

SOFC-锂电池的船用直流微网的动态稳定性

方乙彬¹, 李素文^{1,2}, 俞万能^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 推进电机负载的冲击特性对固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cells, SOFC)和锂电池组成的电-电复合船舶直流微网动态稳定性提出了很大的挑战。重点研究带SOFC的船舶直流微电网的大信号稳定性和动态响应特性,采用混合势函数方法对传统双闭环控制策略的电源侧变换器的大信号特性进行建模,推导出双闭环控制策略下系统的大信号稳定判据和负载稳定边界。比较系统在冲击性负荷阶跃大信号运行不同工况下的动态响应特性。仿真结果表明,所获得的稳定性判据能精确计算稳定性边界,准确判别系统的动态稳定性。

[关键词] 电-电复合船舶直流微网; 混合势函数; 大信号稳定性; 稳定边界; 固体氧化物燃料电池

[中图分类号] U 664.14

Dynamic Stability of Marine Direct Current Microgrid with SOFC and Lithium Batteries

FANG Yibin¹, LI Suwen^{1,2}, YU Wanneng^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: The impact characteristics of propulsion motor loads pose substantial challenges to the dynamic stability of shipboard direct current(DC) microgrids composed of solid oxide fuel cells (SOFC) and lithium batteries. This paper focuses on the large-signal stability and dynamic response characteristics of shipboard DC microgrids with SOFC. Using the hybrid potential function method, the large-signal characteristics of the power-side converter were modeled under the traditional dual-loop control strategy. The large-signal stability criteria and load stability boundaries for the system were derived under the dual-loop control strategy. The dynamic response characteristics of the system under various operating conditions with impulsive load steps were compared. Simulation results showed that the obtained stability criteria could accurately calculate stability boundaries and determine the dynamic stability of the system.

Keywords: electro-electrical composite marine DC microgrid; hybrid potential function; large-signal stability; stability boundary; solid oxide fuel cells(SOFC)

0 引言

《“十四五”全国清洁生产推行方案》《2030年前碳达峰行动方案》《“十四五”可再生能源发展规划》等政策规划中都明确指出,要加速推进燃料电池技术在不同行业的研究与规模化应用^[1]。燃

[收稿日期] 2024-05-07

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52171308)

[通信作者] 李素文(1973—), 硕士, 讲师, 从事机械工程设计方向研究。E-mail: lisuwen-post@126.com

http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb

料电池按电解质种类可分为碱性燃料电池、磷酸盐燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池（solid oxide fuel cells, SOFC）和质子交换膜燃料电池^[2]。研究表明，SOFC 作为高温燃料电池，其燃料灵活性更高^[3-4]，且在小型分布式发电中有更高的价值和效率^[5]。文献 [6] 提出了微型涡轮机和 SOFC 构成的微网系统，建立仿真模型并分析负载跟随特性，实验结果表明，微型涡轮机和燃料电池能够跟踪负载变化，显著提高了其经济价值。国际航运承担着大部分的全球贸易流通，使用绿色燃料的零排放技术对于减轻国际航运对环境的影响至关重要。SOFC 应用于航运领域有很好的前景，许多研究者致力于 SOFC 性能对船舶系统的影响研究，研究不同温度下 SOFC 运行情况是否满足航运需求^[7-8]。

围绕“双碳”目标，船舶绿色化将进入全面爆发期，电动船舶的研发方兴未艾，但也存在续航里程短的痛点^[9]。因此，研发新一代纯电动船舶动力系统迫在眉睫。应用新一代 SOFC 技术，并结合锂电池的高倍率放电输出的优势，研发由 SOFC 和锂电池组成的电-电复合船舶直流微网系统，必将促进电动船舶市场的高效、快速发展，推动我国海上经济向低碳、环保方向迈进，具有广阔的市场推广价值。可见，电动船舶直流电网稳定性问题也至关重要。因此，本文针对电-电复合船舶直流微网大扰动下的系统稳定性问题，应用混合势函数理论，得出稳定边界条件对系统推进负载功率的影响，实现对系统大扰动边界的判断；最后对不同工况条件进行了仿真，验证所提方法及稳定性判据的正确性。

1 电-电复合船舶直流微电网系统模型

1.1 船舶直流微电网的拓扑结构

直流微电网因效率高、控制结构简单等优点而受到广泛研究^[8]。直流微电网已成功应用于电动船舶领域，并出现了许多相关研究^[10-14]。本文研究的船舶直流微电网的拓扑结构，其电源、电源变流器和电源整流器的一侧为发电侧，而包含负载的一侧为功耗侧。发电侧两侧各有 1 个 SOFC 和 1 个锂电池组，负载侧两侧各有 1 个推进电机和其他负载。其中间由母联开关控制，2 套发电系统互为备用，如图 1a 所示。以单侧船舶直流微网系统为基础建立的等效电路模型如图 1b 所示。

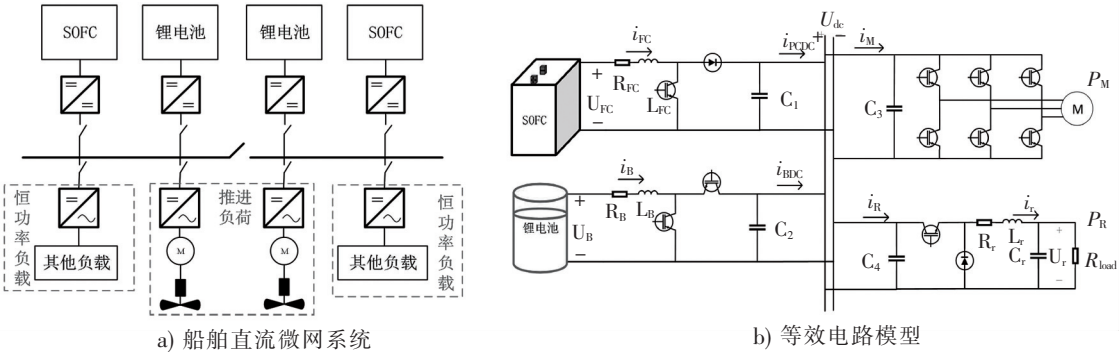
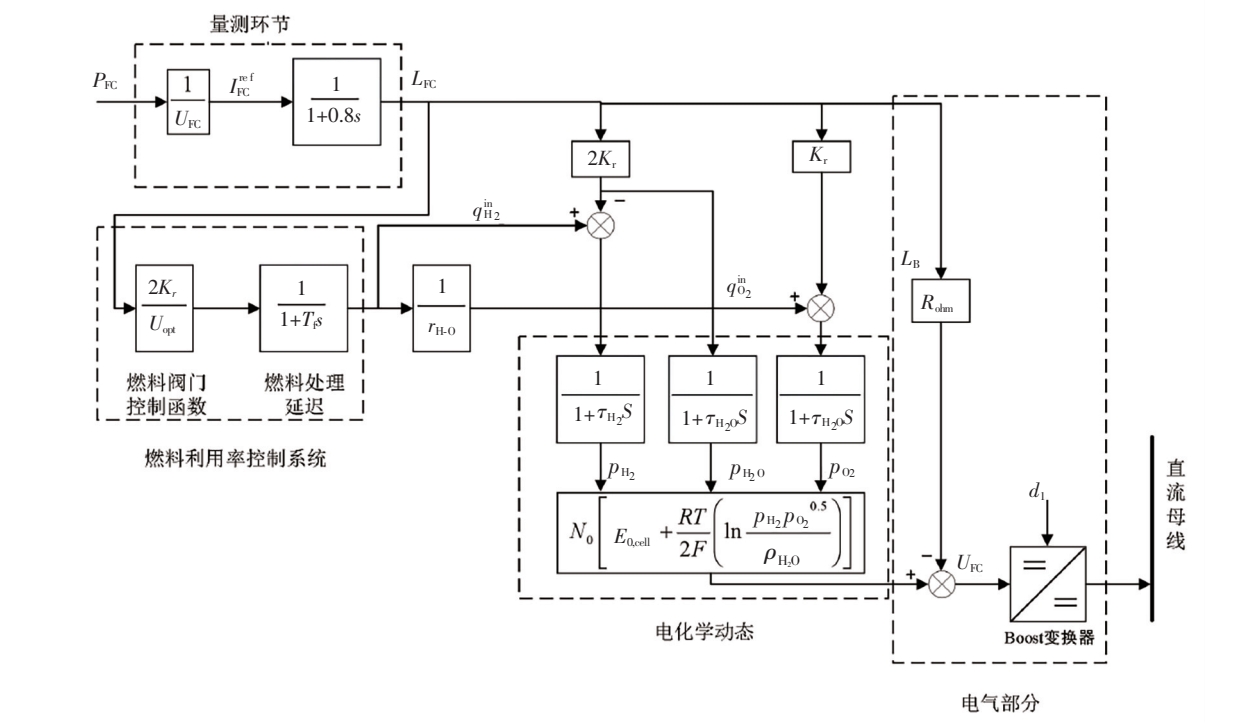


图 1 船舶直流电网的拓扑结构

Fig.1 A topology of a shipboard DC microgrid

1.2 SOFC 建模

适合电力系统研究的 SOFC 电厂动态模型如图 2 所示。在图 2 中，电动力学描述了恢复被负载迅速耗尽的电荷的化学反应，它是用一阶传递函数来建模的。燃料利用率控制系统描述的是燃料供给的动态过程，是天然气供给向富氢燃料转化的过程，它可以简单地表示为时间常数 T_f 的一阶滞后模型。SOFC 电堆内燃料反应的化学过程分别用氢、氧和水的 3 个一阶传递函数来描述。电堆通过输出电压来控制燃料流量的大小。



说明: U_{opt} 为最优燃料利用率; p_{H_2} 、 p_{O_2} 、 p_{H_2O} 分别为燃料电池堆堆氢气、氧气、水的压力; P_{FC} 为额定功率; I_{FC}^{ref} 和 I_{FC} 为输入电流; r_{H_2O} 为氢氧比; d_1 为 Boost 变换器的占空比。

图 2 SOFC 动态模型
Fig.2 Dynamic model of a SOFC

SOFC 堆产生的内部电动势由能斯特方程计算, 是多个串联单元的开路电动势。能斯特电压可以表示为:

$$E_{cell} = N_0 \left[E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \right] \quad (1)$$

其中: $E_{0,cell}$ 是由 1 个常数项和 1 个温度相关组成; N_0 是电池堆中的电池单元数; R 是气体常数; T 是电堆运行温度; F 是法拉第常数。

氢气、氧气、水的分压公式为:

$$\begin{cases} p_{H_2}(s) = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}S} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{FC}^r), \\ p_{O_2}(s) = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2}S} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{FC}^r), \\ p_{H_2O}(s) = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O}S} \cdot 2K_r I_{FC}^r. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $K_r = N/(4F)$ 为一常数; K_{H_2} 、 K_{O_2} 、 K_{H_2O} 分别为氢气、氧气、水的摩尔常数; τ_{H_2} 、 τ_{O_2} 、 τ_{H_2O} 分别为氢气、氧气、水流的响应时间; $q_{H_2}^{in}$ 、 $q_{O_2}^{in}$ 为氢气和氧气的输入流量。

欧姆电压可以表示为:

$$E_{ohm} = I_{FC} R_{ohm} \quad (3)$$

其中: I_{FC} 为 SOFC 反应堆的运行电流; R_{ohm} 为燃料电池的欧姆损耗。

应用能斯特方程和欧姆定律考虑欧姆损耗, 则固体燃料电池的电压可表示为:

$$U_{FC} = E_{cell} - E_{ohm} \quad (4)$$

其中: U_{FC} 为 SOFC 电池输出电压。

1.3 锂电池建模

锂电池由于其发热量低, 稳定性好, 循环寿命长, 生产和使用过程无毒、无污染而被广泛应用。锂电池储能系统被接入船舶直流微电网系统中, 用于平抑负荷波动、补偿发电机的功率缺额和快速响应冲击性负荷的需求^[15]。本文锂电池建模方法参考文献 [16], 图 3 为锂电池二阶 RC 等效电路模型。

1.4 直流变换器控制策略建模

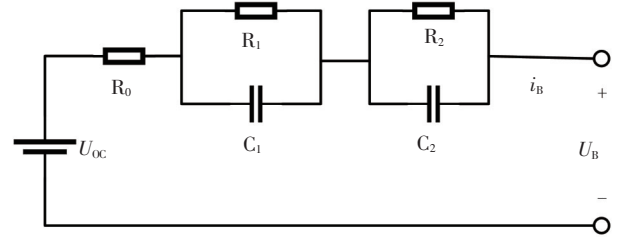
在船舶直流微电网拓扑结构图 (图 1b) 中, 两直流变换器的状态空间方程分别为:

$$\begin{cases} L_{FC} di_{FC}/dt = U_{FC} - R_{FC} i_{FC} - (1 - d_1) U_{dc}, \\ C_1 dU_{dc}/dt = (1 - d_1) i_{FC} - i_{FCDC}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} L_B di_B/dt = U_B - R_B i_B - (1 - d_2) U_{dc}, \\ C_2 dU_{dc}/dt = (1 - d_2) i_B - i_{BDC}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: L_{FC} 、 L_B 为电感; R_{FC} 、 R_B 为电阻; C_1 、 C_2 为电容; U_{FC} 、 U_B 为输入电压; i_{FC} 、 i_B 为电感电流; i_{FCDC} 、 i_{BDC} 为输出电流; U_{dc} 为母线电压; d_1 、 d_2 为占空比。

采用双闭环控制策略 (图 4) 对直流母线电压和电流进行调节, 设计比例积分 (proportional integral, PI) 控制器。图 4 中: U_{dc_ref} 为母线电压参考值; U_{dc} 为母线电压实际值; i_{ref} 为电流内环参考值; i 为变换器输入电流; d 为变换器占空比。



说明: U_{OC} 为开路电压; R_0 为锂电池等效内阻; R_1 、 C_1 为电化学极化内阻和电容; R_2 、 C_2 为浓差极化内阻和电容; i_B 为负载电流; U_B 为锂电池端电压。

图 3 二阶 RC 等效电路模型

Fig.3 Second-order RC equivalent circuit model

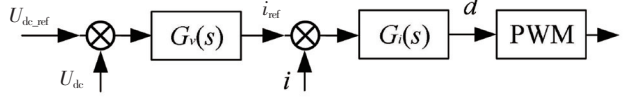


图 4 电压-电流双闭环控制结构

Fig.4 Structure of voltage-current dual closed-loop control

电流环和电压环的传递函数可表示为 $G_i(s) = k_{ip} + k_{ii}/s$ 、 $G_v(s) = k_{vp} + k_{vi}/s$ 。因此相应的控制环路表达式为:

$$\begin{cases} i_{FC}^{ref} = k_{Svp} (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) + k_{Svi} \int (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) dt, \\ d_1 = k_{Sip} (i_{FC}^{ref} - i_{FC}) + k_{Sii} \int (i_{FC}^{ref} - i_{FC}) dt. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_B^{ref} = k_{Bvp} (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) + k_{Bvi} \int (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) dt, \\ d_2 = k_{Bip} (i_B^{ref} - i_B) + k_{Bii} \int (i_B^{ref} - i_B) dt. \end{cases} \quad (8)$$

其中: k_{Svp} 、 k_{Sip} 分别为 Boost 变换器电压外环、电流内环的比例系数; k_{Svi} 、 k_{Sii} 分别为 Boost 变换器电压外环、电流内环的积分系数; k_{Bvp} 、 k_{Bvi} 分别为双向 DC-DC 变换器电压外环、电流内环的比例系数; k_{Bip} 、 k_{Bii} 分别为双向 DC-DC 变换器电压外环、电流内环的积分系数; i_{FC}^{ref} 、 i_B^{ref} 分别为两变换器电流的给定值; U_{dc}^{ref} 、 U_{dc} 分别为两变换器电压的给定值。

对于恒功率负载与推进电机负荷, 其输出动态特性可等效为恒功率负载, 对外呈现负阻抗特性。恒功率负载与推进电机负荷的电压电流关系为:

$$\begin{cases} i_R = P_R / U_{dc}, \\ i_M = P_M / U_{dc}. \end{cases} \quad (9)$$

其中: i_R 、 i_M 分别为恒功率负载与推进电机的电流; P_R 、 P_M 分别为恒功率负载与推进电机的功率。

根据上述建立的数学模型, 并结合图 1b 建立的系统仿真模型如图 5 所示。

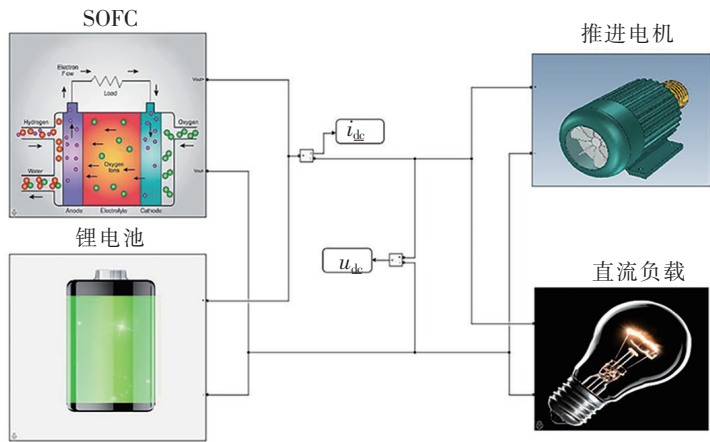


图 5 Matlab/Simulink 系统仿真模型
Fig.5 Simulation model of Matlab/Simulink system

2 电-电复合船舶直流微电网的稳定性

2.1 混合势函数

混合势函数是 Lyapunov 函数的一种特殊形式的能量函数, 它特别适用于分析包含负阻抗元件的电路稳定性^[17]。因此, 本文应用混合势函数研究恒功率负载系统在大扰动下的稳定性。混合势函数包括电压势函数和电流势函数。应用混合势函数的步骤可分为 2 步: 1) 构造系统的混合势函数模型; 2) 根据模型特点, 应用相应的稳定性定理得到大扰动下的稳定性判据。

根据特勒根定理 (网络中所有支路电压和相应支路电流的乘积之和恒等于零), 可得表达式为:

$$\int_{\Gamma_{\mu>r+s}} \sum v_{\mu} di_{\mu} + \int_{\Gamma_{\sigma=r+1}} \sum v_{\sigma} di_{\sigma} + \int_{\Gamma_{\rho=1}} \sum v_{\rho} di_{\rho} = 0。 \tag{10}$$

其中: $\int_{\Gamma_{\mu>r+s}} \sum v_{\mu} di_{\mu}$ 为非储能元件支路的势函数之和, 如电阻支路等; $\int_{\Gamma_{\sigma=r+1}} \sum v_{\sigma} di_{\sigma}$ 为电路中所有电容支路的势函数之和; $\int_{\Gamma_{\rho=1}} \sum v_{\rho} di_{\rho}$ 为独立电流变量所在支路的势函数 (在电路中, 独立电流变量一般为流经电感的电流, 因此该项也可以看作电感支路的势函数之和); i_{ρ} 为电容支路的电流; v_{ρ} 为电感支路的电压。

结合基尔霍夫定律、定义的支路电压、电流正方向, 非线性电路的差分方程可表示为:

$$\begin{cases} L di_{\rho}/dt = \partial P(i,v)/\partial i_{\rho}, \quad \rho = 1, \cdots, r, \\ -C dv_{\sigma}/dt = \partial P(i,v)/\partial v_{\sigma}, \quad \sigma = r+1, \cdots, r+s. \end{cases} \tag{11}$$

其中: i_{ρ} 表示通过第 ρ 个电感的电流; v_{σ} 表示 σ 个电容两端的电压。可以根据系统混合势函数 P 与电路的状态方程之间是否满足式 (11) 来检验模型的正确性。根据上述分析, 可以得到混合势函数的统一形式为:

$$P(i,v) = -A(i) + B(v) + D(i,v)。 \tag{12}$$

其中: $A(i)$ 为电路中非储能元件的电流势函数; $B(v)$ 为电路中非储能元件的电压势函数; $D(i,v) = i^T \gamma v$ 为电路中电容的能量和部分非储能元件的能量, γ 为与电路拓扑有关的常系数矩阵。

混合势函数理论共有 3 条稳定性定理, 本文采用第 3 条稳定性理论分析系统的大扰动稳定性。为方便应用混合势函数理论的第 3 条稳定性, 现给出稳定性判据为:

$$\begin{cases} P_i = \partial P(i,v)/\partial i, \\ P_v = \partial P(i,v)/\partial v, \\ A_{ii}(i) = \partial^2 A(i)/\partial i^2, \\ B_{vv}(v) = \partial^2 B(v)/\partial v^2. \end{cases} \tag{13}$$

设 μ_1 为矩阵 $L^{(-1/2)} A_{ii}(i) L^{(-1/2)}$ 的最小特征值, μ_2 为矩阵 $C^{(-1/2)} B_{vv}(v) C^{(-1/2)}$ 的最小特征值, L 为电路中所有电感组成的对角矩阵, C 为电路中所有电容组成的对角矩阵。即电路中若有电感 $L_1, L_2, \dots, L_n$, 则 $L = \text{diag}(L_1, L_2, \dots, L_n)$ 。

重构混合势函数为:

$$P^*(i, v) = ((\mu_1 - \mu_2)/2)P(i, v) + (P_i, L^{-1}P_i)/2 + (P_v, L^{-1}P_v)/2 \rightarrow \infty. \quad (14)$$

如果对于系统中的任意 i 和 v , 有 $\mu_1 + \mu_2 > 0$ 。当 $|i| + |v| \rightarrow \infty$ 时, $P^*(i, v) \rightarrow \infty$, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 被研究系统的所有解都将趋于稳态工作点, 系统最终能够稳定运行。

2.2 电-电复合直流微电网系统混合势函数

电-电复合直流微电网系统的大信号稳定性研究仍基于图 1 所示的简化系统进行分析, 变换器控制系统沿图 4 所示的双闭环控制结构。源变换器中由于存在电流内环控制器, 因此具有可控电流源的特点。当电源侧电压下降或增大时, 电流会发生变化, 这将进一步加剧电压波动, 因此负载侧变换器也可以等效为受控电流源。故电源侧的 Boost, 双向 DC-DC 变流器与负载侧的 Buck, DC/AC 变换器可等效为受控电流源简化模型分别由 i_{FCDC} 、 i_{BDC} 、 i_{R} 、 i_{M} 表示, 因忽略线路阻抗影响, 总电容可等效为 $C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$ 。系统大信号的简化模型如图 6 所示。

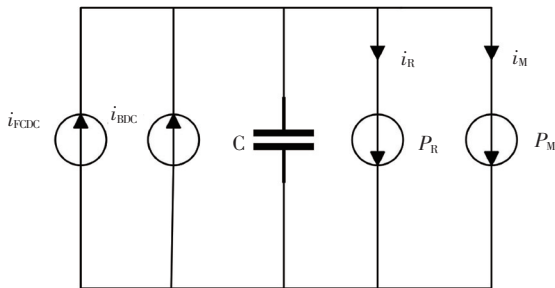


图 6 系统大信号的简化模型

Fig.6 Simplified model of the system under large signals

混合势函数由非储能元件的电流势函数和电容支路的电压电流乘积之和求得。

对于图 1b 所示的电路, 两台 DC/DC 变换器等效电流源、直流负载和电机负载对应的电流势函数为

$$\begin{aligned} \int \sum_{\mu > r+s} U_{\mu} di_{\mu} &= \int_{\Gamma} U_{\text{dc}} di_{\text{FCDC}} + \int_{\Gamma} U_{\text{dc}} di_{\text{BDC}} - \int_{\Gamma} (P_{\text{R}}/i) di_{\text{R}} - \int_{\Gamma} (P_{\text{M}}/i) di_{\text{M}} = U_{\text{dc}} i_{\text{FCDC}} - \\ &\int_0^{U_{\text{dc}}} i_{\text{FCDC}} du + U_{\text{dc}} i_{\text{BDC}} - \int_0^{U_{\text{dc}}} i_{\text{BDC}} du - P_{\text{R}} + \int_0^{U_{\text{dc}}} (P_{\text{R}}/u) du - P_{\text{M}} + \int_0^{U_{\text{dc}}} (P_{\text{M}}/u) du. \end{aligned} \quad (15)$$

电容支路的电压、电流乘积为:

$$\sum_{\sigma}^{r+s} (U_{\sigma} i_{\sigma}) = -U_{\text{dc}} (i_{\text{FCDC}} + i_{\text{BDC}} - (P_{\text{R}}/U_{\text{dc}}) - (P_{\text{M}}/U_{\text{dc}})) = -U_{\text{dc}} (i_{\text{FCDC}} + i_{\text{BDC}}) + P_{\text{R}} + P_{\text{M}}. \quad (16)$$

对式 (15) 和式 (16) 求和, 得到系统的混合势函数为:

$$P(i, u) = - \int_0^{U_{\text{dc}}} i_{\text{FCDC}} du - \int_0^{U_{\text{dc}}} i_{\text{BDC}} du + \int_0^{U_{\text{dc}}} (P_{\text{R}}/u) du + \int_0^{U_{\text{dc}}} (P_{\text{M}}/u) du. \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (11) 中, 可验证所得混合势函数为:

$$(\partial P(i, u)/\partial U_{\text{dc}}) = -i_{\text{FCDC}} - i_{\text{BDC}} + (P_{\text{R}}/U_{\text{dc}}) + (P_{\text{M}}/U_{\text{dc}}) = -i_{\text{FCDC}} - i_{\text{BDC}} + i_{\text{R}} + i_{\text{M}} = -C(dU_{\text{dc}}/dt). \quad (18)$$

结合模型 P 与电路的状态方程, 可知系统的混合势函数正确。

2.3 电-电复合直流微电网系统的混合势函数的判据

对于图 6 所示的系统, 依据混合势函数理论, 将得到的混合势函数式 (17) 转换为式 (12) 所示的统一表达式, 即:

$$\begin{cases} A(i) = 0, \\ B(u) = - \int_0^{U_{\text{dc}}} i_{\text{FCDC}} du - \int_0^{U_{\text{dc}}} i_{\text{BDC}} du + \int_0^{U_{\text{dc}}} (P_{\text{R}}/u) du + \int_0^{U_{\text{dc}}} (P_{\text{M}}/u) du, \\ D(i, u) = 0. \end{cases} \quad (19)$$

由式 (19) 可以得到系统混合势函数符合第 3 条稳定性定理, 故有:

$$\begin{cases} A_{ii}(i) = 0, \\ B_{uu}(u) = - \partial i_{\text{FCDC}}/\partial U_{\text{dc}} - \partial i_{\text{BDC}}/\partial U_{\text{dc}} - P_{\text{R}}/U_{\text{dc}}^2 - P_{\text{M}}/U_{\text{dc}}^2. \end{cases} \quad (20)$$

μ_1 、 μ_2 为电压和电流二阶偏导数矩阵的最小特征值, 根据式 (20) 可得:

$$\mu_1 + \mu_2 = -\partial i_{\text{FCDC}}/\partial U_{\text{dc}} - \partial i_{\text{BDC}}/\partial U_{\text{dc}} - P_{\text{R}}/U_{\text{dc}}^2 - P_{\text{M}}/U_{\text{dc}}^2 > 0。$$

(21)

在图 1b 所示的电源侧系统采用如图 4 所示的双闭环 PI 控制, 推导出电源侧变换器输出电流相对于母线电压的变化率。根据式 (5) 第 1 项微分方程可得:

$$i_{\text{FC}} = [U_{\text{FC}} - (1 - d_1)U_{\text{dc}}/R_{\text{FC}}] - h(t)。$$

(22)

其中: $h(t) = L_{\text{FC}}\text{d}i_{\text{FC}}/\text{d}t = [U_{\text{FC}} - (1 - d_1)U_{\text{dc}}]/R_{\text{FC}}e^{-R_{\text{FC}}/L_{\text{FC}}t}$ 为时变项, 衰减迅速, 对稳态影响较小。故由式 (22) 和式 (7) 可得:

$$i_{\text{FC}} = [U_{\text{FC}} - (1 - d_1)U_{\text{dc}}]/R_{\text{FC}} = \{U_{\text{FC}} - [1 - k_{\text{Sip}}k_{\text{Svp}}(U_{\text{dc}}^{\text{ref}} - U_{\text{dc}})]U_{\text{dc}}\}/[R_{\text{FC}} + k_{\text{sip}}U_{\text{dc}}]。$$

(23)

在稳态下, $U_{\text{dc}}^{\text{ref}} = U_{\text{dc}}$, 由功率守恒可知, $U_{\text{FC}}i_{\text{FC}} = i_{\text{FCDC}}U_{\text{dc}}$, 可得:

$$i_{\text{FCDC}} = i_{\text{FC}}U_{\text{FC}}/U_{\text{dc}} = \{U_{\text{FC}}^2 - [1 - k_{\text{Sip}}k_{\text{Svp}}(U_{\text{dc}}^{\text{ref}} - U_{\text{dc}})]U_{\text{dc}}U_{\text{FC}}\}/[R_{\text{FC}}U_{\text{dc}} + k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}^2]。$$

(24)

同理可得, 双向 DC-DC 变换器输出电流 (i_{BDC}) 为:

$$i_{\text{BDC}} = i_{\text{B}}U_{\text{B}}/U_{\text{dc}} = \{U_{\text{B}}^2 - [1 - k_{\text{Bip}}k_{\text{Bvp}}(U_{\text{dc}}^{\text{ref}} - U_{\text{dc}})]U_{\text{dc}}U_{\text{B}}\}/[R_{\text{B}}U_{\text{dc}} + k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}^2]。$$

(25)

根据式 (24)、式 (25), 可以得到 i_{FCDC} 、 i_{BDC} 的偏导数为:

$$\begin{cases} \partial i_{\text{FCDC}}/\partial U_{\text{dc}} = -\{-U_{\text{FC}}^2(R_{\text{FC}} + 2k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}) + U_{\text{FC}}k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}^2(1 - k_{\text{Svp}}R_{\text{FC}} - k_{\text{svp}}k_{\text{sip}}U_{\text{dc}})\}/[(R_{\text{FC}}U_{\text{dc}} + k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}^2)^2], \\ \partial i_{\text{BDC}}/\partial U_{\text{dc}} = -\{-U_{\text{B}}^2(R_{\text{B}} + 2k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}) + U_{\text{B}}k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}^2(1 - k_{\text{Bvp}}R_{\text{B}} - k_{\text{Bvp}}k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}})\}/[(R_{\text{B}}U_{\text{dc}} + k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}^2)^2]。 \end{cases}$$

(26)

结合式 (21) 和式 (26), 可得电-电复合的直流微电网系统大扰动稳定性判据为:

$$\begin{cases} \mu_1 = 0, \\ \mu_2 = \{U_{\text{FC}}^2(R_{\text{FC}} + 2k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}) - U_{\text{FC}}k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}^2(1 - k_{\text{Svp}}R_{\text{FC}} - k_{\text{svp}}k_{\text{sip}}U_{\text{dc}})\}/(R_{\text{FC}}U_{\text{dc}} + k_{\text{Sip}}U_{\text{dc}}^2)^2 + \\ \quad \{U_{\text{B}}^2(R_{\text{B}} + 2k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}) - U_{\text{B}}k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}^2(1 - k_{\text{Bvp}}R_{\text{B}} - k_{\text{Bvp}}k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}})\}/(R_{\text{B}}U_{\text{dc}} + k_{\text{Bip}}U_{\text{dc}}^2)^2 - \\ \quad P_{\text{R}}/U_{\text{dc}}^2 - P_{\text{M}}/U_{\text{dc}}^2, \\ \mu_1 + \mu_2 > 0。 \end{cases}$$

(27)

另外, 系统能够稳定运行的前提是能够满足功率平衡, 即恒功率负载的功率应小于系统能够提供的最大功率, 因此有:

$$i_{\text{FC}}U_{\text{FC}} + i_{\text{B}}U_{\text{B}} > P_{\text{M}} + P_{\text{R}}。$$

(28)

式 (27)、式 (28) 即为直流船舶微电网的大扰动稳定性判据。根据该稳定性判据, 可以得出直流变换器参数、冲击性负载、恒功率负载对稳定性判据的影响。在保障系统稳定的前提下, 提高电流内环的比例参数有利于大信号扰动下系统的稳定。

3 仿真实验

为了验证上述稳定性判据的正确性, 本文针对双闭环控制的 Boost 与双向 DC/DC 变换器进行案例分析, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建如图 1b 所示系统的仿真模型进行验证。模型中: SOFC 额定功率为 100 kW, 锂电池容量为 100 A·h, 初始其他负载为 20 kW, 推进电机负载为 30 kW, 其他参数如表 1 所示。

系统的稳定性判据式 (27) 表明, 本文主要研究当系统变换器参数固定时, 冲击性负荷突变大小对系统大扰动稳定性的影响。由表 1 可见, 在上述大扰动下, 负荷功率稳定运行的边界条件为:

$$P_{\text{M}} + P_{\text{R}} < 169\ 260\ \text{W}。$$

(29)

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值	参数	数值
U_{FC}/V	380	U_{B}/V	400
R_{FC}/Ω	0.01	R_{B}/Ω	0.01
L_{FC}/mH	1	L_{B}/mH	0.5
k_{Svp}	0.7	k_{Bvp}	0.6
k_{Sip}	1	k_{Bip}	1.5
k_{Svi}	90	k_{Bvi}	50
k_{Sii}	100	k_{Bii}	30
C/mF	7	U_{dc}/V	600

本文主要探究的是推进负载变化对电-电复合直流微电网的影响，故仿真实验把直流负载当作恒功率，推进电机当作阶跃负载。不同负载变化工况的稳定性预测结果如表 2 所示。

为了模拟船舶实际运行中突加负载的 4 种工况，系统大扰动设置为 $t = 4\text{ s}$ ，得到的仿真结果如图 7 所示。

在仿真中，直流母线电压参考值 $U_{dc} = 600\text{ V}$ ，在仿真 4 s 时，示例直流微电网系统受到推进电机阶跃变化的冲击干扰。由图 7(a) 可以看出，对于工况 A，在 $t = 4\text{ s}$ 时，由于推进电机功率增加较少 ($\Delta P_M = 40\text{ kW}$)，电压出现微小波动，并快速收敛到平衡点，系统保持稳定运行。因此，工况 A 仿真结果符合稳定性分析结果。同理，对于工况 B 和工况 C，大容量负载投入由于设置的冲击性负荷功率增大，导致系统母线电压的跌落也随之增加，收敛速度减缓，满足稳定性判据式 (29)。并且由判据可以看出，随着投入的冲击性负荷增加离临界稳定值较近，系统收敛至平衡点的时间也随之增加，直流母线电压如图 7(b)、图 7(c) 所示。

表 2 系统 4 种工况条件的稳定性预测结果
Tab.2 Prediction results of stabilities of the system under four working conditions

工况	$(P_M + P_R)/\text{kW}$	$\Delta P_M/\text{kW}$	系统稳定性	边界条件
A	50	40	稳定	满足
B	50	60	稳定	满足
C	50	90	稳定	满足
D	50	120	不稳定	不满足

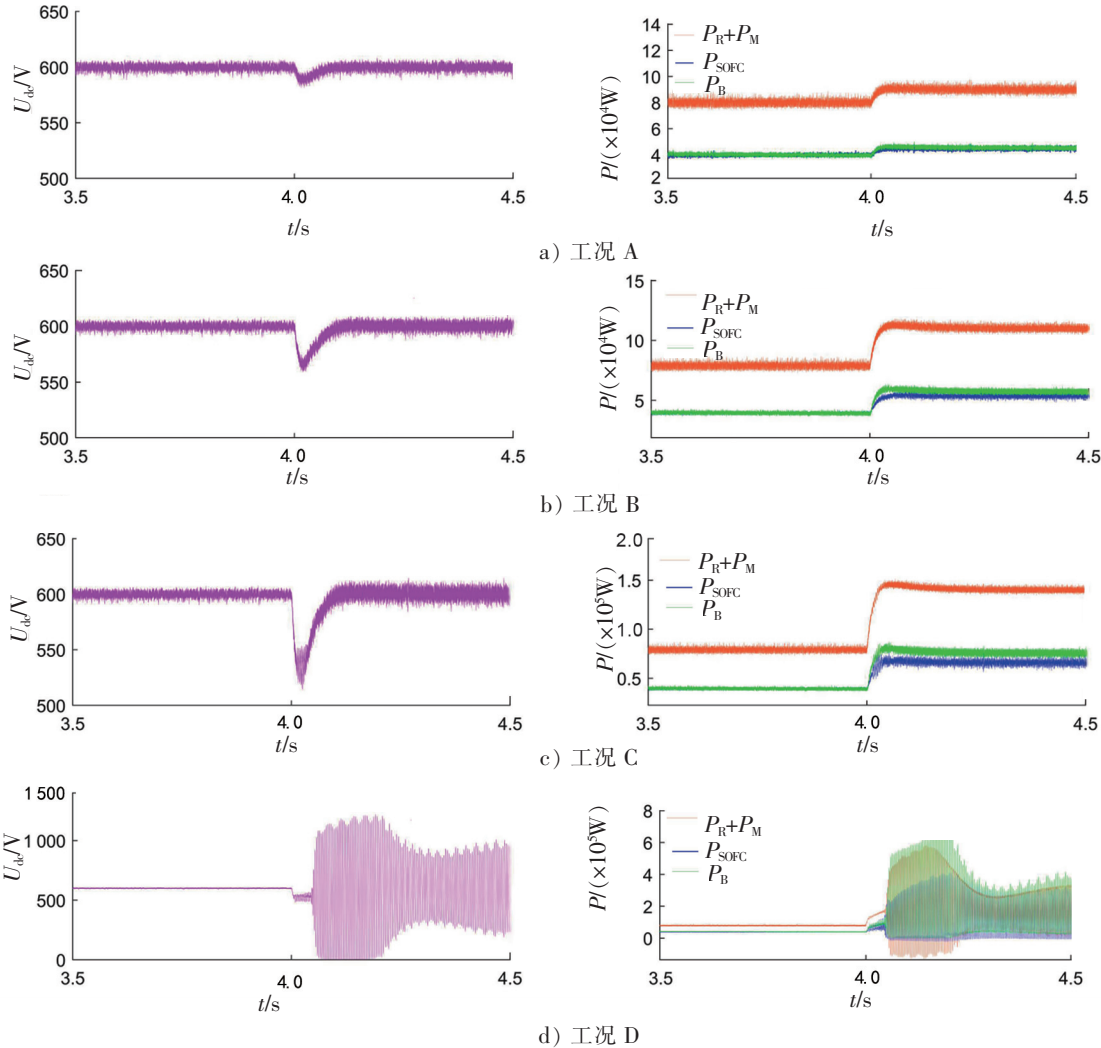


图 7 船舶直流微电网系统 4 种工况下的仿真图
Fig.7 Simulation of the ship DC microgrid system under four operating conditions

对于工况 D, 系统中冲击性负荷阶跃变化较大, 不满足直流微电网群大信号稳定性判据式 (29), 即大信号稳定临界值 $169\ 260\ \text{W} \nlessgtr 170\ 000\ \text{W}$ 。由图 7(d) 可以看出, 在 $t=4\ \text{s}$ 发生阶跃变化后, 系统逐渐大幅振荡, 随之又衰减, 直至最后不能保持稳定运行。因此, 工况 D 仿真结果符合稳定性判据结果。

上述分析表明, 通过仿真验证稳定性判据式 (29) 对于大扰动下系统冲击性负荷发生变化临界值的预测是较为准确的。

4 结论

基于电-电复合的船舶直流微网系统拓扑结构, 本文建立了该系统的仿真模型与混合势函数模型; 依据混合势函数模型, 推导得到了系统在大扰动下的稳定性判据; 给出了适用于电-电复合的船舶直流微电网系统的混合势函数判据推导方法。结果表明: 1) 通过引入电源侧变换器的控制方程, 得到的混合势函数判据能够较为准确地预测冲击性负载阶跃变化大小对系统稳定性的影响; 2) 通过仿真验证, 推导得到的系统稳定性判据能够直观地反映负载阶跃大小对系统稳定性的影响。

[参考文献]

- [1] 申桂英.《“十四五”可再生能源发展规划》发布[J]. 精细与专用化学品, 2022, 30(6): 4.
- [2] HASELTALAB A, VAN BIERT L, SAPRA H, et al. Component sizing and energy management for SOFC-based ship power systems[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245: 114625.
- [3] ZHANG L, SHI S Y, JIANG J H, et al. An optimization and fast load-oriented control for current-based solid oxide fuel cell system[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2018, 22: 2863-2877.
- [4] DING X Y, LU X J, WENG Y W. Fuel-adaptability analysis of intermediate-temperature-SOFC/Gas turbine hybrid system with biomass gas[J]. Journal of Energy Resource Technology, 2021, 143(2): 022104.
- [5] DUONG P A, RYU B, JUNG J, et al. Thermal evaluation of a novel integrated system based on solid oxide fuel cells and combined heat and power production using ammonia as fuel[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6287.
- [6] ZHU Y, TOMSOVIC K. Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells [J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1): 1-11.
- [7] PADULLÈS J, AULT G W, MCDONALD J R. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2): 495-500.
- [8] BUTICCHI G, COSTA L, LISERRE M. Improving system efficiency for the more electric aircraft: a look at dc-dc converters for the avionic onboard dc microgrid[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(3): 26-36.
- [9] YU W N, ZHOU P L, WANG P B. Evaluation on the energy efficiency and emissions reduction of a short-route hybrid sight-seeing ship[J]. Ocean Engineering, 2018, 162: 34-42.
- [10] 张国澎, 郑钰麒, 郑征, 等. 含混合储能直流微电网混合势函数建模及稳定性分析[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 38-48.
- [11] QIAO Z F, YANG R F, LIAO W Q, et al. Impedance modeling, parameters sensitivity and stability analysis of hybrid DC ship microgrid[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 226: 109901.
- [12] YU W N, LI S W, ZHU Y H, et al. Management and distribution strategies for dynamic power in a ship's micro-grid system based on photovoltaic cell, diesel generator, and lithium battery[J]. Energies, 2019, 12(23): 4505.
- [13] 孟飞, 俞万能, 王文斌. 小型混合动力船舶微网系统建模仿真[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2018, 23(3): 212-217.
- [14] CHUB A, VINNIKOV D, LIIVIK E, et al. Multiphase quasi-Z-source DC-DC converters for residential distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8361-8371.
- [15] CHEN R, YU W N, ZHU Y H, et al. Energy management strategy of marine lithium batteries based on cyclic life[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 467(1): 012204.
- [16] 尚彦赞, 宋红为, 杨照光, 等. 基于二阶 RC 模型的锂电池充放电特性分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 87-94.
- [17] JELTSEMA D, SCHERPENJ M A. Multidomain modeling of nonlinear networks and systems: energy- and power-based perspectives[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2009, 29(4): 28-59.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)