

网络化多机电力系统的分布协调控制和 暂态联结稳定性分析

马连增[†], 陈雪波

(辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘 要: 针对 n 个同步发电机互联电力系统暂态过程中出现的发电机失步现象, 为了控制任意两台电机之间的转角差, 提出一种新的分布式协调控制设计方法. 将整个系统对对分解为 $n-1$ 个子系统, 设计分布式协调控制律, 估计子系统的局部稳定区域, 得到判定联结稳定性的定理; 通过一个三机系统的算例, 给出判别方法的应用. 算例表明, 这种判别方法能够简化系统稳定性分析的复杂性, 并能够降低计算量.

关键词: 多机电力系统; 分布协调控制; 暂态联结稳定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Distributed coordination control and transient connective stability of networked multi-machine power systems

MA Lian-zeng[†], CHEN Xue-bo

(School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Considering transient stability of an n -machine interconnected power system when a large disturbance lead to a loss of synchronism, a novel distributed coordination control method is proposed in order to control the rotor angle error to zero. A pairwise decomposition of the model is performed into $n-1$ interconnected subsystems. A distributed coordination controller is designed to guarantee the local stability of subsystems. The stability regions for each disconnected subsystems are estimated. Then, an aggregate model is constructed involving a vector Lyapunov function and the subsystem-region estimates is used to determine the stability of the overall system. A 3-generator example is given to illustrate the effectiveness of the proposed method. This judging method can simplify the complexity of system stability analysis and reduce the computation load.

Keywords: multi-machine power systems; distributed coordination control; transient connective stability

0 引 言

电力系统是由不同类型的发电机组(通常为汽轮发电机组,水轮发电机组和核机组)、电力负荷和不同电压等级的电力网络(主要包括变压器、交流或直流输电线路)及各类电力电子设备所组成的十分庞大而复杂的动力学系统. 在电力系统运行过程中必然会有各种干扰,如负荷的变化,机组、线路和变压器发生故障等. 在干扰作用下,电力系统原有的平衡状态将被打破,使系统进入暂态过程. 在暂态过程中,系统的频率和各个结点的电压可能随时间剧烈变化从而严重恶化电能质量,使电力负荷无法正常工

作. 在严重情况下,可能使发电机之间失去同步,甚至使系统崩溃. 因此,研究暂态过程中如何控制以改善性能具有理论和现实意义. 暂态稳定性分析就是发现故障并排除后分析系统的运动是否会收敛到稳定状态.

电力系统的电能主要靠同步发电机产生,同步发电机的作用是将原动机的旋转机械能转换为同步发电机定子输出的电能. 电力系统稳定性问题在很大程度上是研究相互连接的同步电机如何保持同步运行的问题. 多机电力系统中,各台发电机之间是相互联系和相互影响的. 这种相互联系或影响通过电力

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2017-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61433004).

作者简介: 马连增(1970—),男,副教授,博士,从事大规模动态系统及在电力系统和多机器人系统应用的研究; 陈雪波(1960—),男,教授,博士生导师,从事大规模动态系统、群集智能等研究.

[†]通讯作者. E-mail: mlzhxm@sina.com

网络的连接而得以传递,因此与网络结构和参数必然有关. 电力系统的稳定性取决于系统内任两台电机转子之间的角度差. 电网调度自动化的目的是为了 保证电能质量,即符合要求的电压和频率,电压和频率的调节通过调节速度(即控制转角)实现.

多机电力系统的暂态稳定性对于电力系统的正常运行非常重要,已有许多研究者对此进行了深入的研究. 文献[1]研究了带调速器的多台电机组电力大系统的暂态关联稳定性. 联结稳定性的概念最初由文献[2]提出,用于研究结构扰动对互联子系统构成的大系统的稳定性的影响. 一些研究者将联结稳定性扩展和应用,研究了各种结构扰动类型. 文献[3]较详细地介绍了几种常用的多机电力系统数学模型,并着重阐明了其中的差别和特点. 文献[4]提出了一种多机系统模糊稳定器的逆调-顺调协调方法. 文献[5]为了提高多机电力系统的暂态关联稳定性,设计了一种新的非线性励磁控制器,主要采用部分反馈线性化技术. 文献[6]研究了大系统扩展结构的分散化稳定性,整个系统虽然扩大了维数,但子系统间减小了耦合强度,利于采用分散化控制. 文献[7]在多机电力系统的暂态关联稳定性分析中采用了灾变理论. 文献[8]改进了直接反馈线性化设计方法. 文献[9]考虑了电力系统的全局控制. 文献[10]设计了高阶的块滑模控制器. 文献[11]提出了非线性自适应分散化镇定控制. 文献[12]提出了鲁棒分散化的非线性控制设计. 随着系统规模的扩大,上述分析和设计方法仍然面临巨大的挑战,原因在于牵涉大量不稳定的状态所带来的概念上和数值上的困难.

本文从大规模系统控制的角度,提出一种新的分解和控制方法. 首先进行系统的对对分解,以其中一台电机的状态为共同参考,将整个系统对对分解为 $n - 1$ 个子系统,子系统模型具有 Lur'e-Postnikov 系统形式;然后针对每个子系统设计非线性控制器,该控制器能够保证子系统的局部稳定,但需要获取其他子系统的状态信息,具有分布式特性,各子系统比照参考子系统状态分别调节,具有协调性;最后分析了系统的稳定性,通过构建复合 Lyapunov 函数,应用 Lyapunov 直接方法判定整个系统的稳定性,给出了全局联结稳定性的判定定理.

1 网络化多同步发电机电力系统模型

考虑 n 台同步发电机并联运行组成的电力系统,如图1所示. 每个同步发电机的绝对运动方程为

$$M_i \ddot{\delta}_i + D_i \dot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

其中: $P_{ei} = \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$; δ_i 为转子轴和基准转轴之间的电角度; M_i 为惯性系数; D_i 为电机阻尼系数; P_{mi} 为机械输入功率; P_{ei} 为输出电功率; E_i 为端电压; Y_{ij} 为标号 i 与 j 电机间电导; θ_{ij} 为标号 i 与 j 电机间电导的相位角.

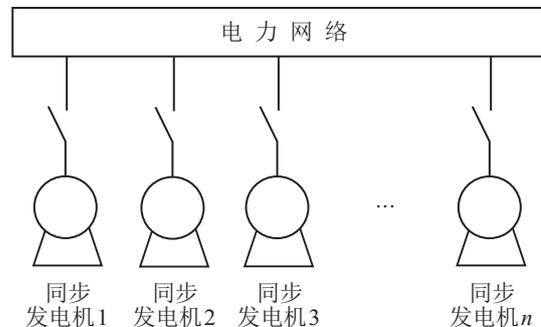


图1 网络化多机电力系统

假设 M_i, P_{mi}, E_i 是常数,并具有一致的衰减,即

$$\frac{D_i}{M_i} = \lambda. \quad (2)$$

若选择状态变量为

$$x = (\omega_{1n}, \omega_{2n}, \dots, \omega_{n-1,n}, \delta_{1n} - \delta_{1n}^0, \dots, \delta_{n-1,n} - \delta_{n-1,n}^0)^T. \quad (3)$$

其中: $\delta_{in} = \delta_i - \delta_n, \omega_{in} = \omega_i - \omega_n, \omega_i = \dot{\delta}_i, \delta_{in}^0$ 由解平衡方程

$$P_{ei}(\delta_{ij}^0) = P_{mi} \quad (4)$$

获得. 则整个系统可描述为如下非线性 Lur'e-Postnikov 系统形式:

$$\dot{x} = Ax + Bf(y), y = C^T x. \quad (5)$$

其中

$$f = \left[\sum_{j=2}^n f_{1j}, \sum_{j=1, j \neq 2}^n f_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^{n-1} f_{nj} \right]^T,$$

$$f_{ij} = A_{ij} [\cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) - \cos(\delta_{in}^0 - \theta_{ij})],$$

$$A_{ij} = E_i E_j Y_{ij},$$

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda I_{n-1} & 0_{n-1} \\ I_{n-1} & 0_{n-1} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -M_n^{-1} & & O & M_n^{-1} \\ & -M_n^{-1} & & M_n^{-1} \\ & & \ddots & \vdots \\ O & & & -M_n^{-1} & M_n^{-1} \\ & 0_{n-1} & & & 0_{n-1} \end{bmatrix},$$

$$C^T = [0_{n-1} \quad I_{n-1}].$$

2 系统模型分解和分布协调控制器设计

以第 n 号同步发电机的状态为系统运动的共同参考, 则 n 个同步发电机可以对分解为 $n - 1$ 个子系统. 或者虚拟一台理想工作状态的同步发电机组, 以这台虚拟机组为共同参考构成 n 个子系统. 以3台电机系统为例, 以第3台同步发电机为参考, 对分解关系如图2所示, 若将对分解后的子系统视为节点, 互联部分视为边, 则整个系统具有网络图的形式.

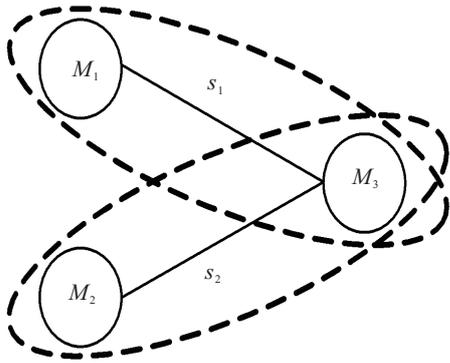


图2 对分解

选择每个子系统状态向量为 $x_i = (\omega_{in}, \delta_{in} - \delta_{in}^0)^T$, 若以 $y_i = \delta_{in} - \delta_{in}^0 (i = 1, 2, \dots, n - 1)$ 为子系统的输出, 将 δ_{in} 检测出来作输出反馈, 则可以设计每个子系统的控制器为

$$u_i(y_i) = (M_i^{-1} + M_n^{-1})A_{in} \sin \theta_{in} (\sin \delta_{in} - \sin \delta_{in}^0). \quad (6)$$

该控制器的输出作为子系统的控制输入, 控制器具有分布式性质, 机组所受的内扰、外扰最终体现在转角的变化上, 分布式协调控制器产生的控制量可使子系统的转角差最终趋于零, 系统运行在稳定区域. 根据三角函数关系

$$\cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) = \cos \delta_{ij} \cos \theta_{ij} + \sin \delta_{ij} \sin \theta_{ij}, \quad (7)$$

每个子系统可以表示为

$$\dot{x}_i = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x_i + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} u_i(y_i) + h_i(x), \quad (8)$$

$$y_i = [0 \ 1]x_i, \quad (9)$$

其中互联项表示为

$$h_i(x) = \begin{bmatrix} (M_n^{-1} - M_i^{-1})A_{in} \cos \theta_{in} \times (\cos \delta_{in} - \cos \delta_{in}^0) + \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} (M_n^{-1} f_{nj} - M_i^{-1} f_{ij}) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3 子系统稳定区域估计和整个系统联结稳定性判定

3.1 子系统稳定区域估计

对于每个孤立子系统(8), 系统阵中0项由 $\alpha \mu_i y_i - \alpha \mu_i [0 \ 1]x_i$ 代替, 其中 α 为一个正数. 令

$$\mu_i = (M_i^{-1} + M_n^{-1})A_{in} \sin \theta_{in}, \quad (11)$$

经过重新组合后得到子系统方程为

$$\dot{x}_i = A_i x_i + b_i u_i(y_i), \quad (12)$$

$$y_i = c_i^T x_i. \quad (13)$$

那么矩阵 A_i 是稳定的, 其中

$$A_i = \begin{bmatrix} -\lambda & -\alpha \mu_i \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad b_i = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad c_i^T = [0 \ 1].$$

作为控制输入, 满足集合条件

$$U_i = \{u_i : 0 \leq y_i u_i \leq k_i y_i^2, \forall y_i \in [y_{i1}, y_{i2}]\}. \quad (14)$$

其中

$$y_{i1} = -\pi - 2\delta_{in}^0, \quad y_{i2} = \pi - 2\delta_{in}^0.$$

能找到一个候选Lyapunov函数 $V_i(x_i)$, 有

$$V_i(x_i) = x_i^T H_i x_i + \zeta_i \int_0^{y_i} u_i(y_i) dy_i. \quad (15)$$

其中: H_i 为常数阵, ζ_i 为标量. 沿系统(12)解的时间导数为

$$\dot{V}_i(x_i) = [\gamma_i^{1/2} u_i + g_i^T x_i]^2 + \Gamma_i. \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} -g_i g_i^T &= A_i^T H_i + H_i A_i, \\ -\gamma_i^{1/2} g_i &= H_i b_i + \frac{1}{2} (\zeta_i A_i^T + I) c_i, \\ -\gamma_i &= \zeta_i c_i^T b_i - k_i^{-1}, \\ -\Gamma_i &= [k_i^{-1} u_i - y_i] u_i. \end{aligned}$$

令

$$v_i(x_i) = \sqrt{V_i(x_i)}, \quad (17)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{v}_i(x_i) &= \frac{\dot{V}_i(x_i)}{2\sqrt{V_i(x_i)}}, \\ \text{grad} v_i(x_i) &= \frac{\text{grad} V_i(x_i)}{2\sqrt{V_i(x_i)}}. \end{aligned}$$

进而有

$$\eta_{i1} \|x_i\| \leq v_i(x_i) \leq \eta_{i2} \|x_i\|, \quad (18)$$

$$\dot{v}_i \leq -\eta_{i3} \|x_i\|, \quad (19)$$

$$\|\text{grad} v_i\| \leq \eta_{i4}. \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta_{i1} &= \sqrt{\lambda_m(H_i)}, \\ \eta_{i2} &= \sqrt{\lambda_m(H_i)}, \\ \eta_{i3} &= \sqrt{\lambda_m(H_i)}, \\ \eta_{i4} &= \frac{1}{2} \frac{\lambda_M(H_i)}{\sqrt{\lambda_m(H_i)}}. \end{aligned}$$

从而得到子系统稳定区域的估计定理.

定理 1 假设孤立子系统(12)的零解是渐近稳定的, 存在式(15)定义的 Lyapunov 函数 $V_i(x_i)$, 则当控制输入满足式(14)时, 其稳定域估计如式(18)~(20)所示.

3.2 整个系统联结稳定性判定

由

$$\text{grad}v_i(x_i) = \frac{\text{grad}V_i(x_i)}{2\sqrt{V_i(x_i)}} \quad (21)$$

可计算得

$$\begin{aligned} &[\text{grad}v_i(x_i)]^T h_i(x) = \\ &\frac{1}{2} v_i^{-1}(x_i) (\zeta_i x_{i1} + x_{i2}) \times \\ &\left[(M_n^{-1} - M_i^{-1}) A_{in} \cos \theta_{in} (\cos \delta_{in} - \cos \delta_{in}^0) + \right. \\ &\left. \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} (M_n^{-1} f_{nj} - M_i^{-1} f_{ij}) \right], \\ &i = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (22)$$

互联项约束满足

$$\|[\text{grad}v_i(x_i)]^T h_i(x)\| \leq \sum_{j=1}^{n-1} \xi_{ij} \|x_j\|. \quad (23)$$

其中

$$\xi_{ij} = \begin{cases} \hat{\zeta}_i \eta_{i1}^{-1} = \\ \left[|M_n^{-1} - M_i^{-1}| A_{in} \cos \theta_{in} |\sin \delta_{in}^0| + \right. \\ \left. \sum_{j=1, j \neq i}^{n-1} M_i^{-1} A_{ij} |\sin(\delta_{in}^0 - \theta_{ij})| \right], & i = j; \\ \hat{\zeta}_i \eta_{i1}^{-1} = \\ \left[M_n^{-1} A_{jn} |\sin(\delta_{jn}^0 + \theta_{jn})| + \right. \\ \left. M_i^{-1} A_{ij} |\sin(\delta_{in}^0 - \theta_{ij})| \right], & i \neq j. \end{cases}$$

进而可得

$$\begin{aligned} &\dot{v}_i(x_i)_{(8)} = \\ &\dot{v}_i(x_i)_{(12)} + [\text{grad}v_i(x_i)]^T h_i(x) \leq \\ &- \eta_{i3} \|x_i\| + \sum_{j=1}^{n-1} \xi_{ij} \|x_j\| \leq \\ &- \eta_{i2}^{-1} \eta_{i3} v_i(x_i) + \sum_{j=1}^{n-1} \xi_{ij} \eta_{j1}^{-1} v_j(x_j). \end{aligned} \quad (24)$$

引入向量 Lyapunov 函数

$$v(x) = [v_1(x_1), v_2(x_2), \dots, v_{n-1}(x_{n-1})]^T. \quad (25)$$

标量不等式(24)可以写成向量微分不等式

$$\dot{v} \leq Wv. \quad (26)$$

其中

$$W = (w_{ij}). \quad (27)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} -\eta_{i2}^{-1} \eta_{i3} + \xi_{ii} \eta_{i1}^{-1}, & i = j; \\ \xi_{ij} \eta_{j1}^{-1}, & i \neq j. \end{cases} \quad (28)$$

为了保证聚集阵是一个稳定阵, 需要满足条件

$$\begin{aligned} &(-1)^k \begin{vmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1k} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ w_{k1} & w_{k2} & \cdots & w_{kk} \end{vmatrix} > 0, \\ &k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (29)$$

因此, 得到整个系统的联结稳定性判定定理.

定理 2 假设存在 Lyapunov 函数如式(15), 且是局部 Lyapunov 函数 Lipschitzian 的, 对于孤立子系统(12), 满足式(14), 同时假设互联函数满足式(23), 则存在由(27)定义的聚集阵, 当满足条件式(29)时, 电力大系统(1)的零解是联结渐近稳定的.

4 算例分析

考虑 3 台同步发电机通过电力网络互联组成的系统, 其参数如下:

$$\begin{aligned} M_1 &= 0.01, \quad M_2 = 0.01, \quad M_3 = 2.00, \\ E_1 &= 1.017, \quad E_2 = 1.005, \quad E_3 = 1.033, \\ Y_{12} &= 0.00098, \quad Y_{13} = 0.114, \quad Y_{23} = 0.106, \\ \theta_{12} &= 86^\circ, \quad \theta_{13} = 88^\circ, \quad \theta_{23} = 89^\circ, \\ \delta_{12}^0 &= 5^\circ, \quad \delta_{13}^0 = -2^\circ, \quad \delta_{23}^0 = -3^\circ, \\ \lambda &= 100. \end{aligned}$$

将第 3 台电机作为参考, 得到两个子系统, 如图 2 所示. 根据控制量计算式(6), 分别得到

$$\begin{aligned} u_1(y_1) &= \\ &(M_1^{-1} + M_3^{-1}) A_{13} \sin \theta_{13} (\sin \delta_{13} - \sin \delta_{13}^0), \\ u_2(y_2) &= \\ &(M_2^{-1} + M_3^{-1}) A_{23} \sin \theta_{23} (\sin \delta_{23} - \sin \delta_{23}^0), \end{aligned}$$

其中 δ_{13} 和 δ_{23} 由实际检测得到. 若选择 $\zeta_1 = \zeta_2 = 1$, 根据式(18)~(20), 得到子系统估计

$$\begin{aligned} \eta_{11} &= 0.704, \quad \eta_{12} = 7.485, \quad \eta_{13} = 0.796, \\ \eta_{21} &= 0.704, \quad \eta_{22} = 7.452, \quad \eta_{23} = 0.735. \end{aligned}$$

根据式(23),确定交互界为

$$\begin{aligned}\xi_{11} &= 0.352, \xi_{12} = 0.154, \\ \xi_{21} &= 0.161, \xi_{22} = 0.293.\end{aligned}$$

由以上数据可得聚集阵

$$W = \begin{bmatrix} -0.093 & 0.0874 \\ 0.0827 & -0.091 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

式(30)满足(29)确定的条件,是稳定的矩阵,从而可以判定整个电力系统是联结稳定的.

5 结论

本文提出了一种新的分布式协调控制设计方法,将复杂大系统网络化,子系统视为节点,互联部分视为边.对分解后的子系统控制器设计具有分布式协调性质,将复杂问题简单化,但由于稳定区域的估计,稳定性的判定具有一定的保守性.

参考文献(References)

- [1] 张鸿亮.带调速器的多台机组的暂态关联稳定性[J].应用数学,1994,7(2):131-136.
(Zhang H L. Transient connective stability of multi-machine power systems with governor[J]. *Mathematica Applicata*, 1994, 7(2): 131-136.)
- [2] Siljak D D. Large-scale dynamic systems: Stability and structure[M]. New York: North-Holland, 2007.
- [3] 李兴源,王贵德,刘俊勇.稳定控制研究中的多机电力系统数学模型[J].电力系统自动化,1994,18(5):20-25.
(Li X Y, Wang G D, Liu J Y. Models of multi-machine power systems for stability and control studies[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1994, 18(5): 20-25.)
- [4] 吴小苗,韩祯祥.多机电力系统自适应模糊稳定器的协调[J].中国电机工程学报,1996,16(3):155-159.
(Wu X M, Han Z X. Coordination of adaptive fuzzy logic stabilizers in multi-machine power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1996, 16(3): 155-159.)
- [5] Mahmud M A, Pota H R, Aldeen M, et al. Partial feedback linearizing excitation controller for multi-machine power systems to improve transient stability[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2014, 29(2): 561-571.
- [6] Tan X L, Ikeda M. Decentralized stabilization for expanding construction of large scale systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*. 1990, 35: 644-651.
- [7] 邓集祥,张崇见,边二曼,等.灾变理论在多机电力系统暂态稳定分析中的应用[J].中国电机工程学报,1995,15(3):158-165.
(Deng J X, Zhang C J, Bian E M, et al. Transient stability analysis using catastrophe theory in multi-machine power systems[J]. *Proc of the CSEE*, 1995, 15(3): 158-165.)
- [8] Godpromesse Kenné, Raphael Goma, Homère Nkwawo, et al. An improved direct feedback linearization technique for transient stability enhancement and voltage regulation of power generators[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2010, 32: 809-816.
- [9] Yi Guo, David J Hill, Youyi Wang. Global transient stability and voltage regulation for power systems[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2001, 16(4): 678-688.
- [10] Alexander G Loukianov, José M Caedo, Leonid M Fridman, et al. High-order block sliding-mode controller for a synchronous generator with an exciter system[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 337-346.
- [11] Shan-Ying Li, Sang-Seung Lee, Yong Tae Yoon, et al. Nonlinear adaptive decentralized stabilization control for multimachine power systems[J]. *Int J of Control, Automation, and Systems*, 2009, 7(3): 389-397.
- [12] Youyi Wang, Guoxiao Guo, David J Hill. Robust decentralized nonlinear controller design for multimachine power systems[J]. *Automatica*, 1997, 33(9): 1725-1733.

(责任编辑:郑晓蕾)