改进的机电振荡模式相对局域性指标及其适应性

荣 娜,李泽滔,韩 松
(贵州大学 电气工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:为了发展大规模互联电网态势感知的理论与方法,从依据系统规模灵活调整参数取值的角度出发,提出了一种改进的机电振荡模式相对局域性量化指标及其求解方法。首先,基于小信号模型分析系统状态矩阵的特征值,借助二分法在参与因子阈值闭区间内优化幂指数参数;然后,由归一化的参与因子获得机电振荡模式的局域性指标;相较于传统指标,所提指标计算效率高、实用性好;最后,借助 MATLAB 环境下的 PST V3 仿真工具进行 IEEE 50 机 145 母线系统和 Kundur 4 机 11 母线系统的仿真分析,结果证明了所提指标的有效性和适应性。

关键词:机电振荡;相对局域性;量化指标;参与因子;态势感知;小信号模型
中图分类号:TM 743 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.021

0 引言

随着跨区域大容量交直流互联系统的发展及间歇性、随机性新能源的接入,其在提高电力系统运行经济性和优化一次能源比例的同时,也使整个互联系统的动态特性变得更为复杂[1-2]。发展广域测量系统(WAMS)及态势感知技术[3-4]的重要目标之一就是提供这些复杂互联系统机电振荡行为的关键信息(主要包括模式信息、振荡交互路径以及对控制行为的响应)[5-6]。而支撑上述目标实现的基础理论中,关于机电振荡相对局域性量化指标及其同调性估计、动态降阶等值等问题还有待深入研究和探讨。

现代电力系统的响应往往呈现振荡特征,广义上而言,可以观察到 2 类机电振荡。第一类是全局振荡或区间振荡,可以定义为频率低于 1 Hz 的低频振荡,往往涉及系统的一部分机组相对于另一部分机组的振荡。可以通过分析这些区间的振荡模式获得对整个电力系统动态特性较好的理解或认知。第二类是局部振荡,可以定义为频率相对较高(一般处于 0.5~2.0 Hz)的机电振荡,往往涉及单台机组相对于全网或一群相邻的机组之间的振荡。一般而言,专设于同步发电机转子上的阻尼绕组可以很好地约束该机组的局部振荡模式[7]。在许多案例中,这类振荡的频率等特征往往隐含了该振荡模式的内在特性[8],但目前还没有一个可靠的工具或定量的指标去区分这些机电振荡模式属于区间模式还是局部模式。此外,传统上认为机电振荡模式的频率一般与参与该模式的机组数量负相关,但近期的研究显示这种相关性有时并不明显。

作为电力系统稳定性分析的重要组成部分,机电振荡模式的局部与区间模式分类可通过相对规范的方式执行和获得。然而,对于大型互联电网而言,却很难区分出哪些是最全局或最局部的模式。或者说,仅仅从对参与机组的简单观察来获得一个模式的局部性特征是不完整的。此外,从表面上看一个模式能量与其复平面上的特征根描述之间的内在映射关系可以认识到:模式的局域性与该模式的能量紧密相关。因此,有必要研究汇集模式能量信息的指标设计方案,形成一个有效的局域性排序策略,发展新的发电机动态聚合与等值方法。同时,利用参与机组的排序变化或局域性指标变化来反映系统动态性能的改变和趋势预测[9],这对大规模互联电网态势感知技术的发展有支撑作用,值得深入研究。

为此,从依据系统规模灵活调整参数取值角度出发,以机电振荡模式的参与因子构建特征为基础,本文提出了一种改进的机电振荡模式的相对局域性量化指标及其求解方法。所提指标具有根据模式的局域性对各机电振荡模式展开聚类的能力,可为动态等值、同调分群、态势感知等的发展提供参考。

1 模态分析理论回顾与模式属性判定讨论

1.1 电力系统模态分析回顾

对于一个运行平衡点的小扰动,多机电力系统可以线性化为一个状态空间形式,即:

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{x}$ 为系统状态变量;$\boldsymbol{A}$ 为系统状态矩阵。矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的维度由系统状态变量的数目决定。虽然相较于经典模型,发电机详细模型的引入会导致状态变量

收稿日期:2016-04-06;**修回日期**:2016-12-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61540067,51567006);贵州省科教青年英才培养工程项目(2012151);贵州省科学技术基金资助项目(20132109)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61540067,51567006),the Training Program for Outstanding Young Scientists and Educators of Guizhou Province (2012151) and the Science and Technology Foundation of Guizhou Province(20132109)

数目增加,但对应于发电机机电振荡模式的状态变量数目是保持不变的。由于关注的是机电振荡模式,所以上述矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可仅考虑发电机的 2 个机电状态变量。对于一个带有 m 个机电振荡模式变量的系统而言,矩阵 $\boldsymbol{A}(m\times m$ 阶)的特征值分析将生成 m 个特征值 λ_i 以及对应的右特征向量 $\boldsymbol{u}_i$ 和左特征向量 $\boldsymbol{v}_i$。对应于第 i 个特征值或模式 λ_i 的归一化特征向量存在如下关系式:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{A}\boldsymbol{u}_i&=\lambda_i\boldsymbol{u}_i\\ \boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}&=\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\lambda_i\end{aligned}\tag{2}$$

从物理意义上而言,右特征向量 $\boldsymbol{u}_i$ 中元素 u_{ki} 反映了在状态变量 x_k 上观察模式 λ_i 的相对幅值及相位,或者说 $|u_{ki}|$ 表征了 x_k 对 λ_i 的"可观性"强弱;而左特征向量的元素 v_{ki} 则反映了 x_k 对 λ_i 的"可控性"。这样,一个特定的状态变量与一个模式之间的耦合关系可通过这 2 个特征向量的乘积即参与因子 p_{ki} 来揭示,如式(3)所示[10]。

$$p_{ki}=\frac{v_{ki}u_{ki}}{\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}_i}\tag{3}$$

参与因子 p_{ki} 可以表征模式 λ_i 中状态变量 x_k 的参与程度,且 $0\leqslant p_{ki}\leqslant 1$。显然,$p_{ki}$ 满足如式(4)所示的关系。

$$\sum_{k=1}^{N}p_{ki}=1\tag{4}$$

其中,N 为系统机组数。

1.2　依靠频率判断振荡模式区域或局部属性的不足

传统上认为依据模式频率可以判断该模式的全局、区间或局部属性。但以 IEEE 50 机 145 母线系统为例,其机电振荡模式频率与参与机组数量的分布关系并未呈现出严格的线性相关关系或聚类特性,如图 1 所示。换而言之,传统的频率判断标准是存在局限性的,不严格的。

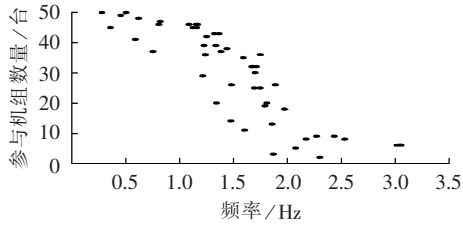

图 1 IEEE 50 机 145 母线系统机电振荡模式频率与参与机组数量的关系分布

Fig.1 Distribution of relationship between frequency of electromechanical oscillation mode and quantity of participating units for IEEE 50-machine 145-bus system

2　模式局域性的量化与指标改进

2.1　模式局域性的量化

作为小信号稳定分析的一部分,参与因子的计算有助于获取该系统振荡模式或特征值中与发电机相关的状态变量信息。如果大量分散的发电机与一个机电振荡模式相关,那么它可以确定为一个区间振荡模式;而一个局部振荡模式往往仅与一小部分机组相关。此外,也应认识到,在利用经典模型建模的系统中,如果忽略线路电阻和发电机阻尼绕组,则发电机状态变量的参与因子直接反映了该振荡模式中对应机组的模式能量[11-12]。对于一个振荡模式而言,全部参与因子之和为 1,各参与因子表明了该模式的整个能量中各台机组的相对贡献量。在归一化的参与因子矩阵中,每一个数都是该模式的一台机组对应系数与所有机组中最大系数的比值。因此,对于一个模式而言,一个由全部归一化的参与因子构成的向量,可以作为表征该模式全部能量的指标[13-14]。或者说,一个模式的能量与其复平面上的特征根描述之间的内在映射关系说明模式的局域性与该模式的能量紧密相关。因此,一个能够汇总模式能量信息的指标可用于发展有效的局域性排序策略。

2.2　传统的相对局域性指标设计

对于一个 N 机电力系统而言,第 i 个机电振荡模式的局域性指标可由式(5)计算得到[15]。

$$L_{\mathrm{idx},i}=\sum_{k=1}^{N}(1-p_{ki})^n\tag{5}$$

其中,指数 n 的目的在于为 $L_{\mathrm{idx},i}$ 提供聚类属性。文献[15]依据一个 4 机、6 机以及 10 机系统的案例认为,指数 n 取为 N 时聚类效果是最佳的,即 $n=N$。总体而言,该局域性指标 L_{idx} 的主要目的是根据各模式的相对局域性量化指标对所有机电振荡模式进行排序,形成一个排序列表。显然,位于列表底部的模式为区间模式,位于其顶部的模式则为局部模式。同时,根据 L_{idx} 的排序列表,各机电振荡模式将显现出自然的聚类特征。

2.3　改进的相对局域性指标

n 的取值是上述指标聚类特性的关键因素,简单地以系统中机组数量 N 作为其取值,存在一些局限性,例如计算效率较低,忽视了大规模系统中很多机组对于部分机电振荡模式的参与因子极小的问题。为提高传统方法计算 L_{idx} 的效率,依据系统规模灵活调整或优化指数 n 的取值,对 L_{idx} 的计算方法做出改进,其计算流程如图 2 所示。图中,$p_{\min 2}=0.0001$;对于小系统而言,$p_{\min 1}$ 取为 0.1 或 0.2,r 取为 20 %;对于大系统而言,$p_{\min 1}$ 取为 0.01 或 0.05,r 取为 10 %。

3　案例分析

3.1　案例 1:IEEE 50 机 145 母线系统

IEEE 50 机 145 母线系统是用于稳定性研究的标准系统,来源一个实际电力系统的近似模型[16-17],其包括 145 条母线和 453 条线路或变压器支路(52

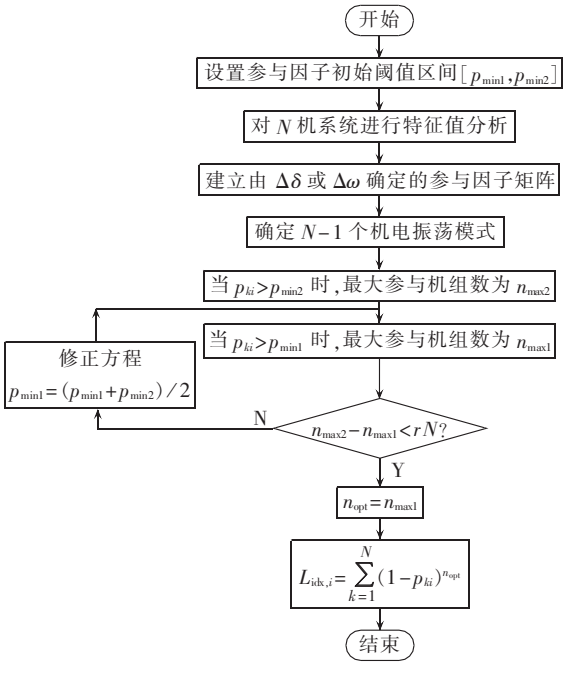

图 2 所提改进指标 L_{idx} 的计算流程图

Fig.2 Flowchart of improved index L_{idx} calculation

台固定分接头的变压器)。其中连接在母线 93、102、104、105、106、110 和 111 上的 7 台发电机采用 4 阶的详细模型,为带有电力系统稳定器(PSS)的 IEEE DC1 型励磁机,其余发电机采用 2 阶经典模型。负荷采用恒阻抗模型。该系统有 60 个负荷,总计 2.83 GW、0.8 Gvar。该 IEEE 50 机系统显示了宽泛的动态特性,在高负荷水平工况下,呈现出低频机电振荡。上述系统的基础稳态数据和动态数据可参见文献[18]。本文涉及仿真及自定义计算程序利用了 MATLAB2013a 和 PST V3[18]。

针对上述 IEEE 50 机 145 母线标准算例,取 p_{min1}=0.1、p_{min2}=0.000 1、r=10 %,由本文所提相对局域性指标及传统指标的计算方法得出的结果如图 3 所示。为进一步展现各机电振荡模式下参与机组数与相对局域性指标 L_{idx} 的关系,对上述结果分别利用 MATLAB 函数进行一次拟合,传统指标和本文所提指标的拟合结果分别如图 3 中虚线和实线所示。

由图 3 可以看出,图中左上角三角形数据点以及

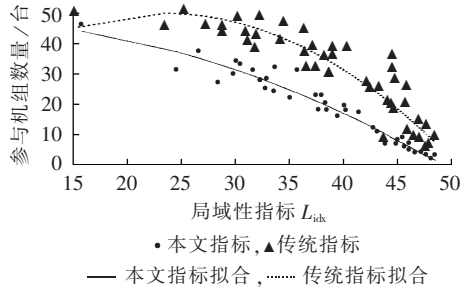

图 3 所提指标 L_{idx} 和传统指标的计算结果和拟合结果比较

Fig.3 Comparison of calculative and fitting results between proposed index L_{idx} and traditional index

圆形数据点的局域性指标最小,约为 15,表明该振荡模式为局域性最低的模式。这与对应的参与机组数量的计算结果(分别为 50 台和 46 台)所表明的模式局域性或区域性特征是一致的。同时,图中右下角的三角形和圆形数据点的局域性指标均约为 48,参与机组数量均约为 3 台,表明对应振荡模式为最局域的模式。综上所述,这 2 种指标计算方法均能够量化机电振荡模式的相对局域性。

观察图 3 中虚线和实线的左侧部分,如局域性指标小于 30 的曲线部分,发现本文所提指标 L_{idx} 的计算结果与参与机组数量的线性关系相对于传统指标而言更好。同时,从拟合曲线以及各振荡模式的数据点分布来看,相对传统指标,本文所提指标的聚类特征也表现得较好。更为重要的是,本文所提指标优选的指数较小,意味着其计算步骤较少,计算速度更快,对于大规模电力系统的实用性更佳。

为进一步表明所提改进指标的有效性和差异性,给出优选指数 n_{opt}=46、p_{min2}=0.003 时的计算结果中 L_{idx} 最低的机电振荡模式 4、1 和 12 的归一化参与因子分布,分别见图 4、5、6。

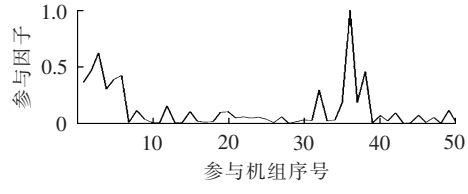

图 4 机电振荡模式 4 的归一化参与因子分布

Fig.4 Distribution of normalized participation factor for electromechanical oscillation Mode 4

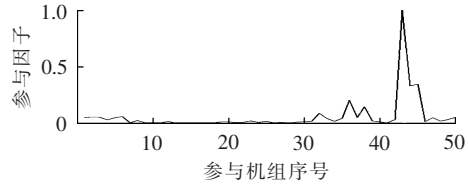

图 5 机电振荡模式 1 的归一化参与因子分布

Fig.5 Distribution of normalized participation factor for electromechanical oscillation Mode 1

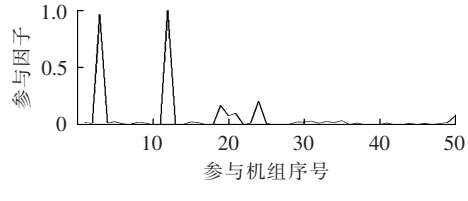

图 6 机电振荡模式 12 的归一化参与因子分布

Fig.6 Distribution of normalized participation factor for electromechanical oscillation Mode 12

图 4 从参与因子的角度呈现了一个局域性最低或区域性最强振荡模式的归一化参与因子分布。该模式共有 46 台机组参与,强相关机组为 36 号和 3 号机组,其参与因子分布图的多峰特征符合 L_{idx} 最小

的计算结果,充分表明了图 3 中左上角数据点的机电振荡模式相对局域性的量化结果是正确的。同时也再次说明本文所提改进指标与传统指标相比在量化效果上更有效。

由图 5 可见,利用前述优选指数,机电振荡模式 1 共有 37 台机组参与,强相关机组为 43、44、45 号机组。由图 6 可见,机电振荡模式 12 有 33 台机组参与,强相关机组为 12、3 号机组。对照图 3 中 L_{idx} 较小的模式数据发现,图 5、图 6 所得结果也与图 3 的结果是吻合的,说明适当降低指数 n_{opt} 并未影响该指标的有效性。

3.2　案例 2:Kundur 4 机 11 母线系统

为进一步分析系统转动惯量参数以及运行工况变化下本文所提指标的适应性,选取一个较为简单典型和容易调整的 Kundur 4 机 11 母线系统开展了研究。1 号和 2 号发电机的型号相同,位于送端;3 号和 4 号发电机的型号相同,位于受端。不同调整组合方式下的 L_{idx} 计算结果如表 1 所示,表中输送功率是指区间联络线的输送功率;H_1—H_4 分别代表 1—4 号发电机的转动惯量。

表 1　不同系统参数和工况下所提指标 L_{idx} 的计算结果

Table 1 Calculative results of index L_{idx} for different system parameters and working conditions

工况	H_1,H_2/s	H_3,H_4/s	L_{idx}		
			模式 1	模式 2	模式 3
输送功率 400 MW	6.5	4	0.23	2.09	2.05
输送功率 0 MW	6.5	4	0.08	2.07	2.12
输送功率 200 MW	6.5	4	0.05	2.03	2.14
转动惯量变化方案 1	8	2	0.77	2.00	2.00
转动惯量变化方案 2	48	1	3.53	1.19	2.03
转动惯量变化方案 3	100	1	3.74	1.94	2.03
输送功率 0 MW,转动惯量变化方案 1	8	2	0.59	2.00	2.08
输送功率 0 MW,转动惯量变化方案 2	48	1	3.48	1.76	2.05
输送功率 0 MW,转动惯量变化方案 3	100	1	3.67	1.88	2.05

由表 1 可得出以下 2 点发现和推论。

a. 通过调整发电机与负荷的有功功率和无功功率使得联络线输送功率变化(分别为 400 MW、0 MW 和 200 MW),借助本文所提方法获得的各机电振荡模式的 L_{idx} 分别为:模式 1 的数值区间变化很小,为 0.05~0.23,呈现典型的区间振荡属性;而模式 2、模式 3 的数值区间变化也很小,分别为 2.03~2.09 和 2.05~2.14,呈现典型的局域振荡属性。可见,不同运行工况下,指标 L_{idx} 能够有效地量化振荡模式的局域性,准确地反映机电振荡区域属性。

b. 通过增加送端 1、2 号机组的转动惯量 H_1 和 H_2(分别同时增加为 8 s、48 s、100 s),同时减少 3、4 号机组的转动惯量 H_3 和 H_4(分别同时减少为 2 s、1 s、1 s)。此时,模式 1 的指标 L_{idx} 发生了显著变化,由基础工况的 0.23 分别增加为 0.77、3.53 和 3.74,呈现出由区域性振荡属性向局域性振荡变化的现象;模式 2 的指标 L_{idx} 发生了一定变化,由基础工况的 2.09 分别减少为 2.00、1.19 和 1.94,呈现出一定区域性弱化特征;模式 3 的指标 L_{idx} 基本保持不变,均约为 2.03,维持局域性特征。可见,发电机或等值机的转动惯量发生变化时,指标 L_{idx} 能有效地量化和识别机电振荡模式局域性特征的变化,这对于大规模互联系统的态势感知有一定的支撑作用。

此外,为丰富实验样本,表 1 也给出了联络线输送功率为 0 MW 时不同转动惯量案例的计算结果。

综合来看,利用局域性指标 L_{idx} 区分机电振荡模式属性具有较好的适应性。

4　结论

机电振荡模式的局域性量化指标可为大规模互联电网态势感知理论中同调性估计、动态降阶等值等技术提供一种新的思路。为此,借助 MATLAB 环境下的 PST V3 仿真工具,开展了局域性量化指标及其改进方法的研究工作,得到以下结论和认识。

a. 指出了传统电力系统动态特性分析或小信号分析中,依靠机电振荡模式频率判断其区域或局部属性的不足,进而讨论了振荡模式相对局域性的量化方法。

b. 从结合系统规模灵活调整或优化指数 n 的取值出发,利用参与因子阈值区间,提出了一种改进的机电振荡模式的局域性指标。借助 IEEE 50 机系统,表明所提指标相较于传统指标,具有计算速度快、精度要求可调整的优点。

c. 从运行方式调整、转动惯量变化等角度,借助 2 区 4 机系统进一步验证和分析了所提指标实现机电振荡模式局域性属性聚类的有效性和适应性。

d. 下一步将通过时域信号分析获取振荡模式能量,进而估计得到参与因子,探索实现相对局域性指标 L_{idx} 的实时跟踪,为大规模互联电网态势感知的理论发展提供参考。

参考文献:

[1] 鞠平,刘咏飞,王红印,等. 电力系统的广义强迫振荡[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):1-6.
JU Ping,LIU Yongfei,WANG Hongyin,et al. General forced oscillations of power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):1-6.

[2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:24-37.

[3] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin,LU Zongxiang,LIU Yingmei,et al. Development

models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):4999-5008.
[4] 周华锋,胡荣,李晓露,等. 基于态势感知技术的电力系统运行驾驶舱设计[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):130-135.
ZHOU Huafeng,HU Rong,LI Xiaolu,et al. Design of power system operation cockpit based on situation awareness technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):130-135.
[5] HAUER J,TRUDNOWSKI D,DESTEESE J. A perspective on WAMS analysis tools for tracking of oscillatory dynamics[C]// Power Engineering Society General Meeting,2007. Tampa,FL,USA:IEEE,2007:1-10.
[6] 蒋长江,刘俊勇,刘友波,等. 基于广域测量系统和CELL理论的强迫振荡在线感知与定位[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):125-132.
JIANG Changjiang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Online forced oscillation detection and identification based on wide area measurement system and CELL theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):125-132.
[7] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York,USA:McGraw-Hill,1994:89-120.
[8] 徐伟,鲍颜红,徐泰山,等. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):98-101.
XU Wei,BAO Yanhong,XU Taishan,et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):98-101.
[9] 陈恩泽,唐飞,刘涤尘,等. 振荡中心迁移下的电网失步解列策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3799-3806.
CHEN Enze,TANG Fei,LIU Dichen,et al. Splitting strategy of power systems based on migration of oscillation center[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3799-3806.
[10] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:235-270.
[11] CHAN S M. Small signal control of multiterminal DC/AC power systems[D]. Cambridge,MA,USA:Massachusetts Institute of Technology,1981.
[12] MESSINA A R,OCHOA M,BAROCIO E. Use of energy and power concepts in the analysis of the inter-area mode phenomenon[J]. Electric Power Systems Research,2001,59(2):111-119.
[13] 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.
[14] WU C,ZHANG J. Determining modes of low frequency oscillations based on power oscillation flows in the tie lines [C]//Power & Energy Society General Meeting,2009. Calgary,Canada:IEEE,2009:1-5.
[15] GHOSH S,SENROY N. The localness of electromechanical oscillations in power systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2012,42(5):306-313.
[16] ZARATE-MINANO R,MILANO F,CONEJO A J. An OPF methodology to ensure small-signal stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(3):1050-1061.
[17] VITTAL V. Transient stability test systems for direct stability methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(1):1050-1061.
[18] CHOW J,ROGERS G. Power system toolbox ver. 3.0:dynamic tutorial and functions[Z]. Colborne,ON,Canada:Cherry Tree Scientific Software,2008.

作者简介:

荣 娜

荣 娜(1979—),女,贵州大方人,讲师,博士研究生,研究方向为电力电子装备与系统、电力市场(**E-mail**:ee.nrong@gzu.edu.cn);

李泽滔(1960—),男,贵州遵义人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为故障诊断与容错控制、电力电子装备与系统(**E-mail**:gzgylzt@163.com);

韩 松(1978—),男,吉林长春人,教授,博士,研究方向为交直流电力系统动态分析、新型电力电子装备以及配电网规划(**E-mail**:ee.shan@gzu.edu.cn)。

Improved relative-locality index of electromechanical oscillation mode and its adaptability

RONG Na,LI Zetao,HAN Song

(Department of Electrical Engineering,Guizhou University,Guiyang 550025,China)

Abstract: An improved quantitative relative-locality index of electromechanical oscillation mode and its solving method are proposed to develop the theories and methods for the situation awareness of large-scale interconnected power system,which flexibly adjusts the parameters according to the system scale. Based on the state matrix eigenvalues of small-signal model analysis system,the bisection method is applied to optimize the exponent parameters within the closed threshold interval of participation factors and the relative-locality index of electromechanical oscillation mode is then obtained from the normalized participation factors,which has higher calculation efficiency and better practicability than the traditional index. PST V3 simulation tool in MATLAB is used to carry out the simulative analysis for IEEE 50-machine 145-bus system and Kundur 4-machine 11-bus system,and the results demonstrate the effectiveness and adaptability of the proposed index

Key words: electromechanical oscillation; relative locality; quantitative index; participation factors; situation awareness; small-signal model