

采用广域测量信号的 2 级 PSS 控制策略

袁 野, 程 林, 孙元章

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084)

摘要: 提出电力系统稳定器(PSS)的输入信号由本地测量信号和广域测量信号组成,从而构成 2 级 PSS 控制。本地测量信号采用本地发电机角频率,广域测量信号分别采用联络线功率和区间相对角频率。分析表明广域反馈具有相位稳定的特点,可以根据参与因子和传递函数留数选取广域测量信号,通过模式辨识进行 2 级 PSS 控制,抑制区间低频振荡。2 区域电力系统上的仿真结果表明,2 级 PSS 控制能有效抑制区间低频振荡,提高互联系统的传输容量,适用的频率范围广。

关键词: 广域测量系统; 低频振荡; 电力系统稳定器

中图分类号: TM712; TM761

0 引言

电力系统中发电机经输电线并列运行时,在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆,并在缺乏阻尼时,引起 0.2 Hz~2.5 Hz 的低频振荡。按照振荡参与机组和振荡频率的不同,将其分为本地模式和区间模式。相比而言,区间模式更加复杂,危害性也较大,如控制措施不当将引发严重的电网事故^[1]。

在全国联网的新形势下,互联电网的低频振荡问题更加复杂,往往表现为众多机组共同参与的区域系统间的超低频振荡,频率在 0.1 Hz 左右。根据国家电网公司有关单位的仿真分析,在典型运行方式下,华中—川渝互联系统、东北—华北互联系统的振荡频率,联网前在 0.263 Hz~0.286 Hz,联网后降低到 0.133 Hz~0.137 Hz;在相同运行方式下,即使联络线不承担功率输送任务,也可能产生区域间的弱阻尼振荡,并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进一步恶化。

电力系统稳定器(PSS——power system stabilizer)自 20 世纪 60 年代出现以来,已经成为抑制电力系统低频振荡、提高功率传输容量、改善系统稳定性的重要措施^[2]。多机系统中 PSS 的参数调制和优化设计^[3-9]、PPS 配置点的选择^[10-11]、PSS 与其他控制器的协调控制^[12-13]等已经成为研究的热点问题。然而,传统的以本地状态量进行反馈控制的 PSS 受到本地信息的约束,不能很好地抑制互联电网的区间低频振荡^[14]。

广域测量系统(WAMS)的出现为大型互联电

力系统实现分布式同步测量和广域稳定控制提供了可能。基于相量测量单元(PMU)的远方信号反馈控制^[14]、广域阻尼控制(WADC)和附加区间阻尼控制^[15-17]、广域鲁棒控制^[18]等成为电力系统广域控制研究的热点问题。

本文分析了广域反馈的相位特点,并根据参与因子和传递函数留数选取广域测量信号,通过模式辨识进行 2 级 PSS 控制。在 2 区域 4 机电力系统上进行仿真,验证了采用广域测量信号的 2 级 PSS 控制在抑制系统区间低频振荡、提高互联系统传输容量上的有效性。

1 PSS 配置策略

N 机电力系统可以建模为线性状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \sum_{j=1}^N \mathbf{B}_j u_j \\ \mathbf{y}_j = \mathbf{C}_j \mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

对矩阵 $\mathbf{A}$ 进行特征值分析,可以得到该系统的特征值 λ_i ,对应的右特征向量 ϕ_i 和左特征向量 ψ_i 。为了增强弱阻尼模式的阻尼,给发电机配置 PSS,一般采用参与因子法和传递函数留数法^[19]。

参与因子通常是对应模式的相应状态的相对参与指示度。 $p_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ik}$ 表示第 i 个模式中第 k 个状态变量的相对参与程度。因此,可以选取对研究模式有较高参与因子的发电机进行 PSS 配置。

当指定第 j 台机的输入输出,系统开环传递函数表示为:

$$G_j = \frac{y_j}{u_j} \quad (2)$$

采用模式和留数的形式表示为:

$$G_j = \sum_{i=1}^n \frac{R_{ij}}{s - \lambda_i} \quad (3)$$

式中: R_{ij} 为与第 i 个模式和传递函数 G_j 相关的留数, 可以由下式得到:

$$R_{ij} = \lim_{s \rightarrow \lambda_i} (s - \lambda_i) G_j(s) \quad (4)$$

根据文献[20], 可以通过下式进行留数的计算:

$$R_{ij} = \mathbf{C}_j \boldsymbol{\phi}_i \boldsymbol{\psi}_i \mathbf{B}_j \quad (5)$$

留数可以用模式可控性和可观性来表示。

发电机 j 对模式 i 的可控性由下式表示:

$$\mu_{ij} = |\boldsymbol{\psi}_i \mathbf{B}_j| \quad (6)$$

发电机 j 对模式 i 的可观性由下式表示:

$$\eta_{ij} = |\mathbf{C}_j \boldsymbol{\phi}_i| \quad (7)$$

从式(5)~式(7), 可以看出:

$$|R_{ij}| = |\mathbf{C}_j \boldsymbol{\phi}_i \boldsymbol{\psi}_i \mathbf{B}_j| = \mu_{ij} \eta_{ij} \quad (8)$$

稳定控制要求特征值改变方向为趋于左半平面, 这可以通过 PSS 的相位补偿环节进行调节。需要补偿的相位下式得到^[21]:

$$\varphi_{ij} = 180^\circ - \arg(R_{ij}) \quad (9)$$

发电机 j 对模式 i 进行补偿的 PSS 传递函数为:

$$H_{\text{PSS}_j}(s) = K \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left(\frac{1 + T_{1j} s}{1 + T_{2j} s} \right)^2 \quad (10)$$

式中:

$$T_{1j} = \frac{1}{2\pi f_i \sqrt{\alpha_j}}, T_{2j} = \alpha_j T_{1j}, \alpha_j = \frac{1 - \sin(\varphi_{ij}/2)}{1 + \sin(\varphi_{ij}/2)}$$

φ_{ij} 为式(9)得到的补偿相位; T_w 为隔直时间常数, 一般取 10 s; f_i 为模式 i 的振荡频率; K 值确定了 PSS 产生的阻尼大小, 理想情况下这个增益设定在对应最大阻尼下的值^[22]。

2 广域反馈信号的相位特点

互联电网发生低频振荡时, 发电机功角变化的影响要远大于电压变化的影响^[23]。相对全系统统一惯性中心而言, 总是同时存在加速机群和减速机群, 而加速、减速的关系会随时间按振荡频率规则变化。若互联的 2 区域系统按各自的“部分惯性中心”进行等值, 可以简化为如图 1 所示的 2 机系统。

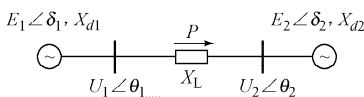


图 1 等值 2 机系统

Fig. 1 Equivalent two-machine system

互联系统发生低频振荡时, 其联络线的有功输送将出现周期性振荡, 在图 1 的简单模型下, 联络线的功率可表示为:

$$P_{\text{tie}} = \frac{E_1 E_2}{X_\Sigma} \sin \delta_{12} \quad (11)$$

式中: $X_\Sigma = X_L + X_{d1} + X_{d2}$; $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$; X_{d1}, X_{d2} 分别为等值机的内电抗; X_L 为线路电抗; E_1, E_2 为等值机的内电势幅值; δ_1, δ_2 为内电势角度。

对式(11)在其运行点处线性化得:

$$\Delta P_{\text{tie}} = \frac{E_{1,0} E_{2,0}}{X_\Sigma} \cos \delta_{12,0} \Delta \delta_{12} + \frac{\sin \delta_{12,0}}{X_\Sigma} (E_{2,0} \Delta E_1 + E_{1,0} \Delta E_2) \quad (12)$$

忽略动态过程中等值机内电势变化的影响, 联络线功率的变化量就只与区间相对转子角的变化量相关, 即

$$\Delta P_{\text{tie}} = \frac{E_{1,0} E_{2,0}}{X_\Sigma} \cos \delta_{12,0} \Delta \delta_{12} \quad (13)$$

因此, 联络线有功功率变化与区间相对转子角变化大致同相, 滞后区间转速差变化 90° 。选用相位关系不受运行点影响且相对稳定的反馈信号可以提高阻尼控制器的鲁棒性^[24]。而本地测量的变化量 $\Delta \delta_1, \Delta \delta_2$ 的相位与联络线有功功率变化量之间并无固定的相位关系, 因此从反馈信号对区间低频模式相位的反映上讲, 广域反馈具有相位关系稳定的特点^[25]。

互联的 2 区域分别含有 p, q 台机组时, 分别进行区域惯性中心等值, 得到区间相对功角和区间相对角频率, 可以表示为:

$$\Delta \delta_{12} = \frac{\sum_{i=1}^p H_i \Delta \delta_i}{\sum_{i=1}^p H_i} - \frac{\sum_{j=1}^q H_j \Delta \delta_j}{\sum_{j=1}^q H_j} \quad (14)$$

$$\Delta \omega_{12} = \frac{\sum_{i=1}^p H_i \Delta \omega_i}{\sum_{i=1}^p H_i} - \frac{\sum_{j=1}^q H_j \Delta \omega_j}{\sum_{j=1}^q H_j} \quad (15)$$

式中: H 为机组的惯性常数。

对于大型互联系统, 如果引入所有机组的状态量, 过程比较复杂, 也没有必要。需要引入的是对于区间振荡模式具有较大参与因子的机组状态量。

3 考虑广域反馈信号的 2 级 PSS 控制

在保证本地振荡模式阻尼的情况下, 为区域振荡模式提供足够的阻尼, 是引入广域反馈信号进行 PSS 设计的目标。为此, 可以采用图 2 所示的 2 级 PSS 控制方案^[26]。控制信号 u^1 采用本地发电机角频率信号作为 PSS 输入, 主要用于提供本地振荡模式的阻尼。这一部分的控制看做 2 级控制方案的第 1 级, 定义为 PSS1。

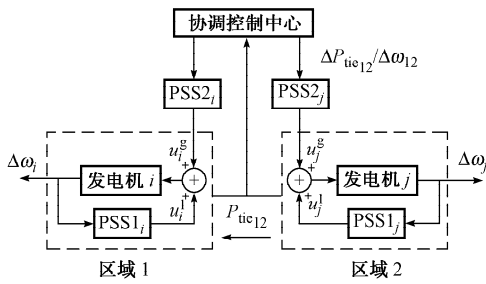


图 2 2 级 PSS 控制方案
Fig. 2 Two-level PSS control scheme

控制信号 u^g 采用广域反馈信号作为 PSS 输入,主要用于提供区间振荡模式的阻尼。这一部分的控制看做 2 级控制方案的第 2 级,定义为 PSS2。

当选取联络线功率或区域间相对角频率作为广域反馈信号时,发电机 i 的 2 级 PSS 控制设计如图 3 所示。

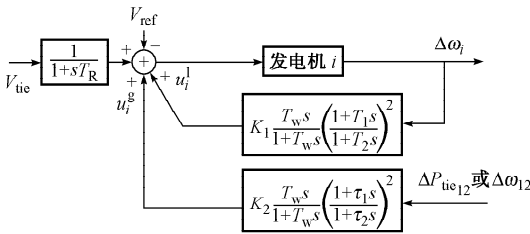


图 3 发电机 2 级 PSS 控制设计
Fig. 3 Generator 2-level PSS control design

PSS1_i 和 PSS2_i 的传递函数分别为:

$$H_{PSS1_i}(s) = K_1 \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left(\frac{1 + T_{1i} s}{1 + T_{2i} s} \right)^2 \quad (16)$$

$$H_{PSS2_i}(s) = K_2 \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left(\frac{1 + \tau_{1i} s}{1 + \tau_{2i} s} \right)^2 \quad (17)$$

对系统进行特征值分析,辨识出本地模式和区间模式,然后进行留数计算,按第 1 节所述方法可以

得到 PSS1_i 和 PSS2_i 的具体参数选取。

实际系统中,广域测量信号的传输和处理会产生一定的延时。本文假设这个过程是瞬时完成的,不考虑延时的影响。

4 仿真示例及结果分析

4.1 仿真示例 1

考虑图 4 所示的 2 区域 4 机电力系统,参数见文献[22]。本文的仿真中,在负荷节点 7 和 9 安装了 187 Mvar 的并联电容,以补偿节点电压。

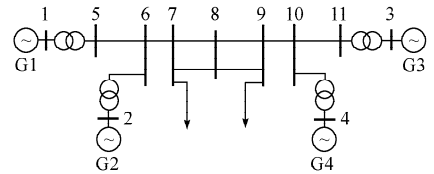


图 4 2 区域系统
Fig. 4 Two-area system

该 2 区域系统在没有 PSS 控制情况下,区域 1 本地振荡模式频率为 1.145 8 Hz,区域 2 本地振荡模式频率为 1.169 2 Hz,区间振荡模式频率为 0.608 1 Hz。机组角频率对 3 种振荡模式参与因子的幅值相对值如表 1 所示。

表 1 机组角频率对振荡模式的参与因子
Table 1 Participation factors of generator palstance

振荡模式	G1	G2	G3	G4
区域 1 本地模式	1.000 0	0.953 1	0.009 8	0.007 0
区域 2 本地模式	0.010 6	0.008 7	1.000 0	0.930 4
区间振荡模式	1.000 0	0.914 1	0.422 9	0.314 4

根据得到的参与因子矩阵,在 G1,G3 上安装 PSS1 抑制本地振荡模式;在 G1 上安装 PSS2 抑制区间振荡模式。机组对 3 种振荡模式的留数计算结果如表 2 所示。

表 2 发电机对于振荡模式的留数
Table 2 Residues on the three modes

振荡模式	G1	G2	G3	G4
区域 1 本地模式	35.208 2+j16.507 8	30.593 7+j16.306 3	0.342 5+j0.171 5	0.248 5+j0.113 0
区域 2 本地模式	0.285 8+j0.138 5	0.256 3+j0.116 5	29.330 2+j13.329 5	26.841 8+j13.312 7
区间振荡模式	18.567 5+j8.329 0	16.944 3+j7.962 6	7.653 7+j3.804 3	5.601 8+j1.334 2

按第 1 节所述方法,得到 G1 的 PSS1 传递函数为 $H_{PSS1_{G1}}(s) = 30 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.173s}{1+0.111s} \right)^2$, 限幅范围为 $-0.15 \sim 0.15$ 。G3 的 PSS1 传递函数为 $H_{PSS1_{G3}}(s) = 30 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.174s}{1+0.106s} \right)^2$, 限幅范围为 $-0.15 \sim 0.15$ 。当选取节点 7 和节点 9 之间的联络

线功率作为广域反馈信号时,G1 的 PSS2 传递函数为 $H_{PSS2_{G1}}(s) = 0.03 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.324s}{1+0.212s} \right)^2$, 限幅范围为 $-0.05 \sim 0.1$ 。选取区间相对角频率作为广域反馈信号时,由参与因子矩阵可知,对于区间振荡模式,2 区域中 G1,G3 参与因子较大,选取 G1,G3 的

相对角频率 $\Delta\omega_{13}$ 作为 G1 的广域反馈信号。此时, G1 的 PSS2 传递函数为 $H_{PSS2_{G1}}(s) = 30 \frac{10s}{1+10s} \cdot \left(\frac{1+0.324s}{1+0.212s}\right)^2$, 限幅范围为 $-0.05 \sim 0.1$ 。并选取 G2, G4 的相对角频率 $\Delta\omega_{24}$ 作为 G2 的广域反馈信号, 以比较信号选取的控制效果。此时, G2 的 PSS2 传递函数为 $H_{PSS2_{G2}}(s) = 30 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.323s}{1+0.210s}\right)^2$, 限幅范围为 $-0.05 \sim 0.1$ 。

不同 PSS 配置下的系统振荡模式如表 3 所示。可以看出, 不加 PSS 控制时, 区间振荡模式为负阻

尼, 系统不稳定; 安装 PSS1 后, 对 2 个区域的本地振荡模式有很好的阻尼作用, 却不能很好地抑制 0.6 Hz 的区间低频振荡; 而采用广域测量信号反馈的 PSS2 能很好地改善区间低频振荡的阻尼特性。对于区间振荡模式, 选取区间相对角频率作为广域反馈信号的阻尼抑制效果优于选取联络线功率作为广域反馈信号的效果。选取参与因子较大的 G1, G3 的相对角频率 $\Delta\omega_{13}$ 作为 G1 的广域反馈信号时, 其控制效果优于选取 G2, G4 的相对角频率 $\Delta\omega_{24}$ 作为 G2 的广域反馈信号时的效果。

表 3 不同 PSS 配置下的振荡模式
Table 3 Oscillation modes with and without PSS

振荡模式	无 PSS		PSS1		PSS1+PSS2					
					ΔP_{tie}		$\Delta\omega_{13}$		$\Delta\omega_{24}$	
	频率/Hz	阻尼/(%)	频率/Hz	阻尼/(%)	频率/Hz	阻尼/(%)	频率/Hz	阻尼/(%)	频率/Hz	阻尼/(%)
区域 1 本地模式	1.145 8	5.440 7	1.309 1	58.735 4	1.334 4	61.914 5	1.334 4	60.488 4	1.316 8	57.429 3
区域 2 本地模式	1.169 2	6.638 0	1.311 5	56.747 2	1.360 1	57.900 1	1.360 1	58.794 8	1.316 2	55.071 9
区间振荡模式	0.608 1	-4.156 1	0.674 7	17.118 4	0.573 2	39.516 7	0.573 2	60.729 9	0.425 1	54.975 5

0.1 s 时在联络线中间发生三相短路故障, 在 0.2 s 排除故障, 得到不同 PSS 配置下的区间相对功角和相对角频率的动态特性, 如图 5、图 6 所示。

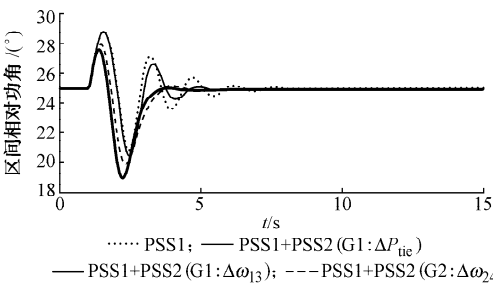


图 5 短路故障后的区间相对功角振荡曲线(算例 1)
Fig. 5 Inter-area relative power angle oscillation following short circuit fault (case 1)

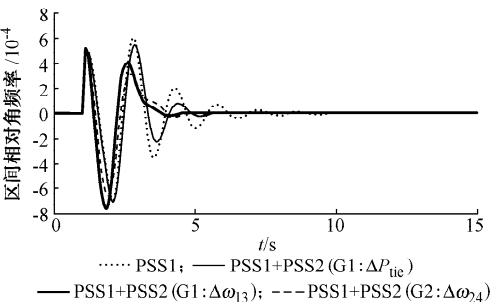


图 6 短路故障后的区间相对角频率振荡曲线(算例 1)
Fig. 6 Inter-area relative angular frequency oscillation following short circuit fault (case 1)

PSS2 后, 区域间振荡模式的阻尼得到了提高, 在较短的时间内有效抑制了低频振荡。

在有功负荷总量、负荷功率因数、机组间功率分配比例及节点 7 和 9 电压幅值保持不变时, 将节点 7 上的负荷逐步转移到节点 8 上, 从而增加联络线传输功率。遭受 0.1 s 的短路故障时, 结果为: 无 PSS2 控制时, 联络线最大传输功率为 705.1 MW; 当选取联络线功率作为 PSS2 广域反馈信号时, 联络线最大传输功率为 739.4 MW; 当选取区间相对角频率作为广域反馈信号时, 联络线最大传输功率为 751.7 MW。

图 7 所示为联络线功率达到 710 MW, 发生 0.1 s 三相短路故障时区间相对功角振荡过程。

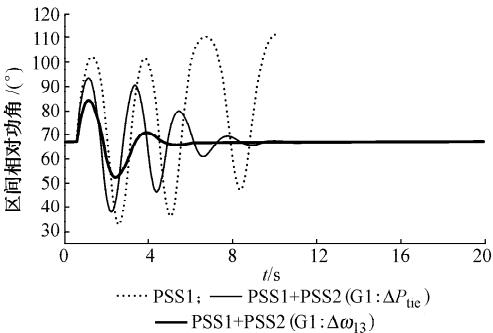


图 7 联络线重载时短路故障后区间相对功角振荡曲线(算例 1)
Fig. 7 Inter-area relative power angle oscillation following short circuit fault when large inter-area power transfer (case 1)

图 5 和图 6 显示, 采用广域测量信号反馈的

图 7 表明,当联络线重负荷状态下,发生严重的短路故障时,采用 PSS2 能够确保系统稳定,否则系统将由于欠阻尼而发生多摆失稳。

4.2 仿真示例 2

为了考察系统发生超低频振荡时 2 级 PSS 控制的性能,对图 4 所示电力系统的参数进行如下调

表 4 不同 PSS 配置下的振荡模式
Table 4 Oscillation modes with and without PSSs

振荡模式	无 PSS		PSS1		PSS1+PSS2			
	频率/Hz	阻尼/(%)	频率/Hz	阻尼/(%)	ΔP_{tie}		$\Delta\omega_{13}$	
区域 1 本地模式	0.661 7	12.662 0	0.616 5	57.339 8	0.639 9	50.235 9	0.630 7	54.200 6
区域 2 本地模式	0.680 5	13.542 5	0.628 2	59.450 0	0.663 7	61.406 5	0.631 8	59.605 1
区间振荡模式	0.141 3	1.519 7	0.125 9	26.290 3	0.158 3	39.551 3	0.080 8	59.548 5

可以看出,安装 PSS1 后,对 2 个区域的本地振荡模式有很好的阻尼作用,但不能很好地抑制 0.1 Hz 附近的区间超低频振荡;而采用广域测量信号反馈的 PSS2 后,很好地改善了区间超低频振荡的阻尼特性。

遭受 0.1 s 的短路故障时,得到不同 PSS 配置下的区间相对功角和相对角频率的动态特性,分别如图 8、图 9 所示。

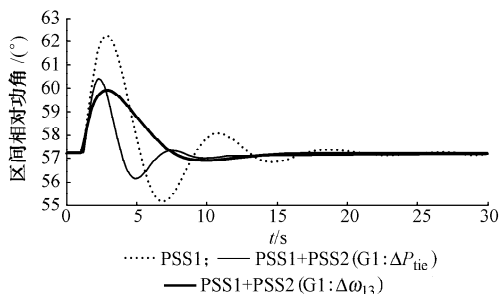


图 8 短路故障后的区间相对功角振荡曲线(算例 2)

Fig. 8 Inter-area relative power angle oscillation following short circuit fault (case 2)

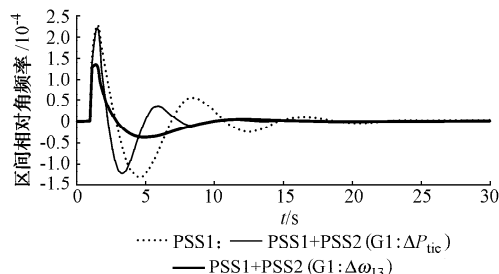


图 9 短路故障后的区间相对角频率振荡曲线(算例 2)

Fig. 9 Inter-area relative angular frequency oscillation following short circuit fault (case 2)

仍然设置 0.1 s 的短路故障,考察联络线传输功率。结果为:无 PSS2 控制时,联络线最大传输功

整;转动惯量 $H_1 = H_2 = 26.5$, $H_3 = H_4 = 26$;节点 7 和节点 9 之间线路长度为 450 km,节点 5 和节点 6、节点 10 和节点 11 之间的线路长度为 1 km。

对新系统进行 PSS 配置和特征值分析,得到在不同反馈信号控制下的系统振荡模式见表 4。

率为 455.1 MW;当选取联络线功率作为 PSS2 广域反馈信号时,联络线最大传输功率为 469.4 MW;当选取区间相对角频率作为广域反馈信号时,联络线最大传输功率为 462.2 MW。

上述仿真结果表明,采用广域测量信号反馈的 2 级 PSS 控制能更好地抑制频率为 0.1 Hz ~ 0.7 Hz 的区间低频振荡,提高功率传输容量,从而证明了基于 WAMS 构建区间阻尼控制系统的可行性,而且该方法可以工程实现。

5 结语

新兴的 WAMS 技术能全局测量和快速传输表征电网运行状态的几乎所有变量,包括发电机内电势、转子角、角频率、母线电压相位、线路功率等与低频振荡密切相关的量,从而为互联电网的阻尼控制、特别是抑制区间低频振荡带来了新的契机。

从反馈信号对区间低频模式相位的反映上讲,广域反馈具有相位关系稳定的特点。因此,可以根据参与因子和传递函数留数选取广域测量信号,通过模式辨识进行 2 级 PSS 控制,抑制区间低频振荡。仿真结果表明,采用广域测量信号的 2 级 PSS 控制,能有效抑制区间低频振荡,提高互联系统传输容量;适用频率范围广,可以工程实现。

参考文献

- [1] MORISON K, YIRGA S. System disturbance stability studies for Western System Coordinating Council (WSCC). EPRI TR-108256, Final Report, 1997.
- [2] OLWEGARD A, WALVE K, WAGLUND G, et al. Improvement of transmission capacity by thyristor controlled reactive power. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(8): 3930-3939.
- [3] 周保荣,房大中,孙景强. 基于轨迹灵敏度分析的电力系统稳定器参数优化设计. 电网技术, 2004, 28(19): 20-23.

ZHOU Baorong, FANG Dazhong, SUN Jingqiang. Tuning of

- PSS parameters using optimization approach based on trajectory sensitivity analysis. *Power System Technology*, 2004, 28(19): 20-23.
- [4] 卢强, 桂小阳, 梅生伟, 等. 大型发电机组调速器的非线性最优 PSS. *电力系统自动化*, 2005, 29(9): 15-19.
LU Qiang, GUI Xiaoyang, MEI Shengwei, et al. A novel nonlinear optimal power system stabilizer for the governor of large-scaled generators. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(9): 15-19.
- [5] 唐巍, 李殿璞, 陈学允. 模糊电力系统稳定器的混沌优化方法. *电力系统自动化*, 2000, 24(9): 28-31.
TANG Wei, LI Dianpu, CHEN Xueyun. The chaos optimization method for fuzzy power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(9): 28-31.
- [6] 谭振宇, 程时杰, 巍璇, 等. 基于神经网络的自适应电力系统稳定器. *电力系统自动化*, 2000, 24(15): 1-5.
TAN Zhenyu, CHENG Shijie, WEI Xuan, et al. A neural network based adaptive power system stabilizer. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(15): 1-5.
- [7] 王克文, 谢志棠, 史述红, 等. 基于概率特征根分析的电力系统稳定器参数设计. *电力系统自动化*, 2001, 25(11): 20-23.
WANG Kewen, XIE Zhitang, SHI Shuhong, et al. Power system stabilizer parameter design based on probabilistic eigenvalue analysis. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(11): 20-23.
- [8] 刘大鹏, 雷宪章, 陈珩. 利用白噪声激励实现多机系统电力系统稳定器的优化与协调. *电力系统自动化*, 2001, 25(19): 15-44.
LIU Dapeng, LEI Xianzhang, CHEN Heng. Coordination and optimization of power system stabilizers in multimachine power systems in terms of white noises. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(19): 15-44.
- [9] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化. *中国电机工程学报*, 2004, 24(2): 22-27.
NIU Zhenyong, DU Zhengchun, FANG Wanliang, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers using evolutionary strategy. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(2): 22-27.
- [10] 李虹, 刘启胜. 多机电力系统中 PSS 配置点的合理选择. *电网技术*, 2004, 28(24): 25-28.
LI Hong, LIU Qisheng. Rational selection of positions to configuration power system stabilizers in multi-machine system. *Power System Technology*, 2004, 28(24): 25-28.
- [11] 徐光虎, 苏寅生, 孙衢, 等. 基于特征值分析法的 PSS 最佳安装地点的确定. *继电器*, 2004, 32(8): 1-4.
XU Guanghu, SU Yinsheng, SUN Qu, et al. Identification of PSS optimum location based on eigenvalue analysis method. *Relay*, 2004, 32(8): 1-4.
- [12] 谢小荣, 崔文进, 唐义良, 等. STATCOM 与发电机励磁的协调控制. *电力系统自动化*, 2001, 25(5): 19-22.
XIE Xiaorong, CUI Wenjin, TANG Yiliang, et al. Coordinated control of STATCOM and generator excitation. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(5): 19-22.
- [13] 邹振宇, 江全元, 张鹏翔, 等. PSS 与 SVC 多目标协调设计. *电力系统及其自动化学报*, 2005, 17(4): 66-70.
ZOU Zhenyu, JIANG Quanyuan, ZHANG Pengxiang, et al. Multi-objective coordinated design of PSS and SVC. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2005, 17(4): 66-70.
- [14] SNYDER A F, ALALI MOHAMMED A E, HADJSAID N, et al. A robust damping controller for power system using linear matrix inequalities//*Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*: Vol 1, Jan 31-Feb 4, 1999, New York, NY, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 519-524.
- [15] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆圆, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制. *电力系统自动化*, 2004, 28(2): 37-40.
XIE Xiaorong, XIAO Jinyu, TONG Luyuan, et al. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurements. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(2): 37-40.
- [16] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究. *中国电机工程学报*, 2004, 24(9): 7-12.
HUANG Ying, XU Zheng. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 7-12.
- [17] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制. *电力系统自动化*, 2004, 28(23): 22-27.
XIAO Jinyu, XIE Xiaorong, HU Zhixiang, et al. Power systems wide-area damping control based on online system identification. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(23): 22-27.
- [18] WU H X, THOMAS K S, HEYDT G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design. *IEEE Trans on Power Systems*, 2004, 19(4): 1935-1941.
- [19] PAGOLA F L, PEREZ-ARRIAGA I J, VERGHESE G C. On sensitivities, residues and participation application to oscillation stability analysis and control. *IEEE Trans on Power Systems*, 1989, 4(1): 278-285.
- [20] YANG X, FELIACHI A, ADAPA R. Damping enhancement in the Western US power system: a case study. *IEEE Trans on Power Systems*, 1995, 10(3): 1271-1278.
- [21] OSTOJIC D R. Stabilization of multi-modal electro-mechanical oscillation by coordinated application of power system stabilizers. *IEEE Trans on Power Systems*, 1991, 6(4): 1439-1445.
- [22] KUNDER P. 电力系统稳定与控制. 北京: 中国电力出版社, 2002.
KUNDER P. *Power system stability and control*. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [23] 余耀南. 动态电力系统. 北京: 水利电力出版社, 1985.
YU Yaonan. *Dynamic power systems*. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [24] 王海风, 李乃湖, 陈珩. 灵活交流输电稳定器安装地点和反馈信号的鲁棒性及正互影响. *中国电机工程学报*, 1999, 19(10): 37-41.
WANG Haifeng, LI Naihu, CHEN Heng. Study on the robustness and positive interactions in selecting the installing locations and feedback signals of FACTS based stabilizers. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19(10): 37-41.
- [25] 肖晋宇. 基于 PMU/WAMS 的互联电网广域阻尼控制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
XIAO Jinyu. *Studies on wide-area damping control for interconnected power systems based on PMU/WAMS [D]*. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [26] MAGDY A, SALLAM A, MCCALLEY J, et al. Damping controller design for power system oscillations using global signals. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(2): 767-773.

袁 野(1981—),男,博士研究生,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究工作。E-mail: yuanye @ mails.tsinghua.edu.cn

程 林(1973—),男,博士,助理研究员,主要从事电力

系统可靠性、电力系统分析与控制等方面的教学和研究。

孙元章(1954—),男,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,主要从事电力系统安全稳定分析、电力系统电压稳定性分析与电能质量、电力系统运行可靠性和风险评估等方面的教学和研究。

Two-level PSS Control Approach Using Global Signals

YUAN Ye, CHENG Lin, SUN Yuanzhang

(State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The input to the power system stabilizer (PSS) consists of two signals, local signal and global signal respectively, which forms two-level PSS control. Local signal is local generator rotor speed while two global signals are suggested as the tie-line active power and inter-area speed difference signals. The phasor of global feedback is stable. Global measurement signal is selected according to participation factor and residue of transfer function and PSS is configured by mode analysis. Simulations on two-area four-machine power system demonstrate the advantage of two-level PSS control in enhancing power angle stability and transfer capability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50595413).

Key words: wide area measurement system (WAMS); low frequency oscillation; power system stabilizer (PSS)