

计及时滞影响的电力系统 H_∞ 阻尼控制

聂永辉¹, 张艺川², 马彦超², 方彬彬², 吕大朋²

(1. 东北电力大学 教务处, 吉林 吉林 132012;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要:利用 Pade 近似方法将时滞环节转化为状态空间形式, 从而建立考虑传输时滞的开环电力系统线性化模型; 采用基于 H_∞ 阻尼控制的混合灵敏度方法对所建模型进行鲁棒控制器设计。时域仿真结果表明: 所设计的鲁棒控制器对电力系统广域时滞具有一定的耐受能力, 同时可以抑制系统干扰的影响。

关键词:电力系统; 区间低频振荡; 时滞; Pade 近似方法; 混合灵敏度控制; 阻尼

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.015

0 引言

随着电网规模的扩大和送电功率的增加, 区域间的低频振荡问题日益突出, 这不仅限制了联络线的传输功率, 而且使系统的安全稳定运行受到了威胁^[1-3]。传统阻尼控制器采用可测量的发电机本地信号作为输入信号以抑制低频振荡, 但由于区域间振荡模态在本地信号中的可观性有限, 故可能对区域间模态的控制效果不甚理想^[4-6]。随着相量测量单元(PMU)和广域量测系统(WAMS)的发展, 其可为阻尼控制获取区域间的发电机相对转子角、转子角速度等全局反馈信息, 且这些全局信息对区间振荡模式具有最大的可观性, 为大规模电力系统区间低频振荡抑制提供了条件^[7]。但广域信号具有高达几十毫秒到数百毫秒的传输时滞, 可能会严重恶化系统性能, 使控制器达不到理想的控制效果^[8-10]。因此, 研究计及时滞影响的互联电网区间振荡控制方法对互联电网的安全稳定运行具有重要意义。

由于时滞系统为无穷维系统, 其特征方程有无穷多个特征值, 这使得分析其稳定性非常复杂。目前主要有 3 类方法用于解决这一难题: 时域仿真法、基于 Lyapunov 理论的方法和基于线性时滞系统稳定性理论的分析方法^[11]。其中第 3 类方法是将理论上已发展比较完善的线性系统稳定性分析理论推广到线性时滞系统, 由于其可以深入揭示线性时滞系统的一些内在规律, 在一定意义上指导时滞系统控制器设计, 因此科研工作者对此做了一些研究工作, 形成了诸多实用的方法包括: Pade 近似法、基于 Rekasius 变换的 Routh 稳定判别方法、扫频法和基于

纯虚特征根的多项式转化法。实际系统中不可避免地存在参数变化、运行工况变化和元件老化等多种不确定因素^[12-13]; 受理论和方法的限制, 在实际系统的建模过程中, 经常要做一些模型简化处理, 导致实际系统和用于分析设计的简化数学模型之间存在一定的误差。由于这些不确定性使得现代控制理论中的许多结果在实际中的控制效果不能令人满意, 因此鲁棒控制理论被用于电力系统阻尼控制器设计, 其中最典型的方法是 H_∞ 控制方法^[14], 其就是寻求一个控制器使闭环传递函数矩阵的 H_∞ 范数最小化。由于该方法将被控对象的各种不确定性纳入设计方案之中, 故能使控制系统具有很好的鲁棒性^[15-16]。

基于上述分析, 本文利用 Pade 近似多项式逼近时滞环节, 从而建立计及时滞的大规模电力系统区间振荡广域控制模型, 利用基于 H_∞ 鲁棒控制的混合灵敏度方法进行阻尼控制器设计, 同时抑制干扰、时滞环节 Pade 近似误差等不确定因素对控制器阻尼性能的影响, 使得闭环电力系统具有一定的鲁棒性, 为解决时滞问题提供了一条有效的途径。

1 考虑时滞环节的电力系统控制模型

对于包含时滞环节的广域反馈闭环电力系统而言, 有开环电力系统 $G(s)$ 、广域反馈时滞环节 $T_r(s)$ 和广域反馈控制器 $K(s)$ 三部分。针对开环电力系统, 取发电机状态变量为 $X_1 = [\Delta\delta^T, \Delta\omega^T, \Delta E'_q{}^T, \Delta E'_{fd}{}^T]^T$ 、控制输入为 $U_1 = \Delta V_s = [\Delta V_{s1}, \Delta V_{s2}, \dots, \Delta V_{sn}]^T$ 、控制器输出为 ΔV_s , 那么包含 n 台机组的开环电力系统 $G(s)$ 线性化方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}'_q \\ \Delta\dot{E}'_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s E & 0 & 0 \\ -T_J^{-1} K_1 & -T_J^{-1} D & -T_J^{-1} K_2 & 0 \\ -T'_{d0}{}^{-1} K_3 & 0 & -T'_{d0}{}^{-1} K_4 & -T'_{d0}{}^{-1} \\ -T_a^{-1} K_a K_5 & 0 & -T_a^{-1} K_a K_6 & -T_a^{-1} \end{bmatrix} \times \\ [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_{fd}]^T + [0 \quad 0 \quad 0 \quad -T_a^{-1} K_a]^T \Delta V_s \quad (1)$$

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577023); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(JJKH20180445KJ)

Project supported by the National Nature Science Foundation of China(51577023) and “13th Five-Year” Science and Technology Research Project of Jilin Province Department of Education (JJKH20180445KJ)

其中, ω_s 为同步电机角速度; D 为阻尼系数; T'_{d0} 为 d 轴开路暂态时间常数; T_J 为发电机惯性时间常数; K_a 和 T_a 分别为励磁系统综合放大环节的增益和时间常数; E'_q 为 q 轴暂态电动势; E_{td} 为同步机空载时的定子电压; E 为适维单位矩阵; K_1 — K_6 见式(2)。

$$\begin{cases} K_1 = \partial P_e / \partial \delta \\ K_2 = \partial P_e / \partial E'_q \\ K_3 = \partial [E'_q + (X_d - X'_d)I_d] / \partial \delta \\ K_4 = \partial [E'_q + (X_d - X'_d)I_d] / \partial E'_q \\ K_5 = \partial V_l / \partial \delta \\ K_6 = \partial V_l / \partial E'_q \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_e 为电磁功率; X_d 、 X'_d 分别为 d 轴同步、暂态电抗; V_l 、 I_d 分别为机端电压、 d 轴电流。

当利用发电机转速差作为广域反馈测量信号时, $G(s)$ 的输出方程为:

$$Y_1 = \Delta\omega = [\Delta\omega_1 \ \Delta\omega_2 \ \dots \ \Delta\omega_n]^T = [0 \ E \ 0 \ 0]X_1 \quad (3)$$

上述开环电力系统状态空间的表达式可简写为:

$$\begin{cases} pX_1(t) = A_1X_1(t) + B_1U_1(t) \\ Y_1(t) = C_1X_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $U_1(t)$ 、 $Y_1(t)$ 分别为输入、输出向量; A_1 、 B_1 和 C_1 分别为状态、输入和输出矩阵。

当电力系统采用广域测量信号构成反馈控制时,必然会产生一定的时滞。研究表明,当控制系统含有时滞时,控制效果会急剧恶化甚至引起系统失稳。在拉普拉斯域中,时滞环节可用 $e^{-\tau s}$ 表示,而包含时滞环节 $e^{-\tau s}$ 的控制系统是一个无穷维系统,这给闭环系统特征值求解和控制器设计带来了极大的不便。本文采用 Pade 近似方法,将时滞项近似表达为有限维多项式:

$$e^{-\tau s} \approx R(s) = \sum_{j=0}^l \frac{(l+k-j)! l! (-\tau s)^j}{j! (l-j)!} \div \sum_{j=0}^k \frac{(l+k-j)! k! (\tau s)^j}{j! (k-j)!} = \frac{b_0 + b_1\tau s + \dots + b_l(\tau s)^l}{a_0 + a_1\tau s + \dots + a_k(\tau s)^k} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_j = (l+k-j)! k! / [j! (k-j)!] \\ b_j = (l+k-j)! l! / [j! (l-j)!] \end{cases} \quad (6)$$

其中, l 、 k 为 Pade 近似阶数,阶数越大, $R(s)$ 越接近于 $e^{-\tau s}$,通常情况下,取 $l=k$ 。Pade 近似过程相当于对纯时延环节进行滤波处理,传输时延数值越小,二者一致相位区间越大,即滤波频带越宽,时滞近似程度越高。对于实际电力系统而言,其频率特性呈低通性质,幅频穿越频率一般小于 10 Hz,实测广域信

号的传输时滞在 0.1 s 以内,故在电力系统中采用 3 阶 Pade 近似逼近时滞项可以满足要求。

基于 Pade 近似得到的传递函数式(5)可变换为时滞环节状态空间表达式如下:

$$\begin{cases} pX_2(t) = A_2X_2(t) + B_2U_2(t) \\ Y_2(t) = C_2X_2(t) + D_2U_2(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $X_2(t)$ 为近似时滞环节的状态向量; $U_2(t)$ 为近似时滞环节输入信号,即广域反馈信号; $Y_2(t)$ 为考虑时滞后的广域反馈信号; A_2 、 B_2 、 C_2 和 D_2 分别为近似时滞环节状态、输入、输出和前馈矩阵。

利用 Pade 近似方法将时滞环节转化为状态空间表达式后,从而得到考虑时滞环节的开环电力系统线性化模型为:

$$\begin{cases} pX_1(t) = A_1X_1(t) + B_1U_1(t) \\ pX_2(t) = A_2X_2(t) + B_2C_1X_1(t) \\ Y_2(t) = C_2X_2(t) + D_2C_1X_1(t) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)可被看作为被控对象,下文将引入加权函数模拟干扰和模型不确定性的频率特性的上限,形成 H_∞ 控制的电力系统混合灵敏度问题,并将之转化为 H_∞ 标准控制问题,利用相应标准算法求解 H_∞ 动态补偿器,使得闭环电力系统保持内部稳定并具有鲁棒稳定性,同时使得区间振荡模式具有一定的阻尼比。

2 H_∞ 混合灵敏度控制

在实际控制系统中,干扰和受控对象的不确定性经常是同时存在的,同时抑制干扰和受控对象的不确定性问题被称为 H_∞ 控制的混合灵敏度问题。图 1 为混合灵敏度控制框图,图中 $G(s)$ 为被控对象, $W_1(s)$ — $W_3(s)$ 为加权函数,二者组成增广被控对象 $P(s)$; $K(s)$ 为控制器; u_1 为外部输入(包括扰动、噪声等); u_2 为控制输入; $y_1 = [y_{1a} \ y_{1b} \ y_{1c}]^T$ 为控制输出; y_2 为测量输出。混合灵敏度控制问题就是通过设计控制器 $K(s)$,使得闭环系统稳定,且使式(9)中的 H_∞ 范数最小或小于某一给定值 γ 。

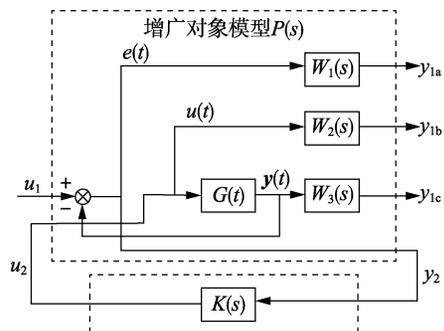


图 1 混合灵敏度控制框图

Fig.1 Block diagram of mixed sensitivity control

$$\left\| \begin{array}{l} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \\ W_3(s)T(s) \end{array} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (9)$$

其中, $S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1}$ 为灵敏度函数; $T(s) = G(s)K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1}$ 为补灵敏度函数; $R(s) = K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1}$ 为输入灵敏度函数。下面对式(9)所示的混合灵敏度问题控制指标的由来进行说明。

由于灵敏度函数是干扰信号对输出的传递函数,为了抑制干扰信号,希望灵敏度函数越小越好;从被控对象具有模型不确定性的鲁棒稳定性角度出发,要求补灵敏度函数尽可能小。由 $S(s) + T(s) = I$ 可知,两者之间存在相互矛盾,故它们之间应该折中。即设计指标可描述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \|S(j\omega_1)\|_{\infty} \ll \varepsilon_1 \quad \omega_1 \in \Omega_1 \\ \|T(j\omega_1)\|_{\infty} \ll \varepsilon_2 \quad \omega_1 \in \Omega_2 \end{array} \right. \quad (10)$$

其中, ε_1 和 ε_2 为正数; Ω_1 和 Ω_2 为相互没有重叠的频率区间; ω_1 为角频率。

由于扰动信号具有低频特性,而模型不确定性常常是因为忽略了高频特性所引起的,这为同时抑制干扰和保证模型不确定性的鲁棒稳定性提供了条件,故 Ω_1 表示低频区间, Ω_2 表示高频区间。然而,实际中很难求解满足式(10)的控制器,为此引入加权函数 $W_1(s) \sim W_3(s)$ 。其中 $W_1(s)$ 表示干扰的频谱特性,反映了对系统灵敏度函数的幅频要求; $W_2(s)$ 为用于调整的参数,主要是为了调整快速响应; $W_3(s)$ 表示系统高频未建模动态的频谱特性,反映了被控对象本身的内在特性。进而建立广义被控对象模型 $P(s)$ 如式(11)所示,则混合灵敏度控制问题可转化为标准 H_{∞} 控制问题,即在可求解控制器的同时满足式(9)所示的设计指标。

$$P(s) = \begin{bmatrix} W_1(s) & -W_1(s)G(s) \\ 0 & W_2(s) \\ 0 & W_3(s)G(s) \\ I & -G(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

在混合灵敏度设计中,考虑到实际电力系统的频率特性呈低通性质,其幅频穿越频率(系统带宽)一般小于 10 Hz,因此, $W_1(s) \sim W_3(s)$ 的选择原则如下。

a. $W_1(s)$ 具有低通特性,其幅频穿越频率近似等于或稍小于期望的闭环系统带宽,在低频段,其幅值应尽可能大;在高频段,其幅值应尽量小。但要兼顾控制系统的超调量,这样才能保证系统具有良好的抗干扰能力。

b. $W_3(s)$ 在高频段的幅值应比较大,即具有高通特性,其幅频穿越频率应近似等于或大于期望的

系统闭环带宽,并且 $W_1(s)$ 与 $W_3(s)$ 的频带不应重叠。

c. 确定 $W_1(s)$ 、 $W_3(s)$ 后,一般选择一个较小的正常数作为 $W_2(s)$,以使得中低频内有较大鲁棒稳定性的参数摄动范围。

3 算例分析

本文采用 4 机 2 区系统作为测试系统,系统参数详见文献[1]。对开环电力系统建模,计算得到振荡模式为 $-0.677 2 + j7.047 5$ 、 $-0.669 1 + j7.269 0$ 和 $0.108 2 + j4.026 8$ 。经计算分析得到,前 2 个振荡模式为局部振荡模式;第 3 个振荡模式为区间振荡模式,该模式实部为正,阻尼比为 $-0.026 9$,故必须加入控制器才能保证系统稳定运行。通过留数矩阵计算,选择 3 号机组的速度偏差为输出信号,2 号机组的励磁系统输入端为控制位置,从而构成广域控制回路。然后利用混合灵敏度方法进行阻尼控制,针对电力系统的特点本文选择的加权函数为:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1(s) = (s+10^6)/[4\ 000(s+10^2)] \\ W_2(s) = 10^{-4} \\ W_3(s) = (0.03s+1)/3\ 500 \end{array} \right. \quad (12)$$

本文在不考虑时滞和时滞为 0.03 s 这 2 种情况下,用所提方法求解 H_{∞} 控制器。由于所得控制器阶数很高,并且不是最小实现,因此利用平衡降阶技术对其进行模型降阶,降阶后的控制器分别用 $K_1(s) = N_1(s)/D_1(s)$ 和 $K_2(s) = N_2(s)/D_2(s)$ 表示,其中:

$$N_1(s) = 0.095\ 97s^7 + 3\ 211s^6 + 4.587 \times 10^5 s^5 + 1.001 \times 10^6 s^4 + 4.483 \times 10^7 s^3 - 3.77 \times 10^7 s^2 - 8.6 \times 10^7 s - 1.492 \times 10^7 \quad (13)$$

$$D_1(s) = s^7 + 732.3s^6 + 1.069 \times 10^5 s^5 + 6.474 \times 10^5 s^4 + 1.05 \times 10^7 s^3 + 1.844 \times 10^6 s^2 + 7.155 \times 10^5 s + 1.539 \times 10^5 \quad (14)$$

$$N_2(s) = -0.018\ 41s^{10} + 2.483 \times 10^4 s^9 + 1.707 \times 10^6 s^8 + 9.334 \times 10^6 s^7 + 2.504 \times 10^8 s^6 + 5.652 \times 10^8 s^5 + 7.636 \times 10^9 s^4 + 5.153 \times 10^9 s^3 - 1.463 \times 10^{10} s^2 - 8.417 \times 10^9 s - 5.574 \times 10^9 \quad (15)$$

$$D_2(s) = s^{10} + 2\ 976 s^9 + 3.127 \times 10^5 s^8 + 4.127 \times 10^6 s^7 + 4.637 \times 10^7 s^6 + 2.915 \times 10^8 s^5 + 1.55 \times 10^9 s^4 + 4.49 \times 10^9 s^3 + 5.345 \times 10^9 s^2 + 7.695 \times 10^8 s + 1.068 \times 10^8 \quad (16)$$

将设计的 2 种控制器分别和原开环电力系统构成闭环系统,计算得到的区间振荡模式为 $-0.108 5 + j4.047 7$ 和 $-0.108 2 + j4.026 8$,可见这 2 种控制器大幅提高了区间振荡模式的阻尼比,分别为 0.026 8 和 0.026 9。表 1 是当时滞分别为 0.05 s、0.10 s、0.15 s、0.20 s 和 0.25 s 时,2 种控制器对区间振荡模式的阻

尼效果。表中, C_1 表示不考虑时滞情况下设计的控制器; C_2 表示考虑时滞情况下设计的控制器。由表 1 可见, 随着时滞的增加, 2 种控制器对区间振荡模式的阻尼作用逐渐削弱, 但考虑时滞控制器的阻尼效果更好, 大幅提高了时滞稳定边界。对于局部振荡模式而言, 2 种控制器基本没有差别, 由于篇幅限制, 此处不再赘述。

表 1 控制器对区间振荡模式的影响

Table 1 Effects of controllers on inter-area oscillation mode

时滞/s	C_1		C_2	
	振荡模式	阻尼比	振荡模式	阻尼比
0.05	-0.100 0+ j4.138 1	0.024 2	-0.099 7+ j4.074 5	0.024 5
0.10	-0.038 1+ j4.204 9	0.009 0	-0.080 0+ j4.117 5	0.019 4
0.15	0.034 8+ j4.222 9	-0.008 3	-0.051 4+ j4.153 0	0.012 3
0.20	0.090 6+ j4.211 8	-0.021 6	-0.016 9+ j4.179 5	0.004 1
0.25	0.128 0+ j4.190 4	-0.030 5	0.020 6+ j4.196 5	-0.005 0

为验证所设计的控制器的抗干扰性, 将不考虑时滞的 H_∞ 控制器与式(8)所示的被控对象构成闭环系统, 当时滞分别为 0、0.09 s、0.116 s, 且励磁参考输入端附加 0.1 p.u. 的干扰时, 图 2 为 3 号机组角速度偏差信号的响应曲线。图中, $\Delta\omega_3$ 为标么值, 后同。可见, 当时滞小于 0.116 s 时, 系统时域响应曲线收敛, 系统保持稳定; 直至时滞达到 0.116 s 时, 系统时域响应曲线开始发散, 系统失去稳定。当广域量测信号存在 0.03 s 的时滞时, 应用本文所提方法求解考虑时滞的 H_∞ 控制器, 图 3 给出了时滞分别为 0.03 s、0.15 s 和 0.236 s 时的闭环系统时域响应曲

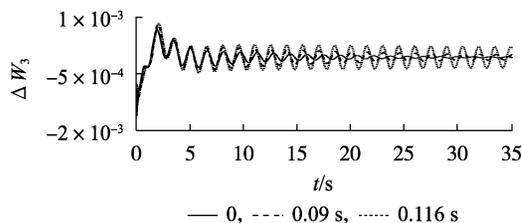


图 2 不考虑时滞的控制器时域仿真曲线

Fig.2 Time-domain simulative curves of controller without considering time delay

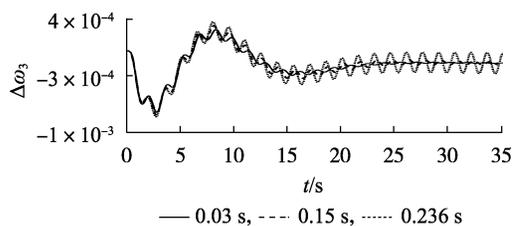


图 3 考虑时滞的控制器时域仿真曲线

Fig.3 Time-domain simulative curves of controller with considering time delay

线。可见, 当时滞为 0.03 s 时, 系统响应曲线收敛, 系统稳定; 随着时滞的增加, 系统时域响应曲线振荡加剧; 直至时滞达到 0.236 s 时, 系统才失去稳定。经过分析比较可知, 考虑时滞的控制器增强了闭环系统耐受时滞的能力, 提高了系统时滞稳定边界。

为验证考虑时滞的 H_∞ 控制器的鲁棒性能, 将区域 1 所连接的负荷由 967 MW 增加到 1 567 MW, 从而改变系统的运行工作点。在这种情况下, 当时滞为 0.03 s 和 0.21 s 时, 运用所设计的控制器构成反馈控制, 得到的时域仿真曲线如图 4 所示。可见, 当时滞为 0.03 s 时, 系统保持稳定; 当时滞增加到 0.21 s 时, 时域仿真曲线发散, 系统失去稳定。由此可见, 本文所提的考虑时滞的 H_∞ 控制器对系统干扰导致的运行点变化具有一定的鲁棒稳定能力, 且能忍受 0.21 s 左右的时延。

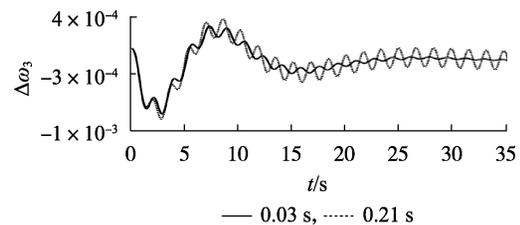


图 4 系统运行点变化时的时域仿真曲线

Fig.4 Time-domain simulative curves when operating point changes

4 结论

为提高电力系统广域反馈控制的动态性能, 削弱时滞环节和系统运行点变化等不确定因素对阻尼控制器控制性能的影响, 本文提出了一种基于 H_∞ 阻尼控制的混合灵敏度方法对所建模型进行鲁棒控制器设计。通过权函数 $W_1(s)$ 的选取, 保证了当电力系统存在平衡点漂移等扰动时控制器的阻尼性能; 通过权函数 $W_2(s)$ 和 $W_3(s)$ 的选取, 抑制了时滞环节近似对阻尼控制性能的影响。仿真结果表明, 采用所提方法设计的控制器在抑制干扰和模型不确定性等方面具有较好的鲁棒性, 对电力系统区间低频振荡具有较强的抑制作用, 同时提高了系统时滞稳定边界。

参考文献:

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:465-552.
- [2] 秦超, 曾沅, 苏寅生, 等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5):100-106. QIN Chao, ZENG Yuan, SU Yinsheng, et al. Low-frequency oscillatory stability analysis based on security region for power system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):100-106.
- [3] 马燕峰, 刘会强, 俞人楠. 风电场中 STATCOM 抑制系统功率振荡[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2):67-73.

- MA Yanfeng, LIU Huiqiang, YU Rennan. Power oscillation suppression based on STATCOM in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 67-73.
- [4] 高磊, 张文朝, 濮钧, 等. 华北-华中-华东特高压联网大区模式下低频振荡模式的频率特性[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 15-20.
- GAO Lei, ZHANG Wenchao, PU Jun, et al. Study on the frequency characteristic of low-frequency oscillation mode under large-area mode formed by interconnection of North China Power Grid with Central China Power Grid and East China Power Grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 15-20.
- [5] 孟凡超, 董晓亮, 高志强, 等. 一种基于 WAMS/PMU 的 PSS 在线评估方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 146-149.
- MENG Fanchao, DONG Xiaoliang, GAO Zhiqiang, et al. Online PSS evaluation based on WAMS/PMU technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 146-149.
- [6] 李俊刚, 张爱民, 张杭, 等. 广域保护系统数据网络可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 344-350.
- LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.
- [7] 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.
- [8] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的测量及建模(一): 通信时延及操作时延[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5768-5777.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, part I: communication delay and operational delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5768-5777.
- [9] FRIDMAN E, SHAKED U. An improved stabilization method for linear time-delay systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(11): 1931-1937.
- [10] 古丽扎提·海拉提, 王杰. 广义 Hamilton 多机电力系统的广域时滞阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6199-6208.
- GULIZHATI Hailati, WANG Jie. Wide-area time-delay damping control of generalized Hamilton multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6199-6208.
- [11] 余晓丹, 贾宏杰, 王成山. 时滞电力系统全特征谱追踪算法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 10-14, 38.
- YU Xiaodan, JIA Hongjie, WANG Chengshan. An eigenvalue spectrum tracing algorithm and its application in time delayed power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 10-14, 38.
- [12] 徐榕, 于泳, 杨荣峰, 等. 基于无源性理论的 H 桥级联 STATCOM 非线性控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 50-57.
- XU Rong, YU Yong, YANG Rongfeng, et al. Strategy based on passivity theory for nonlinear control of STATCOM with cascaded H-bridges[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 50-57.
- [13] 蓝益鹏, 陈其林, 胡学成, 等. 磁悬浮永磁直线电动机控制系统非脆弱鲁棒控制的研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 26-32.
- LAN Yipeng, CHEN Qilin, HU Xuecheng, et al. Research on non-fragile robust control for magnetic levitation permanent magnet linear motor control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 26-32.
- [14] 吴敏, 何勇, 余锦华. 鲁棒控制理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 81-103.
- [15] 刘康志, 姚郁. 线性鲁棒控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 352-369.
- [16] 徐丽杰, 王玮. 多机电力系统 H_∞ 分散鲁棒励磁控制器的优化设计[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 42-44.
- XU Lijie, WANG Wei. A new optimum design of H_∞ decentralized robust excitation controllers for multi-machine power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 42-44.

作者简介:



聂永辉

聂永辉(1970—),男,吉林吉林人,教授,博士,研究方向为电力系统优化运行及控制(E-mail: yonghui_n@aliyun.com);

张艺川(1992—),男,吉林舒兰人,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行及控制(E-mail: zyc61919820@qq.com)。

H_∞ damping control of power system with time delay

NIE Yonghui¹, ZHANG Yichuan², MA Yanchao², FANG Binbin², LU Dapeng²

(1. Academic Administration Office, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The Pade approximation method is used to transform the time delay into the state space form, so as to establish the linearization model of the open-loop power system considering the transmission delay. A robust controller using mixed sensitivity method based on H_∞ damping control theory is designed for the model. Time-domain simulative results show that the designed robust controller has certain tolerant ability of the delay, and can also restrain the influence of interference.

Key words: electric power systems; inter-area low-frequency oscillation; time delay; Pade approximation method; mixed sensitivity control; damping