

时间延迟对电力系统稳定器性能的影响

石颀, 王成山

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 应用电力系统稳定器 (PSS) 抑制区域间低频振荡模式时, 常需要广域信息作为反馈信号。由于广域信息传输距离长, 传输的时间延迟不可忽略。较大的时延对 PSS 的性能有很大的影响。文章应用能控性及可观性指标确定 PSS 控制回路, 采用进化策略整定 PSS 参数。为了有效地分析时延对闭环系统性能的影响, 文章应用 Pade 逼近法近似时延项 e^{-s} , 并把时延表示为状态空间形式, 从而可以分析该时延对系统的影响。以 4 机系统为例进行了非线性仿真, 说明了方法的有效性。

关键词: 电力系统稳定器; 区间振荡模式; 广域信息; 时间延迟; 进化策略; Pade 逼近

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)13-0021-04

0 引言

自二十世纪 70 年代以来, 许多国家的电力系统在运行中都发生了低频振荡问题。随着我国电网大区互联, 低频振荡现象也越来越出^[1,2]。应用 PSS 抑制系统低频振荡是一种经济有效的方法。然而随着系统规模的扩大, 振荡往往涉及多个区域, 系统的主导振荡模式多为区间振荡模式。传统的 PSS 设计方法^[3-5]已经不能达到理想的效果, 而应用区域间的广域信号进行控制的效果更好^[6-8]。PMU (phasor measurement unit) 和 WAMS (wide area measurement system) 的出现为获取广域信息提供了新手段。文献 [9] 提出了采用广域测量信号实现励磁控制器区间阻尼控制环节的方法, 文献 [10] 中提出了一个两级 PSS 的设计方法, 也能达到很好的效果。

上述方法多没有考虑信号传输时延的影响。广域信号的传输时延往往会恶化系统性能, 使控制器达不到理想的控制效果。为了正确地模拟实际系统的运行状态, 考虑时延的影响是必需的, 这对于分析实际控制系统的性能有着重要的意义。文献 [11, 12] 论述了时间延迟的处理方法以及对系统稳定性的影响。

文章详细讨论了信号传输的时间延迟对闭环系统稳定性的影响。应用 Pade 逼近近似时延, 并写成状态空间形式, 从而可分析在有时延情况下闭环系统的稳定性, 为该类问题提供了一条有效的途径。

1 电力系统稳定器设计

1.1 控制系统模型引入

闭环控制系统如图 1 所示, $G(s)$ 表示开环电力系统模型, 可用下式表示:

$$\begin{cases} \dot{X}_1(t) = A_1 X_1(t) + B_1 U_1(t) \\ Y_1(t) = C_1 X_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: X_1 为 n_1 维状态相量; U_1 为 r 维输入; Y_1 为 m 维输出; A_1 、 B_1 、 C_1 为相应维数的状态、输入和输出矩阵。K(s) 为 PSS, 其状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{X}_2(t) = A_2 X_2(t) + B_2 U_2(t) \\ Y_2(t) = C_2 X_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中: X_2 为 n_2 维状态相量; U_2 为 m 维输入; Y_2 为 r 维输出; A_2 、 B_2 、 C_2 为 PSS 的状态、输入和输出矩阵。

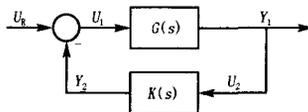


图 1 闭环控制系统方框图

Fig 1 Block diagram of the closed loop system

1.2 电力系统稳定器设计

1.2.1 广域控制回路的选择

PSS 及励磁系统的方框图如图 2 所示。

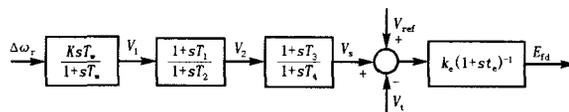


图 2 PSS 及励磁系统的方框图

Fig 2 Block diagram of excitation with PSS

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50595412)

针对线性化后的开环电力系统, $G(s)$ 可表示

为:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = 2 f_0 \cdot \\ \dot{\delta} = H^{-1} (- P_e - D \cdot \delta) \\ \dot{E}'_q = T_{d0}^{-1} [E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) I_d] \\ \dot{E}'_d = T_{q0}^{-1} [- E'_d + (x_q - x'_q) I_q] \\ \dot{E}'_{fd} = T_a^{-1} (- E'_{fd} + K_a (V_s - V_t)) \end{cases} \quad (3)$$

K(s) (即 PSS)可表示为:

$$\begin{cases} V_1 = K \cdot \omega - T_w^{-1} \cdot V_1 \\ V_2 = T_2^{-1} \cdot T_1 \cdot V_1 + T_2^{-1} (V_1 - V_2) \\ V_s = T_4^{-1} \cdot T_3 \cdot V_2 + T_4^{-1} (V_2 - V_s) \end{cases} \quad (4)$$

其中:黑体表示矩阵相量。对 n 机系统, $X_1 = [\omega \quad \delta \quad E'_q \quad E'_d \quad E'_{fd}]^T$, $X_2 = [V_1 \quad V_2 \quad V_s]^T$, $U_R = [V_{ref1} \quad V_{ref2} \dots V_{refn}]^T$, $Y_1 = [\omega \quad \delta \quad E'_q \quad E'_d \quad E'_{fd}]^T$, $Y_2 = [V_{s1} \quad V_{s2} \dots V_{sn}]^T$;其中 V_{ref} 表示机组的参考电压,线性化时忽略参考电压的变化,所以 $U_R = 0$, ω 表示机组的转速差, V_s 表示 PSS 输出信号。

一般来说,以本地信息作为反馈信号形成的控制回路,对局部振荡模式控制效果较好,但是对于区间振荡模式,控制效果不甚理想。通过应用 PMU, 可以获取远方任意一台机组或母线的信号(广域信息),从而形成广域反馈控制回路,这样可以较好地抑制区间振荡模式。

对式(3)进行特征值分析, λ_k 表示第 k 个特征值, $v_k = (v_{k1} \quad v_{k2} \dots v_{k5n})^T$, $w_k = (w_{k1} \quad w_{k2} \dots w_{k5n})$ 分别表示相应的右、左特征向量。由此易得到第 i 台机的输入对振荡模式 k 的能控性程度为^[7]:

$$M_{Cok} = \frac{|w_k b_i|}{w_k \cdot b_i} \quad (5)$$

第 j 台机的输出信号 y_j 对此模式的能观性程度为^[7]:

$$M_{Obk} = \frac{|c_j v_k|}{c_j \cdot v_k} \quad (6)$$

其中: b_i 表示 B_1 阵的第 i 列, c_j 表示 C_1 阵的第 j 行。

对某机电振荡模式 k , 能控性指标最大的输入信号对该模式的控制效果越好,所以应在 M_{Cok} 最大的机组上安装 PSS; 而能观性指标最大的输出,对模式 k 的能观性最好,应作为反馈信号,与 PSS 构成控制回路,抑制此模式。

1.2.2 应用进化策略优化 PSS 参数

进化策略通过模拟生物进化过程来求解优化问题。基于优化问题的目标函数和约束条件,构造问

题的适应度函数,根据求解得到的每一个个体的适应度,来选择淘汰个体,不断进化,直至设定的终止准则^[13]。

选定 PSS 控制回路后,求出闭环系统的所有特征值,并确定机电振荡模式。对某个模式 $\lambda = \alpha + j\omega$, 评价其是否为弱阻尼振荡模式最直接的指标就是阻尼比: $\zeta = -\alpha / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}$, 所以采用 ζ 为适应度最合适,设目标函数为:

$$J = \min(\zeta_i) \quad i \text{ 机电振荡模式}$$

考虑到实际参数的限制,可定义 PSS 参数协调的带约束条件的优化问题为:

$$\begin{cases} \max J \\ \text{s t} \quad k_{\min} < k_i < k_{\max} \\ T_{1\min} < T_{1i} < T_{1\max} \\ T_{3\min} < T_{3i} < T_{3\max} \end{cases}$$

对上式的优化问题应用进化策略求解,所得参数即为闭环系统中 PSS 的理想参数。

本文主要讨论时间延迟对系统稳定性的影响,而 PSS 参数的整定参见文献 [13]。

2 时延的处理

当应用广域信号进行控制时,由于信号传输距离长,传输时延不可忽略。另外,有多个广域控制回路时,由于信号传输距离不等,所以传输时延大小不一,可为一个多时延控制系统。图 3 为含有时延环节的闭环控制系统方框图,时延环节的输入为被控对象 $G(s)$ 的输出,输出为控制器 $K(s)$ 的输入。

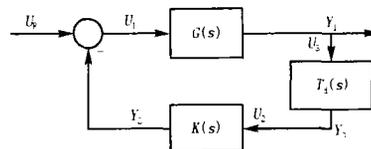


图 3 含有时延环节的闭环控制系统方框图

Fig 3 Block diagram of the closed loop system with time delay

在拉普拉斯域中,时延 $T_d(s)$ 可用 e^{-s} 表示,表示延迟时间。为了分析系统的性能,经常需要用有理函数来近似 e^{-s} 。近似方法有多种,例如 Pade 逼近、Bessel 函数和拉格朗日多项式等。在这些方法中, Pade 逼近 (为书写简便,下记为 $P(s)$) 更为精确,其表达式如下:

$$P(s) = \sum_{j=0}^l \frac{(l+k-j)! \cdot l! \cdot (-s)^j}{j! \cdot (l-j)!} / \sum_{j=0}^k \frac{(l+k-j)! \cdot k! \cdot (s)^j}{j! \cdot (k-j)!} \quad (7)$$

表 1 为 $P(s)$ 简表,为便于书写,只给出 1~4 阶 $P(s)$ 表达式。图 4 为应用 1~3 阶 $P(s)$ 近似时延的阶跃响应曲线。延迟时间为 100 ms,阶跃信号在 0 s 时跃变。由图 4 可知, $P(s)$ 的精度随着阶数 (l 或 k) 的变化而变化,阶数越高,近似就越精确,然而计算量会相应地增大,应综合选取。

表 1 Pade逼近表达式

Tab 1 Pade approximation

$l=k$	$P(s)$
1	$(2-s)/(2+s)$
2	$(12-6s+2s^2)/(12+6s+2s^2)$
3	$(120-60s+12s^2-3s^3)/(120+60s+12s^2+3s^3)$
4	$(1680-840s+180s^2-20s^3+14s^4)/(1680+840s+180s^2+20s^3+14s^4)$

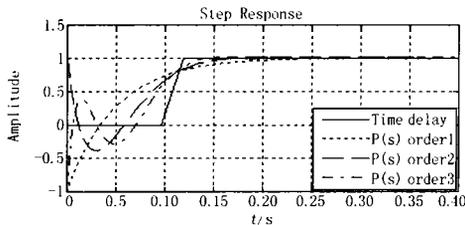


图 4 100 ms 时延环节与 $P(s)$ 的阶跃响应曲线

Fig 4 Step response of $P(s)$ and 100 ms time delay

3 算例

以 4 机 11 节点系统为例,说明本文方法的有效性。图 5 为系统的接线图,励磁系统的参数为 $K_a = 50, T_a = 0.05$,系统的其他参数见文献 [14]。系统处于局部负荷过重的状态,计算出开环系统低频振荡模式如表 2 所示。由表 2 可知系统有三个机电振荡模式,前两个模式为局部振荡模式,第三个模式为区间模式。考虑到控制器间的交互影响,安装了 3 个 PSS 进行控制。由表 2 最后两行可确定 3 个 PSS 控制回路。前两个控制回路均以本地信息构成,而第 3 个是以 #3 机的输出 P_3 作为广域信息,反馈到 #2 机的 PSS 上,形成一条广域控制回路。

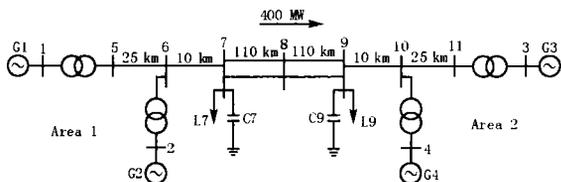


图 5 4 机 11 节点系统

Fig 5 4-generator 11-bus test system

对此系统应用进化策略整定 PSS 参数,结果见表 3。图 6 为无 PSS 系统与安装表 3 所列 PSS 的系统仿真曲线。由图可知,无 PSS 时系统不稳定,而装

上 PSS 后系统稳定。图 7 比较了时延对控制系统稳定性的影响。图中广域信息传输时延分别为 20 ms、40 ms 及 45 ms,随着时延的增大,系统振荡逐渐加剧,当时延达到 45 ms 时系统失去稳定。图 8~10 为应用 Pade 逼近近似不同时延的仿真曲线。结果表明,当时延为 44 ms 时,系统稳定;当时延为 45 ms 时,系统失稳,说明 Pade 逼近近似时误差在 1 ms 以内,近似效果非常理想。

表 2 无 PSS 时 4 机系统特征值分析

Tab 2 Eigenvalue analysis of 4-generator without PSS

模式	1	2	3
特征值	-0.4138 + 6.8244i	-0.3871 + 6.9822i	0.1377 + 3.8220i
阻尼比	0.0605	0.0553	-0.0360
振荡频率	1.0861	1.1112	0.6083
M_{Cmax} 机组	0.7454—#1	0.8100—#3	0.3948—#2
M_{Omax} 机组	0.0024—#1	0.0018—#3	0.0011—#3

表 3 PSS 参数

Tab 3 Parameters of PSS

机组	k	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
#1	17.4972	0.9138	0.05	0.2662	0.05
#2	11.9279	0.1167	0.05	0.1396	0.05
#3	19.3762	0.1169	0.05	0.8189	0.05

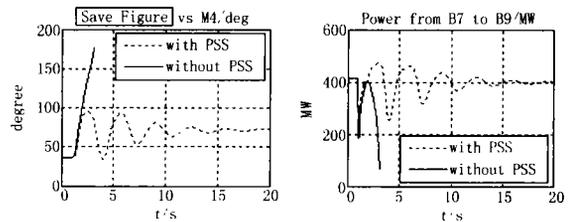


图 6 有无 PSS 时系统仿真曲线 (不考虑时延)

Fig 6 Curves with/without PSS regardless time delay

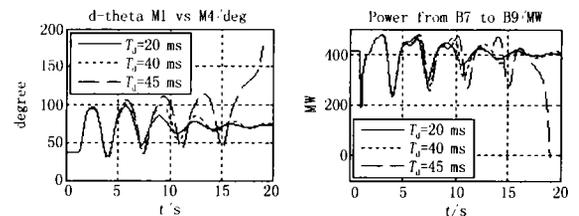


图 7 时延环节对闭环系统稳定性的影响

Fig 7 Impact of time delay on stability of the closed loop system

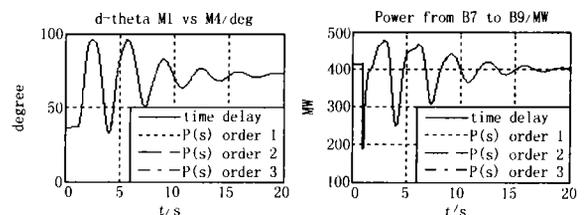


图 8 应用 Pade 逼近近似 10 ms 时延的仿真曲线

Fig 8 Curves of Pade approximation of 10 ms time delay

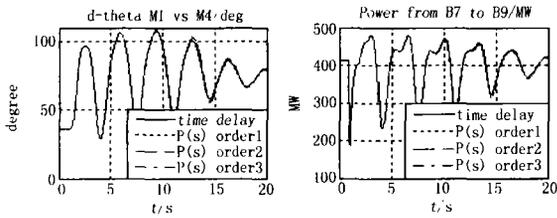


图 9 应用 Pade逼近近似 44 ms 时延的仿真曲线

Fig 9 Curves of Pade approximation of 44 ms time delay

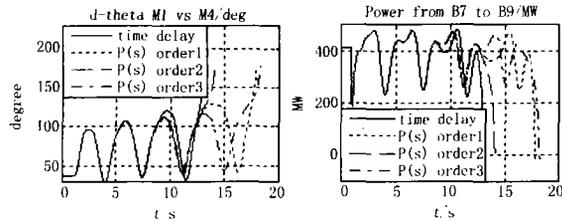


图 10 应用 Pade逼近近似 45 ms 时延的仿真曲线

Fig 10 Curves of Pade approximation of 45 ms time delay

4 结论

在大型互联电力系统中,由于信号传输距离长,传输时延不可忽略。传统的设计方法多不考虑时延影响。文章用实例说明了时延对含区间振荡模式的广域电力系统闭环稳定性的影响,并且时延越大,影响越严重。应用该方法可找出使闭环系统失稳的最大时延的范围。

参考文献:

- [1] Hsu Y, Shyue S, Su C. Low Frequency Oscillations in Longitudinal Systems: Experience with Dynamic Stability of Taiwan Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(1): 92-100.
- [2] Chang C L, Liu C S, Ko C K. Experience with Power System Stabilizers in a Longitudinal Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 539-544.
- [3] Voumas C D, Papadias B C. Power System Stabilization Via Parameter Optimization Application to the Hellenic Interconnected System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 615-623.
- [4] Tse C T, Tso S K. Refinement of Conventional PSS Design in Multimachine System by Modal Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 598-605.
- [5] Ramos R A. A New Methodology for the Coordinated Design of Robust Decentralized Power System Damping Controllers [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 444-454.
- [6] Yang X, Feliachi A. Stabilization of Inter-Area Oscillation Modes Through Excitation Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 494-502.
- [7] Kübner K, Erlich I, Wilfert H H. Design of Inter-Area Oscillation Damping Controllers Using Global Measurements [A]. 2001 IEEE Proc Power Tech Conference.
- [8] Snyder A F, Hadjsaid N. Inter-area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and synchronized Phasor Measurements [A]. 1998 International Conference on Power System Technology. 1998 790-794.
- [9] 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.
- [10] Aboul M E, Sallam A A. Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 767-773.
- [11] WU Hong-xia, NI Hui, Heydt G T. The Impact of Time Delay on Robust Control Design in Power Systems [A]. Proc of 2002 Power Engineering Society Winter Meeting 1511-1516.
- [12] Chow J H, Sanchez-Gasca J J, et al. Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000: 82-90.
- [13] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27.
NI Zhen-yong, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang, et al. Parameter Optimization of Multimachine Power System Stabilizers Using Evolutionary Strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27.
- [14] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2005-12-13; 修回日期: 2006-01-16

作者简介:

石 颀 (1978 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: shijiedaxia11111@163.com

王成山 (1962 -), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事电力系统稳定与控制, 城市电网规划及配电系统自动化等方面的研究。

(下转第 71 页 continued on page 71)

参考文献:

- [1] 陈述彭,鲁学军,周成虎. 地理信息系统导论 [M]. 北京:科学出版社, 2000.
CHEN Shu-peng, LU Xue-jun, ZHOU Cheng-hu The Basic Theory of Geography Information System [M]. Beijing: Science Press, 2000
- [2] 邱生,张焰,陶鹏,等. 配电网可靠性定量评估及成本效益分析软件包研究 [J]. 华东电力, 2004, 32(12): 18-21.
QU Sheng, ZHANG Yan, TAO Peng, et al Study of Quantitative Assessment and Cost/benefit Analysis Software Package for Distribution Network Reliability [J]. East China Electric Power, 2004, 32(12): 18-21.
- [3] 贾小云,王立梅. 配电网管理 GIS系统设计方案 [J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 75-76
JIA Xiao-yun, WANG Limei Design of Management System for Electrical Power Distribution Network Based on GIS [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 75-76
- [4] 倪建立,孟令奎,王宇川,等. 电力地理信息系统 [M]. 中国电力出版社, 2004.
NI Jian-li, MENG Ling-kui, WANG Yu-chuan, et al Geography Information System for Electrical Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 1986
GUO Yong-ji Principle and Application of Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986
- [6] Lockwood D M. Distribution Reliability Cost/benefit Analysis Software [Z]. IEEE, 1995.

收稿日期: 2005-09-19; 修回日期: 2005-11-21

作者简介:

陶鹏 (1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统可靠性和人工智能在电力系统中的应用; E-mail: taop99@sjtu.edu.cn

张焰 (1958-),女,教授,博士生导师,主要从事电力系统规划及电力系统可靠性等方面的教学和研究工作。

Research of quantitative assessment system for distribution network reliability based on GIS

TAO Peng, ZHANG Yan, QU Sheng

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The paper focuses on how to design a quantitative assessment system for distribution network reliability based on GIS. The traditional quantitative assessment system usually is an isolated system and inconvenient to get data and to manage the results. With the broad application of GIS in the management system of distribution, it has not only improved efficiency of the distribution management, but also provides original data to different kinds of analysis systems. Based on the status, the paper puts forward and realizes a quantitative assessment system for distribution network reliability using GIS as a data and management platform, which possesses more flexibility and makes the management of results more convenient, while it is suitable for the trend of amalgamation and information sharing for all management systems. It has also a reference value for other GIS-based distribution network calculation and analysis.

Key words: GIS; distribution network; reliability

(上接第 24 页 continued from page 24)

Time delay impact on the performance of the power system stabilizer

SHI Jie, WANG Cheng-shan

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Damping of low frequency inter-area oscillations using Power System Stabilizer (PSS) may require remote signals. In this case, time delays are associated with the signal transmission. Long delays may be detrimental to the performance of PSS. In this paper, PSS bops are chosen according to the controllability and observability and PSS parameters are coordinated by means of evolutionary strategy. Pade approximation is used to approximate and written in the form of state space, by which the impact of time delays can be gauged by regular approach. The method has been applied on a 4-machine test system and the simulation results verify the validity.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50595412).

Key words: power system stabilizer; inter-area oscillation mode; remote signals; time delay; evolutionary strategy; Pade approximation