

基于功率偏差估计主导区间模式下的 参与因子与参与方向

韩松, 徐政

(浙江大学 电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Estimation of Participation Factors and Participation Orientations for Dominant Inter-Area Mode by Power Deviations

HAN Song, XU Zheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: This paper presents a novel approach to estimate participation factors and participation orientations (called mode shape for participation, MSFP) in the dominant inter-area mode through analyzing power deviation (ΔP) signals. In the context of WAMS (wide area measurement system), it firstly extracts each mode component from the measured ΔP signals in the critical sections using the commonly used parametric methods such as Prony or ESPRIT, and consequently determines the dominant inter-area mode by a new index (i.e. modal energy-level, MEL), which would be also checked and confirmed by the corresponding relative phases of ΔP mode shape in the modal form. Then the amplitudes and phases of right eigen-vectors for the objective mode are estimated so that the participation factors of areas or power plants could be calculated. Finally, the new concept named by mode shapes for participation (MSFP) can be established through combining the relative phases among areas or power plants from $\Delta\omega$ mode shape and their corresponding participation factors. It is enabled to provide more visual information about the extents and directions of participation for targets, and also may offer a reference to on-line and quasi real-time recognition or classification of strongly correlated areas or groups, power plants and even units. The case study has been carried out on a planning case in East China Power Grid (ECPG), and the numerical simulation results indicate that the algorithm is effective.

KEY WORDS: inter-area oscillation; participation factor; modal energy-level; mode shapes for participation(MSFP); power deviation

摘要: 提出一种基于功率偏差估计主导区间模式下参与因子

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目资助(2006BA02A17)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006BA02A17).

与参与方向的方法。该方法首先利用参数化时域辨识方法提取受测振荡功率信号中的各模式分量, 并由一个新的指标(模式能量级 E)确定主导区间模式。然后, 计算该模式对应的右特征向量的归一化幅值和相对相位, 继而估算各大区机群和主力电厂的参与因子。最后, 借助 $\Delta\omega$ 振型相位引入参与方向信息, 形成新的概念——参与度振型。它可以为运行人员提供主导区间模式下区域同调机群和主力电厂的参与程度和参与方向的合成信息, 亦可为在线准实时识别或分类强相关区域、电厂甚至机组提供参考。利用一个扩展的 IEEE 3 机 9 节点算例对文中方法的适用性进行了验证, 并讨论了工况与模型详细程度对结果的影响。案例分析在一个华东电网规划系统中展开, 结果表明了该方法的有效性。

关键词: 区间模式; 参与因子; 模式能量级; 参与度振型; 功率偏差

0 引言

主导模式的频率^[1]、阻尼^[2]以及振型^[3]可以为在线分析电力系统振荡行为提供非常重要的信息^[4], 而目标模式下区域、机群和机组甚至负荷的参与因子则能够为系统广域控制决策提供关键信息。所以参与方向(即振型的相对角度)与参与程度(即参与因子)的合成信息(以下简称参与度振型)应可用于优化发电计划和负荷消减措施, 从而提高某个危险模式的阻尼, 如根据参与度振型仅消减那些强参与该模式的发电机和负荷。

传统上, 获取参与因子和振型的方法主要是基于小信号模型离线计算特征值的复频域分析法^[5]。而通过同步相量测量装置(phase measurement unit, PMU)在线获取振型, 尤其是参与因子的时域分析方法还鲜有报道。支路功率振荡潮流方法是一种分析区间振荡的方法, 最早由文献[6]提出, 文中所提

模式功率偏差(即功率振荡增量)是其核心贡献之一。文献[7]扩展了上述思想,利用广义相量的概念指出了发电机功率振荡增量与机组惯量、右特征向量元素之间的简化关系。受到它们的启发,文献[8]提出了一种借助 Prony 或 ESPRIT(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques)算法,利用联络线功率相对相位判定低频振荡模式的方法,表明了功率偏差及其相位关系与低频振荡模式间的对应关系,为本文功率偏差振型的提出奠定了基础。最近,文献[9-11]陆续报道了借助通信法(communication method, CM)和通道匹配法(channel matching method, CMM)从 PMU 采集的母线频差信号中获取右特征向量比和振型的方法。虽然它们强调了在线估计振型的重要性,但并未给出参与因子的在线估计方法。此外,文献[12]借助解耦控制和多模选择法,提出一种利用目标模式特征向量信息来阻尼区间振荡的广域控制器设计方法。它给出了简化条件下模式中左、右特征向量关系的解析表达式,并认为在详细模型情况下仍然在一定范围内有效,为本文由右特征向量估算参与因子奠定了基础。

针对在线辨识中“参与程度与参与方向”估计方法欠缺的问题,本文结合左、右特征向量的量测估计方法^[3,9-12],提出一种基于功率偏差近似计算主导区间模式下参与度振型的方法。

1 方法的核心思想和主要理论

1.1 由 ΔP 模式能量级确定主导区间模式

传统上,使用振幅、能量谱等指标的时域辨识方法可以鉴别主导区间模式^[13-14],但是它们的物理意义有时并不明显。为此,本文在信号能量谱定义的基础上,提出一个基于功率偏差 ΔP 的模式能量级指标 E ,它具有清晰的物理意义。

对于如下信号数学模型

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^m x_i^n = \sum_{i=1}^m A_i e^{j\varphi_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)n\Delta t} \quad (1)$$

式中: $n=0,1,\dots,N-1$, N 为数据窗采样点数; m 为模式个数; x_i^n 为第 i 个模式中该窗下第 n 个点的的数据; A_i 为幅值; φ_i 为相位; α_i 为衰减因子; f_i 为振荡频率; Δt 为采样间隔时间。

指标 E 的定义为

$$E_i = \sum_{n=0}^{N-1} |x_i^n| \Delta t, \quad i=1,2,\dots,m \quad (2)$$

由式(2)可知,该指标不但考虑了各低频振荡模式振幅初值大小对系统动态特性和稳定性的影响,还考虑了各模式振荡频率和衰减系数大小所起的作用。更为重要的是,当待分析信号为功率偏差时,它实质上表示了各模式振荡功率偏差与采样间隔时间的乘积,反映了观察窗口时间内各模式产生的振荡能量。显然,在多个功率偏差信号中同时存在数值最大的 E_i ,则表明第 i 个模式在这些振荡曲线中占主要成分,主导着它们呈现的动态特性,为系统当前状态下的主导低频振荡模式。

此外,对于实际的大电网来说,往往存在多条联络线或多个关键断面。为评估全网的振荡程度,量化模式差异,还可对式(2)的计算结果做统计分析,得到最大、最小和平均值等统计指标。

1.2 模式与 $\Delta\omega$ 振型、 ΔP 振型的对应关系

在电力系统动态特性分析中,有小的或相对小的扰动后,在很短的时间内是可以忽略调速器影响的,即机械功率 $\Delta P_m = 0$;若发电机考虑详细模型时,可计阻尼系数 $D=0$ 。此时,发电机转子运动方程组中的转速微分方程在当前运行点附近线性化的结果可简化为

$$T_J \Delta \dot{\omega} = -\Delta P_e \quad (3)$$

式中: $T_J=2H$ 为惯性时间常数, H 为转子的机械惯性; $\Delta \dot{\omega}$ 为转速偏差; ΔP_e 为电磁功率偏差。由文献[15]可知,在第 k 个机电振荡模式($\lambda_k = \sigma_k + j\omega_k$)下,任意发电机输出的电磁功率偏差(或称功率振荡增量^[15-16])可以表述为一个广义相量形式,即

$$\Delta \tilde{P}_{e,\lambda_k} = -T_J(\sigma_k + j\omega_k)\Delta \tilde{\omega}_{\lambda_k} \quad (4)$$

式中: $\Delta \tilde{P}_{e,\lambda_k}$ 为第 k 个模式的电磁功率偏差; $\Delta \tilde{\omega}_{\lambda_k}$ 为第 k 个模式的转速偏差。

该模式下,任意 2 台不同发电机 m 和 n 的电磁功率偏差相除有

$$\frac{\Delta \tilde{P}_{em,\lambda_k}}{\Delta \tilde{P}_{en,\lambda_k}} = \frac{T_{J,m}\Delta \tilde{\omega}_{m,\lambda_k}}{T_{J,n}\Delta \tilde{\omega}_{n,\lambda_k}} \quad (5)$$

式中: $\Delta \tilde{P}_{em,\lambda_k}$ 、 $\Delta \tilde{P}_{en,\lambda_k}$ 分别为发电机 m 和 n 第 k 个模式的电磁功率偏差; $T_{J,m}$ 、 $T_{J,n}$ 分别为发电机 m 和 n 的惯性时间常数; $\Delta \tilde{\omega}_{m,\lambda_k}$ 、 $\Delta \tilde{\omega}_{n,\lambda_k}$ 分别为发电机 m 和 n 第 k 个模式的转速偏差。式(5)表明,任意机电模式下 2 台发电机功率偏差(变量)之间的相位关系取决于它们各自转速偏差项(状态量)的相位关系(如正、反相相对振荡)。反过来说,后者间的相对相位也可由前者反映^[3]。

再由零输入下动态系统的自由运动分析理论可知,一个模式下任意状态变量分量之比等于右特征向量中对应项之比。因此,由式(5)和上述关系可导出

$$\frac{v_{m,\lambda_k}}{v_{n,\lambda_k}} = \frac{\Delta\tilde{\omega}_{m,\lambda_k}}{\Delta\tilde{\omega}_{n,\lambda_k}} = \frac{\Delta\tilde{P}_{em,\lambda_k}/T_{J,m}}{\Delta\tilde{P}_{en,\lambda_k}/T_{J,n}} \quad (6)$$

式中: v_{m,λ_k} 、 v_{n,λ_k} 分别为模式 k 下右特征向量中 m 、 n 号机转速偏差对应的那一项。可见,通过该模式下的发电机电磁功率偏差之比可以估计系统右特征向量中对应项的比值。

扩展为考察区域间振荡时,则式(6)中 $\Delta\tilde{\omega}_{m,\lambda_k}$ 可代表区域模式 k 下区域 m 等值机的转速偏差, $T_{J,m}$ 可代表区域 m 等值机的转动惯量, $\Delta\tilde{P}_{em,\lambda_k}$ 可代表区域模式 k 下区域 m 等值机的电磁功率偏差,同理可知 $\Delta\tilde{\omega}_{n,\lambda_k}$ 、 $T_{J,n}$ 以及 $\Delta\tilde{P}_{en,\lambda_k}$ 的含义。这样, $\Delta\tilde{\omega}_{m,\lambda_k}/\Delta\tilde{\omega}_{n,\lambda_k}$ 可代表以区域 n 等值机为基准,区域模式 k 下区域 m 、 n 等值机间的 $\Delta\omega$ 振型, $\Delta\tilde{P}_{em,\lambda_k}/\Delta\tilde{P}_{en,\lambda_k}$ 可代表以区域 n 等值机为基准,区域模式 k 下区域 m 、 n 等值机间的 ΔP 振型。

在上述理论框架下,为了追踪系统动态行为,本文建立一个表格(称之为模态表^[3,17])。它结合了模式与 $\Delta\omega$ 振型、 ΔP 振型 3 个要素,表明了 3 者的唯一对应关系。

1.3 参与度振型的提出

在多机系统中,如果有 n 台机组,理论上将有 $n-1$ 个振荡模式出现,但就某一台机组来说,实际上只对少数的振荡模式有较大的响应。同样,对于一个 n 区域系统来说,理论上将存在 $n-1$ 个区间振荡模式,但就某个区间模式来说,实际上强参与、呈现相互反相振荡的区域、机群和电厂往往只有几个。

参与因子虽可表征机组的参与程度,但却不能展示参与方向。为了综合展现主导区间模式下各强相关分区机群或机组的参与程度和参与方向,并为优化发电计划和负荷消减措施提供参考,本文提出一种名为“参与度振型”的新概念。它以该模式下的 $\Delta\omega$ 振型的相对相位作为其相位,以对应的参与因子作为其幅值。

1.4 参与因子的估算

由文献[12]可知,当发电机采用 2 阶经典模型,忽略转速阻尼系数 D ,同时采用 PQ 分解法求解网络方程时,系统左、右特征向量存在以下关系:

$$\mathbf{u}_{\lambda_k} = [\text{diag}(T_J/\omega_s)]\mathbf{v}_{\lambda_k} \quad (7)$$

式中: \mathbf{u}_{λ_k} 为模式 k 的左特征向量; ω_s 为发电机转速稳态值; \mathbf{v}_{λ_k} 为模式 k 的右特征向量; $\text{diag}()$ 表示对角阵,即

$$\text{diag}(T_J/\omega_s) = \frac{1}{\omega_s} \begin{bmatrix} T_{J1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_{J2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & T_{JN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

此外,文献[12]的研究结果表明,在实际系统区间模式的解耦控制应用中,上述表达的近似关系仍然成立。即有

$$\mathbf{u}_{\lambda_k} \approx [\text{diag}(T_J/\omega_s)]\mathbf{v}_{\lambda_k} \quad (9)$$

因此由式(9)可得,左特征向量中 m 和 n 机对应项之比为

$$\frac{u_{m,\lambda_k}}{u_{n,\lambda_k}} \approx \frac{(T_{J,m}/\omega_{s,m})v_{m,\lambda_k}}{(T_{J,n}/\omega_{s,n})v_{n,\lambda_k}} \quad (10)$$

式中 $\omega_{s,m}$ 、 $\omega_{s,n}$ 分别为 m 、 n 分区等值机或机组的转速稳态值。当 $\omega_{s,m} = \omega_{s,n}$ 的前提下,由式(10)可得

$$\frac{u_{m,\lambda_k}}{u_{n,\lambda_k}} \approx \frac{T_{J,m}v_{m,\lambda_k}}{T_{J,n}v_{n,\lambda_k}} \quad (11)$$

再由参与因子的定义可知,它为左、右特征向量的乘积。这样,结合式(6)(11)有

$$\left| \frac{p_{m,\lambda_k}}{p_{n,\lambda_k}} \right| = \left| \frac{v_{m,\lambda_k} \|u_{m,\lambda_k}\|}{v_{n,\lambda_k} \|u_{n,\lambda_k}\|} \right| \approx \left| \frac{(\Delta\tilde{P}_{em,\lambda_k}/T_{J,m})^2 T_{J,m}}{(\Delta\tilde{P}_{en,\lambda_k}/T_{J,n})^2 T_{J,n}} \right| \approx \left| \frac{(\Delta\tilde{P}_{em,\lambda_k})^2/T_{J,m}}{(\Delta\tilde{P}_{en,\lambda_k})^2/T_{J,n}} \right| \quad (12)$$

式中 p_{m,λ_k} 、 p_{n,λ_k} 分别为参与因子矩阵中模式 k 下 m 号机转速对应的那一项。以参与因子矩阵任意项 p_{i,λ_k} 的最大值 $p_{n,\lambda_k} = \max(p_{i,\lambda_k})$ 作为基准,由式(12)即可得第 m 号区域、电厂等值机甚至机组的参与因子。

2 基于广域测量系统的框架和步骤

本文方法在广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)下的实现步骤为:

1) 做去初值或趋势处理,借助时域信号辨识方法(如多通道 Prony 或 ESPRIT)提取全网区间联络线有功功率偏差信号中的模式分量,并以 ΔP 模式能量级判定主导区间模式。

2) 绘制区间联络线 ΔP 振型,同时由式(6)计算主导模式的右特征向量幅值,在做归一化处理,即可绘制区域等值机的 $\Delta\omega$ 振型。

3) 对获得的区域 $\Delta\tilde{P}_{em,\lambda_k}$ 进行归一化和排序。去

掉那些数值过小的区域，由式(12)估算其他区域机群等值机的参与因子，确定强相关区域。

4) 依据模态表，可获得该模式下强相关区域内潜在强相关机群、主力电厂或机组目标的先验知识。优先对与之对应的 $\Delta \tilde{P}_{en,\lambda_k}$ 进行归一化和排序，并由式(12)估算该主导模式下区内联络线和电厂出线的参与因子，确定强相关机群、电厂或机组，并由步骤 2) 绘制它们的 $\Delta\omega$ 振型。

5) 以步骤 2) 和 4) 得到的区域、机群、电厂甚至机组的 $\Delta\omega$ 振型的相位作为其参与方向，以步骤 3) 和 4) 得到的参与因子作为其参与程度，即可绘制这些目标在系统当前状态的“参与度振型”。

3 算例分析

案例分析以华东电网(East China Power Grid, ECPG)2020 年规划数据为平台，系统结构和联络线功率偏差编号如图 1 所示。

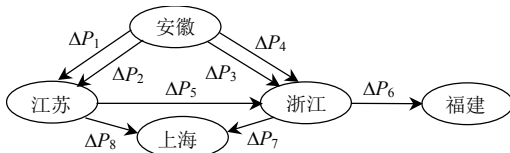


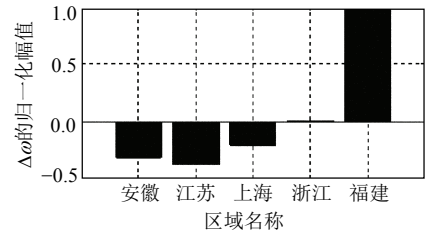
图 1 华东系统中区间联络线情况

Fig. 1 The tie-lines among areas in ECPG

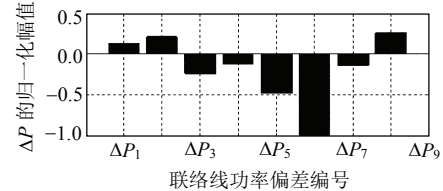
利用文献[18]的方法，发电机采用经典模型，保持网络结构，负荷为阻抗特性，可求得该系统存在 3 个区间模式^[8]：1) 福建对江苏、安徽；2) 浙江对江苏、福建；3) 安徽对江苏。

以区间模式 1($f=0.263$ Hz)为例，由 QR 分解法得到该模式下特征向量中各区域内发电机的转速偏差，将其加权其惯性时间常数后，除以区域等值惯性时间常数并做归一化，即可得图 2(a)所示的区域转速偏差振型图；同时由系统输出变量方程 $Y=CX$ 计算出 Y 阵中各区间联络线功率 P ，继而以 ΔP_6 为基准计算区间 ΔP 振型（联络线功率偏差振型），如图 2(b)所示。这样就初步形成了第 2 节中所述的离线特征值计算的模态表^[3]，表中仅列出模式 1，其他模式同理。

发电机采用详细模型表示并计及励磁系统，在强相关机组(福建后石电厂)施加扰动(励磁参考电压值提高 10%，0.1 s 后恢复原值)，时域仿真 20 s，记录各联络线功率信号。首先，依据第 2 节中的步骤 1) 做去初值处理后，得到各联络线功率偏差 ΔP ，对其按定矩形窗长(4 s)进行多通道 Prony 辨识，并以模式能量级 E 指标判定主导模式。限于篇幅，仅



(a) $\Delta\omega$ 振型(以福建为基准)



(b) ΔP 振型(以 ΔP_6 为基准)

图 2 华东系统模态表中的区域模式 1($f=0.263$ Hz)信息
Fig. 2 The modal form for IAO (inter-area oscillation) mode 1 in ECPG

列出 2 个模式，其中模式 1 用 M_1 表示，模式 2 用 M_2 表示。其次，由第 2 节中的步骤 2) 依据得到的 ΔP 振型相位关系，对照模态表中 ΔP 振型(图 2(b))的相位，校核并最终确认主导模式(即 M_1)^[8]，其结果列于表 1。

表 1 华东系统主导模式的识别与确定

Tab. 1 The determination of the dominant mode in ECPG

窗口/s	联络线 功率参数	A/MW		$E/kW\cdot h$		ΔP 振型相位/(°)	
		M_1	M_2	M_1	M_2	M_1	M_2
7—11	ΔP_1	18.8	31.5	26.7	48.2	0	0
	ΔP_2	56.9	67.9	80.6	104.4	-3	0
	ΔP_3	86.1	40.5	122.2	62.6	177	-202
	ΔP_4	59.9	40.7	85.8	63.1	179	-212
	ΔP_5	145.0	96.2	210.4	149.2	177	-197
	ΔP_6	269.6	84.5	395.1	131.0	174	-14
	ΔP_7	35.2	40.4	49.8	61.8	177	-192
	ΔP_8	72.0	51.3	107.9	79.3	-7	18
	最大值	269.6	96.2	395.1	149.2	179	18
	最小值	18.8	31.5	26.7	48.2	-7	-212
	均值	92.9	56.6	134.8	87.5	—	—

由表 1 可见，模式 1 的 E 指标的计算结果表明它是系统当前状态下的主导模式。幅值 A 指标的结果确认了该结论的有效性，但前者的优点是显见的，因为：

- 1) 避免初值大、阻尼大、衰减快的分量造成的主导模式误判。
- 2) 有效反映时间窗和阻尼等关键特征。
- 3) 能够反映振荡能量，物理意义更清晰。

然后，对于主导模式 M_1 (频率为 0.288 Hz)，根据第 2 节中的步骤 3) 及表 1 中的联络线功率偏差得到各区域等值机的电磁功率偏差 $\Delta \tilde{P}_{ei,\lambda_1}$ ，并对其归一化结果进行排序和筛选。本例中，为全面反映整个系统内各区域的参与程度，由式(12)估算了所

有区域机群的参与因子,列于表2。其中: H_{eq} 为同调区域等值转子的机械惯性; S_{sum} 为同调区域总容量; $\Delta\omega_{nm}$ 为转速偏差的归一化估计值; p_{nm} 为参与因子估计值。

表2 区域机群的参与因子

Tab. 2 The participation factors of areas

区域	$\Delta P_{ei}/pu$	H_{eq}/s	S_{sum}/MVA	$\Delta\omega_{nm}$	p_{nm}
江苏	1.522 9	3 598.4	87 088.1	0.602	0.193
福建	-2.695 6	2 172.3	48 820.7	-1.760	1.000
安徽	1.406 0	1 998.4	50 284.3	1.000	0.296
上海	0.368 6	1 039.4	22 860.2	0.504	0.039
浙江	-1.125 0	2 823.8	66 647.6	-0.566	0.134

由表2可见,福建区域参与因子最大,可重点考察其区内电厂。由第2节中的步骤4),对该区内各主力电厂 $\Delta\tilde{P}_{ei,\lambda_i}$ 的归一化排序结果进行筛选,去掉幅值特别小的。再由式(12)估算该模式(频率为0.288 Hz)下各主力电厂的参与因子,结果见表3。其中:福建的后石火电、惠安核电、莆田燃机厂为区内代表性的强相关电厂;为便于比较,也给出了部分区外非强相关电厂(如福建的华能3期、江苏的隋北LNG和田湾电厂); S_{base} 为电厂的合计容量; p 列数据为利用QR法由发电机经典模型数据得到的结果,以作参考。

表3 电厂的参与因子

Tab. 3 The participation factors of power plants

省份	电厂	$\Delta P_{ei}/pu$	H_{eq}/s	S_{base}/MVA	$\Delta\omega_{nm}$	p_{nm}	p
福建	后石	0.008 171	4.348	6 000	1.000	1.000	1.000
福建	惠安核电	0.007 505	3.690	6 666	0.974	0.895	0.933
福建	莆田燃机	0.007 614	7.433	3 384	0.967	0.901	0.920
江苏	田湾	0.002 856	3.690	6 666	0.371	0.130	0.282
江苏	隋北LNG	0.002 483	8.907	2 471	0.360	0.109	0.197
福建	华能3期	0.001 573	4.348	1 333	0.866	0.167	0.170

由表3可见,本文量测估计法得到的强相关电厂主要有后石、惠安核电、莆田燃机等电厂,这与经典模型的计算结论基本一致。此外,考察江苏田湾电厂和福建惠安核电厂的计算结果发现:对于同型同容量电厂,实际上可直接计算二者振荡功率偏差平方之比来反映它们的相对参与程度。

最后,由第2节中的步骤5),以步骤2)和4)得到的 $\Delta\omega$ 振型相位分别作为各区域和主力电厂的参与方向,绘制系统当前状态下主导区间模式的区域和主力电厂参与度振型,分别如图3—4所示。

观察图3可见,区域参与度振型中呈现的各区域的参与因子和参与方向可用来判定该模式下各区域的优先级。换言之,它可直观地表明哪些反相振荡区域会被首先分析和考察,如图3中的福建和安徽。

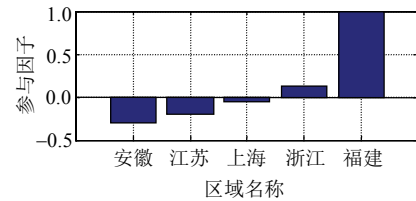


图3 主导模式的区域参与度振型

Fig. 3 The MSFP (mode shape for participation) for areas in the dominant mode

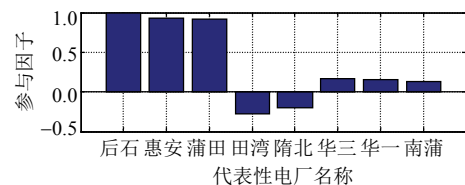


图4 主导模式的电厂参与度振型

Fig. 4 The MSFP for power plants in the dominant mode

从图4可见,电厂参与度振型则能够为提供广域控制系统(wide area control system, WACS)提供哪些电厂甚至局部区域机群(如流域性小水电群等)是用于提高当前系统动态特性最有效或者较有效的受控目标。

4 结论

本文提出一种基于功率偏差估计主导区间模式下的参与因子与参与方向的方法。数值仿真结果表明了该方法的有效性。此外,本文还发现:

1) 文中提出的新指标——模式能量级 E , 比传统指标具有更强的物理意义。

2) 参与度振型能够同时、直观地呈现区域同调机群或主力电厂的参与程度和参与方向信息,可为准实时判定主导模式的强相关目标提供参考,其应用潜力很大。

参考文献

- [1] 韩松, 何利铨, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 56-60.
Han Song, He Liquan, Sun Bin, et al. Hilbert-Huang transform based nonlinear and non-stationary analysis of power system low frequency oscillation and its application[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 56-60(in Chinese).
- [2] Glickman M, O'Shea P, Ledwich G. Estimation of modal damping in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1340-1350.
- [3] 韩松, 徐政, 武诚. 利用相关分析的区间振荡振型快速估计方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 436-443.
Han Song, Xu Zheng, Wu Cheng. Algorithm for inter-area oscillation mode shape estimation using correlation analysis[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 436-443(in Chinese).
- [4] Messina A. Inter-area oscillations in power systems: a nonlinear and nonstationary perspective[M]. New York: Springer, 2009: 101-127.

- [5] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 699-822.
- [6] Zhou E. Power oscillation flow study of electric power systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1995, 17(2): 143-150.
- [7] 王青, 闵勇, 张毅威. 低频振荡的功率振荡增量分布计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 1-4.
Wang Qing, Min Yong, Zhang Yiwei. A new algorithm of oscillatory active power increment distribution in low frequency oscillation study [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 1-4(in Chinese).
- [8] 武诚, 徐政, 张静. 利用联络线功率相对相位判定低频振荡模式[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 36-40.
Wu Cheng, Xu Zheng, Zhang Jing. Low frequency oscillation mode determination based on relative phases of the tie-line active powers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 36-40(in Chinese).
- [9] Trudnowski D. Estimating electromechanical mode shape from synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1188-1195.
- [10] Dosiek L, Trudnowski D J, Pierre J W. New algorithms for mode shape estimation using measured data[C]//IEEE PES General Meeting. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [11] Dosiek L, Pierre J, Trudnowski D. A channel matching approach for estimating electromechanical mode shape and coherence[C]//IEEE PES General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 15-16.
- [12] Far H, Banakar H, Li P, et al. Damping inter-area oscillations by multiple modal selectivity method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 766-775.
- [13] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
Ju Ping, Xie Huan, Meng Yuanjin, et al. Online identification of low-frequency oscillations based on wide-area measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60(in Chinese).
- [14] 邓集祥, 涂进, 陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.
Deng Jixiang, Tu Jin, Chen Wuhui. Identification of critical low frequency oscillation mode in large disturbances[J]. Power system technology, 2007, 31(7): 36-41(in Chinese).
- [15] 王青. 互联电力系统低频振荡机理与特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [16] 武诚, 徐政, 郑翔. 基于 PSS/E 的功率振荡增量分布计算[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 38-42.
Wu Cheng, Xu Zheng, Zheng Xiang. Calculation of oscillatory active power increment distribution based on PSS/E[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 38-42(in Chinese)
- [17] Han S, Xu Z, Wu C. Mode shape estimation and mode checking for IAO using correlation analysis technique[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(6): 1181-1187
- [18] 黄莹, 徐政, 潘武略. 基于 PSS/E 的华东电网低频振荡分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 11-17.
Huang Ying, Xu Zheng, Pan Wulue. Analysis method for low frequency oscillation in East China Power Grid based on power system simulation software PSS/E[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 11-17(in Chinese).



收稿日期: 2011-01-30。

作者简介:

韩松(1978), 男, 博士, 贵州大学副教授, 主要研究方向为交直流电力系统动态分析、广域测控系统、配电网规划以及电能质量, E-mail: ee.hans@gmail.com;

徐政(1962), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术。

(责任编辑 王晔)