基于观测解耦状态空间的多机励磁非线性分散最优控制策略

王晓燕, 邱晓燕

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 为进一步改善多机系统的暂态稳定性,结合直接反馈线性化原理和最优控制理论推导出多机系统中励磁的分散控制规律。该控制策略是根据多机电力系统观测解耦状态空间得出,只需要当地信号实施控制,驱动子系统到达局部平衡点,就能使全系统达到稳定。仿真结果表明,该控制规律能够较好地提高多机电力系统的暂态稳定性。

关键词: 励磁控制; 观测解耦状态空间; 最优控制

中图分类号: TM712 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0038-04

0 引言

励磁控制是改善电力系统稳定性及动态性能的最有效、最经济的手段之一,在电力系统稳定控制中一直发挥着关键作用。由于电力系统具有地域分布广、获取远方信息难的特点,集中控制通常难以实现。为了提高控制的快速和实时性,较好的方法是按照实际控制点的地理位置进行分散控制,即只采用本地可测信号进行控制。如何建立相应的模型,一直是控制器设计中的难点。文献[1]为了获得仅采用本地可测量的控制策略,在推导局部系统的控制规律时忽略了其余机组的动态过程;文献[2]则在推导过程中做了较多的假设。值得一提的是Zaborszky等人提出的多机电力系统观测解耦状态空间模型,它仅需要获得局部信息就能构成局部控制器[3~5]。

另一方面,伴随着现代控制理论的发展,越来越多的先进控制理论,如线性最优控制、鲁棒控制、非线性控制被广泛地应用到励磁系统中。特别是基于反馈线性化的微分几何控制方法,成功地解决了多机分散的镇定问题,所得的控制规律能够有效地提高系统的大干扰稳定性。

本文将观测解耦状态空间模型和直接反馈线性化最优控制理论结合,用于多机系统中发电机励磁的分散控制。首先建立含发电机励磁动态的观测解耦状态空间模型,然后采用直接反馈线性化原理和最优控制理论设计出多机系统中励磁的分散控制规律,只需要当地信号实施控制,驱动子系统到达局部平衡点,就能使全系统达到稳定。仿真结果表明,该策略能更进一步地提高多机系统的稳定性。

1 数学模型

1.1 局部状态估计

考察一个含 n 台发电机的系统,其中第 i 个局部子系统的模型如图1所示。以变压器高压侧电压 V_{ih} 为参考相量,在任意时刻测得发电机 i 各相邻交流支路的潮流 P_{ik}、Q_{ik},由此可推导出发电机内电势 $\bar{E}_i$,电功率 P_{ei} 和支路母线的电压 $\bar{E}_k$[3]:

$$\bar{E}_i = E_t(t)\angle\delta_i\left(1+\frac{\bar{Y}_{ic}}{\bar{Y}_{ia}}+\frac{\bar{Y}_{id}}{\bar{Y}_{ie}}\right)V_{ih}+\frac{1}{\bar{Y}_{ie}+V_{ih}}\sum_k(P_{ik}-jQ_{ik}) \quad (1)$$

$$P_{ei} = G_{ii}E_i^2 + E_iI_{i0}\cos(\delta_i-\theta_{i0}) \quad (2)$$

$$\bar{E}_k = E_k\angle\alpha_k = \left(1+\frac{jB_{cik}}{\bar{Y}_{ik}}\right)V_{ih}-\frac{P_{ik}-jQ_{ik}}{\bar{Y}_{ik}V_{ih}} \quad (3)$$

其中:发电机 i 内部母线节点的自导纳 $\bar{Y}_{ii}=G_{ii}+jB_{ii}$,及其与相邻交流母线节点之间的互导纳 $\bar{Y}_{ik}=Y_{ik}\angle\alpha_{ik}$ 可以通过压缩导纳阵求得;$\bar{Y}_{ia}$ 为电机内电纳;$\bar{Y}_{ib}$ 为变压器导纳;$\bar{Y}_{ic}$ 和 $\bar{Y}_{id}$ 为变压器并联导纳;B_{cik} 为线路并联电纳;$\frac{1}{\bar{Y}_{ie}}=\frac{1}{\bar{Y}_{ia}}+\frac{1}{\bar{Y}_{ib}}+\frac{\bar{Y}_{ic}}{\bar{Y}_{ia}\bar{Y}_{ib}}$;$\bar{I}_{i0}=I_{i0}\angle\theta_{i0}=\sum_k\bar{Y}_{ik}\bar{E}_k$。

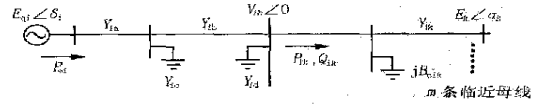

图1 局部子系统的模型

Fig.1 Local subsystem model

1.2 观测解耦状态空间模型

1.2.1 状态变量的选择

设输入机械功率 P_{mi}恒定,发电机采用含励磁动态的三阶模型,针对图 1 所示的局部子系统,结合式(1)～(3)可得:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{H_i}\{P_{mi} - \frac{D_i\omega_i}{\omega_0} - [G_{ii}E_i^2 + E_i I_{i0}\cos(\delta_i - \theta_{i0})]\}$$

$$\dot{E}_i = \frac{1}{T'_{d0i}}[-\frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}}E_i - (1 - \frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}})V_{ih}\cos\delta_i + u_{fi}] \tag{4}$$

δ_i为发电机转子角;ω_i为角速度;ω_0为额定转速;H_i为转动惯量;D_i为阻尼系数;$X_{d\Sigma i}$为电机电抗和变压器电抗的电抗;$X'_{d\Sigma i}$为含电机暂态电抗和变压器电抗的电抗;T'_{d0i}为发电机励磁时间常数;u_{fi}为发电机励磁电压。

由自动控制理论可知,任何动态系统在外部等效的前提条件下,其内部状态变量的选取不是唯一的。为了方便状态解耦变量的求取和直接反馈线性化的应用,对非线性系统(4)选择新的状态变量,采用如下坐标变换:

$$z_{1i} = \delta_i \quad z_{2i} = \omega_i \quad z_{3i} = \dot{\omega}_i \tag{5}$$

其中

$$\dot{z}_{3i} = -\frac{\omega_0}{H}\left(\dot{P}_e + \frac{Dz_{3i}}{\omega_0}\right) \tag{6}$$

对(2)式求导,可得:

$$\dot{P}_{ei} = \dot{E}_i[2G_{ii}E_i + I_{i0}\cos(\delta_i - \theta_{i0})] + E_i[\dot{I}_{i0}\cos(\delta_i -$$

将式(4)的第三式与上式结合,带入式(6),在新的坐标下,原系统的状态方程改写为:

$$\dot{z}_{1i} = z_{2i}$$

$$\dot{z}_{2i} = z_{3i}$$

$$\dot{z}_{3i} = -\frac{\omega_0}{H}\{\frac{1}{T'_{d0i}}[\frac{-X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}}E_i - (1 - \frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}})V_{ih}\cos z_{1i} + u_{fi}][2G_{ii}E_i + I_{i0}\cos(z_{1i} - \theta_{i0})] + E_i[\dot{I}_{i0}\cos(z_{1i} - \theta_{i0}) - I_{i0}\sin(z_{1i} - \theta_{i0})(z_{2i} - \theta_{i0})] + \frac{Dz_{3i}}{\omega_0}\} \tag{7}$$

1.2.2 观测解耦状态空间方程

Zaborszky 等人指出,如果在任意时刻所有的子系统都处于各自的动态平衡状态,那么系统是全局稳定的[6]。令式(7)中各状态变量的导数为零,即发电机输入输出功率达到动态平衡,可以求出局部子系统的动力学平衡点$(\delta_{ei}, \omega_{ei}, \dot{\omega}_{ei})$[5],定义观测解耦状态变量为:

$$x_i = [x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}]^T = [\bar{\delta}_i, \bar{\omega}_i, \dot{\bar{\omega}}_i]^T,$$

其中 $\bar{\delta}_i = \delta_i - \delta_{ei}$, $\bar{\omega}_i = \omega_i - \omega_{ei}$, $\dot{\bar{\omega}}_i = \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_{ei}$

用观测解耦状态变量表示系统(7),可以得到局部子系统的观测解耦状态空间方程,并设定控制目标输出为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= f_i(x_i) + b_i u_i\\ y_i &= x_{1i} = \bar{\delta}_i - \bar{\delta}_{ei}\end{aligned} \tag{8}$$

$$b_i = \left[0 \quad 0 \quad \frac{-\omega_0}{HT'_{d0i}}\right]^T, \quad u_i = u_{fi}$$

$$f_i(x_i) = \left[\begin{array}{l} x_{2i} \\ x_{3i} \\ -\frac{\omega_0}{H}\{\frac{1}{T'_{d0i}}\cdot[\frac{-X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}}E_i - (1 - \frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}})V_{ih}\cos(x_{1i} + \delta_{ei}) + u_{fi}]\cdot[2G_{ii}E_i + I_{i0}\cos(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0})] + E_i[\dot{I}_{i0}\cos(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0}) - I_{i0}\sin(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0})(x_{2i} + \omega_{ei} - \dot{\theta}_{i0})] + \frac{D(x_{3i} + \dot{\omega}_{ei})}{\omega_0}\} - \ddot{\omega}_{ei} \end{array}\right]$$

2　直接反馈线性化

可以看出,式(8)是个复杂的非线性系统,直接求解控制变量 u_{fi}十分困难。本文将采用直接反馈线性化[7]方法使问题求解简单化。其基本思路是:对于给定的非线性系统,通过设置预反馈,使得原系统变为一个完全能控的线性系统。

设置预反馈为:

$$v_{fi} = -\frac{\omega_0}{H}\{\frac{1}{T'_{d0i}}[\frac{-X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}}E_i - (1 - \frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}})V_{ih}\cos(x_{1i} + \delta_{ei}) + u_{fi}]\cdot[2G_{ii}E_i + I_{i0}\cos(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0})] + E_i[\dot{I}_{i0}\cos(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0}) - I_{i0}\sin(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0})\cdot(x_{2i} + \omega_{ei} - \theta_{i0})] + \frac{D(x_{3i} + \dot{\omega}_{ei})}{\omega_0}\} - \ddot{\omega}_{ei} \tag{9}$$

将式(9)带入观测解耦状态空间方程(8):

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1i} &= x_{2i}\\ \dot{x}_{2i} &= x_{3i}\\ \dot{x}_{3i} &= v_{fi}\\ y_i &= x_{1i}\end{aligned} \tag{10}$$

明显的设置预反馈后的系统(10)是一个标准线性化系统,其中 v_{fi}可以看作该线性化系统的虚拟控制量。由式(9)可以看出 v_{fi}是含有原非线性系统控制量 u_{fi}的函数。故,由 v_{fi}的表达式可反解出的 u_{fi}表达式:

$$u_{fi} = \{E_i[\dot{I}_{i0}\cos(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0}) - I_{i0}\sin(x_{1i} + \bar{\delta}_{ei} - \theta_{i0})(x_{2i}$$

$$+\omega_{ei}-\theta_{i0})]+\frac{D(x_{3i}+\dot{\omega}_{ei})+(v_{fi}+\ddot{\omega}_{ei})H}{\omega_0}\}\cdot\frac{-T'_{d0i}}{[2G_{ii}E_i+I_{i0}\cos(x_{1i}+\delta_{ei}-\theta_{i0})]}+\frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}}E_i+(1-\frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}})V_{ih}\cos(x_{1i}+\delta_{ei}) \quad (11)$$

不难看出,只要求得线性化后系统的虚拟控制量 v_{fi} 再带入(11),即可得到原非线性系统的完整控制规律。

3 最优控制

要求解线性化后系统(10)的虚拟控制量 v_{fi},可以利用线性最优控制理论来设计线性二次型最优控制规律。其基本原理如下:

对于给定的线性系统:

$$\dot{Z}=AZ+BY$$

$$Y=CZ$$

首先建立二次型指标,$J=\int_0^\infty(Z^TQZ+V^TRV)\,dt$,Q 为正定或半正定矩阵,R 为正定矩阵。使得性能指标达到极值的 V 称为最优控制:$V=-R^{-1}B^TPZ=-KZ$。其中 P 为 Riccati 方程 $A^TP+PA-PBR^{-1}B^TP+Q=0$ 的对称正定解。

对于系统(10),经过反复调试和分析获取适当的加权矩阵 Q,R,可求得其虚拟控制量的最优控制规律为:

$$v_{fi}=-x_{1i}-2.414x_{2i}-2.414x_{3i} \quad (12)$$

将上式带入(11),即可得出原非线性系统完整的最优控制规律。有资料表明,当灵活地选取 $\bar{\omega}_i=\omega_i$,$\dot{\bar{\omega}}_i=\dot{\omega}_i$ 时,在保证控制效果的同时可以大大简化控制规律的表达式[5]:

$$u_{fi}=\{E_i[\dot{I}_{i0}\cos(\delta_i-\theta_{i0})-I_{i0}\sin(\delta_i-\theta_{i0})(\omega_i-\theta_{i0})]+\frac{D\dot{\omega}_i-[\delta_i-\delta_{ei}+2.414(\omega_i+\dot{\omega}_i)]H}{\omega_0}\}\cdot\frac{-T'_{d0i}}{[2G_{ii}E_i+I_{i0}\cos(\theta_i-\theta_{i0})]}+\frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}}E_i+(1-\frac{X_{d\Sigma i}}{X'_{d\Sigma i}})V_{ih}\cos\delta_i \quad (13)$$

4 数字仿真

本文以一个 3 机系统为例进行数字仿真验算,系统参数参见文献[5]。如图所示,数字仿真考察了当交流联络线在靠近发电机 G_1 出口母线处发生 100 ms 三相短路故障时,系统分别在常规励磁控制、基于观测解耦状态空间模型的非线性分散最优励磁控制方式下,发电机功角、机端电压的变化趋势。

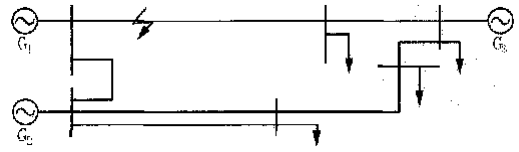

图 2 三机系统

Fig. 2 Three-machine system

由图 3 可以看出,较之常规励磁控制,在采用基于观测解耦状态空间模型的非线性分散最优励磁控制后,对功角差波动的抑制作用非常明显,加速了其振幅的衰减过程,系统恢复稳定所用时间更短;同时发电机 1 的机端电压波动幅度也明显减小。

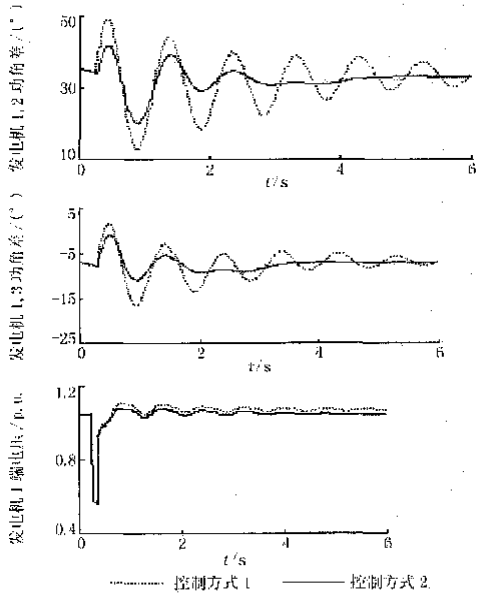

图 3 各种控制方式的比较

Fig. 3 Comparison of control strategies

5 结论

本文研究了多机励磁的分散控制问题,目的在于提高系统的暂态稳定。首先建立发电机励磁动态观测解耦状态空间模型,根据该模型只需要当地信号实施控制,驱动子系统到达局部平衡点,就能使全系统达到稳定。然后结合直接反馈线性化和最优控制理论设计出多机励磁的控制规律。仿真结果证明,所设计的非线性分散控制策略可以明显地提高发电机的功角、机端电压稳定性。

参考文献:

[1] Wang Y, Guo G, Hill D J. Robust Decentralized Nonlinear Controller for Multimachine Power Systems[J]. Automatica,

1997,33(9):1725-1733.

[2] Lu Q, Sun Y Z, Xu Z, et al. Decentralized Nonlinear Optimal Excitation Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996,11(4):1957-1962.

[3] Jerome M. Transient Stability Augmentation Using a Hierarchical Control Structure[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980,99(1):256-267.

[4] 李兴源,刘取,高景德. 多机电力系统再同步最优变目标控制[J]. 中国电机工程学报, 1994,14(4):33-37.

LI Xing-yuan, LIU Qu, GAO Jing-de. Optimal-variable-aim Control of Resynchronization in Multimachine Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1994,14(4):33-37.

[5] 李兴源, 邱晓燕, 刘红超,等. 改善暂态稳定性的HVDC非线性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2002,26(14):16-19.

LI Xing-yuan, QIU Xiao-yan, LIU Hong-chao, et al. A Nonlinear Control Strategy of HVDC for Improving Transient Stability of Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(14):16-19.

[6] Zaborszky J, Whang K W, Prasad K. Stabilizing Control in Emergencies, Part One[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981,100(5):2374-2389.

[7] 马幼捷. SVC与发电机励磁协调非线性控制[J]. 电工技术学报,1998,13(4):1-4.

MA You-jie. The Nonlinear Control of SVC Coordinate with the Excitation System of Generator[J]. Journal of Electrotechnics, 1998,13(4):1-4.

收稿日期: 2004-04-29; **修回日期**: 2004-05-31

作者简介:

王晓燕(1976-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;E-mail: wxy-sc@163.com

邱晓燕(1966-),女,副教授,硕士生导师,从事电力系统分析、稳定和控制等方面的研究工作。

An decentralized nonlinear optimal excitation control strategy based on observation decoupled state space model for multi-machine power systems

WANG Xiao-yan, QIU Xiao-yan

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To improve transient stability of multi-machine power systems, this paper presents a control strategy of generator excitation based on the direct feedback linearization method of nonlinear systems and the optimal control theory of linear systems. Using an observation decoupled state space model of multi-machine power systems, the control rule is easy to be implemented because it needs only local information to drive the subsystems to reach their local equilibrium points, and then the total system is stable. The simulation results show that the proposed method can improve transient stability of multi-machine power systems significantly.

Key words: excitation control; observation decoupled state space model; optimal control

(上接第37页　continued from page 37)

Abstract: By using Hopf bifurcation theory to analyze the stability operation of electric power systems, the nonlinear characteristics of nonlinear systems can be totally involved and the instability reasons for systems be revealed further. While to calculate the Hopf bifurcation points, the previous methods involve a great deal of computation of the eigenvalues of system's Jacobian matrix and decision whether the real parts of the eigenvalues were zero when there exist any change of the parameters in the system. In this paper, with the Louts criterion for Hopf bifurcation, the Hopf bifurcation point of the nonlinear systems and the corresponding frequency at this point can be obtained directly, which overcomes the drawback of the traditional method involving much computation for systems' Jacobian matrix. The method introduced in the paper is proved effective by the example for a simple electric power system.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010) and Research Fund for the Doctoral Programme of Higher Education (No. 20020561004).

Key words: power system; bifurcation theory; Hopf bifurcation; Louts criterion