

# 中间再热式汽轮发电机组的多指标非线性鲁棒综合控制

陈明媛<sup>1</sup>, 李啸骢<sup>1</sup>, 从兰美<sup>1,2</sup>, 徐俊华<sup>1</sup>, 任子熠<sup>1</sup>

(1. 广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 临沂大学 汽车学院, 山东 临沂 276005)

**摘要:** 针对具有不确定干扰的中间再热式汽轮发电机组的励磁与高、中压缸汽阀综合控制系统, 运用多指标非线性鲁棒控制设计方法(MINRCA)建立其鲁棒综合控制模型。通过选取适当的非线性变换输出函数, 配置系统的零、极点, 保证中间再热式汽轮发电机的多个性能指标的实现。该输出函数还能把系统的干扰与零动态系统解耦, 然后运用  $L_2$  增益干扰抑制方法, 将干扰对系统输出的不利影响抑制在给定水平。从而使系统具有良好的动静态性能的同时, 还具有较好的干扰抑制鲁棒性能。在三机电力系统中, 对基于 MINRCA 所得出的鲁棒综合控制律进行仿真分析与讨论, 验证其有效性及优越性。

**关键词:** 中间再热式汽轮发电机; 鲁棒控制; 多指标非线性;  $L_2$  增益干扰抑制; 非线性控制

**中图分类号:** TM 311

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.021

## 0 引言

由于大功率中间再热式汽轮发电机组在电力系统中已得到普遍应用, 因此研究其控制对于提高电力系统的稳定性起着重要的作用, 备受广大学者们的关注<sup>[1-3]</sup>。

文献[4]引入多指标非线性控制设计方法研究中间再热式汽轮发电机组的高、中压缸汽阀和励磁系统的综合控制问题。该方法既能够使系统获得良好的动态性能, 也能够使其获得满意的静态性能。文献[5]应用目标全息反馈法处理中间再热式汽轮发电机组的非线性综合控制。该方法可以将非线性控制系统的多个控制目标均约束在性能指标中, 从而实现系统的多目标控制。然而, 文献[4-5]建立的中间再热式汽轮发电机组模型均没有考虑系统参数的不确定性以及干扰的影响。为了提高非线性控制设计方法的有效性, 使设计所得的控制律在实际应用中能够达到满意的控制效果, 在系统建模和控制器的设计过程中考虑不确定性对系统的影响是必不可少的。

文献[6]讨论了中间再热式发电机的高压缸汽阀和励磁系统的鲁棒综合控制问题, 但没有考虑中压缸汽阀和中间再热器的动态过程。文献[7]讨论了高压缸汽阀的鲁棒调速控制问题, 但未涉及励磁和

中压缸汽阀。文献[8]研究了高、中压缸汽阀的鲁棒控制问题, 但没有考虑励磁控制。由此可见, 大部分文献在对中间再热式发电机组进行鲁棒控制设计时, 都对其数学模型进行了简化处理。

本文在不简化模型的情况下, 探讨多机环境下的中间再热式汽轮发电机组的非线性鲁棒综合设计问题。笔者在文献[9]中提出了一种多指标非线性鲁棒控制设计方法(MINRCA)。由于 MINRCA 并不需要将原被控系统模型完全精确线性化, 因此无需对被控对象的数学模型进行简化处理。应用 MINRCA 所获得的控制器不仅能使系统状态变量满足给定的性能指标, 而且能有效提高系统对于不确定干扰因素的鲁棒性。

## 1 中间再热式发电机组励磁与调速系统的鲁棒综合控制数学模型

考虑一个具有  $n$  台中间再热式汽轮发电机的多机电力系统, 以第  $i$  台发电机为例, 其控制系统的结构如图 1 所示。

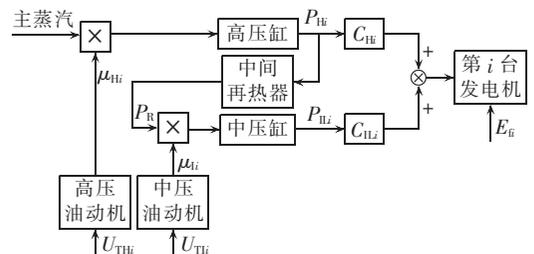


图 1 控制系统结构图

Fig.1 Structure of control system

根据图 1 可看出, 第  $i$  台中间再热式汽轮发电机励磁与高、中压缸汽阀的鲁棒综合控制数学模型可以表示如下:

收稿日期: 2016-08-02; 修回日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267001); 广西科学研究与技术开发项目(14122006-29); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338); 广西优秀博士学位论文培养项目(YCBZ2013006)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267001), Guangxi Scientific Research and Technical Development Project(14122006-29), Guangxi Natural Science Foundation(2014GXNSFAA118338) and the Cultivation Project of Excellent Doctorial Dissertations in Guangxi(YCBZ2013006)

$$\begin{cases}
 \dot{\delta}_i = \omega_0(\omega_i - 1) \\
 \dot{\omega}_i = [C_{Hi}P_{Hi} + C_{Li}P_{Li} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1)]/T_{ji} \\
 \dot{E}'_{qi} = [-E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di})I_{di} + E_{\bar{u}} + w_{li}]/T'_{d0i} \\
 \dot{P}_{Hi} = (\mu_{Hi} - P_{Hi})/T_{VHi} \\
 \dot{\mu}_{Hi} = (U_{THi} - \mu_{Hi} + w_{2i})/T_{sHi} \\
 \dot{P}_{Ri} = (P_{Hi} - P_{Ri})/T_{VRi} \\
 \dot{P}_{Li} = (-P_{Li} + \mu_{Li}P_{Ri})/T_{VLi} \\
 \dot{\mu}_{Li} = (U_{Tli} - \mu_{Li} + w_{3i})/T_{sli} \\
 I_{di} = \sum_{j=1}^n E'_{qj}(G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\
 I_{qi} = \sum_{j=1}^n E'_{qj}(G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\
 I_i = \sqrt{I_{di}^2 + I_{qi}^2}, P_{ei} = E'_{qi}I_{qi}, Q_{ei} = E'_{qi}I_{di} - x'_{di}I_i^2 \\
 U_{ldi} = x'_{di}I_{qi}, U_{lqi} = E'_{qi} - x'_{di}I_{di}, U_{li} = \sqrt{U_{ldi}^2 + U_{lqi}^2}
 \end{cases} \quad (1)$$

其中,下标  $i=1,2,\dots,n$  为第  $i$  台发电机对应的状态量; $w_{li}$  为作用在励磁回路中的电磁扰动; $w_{2i}$  为作用在高压缸调节阀的外部干扰; $w_{3i}$  为作用在中压缸调节阀的外部干扰。其他状态量的物理意义可参考文献[10-11]。 $w_{li}$ 、 $w_{2i}$  和  $w_{3i}$  均属于扩展  $L_2$  空间。属于扩展  $L_2$  空间的信号在时间区间  $[0, T]$  上的定积分  $\int_0^T \|\mathbf{w}(t)\|^2 dt$  是有界的,其中  $\|\mathbf{w}(t)\| = \left(\sum_{i=1}^p w_i^2\right)^{1/2}$ ,  $p$  为信号  $\mathbf{w}(t)$  的维数<sup>[12]</sup>。

## 2 多指标非线性鲁棒综合控制规律的设计

对于如式(1)所示的系统,进行鲁棒综合控制的目标是:当扰动  $[w_{li}, w_{2i}, w_{3i}]^T = 0$  时,系统是稳定的;当扰动  $[w_{li}, w_{2i}, w_{3i}]^T \neq 0$  时,扰动对系统输出的影响被抑制在给定水平。运用文献[9]提出的 MINRCA,可设计出令系统满足上述控制目标的控制规律。

### 2.1 输出函数的选取

系统输出函数的选取,其参考依据如下<sup>[13]</sup>。

**a.** 与励磁控制规律相关的输出函数  $y_{1i}$ :励磁控制的目标之一是将发电机端电压保持在给定值,所以端电压偏差信号  $\Delta U_{ei} = U_{ei} - U_{0i}$ ,必须引入输出函数中进行约束,其中  $U_{0i}$  为电压给定值;同时,发电机运行的稳定性也是一个重要的性能指标,因此转子角速度偏差  $\Delta \omega_i = \omega_i - 1$  也需引入输出函数中进行约束。

**b.** 与高压缸汽阀开度控制规律相关的输出函数  $y_{2i}$ :为实现对发电机转速的精确控制,发电机的转速偏差  $\Delta \omega_i$  应引入输出函数中。汽门开度控制在并联运行的发电机中有实现有功功率合理调节和分配的作用,因此发电机的有功功率偏差值  $\Delta P_{ei}$  也应纳入输出函数中。为了使油动机环节有较好的调节性能,油动机的汽阀开度  $\Delta \mu_{Hi} = \mu_{Hi} - \mu_{H0i}$  也需引入输出

函数中,其中  $\mu_{H0i}$  为高压缸汽阀开度的给定值。

**c.** 与中压缸汽阀开度控制规律相关的输出函数  $y_{3i}$ :控制中压缸汽阀开度的目的与高压缸相似,因此选入输出函数  $y_{3i}$  的系统变量与选入输出函数  $y_{2i}$  的相似。但是,由于调节高压缸会引起中间再热器的输出功率发生变化,因此中压缸汽阀开度的控制还应能进一步反映中间再热器的输出功率的变化,故  $\Delta P_{Ri} = P_{Ri} - P_{R0i}$  信号也要引入输出函数中,其中  $P_{R0i}$  为中间再热器输出功率的给定值。

### 2.2 系统的动态扩展

为消除系统的有功运行点发生改变后,电磁功率  $P_{ei}$  出现的稳态偏差,本文借鉴文献[4]的动态扩展方法,定义一个新的系统状态变量  $P_{eil} = \int_0^T P_{ei} dt$ ,则式(1)所示系统可扩展为如下仿射非线性系统:

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}} = & \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_{1i}(\mathbf{x})E_{\bar{u}} + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_{2i}(\mathbf{x})U_{THi} + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_{3i}(\mathbf{x})U_{THi} + \\
 & \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_{4i}(\mathbf{x})w_{li} + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_{5i}(\mathbf{x})w_{2i} + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_{6i}(\mathbf{x})w_{3i}
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n]^T \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_i = [\delta_i, \omega_i, E'_{qi}, P_{Hi}, \mu_{Hi}, P_{Li}, P_{Ri}, \mu_{Li}, P_{ei}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_i(x_i), \dots, f_n(x_n)]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i) = \begin{bmatrix} \omega_0(\omega_i - 1) \\ [C_{Hi}P_{Hi} + C_{Li}P_{Li} - P_{ei} - D_i(\omega_i - 1)]/T_{ji} \\ [-E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di})I_{di}]/T'_{d0i} \\ (\mu_{Hi} - P_{Hi})/T_{VHi} \\ -\mu_{Hi}/T_{sHi} \\ (P_{Hi} - P_{Ri})/T_{VRi} \\ (-P_{Li} + \mu_{Li}P_{Ri})/T_{VLi} \\ -\mu_{Li}/T_{sli} \\ P_{ei} - P_{e0i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases}
 \mathbf{g}_{1i}(\mathbf{x}) = [0, \dots, 0, \underbrace{1/T'_{d0i}}_{\text{第}(9i-6)\text{列}}, 0, \dots, 0]^T \\
 \mathbf{g}_{2i}(\mathbf{x}) = [0, \dots, 0, \underbrace{1/T_{sHi}}_{\text{第}(9i-4)\text{列}}, 0, \dots, 0]^T \\
 \mathbf{g}_{3i}(\mathbf{x}) = [0, \dots, 0, \underbrace{1/T_{sli}}_{\text{第}(9i-1)\text{列}}, 0, \dots, 0]^T
 \end{cases} \quad (10)$$

根据 2.1 节中所提的输出函数选取依据并结合动态扩展,则式(5)所示系统的输出函数为:

$$\begin{cases}
 y_{1i} = h_{1i}(x) = c_{1i}\Delta U_{ei} + c_{2i}\Delta \omega_i \\
 y_{2i} = h_{2i}(x) = c_{3i}\Delta P_{ei} + c_{4i}\Delta \omega_i + c_{5i}\Delta \mu_{Hi} + c_{6i}\Delta P_{eil} \\
 y_{3i} = h_{3i}(x) = c_{7i}\Delta P_{ei} + c_{8i}\Delta \omega_i + c_{9i}\Delta P_{Ri} + \\
 \quad c_{10i}\Delta \mu_{Hi} + c_{11i}\Delta P_{eil}
 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\Delta \mu_{Hi} = \mu_{Hi} - \mu_{H0i}$ ,  $\mu_{H0i}$  为中压缸汽阀开度的给定值;  $\Delta P_{eil} = P_{eil} - P_{e0il}$ 。

### 2.3 控制规律的设计

令扰动  $[w_{li}, w_{2i}, w_{3i}]^T = 0$ , 输出函数对系统的相对阶可由式(12)确定<sup>[14]</sup>。

$$\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{x}) = [\mathbf{b}_1(\mathbf{x}) \quad \mathbf{b}_2(\mathbf{x}) \quad \mathbf{b}_3(\mathbf{x})] \quad (12)$$

$$\mathbf{b}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g11}L_f^0h_{11} & L_{g12}L_f^0h_{11} & \cdots & L_{g1n}L_f^0h_{11} \\ L_{g11}L_f^0h_{12} & L_{g12}L_f^0h_{12} & \cdots & L_{g1n}L_f^0h_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g11}L_f^0h_{1n} & L_{g12}L_f^0h_{1n} & \cdots & L_{g1n}L_f^0h_{1n} \\ L_{g11}L_f^0h_{21} & L_{g12}L_f^0h_{21} & \cdots & L_{g1n}L_f^0h_{21} \\ L_{g11}L_f^0h_{22} & L_{g12}L_f^0h_{22} & \cdots & L_{g1n}L_f^0h_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g11}L_f^0h_{2n} & L_{g12}L_f^0h_{2n} & \cdots & L_{g1n}L_f^0h_{2n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{b}_2(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g21}L_f^0h_{11} & L_{g22}L_f^0h_{11} & \cdots & L_{g2n}L_f^0h_{11} \\ L_{g21}L_f^0h_{12} & L_{g22}L_f^0h_{12} & \cdots & L_{g2n}L_f^0h_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g21}L_f^0h_{1n} & L_{g22}L_f^0h_{1n} & \cdots & L_{g2n}L_f^0h_{1n} \\ L_{g21}L_f^0h_{21} & L_{g22}L_f^0h_{21} & \cdots & L_{g2n}L_f^0h_{21} \\ L_{g21}L_f^0h_{22} & L_{g22}L_f^0h_{22} & \cdots & L_{g2n}L_f^0h_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g21}L_f^0h_{2n} & L_{g22}L_f^0h_{2n} & \cdots & L_{g2n}L_f^0h_{2n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{b}_3(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} L_{g31}L_f^0h_{11} & L_{g32}L_f^0h_{11} & \cdots & L_{g3n}L_f^0h_{11} \\ L_{g31}L_f^0h_{12} & L_{g32}L_f^0h_{12} & \cdots & L_{g3n}L_f^0h_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g31}L_f^0h_{1n} & L_{g32}L_f^0h_{1n} & \cdots & L_{g3n}L_f^0h_{1n} \\ L_{g31}L_f^0h_{21} & L_{g32}L_f^0h_{21} & \cdots & L_{g3n}L_f^0h_{21} \\ L_{g31}L_f^0h_{22} & L_{g32}L_f^0h_{22} & \cdots & L_{g3n}L_f^0h_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g31}L_f^0h_{2n} & L_{g32}L_f^0h_{2n} & \cdots & L_{g3n}L_f^0h_{2n} \end{bmatrix} \quad (15)$$

易知,矩阵  $\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{x})$  是非奇异的。那么,系统对于输出函数的相对阶为  $r=3n$ 。显然相对阶  $r$  小于系统的总阶数  $9n$ 。因此,形如式(11)所示的输出函数仅能将系统部分精确线性化。

为系统的前  $3n$  个方程选择非线性变换坐标如下:

$$\bar{\mathbf{z}}_L = [\bar{z}_{11}, \bar{z}_{21}, \bar{z}_{31}, \dots, \bar{z}_{1n}, \bar{z}_{2n}, \bar{z}_{3n}]^T = [h_{11}, h_{21}, h_{31}, \dots, h_{1n}, h_{2n}, h_{3n}]^T \quad (16)$$

为系统的后  $6n$  个方程选择非线性变换坐标如下:

$$\mathbf{z}_N = [\bar{z}_{41}, \bar{z}_{51}, \bar{z}_{61}, \bar{z}_{71}, \bar{z}_{81}, \bar{z}_{91}, \dots, \bar{z}_{4n}, \bar{z}_{5n}, \bar{z}_{6n}, \bar{z}_{7n}, \bar{z}_{8n}, \bar{z}_{9n}]^T = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta P_{Hi}, \Delta P_{Li}, \Delta P_{Ri}, \Delta P_{e1}, \dots, \Delta\delta_n, \Delta\omega_n, \Delta P_{Hn}, \Delta P_{Ln}, \Delta P_{Rn}, \Delta P_{en}]^T \quad (17)$$

显然,非线性变换坐标式(17)满足:

$$\begin{cases} L_{g1i}\bar{z}_{4i} = 0, & L_{g2i}\bar{z}_{4i} = 0, & L_{g3i}\bar{z}_{4i} = 0 \\ L_{g1i}\bar{z}_{5i} = 0, & L_{g2i}\bar{z}_{5i} = 0, & L_{g3i}\bar{z}_{5i} = 0 \\ L_{g1i}\bar{z}_{6i} = 0, & L_{g2i}\bar{z}_{6i} = 0, & L_{g3i}\bar{z}_{6i} = 0 \\ L_{g1i}\bar{z}_{7i} = 0, & L_{g2i}\bar{z}_{7i} = 0, & L_{g3i}\bar{z}_{7i} = 0 \\ L_{g1i}\bar{z}_{8i} = 0, & L_{g2i}\bar{z}_{8i} = 0, & L_{g3i}\bar{z}_{8i} = 0 \\ L_{g1i}\bar{z}_{9i} = 0, & L_{g2i}\bar{z}_{9i} = 0, & L_{g3i}\bar{z}_{9i} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

在非线性坐标变换式(16)和(17)的作用下,系统可以转化成如下的形式:

$$\begin{cases} \dot{\bar{\mathbf{z}}}_L = \mathbf{A}\bar{\mathbf{z}}_L + \mathbf{B}_1\bar{\mathbf{v}} + \mathbf{B}_2\bar{\mathbf{w}} \\ \dot{\mathbf{z}}_N = \mathbf{q}(\bar{\mathbf{z}}_L, \mathbf{z}_N) \\ \bar{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\bar{\mathbf{z}}_L + \mathbf{D}\bar{\mathbf{v}} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{y}} = [y_{11}, y_{21}, y_{31}, \dots, y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}, \dots, y_{1n}, y_{2n}, y_{3n}]^T \\ \mathbf{A} = \mathbf{0}_{3n \times 3n}, \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{I}_{3n \times 3n}, \quad \mathbf{B}_2 = \mathbf{I}_{3n \times 3n} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \text{diag}(c_1, \dots, c_{3n}) \\ \mathbf{0}_{3n \times 3n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3n \times 3n} \\ \text{diag}(d_1, \dots, d_{3n}) \end{bmatrix} \\ c_s, d_s \in \mathbf{R} \quad s = 1, 2, \dots, 3n \end{cases} \quad (21)$$

$$\bar{\mathbf{v}} = [\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_i, \dots, \bar{v}_n]^T \quad (22)$$

$$\bar{\mathbf{w}} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_i, \dots, \bar{w}_n]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{q}(\bar{\mathbf{z}}_L, \mathbf{z}_N) = [\mathbf{q}_1(\bar{\mathbf{z}}_L, \mathbf{z}_N), \dots, \mathbf{q}_i(\bar{\mathbf{z}}_L, \mathbf{z}_N), \dots, \mathbf{q}_n(\bar{\mathbf{z}}_L, \mathbf{z}_N)]^T \quad (24)$$

$$\bar{v}_i = \begin{bmatrix} L_f h_{1i} + \sum_{l=1}^n L_{g1l} h_{1l} E_{li} + \sum_{l=1}^n L_{g2l} h_{1l} U_{THi} + \sum_{l=1}^n L_{g3l} h_{1l} U_{Ti} \\ L_f h_{2i} + \sum_{l=1}^n L_{g1l} h_{2l} E_{li} + \sum_{l=1}^n L_{g2l} h_{2l} U_{THi} + \sum_{l=1}^n L_{g3l} h_{2l} U_{Ti} \\ L_f h_{3i} + \sum_{l=1}^n L_{g1l} h_{3l} E_{li} + \sum_{l=1}^n L_{g2l} h_{3l} U_{THi} + \sum_{l=1}^n L_{g3l} h_{3l} U_{Ti} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\bar{w}_i = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^n L_{g1l} h_{1l} w_{1i} + \sum_{l=1}^n L_{g2l} h_{1l} w_{2i} + \sum_{l=1}^n L_{g3l} h_{1l} w_{3i} \\ \sum_{l=1}^n L_{g1l} h_{2l} w_{1i} + \sum_{l=1}^n L_{g2l} h_{2l} w_{2i} + \sum_{l=1}^n L_{g3l} h_{2l} w_{3i} \\ \sum_{l=1}^n L_{g1l} h_{3l} w_{1i} + \sum_{l=1}^n L_{g2l} h_{3l} w_{2i} + \sum_{l=1}^n L_{g3l} h_{3l} w_{3i} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{q}_i(\bar{\mathbf{z}}_L, \mathbf{z}_N) = \begin{bmatrix} \omega_{0i} z_{5i} \\ (C_{Hi} P_{Hi} + C_{Li} P_{Li} - P_{ei} - D_i z_{5i}) / T_{ji} \\ (\mu_{Hi} - P_{Hi}) / T_{VHi} \\ (-P_{Li} + \mu_{Li} P_{Ri}) / T_{VLi} \\ (P_{Hi} - P_{Ri}) / T_{Vri} \\ P_{ei} - P_{e0i} \end{bmatrix} \quad (27)$$

假设  $\mathbf{C}^T \mathbf{D} = 0$ , 且  $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$  是可逆的。

将线性子系统  $\bar{\mathbf{z}}_L$  的二次性能指标选取为:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\bar{\mathbf{z}}_L^T \mathbf{C}^T \mathbf{C} \bar{\mathbf{z}}_L + \bar{\mathbf{v}}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{v}}) dt \quad (28)$$

若对于如下 Riccati 方程<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B}_1 (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} + \frac{1}{\gamma_i^2} \mathbf{C}^T \mathbf{C} = 0 \quad (29)$$

存在一个非负解  $\mathbf{P}$ , 那么  $\bar{\mathbf{z}}_L$  的线性鲁棒控制规律为:

$$\bar{\mathbf{v}} = -(\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{z}}_L \quad (30)$$

在控制规律的作用下,线性子系统  $\bar{\mathbf{z}}_L$  的闭环系统在  $\mathbf{x} = 0$  处是渐进稳定的,并且干扰输入  $\bar{\mathbf{w}}$  到调节输出  $\bar{\mathbf{y}}$  的  $L_2$  增益小于  $\gamma_i$ 。

线性子系统  $\bar{\mathbf{z}}_L$  的鲁棒控制规律如下所示:

$$\bar{\mathbf{v}} = [\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_i, \dots, \bar{v}_n]^T \quad (31)$$

$$\bar{v}_i = [-k_{(3i-2) \times (3i-2)} y_{1i}, -k_{(3i-1) \times (3i-1)} y_{2i}, -k_{(3i) \times (3i)} y_{3i}]^T \quad (32)$$

其中,  $\mathbf{K} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P}$ ,  $k_{(s) \times (s)}$  ( $s = 1, 2, \dots, 3n$ ) 为矩阵  $\mathbf{K}$  的第  $s$  个对角线元素。将式(31)和(32)代入式(25),将控制规律从  $\mathbf{z}$  空间变换回  $\mathbf{x}$  空间,得到鲁棒励磁控制规律  $E_{fi}$ 、鲁棒汽阀开度控制规律  $U_{THi}$  及  $U_{Ti}$ 。

$$E'_{fi} = v_{1i} - c_{2i}\dot{\omega}_i - c_{1i} \left[ \frac{U_{di}}{U_{li}} x_{qi} \dot{I}_{qi} + \frac{U_{qi}}{U_{li}} \left[ -\frac{E'_{qi}}{T_{d0i}} - \frac{(x_{di} - x'_{di})I_{di}}{T'_{d0i}} - x'_{di} \dot{I}_{di} \right] \right] \frac{T'_{d0i} U_{li}}{U_{qi} c_{1i}} \quad (33)$$

$$U_{THi} = \left[ v_{2i} - c_{6i}(P_{ei} - P_{e0i}) + \frac{c_{3i} I_{qi}}{T'_{d0i}} (E'_{fi} - E_{fi}) + \frac{c_{3i}(x_{di} - x'_{di})I_{di} I_{qi}}{T_{d0i}} - c_{3i} E'_{qi} \dot{I}_{qi} - c_{4i} \dot{\omega}_i \right] \frac{T_{shi}}{c_{5i}} + \mu_{Hi} \quad (34)$$

$$U_{Ti} = \left[ v_{3i} - c_{11i}(P_{ei} - P_{e0i}) - c_{7i} E'_{qi} \dot{I}_{qi} - c_{8i} \dot{\omega}_i - c_{9i} \frac{(P_{Hi} - P_{Ri})}{T_{VRi}} + \frac{c_{7i}(x_{di} - x'_{di})I_{di} I_{qi}}{T'_{d0i}} + \frac{c_{7i} I_{qi}}{T'_{d0i}} (E'_{fi} - E_{fi}) \right] \frac{T_{shi}}{c_{10i}} + \mu_{Ti} \quad (35)$$

从式(33)~(35)可以看出,第*i*台发电机的鲁棒励磁控制规律 $E'_{fi}$ 、汽门开度控制规律 $U_{THi}$ 及 $U_{Ti}$ 仅包含该台发电机相关的状态变量,因此所求出的控制规律是具有分散性的。

当线性子系统 $\bar{z}_L$ 进入稳定状态时,有 $\bar{z}_L=0$ 。将 $\bar{z}_L=0$ 代入式(19),那么系统的零动态可重写成:

$$\dot{z}_N = [\dot{z}_{N1}, \dot{z}_{N2}, \dots, \dot{z}_{Ni}, \dots, \dot{z}_{Nn}]^T \quad (36)$$

$$\dot{z}_{Ni} = [\dot{z}_{4i}, \dot{z}_{5i}, \dot{z}_{6i}, \dot{z}_{7i}, \dot{z}_{8i}, \dot{z}_{9i}]^T \quad (37)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_{4i} = \omega_{0i} z_{5i} \\ \dot{z}_{5i} = [C_{Hi}(z_{6i} + P_{H0i}) + C_{Li}(z_{7i} + P_{L0i}) - P_{ei} - D_i z_{5i}] / T_{Ji} \\ \dot{z}_{6i} = [(z_{2i} - c_{3i} \Delta P_{ei} - c_{4i} z_{5i}) / c_{5i} + \mu_{H0i} - z_{6i} - P_{H0i}] / T_{VHi} \\ \dot{z}_{7i} = \{-z_{7i} - P_{L0i} + [(z_{3i} - c_{7i} \Delta P_{ei} - c_{8i} z_{5i} - c_{9i} z_{8i}) / c_{10i} + \mu_{L0i}]\} / T_{VLi} \\ \dot{z}_{8i} = [(z_{6i} + P_{H0i}) - (z_{8i} + P_{R0i})] / T_{VRi} \\ \dot{z}_{9i} = P_{ei} - P_{e0i} \end{cases} \quad (38)$$

$$E'_{qi} = \sqrt{(U_{0i} - c_{2i} z_{4i} / c_{1i})^2 - (x_{qi} I_{qi})^2} + x'_{di} I_{di}$$

$$I_{di} = \sum_{j=0}^n \{ G_{ij} [\sin(z_{3j} + \delta_{0j}) E'_{qj} + (x_{qj} - x'_{dj}) \cos(z_{3j} + \delta_{0j}) I_{qj}] - B_{ij} [\cos(z_{3j} + \delta_{0j}) E'_{qj} - (x_{qj} - x'_{dj}) \sin(z_{3j} + \delta_{0j}) I_{qj}] \}$$

$$I_{qi} = \sum_{j=0}^n \{ G_{ij} [\cos(z_{3j} + \delta_{0j}) E'_{qj} + (x_{qj} - x'_{dj}) \sin(z_{3j} + \delta_{0j}) I_{qj}] + B_{ij} [\sin(z_{3j} + \delta_{0j}) E'_{qj} + (x_{qj} - x'_{dj}) \cos(z_{3j} + \delta_{0j}) I_{qj}] \}$$

$$z_{3j} = z_{3i} - z_{3j}, \quad \delta_{0j} = \delta_{0i} - \delta_{0j}$$

由于输出函数中的待定系数 $c_{1i}, c_{2i}, c_{3i}, c_{4i}, c_{5i}, c_{7i}, c_{8i}$ 和 $c_{9i}$ 出现在零动态系统中,那么通过适当地赋值,可以调节零动态系统的稳定性。

### 3 系统仿真结果

第2节中所设计的多指标非线性鲁棒综合控制方法的有效性将在如图2所示的三机电力系统中进行验证。

图2中发电机 $G_1$ 是无穷大系统, $G_2$ 和 $G_3$ 装配

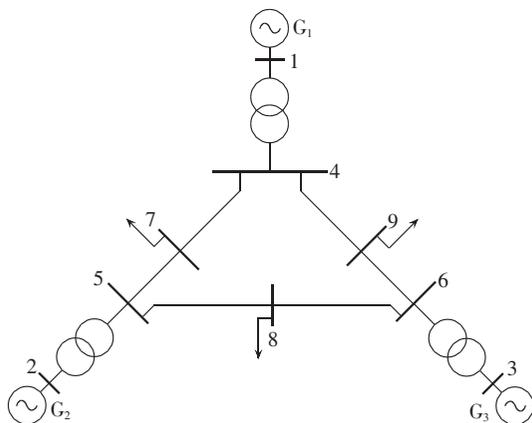


图2 三机电力系统示意图

Fig.2 Diagram of three-machine power system

表1 发电机 $G_2$ 和 $G_3$ 的模型参数  
Table 1 Parameters of  $G_2$  and  $G_3$

发电机	$x'_{di}$	$x_{di}$	$x_{qi}$	$T_{Ji}/s$	$T'_{d0i}/s$	$T_{VHi}/s$	$T_{sh}/s$	$T_{VLi}/s$	$T_{VRi}/s$	$T_{si}/s$
$G_2$	0.038	0.321	0.321	30.0	8.4	0.2	0.2	0.2	8	0.2
$G_3$	0.048	0.306	0.306	39.2	6.2	0.2	0.2	0.2	8	0.2

有综合控制器,其模型参数如表1所示<sup>[16]</sup>。表中, $x'_{di}, x_{di}, x_{qi}$ 为标么值。

在实际应用中,由于发电机的容量有限,所以仅能提供有限的励磁电压。因此,励磁电压和汽阀开度的物理极限如下:

$$-6 \leq E_{fi} \leq 6, \quad 0 \leq U_{THi} \leq 7, \quad 0 \leq U_{Ti} \leq 1.1 \quad i=2,3 \quad (39)$$

#### 3.1 控制规律参数的选取

在MINRCA中,参数 $\gamma_i$ 越小,说明干扰抑制效果越好。然而,太小的 $\gamma_i$ 会导致Riccati方程无解。所以,应该选择适当的参数 $\gamma_i$ 。在方程式(29)中,令 $\gamma_i=0.1(i=2,3)$ ,且令:

$$C = \begin{bmatrix} \text{diag}(c) \\ 0_{6 \times 6} \end{bmatrix}, \quad c = [4, 3, 5, 6, 2, 3]^T \quad (40)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} \\ \text{diag}(d) \end{bmatrix}, \quad d = [10, 8, 11, 9, 12, 8]^T \quad (41)$$

求解Riccati方程,可得:

$$K = \text{diag}(8, 5, 6, 7, 9, 5) \quad (42)$$

如式(11)所示的输出函数的代数参数选取为:

$$\begin{cases} c_{12} = 2, & c_{22} = -15, & c_{32} = -10, & c_{42} = -12 \\ c_{52} = -15, & c_{62} = -1, & c_{72} = -15, & c_{82} = 20 \\ c_{92} = -2, & c_{102} = -25, & c_{112} = -1 \\ c_{13} = 1.5, & c_{23} = -10, & c_{33} = -11, & c_{43} = -30 \\ c_{53} = -14, & c_{63} = -2, & c_{73} = -20, & c_{83} = -35 \\ c_{93} = -1, & c_{103} = -15, & c_{113} = -2 \end{cases} \quad (43)$$

将式(42)和(43)代入控制规律式(33)~(35),得到的控制规律代入系统方程式(5),那么闭环系统的一次渐进系统的特征根配置在如式(44)所示的

位置。

$$\begin{cases} s_{21}=-5.16+j3.62, & s_{22}=-5.16-j3.62, & s_{23}=-1.24 \\ s_{24}=-2.23, & s_{25}=-1.86, & s_{26}=-0.25 \\ s_{27}=-6.21, & s_{28}=-1.59, & s_{29}=-0.74 \\ s_{31}=-2.16+j0.87, & s_{32}=-2.16-j0.87, & s_{33}=-5.29 \\ s_{34}=-3.28, & s_{35}=-2.45, & s_{36}=-0.39 \\ s_{37}=-5.89, & s_{38}=-4.51, & s_{39}=-1.02 \end{cases} \quad (44)$$

### 3.2 零动态系统的稳定性

在控制规律式(33)—(35)的作用下,零动态系统的特征根配置在如下的位置:

$$\begin{cases} s_{0(21)}=-5.16+j3.62, & s_{0(22)}=-5.16-j3.62 \\ s_{0(23)}=-1.24, & s_{0(24)}=-2.23, & s_{0(25)}=-1.86 \\ s_{0(26)}=-0.25 \\ s_{0(31)}=-2.16+j0.87, & s_{0(32)}=-2.16-j0.87 \\ s_{0(33)}=-5.29, & s_{0(34)}=-3.28, & s_{0(35)}=-2.45 \\ s_{0(36)}=-0.39 \end{cases} \quad (45)$$

显然,零动态系统的特征根都位于负半平面,可见零动态系统是稳定的。

### 3.3 仿真案例与仿真结果

为验证多指标非线性鲁棒综合控制律(MINRC)的有效性,针对下述 4 种扰动方案,将其与多指标非线性综合控制律(MINC)进行仿真对比。

MINC 指将输出函数选取为如式(11)所示的形式,输出函数的代数参数选取同式(43),二次性能指标中参数矩阵  $C$  和  $D$  的选取同式(40)和(41),求解式(46)所示的 Riccati 方程<sup>[17]</sup>,可得式(47)。

$$A^T P + PA - PB_1(D^T D)^{-1} B_1^T P + C^T C = 0 \quad (46)$$

$$K = \text{diag}(2, 3, 2, 1, 3, 2) \quad (47)$$

将式(43)和(47)代入式(33)—(35),可得MINC。

#### 3.3.1 电压调节扰动

在 0.5 s 时刻,  $G_2$  的机端电压给定值阶跃调高 2.5%,同时  $G_3$  的机端电压给定值降低 2.5%。系统在 MINRC、MINC 的作用下,各状态变量的响应曲线分别

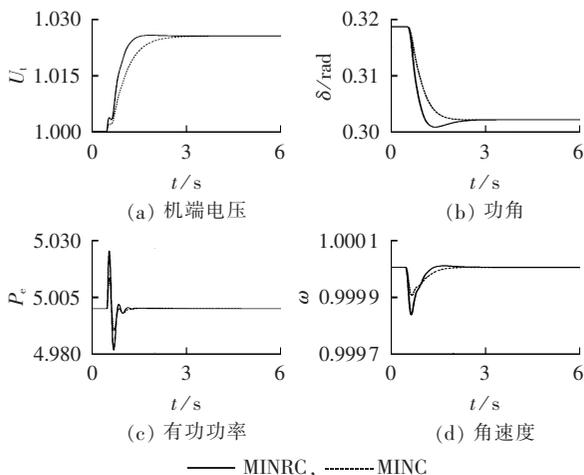


图 3 电压调节扰动时发电机  $G_2$  的系统响应曲线  
Fig.3 System responses for  $G_2$  under voltage regulation disturbance

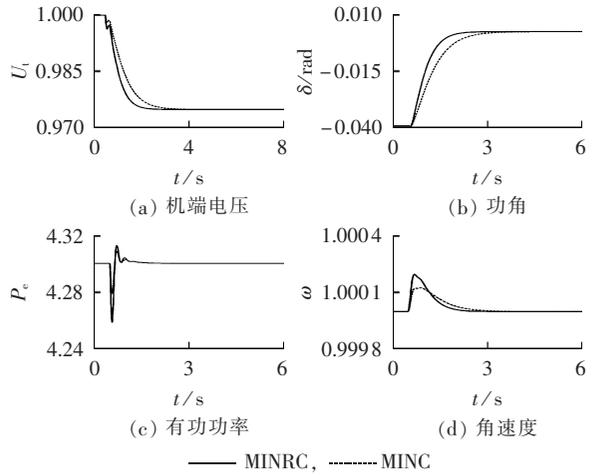


图 4 电压调节扰动时发电机  $G_3$  的系统响应曲线  
Fig.4 System responses for  $G_3$  under voltage regulation disturbance

见图 3、图 4。图中  $U_1$ 、 $P_e$ 、 $\omega$  为标幺值,后同。

图 3 和图 4 表明,当经历电压调节扰动时,发电机的机端电压在 MINRC、MINC 的作用下均能按调节要求对给定值进行跟踪,发电机输出的有功功率未因为出现调压扰动而出现偏差;发电机的功角及角速度的响应特性十分平滑,没有发生振荡现象。

#### 3.3.2 有功调节扰动

在 0.5 s 时刻,发电机  $G_2$  输出的有功功率从 5 p.u. 变为 5.5 p.u.,同时发电机  $G_3$  输出的有功功率从 4.3 p.u. 变为 4 p.u.。系统在 MINRC、MINC 的作用下,各状态变量响应曲线分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知,在 MINRC、MINC 的作用下,发电机输出的有功功率均能按调节要求准确跟踪给定值,机端电压在经过小波动后,恢复到初始运行点而不会产生静态偏移;发电机  $G_3$  功角减小以适应机械功率输入的减小,发电机  $G_2$  功角增大以适应机械功率输入的增加,这些特性与实际相符。

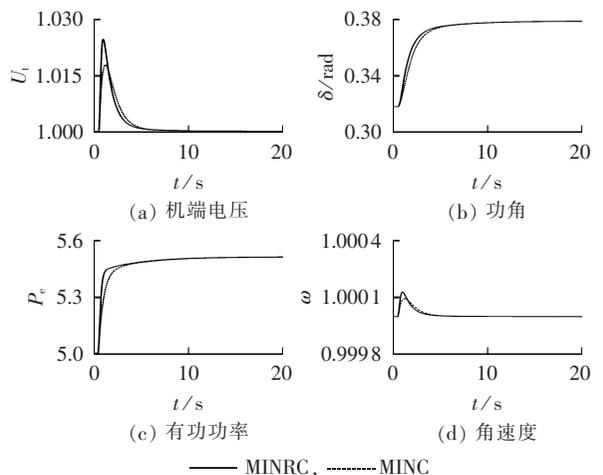


图 5 有功功率调节扰动时发电机  $G_2$  的系统响应曲线  
Fig.5 System responses for  $G_2$  under active power regulation disturbance

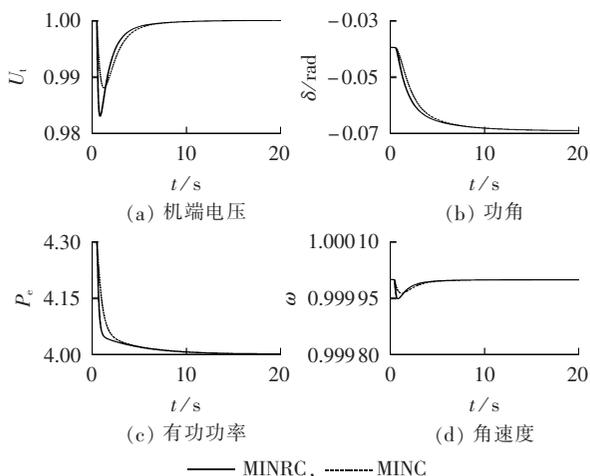


图 6 有功功率调节扰动时发电机  $G_3$  的系统响应曲线

Fig.6 System responses for  $G_3$  under active power regulation disturbance

图 3—6 表明,在 MINRC、MINC 作用下的系统响应具有较为相似的特性,都能提高中间再热式汽轮发电机组的动态性能,并在进入稳态后均能保证相关状态量准确跟踪给定值,具有令人满意的静态性能。

3.3.3 外部扰动

在 0.5 s 时刻,系统受到外部干扰。作用在发电机  $G_2, G_3$  的干扰分别为  $w_{12}=w_{22}=w_{32}=\sin t, w_{13}=w_{23}=w_{33}=-\sin t$ 。系统在 MINRC、MINC 的作用下,有关状态量的响应曲线分别如图 7 和图 8 所示。

图 7 和图 8 表明,当发电机受到外部干扰时,其机端电压、功角、发电机输出的有功功率都不同程度地发生了偏移,说明发电机的运行状态发生了改变。但相比之下,在 MINRC 作用下产生的静态偏移比在 MINC 要小得多,可见 MINRC 比 MINC 具有更加有效的干扰抑制作用,能使系统具有较好的鲁棒性。

3.3.4 三相短路扰动

在扰动发生前,系统处于稳定状态。在 0.5 s 时刻,5 号和 8 号母线之间的线路(靠近 5 号母线端

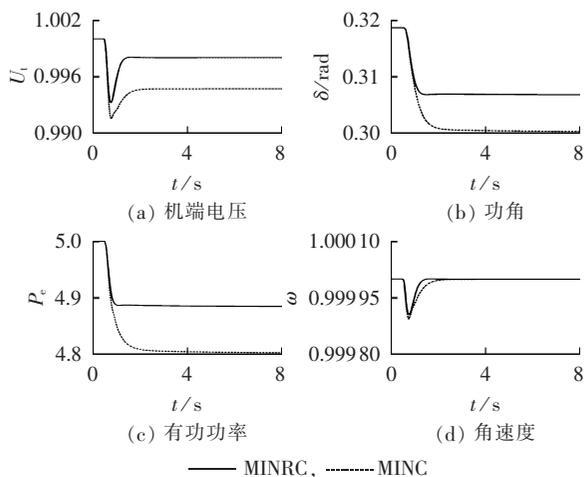


图 7 外部扰动时发电机  $G_2$  的系统响应曲线

Fig.7 System responses for  $G_2$  under exogenous disturbance

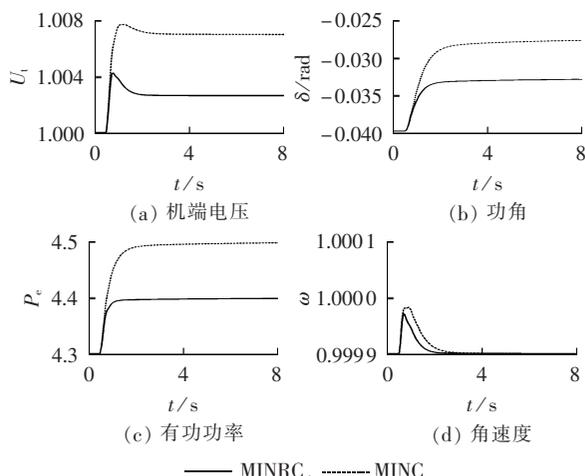


图 8 外部扰动时发电机  $G_3$  的系统响应曲线

Fig.8 System responses for  $G_3$  under exogenous disturbance

处)发生三相金属性短路,故障持续 0.15 s 后被切除,0.8 s 时系统重合闸成功。当系统采用 MINRC、MINC 时,系统有关状态量的响应曲线分别见图 9 和图 10。

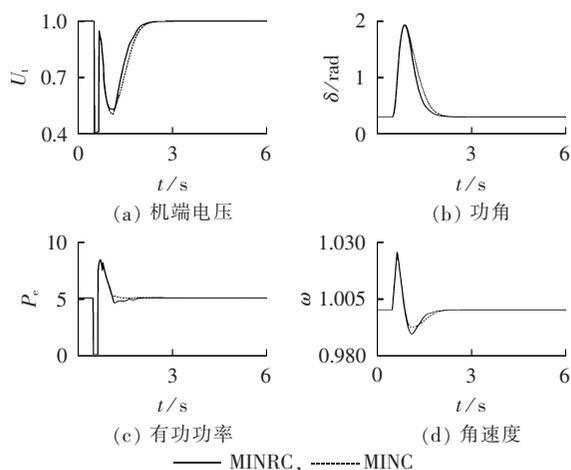


图 9 三相短路扰动时发电机  $G_2$  的系统响应曲线

Fig.9 System responses for  $G_2$  under three-phase short circuit fault

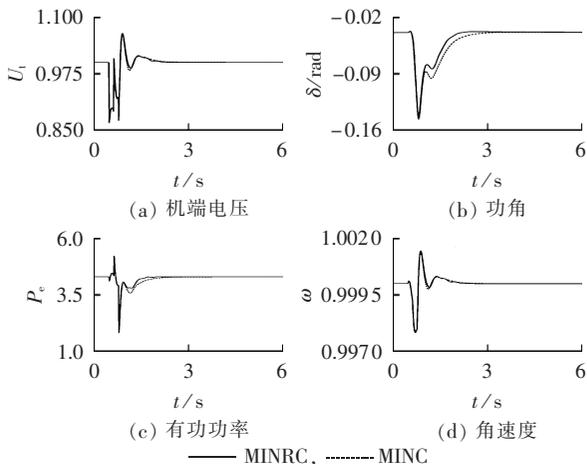


图 10 三相短路扰动时发电机  $G_3$  的系统响应曲线

Fig.10 System responses for  $G_3$  under three-phase short circuit fault

图 9、图 10 表明,当系统发生大扰动时,在 MINRC、MINC 作用下,机端电压均能很快地恢复到初始状态,且有效地平息了有功功率的摆动并抑制了系统的超调,使得发电机具有良好的暂态稳定性能。

#### 4 结语

本文针对一个具有  $n$  台中间再热式汽轮发电机的多机电力系统,建立其鲁棒综合控制模型。运用 MINRCA,成功设计出多机环境下的中间再热式汽轮发电机组励磁与高、中压缸汽阀的 MINRC。仿真结果表明,MINRC 能维持发电机端电压在给定值上运行,准确控制发电机的转速,合理调节和分配发电机的有功,提高发电机运行的稳定性,实现了系统的多目标控制;同时,MINRC 综合控制律相比于 MINC 能更有效地抑制扰动对系统输出的不利影响,增强了系统的鲁棒性。

#### 参考文献:

- [1] 黎浩荣,李东海,李立勤,等. 中间再热式汽轮发电机组汽门开度全程非线性控制[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(10): 84-87.  
LI Haorong,LI Donghai,LI Liqin,et al. Reheat-type turbogenerator steam valve whole range non-linear control[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition),2000,40(10):84-87.
- [2] 刘辉,汪旒,韦化,等. 发电机组目标全息反馈大范围稳定控制设计[J]. 中国电机工程学报,2009,29(31):21-26.  
LIU Hui,WANG Ni,WEI Hua,et al. Global asymptotic stable coordinated control with objective holographic feedbacks for the turbo-generator set[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(31): 21-26.
- [3] CHEN H,JI H B,WANG B,et al. Coordinated passivation techniques for the dual-excited and steam-valving control of synchronous generators[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications,2006,153(1):69-73.
- [4] 李啸骢,程时杰,韦化,等. 中间再热式汽轮发电机组的多指标非线性综合控制器的研究[J]. 电网技术,2004,28(7):1-6.  
LI Xiacong,CHENG Shijie,WEI Hua,et al. Study on multi-index nonlinear integrated controller for reheat-type turbogenerator unit[J]. Power System Technology,2004,28(7):1-6.
- [5] 刘辉,韦化,李啸骢. 大型汽轮发电机组目标全息反馈非线性综合控制设计[J]. 电工技术学报,2008,23(4):25-31.  
LIU Hui,WEI Hua,LI Xiacong. Nonlinear coordinated control with objective holographic feedbacks for large turbogenerator set [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(4): 25-31.
- [6] 王冰,季海波,陈欢,等. 汽轮发电机励磁与汽门协调无源性控制 [J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):104-109.  
WANG Bing,JI HaiBo,CHEN Huan,et al. The coordinated passivity techniques for the excitation and steam-valving control of generator[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):104-109.
- [7] 刘鑫蕊,孙秋野,谢志远,等. 基于观测器的多机系统气门开度的模糊  $H_{\infty}$  控制新方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36 (12):1678-1681.  
LIU Xinrui,SUN Qiuye,XIE Zhiyuan,et al. New observer-based fuzzy  $H_{\infty}$  control approach for steam valve opening of multi-machine power systems [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition),2015,36(12):1678-1681.
- [8] JIANG N,LIU T,LI S,et al. Whole-range nonlinear large disturbance attenuation controller design for turbo generator steam valve systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control,2013,136(1):81-89.
- [9] LI Xiacong,CHEN Mingyuan,LIANG Zhijian,et al. Excitation and steam-valving coordinated robust controller design for multi-machine power systems based on the multi-index nonlinear robust control approach [J]. IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering,2016,11(4):425-434.
- [10] LU Q,SUN Y,XU Z. Decentralized nonlinear optimal excitation control [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1996,11(4): 1957-1962.
- [11] JIN M J,HU W,LIU F,et al. Nonlinear coordinated control of excitation and governor for hydraulic power plants [J]. IET Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2005,152 (4):544-548
- [12] 卢强,梅生伟,孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京:清华大学出版社,2008:182-183.
- [13] 李啸骢,郑涛,梁志坚,等. 水轮机水门、励磁与电气制动系统非线性综合控制 [J]. 电力自动化设备,2016,36(7):97-103.  
LI Xiacong,ZHENG Tao,LIANG Zhijian,et al. Integrated nonlinear control of hydroturbine governor and excitation and TCBR system [J]. Electric Power Automation Equipment,2016, 36(7):97-103.
- [14] 潘月斗,郭凯,陈继义,等. 基于状态反馈线性化的矩阵变换器非线性控制 [J]. 电力自动化设备,2015,35(5):77-82.  
PAN Yuedou,GUO Kai,CHEN Jiye,et al. Nonlinear control of matrix converter based on state feedback linearization [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):77-82.
- [15] 李啸骢,程时杰,韦化,等. 具有多性能指标的汽轮发电机非线性综合控制 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):96-101.  
LI Xiacong,CHENG Shijie,WEI Hua,et al. Multi-index nonlinear integrated control for turbine generator unit [J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):96-101.
- [16] LU Q,SUN Y. Nonlinear stabilizing control of multi-machine systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1989,4(1): 236-241.
- [17] MEI S,LIU F,CHEN Y. Coordinated  $H_{\infty}$  control of excitation and governor of hydroturbo-generator sets;a Hamiltonian approach [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2004,14(9-10):807-832.

#### 作者简介:



陈明媛

陈明媛(1983—),女,广西横县人,博士研究生,研究方向为电力系统稳定控制、鲁棒控制问题等(E-mail: MingyuanChen\_gxu@163.com);

李啸骢(1959—)男,云南昆明人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统分析与控制、电力系统非线性控制等(E-mail: lhlht@gxu.edu)。

(下转第 165 页 continued on page 165)

- [12] WEINBERG A K, RUEDA B. A high power, high frequency, DC to DC converter for space applications[C]//IEEE Transactions on Power Electronics Specialists Conference. Toledo, Spain: IEEE, 1992: 1140-1147.
- [13] HAWASLY S, MOUSSAOUI Z, KORNETZKY P, et al. Dynamic modeling of parallel connected DC to DC converters using Weinberg topologies[C]//Southcon/96 Conference Record. Orlando, FL, USA: IEEE, 1996: 599-609.
- [14] FU Ming, ZHANG Donglai, LI Tiecai. Design and analysis of a conductance compensator for keeping constant bandwidth and output impedance in average current mode control[J]. IEEE

Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 837-848.

#### 作者简介:



霍群海

霍群海(1981—),男,河南驻马店人,副研究员,博士,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: huoqunhai@163.com);

吴理心(1984—),男,山东潍坊人,助理研究员,硕士,通信作者,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: wulixin@mail.ice.ac.cn)。

## Topology of a bidirectional DC chopping circuit for space

HUO Qunhai<sup>1</sup>, WU Lixin<sup>1</sup>, YIN Jingyuan<sup>1</sup>, JIA Dongqiang<sup>2</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Power Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China)

**Abstract:** In view of the limit of space application environment, a bidirectional DC chopping circuit topology is proposed. The discharging and charging converters are combined in a converter topology, where smaller size, lighter weight and higher power density of the space power supply system can be achieved. The bidirectional working principle of the proposed circuit topology is analyzed in detail, and the circuit gain of the boost and buck process is theoretically derived. The dual-loop control strategy of voltage outer loop and current inner loop are employed to realize the increase and decrease of the circuit voltage, and the discharging and charging process of the power supply system are completed. Both computer simulation model and physical experimental platform are built, and simulative and experimental results demonstrate that the proposed topology is effective and feasible.

**Key words:** space power supply; bidirectional chopper circuit; gain modeling; dual-loop control; operation mode

(上接第 145 页 continued from page 145)

## Multi-index nonlinear robust control for reheat-type turbogenerator

CHEN Mingyuan<sup>1</sup>, LI Xiaocong<sup>1</sup>, CONG Lanmei<sup>1,2</sup>, XU Junhua<sup>1</sup>, REN Ziyi<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. School of Automobile Engineering, Linyi University, Linyi 276005, China)

**Abstract:** The MINRCA (Multi-Index Nonlinear Robust Control Approach) is applied to design a robust integrated control model for the excitation and governing control system of reheat-turbine generator units with uncertain disturbances. Zeros and poles of the system are reasonably configured by selecting an appropriate output function, through which multiple performance indices of the reheat-turbine generator can be achieved simultaneously. The selected output function can decouple the uncertain disturbance from the zero-dynamics system. Then, the  $L_2$  gain disturbance attenuation approach is employed to alleviate negative effects of uncertain disturbances on system outputs. Consequently, the controller system can not only provide satisfactory dynamic and static performances, but also produce desired robust performance against uncertain disturbances. A three-machine power system model is designed to test the robust integrated control strategy derived from MINRCA, which finally verifies its effectiveness and superiority.

**Key words:** reheat-turbine generator; robust control; multi-index nonlinearity;  $L_2$  gain disturbance attenuation; nonlinear control