

# 微分代数模型可控制动电阻与励磁系统多指标非线性控制

李啸聪, 郑涛, 梁志坚, 徐俊华

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 针对微分代数模型的水轮发电机组可控制动电阻(Thyristor Controlled Braking Resistor, TCBR)与励磁系统进行多指标非线性扰动解耦控制律设计。微分代数模型多指标非线性设计方法(Differential Algebraic System Multi-Index Nonlinear Control, DASMINC)将输出函数选取为系统关键变量线性组合的形式, 通过扰动解耦设计, 借助哈特曼-格鲁勃曼(Hartman-Grobman)定理, 适当选取输出函数参数矩阵配置微分代数模型闭环系统平衡点处特征根位置, 使系统获得优良控制性能。仿真结果表明该方法控制的TCBR与发电机励磁系统能大幅提高水电站输电系统暂态稳定性, 抗扰能力强, 且能很好协调各状态量的动、静态性能。

**关键词:** 可控制动电阻; 发电机励磁; 微分代数模型; 多指标非线性控制; 暂态稳定

## Multi-index nonlinear control for TCBR and generator excitation based differential algebraic model

LI Xiacong, ZHENG Tao, LIANG Zhijian, XU Junhua

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** A multi-index coordinated control method based nonlinear differential algebraic model for single machine infinite bus power system with thyristor controlled braking resistor (TCBR) is proposed. By means of Hartman-Grobman theorem, differential algebraic system multi-index nonlinear control (DASMINC) design method can reassign the closed-loop system eigenvalues of linear approximate system to the nonlinear differential algebraic system via appropriately selecting output function parameter matrix. Therefore, the system can access to good control performance and strong anti-interference ability. Simulation results show that TCBR and generator excitation system controlled by this proposed method can significantly improve power system transient stability limitation and effectively coordinate the dynamic and the steady-state performances of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267001).

**Key words:** thyristor controlled braking resistor (TCBR); generator excitation; differential algebraic models; multi-index nonlinear control; transient stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0001-07

## 0 引言

提高电力系统暂态稳定的措施, 一般首先考虑减少扰动后发电机机械功率和电磁功率的差额, 电气制动和强行励磁是其中重要的手段<sup>[1]</sup>。传统水轮发电机组电气制动采用的是机械开关对发电机机端水电阻进行投切, 对投切时间的控制属于离散控制, 这方面的研究国内外都取得了一定成果<sup>[2-4]</sup>。但机械

开关动作慢, 不能快速、灵活投切, 无法达到控制性能要求和有效阻尼系统振荡。

晶闸管控制的制动电阻(TCBR)作为一种新型FACTS设备, 其制动电阻的大小连续可调。不但在输电线路发生故障后能快速投入, 起到提高发电机暂态稳定极限的作用, 而且可以通过连续调控接入电阻的大小来及时地调控发电机的电磁功率, 以有效阻尼系统振荡<sup>[5]</sup>。对TCBR的控制策略目前研究还较少, 多数控制方法是在平衡点处进行线性化, 针对线性近似系统进行设计的<sup>[6-8]</sup>。文献[9]虽保留了系统非线性结构, 但对系统模型进行了过多的简化。

采用基于微分代数模型的多指标非线性控制

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51267001); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338); 广西科学与技术开发计划项目(14122006-29)

方法比起线性最优控制完整保留了系统非线性结构,更符合物理实际;同时能突破微分几何理论对隐函数无法求导数的局限<sup>[10-11]</sup>。因此本文采用微分代数模型的多指标非线性设计方法对TCBR与发电机励磁系统协调控制问题进行扰动解耦控制律设计,借助哈特曼-格鲁勃曼(Hartman-Grobman)定理,选取输出参数矩阵( $C_1$ 、 $C_2$ )对微分代数模型的一次近似系统特征根进行配置,增强系统抗干扰能力,使其具有良好动、静态性能。

## 1 TCBR 与水轮机的微分代数模型

通常水电站地处偏远,须通过高压远距离送电并网,因此可以将水轮发电机与系统联系近似为单机无穷大系统<sup>[12-13]</sup>。图1所示为水轮发电机机端并联装有TCBR的单机无穷大电力系统等效电路图。图1可知发电机输出电磁功率 $P_g$ 由TCBR吸收的制动功率 $P_r$ 和输送电网的功率 $P_e$ 组成。

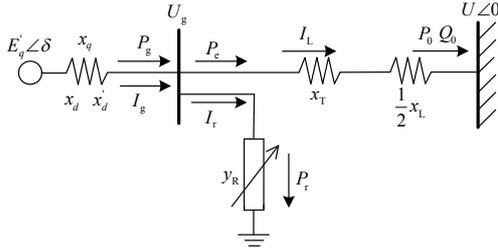


图1 机端并有TCBR的单机无穷大系统等效电路图

Fig. 1 Schematic of single machine infinite bus power system with TCBR

忽略联接变压器及开关损耗可设TCBR吸收纯有功,等效可变电阻 $R \in [R_{\min}, R_{\max}]$ ,其动态过程可采用一阶惯性环节等效<sup>[9,14]</sup>,动态方程数学描述为

$$\dot{y}_R = \frac{-y_R + u_R}{T_R} \quad (1)$$

式中: $y_R = 1/R$ ,为TCBR的等效电导; $u_R$ 为等效电导控制量; $T_R$ 为脉冲触发回路时间常数。图1中水轮发电机采用快速励磁系统,可用经典三阶模型描述<sup>[15-16]</sup>,将式(1)与发电机三阶动态方程组联立可得如下控制系统数学模型。

$$\begin{cases} \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{d0}}(E'_q - u_f) \\ \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_J}(P_m - P_g) - \frac{D}{T_J}(\omega - 1) \\ \dot{y}_R = \frac{1}{T_R}(-y_R + u_R) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E'_q$ 为发电机暂态电势; $\delta$ 为发电机功角; $\omega$ 为转子角速度; $E_q$ 为发电机空载电势; $\omega_0$ 为转子同步角速度; $u_f$ 为发电机励磁电压控制量; $T'_{d0}$ 为定子开路时励磁绕组时间常数; $D$ 为发电机等效阻尼系数; $T_J$ 为转子惯性时间常数。

图1中 $x_T$ 为变压器等效电抗, $x_L$ 为一回线路电抗,定义 $x_e = x_T + x_L/2$ ,在发电机 $dq0$ 坐标系下各变量关系可列出如下电气方程式。

$$\begin{cases} U_{gd} = x_q I_{gq} \\ U_{gq} = E'_q - x'_d I_{gd} \\ U_g^2 = U_{gd}^2 + U_{gq}^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{gd} = U_{gd} y_R + (U_{gq} - U \cos \delta) / x_e \\ I_{gq} = U_{gq} y_R + (U \sin \delta - U_{gd}) / x_e \end{cases} \quad (4)$$

$$E_q = U_{gq} + x_d I_{gd} \quad (5)$$

$$P_g = U_{gd} I_{gd} + U_{gq} I_{gq} \quad (6)$$

联立式(3)~式(6)可得约束变量与状态变量关系式。

$$\begin{cases} I_{gd} = \frac{(x_{q\Sigma} + x_e^2 y_R^2 x_q) E'_q + x_q x_e y_R U \sin \delta - x_{q\Sigma} U \cos \delta}{x_{q\Sigma} x'_{d\Sigma} + x_e^2 y_R^2 x'_d x_q} \\ I_{gq} = \frac{x_e^2 y_R E'_q + x'_{d\Sigma} U \sin \delta - x'_d x_e y_R U \cos \delta}{x_{q\Sigma} x'_{d\Sigma} + x_e^2 y_R^2 x'_d x_q} \\ E_q = E'_q - (x_d - x'_d) I_{gd} \\ U_g^2 = (x_q I_{gq})^2 + (E'_q - x'_d I_{gd})^2 \\ P_g = [E'_q + (x_q - x'_d) I_{gd}] I_{gq} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_e$ , $x_{q\Sigma} = x_q + x_e$ 。设状态变量矩阵 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [E'_q \ \delta \ \omega \ y_R]^T$ ;约束变量矩阵 $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5]^T = [I_{gd} \ I_{gq} \ E_q \ U_g \ P_g]^T$ ;  $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T$ 及扰动 $\mathbf{w} = [0 \ 0 \ P_m/T_J \ 0]^T$ 。那么系统(2)可转化成标准的MIMO非线性微分代数系统。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\mathbf{u} + \mathbf{w} \\ \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ \mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} -y_3 / T'_{d0} \\ (x_3 - 1)\omega_0 \\ -[y_5 + D(x_3 - 1)] / T_J \\ -x_4 / T_R \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} -1/T_{d0}' & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/T_R \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} ay_1 - (x_{q\Sigma} + x_e^2 x_q x_4^2) x_1 - x_q x_e U x_4 \sin x_2 + x_{q\Sigma} U \cos x_2 \\ ay_2 - x_e^2 x_4 x_1 - x_{d\Sigma}' U \sin x_2 + x_d' x_e U x_4 \cos x_2 \\ y_3 - x_1 + (x_d - x_d') y_1 \\ y_4^2 - (x_q y_2)^2 - (x_1 - x_d' y_1)^2 \\ y_5 - [x_1 + (x_q - x_d') y_1] y_2 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  表达式中的  $a = x_{q\Sigma}' x_{d\Sigma}' + x_e^2 x_d' x_q x_4^2$ 。

## 2 DASMING 的设计原理

DASMING 将输出函数选取成状态向量  $\mathbf{x}$  和约束向量  $\mathbf{y}$  的线性组合; 通过非线性变换将原系统解耦为  $\mathbf{i}$  空间线性子系统和非线性子系统; 然后对线性子系统设计二次型最优控制律  $\mathbf{v}$ ; 最后反解出非线性扰动解耦控制律  $\mathbf{u}$ 。

设计时选取  $\mathbf{C}_1$ ,  $\mathbf{C}_2$  两个参数矩阵, 构成输出函数:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \vdots \\ h_a(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \mathbf{y} \quad (9)$$

当输出向量对系统的总相对阶小于系统维数  $n$  时, 系统(8)经坐标变换  $\mathbf{i} = \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  可得  $\mathbf{i}$  空间系统:

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = i_2, \dot{i}_2 = i_3, \dots, \dot{i}_{\beta_1} = v_1 \\ \vdots \\ \dot{i}_{\beta_{a-1}+1} = i_{\beta_{a-1}+2}, \dots, \dot{i}_{\beta_a} = v_a \\ \dot{i}_{\beta_a+1} = \dot{\eta}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \dots, \dot{i}_n = \dot{\eta}_{n-\beta_a}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中  $\mathbf{v} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{a}$ , 其中:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} M_{g1} M_f^{r_1-1} h_1 & \dots & M_{ga} M_f^{r_1-1} h_1 \\ \vdots & & \vdots \\ M_{g1} M_f^{r_a-1} h_a & \dots & M_{ga} M_f^{r_a-1} h_a \end{bmatrix}, \mathbf{a} = \begin{bmatrix} M_f^{r_1} h_1 \\ \vdots \\ M_f^{r_a} h_a \end{bmatrix}$$

对于  $\mathbf{i}$  空间下解耦的  $a$  个线性系统, 基于二次型性能指标, 设计其最优控制律  $\mathbf{v}$ , 进而反解出  $\mathbf{u}$ :

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{a} + \mathbf{K}\mathbf{i}) \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{K}$  为反馈系数矩阵。

联立式(9)、式(11)可得最终抗扰动解耦控制律  $\mathbf{u}$  为

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \mathbf{y} + \mathbf{K}\mathbf{i}) + \mathbf{u}_0 =$$

$$-\mathbf{B}^{-1} \left( \mathbf{C}_1 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^{r_1} x_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^{r_n} x_n \end{bmatrix} + \mathbf{C}_2 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^{r_1} y_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^{r_m} y_m \end{bmatrix} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} i_1 - i_{10} \\ \vdots \\ i_r - i_{r0} \end{bmatrix} \right) + \mathbf{u}_0$$

(12)

从式(12)可看出, 控制律由控制量初值与抗干扰项组成, 物理意义明确。

## 3 TCBR 与发电机励磁的 DASMING 协调控制器设计

首先确定输出函数, 选取输出函数为全状态和全约束的线性组合形式:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [\mathbf{h}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \ \mathbf{h}_2(\mathbf{x}, \mathbf{y})]^T = \mathbf{C}_1^{2 \times 4} \mathbf{x} + \mathbf{C}_2^{2 \times 5} \mathbf{y}$$

对于参数矩阵的选定原则:

(1) 对于  $E_q', E_q, I_{gd}, I_{gq}$  等量在实际中还不具备有效的测量手段。这些不可测量会使得控制器实现变得十分困难。因此在设计控制律时, 应尽量避免不可测量介入。

(2) 励磁系统主要任务为维持发电机端电压在给定值, 稳定发电机运行特性<sup>[17-19]</sup>。输出函数中应有端电压信息  $\Delta U_g$  和发电机转速信息  $\Delta \omega$ 。

(3) 对 TCBR 等效电导控制的目的是在故障中减小发电机加速面积, 吸收过剩电磁功率, 改善系统动态品质; 阻尼系统低频振荡及次同步振荡; 并且约束 TCBR 装置本身的动态行为。因此应输出函数包含的信息应有发电机输出有功功率偏差  $\Delta P_g$ 、角速度偏差  $\Delta \omega$  和 TCBR 的等效电导变化  $\Delta y_R$ 。

综上考虑, 选取的输出参数矩阵为

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix}; \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \tilde{c}_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{c}_{25} \end{bmatrix}$$

即选取输出函数表达式为

$$\begin{cases} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = c_{13} \Delta x_3 + \tilde{c}_{14} \Delta y_4 \\ h_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = c_{23} \Delta x_3 + c_{24} \Delta x_4 + \tilde{c}_{25} \Delta y_5 \end{cases}$$

考查输出函数对系统的相对阶, 计算  $\mathbf{B}$  矩阵。

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{31} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & 0 & \sigma_{44} & 0 \\ \sigma_{51} & \sigma_{52} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & 0 & \rho_{14} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & 0 & \rho_{24} \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{41} & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{51} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中各元素:

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = x_{q\Sigma}' x_{d\Sigma}' + x_e^2 x_d' x_q x_4^2; \sigma_{31} = x_d - x_d';$$

$$\sigma_{41} = 2x'_d(x_1 - x'_d y_1); \quad \sigma_{42} = -2x'_q y_2; \quad \sigma_{44} = 2y_4;$$

$$\sigma_{51} = (x'_d - x_q)y_2; \quad \sigma_{52} = (x'_d - x_q)y_1 - x_1;$$

$$\rho_{11} = -x_{q\Sigma} - x'_e x_q x_4^2;$$

$$\rho_{12} = -U(x_{q\Sigma} \sin x_2 + x_q x_e x_4 \cos x_2);$$

$$\rho_{14} = 2x'_e x'_d x_q x_4 y_1 - 2x'_e x_q x_1 x_4 - x_q x_e U \sin x_2;$$

$$\rho_{21} = -x'_e x_4; \quad \rho_{22} = -x'_{d\Sigma} U \cos x_2 - x'_d x_e U x_4 \sin x_2;$$

$$\rho_{24} = 2x'_e x'_d x_q y_2 x_4 - x'_e x_1 + x'_d x_e U \cos x_2;$$

$$\rho_{41} = 2x'_d y_1 - 2x_1; \quad \rho_{51} = -y_2.$$

$$\text{代入 } \mathbf{B} \text{ 矩阵可得: } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} M_{g1} M_f^0 h_1 & M_{g2} M_f^0 h_1 \\ M_{g1} M_f^0 h_2 & M_{g2} M_f^0 h_2 \end{bmatrix}$$

其中:

$$M_{g1} M_f^0 h_1 = \frac{-\tilde{c}_{14}(\sigma_{11}\rho_{41} - \sigma_{41}\rho_{11} - \sigma_{42}\rho_{21})}{T'_{d0}\sigma_{11}\sigma_{44}}$$

$$M_{g2} M_f^0 h_1 = \frac{\tilde{c}_{14}(\sigma_{41}\rho_{14} + \sigma_{42}\rho_{24})}{T_R\sigma_{11}\sigma_{44}}$$

$$M_{g1} M_f^0 h_2 = \frac{-\tilde{c}_{25}(\sigma_{11}\rho_{51} - \sigma_{51}\rho_{11} - \sigma_{52}\rho_{21})}{T'_{d0}\sigma_{11}}$$

$$M_{g2} M_f^0 h_2 = \frac{c_{24} + \tilde{c}_{25}(\sigma_{51}\rho_{14} + \sigma_{52}\rho_{24})}{T_R\sigma_{11}}$$

将系统平衡点初始值代入  $\mathbf{B}$  矩阵, 可知矩阵为非奇异矩阵, 所选的输出函数对控制系统的总相对阶  $r = r_1 + r_2 = 1 + 1 = 2$  小于系统维数 4。需要另外构造两个光滑函数满足  $M_{gi}\eta_j(x, y) = 0$  ( $i, j = 1, 2$ ), 才可构成非线性变换。易知, 选取  $\eta_1 = \Delta\delta, \eta_2 = \Delta\omega$  满足上述条件。于是可选如下坐标变换:

$$\Phi(x, y) = \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x, y) \\ h_2(x, y) \\ \eta_1(x, y) \\ \eta_2(x, y) \end{bmatrix}$$

将系统(8)解耦成线性子系统  $(\dot{i}_1, \dot{i}_2)$  和非线性子系统  $(\dot{i}_3, \dot{i}_4)$ 。其中, 线性子系统为 2 阶 Brunovsky 标

准型系统。相应的 DSAMINC 控制律  $\mathbf{u}$  可按式(12) 求取。

## 4 算例仿真分析

### 4.1 算例简介

算例中的发电机模型参数以广西某水电站 114 MW 水轮机为实例:  $x_d = 1.057$  p.u.,  $x_q = 0.774$  p.u.,  $x'_d = 0.389$  p.u.,  $T_j = 4.25$  s,  $T'_{d0} = 6.15$  s。TCBR 惯性时间常数  $T_R = 0.02$  s, 考虑 TCBR 装置的容量限制  $y_R(t) \in [0.001 \ 1.8]$ 。变压器及线路参数:  $x_T = 0.130$  p.u.,  $x_L = 0.292$  p.u。系统初始运行工况: 注入无穷大母线的功率为  $P_0 = 0.9$  p.u.,  $U_{g0} = 1.048$  p.u.,  $\delta_0 = 41.3^\circ$ ,  $y_{R0} = 0.001$  p.u., 无穷大系统母线电压  $U_0 = 1.0$  p.u。

### 4.2 实例计算

建立如式(8)描述的微分代数模型, 当输出函数系数矩阵选取为

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & -221 & 0.6 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.7 \end{bmatrix}$$

$i$  空间反馈系数矩阵  $\mathbf{K}$  选取为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & \\ & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 & \\ & 25 \end{bmatrix}$$

借助哈特曼-格鲁勃曼(Hartman-Grobman)定理可得到非线性控制系统的一次近似系统, 并将系统闭环特征根配置在以下位置:  $s_1 = -7.29 + j2.96$ ,  $s_2 = -7.29 - j2.96$ ,  $s_3 = -25.00$ ,  $s_4 = -50.00$ 。

为便于对比, 本文还运用了文献[20]介绍的微分几何非线性反馈精确线性化方法(Nonlinear Feedback Accurate Linearization Control, NFALC)设计了控制律, 选取的输出函数为

$$\begin{cases} h_1(x, y) = \Delta\delta \\ h_2(x, y) = \Delta y_R \end{cases}$$

### 4.3 仿真结果分析

#### 4.3.1 输入机械功率扰动

系统在 1 s 时, 发电机有功输入阶跃 10%, 仿真系统有关量  $\Delta P_g$ 、 $\Delta U_g$ 、 $\omega$ 、 $\delta$  响应曲线如图 2 所示。图 2(a)中可以看出, 应用 DASMINC 方法机端有功输出比 NFALC 方法更快跟踪给定值, 且动态过程超调量小。图 2(b)表明该扰动下用 NFALC 方法机端电压会发生 3.5% 的静态偏差(符合电压偏差标准), 而 DASMINC 方法机端电压无偏移。由图 2(c)可以看出 DASMINC 方法能更快平息频率振荡,

保证系统稳定运行。图 2(d)表明当增大有功输入时, NFALC 方法将发电机功角保持在初始值,而 DASMINC 方法控制发电机功角随输入功率增加而适当拉大,符合功角特性,更有利于提高机组稳定性。

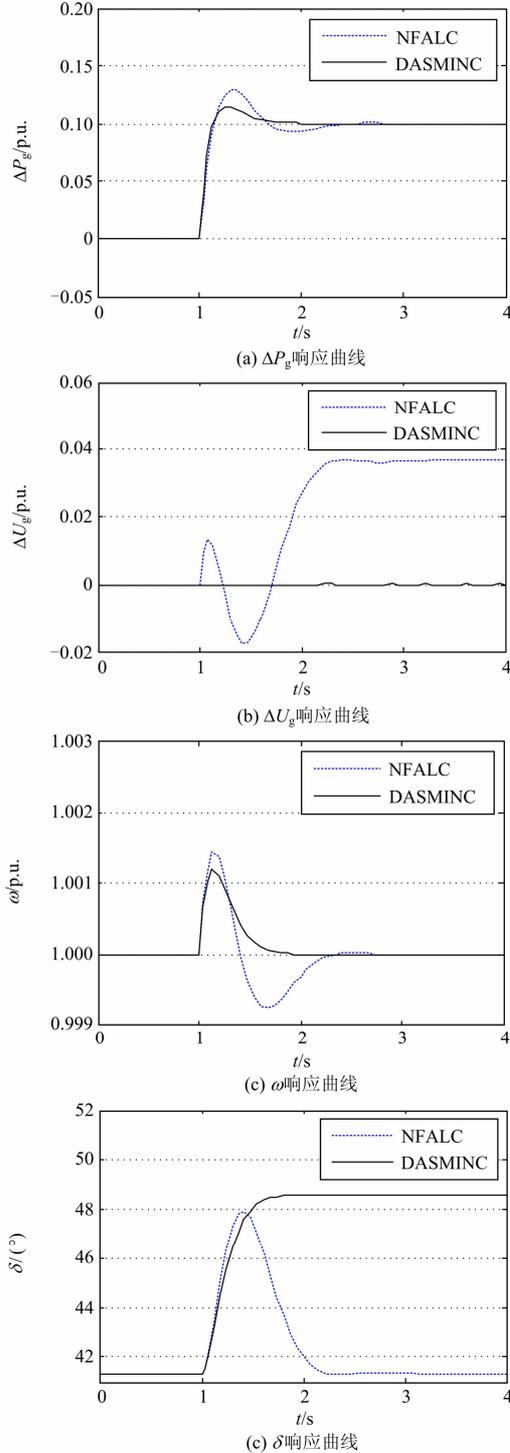


图 2 输入功率扰动时系统响应曲线

Fig. 2 Responses of the system to disturbance of power regulation

### 4.3.2 输电线路三相短路扰动

在 0.5 s 时,发电机与电网联接线路发生三相短路, 0.15 s 后故障切除并重合闸成功,TCBR 发挥作用的机理如图 3 所示。系统在点 1 短路时,TCBR 能迅速投入,吸收大量过剩机械功率,减小发电机加速面积,在点 2 短路切除后可继续吸收过剩机械功率,增大减速面积,直至点 3 重合闸成功后仍可根据转速的摆动情况调节 TCBR 的阻值,从而大幅提高发电机暂态稳定极限。

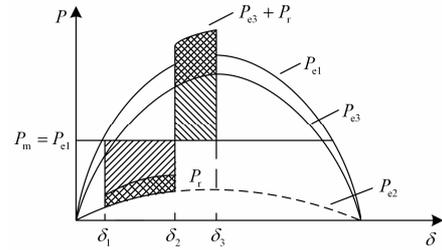
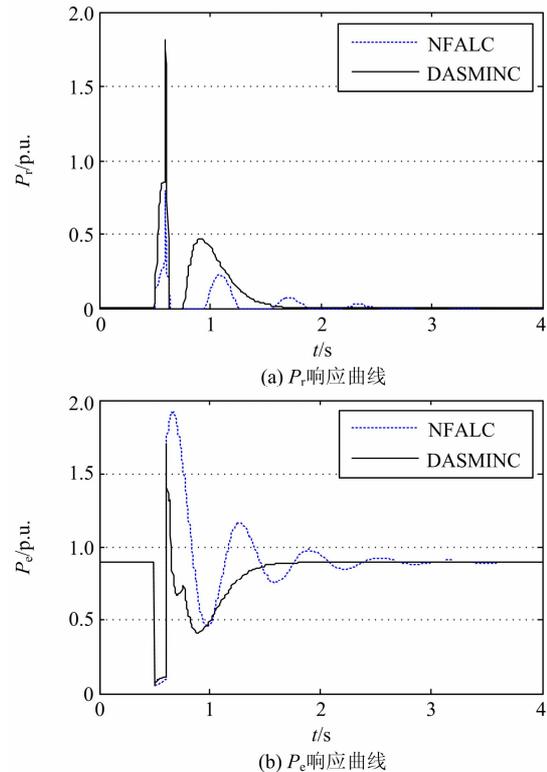


图 3 短路时 TCBR 对单机无穷大系统功角特性的影响

Fig. 3 Power-angle characteristics of the system with TCBR

图 4 为系统相关状态量  $P_T$ 、 $P_e$ 、 $U_g$ 、 $\delta$  的动态响应曲线。综合对比图中两种控制方法, DASMINC 能在短路时更快、更多地提供制动功率,减小故障对系统功率输送的影响,功角振荡幅度更小,动态过程平息更快。



(b)  $P_e$  响应曲线

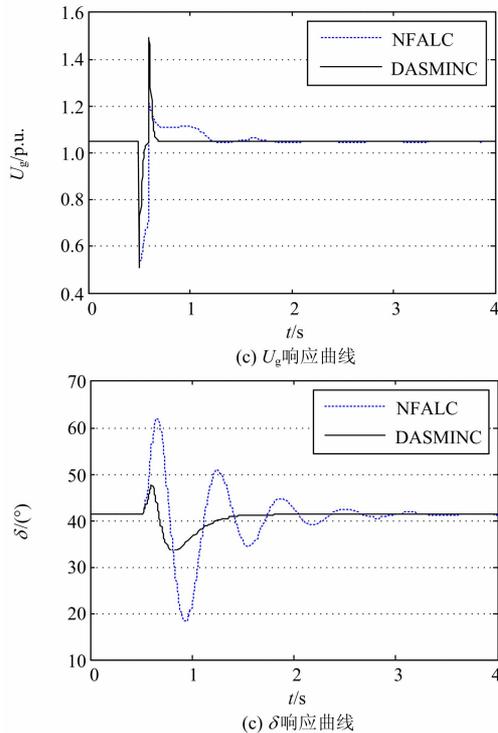


图 4 三相短路扰动时系统响应曲线

Fig. 4 Responses of the system to disturbance of three-phase short circuit

本文还通过重复时域仿真得到三相短路扰动下系统暂稳极限切除时间来比较所设计控制律对系统暂态稳定性的改善程度。如表 1 所示, DASMING 比 NFALC 的暂态极限切除时间提高了 12.5%。

表 1 系统三相短路的暂稳极限切除时间

Table 1 Critical clearing time for transient stability to a three-phase fault

控制方法	No control	NFALC	DASMING
极限切除时间/s	0.163	0.287	0.323

图 5 所示为联络线三相短路 0.3 s 后切除故障的

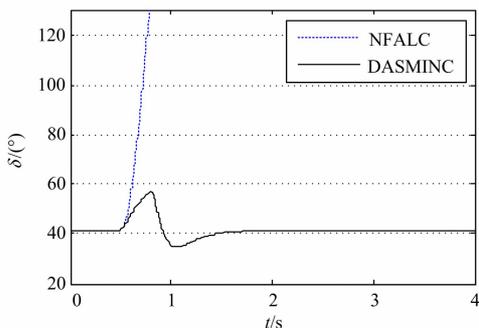


图 5 短路 0.3 s 后切除故障的功角响应曲线

Fig. 5 Responses of the generator angle to disturbance of three-phase short circuit (0.3 s)

功角仿真图。可看出 NFALC 方法控制的发电机功角发散了, DASMING 仍可使发电机功角恢复稳定。

## 5 结论

TCBR 的阻值连续可调, 使用先进的控制方法可大大提高电力系统暂态稳定极限, 文中采用的 DASMING 设计方法能有效解决复杂微分代数模型下电力系统的非线性控制问题。仿真结果表明 DASMING 方法通过合理配置特征根的位置, 在输入机械功率突变和三相短路等强扰动下都能使电力系统快速恢复稳定且能较好地协调各状态量的动、静态性能; 显著提高了水电站输电系统的暂态稳定性。

## 参考文献

- [1] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105-110.  
LIN Li, YANG Yihan. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 105-110.
- [2] SHELTON M L, WINKELMAN P F, MITTELSTADT W A, et al. Bonneville power administration 1400-MW braking resistor[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 602-611.
- [3] RAHIM A H M A, ALAMGIR D A H. A closed-loop quasi-optimal dynamic braking resistor and shunt reactor control strategy for transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 879-886.
- [4] 王建全, 王伟胜, 吴涛, 等. 电力系统最优电气制动控制的新算法[J]. 中国电力, 1997, 30(8): 6-7.  
WANG Jianquan, WANG Weisheng, WU Tao, et al. New algorithm for optimal electric braking control in power systems[J]. Electric Power, 1997, 30(8): 6-7.
- [5] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 436-438.
- [6] 崔建业, 骆济寿, 彭文娟. 用先进的动态电气制动提高电力系统稳定性[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 23-27.  
CUI Jianye, LUO Jishou, PENG Wenjuan. Improving power system stability by advanced dynamic braking[J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 23-27.
- [7] 付蓉, 韩敬东, 鞠平, 等. 可控制动电阻的模糊神经网络控制[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 13-16.  
FU Rong, HAN Jingdong, JU Ping, et al. Fuzzy neural network control of thyristor controlled braking resistance (TCBR)[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 13-16.

- [8] 张雪焱, 黄少锋. 可控制动电阻控制器广域协调优化方法研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 114-118.  
ZHANG Xueyan, HUANG Shaofeng. Wide area coordinated optimization method of thyristor controlled braking resistor controllers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 114-118.
- [9] 彭疆南, 孙元章, 王海风. 基于能量整形的可控制动电阻暂态稳定控制器设计--单机无穷大系统篇[J]. 现代电力, 2005, 22(1): 13-20.  
PENG Jiangnan, SUN Yuanzhang, WANG Haifeng. Novel TCBR controller for transient stability improvement via energy-shaping-a SMIB case[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(1): 13-20.
- [10] 王杰, 陈陈. 电力系统中微分代数模型的非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 15-18.  
WANG Jie, CHEN Chen. Nonlinear control of differential algebraic model in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 15-18.
- [11] 李啸骢, 邓裕文, 游晓枫, 等. 单输入单输出微分代数系统的多指标非线性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 47-52.  
LI Xiaocong, DENG Yuwen, YOU Xiaofeng, et al. Multi-index nonlinear control design for SISO differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 47-52.
- [12] 孙郁松, 孙元章, 卢强, 等. 水轮机调节系统非线性  $H_\infty$  控制规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 56-59.  
SUN Yusong, SUN Yuanzhang, LU Qiang, et al. Research on nonlinear robust control strategy for hydroelectric generator's valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 56-59.
- [13] 汪旻, 刘辉, 陈武晖, 等. 水轮发电机组励磁与水门协调控制设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 262-268.  
WANG Ni, LIU Hui, CHEN Wuhui, et al. Coordinated control for the excitation and governing of hydroturbine generator set[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 262-268.
- [14] RUBAAI A, OFOLI A R, COBBINAH D, et al. Two-layer supervisory controller-based thyristor-controlled braking resistor for transient stability crisis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1539-1547.
- [15] 李世芳, 王杰. 含 STATCOM 装置的凸极式发电机励磁稳定控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 173-180.  
LI Shifang, WANG Jie. Excitation stabilization control design of salient-pole generators with STATCOM of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 173-180.
- [16] 李啸骢, 谢醉冰, 肖明, 等. 基于目标全息反馈的 STATCOM 与发电机励磁的多目标非线性协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 109-115.  
LI Xiaocong, XIE Zuibing, XIAO Ming, et al. Multi-objective coordinated control for STATCOM and generator excitation based on objective holographic feedbacks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 109-115.
- [17] 李康, 王杰. 电池储能系统与发电机励磁的多指标非线性协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 25-31.  
LI Kang, WANG Jie. Multi-index nonlinear coordinated control for battery energy storage system and generator excitation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 25-31.
- [18] 张焯, 胡书举, 董志然, 等. 电励磁风力发电机组励磁控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 255-260.  
ZHANG Ye, HU Shuju, DONG Zhiran, et al. Excitation regulation study of electrical-excited wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 255-260.
- [19] 杨培宏, 刘文颖, 魏毅立, 等. 基于自适应逆推变结构方法的非线性励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 125-129.  
YANG Peihong, LIU Wenyong, WEI Yili, et al. Nonlinear excitation control based on adaptive backstepping and variable structure method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 125-129.
- [20] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 123-138.

收稿日期: 2014-09-13; 修回日期: 2015-04-03

作者简介:

李啸骢(1959-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 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;

郑涛(1989-), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为电力系统稳定与控制. E-mail: tonyzheng03@163.com

(编辑 葛艳娜)