# 带阻容负载的独立发电机整流系统的静态稳定 性研究

魏克银1 徐俊霞1 韩辉1 蒋云昊2

(1. 中国人民解放军 73681 部队 南京 210042 2. 南京信息工程大学信息控制学院 南京 210044)

**摘要** 实验与仿真表明,当系统参数配合不合理时,带阻容负载的独立发电机整流系统存 在静态稳定性问题,通过理论计算、实验与仿真分析较为系统地研究了这一问题。其中理论计 算需要建立包括二阶发电机简化模型、整流桥动态平均值模型、负载动态模型在内的系统状态 空间模型,在此基础上运用一阶线性化方法在稳态运行点得到系统的小信号模型,最后运用特 征值理论进行系统静态稳定性判断。通过实验、仿真及理论计算,总结了上述系统运行稳定性 问题的规律,分析了系统静态稳定性问题的物理机理,并分别从参数与控制策略的角度提出了 抑制系统静态不稳定的方法。

关键词:发电机整流系统 阻容负载 静态稳定性 特征值法 中图分类号:TM301.3

# Study on Steady-State Stability of Generator-Rectifier System with Capacitor-Resistor Load

Wei Keyin<sup>1</sup> Xu Junxia<sup>1</sup> Han Hui<sup>1</sup> Jiang Yunhao<sup>2</sup>

(1. Unit 73681 of PLA Nanjing 210042 China 2. Nanjing University of Information Science & Technology Nanjing 210044 China)

**Abstract** Results of experiment and simulation show that low-frequency oscillation will come forth in a standalone generator-rectifier system with capacitor-resistor load when its system parameters are not reasonable. This paper detailedly studies the issue by the methods of theory computation, experiment and simulation. The system state-space model must be built firstly to finish the theory computation, which includes the simplified 2-dimension model of generator, the dynamic average-value model of diode-bridge rectifier and dynamic model of load. Then the small-signal model of system will be obtained by the linearing method at a steady-state operation point. And finally the eigenvalue theory is used to estimate the system stability. On the ground of the experiments, simulations and theory computation, this paper summarizes the law of steady-state stability of such system, analyzes the physics mechanism, and presents the control methods for the issue from points of view of parameters and controller.

Keywords: Generator-rectifier system, capacitor-resistor load, steady-state stability, eigenvalue method

收稿日期 2011-03-29 改稿日期 2011-09-29

1 引言

随着电力电子及其控制技术、各种分布式电源

系统的发展,独立发电机二极管整流供电系统的使 用已变得越来越普遍<sup>[1,2]</sup>。然而当参数不合理时,这 种系统可能会出现静态稳定性问题(表现为低频振 荡,LFO),如文献[3,4]研究的整流电源-逆变器-感应电机负载的舰船电力推进系统的低频振荡问题, 文献[5-7]研究的三相/多相发电机整流-反电动势负 载系统的低频振荡问题等。在最近的研究中发现, 系统参数配合不合理时,同步发电机整流系统带阻 容负载时同样会出现静态稳定性问题。图1为带阻 容负载的三相发电机整流系统的示意图(隐极发电 机转子在交轴方向上布置一套时间常数与励磁绕组 时间常数接近的 fq 绕组<sup>[5]</sup>),图2为上述系统采用 恒压他励方式发生低频振荡时系统励磁电流、相电 压、相电流、直流侧电压及整流电流的实验波形图。 上述低频振荡给系统在噪声、振动、应力等方面带 来了较多的问题,严重影响了系统的安全运行。为 了较清楚地了解这种现象发生的机理,并进行有效 地抑制,有必要对其进行详细地分析研究。



图 1 带阻容负载的发电机整流系统示意图

Fig.1 Sketch map of generator-rectifier system with capacitor-resistor load







独立发电机整流系统的静态稳定性问题不外乎 有实验、仿真和理论计算等研究方法。实验方法最 为客观与直接,可以方便地考虑饱和等多种因素的 影响,但部分电机参数(如绕组电阻与电感参数) 在实验中不易变化,影响了对系统静态稳定性规律 的研究。仿真方法简单易行,只要建立准确的系统 仿真模型,特别是电机模型,可以方便地修改任何 参数,继而研究它们对系统静态稳定性的影响。但 很难做到对电机参数的准确提取及对饱和影响的准 确考虑,因而在一定程度上影响了仿真的准确性 [8]。研究独立供电系统静态稳定性问题的理论方法 可分为时域方法(特征值法) [4-7,9]和频域方法(阻 抗/导纳法) [10-12]。时域方法可分为以下几个步骤: ①建立电机的降阶模型、二极管整流桥的平均值模 型 (以将不连续系统转化为连续系统)及负载的动 杰模型: ②在稳态运行点对系统模型进行线性化, 得到系统特征方程; ③应用 Routh-Hurwitz 判据进 行系统稳定性判断。频域方法也分为以下几个步骤: ①、②与时域方法相同: ③计算直流电源的输出阻 抗和负载的输入阻抗;④应用 Nyquist 或 Middlebrook 等判据进行系统稳定性判断。可见,不 管是时域方法还是频域方法都需要建立系统在整流 桥平均值模型基础上的线性化模型。然而,由于二 极管整流桥的状态由流过二极管的电流决定, 当直 流侧采用不同滤波器时,其动态平均值模型的推导 有很大的差别。当整流桥直流侧采用 L 滤波或 LC 滤波时,其直流侧电流较为平直,状态空间平均 值模型较容易建立[13,14],但当直流侧仅有电容滤波 器时,直流侧电压较平滑,而直流侧电流的脉动较 大,其平均值模型的求解需要应用数值叠代的方法 [15],而更为复杂的系统线性化模型的得到则需要借 助 ACSL 或 Matlab/Simulink 等软件工具<sup>[16]</sup>。频域 方法有时还存在给出的稳定性条件过于苛刻的问题, 即当电源输出阻抗和负载输入导纳关系不满足稳定 性判据时,实际系统仍可能是稳定的,对稳定域的 精确判断十分困难[12]。

文献[5-7]解释了带反电动势负载的发电机整流 系统静态稳定性问题的物理机理,认为是交轴电抗 与直轴瞬态电抗之比过大(表现为临界稳态电阻大 于折算到交流侧的等效直流动态电阻)导致了系统 的静态不稳定性,并认为直流侧电流微分负反馈或 在转子上设置时间常数与励磁绕组接近的交轴短路 绕组可以有效抑制系统低频振荡的发生。文献 [3]认为是恒功率负载的负阻抗特性引起了其系统的 不稳定,本文中的负载显然不属于这一类情况。由 于直流侧电容的存在,本文系统无法得出等效直流 动态电阻的概念,因而无法像文献 [5-7]一样应用 Roth-Hurwitz 判据进行系统稳定性判断。

发电机整流带阻容负载的系统结构虽不新颖, 但目前尚没有文献系统研究其静态稳定性问题。本 文根据此类系统在临界稳定时的运行特点,分别运 用理论分析、实验与仿真等方法较为全面、系统地 研究了其静态稳定性问题,其中稳定性的理论计算 运用了系统特征值理论。总结了系统静态稳定性问 题的一般规律,分析了其物理机理,并研究了抑制 此类系统静态不稳定的措施。

### 2 理论分析

#### 2.1 三相同步发电机的简化模型与稳态值计算

稳态或似稳态时,可将发电机定、转子电流与 磁链分解为高频与低频分量分别处理。若忽略发电 机定子绕组暂态,转速维持在额定值,在理想化电 机假设的条件下,可得到发电机如图 3 所示的等效 电路模型及 x<sub>ad</sub>标么值系统下如式(1)所示的端电 压方程<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} u_{a} = -E_{1}\sin(\theta - \delta_{1}) - (x_{c}pi_{a} + ri_{a}) \\ u_{b} = -E_{1}\sin(\theta - \delta_{1} - 2\pi/3) - (x_{c}pi_{b} + ri_{b}) \\ u_{c} = -E_{1}\sin(\theta - \delta_{1} + 2\pi/3) - (x_{c}pi_{c} + ri_{c}) \end{cases}$$
(1)

式中,  $E_1$  为图 3 中等效理想电压源幅值;  $\delta_1$  为基波 功率角;  $x_c = (x''_d + x''_q)/2$ , 为等效换相电抗; p 为微 分算子; r 为相电阻。且有

$$\begin{cases} E_{1} = \sqrt{E_{1d}^{2} + E_{1q}^{2}} \\ E_{1d} = E_{1} \sin \delta_{1} = x_{q1}(p)i_{ql} \\ E_{1q} = E_{1} \cos \delta_{1} = G(p)u_{fd} - x_{d1}(p)i_{dl} \\ x_{d1}(p) = x_{d}(p) - x_{c} \\ x_{q1}(p) = x_{q}(p) - x_{c} \end{cases}$$
(2)

式中, G(p) 为运算电导;  $i_{dl}$ 、 $i_{ql}$ 分别为定子直轴电流与交轴电流的低频分量;  $x_d(p)$ 、 $x_q(p)$ 分别为直轴、交轴运算电抗。





Fig.3 Equivalent circuit model of 3-phase synchronous generator

定义纵轴瞬变电动势  $E'_q = x_{ad} \psi_{fd} / x_{fd}$ 、横轴瞬变 电动势  $E'_d = -x_{aq} \psi_{fq} / x_{fq}$ ,则可以建立发电机以  $E'_q$ 、  $E'_d$ 为状态变量的二阶简化模型。

$$\begin{cases} (1+T_{q0}p)E'_{d} = (x_{q1} - x'_{q1})i_{q1} \\ (1+T_{d0}p)E'_{q} = \frac{x_{ad}}{r_{fd}}u_{fd} - (x_{d1} - x'_{d1})i_{d1} \end{cases}$$
(3)

式中,  $T_{d0}=x_{fd}/r_{fd}$ 、 $T_{q0}=x_{fq}/r_{fq}$ 分别为转子励磁绕组和 交轴绕组的时间常数,  $x'_{q1}=x'_{q}-x_{c}$ 、 $x'_{d1}=x'_{d}-x_{c}$ , 且有

$$\begin{cases} E_{1d} = -\psi_{1q} = E'_d + x'_{q1}i_{q1} \\ E_{1q} = \psi_{1d} = E'_q - x'_{d1}i_{d1} \end{cases}$$
(4)

$$\Leftrightarrow E_1^{\&} = E_{1d} + jE_{1q}$$
,  $P_1^{\&} = i_{d1} + ji_{q1}$ ,  $Z_1 = E_1/I_1$ ,

 $\varphi_1$ 

为基波功率因数角,则有

$$\begin{cases} i_{dl} = I_1 \sin(\delta_1 + \varphi_1) \\ \delta_1 = \arctan\left(\frac{x_{q1} \cos \varphi_1}{Z_1 + x_{q1} \sin \varphi_1}\right) \\ i_{ql} = I_1 \cos(\delta_1 + \varphi_1) \end{cases}$$
(5)

#### 2.2 整流桥的平均值模型及负载方程

从仿真与实验研究中发现,系统从轻载到重载 区间内都可能发生低频振荡现象,但系统在两种极 端情况下临界稳定时,整流桥都工作于连续导通模 式,图4所示为重载临界稳态时发电机内电动势与 相电流波形。可见,由于交流侧电感的作用,直流 侧电流仍较平滑。因此,依据文献 [17]中的状态空 间平均值法,可建立图3中整流桥的动态平均值模 型

$$(1+T_{x1}p)I_{\rm DC} = \frac{3}{4\pi r} (\sin\mu + \sqrt{3}\cos\mu + \sqrt{3})E_1 - \frac{1}{2r} \left(\frac{\mu}{\pi} + 1\right) U_{\rm DC}$$
(6)

式中,  $T_{x1}=L_C/r$ ,  $I_{DC}$ 、 $U_{DC}$ 分别为直流侧电流与电 压平均值;  $\mu$ 为换相重叠角。





phase current of generator

由文献[5,6]易知

$$\begin{cases} \varphi_{1} B 2\mu/3 \\ \frac{\sqrt{3}\omega L_{C} \left(\sqrt{3} + \sqrt{3}\cos\mu + \sin\mu\right)}{(\pi + \mu)(1 - \cos\mu)} - \frac{2\pi r}{\pi + \mu} = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} \quad (7) \\ I_{1} B 2\sqrt{3}I_{DC}/\pi \end{cases}$$

直流侧负载方程可表示为

$$(1 + RCp)U_{\rm DC} = RI_{\rm DC} \tag{8}$$

#### 2.3 系统的线性化模型

ſ

式(3)、式(6)与式(8)构成了系统的状态空间模型,由于 *I*<sub>DC</sub>作为系统状态变量时不如 *I*<sub>1</sub>方便,因此,应用式(7)中第3行等式对式 (6)、式(8)中的 *I*<sub>DC</sub>作相应的代换,得到系统 新的状态空间模型

$$\begin{cases} (1+T_{x1}p)I_{1} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi^{2}r}(\sin\mu + \sqrt{3}\cos\mu + \sqrt{3})E_{1} - \\ \sqrt{3}(\mu/\pi + 1)U_{DC}/(\pi r) \\ (1+T_{q0}p)E_{d}' = (x_{q1} - x_{q1}')i_{q1} \\ (1+T_{d0}p)E_{q}' = \frac{x_{ad}}{r_{fd}}u_{fd} - (x_{d1} - x_{d1}')i_{d1} \\ (1+RCp)U_{DC} = \frac{\pi RI_{1}}{2\sqrt{3}} \end{cases}$$
(9)

对系统方程式(9)作一阶线性化处理,并通过 式(2)、式(4)、式(5)与式(7)将系统方程 变

换为以 E'<sub>d</sub>、 E'<sub>q</sub>、 I<sub>1</sub>、 U<sub>DC</sub> 为状态变量的小信号模型。

$$\begin{cases} (1+T_{x1}p)\Delta I_{1} = c_{1}\Delta I_{1} + c_{2}\Delta E'_{d} + c_{3}\Delta E'_{q} + a_{2}\Delta U_{\rm DC} \\ (1+T_{q0}p)\Delta E'_{d} = c_{4}\Delta I_{1} + c_{5}\Delta E'_{d} + c_{6}\Delta E'_{q} \\ (1+T_{d0}p)\Delta E'_{q} = c_{7}\Delta I_{1} + c_{8}\Delta E'_{d} + c_{9}\Delta E'_{q} + x_{ad}\Delta u_{fd} / r_{fd} \\ (1+RCp)\Delta U_{\rm DC} = \pi R\Delta I_{1} / 2\sqrt{3} \end{cases}$$

(10)

式中, $c_1 \sim c_9$ 为变量系数,由系统参数确定。

## 2.4 系统运行稳定性分析

为简化分析,认为发电机转子上不设置  $f_q$ 绕 组,则  $T_{q0}=0$ 、 $x'_q=x_q$ 、 $x'_{q1}=x_{q1}$ 、 $\Delta E'_d=0$ ,系统的特 征方程为

$$\lambda^{3} + d_{1}\lambda^{2} + d_{2}\lambda + d_{3} = 0 \tag{11}$$

$$\vec{x} \oplus \quad d_1 = \frac{T_{d0}T_{x1} + RCT_{x1}(1 - c_9) + RCT_{d0}(1 - c_1)}{RCT_{d0}T_{x1}}$$
$$d_2 = -\left[\sqrt{3}\pi RCa_2T_{d0} + 6CT_{x1}(c_9 - 1) + 6CT_{d0}(c_1 - 1) + 6RC^2(c_3c_7 - c_1c_9 + c_9 + c_1 - 1)\right] / (6RC^2T_{d0}T_{x1})$$
$$d_3 = \frac{\sqrt{3}\pi RCa_2(c_9 - 1) - 6C(c_3c_7 - c_1c_9 + c_9 + c_1 - 1)}{6RC^2T_{d0}T_{x1}}$$

上述系统稳定时,其特征根将具有负的实部,且 系统稳定性越好,其负实部的绝对值越大。考察每 个特征根的阻尼强度,也可判断系统的相对稳定性。

# 3 系统静态稳定性的规律及实验、仿真与 理论的相互验证

为总结系统静态稳定性的规律,作者在一套带 阻容负载的三相同步发电机整流系统

(*P*<sub>N</sub>=20kW, *U*<sub>N</sub>=380V, cos*φ*=0.8, 电磁参数如表 1 所示)上进行了大量的实验、仿真与理论计算, 总结出以下几条规律:①发电机励磁绕组与电枢绕 组的漏感参数越大,系统的稳定性越好;②发电机 交轴阻尼作用越强,系统的稳定性越好;③随着发 电机饱和度的提高,系统的稳定性变好;④直流侧 电容越小,系统的稳定性越好;⑤只有当电阻属于 某一区间时(即负载功率不太大也不太小),系统 才可能发生低频振荡,且在此区间内存在一电阻可 使系统的低频振荡最为严重。

#### 表1 发电机的电磁参数(标幺值)

Tab.1 The electromagnetic parameters of

generator (pu)								
r	0.118 7	$X_0$	0.126 7	$x_{fd}$	2.001 2			
x <sub>ad</sub>	1.920 9	r <sub>fd</sub>	0.014 6	X <sub>1d</sub>	1.979 4			
x <sub>aq</sub>	1.920 9	$R_{1d}$	0.543 9	$x_{1q}$	1.979 4			
$x_1$	0.061 9	r <sub>1q</sub>	0.543 9					

当 C=3.5mF、R=30Ω时,给发电机施加 31V 的 阶跃励磁电压,系统将发生低频振荡。图 5 所示为 在 EMTDC 软件环境中,测试不同阻尼绕组电阻对 系统静态稳定性影响的结果,其中图 5a 中阻值为 电机电磁参数设计计算值。可见,直轴阻尼对系统 静态稳定性影响不大,而交轴阻尼作用增强后,系 统的静态稳定性得到明显改善。





图 6 所示为综合考虑电容与电阻对系统静态稳 定性影响的实验与仿真结果。仿真给出了电容与电 阻变化时系统临界稳定的边界,可见,只有当电容 大于某一值时,系统才可能出现静态不稳定,而在 负载太大或太小时,系统都将稳定。图中作标志的





Fig.6 The associated effect of capacitor and resistance on

#### system LFO

表 2 C=3.5ml	F 时的糸统特征值
-------------	-----------

Tab.2 System eigenvalue when C=3.5mF

$R=15\Omega$	<i>R</i> =13Ω	$R=8\Omega$	$R=5\Omega$	$R=1\Omega$				
0.049 7+0.860 1i	-0.002 2+0.866 6i	-0.629 6+0.715 7i	-1.295 3	-2.118				
0.049 7+0.860 1i	-0.002 2+0.866 6i	-0.629 6+0.715 7i	-0.8888	-0.734 5				
-0.017 7 -0.0183		-0.027 4	-0.039	-0.053				
表 3 C=4.5mF 时的系统特征值								
Tab.3 System eigenvalue when $C=4.5$ mF								
<i>R</i> =13Ω	$R=10\Omega$	$R=8\Omega$	$R=5\Omega$	$R=3\Omega$				
0.005 1+0.786 5i	-0.347+0.747 1i	-0.619+0.600 9i	-1.540 2	-2.229 6				
0.005 1+0.786 5i	-0.347+0.747 1i	-0.619+0.600 9i	-0.605 2	-0.556 7				
-0.019 8	-0.021 6	-0.026	-0.037 5	-0.051 6				

点为实验结果(△表示稳定运行点,□表示临界稳 定点, ○表示不稳定点)。可见,仿真与实验结果 基本一致。

从图 6 仿真结果中可知,当系统在电容为 3.5 mF、4.5mF 达到临界稳定时,较小的临界电阻分别 为 18.0Ω与 16.1Ω。根据上文中准稳定系统特征值 的计算方法,表 2、表 3 分别列出了在电容为 3.5mF 与 4.5mF,并带不同负载电阻时系统特征值 的理论计算结果。从表 2 与表 3 中可见,在电容为 3.5mF、4.5mF 时,当负载电阻约为 15.0Ω 及 13.0Ω 时系统达到临界稳定,且随着负载电阻减小 (负载功率增大),系统的稳定性变好,这与图 6 显示基本一致。当系统负载较轻时,直流侧电流 脉动较大,此时整流桥平均值模型的效用变差,基 于此计算出的系统特征值不能准确验证系统静态稳 定性。

2005 年 1 月 第 20 卷第 1 期

# 4 系统低频振荡的机理

将式(7)第2行代入式(6)得

$$k_1 p I_1 = E_1 - k_2 U_{\rm DC} \tag{13}$$

式中,  $k_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} / M > 0$ ,  $k_2 = \frac{1}{2r} \left( \frac{r}{\pi} + 1 \right) / M > 0$ 。  $M = 3(\sin \mu + \sqrt{3} \cos \mu + \sqrt{3}) / 4\pi r - \sqrt{3}(1 - \cos \mu) / 2L_C$ 系 统某一瞬间发生小扰动时,可认为  $\Delta \mu = 0^{[7]}$ ,将式 (13) 在稳定运行点一阶线性化得

$$k_1 p \mathsf{V} I_1 = \mathsf{V} E_1 - k_2 \mathsf{V} U_{\mathrm{DC}} \tag{14}$$

式(14)揭示了系统"微变"稳定性条件的机 理:当小扰动引起电枢电流增大时(即 $\Delta I_1 > 0$ ), 励磁电流 $I_{fd}$ 增大以维持磁链 $\psi_{fd}$ 不变,发电机的等 效电动势将增大( $\Delta E_1 > 0$ ),同时,直流侧负载压 降也将增大( $\Delta U_{DC} > 0$ )。如果发电机等效电动势 增量小于直流侧负载压降增量(折算到交流侧,  $k_2$ 可认为是整流桥两侧电压折算系数或变比),则 电枢电流将减小,使系统恢复到原来的平衡状态,即系统在该平衡状态下能够稳定运行;反之,若发 电机等效电动势增量大于直流侧负载压降(折算到 交流侧),则电枢电流将进一步增大,使系统逐渐 远离原来的平衡点,即系统在该平衡状态下不能够 稳定运行。对于小扰动引起电枢电流减小时系统的 稳定性可类似上文分析。

# 5 系统低频振荡的抑制方法

#### 5.1 从参数角度的抑制方法

系统参数影响低频振荡的发生及强弱,从参数 的角度可采取以下措施抑制系统的静态不稳定: ①增大发电机励磁绕组与电枢绕组的漏感; ②增大 发电机交轴阻尼绕组的电感,减小其电阻; ③减小 负载电容; ④选择适当阻值的电阻负载; ⑤选择恒 流源作为发电机的励磁电源。图 7a 与图 7b 所示为 *C*=3.5mF、*R*=30Ω,发电机励磁电源分别为 74V 的 恒压源与 2A 的恒流源的直流侧电压仿真波形。可 见,恒流源给发电机磁场供电时,系统不会发生静 态不稳定现象。这是因为励磁电流为恒流时,若系 统出现扰动,则励磁绕组的磁链不再守恒,因而这 个扰动不会引起 Δ*I*<sub>1</sub>发散,因而系统能够维持稳定。 当然,也不能为了避免系统不稳定,而任意改变上 述参数,如绕组漏感的增加将加大电机的时间常数, 阻尼绕组电阻、电感的大小受电机结构及工况的限 制,而负载电容与电阻有时不能任意改变。



#### 5.2 从控制器角度的抑制方法

从控制的角度也可以减轻或避免系统的运行不 稳定。如图 8 所示,当系统以直流侧电压为整定对 象时,给定直流侧电压参考值,取直流侧电压为负 反馈量。为抑制系统静态不稳定,在控制器的输入 端可加入直流侧电压微分负反馈。图中 *G*<sub>1</sub>为励磁 功率放大器,发电机以一阶惯性节表示,将发电机 等效内电动势与直流侧电压表示成线性关系 <sup>[6]</sup>。图 7c 中所示为 *C*=3.5mF、*R*=30Ω, *U*<sub>dc-ref</sub>=479V 时, 系统采用直流侧电压负反馈加微分负反馈控制方式 时的直流侧电压波形。可见,上述控制方式有效抑 制了系统的运行不稳定,但控制器的引入增大了系 统的时间常数。



图 8 低频振荡的控制措施 Fig.8 The control method for LFO

# 6 结论

本文较为详细地研究了带阻容性负载的独立三 相发电机整流系统的静态稳定性问题。建立了包括 二阶发电机模型、二极管整流桥的动态平均值模型 及负载动态模型在内的系统状态空间模型及运用线 性化方法建立的小信号模型,运用系统特征值理论 判断了带阻容性负载的独立三相发电机整流系统的 静态稳定性。结合实验与仿真分析方法,总结了上 述系统运行稳定性的规律,并分析了其不稳定的物 理机理。论文还从参数与控制策略的角度提出了增 强系统运行稳定性的措施。

#### 参考文献

- IEEE Committee Report. IEEE standard definitions for excitation systems for synchronous machines[S]. IEEE Std 421.1<sup>TM</sup>—2007, July 2007.
- [2] Warner T H Kassakian J G. Transient characteristics of large turboalternator driven rectifier/inverter system based on field test data[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1985, 104(7): 1804-1811.
- [3] Sudhoff S D, Coorzine K A, Glover S F, et al. DC link stabilized field oriented control of electric propulsion systems[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 1998, 13(1): 27-33.
- [4] 郭云珺,王东,刘德志,等.变频驱动三相感应电机系统稳定性的数学推导与分析 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 47-55.

Guo Yunjun, Wang Dong, Liu Dezhi, et al. Mathematical deduction and stability analysis of three-phase inverter-fed induction motor drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 47-55.

- [5] 马伟明. 十二相同步发电机及其整流系统的研究 [D]. 北京:清华大学, 1995.
- [6] 张晓锋. 同步发电机整流系统的运行稳定性研究 [D]. 北京:清华大学, 1995.
- [7] 杨青. 交直流混合独立供电系统运行稳定性研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2003.
- [8] Wu Xusheng, Ma Weiming, Sun Junzhong, et al. Parameter measurement of multi-phase synchronous machines with AC and DC output[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, 2001: 587-591.
- [9] Ma Weiming, Hu An, Liu Dezhi, et al. Stability of a

synchronous generator with diode-bridge rectifier and back-EMF load[J]. IEEE Transactions Energy Convetsion, 2000, 15(4): 458-463.

- [10] 陈明亮. 电力电子变换器端口特性分析及应用研究[D]. 武汉:海军工程大学,2007.
- [11] Belkhayat M. Stability criteria for AC power systems with regulated loads[D]. Indiana: Purdue University, 1997.
- [12] Sudhoff S D, Glover S F, Lamm P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems[J]. IEEE Transactions Aerospace Electronics System, 2000, 36(3): 965-973.
- [13] Sudhoff S D, Corzine K A, Hegner H J, et al. Transient and dynamic average-value modeling of synchronous machine fed load-commutated converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 508-514.
- [14] Huiyu Z, Burgos R P, Lacaux F, et al. Evaluation of average models for nine-phase diode rectifiers with improved AC and DC dynamics[C]. Proceedings of the 21st IEEE Annual Conference on Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, TX, USA, 2006: 1324-1330.
- [15] Alt J T, Sudhoff S D, Ladd B E, Analysis and average-value modeling of an inductorless synchronous machine load commutated converter system[J]. IEEE Transactions Energy Conversion, 1999, 14(1): 37-43.
- [16] Simulink—Writing S-Functions, 6th ed. [Z]. The Math Works, Inc., Natick, MA, 2002: 2-9–2-12.
- [17] Sanders S R, Verghese G C. Synthesis of averaged circuit models for switched power converters[J].
  IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(8): 905-915.

作者简介:魏克银 男, 1978 年生,博士,主要研究方向为集成化 发电系统的性能分析。徐俊霞 女,1978 年生,硕士,主要研究 方向为电力拖动与工业自动化。