

# 考虑系统不确定性的高压直流发电机控制策略

王立坤, 祁在明, 杨善水, 王 莉

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211100)

**摘要:** 为满足多电飞机的供电性能需求, 针对供电系统中存在的线路电缆老化、部件参数时变、大功率负载突加突卸等不确定干扰, 提出了一种基于  $H_\infty$  混合灵敏度的鲁棒控制策略; 通过状态空间方程搭建发电机数学模型, 以最大化系统抗不确定性干扰能力为目标, 对发电系统模型参数不确定性和外部干扰不确定性进行分析, 合理的选择权函数, 设计了针对高压直流 (high voltage direct current, HVDC) 飞机发电系统的鲁棒控制器; 仿真实验表明, 发电系统鲁棒控制器对不确定性因素带来的振荡具有良好的抑制效果, 使系统具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 鲁棒控制; 三级式无刷直流发电机;  $H_\infty$  混合灵敏度方法; 加权函数

## Control Strategy of HVDC Generator Considering System Uncertainty

Wang Likun, Qi Zaiming, Yang Shanshui, Wang Li

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to meet the power supply performance requirements of multi-electric aircraft, a robust control strategy based on  $H_\infty$  mixed sensitivity is proposed in response to uncertain disturbances such as line and cable aging, time-varying component parameters, and sudden loading and unloading of high-power loads in the power supply system. The mathematical model of the generator is built through the state space equation, with the goal of maximizing the system's anti-uncertainty interference ability, the uncertainty of the power generation system model parameters and the uncertainty of external interference are analyzed, the weight function is reasonably selected, and the design is presented for high voltage robust controller for direct current aircraft power generation system. The simulation experiment shows that the robust controller of the power generation system has a good suppression effect on the oscillation caused by the uncertain factors, and the system has strong robustness.

**Keywords:** robust control; three-stage brushless DC generator;  $H_\infty$  infinite mixed sensitivity method; weighting function

## 0 引言

安全可靠的供电对多电飞机执行飞行任务至关重要, 发电系统控制技术在多电飞机供电系统中处于核心地位, 具有快速响应、提高系统抗干扰能力、减小电压超调等优点, 是保证系统电能质量的关键。但供电系统性能容易受到发电机工作状况、外部飞行环境变化、部件老化以及无法预测的负载加卸的影响, 且高压直流发电机的工作过程极其复杂, 只能分析和建立近似反映实际情况的数学模型, 设计控制策略所用的发电机数学模型与实际系统存在一定差异。为了满足供电系统性能需求, 需要设计一个存在供电系统参数时变、发电机未建模动态特性干扰时仍能满足镇定加卸负载情况的发电系统控制器。

针对高压直流发电机这类非线性多变量的控制对象,  $H_\infty$  控制理论正好适用于这个方向, 相关的学者对该理论已经有较多研究和分析来应用于解决不确定性扰动的问题<sup>[1-2]</sup>。文献 [1] 通过对并网逆变器并联系统的控制策略进行研究, 使并网系统能够克服逆变器参数扰动带来的不

良影响, 保证系统的稳定性和性能。文献 [2] 以滚转俯仰式红外导引头稳定跟踪平台为研究对象设计了基于  $H_\infty$  控制理论的干扰抑制算法, 提高了跟踪平台对系统扰动的抑制能力。针对高压直流发电机存在的内部参数扰动及外部负载扰动因素引起的汇流条电压畸变, 近些年有学者尝试将  $H_\infty$  控制理论应用在发电机调压领域<sup>[3-5]</sup>。文献 [3] 设计了一种用于航空发动机分布式系统的自适应滑模控制器, 降低了外部干扰对系统动态性能的影响。文献 [4] 应用直接反馈线性化建立风力发电机的鲁棒控制模型, 设计了  $\mu$  综合鲁棒控制器。但两者更加注重外部干扰带来的影响, 对系统内部参数因素关注较小。

为了提高高压直流供电系统的性能, 本文在简化假设的前提下建立了发电机的非线性数学模型, 分析了发电机运行过程中所受到的内部参数不确定性干扰和外部负载扰动, 在此基础上设计了系统不确定性扰动的加权函数, 并基于  $H_\infty$  控制理论设计出混合灵敏度的控制器, 最后在 Matlab/simulink 平台搭建单通道 HVDC 模型验证了控制策

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-11-16。

作者简介: 王立坤(1995-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事航空配电系统方向的研究。

杨善水(1969-), 男, 安徽望江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事航空航天供电系统方向的研究。

王 莉(1969-), 女, 河南南阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事固态配电技术和故障检测与定位技术方向的研究。

引用格式: 王立坤, 祁在明, 杨善水, 等. 考虑系统不确定性的高压直流发电机控制策略[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 131-135, 163.

略的有效性。

### 1 主发电机数学模型

本文以三级式无刷高压直流发电机作为研究对象进行分析。发电过程为发电机控制器通过控制交流励磁机的直流励磁电流幅值，改变其转子侧电枢绕组的输出电压并经过旋转整流器为主发电机提供励磁，调整励磁来控制主发电机的输出电压并为后级高压负载供电。为简化数学模型此处假设电机恒速旋转、忽略阻尼绕组作用和电枢绕组作用<sup>[6]</sup>，写出三级式发电机的磁链方程为：

$$\begin{cases} U_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} \psi_f \\ U_d = -\frac{d}{dt} \psi_d - r i_d \\ U_q = \frac{d}{dt} \psi_q - r i_q \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_f = \psi_{md} + L_{1f} i_f \\ \psi_d = \psi_{md} - L_1 i_d \\ \psi_q = -L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$\psi_{md} = L_{ad} (i_f - i_d) \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_d = R_L i_d - X_L i_q \\ U_q = R_L i_q + X_L i_d \end{cases} \quad (4)$$

其中：式 (1)、(2) 为互磁链方程，(3)、(4) 为负载方程。其中  $U_f$  是励磁绕组电压， $U_d$  是电枢绕组纵轴电压分量， $U_q$  是电枢绕组横轴电压分量， $i_d$  是电枢纵轴电流分量， $i_q$  是电枢横轴电流分量， $i_f$  是励磁绕组电流， $\omega$  是角频率， $\psi_d$  是电枢纵轴磁链， $\psi_f$  是励磁绕组磁链， $\psi_q$  是横轴电枢磁链， $\psi_{md}$  是纵轴互磁链， $L_{ad}$  是纵轴电枢反应电感， $L_{af}$  是横轴电枢反应电感， $L_q$  横轴电枢电感， $L_1$  是电枢绕组漏电感， $L_{1f}$  励磁绕组漏电感， $r$  是电枢相电阻， $R_f$  励磁绕组电阻， $R_L$  负载相电阻， $X_f$  负载相电抗。

控制器的设计目标是发电机最差突发情况下尽可能使发电系统输出电能符合电气负载要求。要运用  $H^\infty$  控制理论对高压直流发电系统的鲁棒性进行研究，必须将建立的系统电气模型转换为数学模型，并进一步将发电系统数学模型转换为  $H^\infty$  控制理论研究的状态空间方程的形式，通过整理电压方程、磁链方程和互磁链方程可得三级式同步发电机的状态空间方程：

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-r(L_1 + 2L_{ad})}{(L_1 + L_{ad})^2 + L_1 L_{ad}} & \frac{-r(L_1 + 2L_{ad})}{(L_1 + L_{ad})^2 + L_1 L_{ad}} \\ r & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_1 + 2L_{ad}}{(L_1 + L_{ad})^2 + L_1 L_{ad}} & \frac{L_{ad}}{(L_1 + L_{ad})^2 + L_1 L_{ad}} \\ \frac{1}{L_q} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 1.1 发电系统基本控制结构

多电飞机的发电系统由 270 V 三级式高压直流发电机、高压负载、DC/DC 变换器和逆变器二次能源负载组成，其中发电机由励磁机、主发电机和旋转整流器组成，通过调节励磁机改变主发电机输出电压。

针对单通道高压直流发电系统所设计的控制系统图如图 1 所示。图中， $Z_{line}$  代表线路阻抗， $Z_1$  和  $Z_2$  分别是发电系统所带的高压直流负载和二次能源负载，三者作为发电机的外部不确定性因素； $U_{270}$  为负载前端的电压值， $U_{ref}$  为参考电压幅值，经鲁棒控制器生成 PWM 波对励磁机进行调节。从控制结构图可知，整个发电系统仅需要一个单环电压环，比传统双环 PI 控制以及双环 PR 控制结构更简单且容易实现。

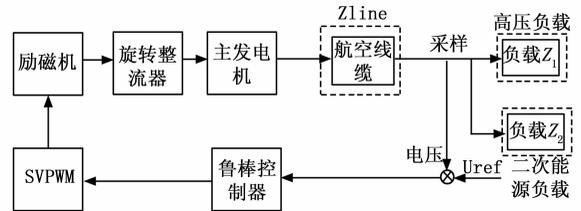


图 1 发电系统控制结构

本文选取的鲁棒控制器是基于  $H^\infty$  混合灵敏度优化设计鲁棒控制器，也就是混合灵敏度控制中的两块问题—S/T 问题，但由于发电机系统传递函数分母通常比分子高阶，用混合灵敏度两块问题进行设计时不能满足秩的要求，因此在设计时将设计问题归纳为混合灵敏度三块问题选取加权函数<sup>[7]</sup>。

### 2 $H^\infty$ 混合灵敏度控制问题

混合灵敏度参数是影响鲁棒控制性能的关键，混合灵敏度针对系统中存在的不确定性因素、需要达到的鲁棒性能和对误差的跟踪能力转换为设计加权函数的标准问题，具有良好的抗不确定性因素干扰能力。

本文以高压直流发电机系统作为被控对象，采用  $H^\infty$  混合灵敏度三块问题的控制方案，控制结构如图 2 所示，其中  $r$  为控制器参考输入 270 V， $e$  为跟踪误差， $u$  为鲁棒控制器对励磁环节的控制量， $\Delta(s)$  表示模型内不确定性参数， $d$  为电压测量干扰， $y$  为高压直流汇流条输出电压， $z$  为评价输出。其中  $K(s)$  为鲁棒控制器。 $G(s)$  为发电系统的数学模型， $W_1(s) \sim W_3(s)$  为加权函数。定义灵敏度函数  $S$ 、 $R$ ，补灵敏度函数  $T$  分别为  $r$  到  $e$ 、 $r$  到  $u$ 、 $r$  到  $y$  的传递函数， $E$  为单位矩阵。

$$S = (E + G(s)K(s))^{-1} \quad (6)$$

$$R = K(E + G(s)K(s))^{-1} \quad (7)$$

$$T = G(s)K(s)(E + G(s)K(s))^{-1} \quad (8)$$

混合灵敏度设计就是以使闭环系统稳定并且  $d$  对  $y$  的影响最小为目标，设计鲁棒控制器，使系统的参考输入  $r$  到评价输出  $z$  的传递函数的  $\infty$  范数最小。闭环控制系统的  $H^\infty$  最

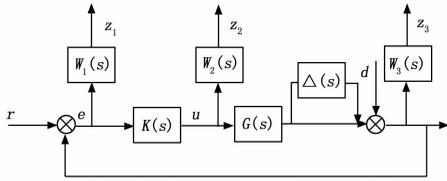


图 2 H $\infty$ 混合灵敏度三块问题

最优控制就是求出鲁棒控制器  $K(s)$  使下式 3 个传递函数的  $\infty$  范数最小, 式中  $\mu$  指一个很小的正数。

$$\begin{bmatrix} W_1(s)S \\ W_2(s)R \\ W_3(s)T \end{bmatrix}_{\infty} \leq \mu \quad (9)$$

通过缩小  $\mu$  的值可以实现控制结果向最优解的逼近, 混合灵敏度  $H\infty$  控制的设计过程主要是面对加权函数的设计。

### 3 设计鲁棒控制器

为满足系统对抑制不确定性扰动的性能要求, 增加本文在混合灵敏度 3 个加权函数的基础上额外选择模型摄动的加权函数。定义模型摄动加权函数为  $W_0(s)$ , 灵敏度加权函数为  $W_1(s)$ , 输出信号加权函数为  $W_2(s)$ , 干扰灵敏度加权函数为  $W_3(s)$ 。

#### 3.1 模型摄动加权函数 $W_0$

发电机系统内部电磁干扰、摩擦、负载变化等不确定性因素会给系统控制带来干扰, 考虑高压直流发电机数学模型的参数误差和未建模的高频动态特性, 为保证鲁棒控制器能够满足系统对抗干扰能力的性能要求, 通过摄动加权函数建立弹性发电机模型进行鲁棒控制器的设计, 选取发电机参数变化范围为加权函数。

$W_0(s)$  选取的原则是在波特图上覆盖住内部摄动的传递函数, 本文采用近似法, 以低阶传递函数近似逼近高阶系统, 得到发电机正常工作于额定转速, 带不同负载情况下发电机的传递函数, 再结合三级式发电机的状态空间方程建立数学模型的传递函数, 将不同工作点下的发电机传递函数与数学模型的传递函数相减, 对比得到数学模型与实际电机模型间的不确定性摄动如图 4。

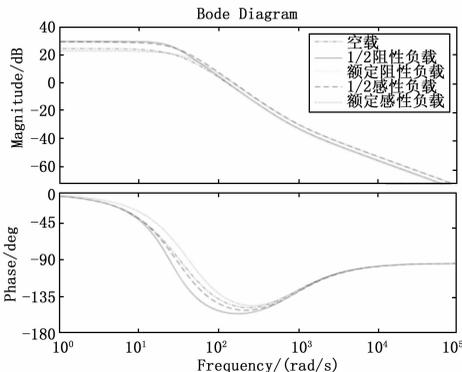


图 3 不同负载下发电机传递函数波特图

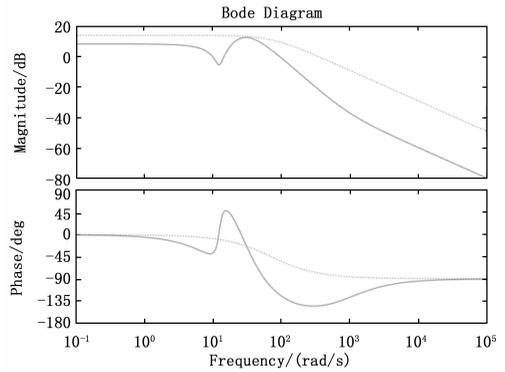


图 4 加权函数覆盖摄动图

使用 Matlab 绘出覆盖摄动的加权函数, 选取模型摄动加权函数  $W_0(s)$  为:

$$W_0(s) = \frac{1}{0.0028s + 0.2} \quad (10)$$

#### 3.2 灵敏度加权函数 $W_1$

灵敏度函数  $S$  是系统参考输入到跟踪误差的传递函数同时也是干扰输入到系统输出的传递函数, 它能够反映出系统输出对所受干扰的抑制能力, 干扰通常出现在低频段, 因此灵敏度加权函数  $W_1$  通常选取具有低通特性的函数。

本文研究的发电机输出电压是 270 V 直流信号, 负载突加突卸引起的电压突变扰动均可视为阶跃函数, 根据内模原理可知, 要对阶跃响应有良好的跟踪效果, 要求控制器内包含积分控制规律。

$$W = \frac{\rho}{s} \quad (11)$$

式中,  $\rho$  的大小由系统本身来决定, 但直接选取积分控制形式会导致系统在虚轴上有极点, 因此结合加权函数选取原则, 实际求解控制器时选择  $W_1(s)$  为:

$$W_1(s) = \frac{1}{0.096s + 0.001} \quad (12)$$

#### 3.3 补灵敏度加权函数 $W_3$

$W_3(s)$  是体现系统的鲁棒性能的加权函数, 在鲁棒设计中用于反映系统的未建模动态和参数变化, 体现系统中的乘性不确定性。本文选取的方法是将已建模的系统看做  $G_0$ , 增加外部负载和其他不确定性扰动后的系统看做  $G_1$ , 选择  $W_3(s)$  将所受扰动全部覆盖, 保证系统有充足的稳定裕度。

为表示负载的不确定范围, 本文设计发电系统的额定输出功率为 60 kW, 对应纯阻性负载范围为  $[0.823 \Omega, \infty)$ , 考虑实际情况下供电线路阻抗不确定性影响, 航空线缆长度选择为 100 m, 最终选取  $W_3(s)$  为:

$$W_3(s) = \frac{s + 1}{0.01s + 100} \quad (13)$$

#### 3.4 输出信号加权函数 $W_2$

$W_2(s)$  是鲁棒控制器  $K(s)$  的输出信号的加权函数, 用于表示输入信号  $r$  到控制量输出  $u$  的性能要求。主要功能是避免执行器输出量出现饱和现象而超出系统本身的硬件

限制。通常  $W_2(s)$  的静态增益选择尽量大一些来保证输出  $u$  在合理的范围内。根据三级式无刷同步发电机的励磁，本文选取  $W_2(s)$  为：

$$W_2(s) = 0.0182 \quad (14)$$

### 3.5 鲁棒控制器的求取

采用 Matlab 鲁棒控制工具箱中的 hinfopt 函数和 hankelmr 降阶函数求解鲁棒控制器，运行后求解得到鲁棒控制器为 4 阶函数  $K(s)$ ：

$$K(s) = \frac{32610(s + 1e^4)(s^2 + 64.8s + 1.11e^4)}{(s + 1.808e^4)(s + 1.611e^4)(s646.2)(s + 0.1042)} \quad (15)$$

得到鲁棒控制器后，为方便对发电机系统进行分析，画出带控制器的发电机系统开环波特图如图 5。

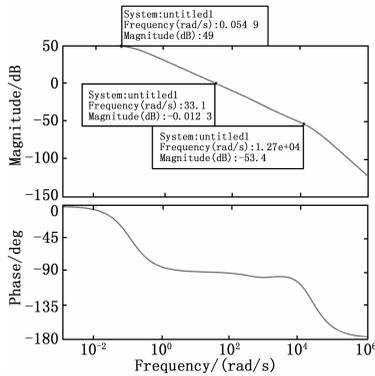


图 5 发电机系统开环波特图

通过分析发电机系统开环波特图可知，开环系统在整体频率小于 0.1 rad/s 的低频段有较高增益，增益幅值为 50 dB，低频段平缓的幅频曲线斜率可以保证系统有良好的追踪信号能力和抑制低频扰动能力。对于从 0.1 rad/s 至  $10^4$  rad/s 区间，包括穿越频率在内的中频段始终保持 -20 dB/dec 的斜率，占有足够的频带宽度，保证系统有良好的稳定性。高频段斜率更低，可以使系统对高频段噪声有良好的抑制能力。分析结构可知，鲁棒控制器在抑制系统所受不确定性干扰时有良好的性能。

## 4 仿真验证

高压直流供电系统的性能指标主要包括：270 V 汇流条在不确定性干扰下的电压超调量、恢复时间和稳态性能。

为了验证鲁棒控制器的性能，本文对系统进行了 Matlab/Simulink 仿真，仿真平台搭建了包含发电系统、高压直流负载和二次电源负载的单通道飞机供电系统模型如图 6 所示。

仿真模型分为 4 个部分，其中 A 为三级式发电机为主的发电系统，B 为 270 V 转 28 V 的 DC/DC 变换器，C 为 270 V 转 115 V/400 Hz 的三相逆变器，D 为调压控制器。仿真主要关注调压控制器对系统性能的影响，因此将发电机转速设定为恒定转速，直流变换器和三相逆变器分别为 LLC 变换器和全桥逆变器，发电系统内其他参数设计如表 1。

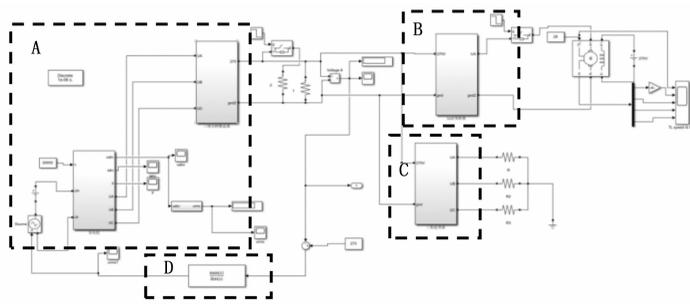


图 6 单通道仿真模型

表 1 三级式无刷同步发电机参数

主发电机主要电磁参数			
Ld	403 μH	LQ	6.29 μH
Lq	201 μH	Rs	0.01 Ω
Lo	37.5 μH	Rf	0.42 Ω
Lf	54 μH	RD	0.006 Ω
LD	57.6 μH	RQ	0.004 Ω
交流励磁机主要电磁参数			
Ls	45 mH	L1	4 μH
Lr	101.4 μH	Rs	0.02 Ω
Lm	735 μH	Rr	0.07 Ω

### 4.1 参数扰动不确定性因素仿真

根据多电机供电系统环境，初始仿真条件 1 选择线路阻抗  $R_{line}$  为 0.02 Ω， $L_{line}$  为 16 μH，负载阻性负载  $R = 10$  kΩ 启动发电系统，在  $t = 0.6$  s 时突加负载为 10 kW 的电动机负载和 50 kW 的纯阻性负载，PI 控制和鲁棒控制下系统输出的电压波形分别见图 7 (a)、(b) 实线。为体现内部不确定性扰动对系统性能的影响，分别设定了仿真条件 2、3、4 为 1.5、2、3 倍阻抗，4 种仿真条件下电压波形如图 7 所示。

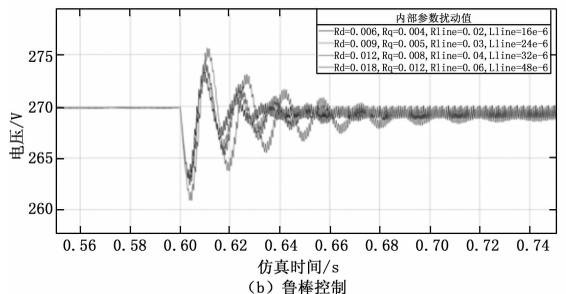
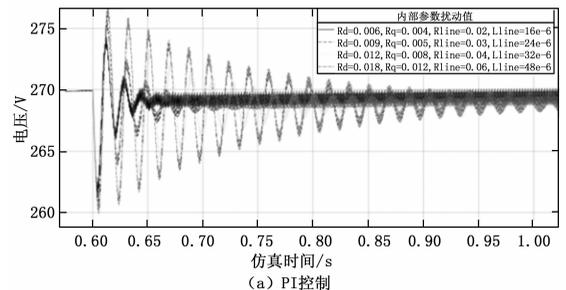


图 7 突加 60 kW 负载仿真

对仿真结果总结出如表 2。

表 2 突加负载仿真结果对比

系统内部参数	PI 控制		鲁棒控制	
	超调量	稳定时间/ms	超调量	稳定时间/ms
条件 1	1.59%	40	1.22%	30
条件 2	2.14%	80	1.48%	38
条件 3	2.29%	200	1.67%	44
条件 4	2.41%	420	2.03%	90

由仿真结果对比可知, 突加负载情况下, 仅针对初始仿真条件 1, 调节控制器参数可以保证传统 PI 控制和鲁棒控制满足系统性能要求, 超调量均小于 2%, 稳定时间低于 100 ms, 两者控制器的性能相近, 稳态均能稳定在 270 V 电压。但修改发电机内部阻抗参数, 使系统内部参数扰动逐渐增大, 鲁棒控制器的超调量和稳定时间变化较小, 而传统 PI 控制的稳定时间显著增加且系统出现一定程度的震荡, 对比可知鲁棒控制器相比传统 PI 控制有更好的鲁棒性能和稳定性。

分析突卸负载情况鲁棒控制器的性能, 选择初始仿真条件 1 不变, 满载运行, 在  $t=0.6$  s 时卸载 10 kW 电动机负载和 50 kW 的阻性负载, 4 种仿真条件下电压波形如图 8 所示。

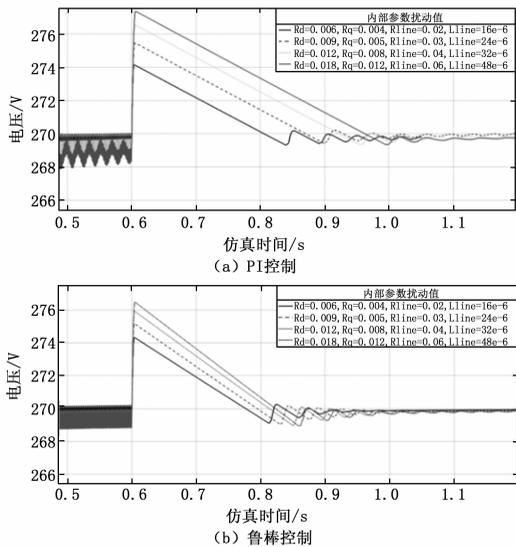


图 8 突卸负载仿真

对仿真结果总结出如表 3。

表 3 突加负载仿真结果对比

系统内部参数	PI 控制		鲁棒控制	
	超调量	稳定时间/ms	超调量	稳定时间/ms
条件 1	1.52%	240	1.59%	220
条件 2	2.01%	300	1.93%	240
条件 3	2.41%	370	2.9%	260
条件 4	2.71%	410	2.40%	280

突加负载情况下, 仿真条件 1 时传统 PI 控制器与鲁棒

控制器均能满足超调量的要求, 条件 1 与条件 4 对比鲁棒控制器超调量增加 0.81%, PI 控制增加 1.19%, 稳定时间分别增加 60 ms 和 170 ms, 对比可知系统参数扰动变化对鲁棒控制器影响更小。

通过突加负载与突卸负载情况比较, 在控制对象属性模型明确时针对确定模型设计的鲁棒控制器与传统 PI 控制器均能满足性能要求, 但修改系统内部参数后, 鲁棒控制器在面对系统参数扰动带来的不确定性干扰有更好的性能。

### 4.2 外部不确定性因素仿真

除内部参数变化, 特殊情况下负荷超载、线路短路均考验控制器的动态性能。为体现外部不确定性因素对系统的影响, 将负载改为 0.6 s 突加 72 kVA 负载, 并在 1.35 s 时卸载负载, 其他参数设置与条件 1 相同, 仿真情况如图 9 所示。

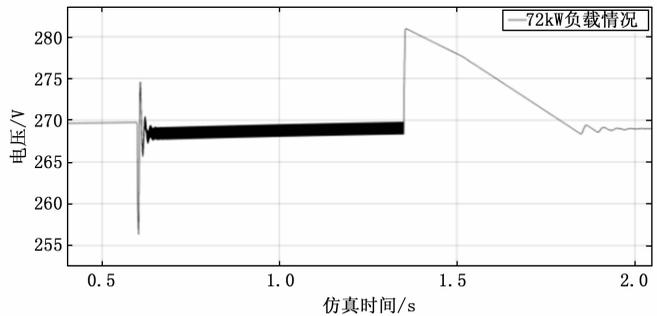


图 9 过载情况仿真

受到负荷超载 1.2 倍扰动后, 线路阻抗分压增加, 突加负载时超调量为 1.85%, 稳定时间为 60 ms, 突卸负载超调量为 4.45%。稳定是奇偶偶 540 ms。传统 PI 在不修改控制器参数情况下无法镇定超载情况, 而鲁棒控制器在超调量和稳定时间大幅度增加的情况下仍能保证系统处于稳定。通过上述三次仿真对比可知, 面对外部环境引发的发电机内部参数扰动, 引用鲁棒控制器可以有效解决这种问题; 当负载发生变化时, 可以从仿真结果发现鲁棒控制器的调节更加迅速精确。采用鲁棒控制器的供电系统, 有良好的动态响应性能和抗内部外部干扰能力, 稳态性能也较好,  $H_{\infty}$ 鲁棒控制器能够有效改善高压汇流条电压质量。

### 5 结束语

文章对多电机供电系统中发电机的运行控制问题进行了研究, 经理论分析与仿真实验, 得出以下结果:

- 1) 建立了发电机的非线性数学模型。在此基础上, 利用  $H_{\infty}$ 控制理论选取混合灵敏度的加权函数并设计了满足稳定性要求的电压控制器。
- 2) 所设计鲁棒控制器有较强的抗干扰能力, 仅一个电压环就能够同时解决鲁棒稳定性和系统性能指标的问题。
- 3) 将控制器应用于多电机单通道供电系统中, 在系统内部参数和外部负载存在不确定性时, 通过仿真对比试验证明了其具有较强的鲁棒性。

(下转第 163 页)