



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118545230 A

(43) 申请公布日 2024. 08. 27

(21) 申请号 202411019650.0

B60L 50/75 (2019.01)

(22) 申请日 2024.07.29

B60L 58/40 (2019.01)

(71) 申请人 浙江长龙海运有限公司

地址 316000 浙江省舟山市普陀区东港街
道海天大道2701号舟山海中洲国际广
场西楼15B01室

(72) 发明人 项坚波 沈坚强

(74) 专利代理机构 大连东方专利代理有限责任
公司 21212

专利代理师 高意

(51) Int. Cl.

B63H 21/21 (2006.01)

B63H 21/17 (2006.01)

B63H 21/00 (2006.01)

B60L 50/40 (2019.01)

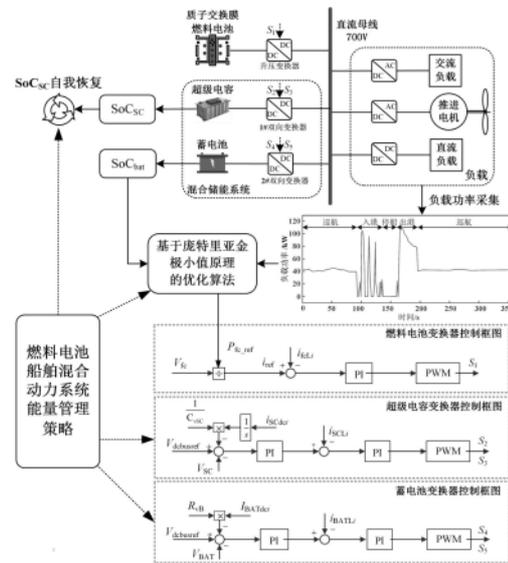
权利要求书3页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种燃料电池船舶的能量管理方法

(57) 摘要

本发明提供一种燃料电池船舶的能量管理方法,包括:基于燃料电池混合动力船舶的混合动力系统架构,建立燃料电池船舶整船动力系统模型;采集燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据;基于庞特里亚金极小值原理,通过打靶法离线获取协态变量与蓄电池 SoC 变化量的关系,根据历史典型工况,对哈密顿函数进行最小化求解的同时,保证蓄电池 SoC 变化量在限定范围内,获取燃料电池和混合储能系统之间的最优功率分配;通过下垂变频控制方法,利用变换器控制层的变频控制策略,解决混合储能系统中,蓄电池和超级电容的功率分配,搭配庞特里亚金极小值原理所得功率分配结果,实现燃料电池混合动力船舶较优的能量管理的目标。



1. 一种燃料电池船舶的能量管理方法,其特征在于,包括:

S1、基于燃料电池混合动力船舶的混合动力系统架构,引入协状态变量和目标函数,建立燃料电池船舶整船动力系统模型、相关状态方程和哈密顿函数;

S2、采集燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,并将采集的工况数据导入至步骤S1中建立的燃料电池船舶整船动力系统模型,根据导入的历史典型行驶工况数据,对哈密顿函数进行最小化求解;

S3、基于庞特里亚金极小值原理,通过打靶法离线获取协态变量与蓄电池 SoC 变化量的关系,保证蓄电池 SoC 变化量在限定范围内,并通过下垂分频控制方法,利用变换器控制层的分频控制策略,获取燃料电池和混合储能系统之间的最优功率分配,实现燃料电池混合动力船舶的能量管理的最优目标。

2. 根据权利要求1所述的一种燃料电池船舶的能量管理方法,其特征在于,步骤S1,具体包括:

S11、选择以蓄电池的荷电状态 SoC_{BAT} 为状态变量 $x(t)$,以氢燃料电池系统的输出功率 P_{fc} 为控制变量 $u(t)$,依据燃料电池混合动力船舶的能量管理策略数学模型,以燃料电池混合动力系统中氢耗量最小为优化目标,引入目标函数,如下:

$$\min J(SoC_{BAT}, P_{fc}, t) = \min \left\{ m_{H_2fc} [P_{fc}(t)] + \alpha(SoC_{BAT}) \cdot m_{H_2BAT} \right\};$$

式中, $\alpha(SoC(t_1))$ 为蓄电池的状态指标; m_{H_2BAT} 为锂电池在航程结束时电量的等效氢耗; m_{H_2fc} 为燃料电池的实际氢耗量;

S12、加入蓄电池的状态指标 $\alpha(SoC(t_1))$,以惩罚系数的形式维持蓄电池的 SoC 范围,如下:

$$\alpha(SoC_{BAT}) = \begin{cases} 10000, SoC_{BAT} \geq 80\% \\ 1, 40\% \leq SoC_{BAT} \leq 80\%; \\ 10000, SoC_{BAT} \leq 40\% \end{cases}$$

S13、将蓄电池的荷电状态 SoC_{BAT} 作为状态变量,约束在限制范围内,同时期望在燃料电池混合动力船舶结束航程后,该状态变量的初末状态差值最小,同时设定初始值状态变量的初始值;

S14、将燃料电池的实际输出功率作为控制变量 $u(t)$,根据燃料电池的特性,对燃料电池的最大、最小输出功率和功率变化率进行约束,限制如下:

$$\begin{cases} P_{fc_min} \leq P_{fc} \leq P_{fc_max} \\ \Delta P_{fc_min} \leq \Delta P_{fc}(t) \leq \Delta P_{fc_max} \end{cases};$$

式中, P_{fc_min} , P_{fc_max} 为燃料电池输出功率的极值, ΔP_{fc_min} , ΔP_{fc_max} 为燃料电池输出功率变化速率的范围值;

S15、为管理燃料电池船舶的航程,约束蓄电池 SoC_{BAT} 的初末状态差值范围,如下:

$$|\Delta SoC_{BAT}| \leq 0.05;$$

S16、建立蓄电池数学模型的状态方程,如下:

$$\dot{SoC}(t) = -\frac{1}{C_N} \cdot \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_{BAT}P_{BAT}(t)}}{2R_{BAT}};$$

式中, C_N 为蓄电池容量, E 为蓄电池开路电压, R_{BAT} 为蓄电池内阻, P_{BAT} 为蓄电池输出功率;

S17、考虑到氢气的摩尔质量和系统中辅机消耗的功率,计算氢气消耗率与燃料电池系统的输出功率关系,如下:

$$R_{fc} = \frac{M_{H_2} P_{fcs}}{2FU_{fcs}\eta_{fc}} = \frac{2.02P_{fcs}}{2FU_{fcs}\eta_{fc}} = 1.05 \times \frac{P_{fcs}}{U_{fcs}\eta_{fc}};$$

式中, U_{fcs} 为燃料电池输出电压, η_{fc} 为燃料电池系统效率, P_{fcs} 为燃料电池系统输出功率, M_{H_2} , F 分别为氢气摩尔质量和法拉第常数;

S18、计算燃料电池的氢耗量,如下:

$$m_{H_2,fc} [P_{fc}(t)] = \int R_{fc} [P_{fc}(t)] dt;$$

S19、蓄电池的等效氢耗量 $m_{H_2,BAT}$ 依据蓄电池 SoC 的变化量进行体现,根据PMP原理,引入协状态变量 λ ,构造哈密顿函数,如下:

$$H[x(t), \lambda(t), u(t), t] = m_{H_2} [P_{fc}(t)] + \lambda \dot{SoC}(t);$$

式中, λ 为协状态变量正则方程, $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial H}{\partial SoC} = -\frac{\lambda}{C_N} \frac{\partial I_{BAT}}{\partial SoC_{BAT}}$, 其中, I_{BAT}

为蓄电池电流, SoC_{BAT} 为蓄电池的荷电状态。

3. 根据权利要求1所述的一种燃料电池船舶的能量管理方法,其特征在于,步骤S2,具体包括:

S21、代入采集的燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,得哈密顿函数在燃料电池船舶整个航程中取得最小值,如下:

$$H[x^*(t), \lambda^*(t), u^*(t), t] \leq H[x(t), \lambda(t), u(t), t];$$

S22、计算燃料电池系统基于氢耗最小目标的最佳输出功率,如下:

$$P_{fc} = u^*(t) = \arg \min H[x^*(t), \lambda^*(t), t];$$

上式中, $u^*(t)$ 表示目标函数; $x^*(t)$ 表示状态变量; $\lambda^*(t)$ 表示确定的协状态变量; t 表示航程对应的运行时间。

4. 根据权利要求1所述的一种燃料电池船舶的能量管理方法,其特征在於,步骤S3,具体包括:

S31、将由高能量密度的蓄电池和高功率密度的超级电容构成的混合储能系统HESS的电流关系表示为:

$$\begin{cases} I_{HESS} = I_{load} - I_{fc} \\ I_{HESS} = I_{SC} + I_B \end{cases};$$

上式中, I_{load} 表示负载电流; I_{SC} 表示超级电容电流; I_B 表示蓄电池电流; I_{fc} 表示燃料电池电流;

S32、根据步骤S31中HESS的电流关系公式,对于蓄电池和超级电容SC,分别采用虚拟电阻下垂控制方法和虚拟电容下垂控制方法,当系统稳定运行时,存在U-P关系如下:

$$\begin{cases} U_B = U_{busref} - P_{BAT} \cdot R_{vB} \\ U_{SC} = U_{busref} - P_{SC} \cdot \frac{1}{sC_{vSC}} \\ P_{HESS} = P_{BAT} + P_{SC} \end{cases};$$

上式中, U_B 表示蓄电池电压; U_{busref} 表示直流母线参考电压; P_{BAT} 表示蓄电池功率; R_{vB} 表示蓄电池控制环路的虚拟电阻; U_{SC} 表示超级电容电压; P_{SC} 表示超级电容功率; s 表示拉普拉斯变量; C_{vSC} 表示超级电容控制环路的虚拟电容; P_{HESS} 表示等效HESS功率;

S33、由于下垂系数远大于线路阻抗,因此可以忽略线路阻抗,则认为:

$$U_{BAT} = U_{SC} = U_{bus};$$

上式中, U_{bus} 表示直流母线的实际电压;

S34、基于上述步骤,得到蓄电池与超级电容变换器之间的电流分配关系,如下:

$$\begin{cases} P_{BAT} = \frac{1}{sR_{vB}C_{vSC} + 1} \cdot P_{HESS} = G_{BAT}(s) \cdot P_{HESS} \\ P_{SC} = \frac{sR_{vB}C_{vSC}}{sR_{vB}C_{vSC} + 1} \cdot P_{HESS} = G_{SC}(s) \cdot P_{HESS} \end{cases};$$

从上式中可以看出, $G_{BAT}(s)$ 相当于一阶低通滤波器, $G_{SC}(s)$ 相当于一阶高通滤波器,等效HESS功率 P_{HESS} 从分频点被分解为低频分量和高频分量两部分,分别由蓄电池和超级电容承担,实现了混合储能单元之间的母线电压功率波动分频响应。

一种燃料电池船舶的能量管理方法

技术领域

[0001] 本发明涉及新能源船舶功率分配技术领域,具体而言,尤其涉及一种燃料电池船舶的能量管理方法。

背景技术

[0002] 发展燃料电池船舶是实现航运业转型升级和低碳化的重要发展方向之一。随着船用燃料电池技术的不断进步,燃料电池凭借其零污染、高效率、低噪低振、高能量密度等优点脱颖而出,燃料电池船舶已成为造船行业的重点发展方向之一。

[0003] 当前,为解决燃料电池上船的诸多问题,能量管理是关键技术之一。在现有的技术中,大多数的能量管理方法存在计算量大、设计复杂等特点,同时混合储能系统的应用会使得能量管理更为复杂化。

发明内容

[0004] 根据上述提出的技术问题,本发明提供一种基于庞特里亚金极小值原理的燃料电池船舶的能量管理方法。考虑到燃料电池船舶经常航行于内河,航行路线较为固定,本发明方法采用庞特里亚金极小值原理与下垂分频的变换器控制方法进行结合,满足燃料电池船舶能量管理策略的功率分配需求。

[0005] 本发明采用的技术手段如下:

一种基于庞特里亚金极小值原理的燃料电池船舶能量管理方法,包括:

S1、基于燃料电池混合动力船舶的混合动力系统架构,引入协状态变量和目标函数,建立燃料电池船舶整船动力系统模型、相关状态方程和哈密顿函数;

S2、采集燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,并将采集的工况数据导入至步骤S1中建立的燃料电池船舶整船动力系统模型,根据导入的历史典型行驶工况数据,对哈密顿函数进行最小化求解;

S3、基于庞特里亚金极小值原理,通过打靶法离线获取协态变量与蓄电池SoC变化量的关系,保证蓄电池SoC化量在限定范围内,并通过下垂分频控制方法,利用变换器控制层的分频控制策略,获取燃料电池和混合储能系统之间的最优功率分配,实现燃料电池混合动力船舶的能量管理的最优目标。

[0006] 进一步地,步骤S1,具体包括:

S11、选择以蓄电池的荷电状态 SoC_{BAT} 为状态变量 $x(t)$,以氢燃料电池系统的输出功率 P_{fc} 为控制变量 $u(t)$,依据燃料电池混合动力船舶的能量管理策略数学模型,以燃料电池混合动力系统中氢耗量最小为优化目标,引入目标函数,如下:

$$\min J(SoC_{BAT}, P_{fc}, t) = \min \left\{ m_{H_2fc} [P_{fc}(t)] + \alpha(SoC_{BAT}) \cdot m_{H_2BAT} \right\};$$

式中, $\alpha(SoC(t_1))$ 为蓄电池的状态指标; m_{H_2BAT} 为锂电池在航程结束时电量的等

效氢耗； m_{H_2fc} 为燃料电池的实际氢耗量；

S12、加入蓄电池的状态指标 $\alpha(SoC(t_1))$ ，以惩罚系数的形式维持蓄电池的SoC范围，如下：

$$\alpha(SoC_{BAT}) = \begin{cases} 10000, SoC_{BAT} \geq 80\% \\ 1, 40\% \leq SoC_{BAT} \leq 80\% ; \\ 10000, SoC_{BAT} \leq 40\% \end{cases}$$

S13、将蓄电池的荷电状态 SoC_{BAT} 作为状态变量，约束在限制范围内，同时期望在燃料电池混合动力船舶结束航程后，该状态变量的初末状态差值最小，同时设定初始值状态变量的初始值；

S14、将燃料电池的实际输出功率作为控制变量 $u(t)$ ，根据燃料电池的特性，对燃料电池的最大、最小输出功率和功率变化率进行约束，限制如下：

$$\begin{cases} P_{fc_min} \leq P_{fc} \leq P_{fc_max} \\ \Delta P_{fc_min} \leq \Delta P_{fc}(t) \leq \Delta P_{fc_max} \end{cases} ;$$

式中， P_{fc_min} ， P_{fc_max} 为燃料电池输出功率的极值， ΔP_{fc_min} ， ΔP_{fc_max} 为燃料电池输出功率变化速率的范围值；

S15、为管理燃料电池船舶的航程，约束蓄电池 SoC_{BAT} 的初末状态差值范围，如下：

$$|\Delta SoC_{BAT}| \leq 0.05 ;$$

S16、建立蓄电池数学模型的状态方程，如下：

$$\dot{SoC}(t) = -\frac{1}{C_N} \cdot \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_{BAT}P_{BAT}(t)}}{2R_{BAT}} ;$$

式中， C_N 为蓄电池容量， E 为蓄电池开路电压， R_{BAT} 为蓄电池内阻， P_{BAT} 为蓄电池输出功率；

S17、考虑到氢气的摩尔质量和系统中辅机消耗的功率，计算氢气消耗率与燃料电池系统的输出功率关系，如下：

$$R_{fc} = \frac{M_{H_2} P_{fcs}}{2FU_{fcs}\eta_{fc}} = \frac{2.02P_{fcs}}{2FU_{fcs}\eta_{fc}} = 1.05 \times \frac{P_{fcs}}{U_{fcs}\eta_{fc}} ;$$

式中， U_{fcs} 为燃料电池输出电压， η_{fc} 为燃料电池系统效率， P_{fcs} 为燃料电池系统输出功率， M_{H_2} ， F 分别为氢气摩尔质量和法拉第常数；

S18、计算燃料电池的氢耗量，如下：

$$m_{H_2fc} [P_{fc}(t)] = \int R_{fc} [P_{fc}(t)] dt ;$$

S19、蓄电池的等效氢耗量 $m_{H_2,BAT}$ 依据蓄电池 SoC 的变化量进行体现,根据PMP原理,引入协状态变量 λ ,构造哈密顿函数,如下:

$$H[x(t), \lambda(t), u(t), t] = m_{H_2} [P_{fc}(t)] + \lambda \dot{SoC}(t);$$

式中, λ 为协状态变量正则方程, $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial H}{\partial SoC} = -\frac{\lambda}{C_N} \frac{\partial I_{BAT}}{\partial SoC_{BAT}}$, 其中,

I_{BAT} 为蓄电池电流, SoC_{BAT} 为蓄电池的荷电状态。

[0007] 进一步地,步骤S2,具体包括:

S21、代入采集的燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,得哈密顿函数在燃料电池船舶整个航程中取得最小值,如下:

$$H[x^*(t), \lambda^*(t), u^*(t), t] \leq H[x(t), \lambda(t), u(t), t];$$

S22、计算燃料电池系统基于氢耗最小目标的最佳输出功率,如下:

$$P_{fc} = u^*(t) = \arg \min H[x^*(t), \lambda^*(t), t];$$

上式中, $u^*(t)$ 表示目标函数; $x^*(t)$ 表示状态变量; $\lambda^*(t)$ 表示确定的协状态变量; t 表示航程对应的运行时间。

[0008] 进一步地,步骤S3,具体包括:

S31、将由高能量密度的蓄电池和高功率密度的超级电容构成的混合储能系统 $HESS$ 的电流关系表示为:

$$\begin{cases} I_{HESS} = I_{load} - I_{fc} \\ I_{HESS} = I_{SC} + I_B \end{cases};$$

上式中, I_{load} 表示负载电流; I_{SC} 表示超级电容电流; I_B 表示蓄电池电流; I_{fc} 表示燃料电池电流。

[0009] S32、根据步骤S31中 $HESS$ 的电流关系公式,对于蓄电池和超级电容 SC ,分别采用虚拟电阻下垂控制方法和虚拟电容下垂控制方法,当系统稳定运行时,存在 U - P 关系如下:

$$\begin{cases} U_B = U_{busref} - P_{BAT} \cdot R_{vB} \\ U_{SC} = U_{busref} - P_{SC} \cdot \frac{1}{sC_{vSC}} \\ P_{HESS} = P_{BAT} + P_{SC} \end{cases};$$

上式中, U_B 表示蓄电池电压; U_{busref} 表示直流母线参考电压; P_{BAT} 表示蓄电池功率; R_{vB} 表示蓄电池控制环路的虚拟电阻; U_{SC} 表示超级电容电压; P_{SC} 表示超级电容功率; s 表示拉普拉斯变量; C_{vSC} 表示超级电容控制环路的虚拟电容; P_{HESS} 表示等效 $HESS$ 功率;

S33、由于下垂系数远大于线路阻抗,因此可以忽略线路阻抗,则认为:

$$U_{BAT} = U_{SC} = U_{bus};$$

上式中, U_{bus} 表示直流母线实际电压;

S34、基于上述步骤,得到蓄电池与超级电容变换器之间的电流分配关系,如下:

$$\begin{cases} P_{BAT} = \frac{1}{sR_{vB}C_{vSC} + 1} \cdot P_{HESS} = G_{BAT}(s) \cdot P_{HESS} \\ P_{SC} = \frac{sR_{vB}C_{vSC}}{sR_{vB}C_{vSC} + 1} \cdot P_{HESS} = G_{SC}(s) \cdot P_{HESS} \end{cases};$$

从上式中可以看出, $G_{BAT}(s)$ 相当于一阶低通滤波器, $G_{SC}(s)$ 相当于一阶高通滤波器, 等效HESS功率 P_{HESS} 从分频点被分解为低频分量和高频分量两部分, 分别由蓄电池和超级电容承担, 实现了混合储能单元之间的母线电压功率波动分频响应。

[0010] 较现有技术相比, 本发明具有以下优点:

1、本发明提供的燃料电池船舶的能量管理方法, 采用庞特里亚金极小值原理与下垂分频的变换器控制方法进行结合, 能够在提高系统运行稳定性的同时, 实现各动力源功率的高效分配, 延长其航程, 实现燃料电池在目标工况下氢耗最小。

[0011] 2、本发明提供的燃料电池船舶的能量管理方法, 结合了下垂分频的变换器控制方法, 无需储能系统的变换器之间进行通信, 并能实现蓄电池和超级电容功率的良好分配, 恢复超级电容的 SoC 。

[0012] 基于上述理由本发明可在新能源船舶等领域广泛推广。

附图说明

[0013] 为了更清楚地说明本发明实施例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做以简单地介绍, 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性的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0014] 图1为本发明采用的燃料电池综合电力系统架构图。

[0015] 图2为本发明设计的能量管理策略原理图。

[0016] 图3为本发明实施过程中燃料电池船舶能量管理中庞特里亚金最小值优化算法原理流程示意图。

[0017] 图4为本发明实际应用后的各动力源功率输出参考图。

具体实施方式

[0018] 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进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例仅仅是本发明一部分的实施例, 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做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例, 都应当属于本发明保护的范围。

[0019] 需要说明的是, 本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第

二”等是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的的数据在适当情况下可以互换,以便这里描述的本发明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。此外,术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0020] 如图1所示,为本发明采用的燃料电池船舶综合电力系统架构图,本发明方法面向的燃料电池船舶的混合动力系统组成部分包括燃料电池、蓄电池、超级电容、DC-DC变换器、电机控制器、驱动电机等关键部件,建立上述部件的数学模型作为控制对象。

[0021] 如图2、3所示,本发明提供了一种基于庞特里亚金极小值原理的燃料电池船舶能量管理方法,包括:

S1、基于燃料电池混合动力船舶的混合动力系统架构,引入协状态变量和目标函数,建立燃料电池船舶整船动力系统模型、相关状态方程和哈密顿函数;

S2、采集燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,并将采集的工况数据导入至步骤S1中建立的燃料电池船舶整船动力系统模型,根据导入的历史典型行驶工况数据,对哈密顿函数进行最小化求解;

S3、基于庞特里亚金极小值原理,通过打靶法离线获取协态变量与蓄电池 SoC 变化量的关系,保证蓄电池 SoC 变化量在限定范围内,并通过下垂分频控制方法,利用变换器控制层的分频控制策略,解决混合储能系统中,蓄电池和超级电容的功率分配,获取燃料电池和混合储能系统之间的最优功率分配,实现燃料电池混合动力船舶的能量管理的最优目标。

[0022] 具体实施时,作为本发明优选的实施方式,步骤S1,具体包括:

S11、选择以蓄电池的荷电状态 SoC_{BAT} 为状态变量 $x(t)$,以氢燃料电池系统的输出功率 P_{fc} 为控制变量 $u(t)$,依据燃料电池混合动力船舶的能量管理策略数学模型,以燃料电池混合动力系统中氢耗量最小为优化目标,引入目标函数,如下:

$$\min J(SoC_{BAT}, P_{fc}, t) = \min \left\{ m_{H_2fc} [P_{fc}(t)] + \alpha(SoC_{BAT}) \cdot m_{H_2BAT} \right\};$$

式中, $\alpha(SoC(t_1))$ 为蓄电池的状态指标; m_{H_2BAT} 为锂电池在航程结束时电量的等效氢耗; m_{H_2fc} 为燃料电池的实际氢耗量;

S12、加入蓄电池的状态指标 $\alpha(SoC(t_1))$,以惩罚系数的形式维持蓄电池的 SoC 范围,如下:

$$\alpha(SoC_{BAT}) = \begin{cases} 10000, & SoC_{BAT} \geq 80\% \\ 1, & 40\% \leq SoC_{BAT} \leq 80\%; \\ 10000, & SoC_{BAT} \leq 40\% \end{cases}$$

S13、将蓄电池的荷电状态 SoC_{BAT} 作为状态变量,约束在限制范围内,同时期望在

燃料电池混合动力船舶结束航程后,该状态变量的初末状态差值最小,同时设定初始值状态变量的初始值为60%;

S14、将燃料电池的实际输出功率作为控制变量 $u(t)$,根据燃料电池的特性,对燃料电池的最大、最小输出功率和功率变化率进行约束,限制如下:

$$\begin{cases} P_{fc_min} \leq P_{fc} \leq P_{fc_max} \\ \Delta P_{fc_min} \leq \Delta P_{fc}(t) \leq \Delta P_{fc_max} \end{cases};$$

式中, P_{fc_min} , P_{fc_max} 为燃料电池输出功率的极值, ΔP_{fc_min} , ΔP_{fc_max} 为燃料电池输出功率变化速率的范围值;

S15、为管理燃料电池船舶的航程,约束蓄电池 SoC_{BAT} 的初末状态差值范围,如下:

$$|\Delta SoC_{BAT}| \leq 0.05;$$

S16、建立蓄电池数学模型的状态方程,如下:

$$\dot{SoC}(t) = -\frac{1}{C_N} \cdot \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_{BAT}P_{BAT}(t)}}{2R_{BAT}};$$

式中, C_N 为蓄电池容量, E 为蓄电池开路电压, R_{BAT} 为蓄电池内阻, P_{BAT} 为蓄电池输出功率;

S17、考虑到氢气的摩尔质量和系统中辅机消耗的功率,计算氢气消耗率与燃料电池系统的输出功率关系,其随功率变化如图4所示如下:

$$R_{fc} = \frac{M_{H_2} P_{fcs}}{2FU_{fcs}\eta_{fc}} = \frac{2.02P_{fcs}}{2FU_{fcs}\eta_{fc}} = 1.05 \times \frac{P_{fcs}}{U_{fcs}\eta_{fc}};$$

式中, U_{fcs} 为燃料电池输出电压, η_{fc} 为燃料电池系统效率, P_{fcs} 为燃料电池系统输出功率, M_{H_2} , F 分别为氢气摩尔质量和法拉第常数,在该式中取常数;

S18、计算燃料电池的氢耗量,如下:

$$m_{H_2fc} [P_{fc}(t)] = \int R_{fc} [P_{fc}(t)] dt;$$

S19、蓄电池的等效氢耗量 m_{H_2BAT} 依据蓄电池 SoC 的变化量进行体现,根据PMP原理,引入协状态变量 λ ,构造哈密顿函数,如下:

$$H[x(t), \lambda(t), u(t), t] = m_{H_2} [P_{fc}(t)] + \lambda \dot{SoC}(t);$$

式中, λ 为协状态变量正则方程, $\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial H}{\partial SoC} = -\frac{\lambda}{C_N} \frac{\partial I_{BAT}}{\partial SoC_{BAT}}$, 其中,

I_{BAT} 为蓄电池电流, SoC_{BAT} 为蓄电池的荷电状态。由于本实施例中的蓄电池被约束在较好

的 SoC 区域内工作,其开路电压及内阻被当作常数处理,与 SoC_{BAT} 的变化无关。

[0023] 在上述实施例中,在步骤S1中,本发明选择以蓄电池的 SoC_{BAT} 为状态变量 $x(t)$,以氢燃料电池系统的输出功率 P_{fc} 为控制变量 $u(t)$,依据燃料电池混合动力船舶的能量管理策略数学模型,以燃料电池混合动力系统中氢耗量最小为优化目标,同时,此处加入了蓄电池的状态指标 $\alpha(SoC(t_1))$,以惩罚系数的形式维持蓄电池的 SoC 范围。将蓄电池的 SoC_{BAT} 作为状态变量,约束在限制范围内,同时期望在燃料电池混合动力船舶结束航程后,该状态变量的初末状态差值最小。同时给定其初始值为60%。为更好管理燃料电池船舶的航程,同时该原理需采用打靶法对协状态变量进行求解,则需要添加蓄电池 SoC_{BAT} 初末状态的限制条件,以该限制条件,用于结束打靶法的计算。针对燃料电池,将其实际输出功率作为控制变量 $u(t)$,根据其特性,约束其最大、最小输出功率和功率变化率进行约束。同时用相关公式计算燃料电池的氢耗量;蓄电池的等效氢耗量 $m_{H_2,BAT}$ 依据其 SoC 的变化量进行体现,则根据PMP原理,引入协状态变量 λ ,构造哈密顿函数,由于本研究中的蓄电池被约束在较好的 SoC 区域内工作,其开路电压及内阻被当作常数处理,与 SoC_{BAT} 的变化无关。

[0024] 具体实施时,作为本发明优选的实施方式,步骤S2,具体包括:

S21、代入采集的燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,得哈密顿函数在燃料电池船舶整个航程中取得最小值,如下:

$$H[x^*(t), \lambda^*(t), u^*(t), t] \leq H[x(t), \lambda(t), u(t), t];$$

S22、计算燃料电池系统基于氢耗最小目标的最佳输出功率,如下:

$$P_{fc} = u^*(t) = \arg \min H[x^*(t), \lambda^*(t), t];$$

上式中, $u^*(t)$ 表示目标函数; $x^*(t)$ 表示状态变量; $\lambda^*(t)$ 表示确定的协状态变量; t 表示航程对应的运行时间。

[0025] 在上述实施例中,在步骤S2中,采集燃料电池混合动力船舶的历史典型行驶工况数据,并将其导入到步骤S1中建立的燃料电池船舶整船动力系统模型,根据该工况,对协状态变量 λ 采取打靶法,离线获取协状态变量与蓄电池 SoC 变化量 $\dot{SoC}(t)$ 的关系,以获取最优协态变量;并根据最优协态变量,对步骤S1中的哈密顿函数进行极小值求解。代入行驶工况数据,可得哈密顿函数在燃料电池船舶整个航程中取得最小值。

[0026] 具体实施时,作为本发明优选的实施方式,步骤S3,具体包括:

S31、将蓄电池和超级电容各自通过双向DC-DC变换器连接到总线,如图2,以弥补PEMFC和负载之间的功率不平衡并保持母线电压,将由高能量密度的蓄电池和高功率密度的超级电容构成的混合储能系统HESS的电流关系表示为:

$$\begin{cases} I_{HESS} = I_{load} - I_{fc} \\ I_{HESS} = I_{SC} + I_B \end{cases};$$

上式中, I_{load} 表示负载电流; I_{SC} 表示超级电容电流; I_B 表示蓄电池电流; I_{fc} 表示燃料电池电流。

[0027] S32、根据步骤S31中HESS的电流关系公式,对于蓄电池和超级电容SC,分别采用虚拟电阻下垂控制方法和虚拟电容下垂控制方法,当系统稳定运行时,存在U-P关系如下:

$$\begin{cases} U_B = U_{busref} - P_{BAT} \cdot R_{vB} \\ U_{SC} = U_{busref} - P_{SC} \cdot \frac{1}{sC_{vSC}} \\ P_{HESS} = P_{BAT} + P_{SC} \end{cases};$$

上式中, U_B 表示蓄电池电压; U_{busref} 表示直流母线参考电压; P_{BAT} 表示蓄电池功率; R_{vB} 表示蓄电池控制环路的虚拟电阻; U_{SC} 表示超级电容电压; P_{SC} 表示超级电容功率; s 表示拉普拉斯变量; C_{vSC} 表示超级电容控制环路的虚拟电容; P_{HESS} 表示等效HESS功率;

S33、由于下垂系数远大于线路阻抗,因此可以忽略线路阻抗,则认为:

$$U_{BAT} = U_{SC} = U_{bus};$$

上式中, U_{bus} 表示直流母线实际电压。

[0028] S34、基于上述步骤,得到蓄电池与超级电容变换器之间的电流分配关系,如下:

$$\begin{cases} P_{BAT} = \frac{1}{sR_{vB}C_{vSC} + 1} \cdot P_{HESS} = G_{BAT}(s) \cdot P_{HESS} \\ P_{SC} = \frac{sR_{vB}C_{vSC}}{sR_{vB}C_{vSC} + 1} \cdot P_{HESS} = G_{SC}(s) \cdot P_{HESS} \end{cases};$$

从上式中可以看出, $G_{BAT}(s)$ 相当于一阶低通滤波器, $G_{SC}(s)$ 相当于一阶高通滤波器,等效HESS功率 P_{HESS} 从分频点被分解为低频分量和高频分量两部分,分别由蓄电池和超级电容承担,实现了混合储能单元之间的母线电压功率波动分频响应。

[0029] 在上述实施例中,在步骤S3中,根据基于庞特里亚金极小值原理的最优功率分配结果,并基于混合储能变换器中下垂分频控制策略,解决混合储能系统中,蓄电池和超级电容的功率分配,超级电容的SoC恢复两大问题。蓄电池和超级电容各自通过双向DC-DC变换器连接到总线,如图2,以弥补PEMFC和负载之间的功率不平衡并保持母线电压。对于电池和超级电容SC,在其DC-DC变换器控制环节中,分别采用虚拟电阻下垂控制方法和虚拟电容下垂控制方法,将HESS功率 P_{HESS} 从分频点被分解为低频分量和高频分量两部分,分别由蓄电池和超级电容承担,实现了混合储能单元之间的母线电压功率波动分频响应。此外,该发明方法不仅可以实现船舶负载功率的自主分频,还可以实现超级电容的SOC_{SC}自动恢复,

且当不存在高频功率时,分配给超级电容的需求功率将接近零。超级电容将通过DC-DC变换器控制电路中的积分环节随着直流母线电压的恢复,自动恢复其自身 *SoC*,而不需要额外的控制。将实际船舶工况运行数据代入本发明中,可得如图4所示的运行情况。

[0030] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各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,或者对其中部分或者全部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范围。

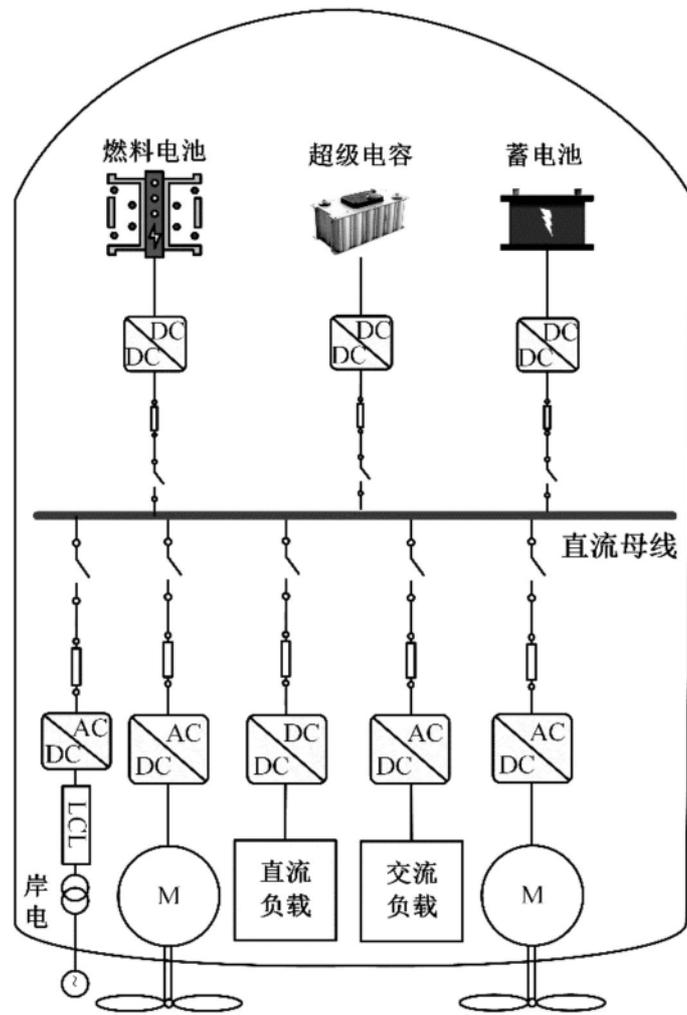


图1

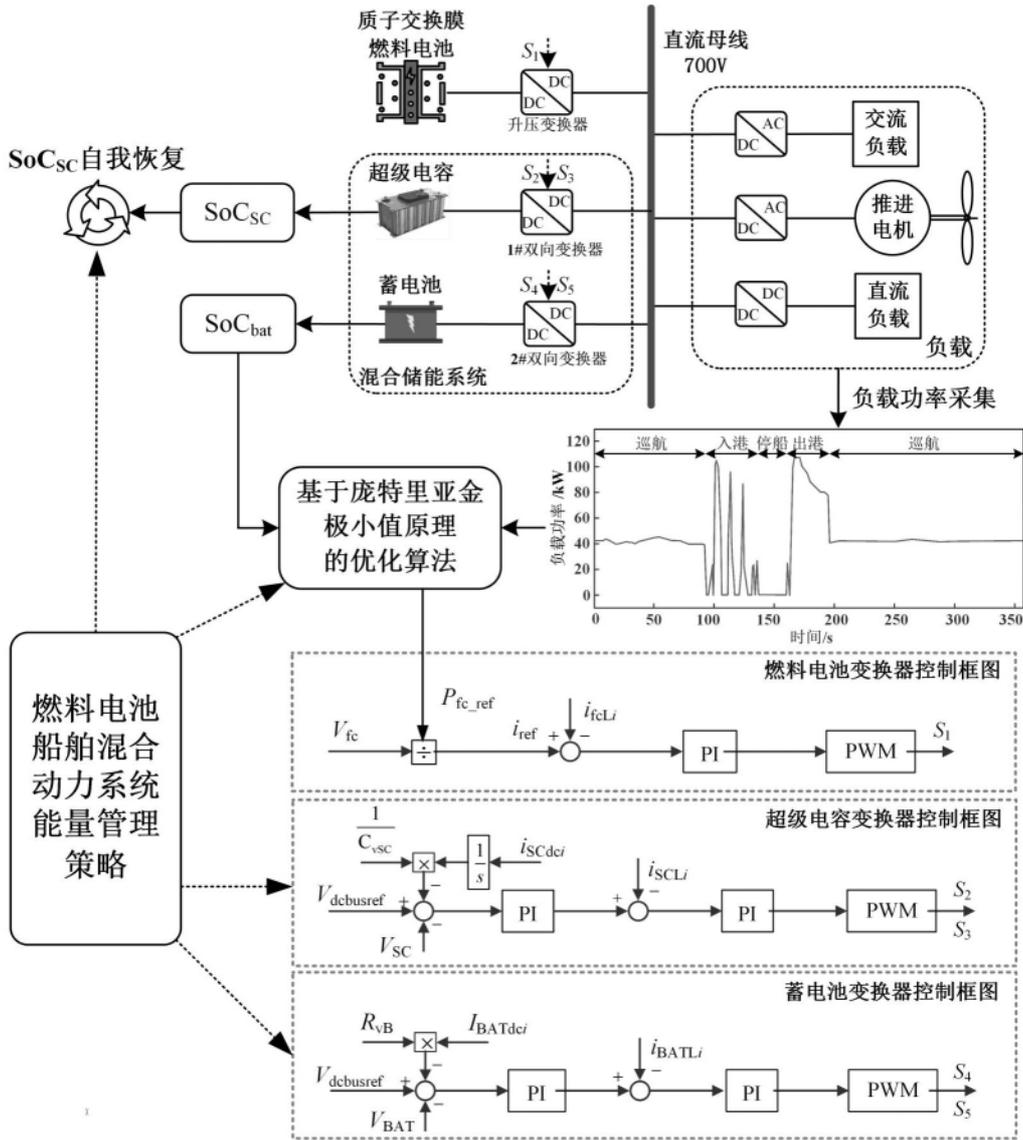


图2

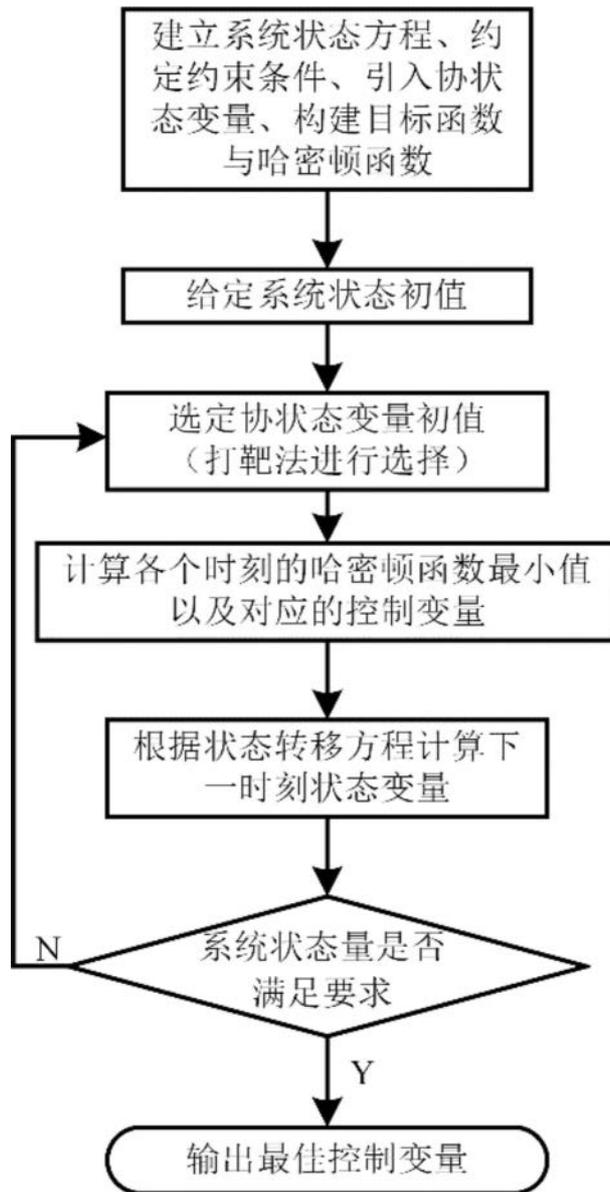


图3

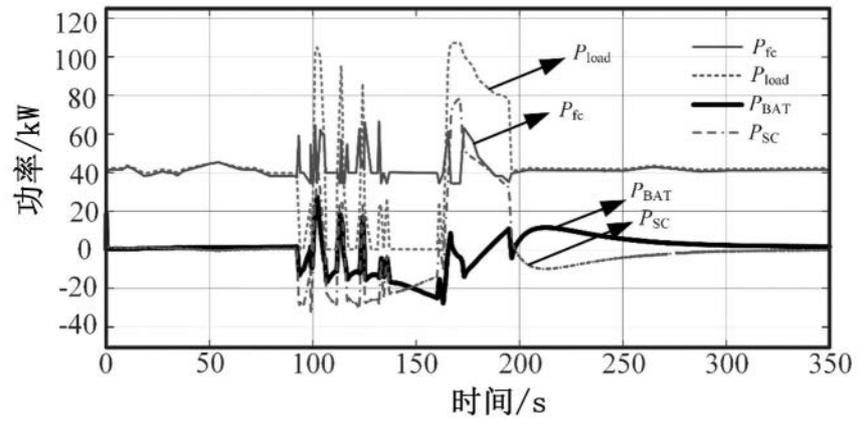


图4