

基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞阻尼控制器设计

丁贵立¹, 林涛¹, 陈汝斯¹, 潘明森¹, 徐遐龄²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077)

摘要:针对联络线可能存在的功率低频振荡, 采用广域测量数据并选择合适的反馈信号实现快速的广域时滞阻尼控制。在建立的电力系统线性化模型中考虑广域测量信号时滞, 并基于参量 Lyapunov 理论设计得到了一种新型的广域时滞阻尼控制器, 控制器控制律和参数值可以通过参量 Lyapunov 方程直接得到。基于 4 机 2 区仿真模型建立了互联电力系统研究模型, 时域仿真表明, 所提的广域时滞阻尼控制器能有效地阻尼互联系统区间振荡。

关键词:功率振荡; 广域阻尼控制器; 时滞; 参量 Lyapunov 理论; 输出反馈控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.012

0 引言

国家电网“十三五”规划中指出, 提高大规模互联电网安全稳定控制保障能力是未来研究的重点方向之一。随着大区域电网互联及跨区送电规模扩大, 区间阻尼随跨区联络线和区域电网内部主要断面输送潮流的增加而恶化, 电网发生区间低频振荡的风险正逐步加大, 成为互联电网安全稳定运行的巨大威胁。例如南方互联系统“4·26”振荡事故^[1]导致系统解列, 南方电网“5·13”功率振荡^[2]事故, 2006 年 7 月 1 日河南电网多条 500 kV 和 220 kV 线路跳闸后, 华中电网发生大范围低频功率振荡, 最终导致华中电网和华北电网、华中电网主网与川渝电网解列^[3]。严重的低频振荡现象甚至会以一种等幅的并不衰减的形式出现, 这种低频振荡严重影响了区间功率的传送效率和互联系统的稳定性, 并且可能引起系统解列甚至崩溃。例如在北美和加拿大系统都出现过不同寻常的振荡过程^[4], 在我国河北南网的安保线也多次发生等幅的低频振荡, 安装电力系统稳定器(PSS)后振荡依然时有发生^[5]。因此, 提高系统阻尼成为提升互联系统稳定性和坚强性的主要方法之一, 特别应该重视严重威胁互联电力系统安全稳定运行的等幅低频振荡模式。

随着广域测量系统(WAMS)的发展, 使用远方反馈信号可以有效地阻尼区间低频振荡, 但由此带来的远方反馈信号传输时延成为影响控制器效果甚至系统稳定的主要原因, 也是大规模电网动态安全

稳定分析和控制不可避免的一个关键问题, 故设计考虑信号传输时延的广域阻尼控制器愈发迫切。针对时滞问题, 目前主要有两大类处理方法。一类可归纳为对广域反馈信号或时滞的直接补偿。文献[6]通过设计一个时延预估器来补偿时滞。文献[7]对网络化环境下的自动发电控制(AGC)系统的延迟进行了分析, 提出了基于时滞系统控制理论的 AGC H_∞ 控制方法。产生于 20 世纪 50 年代的 Smith 预测方法是最早的处理控制器设计中时延问题的方法^[8], 典型的 Smith 预估补偿是根据延迟引入系统开环的反馈环节^[9]。文献[10]对 Smith 预测方法进行了改进, 可以显著改善时滞系统的控制性能。文献[11]将 Pade 近似方法引入广域时滞系统的分析与控制, 其是处理广域阻尼控制器设计中时滞问题的一种有效方法。文献[12]应用 Pade 近似将时滞项转化为有理多项式, 并在此基础上进行鲁棒控制器设计, 取得了良好的效果。事实上, Smith 预估方法和 Pade 近似方法在一定程度上是等效的, 都是将含时滞系统的控制器设计问题转化为不显含时滞系统的控制器设计问题, 进而完成控制器的设计。基于时滞预测补偿原理的控制器, 由于其参数选择通常需要反复离线仿真来调试或者通过经验来选取, 并没有一个具体的可操作的标准方法。这不仅增加了控制器设计的时间, 而且也阻碍了其在大系统中实际应用的可能。并且 Smith 预估方法和 Pade 近似方法都是针对固定时滞的处理方法, 对实际广域时滞阻尼控制系统中的较大范围的时滞变化的适应性有待提高。

为保证系统在一定时滞范围内的稳定性, 提出另一类考虑时滞的广域阻尼鲁棒控制器设计思路。如使用非线性 bang-bang 控制方法^[13], 将时滞作为系统不确定性处理的鲁棒控制方法^[14], 应用自由矩阵设计广域阻尼控制器(WADC)^[15-16], 使用超前滞后相位补偿方法设计广域时滞阻尼控制器^[17], 文献[18]则提出了被广泛使用的基于线性矩阵不等

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2018-05-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902600, 2017YFB0902002); 国家电网公司科技项目(新能源基地特高压外送在线安全运行风险评估和预警技术研究与应用)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902600, 2017YFB0902002) and the Science and Technology Project of SGCC(Stability Analysis and Control of Power System Integrating Renewable Energy Generation Bases Delivered by HVDC Transmissions)

式(LMI)的广域阻尼控制器设计方法。自由权矩阵设计方法本质上也是一种基于 LMI 的设计方法。线性矩阵不等式方法是一个典型的充分条件,不可避免地存在较大的保守性和复杂性,将其应用于大规模电力系统控制中还需要更深入的研究。以上 2 类方法虽然对处理时滞有效果,但是这些方法在应用之前大都需要对系统进行近似降阶,这就降低了模型的精确性,影响控制器的设计效果。

近年来,在电网可观性的工程实践方面,通过全球定位系统(GPS)可以准确地获得相量测量单元(PMU)和控制中心的时间数据。 t_1 时刻相量数据集中器收集和同步广域测量信号,控制器通过测得的广域信号发出广域阻尼控制信号,当安装在发电机励磁侧的控制器在 t_2 时刻收到控制信号时,GPS提供的高分辨率的时间服务可以获得时间延迟的准确数据^[19],为广域时变时滞阻尼控制器的设计提供基础。在系统稳定控制理论方面,代数 Lyapunov 方程和代数 Riccati 方程分别是系统分析和设计的两大方法,而参量 Lyapunov 理论^[20-21]结合了以上 2 种方法的所有优点,该理论在其他的一些工程领域已经得到了成功的应用,例如文献[20-21]应用该理论系统地给出了航天器交会系统的控制器设计方法,为相关工程实践提供了一定的理论保证和可供借鉴的设计思想。

本文基于参量 Lyapunov 理论设计了广域时滞阻尼控制器。一方面,该方法通过对实测时滞进行动态补偿的原理设计控制器,克服了一般时滞补偿控制器主要针对固定时滞的缺陷。这是由于一般时滞补偿控制器设计方法不能给出显含时滞的控制律,设计思路是将含时滞系统的控制器设计问题转化为不显含时滞系统的控制器设计问题,进而完成控制器的设计。而本文提出的控制器设计方法能给出显含时滞的控制器表达式,从理论上保证了所提方法对时变时滞动态补偿的可行性。同时,该方法还可以直接给出精确的控制器参数取值,克服了一般时滞补偿控制器参数整定无公式化算法的问题。另一方面,该方法只需要对原系统精确模型状态矩阵进行 Jordan 标准化处理,不需要系统降阶,提高了控制精确性;所给控制器参数是闭环系统渐进稳定的充要条件,降低了控制器设计的保守性,使闭环系统具有更好的动态响应性能。

1 参量 Lyapunov 理论简介

系统在运行点线性化后的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$; $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$; $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$; $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^p$ 。所谓二次最优控制问题是指对于任意给定的矩

阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{S}^T \mathbf{S} \geq 0$, $\mathbf{R} > 0$ 且 (\mathbf{A}, \mathbf{S}) 可检测, 寻求反馈 $\mathbf{u} = F(\mathbf{x})$ 使得如下二次指标函数最小化, 即是最优控制问题。

$$J(\mathbf{u}) = \int_0^{\infty} [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \quad (2)$$

极小化的最优反馈可表示为:

$$\mathbf{u}^*(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

$\mathbf{P} > 0$ 是下述代数 Riccati 方程的唯一对称正定解。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = -\mathbf{Q} \quad (4)$$

式(3)给出的最优控制器具有一个非常重要的特征,就是由其构成的闭环系统具有无穷大的幅值裕度和至少 60° 的相角裕度^[22],从而具有很好的鲁棒性。正因为如此,最优控制理论在工程上得到了非常广泛的应用。从最优控制理论可知,只要 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 确定,那么反馈控制器就唯一确定。对于 \mathbf{R} 的选择原则已经较为明确,但是对于 \mathbf{Q} 的选择则并无规则可循,将二次最优控制理论应用到实际工程中,设计者通常要通过反复试猜或迭代才能选择到满意的 \mathbf{Q} 。

为了解决这个问题,提出了参量 Riccati 方程。假设 Riccati 方程式(4)有一个对称正定解 $\mathbf{P} > 0$, 那么对于任意 $\gamma > 0$, 取:

$$\mathbf{Q} = \gamma \mathbf{P} \quad (5)$$

即可保证 \mathbf{Q} 的正定性。由此, Riccati 方程式(4)可表示为:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = -\gamma \mathbf{P} \quad (6)$$

定理 1 考虑连续系统式(1), 其中 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 可控。假设 Riccati 方程式(6)有一个对称正定解 $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\gamma) > 0$, 其中 $\gamma > 0$, 那么:

$$\mathbf{u}^*(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t) \quad (7)$$

如式(7)所示的控制器为正定线性系统, 并且 $\mathbf{u}^*(t)$ 为如式(8)所示的最优控制问题的解, $\mathbf{u}^*(t)$ 极小化如式(9)所示的二次指标函数。

$$\inf_{\mathbf{u}(t)} \left\{ \int_0^{\infty} e^{\gamma t} \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) dt \right\}, \text{ s.t. } \lim_{t \rightarrow \infty} e^{\frac{\gamma}{2} t} \mathbf{x}(t) = 0 \quad (8)$$

$$J_{\gamma}(\mathbf{u}) = \int_0^{\infty} [\mathbf{x}^T(t) \gamma \mathbf{P} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \quad (9)$$

一方面, 根据定理 1 的第一项(式(8)), 由原系统与 $\mathbf{u}^*(t)$ 构成的闭环系统的收敛速度至少是 $e^{\frac{\gamma}{2} t}$, 从而最优控制问题是带有收敛速率保证的最小能量控制问题。因此, 方程式(6)可看成是带有收敛速率保证的最小能量控制问题所对应的 Riccati 方程。另一方面, 根据定理 1 的第二项(式(9)), 方程式(6)还可看成是最小化二次指标函数式(9)的最优控制问题所对应的 Riccati 方程。

定理 2 设 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 可控, 则下述命题成立。

当且仅当

$$\gamma > -2 \min_{i \in [1, n]} \{ \operatorname{Re}[\lambda_i(\mathbf{A})] \} \quad (11)$$

成立时,参量 Riccati 方程式(6)具有唯一的对称正定解。

此外,若满足上述条件,该唯一的解可以表示为 $\mathbf{P}(\gamma) = \mathbf{W}^{-1}(\gamma)$,其中 $\mathbf{W}(\gamma)$ 为式(12)所示的参量 Lyapunov 方程的唯一对称正定解。

$$\mathbf{W} \left(\mathbf{A} + \frac{\gamma}{2} \mathbf{I} \right) + \left(\mathbf{A} + \frac{\gamma}{2} \mathbf{I} \right) \mathbf{W} = \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \quad (12)$$

参量 Lyapunov 理论的详细介绍及推导证明过程可详见文献[20-21,23]。

2 基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞阻尼控制器设计的理论基础及特点分析

2.1 基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞阻尼控制器设计的理论基础

考虑时滞的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t-\tau) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad t \geq 0 \\ \mathbf{x}(\theta) = \boldsymbol{\psi}(\theta) \quad \forall \theta \in [-\tau, 0], \boldsymbol{\psi} \in \ell_{n,\tau} \end{cases} \quad (13)$$

其中, τ 为控制器输入反馈信号的延且 $\tau > 0$; $\ell_{n,\tau} = \ell([- \tau, 0], \mathbf{R}^n)$ 表示从区间 $[- \tau, 0]$ 到 \mathbf{R}^n 函数映射的 Banach 空间,则若存在 $\mathbf{x}_t \in \ell_{n,\tau}$ 就表示将 $\mathbf{x}(t)$ 从区间 $[t-\tau, t]$ 映射到 $[- \tau, 0]$, 即 $\mathbf{x}_t(\theta) = \mathbf{x}(t+\theta)$, $\theta \in [- \tau, 0]$ 。

根据以上状态方程,矩阵对 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 可以通过 Jordan 标准型变换成以下形式:

$$\mathbf{A}_j = \mathbf{T} \mathbf{A} \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_- \end{bmatrix}, \mathbf{B}_j = \mathbf{T} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 \\ \mathbf{B}_- \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{A}_j, \mathbf{B}_j$ 分别为原系统方程状态矩阵 \mathbf{A} 和输入矩阵 \mathbf{B} 进行 Jordan 标准型变换后得到的状态矩阵和输入矩阵; \mathbf{A}_- 为包含 \mathbf{A}_j 中负实部的所有特征值的矩阵且 $\mathbf{A}_- \in \mathbf{R}^{n \times n_-}$; \mathbf{A}_0 为包含 \mathbf{A}_j 中所有位于虚轴上的特征值的矩阵且 $\mathbf{A}_0 \in \mathbf{R}^{n \times n_0}$ 。

基于第 1 节介绍的参量 Lyapunov 理论,得出控制器的控制律如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}_j \hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_j \mathbf{u}(t-\tau) + \mathbf{L}(\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}_j \hat{\mathbf{x}}(t)) \\ \mathbf{u}(t-\tau) = -[\mathbf{B}_0^T \mathbf{P}_0(\gamma) e^{A_0 \tau} \quad \mathbf{0}] \hat{\mathbf{x}}(t-\tau) \quad \forall t \geq 0 \\ \hat{\mathbf{x}}_0 = \hat{\boldsymbol{\psi}} \in \ell_{n,\tau}, \gamma \in (0, \gamma^*) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{p \times n}$ 使得 $\mathbf{A}_j - \mathbf{L} \mathbf{C}_j$ 渐进稳定; $\mathbf{P}_0(\gamma)$ 为如式(16)所示的代数 Riccati 方程的唯一正定解。

$$\mathbf{A}_0^T \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_0 \mathbf{A}_0 - \mathbf{P}_0 \mathbf{B}_0 \mathbf{B}_0^T \mathbf{P}_0 = -\gamma \mathbf{P}_0 \quad (16)$$

将式(16)变换成如下形式:

$$\mathbf{W} \left(\mathbf{A}_0 + \frac{\gamma}{2} \mathbf{I} \right) + \left(\mathbf{A}_0 + \frac{\gamma}{2} \mathbf{I} \right) \mathbf{W} = \mathbf{B}_0 \mathbf{B}_0^T \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_0(\gamma) = \mathbf{W}^{-1}(\gamma) \quad (18)$$

控制器参数取值为:

$$\gamma \in (0, \gamma^*], \gamma^* = \min\{\gamma_1^*, \gamma_2^*, \gamma_3^*\} \quad (19)$$

其中, $\gamma_1^*, \gamma_2^*, \gamma_3^*$ 分别由式(20)—(22)确定。

$$\mathbf{W}_0(\gamma) \leq \mathbf{R} \quad \forall \gamma \in (0, \gamma_1^*] \quad (20)$$

其中, $\mathbf{W}_0(\gamma) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0(\gamma) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$, $\mathbf{P}_0(\gamma)$ 由式(18)确定;

$\mathbf{R} > \mathbf{0}$ 为 $(\mathbf{A}_j - \mathbf{L} \mathbf{C}_j)^T \mathbf{R} + \mathbf{R}(\mathbf{A}_j - \mathbf{L} \mathbf{C}_j) = -\mathbf{I}$ 的解。

$$\begin{aligned} \mathbf{I} \geq \gamma \mathbf{R} + 2n_0 \gamma e^{\omega_0 \gamma \tau} e^{-(\mathbf{A}_j - \mathbf{L} \mathbf{C}_j)^T \tau} \mathbf{W}_0(\gamma) e^{-(\mathbf{A}_j - \mathbf{L} \mathbf{C}_j) \tau} \\ \forall \gamma \in (0, \gamma_2^*] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{1}{2} \frac{4\gamma_3^* n_0^3}{\omega_0} \tau e^{\omega_0 \gamma_3^* \tau} (e^{\omega_0 \gamma_3^* \tau} - 1) \eta = 0 \quad (22)$$

其中, n_0 为 \mathbf{A}_0 的维数, $\omega_0 = n_0 - 1$; η 为任意给定常数且 $\eta > 1$, 使得 $V(\mathbf{x}_0(t+\theta), \mathbf{e}(t+\theta)) < \eta V(\mathbf{x}_0(t), \mathbf{e}(t))$, $\forall \theta \in [-2\tau, 0], \forall t \geq \tau, \mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$ 。

2.2 与基于 LMI 方法的自由权矩阵控制器设计方法的理论比较

基于 LMI 方法的自由权矩阵控制器如式(23)所示。

$$\mathbf{u}(t-\tau) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t-\tau) \quad (23)$$

这类方法的设计目标是确定状态反馈增益矩阵 \mathbf{K} , 使得闭环系统在稳定的前提下,能够容忍足够大的时滞。

基于参量 Lyapunov 广域时滞阻尼控制器如式(15)所示,其具有如下的特点。

a. 根据第 2.1 节的理论分析,由该控制器构成的闭环系统的收敛速度至少为 $e^{\frac{\gamma}{2}t}$, 是带有收敛速率保证的最小能量控制。相比于基于 LMI 方法的自由权矩阵控制器的定常反馈矩阵^[15], 所提的基于参量 Lyapunov 广域时滞阻尼控制器的动态响应性能更好, 控制器稳定闭环系统所需的时间也能得到保证。同时, 由于所设计的控制器是一种最小能量控制, 因此能够尽量避免可能出现的控制器饱和问题。

b. 将含时滞的闭环系统稳定问题转化为基于 LMI 方法的可解性问题, 这类广域时滞阻尼控制器设计方法(包括自由权矩阵)所求得的控制律一般较大的保守性, 其是由 LMI 理论的本质特性决定的; 而基于参量 Lyapunov 理论设计的广域时滞阻尼控制器参数(具体参数及取值参考式(19)—(22)), 是从系统稳定的本质定义出发而确定的(即系统初始能量一定时, 能量函数一阶导数为负, 则此系统稳定的), 理论上降低了控制器设计的保守性, 避免了出现实际系统可控而 LMI 方法不可解的问题。

c. 基于 LMI 方法的自由权矩阵控制器反馈增

益矩阵 K , 需要通过高维矩阵不等式方程循环迭代求解^[15] 或者对原系统进行等值和近似降阶, 而基于参量 Lyapunov 理论可以直接根据原系统矩阵变换方程显式的给出控制器控制律解析解(式(15))及参数取值(式(19)~(22)), 便于进一步的分析和综合。

基于参量 Lyapunov 理论设计的广域时滞阻尼控制器的控制律参数是一个标量, 方便设计, 降低了控制器设计的复杂性, 还可以避免由于控制律的过度参数化引起的复杂计算, 这对于需要控制器快速反应的特殊系统而言是具有优势的。

3 控制器总体结构、输入输出信号选择和设计流程

文献[17]论述了分别考虑上下行时滞和统一考虑时滞对控制器设计方法和效果并无影响, 因此一般都上下行时滞看成一个整体时滞来处理。

3.1 控制器总体结构

本文设计的参量 Lyapunov 广域时滞阻尼控制器总体结构如图 1 所示。由图 1 可以看出, 参量 Lyapunov 控制器(PLC)是通过给 PSS 装置提供附加阻尼控制信号来阻尼区间振荡模式的, 采样测量时间、控制器计算时间、传输时间等被简化为单一时滞, 在图 1 中用 e^{-sd} 表示。

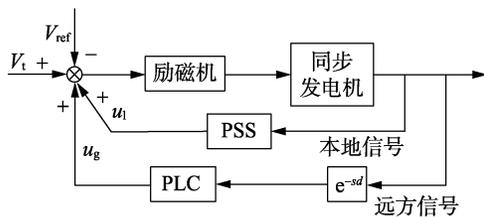


图 1 基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞阻尼控制器总体结构

Fig.1 Overall structure of wide-area time-delay damping controller based on parametric Lyapunov theory

3.2 控制器输入输出信号选择

对线性系统应用模态分析法分析系统的低频振荡模式, 可以得到系统的关键区间振荡模式。如留数方法^[24] 及几何测量方法^[25-26] 的模态可观性分析可以用来选择广域阻尼控制器的反馈信号。由于几何测量方法是针对某一特定的模式给出, 其能够更好地控制这一振荡模式的相对可控/可观性最高的一个反馈信号。因此, 本文采用文献[25]中的几何测量方法选择 WADC 的反馈信号。附加控制信号应该输入具有最大的留数 λ_{ijk} 的地点^[27]。

3.3 控制器设计步骤

基于参量 Lyapunov 方法的广域时滞阻尼控制器设计步骤如下。

a. 建立所要研究的电力系统的详细模型, 在系

统稳定运行点获得不包含控制器的系统线性化模型。

b. 使用模态分析方法获得系统频率和阻尼比的关系, 找出关键的区间振荡模式。

c. 使用几何可控可观方法确定对关键模式可观性最好的反馈信号, 使用留数法确定控制器输出信号的地点。

d. 矩阵对 (A, B) 通过 Jordan 标准型变换成以下形式:

$$A_j = TAT^{-1} = \begin{bmatrix} A_0 & 0 \\ 0 & A_- \end{bmatrix}, B_j = TB = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_- \end{bmatrix}$$

e. 根据式(15)获得控制律, 参数取值由式(19)~(22)确定。

f. 在原始详细模型上验证所设计的控制器的有效性。

4 仿真验证

为了验证所提方法的有效性, 在如图 2 所示的 4 机 2 区系统上验证本文所提的控制策略, 系统参数见文献[28], 并将仿真结果与目前应用比较广泛的基于 LMI 方法的自由权矩阵控制器进行比较。

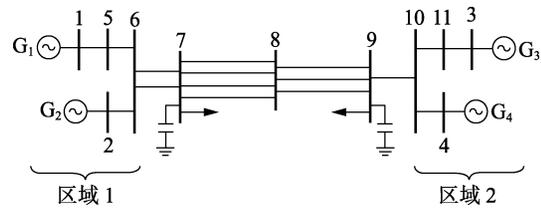


图 2 4 机 2 区系统

Fig.2 Four-generator two-area system

4.1 模态分析、反馈信号和控制信号输入点的选择

模态分析结果见表 1。可以看到, 模式 1 为关键区间振荡模式, 广域时滞阻尼控制器的设计目的就是要抑制这种振荡模式。

表 1 4 机 2 区系统模态分析结果

Table 1 Modal analysis results of four-generator two-area system

模式	模式类型	阻尼比	频率/Hz
1	区间模式	0	0.647 3
2	本地模式	0.189 5	1.125 8
3	本地模式	0.188 5	1.166 5

关于模式 1 的几何可观度指标见表 2, 为了简洁, 将几何可观度指标标准化, 即将其中最大的指标作归一化处理。由表 2 可知, 发电机 G_1 、 G_3 转子角偏差具有最大的几何可观性, 因此将发电机 G_1 、 G_3 转子角偏差作为广域时滞阻尼控制器的反馈信号; 发电机 G_3 可控性最好, 因此控制器的输出信号输入发电机 G_3 的励磁系统。

表 2 模式 1 的几何可观度指标

Table 2 Geometric observability index of Mode 1

序号	待选信号	几何可观度	序号	待选信号	几何可观度
1	δ_{1-3}	1.000 0	6	I_{8-9}	0.868 2
2	I_{7-8}	0.957 2	7	P_{8-9}	0.863 9
3	δ_{2-3}	0.938 1	8	δ_{2-4}	0.863 9
4	δ_{1-4}	0.926 7	9	I_{6-7}	0.641 2
5	P_{7-8}	0.869 3	10	I_{9-10}	0.641 2

4.2 基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞阻尼控制器的设计结果

应用式(16)—(18)得控制器关键参数 $P_o(\gamma)$

的表达式为 $P_o(\gamma) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$, 其中 m_{11} 、 m_{12} 、 m_{21} 、 m_{22} 的表达式见附录。

将 $P_o(\gamma)$ 的表达式代入式(15)即可得出控制器的控制律。

将不同时滞 τ 代入式(19)—(22)确定控制器参数取值,得出对应的 γ 取值如表 3 所示。

表 3 不同时滞时对应参数取值

Table 3 Parameter range of γ corresponding to different values of time delay τ

τ/s	γ
0	0.833 789
0.2	0.732 465
0.4	0.360 823
0.5	0.327 396

4.3 仿真验证

扰动为机组 G_1 励磁电压在 1 s 时阶跃 5%,0.2 s 后恢复为额定值。

4.3.1 固定时滞下所设计控制器效果验证

图 3—5 分别为固定 0、200 ms、400 ms 时滞下机组 G_1 与 G_3 功角差 δ_{1-3} 、联络线 7-9 传输功率 P_{7-9} 响应时域仿真图。图 6 为 500 ms 时滞下参量 Lyapunov 控制器作用下的机组 G_1 与 G_3 转速差、联络线 7-9 传输功率响应时域仿真图。图中 NC 表示无控制器,FWMC 表示根据文献[15]的方法设计的自由权矩阵控制器,PLC 表示基于参量 Lyapunov 理论设计的控制器。由图 3 可知,系统无时滞时参量 Lyapunov 控制器和自由权矩阵控制器都能有效阻尼振荡,参量 Lyapunov 控制器的控制效果和动态性能都要更加优越。由图 4 可知,200 ms 延时下参量 Lyapunov 控制器和自由权矩阵控制器都能有效阻尼振荡,参量 Lyapunov 控制器的控制效果和动态性能依然要优越于自由权矩阵控制器。由图 5 可知,延时达到 400 ms 时,自由权矩阵控制器已经不能很好地抑制这种区间低频振荡模式,这是因为超过了根据文献[15]中的自由权矩阵方法设计的控制器的容忍时滞 380.2 ms,而参量 Lyapunov 控制器则依然

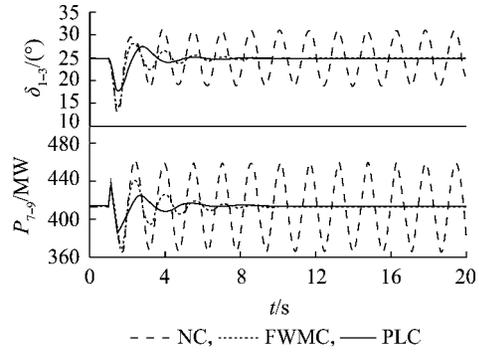


图 3 无延时下仿真波形

Fig.3 Simulative waveforms without time-delay

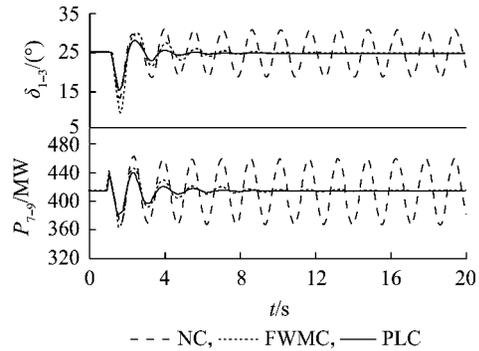


图 4 200 ms 延时下仿真波形

Fig.4 Simulative waveforms with 200 ms time-delay

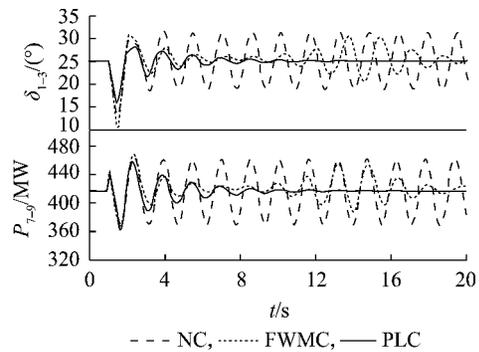


图 5 400 ms 延时下仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms with 400 ms time-delay

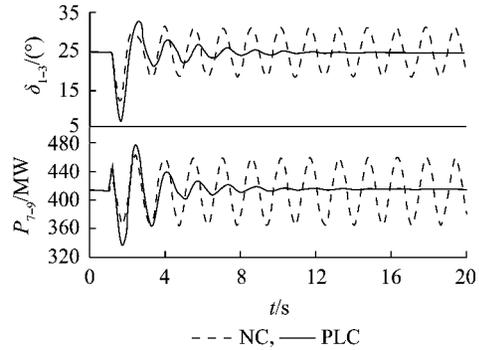


图 6 500 ms 延时下仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms with 500 ms time-delay

可以有效地抑制振荡。由图 6 可知,当延时达到 500 ms 时,参量 Lyapunov 控制器仍然能够有效地抑制区间振荡,表明该控制器可以在保证系统稳定的前提

下提供更大的容忍时滞,而系统时滞一般可以控制在 500 ms 内^[29]。即使时滞超过 500 ms,也可以通过更新时滞取值,重新计算控制器参数,然后回代控制律表达式,设计出满足时滞要求的参量 Lyapunov 控制器,这也是参量 Lyapunov 控制器的显著优点之一^[19]。

4.3.2 时变时滞下所设计控制器效果验证

图 7 为验证时变时滞下控制器性能的仿真波形,图中 PLC 表示根据固定时滞(300 ms)设计的参量 Lyapunov 控制器,FWMC 表示自由权矩阵控制器,SC 表示基于参量 Lyapunov 理论设计的分时切换固定时滞控制器(以每隔 2 s 时间段内最长时延作为时延参数,基于参量 Lyapunov 理论设计广域时滞阻尼控制器),RTC 表示根据实时时滞基于参量 Lyapunov 理论设计的广域时变时滞阻尼控制器。

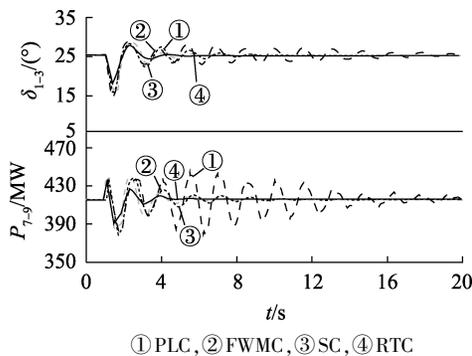


图 7 时变时滞下仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms with changing time-delays

由图 7 可知,在处理时变时滞时,相比于固定时滞参数下设计的参量 Lyapunov 控制器、自由权矩阵控制器、分时段固定时滞参量 Lyapunov 控制器,基于参量 Lyapunov 理论的广域时变时滞阻尼控制器能够更快地平息区间传输功率振荡,控制器的动态性能也要更加优越。另外,在同样使用基于参量 Lyapunov 理论设计广域阻尼控制器时,分别采用固定时滞、分时切换固定时滞、实时时变时滞为时滞参数的 3 种参量下 Lyapunov 控制器效果及动态性能依次提升,说明在一般实际系统具有实时时变时滞情况下,控制器采用实时时变时滞参数设计的必要性,这也是本文基于参量 Lyapunov 理论设计广域时滞阻尼控制器的初衷。

5 结论

本文提出了一种基于参量 Lyapunov 理论的广域时滞阻尼控制器设计策略,在 4 机 2 区系统模型上验证了所提控制方法的有效性,并通过与基于 LMI 方法设计控制器的效果对比,得出以下结论。

a. 相比基于 LMI 方法的自由权矩阵阻尼控制器,所提出的控制器设计简洁,不需要对原系统进行等值和降阶,也不需要将控制器设计问题转换为复杂的 LMI 数学表达式,有效降低了控制器设计的复

杂性和保守性。并且能给出与时滞参数显式相关的控制律及参数取值,使得控制器对固定时滞和时变时滞系统都有良好的控制效果。

b. 相比基于 LMI 方法的自由权矩阵阻尼控制器,所提的控制器设计策略能够提供更大的允许时延,在同样的固定时滞条件下,所提的控制器动态响应性能更优越,稳定闭环系统所需的时间更短。

c. 相比基于 LMI 方法的自由权矩阵阻尼控制器,在时变时滞条件下,以时变时滞为参数设计的参量 Lyapunov 广域时滞阻尼控制器效果和动态性能依然优越于自由权矩阵控制器。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 29-33.
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
- [2] 贺仁睦, 韩志勇, 周密, 等. 互联电力系统未知机理低频振荡分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 1-4.
HE Renmu, HAN Zhiyong, ZHOU Mi, et al. Analysis on unknown mechanism low frequency oscillation of interconnected power system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(1): 1-4.
- [3] 陈碧云, 丁晋, 陈绍南. 基于关联规则挖掘的电力生产安全事故事件关键诱因筛选[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 68-74.
CHEN Biyun, DING Jin, CHEN Shaonan. Selection of key incentives for power production safety accidents based on association rule mining[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 68-74.
- [4] 和萍, 耿斯涵, 姚依林, 等. UPFC 改善含风电电力系统阻尼特性分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 208-213.
HE Ping, GENG Sihan, YAO Yilin, et al. Analysis of damping characteristics improvement by UPFC for power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 208-213.
- [5] 中国电力科学研究院. 安保线功率振荡问题研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 1999.
- [6] CHAUDHURI N R, RAY S, MAJUMDER R, et al. A new approach to continuous latency compensation with adaptive Phasor power Oscillation Damping controller (POD) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 939-946.
- [7] 段献忠, 何飞跃. 考虑通信延迟的网络化 AGC 鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 35-40.
DUAN Xianzhong, HE Feiyue. Networked AGC robust controller design in consideration of communication delay [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 35-40.
- [8] WATANABE K, ITO M. A process-model control for linear systems with delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(6): 1261-1269.
- [9] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, PAL B C, et al. A unified Smith predictor approach for power system damping control design using remote signals[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(6): 1063-1068.
- [10] LAI C L, HSU P L. Design the remote control system with the time-delay estimator and the adaptive Smith predictor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(1): 73-80.

- [11] 刘青,张立娜. 多机系统发电机时滞反馈励磁与 STATCOM 的非线性鲁棒协调控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 102-108.
LIU Qing, ZHANG Lina. Nonlinear robust coordinated control of time-delay feedback excitation and STATCOM for multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 102-108.
- [12] 胡志祥,谢小荣,童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多项式拟合补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 29-34.
HU Zhixiang, XIE Xiaorong, TONG Luyuan. Characteristic analysis and polynomial fitting based compensation of the time delays in wide-area damping control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 29-34.
- [13] KAMWA I, GRONDIN R, ASBER D, et al. Large-scale active-load modulation for angle stability improvement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 582-590.
- [14] YU Li, CHU Jian, SU Hongye. Robust memoryless H_∞ controller design for linear time-delay systems with norm-bounded time-varying uncertainty[J]. Automatica, 1996, 32(12): 1759-1762.
- [15] 张子泳,胡志坚,胡梦月,等. 含风电的互联电力系统时滞相关稳定性分析与鲁棒阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 8-16.
ZHANG Ziyong, HU Zhijian, HU Mengyue, et al. Delay-dependent stability analysis and robust damping control of power system with wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 8-16.
- [16] MA J, LI J, GAO X, et al. Research on time-delay stability upper bound of power system wide-area damping controllers based on improved free-weighting matrices and generalized eigenvalue problem[J]. Power System Protection and Control, 2014, 64(18): 476-482.
- [17] YAO W, JIANG L, WEN J, et al. Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(1): 318-329.
- [18] SNYDER A F, MOHAMMED A E, GEORGES D, et al. A robust damping controller for power systems using linear matrix inequalities [C]// IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting. New York, USA; IEEE, 1999: 519-524.
- [19] KE D P, CHUNG C Y, XUE Y. An eigenstructure-based performance index and its application to control design for damping inter-area oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2371-2380.
- [20] ZHOU B, LIN Z, DUAN G. Stabilization of linear systems with input delay and saturation—a parametric Lyapunov equation approach[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2010, 20(13): 1502-1519.
- [21] ZHOU B, DUAN G, LIN Z. A parametric Lyapunov equation approach to the design of low gain feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1548-1554.
- [22] ANDERSON B D O, MOORE J B. Optimal control: linear quadratic methods[M]. [S.l.]: Prentice-Hall Inc., 1990.
- [23] LIN Z, FANG H. On asymptotic stabilizability of linear systems with delayed input[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(6): 998-1013.
- [24] HENICHE A, KAMWA I. Assessment of two methods to select wide-area signals for power system damping control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 572-581.
- [25] ZHANG Y, BOSE A. Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1136-1143.
- [26] HAMDAN A M A, ELABDALLA A M. Geometric measures of modal controllability and observability of power system models[J]. Electric Power Systems Research, 1988, 15(2): 147-155.
- [27] ABOUL-ELA M E, SALLAM A A, MCCALLEY J D, et al. Damping controller design for power system oscillations using global signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 767-773.
- [28] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA; McGraw-Hill, 1994.
- [29] 蔡洋. 电网调度管理须与电网发展俱进——北美东北电网事故浅析[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 6-9.
CAI Yang. Power system operation control should be in step with its expansion—a brief analysis of large scope blackout in interconnected northeast America Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 6-9.

作者简介:



丁贵立

丁贵立(1987—),男,湖北孝感人,博士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: mail579@163.com);

林涛(1969—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行控制、电能质量、继电保护、分布式发电技术。

Design of wide-area time-delay damping controller based on parametric Lyapunov theory

DING Guili¹, LIN Tao¹, CHEN Rusi¹, PAN Mingsen¹, XU Xialing²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central China Electric Power Dispatching and Communication Centre, Wuhan 430077, China)

Abstract: As for the potential power oscillation in tie-lines, the wide-area measurement data is employed and the suitable feedback signals are selected to control the wide-area time-delay damping quickly. The linear model of power system is established considering the transmission time delay of the wide-area measurement signals. Meanwhile, a novel wide-area time-delay damping controller is designed, whose control law and parameters can be directly obtained based on parametric Lyapunov function. Moreover, an interconnected electric power system model is established based on the four-generator two-area simulation model. The time-domain simulation shows that the proposed wide-area time-delay damping controller can effectively damp the inter-area oscillations of the interconnected system.

Key words: power oscillation; wide-area damping controller; time delay; parametric Lyapunov theory; output feedback control

附录

$$m_{11} = \frac{-0.00008(34173+500\lambda^2)\lambda(6.98767974*10^8 - 6.340875*10^6\lambda + 28750\lambda^2)}{-7.94286710*10^6 - 1.162141703*10^5\lambda^2 + 0.02\lambda^4}$$

$$m_{21} = \frac{0.00008(34173+500\lambda^2)\lambda(3.05790888*10^8 - 7.024175*10^6\lambda + 51250\lambda^2)}{-7.94286710*10^6 - 1.162141703*10^5\lambda^2 + 0.02\lambda^4}$$

$$m_{12} = \frac{0.00008(34173+500\lambda^2)\lambda(3.05790888*10^8 - 7.024175*10^6\lambda + 51250\lambda^2)}{-7.94286710*10^6 - 1.162141703*10^5\lambda^2 + 0.02\lambda^4}$$

$$m_{22} = \frac{-0.00008(34173+500\lambda^2)\lambda(1.35594566*10^8 - 4.917325*10^6\lambda + 91250\lambda^2)}{-7.94286710*10^6 - 1.162141703*10^5\lambda^2 + 0.02\lambda^4}$$