

基于微型燃气轮机发电的混合动力系统小信号稳定性分析及前馈补偿控制

李鸿扬^{1,2}, 温旭辉^{1,2}, 王又珑^{1,2}

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在由燃气轮机、发电机及其整流器、电池和电力推进负载等不同功能模块组成的混合动力系统中, 由于发电机整流器和燃气轮机的非线性特性、负载的恒功率特性使得系统的稳定性问题非常复杂。本文分析和比较了目前已有的阻抗分析方法, 对比了不同分析方法采用的阻抗比判据, 选取保守性较小的 MPC 判据作为所研究的微型燃气轮机发电系统小信号模型的稳定性分析判据。并对 MPC 判据缺点做了改进。建立了混合动力系统中双轴燃气轮机、发电机整流器及电动机逆变器的小信号模型。使用阻抗分析法对混合动力系统进行了小信号稳定性分析。最后, 提出了一种前馈补偿法来提升系统小信号稳定性, 解决了燃气轮机带发电机整流器负载时小信号不稳定问题。

关键词: 微型燃气轮机; 小信号; 稳定性; PWM 整流器; MPC

DOI: 10.12067/ATEEE2002023

文章编号: 1003-3076(2021)04-0059-09

中图分类号: TM921

1 引言

由燃气轮机、发电机及整流器、电力推进负载等组成的混合动力系统如图 1 所示。由于各个模块独立设计, 对系统其他模块的参数匹配和控制结构、参数对系统稳定性的影响考虑不充分, 故在各个模块集成后, 可能会出现系统不稳定现象^[1-3]。例如, 在整流器设计时, 通常以电阻为负载进行控制结构和参数设计, 但在混合动力系统中整流器的负载多呈现负阻抗特性的恒功率负载, 这将导致在集成后, 由于模块之间的相互作用产生稳定性问题。

当前混合动力发电系统的小信号稳定性研究多关注于电气端口, 如直流母线及多装置并联端口, 而对于机械端口少有研究^[4-8]。例如, 在混合动力系统中的燃气轮机外特性也具有强烈的非线性特征, 且具有转矩响应慢及惯量小的特点, 当其负载为恒压控制的发电机及整流器时, 整流器及发电机对于前级模块(燃气轮机)而言为恒功率负载, 使得小信号稳定性问题突出。

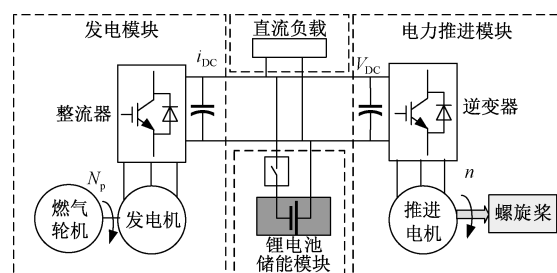


图 1 系统结构图

Fig.1 Configuration of system

小信号稳定性问题是燃气轮机发电系统研究的重点和难点之一。一定程度上可以借鉴电力系统小信号阻抗稳定性分析方法进行研究。电力系统中各个变换装置在运行时, 由于装置之间的相互影响, 会出现不稳定现象。目前, 应用最广泛的电力系统小信号稳定性分析方法是在 1976 年由 Middlebrook 等提出的阻抗分析法^[2]。这种方法给出了满足小信号稳定性源变换器的输出阻抗和负载变换器的输入导纳之间的相互关系^[2, 3]。在阻抗分析方法的基础

收稿日期: 2020-02-17

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KGFZD-135-16-007-2)

作者简介: 李鸿扬(1991-), 男, 山东籍, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动;

王又珑(1982-), 男, 吉林籍, 副研究员, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动(通讯作者)。

之上,许多学者提出了不同的小信号稳定性判据以及相关的输入/输出阻抗设计要求,这其中也包括了后续广泛采用的阻抗禁止区方法^[9-13]。这些方法都为系统提供了充分不必要的稳定条件,但均存在一些缺点,例如 Middlebrook 判据、(Opposing Argument, OA)判据、增益裕度和相位裕度(Gain Margin and Phase Margin, GMPM)判据过于保守,而(Energy Systems Analysis Consortium, ESAC)判据、最大峰值判据(Maximum Peak Criteria, MPC)判据又过于复杂,很难通过 Bode 图进行量化分析。

为了得到适用于微型燃气轮机发电系统小信号稳定性分析的模型,本文分析和比较了目前常用的阻抗稳定分析判据,最后选取保守性较小的 MPC 标准作为微型燃气轮机发电系统的稳定性判据,并对 MPC 判据做了改进,基于 MPC 标准获得输入/输出阻抗的禁止区域,进行了小信号分析。最后,针对系统小信号不稳定问题,提出了一种前馈补偿法,以提升系统小信号稳定性,解决燃气轮机带发电机整流器负载时的小信号不稳定问题。

2 小信号稳定性判据

2.1 小信号稳定性判据

大多数直流电源系统可以等效为线性源变换器系统和线性负载变换器系统,如图 2 所示。其中, v_s 和 Z_s 分别为线性源变换器模型的戴维南等效电压和阻抗,而 v_l 和 $Z_l(=1/Y_l)$ 分别为线性负载变换器模型的戴维南等效电压和阻抗, i_s 和 i_l 分别为流入两个转换器的电流。

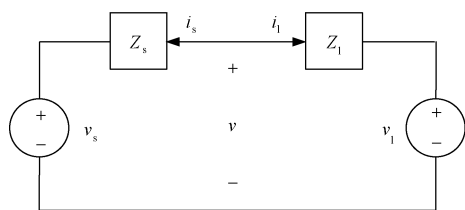


图 2 两级直流电源系统的阻抗模型

Fig.2 Two stage DC-to-DC power conversion system

从图 2 可以看出:

$$v = \frac{Z_l}{Z_s + Z_l} \cdot v_s + \frac{Z_s}{Z_s + Z_l} \cdot v_l \quad (1)$$

若最小环路增益 $T_m = Z_s/Y_l$ 满足奈奎斯特稳定判据,则图 2 的互连系统是稳定的。

为了确保集成系统的稳定性和性能,通常针对源变换器的给定输出阻抗规定负载阻抗规范。负载

阻抗规范通常是根据禁止区域生成的,基于禁区提出的几种稳定性判据包括 Middlebrook 判据, GMPM 判据, ESAC 判据, OA 判据^[9]和 MPC^[13],以上判据在 s 平面上定义了如图 3 所示的各种禁区。

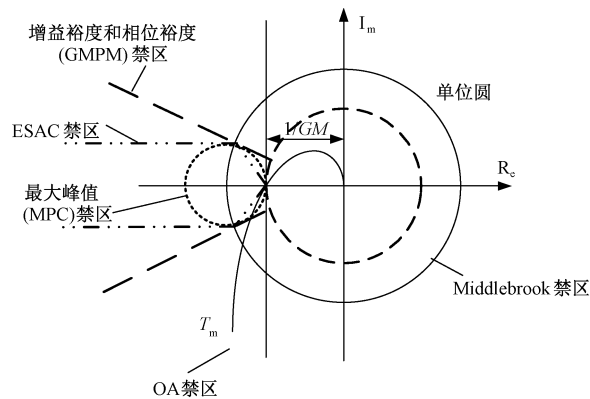


图 3 文献中已有的阻抗比判据

Fig.3 Collection of forbidden regions in complex plane

与其他准则相比, MPC 准则的禁区在复平面中占用的空间要少得多,并且保持相同甚至更好的鲁棒性。但是 MPC 判据只能保证系统的稳定裕度并不能保证系统的稳定性,还需使用奈奎斯特判据判断系统稳定性,给分析带来较大不便。

2.2 一种改进的 MPC 判据的阻抗比禁区

为解决上述问题,本文提出了改进的阻抗比禁区,如图 4(a)所示。在 MPC 禁区的基础上,加入禁区左侧实轴作为新的禁区。该禁区包含奈奎斯特稳定判据,既能保证系统稳定裕度,也可以保证系统稳定性。

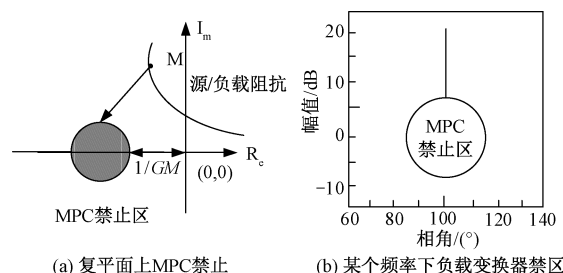


图 4 改进的 MPC 禁区

Fig.4 Improved forbidden regions

在已知源变换器的输出阻抗时,根据 MPC 标准,通过在某频率(以 M 点为例)计算确定负载变换器的输入导纳在相平面中的禁止区域^[9],如图 4(b)所示。以整流器为源变换器、逆变器为负载变换器为例,其参数见表 1,通过源变换器的输出阻抗在全频率段计算禁止区域,可以得到的负载变换

器输入阻抗禁止区域,如图 5 所示。文中采用的幅值裕度和相角裕度分别为 3 dB 和 60°。

表 1 系统参数

Tab.1 System Parameters

参数	数值
阀门位置调节时间常数 (τ_v)/s	0.2
燃料系统时间常数 (τ_{FD})/s	0.1
高压涡轮时间常数 (τ_{CD})/s	0.1
动力涡轮(LPT)惯量 (J)/(kg·m ²)	0.5
额定功率 (P_s)/kW	300
整流器直流侧电容 (C)/mF	3.3
整流器参考电压 (V_{dref})/V	720
动力涡轮参考转速 (N_{pref})/(r/min)	5 800
极对数 (n_p)	3
永磁磁链 (ψ_f)/Wb	0.151 4
d 轴电感(L_d)/mH	0.12
q 轴电感(L_q)/mH	0.27
定子绕组电阻/ Ω	0.001 85
开关频率/kHz	5

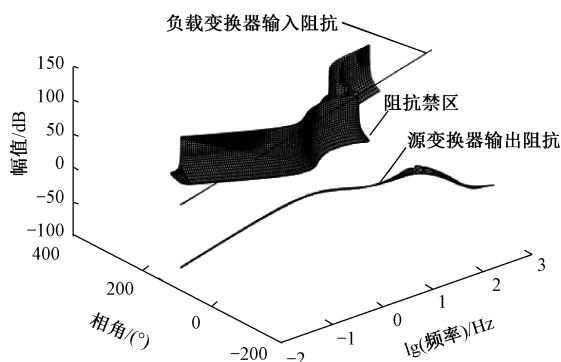


图 5 源输出阻抗在 s 平面投影及根据源阻抗得到的阻抗禁止区域三维图

Fig.5 Source output impedance projected on s-plane and impedance prohibited area obtained from source impedance

3 小信号阻抗模型

3.1 分轴燃气轮机小信号模型

分轴燃气轮机结构如图 6 所示,由压气机、燃烧室、高压涡轮、动力涡轮、回热器以及换热器组成^[14-16]。压气机将由吸入的空气压缩成高压气体,送入燃烧室与燃料混合后燃烧带动燃气涡轮旋转,燃气涡轮一部分能量为压缩机提供动力,其余能量通过高压、高温燃气进入动力涡轮,通过变速齿轮带动发电机工作^[17-19]。

Luca Bozzi 提供了适用于发电厂和分布式发电应用的动态研究的双轴燃气轮机的简化数学模型,

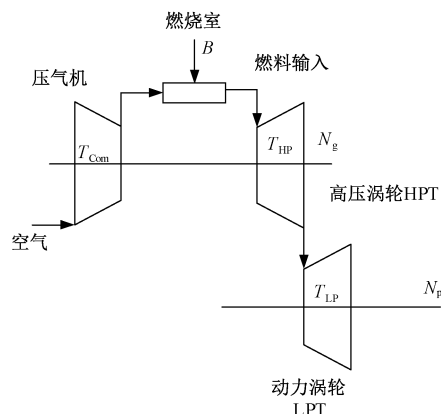


图 6 分轴燃气轮机结构

Fig.6 Structure of twin-shaft microturbine

其频率依赖性低,在高压涡轮 50%~110%额定转速及动力涡轮 15%~110%额定转速的工况有较高的仿真精度^[20]。本文以此模型为基础,改进了其控制结构,忽略了对转速控制影响较小的温度控制模块,提出了适用于双轴燃气轮机用于发电系统仿真分析的模型。

在研究燃气轮机-发电机组系统外特性时,本文只关注燃气轮机的机械特性,即动力涡轮转速动态响应。因此,可以对燃气轮机内部特性及动态过程进行简化,便于分析燃气轮机机械特性及发电机组在负载变化时的动态响应。

高压涡轮及控制系统如图 7 所示,其中, N_g 为高压涡轮转速, N_p 为动力涡轮转速, W_f 为燃油流量指令, τ_v 为燃油阀门时间常数, τ_{FD} 为燃烧室时间常数, τ_{CD} 为高压涡轮时间常数, T_{HP} 为高压涡轮转矩, T_{LP} 为动力涡轮转矩, H 为高压涡轮转子的转动惯量, J 为动力涡轮转子的转动惯量, $K_{p_{Ng}}$ 和 $K_{i_{Ng}}$ 为高压涡轮转速 PI 控制器的比例积分值, N_{g_ref} 为高压涡轮转速指令、 N_{p_ref} 为动力涡轮转速指令、 $K_{p_{Np}}$ 和 $K_{i_{Np}}$ 为动力涡轮转速 PI 控制器的比例积分值。为了简化分析,速度均由角速度表示。高压涡轮转速控制器按照 I 型系统进行校正,校正后的高压涡轮转速可等效为一阶延时环节,如式(2)所示。燃气轮机双闭环控制回路可简化为单闭环控制,如图 8 所示。

$$N_g = \frac{1}{\tau_{HP}s + 1} N_{g_ref} \quad (2)$$

对燃气轮机模型在稳态工作点做小信号处理可得到小信号模型,小信号变量用字母上加“^”表示。

$$\hat{\omega}_{Ng} = \frac{1}{\tau_{HP}s + 1} \hat{\omega}_{Ng_ref} \quad (3)$$

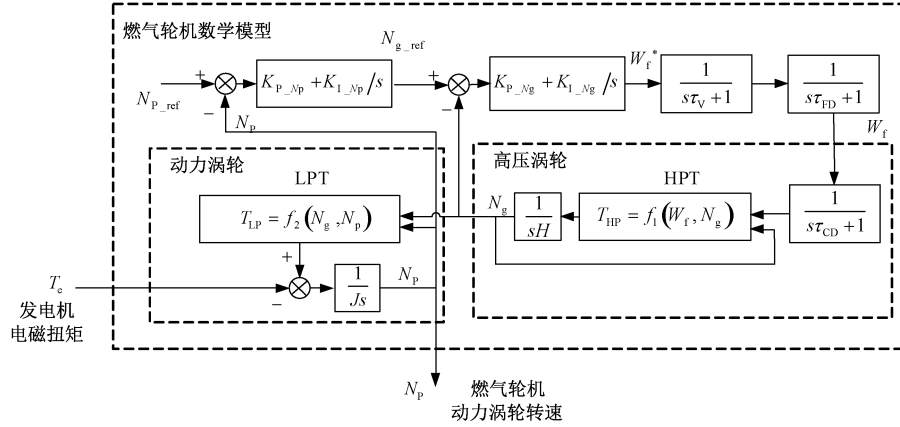


图7 双轴燃气轮机控制回路

Fig.7 Control circuit of twin-shaft microturbine

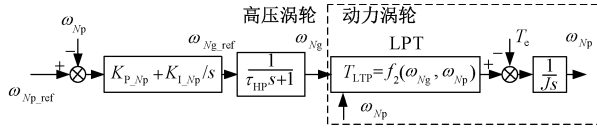


图8 简化后系统框图

Fig.8 Simplified block diagram of system

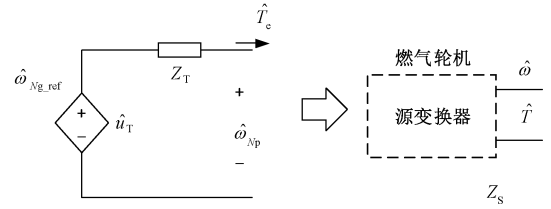


图9 燃气轮机小信号阻抗模型

Fig.9 Small signal impedance model of microturbine

$$\hat{T}_{LP} = (a_2 + 2a_3\omega_{Ng0})\hat{\omega}_{Ng} + a_4\hat{\omega}_{Np} \quad (4)$$

$$\hat{\omega}_{Np} = \frac{1}{sJ}(\hat{T}_{LP} - \hat{T}_e) \quad (5)$$

式中, \$\omega_{Ng}\$ 和 \$\omega_{Ng_ref}\$ 分别为高压涡轮角速度和角速度参考; \$\omega_{Np}\$ 为动力涡轮角速度。

由此可得到燃气轮机动力涡轮的开环传递矩阵:

$$[\hat{\omega}_{Np}] = [-Z_T \quad G_{co}] \begin{bmatrix} \hat{T}_e \\ \hat{\omega}_{Ng_ref} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, 输出阻抗 \$Z_T = 1/(sJ - a_4)\$; 控制输出传递函数 \$G_{co} = (a_2 + 2a_3\omega_{Ng0})/(\tau_{HP} + 1)(sJ - a_4)\$。

当动力涡轮参考转速 \$\omega_{Np_ref}\$ 恒定时, 有 \$\hat{\omega}_{Np_ref} = 0\$, 可得燃气轮机转速输出阻抗 \$Z_{o-c}\$ 如式(7)所示, 可将燃气轮机小信号阻抗模型等效成二端口网络模型, 如图9所示。

$$Z_{o-c} = Z_T / (1 + L_i) \quad (7)$$

式中, \$L_i = (K_{P_Np} + K_{L_Np}/s) G_{co}\$。

3.2 电机及变换器小信号阻抗模型

将发电机整流器整体进行分析, 其输入为 \$(T_e, \omega_e)\$, 输出为 \$(v_{dc}, i_L)\$, 得到发电机及整流器阻抗模型, 如图10所示。

发电机及整流器的 dq 轴模型为^[21]:

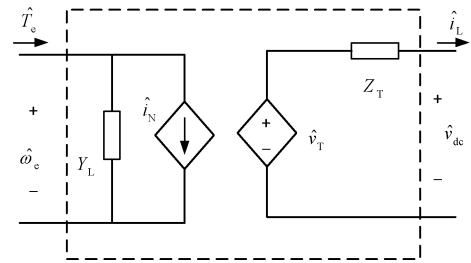


图10 发电机及整流器阻抗模型

Fig.10 Impedance model of PMSG and rectifier

$$\begin{cases} \left(R + L_d \frac{d}{dt}\right) i_d = v_d - \omega_e L_q i_q \\ \left(R + L_q \frac{d}{dt}\right) i_q = v_q + \omega_e L_d i_d - \omega_e \varphi_f \end{cases} \quad (8)$$

$$J \frac{d}{dt} \omega_e = n_p (T_e - T_L) \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (10)$$

$$i_L = \frac{3}{2} (D_q i_q + D_d i_d) + sC \hat{v}_{dc} \quad (11)$$

式中, \$R\$ 为定子绕组电阻; \$L_d, L_q\$ 分别为 dq 轴电感; \$i_d, i_q\$ 分别为 dq 轴电流; \$v_d, v_q\$ 分别为 dq 轴电压; \$\omega_e\$ 为电磁角速度; \$\varphi_f\$ 为永磁磁链; \$n_p\$ 为极对数; \$T_e, T_L\$

分别为电磁转矩及负载转矩; C 为直流侧电容; i_L 为直流侧负载电流; D_d 和 D_q 分别为开关函数的 dq 轴分量。

对式(8)~式(11)在平衡点, $D_{q0} = \omega_e \varphi_f / V_{dc0}$, I_{q0}, V_{dc0} 附近做小信号处理, 稳态值用字母加“0”下标表示, 小信号变量用字母上加“^”表示。

$$\begin{cases} \hat{D}_q V_{dc0} + D_{q0} \hat{v}_{dc} = (R + sL_q) \hat{i}_q + \hat{\omega}_e \varphi_f \\ \hat{D}_d V_{dc0} + D_{d0} \hat{v}_{dc} = (R + sL_d) \hat{i}_d \\ Js\hat{\omega}_e = n_p (\hat{T}_e - \hat{T}_L) \\ \hat{T}_e = \frac{3}{2} n_p \varphi_f \hat{i}_q \\ \hat{i}_L = \frac{3}{2} (D_{q0} \hat{i}_q + \hat{D}_q I_{q0} + D_{d0} \hat{i}_d + \hat{D}_d I_{d0}) + sC\hat{v}_{dc} \end{cases} \quad (12)$$

化简式(12)可得发电机整流器开环传递函数矩阵:

$$\begin{bmatrix} \hat{T}_e \\ \hat{v}_{dc} \\ \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{in-o} & T_{oi-o} & G_{sdi-o} & G_{sqi-o} \\ G_{io-o} & -Z_{o-o} & G_{sdo-o} & G_{sqo-o} \\ G_{vid-o} & G_{iid-o} & G_{sdl-d-o} & G_{sdd-d-o} \\ G_{viq-o} & G_{iiq-o} & G_{sdiq-o} & G_{sqiq-o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_e \\ \hat{i}_L \\ \hat{D}_d \\ \hat{D}_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

加入电压电流双闭环控制, 得到发电机及整流器的小信号双闭环控制框图, 如图 11 所示。其中, $G_{Ts} = K_{PWM} / (0.5T_s s + 1) = 1 / [\sqrt{3}V_{dc} (0.5T_s s + 1)]$, $G_i = K_{p_{cu}} + K_{L_{cu}}/s$, $G_v = K_{p_v} + K_{L_v}/s$ 。

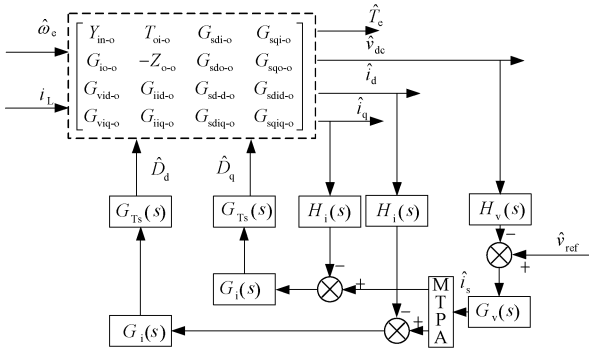


图 11 发电机及整流器电压电流双闭环控制

Fig.11 Closed loop control of rectifier

电压、电流采样过程传递函数分别为: $H_v(s) = 1/(T_s + 1)$, $H_i(s) = 1/(T_s + 1)$, 其中 T_s 为采样周期。

由此可得到以发电机及恒压控制 PWM 整流器

整体的小信号阻抗模型, 如式(14)所示, 可等效成二端口网络, 如图 12 所示。其中 $H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}$ 见附录。

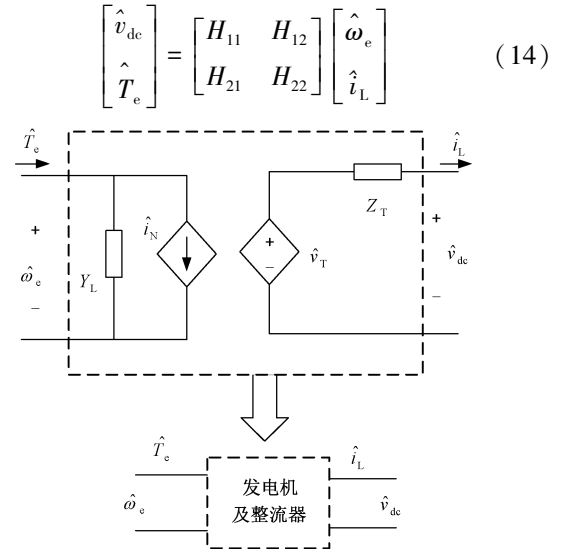


图 12 发电机及整流器的小信号阻抗模型

Fig.12 Small signal impedance model of PMSG with rectifier

类似的, 对电动机及逆变器负载, 规定其三相电流及逆变器变流与发电机及整流器相反。可等效成二端口网络, 如图 13 所示。

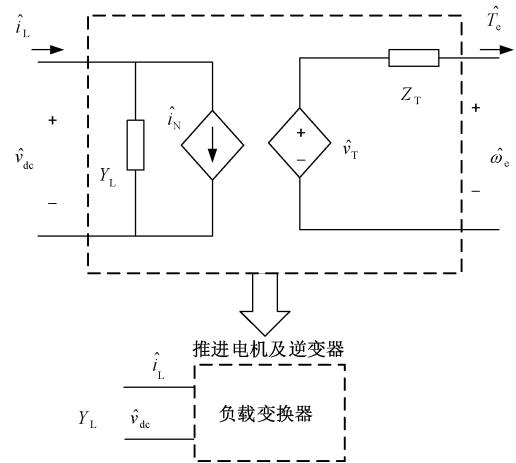


图 13 电动机及逆变器的小信号阻抗模型

Fig.13 Small signal impedance model of PMSM with inverter

系统输入导纳为:

$$Y_L = Z_c + 6D_{q0}^2 Z_J - 3D_{q0} i_{q0} G_i G_{Ts} (3\varphi_f G_v H_v n_p^2 + 2H_i Z_J) / [6\varphi_f (\varphi_f + v_{dc} G_i G_v H_v G_{Ts}) n_p^2 + 4Z_J (V_{dc0} H_i H_i G_{Ts} + Z_q)] \quad (15)$$

式中, $Z_c = sC$; $Z_q = sL_q + R$; $Z_J = sJ$ 。

4 系统小信号阻抗分析及仿真验证

4.1 混合动力系统小信号阻抗模型

为了分析混合动力系统的小信号稳定性,首先需要建立系统小信号阻抗模型,由于系统通常由多级变换器串并联组成,其源、负载变换器及中间变换器的相互作用,使得系统的稳定性问题变得过于复杂。若进行系统小信号分析,需要将系统简化成二级源负载系统进行阻抗分析,如图14所示。

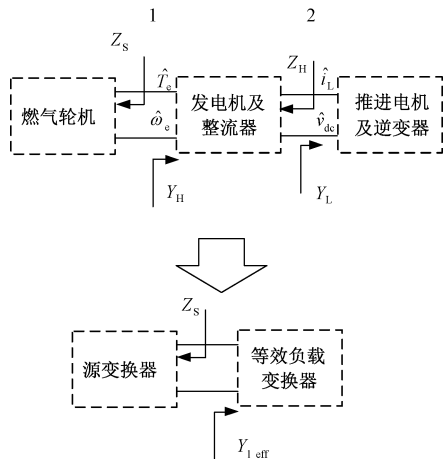


图14 系统源变换器及等效负载变换器

Fig.14 System source converter and equivalent load converter

图14中, Y_H 和 Y_L 分别为发电机整流器和逆变器的输入导纳。其中,发电机及恒压控制PWM整流器整体既是燃气轮机的负载变换装置,同时也是逆变器负载的源变换装置。

首先针对1处的小信号稳定性进行分析,将发电机整流器作为负载考虑。

1端口后端变换器为发电机及整流器、逆变器及电动机负载,为了对系统1端口进行小信号分析。首先要判断PWM整流器与推进电机逆变器之间端口(端口2)是否满足MPC稳定性要求,若满足则可以按等效简化规则将其等效为一个新的电力变换装置,新的负载输入导纳为:

$$Y_{L,eff} = H_{21} - \frac{H_{22}H_{11}Y_L}{1 + H_{12}Y_L} \quad (16)$$

对于表1所示的系统参数,在0~300 kW负载、90%~110%燃气轮机转速等工况计算整流器输出阻抗及禁止域,逆变器的输入导纳并没有进入由整流器输出阻抗为基础的禁止区域之中,如图15所示。因此2端口满足稳定性要求,可以将发电机整流器及逆变器负载等效为一个新的电力变换装置即等效

负载变换器 L_{eff} 。此时仅需要分析燃气轮机与 L_{eff} 的稳定性,就可判断系统在1端口处的小信号稳定性。

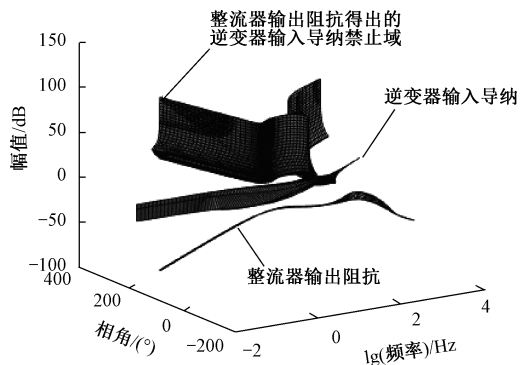


图15 逆变器输入导纳及其禁止区域

Fig.15 Inverter input admittance and forbidden regions

燃气轮机输出阻抗禁止域与燃气轮机等效负载 L_{eff} 输入导纳,如图16所示,可以看出 L_{eff} 的闭环输入导纳于0.05 Hz进入了禁止区域,系统可能存在小信号不稳定现象。

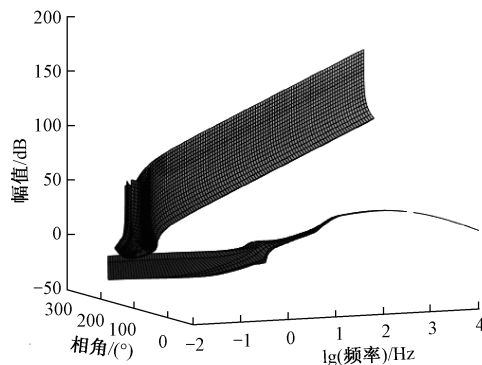


图16 等效源变换器禁止区与等效负载变换器输入导纳

Fig.16 Forbidden zone of equivalent source converter and admittance of equivalent load converter

4.2 整流器前馈补偿控制

针对发电机整流器存在的恒功率负阻抗特性,可以从阻抗补偿的角度来改善系统稳定性,满足稳定条件。

为改善系统小信号稳定性,引入了一种转速前馈补偿控制,转速前馈控制小信号框图如图17所示,除了PWM整流器电压电流双闭环控制外,在控制器的电压指令的输入端还引入了转速前馈 $G_{ff}(s)$ 。

将 $G_{ff}(s)$ 设计为带通滤波器,设置 ω_1, ω_2 使滤波器的带宽覆盖0.05 Hz区域。

$$G_{ff} = \frac{J_v s \omega_1}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (17)$$

发电机整流器在控制中引入转速前馈控制相当

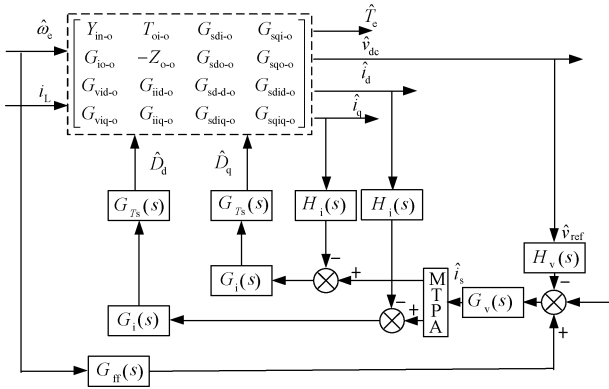


图 17 整流器转速前馈控制小信号框图

Fig.17 Small signal block diagram of rectifier speed feedforward control

于在其输入端增加一个等效惯量;发电机及 PWM 整流器输入端即燃气轮机输出端的等效惯量的增加可以降低输入转速的波动,改善系统的小信号稳定性。

引入转速前馈后,整流器及发电机组成的变换器其输入导纳相角的增加使得系统的相角裕度增加,输入导纳与导纳禁止区无重叠,提高了系统稳定性,如图 18 所示。为了验证本文所提出方法的有效性,在 Matlab/Simulink 按照实际系统拓扑搭建系统模型,并在发电机整流器直流侧施加负载扰动,得到燃气轮机转速响应结果,如所图 19 所示,由图 19 的仿真结果可以看出,加入补偿前,系统于 1 800 s 时加入负载扰动,动力涡轮转速发散,系统小信号不稳定,加入补偿后,燃气轮机转速稳定性明显提升,证明前馈补偿控制可以改变发电机整流器作为燃气轮机负载时带有的负阻抗特性。

为了验证本文所提出方法的有效性,搭建了混合动力系统试验平台,如图 20 所示,在实验台上进行了对比测试,系统参数如表 1 所示。当燃气轮机发电转速为 5 800 r/min,输出功率为 200 kW 时,加入负载扰动,测量动力涡轮转速响应,实验结果如图 21 所示。加入补偿前出现了明显的转速振荡,加入所提出的前馈补偿方法后有效抑制了转速波动,使得燃气轮机发电系统可以在此工况下稳定运行。

5 结论

本文分析和比较了目前常用的阻抗稳定分析判据,选取保守性较小的 MPC 标准作为微型燃气轮机发电系统的稳定性判据,并对 MPC 判据进行了改

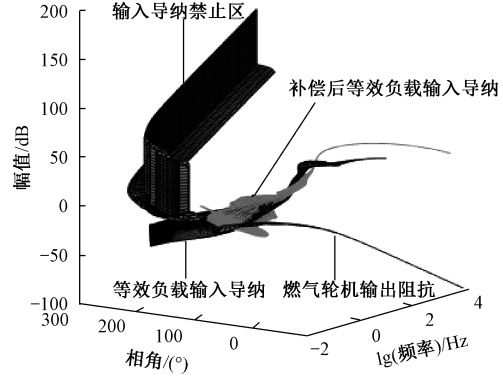


图 18 等效源变换器的禁止区与加入前馈补偿的等效负载变换器的输入导纳

Fig.18 Forbidden zone of equivalent source converter and admittance of equivalent load converter with feedforward compensation

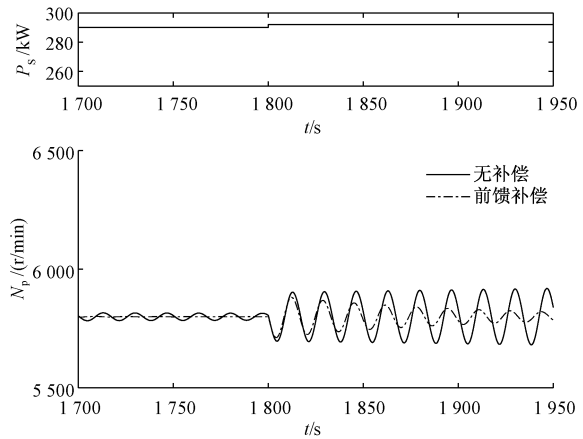


图 19 燃气轮机输出转速仿真结果
无补偿器和带补偿器

Fig.19 Simulation results of gas turbine output speed without compensator and with compensator

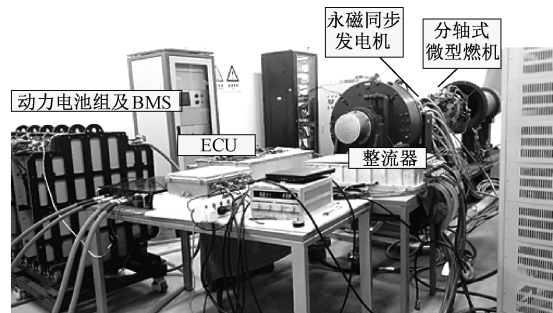


图 20 系统试验台架

Fig.20 System test bench

进,基于 MPC 标准获得输入/输出阻抗的禁止区域。建立了微型燃气轮机和电力电子变换器的阻抗模

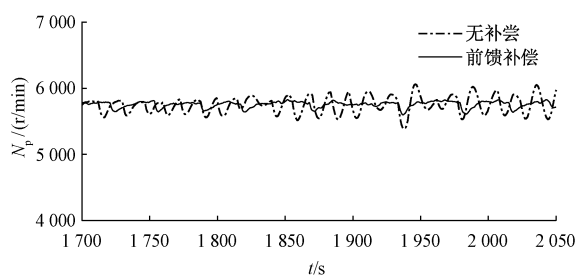


图21 燃气轮机输出转速实验结果

Fig.21 Experiment results of gas turbine output speed

型,以混合动力系统整流器为控制对象,从改进控制

方法的角度改善其输入导纳,提高了燃气轮机带恒功率负载的小信号稳定性,并得到如下结论:

(1) 由于燃气轮机燃烧过程、高压涡轮及动力涡轮的非线性特性、动态响应慢及动力涡轮输出轴的小惯量特性,其带发电机整流器负载时,会出现小信号不稳定现象,小信号阻抗分析、仿真及实验结果均验证了这一点。

(2) 为了改进发电机和整流器整体的输出导纳,提出了一种转速前馈补偿控制方法,对燃气轮机的转动惯量进行补偿。仿真结果和实验结果证明该补偿控制方法可以使发电机整流器在具有较好的动静态性能的同时,提高燃气轮机系统的稳定性。

附录

$$H_{11} = \{2Z_J[-V_{dc}G_iG_{Ts}(2Z_cG_{if}+3S_{q0}G_vG_{vf})+2Z_cZ_q+3S_{q0}^2]+6\varphi^2Z_cn_p^2+3i_{q0}G_iG_{Ts}[G_vG_{vf}(2Z_JZ_q+3\varphi^2n_p^2)-2S_{q0}\cdot G_{if}Z_J]\} / \{2n_p[-V_{dc}G_iG_{Ts}(2Z_cG_{if}+3S_{q0}G_vG_{vf})+2Z_cZ_q+3i_{q0}G_iG_{Ts}(G_vG_{vf}Z_q-S_{q0}G_{if})+3S_{q0}^2]\}$$

$$H_{12} = -3\varphi n_p(S_{q0}-V_{dc}G_iG_{Ts}G_vG_{vf}) / [-V_{dc}G_iG_{Ts}(2Z_cG_{if}+3S_{q0}G_vG_{vf})+2Z_cZ_q+3i_{q0}G_iG_{Ts}(G_vG_{vf}Z_q-S_{q0}G_{if})+3S_{q0}^2]$$

$$H_{21} = 3\varphi(S_{q0}-i_{q0}G_iG_{if}G_{Ts}) / [-V_{dc}G_iG_{Ts}(2Z_cG_{if}+3S_{q0}G_vG_{vf})+2Z_cZ_q+3i_{q0}G_iG_{Ts}(G_vG_{vf}Z_q-S_{q0}G_{if})+3S_{q0}^2]$$

$$H_{22} = (-2V_{dc}G_iG_{if}G_{Ts}+2Z_q) / [3S_{q0}^2-V_{dc}G_iG_{Ts}(3S_{q0}G_vG_{vf}+2G_{if}Z_c)+2Z_cZ_q+3i_{q0}G_iG_{Ts}(-S_{q0}G_{if}+G_vG_{vf}Z_q)]$$

参考文献 (References):

- [1] 王燕宁, 郭春义, 王烨 (Wang Yanning, Guo Chunyi, Wang Ye). 控制系统对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响 (Impact of control system on small-signal stability of two-terminal MMC-HVDC system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (10): 20-31.
- [2] 谷青发, 王杰 (Gu Qingfa, Wang Jie). 逆变型微网下垂控制器参数选择和稳定性分析 (Droop controller parameter selection and stability analysis for inverter-interfaced microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 34-40.
- [3] Middlebrook R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators [A]. Pesc76, IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. 1976. 366-382.
- [4] Loop B P, Sudhoff S D, Zak S H, et al. An optimization approach to estimating stability regions using genetic algorithms [A]. Proceedings of the 2005, American Control Conference [C]. Portland, OR, 2005. 8556478.
- [5] Loop B P, Sudhoff S D, Zak S H, et al. Estimating regions of asymptotic stability of power electronics systems using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18 (5): 1011-1022.
- [6] 王磊, 王秋实, 赵君君, 等 (Wang Lei, Wang Qiushi, Zhang Junjun, et al.). 新能源发电系统用多相耦合交错型双向 DC-DC 变换器及控制研究 (Research on staggered parallel magnetic DC-DC converters for new energy power generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 41-50.
- [7] Sudhoff S D, Crider J M. Advancements in generalized immittance based stability analysis of DC power electronics based distribution systems [A]. 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium [C]. Alexandria, VA, USA, 2011. 12007986.
- [8] 荀倩, 王培良, 蔡志端, 等 (Xun Qian, Wang Peiliang, Cai Zhiduan, et al.). 基于负载转矩观测器的 PMSM 抗负载扰动控制策略 (Anti-load disturbance control strategy of PMSM based on load torque observer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 36-41.
- [9] Sudhoff S D, Glover S F, Lamm P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36 (3): 965-973.
- [10] Vesti S, Suntio T, Oliver J A, et al. Impedance-based stability and transient-performance assessment applying maximum peak criteria [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (5): 2099-2104.

- [11] Sudhoff S D, Loop B P, Byoun J, et al. A new procedure for calculating immittance characteristics using detailed computer simulations [A]. 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]. Orlando, FL, USA, 2007. 9830877.
- [12] Sullivan C J, Sudhoff S D, Zivi E L, et al. Methods of optimal lyapunov function generation with application to power electronic converters and systems [A]. 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium [C]. Arlington, VA, USA, 2007. 9693153.
- [13] Feng Xiaogang, Liu Jinjun, Lee F C. Impedance specifications for stable DC distributed power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17 (2): 157-162.
- [14] Azmy A M, Erlich I. Impact of distributed generation on the stability of electrical power system [A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005 [C]. San Francisco, CA, USA, 2005. 8704504.
- [15] Hannett L N, Jee G, Fardanesh B. A governor/turbine model for a twin-shaft combustion turbine [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (1): 133-140.
- [16] Nehrir M H, Wang C, Strunz K, et al. A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: configurations, control, and applications [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2 (4): 392-403.
- [17] Gaonkar D N, Nayak S. Modeling and performance analysis of microturbine based distributed generation system, "a review" [A]. Proceedings of the IEEE 2011 Energy-Tech [C]. Cleveland, OH, USA, 2011. 12116827.
- [18] Rowen W I. Simplified mathematical representations of single shaft gas turbines in mechanical drive service [J]. Turbomachinery International, 1992, 33 (5): 1-7.
- [19] Xu X, Li K, Jia H, et al. Data-driven dynamic modeling of coupled thermal and electric outputs of microturbines [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (2): 1387-1396.
- [20] Bozzi L, Crosa G, Trucco A. Simplified simulation block diagram of twin-shaft gas turbines [A]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2003 [C]. Atlanta, Georgia, USA, 2003. 1-8.
- [21] 易灵芝, 张成董, 冯江 (Yi Lingzhi, Zhang Chengdong, Feng Jiang). 基 CKMTOA-KELM 优化 ADRC 的永磁同步电机直接转矩控制 (Direct torque control for permanent magnet synchronous motor based on ADRC optimized by CKMTOA-KELM) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (4): 13-21.

Small signal stability analysis of micro turbine based power generation system and feedforward compensation control

LI Hong-yang^{1,2}, WEN Xu-hui^{1,2}, WANG You-long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In a hybrid power system composed of different functional modules such as a microturbine, a generator and its rectifier, a battery, and an electric propulsion load, the problem of system stability is very complicated due to the nonlinear characteristics of the generator rectifier and the microturbine and the constant power characteristics of the load. This paper analyzes and compares the existing impedance analysis methods, compares the impedance ratio criteria adopted by different analysis methods, and selects the less conservative MPC criterion as the stability analysis of the small-signal model of the microturbine power generation system studied. And the shortcomings of the MPC criterion are improved. A small-signal model of a micro-turbine, a generator rectifier, and a motor inverter in a hybrid power system is established. A small-signal stability analysis of the hybrid system is performed using impedance analysis. Finally, in view of the possible small-signal instability problem, a feedforward compensation method is proposed to improve the small-signal stability of the system, and the small-signal instability problem of the small gas turbine with a generator rectifier load is solved.

Key words: microturbine; small signal; stability; PWM rectifier; MPC