改进的 WPSS 分段时延补偿方法

陈 刚1,张 华1,程 林2,滕予非1,丁理杰1,张 放2

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072;

2. 清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

摘要:实现广域电力系统稳定器(WPSS)的工程应用的关键是对其反馈输入信号时延的良好补偿。对实际 电网中相量测量单元(PMU)数据时延进行了实测,测试结果表明时延具有一定的随机分布特性和较强的 抖动性。为适应时延的抖动特性,对分段时延补偿方法进行了改进,利用每次时延补偿器动作时刻前一段 时间内的平均时延作为选择时延补偿的依据,避免了由于时延抖动带来的错误结果。在两区四机系统中进 行的开环和闭环时频域仿真分析表明改进的方法能够更好地适应时延的变化,基于 RTDS 的实际电网仿真 进一步验证了该方法在大系统中的有效性和可行性。

关键词:低频振荡;广域电力系统稳定器;时延;实测;改进分段补偿;电力系统 中图分类号:TM 72 文献标识码: A DOI:10.3969/i.issn.

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.013

0 引言

电网互联使得电力系统规模越来越大,给电网 安全稳定运行带来了一系列新的问题。其中,突出 问题之一是振荡频率更低的区间模式振荡。互联系 统的弱阻尼区间模式低频振荡问题已经成为西电东 送传输极限能力提高的瓶颈。

由于只能以本地信号为反馈输入,本地电力系 统稳定器(PSS)对区间模式振荡的抑制效果需要重 新评估^[1]。以相量测量单元(PMU)测量的远方同步信 号为输入的广域电力系统稳定器(WPSS)为抑制区间 模式振荡提供了新的途径^[2-3]。与此同时,广域信号 的引入也给控制器的设计带来了新的内容:在众多 类型的广域信息中选取最优的反馈信号;选择最优 的控制器落点;控制器的结构与参数设计;广域反馈 信号时延的补偿问题等。经过多年的研究,学者们在 上述各个方面取得了丰硕的研究成果^[4-7]。然而,要 实现 WPSS 的工程应用并不容易,其中最大的挑战来 自于实际电力系统中广域反馈时延的补偿问题^[8]。

由于很小的时延都会影响阻尼控制的效果,甚 至引起系统失稳^[9],在控制器设计时必须予以考虑。 从 20 世纪 50 年代开始,学者们就开始研究时延补偿 问题,提出了一系列时延补偿方法。这些方法可分 为 2 类:一是固定补偿法^[10-11],通过设计一个固定不 变的时延补偿器,实现对固定时延的补偿,尽管这些 固定补偿器能够在一定的时延范围提供补偿,但当 时延变化过大时可能会失效;二是连续补偿法^[12],通

收稿日期:2014-02-10;修回日期:2014-10-12

过设计大量的离线备选控制器,实现对时延的精确 补偿,但很难用于实际电力系统^[13]。

在考虑 WPSS 实际工程应用时,既要考虑从短 期来看时延相对比较集中、波动性较小的特性,也要 考虑从长期来看时延可能会出现较大随机变化的特 点。因此,需要进一步研究时延补偿策略,以解决 WPSS 在工程现场长期投运时的时延问题。为此,应 用 WPSS 的工程实践中, 文献 [14] 提出了一种基于 分段的时延补偿方法。将时延分为若干区间分别设 计固定的时延补偿器.根据实测时延自适应选择补 偿区间。该方法解决了时延发生较大变化时传统固 定时延补偿失效的问题,保证 WPSS 长期稳定运行: 同时避免了连续跟踪时延补偿控制器频繁动作可能 导致系统失稳的风险,保证 WPSS 短期稳定运行。然 而,这种方法以控制器动作时刻的时延为选择时延补 偿区间的依据,若时延恰好在控制器动作时刻出现 抖动,则会导致选择错误的时延补偿区间,影响控制 器的效果,并且该方法并未通过大系统仿真的验证。

本文针对文献[14]的不足,提出一种改进的分 段时延补偿方法。首先对实际电网中的时延进行实 测,实测结果表明时延抖动性很强,若以控制器动作 时刻的时延选择补偿区间可能会导致错误的结果, 影响系统稳定。为此,提出一种改进的方法,以补偿 器动作前一段时间的平均时延作为选择时延补偿区 间的依据。两区四机系统上进行的时频域仿真结果 验证了所提方法的有效性。实际电网 RTDS 仿真进 一步验证了该方法在大系统中的有效性和可行性。

1 PMU 数据时延的组成与实测

1.1 PMU 数据时延的组成

在利用广域测量系统(WAMS)进行广域控制时,

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2014AA-051901)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA-051901)

需要考虑的时延为 PMU 测量数据从被采集到控制 信号进入控制执行器所产生的时延,可用图 1 表示。



图 1 PMU 实测数据网络传输时延示意图

Fig.1 Schematic diagram of time-delay along PMU data communication path

从图 1 可以看到,广域信号从被 PMU 量测到传送至控制执行器产生的时延可表示为:

$$\tau = \Delta \tau_m + \Delta \tau_m + \Delta \tau_{syn} + \Delta \tau_{down} + \Delta \tau_a$$
 (1)
其中, $\Delta \tau_m$ 为 PMU 采集并发送数据的时延, 包括相
量采样、计算、封装产生的时延和 PMU 发送数据产
生的抖动时延。PMU 测量数据以数据包的形式发
送, 先量测的数据要等待后量测的数据, 因此, 数据

发送抖动时延会显著影响同步时延 Δτ_{sno}

Δ τ_{up} 和Δ τ_{down} 分别为上行通道和下行通道的网 络传输时延,视通信协议、通信线路负载情况、传 送距离、通信通道带宽、经过路由器的多少等因素 的不同而不同,从几十毫秒到几百毫秒不等^[15-16]。在 WPSS 工程应用时,可选择恰当的通信网络通道、提 高通道带宽或者使用专用数据通道以降低通道负载 等方式降低此部分时延。

 $\Delta \tau_{sm}$ 为数据与控制中心产生的时延,由于数据 中心需要等待所有 PMU 通道上传的数据到达后方 能进行数据时标同步,因此, $\Delta \tau_{sm}$ 包括 PMU 数据同 步产生的时延、控制规律计算和发送过程中产生的 时延。在 WPSS 工程应用时,可采用更为高级的数据 服务器、实时操作系统以及更为优化的数据处理和 控制规律算法降低此部分时延。

Δτ。为控制执行器动作时延,包括接收控制命 令和将控制命令序列转换为符合控制器接口的模拟 信号并作用于控制器产生的时延。该部分时延较固 定,通常在5ms内,可在时延补偿设计时直接考虑。

由于 GPS 具有精确授时功能,通过比较当前时标与当前到达数据包的时标可得到该阶段数据包产生的时延。PMU 在上传每个数据包时都打上时标 $t_{\rm m}$,数据包上传至数据控制中心完成时标同步并获得控制器所需的输入信号后可打上时标 $t_{\rm s}$,将 $t_{\rm s}$ 和 $t_{\rm m}$ 进行比较可获得上行通道以及同步时延;控制器完成控制逻辑计算得到控制序列信号,并准备下发时打上时标 $t_{\rm c}$,比较 $t_{\rm c}$ 和 $t_{\rm s}$ 可获得控制逻辑计算和控制信号发送时延;控制中心将控制序列信号下发至执行器时,比较执行器时标 $t_{\rm a}$ 和 $t_{\rm c}$ 可得控制序列信号 在下行通道产生的时延。将各部分时延相加即可得到WPSS闭环反馈回路的完整时延 τ .

$$\tau = (t_{s} - t_{m}) + (t_{c} - t_{s}) + (t_{a} - t_{c}) + \Delta \tau_{m} + \Delta \tau_{a} = t_{a} - t_{m} + \Delta \tau_{m} + \Delta \tau_{a}$$
(2)

根据上文分析, $\Delta \tau_{m}$ 和 $\Delta \tau_{a}$ 比较固定,可在补 偿器设计时直接考虑。若 WPSS 输入为单信号,则 t_{m} 为该单输入信号的时标;若 WPSS 输入为组合信号, 则 t_{m} 通常为组合信号中时延最大的单信号的时标。

1.2 PMU 数据时延的实测

为了深入研究 PMU 数据时延的分布特性,为 WPSS 工程应用提供第一手资料,以贵州电网为例对 时延进行初步实测,受测试条件所限,只针对 PMU 数据包发送抖动时延和上传通道时延进行了测试。

1.2.1 PMU 数据包发送抖动时延测试

WPSS 在线应用时,需尽可能降低 PMU 数据的时延,以抖动时延为例,可选择抖动时延较均匀的 PMU 以减小时延,为此需要对 PMU 抖动时延进行比较^[17]。

实验对象为:北京四方公司生产的 CSS-200、 CSD-361 及中国电科院生产的 PAC-2000 这 3 种型 号 PMU。实验用主机配置为:CPU 为双核 1.86 GHz, 内存 3 G。为提高发送数据的效率,PMU 采用 UDP 协议,数据发送间隔为 10 ms。测试时间长度为 200 s, 即 20 000 个数据包。理想状况下,PMU 发出的任意 2 个相邻的数据包到达主机的时间间隔应该相等, 即为 10 ms。测试结果如图 2 所示。



Fig.2 Test results of time-delay distribution for different PMU types

从图 2 可以看到,CSS-200 型 PMU 的抖动时延 波动较大,最大达到 20 ms,最小小于 1 ms,约 45%~ 50% 的抖动时延位于 9.5~10.5 ms 以内;CSD-361 型 PMU 的抖动时延较稳定,约 97% 的时延位于 9.5~ 10.5 ms 以内;PAC-2000 型 PMU 的抖动时延分布范 围较大,主要位于 7.5~12.5 ms 以内。PMU 发送数据 抖动时延给广域控制输入信号引入了随机性,增加 了时延补偿的难度。因此,从工程应用角度,应选择抖 动时延较小的 PMU,如本测试中的 CSD-361 型 PMU。 1.2.2 PMU 数据包上传通道时延测试

为了测试网络通道的时延,以上传通道网络时延 为例进行实测,测试对象为贵州电网思林电厂 PMU

Ð

至贵阳 PMU 主站。

当采用 2 Mbit/s 专用通道时,传输不同数据包 大小对应的时延如图 3 所示,可以看到,随着上传数 据包大小从 500 字节增加到 1500 字节,各个数据包 产生的时延均值大约从 19 ms 增加到 36 ms,但由于 传输通道为专用通信网络,时延相对比较集中。若 将数据上传通道改为电力调度通信网公用通道,即 PMU 数据包与电网其他数据共享网络通道,传输数 据包为 1500 字节时的时延如图 4 所示,可以看到, 当传输通道为公用网络时,数据包的时延均值变 化不大,但时延的抖动以及随机性大幅增大,会出 现超过 100 ms 以上的时延。



图 3 不同数据包大小在 2 Mbit/s 专用通道传输时的时延 Fig.3 Time-delay of data communication in 2 Mbit/s

private channel for different package sizes





本测试只考虑了上行通道时延 $\Delta \tau_{w}$,若同时考虑下行通道时延和同步时延等,PMU数据时延会更大,随机性会更明显。因此,从长远来看,随着网络通道及 PMU 数据包大小的变化,PMU 数据时延可能出现较显著的变化,这种较大变化的时延会使固定补偿的时延补偿器不能提供最优的补偿,影响控制效果。

2 改进的 WPSS 分段时延补偿方法

在 WPSS 的工程应用研究中,考虑到 WPSS 长 期运行时反馈时延可能出现较大随机分布性的问题,文献[14]提出基于分段的自适应时延补偿方法。

该方法首先对时延进行分段,对于时延 $\tau \epsilon(0, \tau_{\rm M}]$, 可按照分段间隔 $\tau_i = \varphi_0 i / (360 f)$ 将时延分为m个 时延区间,则第m-1个时延区间的上界,即第m个 时延区间的下界 τ_{m-1} 为小于 $\tau_{\rm M}$ 的最大分界值,可表 示为:

$$\tau_{m-1} = \max \{ \tau_i < \tau_M | \tau_i = \varphi_0 i / (360f) \}$$
(3)

得到第 m 个时延区间(τ_{m-1}, τ_{M}]。其中, φ_{0} 为时延分 段的相位偏差标准,文献[14]中选择 10°;i 为时延区 间编号;f 为所研究模式的振荡频率。

然后,以每个时延区间中点的时延按照固定时 延补偿法进行设计,将得到的补偿器作为这一段时 延的补偿器。采用如式(4)所示的经典时延补偿器:

$$H_{\rm c}(s,\tau) = K_{\rm c}(\tau) \frac{1 + sT_{\rm cl}(\tau)}{1 + sT_{\rm c2}(\tau)}$$
(4)

其中,时延补偿器参数表示为时延τ的函数,见表1。

表1 时延区间分段补偿

Table 1 Interval compensation of time-delay

序号	时延区间	补偿时延 τ_{c}	$K_{\rm c}(\tau)$	$T_{\rm cl}(\tau)$	$T_{\rm c2}(\tau)$
i	$(\tau_{i-1}, \tau_i]$	$\frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{2}$	$K_{\rm c}(\tau_{\rm ci})$	$T_{\rm cl}(\tau_{\rm ci})$	$T_{\rm c2}(\tau_{\rm ci})$

完成设计后,基于时延分段的补偿器的结构如 图 5 所示。GPS 同时给 PMU 采样数据包、时延测量 模块以及 WPSS 控制服务器提供精确授时信号。 PMU 实测的带时标同步数据以数据包的形式经由 上行网络通道从反馈信号测量点连续地传输至 WPSS 控制中心,WPSS 完成控制序列计算,同时获得 上传通道和控制规律计算产生的时延,将此时延与 控制规律序列一起打包并重新打上时标,下发至时 延补偿器,时延在线测量模块测得下发通道的时延, 并结合同时下发的上传通道时延、直接考虑的 PMU 发送数据时延和执行器动作时延,可获得总的时延, 该过程即为式(2)的实现。根据实测的时延判断当前 时延位于哪个时延分段区间,进而按照动作规则选择 恰当的时延补偿区间,实现时延的在线自适应补偿。



图 5 基于时延分段的补偿器结构

Fig.5 Architecture of interval time-delay compensator

为了减少时延补偿器测量时延的计算压力,文 献[14]仅在每次控制器动作前测量一次时延,即以 控制器动作前一时刻的时延为选择补偿区间的依 据。然而,根据上文的时延实测结果,在某些情况下 时延会出现很严重的抖动或跳变,若恰好以抖动的 时延选择补偿区间,会得到错误的结果,甚至会恶化 系统阻尼,影响系统稳定。

因此,本文提出以补偿器动作前一段时间 Δt 内 的平均时延 τ_{av} 作为选择下一个控制间隔时延补偿 区间的依据,通常 $\Delta t \leq \Delta T, \Delta T$ 为控制器动作间隔。即: 若补偿器上一个动作时刻为 $t = T_k$,控制器下一动作 时刻 $t = T_k + \Delta T$ 的补偿时延为区间 $[T_k + \Delta T - \Delta t, T_k + \Delta T]$

78

 ΔT]的平均时延 τ_{avo} Δt 和 ΔT 的关系可用图 6 表示。



图 6 Δt 和 ΔT 的关系示意图 Fig.6 Relationship between Δt and ΔT

在网络负荷轻、时延较为平稳时,ΔT可选择较 大值;未来随着网络负荷的增加,时延随机性增大, 可适当减小。通常可取 5~10 s,即区间振荡的几个 周期的时间,保证振荡已经被一定程度地抑制后再 进行下一次动作。

3 算例分析

3.1 两区四机系统仿真

考虑经典两区四机系统^[18],系统参数配置跟文献[14]相同。在 G₁ 配置 WPSS 提高区间模式的阻尼,反馈信号为区间相对角速度 $\Delta \omega_{12}$ 。投入 WPSS 后,区间模式阻尼由 2.18%增大到 13.16%。WPSS 传递函数可表示为:

$$H_{\text{WPSS}}(s) = 20 \times \frac{10s}{1+10s} \times \left(\frac{1+1.1286s}{1+0.7286s}\right)^2 \quad (5)$$

当 WPSS 输入信号有时延时, WPSS 控制效果会 有一定程度的恶化。对于固定时延,可以设计形如式 (4)所示的固定时延补偿环节进行补偿,当时延为 100 ms 时,补偿器参数为:K_e=0.8533、T_{el}=0.1686s、 T_{e2}=0.05 s。由于固定补偿方法对于固定时延补偿的 良好效果,为 WPSS 配置所设计的补偿环节后其控制 效果跟理想无时延 WPSS 几乎完全一致。随着电网 中高级应用功能的增多, 网络通信负担加重, 从长期 来看, 时延可能会增加。考虑补偿 100 ms 的固定补 偿环节,当时延从 100 ms 增加到 300 ms 时系统的动 态响应如图 7 所示。可以看到,随着时延的增大, 固 定 100 ms 的补偿环节已经不能完全实现对变化后 时延的补偿。时延越大,补偿效果越差,当时延达到 300 ms 时, 系统接近失去稳定。因此, 传统的固定补



图 7 补偿固定为 100 ms 时不同时延对应的动态响应 Fig.7 Dynamic response of fixed 100 ms compensation for different time-delays

偿方法并不适合于时延有较大变化的情况。

本算例目标模式振荡频率为 0.615 Hz,设最大 可能时延 *τ*_M 为 250 ms,按照上文描述的时延分段 及时延补偿器设计方法可得时延分段的结果和各区 间对应的补偿器参数如表 2 所示。

表 2 两区四机系统时延分段补偿表

Table 2 Interval time-delay compensation for two-area four-machine power system

相位/(°)	时延分段 区间/ms	补偿 时延/ms	$K_{ m c}$	$T_{\rm cl}/{ m s}$	$T_{\rm c2}/{ m s}$
(0,10]	(0,45]	22.6	0.9793	0.0739	0.05
(10,20]	(45,90]	67.7	0.9159	0.1258	0.05
(20,30]	(90,135]	112.9	0.8245	0.1876	0.05
(30,40]	(135,180]	158.0	0.7083	0.2673	0.05
(40,50]	(180,225]	203.2	0.5703	0.3828	0.05
(50,55.4]	(225,250]	237.9	0.3828	0.5219	0.05

各区间时延补偿器的频率响应如图 8 所示(其 中时延区间 1—6分别对应表 2 中第 2 列各分段区 间)。从幅频响应可以看到,各区间时延补偿器的幅 频响应相交于主导振荡频率 0.615 Hz 附近,对应的幅 频响应大小几乎为 0,表明设计的各时延区间的补偿 器在主导振荡频率处不改变原 WPSS 控制输出的大 小。从相频响应可以看到,各时延补偿器在主导振荡 频率的相位分别为 5°、15°、25°、35°、45°、52.5° 左右, 约等于各区间补偿时延在主导振荡频率产生的滞后 相位。综上可以得到:所设计的各时延补偿器能够补 偿各区间补偿时延在主导振荡频率产生的相位滞 后,并且不改变 WPSS 控制输出的大小,表明所设计 时延补偿器的有效性。

为模拟时延的随机分布特性,在 WPSS 输入引



图 8 合区间时延补法 高的 频 半 响 应 对 C Fig.8 Comparison of frequency response among different interval time-delay compensators

入均值变化的正态分布随机时延,如图 9 中实线所示,时延的均值在图中用虚线表示。



设 $\Delta T = 5$ s,即时延补偿器每隔 5 s 进行一次校 核; $\Delta t = 1$ s,即以每次补偿器动作前 1 s 内的平均时 延作为下一次动作时选择时延补偿区间的依据。按 照时延补偿动作规则,时延补偿器的补偿时延如图 9 中点线所示。

将设计的随机时延引入 WPSS 输入, WPSS 开环 控制时仿真结果如图 10 所示。可以看到, 引入时延 后, WPSS 输出控制信号产生了一定的相位滞后。随 着正态分布时延均值增大, WPSS 输出控制信号滞后 角度也增大, 即时延引起的相位滞后与时延大小成 正比。采用改进时延补偿器进行补偿后, WPSS 输出 控制信号的相位滞后得到了校正。由于补偿器不能 完全跟踪时延的变化, 在 2~5 s 和 7~10 s, 校正后输 出不能完全吻合理想的控制输出。





图 11 给出了 WPSS 闭环控制时,在母线 8 处施 加持续时间为 0.4 s 的三相短路故障的仿真结果。可 以看到,时延的引入使得系统失去稳定;经过补偿 后,系统恢复稳定。并且,补偿后振荡较理想无时延



图 11 闭环仿真时 WPSS 控制效果比较(ΔT=5 s) Fig.11 Comparison of WPSS control effect for close-loop simulation(ΔT=5 s)

WPSS 需要多 2 个周期才得以平息振荡。

根据上文分析,当 $\Delta T = 5 \text{ s}, \Delta t = 1 \text{ s}$ 时,时延补偿 器并不能完全跟踪随机时延的变化,导致控制效果 与理想 WPSS 的控制效果有一定差别。为了进一步 校验控制器的效果,考虑缩小补偿器的动作间隔,设 $\Delta T = 1 \text{ s}, \Delta t = 1 \text{ s}$ 。此时,补偿器对变化时延的跟随能 力变强,见图 12,时延补偿器仅在 2~3 s 和 7~8 s 时 不能跟踪时延的变化。闭环仿真结果如图 13 所示, 可以看到,补偿后的控制效果明显改善,几乎与理想 WPSS 控制效果一致。



图 13 闭环仿真时 WPSS 控制效果比较(ΔT=1s) Fig.13 Comparison of WPSS control effect for close-loop simulation(ΔT=1s)

对比 $\Delta T = 5 \text{ s}$ 和 $\Delta T = 1 \text{ s}$ 的仿真结果,可以看到, 补偿器动作间隔的变化会影响控制效果。理论上而 言,每接收到一个 PMU 数据包,就可获得相应时延 τ ,进而根据该时延选择恰当的时延补偿器区间,此 时,时延补偿器根据 PMU 数据包上传的频率进行自 适应调整。然而,本文选择一个远大于 PMU 数据包 上传间隔的时间 ΔT 为动作间隔进行时延补偿器的 自适应调整,有2点原因:若 ΔT 太小,导致时延补 偿器频繁动作,这种频繁的动作会引起控制器持续 振荡,当遇到网络阻塞、时延抖动频繁时,甚至可能 导致系统失稳:根据时延组成的分析与时延实测结 果可知,虽然 WAMS 时延具有一定的随机分布性,但 由于我国电网目前基于 WAMS 的高级应用较少,电 网通信网络大多处于刚升级改造完成阶段,网络负 荷较轻,时延相对集中,样本方差较小。因此,时延不 会在短时间内发生巨大变化,没有必要过于频繁地调 整控制器的时延补偿。未来随着网络负荷的增加, 时延随机性增大,可适当减小时延补偿器的动作间隔 ΔT 。根据如图 11 所示 ΔT 为 5 s 时的仿真结果,纵 使时延均值发生如图 9 所示的剧烈变化,从工程应用的角度考虑,控制效果依然可以接受。因此,推荐 ΔT 取较大值,如 5~10 s。

由于本文是在文献[14]基础上进行改进,将本 文的补偿方法与文献[14]的方法进行对比,仿真结 果如图 14 和图 15 所示。从图 14 可以看到,由于本 文采用的随机时延抖动较为明显,以补偿器动作时 刻为选择补偿区间的传统分段补偿法明显不能很好 地跟踪时延的变化。图 15 的控制效果进一步表明改 进的分段补偿能够在较短时间平息振荡。



图 14 本文方法与文献[14]方法的补偿时延对比($\Delta T=5$ s)

Fig.14 Comparison of compensated time-delay between proposed method and reference $\lceil 14 \rceil (\Delta T = 5 s)$



图 15 本文方法与传统分段时延补偿法的 控制效果对比(ΔT=5 s)

Fig.15 Comparison of control effect between proposed and traditional interval compensation methods (ΔT =5 s)

3.2 实际电网仿真

为了验证所提方法在实际电网中的应用效果, 在贵州电网 RTDS 等值模型上进行仿真。系统包括 39 台发电机、104 条母线、174 条线路,使用 8 个 Rack 资源。将文献[14]提出的四机系统 RTDS 试验平台 改进为贵州电网 RTDS 试验平台,如图 16 所示。图 中,GTAI 和 GTAO 分别为吉比特模拟输入和输出 卡。为跟现场保持一致,PMU 选择 CSS-200;励磁器 选用擎天 EXC-9000,改进的分段时延补偿单元集成





Fig.16 Hardware system of Guizhou Grid RTDS experiment

在网络控制单元中。

贵州电网内部在黔北和黔东地区之间存在一区间振荡模式,最可控和最可观机组分别为思林电厂和乌江新厂。WPSS 配置在思林电厂,反馈信号为思林电厂与乌江新厂之间的功角差。

采用均值变化的正态分布随机时延对本文所设 计的自适应时延补偿器进行校核。随机时延分为2 段,各持续5s:第1段时延均值为65ms,标准差为 20ms;第2段时延均值为170ms,标准差为30ms。 在鸭溪变施加持续时间为0.1s的三相短路故障校 核控制器的效果,RTDS 仿真结果如图17所示。可 以看到,当采用改进分段时延补偿后,其效果跟无时 延WPSS 控制时基本一致。



Fig.17 Results of RTDS close-loop experiment

4 结论

本文对实际电网中的时延进行了实测,测试结果 表明时延具有一定的随机分布特性,时延大小随传 输数据包大小以及网络通道环境的变化而变化。并 且,时延的抖动性很强,若以控制器动作时刻的时延 选择补偿区间可能会导致错误的结果,影响系统稳 定。为此,提出一种改进的分段时延补偿方法,以补 偿器动作前一段时间的平均时延作为选择时延补偿 区间的依据,以更好地发挥 WPSS 抑制区间功率振 荡的功效。

在两区四机系统上进行的时频域对比仿真结果 验证了所提方法的有效性与可行性。最后,将所提方 法应用于贵州电网 RTDS 闭环试验,仿真结果进一步 验证了所提方法在大系统中应用的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] REE J D L,CENTENO V,THORP J S,et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems [J]. IEEE Tran-

sactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 20-27.

[3] 鞠平,郑世宇,徐群,等. 广域测量系统研究综述[J]. 电力自动化 设备,2004,24(7):37-40,49.

JU Ping,ZHENG Shiyu,XU Qun,et al. Survey of wide area measurement system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7):37-40,49.

- [4] ZHANG Junbo, CHUNG C Y, HAN Yingduo. A novel modal decomposition control and its application to PSS design for damping interarea oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):2015-2025.
- [5] 马静,王玉慧,王增平,等. 基于完全调节法的广域阻尼鲁棒 H₂/H_{*}控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):49-53.
 MA Jing,WANG Yuhui,WANG Zengping, et al. Wide-area damping robust H₂/H_{*} control strategy based on perfect regulation [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):49-53.
- [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. Wide-area

anti-delay coordinated control among FACTS controllers [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):37-42.

[7] 戚军,张有兵. 广域电力系统中时滞控制信号的选择[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):67-71.
 QI Jun,ZHANG Youbing. Selection of time-delay control signal in wide-area power system[J]. Electric Power Automation Equip-

ment,2010,30(6):61-71.
[8] CHAUDHURI B,MAJUMDER R,PAL B C. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal

- ment-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004,19(4):1971-1979.
- [9] SNYDER A F, HADJSAID N, GEORGES D, et al. Interarea oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements[C]//1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, China:[s.n.],1998:790-794.
- [10] PHILIPP L D, MAHMOOD A, PHILIPP B L. An improved refinable rational approximation to the ideal time delay[J]. IEEE Transactions on Circuit System, 1999, 46(5):637-640.
- [11] 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.
- [12] WU H X,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.

- [13] 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.
- [14] 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 interval time delay compensation method for WPSS feedback signal delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (14):25-31.
- [15] NADUVATHUPARAMBI B,VALENTI M C,FELIACHI A. Communication delays in wide area measurement systems[C]//Proceedings of 34th Southeastern Symposium on System Theory. [S.I.]:IEEE,2002:118-122.
- [16] 胡志祥,谢小荣,肖晋宇,等. 广域测量系统的延迟分析及其测试[J]. 电力系统自动化,2004,28(15):39-43.
 HU Zhixiang,XIE Xiaorong,XIAO Jinyu,et al. Analysis and test on delay in the wide-area measuring system[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(15):39-43.
- [17] 刘志雄,黎雄,孙元章,等. 广域 PSS 闭环控制工程中可变时滞及其处理[J]. 电力系统自动化,2013,37(10):54-59.
 LIU Zhixiong,LI Xiong,SUN Yuanzhang,et al. Variable delay and its treatment in wide-area PSS closed-loop control engineering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (10):54-59.
- [18] KUNDER P. Power system stability and control[M]. 北京:中国 电力出版社,2002:813-816.

作者简介:



陈 刚(1985—),男,四川南充人,工程 师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分 析与控制(E-mail:gangchen08@gmail.com); 张 华(1985—),男,四川巴中人,工程 师,硕士,主要研究方向为电力系统暂态分 析与控制;

程 林(1973—),男,湖南湘潭人,副教 陈 刚 授,博士研究生导师,主要研究方向为电力 系统分析与控制和电力系统可靠性。

Improved interval time-delay compensation method for WPSS

CHEN Gang¹, ZHANG Hua¹, CHENG Lin², TENG Yufei¹, DING Lijie¹, ZHANG Fang²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The key of WPSS(Wide-area Power System Stabilizer) engineering application is the proper compensation of time-delay for the feedback input signal. The measured data of PMU(Phasor Measurement Unit) time-delay in real grid present the characteristics of random distribution and strong vibration. An improved method of interval time-delay compensation is presented to deal with the variation of time-delay, which takes the average delay for a certain time before its action as the reference for selecting the interval compensator to avoid the wrong result caused by time-delay chattering. The results of open-loop and closeloop time-domain and frequency-domain simulations for two-area four-machine power system show the improved method adapts to the delay variation better. RTDS simulation of real power grid verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: low-frequency oscillation; wide-area power system stabilizer; time-delay; field test; improved interval compensation; electric power systems

82