

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.05.021

# 基于 Minimax 理论的多机电力系统 干扰抑制控制器设计

常 玲<sup>1,2</sup>, 井元伟<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳城市建设学院 信息与控制工程系, 辽宁 沈阳 110167)

**摘 要:** 为了解决具有耦合性能的多机电力系统的干扰抑制问题,提出了一种基于 Minimax 理论的干扰抑制算法. 该方法将广义哈密顿理论进行改进,建立多机励磁系统的伪广义哈密顿形式,并将 Minimax 理论引入到具有干扰的多机电力系统中. 通过构造与性能函数有关的检验函数,对多机励磁系统的最坏干扰程度进行计算,确定最大破坏程度下的干扰抑制控制器. 该方法避免了对系统干扰程度的假设,降低了传统干扰抑制方法因为不等式放缩等原因造成的保守性. 仿真结果表明,在大扰动影响下,该方法和控制策略能够使系统状态快速收敛于平衡点,能够有效提高电力系统的暂态稳定性能.

**关 键 词:** Minimax; 哈密顿系统; 干扰抑制; 多机; 励磁系统

**中图分类号:** N 93      **文献标志码:** A      **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:** 1005-3026(2020)05-0736-05



## Design of Disturbance Suppression Controller for Multi-machine Power Systems Based on Minimax Theory

CHANG Ling<sup>1,2</sup>, JING Yuan-wei<sup>1</sup>

(1. School of Information & Control Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. Department of Information and Control Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, China. Corresponding author: CHANG Ling, E-mail: changling0321@163.com)

**Abstract:** A disturbance suppression algorithm based on Minimax theory is proposed for solving the disturbance suppression of multi-machine power systems with coupling performance. A pseudo-generalized Hamilton form is established based on modifying generalized Hamilton system for multi-machine excitation system. By introducing the Minimax theory into the Hamiltonian power system with disturbances, the disturbance suppression controller is determined based on the worst disturbance situation. The degree of disturbance presumption can be avoided and the conservatism of the traditional method can be reduced. Simulation results show that the method and the control strategy can make the system state converge to the initial equilibrium point rapidly during large disturbances, which effectively improves the transient stability performance of power systems.

**Key words:** Minimax; Hamilton system; disturbance suppression; multi-machine; excitation system

电力系统运行过程中,存在许多影响其稳定性的因素,如线路上负荷的波动、电力元件的短路故障以及失去子系统间接联等情况. 为了保障用电的可靠性,电力系统应具有承受干扰的能力. 同时,在最坏的情况下,系统仍可控且无大范围连锁式停电的情况发生. 文献[1]采用微分几何与线性最优控制理论相结合方法,完成了单机电力系

统的励磁与汽门控制设计. 文献[2]提出一种新的改进的直接反馈线性化方法,并应用于电力系统的自适应非线性励磁控制,有效调节了电力系统的机端电压. 文献[3]采用自适应 backstepping 的方法,讨论了单机电力系统鲁棒控制器设计问题,所得结果可使系统对于干扰具有快速的收敛性能. 虽然单机电力系统的鲁棒控制方法逐渐成熟,

但是随着并入电力系统的发电机组越来越多,导致大规模、超高压机组互联等电力系统的非线性、强耦合性能越来越突出. 因此,多机电力系统的稳定性和抗干扰能力的研究尤为重要. 随着学者们对 Hamilton 理论的深入研究,使得其在电力系统中得到了较好的应用与实现. 文献[4]给出了一般系统广义耗散 Hamilton 实现的充分条件,该条件进一步应用到了简单的电力系统中,得到了双机系统的局部耗散 Hamilton 实现. 文献[5]基于非线性微分-代数系统(NDAS)的 Hamilton 实现问题,提出了一种改进的 Hamilton 系统,通过重构系统结构矩阵对  $H$  函数进行能量整形,给出了镇定控制器的设计方法. 文献[6-7]结合广义 Hamilton 能量理论,研究了电力系统控制器的设计问题. 文献[8]分别在两种情况下建立了结构保持多机电力系统的广义 Hamilton 模型. 其中,一种情况为不考虑转移电导,另一种情况为同时考虑自导纳和互电纳,而不考虑互电导. 文献[9]则在考虑互电导的情况下,构建了改进的 Hamilton 系统,可称为伪广义 Hamilton 系统. 对于多机电力系统的干扰抑制问题,学者们在  $L_2$  干扰抑制和自适应  $H_\infty$  控制上已经取得了许多成果. 但是在处理干扰问题上,多采用对不等式进行放缩的方式,这从某种程度上增加了系统的保守性.

经研究发现,基于 Minimax 理论的控制方法对于抑制突发性的大干扰具有较好效果<sup>[10]</sup>,且已有结果<sup>[11]</sup>将其应用于单机电力系统的干扰抑制问题研究中. 文献[10]针对具有晶闸管控制串联补偿器(thyristor controlled series compensation, TCSC)的单机无限大电力系统,采用 Minimax 和 backstepping 相结合的方法,提出了一种有效的输出反馈控制方法. 文献[11]将 Minimax 理论引入到耗散 Hamilton 系统中,对 TCSC 单机无限大电力系统,设计了干扰抑制控制器. 基于上述讨论,本文将考虑多机间互电导影响存在时,多机电力系统的控制问题,并对原有 Hamilton 理论进行改进. 运用 Minimax 方法对系统干扰项进行处理,通过构造与性能指标相关的检验函数,准确估计最大干扰对系统的影响,改善传统干扰处理方法<sup>[12-14]</sup>的保守性.

## 1 多机电力系统伪广义 Hamilton 模型建立

考虑多机电力系统数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega_s \omega_i, \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{M_i} [P_{mi} - D_i \omega_i - G_{ii} E_{qi}'^2 - \\ &E_{qi}' \sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj}' (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij})] + \varepsilon_{i1}, \\ \dot{E}_{qi}' &= \frac{1}{T_{doi}'} [-b_i E_{qi}' - c_i \sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj}' (G_{ij} \sin \delta_{ij} - \\ &B_{ij} \cos \delta_{ij}) + E_{tdsi} + u_{fi}] + \varepsilon_{i2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中:  $b_i = 1 - (X_{di} - X_{di}') B_{ii}$ ;  $c_i = X_{di} - X_{di}'$ ;  $X_{di}$  为发电机  $d$  轴同步电抗;  $X_{di}'$  为  $d$  轴暂态电抗;  $\omega_i$  为发电机角速度;  $\omega_s$  为发电机同步角速度;  $T_{doi}'$  为  $d$  轴开路时间常数;  $M_i$  为发电机惯性时间常数;  $D_i$  为阻尼系数;  $P_{mi}$  为机械功率;  $E_{qi}'$  为  $q$  轴暂态电势;  $E_{tdsi}$  为系统稳态运行时的励磁电压;  $u_{fi}$  为发电机励磁输入电压;  $\varepsilon_{i1}$  和  $\varepsilon_{i2}$  为有界扰动,分别表示机械功率扰动和励磁绕组参数扰动.

选择式(2)的 Hamilton 函数:

$$\begin{aligned} H(\delta, \omega, E_q') &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_s \omega_i^2 + \\ &\sum_{i=1}^n P_{mi}' (\delta_{is} - \delta_i) + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2c_i} (E_{qi}' - \frac{1}{b_i} E_{tdsi}')^2 + \\ &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (E_{qis}' E_{qjs}' B_{ij} \cos \delta_{ijs} - E_{qi}' E_{qj}' B_{ij} \cos \delta_{ij}). \end{aligned} \quad (2)$$

将  $H(\delta, \omega, E_q')$  对各状态变量求一阶偏导数,可得

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial x_1} &= -P_{mi}' + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qi}' E_{qj}' B_{ij} \sin \delta_{ij}, \\ \frac{\partial H}{\partial x_2} &= M_i \omega_s \omega_i, \\ \frac{\partial H}{\partial x_3} &= \frac{b_i}{c_i} (E_{qi}' - \frac{1}{b_i} E_{tdsi}') - \sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj}' B_{ij} \cos \delta_{ij}. \end{aligned} \right.$$

构造伪广义 Hamilton 系统:

$$\dot{x}_i = [J_i - R_i] \frac{\partial H(x)}{\partial x_i} + p_i(x_i) + g_i u_{fi} + \tilde{g}_i \varepsilon_i. \quad (3)$$

其中,  $p_i$  为状态变量  $x$  的有界映射函数,则

$$J_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M_i} & 0 \\ -\frac{1}{M_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_i}{M_i^2 \omega_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_i}{T_{doi}'} \end{bmatrix},$$

$$p_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{E_{qi}' \sum_{i,j=1, j \neq i}^n E_{qj}' G_{ij} \cos \sigma_{ij}}{M_i} \\ -\frac{c_i}{T_{doi}'} \sum_{i,j=1, j \neq i}^n E_{qj}' G_{ij} \sin \sigma_{ij} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{doi}} \end{bmatrix}^T, \tilde{\mathbf{g}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \boldsymbol{\varepsilon}_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i1} \\ \varepsilon_{i2} \end{bmatrix}.$$

选择新的能量函数<sup>[6]</sup>:

$$\mathbf{W}(x) = \mathbf{H}(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^3 \int_{x_{i0}}^{x_k} \xi_{ik}(x_k) dx_k - \mathbf{H}(x_0). \quad (4)$$

其中,

$$\xi_{ik}(x_k) = \begin{cases} \bar{p}_{ik}(x_1, x_{20}, x_{30}), k=1; \\ \bar{p}_{ik}(x_{10}, x_2, x_{30}), k=2; \\ \bar{p}_{ik}(x_{10}, x_{20}, x_3), k=3. \end{cases}$$

$$\bar{\mathbf{p}}_i(x) = \mathbf{M}_i^{-1}(x) \mathbf{p}_i(x) = [\bar{p}_{i1}(x), \bar{p}_{i2}(x), \bar{p}_{i3}(x)]^T. \quad (5)$$

则式(3)可以表示为

$$\dot{x}_i = [\mathbf{J}_i - \mathbf{R}_i] \frac{\partial \mathbf{W}(x)}{\partial x_i} + \mathbf{g}_i \hat{u}_{fi} + \boldsymbol{\eta}_i + \tilde{\mathbf{g}}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i. \quad (6)$$

其中,  $\boldsymbol{\eta}_i = \mathbf{p}_i(x) - \bar{\mathbf{p}}_i(x)$  为有界参数且

$$\frac{\partial \mathbf{W}(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial \mathbf{H}(x)}{\partial x_i} + \mathbf{M}_i^{-1}(x) \mathbf{p}_i(x).$$

将式(6)的最后两项写成

$$\mathbf{G}_i \boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\eta}_i(x) + \tilde{\mathbf{g}}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i.$$

其中,  $\boldsymbol{\omega}_i$  包含了系统的不确定扰动项和有界向量的共同影响. 可看做是新的有界扰动向量. 则

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \boldsymbol{\omega}_i = \begin{bmatrix} \omega_{i1} \\ \omega_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\boldsymbol{\eta}_i + \tilde{\mathbf{g}}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i).$$

则式(3)可以表示为

$$\dot{x}_i = [\mathbf{J}_i - \mathbf{R}_i] \frac{\partial \mathbf{W}(x)}{\partial x_i} + \mathbf{g}_i(x_i) \hat{u}_{fi} + \mathbf{G}_i \boldsymbol{\omega}_i. \quad (7)$$

2 基于 Minimax 理论的干扰抑制控制器设计

定理 1 针对伪广义 Hamilton 系统:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= [\mathbf{J}(x) - \mathbf{R}(x)] \frac{\partial \mathbf{W}(x)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g} \mathbf{u} + \mathbf{G} \boldsymbol{\omega}, \\ \mathbf{z} &= \mathbf{h}(x) \mathbf{g}^T \frac{\partial \mathbf{W}(x)}{\partial \mathbf{x}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

若存在半正定的能量存储函数(4)和(9), 干扰抑制常数  $\gamma$  以及控制器(10):

$$\mathbf{Q}(x) = \nabla \mathbf{W}^T \cdot (\mathbf{R} - \frac{1}{2\gamma^2} \mathbf{G} \mathbf{G}^T) \cdot \nabla \mathbf{W}, \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{2} \mathbf{h}^T \mathbf{h} \mathbf{g}^T \nabla \mathbf{W}. \quad (10)$$

使得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R} - \frac{1}{2\gamma^2} \mathbf{G} \mathbf{G}^T &\geq 0, \\ \dot{\mathbf{W}} + \mathbf{Q}(x) &\leq \frac{1}{2} \{ \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2 - \| \mathbf{Z} \|^2 \}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则系统具有干扰抑制特性, 并且在平衡点处渐进稳定.

证明: 定义二次型性能指标函数:

$$\mathbf{J}_0 = \int_0^\infty (\| \mathbf{Z} \|^2 - \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2). \quad (12)$$

根据 Minimax 理论选择检验函数:

$$\boldsymbol{\Psi} = \dot{\mathbf{W}} + \frac{1}{2} (\| \mathbf{Z} \|^2 - \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2). \quad (13)$$

计算式(13)的最大值. 令  $\nabla \mathbf{W} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{x}}$ , 则

$$\boldsymbol{\Psi} = \dot{\mathbf{W}} + \frac{1}{2} (\| \mathbf{Z} \|^2 - \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2) = \nabla \mathbf{W}^T \cdot \dot{\mathbf{x}} +$$

$$\frac{1}{2} (\| \mathbf{Z} \|^2 - \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2) = -\nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \nabla \mathbf{W} +$$

$$\nabla \mathbf{W}^T \mathbf{g}(x) \mathbf{u} + \nabla \mathbf{W}^T \mathbf{G} \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2} (\| \mathbf{Z} \|^2 - \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2). \quad (14)$$

利用极值原理, 对式(14)关于  $\boldsymbol{\omega}$  求一阶导数, 并令导数等于 0, 可得临界干扰程度为

$$\boldsymbol{\omega}^* = \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{G}^T (\nabla \mathbf{W}). \quad (15)$$

继续求二阶导数, 可得

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{\Psi}}{\partial \boldsymbol{\omega}^2} = -\gamma^2 < 0. \quad (16)$$

因此, 可知干扰最大值为

$$\max(\boldsymbol{\Psi}) = \max[\dot{\mathbf{W}} + \frac{1}{2} (\| \mathbf{Z} \|^2 - \gamma^2 \| \boldsymbol{\omega} \|^2)]. \quad (17)$$

对式(17)两边同时取积分, 并令  $\bar{\boldsymbol{\Psi}} =$

$$\int_0^\infty \boldsymbol{\Psi} dt, \text{ 则有}$$

$$\max(\bar{\boldsymbol{\Psi}}) = [\mathbf{W}(\infty) - \mathbf{W}(0)] + \max(\frac{1}{2} \mathbf{J}_0). \quad (18)$$

如果干扰  $\boldsymbol{\omega}$  对系统的影响足够大, 使  $\Delta \mathbf{W} = 0$ , 则有

$$\max(\bar{\boldsymbol{\Psi}}) = \max(\frac{1}{2} \mathbf{J}_0). \quad (19)$$

此时, 根据式(19)可知,  $\boldsymbol{\omega}^*$  为对系统影响程度最大的干扰. 在此干扰情况下将控制器(10)代入到式(14)中, 有

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Psi} &= -\nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \nabla \mathbf{W} - \frac{1}{2} \nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{g} \mathbf{h}^T \mathbf{h} \mathbf{g}^T \nabla \mathbf{W} + \\ &\frac{1}{\gamma^2} \nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{G} \mathbf{G}^T \nabla \mathbf{W} + \frac{1}{2} \nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{g} \mathbf{h}^T \mathbf{h} \mathbf{g}^T \nabla \mathbf{W} - \\ &\frac{1}{2\gamma^2} \nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{G} \mathbf{G}^T \nabla \mathbf{W} = \\ &-\nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{R} \cdot \nabla \mathbf{W} + \frac{1}{2\gamma^2} \nabla \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{G} \mathbf{G}^T \nabla \mathbf{W}. \end{aligned} \quad (20)$$

若  $\mathbf{R} - \frac{1}{2\gamma^2} \mathbf{G} \mathbf{G}^T \geq 0$ , 则  $\boldsymbol{\Psi} \leq 0$ . 令

$$\boldsymbol{Q}(x)=\nabla \boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} \cdot\left(\boldsymbol{R}-\frac{1}{2 \gamma^2} \boldsymbol{G} \boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\right) \cdot \nabla \boldsymbol{W} . \quad(21)$$

则系统 (8) 存在半正定的能量存储函数  $\boldsymbol{W}(x)$  和  $\boldsymbol{Q}(x)$ , 使得耗散不等式 (11) 成立.

注 1 采用 Minimax 理论设计干扰抑制控制器之前, 先通过所构造检验函数推算出系统所能承受的最大临界干扰程度, 这种干扰程度依赖于状态和系统输入的变化, 而不是简单估计.

注 2 根据检验函数推算系统能承受的最大干扰程度, 解决了不等式放缩引起的保守性, 进而准确设计干扰抑制控制器.

根据定理 1, 可得多机电力系统 (1) 发电机控制率为

$$\hat{u}_{fi}=\frac{1}{T_{doi}'} u_{fi}=-\frac{1}{2} \boldsymbol{h}_i^{\mathrm{T}} \boldsymbol{h}_i \boldsymbol{g}_i^{\mathrm{T}} \frac{\partial \boldsymbol{W}(x)}{\partial x_i} . \quad(22)$$

对于最大破坏扰动, 设计控制器:

$$u_{fi}=-\frac{1}{2} T_{doi}' \boldsymbol{h}_i(x) \boldsymbol{h}_i^{\mathrm{T}}(x) \times$$
$$\left[\frac{b_i}{c_i}\left(E_{qi}'-\frac{1}{b_i} E_{fdi}'\right)-\sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj}' B_{ij} \cos \delta_{ij}+\right.$$
$$\left.\sum_{j=1, j \neq i}^n E_{qj}' G_{ij} \sin \delta_{ij}-\frac{E_{fdi}'}{c_i}\right] . \quad(23)$$

3 仿真分析

为了验证该方法的有效性, 对图 1 所示的三机电力系统进行仿真研究. 以图中发电机节点 3 为参考节点, 系统网络参数详见文献 [1].

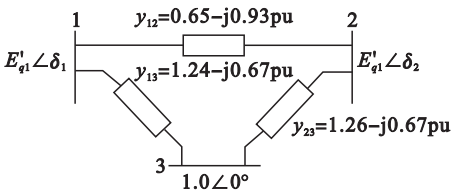
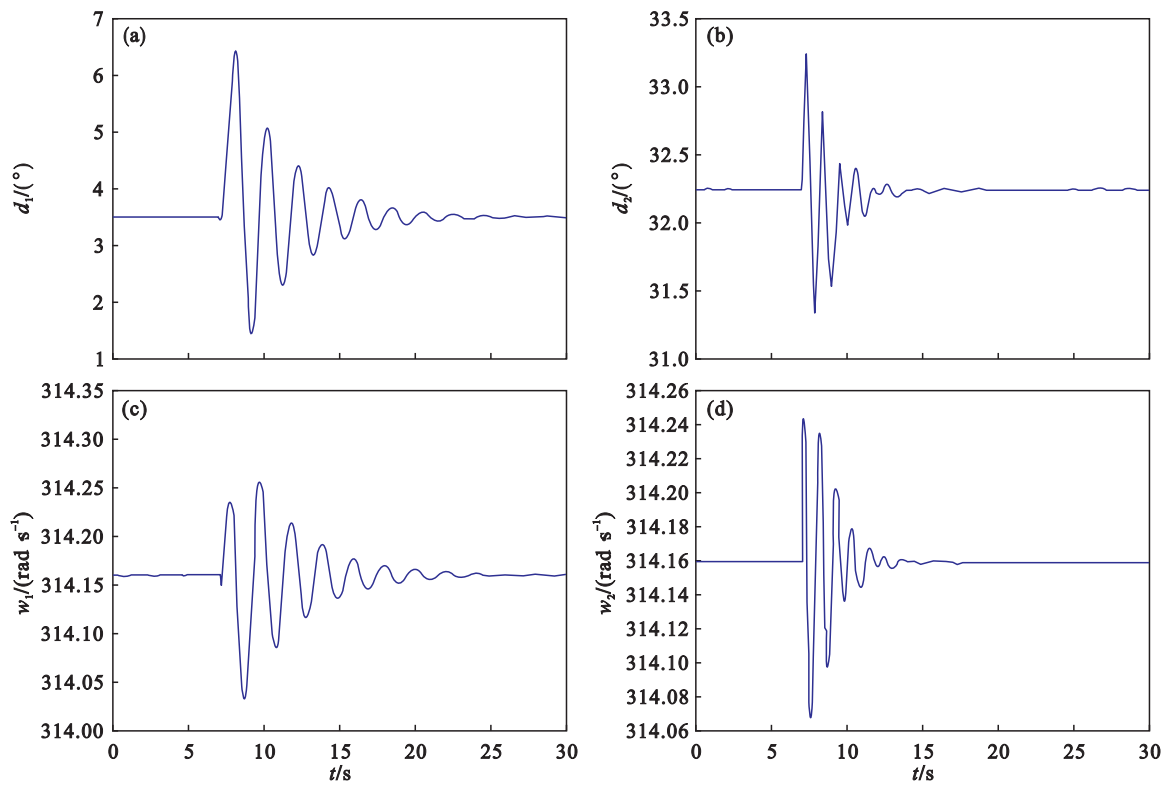


图 1 三机电力系统简化结构图  
Fig. 1 The simplified structure of the three machine power system

假定 7s 时发电机 1 和 2 的母线之间发生三相短路故障, 7.1s 时继电保护发生动作, 断开故障线路, 8s 时故障排除, 进行自动重合闸. 得到仿真结果如图 2 所示.

从以上仿真结果可以看出, 当系统在 7s 钟发生短路故障时扰动较大, 因此, 状态与稳态时平衡点状态相差较大, 曲线有较大波动. 当系统在 8s 排除故障、恢复正常工作后, 控制器做出迅速调整, 响应曲线能够迅速收敛于平衡点, 保证了系统的稳定性. 经分析, 该方法可以有效抑制多机电力系统的干扰问题.



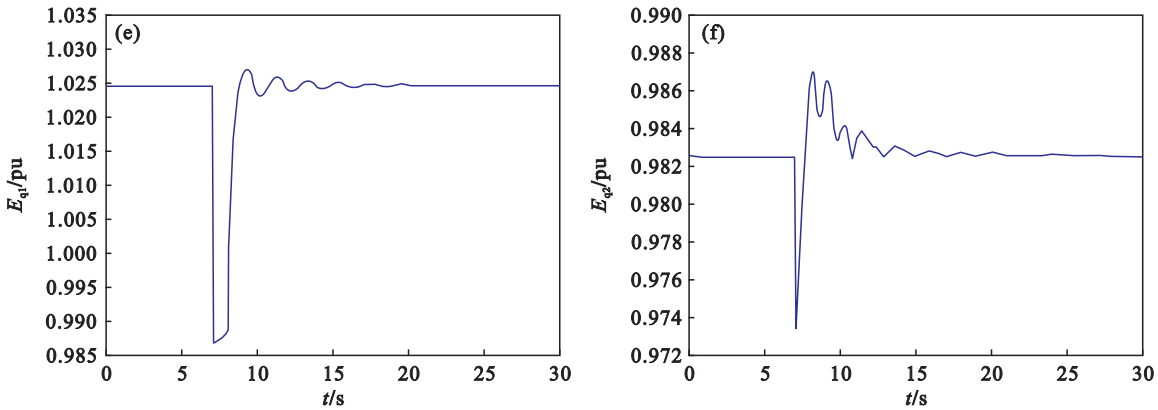


图 2 仿真动态曲线  
Fig. 2 Simulation dynamic curves

(a)—发电机 1 功角; (b)—发电机 2 功角; (c)—发电机 1 转速; (d)—发电机 2 转速;  
(e)—发电机 1 暂态电势; (f)—发电机 2 暂态电势。

4 结 语

本文在 Hamilton 理论的基础上进一步改进,对多机电力系统干扰抑制问题进行了研究,并将 Minimax 理论与改进的 Hamilton 理论相结合.在处理干扰时,推算出最坏干扰程度,解决了以往对系统参数进行假设的问题,降低了保守性.通过仿真研究,说明了该方法具有有效的干扰抑制效果.

参考文献:

[ 1 ] Zhu C L, Zhou R J, Wang Y Y. A new nonlinear voltage controller for power systems[ J ]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1997, 19( 1 ) : 19 – 27.

[ 2 ] Kenné G, Goma R, Nkwawo H, et al. An improved direct feedback linearization technique for transient stability enhancement and voltage regulation of power generators[ J ]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2010, 32: 809 – 816.

[ 3 ] Jiang N, Chen X Y, Liu T, et al. Nonlinear steam valve adaptive controller design for the power systems [ J ]. *Intelligent Control and Automation*, 2011, 2( 1 ) : 301 – 305.

[ 4 ] 王玉振, 广义 Hamilton 控制系统理论: 实现、控制与应用 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2007: 86 – 128.

( Wang Yu-zhen. Generalized Hamilton control system theory: implementation, control and application [ M ]. Beijing: Science Press, 2007: 86 – 128. )

[ 5 ] 陆冬良, 张秀彬. 基于 Hamilton 能量整形的多机电力系统励磁控制 [ J ]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39( 5 ) : 45 – 50.

( Lu Dong-liang, Zhang Xiu-bin. Based on the Hamilton energy plastic multi-machine power system excitation control [ J ]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39( 5 ) : 45 – 50. )

[ 6 ] Liu M, Wang J. Nonlinear control of multi-machine power system with structure preserving models based on Hamilton

system energy theory [ J ]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27 ( sup 1 ) : 28 – 34.

[ 7 ] Sun Y Z, Cao M, Shen T L, et al. Decentralized passive control of turbo-generators based on the generalized Hamilton system theory [ J ]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26( 3 ) : 6 – 9.

[ 8 ] 刘梦欣. 多机电力系统励磁和广义 Hamilton 实现控制方法与应用 [ D ]. 上海: 上海交通大学, 2008: 24 – 48.

( Liu Meng-xin. Multi-machine power system excitation and the generalized Hamilton realize control method and application [ D ]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008: 24 – 48. )

[ 9 ] 石访, 王杰, 伪广义. 哈密顿理论及其在多机电力系统非线性励磁控制中的应用 [ J ]. *中国电机工程学报*, 2011, 31 ( 19 ) : 67 – 74.

( Shi Fang, Wang Jie, Wei Guang-yi. Pseudo generalized Hamilton theory and its application in multi-machine power system nonlinear excitation control [ J ]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31( 19 ) : 67 – 74. )

[ 10 ] Jiang N, Liu T, Jing Y W. The design of nonlinear disturbance attenuation controller for TCSC robust model of power system [ J ]. *Nonlinear Dynamics*, 2011, 67: 1863 – 1870.

[ 11 ] Liu T. The TCSC system adaptive minimax interference suppression controller design [ J ]. *Control and Decision Making*, 2013, 28( 12 ) : 1894 – 1895.

[ 12 ] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

( Sun Yuan-zhang, Jiao Xiao-hong, Shen Tie-long. The nonlinear robust control in power systems [ M ]. Beijing: Qinghua University Press, 2007. )

[ 13 ] Chang L, Jiang N, Jing Y W, et al. Excitation controller design for nonlinear multi-machine power system based on Hamilton theory [ C ] // 27th Chinese Control and Decision Conference. Qingdao, 2015: 1362 – 1366.

[ 14 ] Ortega R, Galaz M, Astolfi A, et al. Transient stabilization of multi-machine power systems with nontrivial transfer conductances [ J ]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50( 1 ) : 60 – 75.