

水轮机水门、励磁与电气制动系统非线性综合控制

李啸骢, 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: 针对混流式水轮机水门、励磁及电阻制动控制系统非线性时变、非最小相位的特性,建立了动态扩展的综合控制系统微分代数模型,采用微分代数多指标非线性控制方法求取反馈解耦控制律。通过哈特曼-格鲁勃曼定理,适当选择输出函数参数矩阵配置闭环控制系统特征根来使非线性系统渐近稳定,将扰动解耦,从而使系统得到优良控制性能。仿真结果表明该控制模型能很好地协调水轮机系统的动、静态性能,增强其抗强干扰的能力,有效地提高水电站输电系统的静态和暂态稳定性。

关键词: 水轮机调速; 励磁; 可控制动电阻; 微分代数模型; 非线性控制

中图分类号: TM 312; TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.015

0 引言

我国水力资源居世界首位,为了利用水力资源,我国已兴建了许多大型水电站,这些水电站一般距负荷中心较远,要经过远距离高压输电线路外送电能。远距离输电线路的传输能力受到暂态稳定极限的限制。为提高输电系统暂态稳定性,首先考虑减少强扰动后发电机机械功率与电磁功率的差额。对水轮机而言,动力调速系统的控制对象为导叶开度,由于有压引水系统的水流惯性,其不能像汽轮机那样进行快速汽门控制^[1]。因此,仅依靠动力调速系统的控制不能达到提高暂态稳定的要求,而需要采用快速励磁、电阻制动这些辅助措施的配合来缩短系统动态过程时间,以保证系统故障引起的振荡能够快速平息,保持发电机稳定运行。因此,对水轮机调速、励磁和电阻制动综合控制的研究很有必要。

电阻制动是提高水电站输送功率极限的十分有效的措施^[2]。随着现代电力电子技术迅猛发展,传统机械开关的投切制动电阻已被晶闸管静止开关控制的制动电阻 TCBR (Thyristor Controlled Braking Resistor) 所代替。TCBR 能准确控制制动电阻投切时间及电阻大小,有效提高系统暂态稳定性及阻尼系统振荡^[3]。近年来对 TCBR 的控制逐渐引起国内外学者的研究兴趣^[4-8]。

水轮机水力、机械、电气各个物理量动态关系复杂,整个控制系统数学模型具有高阶非线性时变特性^[9-11]。目前,为突破传统线性化 PID 控制的局限,已

针对水轮机进行了各种非线性控制方法的研究,如自适应控制、人工神经网络控制、微分几何反馈线性化、目标全息反馈法、 H_∞ 鲁棒控制等。本文运用微分代数多指标非线性控制 DASMNC (Differential Algebraic System Multi-Index Nonlinear Control) 理论,讨论混流式水轮发电机水门、励磁和电阻制动的综合控制问题。通过反馈参数矩阵参数选取可以任意配置控制系统特征根,使系统获得满意的控制效果。

1 混流式水轮发电机综合控制系统微分代数模型

一般水电站建在远离负荷中心的地区,通过高压长距离联络线与系统相联,因此水轮发电机与系统联系一般可近似为单机无穷大系统^[12-13]。图 1 为水轮发电机机端并联装有 TCBR 的单机无穷大电力系统示意图。图 1 中, E'_q 为水轮机暂态电势; δ 为发电机功角; x_T 为水电站升压变压器等效电抗; x_L 为单回线路等效电抗; U 为电网电压; P_0 、 Q_0 、 y_{R0} 分别为初始工况下输送电网的有功功率、无功功率及 TCBR 等效电导。由图 1 可知发电机输出电磁功率 P_g 可分为 TCBR 制动功率 P_r 和注入电网功率 P_e 。

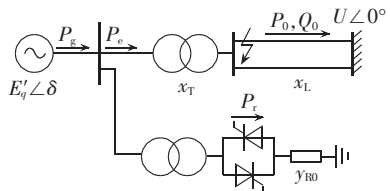


图 1 并有 TCBR 的单机无穷大系统示意图

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

忽略开关损耗,可设 TCBR 装置只吸收有功功率,将其看作可变电阻,TCBR 的动态过程可以等效为一阶惯性环节^[4,7]:

收稿日期:2015-06-27;修回日期:2016-03-29

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计划项目(桂科攻 14122006-29);广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267001),Guangxi Science and Technology Development Project(Department of Guangxi 14122006-29) and Natural Science Foundation of Guangxi(2014GXNSFAA118338)

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

其中, y_R 为 TCBR 的等效电导; u_R 为其控制量; T_R 为装置惯性时间常数。

混流式水轮机稳定运行时, 调速系统中导叶开度变化对转矩的影响如图 2 所示^[14]。图 2 中, m_t 为机械力矩; m_g 为动力系统干扰量; e_μ 、 e_h 、 e_x 、 $e_{q\mu}$ 、 e_{qh} 、 e_{qx} 为水轮机传递系数; μ 为导叶开度; h 和 q 分别为引水系统水压变化相对值和水流量; x 为机组转速偏差。

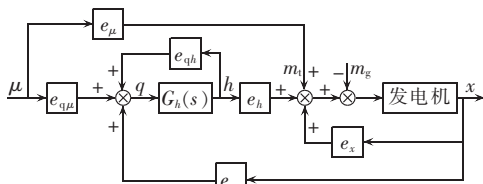


图 2 水轮机动力调速系统传递函数框图

Fig.2 Block diagram of transfer function of hydroturbine governor system

由图 2 可得混流式水轮机导叶开度到机械力矩的传递函数为:

$$G_T(s) = \frac{m_t(s)}{\mu(s)} = \frac{e_\mu + (e_{q\mu}e_h - e_{qh}e_\mu)G_h(s)}{1 - e_{qh}G_h(s)} \quad (2)$$

引水管道较短时, 考虑刚性水锤效应, 引水系统中的流量-水压传递函数 $G_h(s)$ 可表示为:

$$G_h(s) = -T_w s \quad (3)$$

其中, T_w 为水流惯性时间常数。

在理想工况下: $e_\mu = 1$ 、 $e_{q\mu} = 1$ 、 $e_h = 1.5$ 、 $e_{qh} = 0.5$ 。考虑频率偏离较小时, 发电机输入机械功率 P_m 约等于 m_t , 则可得混流式水轮机引水及调速系统状态方程为:

$$\dot{P}_m = 2(-P_m + \mu - T_w \dot{\mu}) / T_w \quad (4)$$

式(4)描述了一个典型的非最小相位环节, 正是因为这个环节的存在, 使水轮机的控制变得比较困难。

水轮机调节导叶开度的接力器数学模型由下式给出:

$$\dot{\mu} = (-\mu + u_w) / T_y \quad (5)$$

其中, T_y 为接力器时间常数; u_w 为导叶开度控制量。

图 2 中发电机采用快速励磁系统, 采用经典三阶模型描述^[15-16], 将式(1)、(4)、(5)与发电机三阶方程联立可得六阶控制系统数学模型:

$$\begin{cases} \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{d0}}(E'_q - u_f) \\ \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_J}(P_m - P_g) - \frac{D}{T_J}(\omega - 1) \\ \dot{P}_m = 2\left[-P_m + \left(1 + \frac{T_w}{T_y}\right)\mu\right] / T_w \\ \dot{\mu} = \frac{1}{T_y}(-\mu + u_w) \\ \dot{y}_R = \frac{1}{T_R}(-y_R + u_R) \end{cases} \quad (6)$$

其中, 励磁控制模型各个量的物理意义详见文献[15-18]。

定义 $x_e = x_T + x_L / 2$, 可得到 $dq0$ 坐标系下各电气量关系式:

$$\begin{cases} U_{gd} = x_q I_{gq} \\ U_{gq} = E'_q - x'_d I_{gd} \\ U_g^2 = U_{gd}^2 + U_{gq}^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{gd} = U_{gd} y_R + (U_{gq} - U \cos \delta) / x_e \\ I_{gq} = U_{gq} y_R + (U \sin \delta - U_{gd}) / x_e \end{cases} \quad (8)$$

$$E_q = U_{gq} + x'_d I_{gd} \quad (9)$$

$$P_g = U_{gd} I_{gd} + U_{gq} I_{gq} \quad (10)$$

联立式(7)~(10)可得代数约束变量表达式:

$$\begin{cases} I_{gd} = \frac{(x_q \Sigma + x_e^2 \gamma_R^2 x_q) E'_q + x_q x_e \gamma_R U \sin \delta - x_q \Sigma U \cos \delta}{x_q \Sigma x'_d \Sigma + x_e^2 \gamma_R^2 x'_d x_q} \\ I_{gq} = \frac{x_e^2 \gamma_R E'_q + x'_d \Sigma U \sin \delta - x'_d x_e \gamma_R U \cos \delta}{x_q \Sigma x'_d \Sigma + x_e^2 \gamma_R^2 x'_d x_q} \\ E_q = E'_q - (x_d - x'_d) I_{gd} \\ U_g^2 = (x_q I_{gq})^2 + (E'_q - x'_d I_{gd})^2 \\ P_g = [E'_q + (x_q - x'_d) I_{gq}] I_{gq} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $x'_d \Sigma = x'_d + x_e$; $x_q \Sigma = x_q + x_e$ 。设状态变量矩阵为 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T = [E'_q \ \delta \ \omega \ P_m \ \mu \ y_R]^T$; 代数变量的约束矩阵为 $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5]^T = [I_{gd} \ I_{gq} \ E_q \ U_g \ P_g]^T$; 控制量为 $\mathbf{u} = [u_f \ u_w \ u_R]^T$ 。那么控制系统模型式(6)可转换为标准的多输入多输出非线性微分代数系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \mathbf{u} \\ \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \mathbf{0} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} -w_3 / T'_{d0} \\ (x_3 - 1) \omega_0 \\ [x_4 - w_5 + D(x_3 - 1)] / T_J \\ 2[-x_4 + (1 + T_w / T_y) x_5] / T_w \\ -x_5 / T_y \\ -x_6 / T_R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} -1 / T'_{d0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 / T_y & 0 \\ 0 & 1 / T_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 / T_R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} a w_1 - (x_q \Sigma + x_e^2 \gamma_R^2 x_q^2) x_1 - x_q x_e U x_6 \sin x_2 + x_q \Sigma U \cos x_2 \\ a w_2 - x_e^2 \gamma_R^2 x_1 - x'_d \Sigma U \sin x_2 + x'_d x_e U x_6 \cos x_2 \\ w_3 - x_1 + (x_d - x'_d) w_1 \\ w_4^2 - (x_q w_2)^2 - (x_1 - x'_d w_1)^2 \\ w_5 - [x_1 + (x_q - x'_d) w_1] w_2 \\ a = x_q \Sigma x'_d \Sigma + x_e^2 \gamma_R^2 x_q^2 \end{bmatrix}$$

2 基于 DASMINEC 的水轮机综合控制器设计

2.1 DASMINEC 设计原理

考虑形式如式(12)的多输入多输出微分代数系统,DASMINEC 设计方法将输出函数 y 选取为如式(13)表示的状态变量 x 和代数约束变量 w 的线性组合:

$$h(x, w) = \begin{bmatrix} h_1(x, w) \\ \vdots \\ h_a(x, w) \end{bmatrix} = C_1 x + C_2 w \quad (13)$$

其中, C_1 和 C_2 分别称为状态变量参数矩阵和代数约束变量参数矩阵。

当输出函数对系统的总相对阶小于系统维数 n 时,可通过坐标变换 $i = \Phi(x, w)$ 将原系统解耦为 i 空间线性子系统和非线性子系统:

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = i_2, \dot{i}_2 = i_3, \dots, \dot{i}_{\beta_1} = v_1 \\ \vdots \\ \dot{i}_{\beta_{a-1}+1} = i_{\beta_{a-1}+2}, \dots, \dot{i}_{\beta_a} = v_a \\ \dot{i}_{\beta_a+1} = \eta_1(x, w), \dots, \dot{i}_n = \eta_{n-\beta_a}(x, w) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $v = [v_1 \dots v_a]^T = Bu + \alpha$, B 矩阵用于确定输出函数对系统总相对阶数,计算方法如下。

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

在 i 空间内对线性子系统采用最优二次型指标设计控制律 v ,然后由 v 反解出控制律 u :

$$u = -B^{-1}(\alpha + Ki) \quad (15)$$

其中, K 为反馈系数矩阵。联立式(9)和(11)可得最终扰动解耦控制律 u 为:

$$u = -B^{-1} \left(C_1 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^{r_1} x_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^{r_n} x_n \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^{r_1} w_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^{r_m} w_m \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} i_1 - i_{10} \\ \vdots \\ i_r - i_{r0} \end{bmatrix} \right) + u_0 \quad (16)$$

由式(16)可知 DASMINEC 的控制律由控制量初值与抗干扰部分组成,具有明确的物理意义。

2.2 系统动态扩展与参数矩阵的确定

根据微分代数系统反馈线性化理论,采用 DASMINEC 设计方法进行非线性系统部分精确线性化,零动态系统必须是渐近稳定的,这对线性子系统的优化控制设计才是有效的。对于水轮机综合控制系统这样一个复杂的、含非最小相位的系统,为了获得更好的控制效果,使之具有渐近稳定的零动态,可以引入一组变量 $x_g = \int_0^t \Delta P_g d\tau$,对控制系统进行动态扩展,扩展后的系统涵盖了原系统的所有动态^[19-20],

经动态扩展后式(6)控制系统模型变为:

$$\begin{cases} \dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{d0}'} (E_q' - u_r) \\ \dot{\delta} = (\omega - 1) \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_J} (P_m - P_g) - \frac{D}{T_J} (\omega - 1) \\ \dot{P}_m = 2[-P_m + (1 + T_w/T_y)\mu] / T_w \\ \dot{\mu} = \frac{1}{T_y} (-\mu + u_w) \\ \dot{y}_R = \frac{1}{T_R} (-y_R + u_R) \\ \dot{x}_g = P_g - P_{g0} \end{cases} \quad (17)$$

设计时选取的参数矩阵 C_1 和 C_2 对输出函数中状态量与代数约束量组合形式起到决定性作用,同时关系到系统零动态是否稳定,从而影响到整个水轮机系统综合控制效果。为充分提高暂态综合控制器的性能,参数矩阵的选定综合考虑以下因素:

(1)为使励磁控制器能同时起到传统自动电压调节器与电力系统稳定器所发挥的作用,将励磁控制输出函数选择为机端电压偏差 ΔU_g 与角速度偏差 $\Delta \omega$ 的组合;

(2)动力调速系统的首要控制目标是准确调配机组的有功出力、维持发电机转速恒定,所以导叶开度控制输出函数应包含水轮发电机有功 ΔP_g 和角速度偏差 $\Delta \omega$,同时对接力器的动态行为进行约束,要将 $\Delta \mu$ 也选入;

(3)对 TCBR 等效电导控制的目的是在故障中吸收过剩电磁功率,改善动态品质,有效阻尼系统低频振荡及次同步振荡,并且约束 TCBR 装置的动态行为,因此电导控制输出函数信息应有 ΔP_g 、 $\Delta \omega$ 和 TCBR 的等效电导变化 Δy_R 。

综上所述,本文将混流式水轮机 DASMINEC 综合控制参数矩阵 C_1 、 C_2 取为:

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{23} & 0 & c_{25} & 0 & c_{27} \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 & c_{36} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \tilde{c}_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{c}_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{c}_{35} \end{bmatrix}$$

则对应输出函数为:

$$\begin{cases} h_1(x, w) = c_{13} \Delta \omega + \tilde{c}_{14} \Delta U_g \\ h_2(x, w) = c_{23} \Delta \omega + c_{25} \Delta \mu + c_{27} x_g + \tilde{c}_{25} \Delta P_g \\ h_3(x, w) = c_{33} \Delta \omega + c_{36} \Delta y_R + \tilde{c}_{35} \Delta P_g \end{cases} \quad (18)$$

2.3 DASMINEC 控制律的计算

首先,针对拓展后的控制系统模型式(17)计算

输出函数式(18)对系统的相对阶:

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{w}} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{31} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & 0 & \sigma_{44} & 0 \\ \sigma_{51} & \sigma_{52} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & 0 & 0 & 0 & \rho_{16} & 0 \\ \rho_{21} & \rho_{22} & 0 & 0 & 0 & \rho_{26} & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \rho_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = x_q \Sigma x_d' \Sigma + x_e' x_d' x_q \gamma_R^2, \quad \sigma_{31} = x_d - x_d'$$

$$\sigma_{41} = 2x_d'(E_q' - x_d' I_{gd}), \quad \sigma_{42} = -2x_q^2 I_{gd}, \quad \sigma_{44} = 2U_g$$

$$\sigma_{51} = (x_d' - x_q) I_{gd}, \quad \sigma_{52} = (x_d' - x_q) I_{gd} - E_q'$$

$$\rho_{11} = -x_q \Sigma - x_e' x_q \gamma_R^2$$

$$\rho_{12} = -U(x_q \Sigma \sin \delta + x_q x_e \gamma_R \cos \delta)$$

$$\rho_{16} = 2x_e' x_d' x_q \gamma_R I_{gd} - 2x_e' x_q E_q' \gamma_R - x_q x_e U \sin \delta$$

$$\rho_{21} = -x_e' \gamma_R, \quad \rho_{22} = -x_d' \Sigma U \cos \delta - x_d' x_e U \gamma_R \sin \delta$$

$$\rho_{26} = 2x_e' x_d' x_q I_{gd} \gamma_R - x_e' E_q' + x_d' x_e U \cos \delta$$

$$\rho_{41} = 2x_d' I_{gd} - 2E_q', \quad \rho_{51} = -I_{gd}$$

代入 $\mathbf{B}$ 矩阵得:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} M_{g1} M_f^0 h_1 & M_{g2} M_f^0 h_1 & M_{g3} M_f^0 h_1 \\ M_{g1} M_f^0 h_2 & M_{g2} M_f^0 h_2 & M_{g3} M_f^0 h_2 \\ M_{g1} M_f^0 h_3 & M_{g2} M_f^0 h_3 & M_{g3} M_f^0 h_3 \end{bmatrix}$$

$$M_{gi} M_f^0 h_j = \left[\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{w}} \left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{w}} \right)^{-1} \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \right] \mathbf{g}_i \quad i, j = 1, 2, 3$$

将系统初始平衡点代入 $\mathbf{B}$ 矩阵, 可得矩阵为满秩矩阵, 所以输出函数对控制系统的总相对阶 $r = r_1 + r_2 + r_3 = 1 + 1 + 1 = 3$ 小于系统维数 7。需要另外构造 4 个光滑函数满足 $M_{gi} \eta_j(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = 0 (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4)$ 才可构成非线性变换。计算得出以下坐标变换满足条件:

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \mathbf{z} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ h_2(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ h_3(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta P_m + 2\Delta \mu \\ x_g \end{bmatrix}$$

最后, 根据式(16)可以求解得出 DASMINE 控制律 $\mathbf{u}$ 。

3 实例仿真分析

3.1 实例简介

本文的设计以广西某水电站 302 MW 混流式水轮机为实例, 水轮发电机参数为: $x_d = 1.090$ p.u., $x_q =$

0.728 p.u., $x_d' = 0.34$ p.u., $T_J = 7$ s, $T_{d0}' = 6.21$ s, $T_y = 0.5$ s, $T_w = 0.86$ s。TCBR 装置的惯性时间常数 $T_R = 0.02$ s, TCBR 电导限制 $\gamma_R(t) \in [0.001, 1.5]$ 。线路及变压器参数: $x_L = 0.242$ p.u., $x_T = 0.169$ p.u.。系统初始运行工况: 注入无穷大系统功率为 $P_0 = 0.9$ p.u., $Q_0 = 0.06$ p.u.; 机端电压 $U_{g0} = 1.05$ p.u., $\delta_0 = 40.8^\circ$, $\gamma_{R0} = 0.001$ p.u., 无穷大系统母线电压 $U_0 = 1.0$ p.u.。

3.2 实例计算

根据哈特曼-格鲁勃曼(Hartman-Grobman)定理, 非线性系统的稳定性可等价于其平衡点一阶近似系统的稳定性。本文先将闭环控制系统线性化, 代入初始值, 考察系统特征根, 若对特征根位置不满意, 则根据李雅普诺夫稳定判据进行修正, 最终确定合适的参数矩阵值。

将控制系统模型式(17)转化为如式(12)描述的微分代数模型, 当输出函数参数矩阵选取为:

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.0 & 0 & -297.2 & 0 & -64.5 \\ 0 & 0 & -221 & 0 & 0 & 0.7 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 39.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.6 \end{bmatrix}$$

i 空间反馈系数矩阵 $\mathbf{K}$ 选取为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & & \\ & k_{22} & \\ & & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 & & \\ & 35 & \\ & & 25 \end{bmatrix}$$

可将非线性控制系统的一次近似系统闭环特征根配置在以下位置: $s_1 = -6.42 + j1.52$, $s_2 = -6.42 - j1.52$, $s_3 = -0.64$, $s_4 = -0.66$, $s_5 = -50.00$, $s_6 = -35.00$, $s_7 = -25.00$ 。对应的零动态极点为: $s_1 = -6.42 + j1.52$, $s_2 = -6.42 - j1.52$, $s_3 = -0.64$, $s_4 = -0.66$ 。

为了与设计的 DASMINE 控制律进行对比, 本文还同时设计了抗扰线性最优控制律(ALOC), 得到线性闭环控制系统的特征根如下: $\tilde{s}_1 = -867.46$, $\tilde{s}_2 = -4.32 + j9.47$, $\tilde{s}_3 = -4.32 - j9.47$, $\tilde{s}_4 = -4.01 + j0.42$, $\tilde{s}_5 = -4.01 - j0.42$, $\tilde{s}_6 = -23.16$, $\tilde{s}_7 = -1.16$ 。

3.3 仿真结果分析

3.3.1 有功给定值扰动

为考察水轮机综合控制器对导叶控制的动态精度, 仿真实验在 1 s 时将有功功率设定值阶跃 10%。系统有关量 P_g , U_g , ω , P_r (均为标幺值) 动态响应曲线如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出, 水轮机调功时动态过程较缓慢, 在调功的初期, 输出有功功率出现了反调, 这是因为水轮机调速系统模型中存在非最小相位环节, 是水轮机组功率变化时的特有现象。对比图中 2 条曲线, DASMINE 综合控制器的输出电磁功

率 P_g 反调小,超调小,动态过程平滑。图 3(b)表明该扰动下 ALOC 控制器机端电压会发生较大幅度的波动,而 DASMINE 控制器机端电压毫无波动。从图 3(c)看出 DASMINE 控制器频率振荡小,保证了系统稳定运行。图 3(d)表明了 TCBR 的作用机理,当机组动力系统扰动时,DASMINE 控制的 TCBR 能迅速投入,更多地提供制动功率,减小功率差额,之后退出;而 ALOC 控制在调压后 TCBR 未退出,造成能量浪费。

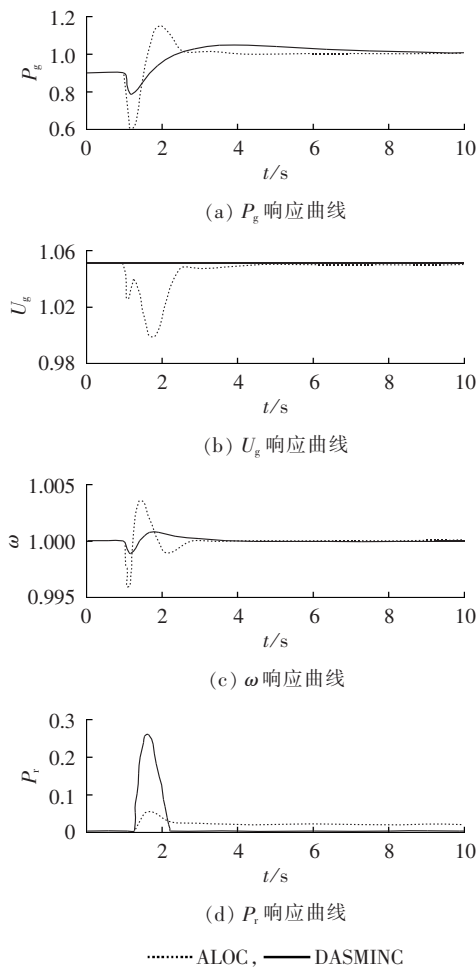


图 3 输入功率扰动下系统响应曲线
Fig.3 Response curves of system to power input disturbance

3.3.2 调压扰动

对运行中的发电机进行电压调节是水电站常见的一种操作。为考察发电机机端电压给定值发生变化后,控制器的动态调节速度和静态精度,在 1 s 时发电机机端电压给定值调高 5%,机组相关物理量 (ΔU_g 、 ΔP_g 、 γ_R 为标幺值)动态响应曲线如图 4 所示。对比图 4(a)、(b)、(c)可看出,DASMINE 综合控制器能迅速而准确地跟踪机端电压的变化,使水轮机更快过渡到新的运行工况下。图 4(d)说明了常规的调压操作不会使 TCBR 电导值发生稳态偏移。

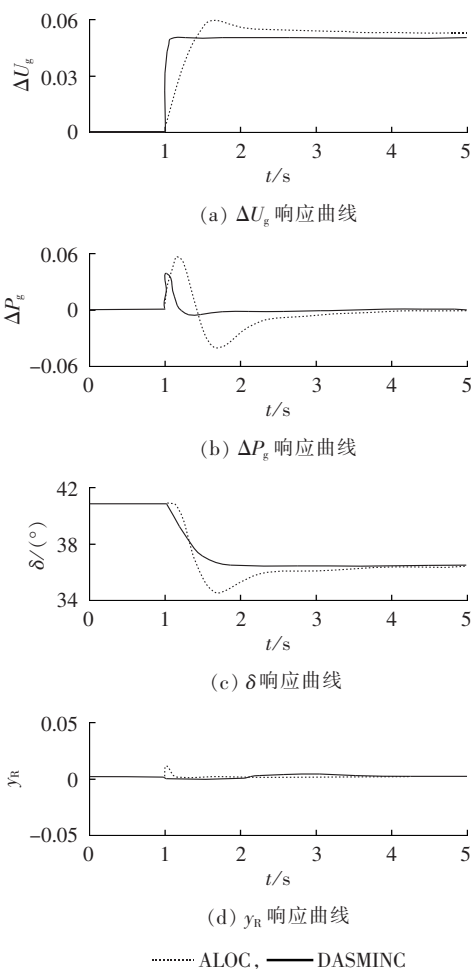


图 4 调压操作时系统响应曲线

Fig.4 Response curves of system to voltage-regulation operation

3.3.3 输电线路三相短路扰动

当系统发生大扰动,如三相短路故障时,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,在故障切除后可继续吸收过剩机械功率,增大减速面积,从而大幅提高发电机暂态稳定极限。

在 0.5 s 时,水电站与大电网高压联络线发生三相短路,0.15 s 后故障切除并重合闸成功,图 5 给出了 2 种综合控制方法及 TCBR 装置退出运行时 DASMINE 控制下系统相关状态量 (P_r 、 P_e 、 U_g 为标幺值)的仿真曲线。图 5(c)表明 TCBR 装置主要影响系统有功量,对机端电压基本无影响。对比图中 2 种综合控制方法,DASMINE 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,迅速平息功角振荡。图中对比也体现出在相同的控制律下 TCBR 装置对减小功率差额、提高系统暂态稳定极限、平抑发电机功角振荡所发挥出的重要作用。

表 1 给出了通过重复时域仿真得到的本系统模型三相短路故障下暂稳极限切除时间。从中看出采用 DASMINE 控制律同时装设 TCBR 的水轮机输电系统暂稳极限得到了非常显著的提高,虽然工程实

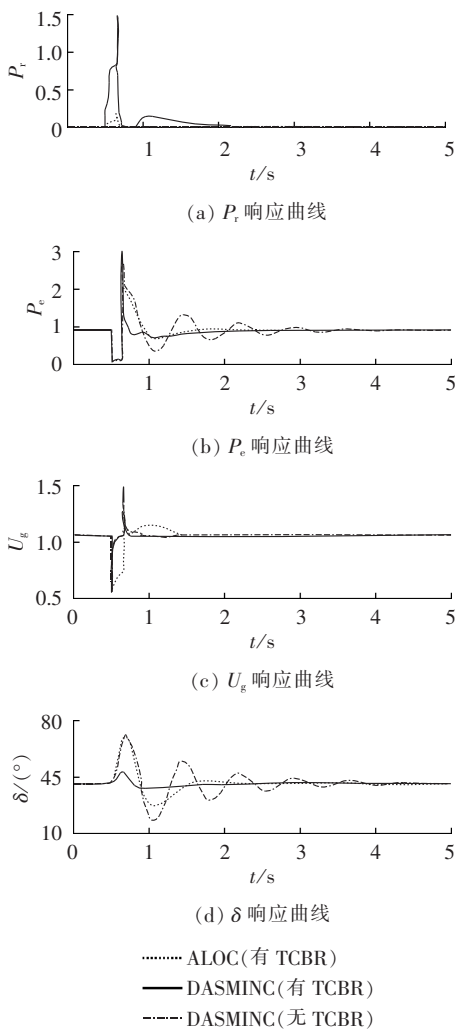


图 5 三相短路时系统响应曲线

Fig.5 Response curves of system to three-phase short circuit

表 1 系统三相短路故障下暂稳极限切除时间
Table 1 Critical clearing time of three-phase short circuit fault for transient stability

控制方法	极限切除时间/s
DASMINC(无 TCBR)	0.31
ALOC(有 TCBR)	0.39
DASMINC(有 TCBR)	2.75

际中不可能出现这么长时间的短路故障,但可以通过仿真实验来研究这一极端现象,从而得到极限切除时间,这正体现出了仿真实验的价值。

4 结论

本文建立了动态拓展的混流式水轮机调速、励磁和电阻制动综合控制系统微分代数模型,并采用 DASMINC 设计方法进行非线性抗扰控制律的设计, DASMINC 通过一阶求导就能求出控制律,便于工程实现,有效解决了复杂电力系统微分代数模型的非线性控制问题。仿真结果表明了 DASMINC 方法在导叶开度受扰、电压调节和三相短路扰动下都能使

系统快速恢复稳定且能较满意地协调控制量的动、静态性能;装设 TCBR 装置能显著提高水轮机抗大扰动的能力,提高水电站输电系统输送功率极限。

参考文献:

[1] 师彪,李郁侠,何常胜,等. 水轮机智能调速系统数学模型仿真及参数辨识[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):10-15.
SHI Biao,LI Yuxia,HE Changsheng,et al. Hydraulic turbine intelligent governing system mathematical model and its parameters identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(4):10-15.

[2] 唐忠. 现代电力工程与技术基础[M]. 北京:中国电力出版社, 2012:65-66.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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. Improve power system stability by advanced dynamic braking[J]. Power System Technology, 1997,21(10):23-27.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 张雪焱,黄少锋. 基于 PMU 的可控制动电阻协调控制器研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(5):55-58.
ZHANG Xueyan,HUANG Shaofeng. PMU based TCBR coordinated controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(5):55-58.

[9] 方红庆,沈祖谔,吴恺. 水轮机调节系统非线性扰动解耦控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):151-155.
FANG Hongqing,SHEN Zuyi,WU Kai. Nonlinear disturbance decoupling control for hydraulic turbogenerators regulating system [J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):151-155.

[10] 孔繁锦,吴杰康. 水轮机调速系统的 H_{∞} 双回路鲁棒控制策略[J]. 电网技术,2011,35(8):212-217.
KONG Fannie,WU Jiekang. An H_{∞} double-loop robust control of hydro turbine speed governor[J]. Power System Technology, 2011,35(8):212-217.

[11] 陈帝伊,郑栋,马孝义,等. 混流式水轮机调节系统建模与非线性动力学分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(32):116-123.
CHEN Diyi,ZHENG Dong,MA Xiaoyi,et al. Nonlinear dynamical analysis and mathematical model of hydro-turbine governing systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(32): 116-123.

- [12] 汪旋,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.
- [13] 肖健梅,张科,王锡淮. 基于预测函数与线性多变量反馈控制的同步发电机励磁控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):153-159.
XIAO Jianmei,ZHANG Ke,WANG Xihuai. Excitation control based on predictive function control and linear multi-variable feedback control for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):153-159.
- [14] 李啸骢,程时杰,韦化,等. TCSC 与水轮发电机励磁和水门的多指标非线性协调控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(11):21-27.
LI Xiaocong,CHENG Shijie,WEI Hua,et al. Multi-index nonlinear coordinated control for TCSC and hydroturbine generator excitation and governor[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(11):21-27.
- [15] 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.
- [16] 李啸骢,邓裕文,李秋文,等. ASVG 与发电机励磁的多指标非线性协调控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):47-51.
LI Xiaocong,DENG Yuwen,LI Qiuwen,et al. Multi-index nonlinear coordinated control of ASVG and generator excitation [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):47-51.
- [17] 程启明,程尹曼,薛阳,等. 同步发电机励磁控制方法的发展与展望[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):108-117.
CHENG Qiming,CHENG Yiman,XUE Yang,et al. Development and prospects of excitation control methods for synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):108-117.
- [18] 李江,李国庆,邹维,等. 固定增益与变增益最优励磁控制策略的小扰动稳定域研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):97-100.
LI Jiang,LI Guoqing,ZOU Wei,et al. Small signal stability region of power system with fixed or variable gain optimal excitation control [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):97-100.
- [19] 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,2008:212-222.
- [20] van NIEUWATADT M,RATHINAM M,MURRAY R M. Differential flatness and absolute equivalence[C]//Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control. Lake Buena Vista,FL,USA:[s.n.],1994:326-332.

作者简介:



李啸骢

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、电力系统非线性控制(E-mail:lhtlht@gxu.edu.cn);

郑涛(1989—),男,福建宁德人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:tony Zheng03@163.com)。

Integrated nonlinear control of hydroturbine governor and excitation & TCBR system

LI Xiaocong,ZHENG Tao,LIANG Zhijian,XU Junhua

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

Abstract: A dynamically expanded differential algebraic model of integrated control system for the mixed-flow hydroturbine governor and the excitation & TCBR(Thyristor Controlled Braking Resistor) system is established according to their characteristics of nonlinear time-varying and non-minimum phase,which applies the DASMINC(Differential Algebraic System Multi-Index Nonlinear Control) design method to obtain the feedback decoupling control law. Based on the Hartman-Grobman theorem,the output function parameter matrix is appropriately selected to configure the eigenvalues of closed-loop control system,which gradually stabilize the nonlinear system to decouple the disturbances and achieve the excellent control performance. Simulative results show that,the proposed control system model can well coordinate the dynamic and static performances of hydroturbine system,enhance its anti-interference ability,and effectively improve the transient and steady-state stability of the power transmission system of hydropower station.

Key words: hydroturbine governor; excitation; thyristor controlled braking resistor; differential algebraic model; nonlinear control