

多 Agent 系统在区间振荡控制中的应用

李斌, 徐建源, 林莘

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110870)

Application of Multi-Agent System in Control of Inter-Area Oscillation

LI Bin, XU Jian-yuan, LIN Xin

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: In view of the problems existing in inter-area oscillation control modes such as centralized control and time delay in wide area power system, on the basis of the research on inter-area oscillation control system within wide area and the research on multi-agent system (MAS), an inter-area collaborative oscillation control model based on phasor measurement units (PMUs) and MAS is proposed. The main functions of all agents in this model are dissertated; the monitoring strategy of signals in the three-level power system stabilizers (PSSs) based on the proposed model is designed; and the collaborative process of suppressing inter-area oscillation by the proposed model is given. Digital simulation results verify the feasibility and effectiveness of constructing an inter-area oscillation control system based on MAS.

KEY WORDS: multi-Agent system; inter-area oscillation; wide-area measurement information; power system stabilizer (PSS); distributed control; system delay

摘要: 针对目前区间振荡控制模式中存在的集中控制和广域电力系统延时等问题,在对现有的广域网内区间振荡控制系统和多 Agent 系统研究的基础之上,提出了基于相角测量单元和多 Agent 系统的区间振荡控制协作模型。论述了该模型内各 Agent 的主要功能,设计了基于该模型的3级电力系统稳定器信号的监控策略,并给出了该模型抑制区间振荡的协作过程。数字仿真验证了基于多 Agent 系统构建区间振荡控制系统的可行性和有效性。

关键词: 多 Agent 系统; 区间振荡; 广域测量信息; 电力系统稳定器; 分布控制; 系统延时

0 引言

电力系统中出现的区间低频振荡问题已经对电网的安全稳定运行造成危害,并且限制了区域电网间的功率支援和电量交换^[1]。传统的基于本地信息的阻尼控制器对抑制区域间的低频振荡效果并

不理想^[2]。随着计算机技术和通信技术的发展,以及基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的相角测量单元(phase measurement unit, PMU)的研制成功,构建了可以为全网提供高精度同步运行的广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)^[3-4]。

WAMS 能够对电力系统动态过程进行同步在线测量,尤其是能够快速测量与发电机机电暂态密切相关的量,如发电机的内电势、功角、角速度和母线电压等,并能够及时地将信息传送到调度中心,为实现全网在线分析低频振荡提供了信息平台。国内外科研工作者在利用广域信号构成闭环阻尼控制方面已经做了大量的研究工作^[5-6]。从相关文献的仿真结果来看^[7-8],采用广域信号设计的控制器不考虑延时和考虑延时的控制效果相差较大,即使是很小的时滞也可能使性能优良的控制器在实际电力系统中应用时失效。目前如何处理 WAMS 中存在的延时问题,以及集中控制所带来的实时性、动态特性和协作性较差等缺点,已经成为抑制区域间低频振荡研究领域的热点问题^[9-10]。

多 Agent 系统(multi Agent system, MAS)^[11]是分布式人工智能的一个分支,它能使逻辑上和物理上分散的系统并行、协调地求解问题。采用多 Agent 进行控制,不追求单个庞大复杂的体系,而是按控制系统的要求,从功能上划分为多个 Agent 系统,它们相互通信,彼此协调,共同完成大的复杂系统的控制作业任务。这样的系统不仅具备一般分布式系统所具有的资源共享、可靠性强、实时性强、易于扩展等特点,而且通过各 Agent 之间的相互协调和协作可解决大规模的复杂问题,使系统具有很强的灵活性和鲁棒性。目前多 Agent 系统已经在电力系统中的一些研究方面得到了应用,如电力市场、

继电保护、事故分析与故障诊断、电压无功优化等^[12-13]。它本身所具有的优势已经被研究电力系统的学者所认可。

本文结合集中控制与分布控制 2 者的优点，根据电力系统区间振荡的实际情况，将多 Agent 系统引入该领域中，提出了集中协调、分层协作的思想。将目前只具有数据采集和通信能力的电厂及变电站内的 PMU 设计成具有一定计算能力和智能性的发电机监控子系统和变电站监控子系统。通过它们与广域监控系统之间的协调与协作，可以有效地解决目前区间振荡控制模式中存在的系统延时等问题。

1 基于 PMU 和多 Agent 的区间振荡监控协作模型

基于 PMU 和多 Agent 的区间振荡监控协作模型主要由广域监控系统、变电站监控子系统和发电机监控子系统 3 部分组成，如图 1 所示。

1) 广域监控系统。它实时地接收来自于变电站监控子系统和发电机监控子系统的信息。通过在线分析和广域优化运算得出控制区间振荡的广域控制策略。它可以对发电机监控子系统和变电站监

控子系统下达控制指令，也可以接收来自他们的状态信息及返回的任务结果，并根据 Agent 运行及任务完成情况，修改相应的数据库，还可通过广域协作 Agent 与其他广域监控系统联系，以达到更高级的协作。

2) 变电站监控子系统。它能够实时地检测接入该变电站的母线状态，将数据上传到广域监控系统，同时能够实时地同相连的其他变电站监控系统交换所监测母线电压的相角数据，并保存到本地资源信息库，还可根据相连的其他变电站的数据，在线判断该区域内是否发生区间振荡。如发生振荡，变电站监控子系统将向所有相关的电厂索要某一时刻内的发电机信息，分析后形成区域控制信息发送给各发电机监控子系统。变电站监控子系统还能接收来自广域监控系统和发电机监控子系统的协作信息，动态地修改本地策略表。

3) 发电机监控子系统。它能够实时地检测各发电机及其他设备的状态，将数据上传到广域监控系统。在没有远方控制信息时，能够在线检测并自适应地抑制本地振荡。也可以接收来自变电站监

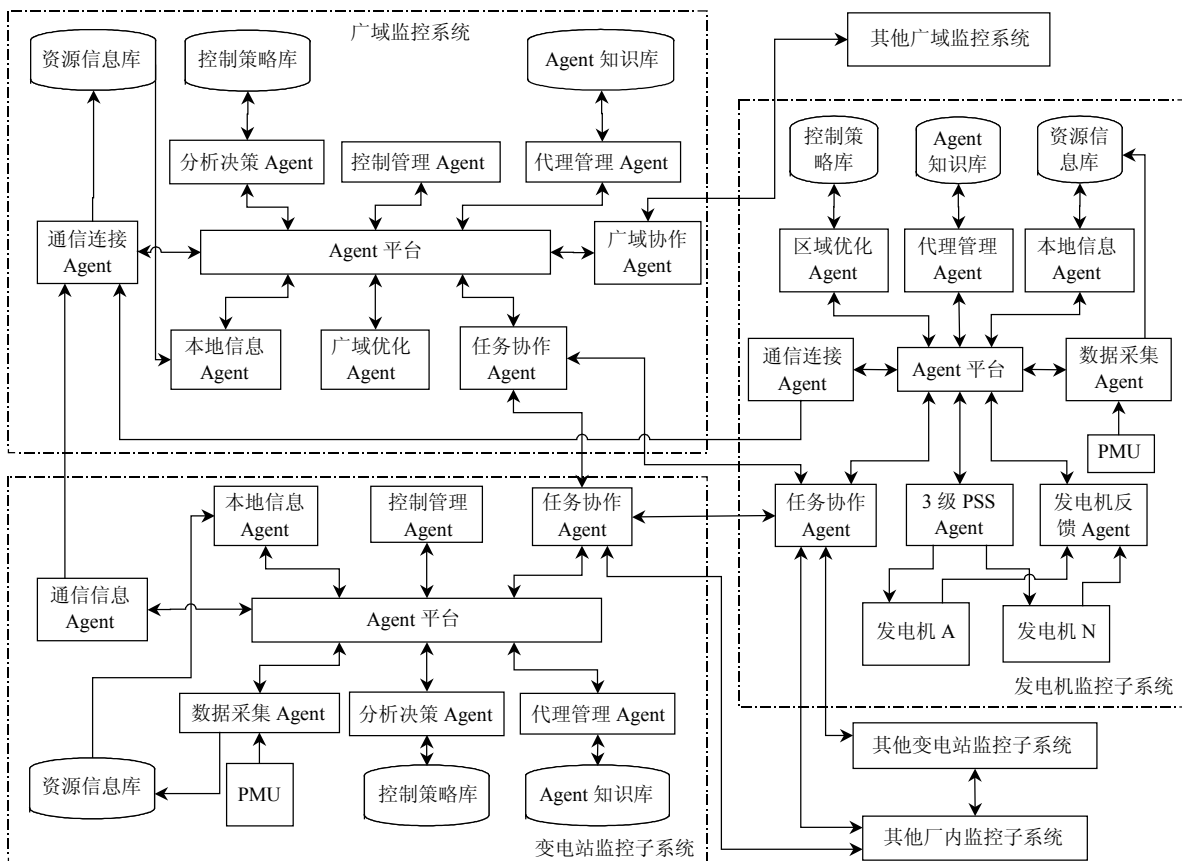


图 1 基于 PMU 和多 Agent 系统的区间振荡监控协作模型

Fig. 1 The monitoring collaborative model of the inter-area oscillation based on PMU and multi-Agent system

控子系统的区域控制信息和广域监控系统的广域控制信息,并将这些信息与本地信息拟合作为抑制区间振荡的控制信息。发电机监控子系统还可以获取其他电厂的信息,在本地分析后形成区间振荡的控制信号。

协作模型内各主要 Agent 功能:

Agent 平台。本模型中的 Agent 平台采用 JADE^[14]作为平台总线。它为各种 Agent 提供基本服务:包括 Agent 管理系统、Agent 通信通道、目录查询器,以及 Agent 的安全、一致性、持久性、通信和命名等,移动 Agent 的安全认证、注册、生成、召回、迁移等管理。

Agent 知识库。它主要包括服务资源关联信息、服务资源知识信息、服务资源语义信息等。它既包含单个 Agent 对自己本区域事务的处理规则,也包含与其他 Agent 协作之后或者对本区域规划后生成的任务子集。Agent 根据任务集来确定自己的行为,以实现目标。

控制策略库。它为各监控系统提供优化后的分析及控制策略。随着系统的逐渐完善,控制策略库会被不断的更新,为智能控制提供策略支持。

资源信息库。它包含各控制系统内所对应的被控设备在任何时刻的参数信息(如频率、电压、相位、功率等)。

代理管理 Agent。它管理系统内各种进出 Agent 平台任务的 Agent,监控他们的状态、生命周期、任务完成情况等。

控制管理 Agent。它控制、协调和管理系统内多个 Agent 之间的工作,协同处理任务执行中各 Agent 的冲突,监控任务的执行,为整个代理层 Agent 的运行提供支持。

分析决策 Agent。它通过在线分析算法(如 Prony 算法)分析出主振荡模式,并依据控制策略库中相应模式的控制策略,形成针对这一振荡模式的控制策略。

广域优化 Agent。它通过广域优化算法(如遗传算法)形成广域控制策略,供分析决策 Agent 调用,并存在控制策略库。

任务协作 Agent。任务协作 Agent 可动态地协调各广域监控系统、发电机监控子系统和变电站监控子系统之间的联系。

本地信息 Agent。它不仅可以把本地的各种数据及操作记录在资源信息库内,也可以同本地的其

他信息管理系统(如 SCADA)交换数据。

发电机反馈 Agent。它可以实时地检测各发电机的状态,调用本地信息 Agent,将检测到的发电机信息存入资源信息库。

数据采集 Agent。它通过 PMU 实时检测线路上的信息,能够对所采集到的信息进行插值和低通滤波以及去除直流分量等预处理。

通信连接 Agent。它能够建立各监控系统之间的连接,实时地上传数据,还能监测通信网络的状态,判断其是处于正常、故障,还是阻塞状态,并请求控制管理 Agent 处理。

3 级 PSS Agent。针对由广域监控系统、变电站监控子系统和发电机监控子系统的 3 部分监控信号,将广域监控系统的信息作为第 3 级 PSS 的信号输入,将变电站监控子系统的信息作为第 2 级 PSS 的信号输入,将发电机监控子系统通过移动 Agent 获取其他电厂的发电机信息,在本地计算后形成第 1 级 PSS 的信号输入。3 级 PSS Agent 能协调和控制 3 者之间的关系,使它们协同工作。

模型内部还有智能用户 Agent、移动服务 Agent、安全分析 Agent、统计分析 Agent 等,本文将不予讨论。

2 基于 PMU 和多 Agent 协作模型的 3 级 PSS 监控策略

3 级 PSS 信号分别来自广域监控系统、变电站监控子系统和发电机监控子系统,如图 2 所示。在互联电网广域阻尼控制中通常以联络线有功功率变化量或区间相对角频率,作为电力系统稳定器的控制信号,但采用区间相对角频率作为控制信号的效果更好^[15],故本文将以相对角频率作为控制变量。图 2 给出了基于 3 级 PSS 控制信号的监控模型。

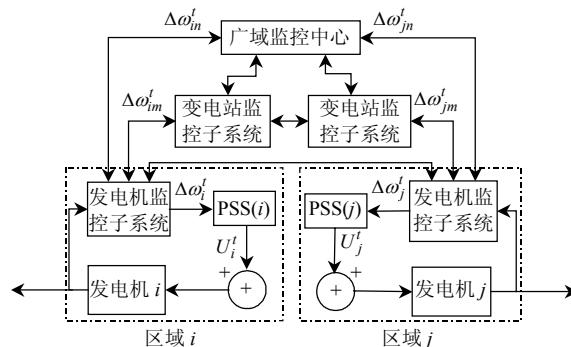


图 2 基于 3 级 PSS 控制信号的监控模型
Fig. 2 The monitoring model based on the control signal of the three-level PSS

图中： $\Delta\omega_m^t$ 表示时标为 t 的对 n 个发电机分析形成的对于第 i 个 PSS 的 3 级控制信号； $\Delta\omega_m^t$ 表示时标为 t 的对 m 个发电机分析形成的对于第 i 个 PSS 的 3 级控制信号($n \geq m$)。各级监控系统将分析同一时间内的数据，各级的控制信号将在不同的时刻到达发电机监控子系统，然后将这些信息拟合成控制信号 $\Delta\omega_i^t$ 作为 PSS 输入，用于抑制区间振荡。

各级控制信号的选取如下：

1) 变电站监控子系统控制级信号。

在变电站内的 PMU 可直接测得接入的各母线电压，由式(1)得出各母线之间在时间 $t \in [0, \tau]$ 内的电压相角差。

$$\theta_i^t = \arg\left(\frac{U_i^t}{U_j^t}\right) \quad (1)$$

$j, i=1 \dots n; j \neq i$

$$D_\theta^t = \max_{t \in [0, \tau]} |\theta_i^t| < C \quad (2)$$

式中 U_i^t 是某一时刻母线 i 上的电压。因为两端母线相角差能较好地反映振荡规律，变电站监控子系统区间振荡判据为式(2)。如果各母线之间的电压相角差的最大值 D_θ^t 在任一时刻都不大于给定值 C ($C > 0$)，则说明各变电站所连系统内没有发生区间振荡。当上式不满足时，变电站监控子系统将向所连的各发电机监控子系统索要相关 PMU 数据(如电势、功角、角速度等)，进行 Prony 分析，形成带时标的控制信息，发送给发电机监控子系统作为 PSS 的 2 级控制信号。

2) 广域监控系统控制级信号。

如果广域网内各台发电机 i 和 j 的转子角相对偏差 D_{ij}^δ 在任一时刻都不大于给定值 C ($C > 0$)，则说明广域网内没有发生低频振荡，如式(3)所示。当式(3)不满足时，广域监控系统将对全网的数据进行 Prony 分析，形成带时标的区间相对角控制信息发送给发电机监控子系统作为 PSS 的 3 级控制信号。

$$D_{ij}^\delta = \max_{t \in [0, \tau]} |\Delta\delta(t) - \Delta\delta(t)| < C \quad (3)$$

3) 发电机监控子系统控制级信号。

发电机监控子系统拥有传统的 PSS，可以由发电机的闭环控制系统得到抑制本地低频振荡的控制信号。当发生振荡后，2 级和 3 级控制信号在某一时间内未到达时，发电机监控子系统将与相邻的各发电厂通信，并获得某一时间内的 PMU 采样数据，分析后形成 PSS 的 1 级控制信号。

各级 PSS 的传递函数^[15]如下：

$$H_i(s) = K \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left(\frac{1 + T_{1j} s}{1 + T_{2j} s} \right)^2 \quad (4)$$

式中： $T_{1j} = 1/2\pi f_q \sqrt{a_j}$ ； $T_{2j} = a_j T_{1j}$ ； $a_j = \frac{1 - \sin(\phi_{qj}/2)}{1 + \sin(\phi_{qj}/2)}$ ； ϕ_{qj} 为区间振荡模式的 j 级信号补偿相位； T_w 为隔直时间常数(一般取 10 s)； f_q 为区间振荡模式的振荡频率； K 为该传递函数的增益，其值确定了 PSS 产生的阻尼大小。

各级监控系统进行 Prony 分析，辨识出本地模式和区间模式后进行留数计算，然后可按式(4)得到各级 PSS 选取的具体参数。

3 基于 PMU 和多 Agent 协作模型的抑制区间振荡协作过程

基于多 Agent 的抑制区间振荡协作过程如图 3 所示。当广域电力系统正常运行时，发电机监控子系统和变电站监控子系统将 PMU 采集的发电机和线路信息通过通信连接 Agent 实时地将数据上传到广域监控系统。同时变电站监控子系统将与其连接的其他变电站监控子系统实时地交换带时标的各母线上的电压功角数据。并且各系统将获得的数据存入各自的资源信息库，如图 3 中过程(1)~(4)所示。然后广域监控系统将获得的信息进行分析、优化后，形成广域的控制策略，由任务协作 Agent 动态创建移动的广域策略 Agent，并派遣到发电机监控子系统和变电站监控子系统，与它们各自的任务协作 Agent 协作，更新各自范围内的抑制区间振荡策略，如图 3 中过程(5)~(8)所示。同时变电站监控子

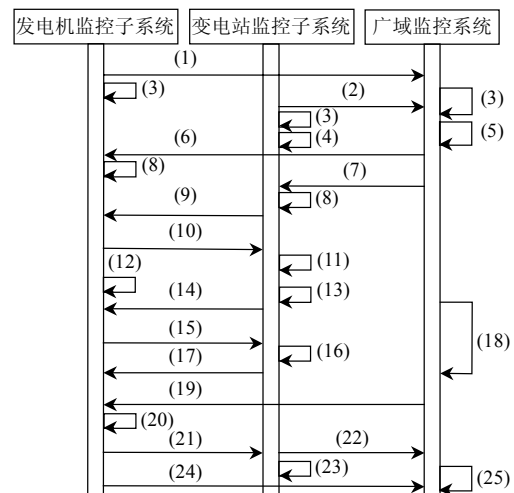


图 3 基于多 Agent 协作模型的抑制区间振荡协作过程
Fig. 3 The collaborative process of suppressing the inter-area oscillations based on the collaborative model of multi-Agent

系统由任务协作 Agent 动态创建移动的区域环境 Agent, 并派遣到所连接的各发电机监控子系统, 与他们各自的任务协作 Agent 协作, 索取各发电机的正常运行状态下的参数及线路信息, 移动 Agent 完成任务后将被召回, 并通过本地信息 Agent 将数据存入资源信息库, 如图 3 中过程(9)~(11)所示。

当发电机监控子系统根据判据检测到本地低频振荡时, 会由该系统生成本地的阻尼控制策略, 进行本地 PSS 控制, 如图 3 中过程(12)所示。当变电站监控子系统根据判据检测到区间振荡时, 会由任务协作 Agent 动态创建移动的数据获取 Agent, 并派遣到所连接的各发电机监控子系统获取检测到区间振荡那一时刻之前的采样数据。移动 Agent 完成任务后将被召回, 并通过分析决策 Agent 调用 Prony 算法对获取的数据进行分析, 由区域优化 Agent 根据分析的结果形成区域内的阻尼控制策略, 并把携带控制策略的任务执行移动 Agent 派遣到各发电机监控子系统, 进行 2 级 PSS 控制, 如图 3 中过程(13)~(17)所示。当广域监控系统根据判据检测到区间振荡时, 会由分析决策 Agent 调用 Prony 算法, 对资源信息数据库中的数据进行分析, 由广域优化 Agent 根据分析的结果形成广域内的阻尼控制策略, 并把携带控制策略的任务执行移动 Agent 派遣到各发电机监控子系统, 进行 3 级 PSS 控制, 如图 3 中过程(18)~(19)所示。当发电机监控子系统在一定的时间内, 没有收到来自广域监控系统和变电站监控子系统的控制信号时, 会由任务协作 Agent 动态创建移动的数据获取 Agent, 并按照知识库中的路由表迁移到邻近各发电机监控子系统获取某一时刻内的 PMU 数据, 最后被召回到发电机监控子系统, 进行数据分析, 生成对区间振荡的 1 级 PSS 控制信号, 如图 3 中过程(20)所示。当区间振荡被抑制后, 发电机监控子系统生成并派遣任务结果移动 Agent 到变电站监控子系统和广域监控系统, 变电站监控子系统也会生成并派遣任务结果移动 Agent 到广域监控系统, 各系统将根据反馈回来的任务完成情况, 相应地更新自己的控制策略信息库, 如图 3 中过程(21)~(25)所示。

4 系统仿真

作为本文区间振荡分析模型, 选用 IEEE 4 机 2 区电力系统, 其接线如图 4 所示。其中 2 个区域包

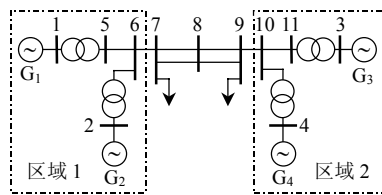


图 4 4 机 2 区系统

Fig. 4 A four-machine two-area power system

括了 2 个变电站监控子系统和 4 个发电机监控子系统, 每个变电站监控子系统由 2 个变电站组成, 每台发电机可视为一个发电机监控子系统^[15-16]。

区间振荡模式频率为 0.608 1 Hz, 机组角频率对区间振荡模式参与因子的幅值相对值 $G_1=1.000 0$, $G_2=0.914 1$, $G_3=0.422 9$, $G_4=0.314 4$ 。由此可以得出, 对于区间振荡模式, 2 区域中 G_1 和 G_3 参与因子较大, 故选取 G_1 、 G_3 的相对角频率 $\Delta\omega_{13}$ 作为 G_1 和 G_3 的 3 级 PSS Agent 控制信号。根据式(4)得出各级 PSS 的传递函数为 $H_i(s) = \frac{300s}{1+10s}$ 。

$\left(\frac{1+0.324s}{1+0.212s}\right)^2$, 限幅范围为 -0.05~0.1。

通过 Matlab 7.0 环境中的 LMI 工具箱和 TCP/IP 工具箱进行仿真分析, 验证各级 PSS 控制信号延时对抑制区间振荡的影响。

现假设联络线功率达到 $90\%P_m$, 在节点 7 和 9 之间的联络线上 0.1 s 时刻发生三相短路故障, 0.2 s 故障排除, 采用 3 级 PSS Agent 控制后的区间相对功角振荡过程仿真如下:

1) 图 4 为 4 机 2 区电力系统的仿真模型, 可设 3 级、2 级和 1 级 PSS 控制信号的通信距离相等, 通信延时都为 20 ms。根据各级 PSS 的任务设定, 2 级 PSS 控制信号所分析的数据, 首先由判据判断出发生区间振荡后, 变电站监控子系统生成数据获取移动 Agent, 并派遣到各发电机监控子系统获取 PMU 数据, 然后被召回进行数据分析, 因此存在一定的数据获取延时。根据仿真模型可设 2 级 PSS 控制信号数据获取延时为 20 ms。对于 3 级 PSS 控制信号, 其所分析的数据是实时接收的, 所以数据获取延时可忽略不计。即在所采用的仿真模型内, 不计系统内其他延时的情况下, 2 级 PSS 控制信号所需的延时为 40 ms, 3 级 PSS 控制信号所需的延时为 20 ms。图 5 给出了 3 级 PSS 控制信号单独作用和 2 级 PSS 控制信号单独作用及 3 级和 2 级联合作用时的区间相对功角振荡过程。

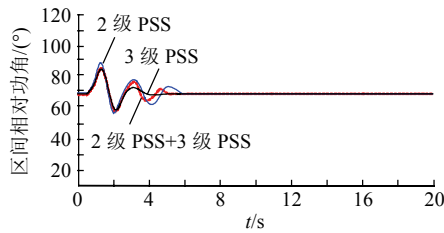


图5 3级 PSS Agent 的区间相对功角振荡曲线
Fig. 5 The inter-area relative power angle oscillation curve based on three-level PSS Agent

由图5可以看出,当采用3级PSS控制信号单独作用时,区间振荡的稳定时间小于4s。采用2级PSS控制信号单独作用时,区间振荡的稳定时间小于6s。采用3级和2级PSS控制信号联合作用时,区间振荡的稳定时间小于5s。由此可知3种PSS控制信号都能够确保系统稳定,但当3级PSS控制信号的延时小于2级PSS控制信号的延时时,3级PSS控制信号抑制区间振荡的效果要优于2级PSS控制信号及3级与2级PSS联合的控制信号。

2) 设2级和3级PSS控制信号在系统发生低频振荡200ms内未到达发电机监控子系统时,发电机监控子系统将生成数据获取移动Agent,并派遣到其他的发电机监控子系统获取PMU数据,然后被召回进行数据分析。根据仿真模型可设1级PSS控制信号数据获取延时为20ms。即在所采用的仿真模型内,不计系统内其他延时的情况下,1级PSS控制信号所需的延时为240ms。图6给出了1级PSS控制信号单独作用时的区间相对功角振荡过程。

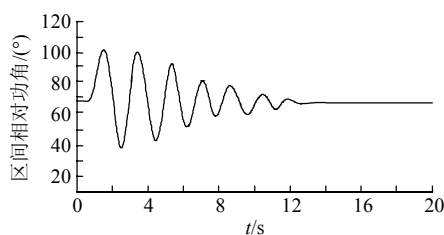


图6 只存在1级PSS控制信号时的区间相对功角振荡曲线
Fig. 6 The inter-area relative power angle oscillation curve when only level PSS control signal

由图6可以看出,根据假设条件,当采用1级PSS控制信号单独作用时,区间振荡的稳定时间小于13s。由此可知在2级与3级PSS控制信号的延时大于200ms时,1级PSS也能够确保在13s内保证系统稳定。

上述仿真结果表明,在采用4机2区电力系统的仿真模型和3种PSS的传递函数相同条件下,当联络线处于重负荷状态下,并发生严重的短路故障时,设3种PSS的控制信号的通信延时为一个固定

值。在仅考虑3种PSS控制信号的数据获取延时不同时,单独采用3级PSS抑制区间振荡的效果要优于单独的2级PSS及3级与2级PSS的联合信号。当2级和3级PSS控制信号的延时都较大或无信号时,1级PSS控制信号也能够确保系统稳定,但区间振荡的稳定时间较大,如不提供区间阻尼,系统将由于欠阻尼而发生多摆失稳。

5 结语

本文在现有的广域内区间振荡控制系统和多Agent系统分析的基础上,提出了基于多Agent和PMU的区间振荡控制协作模型,并给出了该模型内各Agent的主要功能。设计了基于该模型的3级PSS信号的监控策略,详细描述了各级控制信号的区间振荡判据和形成控制信号的方法。基于本文设计的协作模型,给出了多Agent的抑制区间振荡协作过程。数字仿真验证了基于多Agent系统构建区间振荡控制系统的可行性和有效性。本文中所设计的协作模型也可用于功角稳定控制、频率稳定控制、电压稳定控制和暂态不稳定控制等其他方面。

参考文献

- [1] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.
Yu Yixin, Li Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11(in Chinese).
- [2] 刘红超,雷宪章,李兴源,等. 互联电力系统中PSS的全局协调优化[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 1-6.
Liu Hongchao, Lei Xianzhang, Li Xingyuan, et al. Global coordinated optimization of PSSs in interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 1-6(in Chinese).
- [3] 张鹏飞,罗承廉,孟远景,等. 电力系统低频振荡的广域监测与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 157-161.
Zhang Pengfei, Luo Chenglian, Meng Yuanjing, et al. Review of wide-area monitoring and controlling of power system low frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 157-161(in Chinese).
- [4] 许树楷,谢小荣,辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).
- [5] 易俊,周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-12.
Yi Jun, Zhou Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12(in Chinese).
- [6] 陈振宇,王钢,李海峰,等. 基于智能多代理技术的广域电网协调保护系统[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 42-45.

- Chen Zhenyu, Wang Gang, Li Haifeng, et al. A MAS-based coordinated protection system for wide area power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 42-45(in Chinese).
- [7] Chaudhuri B, Majumder R, Pal B C. Wide-area measurement based stabilizing control of power system considering signal transmission delay[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1971-1979.
- [8] Naduvathuparamhil B, Valenti M C, Feliachi A. Communication delays in wide area measurement systems[C]. Proceedings of the Thirty-fourth Southeastern Symposium on System Theory, PiscatawayNJ, 2002.
- [9] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [10] Wu H X, Tsakalis K S, Heydt G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1935-1941.
- [11] 方义, 熊璋, 王剑昆. 智能控制中的多 Agent 系统[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 810-814.
Fang Yi, Xiong Zhang, Wang Jiankun. Multi-Agent system in intelligent control[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(5): 810-814(in Chinese).
- [12] 束洪春, 唐岚, 董俊. 多 Agent 技术在电力系统中的应用展望[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 27-31.
Shu Hongchun, Tang Lan, Dong Jun. A survey on application of multi-agent system in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 27-31(in Chinese).
- [13] 朱亮, 黄怡, 江全元. 多智能体开发系统 SWARM 在电力系统中的应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 550-554.
Zhu Liang, Huang Yi, Jiang Quanyuan. Principle and applications of multi-agent developing system swarm in power system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 550-554(in Chinese).
- [14] Te S C, He T. Project Java agent development framework is an open source platform for peer-to-peer agent based applications[EB/OL]. <http://jade.cse.ust.hk/>, 2004.
- [15] 袁野, 程林, 孙元章. 采用广域测量信号的 2 级 PSS 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 11-16.
Yuan Ye, Cheng Lin, Sun Yuanzhang. Two-level PSS control approach using global signals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 11-16(in Chinese).
- [16] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002, 768-782.



李斌

收稿日期: 2009-11-02。

作者简介:

李斌(1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能技术在电力系统中的应用, E-mail: tflb@qq.com;

徐建源(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、高电压与绝缘技术等研究;

林莘(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、高电压与绝缘技术等研究。

(责任编辑 王晔)