基于时滞灵敏度和多目标优化的广域电力系统 稳定器参数设计

陈 中^{1,2}, 唐浩然^{1,2}, 严绍兴³, 周 涛^{1,2}

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 江苏省智能电网技术与装备重点实验室,江苏 南京 210096;
 3. 国网江苏省电力有限公司泰州供电公司,江苏 泰州 225300)

摘要:针对广域电力系统稳定器应用过程中信号具有时滞的问题,基于Pade 近似与阻尼转矩分析法推导得 到一个特征根相对于时滞的灵敏度指标,进而采用多目标粒子群优化算法求解综合考虑该灵敏度指标与系 统阻尼的广域电力系统稳定器参数优化问题,实现对时滞具有较好鲁棒特性的广域电力系统稳定器参数设 计。在搭建的信息电力融合系统平台中以2区4机系统为例,研究了不同时滞下控制器的控制效果。时域仿 真结果表明,所提控制器参数设计方法对广域信号时滞的波动有较好的鲁棒特性,当广域测量系统的传输时 滞在一定的范围内变化时,控制器依然能够有效地抑制系统区域间的低频振荡,为广域电力系统稳定器的参 数整定提供了一种新的思路。

0 引言

随着广域测量系统WAMS(Wide Area Measurement System)的不断发展,基于WAMS的广域电力系统稳定器WPSS(Wide area Power System Stabilizer)的提出为解决系统区域间的低频振荡、互联电网之间的稳定控制等问题提供了新的方法^[1]。但广域信号在数据传输过程中难以避免地存在着通信时滞,考虑时滞的广域控制器参数设计是一个复杂且困难的问题,若控制器参数设计不当,则具有时滞的广域信号会恶化控制器的控制效果,对系统稳定造成不利的影响,甚至导致系统失稳^[2]。

目前,关于具有时滞特性的广域阻尼控制器的 研究主要有2种思路。第一种思路是从时滞信号传 输的角度出发,对具有时滞的信号采用预测补偿的 方法^[3],从而减弱时滞对控制器性能的影响。虽然 该类方法避免了对时滞电力系统进行复杂的建模与 分析,但也存在难以揭示时滞电力系统内在规律的 问题。第二种思路是基于线性时滞系统的稳定性理 论^[4]或 Lyapunov 理论^[5],从时滞对系统的影响机理

收稿日期:2019-01-09;修回日期:2019-07-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900602); 国家自然科学基金资助项目(51277029);国家电网公司总 部科技项目(SGTYHT/17-JS-199);江苏省智能电网技术与 装备重点实验室课题项目

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900602), the National Natural Science Foundation of China (51277029), the Science and Technology Program of SGCC (SGTYHT/17-JS-199) and the Project of Jiangsu Key Laboratory of Intelligent Power Grid Technology and Equipment 出发,分析时滞系统的稳定性以及进一步指导广域 控制器参数的设计。关于第二种研究思路目前已有 较多的研究:文献[6]通过状态观测器和时滞依赖状 态反馈鲁棒控制的方法,提出了考虑时滞的阻尼控 制器设计方法;文献[7]设计了时滞全状态鲁棒反馈 控制器:文献[8]基于阻尼转矩分析(DTA)法和相量 法设计了不同信号时滞下WPSS控制器的最优参数。 以上设计方法均考虑控制器在固定时滞下具有最优 的控制效果。文献[9]基于线性矩阵不等式LMI (Linear Matrix Inequality)和增益调度相结合的方 法设计了WPSS参数,保证了系统在一定时滞范围 内的稳定性,这种方法虽然能够对传输信号提供精 确的相位补偿,但需要设计大量的离线备选控制器, 过程相对复杂。文献[10]对时滞进行分段,然后对 每个时滞区间进行补偿,使得系统在不同的传输时 滞下都能够保持稳定。文献[11]提出了以最大化阻 尼比和时滞稳定裕度为目标的辅助阻尼控制器智能 优化设计方法。为了提高时滞电力系统的稳定性, 基于非线性理论的研究方法也被引入时滞电力系统 的建模与广域阻尼控制器的参数整定中,文献[12-13]分别利用非线性的滑膜控制方法与H。控制方法 设计了对时滞具有较大稳定裕度的控制器;文献 [14] 通过建立非线性时滞广义 Hamilton 模型, 求解 得到广域电力系统的时滞裕度,并进一步设计了相 应的广域阻尼控制器。

基于上述分析可知,考虑固定时滞下具有最优 控制效果以及从最大时滞稳定裕度角度出发的广域 阻尼控制器设计已有较多的研究。文献[15-16]分 别对贵州和浙江的WAMS进行实测,结果均表明广 域信号在传输过程中的时滞是在一个较小范围内波 动的,并可用正态分布或莱斯分布对时滞进行建模。 因此,从时滞动态变化的特性出发设计对时滞波动 具有弱敏感性的控制器同样值得深入研究。文献 [17]计算了时滞电力系统特征根的移动轨迹,但并 未进一步考虑在时滞变化的情况下尽量减小系统特 征根的移动,从而设计具有弱时滞敏感特性的广域 阻尼控制器。

本文基于时滞电力系统自身的阻尼特性,并考 虑WAMS传输时滞动态波动的实际情况,研究了计 及广域信号时滞的WPSS参数设计方法。首先,基 于DTA法推导得到一个特征根关于时滞的灵敏度 指标,并结合Pade 近似的方法计算得到该灵敏度 指标:然后,采用多目标粒子群优化 MOPSO(Multi-Objective Particle Swarm Optimization)算法求解综 合考虑该灵敏度指标与系统阻尼的 WPSS 参数优化 问题,实现对波动的时滞具有较好鲁棒特性的 WPSS设计;最后,在搭建的信息电力融合系统 CPPS(Cyber Physical Power System)仿真平台中以 2区4机系统为例,研究了不同时滞下控制器抑制振 荡的效果。时域仿真结果表明,本文所提控制器设 计方法对广域信号时滞的变化有较好的鲁棒特性, 当WAMS的传输时滞在一定的范围内波动时,所设 计的WPSS依然能够有效地抑制系统区域间的低频 振荡。

1 考虑时滞的DTA模型

1.1 时滞电力系统的线性化模型

在考虑时滞的电力系统模型中,WPSS的输入信号u通过传递函数G(s)输出信号y,从而增大了电力系统的阻尼。输入信号u是由WAMS传递的多个广域信号共同构成,该信号不可避免地具有时滞特性。

假设系统共有 n 个状态变量、S 个节点、N 台发 电机,含有 WPSS 的电力系统线性化方程为^[18]:

$$\begin{cases} \Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta V + E_x \Delta y \\ 0 = C\Delta X + D\Delta V + E_y \Delta y \end{cases}$$
(1)

其中,X为系统的状态变量(包括发电机、励磁等的 状态变量,但不包括WPSS的状态变量);V为系统电 压代数变量;A、B、C、D、E、大E、为对应的系数矩阵。

本文通过发电机的角速度信号构造得到WPSS 的输入信号,WPSS采用传递函数的形式可表示为:

$$\begin{cases} \Delta y(s) = G(s)\Delta u(s) \\ \Delta u(s) = \sum_{i=1}^{L} F_i \Delta \omega_i(s) \end{cases}$$
(2)

$$G(s) = K \frac{sT_s}{1 + sT_s} \frac{(1 + sT_1)^2}{(1 + sT_2)^2}$$
(3)

其中, $\Delta\omega_i$ 为系统中发电机i的角速度信号;L为广域

信号的个数; F_i 为构造的对区域间低频振荡具有良好可观/可控性的输入信号所需的系数;K为WPPS的开环增益系数; T_s 为隔直环节的时间常数; T_1 、 T_2 分别为超前、滞后环节的时间常数。进一步可得到时滞输入信号 Δu_r 的时域表达式为:

$$\Delta u_{\tau}(t) = \sum_{i=1}^{L} F_i \Delta \omega_i (t - \tau_i)$$
(4)

其中,τ_i为第i个广域信号的传输时滞。

具有多个子站的 WAMS 在处理广域信号的过程中,存在构造同一时刻断面数据的过程,即在多个数据上传过程中由于时滞的随机性和传输通道的不同,每个信号 $\Delta\omega_i$ 的时滞 τ_i 可能是不同的,但为了保证数据的完整性,需要等待同一发送时刻的数据全部到达后才能构造得到可用于输入控制器的信号。故式(4)可变换为:

$$\Delta u_{\tau}(t) = \sum_{i=1}^{L} F_i \Delta \omega_i (t - \tau)$$
(5)

$$\tau = \max\left\{\tau_i\right\} \quad i = 1, 2, \cdots, L \tag{6}$$

将式(5)从时域变化到频域可得:

$$\Delta u_{\tau}(s) = e^{-s\tau} \sum_{i=1}^{L} F_{i} \Delta \omega_{i}(s)$$
(7)

因此输出信号 Δy 可表示为:

$$\Delta y(s) = G(s) e^{-s\tau} \Delta u(s)$$
(8)

$$\Delta u(t) = \sum_{i=1}^{L} F_i \Delta \omega_i(t)$$
(9)

由式(8)可知,时滞环节 e^{-st} 可移动到控制器的 传递函数中,此时输入信号为不含时滞的理想信号 Δu ,定义 $G_{\tau}(s)$ 为考虑时滞的 WPSS 的传递函数,如 式(10)所示。

$$G_{\tau}(s) = e^{-s\tau} K \frac{sT_s}{1+sT_s} \frac{(1+sT_1)^2}{(1+sT_2)^2}$$
(10)

式(10)表明,广域信号中所带有的时滞信息可 以转换为传递函数中的一个时滞环节,从而可建立 时滞电力系统的线性化模型。

1.2 时滞系统的DTA模型

DTA 建立在经典控制理论和发电机转子运动所 受力矩的分解基础上,具有明确的物理意义,DTA 指 标的定义和计算公式为^[19]:

$$S_{\text{DTA}}^{i} = \frac{\Delta \lambda_{i}}{\Delta G(\lambda_{i})} = \sum_{j=1}^{N} S_{ij} H_{ij} \angle \varphi_{ij}$$
(11)

其中, λ_i 、 $\Delta\lambda_i$ 分别为广域闭环控制系统的第*i*个特征根以及该特征根的变化量; $\Delta G(\lambda_i)$ 为WPSS传递函数的变化量; S_{ij} 为第*i*个特征根对发电机*j*的机电振荡回路提供的阻尼转矩的灵敏度; $H_{ij} \angle \varphi_{ij}$ 为WPSS对发电机*j*的机电振荡提供的阻尼转矩。由DTA的计算可知(具体方法见文献[20]),DTA的数值与WPSS传递函数的具体形式无关,仅与当前传递函数

下系统的特征根有关。故可得到时滞系统的DTA 模型为:

$$S_{\text{DTA}}^{i} = \frac{\Delta \lambda_{i}}{\Delta G_{\tau}(\lambda_{i})} = \sum_{j=1}^{N} S_{ij} H_{ij} \angle \varphi_{ij}$$
(12)

$$\Delta G_{\tau}(s) = e^{-s\tau} K \frac{sT_s}{1 + sT_s} \frac{(1 + sT_1)^2}{(1 + sT_2)^2} (-s) \Delta \tau \qquad (13)$$

$$S_{\text{DTA}}^{i} = \frac{\Delta \lambda_{i}}{e^{-s\tau} K \frac{sT_{s}}{1 + sT_{s}} \frac{(1 + sT_{1})^{2}}{(1 + sT_{2})^{2}} (-s) \Delta \tau}$$
(14)

其中, Δ *τ*为时滞的变化量。进一步地,可以得到时 滞系统的 λ ,对于时滞*τ*的灵敏度为:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \tau} = S_{\text{DTA}}^i \mathrm{e}^{-s\tau} K \frac{sT_s}{1+sT_s} \frac{(1+sT_1)^2}{(1+sT_2)^2} \left(-s\right)$$
(15)

该灵敏度指标反映了当前 WPSS 参数下时滞 τ 的变化对λ_i的影响。为了获得对时滞变化有较好鲁 棒性的 WPSS,应使得该灵敏度指标的数值尽量小, 从而使得广域信号的时滞在一定的范围内波动时, 控制器依然能提供较高的阻尼,从而对系统的区域 间低频振荡有较好的抑制能力。

由式(15)可知,在计算 ∂λ_i/∂τ 的过程中必须求 解得到时滞系统的特征根,由于时滞环节 e^{-sr} 的存 在,时滞系统的特征方程是一个含有超越项的方程。 可通过对时滞环节 e^{-sr} 做近似处理的方法求取得到 时滞电力系统的特征根,本文采用 Pade 近似对时滞 环节进行处理,e^{-sr} 的表达式见附录 A^[21]。

同时,文献[21]中进一步地指出了当时滞在 [0,0.7] s范围内时,5阶 Pade 能够近似反映时滞环 节的特性(近似度为99.9999%)。因此本文采用5 阶 Pade 近似,则时滞环节可表示为:

 $e^{-\tau s} = (-s^5\tau^5 + 30s^4\tau^4 - 420s^3\tau^3 + 3\ 360s^2\tau^2 -$

 $15\ 120\ s\tau + 30\ 240\)\ /\ (\ s^5\tau^5 + 30\ s^4\tau^4 + 420\ s^3\tau^3 +$

(16)

 $3\,360\,s^2\tau^2$ + 15 120 $s\tau$ + 30 240)

这样就将具有超越项的时滞微分方程变成普通 的微分--代数方程,即可求解得到时滞系统的特征 根。进而通过式(15)可求出特征根相对于时滞的灵 敏度指标。

1.3 考虑时滞的鲁棒控制器设计

在WPSS传递函数的设计过程中,其参数 $K_x T_s$ 、 T_2 在实际应用中通常可按经验取值。而相位补偿环 节的参数 T_1 需要进行计算得到,其取值直接影响着 WPSS的控制效果与系统的稳定。由于对时滞环节 进行 Pade 近似后,可得到当前时滞下电力系统的特 征根,从而可反映当前系统的阻尼情况,而 $\partial \lambda_i / \partial \tau$ 反 映了当前参数下系统特征根相对于时滞的灵敏度。 在WPSS的参数设计过程中,往往希望反映系统区 域间低频振荡的特征根具有尽量大的阻尼,即要求 该特征根的实部在保证位于复平面左半边的同时, 还要尽量地远离复平面的虚轴,并且该特征根实部的时滞灵敏度参数尽量得小。这样就保证了当广域 信号的时滞在不断波动时,系统仍然有较大的阻尼, 表明WPSS在抑制区域间低频振荡过程中对时滞具 有较好的鲁棒特性。

因此可建立如下的多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min f_1(T_1) = \operatorname{abs} [\operatorname{Re}(\partial \lambda / \partial \tau)] \\ \min f_2(T_1) = \operatorname{Re}(\lambda) \\ \text{s.t.} \quad 0 < T_1 < 1 \text{ s} \end{cases}$$
(17)

本文通过 MOPSO 算法对式(17)的多目标优化 问题进行求解,算法中采用动态惯性权重、线性调整 学习因子、自适应变异以及动态拥挤距离排序等策 略提高粒子多样性,从而克服局部最优提高全局寻 优能力。

2 基于 OPNET & MATLAB 的 CPPS 联合仿真 平台

考虑WAMS的2区4机系统模型见附录B中的 图B1,系统参数见附录C中的表C1—C6。当不装设 WPSS时,该电力系统存在1个反映区域间负阻尼振 荡模态的特征根0.1891±j2.988,阻尼比为-6.32%,2 个反映本地振荡模态的特征根-0.1504±j5.8585和 -0.1563±j6.0575,阻尼比分别为2.57%和2.58%。

由于区域间振荡模态呈现负阻尼,故可通过在 G₁ 处装设 WPSS 来提高系统的阻尼,抑制区域间的 低频振荡。通过输入信号系数 F_i 可构造得到反馈信 号 $\Delta\omega_{13}$,见式(18)。

$$\Delta \omega_{13} = \frac{H_1 \omega_1 + H_2 \omega_2}{H_1 + H_2} - \frac{H_3 \omega_3 + H_4 \omega_4}{H_3 + H_4}$$
(18)

其中, $H_1 - H_4$ 分别为发电机 $G_1 - G_4$ 的惯性时间常数; $\omega_1 - \omega_4$ 分别为发电机 $G_1 - G_4$ 的转子角速度。

本文采用文献[22]中的方法,在高级网络通信的仿真软件 OPNET 中搭建2区4机系统的通信模型,如图1所示。图中,PMU_1—PMU_4和PDC分别为4台发电机的相量测量单元 PMU(Phasor Mea-



surement Unit)和相量数据集中模块PDC(Phasor Data Concentrator);route_1—route_4、route_pdc分别 为装置PMU_1—PMU_4和PDC的本地路由装置;WAN为相应的广域传输网络;Cosim_Interface为OPNET的外部数据交互模块,具有传递仿真数据至对应仿真节点并接收对应仿真节点数据的功能。基于图1所示通信模型,可对WAMS中的不同信号传输时滞进行模拟。

由于网络中时滞的不确定性,不同的数据包经 历不同的传输过程,在此过程中可能会产生"先发后 至,后发先至"的粘包以及数据包丢失的现象。根据 文献[23]的网络控制系统模型,可通过在广域闭环 控制系统中装设零阶信号保持器,使得在通信失败 的情况下 WPSS 依然能够保持有持续输入的信号, 直到下一时刻的新输入信号到来。装有零阶信号保 持器的广域闭环控制系统见附录 B 中的图 B2。

综上,在 CPPS 联合仿真平台的时域仿真过程中 可采用如下的方式对含有时滞的数据包进行模拟: 假设 PMU 输出的有序数据包为 x_{k-1} 、 x_k 、 x_{k+1} 、 x_{k+2} ,若 当前t时刻控制器收到的数据包为 $x_t = x_{k0}$ 如果时滞关 系满足式(19),则t+1时刻的控制器数据为 x_{k+1} ,此时 控制器接收的数据包序列为: x_{k-1} 、 x_k 、 x_{k+10}

$$\tau_{k+1} \leq \Delta t \tag{19}$$

其中, τ_{k+1} 为下一时刻数据包 x_{k+1} 的时滞; Δt 为PMU的采样周期。

若不满足式(19)所示的条件,则t+1时刻的控 制器数据仍保持为 $x_{t+1} = x_k$,并且若此时 $\tau_{k+2} - \tau_{k+1} >$ $-\Delta t$,为了保持控制器有连续的信号输入,则控制器 接收的数据包序列为 $x_{k-1}, x_k, x_k, \dots, x_{k+1}, x_{k+2}$;若 $\tau_{k+2} - \tau_{k+1} < -\Delta t$,则新的数据包 x_{k+2} 将在旧数据包 x_{k+1} 之前或同时到达控制器,此时控制器将舍弃旧数据 包 x_{k+1} ,WPSS接收的数据包序列变为 $x_{k-1}, x_k, x_k, \dots, x_{k+2}$,从而实现了对具有随机时滞的广域信号时域仿真 模拟。

3 算例及验证

3.1 特征根对时滞灵敏度表达式的验证

若WPSS的传递函数为:

$$G(s) = 20 \frac{5s}{1+5s} \left(\frac{1+0.5s}{1+0.05s}\right)^2 \tag{20}$$

采用本文所提方法针对2区4机系统中1个反映区域间低频振荡模态与2个反映局部低频振荡模态的3个特征根,计算特征根相对于时滞的灵敏度指标,并与数值方法的计算结果进行对比,结果见附录C中的表C7。

由计算结果可知,公式法和数值法的计算结果 非常相近,从而验证了本文所提计算特征根相对于 时滞的灵敏度方法的正确性;同时可看出,反映区域 间低频振荡的特征根对时滞的灵敏度较大,随着时 滞的增大,特征根的实部将快速向复平面的虚轴方 向移动,甚至将会穿越虚轴呈现负阻尼性质,使得系 统失去小干扰稳定性。

3.2 控制器参数选取及时域仿真验证

假设WAMS的传输时滞在 $\tau = 0.1$ s附近波动, 根据本文所提方法对2区4机系统的WPSS参数进 行设计,使得WPSS在 $\tau = 0.1$ s附近波动时依然能 够具有较好的阻尼特性。对式(17)采用MOPSO算 法求解得到的Pareto解集见附录B中的图B3。

由 Pareto 解集可知,系统阻尼与特征根相对于时 滞的灵敏度指标之间存在着竞争关系,这两目标函 数间存在着较大的矛盾,不是按照线性变化的;且解 的分布具有较好的多样性,为WPSS的参数整定提供 了多样化的选择。本文综合考虑阻尼性能、灵敏度 指标,选取一个较为折中的参数,即 Re(λ) = -0.1837, abs[Re($\partial\lambda/\partial\tau$)] = 0.2763,此时 T_1 = 0.3653 s。如果 仅考虑 τ = 0.1 s 时系统具有最大的阻尼,那么 Re(λ) = -0.2593, abs[Re($\partial\lambda/\partial\tau$)] = 1.2236,此时有 T_1 = 0.6245 s。2种不同配置方法下反映区域间低频 振荡模态的特征根及灵敏度指标如表1所示。

表1 不同参数配置方法的结果($\tau=0.1$ s)

Table 1 Results of different parameter configuration methods($\tau = 0.1$ s)

T_1 / s	$\partial\lambda$ / ∂au	$oldsymbol{\lambda}_i$
0.6245	1.2236±j0.9479	-0.2593±j3.147
0.3653	0.2763±j0.5736	$-0.1837 \pm j3.031$

表1所示结果表明,当系统中反映区域间低频 振荡的特征根具有最大的阻尼时,该特征根的时滞 灵敏度指标也较大;而当折中考虑系统阻尼与灵敏 度指标时,系统阻尼虽有所下降,但时滞灵敏度指标 也大幅降低。对于不考虑时滞的控制器参数设计方 法而言,通过单目标粒子群优化算法计算可得,当时 滞 $\tau = 0$ 时,反映系统区域间低频振荡的特征根的最 小实部为 Re(λ) = -0.312 4,此时 T_1 = 0.540 3 s。通 过 Pade 近似可计算得到上述 3 种不同的 WPSS 参数 配置方法下反映系统区域间低频振荡模态的特征根 实部随时滞变化的曲线,结果如图 2 所示。

由图2可知,采用本文所提综合考虑系统特征 根实部与时滞灵敏度指标的控制器设计方法对 WPSS参数进行配置后,当时滞波动时,特征根的实 部变化较小,表明当广域输入信号的时滞变化时, WPSS对系统提供的阻尼变化较小,控制器在时滞电 力系统的应用中具有较好的鲁棒特性。

为了验证本文所提控制器参数设计方法在不同 的时滞场景下能够对系统的区域间低频振荡有良好 的抑制效果,在CPPS平台上分别进行不同时滞条件



212



inter-area oscillation mode vs. time delay

下的时域仿真,并进一步选取文献[10]中所提考虑时滞动态特性的WPSS设计方法,将其与本文所设计的3种不同的控制器方案进行对比。

在 MATLAB 中设定附录 B 中图 B1 所示系统的 节点 8 在 t=0.1 s时发生三相短路故障,t=0.11 s时 切除故障。在通信软件 OPNET 中设定不同的信号 传输时滞,图3(a)—(d)分别为固定时滞 $\tau=0.1$ s、固 定时滞 $\tau=0.2$ s、正态分布时滞 τ ~N(0.1,0.025²)(表 示时滞模型服从均值为 0.1 s、标准差为 0.025 s 的正 态分布)以及双峰分布时滞^[24]这 4 种信号传输时滞 场景下系统的动态功角仿真结果对比。其中,双峰 分布时滞模型的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{0.5}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} \exp\left[-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{0.5}{\sqrt{2\pi} \sigma_2} \exp\left[-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]$$
(21)

其中, μ_1 =100 ms; σ_1 =30 ms; μ_2 =200 ms; σ_2 =10 ms。

由系统时域仿真结果可知,固定时滞 $\tau=0.1$ s时 4种参数配置方法所设计的WPSS对区域间低频振 荡的抑制效果相差不大,其中以T₁=0.6245s的配 置方法和文献[10]所提方法的抑制振荡效果最好; 当时滞增大到τ=0.2s时,本文所提综合考虑系统阻 尼与时滞灵敏度的参数设计方法仍然能使得系统保 持较高的阻尼,而仅考虑时滞 $\tau = 0.1$ s下特征根实 部最小的参数设计方法已经呈现弱阻尼特性,但不 考虑信号传输时滞的参数设计方法的控制效果更 差,此时系统已经呈现负阻尼特性难以保持小干扰 稳定。同时可看出,在以上2种固定时滞的情况下, 文献[10]提出的参数整定方法由于可以基于预先设 计好的时滞分段补偿规则,在不同的时滞情况下通 过调整控制器参数,从而能够更准确地补偿时滞造 成的信号相位角误差,因此相比于本文所提参数设 计方法,其表现出更好的低频振荡抑制能力;但当 WAMS的时滞模型服从正态分布与双峰分布时,与 另外3种方法相比,本文所提方法能够表现出对区 域间低频振荡更优良的抑制特性。由于文献[10]所 提的 WPSS 设计方法在分布时滞的场景下 WPSS 参



图 3 不同时滞场景下G₁与G₃间功角差的仿真曲线 Fig.3 Simulative curves of power angle difference between G₁ and G₃ with different time delays

数的动态调整与时滞的抖动特性相比存在一定的滞 后性,且运行中可能会存在错误选择时滞补偿区间 的问题,从而使得 WPSS补偿时滞信号相位角误差 的能力受到了限制,导致在时滞动态变化的情况下 WPSS抑制振荡的能力并不如本文所提设计方法。 而且由于本文所提方法并不需要经常性地改变 WPSS的参数,这也使得 WPSS的参数设计更为简 便,并且能够在一个更为稳定的工况下运行。以上 时域仿真曲线在验证了图2所示时滞电力系统线性 化模型计算结果正确性的同时,也表明了本文所搭 建的CPPS平台的有效性与实用性。 综上可知,在不同的参数设计方案下,时滞的变 化及波动对WPSS抑制系统振荡的效果有显著的影 响。采用本文所提综合考虑系统阻尼与时滞灵敏度 指标的方法,当输入信号的传输时滞在一定的范围 内变化的情况下,WPSS仍然能够对电力系统的区域 间低频振荡具有较强的抑制能力。

4 结论

本文在原有DTA法的基础上,将DTA法扩展至 时滞电力系统,并推导得到了时滞系统的特征根相 对于时滞的灵敏度指标,并根据该指标设计了对时 滞具有较好鲁棒特性的WPSS,最后在所搭建的 CPPS平台中对2区4机系统算例进行了时域仿真, 验证了本文所提灵敏度指标以及控制器设计方法的 有效性。本文所提方法在设计WPSS参数时,为了 针对时滞波动具有较好的鲁棒性能,牺牲了一定的 WPSS提供阻尼的性能,如何使得WPSS在提供较高 阻尼的情况下依然能够具有较好的时滞不敏感特 性,从而更为有效地抑制电力系统区域间低频振荡 这一问题值得进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- BOSE A. Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1):11-19.
- [2] 马燕峰,张佳怡,蒋云涛,等. 计及广域信号多时滞影响的电力 系统附加鲁棒阻尼控制[J]. 电工技术学报,2017,32(6): 58-66.

MA Yanfeng, ZHANG Jiayi, JIANG Yuntao, et al. Additional robust damping control of wide-area power system with multiple time delays considered [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2017, 32(6):58-66.

[3] 刘运花,黎雄,刘志雄,等. 基于灰色预测的广域电力系统稳定 器分布延时补偿设计[J]. 电力系统自动化,2015,39(12): 44-49.

LIU Yunhua, LI Xiong, LIU Zhixiong, et al. A compensation design for wide-area power system stabilizer distributed time delay based on grey prediction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12):44-49.

 [4] 刘志雄,孙元章,黎雄,等.广域电力系统稳定器阻尼控制系统 综述及工程应用展望[J].电力系统自动化,2014,38(9):152-159,183.
 LIU Zhixiong, SUN Yuanzhang, LI Xiong, et al. Review of

wide area PSS control system and its engineering application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):152-159,183.

- [5] 丁贵立,林涛,陈汝斯,等.基于参量 Lyapunov 理论的广域时 滞阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):81-87.
 DING Guili,LIN Tao,CHEN Rusi, et al. Design of wide-area time-delay damping controller based on parametric Lyapunov theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8): 81-87.
- [6]黄柳强,郭剑波,孙华东,等.多FACTS广域抗时滞协调控制 [J].电力自动化设备,2014,34(1):37-42.

HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, SUN Huadong, et al. Widearea anti-delay coordinated control among FACTS controllers [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 37-42.

- [7] ZRIBI M, MAHMOUD M S, KARKOUB M, et al. H_x-controllers for linearised time-delay power systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(5):401-408.
- [8]周涛,陈中,殷大朋,等.基于阻尼转矩分析法的时滞丢包统一 建模及其应用[J].电力系统自动化,2017,41(5):53-57.
 ZHOU Tao, CHEN Zhong, YIN Dapeng, et al. Damping torque analysis based unified modeling of time delay and data loss and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(5):53-57.
- [9] 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.
- [10] 陈刚,程林,张放,等. WPSS 输入反馈时延的自适应分段补偿 设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):25-31.
 CHEN Gang, CHENG Lin, ZHANG Fang, et al. An adaptive sectional compensation design for WPSS input feedback time delay[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(14): 25-31.
- [11] 李婷,吴敏,何勇. 计及广域测量系统时滞影响的灵活交流输 电系统阻尼控制器多目标设计[J]. 电工技术学报,2014,29 (8):227-234.
 LI Ting,WU Min,HE Yong. Multi-objective design of FACTS damping controller based on WAMS with signal transmission delay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014, 29(8):227-234.
- [12] LI M, CHEN Y. Wide-area stabiliser on sliding mode control for cross-area power systems with random delay and packet dropouts[J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(6):2130-2142.
- [13] LI M, CHEN Y. A wide-area dynamic damping controller based on robust H_{∞} control for wide-area power systems with random delay and packet dropout[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):4026-4037.
- [14] 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 damning control of conceptiond Hamilton multi-meching names on

ping control of generalized Hamilton multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6199-6208.

[15] 张放,程林,黎雄,等.广域闭环控制系统时延的测量及建模
 (二):闭环时延[J].中国电机工程学报,2015,35(23):5995-6002.

ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, part II: closed-loop delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):5995-6002.

- [16] 杨博,魏路平,占震滨,等. 基于概率分布的广域测量系统时延 特性分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):38-43,55.
 YANG Bo, WEI Luping, ZHAN Zhenbin, et al. Analysis on characteristics of communication delay in wide area measurement system based on probability distribution[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(12):38-43,55.
- [17] 聂永辉,张鹏宇,马彦超,等. 基于 Pade 近似的广域电力系统 关键模态时滞轨迹分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(12): 87-92.

NIE Yonghui, ZHANG Pengyu, MA Yanchao, et al. Time delay trajectory analysis of critical modes in wide-area power system based on Pade approximation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 87-92.

- [18] 陈中. 阻尼转矩分析法在大规模区域互联电力系统中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):102-105.
 CHEN Zhong. Study of the DTA application in large scale inter-connected power system [J]. Power System Protection and Control,2011,39(12):102-105.
- [19] 杜文娟,王海风. 电力系统低频功率振荡阻尼转矩分析理论与 方法[M]. 北京:科学出版社,2015:95-120.
- [20] 周涛,陈中,郭瑞兴. 基于闭环阻尼转矩分析法的电力系统稳定器参数整定[J]. 电力系统自动化,2016,40(18):56-60.
 ZHOU Tao, CHEN Zhong, GUO Ruixing. Power system stabilizer parameter tuning based on closed-loop damping torque analysis method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(18):56-60.
- [21] 周一辰.考虑时滞的电力系统阻尼控制器设计[D].北京:华 北电力大学,2015.
 ZHOU Yichen. Design of power system damping controllers with delay considered [D]. Beijing: North China Electric Power University,2015.
- [22] 周力,吴在军,孙军,等.融合时间同步策略的主从式信息物理 系统协同仿真平台实现[J].电力系统自动化,2017,41(10):9-15,91.

ZHOU Li, WU Zaijun, SUN Jun, et al. Realization of a master-slave mode co-simulation in cyber physical system based on hybrid time synchronization strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10):9-15, 91.

- [23] WANG S B, MENG X Y, CHEN T W. Wide-area control of power systems through delayed network communication[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2012,20(2): 495-503.
- [24] WILCHES-BERNAL F, PIERRE B J, ELLIOTT R T, et al. Time delay definitions and characterization in the pacific DC intertie wide area damping controller [C] //2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. New York, USA: IEEE, 2017:1-5.

作者简介:



陈中

陈 中(1975—), 男, 江苏丹阳人, 副 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定 与控制(E-mail:chenzhong_seu@163.com); 唐浩然(1993—), 男, 云南德宏人, 硕 士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定

与控制(**E-mail**:tanghaoran_ee@163.com); 严绍兴(1980—),男,江苏泰州人,高

级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统 规划(**E-mail**:58694292@qq.com)。

周 涛(1991—),男,江苏沭阳人,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制、多端柔性直流输电(E-mail: zhoutaoguo1908@163.com)。

Parameter design of wide area power system stabilizer based on time delay sensitivity and multi-objective optimization

CHEN Zhong^{1,2}, TANG Haoran^{1,2}, YAN Shaoxing³, ZHOU Tao^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Nanjing 210096, China;

3. Taizhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou 225300, China)

Abstract: Aiming at the time delay problem of signals in the application progress of WPSS (Wide area Power System Stabilizer), a sensitivity index of eigenvalue to time delay is derived based on the Pade approximation and damping torque analysis method, then the multi-objective particle swarm optimization algorithm is applied to solve the parameter optimization problem of WPSS considering the sensitivity index and system damping comprehensively, then the parameter design of WPSS with good robustness for time delay is realized. In the established CPPS (Cyber Physical Power System) platform, the two-area four-generator system is taken as the example to study the control effect of the controller with different time delays. Timedomain simulative results show that the proposed parameter design method of controller has good robustness to the time delay fluctuation of wide area signal. When the transmission time delay of the wide area measurement system changes in a certain range, the controller can still suppress the inter-area low-frequency oscillation effectively, which provides a novel idea for the parameter design of the WPSS.

Key words: wide area power system stabilizer; Pade approximation; damping torque analysis method; time delay; multi-objective optimization; parameter design 附录 A

$$e^{-\tau s} \approx R(s) = \frac{N_n}{N_m} = \frac{a_0 + a_1 \tau s + \dots + a_n (\tau s)^n}{b_0 + b_1 \tau s + \dots + b_m (\tau s)^m}$$
 (A1)

$$a_{j} = (-1)^{j} \frac{(n+m-j)!n!}{(n+m)!j!(n-j)!}$$
(A2)

$$b_{j} = \frac{(n+m-j)!m!}{(n+m)!\,j!(m-j)!}$$
(A3)

其中, $n \pi m$ 为 Pade 近似阶数,阶数越高,则近似效果越好,通常情况下,取n=m。



附录 B

Fig.B1 Model of two-area four-generator system



Fig.B2 Network control model of wide area power system



Fig.B3 Optimization results of MOPSO

附录 C

表 C1 2 区 4 机系统的支路参数 Table C1 Parameters of branches in 2-area 4-generator system

始节点	末节点	R	Х	<i>B</i> /2	变比
1	5	0	0.01666	0	1
2	6	0	0.01666	0	1
3	11	0	0.01666	0	1
4	10	0	0.01666	0	1
5	6	0.0025	0.025	0.4375	1
6	7	0.001	0.01	0.0175	1
7	8	0.011	0.11	0.1925	1
7	8	0.011	0.11	0.1925	1
8	9	0.011	0.11	0.1925	1
8	9	0.011	0.11	0.1925	1
9	10	0.001	0.01	0.0175	1
10	11	0.0025	0.025	0.04375	1

注:表中的 R、X、B/2 均为标幺值。

表 C2 2 区 4 机系统的并联电容参数

Table C2 Parameters of shunt capacitors in 2-area 4-generator system

节点	有功补偿/MW	无功补偿/Mvar
7	0	200
9	0	350

表 C3 2 区 4 机系统的负荷节点参数

Table C3 Parameters of load buses in 2-area 4-generator system

节点	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar
7	1467	100
9	1767	100

表 C4 2 区 4 机系统的发电机节点参数

Table C4 Parameters of generator buses in 2-area 4-generator system

节点	电压	相角/(°)	有功功率/MW	无功功率/Mvar
1	1.03	0	825	185
2	1.01	0	825	235
3	1.03	-6.8	844	176
4	1.01	0	825	202

注:表中的电压均为标幺值。

表 C5 2 区 4 机系统的发电机模型参数	
Table C5 Generator model's parameters of 2-area 4-generator system	

发电机	$S_{\rm B}/({\rm MV}\cdot{\rm A})$	<i>f</i> /Hz	$R_{\rm a}$	X_d	X'_d	X''_d	$_{T_{d0}^{'}}/\mathbf{S}$	T_{d0}''/s	X_q	X'_q	X_q''	T_{q0}'/s	T_{q0}'' / \mathbf{S}	H/s
G1	900	50	0.025	1.8	0.3	0.25	8	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.5
G_2	900	50	0.025	1.8	0.3	0.25	8	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.5
G ₃	900	50	0.025	1.8	0.3	0.25	8	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.175
G4	900	50	0.025	1.8	0.3	0.25	8	0.03	1.7	0.55	0.25	0.4	0.05	6.175

注:表中的 R_a 、 X_d 、 X'_d 、 X'_a 、 X_q 、 X'_q 、 X'_q 、 X''_q 均为标幺值。

表 C6 2 区 4 机系统的励磁模型参数 Table C6 Excitation model's parameters 2-area 4-generator system

发电机	$T_{\rm R}/{ m s}$	KA	$T_{A/S}$
G1	0.01	20	0.01
G_2	0.01	20	0.01
G3	0.01	20	0.01
G4	0.01	20	0.01

注: T_R、T_A为励磁环节时间常数;K_A为励磁增益系数。

表 C7 系统特征根相对于时滞的灵敏度(τ=0.1 s)	
Table C7 Sensitivity index of eigenvalues to time $delay(\tau=0.1 s)$	

些尔坦	灵每	故度
衬证侬	本文所提方法	数值法
-0.8375±j5.6361	$0.2045 \pm j0.1965$	0.2049±j0.1968
$-0.1592\pm j6.0327$	$0.0023 \pm j 0.0122$	$0.0023 \pm j 0.0124$
-0.2384±j2.9837	$0.9178 \pm j 0.9423$	$0.9103 \pm j 0.9436$