

广域PSS附加阻尼控制的时滞分析及时滞补偿

通常基于本地反馈信息的电力系统稳定器 (Power System Stabilizer, PSS) 不能很好地抑制系统区间低频振荡, 广域测量系统 (Wide Area Measurement System, WAMS) 的应用为抑制系统区间低频振荡提供了强有力的工具。提出一种考虑时延影响的PSS, 并利用增益调节模块和相位超前/滞后模块构成PSS时滞补偿环节, 消除远方信号延迟的影响。以一个四机两区域系统为例, 利用改进矩阵束的方法辨识不同延迟条件下对阻尼控制的影响和阻尼补偿效果。仿真结果表明该时滞补偿方法在一定延迟范围内的有效性, 维持了PSS采用远方信号的阻尼效果, 提高了系统稳定性。

孙 凌 李兴源 胡 楠 李 宽/四川大学电气信息学院

互联电力系统的运行稳定性是系统运行的重要问题。随着互联电力系统大量功率的远距离传输, 区间低频振荡危害性问题日益增加, 而基于本地反馈信息的电力系统稳定器 (PSS) 不能很好地抑制互联电力系统区间低频振荡。

广域测量系统 (WAMS) 能实现广域电力系统运行状态的实时同步测量^[1], 并借助于高速通信网络将测得的相量数据汇总; 也能实现对分布于电力系统中的测量、保护和控制装置数据的共享, 并将测量的电压、电流和功角等相量的更新速度提高到毫秒级。同时, 不同的电力通信线路产生不同的数据延迟, 基于WAMS的延迟直接影响系统控制的有效性, 降低了控制装置对电力系统的振荡阻尼速度, 提高了电网稳定的性

能^[2-3]。文献[4-5]分别介绍了计及信号时滞的电网自动发电控制 (AGC) 模式研究和计及WAMS时滞影响的可控串联补偿 (TCSC) 控制器设计。文献[6]介绍了采用广域测量信号的PSS参数优化设计, 进而更好地抑制低频振荡。基于多项式拟合补偿的方法^[7]在广域控制器时滞补偿设计中得到应用, 同时以线性矩阵不等式 (LMI) 为研究工具, 时滞影响与鲁棒性统一为带约束的最优控制设计问题, 也成为研究热点之一^[8-9]。

本文针对一个四机两区域系统, 用以反应系统区域间低频振荡特性为反馈信号的PSS抑制低频振荡。考虑信号传输延迟影响^[10], 应用改进矩阵束方法对系统进行辨识, 分析延迟时间对区间低频振荡的阻尼性和系统稳定性的影响, 引入时滞补偿环节以消除延迟的影响, 并比较时滞补偿前后系统的阻尼特性, 仿真表明时滞补偿的有效性。

考虑时滞的电力系统模型及模式辨识方法

1. 时滞电力系统模型

采用广域测量信号反馈控制抑制互联电力系统区间振荡, 提高系统稳定性和传输能力。时滞系统结构框图如图1所示。

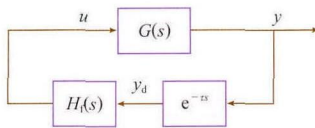


图1 含有时滞环节的闭环控制系统框图

图中, $G(s)$ 为电力系统模型; $H(s)$ 为抑制区间低频振荡的阻尼控制器; e^{-ts} 为



孙 凌/硕士研究生

关键词/Keywords

广域测量系统 ·
时滞补偿 ·
区间阻尼控制 ·
PSS ·
改进矩阵束辨识 ·

国家自然科学基金重点项目 (51037003), “863” (2011AA05A119), 国家电网公司和浙江电力公司科技重大专项 (SGCC-MPLG027-2012)。

延时环节, 其中 τ 为测量信号的时滞; u 、 y 、 y_d 分别为系统控制信号、输出信号和延迟输出信号。

电力系统模型为常微分-代数线性化空间模型, 表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为系统状态变量; y 为系统输出变量; u 为控制变量; A 、 B 、 C 和 D 为相应的系数矩阵。

2. 改进矩阵束辨识算法简介

改进矩阵束算法是鉴于传统矩阵束 (Matrix Pencil, MP) 算法在有噪声情况下, 模态级数辨识效果不理想, 提出将信息熵^[11]引进矩阵束并用来对电力系统进行辨识的改进方法。

电力系统遭受扰动时, 机电暂态响应可拟合为^[12]

$$y(t) = \sum_{i=1}^n R_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (2)$$

式中, R_i 为振荡幅值; σ_i 为衰减系数; f_i 为振荡频率; θ_i 为初相。

下面描述MP算法的计算步骤:

1) 利用采样数据点构造如下Hankel矩阵

$$Y = \begin{pmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(L+1) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(L+2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-L) & y(N-L+1) & \cdots & y(N) \end{pmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (3)$$

式中, L 为矩阵束的参数。

2) 对矩阵 Y 进行奇异值分解, 并对式(3)在设定的域值下求解模态阶数, 表达式为

$$Y = SVD^T \quad (4)$$

式中, S 为 $(N-L)(N-L)$ 的正交矩阵; D 为 $(L+1)(L+1)$ 的正交矩阵; V 为 $(N-L)(L+1)$ 的对角阵, 其对角元素 σ_i 为 Y 矩阵的第 i 个奇异值。

3) 由式(4)定义 Y_1 和 Y_2 矩阵, 组成预测矩阵束 $Y_2 - \lambda Y_1$, 并求解其广义特征值 $\lambda_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 表达式为

$$\begin{cases} Y_1 = SV_1 D_1^T \\ Y_2 = SV_2 D_2^T \end{cases} \quad (5)$$

式中, D_1 为将奇异值分解后矩阵 Y 的前 n 个主导右特征相量 D^T 的最后一行删去形成的 $L \times n$ 矩阵; D_2

为由前 n 个主导右特征相量 D^T 的第一行删去形成的 $L \times n$ 矩阵。

4) 利用式(6)、式(7)分别求出衰减因子和振荡频率

$$\sigma_i = \text{Re} \frac{\ln \lambda_i}{T} \quad (6)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \text{Im} \frac{\ln \lambda_i}{T} \quad (7)$$

式中, T 为采样周期。

改进矩阵束的辨识方法是MP算法的优化, 克服了Prony法在模型阶数较大时求解困难、极点求解较不准确以及低抗噪性等问题, 同时信息熵的引入, 提高了MP算法的抗噪声能力。

考虑时滞影响的PSS时滞补偿设计

为消除时滞的影响, 增强系统阻尼, 利用相位超前/滞后模块以及增益模块构成的时滞补偿环节进行补偿。由特征值分析法^[13]可知, 超前模块提供的相位超前量可用来消除时滞 t 带来的相位滞后的影响, 增益调节 K 用来平衡时滞 t 造成增益放大的影响, β 为补偿系数, 可根据补偿效果选取。

考虑时滞影响的PSS时滞补偿环节传递函数, 其表达式为

$$H_r(s) = K \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^m \quad (8)$$

式中, $m=2$; $K=\beta e^{\sigma\tau}$, σ 为衰减因子, $0 < \beta < 1$; $T_1 = 1/2\pi f_i \sqrt{a}$, f_i 为模式 i 的振荡频率, $a = T_2/T_1 = (1 - \sin \frac{\omega\tau}{2}) / (1 + \sin \frac{\omega\tau}{2})$, $\omega = 2\pi f_i$ 。

此时PSS带励磁的等效模型如图2所示。

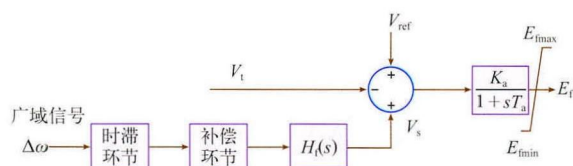


图2 PSS的控制系统模型

图中, $\Delta\omega$ 为广域测量的发电机 G_1 和 G_3 的功角差信号; E_f 为励磁电压; K_a 和 T_a 为励磁环节的增益和时间常数; V_{ref} 为基准电压; V_t 为机端电压; V_s 为PSS的输出信号; $H_r(s) = 7.5 \times \frac{10s}{1+10s} \times \left(\frac{1+2.7s}{1+0.2s} \right)^2$ 。

系统仿真及结果分析

为了检测本文所述互联系统中考虑时滞影响的PSS时滞补偿设计方法的有效性,以一个修改后的四机两区域系统为例进行仿真验证。为抑制互联系统区间低频振荡,发电机G₁机组采用了考虑时滞补偿的PSS,输入为广域测量信号;机组G₃安装了经典PSS,输入为机组角速度。预想故障为L8~9在母线9侧发生三相短路接地,2 s时故障,经4个周波故障消失。

(1) 改进MP辨识结果

WAMS恒定延迟的可能延迟范围为几百毫秒。因此,本文利用改进矩阵束方法对100~600 ms的恒定延迟补偿前后的阻尼情况进行辨识,结果如下表所示。

表 不同延迟条件下交流联络线有功功率曲线的改进MP分析

延迟时间 /ms	补偿前		补偿后	
	频率/Hz	衰减因子	频率/Hz	衰减因子
100	0.161 7	-0.128 6		
200	0.181 9	-0.100 3	0.161 9	-0.102 0
300	0.184 8	-0.068 5	0.167 1	-0.115 8
400	0.154 3	-0.055 4	0.151 3	-0.151 4
500	0.273 3	-0.009 7	0.270 5	-0.151 9
600	0.121 1	0.012 9	0.120 9	-0.102 5

由上表数据可以看出,随着反馈信号传输时滞的增加,系统抑制区间低频振荡阻尼明显不足,互联系统稳定性较差。时滞补偿后,抑制区间低频振荡阻尼与未补偿的系统相比较之下明显增加,且增强了系统稳定性。

(2) PSCAD仿真结果

利用PSCAD/EMTDC对系统进行仿真。以广域测量信号为恒定300 ms延迟为例,说明PSS有/无时滞补偿条件下的发电机功角曲线和系统有功功率输出曲线变化情况,结果如图3~图6所示。

观察图3和图4的仿真结果可以发现,反馈信号的时滞确实会给广域PSS的阻尼控制带来负面影响。同时由图5和图6可以看出,采用时滞补偿后的广域PSS附加阻尼控制器很好地增加了阻尼,有效抑制了区间低频振荡,提高了系统的阻尼特性。

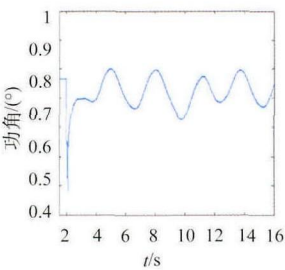


图3 不带时滞补偿的发电机功角摇摆曲线

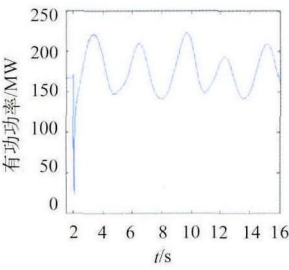


图4 不带时滞补偿的系统有功功率输出曲线

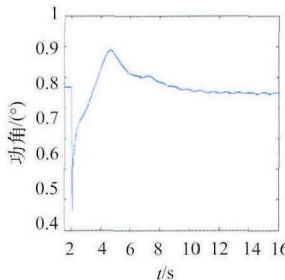


图5 带时滞补偿的发电机功角摇摆曲线

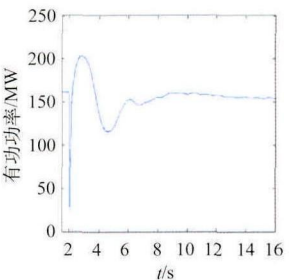


图6 带时滞补偿的系统有功功率输出曲线

结束语

本文引入以广域测量信号为反馈的PSS,在不同时延下,通过超前/滞后环节对PSS的时滞环节进行补偿,针对四机两区域测试系统,采用改进矩阵束方法对补偿前后的系统进行辨识。仿真结果表明,引入时滞补偿环节能够消除时滞对系统的不利影响,广域PSS可有效地抑制阻尼区域间低频振荡,保证PSS阻尼控制的有效性,提高系统的稳定性,具有重要的工程实践意义,且本文采用的矩阵束算法要优于传统的系统辨识方法,更适用于实际工程复杂的环境。

参考文献

[1] 谢小荣,李红军,吴京涛.同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J].电网技术,2004,28(1):10-14.

[2] Wu Hongxia, Tsakalis K S, Heydt G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4): 1935-1941.

[3] 贾宏杰,陈建华,余晓丹.时滞环节对电力系

- 统小扰动稳定性的影响 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (5): 5-8.
- [4] 洪兰秀, 杨莉, 邱家驹, 等. 含自动发电控制信号时滞的区域互联电网AGC控制模式研究 [J]. 华东电力, 2006, 34 (3): 23-27.
- [5] 江全元, 白碧蓉, 邹振宇, 等. 计及广域测量系统时滞影响的TCSC控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (24): 21-25.
- [6] 杨晓静, 赵书强, 马燕峰. 采用广域测量信号的PSS参数优化设计 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (3): 47-50.
- [7] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多式拟合补偿 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (20): 29-34.
- [8] Snyder A F. A robust damping controller for power system using linear matrix inequalities [C]. Proceeding of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 1999, 1: 519-523.
- [9] Wu Hongxia, Ni Hui, Heydt G T. The Impact of Time Delay on robust control design in power system [C]. Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA: 2002, 2: 1511-1516.
- [10] 王成山, 石颀. 考虑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.
- [11] 何正友, 符玲, 麦瑞坤, 等. 小波奇异熵及其在高压输电线路故障选相中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (1): 31-36.
- [12] 李宽, 李兴源, 赵睿. 基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测 [J]. 电网技术, 2012, 36 (4): 128-132.
- [13] 袁野, 程林, 孙元章, 等. 广域阻尼控制的时滞影响分析及时滞补偿设计 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14): 6-9.
- (收稿日期: 2014-04-01) EA

(上接第42页)

基础上增加一条桥臂为中性线电流提供通路并进行控制, 比较了两电平四桥臂及三电平四桥臂的优缺点后, 应用三相三电平四桥臂作为SVG的主结构, 并设计了基于载波层叠PWM方法的SVG控制策略及直流侧电容电压的均压控制方法, 搭建仿真模型验证其效果。结果表明, 上述控制策略可以在对系统有效无功补偿的基础上对三相四线制中由不平衡负载所造成的中性线电流进行补偿, 减小对系统的影响, 使功率因数得以提高, 系统稳定运行能力增强; 同时直流侧电容上的电压得以控制并均匀分配, 但从直流侧电压的波动情况来看, 所应用的均压控制方法还需要进一步优化处理。

参考文献

- [1] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 等. 三相四桥臂逆变器控制技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011 (24): 41-46.
- [2] 张崇巍, 苑春明, 张兴. 中点电位平衡的三电平逆变器SVPWM简化算法及其实现 [J]. 电气传动, 2008 (11): 37-41, 48.
- [3] 申张亮, 郑建勇, 梅军. 基于改进虚拟空间矢量调制方法的中点箝位型三电平逆变器电容电压平衡问题 [J]. 电力自动化设备, 2011 (3): 79-84.
- [4] 宋文祥, 丁肖宇, 束满堂, 等. 三电平逆变器空间矢量脉宽调制及其实现 [J]. 电力电子技术, 2005 (5): 13-14, 30.
- [5] 姜卫东, 杨柏旺, 黄静, 等. 不同零序电压注入的NPC三电平逆变器中点电位平衡算法的比较 [J]. 中国电机工程学报, 2013 (33): 17-25, 3.
- [6] 陈鑫兵, 何礼高. 基于模糊控制的三电平逆变器中点电位平衡策略 [J]. 电工技术学报, 2007 (10): 103-108.
- [7] 王存平, 尹项根, 熊卿, 等. 一种改进的ip-iq无功电流检测方法及其应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2012 (13): 121-126.
- (收稿日期: 2015-01-07) EA