

不确定电力系统模型的功角稳定控制器

郑方圆, 王杰, 袁林玉

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240)

A New Kind of Power-Angle Controller for Uncertain Power System Model

ZHENG Fang-yuan, WANG Jie, YUAN Lin-yu

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University,
Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: A mathematical model and corresponding control scheme for power system with structured uncertainty are proposed to ensure the power-angle stability of generators. By use of classical 3-order uniaxial model of generator and according to the feature of system structure, the weight factor that can reflect uncertainty of transmission line connection in interconnected power system is led in and a nonlinear uncertain model that can characterize the uncertainty of this power system is put forward. After appropriate coordinate transformation and by use of Lyapunov equation based robust control strategy, a robust linear controller for power-angle is designed. Simulation results of a 3-machine system built by Matlab/Simulink show that the proposed controller is effective in suppressing the affect of power network structure disturbance on power-angle stability.

KEY WORDS: uncertain power system model; power-angle stability; Lyapunov equation; robust controller

摘要: 针对网络结构不确定的电力系统, 提出了一种数学模型及其控制方案, 用于保障发电机的功角稳定。文中从发电机经典 3 阶模型出发, 根据系统结构特点, 引入能够反映互联网络线路不确定通断情况的权因子, 提出了一种能够反映系统结构不确定特性的非线性不确定模型。经过适当坐标变换后, 采用基于 Lyapunov 方程的鲁棒控制策略, 设计了发电机功角鲁棒线性控制器。通过 Matlab/Simulink 对一个 3 机系统进行仿真表明, 文中所提出的控制器在抑制电力系统网络结构扰动对功角稳定的影响方面是有效的。

关键词: 不确定电力系统模型; 功角稳定; Lyapunov 方程; 鲁棒控制器

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60674035)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(60674035).

0 引言

现代电力工业的主要特征是发展大型电力系统, 减少备用容量, 相互功率支援^[1-3], 但是大电网、联合供电的运行方式也对其安全运行提出了新的挑战^[4-7]。作为当今最复杂的人工网络之一, 现代电力系统具有组成元件非线性、互联结构复杂性、系统参数不确定性、难以用数学模型准确描述^[8]等特点。此外电力系统还不断受各种随机性扰动的影响, 这些随机扰动分为负荷扰动和事件扰动: 负荷扰动是负荷需求小的随机波动; 事件扰动包括发电机停运、变压器或输电线路的开合及大的负荷突变等^[9]。事件扰动的结果导致系统网络结构发生改变, 而这些变化是人们事先无法预知的, 因此电力系统模型表现出相当大的不确定性。

事实上, 网络结构是电网内在、本质的特性, 一旦确定下来, 必然对电网性能产生深刻影响^[10]。从电网自身的拓扑结构特性出发来分析电网的运行状态, 寻找稳定控制规律, 对建设强健的电网具有指导意义。目前绝大多数关于多机系统稳定控制器的研究均假设网络具有确定不变连接结构。文献[11]建立了多机环境下考虑外界干扰的水轮机组调速系统鲁棒模型, 提出了非线性分散协调控制策略; 文献[12]将多机系统表示为具有耗散性的 Hamiltonian 控制系统, 利用 Hamiltonian 函数提出了分散励磁控制策略; 文献[13]采用反馈线性化方法设计了基于观测器的鲁棒非线性控制策略, 其中滑模观测器用于估计系统状态和干扰。这些研究成果计及了系统的非线性, 但没有考虑电力系统网络结构不确定的特点。

本文计及复杂电力系统在运行中表现出的网络结构不确定性的特点,提出一种能够反映系统网络结构变化特性的非线性不确定模型。在控制器设计上,采用鲁棒控制策略^[14],只需用不确定项和标称系统的稳定信息,通过一个可解的 Lyapunov 方程,便可求得控制规律,从而避免了其他鲁棒控制规律求解 Riccati 方程时可能出现的无解情况,具有较强的通用性。该控制器以发电机功角为控制目标,将励磁电压作为控制量,物理意义明确。

1 发电机动态模型

考虑具有励磁控制的 n 机电力系统,将负荷节点以恒定阻抗表示,且并入系统节点阻抗矩阵,消去负荷节点和联络节点后,可得仅含发电机节点的连通图,如图 1 所示。

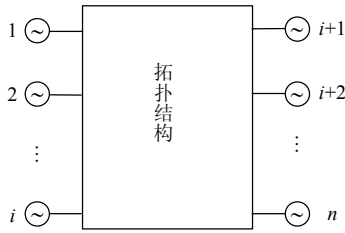


图 1 仅含发电机节点的多机系统连通图

Fig. 1 Multimachine power system diagram only with generator node

发电机采用 3 阶单轴模型,以同步旋转轴为参考轴;不考虑快速励磁设备的动态过程,即 $E_{fi} = u_{fi}$, E_{fi} 为第 i 台发电机的励磁电压(励磁设备的输出); u_{fi} 为第 i 台励磁设备的控制电压(励磁设备的输入);发电机的机械功率在暂态过程中保持不变,即 $P_{mi} = P_{mi0}$ 。

基于上述假设得系统状态方程^[15]

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = -\frac{D_i}{2H_i}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi0} - P_{ei}) \\ \dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0i}}(E_{fi} - E_{qi}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ_i 为第 i 台发电机的功角,并记 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$; ω_i 为发电机的转速(ω_0 为同步角速度); P_{ei} 为发电机电磁功率; D_i 、 H_i 分别为发电机的阻尼系数和转子转动惯量; T'_{d0i} 为机组 d 轴暂态时间常数; E_{qi} 、 E'_{qi} 分别为发电机 q 轴电势和 q 轴暂态电势。

由于 E'_{qi} 不便量测,考虑引入电磁功率 P_{ei} 作为一个状态变量。忽略线路电抗,由文献[16]可得, n 机系统中发电机有功功率为

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n E'_{qi} E'_{qj} B_{ij} \sin \delta_{ij} \quad (2)$$

其中 B_{ij} 为连接发电机节点 i 和 j 之间的电纳。

对式(2)两边求导,有

$$\begin{aligned} \dot{P}_{ei} = & \dot{E}'_{qi} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij} \sin \delta_{ij} + E'_{qi} \sum_{j=1}^n \dot{E}'_{qj} B_{ij} \sin \delta_{ij} + \\ & E'_{qi} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij} \omega_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

又有

$$E_{qi} = E'_{qi} + (x_{di} - x'_{di}) I_{di} \quad (4)$$

$$I_{di} = -\sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (5)$$

式中: x_{di} 、 x'_{di} 分别为发电机 d 轴电抗和 d 轴暂态电抗; I_{di} 为发电机 d 轴电流。

代入式(3)可得以 $[\delta_i \ \omega_i \ P_{ei}]^T$ 为变量的多机系统 3 阶状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = -\frac{D_i}{2H_i}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi0} - P_{ei}) \\ \dot{P}_{ei} = \left(\frac{u_{fi}}{T'_{d0i}} - \frac{E'_{qi}}{T'_{d0i}} + \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij} \right) \cdot \\ \quad \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij} \sin \delta_{ij} + E'_{qi} \sum_{j=1}^n \dot{E}'_{qj} B_{ij} \sin \delta_{ij} + \\ \quad E'_{qi} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij} \cos \delta_{ij} \omega_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 B_{ij} 反映了仅含发电机节点的连通图拓扑结构。当电网受发电机停运、输电线路开合等随机事件扰动时,系统的网络结构随系统运行方式的改变而不断变化,即 B_{ij} 包含不确定项。

若引入一个不确定因子 α_{ij} 来反映拓扑结构的这种不确定性,则

$$B_{ij} = \alpha_{ij} B_{ij0} \quad (7)$$

式中 B_{ij0} 为确定值,等于第 i 、 j 台发电机直接相连时的电纳值; α_{ij} 为不确定因子,当节点 i 、 j 相连时,取 $\alpha_{ij}=1$; 节点 i 、 j 断开时, $\alpha_{ij}=0$ 。

由于状态方程(6)中包含不确定项,在设计控制器时需要将这部分变量以扰动项的形式分离出来,则式(6)中

$$\begin{aligned} \dot{P}_{ci} &= \frac{u_{fi}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} (B_{ij0} - B_{j0} + \alpha_{ij} B_{j0}) \sin \delta_{ij} - \\ &\quad \frac{E'_{qi}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{j0} \sin \delta_{ij} + \\ \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} &\left(\sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{ij0} \cos \delta_{ij} \right) \sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{j0} \sin \delta_{ij} + \\ E'_{qi} \sum_{j=1}^n &\dot{E}'_{qj} \alpha_{ij} B_{j0} \sin \delta_{ij} + E'_{qi} \sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{j0} \cos \delta_{ij} \omega_{ij} = \\ &\frac{u_{fi}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{j0} \sin \delta_{ij} - \frac{P_{ci}}{T'_{d0i}} + \Delta_i \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \left(\dot{E}'_{qi} + \frac{E'_{qi}}{T'_{d0i}} \right) \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} (\alpha_{ij} - 1) \sin \delta_{ij} + \\ &\frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \left(\sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{ij0} \cos \delta_{ij} \right) \sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{j0} \sin \delta_{ij} + \\ &\quad E'_{qi} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} B_{j0} (\dot{E}'_{qj} \sin \delta_{ij} + E'_{qj} \cos \delta_{ij} \omega_{ij}) \end{aligned}$$

Δ_i 由于含有不确定因子 α_{ij} , 视作系统的扰动项, 至此原式(6)完成了不确定项的分解, 得到式(8)。

根据系统要求, 控制器的设计必须满足发电机功角稳定这个目标, 选择输出

$$y_i = \delta_i - \delta_0 = \Delta \delta_i \quad (9)$$

考虑网络结构不确定性的多机系统动态方程

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = -\frac{D_i}{2H_i} (\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{mi0} - P_{ci}) \\ \dot{P}_{ci} = \frac{u_{fi}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} \sin \delta_{ij} - \frac{P_{ci}}{T'_{d0i}} + \Delta_i \\ y_i = \delta_i - \delta_0 = \Delta \delta_i \end{cases} \quad (10)$$

2 鲁棒镇定控制器设计

定义: $A > B$, 表示 $A - B$ 为正定矩阵。

引理 1: 设 $A = A^T \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12}^T & A_{22} \end{bmatrix}$,

$A_{11} \in \mathbf{R}^{r \times r}$, 则 $A > 0$ 的充分必要条件是 $A_{11} > 0$, 且 $A_{22} > A_{12}^T A_{11}^{-1} A_{12}$ [17]。

引理 2: 设矩阵 $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 矩阵, $C \in \mathbf{R}^{m \times m}$, $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $A, C > 0$, 若 $C - B^T A^{-1} B > 0$, 则对任意 $x \in \mathbf{R}^n, y \in \mathbf{R}^m$, 有 $2|x^T B y| \leq x^T A x + y^T C y$ 。

考虑不确定线性系统

$$\dot{x} = Ax + B(u + \Delta u) + w \quad (11)$$

这里 $x \in \mathbf{R}^n$, 输入 $u \in \mathbf{R}^m$, A 和 B 是适合维数的

常矩阵, Δu 为输入不确定项, w 为系统不确定项, 在具体的处理上, 为减少保守性, 将 Δu 和 w 分别处理。

假设 1: 存在矩阵 K , 使 $A + BK$ 是 Hurwitz 稳定阵。

如果假设 1 成立, 那么对于一个给定的正定矩阵 Q , 下面的 Lyapunov 方程具有唯一的正定矩阵解 P , 即

$$(A + BK)^T P + P(A + BK) = -Q \quad (12)$$

假设 2: 不确定项满足条件

$$\|w\| \leq a(x) \|x\| \quad (13)$$

$$\|\Delta u\| \leq b(x) \|x\| \quad (14)$$

其中 $a(x)$ 和 $b(x)$ 是非负连续函数, $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数。选取

$$\eta > \frac{1}{2} [\sqrt{\lambda_{\min}^2(S) + 4\lambda_{\max}(P^2)} - \lambda_{\min}(S)] \quad (15)$$

其中 $S = PBB^T P$, P 由式(12)确定, $\lambda_{\max}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 分别表示相应矩阵的最大和最小特征值。当增益矩阵 B 列满秩时(大多数情况下是成立的), $\lambda_{\min}(S) = 0$, η 的范围简化为 $\eta > \lambda_{\max}(P^2)$ 。

对于系统(11), 对应鲁棒状态反馈线性控制器

$$u = u^a + u^b + u^c \quad (16)$$

$$u^a = Kx$$

$$u^b = -0.5\xi^2 B^T Px$$

$$u^c = -0.5\sigma^2 B^T Px$$

式中 ξ 和 σ 是满足 $0 < \xi^2 < \lambda_{\min}(Q)/\eta$, $\sigma > 0$ 的可调参数。由式(16)可知, 线性控制器由 3 部分组成。 u^a 保证了系统(11)的无扰动系统的稳定性, u^b 和 u^c 2 部分用来抵消系统的干扰。其中的可调参数可以根据控制器增益及不确定性的的大小来选取。

定理 1: 考虑系统(11), 如果假设 1 及假设 2 和下列条件成立

$$a^2(x) + \frac{\xi^2}{\eta\sigma^2} b^2(x) \leq \left(\frac{\lambda_{\min}(Q)}{\eta} - \xi^2 \right) \xi^2 \quad (17)$$

那么系统(11)经由线性控制器(16)在平衡点 $x=0$ 处是一致渐近稳定[14]。

针对式(10)所示的 3 阶非仿射非线性不确定数学模型, 首先进行反馈线性化, 然后应用不匹配不确定线性系统控制理论进行鲁棒线性控制器设计。

取 $z_{1i} = \delta_i - \delta_0$, $z_{2i} = \omega_i - \omega_0$, $z_{3i} = P_{ci} - P_{mi0}$,

$$v_i = \frac{u_{fi}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} \sin \delta_{ij} - \frac{P_{mi0}}{T'_{d0i}}, \text{ 有 } \dot{z}_{1i} = \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 =$$

$$\begin{aligned} z_{2i}, \quad \dot{z}_{2i} = \dot{\omega}_i = -\frac{D_i}{2H_i}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi0} - P_{ei}) = \\ -\frac{D_i}{2H_i}z_{2i} - \frac{\omega_0}{2H_i}z_{3i}, \quad \dot{z}_{3i} = \dot{P}_{ei} = -\frac{1}{T'_{d0i}}z_{3i} + v_i + \Delta_i. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{设 } \mathbf{x}_i = [x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}]^T = [\delta_i, \omega_i, P_{ei}]^T, \quad \mathbf{z}_i = [z_{1i}, z_{2i}, \\ z_{3i}]^T = [\delta_i - \delta_0, \omega_i - \omega_0, P_{ei} - P_{mi0}]^T = \Phi(\mathbf{x}), \text{ 注意到} \\ \det(\partial\Phi/\partial\mathbf{x}) = 1 \neq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

坐标变换 $\Phi(\mathbf{x})$ 为微分同胚变换, 可将系统(10)转换为标准形式

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}_i &= \mathbf{A}_i \mathbf{z}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{v}_i + \mathbf{W}_i \\ \mathbf{y}_i &= \mathbf{C}_i \mathbf{z}_i + \mathbf{F}_i \mathbf{v}_i, \end{aligned}$$

$$\text{其中: } \mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & a_1 & a_2 \\ 0 & 0 & a_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta_i \end{bmatrix},$$

$$a_3 = -\frac{1}{T'_{d0i}}, \quad \mathbf{C}_i = [1 \ 0 \ 0], \quad \mathbf{F}_i = 0, \quad a_1 = \frac{-D_i}{2H_i},$$

$$a_2 = \frac{-\omega_0}{2H_i}.$$

通过计算其标称系统($\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i$)的能控性矩阵可知, 该系统满足能控性条件。又由于 $\|\mathbf{W}_i\| = |\Delta_i|$, 系统扰动项 \mathbf{W}_i 最值与不确定项 Δ_i 有关。根据文献[15]知, 系统中所有发电机的励磁顶值电压 E_{fi} 不超过 5 倍 E_{qi} , 结合 α_{ij} 的取值特点, 有

$$\begin{aligned} \|\mathbf{W}_i\| = |\Delta_i| \leq & \left| \left(\dot{E}'_{qi} + \frac{E_{qi}}{T'_{d0i}} \right) \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} (\alpha_{ij} - 1) \sin \delta_{ij} \right| + \\ & \left| \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \left(\sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{ij0} \cos \delta_{ij} \right) \sum_{j=1}^n E'_{qj} \alpha_{ij} B_{ij0} \sin \delta_{ij} \right| + \\ & \left| E'_{qi} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} B_{ij0} (\dot{E}'_{qj} \sin \delta_{ij} + E'_{qj} \cos \delta_{ij} \omega_{ij}) \right| \leq \\ & \left| \frac{5E_{qi}}{T'_{d0i}} \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} \right| + \left| \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} \left(\sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} \right) \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} \right| + \\ & \left| E'_{qi} \sum_{j=1}^n B_{ij0} \left(\frac{4E_{qi}}{T'_{d0i}} + E'_{qj} \omega_{ij} \right) \right| \end{aligned}$$

由于 E_{qi} 、 E'_{qi} 、 B_{ij0} 、 x'_{di} 、 x_{di} 、 T'_{d0i} 及 ω_{ij} 都是有界的, 故可知系统的扰动项 \mathbf{W}_i 有上界。

按照式(16)的控制输入, 通过选择适当的反馈矩阵 \mathbf{K} 和可调参数 ξ 、 σ , 使假设条件 1 和 2 成立, 从而可获得该系统第 i 台发电机的鲁棒控制规律, 再由逆变换求得励磁电压

$$u_{fi} = (T'_{d0i} v_i + P_{mi0}) / \sum_{j=1}^n E'_{qj} B_{ij0} \sin \delta_{ij}$$

式中: T'_{d0i} 、 P_{mi0} 、 B_{ij0} 为确定值; 变量 E'_{qj} 、 δ_{ij} 不容易被直接量测到, 文献[18]为此采用了状态观测器。实际上根据电力系统的基本原理和动态特性, 通过一系列变化, 可将它们转换为发电机输出量和一些可量测量的表达式^[16]。

本文研究的线性鲁棒控制器设计完全依据一个可解的 Lyapunov 方程, 避免了其他鲁棒控制规律求解 Riccati 方程时可能出现无解的情况, 具有很强的通用性, 并且控制规律 \mathbf{v}_i 含有可调参数, 可以根据不确定项界函数的大小来选取, 在工程中是可以实现的。

3 仿真分析

仿真模型与参数采用文献[15]的经典 3 机系统, 如图 2 所示, 其中发电机 3 为系统平衡节点 ($E'_{q3} = 1 \angle 0^\circ$), 发电机 1、2 为考虑拥有众多发电机和负荷的区域电网等值机。

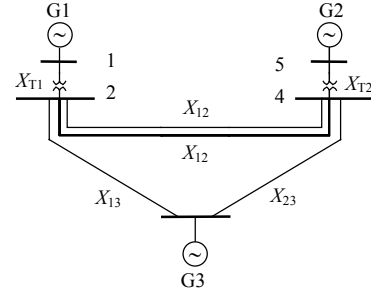


图 2 3 机电力系统

Fig. 2 Three-machine power system

系统参数用标么值表示。发电机 1: $D_1=5$, $H_1=4$, $x_{d1}=1.863$, $x'_{d1}=0.257$, $T'_{d01}=6.9$ s, 机端变压器等值电抗 $x_{T1}=0.129$; 发电机 2: $D_2=3$, $H_2=5.1$, $x_{d2}=2.36$, $x'_{d2}=0.319$, $T'_{d02}=7.96$ s, 机端变压器等值电抗 $x_{T2}=0.11$; 线路电抗 $X_{12}=0.55$, $X_{13}=0.53$, $X_{23}=0.6$, $\omega_0=314.159$ rad/s。约束条件: $0 \leq E_{fi} \leq 6$, $0.05 \leq P_e \leq 1.5$ 。

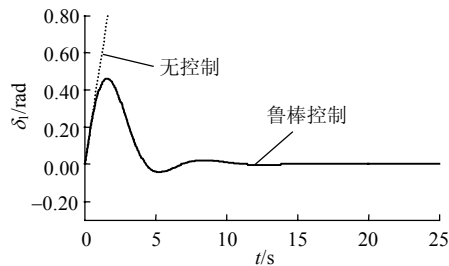
为验证本文提出的鲁棒线性控制律的有效性, 将控制效果做 2 方面比较: 与系统无控制的情况做比较; 与线性二次最优控制律做比较。

取 LQR 性能指标为: $J = \int_0^\infty (\mathbf{z}^T \mathbf{Q} \mathbf{z} + \mathbf{v}^T \mathbf{R} \mathbf{v}) dt$, 其中 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 为正定权矩阵。由此可得 LQR 控制律为: $\mathbf{v}' = -(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}) \mathbf{z}$, 其中 \mathbf{P} 为 Riccati 方程 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$ 的解。

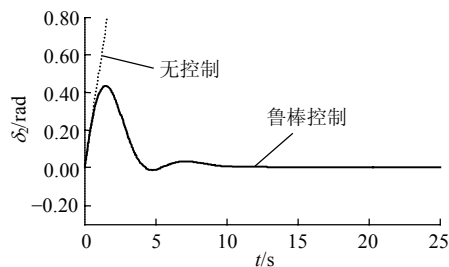
假设仿真过程中, 系统由于无法预知的原因导致网络拓扑结构变化, 且在 $t=0$ s 时, 1、2 号发电机转子转速 ω_1 、 ω_2 分别同时偏离平衡点 5%, 与系

统无控制比较时, 功角响应曲线如图3所示。鲁棒控制与LQR控制下的功角响应曲线如图4所示。

从图中可以看出, 在发生扰动的情况下, 如果网络结构不确定变化的系统不采取任何控制措施对抗干扰, 将会迅速失去稳定; 而在鲁棒线性控制器和LQR控制器作用下, 均能够回到原平衡点稳定运行, 保证功角稳定。不过从2个控制器响应曲线对比中可以看出, 鲁棒控制器能够更快地恢复到平衡状态, 且超调量远小于LQR控制。可见本文设计的鲁棒控制器在性能上优于LQR控制器。

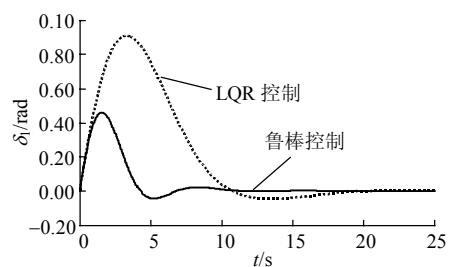


(a) 发电机 1

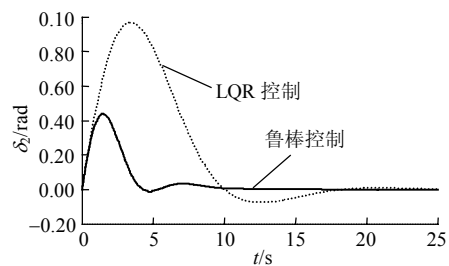


(b) 发电机 2

图3 与系统无控制比较时发电机功角响应曲线
Fig. 3 Responses of power angle of robust controller compared with no controller



(a) 发电机 1



(b) 发电机 2

图4 鲁棒控制与LQR控制下的功角响应曲线
Fig. 4 Responses of power angle of robust controller compared with LQR controller

4 结论

1) 本文提出的电力系统不确定模型反映了网络结构不确定变化, 与传统多机系统结构确定模型相比, 能够更为准确地表达电网的动态特性。

2) 针对文中的不确定模型, 研究了一种基于Lyapunov方程的鲁棒状态反馈控制方法, 设计了以发电机功角稳定为控制目标, 励磁电压为控制变量的系统稳定控制器。该控制策略避免了其他鲁棒控制规律在求解Riccati方程时可能出现的无解情况, 具有较强的通用性。

3) 本文所提出的基于Lyapunov方程鲁棒控制器能使系统在网络结构发生不确定扰动时保持更好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 徐丽杰, 王伟. 多机电力系统H_∞分散鲁棒励磁控制器的优化设计[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 42-46.
Xu Lijie, Wang Wei. A new optimum design of H_∞ decentralized robust excitation controllers for multi-machine power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 42-46(in Chinese).
- [2] 王杰, 阮映琴, 傅乐, 等. 计及动态负荷的电力系统静止无功补偿器(SVC)与发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 24-29.
Wang Jie, Ruan Yingqin, Fu Le, et al. The nonlinear control of SVC and excitation of generators in power systems with dynamic loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 24-29(in Chinese).
- [3] 赵兴勇, 张秀彬, 何斌. 电网大停电自组织临界性的概率统计分析法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 60-63.
Zhao Xingyong, Zhang Xiubin, He Bin. Probabilistic statistical analysis on self-organized criticality of power grid blackouts [J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 60-63(in Chinese).
- [4] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
Han Zhenxiang, Cao Yijia. Power system security and its prevention [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6(in Chinese).
- [5] 孙可, 韩祯祥, 曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 1-9.
Sun Ke, Han Zhenxiang, Cao Yijia. Review on models of cascading failure in complex power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 1-9(in Chinese).
- [6] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论的复杂电力系统脆弱性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 12-17.
Chen Weihua, Jiang Quanyuan, Cao Yijia, et al. Risk-based vulnerability assessment in complex power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 12-17(in Chinese).
- [7] 刘文焯, 汤涌, 万磊, 等. 大电网特高压直流系统建模与仿真技术[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 1-3,7.
Liu Wenzhuo, Tang Yong, Wan Lei, et al. Modelling and simulation technologies for large UHVDC power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 1-3,7(in Chinese).

(下转第62页 continued on page 62)