汽轮发电机组汽门开度和励磁系统的自抗扰综合控制

余 涛[1]，沈善德[1]，李东海[2]，朱守真[1]
（1. 清华大学电机系，北京市 100084；2. 清华大学热能系，北京市 100084）

摘要：通过构造扩张状态观测器对受控对象内环进行动态输出反馈线性化，对补偿线性化后的对象外环进行预期动力学设计的方法，提出了基于自抗扰技术的汽轮发电机汽门和励磁综合控制策略。本控制方法解决了传统单输入单输出自抗扰控制方法在处理多输入多输出对象时协调率难以确定的问题。数字仿真表明，该控制方法不仅能较好地处理汽门和励磁控制的协调性，而且对模型的内外扰表现出了很好的适应性和鲁棒性。

关键词：汽轮发电机组；自抗扰控制；反馈线性化；多输入多输出系统
中图分类号：TM761.11；O231.3

0 引言

一般工业系统对象都具有非线性、时变、多变量耦合的特点，经典的 PID 控制器和多变量的线性最优控制器已经得到了广泛应用，但两者均不能保证闭环系统在远离设计运行点的大范围渐近稳定。近 20 年来，反馈线性化方法作为非线性系统控制理论的一种有效方法得到了迅速发展，相继出现了基于微分几何理论的反馈线性化[1]、直接反馈线性化[2]和逆系统[3]方法等。以上方法均建立在对象模型是精确的这一假设基础上，基本上都可以看做精确反馈线性化方法。但是，精确反馈线性化方法得到的控制规律理论上对模型不具备参数鲁棒性，而且其数学推导在处理高阶对象模型时变得异常繁琐，不利于广大工程人员所接受。这都促使我们去寻找其他鲁棒性更高、数学表达更为简洁的反馈线性化方法。

扩张状态观测器(ESO)[4]的出现为一类不确定系统的反馈确定化提供了一条新思路。大量的理论和仿真研究已证明[5~7]：在低阶情况下，扩张状态观测器能够非常有效地观测具有较高不确定性的非线性系统的内外扰。如果将此内外扰的估计值补偿到控制规律中，即可达到反馈线性化的目的。

迄今为止，基于 ESO 的自抗扰控制器[8]的应用研究已延伸到了电力系统控制领域，在单输入单输出(SISO)控制问题的研究中取得了很多有益的成果[9~11]，特别是文献[10]已对励磁控制的 ESO 动态反馈线性化进行了系统的研究，从而为本文对于多输入多输出(MIMO)问题的研究奠定了理论和实践基础。文献[12,13]利用多个 SISO 自抗扰控制器实现了 MIMO 对象的综合控制，但由于自抗扰控制器参数整定的复杂性，多个 SISO 自抗扰控制器之间的协调率往往无法确定，因而也很难对整个MIMO系统的闭环稳定性给出一个满意的数学解释。

本文通过构造 ESO 对受控对象内环进行动态输出反馈线性化，对补偿线性化后的对象外环进行预期动力学设计的控制方法，并应用于大型汽轮发电机组稳定控制，提出了基于 ESO 的汽轮发电机汽门和励磁自抗扰综合控制策略。本控制方法解决了传统 SISO 自抗扰控制器在处理 MIMO 对象时协调率难以确定的问题，对整个闭环系统的稳定性给出了满意的数学解释。数字仿真表明，本控制方法不仅能较好地处理汽门和励磁控制的协调性，而且对模型内外扰表现出了很好的适应性和鲁棒性。

1 自抗扰综合控制器原理

1.1 基于扩张状态观测器的动态反馈线性化

设未知外扰作用的 SISO 对象的 I-O 描述为：

$$y^{(n)} = f(y^{(n-1)},\cdots,\dot{y},y,W,t) + b(t)u(t) \quad (1)$$

式中：$f(\cdot)$为复杂非线性函数；$W(t)$为未知外扰；$b(t)$为非线性函数；$y(t)$为对象的输出；$u(t)$为控制规律。

如取 b_0 为 $b(t)$在平衡点的数值，则对象(1)又可以写成：

$$y^{(n)} = f(y^{(n-1)},\cdots,\dot{y},y,W,t) + (b(t) - b_0)u(t) + b_0u(t) \quad (2)$$

令 $a(t) = f(\cdot) + (b(t) - b_0)u(t) = y^{(n)} - b_0u(t)$，它表示未知内外扰作用，称 $a(t)$ 为对象(1) 的总扰动。如取 $n+1$ 维状态变量如下：

$$[z_1,z_2,\cdots,z_n,z_{n+1}] = [y,\dot{y},\cdots,y^{(n-1)},a]$$

收稿日期：2002-08-17；修回日期：2002-09-06。
国家自然科学基金资助项目(50277021)；国家电力公司科技资助项目(SP(2002)18124)。

则对象(1)的 $n+1$ 维扩张状态方程有如下描述：

$$\begin{cases}\dot{z}_1 = z_2\\ \dot{z}_2 = z_3\\ \vdots\\ \dot{z}_{n-1} = z_n\\ \dot{z}_n = a(t) + b_0u(t) = z_{n+1} + b_0u(t)\\ \dot{z}_{n+1} = \dot{a}(t)\\ y = z_1\end{cases} \tag{3}$$

此时，对于对象(3)的状态观测器，可以利用文献[4]提出的方法构造，其状态方程如下：

$$\begin{cases}\dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 - g_1(\hat{z} - z_1)\\ \dot{\hat{z}}_2 = \hat{z}_3 - g_2(\hat{z} - z_1)\\ \quad\vdots\\ \dot{\hat{z}}_{n-1} = \hat{z}_n - g_{n-1}(\hat{z}_1 - z_1)\\ \dot{\hat{z}}_n = \hat{z}_{n+1} + b_0u(t) - g_n(\hat{z}_1 - z_1)\\ \dot{\hat{z}}_{n+1} = \dot{a}(t) - g_{n+1}(\hat{z}_1 - z_1) \approx - g_{n+1}(\hat{z}_1 - z_1)\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\hat{z}_i$ 为状态观测量；$g_i(\hat{z}_1 - z_1)$ 为非线性校正函数；$i=1,2,\cdots,n+1$。

文献[7]给出了扩张状态观测器(4)的非线性函数 $g_i(\hat{z}_1 - z_1)$ 的选取原则。根据此原则，本文选取 $g_i(\hat{z}_1 - z_1) = \beta_i\tanh(\hat{z}_1 - z_1)$。增益 β_i 的选取可利用极点配置的方法获得。作者曾采用双曲正切函数等非线性函数与文献[4]提出的非线性函数进行了大量的仿真比较，得到了与文献[7]一致的结论：非线性 ESO 的动态品质主要取决于增益 β_i，在工程要求不很高的情况下，完全可以选择形式更为简单的非线性函数，从而降低 ESO 参数整定的复杂度。

顺便指出，除了文献[4]提出的方法以外，也可用诸如文献[14]提出的 Luenberger 型观测器或文献[15]提出的高增益观测器(high-gain observer)来构造其非线性状态观测器。

文献[7]已证明，在 $a(t)$ 及 $\dot{a}(t)$ 有界的条件下，当选取了足够强的非线性函数 $g_i(\hat{z}_1 - z_1)$，系统(4)渐近稳定，而且具有足够高的响应速度跟踪各个扩张状态，即 $\hat{z}_1 \to z_1, \hat{z}_2 \to z_2, \cdots, \hat{z}_n \to z_n, \hat{z}_{n+1} \to a(t)$，这就是 ESO 的特点，增益 β_i 越高，其响应速度越快，估计的精度越高。但是根据极点配置的原理，不难得到以下结论：当系统(4)的阶数增大时，要满足 ESO 渐近稳定且具有较高的响应速度，增益 β_i 会急剧增大，这将严重阻碍 ESO 在工业上的实际应用。因此在实际应用中，应尽量利用可测量的状态量，从而尽量降低 ESO 的阶数，以保证其动态响应品质。

当选取了适当的 ESO，即可获得对象(1)的内外扰 $a(t)$ 令人满意的估计值 $\hat{a}(t)$。显然，如果在控制规律 $u(t)$ 中包含了 $-\hat{a}(t)$ 项，进而动态补偿对象(1)，则经补偿以后的对象可以表示为：

$$y^{(n)} = (a(t) - \hat{a}(t)) + V(t) = \varepsilon + V(t) \tag{5}$$

式中：ε 为 $a(t)$ 的观测误差；$V(t)$ 为虚拟输入。

$V(t)$ 与实际控制规律 u(t) 满足以下关系式：

$$u(t) = \frac{V(t) - \hat{a}(t)}{b_0} \tag{6}$$

由于 ESO 渐近稳定，即满足 $\lim\limits_{t\to\infty} \varepsilon = 0$，此时对象(5)经 ESO 动态反馈补偿后已经实现了线性化。

1.2 外环的预期动力学设计

对于一个 MIMO 仿射非线性系统而言，其状态方程可以表示为：

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{W},t) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{X},t)\boldsymbol{U}(t) \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{f}(\cdot)$ 为状态向量 $\boldsymbol{X}$ 和未知外扰 $\boldsymbol{W}$ 的非线性函数向量；$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{X},t)$ 为非线性函数向量；$\boldsymbol{U}(t)$ 为控制输入。

对于系统(7)，可以根据受控对象的具体特点选择可测量的同维变量作为状态变量；然后寻找一种满足局部微分同坯映射条件[1]的非线性映射 $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X})$，将系统中的非线性因素全部集中体现在含有控制输入的状态方程中。微分同坯映射 $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X})$ 应满足 $\boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Phi}^{-1}$ 光滑，且 Jacobian 矩阵在 $\boldsymbol{X}_0$ 的邻域内非奇异。非线性映射 $\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{X})$ 可以根据微分几何精确线性化原理求得。有关 MIMO 系统的各种线性化标准型的讨论可详见文献[1]。

至此，可利用多个 ESO 来对含有非线性因素和控制量的各项分别进行动态反馈线性化。系统(7)经过上述方法处理以后，可以得到一个用虚拟输入表示的线性定常系统：

$$\dot{\boldsymbol{Z}} = \tilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{Z} + \tilde{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{V} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{Z}$ 为重新选择的状态变量向量；$\tilde{\boldsymbol{A}}, \tilde{\boldsymbol{B}}$ 为经补偿线性化后的常数矩阵；$\boldsymbol{V}(t)$ 为虚拟输入向量。

$\boldsymbol{V}(t)$ 可根据实际对象的预期动力学特性进行设计。常用的设计方法包括极点配置方法和 LQ 最优控制方法。外环的预期动力学特性决定了整个经内环 ESO 补偿线性化后的闭环系统(8)的稳定性。

为了满足 MIMO 系统协调控制的要求，本文采用了 LQR 方法进行外环的预期动力学特性设计。$\boldsymbol{Q}$ 阵反映了各个状态变量的权重关系；$\boldsymbol{R}$ 阵则反映了各个虚拟输入量之间的权重关系。通过求解黎卡提(Riccatti)方程：

$$-\boldsymbol{PA} - \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{PBR}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} - \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{0} \tag{9}$$

则可获得虚拟输入的最优控制规律：

$$\boldsymbol{V} = -\boldsymbol{RB}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{PZ} = -\boldsymbol{KZ} \tag{10}$$

然后，通过与式(6)联立，即可以获得实际控制规律 $\boldsymbol{U}(t)$。

2 汽轮发电机自抗扰综合控制器

2.1 数学模型

图 1 为单机(汽轮发电机)无穷大系统。

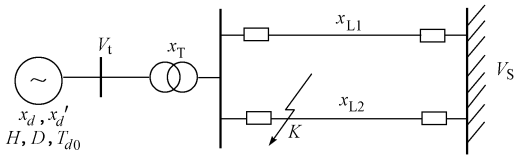


图 1 单机无穷大系统结构示意图

Fig. 1 Structure of single-machine infinite-bus system

对于如图 1 所示系统,汽门和励磁控制数学模型[16]可以表示为:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \tag{11}$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H}P_m - \frac{\omega_0}{H}P_e - \frac{D}{H}(\omega - \omega_0) \tag{12}$$

$$\dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{d0}}E_q + \frac{1}{T_{d0}}E_f \tag{13}$$

$$\dot{P}_m = -\frac{1}{T_B}(P_m - P_{m0}) + \frac{1}{T_B}\mu \tag{14}$$

$$\dot{\mu} = -\frac{1}{T_\mu}(\mu - \mu_0) + \frac{1}{T_\mu}V_g \tag{15}$$

代数方程为:

$$P_e = \frac{E_q'V_S}{x_{d\Sigma}}\sin\delta + V_S^2\frac{x_{d\Sigma}' - x_{d\Sigma}}{2x_{d\Sigma}'x_{d\Sigma}}\sin 2\delta \tag{16}$$

$$E_q' = \frac{x_{d\Sigma}'}{x_{d\Sigma}}E_q + \frac{(x_d - x_d')V_S\cos\delta}{x_{d\Sigma}} \tag{17}$$

$$V_t = \frac{\sqrt{E_q^2x_s^2 + V_S^2x_d^2 + 2x_sx_dE_qV_S\cos\delta}}{x_{d\Sigma}} \tag{18}$$

式中:δ 为发电机功角;ω 为发电机转速,$\omega_0 = 314.16$ rad/s;E_q' 为 q 轴暂态电势;E_q 为 q 轴电势;V_t 为发电机端电压;V_S 为无穷大母线电压;H 为机械转动惯量;D 为阻尼系数;P_m 为汽轮机机械功率;P_e 为发电机电磁功率;μ 为汽门开度;T_{d0} 为发电机定子开路时励磁绕组的时间常数;T_μ 为汽轮机高压及中压调节门油动机的时间常数;T_B 为汽轮机高压及中压蒸汽管道的惯性时间常数;$x_s = x_T + x_L/2$,为输电系统总电抗;$x_{L1} = x_{L2} = x_L$;x_d' 和 $x_{d\Sigma}'$ 分别为发电机的 d 轴暂态电抗和计入了输电系统总电抗后的 d 轴暂态总电抗;x_d 和 $x_{d\Sigma}$ 分别为发电机的 d 轴同步电抗和计入了输电系统总电抗后的 d 轴总同步电抗;E_f 和 V_g 分别为励磁和汽门的控制输入。

2.2 汽轮发电机自抗扰综合控制器的设计

根据汽轮发电机数学模型(5 阶系统)的特点,尽量选择发电机的可测量为系统的状态变量,可取状态变量 $\boldsymbol{X} = [\delta, \omega, P_e, P_m, \mu]^T$。

由于电磁功率 P_e 是一个非线性函数,必须将其非线性因素集中到含有控制输入的方程中。将式(16)对时间求导,可得:

$$\dot{P}_e = S_{E'}\dot{\delta} + R_{E'}\dot{E}_q' \tag{19}$$

$$S_{E'} = \frac{\partial P_e}{\partial\delta} = \frac{E_q'V_S}{x_{d\Sigma}'}\cos\delta + V_S^2\frac{x_{d\Sigma}' - x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}'x_{d\Sigma}}\cos 2\delta$$

$$R_{E'} = \frac{\partial P_e}{\partial E_q'} = \frac{V_S}{x_{d\Sigma}'}\sin\delta$$

将式(17)代入式(13),消去 E_q,可得:

$$\dot{E}_q' = -\frac{x_{d\Sigma}E_q'}{x_{d\Sigma}'T_{d0}} + \frac{(x_d - x_d')V_S\cos\delta}{x_{d\Sigma}'T_{d0}} + \frac{E_f}{T_{d0}} \tag{20}$$

联立式(19)和式(20)可得下式:

$$\dot{P}_e = S_{E'}\dot{\delta} - \frac{x_{d\Sigma}E_q'}{x_{d\Sigma}'T_{d0}}R_{E'} + \frac{(x_d - x_d')V_S\cos\delta}{x_{d\Sigma}'T_{d0}}R_{E'} + \frac{R_{E'}}{T_{d0}}E_f \tag{21}$$

显然,式(21)为一个符合对象(1)形式的一阶对象,可用一个二阶 ESO 对其进行动态反馈线性化为:

$$\dot{P}_e = V_f \tag{22}$$

式中:V_f 为虚拟的励磁控制输入。

将式(22)替换式(13),若系统的数学模型采用偏差量表示形式,则汽轮发电机数学模型化为线性的定常系统:

$$\dot{\boldsymbol{Z}} = \tilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{Z} + \tilde{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{V} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{Z} = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta P_e, \Delta P_m, \Delta\mu]^T$$

$$\boldsymbol{V} = [\Delta V_f, \Delta V_g]^T$$

$$\tilde{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{H} & \frac{\omega_0}{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_B} & \frac{1}{T_B} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_\mu} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_\mu^{-1} \end{bmatrix}^T$$

观察式(23),不难发现该式不显含与输电系统有关的各种参数,理论上对以上参数具有很强的鲁棒性。后面的仿真结果也证实了这一点。

最后,根据外环预期动力学特性的设计方法,求解有关的虚拟控制输入规律和实际控制输入规律。

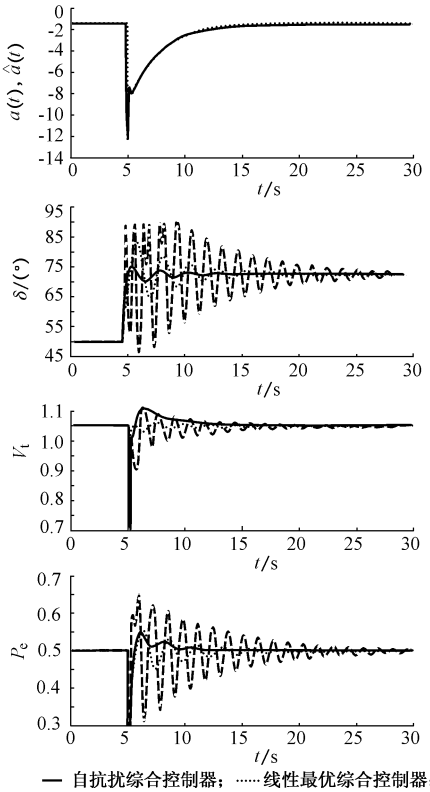
3 仿真算例

仿真采用的单机无穷大系统的参数取自某电厂一台 100 MW 汽轮发电机组及其输电线路的设计值[16]:$H = 7.764$,$D = 1.43$,$T_{d0} = 5.85$ s,$T_\mu = 0.15$ s,$T_B = 0.2$ s,$x_s = x_T + x_L/2 = 0.1 + 1.46/2$

$=0.83, x_d' = 0.333, x_d = 1.314$。发电机稳态工作点为：$P_{e0}=0.5, \delta_0 = 50°, V_{t0}=1.05$。考虑励磁系统限幅作用，励磁系统强励定值倍数为额定功率的3倍。

对于仿真对象，可以得到以下结果：

a. 对于内环二阶ESO，$b_0 = \left.\frac{R_{E'}}{T_{d0}}\right|_{t=t_0} = 0.138$，经过仿真比较，取增益 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2] = [500, 200]$ 即可获得满意的跟踪效果，总扰动 $a(t)$ 的跟踪结果可参见图2和图3。



— 自抗扰综合控制器；……线性最优综合控制器；
--- PSS励磁控制，PI汽门控制

图2 参数确定条件下故障扰动后的响应曲线
Fig. 2 System response to the fault with the designed parameters

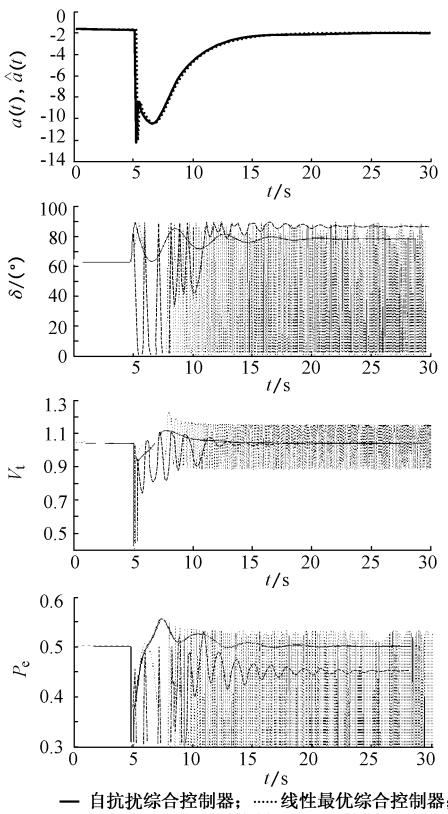
b. 对于外环控制，取 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}[100,500,5,5,1]$，$\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}[1,4]$，可以得到外环控制规律：

$$\begin{aligned}[\Delta V_f, \Delta V_g]^T = [&9.8\Delta\delta + 22.3\Delta\omega - 40.4\Delta P_e + \\ &35.7\Delta P_m + 4.0\Delta\mu, \\ &-0.88\Delta\delta - 2.0\Delta\omega + 6.6\Delta P_e - \\ &6.0\Delta P_m - 1.5\Delta\mu]^T\end{aligned}$$

c. 如果考虑到实际系统中功角测量比较困难，同时考虑到励磁系统对机端电压和无功输出的调节作用，应引入机端电压作为控制量。因此，可在平衡点作近似线性化[17]，求得：

$$\Delta\delta(t) = 1.48\Delta P_e - 1.53\Delta V_t$$

代入外环控制规律，又可得最终外环控制规律：



— 自抗扰综合控制器；……线性最优综合控制器；
--- PSS励磁控制，PI汽门控制

图3 参数存在较大误差条件下故障扰动后的响应曲线
Fig. 3 System response to the fault with the modified parameters

$$\begin{aligned}[\Delta V_f, \Delta V_g]^T = [&-14.5\Delta P_e + 22.3\Delta\omega - \\ &25.4\Delta V_t + 35.7\Delta P_m + 4.0\Delta\mu, \\ &1.3\Delta P_e - 2.0\Delta\omega + 5.3\Delta V_t - \\ &6.0\Delta P_m - 1.5\Delta\mu]^T\end{aligned}$$

控制效果的比较采用以下两种方案：

a. 经典控制方法[17]，即励磁系统采用PSS控制方式，汽门控制采用PI控制方式。

b. 线性最优控制方法[17]，即工作点附近的近似线性化方法，如取 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}[50,500,10^3,50,1]$，$\boldsymbol{R}=\mathrm{diag}[1,1]$，可得：

$$\begin{aligned}[\Delta E_f, \Delta V_g]^T = [&-13.5\Delta P_e + 4.6\Delta\omega - \\ &4.5\Delta V_t + 8.1\Delta P_m + 0.8\Delta\mu, \\ &33.4\Delta P_e - 21.6\Delta\omega + 16.1\Delta V_t - \\ &50.1\Delta P_m - 9.9\Delta\mu]^T\end{aligned}$$

下面研究输电系统发生永久三相故障扰动时（即 $t=5$ s时，输电线路一回靠近变压器出口处发生永久性三相短路，短路维持0.2 s后，保护动作并切除故障线路）闭环系统的动态响应：

a. 在系统参数确定的情况下，闭环系统主要状态量的动态响应曲线如图2所示。

b. 考虑系统参数存在较大误差。控制器参数不

变,系统参数更改为现场试验后的辨识值:$T_{d0}=6.2$ s,$x_d=1.806$,$x_d'=0.286$,$x_L=1.9$,$H=6.80$,$D=1.04$。在故障扰动下,闭环系统主要状态量的动态响应曲线如图 3 所示。

当系统参数确定的条件下,如图 2 所示,自抗扰综合控制器功角及电磁功率的超调量和调节时间都小于线性最优控制器和经典控制器,其控制性能明显优于后面两种控制器。由于机端电压和功角两者指标不能兼顾,所以,线性最优控制器在控制机端电压方面超调量要小于自抗扰控制器,但两者的调节时间基本相当。

在很多情况下,在设计控制器的时候往往只能获得对象的设计参数,而实际参数总存在一定的误差。当设计参数和实际参数存在较大误差时,如图 3 所示,拥有自抗扰综合控制器的发电机系统依然能稳定,控制性能良好;而对于线性最优控制器则闭环系统已经失稳;经典控制器的性能则严重恶化,已不能维持其原有输出功率和机端电压。显然,由于 ESO 适当地补偿了模型内扰的影响,自抗扰综合控制器表现出了很好的鲁棒性。此仿真结果与本文的理论分析也是相符的。

4 结语

自抗扰控制器是一种适用于不确定系统的具有高鲁棒性能的控制器,其抗扰性能主要归功于 ESO 对内外扰动的动态观测和补偿能力。本文提出的综合控制器的结构和原理已经与最初的 SISO 自抗扰控制器有所不同,之所以依然使用了"自抗扰控制器"的名称,是由于其内环控制的核心也是 ESO,其优异的控制适应性和鲁棒性在数字仿真中得到了进一步的证实。

电力系统具有高度非线性、时变、强耦合的特点,但是大多数元件都可获得较为精确的数学模型。因此,我们在设计电力系统自抗扰控制器时,无须把受控对象完全看成一个不确定对象,可以尽可能地利用数学模型的确定性信息及可测量状态量,简化自抗扰控制器结构,从而可用本文所提出的方法为外环系统设计预期的动力学特性。

本文提出的综合控制器的另一大特点就是,在外环控制中利用了全状态反馈和 LQ 最优控制原理,这在很大程度上解决了传统 SISO 自抗扰控制器应用于 MIMO 系统协调控制时协调率难以确定的问题,从而从数学上对 MIMO 系统的自抗扰控制器的设计给出了一个较为满意的数学解释。今后的工作是准备将本文提出的综合控制器原理应用于更为复杂的电力系统 MIMO 对象,进一步验证本控制方法的有效性。

参 考 文 献

1 Isidori A. Nonlinear Control Systems. 2nd Ed. Berlin (Germany): Springer-Verlag, 1989

2 李 华(Li Hua). 直接大范围线性化理论在电力系统稳定控制中的应用:〔博士学位论文〕(Direct Large-scale Linearization Theory and Its Application to Electric Power Systems, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 1991

3 李春文,冯元琨 (Li Chunwen, Feng Yuankun). 多变量非线性系统的逆系统方法(Multi-variables Nonlinear System with the Inverse System Method). 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1991

4 韩京清(Han Jingqin). 一类不确定对象的扩张状态观测器(An Extended State Observer for a Class of Uncertain Plant). 控制与决策(Control and Decision-making), 1995, 10(1)

5 韩京清,张 荣 (Han Jingqin, Zhang Rong). 二阶扩张状态观测器的误差分析(Error Analysis of Second-order Extended State Observer). 系统科学与数学 (System Science and Mathematics), 1999, 19(4)

6 黄 一,韩京清(Huang Yi, Han Jingqin). 非线性连续二阶扩张状态观测器的分析与设计(Analysis and Design of Nonlinear Continuous Second-order Extended State Observer). 科学通报(Science Paper), 2000, 45(13)

7 康忠健,陈学允(Kang Zhongjian, Chen Xueyun). 非线性扩张状态观测器的一种设计方法(A Design Method of Nonlinear Extension State Observer). 电机与控制学报(Electric Machines and Control), 2001, 5(3)

8 韩京清(Han Jingqin). 自抗扰控制器及其应用(Auto-disturbance-rejection Controller and Its Application). 控制与决策(Control and Decision-making), 1998, 13(1)

9 刘 翔,李东海,姜学智(Liu Xiang, Li Donghai, Jiang Xuezhi). 水轮发电机组调速系统的自抗扰控制(Auto-disturbance-rejection Control for Speed Regulation of Hydroelectric Units). 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University(Sci & Tech)), 2001, 41(10)

10 高 龙,韩俊生,李崇坚,等(Gao Long, Han Junsheng, Li Chongjian, et al). 非线性鲁棒自抗扰控制器在电力系统中的应用(Nonlinear Robust Auto-disturbance-rejection Controller for Power System). 清华大学学报(自然科学版) (Journal of Tsinghua University(Sci & Tech)), 2000, 40(3)

11 焦连伟,陈寿孙,王晓平(Jiao Lianwei, Chen Shoushun, Wang Xiaoping). 电力系统自抗扰控制器(Auto-disturbance-rejection Controller for Power Systems). 清华大学学报(自然科学版) (Journal of Tsinghua University(Sci & Tech)), 1999, 39(3)

12 冯 光,黄立培,朱东起(Feng Guang, Huang Lipei, Zhu Dongqi). 异步电机的新型非线性自抗扰控制器的研究(Study of a Novel Nonlinear Auto-disturbance-rejection Controller for Electrical Machines). 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University(Sci & Tech)), 1999, 39(3)

13 刘 翔,姜学智,李东海(Liu Xiang, Jiang Xuezhi, Li Donghai). 火电单元机组机炉协调自抗扰控制(Coordinated Auto-disturbance-rejection Control for Turbine-boiler of Thermal Generating Unit). 控制理论与应用(Control Theory and Its Application), 2001, 18(8)

14 Atassi A N, Khalil H K. Separation Results for the Stabilization of Nonlinear System Using Different High-gain

Observer Designs. System & Control Letters, 2000(39): 183～191

15 Ciccarella G, Dallamora M, Germani A. A Luenberger-like Observer for Nonlinear Systems. Int J Control, 1993,57(3): 537～556

16 沈善德(Shen Shande). 电力系统辨识(Electric Power System Identification). 北京: 清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),1993

17 卢 强,王仲鸿,韩英铎(Lu Qiang, Wang Zhonghong, Han Yingduo). 输电系统最优控制(Linear Quadratic Control for Electric Transmission System). 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press),1982

余 涛(1974—),男,博士研究生,主要研究方向为AC-DC电力系统的控制理论和仿真研究。E-mail: andy_yt99@mails.tsinghua.edu.cn

沈善德(1935—),男,教授,长期从事电力系统建模和参数辨识等研究工作。

李东海(1963—),男,博士,副教授,从事大型工业控制系统仿真及非线性控制方面的研究。

NONLINEAR COORDINATED AUTO-DISTURBANCE-REJECTION GOVERNOR AND EXCITATION CONTROLLER FOR SYNCHRONOUS GENERATORS

Yu Tao, Shen Shande, Li Donghai, Zhu Shouzhen (Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper develops a novel coordinated nonlinear auto-disturbance-rejection controller for the steam valve and the exciting system of thermal generating units. A new dynamic feedback linearization method based on a nonlinear extended state observer is introduced, and the anticipating dynamic characteristic design for the linearized system is also demonstrated. The simulation results show that the designed controller has excellent control performance, especially including outstanding adaptability and robustness against external disturbances and model uncertainties.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277021) and Science and Technology Research Project of the State Power Company of China (No. SP(2002)18124).

Key words: thermal generating unit; auto-disturbance-rejection control; feedback linearization; multi-input multi-output (MIMO) nonlinear system