆磊, 郭雨梅. 基于 Matlab/Simulink 全钒液流电池的建模研究[J]. 电源技术, 2013, 37(2): 234-237.
- WANG Xiangming, LI Qinglei, GUO Yumei. Research on VRB modeling based on Matlab/Simulink[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(2): 234-237.
- [21] 姚寿广, 刘卫, 程杰, 等. 锌镍单液流电池模块化系统管路设计优化[J]. 电池, 2018, 48(2): 83-87.
- YAO Shouguang, LIU Wei, CHENG Jie, et al. Pipeline design optimization of modular system for zinc-nickel single flow battery[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(2): 83-87.
- [22] SVOBODA V, DOERING H, GARCHE J. The influence of fast charging on the performance of VRLA batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 244-254.
- [23] GIULIANINI M, DART M. Flow battery versatility: adapting the battery to the specific application[C]//2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). Broadbeach, QLD, Australia. IEEE, 2017: 303-306.
- [24] 李辉, 季海婷, 付博, 等. 含 DC/DC 变换器全钒液流电池储能系统安全充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 7-11, 18.
- LI Hui, JI Haiting, FU Bo, et al. Safe charge-discharge control strategy for vanadium redox flow battery energy storage system with DC/DC converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 7-11, 18.
- [25] 郑涛, 桂少婷, 李鑫, 等. 一种全钒液流电池组的 SOC 均衡控制方案[J]. 电源技术, 2018, 42(1): 81-83.
- ZHENG Tao, GUI Shaoting, LI Xin, et al. SOC equalization control scheme of all vanadium redox flow battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(1): 81-83.
- [26] 熊磊, 陈相全, 谢晖, 等. 基于卡尔曼滤波的 PID 控制在 PLC 中的实现及应用[J]. 现代电子技术, 2022, 45(6): 5-8.
- XIONG Lei, CHEN Xiangquan, XIE Hui, et al. Realization and application of PID control based on Kalman filtering in PLC[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(6): 5-8.
- [27] 董栋, 何鼎, 景俊杰. 含钒电池的微电网作为黑启动电源的研究[J]. 电源技术, 2016, 40(11): 2217-2219, 2287.
- DONG Dong, HE Ding, JING Junjie. Investigation of microgrid with vanadium redox flow battery storages as black start source[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(11): 2217-2219, 2287.

作者简介:



练润哲

练润哲(2000),男,硕士在读,研究方向为电力能源互联及其智能化(E-mail: 2221006-2@zju.edu.cn);

董树锋(1982),男,博士,副教授,研究方向为电力系统状态估计和优化运行、综合能源系统与微电网优化运行、信息技术与高性能计算技术在电力系统中的应用。

A method of flow battery control system based on event-driven technology

LIAN Runzhe, DONG Shufeng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Flow battery is an ideal choice for long-term and large-scale energy storage due to its advantages of numerous charge-discharge cycles, high capacity and long lifespan. However, the flow battery's complex structure poses high demands on battery control system, and traditional development methods are challenging to meet the flow battery system's diverse control requirements. To address this problem, a method for developing a flow battery control system based on event-driven technology is proposed, which aims to improve control precision and real-time performance. The proposed approach firstly presents a main-auxiliary stack synergistic architecture to address issues such as high stability requirements and large internal losses of flow batteries, and the architecture is modeled and analyzed. Then, the control system is designed by modularization based on event-driven technology, including the modules of flexible charging-discharging control, black start-up control strategy with auxiliary stacks, and state of charge (SOC) estimation based on Kalman filtering. Finally, a semi-physical simulation platform is built to validate the proposed architecture and strategies, which demonstrates that the proposed architecture and strategies can improve the energy conversion efficiency and stability of the system.

Keywords: flow battery; event-driven; energy storage; flexible charge-discharge control; Kalman filtering; state of charge (SOC) estimation; black start-up

(编辑 吴昊)