



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113555590 A

(43) 申请公布日 2021. 10. 26

(21) 申请号 202110654020.0

H01M 8/04992 (2016.01)

(22) 申请日 2021.06.11

H02J 1/10 (2006.01)

(71) 申请人 武汉理工大学

H02J 7/00 (2006.01)

地址 430070 湖北省武汉市洪山区珞狮路122号

H02J 7/34 (2006.01)

(72) 发明人 陈启宏 付志超 张浩然 张立炎 周克亮 肖朋

(74) 专利代理机构 武汉开元知识产权代理有限公司 42104

代理人 刘琳 周艳

(51) Int. Cl.

H01M 8/04537 (2016.01)

H01M 8/0432 (2016.01)

H01M 8/04701 (2016.01)

H01M 8/04858 (2016.01)

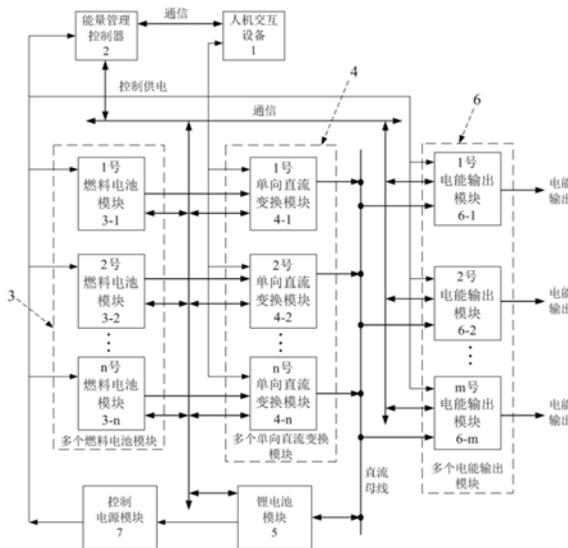
权利要求书5页 说明书13页 附图3页

(54) 发明名称

多燃料电池模块发电系统及其控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种多燃料电池模块发电系统及其控制方法,多燃料电池模块发电系统包括多个燃料电池模块、多个单向直流变换模块、锂电池模块、多个电能输出模块、能量管理控制器、人机交互设备和控制电源模块。控制方法包括燃料电池模块性能评估模型、二次规划最优能量管理策略、燃料电池模块最优功率时目标温度模型。所述燃料电池模块的电流、温度、承受功率通过性能评估模型得到相应的最佳功率、最大功率和功率最大变化量;根据多燃料电池模块发电系统状态求得系统输出功率,并通过二次规划能量管理策略得到每个燃料电池模块最优功率;最后根据目标温度模型得到模块温度,控制燃料电池模块在该温度点工作,使燃料电池性能最优,发电系统能量管理总体最优。



1. 一种多燃料电池模块发电系统,其特征在于,包括:

多个燃料电池模块,用于作为主动力源,并监控自身的状态数据,对所述燃料电池模块进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量;

多个单向直流变换模块,其与多个燃料电池模块一一对应,且所述单向直流变换模块的电能输入端与对应的所述燃料电池模块的电能输出端相连,所述单向直流变换模块的电能输出端与直流母线相连,用于将多个所述燃料电池模块输出的电能变换为与所述直流母线电气匹配;且所述单向直流变换模块接收能量管理控制器的需求电流指令,并根据接收到的需求电流指令,控制对应的所述燃料电池模块的输出电流达到目标需求电流,以控制所述燃料电池模块的输出功率;

锂电池模块,用于作为辅助动力源并存储电能,且所述锂电池模块的一个电能端与所述直流母线相连;

多个电能输出模块,所述电能输出模块的电能输入端与所述直流母线相连,所述电能输出模块的电能输出端连接外部负载,为外部负载供电;

能量管理控制器,所述能量管理控制器的一个通信口与多个所述燃料电池模块、多个所述单向直流变换模块、所述锂电池模块和多个所述电能输出模块的通信口连接,用于根据多个所述电能输出模块发送的总负载功率以及所述锂电池模块发送的锂电池当前电压值和当前电流值,计算多个所述燃料电池模块的需求功率;根据所述需求功率和所述燃料电池模块发送的最优功率确定启动的所述燃料电池模块的数量,并根据启动的所述燃料电池模块的数量以及所述燃料电池模块发送的最大功率和功率最大变化量,基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略,计算每个所述燃料电池模块的设定功率;根据每个所述燃料电池模块的设定功率和燃料电池模块性能评估数学模型,反推每个所述燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度,并控制对应的燃料电池模块达到该目标温度,实现能量分配总体最优;所述能量管理控制器还将每个所述燃料电池模块的所述最优功率换算成需求电流值发送给对应的所述单向直流变换模块,以实现能量管理控制;

人机交互设备,与所述能量管理控制器的另一个通信口连接,用于接收人工开关机指令、显示和存储所述能量管理控制器发送的来自多个所述燃料电池模块、多个所述单向直流变换模块、所述锂电池模块和多个所述电能输出模块的状态数据;

控制电源模块,所述控制电源模块的电能输入端与所述锂电池模块的另一个电能端相连,所述控制电源模块的电能输出端与多个所述燃料电池模块、多个所述单向直流变换模块、多个所述电能输出模块、所述能量管理控制器以及所述人机交互设备的控制电源接口相连。

2. 如权利要求1所述的多燃料电池模块发电系统,其特征在于,所述燃料电池模块为质子交换膜燃料电池或者固体氧化物燃料电池,所述质子交换膜燃料电池包括液冷和风冷冷却方式。

3. 如权利要求1所述的多燃料电池模块发电系统,其特征在于,电气匹配通过升压变换电路或降压变换电路或升压变换电路结合降压变换电路实现。

4. 如权利要求1所述的多燃料电池模块发电系统,其特征在于,所述电能输出模块为交

流电能输出模块或者直流电能输出模块,所述交流电能输出模块为单相交流电能输出模块或三相交流电能输出模块。

5.如权利要求1所述的多燃料电池模块发电系统,其特征在于,监控自身的状态数据,对所述燃料电池模块进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量具体为:

根据当前燃料电池模块的电流、温度、承受功率SOP,结合燃料电池半经验模型进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量:

$$\begin{pmatrix} P_{g\_fcsmax,i} \\ P_{g\_fcsy,i} \\ \Delta P_{g\_fcs,i} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} I_{fcs,i} \\ T_{fcs,i} \\ SOP_{fcs,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

在式(1)中, $f()$ 是燃料电池半经验模型与燃料电池寿命测试数据拟合的多变量数学模型,采用非线性自回归平均滑动方法获得 $f()$ ,该模型以燃料电池模块 $i$ ( $i=1\sim n$ , $n$ 为正整数)的电流值 $I_{fcs,i}$ 、温度值 $T_{fcs,i}$ 、承受功率 $SOP_{fcs,i}$ 为输入,输出为燃料电池模块 $i$ 评估的燃料电池模块的最大功率 $P_{g\_fcsmax,i}$ ,最优功率 $P_{g\_fcsy,i}$ ,功率最大变化量 $\Delta P_{g\_fcs,i}$ ;

计算多个所述燃料电池模块需求功率的函数为:

$$P_{de} = \sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}} + V_{bat} \times I_{bat} \quad (2)$$

在式(2)中, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{fa,j}$ 为电能输出模块 $j$ ( $j=1\sim m$ , $m$ 为正整数)的输出电能值, $\eta_{fa,j}$ 为电能输出模块 $j$ 的电能转换效率值, $V_{bat}$ 为锂电池模块的当前电压值, $I_{bat}$ 为锂电池模块的当前电流值, $\sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}}$ 为多个电能输出模块的总负载功率;

计算每个所述燃料电池模块的设定功率的过程具体为:

(i)根据式(3)推导启动燃料电池模块的数量:

$$\sum_{i=1}^{k-1} P_{g\_fcsy,i} < P_{de} < \sum_{i=1}^k P_{g\_fcsy,i} \quad (3)$$

在式(3)中, $k$ 为启动燃料电池的数量, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{g\_fcsy,i}$ 为评估的燃料电池模块 $i$ 的最优功率;

(ii)由式(4)~式(8)计算每个所述燃料电池模块的设定功率:

$$P_{fcsset} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) \quad (4)$$

在式(4)中, $P_{fcsset}$ 为前 $k$ 个燃料电池模块经单向直流变换模块后输出电能的总和, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块 $i$ 的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块 $i$ 的转换效率;

$$P_{ref} = P_{fcsset} + V_{bat} \times I_{soc} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) + V_{bat} \times I_{batset} \quad (5)$$

在式(5)中, $P_{ref}$ 是多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块 $i$ 的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块 $i$ 的转换效率, $V_{bat}$ 是锂电池模块的当前电压值, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值;

$$I_{batset} = \begin{cases} \alpha_1 * I_{e\_bat} & SOC \leq a_1 \\ \alpha_2 * I_{e\_bat} & a_1 < SOC \leq a_2 \\ \alpha_3 * I_{e\_bat} & a_2 < SOC \leq a_3 \\ 0 & a_3 < SOC \leq a_4 \\ \alpha_4 * I_{e\_bat} & a_4 < SOC \end{cases} \quad (6)$$

在式(6)中,  $I_{batset}$  是设定的锂电池充放电电流值,  $I_{e\_bat}$  是额定充电电流,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  是充电倍率参数,  $0 < a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < 1$  代表SOC范围值;

通过二次规划方法, 求解全局燃料电池系统效率最大化:

$$\max(a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)) \quad (7)$$

在式(7)中,  $P_{ref}$  是式(5)中的多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率,  $a_2(i)$  是  $P_{ref}$  二次方的修正系数,  $a_1(i)$  是  $P_{ref}$  一次方的修正系数,  $a_0(i)$  是修正系数, 式(7)可表示为  $\max(f)$ , 其表示求函数  $f$  的最大值;

约束条件:

$$\begin{cases} 0 < P_{fcsset,i} < P_{g\_fcsmax,i} \\ 0 < \Delta P_{fcsset,i} < \Delta P_{g\_fcs,i} \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)中,  $P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块  $i$  的设定功率,  $P_{g\_fcsmax,i}$  为评估的燃料电池模块  $i$  的最大功率,  $\Delta P_{g\_fcs,i}$  为评估的燃料电池模块  $i$  的功率最大变化量,  $\Delta P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块  $i$  的设定变化量功率;

反推每个所述燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度的过程具体为:

根据式(9)计算每个燃料电池模块的目标温度:

$$T_{fcsset,i} = g(P_{fcsset,i}, V_{fcs,i}, R_{fcs,i}) \quad (9)$$

在式(9)中,  $g()$  是燃料电池模块性能评估的多变量数学模型, 同样采用非线性自回归滑动平均方法获得  $g()$ , 该模型以能量管理分配给燃料电池模块  $i$  的设定功率  $P_{fcsset,i}$ , 燃料电池模块  $i$  的电压  $V_{fcs,i}$ , 燃料电池模块  $i$  的冷却设备转速  $R_{fcs,i}$  为输入, 输出为燃料电池模块  $i$  评估的设定功率时燃料电池模块的目标温度  $T_{fcsset,i}$ 。

6. 一种多燃料电池模块发电系统的控制方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

(a) 多个燃料电池模块监控自身的状态数据, 对燃料电池模块进行性能评估得到当前温度情况下每个燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量;

(b) 根据多个电能输出模块发送的总负载功率以及锂电池模块发送的锂电池当前电压值和当前电流值, 计算多个燃料电池模块的需求功率;

(c) 根据所述需求功率和所述最优功率确定启动的燃料电池模块的数量, 并根据启动的燃料电池模块的数量以及所述最大功率和所述功率最大变化量, 基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略, 计算每个燃料电池模块的设定功率;

(d) 根据每个燃料电池模块的设定功率和燃料电池模块性能评估数学模型, 反推每个燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度, 并控制对应的燃料电池模块达到该目标温度, 实现能量分配总体最优, 并将每个燃料电池模块的最优功率换

算成需求电流值发送给对应的单向直流变换模块,以使对应的燃料电池模块的输出电流达到目标需求电流,从而控制燃料电池模块的输出功率,实现能量管理控制。

7.如权利要求6所述的多燃料电池模块发电系统的控制方法,其特征在于,所述步骤(a)具体为:

根据当前燃料电池的电流、温度、承受功率SOP,结合燃料电池半经验模型进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量:

$$\begin{pmatrix} P_{g\_fcsmax,i} \\ P_{g\_fcsy,i} \\ \Delta P_{g\_fcs,i} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} I_{fcs,i} \\ T_{fcs,i} \\ SOP_{fcs,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

在式(1)中, $f()$ 是燃料电池半经验模型与燃料电池寿命测试数据拟合的多变量数学模型,采用非线性自回归平均滑动方法获得 $f()$ ,该模型以燃料电池模块 $i$ ( $i=1\sim n$ , $n$ 为正整数)的电流值 $I_{fcs,i}$ 、温度值 $T_{fcs,i}$ 、承受功率 $SOP_{fcs,i}$ 为输入,输出为燃料电池模块 $i$ 评估的燃料电池模块的最大功率 $P_{g\_fcsmax,i}$ ,最优功率 $P_{g\_fcsy,i}$ ,功率最大变化量 $\Delta P_{g\_fcs,i}$ 。

8.如权利要求7所述的多燃料电池模块发电系统的控制方法,其特征在于,所述步骤(b)中计算多个燃料电池模块的需求功率函数为:

$$P_{de} = \sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}} + V_{bat} \times I_{bat} \quad (2)$$

在式(2)中, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{fa,j}$ 为电能输出模块 $j$ ( $j=1\sim m$ , $m$ 为正整数)的输出电能值, $\eta_{fa,j}$ 为电能输出模块 $j$ 的电能转换效率值, $V_{bat}$ 为锂电池模块的当前电压值, $I_{bat}$ 为锂电池模块的当前电流值, $\sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}}$ 为多个电能输出模块的总负载功率。

9.如权利要求8所述的多燃料电池模块发电系统的控制方法,其特征在于,所述步骤(c)具体为:

(i)根据式(3)推导启动燃料电池模块的数量:

$$\sum_{i=1}^{k-1} P_{g\_fcsy,i} < P_{de} < \sum_{i=1}^k P_{g\_fcsy,i} \quad (3)$$

在式(3)中, $k$ 为启动燃料电池的数量, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{g\_fcsy,i}$ 为评估的燃料电池模块 $i$ 的最优功率;

(ii)由式(4)~式(8)计算每个所述燃料电池模块的设定功率:

$$P_{fcsset} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) \quad (4)$$

在式(4)中, $P_{fcsset}$ 为前 $k$ 个燃料电池模块经单向直流变换模块后输出电能的总和, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块 $i$ 的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块 $i$ 的转换效率;

$$P_{ref} = P_{fcsset} + V_{bat} \times I_{soc} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) + V_{bat} \times I_{batset} \quad (5)$$

在式(5)中, $P_{ref}$ 是多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块 $i$ 的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块 $i$ 的转换效率, $V_{bat}$ 是

锂电池模块的当前电压值, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值;

$$I_{batset} = \begin{cases} \alpha_1 * I_{e\_bat} & SOC \leq a_1 \\ \alpha_2 * I_{e\_bat} & a_1 < SOC \leq a_2 \\ \alpha_3 * I_{e\_bat} & a_2 < SOC \leq a_3 \\ 0 & a_3 < SOC \leq a_4 \\ \alpha_4 * I_{e\_bat} & a_4 < SOC \end{cases} \quad (6)$$

在式(6)中, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值, $I_{e\_bat}$ 是额定充电电流, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 是充电倍率参数, $0 < a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < 1$ 代表SOC范围值;

通过二次规划方法,求解全局燃料电池系统效率最大化:

$$\max(a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)) \quad (7)$$

在式(7)中, $P_{ref}$ 是式(5)中的多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $a_2(i)$ 是 $P_{ref}$ 二次方的修正系数, $a_1(i)$ 是 $P_{ref}$ 一次方的修正系数, $a_0(i)$ 是修正系数,式(7)可表示为 $\max(f)$ ,其表示求函数 $f$ 的最大值;

约束条件:

$$\begin{cases} 0 < P_{fcsset,i} < P_{g\_fcsmax,i} \\ 0 < \Delta P_{fcsset,i} < \Delta P_{g\_fcs,i} \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)中, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块 $i$ 的设定功率, $P_{g\_fcsmax,i}$ 为评估的燃料电池模块 $i$ 的最大功率, $\Delta P_{g\_fcs,i}$ 为评估的燃料电池模块 $i$ 的功率最大变化量, $\Delta P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块 $i$ 的设定变化量功率。

10.如权利要求9所述的多燃料电池模块发电系统的控制方法,其特征在于,所述步骤(d)中反推每个燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度的过程具体为:

根据式(9)计算每个燃料电池模块的目标温度:

$$T_{fcsset,i} = g(P_{fcsset,i}, V_{fcs,i}, R_{fcs,i}) \quad (9)$$

在式(9)中, $g()$ 是燃料电池模块性能评估的多变量数学模型,同样采用非线性自回归滑动平均方法获得 $g()$ ,该模型以能量管理分配给燃料电池模块 $i$ 的设定功率 $P_{fcsset,i}$ ,燃料电池模块 $i$ 的电压 $V_{fcs,i}$ ,燃料电池模块 $i$ 的冷却设备转速 $R_{fcs,i}$ 为输入,输出为燃料电池模块 $i$ 评估的设定功率时燃料电池模块的目标温度 $T_{fcsset,i}$ 。

## 多燃料电池模块发电系统及其控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及燃料电池系统控制技术领域,具体涉及一种多燃料电池模块发电系统及其控制方法。

### 背景技术

[0002] 发电系统目前在野外、居民供电以及军事活动等场合中得到广泛使用,而传统的发电系统多采用光伏、蓄电池或柴油发电机发电,这在经济性方面会有很大的弊端,另外在特殊天气或恶劣环境下也会对系统有较大的影响。鉴于氢能是一种环境友好型的能源,利用氢能的燃料电池已经广泛应用于军事和航天领域。

[0003] 通常,燃料电池发电系统主要由燃料电池、锂电池和控制系统组成,其中,控制系统所采用的能量管理策略通常只考虑能量分配关系,即只考虑负载需求功率和锂电池SOC(State of Charge,荷电状态)。

[0004] 然而,由于现有的发电系统中的控制系统采用的能量管理策略只考虑能量分配关系,而忽视了限制实际输出燃料电池功率的外界条件带来的影响(如环境温度对燃料电池功率及效率影响、燃料电池长时间使用、性能衰减导致承受功率SOP下降等),因而影响了整个发电系统的经济性和寿命。

### 发明内容

[0005] 本发明为解决上述现有技术中的问题,提出一种多燃料电池模块发电系统及其控制方法,其不仅能使系统能量管理总体最优,而且能保证系统的可靠性、满足外界负载种类的需求。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了一种多燃料电池模块发电系统,包括:

[0007] 多个燃料电池模块,用于作为主动力源,并监控自身的状态数据,对所述燃料电池模块进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量;

[0008] 多个单向直流变换模块,其与多个燃料电池模块一一对应,且所述单向直流变换模块的电能输入端与对应的所述燃料电池模块的电能输出端相连,所述单向直流变换模块的电能输出端与直流母线相连,用于将多个所述燃料电池模块输出的电能变换为与所述直流母线电气匹配;且所述单向直流变换模块接收能量管理控制器的需求电流指令,并根据接收到的需求电流指令,控制对应的所述燃料电池模块的输出电流达到目标需求电流,以控制所述燃料电池模块的输出功率;

[0009] 锂电池模块,用于作为辅助动力源并存储电能,且所述锂电池模块的一个电能端与所述直流母线相连;

[0010] 多个电能输出模块,所述电能输出模块的电能输入端与所述直流母线相连,所述电能输出模块的电能输出端连接外部负载,为外部负载供电;

[0011] 能量管理控制器,所述能量管理控制器的一个通信口与多个所述燃料电池模块、

多个所述单向直流变换模块、所述锂电池模块和多个所述电能输出模块的通信口连接,用于根据多个所述电能输出模块发送的总负载功率以及所述锂电池模块发送的锂电池当前电压值和当前电流值,计算多个所述燃料电池模块的需求功率;根据所述需求功率和所述燃料电池模块发送的最优功率确定启动的所述燃料电池模块的数量,并根据启动的所述燃料电池模块的数量以及所述燃料电池模块发送的最大功率和功率最大变化量,基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略,计算每个所述燃料电池模块的设定功率;根据每个所述燃料电池模块的设定功率和燃料电池模块性能评估数学模型,反推每个所述燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度,并控制对应的燃料电池模块达到该目标温度,实现能量分配总体最优;所述能量管理控制器还将每个所述燃料电池模块的所述最优功率换算成需求电流值发送给对应的所述单向直流变换模块,以实现能量管理控制;

[0012] 人机交互设备,与所述能量管理控制器的另一个通信口连接,用于接收人工开关机指令、显示和存储所述能量管理控制器发送的来自多个所述燃料电池模块、多个所述单向直流变换模块、所述锂电池模块和多个所述电能输出模块的状态数据;

[0013] 控制电源模块,所述控制电源模块的电能输入端与所述锂电池模块的另一个电能端相连,所述控制电源模块的电能输出端与多个所述燃料电池模块、多个所述单向直流变换模块、多个所述电能输出模块、所述能量管理控制器以及所述人机交互设备的控制电源接口相连。

[0014] 优选地,所述燃料电池模块为质子交换膜燃料电池或者固体氧化物燃料电池,所述质子交换膜燃料电池包括液冷和风冷冷却方式。

[0015] 优选地,电气匹配通过升压变换电路或降压变换电路或升压变换电路结合降压变换电路实现。

[0016] 优选地,所述电能输出模块为交流电能输出模块或者直流电能输出模块,所述交流电能输出模块为单相交流电能输出模块或三相交流电能输出模块。

[0017] 优选地,监控自身的状态数据,对所述燃料电池模块进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量具体为:

[0018] 根据当前燃料电池模块的电流、温度、承受功率SOP,结合燃料电池半经验模型进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量:

$$[0019] \quad \begin{pmatrix} P_{g\_fcsmax,i} \\ P_{g\_fcsy,i} \\ \Delta P_{g\_fcs,i} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} I_{fcs,i} \\ T_{fcs,i} \\ SOP_{fcs,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0020] 在式(1)中, $f()$ 是燃料电池半经验模型与燃料电池寿命测试数据拟合的多变量数学模型,采用非线性自回归平均滑动方法获得 $f()$ ,该模型以燃料电池模块 $i$ ( $i=1\sim n$ , $n$ 为正整数)的电流值 $I_{fcs,i}$ 、温度值 $T_{fcs,i}$ 、承受功率 $SOP_{fcs,i}$ 为输入,输出为燃料电池模块 $i$ 评估的燃料电池模块的最大功率 $P_{g\_fcsmax,i}$ ,最优功率 $P_{g\_fcsy,i}$ ,功率最大变化量 $\Delta P_{g\_fcs,i}$ ;

[0021] 计算多个所述燃料电池模块的需求功率的函数为:

$$[0022] \quad P_{de} = \sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}} + V_{bat} \times I_{bat} \quad (2)$$

[0023] 在式(2)中, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{fa,j}$ 为电能输出模块j( $j=1\sim m$ , $m$ 为正整数)的输出电能值, $\eta_{fa,j}$ 为电能输出模块j的电能转换效率值, $V_{bat}$ 为锂电池模块的当前电压值, $I_{bat}$ 为锂电池模块的当前电流值, $\sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}}$ 为多个电能输出模块的总负载功率;

[0024] 计算每个所述燃料电池模块的设定功率的过程具体为:

[0025] (i) 根据式(3)推导启动燃料电池模块的数量:

$$[0026] \quad \sum_{i=1}^{k-1} P_{g\_fcsy,i} < P_{de} < \sum_{i=1}^k P_{g\_fcsy,i} \quad (3)$$

[0027] 在式(3)中, $k$ 为启动燃料电池的数量, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{g\_fcsy,i}$ 为评估的燃料电池模块i的最优功率;

[0028] (ii) 由式(4)~式(8)计算每个所述燃料电池模块的设定功率:

$$[0029] \quad P_{fcsset} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) \quad (4)$$

[0030] 在式(4)中, $P_{fcsset}$ 为前k个燃料电池模块经单向直流变换模块后输出电能的总和, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块i的转换效率;

$$[0031] \quad P_{ref} = P_{fcsset} + V_{bat} \times I_{soc} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) + V_{bat} \times I_{batset} \quad (5)$$

[0032] 在式(5)中, $P_{ref}$ 是多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块i的转换效率, $V_{bat}$ 是锂电池模块的当前电压值, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值;

$$[0033] \quad I_{batset} = \begin{cases} \alpha_1 * I_{e\_bat} & SOC \leq a_1 \\ \alpha_2 * I_{e\_bat} & a_1 < SOC \leq a_2 \\ \alpha_3 * I_{e\_bat} & a_2 < SOC \leq a_3 \\ 0 & a_3 < SOC \leq a_4 \\ \alpha_4 * I_{e\_bat} & a_4 < SOC \end{cases} \quad (6)$$

[0034] 在式(6)中, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值, $I_{e\_bat}$ 是额定充电电流, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 是充电倍率参数, $0 < a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < 1$ 代表SOC范围值;

[0035] 通过二次规划方法,求解全局燃料电池系统效率最大化:

$$[0036] \quad \max(a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)) \quad (7)$$

[0037] 在式(7)中, $P_{ref}$ 是式(5)中的多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $a_2(i)$ 是 $P_{ref}$ 二次方的修正系数, $a_1(i)$ 是 $P_{ref}$ 一次方的修正系数, $a_0(i)$ 是修正系数,式(7)可表示为 $\max(f)$ ,其表示求函数f的最大值;

[0038] 约束条件:

$$[0039] \quad \begin{cases} 0 < P_{fcsset,i} < P_{g\_fcsmax,i} \\ 0 < \Delta P_{fcsset,i} < \Delta P_{g\_fcs,i} \end{cases} \quad (8)$$

[0040] 在式(8)中, $P_{rcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率, $P_{g\_fcsmax,i}$ 为评估的燃料电池模

块i的最大功率,  $\Delta P_{g\_fcs,i}$  为评估的燃料电池模块i的功率最大变化量,  $\Delta P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块i的设定变化量功率;

[0041] 反推每个所述燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度的过程具体为:

[0042] 根据式(9)计算每个燃料电池模块的目标温度:

$$[0043] \quad T_{fcsset,i} = g(P_{fcsset,i}, V_{fcs,i}, R_{fcs,i}) \quad (9)$$

[0044] 在式(9)中,  $g()$  是燃料电池模块性能评估的多变量数学模型, 同样采用非线性自回归滑动平均方法获得 $g()$ , 该模型以能量管理分配给燃料电池模块i的设定功率 $P_{fcsset,i}$ , 燃料电池模块i的电压 $V_{fcs,i}$ , 燃料电池模块i的冷却设备转速 $R_{fcs,i}$  为输入, 输出为燃料电池模块i评估的设定功率时燃料电池模块的目标温度 $T_{fcsset,i}$ 。

[0045] 另外, 本发明还提供了一种多燃料电池模块发电系统的控制方法, 包括如下步骤:

[0046] (a) 多个燃料电池模块监控自身的状态数据, 对燃料电池模块进行性能评估得到当前温度情况下每个燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量;

[0047] (b) 根据多个电能输出模块发送的总负载功率以及锂电池模块发送的锂电池当前电压值和当前电流值, 计算多个燃料电池模块的需求功率;

[0048] (c) 根据所述需求功率和所述最优功率确定启动的燃料电池模块的数量, 并根据启动的燃料电池模块的数量以及所述最大功率和所述功率最大变化量, 基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略, 计算每个燃料电池模块的设定功率;

[0049] (d) 根据每个燃料电池模块的设定功率和燃料电池模块性能评估数学模型, 反推每个燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度, 并控制对应的燃料电池模块达到该目标温度, 实现能量分配总体最优, 并将每个燃料电池模块的最优功率换算成需求电流值发送给对应的单向直流变换模块, 以使对应的燃料电池模块的输出电流达到目标需求电流, 从而控制燃料电池模块的输出功率, 实现能量管理控制。

[0050] 优选地, 所述步骤(a)具体为:

[0051] 根据当前燃料电池的电流、温度、承受功率SOP, 结合燃料电池半经验模型进行性能评估得到当前温度情况下燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量:

$$[0052] \quad \begin{pmatrix} P_{g\_fcsmax,i} \\ P_{g\_fcsy,i} \\ \Delta P_{g\_fcs,i} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} I_{fcs,i} \\ T_{fcs,i} \\ SOP_{fcs,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0053] 在式(1)中,  $f()$  是燃料电池半经验模型与燃料电池寿命测试数据拟合的多变量数学模型, 采用非线性自回归平均滑动方法获得 $f()$ , 该模型以燃料电池模块i ( $i=1 \sim n$ ,  $n$ 为正整数)的电流值 $I_{fcs,i}$ 、温度值 $T_{fcs,i}$ 、承受功率 $SOP_{fcs,i}$  为输入, 输出为燃料电池模块i评估的燃料电池模块的最大功率 $P_{g\_fcsmax,i}$ , 最优功率 $P_{g\_fcsy,i}$ , 功率最大变化量 $\Delta P_{g\_fcs,i}$ 。

[0054] 优选地, 所述步骤(b)中计算多个燃料电池模块的需求功率函数为:

$$[0055] \quad P_{de} = \sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}} + V_{bat} \times I_{bat} \quad (2)$$

[0056] 在式(2)中,  $P_{de}$  为多个燃料电池模块的需求功率值,  $P_{fa,j}$  为电能输出模块j ( $j=1 \sim m$ ,  $m$ 为正整数)的输出电能值,  $\eta_{fa,j}$  为电能输出模块j的电能转换效率值,  $V_{bat}$  为锂电池模块

的当前电压值,  $I_{bat}$  为锂电池模块的当前电流值,  $\sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}}$  为多个电能输出模块的总负载功率。

[0057] 优选地, 所述步骤 (c) 具体为:

[0058] (i) 根据式 (3) 推导启动燃料电池模块的数量:

$$[0059] \quad \sum_{i=1}^{k-1} P_{g\_fcsy,i} < P_{de} < \sum_{i=1}^k P_{g\_fcsy,i} \quad (3)$$

[0060] 在式 (3) 中,  $k$  为启动燃料电池的数量,  $P_{de}$  为多个燃料电池模块的需求功率值,  $P_{g\_fcsy,i}$  为评估的燃料电池模块  $i$  的最优功率;

[0061] (ii) 由式 (4) ~ 式 (8) 计算每个所述燃料电池模块的设定功率:

$$[0062] \quad P_{fcsset} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) \quad (4)$$

[0063] 在式 (4) 中,  $P_{fcsset}$  为前  $k$  个燃料电池模块经单向直流变换模块后输出电能的总和,  $P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块  $i$  的设定功率,  $\eta_{dc,i}$  为单向直流变换模块  $i$  的转换效率;

$$[0064] \quad P_{ref} = P_{fcsset} + V_{bat} \times I_{soc} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) + V_{bat} \times I_{batset} \quad (5)$$

[0065] 在式 (5) 中,  $P_{ref}$  是多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率,  $P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块  $i$  的设定功率,  $\eta_{dc,i}$  为单向直流变换模块  $i$  的转换效率,  $V_{bat}$  是锂电池模块的当前电压值,  $I_{batset}$  是设定的锂电池充放电电流值;

$$[0066] \quad I_{batset} = \begin{cases} \alpha_1 * I_{e\_bat} & SOC \leq a_1 \\ \alpha_2 * I_{e\_bat} & a_1 < SOC \leq a_2 \\ \alpha_3 * I_{e\_bat} & a_2 < SOC \leq a_3 \\ 0 & a_3 < SOC \leq a_4 \\ \alpha_4 * I_{e\_bat} & a_4 < SOC \end{cases} \quad (6)$$

[0067] 在式 (6) 中,  $I_{batset}$  是设定的锂电池充放电电流值,  $I_{e\_bat}$  是额定充电电流,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  是充电倍率参数,  $0 < a_1 < a_2 < a_3 < a_4 < 1$  代表 SOC 范围值;

[0068] 通过二次规划方法, 求解全局燃料电池系统效率最大化:

$$[0069] \quad \max(a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)) \quad (7)$$

[0070] 在式 (7) 中,  $P_{ref}$  是式 (5) 中的多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率,  $a_2(i)$  是  $P_{ref}$  二次方的修正系数,  $a_1(i)$  是  $P_{ref}$  一次方的修正系数,  $a_0(i)$  是修正系数, 式 (7) 可表示为  $\max(f)$ , 其表示求函数  $f$  的最大值;

[0071] 约束条件:

$$[0072] \quad \begin{cases} 0 < P_{fcsset,i} < P_{g\_fcsmax,i} \\ 0 < \Delta P_{fcsset,i} < \Delta P_{g\_fcs,i} \end{cases} \quad (8)$$

[0073] 在式 (8) 中,  $P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块  $i$  的设定功率,  $P_{g\_fcsmax,i}$  为评估的燃料电池模块  $i$  的最大功率,  $\Delta P_{g\_fcs,i}$  为评估的燃料电池模块  $i$  的功率最大变化量,  $\Delta P_{fcsset,i}$  为燃料电池模块  $i$  的设定变化量功率。

[0074] 优选地,所述步骤(d)中反推每个燃料电池模块的设定功率为最优功率时每个燃料电池模块的目标温度的过程具体为:

[0075] 根据式(9)计算每个燃料电池模块的目标温度:

$$T_{fcsset,i} = g(P_{fcsset,i}, V_{fcs,i}, R_{fcs,i}) \quad (9)$$

[0077] 在式(9)中, $g()$ 是燃料电池模块性能评估的多变量数学模型,同样采用非线性自回归滑动平均方法获得 $g()$ ,该模型以能量管理分配给燃料电池模块*i*的设定功率 $P_{fcsset,i}$ ,燃料电池模块*i*的电压 $V_{fcs,i}$ ,燃料电池模块*i*的冷却设备转速 $R_{fcs,i}$ 为输入,输出为燃料电池模块*i*评估的设定功率时燃料电池模块的目标温度 $T_{fcsset,i}$ 。

[0078] 本发明提供的技术方案带来的有益效果是:

[0079] 一方面,本发明的多燃料电池模块发电系统及其控制方法通过燃料电池模块性能评估根据燃料电池模块当前的电流、温度、承受功率得到不同温度情况下燃料电池最佳功率、燃料电池最大功率和燃料电池功率变化量,并根据当前燃料电池模块状态及功率需求得到系统内耗最小时的燃料电池温度值,而系统需求功率既满足了对外输出的电能需求,也满足了维持锂电池处于高SOC状态的电能需求,同时系统能量管理策略评估燃料电池模块当前能输出的最大功率及最大突变功率对实际能量分配做限制,并基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略,计算每个燃料电池模块设定功率且控制使燃料电池设定功率为最优功率时燃料电池相应温度,控制燃料电池达到温度值,使系统能量管理总体最优。另一方面,本发明的锂电池模块可用于系统启动供电、启动过程中大功率电能输出以及系统运行时的电能削峰填谷;多个燃料电池模块存在冗余和备份,保证了系统的可靠性;多个单向直流变换模块的电气存在升压变换电路、或降压变换电路、或同时存在升压变换电路和降压变换电路,保证不同功率燃料电池模块都能与系统母线电压匹配,系统兼容性强;电能输出模块多样性满足外界负载种类需求。

## 附图说明

[0080] 图1为本发明实施例提供的多燃料电池模块发电系统的结构示意图;

[0081] 图2为本发明实施例提供的多燃料电池模块发电系统的控制方法的流程图;

[0082] 图3为本发明具体案例提供的多燃料电池模块发电系统的结构示意图。

## 具体实施方式

[0083] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案作进一步地详细描述。

[0084] 如图1所示,本实施例提供了一种多燃料电池模块发电系统包括人机交互设备1、能量管理控制器2、多个燃料电池模块3、多个单向直流变换模块4、锂电池模块5、多个电能输出模块6和控制电源模块7。

[0085] 人机交互设备1与能量管理控制器2的一个通信口连接,且人机交互设备1的控制电源接口与控制电源模块7的电能输出端相连。人机交互设备1可接收人工指令并显示和存储能量管理控制器2发送的系统状态,如多个燃料电池模块3、多个单向直流变换模块4、锂电池模块5和多个电能输出模块6的状态数据。具体地,人机交互设备1与能量管理控制器2可通过RS485通信连接。

[0086] 能量管理控制器2的另一个通信口与多个燃料电池模块3、多个单向直流变换模块4、锂电池模块5和多个电能输出模块6的通信口相连,接收各设备状态数据,进行多个燃料电池模块需求功率计算、启动燃料电池模块数量计算、系统能量管理策略处理和燃料电池模块控制优化,是系统能量计算和分配的核心。能量管理控制器2的控制电源接口与控制电源模块7的电能输出端相连。由于“系统需求功率计算”、“启动燃料电池模块数量计算”、“系统能量管理策略处理”和“燃料电池模块控制优化”与下面的多燃料电池模块发电系统控制方法的步骤S2~步骤S5中记载的内容相同,此处不再赘述。

[0087] 多个燃料电池模块3包括1号燃料电池模块3-1、2号燃料电池模块3-2、...、n号燃料电池模块3-n。燃料电池模型类型包括质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池等,质子交换膜燃料电池存在液冷和风冷冷却方式等,燃料电池模块的功率可以相同或不同。多个燃料电池模块用作主动力源,并可监控自身的状态数据,对每个燃料电池模块进行性能评估得到不同温度情况下每个燃料电池模块的最大功率、最优功率和功率最大变化量。燃料电池模块的性能评估同下面的多燃料电池模块发电系统控制方法的步骤S1中的内容相同,此处不再赘述。

[0088] 多个单向直流变换模块4包括1号单向直流变换模块4-1、2号单向直流变换模块4-2、...、n号单向直流变换模块4-n,且与多个燃料电池模块一一对应连接,即1号燃料电池模块3-1的电能输出端与1号单向直流变换模块4-1的电能输入端相连,2号燃料电池模块3-2的电能输出端与2号单向直流变换模块4-2的电能输入端相连...n号燃料电池模块3-n的电能输出端与n号单向直流变换模块4-n的电能输入端相连。1号单向直流变换模块4-1、2号单向直流变换模块4-2、...、n号单向直流变换模块4-n的电能输出端与直流母线连接。单向直流变换模块的电气存在升压变换电路、降压变换电路或升压变换电路加降压变换电路,保证不同功率的燃料电池模块都能与系统母线的电压匹配。

[0089] 1号燃料电池模块3-1的通信口、2号燃料电池模块3-2的通信口、...、n号燃料电池模块3-n的通信口均与能量管理控制器2的通信口连接,以传输燃料电池模块状态,且1号单向直流变换模块4-1的通信口、2号单向直流变换模块4-2的通信口、...、n号单向直流变换模块4-n的通信口均与能量管理控制器2的通信口连接,以传输单向直流变换模块的状态。1号燃料电池模块3-1的控制电源接口、2号燃料电池模块3-2的控制电源接口、...、n号燃料电池模块3-n的控制电源接口以及1号单向直流变换模块4-1的控制电源接口、2号单向直流变换模块4-2的控制电源接口、...、n号单向直流变换模块4-n的控制电源接口与控制电源模块的电能输出端连接。多个单向直流变换模块4用于将多个燃料电池模块输出的电能变换为与直流母线电气匹配,而且从能量管理控制器2接收由每个燃料电池模块的最优功率换算成的需求电流的指令控制对应的燃料电池模块的输出电流达到目标需求电流,以控制对应的燃料电池模块的输出功率。

[0090] 锂电池模块5的一个电能端与直流母线相连,锂电池模块5的另一个电能端与控制电源模块7的电能输入端相连,且锂电池模块5的通信口与能量管理控制器2的通信口相连,以传输锂电池模块状态。锂电池模块5作为储能和辅助动力源,用于系统启动及运行电能削峰填谷。

[0091] 多个电能输出模块6包括1号电能输出模块6-1、2号电能输出模块6-2,...,m号电能输出模块6-m。1号电能输出模块6-1的电能输入端、2号电能输出模块6-2的电能输入端,...,

m号电能输出模块6-m的电能输入端均与直流母线相连,1号电能输出模块6-1的电能输出端、2号电能输出模块6-2的电能输出端,⋯,m号电能输出模块6-m的电能输出端连接外部负载,为外部负载供电。而且,1号电能输出模块6-1的通信口、2号电能输出模块6-2的通信口,⋯,m号电能输出模块6-m的通信口均与能量管理控制器2通信口相连,以传输电能输出模块状态。1号电能输出模块6-1的控制电源接口、2号电能输出模块6-2的控制电源接口,⋯,m号电能输出模块6-m的控制电源接口均与控制电源模块7的电能输出端相连。多个电能输出模块可以为交流,如单向交流、三相交流等,也可以是直流,用于为外部负载供电。

[0092] 控制电源模块7的电能输入端与锂电池模块5的电能端相连,经过控制电源模块7的电能变换输出,满足各设备控制用电需求。控制电源模块7的电能输出端还与燃料电池模块3、单向直流变换模块4的控制电源接口相连。

[0093] 参考图2,本发明还提供了一种多燃料电池模块发电系统控制方法,该方法包括如下步骤:

[0094] 步骤S1:燃料电池模块3-i性能评估:根据当前燃料电池的电流、温度、承受功率SOP,结合燃料电池半经验模型与燃料电池寿命测试数据拟合的多变量数学模型 $f()$ 进行性能评估得到不同温度情况下燃料电池的最大功率、最优功率、功率最大变化量:

$$[0095] \quad \begin{pmatrix} P_{g\_fcsmax,i} \\ P_{g\_fcsy,i} \\ \Delta P_{g\_fcs,i} \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} I_{fcs,i} \\ T_{fcs,i} \\ SOP_{fcs,i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0096] 在式(1)中,采用非线性自回归平均滑动方法获得 $f()$ 的多变量数学模型,该模型以燃料电池模块i( $i=1\sim n$ , $n$ 为正整数)的电流值 $I_{fcs,i}$ 、温度值 $T_{fcs,i}$ 、承受功率 $SOP_{fcs,i}$ 为输入,输出为燃料电池模块i评估的燃料电池最大功率 $P_{g\_fcsmax,i}$ ,燃料电池最优功率 $P_{g\_fcsy,i}$ ,燃料电池功率最大变化量 $\Delta P_{g\_fcs,i}$ ;

[0097] 步骤S2:多个燃料电池模块需求功率的计算:能量管理控制器2获取多个电能输出模块6发出的总负载功率,获取锂电池模块5的状态及SOC值,根据既要满足对外输出的电能需求,同时满足维持锂电池处于高SOC状态的电能需求,计算多个燃料电池模块的需求功率,计算需求功率的函数为:

$$[0098] \quad P_{de} = \sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}} + V_{bat} \times I_{bat} \quad (2)$$

[0099] 在式(2)中, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{fa,j}$ 为电能输出模块j( $j=1\sim m$ , $m$ 为正整数)的输出电能值, $\eta_{fa,j}$ 为电能输出模块j的电能转换效率值, $V_{bat}$ 为锂电池模块的当前电压值, $I_{bat}$ 为锂电池模块的当前电流值, $\sum_{j=1}^m \frac{P_{fa,j}}{\eta_{fa,j}}$ 为多个电能输出模块的总负载功率;

[0100] 步骤S3:计算启动燃料电池模块数量:能量管理控制器2根据系统需求功率计算 $P_{de}$ 、接收到的燃料电池模块3-i性能评估的燃料电池最优功率 $P_{g\_fcsy,i}$ ,采用式(3)推导计算

$$[0101] \quad \sum_{i=1}^{k-1} P_{g\_fcsy,i} < P_{de} < \sum_{i=1}^k P_{g\_fcsy,i} \quad (3)$$

[0102] 得到启动燃料电池数量,在式(3)中, $k$ 为启动燃料电池的数量, $P_{de}$ 为多个燃料电池模块的需求功率值, $P_{g\_fcsy,i}$ 为燃料电池模块i( $i=1\sim n$ )评估的燃料电池最优功率;燃料电

池模块启动时,默认启动顺序为1,2,⋯,n依次启动,如果其中某个一个或多个燃料电池模块存在故障,系统自动识别,默认该模块输出功率为零;

[0103] 步骤S4:系统能量管理策略:能量管理控制器2基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略,根据式(4)~式(8)计算每个燃料电池模块的设定功率:

$$[0104] \quad P_{fcsset} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) \quad (4)$$

[0105] 在式(4)中, $P_{fcsset}$ 为前k个燃料电池模块经单向直流变换模块后输出电能的总和, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块i的转换效率;

$$[0106] \quad P_{ref} = P_{fcsset} + V_{bat} \times I_{soc} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) + V_{bat} \times I_{batset} \quad (5)$$

[0107] 在式(5)中, $P_{ref}$ 是多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率, $\eta_{dc,i}$ 为单向直流变换模块i的转换效率, $V_{bat}$ 是锂电池模块的当前电压值, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值;

$$[0108] \quad I_{batset} = \begin{cases} \alpha_1 * I_{e\_bat} & SOC \leq a_1 \\ \alpha_2 * I_{e\_bat} & a_1 < SOC \leq a_2 \\ \alpha_3 * I_{e\_bat} & a_2 < SOC \leq a_3 \\ 0 & a_3 < SOC \leq a_4 \\ \alpha_4 * I_{e\_bat} & a_4 < SOC \end{cases} \quad (6)$$

[0109] 在式(6)中, $I_{batset}$ 是设定的锂电池充放电电流值, $I_{e\_bat}$ 是额定充电电流, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 是充电倍率参数, $0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4 < 1$ 代表SOC范围值;

[0110] 通过二次规划方法,求解全局燃料电池系统效率最大化:

$$[0111] \quad \max(a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)) \quad (7)$$

[0112] 在式(7)中, $P_{ref}$ 是式(5)中的多个燃料电池模块和锂电池模块的输出功率, $a_2(i)$ 是 $P_{ref}$ 二次方的修正系数, $a_1(i)$ 是 $P_{ref}$ 一次方的修正系数, $a_0(i)$ 是修正系数,式(7)可表示为 $\max(f)$ ,  $f = a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)$ ,其表示求函数f的最大值;

[0113] 约束条件:

$$[0114] \quad \begin{cases} 0 < P_{fcsset,i} < P_{g\_fcsmax,i} \\ 0 < \Delta P_{fcsset,i} < \Delta P_{g\_fcs,i} \end{cases} \quad (8)$$

[0115] 在式(8)中, $P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率, $P_{g\_fcsmax,i}$ 为燃料电池模块i评估的燃料电池最大功率, $\Delta P_{g\_fcs,i}$ 为燃料电池模块i评估的燃料电池功率最大变化量, $\Delta P_{fcsset,i}$ 为燃料电池模块i的设定功率变化量。

[0116] 步骤S5:燃料电池模块控制优化:燃料电池模块3-i根据系统能量管理策略设定功率以及燃料电池模块性能评估的多变量数学模型 $g()$ ,反推燃料电池设定功率为最优功率时燃料电池相应温度,控制燃料电池达到温度值,以使系统能量管理总体最优,并将每个燃料电池模块的最优功率换算成需求电流值发送给对应的单向直流变换模块,以使对应的燃料电池模块的输出电流达到目标需求电流,从而控制燃料电池模块的输出功率,实现能量管理控制:

[0117] 根据式(9)计算每个燃料电池模块的目标温度:

$$T_{fcsset,i} = g(P_{fcsset,i}, V_{fcs,i}, R_{fcs,i}) \quad (9)$$

[0119] 在式(9)中,  $g()$  是燃料电池模块性能评估的多变量数学模型, 同样采用非线性自回归滑动平均方法获得  $g()$ , 该模型以能量管理分配的燃料电池模块  $i$  的设定功率  $P_{fcsset,i}$ , 燃料电池模块  $i$  的电压  $V_{fcs,i}$ , 燃料电池模块  $i$  的冷却设备转速  $R_{fcs,i}$  为输入, 输出为燃料电池模块  $i$  评估的最优功率时燃料电池模块的目标温度  $T_{fcsset,i}$ 。

[0120] 需要说明的是, 为了满足系统负载功率突变及能量需求, 锂电池模块维持高SOC状态, 锂电池设计处于充电状态,  $I_{batset}$  值根据锂电池SOC的规则限制情况设定, SOC值越小,  $I_{batset}$  越大, SOC值越高,  $I_{batset}$  越小。

[0121] 为了更清楚地了解本发明, 下面列举一个具体案例。

[0122] 如图3所示, 本具体案例提供了一种多燃料电池模块发电系统, 其中, 人机交互设备1为触摸屏, 能量管理控制器2为DSP2812控制器, 3个燃料电池模块分别为: 1号燃料电池模块、2号燃料电池模块3-2和3号燃料电池模块3-3。1号燃料电池模块3-1是风冷燃料电池模块, 技术参数: 功率4kW, 电压DC45-90V, 电流: 80A。2号燃料电池模块3-2是风冷燃料电池模块, 技术参数: 功率4kW, 电压DC45-90V, 电流: 80A。3号燃料电池模块3-3是风冷燃料电池模块, 技术参数: 功率6kW, 电压DC60-120V, 电流: 80A。3个单向直流变换模块4分别为: 1号单向直流变换模块4-1为降升压直流变换器, 技术参数: 功率4kW, 输入电压DC45-90V, 输出电压DC42-60V, 电气结构是升压变换电路和降压变换电路。2号单向直流变换模块4-2为降升压直流变换器, 技术参数: 功率4kW, 输入电压DC45-90V, 输出电压DC42-60V, 电气结构是升压变换电路和降压变换电路。3号单向直流变换模块4-3为降压变换器, 技术参数: 功率6kW, 输入电压DC60-120V, 输出电压DC42-60V, 电气结构是降压变换电路。锂电池模块5为三元锂电池, 技术参数: 容量5.12kWh, 电压范围DC42-58V, 标称容量100Ah。3个电能输出模块6分别为: 1号电能输出模块6-1为三相交流电源, 技术参数: 功率6kW, 输入DC42-60V, 输出AC400V/50Hz。2号电能输出模块6-2为单相电源, 技术参数: 功率4kW, 输入DC42-60V, 输出AC230V/50Hz。3号电能输出模块6-3为DC12V电源, 技术参数: 功率1kW, 输入DC42-60V, 输出DC12V。控制电源模块7为DC24V电源, 技术参数: 功率500W, 输入DC42-60V, 输出DC24V。

[0123] 触摸屏1与DSP2812控制器2通过RS485通信连接, 触摸屏1的控制电源接口与DC24V电源7电源输出接口相连; 触摸屏1用于接收人工指令, 同时用于显示和存储由DSP2812控制器2发送的系统状态。

[0124] DSP2812控制器2的通信口与3个燃料电池模块3-1~3-3、3个单向直流变换模块4-1~4-3、锂电池模块5和3个电能输出模块6-1~6-3的通信口通过CAN通信相连。

[0125] DC24V电源7的电源输入接口与三元锂电池5的辅助电能接口相连, DC24V电源7的电源输出端与DSP2812控制器2、3个燃料电池模块3-1~3-3、3个单向直流变换模块4-1~4-3、锂电池模块5和3个电能输出模块6-1~6-3的控制电源接口相连。

[0126] 4kW风冷燃料电池模块3-1的电能输出端与降升压直流变换器4-1的电能输入端相连, 4kW风冷燃料电池模块3-2的电能输出端与降升压直流变换器4-2的电能输入端相连, 6kW风冷燃料电池模块3-3的电能输出端与降压直流变换器4-3的电能输入端相连。

[0127] 降升压直流变换器4-1的电能输出端与母线相连, 降升压直流变换器4-2的电能输出端与母线相连, 降压直流变换器4-3的电能输出端与母线相连。

[0128] 三元锂电池5的主电能接口与母线相连,三元锂电池5的辅助电能接口与DC24V电源7的电能输入接口相连。

[0129] 本具体案例还提供了一种多燃料电池模块发电系统控制方法,其包括:燃料电池模块性能评估、系统需求功率计算、系统能量管理策略、燃料电池模块控制优化。

[0130] 步骤S1:4kW风冷燃料电池模块3-1性能评估,根据当前燃料电池的电流( $I_{fcs,1}$ )、温度( $T_{fcs,1}$ )、SOP( $SOP_{fcs,1}$ ),采用非线性自回归平均滑动方法获得 $f()$ 的多变量数学模型,得到不同温度情况下燃料电池最大功率( $P_{g\_fcsmax,1}$ )、燃料电池最优功率( $P_{g\_fcsy,1}$ ),燃料电池功率最大变化量( $\Delta P_{g\_fcs,1}$ ):

$$[0131] \quad \begin{pmatrix} P_{g\_fcsmax,1} \\ P_{g\_fcsy,1} \\ \Delta P_{g\_fcs,1} \end{pmatrix} = f \left( \begin{pmatrix} I_{fcs,1} \\ T_{fcs,1} \\ SOP_{fcs,1} \end{pmatrix} \right) \quad (1')$$

[0132] 同理,4kW风冷燃料电池模块3-2性能评估,求得 $P_{g\_fcsmax,2}$ , $P_{g\_fcsy,2}$ , $\Delta P_{g\_fcs,2}$ ;

[0133] 同理,6kW风冷燃料电池模块3-3性能评估,求得 $P_{g\_fcsmax,3}$ , $P_{g\_fcsy,3}$ , $\Delta P_{g\_fcs,3}$ ;

[0134] 步骤S2:多个燃料电池模块需求功率计算,DSP2812控制器2获取3个电能输出模块6-1~6-3的总负载功率,获取三元锂电池5的状态及SOC值,根据既要满足对外输出的电能需求,同时满足维持锂电池处于高SOC状态的电能需求,多个燃料电池模块需求功率函数为:

$$[0135] \quad P_{de} = \frac{P_{fa,1}}{\eta_{fa,1}} + \frac{P_{fa,2}}{\eta_{fa,2}} + \frac{P_{fa,3}}{\eta_{fa,3}} + V_{bat} \times I_{bat} \quad (2')$$

[0136] 在式(2')中,如 $P_{fa,1}$ 是电能输出模块1输出电能值5kW, $\eta_{fa,1}$ 是电能输出模块1的电能转换效率值0.85, $P_{fa,2}$ 是电能输出模块2输出电能值3.5kW, $\eta_{fa,2}$ 是电能输出模块2的电能转换效率值0.9, $P_{fa,3}$ 是电能输出模块3输出电能值1kW, $\eta_{fa,3}$ 是电能输出模块3的电能转换效率值0.93, $V_{bat}$ 是锂电池模块当前电压值49V, $I_{bat}$ 是锂电池当前放电电流值20A, $P_{de}$ 是多个燃料电池模块计算功率值11.82kW。

[0137] 步骤S3:计算启动燃料电池模块数量,能量管理控制器2根据多个燃料电池模块需求功率计算 $P_{de}$ 、通信接收到的燃料电池模块3-i性能评估的燃料电池最优功率( $P_{g\_fcsy,i}$ ),推导计算

$$[0138] \quad \sum_{i=1}^{k-1} P_{g\_fcsy,i} < P_{de} < \sum_{i=1}^k P_{g\_fcsy,i} \quad (3')$$

[0139] 得到启动燃料电池数量值为3。

[0140] 步骤S4:系统能量管理策略,能量管理控制器2基于锂电池SOC规则限制约束情况下的二次规划能量管理策略,计算每个燃料电池模块设定功率( $P_{fcsset,i}$ )。

[0141] 前3个燃料电池模块经单向直流变换模块后输出电能总和:

$$[0142] \quad \begin{aligned} P_{fcsset} &= \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcsset,i}) \\ &= \eta_{dc,1} * P_{fcsset,1} + \eta_{dc,2} * P_{fcsset,2} + \eta_{dc,3} * P_{fcsset,3} \end{aligned} \quad (4')$$

[0143] 其中 $P_{fcset,i}$ 是燃料电池模块i的输出功率, $\eta_{dc,i}$ 是单向直流变换模块i的转换效率, $i=1,2,3$ ;

[0144] 系统输出功率:

$$[0145] \quad P_{ref} = P_{fcset} + V_{bat} \times I_{soc} = \sum_{i=1}^k (\eta_{dc,i} * P_{fcset,i}) + V_{bat} \times I_{batset} \quad (5')$$

[0146] 其中, $P_{ref}$ 是系统燃料电池和锂电池输出功率, $V_{bat}$ 是锂电池模块当前电压值, $I_{batset}$ 是设定锂电池充放电电流值。为了满足系统负载功率突变及能量需求,锂电池模块维持高SOC状态,锂电池设计处于充电状态, $I_{batset}$ 值根据锂电池SOC的规则限制情况设定,SOC值越小, $I_{batset}$ 越大,SOC值越高, $I_{batset}$ 越小。

$$[0147] \quad I_{batset} = \begin{cases} I_{e\_bat} & SOC \leq 0.5 \\ 0.5 * I_{e\_bat} & 0.5 < SOC \leq 0.7 \\ 0.2 * I_{e\_bat} & 0.7 < SOC \leq 0.85 \\ 0 & 0.85 < SOC \leq 0.95 \\ -0.1 * I_{e\_bat} & 0.95 < SOC \end{cases} \quad (6')$$

[0148] 其中,额定充电电流 $I_{e\_bat} = 40$ ,充电倍率参数 $a_1 = 1, a_2 = 0.5, a_3 = 0.2, a_4 = -0.1$ ,SOC范围值 $a_1 = 0.5, a_2 = 0.7, a_3 = 0.85, a_4 = -0.95$ 。

[0149] 通过二次规划方法,求解全局燃料电池系统效率最大化:

$$[0150] \quad \max(a_2(i) * P_{ref}^2 + a_1(i) * P_{ref} + a_0(i)) \quad (7')$$

[0151] 约束条件:

$$[0152] \quad \begin{cases} 0 < P_{fcset,1} < P_{g\_fcsmax,1} \\ 0 < \Delta P_{fcset,1} < \Delta P_{g\_fcs,1} \end{cases} \quad (8')$$

$$[0153] \quad \begin{cases} 0 < P_{fcset,2} < P_{g\_fcsmax,2} \\ 0 < \Delta P_{fcset,2} < \Delta P_{g\_fcs,2} \end{cases} \quad (9')$$

$$[0154] \quad \begin{cases} 0 < P_{fcset,3} < P_{g\_fcsmax,3} \\ 0 < \Delta P_{fcset,3} < \Delta P_{g\_fcs,3} \end{cases} \quad (10')$$

[0155] 由公式(5')(6')(7')(8')(9')(10')求得每个燃料电池模块功率 $P_{fcset,1}, P_{fcset,2}, P_{fcset,3}$ ;

[0156] 步骤S5:燃料电池模块控制优化,燃料电池模块3-1根据系统能量管理策略设定功率( $P_{fcset,1}$ )以及燃料电池模块性能评估的多变量数学模型 $g()$ ,反推燃料电池设定功率为最优功率时燃料电池相应温度 $T_{fcset,1}$ ,控制燃料电池达到温度值,以使系统能量管理总体最优。

[0157] 燃料电池模块3-1目标温度:

$$[0158] \quad T_{fcset,1} = g(P_{fcset,1}, V_{fcs,1}, R_{fcs,1}) \quad (11')$$

[0159] 在式(11')中, $g()$ 是燃料电池模块性能评估的多变量数学模型,同样采用非线性自回归滑动平均方法获得 $g()$ ,该模型以能量管理分配给燃料电池模块3-1功率 $P_{fcset,1}$ ,电压 $V_{fcs,1}$ ,冷却设备转速 $R_{fcs,1}$ 为输入,输出为燃料电池模块3-1评估的最优功率时燃料电池相应温度 $T_{fcset,1}$ 。

[0160] 同理:求得燃料电池模块3-2目标温度 $T_{\text{fcset},2}$ ;

[0161] 同理:求得燃料电池模块3-3目标温度 $T_{\text{fcset},3}$ 。

[0162] 以上仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

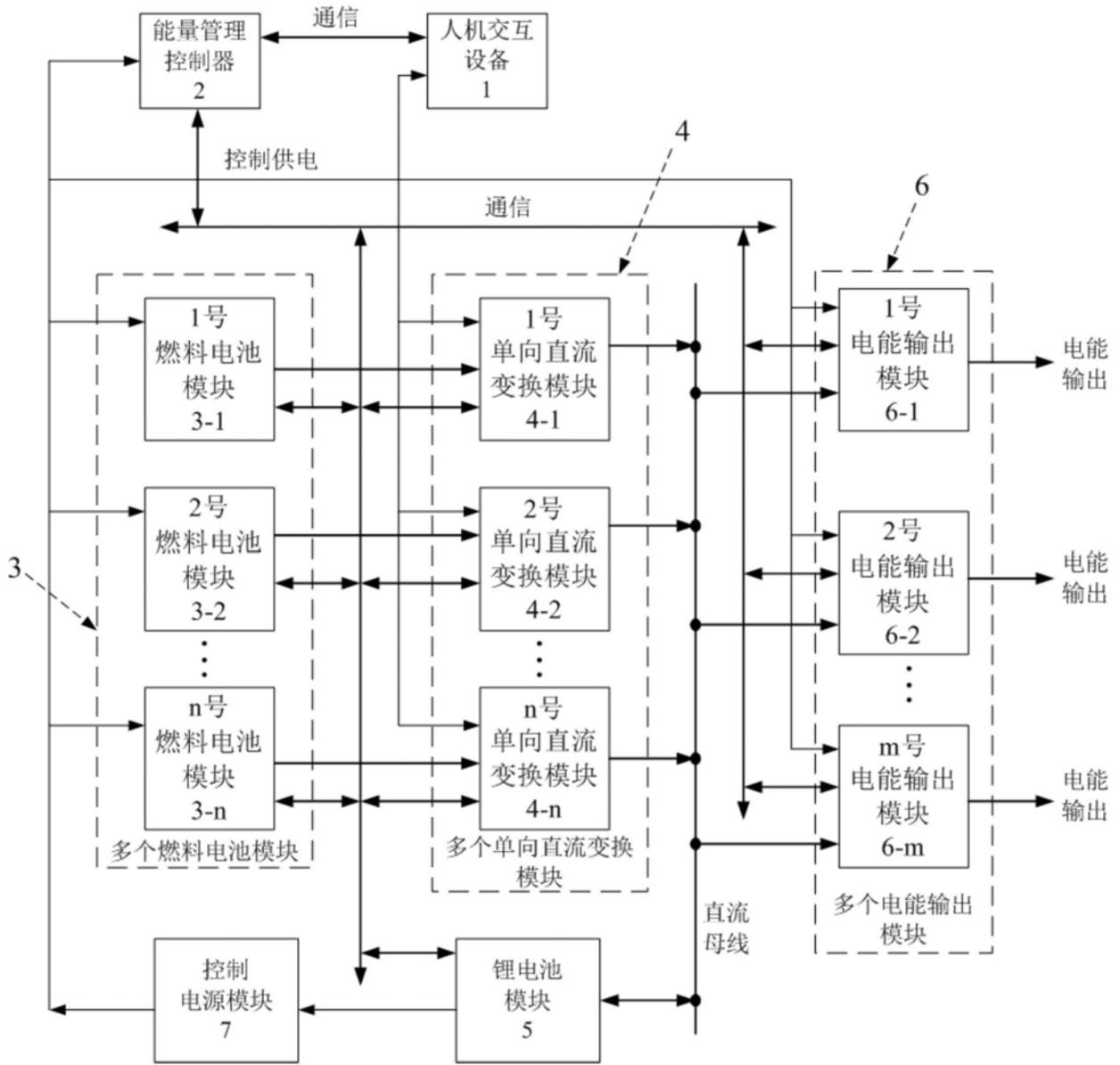


图1

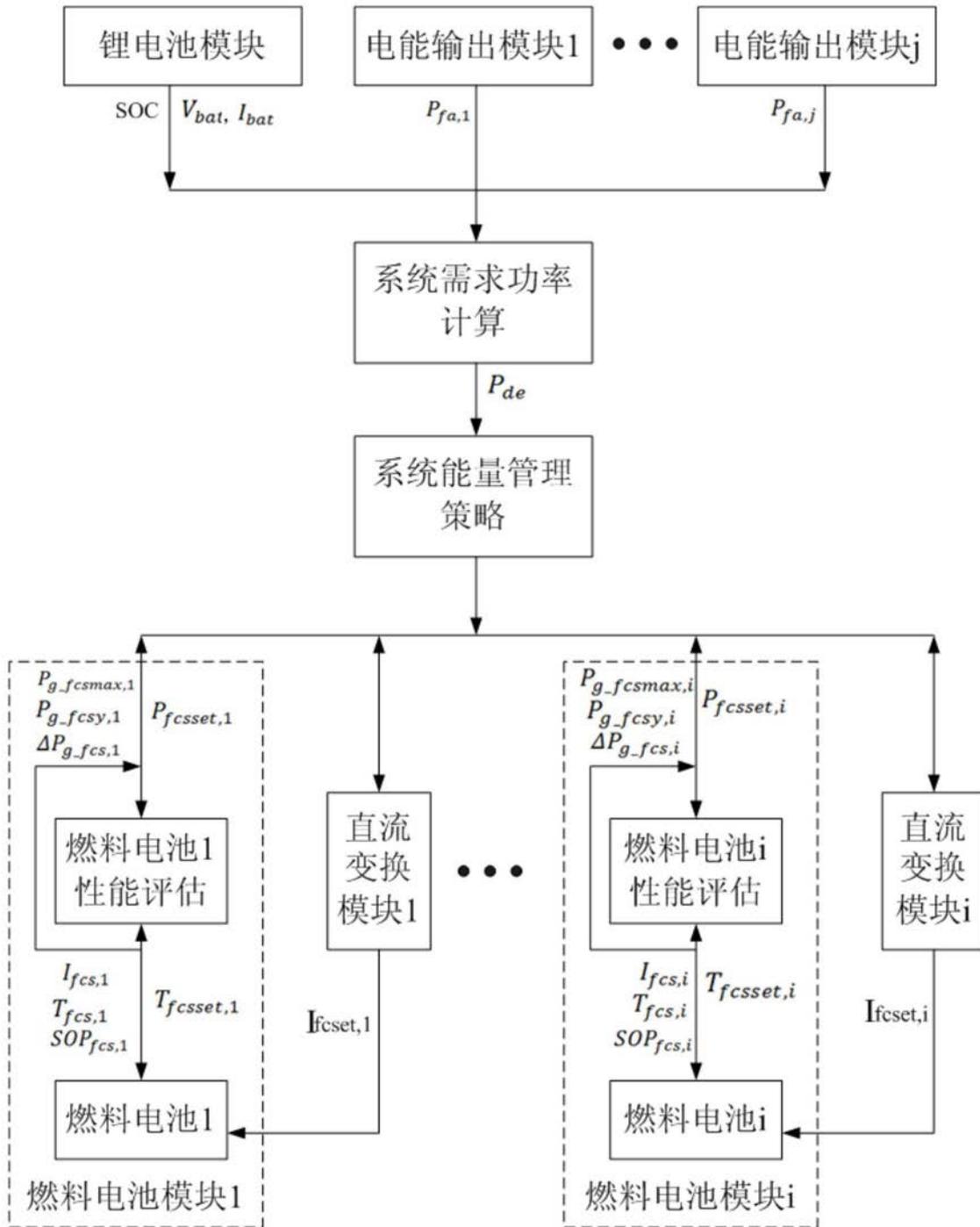


图2

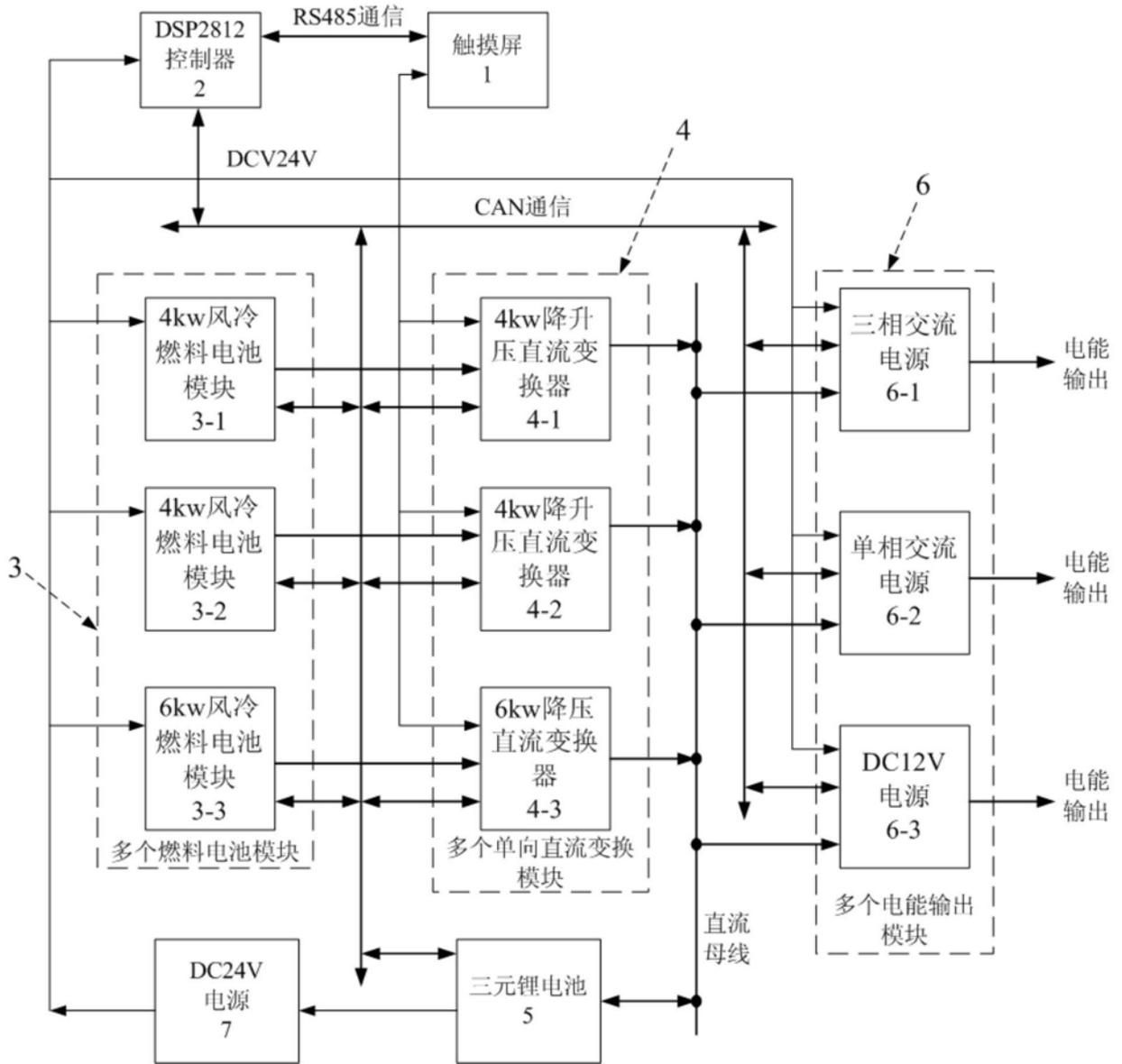


图3