

基于测度理论的广域电力系统反馈信号最大允许时延分析

石颀, 刘韬

(苏州热工研究院, 江苏 苏州 215004)

摘要: 广域电力系统稳定性分析与控制中一个不容忽视的问题就是广域信号的传输时延。文章提出了一种基于矩阵测度理论的分析方法。该方法从广义的角度给出了应用广域控制策略的含多时延的闭环电力系统模型; 针对该模型, 应用矩阵测度的现有理论给出了保证系统闭环稳定的充分条件, 并能求出系统最大允许时延。文章以时域仿真结果说明了该方法的有效性。

关键词: 广域电力系统; 矩阵测度; 广域控制; 最大允许时延; 渐进稳定

Analysis of the maximal delay of remote signal for wide-area power system based on the theory of measure

SHI Jie, LIU Tao

(Suzhou Nuclear Power Institution, Suzhou 215004, China)

Abstract: Time delay of remote signal is an unavoidable matter for study of the wide area power system. In this paper, a new approach based on the matrix measure theory is proposed. The closed-loop multi-delay power system model with wide-area controller is presented from the general point of view. The sufficient condition to obtain the maximum allowable delay which ensures asymptotic stability of the closed-loop system is given based on the matrix measure theory. The simulation results verify its validity.

Key words: wide area power system; matrix measure; wide area control; maximum allowable delay; asymptotic stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0008-04

0 引言

大区电网互联是电网发展到一定阶段的必然趋势。然而互联电网规模巨大, 广域信息的传输时延一般都在几十毫秒到数百毫秒之间^[1-3], 是不能忽略的。时延的存在往往是系统不稳定或系统性能变差的根源之一^[4]。所以, 如何考虑时延的影响, 如何正确地分析含时延项的广域闭环电力系统的稳定性, 已成为国内外学者研究的热点问题之一。

众所周知, 基于广域信息的控制器可以有效地提高互联系统的动态性能^[5-8]。但若不考虑信号传输时延的影响, 所得到的控制器在实际应用中可能达不到理想的效果, 甚至会恶化闭环系统的性能^[9]。为得到更切合实际的控制器, 应该在考虑信号传输时延的情况下对互联电力系统进行研究。文献[10~12]在考虑时延的情况下设计了控制器, 不但提高了互联系统的动态性能, 而且增强了系统对时延的鲁棒性。

测度理论可用于分析控制系统的稳定性, 文献[13,14]应用比较定理及测度理论对含时延项的控制

系统的稳定性进行了分析。文献[15]根据时滞系统的理论给出了含时延系统稳定的充分条件, 据此条件可求出保证闭环系统稳定的最大允许时延。

本文从一个新的角度对含有时延项的广域闭环电力系统模型进行了分析, 应用矩阵测度理论给出了能使广域闭环电力系统渐进稳定的充分条件, 根据该条件求出了最大允许时延。从而为该类问题的解决提供了一条新路。

1 考虑时延的电力系统模型

1.1 开环广域电力系统模型

对 n 机电力系统, 取状态变量为 $X=[\Delta\delta^T \ \Delta\omega^T \ \Delta E_q^T \ \Delta E_{fd}^T]^T$, 输入 $U=[\Delta V_{K1} \ \Delta V_{K2} \ \cdots \ \Delta V_{Kn}]^T$, 输出 $Y=[\Delta\omega_1 \ \Delta\omega_2 \ \cdots \ \Delta\omega_n]^T$, ΔV_K 表示控制器的输出, 则线性化后的模型 $G(S)$ 的状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}_q \\ \Delta\dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 E & 0 & 0 \\ -M^{-1}K_1 & -M^{-1}D & -M^{-1}K_2 & 0 \\ -T_{d0}^{-1}K_3 & 0 & -T_{d0}^{-1}K_4 & -T_{d0}^{-1} \\ -T_a^{-1}K_a K_5 & 0 & -T_a^{-1}K_a K_6 & -T_a^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_a^{-1}K_a \end{bmatrix} \Delta V_K \quad (1)$$

式中, $K_1 = \partial P_e / \partial \delta$, $K_2 = \partial P_e / \partial E'_q$,

$K_3 = \partial(E'_q + (x_d - x'_d)I_d) / \partial \delta$, $K_4 = \partial(E'_q + (x_d - x'_d)I_d) / \partial E'_q$,

$K_5 = \partial V_t / \partial \delta$, $K_6 = \partial V_t / \partial E'_q$, E 为相应维数的单位矩阵。系统的输出方程为:

$$\Delta\omega^T = [0 \ E \ 0] \cdot [\Delta\delta^T \ \Delta\omega^T \ \Delta E'_q \ \Delta E'_{fd}]^T \quad (2)$$

开环电力系统的状态空间方程可写为一般形式如下:

$$\begin{cases} \dot{X}_p(t) = A_p X_p(t) + B_p U(t) \\ Y(t) = C_p X_p(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中: A_p 、 B_p 、 C_p 为适维矩阵。

1.2 闭环广域电力系统模型

由于广域电力系统地理分布很广, 在进行闭环控制时, 为达到最理想的效果, 反馈信号不应局限于本地信息。对于广域信号来说, 传输延时能达到数十甚至数百毫秒, 是不能忽略的。另外, 有多个广域控制回路时, 由于信号传输距离不等, 传输时延大小不一, 系统为一个多时延控制系统。设系统(3)存在严格真的输出反馈控制器:

$$U(t) = K(s)Y(t-d) \quad (4)$$

其状态空间实现为:

$$\begin{cases} \dot{X}_K(t) = A_K X_K(t) + B_K Y(t-d) \\ U(t) = C_K X_K(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$Y(t-d) = \sum_{j=1}^m (\text{ONE}_j \otimes C_p) \cdot X_p(t-d_j) \quad (6)$$

其中: X_K 为控制器状态相量; A_K 、 B_K 、 C_K 为适维矩阵, \otimes 表示矩阵对应元素相乘, ONE_j 表示与 C_p 维数相同, 但只有第 j 行元素为 1, 其它元素全为零的矩阵, m 表示含时延的广域反馈信号个数。此时系统模型具有时延依赖性。

联立式(3)、(5)、(6)可得到:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + \sum_{j=1}^m A_j X(t-d_j) \\ Y(t) = CX(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} A_p & B_p C_K \\ 0 & A_K \end{bmatrix}, \quad A_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_K (\text{ONE}_j \otimes C_p) & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [C_p \ 0], \quad X = \begin{bmatrix} X_p^T & X_K^T \end{bmatrix}^T,$$

$$X(t-d_j) = \begin{bmatrix} X_p^T(t-d_j) & X_K^T(t-d_j) \end{bmatrix}^T$$

2 比较定理与矩阵测度

定义 1 对于矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, $\|A\|$ 表示其范数, 则关于范数 $\|A\|$ 的测度定义为:

$$\mu(A) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{\|I + hA\| - 1}{h} \quad (8)$$

定义 2 关于范数 $\|A\|_1$ 、 $\|A\|_2$ 、 $\|A\|_\infty$ 的测度分别定义为:

$$\mu_1(A) = \max_j (a_{jj} + \sum_{i \neq j} |a_{ij}|) \quad (9a)$$

$$\mu_2(A) = \lambda_{\max} \left(\frac{A + A^T}{2} \right) \quad (9b)$$

$$\mu_\infty(A) = \max_i (a_{ii} + \sum_{j \neq i} |a_{ij}|) \quad (9c)$$

其中: $\lambda(\cdot)$ 表示特征值。

引理 1^[16] 任意向量 $x, y \in R^m$, $x \leq y$ 当且仅当 $x_i \leq y_i$, ($i=1, 2, \dots, m$)。

引理 2^[16] (比较定理) 假设向量值函数 $F(t, s, x): J \times J \times R^m \rightarrow R^m$, $J=[t_0, \infty)$ 有如下性质:

对任意给定的 t 和 s , 当 $x_1 \leq x_2$ 时, $F(t, s, x)$ 满足

$$F(t, s, x_1) \leq F(t, s, x_2)$$

令 $x(t)$ 是积分不等式

$$x(t) \leq x_0(t) + \int_{t_0}^t F(t, s, x(s-h)) ds$$

$$\text{的解, 那么, 方程 } w(t) = x_0(t) + \int_{t_0}^t F(t, s, w(s-h)) ds$$

的最大解 $r(t)$ 满足: $x(t) \leq r(t)$ $t \geq t_0$

定理 1^[15] 对于控制系统(7), 如果满足

$$\mu(A) < -\sum_{j=1}^N \|A_j\|$$

那么, 它就是大范围渐近稳定的。

定理 1 给出了控制系统(7)渐近稳定的充分条件, 由定理条件可以看出, 条件是否成立与矩阵范数的选择有关。选择一种范数, 实际的网络控制系统可能并不满足定理条件, 但是, 另一种范数下, 定理条件也许就会成立。除了 1, 2 和 ∞ 范数, 其它的范数也可以考虑。例如

$$\|A\|_w = \max_j \sum_i \frac{w_i}{w_j} |a_{ij}|,$$

$$\mu_w(A) = \max_j \left\{ a_{jj} + \sum_{i \neq j} \frac{w_i}{w_j} |a_{ij}| \right\}$$

其中: w_i, w_j 是任意的正参数。

同时, 只要设计合适的控制器参数, 使实际的闭环控制系统满足定理 1 的条件, 那么, 即使网络控制系统的时延非常大, 系统仍然可以渐近稳定。

定理 2^[15] 对于控制系统(7), 假设 $A + \sum_{j=1}^N A_j$ 是渐近稳定的, 如果 $h = \max_{j=1}^N h_{j,max}$ 满足:

$$0 < h < \frac{-\mu \left(A + \sum_{j=1}^N A_j \right)}{\sum_{j=1}^N \left(\|A_j A\| + \sum_{i=1}^N \|A_j A_i\| \right)} \quad (10)$$

那么系统(7)是渐近稳定的, 其中 $\mu(\cdot)$ 表示矩阵测度。

定理 2 给出了显含时延项的控制系统稳定性的充分条件, 对于实际的系统而言, 可以应用此定理来验证其稳定性。但是, 由于只是充分条件, 如果条件不满足的话, 并不能说明实际的网络控制系统不稳定, 还得用其他方法去判定。另外, 应用定理可以求出使系统稳定的最大时延, 指导设计者选取适当的控制网络以及设计合适的网络调度算法, 以满足控制系统稳定性的要求。

3 算例

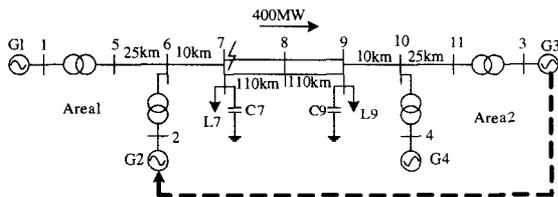


图 1 4 机测试系统

Fig.1 4-generators system

图 1 为本文选用的测试系统接线图, 四台发电机均为一阶励磁系统, 参数为 $K_a=100, T_a=0.01$, 系统的其他参数见文献[5]。系统处于局部负荷过重的状态, 当不安装控制装置时, 计算出开环系统低频振荡模式如表 1 所示。由表 1 可知系统处于不稳定状态, 有三个振荡模式, 前两个模式为局部振荡模式, 第三个模式为区间振荡模式。考虑到控制器间的交互影响, 文章选取了 3 个 PSS 控制回路, 前两个 PSS 分别安装在 1 号机组和 3 号机组上, 并以相应机组的输出 $\Delta\omega_i$ 作为反馈信号, 而第 3 个是以 3# 机的输出 $\Delta\omega_3$ 作为广域信息, 反馈回 2# 机的 PSS, 形成一条广域控制回路, 该控制回路存在时延。PSS 参数应用文献[5]的进化策略获得, 见表 2。安装该 PSS 后系统最小阻尼比变为 0.1349, 已足够稳定。

再根据式(7)可得到含时延的控制系统模型。由于 $A + \sum_{j=1}^N A_j$ 的最大特征值为 $-0.0676 < 0$, 是渐进稳定的,

根据定理 2 可求出能保证系统稳定的最大时延, 表 3 分别给出了三种范数意义下的最大允许时延。由表 3 的结果可知, 选取不同的范数, 所得的结果是不同的。图 2 给出了安装 PSS 后的系统在不同时延下的仿真曲线, 由图 2 可知, 在三种范数下求出的最大允许时延都能使系统渐近稳定。然而, 系统在时延达到 250 ms 时才接近稳定极限, 说明实际的系统最大允许时延大于三种范数所确定的。这又说明了定理的条件只是充分条件, 是比较保守的。

表 1 不安装 PSS 时系统特征值分析

Tab.1 Eigenvalue analysis of the system without PSS

模式	1	2	3
特征值	-0.4472+6.7180i	-0.1360+5.9832i	0.1022+2.9171i
阻尼比	0.0664	0.0227	-0.0350
振荡频率	1.0692	0.9523	0.4643
强相关机组	1#	3#	2#、3#

表 2 PSS 参数

Tab.2 Parameters of PSS

机组	k	T1	T2	T3	T4
1#	31.7493	0.1756	0.05	0.0614	0.05
2#	3.0101	0.3176	0.05	0.5147	0.05
3#	16.5955	0.6254	0.05	0.4456	0.05

表 3 矩阵测度及系统能稳定的最大允许时延

Tab.3 Matrix measure and maximum allowable delay

	$-\mu \left(A + \sum_{j=1}^N A_j \right)$	系统能稳定的最大时延/ms
1	18626.45	172.9
2	9140.37	72.0
∞	33554.69	191.6

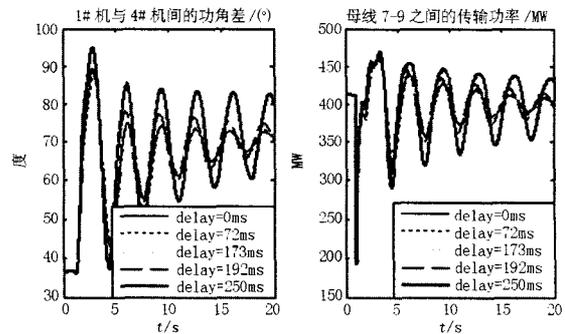


图 2 系统在不同时延下的仿真曲线

Fig.2 Simulation curve with the different delays

4 结论

文章针对应用广域控制的电力系统存在时延的现象,提出了一种基于矩阵测度的计算闭环系统稳定的最大允许时延的方法。只要设计合适的调度算法,使得反馈信号的传输时延小于最大允许时延,实际系统就能够稳定运行。由于是充分条件,所以实际的最大允许时延可能大于定理求出的时延,因此定理条件具有一定的保守性。

参考文献

- [1] TAYLOR C W, et al. Wide-area Stability and Voltage Control[A]. In: Proceedings of the VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning[C]. Curitiba(Brazil):2000.
- [2] Naduvathuparambil B, et al. Communication Delays in Wide Area Measurement Systems[A].In: Proceedings of the 34th Southeastern Symposium on System Theory[C]. Huntsville(AL):2002.118-122.
- [3] 胡志祥, 谢小荣, 肖晋宇, 等. 广域测量系统的延迟分析及其测试[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15):39-43.
HU Zhi-xiang, XIE Xiao-rong, XIAO Jin-yu, et al. Analysis and test on Delay in the Wide Area Measuring System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15):39-43.
- [4] Kolmanovskii V B, et al. Delay Effects on Stability: A Survey[A]. In: Proceedings of the 38th IEEE Confon Decision and Control[C].Arizona:1999.1993-1998.
- [5] 王成山, 石颢. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 1-6.
WANG Cheng-shan, SHI Jie. PSS Designing with Consideration of Time Delay Impact[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 1-6.
- [6] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004,24(9):7-11.
HUANG Ying, XU Zheng. HVDC Supplementary Controller Based on Synchronized Phasor Measurement Units [J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(9):7-11.
- [7] Kubner K, Erlich I. Design of Inter-area Oscillation Damping Controller Using Global Measurements[A]. In:IEEE Power Tech Conference[C]. Portugal: 2001.
- [8] 谢小荣, 肖晋宇,等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004,28(2):37-40.
XIE Xiao-rong, XIAO Jin-yu, et al. Inter-Area Damping Control of Interconnected Power Systems Using Wide-Area Measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(2):37-40.
- [9] 石颢, 王成山. 时间延迟对电力系统稳定器性能的影响[J]. 继电器, 2006, 34(13): 21-24,71.
SHI Jie, WANG Cheng-shan. Time Delay Impact on Performance of the Power System Stabilizer[J]. Relay, 2006, 34(13): 21-24,71.
- [10] WU Hong-xia, NI Hui, Heydt G T. The Impact of Time Delay on Robust Control Design in Power Systems[A]. In:Proc Power Engineering Society Winter Meeting[C].2002. 1511 -1516.
- [11] WU Hong-xia, Tsakalis K S, Heydt G T. Evaluation of Time Delay Effects to Wide-Area Power System Stabilizer Design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1935-1941.
- [12] Chaudhuri B, Majumder R, Pal Bikash C. Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1971-1979.
- [13] Lee Chien-hua, Li Tzuu-Hseng S, Kung Fan-chu. A New Approach for the Robust Stability of Perturbed Systems with a Class of Noncommensurate Time Delays[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-1:Fundamental and Applications, 1993, 40(9):605-608.
- [14] Tsay J T, Liu P L, Su T J. Robust Stability for Perturbed Large-scale Time-delay Systems[J]. IEEE Proc-Control Theory Appl, 1996, 143(3):233-236.
- [15] 窦连旺, 刘鲁源, 陈玉柱. 基于时滞理论的网络控制系统稳定性分析[J]. 天津大学学报, 2005, 38(1): 22-26.
DOU Lian-wang, LIU Lu-yuan, CHEN Yu-zhu. Stability Analysis of Networked Control Systems Based on Time-Delay Theory[J]. Journal of Tianjin University, 2005,38(1):22-26.
- [16] Lakshmikantham V, Leela S. Differential and Integral Inequalities[M]. New York: Academic Press, 1969.

收稿日期: 2007-06-24

作者简介:

石颢(1978-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: shijiedaxia11111@163.com

刘韬(1976-), 男, 博士, 工程师, 从事电站设备寿命和老化管理工作。

欢迎向“2008年中国电力系统保护与控制学术研讨会”投稿!

详情请登录 <http://www.dlbh.net>