燃料电池混合动力船舶的功率跟踪控制研究

陈维原，王锡淮，肖健梅

（上海海事大学物流工程学院，上海201306）

摘要：提出了一种基于模型预测控制的燃料电池超级电容混合动力船舶的功率跟踪控制策略。在提升了系统的瞬态功率响应能力的同时，实现了对超级电容中能量的滚动储备；在平抑燃料电池系统的端口功率波动的同时，实现了系统的可靠运行。仿真结果表明了所提出的控制策略的有效性，对比不同控制参数的情况，验证了控制器设计的有效性。

引言

随着全球化石能源的供需矛盾越加突显，船舶工业领域中清洁能源的应用越来越受到关注[1,2]。航运燃料的排放物主要是温室气体污染物。有数据显示，船舶航运产业在年度全球温室气体排放量占比近百分之三[3]。燃料电池船舶是一种解决传统船舶排放的解决方案之一，并且已经出现了一些应用[4]。

然而，燃料电池在船舶电力系统的应用中存在一系列运行管理上的问题。首先，为了防止燃料电池堆中的氧气匮乏问题，需要限制燃料电池输出端电流或功率的变化率[5]。文献[6]指出，电池堆内过低的氧气含量，将影响燃料电池的使用寿命，甚至使交换膜产生永久性的损伤。其次，对于采用离心式压缩机的燃料电池空气供应系统，文献[7]指出压缩机的工作点会因为其排出口的管网压力过高和吸入流量过低而超出其安全运行范围，进入喘振区，严重影响系统运行。当燃料电池输出端功率突然变化时，压缩机的空气供应量也需要快速地增减，从而容易使工作点进入喘振区。

以上运行特性表明，燃料电池系统的输出功率需要得到实时的控制。另一方面，电力推进船舶的负载多具有功率波动剧烈的特点，这就急需一类高功率密度的辅助电源为燃料电池提供功率缓冲。文献[8]采用燃料电池与超级电容结合的结构配置，使得超级电容的高功率密度特性与燃料电池高能量密度特性得到相互弥补。

然而超级电容在运行控制上同样存在需要考虑的因素。文献[9]指出，当超级电容的充电状态过低时，其外特性将接近短路。这将使其端口的双向DCDC变换器处于欠电压工作状态。同样，其过高的充电状态将对超级电容的使用寿命产生不良影响。综上所述，超级电容的充电状态管理需要实现滚动储备[10]：当功率需求上升时，能够释放电流，充电状态下降；当功率需求下降时，能够吸收能量，充电状态上升；从而整体上使充电状态维持在一个正常范围内。并且当超级电容的容量越小时，对滚动储备的需求就越明显。

基于以上分析，本文将模型预测控制[11]应用到燃料电池混合动力船舶的控制中，利用其多变量约束与滚动时域的特点，在系统变量临近其边界值时提前做出预判，避免系统变量越限，从而实现系统的安全可靠运行。利用其多目标优化特点，使得超级电容的充电状态滚动储备与功率跟踪控制得到兼顾；并协调燃料电池系统的可靠运行与燃料电池系统输出功率跟踪能力。

本文对象系统及控制系统框图如图1所示。

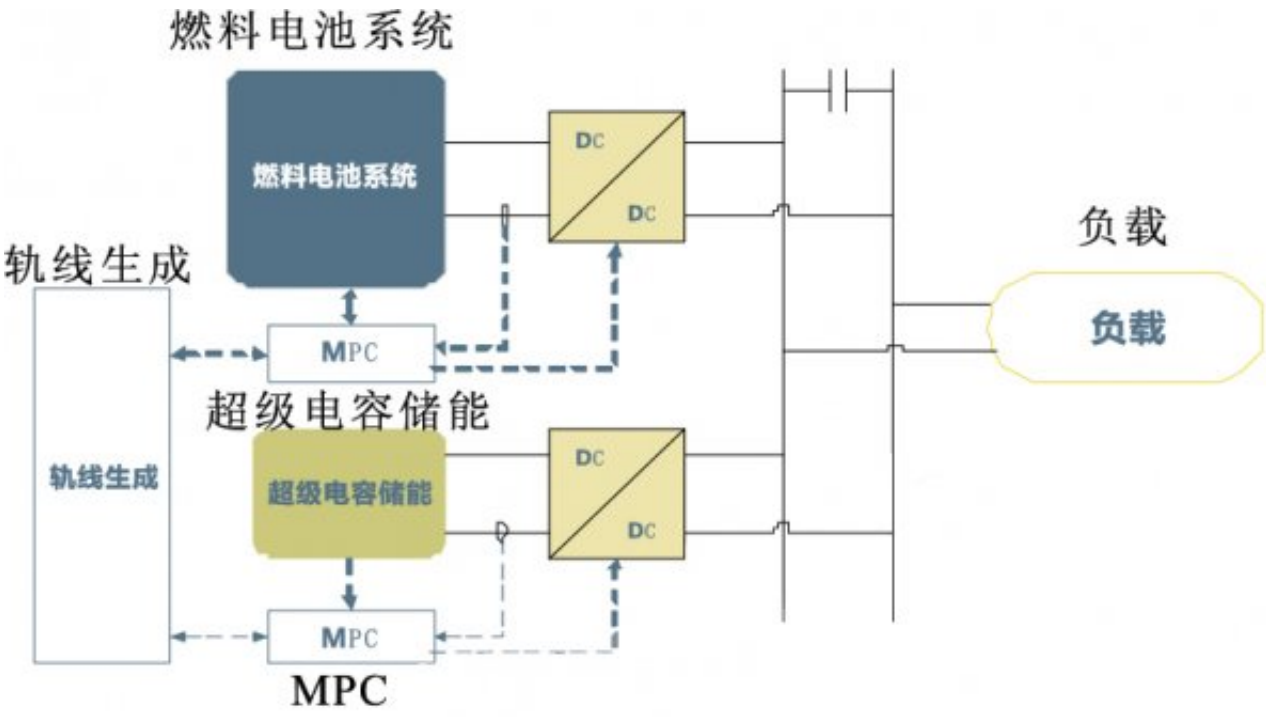

图1 燃料电池混合动力船舶系统框图

图中，一台50kW的质子交换膜燃料电池作为船舶的主动力源，通过升压直流变换器与直流母线相连；容量为12F的超级电容储能装置作为辅助储能，经双向DCDC变换与直流母线相连，实现与直流母线的功率双向交换，从而平抑燃料电池端口受到负载侧功率波动的影响。其中直流母线的电压通过直流变换器的电压控制环实现控制。

1燃料电池及其模型预测控制器设计

通过上文中的分析与描述，本文利用模型预测控制策略对燃料电池系统运行中的输出功率进行管理。

为了衡量燃料电池堆的氧气匮乏程度，本文引入余氧系数，如式(1)所示。

$$\lambda_{O_2} = \frac{W_{O_2,in}}{W_{O_2,rct}} \tag{1}$$

其中$W_{O_2,in}$为进入电池堆的氧气流量，$W_{O_2,rct}$为参与反应的氧气流量。

为了防止燃料电池堆的氧气匮乏，引入如下约束条件。

$$\lambda_{O_2min} \le \lambda_{O_2} \le \lambda_{O_2max} \tag{2}$$

本文中$\lambda_{O_2min} = 1.5$，$\lambda_{O_2max} = 2.5$

为了防止燃料电池中空气供应系统的压缩机工作点进入喘振区，基于本文中采用压缩机的特性曲线图，设立如下线性约束条件：

$$50W_{cp} - {p_{sm}}/{p_{atm}} \ge 0.1 \tag{3}$$

$$15.27W_{cp} - {p_{sm}}/{p_{atm}} \le -0.6 \tag{4}$$

本文中燃料电池系统的数学模型，参见文献[12]。

通过线性化方法，并以采样周期T_s^{fc}离散化，增加低通滤波来避免输入输出直通量后，可以得到如下式

$$\begin{aligned} x_{fc}(k_f+1) &= A_{fc}x_{fc}(k_f) + B_{fc}u_{fc}(k_f) \\ y_{fc}(k_f) &= C_{fc}x_{fc}(k_f) \end{aligned} \tag{5}$$

其中，$k_fT_s^{fc}$表示当前采样时刻，状态量$x_{fc} = [p_{O_2} \quad p_{N_2} \quad p_{sm} \quad w_{cp} \quad x_{f1} \quad x_{f2}]^T$，输入量$u_{fc} = [I_{fc} \quad v_{cm}]^T$，输出量$y_{fc} = [\lambda_{O_2} \quad W_{cp} \quad p_{sm} \quad v_{st} \quad P_{cp} \quad I_{fc}]^T$。

下面给出离散线性化模型的参数矩阵：

$$B_{fc} = \begin{bmatrix} -18.11 & 11.17 \\ 7.632 & 42.15 \\ -5.636 & 95.65 \\ -0.003 & 20.1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$A_{fc}=\begin{bmatrix} 0.653 & -0.099 & 0.104 & 0.783 & 0 & 0 \\ -0.363 & 0.377 & 0.395 & 2.957 & 0 & 0 \\ 0.280 & 0.273 & 0.513 & 5.065 & 0 & 0 \\ 3.28\times10^{-4} & 3.23\times10^{-4} & 7.99\times10^{-4} & 0.444 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.54\times10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.54\times10^{-5} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_{fc}=\begin{bmatrix} -1.308\times10^{-6} & -1.308\times10^{-6} & 1.308\times10^{-6} & 0 & -9.845\times10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & -5.35\times10^{-9} & 2.68\times10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 2.196\times10^{-5} & -2.05\times10^{-7} & 0 & 0 & -2.451\times10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0291 & 0 & 2.3398 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

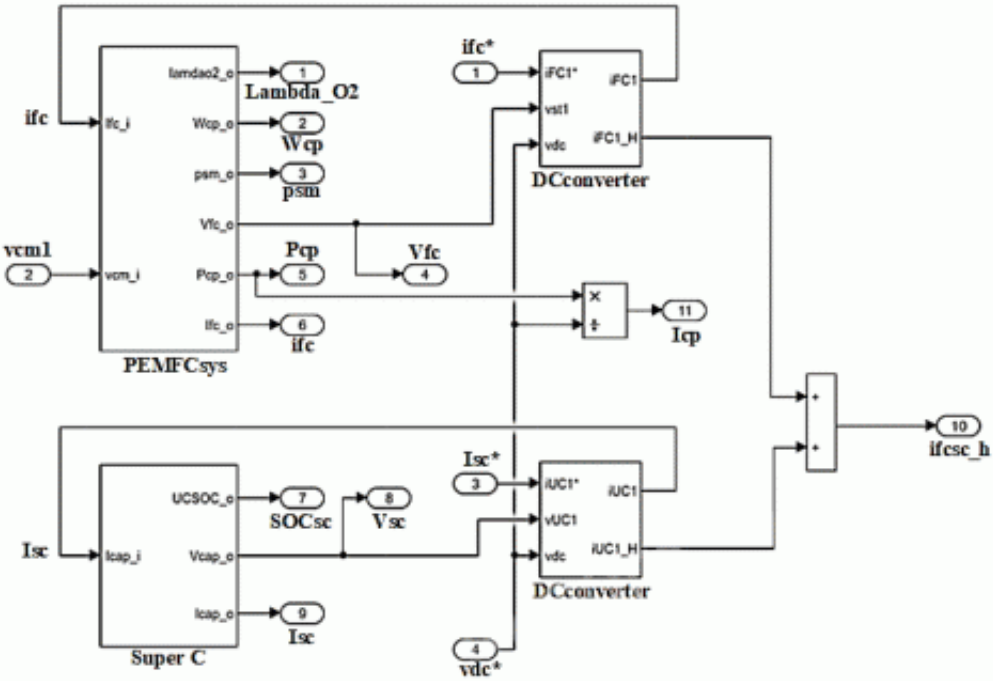

图2 燃料电池混合动力船舶仿真模型

燃料电池系统的模型预测控制问题的形式可如下所述：

$$J = min \sum_{j=1}^{P_{fc}} \left(q_{\lambda_{O_2}}^{(j)} \left(\lambda_{O_2}^{ref}(j) - \lambda_{O_2}(k_f + j|k_f) \right)^2 + q_{I_{fc}}^{(j)} \left(I_{fc}^{ref}(j) - I_{fc}(k_f + j|k_f) \right)^2 \right) \quad (9)$$

满足状态方程式(5)以及如式(2)到(4)的输出量约束，$\forall j = 1 \ldots P_{fc}$成立。

其中，P_{fc}为燃料电池系统模型预测控制的预测视野，记号$k_f + j|k_f$表示在当前k_f步下，模型对相应量在$k_f + j$步的预测值。$q_x^{(j)}$表示第$k_f + j$步下相应量的权重。

文中：

$I_{fc}^{ref}(j) = P_{fc}^{dem}(k_f + j)/v_{st}(k_f + j|k_f - 1)$，$P_{fc}^{dem}$为上层控制的参考信号；$\lambda_{O_2}^{ref}(j) = 2.0$，以保证电池堆氧气含量充足。式(9)所示的目标函数中权重的选取，关系到系统可靠运行指标与功率跟踪能力的协调权衡。

2超级电容及其模型预测控制器设计

为了衡量超级电容的充电状态，定义充电状态如下式：

$$SOC_{sc} = \frac{V_{sc}}{V_{max}} \tag{10}$$

其中，V_{max}为超级电容的电容C_{sc}的最大电压上限。那么，设I_{sc}为流出超级电容的电流那么超级电容就如下式所示：

$$\frac{dSOC_{sc}}{dt} = -\frac{I_{sc}}{C_{sc}V_{max}} \tag{11}$$

其中，R_{sc}为超级电容的集中等效内阻，C_{sc}为超级电容的等效电容大小。

将以上线性的超级电容模型以采样周期T_s^{sc}离散化，增加低通滤波来避免输入输出直通量后，可以得到离散时不变状态方程的参数矩阵如式(12)到(14)所示。

$$A_{sc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 4.54 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$B_{sc} = \begin{bmatrix} -4.63 \times 10^{-6} \\ 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$C_{sc} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 360 & -0.02 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

超级电容的充电状态约束如下所示：

$$SOC_{scmin} \le SOC_{sc} \le SOC_{scmax} \tag{15}$$

本文中，$SOC_{scmin} = 0.4$，$SOC_{scmax} = 0.9$

超级电容的模型预测控制问题的形式可如下所述：

$$J = min \sum_{j=1}^{P_{sc}} \left(q_{S_{sc}}^{(j)} \left(SOC_{sc}^{ref} - SOC_{sc} \right)^2 + q_{I_{sc}}^{(j)} \left(I_{sc}^{ref} - I_{sc} \right)^2 \right) \tag{16}$$

满足状态方程式(11)以及如式(15)的输出量约束，$\forall j = 1 \ldots P_{sc}$成立。其中，$P_{sc}$为超级电容模型预测控制的预测视野。文中

$$SOC_{sc}^{ref} = 0.68 \quad ,$$

$$I_{sc}^{ref} = \frac{SOC_{sc}V_{max} - \sqrt{(SOC_{sc}V_{max})^2 - 4\frac{R_{sc}P_{sc}^{dem}}{\eta}}}{2R_{sc}}$$

其中P_{sc}^{dem}为上层控制的参考信号，η为双向DCDC 变换的效率。式(16)所示的目标函数中权重的选取，关系到超级电容能量的滚动储备与功率跟踪能力的协调与权衡。

3仿真分析

燃料电池混合动力船舶的基于MATLAB/Simulink的仿真模型如图2所示。

在本文仿真中，燃料电池及超级电容控制器的权重选取如下：$q_{\lambda_{O_2}}^{(j)} = 4.82$，$q_{I_{fc}}^{(j)} = 7.28$，$q_{S_{sc}}^{(j)} = 0.23j^2$，$q_{I_{sc}}^{(j)} = 6.7$。

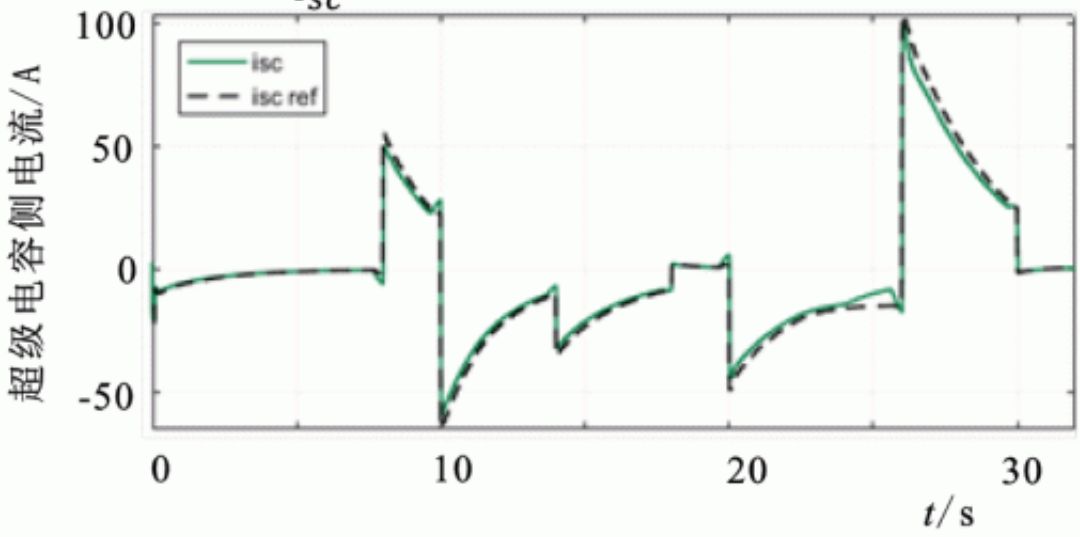

图3 P_{sc}=20时超级电容的输出电流

图 3 给出当 P_{sc}=20 时，超级电容侧输出电流跟随上层控制参考轨迹的变化情况，而图 8 给出了当$P_{sc} = 24$时，超级电容侧输出电流与参考轨迹的变化情况。相比图 3，图 8 由于较长的预测时

域能更早预判到功率需求峰谷值的到来，更早一步为超级电容的充电状态做好储备，所以在输出电流上出现了更明显的反向尖峰，这对功率跟踪性能是不利的，所以选取合适的预测时域非常重要。图 4 给出了当$P_{sc}=20$时，超级电容充电状态的变化情况。

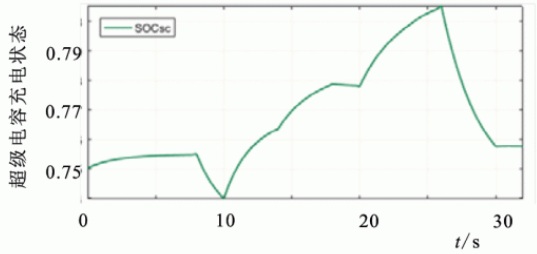

图4 P_{sc}=20时超级电容的充电状态

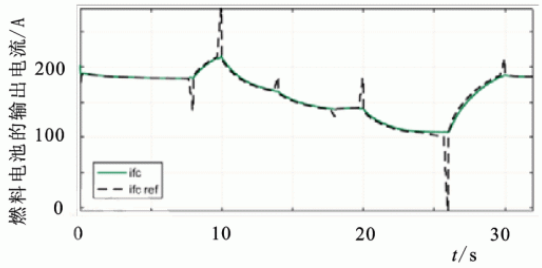

图5 P_{sc}=20时燃料电池的输出电流

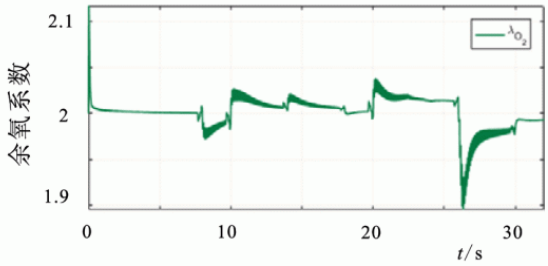

图6 P_{sc}=20时燃料电池的余氧系数

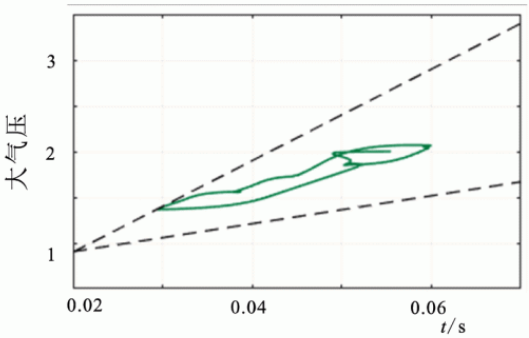

图7 P_{sc}=20时燃料电池的压缩机参量轨迹

图 5 给出了在$P_{sc}=20$时，燃料电池输出电流跟随上层控制参考轨迹的变化情况，可以发现由于燃料电池模型预测控制器的代价函数权衡了可靠运行指标与跟踪能力，在 26 秒时参考轨迹出现的一个尖峰并没有影响燃料电池输出功率的急速下滑。图 6 图 7 分别给出了在$P_{sc}=20$时，燃料电

池的余氧系数的变化情况以及压缩机参量的变化轨迹。而图 9 图 10 分别给出了在$P_{sc}=24$时，燃料电池的余氧系数以及压缩机参量的轨迹。可以看出：相比图 9 图 10，在$P_{sc}=20$时燃料电池受到负载侧功率波动的影响更小；在余氧系数的波动减小的同时，压缩机参量的轨迹变化范围也有所减小，获得了更好的运行性能。

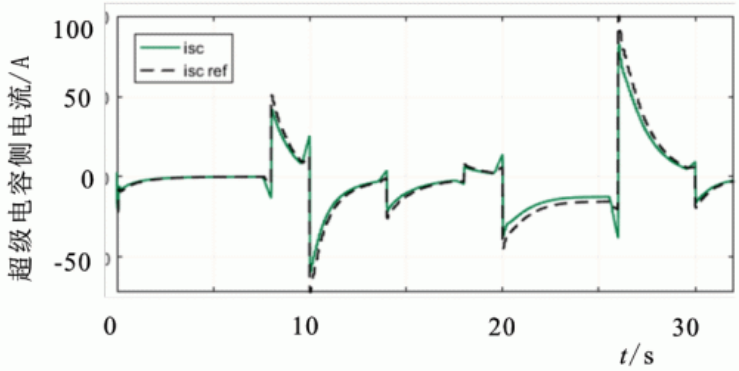

图8 P_{sc}=24时超级电容的输出电流

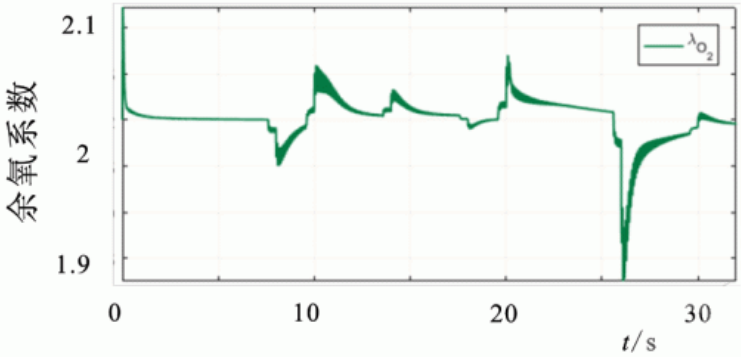

图9 P_{sc}=24时燃料电池的余氧系数

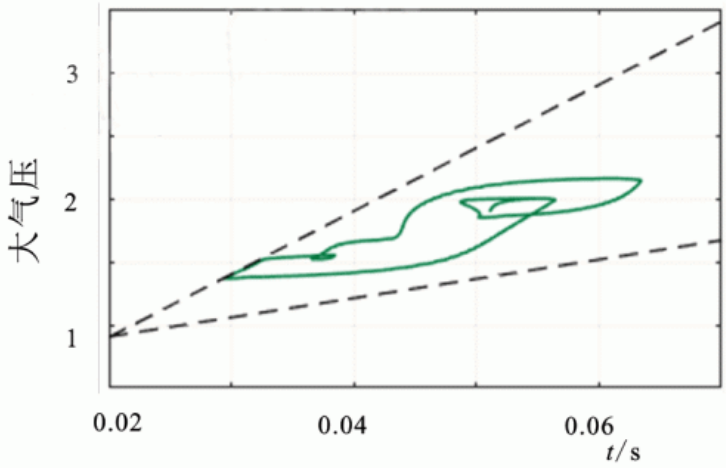

图10 P_{sc}=24时燃料电池的压缩机参量轨迹

4结论

提出的燃料电池模型预测控制器实现了可靠运行与燃料电池系统输出功率跟踪能力的权衡，在系统可靠性得到保证的同时，体现出了良好的响应能力。提出的超级电容模型预测控制器实现了能量储备与输出功率跟踪能力的协调，进一步影响并改善了燃料电池端口的功率波动情况，提升了系统的鲁棒性。燃料电池及超级电容的模型预测控制器作为下层功率跟踪控制的组成部分，为系统的上层能量管理策略的必要基础，为能量分配策略的有效实施提供了保障。

参考文献：

[1] NILSEN R, SORFONN I. Hybrid power generation systems [C]. European Conference on Power Electronics and Applications, 2009: 1-9.

[2] 张轶, 郭栋, 潘国平, 等. 一种游船多模混合推进动力系统设计[J]. 船电技术, 2012, 32(1): 22-24.

[3] STIPA T, JALKANEN P, HONGISTO M, et al. Prevention of air pollution from ships [J]. China Maritime Safety, 2005-02.

[4] LEE K J, SHIN D, YOO D W, et al. Hybrid photovoltaic/diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode – Experimental investigation [J]. Energy, 2012, 49(1): 475-483.

[5] THOUNTHONG P, SETHAKUL P, RAEL S, et al. Performance evaluation of fuel cell/ battery/ supercapacitor hybrid power source for vehicle applications [C]. 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2009:1-8.

[6] PUKRUSHPAN J T, STEFANOPOULOU A G. Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cel systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2004, 126(1): 14-25.

[7] 张成宝. 离心式压缩机的喘振分析与控制 [J]. 压缩机技术, 2002, 6: 4-8.

[8] LIN W S, ZHENG C H. Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(6): 3280-3289.

[9] BURKE A. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology [J]. Journal of Power Sources, 2000, 91(1): 37-50.

[10] SHEN Q, RAMACHANDRAN B, SRIVASTAVA S K, et al. Power and energy management in integrated power system [C], 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2011: 414-419.

[11] RAWLINGS J B, MAYNE D Q. Model predictive control: theory and design [C], 2009: 3430-3433.

[12]BOETTNER D D, PAGANELLI G, GUEZENNEC Y G, et al. Proton exchange membrane fuel cell system model for automotive vehicle simulation and control [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2002, 124(1): 20-27.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/164746.html