

基于校准导航的广域电力系统负荷模型校准

郝丽丽¹, 岳浩永², 王昊昊³

(1. 南京工业大学 自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019;
3. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106)

摘要: 基于系统主导模式下功角稳定裕度关于各节点负荷参数的灵敏度分析, 提出广域电力系统负荷模型的校准导航, 以区分系统负荷模型的主导校准区域和主导校准参数, 并分析节点的稳定群属特征。基于静态、动态负荷比例参数和负荷功率初值, 讨论电力系统负荷模型主导校准区域的分布规律及其影响因素, 结果表明该类参数的主导校准区域分布主要取决于扰动的位置和各节点负荷有功功率的大小, 仿真和实际算例验证了其正确性。提出先选择主导校准区域, 再对其中负荷节点进行分类, 并对同类负荷节点采用相同的模型参数进行统一校准的方案, 以提高广域电力系统负荷模型校准的效率和精度。

关键词: 校准导航; 广域电力系统; 负荷模型; 主导校准区域; 主导校准参数; 负荷分类

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.012

0 引言

电力系统动态仿真的准确性将直接影响系统研究、规划、设计和运行的可靠性, 实际工程中多次发现仿真结果无法重现真实的动态过程, 仿真的有效性问题逐渐引起更多学者和机构的重视^[1-5]。模型是造成仿真误差的主要因素, 其有效性评估及校准^[6]是电力系统重要的基础性工作。为了使仿真模型及时跟踪系统的增建和调整, 需要定期进行系统模型的校准。系统运行中的随机扰动为模型校准提供了很好的契机, 美国 WECC 通过十几年间持续记录扰动数据不断地修正系统模型, 改善其元件动态模型和数据库^[7]。由多系统互联组成的广域电力系统节点面广量大, 元件众多, 其系统模型校准难度可想而知。

系统模型能够成为实际广域系统镜像的充要条件是二者在所有激励下均能获得完全相同的动态响应, 其研究必须基于系统的整体动态信息。广域测量系统(WAMS)为广域电力系统模型的评估和校准提供了参照信息基础^[8]。将 WAMS 采集的实际系统响应曲线作为比较的标准, 建立仿真与实测轨迹间的差异度评估指标, 用作模型校准的目标函数。在系统临界状态处, 参数的微小变化往往引起受扰轨迹几何外形特征在动态鞍点后的巨大差异, 故其差异度指标在系统位于稳定域边界处不满足连续性, 后者只能依靠系统的物理机理特征^[9-10]。

广域电力系统负荷数目繁多, 且负荷具有分散和

时变特性, 若对每个负荷节点都精确建模, 无论是建模还是计算, 都十分困难。为了提高仿真速度, 在大系统仿真过程中, 通常按照所属区域设置负荷模型参数, 甚至全系统共用一套模型参数, 虽然简单, 却不符合实际, 且会带来较大误差。也可以先根据负荷节点的特征变量^[11-14]对负荷分类, 同一类负荷采用相同参数统一识别^[15]。即便如此, 广域系统中的待识别负荷参数数量仍是非常可观的。文献[3, 16]利用 PMU 实测数据对系统分块识别。不同空间位置的节点参数对响应的影响程度不同^[17], 如何选择 PMU 实测数据的注入点将系统分块值得探讨。

多数情况下, 仿真系统中的负荷被设置为与电压相关的静态模型或静态模型并联电动机的综合模型, 后者的参数具体为有功、无功负荷的恒阻抗、恒电流、恒功率组成比例, 负荷功率初值和电动机模型参数及比例。为简化问题, 本文在此前提下, 假定各节点电动机模型参数已知, 且有功、无功负荷有相同的静态组成比例, 进一步将负荷模型参数的校准对象限定为静态、动态负荷比例参数和负荷功率初值。

本文就广域电力系统负荷模型校准展开研究, 首先以系统功角稳定裕度关于负荷参数的灵敏度定义负荷模型的校准导航; 其次, 针对校准对象参数, 用具有理想两群特性的两机系统讨论了负荷模型主导校准区域的分布规律及其影响因素, 并通过 IEEE 10 机 39 节点系统和实际电网验证结论的正确性; 最后, 提出了广域电力系统负荷模型的校准方案, 并讨论了负荷模型的适用性问题。

1 模型校准的特征提取

系统中所有元件的影响都会反映于系统轨迹, 广域电力系统负荷模型校准是通过调整系统内各负

收稿日期: 2015-08-25; 修回日期: 2016-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307078); 江苏政府留学奖学金资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307078) and Jiangsu Government Scholarship for Overseas Studies

荷节点模型使仿真响应逼近系统实测的过程,局部信息难以有效反映系统整体动态,难以充分反映各节点负荷模型的影响,因此宜选取能有效反映广域系统整体动态行为的轨迹集来校准模型。由于在高维空间中难以定义动态特征,往往需要在保持动态特性的前提下,先将高维轨迹映射到低维空间,再提取特征。扩展等面积准则(EEAC)将多维轨迹的动态特征通过互补群惯量中心相对运动变换,严格地保留到主导映象上的时变单机系统的轨迹中,进而可以识别受扰轨迹的主导模式,计算受扰轨迹的功角稳定裕度^[18]。另外,功角稳定裕度可以在整个参数域连续反映系统参数变化,有利于正确反映参数的变化。

按照机组所属领先群和余下群的不同,系统有多种分群模式,其中最危险的模式为系统的主导模式,该模式反映了系统最剧烈的动态行为,能够充分体现模型对系统动态的影响,具有较强的可观性。本文选择系统的整体功角曲线为观察对象,设系统第 i 个分群模式下共 q 台机组属领先群,则该模式可记为 $OM_i = \{G_{b_1}, \dots, G_{b_q}\}$, 其中 b_1, b_q 分别为第 1 和第 q 台机组所在母线的序号,用 OM_1 表示系统的主导模式, $OM_i (i \neq 1)$ 为系统的非主导模式。用系统分群模式下的功角稳定裕度作为负荷模型校准的特征。

2 广域电力系统负荷模型的主导校准区域

2.1 模型的校准导航

用系统分群模式下的功角稳定裕度关于各节点负荷模型参数的灵敏度空间分布作为参数在该模式下的校准导航 CN(Calibration Navigator)。第 k 个模式下负荷第 i 个参数的校准导航如下:

$$A_{CN\alpha_i}^{OM_k} = \left[\frac{\partial \eta_{OM_k}}{\partial \alpha_i^1}, \frac{\partial \eta_{OM_k}}{\partial \alpha_i^2}, \dots, \frac{\partial \eta_{OM_k}}{\partial \alpha_i^j}, \dots, \frac{\partial \eta_{OM_k}}{\partial \alpha_i^N} \right] \quad (1)$$

其中, $\alpha_i^j (j=1, 2, \dots, N)$ 为系统第 j 个节点负荷的第 i 个参数; OM_k 为系统第 k 个分群模式; η_{OM_k} 为第 k 个模式下的功角稳定裕度。

广域电力系统规模庞大,为了能够利用已有的商业分析软件方便地计算出式(1)中各元素,本文用数值差分法来计算灵敏度:

$$\frac{\partial \eta_{OM_k}}{\partial \alpha_i^j} = \frac{\eta_{OM_k}(\alpha_i^j + \Delta \alpha_i^j) - \eta_{OM_k}(\alpha_i^j)}{\Delta \alpha_i^j} \quad (2)$$

根据 $A_{CN\alpha_i}^{OM_k}$ 可以判断出主导模式 OM_1 下系统各节点的负荷参数 α_i 对系统动态影响大小和方向的空间分布。将 $A_{CN\alpha_i}^{OM_k}$ 中各元素幅值较大者所对应节点定义为关于参数 α_i 的主导校准节点(简称为主导节点),该节点上参数 α_i 的调整对系统动态影响更为突出。依次比较不同参数的 CN 中对应元素的幅值,将其中较大者对应的参数定义为相应节点的主导校准

参数(简称为主导参数),某节点主导参数的调整较其他参数对系统的动态影响更为突出。

在参数 α_i 的校准过程中,主导节点上该参数的调整能使系统动态更快地逼近实测轨迹,相反,非主导节点上该参数的调整对系统特征的影响较小,其参数如何取值对系统动态影响不大,无法根据系统动态有效校准此类参数。同理,某节点上主导参数的调整能使系统动态更快地逼近实测轨迹,而非主导参数的调整对系统特征的影响较小。因此,用典型模型及参数表示非主导节点和主导节点上的非主导参数,既不会影响系统动态,又可以大幅减少广域电力系统的待校准节点及参数个数,提高模型校准效率。

2.2 主导变换

适当选取关于参数 α_i 主导节点比例 θ_i , 定义主导变换,用算子 $T_D[\cdot]$ 表示,该变换将 $A_{CN\alpha_i}^{OM_k}$ 中各元素绝对值最大的前 $N\theta_i$ 个节点取为主导节点,将 CN 的对应位置处元素置 1,其余元素为非主导节点, CN 的对应位置处元素置 0,得到主导模式下关于参数 α_i 的主导节点标志 DBS(Dominant Buses Symbol)序列为:

$$A_{DBS\alpha_i}^{OM_k} = T_D[A_{CN\alpha_i}^{OM_k}] \quad (3)$$

2.3 系统的主导校准区域

将系统的主导节点集合定义为主导校准区域 DA(Dominant Area),由各参数主导节点集合的或运算得到,如果系统共有 m 个待校准参数($\alpha_1, \dots, \alpha_m$),则系统的主导节点标志序列为:

$$A_{DBS}^{OM_k} = A_{DBS\alpha_1}^{OM_k} \vee A_{DBS\alpha_2}^{OM_k} \vee \dots \vee A_{DBS\alpha_m}^{OM_k} \quad (4)$$

为了提高计算效率,对负荷模型校准时,在某场景下不宜一次性考虑过多的节点和参数,可以通过控制 θ_i 的取值,将系统的主导校准区域规模限制在一定范围内。因此 $A_{DBS}^{OM_k}$ 中将存在较多零值,为了使表述简化,仅用该序列中非零元素所对应的节点号序列来描述主导校准区域,并将其记为 $A_{DA}^{OM_k}$ 。

为了得到系统的主导节点,需要统一比较各类参数的灵敏度大小,然而,各类参数的量纲、物理意义不一定相同,因此,功角稳定裕度关于各参数灵敏度的物理意义可能不同,因此应适当选取各参数的主导节点比例参数 θ_i , 使其选出的各类参数的主导节点对系统有相应的影响程度。

3 CN 对负荷稳定群属特征的表征

广域电力系统负荷模型校准时,若主导区域仍然较大,可根据负荷节点的特征进行分类,同一类负荷采用相同参数,统一优化校准各类负荷参数。笔者曾以静态负荷比例参数为例讨论了负荷的稳定群属特征,只有按照各节点构成特征接近且群属特征

相同的原则对负荷节点分类,才能保证同一类负荷节点的识别结果在不同扰动场景下都有较好的适应性^[13]。当节点间负荷构成特征与群属特征矛盾,又不便增加负荷分类数目时,所属群相同的节点,如各节点负荷构成特征相差不是太大或节点功率较小,可近似并入同一分类;构成特征相近的节点,如与各自所属群电气联系不是很紧密或负荷比例参数扰动引起的稳定裕度变化微乎其微,可并入同一分类。

根据 $A_{CN\alpha_i}^{OM_i}$ 中各元素的正负,可以直接得到各节点关于该负荷参数的稳定群属特征。各参数下节点的稳定群属特征可能不一致,需选择一个对系统影响最大的关键参数,并用其 CN 定义系统各节点的稳定群属特征。用各负荷节点的稳定群属特征和构成特征对节点分类,每类负荷节点采用相同参数进行模型校准,可以进一步减少广域系统负荷的待校准模型参数数量。

4 主导校准区域的分布

EEAC 首先将多机系统轨迹聚合为最危险模式下的两群,然后再转换为时变单机系统轨迹计算功角稳定裕度。故本文直接以图 1 所示具有理想两群特性的两机系统为例,针对校准对象参数说明主导校准区域的分布规律,其中发电机 G_1 、 G_2 均为经典模型,其转子运动方程如下:

$$M_1 \ddot{\delta}_1 = P_{m1} - P_{L10}(1 - \alpha_{z1}) - P_{L10} \alpha_{z1} (U_1/U_{10})^2 - U_1^2 G_{11} - U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12} + \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

$$M_2 \ddot{\delta}_2 = P_{m2} - P_{L20}(1 - \alpha_{z2}) - P_{L20} \alpha_{z2} (U_2/U_{20})^2 - U_2^2 G_{22} + U_1 U_2 Y_{12} \sin(\delta_1 - \delta_2 + \theta_{12} - \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

其中, δ_i 、 M_i 、 P_{mi} 分别为发电机 G_i ($i=1, 2$) 的功角、惯量、机械功率;为简化问题,假设系统负荷均为 ZP 静态特性, α_{zi} 、 P_{Li0} 、 U_{i0} 分别为母线 i 上负荷的恒阻抗负荷比例参数、初始负荷功率、初始母线电压; G_{ii} 为导纳矩阵 Y_{ii} 的实部。扰动过程中,两机系统具有理想的两群特性,2 台发电机将分别属于领先群和余下群,二者间的相对运动反映了系统的同步稳定性,等值单机无穷大 OMIB (One Machine Infinity Bus) 系统的数学模型为:

$$M \ddot{\delta} = P_m - P_e = P_m - [P_c + P_{\max} \sin(\delta - v)] \quad (7)$$

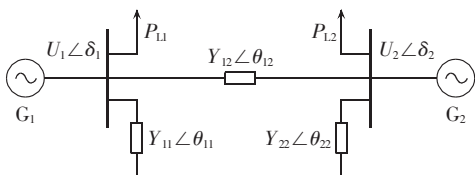


图 1 2 机系统
Fig.1 2-machine system

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 - \delta_2 \\ M_T &= M_1 + M_2 \\ M &= M_1 M_2 M_T^{-1} \\ P_m &= (M_2 P_{m1} - M_1 P_{m2}) M_T^{-1} \\ P_c &= (M_2 P_{L10} - M_1 P_{L20}) M_T^{-1} + \\ &\quad \alpha_{z1} M_2 M_T^{-1} P_{L10} [(U_1/U_{10})^2 - 1] - \\ &\quad \alpha_{z2} M_1 M_T^{-1} P_{L20} [(U_2/U_{20})^2 - 1] + \\ &\quad (M_2 U_1^2 G_{11} - M_1 U_2^2 G_{22}) M_T^{-1} \\ P_{\max} &= U_1 U_2 Y_{12} M_T^{-1} [M_T^2 \sin^2 \theta_{12} + (M_2 - M_1)^2 \cos^2 \theta_{12}]^{1/2} \\ v &= \arctan [(M_2 - M_1) M_T^{-1} \cot \theta_{12}] \end{aligned}$$

根据 EEAC, 系统功角稳定裕度 η 表示如下:

$$\eta \triangleq f(P_m, P_e, \delta) \quad (8)$$

将式(7)表示为:

$$\delta \triangleq g(P_m, P_e) \quad (9)$$

设动态过程中机组出力不变,即 P_m 为常数,以节点 1 的负荷参数 α_{z1} 为例,对式(9)关于 α_{z1} 求导:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \alpha_{z1}} = \frac{\partial g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial \alpha_{z1}} = \frac{\partial g}{\partial P_e} \left[\frac{\partial P_c}{\partial \alpha_{z1}} + P_{\max} \cos(\delta - v) \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_{z1}} \right]$$

可知:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \alpha_{z1}} = \frac{\partial g}{\partial P_e} \frac{\partial P_c}{\partial \alpha_{z1}} \left[1 - \frac{\partial g}{\partial P_e} P_{\max} \cos(\delta - v) \right]^{-1} \quad (10)$$

系统功角稳定裕度关于 α_{z1} 的灵敏度如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial \alpha_{z1}} &= \frac{\partial f}{\partial P_m} \frac{\partial P_m}{\partial \alpha_{z1}} + \frac{\partial f}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial \alpha_{z1}} + \frac{\partial f}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_{z1}} = \\ &\quad \frac{\partial f}{\partial P_e} \left[\frac{\partial P_c}{\partial \alpha_{z1}} + P_{\max} \cos(\delta - v) \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_{z1}} \right] + \frac{\partial f}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_{z1}} \end{aligned}$$

将式(10)代入上式,并整理得:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \alpha_{z1}} = P_{L10} \left[1 - \left(\frac{U_1}{U_{10}} \right)^2 \right] \frac{A}{B U_1 U_2 - 1} \quad (11)$$

$$A = M_2 M_T^{-1} \left(\frac{\partial f}{\partial P_e} + \frac{\partial g}{\partial P_e} \frac{\partial f}{\partial \delta} \right)$$

$$B = \frac{\partial g}{\partial P_e} \cos(\delta - v) Y_{12} M_T^{-1} \times$$

$$[M_T^2 \sin^2 \theta_{12} + (M_2 - M_1)^2 \cos^2 \theta_{12}]^{1/2}$$

电网结构和机组性质一般较固定,故 A 、 B 是随 OMIB 系统功角变化的参数,由式(11)可知,扰动过程中功角变化对各负荷节点的灵敏度产生相近的影响,各负荷节点参数灵敏度的大小差异主要取决于负荷节点电压 U_1 、与之相连节点的电压 U_2 和负荷的初始功率 P_{L10} ,后者的影响显而易见,负荷的初始功率越大,该负荷节点的负荷比例参数灵敏度越大,即功率初值大的负荷,其参数 α_{zi} 对功角稳定裕度的影响较其他负荷更大。下面主要讨论电压对负荷参数灵敏度的影响。如系统无扰动,则所有负荷节点的灵敏度均为零。扰动情况下,如故障点与负荷节点 1 之间的电气距离无限大,故障过程中 U_1 保持不变,则 $\partial \eta / \partial \alpha_{z1} = 0$,即参数变化不会影响功角稳定裕度;反之,若故障点靠近节点 1, $\partial \eta / \partial \alpha_{z1}$ 的绝对值将会增大。如故障

中各节点电压下降,显然负荷节点 1 越接近故障点, U_1 值越小, $\partial\eta/\partial\alpha_{z1}$ 的绝对值越大。如故障中节点电压 U_1 、 U_2 上升,任意取实数 k 和 l ,且 $k>l>1$,若负荷节点 1 更靠近故障点,设 $U_1=k$, $U_2=l$,则 $|\partial\eta/\partial\alpha_{z1}|=|P_{L10}(k^2-1)A/(Bkl-1)|$;若负荷节点 1 远离故障点,设 $U_1=l$, $U_2=k$,则 $|\partial\eta/\partial\alpha_{z1}|=|P_{L10}(l^2-1)A/(Bkl-1)|$,显然,负荷节点 1 越接近故障点,其灵敏度绝对值越大。

归纳之,系统扰动过程中,稳定裕度关于静态负荷比例参数的灵敏度大小与负荷自身容量和该负荷距扰动点的电气距离密切相关,动态负荷比例参数的灵敏度有类似的规律。用相同方法,可分析出稳定裕度关于负荷初始功率的灵敏度大小与负荷距扰动点的电气距离和负荷自身性质密切相关,其中后者的作用在负荷容量很小时退化为零。

5 仿真验证

5.1 实验系统验证

本节以 IEEE 10 机 39 节点系统为研究对象,以母线序号标记负荷,考察各负荷节点的初始有功功率 P_0 、初始无功功率 Q_0 、静态负荷比例参数 α_z 和电动机负荷比例参数 α_M ,假设各节点的电动机负荷模型参数已知。分别在 2 个扰动场景下考察各参数的 CN:扰动场景 1 为线路 24-23 首端三相短路, t_{c1} 切除该线路;扰动场景 2 为线路 2-25 首端三相短路, t_{c2} 切除该线路。

在系统负荷为 ZP 模型下考察各负荷节点的 P_0 和 Q_0 , ΔP_0 和 ΔQ_0 均取为负荷总量的 1%,在扰动场景 1 下, t_{c1} 分别取为 0.21、0.22、0.23、0.24、0.25 s,均在主导模式 $OM_1=\{G_{35}, G_{36}\}$ 下观察,为了研究分群模式对 CN 的影响,当 t_{c1} 为 0.25 s 时,还选取了其他 2 种模式 $OM_2=\{G_{39}\}$ 和 $OM_3=\{G_{33}\}$ 进行观察。在扰动场景 2 下, t_{c2} 分别取为 0.15、0.17、0.19、0.21、0.23 s,均在主导模式 $OM_1=\{G_{37}\}$ 下观察,当 t_{c2} 为 0.23 s 时,也选取了其他 2 种模式 $OM_2=\{G_{39}\}$ 和 $OM_3=\{G_{35}, G_{36}\}$ 进行观察。根据式(1)计算关于负荷初始有功和无功功率的校准导航,如图 2、3 所示。

在系统负荷均为 ZP 模型下考察负荷恒阻抗比例参数 α_z , $\Delta\alpha_z$ 取 0.1,在扰动场景 1 下, t_{c1} 分别取为 0.21、0.22、0.23、0.24、0.25 s,均在主导模式 $OM_1=\{G_{35}, G_{36}\}$ 下观测,当 t_{c1} 为 0.25 s 时,选取模式 $OM_2=\{G_{39}\}$ 和 $OM_3=\{G_{33}\}$ 观察。在扰动场景 2 下, t_{c2} 分别取为 0.15、0.17、0.19、0.21、0.23 s, $OM_1=\{G_{37}\}$,当 t_{c2} 为 0.23 s 时,选取模式 $OM_2=\{G_{39}\}$ 和 $OM_3=\{G_{35}, G_{36}\}$ 观察。关于负荷恒阻抗比例参数的校准导航如图 4 所示。

系统各节点负荷均采用动态负荷与静态负荷并联的综合负荷模型,其中动态负荷模型采用三阶的感应电动机模型,静态负荷采用 ZP 模型,考察动态负

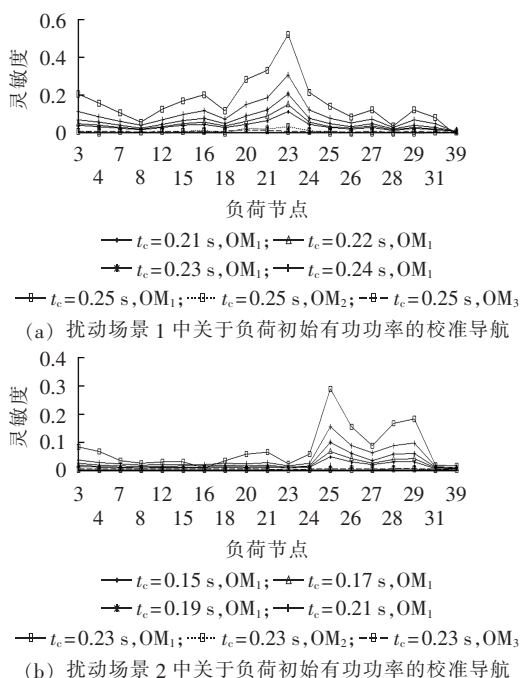


图 2 关于负荷初始有功功率的校准导航

Fig.2 Calibration navigator for initial active power of loads

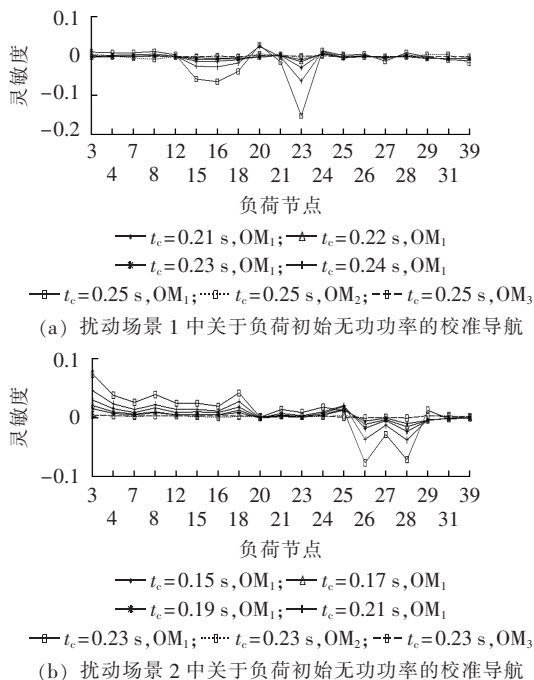


图 3 关于负荷初始无功功率的校准导航

Fig.3 Calibration navigator for initial reactive power of loads

荷比例参数 α_M , $\Delta\alpha_M$ 取 0.1。在扰动场景 1 下, t_{c1} 分别取为 0.13、0.14、0.15 s, $OM_1=\{G_{35}, G_{36}\}$,当 t_{c1} 为 0.15 s 时,选取模式 $OM_2=\{G_{39}\}$ 和 $OM_3=\{G_{33}, G_{34}\}$ 观察。在扰动场景 2 下, t_{c2} 分别取为 0.15、0.16、0.17 s, $OM_1=\{G_{37}\}$,当 t_{c2} 为 0.17 s 时,选取模式 $OM_2=\{G_{37}, G_{38}\}$ 和 $OM_3=\{G_{30}, G_{31}, G_{39}\}$ 观察。关于动态负荷比例参数的校准导航如图 5 所示。

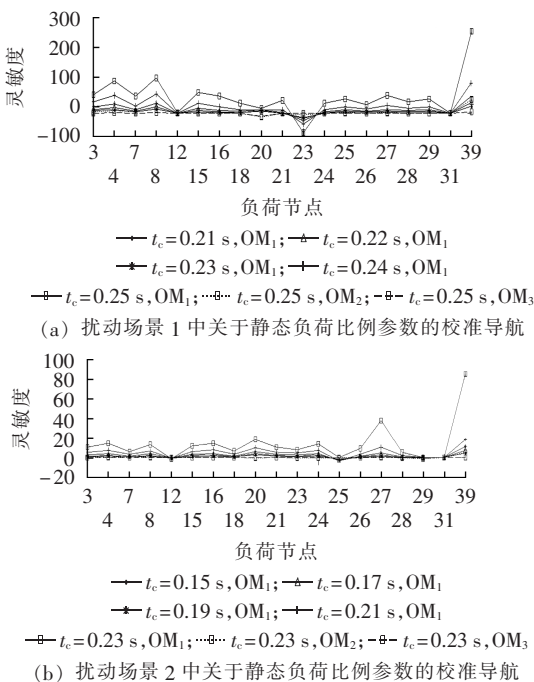


图 4 关于负荷恒阻抗比例参数的校准导航

Fig.4 Calibration navigator for constant impedance ratio parameter of loads

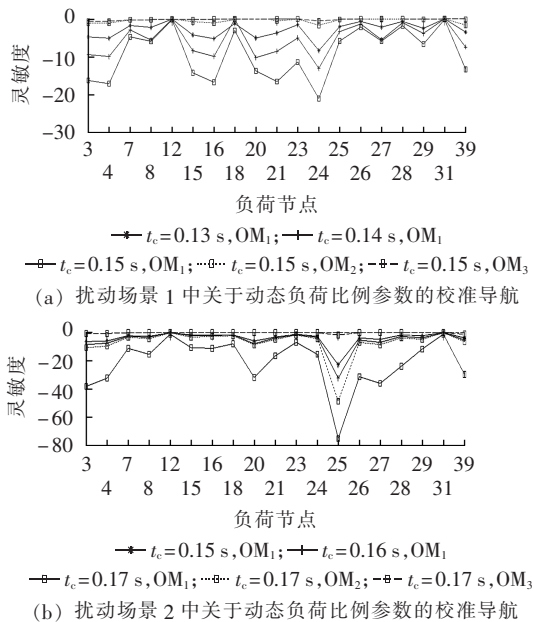


图 5 关于动态负荷比例参数的校准导航

Fig.5 Calibration navigator for ratio parameter of dynamic loads

由图 5 可得出如下结论。

(1)同样的扰动场景下,CN 中各元素的幅值将随着扰动持续时间的增大而增大,这说明扰动强度越大越易激发系统元件的动态特征,模型也更易校准,相反,强度小的激励只能激发出系统平衡点附近的模态,难以有效指导模型校准。CN 中各元素幅值的排序基本不随扰动强度变化,即在固定的扰动场景和分群模式下系统模型校准具有较为稳定的主导校准

区域。

(2)系统主导模式下 CN 中各元素的幅值远大于非主导模式下的结果,进一步验证了主导模式对系统动态有更强的观测能力。

(3)如果非主导模式下系统也较危险,此时模型参数也可能会有较好的可观测性,如图 5 扰动场景 2 中的 OM_2 ,但其 CN 各元素幅值的排序与 OM_1 几乎完全相同,且观察能力仍不如主导模式,故仍以主导模式为准。

(4)图中同一模式下,CN 各元素的符号没有随着扰动强度的变化而改变,但当扰动由 1 变为 2 后,CN 中部分元素的符号发生变化,说明系统中各负荷节点关于某参数的稳定群属特征不会随着扰动强度变化,但如果扰动的位置或性质改变时,节点的稳定群属特征将可能随之改变。

(5)改变分群模式,CN 各元素的符号有可能随之改变,即各负荷节点的稳定群属特征依赖于系统分群模式。

系统共 19 个负荷节点,设各参数的主导节点比例 θ_i 均为 20%,即各参数的主导节点个数都为 4。主导模式下各参数及系统的负荷模型主导校准区域见表 1,系统主导校准区域分布如图 6 所示,其中圆形、星形分别用于标注扰动场景 1、2 下属系统主导校准区域的节点。图中主导校准区域大多分布于相应的扰动点附近。

为了进一步研究主导校准区域分布的影响因素,用两节点互阻抗的模衡量节点间的电气距离,则扰动场景 1、2 下各负荷节点 i 距扰动点 c_1, c_2 的电气距离分别为 $|Z|_{ic_1}, |Z|_{ic_2}$ 。此外,用 d_{SLic_1}, d_{SLic_2} 分别表示扰动场景 1、2 下各负荷节点距扰动点的最短路径,用以显示主导节点与扰动点的拓扑关系。各节点负荷的有功功率、2 种扰动场景下各节点距扰动点的电气距离和最短路径如表 2 所示,表中电气距离为标么值,后同。扰动场景 1 下主导节点 15、16、18、20、21、23 和 24 都靠近扰动点,它们距扰动点的电气距离小于 0.08,最短路径小于等于 3,而且均带有相当数量的有功负荷。主导节点 4、8 和 39 虽然距扰动

表 1 负荷模型的主导校准区域

Table 1 Dominant calibration areas of load model

场景	参数	OM_1	$A_{OM_1}^{DA}$	系统负荷模型的主导校准区域
扰动场景 1 $t_{c1}=0.25\text{ s}$	P_0	$\{G_{35}, G_{36}\}$	$[20, 21, 23, 24]$	4, 8, 15, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 39
	Q_0	$\{G_{35}, G_{36}\}$	$[15, 16, 18, 23]$	
	α_Z	$\{G_{35}, G_{36}\}$	$[4, 8, 15, 39]$	
	α_M	$\{G_{35}, G_{36}\}$	$[4, 16, 21, 24]$	
扰动场景 2 $t_{c2}=0.23\text{ s}$	P_0	$\{G_{37}\}$	$[25, 26, 28, 29]$	3, 4, 18, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 39
	Q_0	$\{G_{37}\}$	$[3, 18, 26, 28]$	
	α_Z	$\{G_{37}\}$	$[4, 20, 27, 39]$	
	α_M	$\{G_{37}\}$	$[3, 4, 20, 25]$	

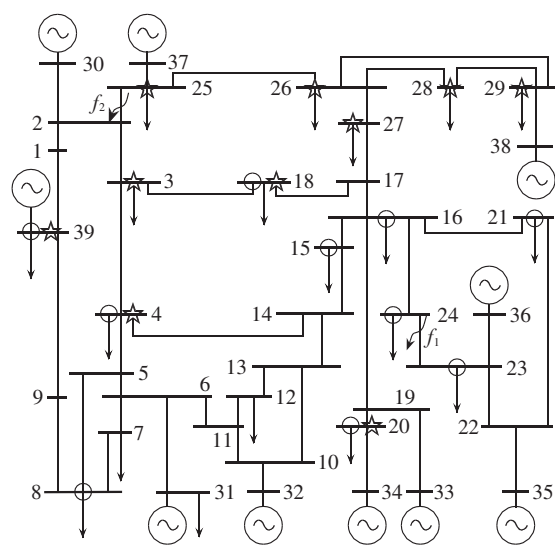


图 6 扰动场景 1、2 下 IEEE 39 节点系统负荷模型的主导校准区域

Fig.6 Dominant calibration areas of load model for disturbance scenario 1 and 2 of IEEE 39-bus system

表 2 IEEE 39 节点系统负荷主导校准区域分布的影响因素

Table 2 Influencing factors of dominant calibration area distribution of IEEE 39-bus system

负荷节点	P_L/MW	$ Z _{ic_1}$	$d_{\text{St}ic_1}$	$ Z _{ic_2}$	$d_{\text{St}ic_2}$
3	322.0	0.0802	4	0.0763	1
4	500.0	0.0822	4	0.0826	2
7	233.8	0.0844	7	0.0843	5
8	522.0	0.0846	8	0.0842	4
12	8.5	0.0829	5	0.0844	5
15	320.0	0.0730	2	0.0825	4
16	329.0	0.0697	1	0.0820	4
18	158.0	0.0767	3	0.0789	2
20	680.0	0.0659	3	0.0776	6
21	274.0	0.0691	2	0.0826	5
23	247.5	0.0676	1	0.0829	6
24	308.6	0.0644	0	0.0822	5
25	224.0	0.0823	5	0.0710	1
26	139.0	0.0818	4	0.0791	2
27	281.0	0.0786	3	0.0798	3
28	206.0	0.0844	5	0.0815	3
29	283.5	0.0845	5	0.0817	3
31	9.2	0.0756	7	0.0759	5
39	1104.0	0.0860	7	0.0790	2

点较远,但这些节点的有功负荷都非常大。非主导节点距扰动点普遍较远,节点 31 虽然距扰动点的距离较近,但由于其有功功率很小,故仍属于非主导节点。扰动场景 2 下主导校准区域的分布有类似的规律。这说明了系统负荷主导校准区域的分布主要取决于扰动点的位置和节点所带有功负荷的大小,当某节点靠近扰动点,且带有一定的有功负荷,那么该节点将很可能落入负荷的主导校准区域;当节点远离扰动点,如果其所带有功负荷很大,则该节点仍可能落入主导校准区域,相反,虽然节点接近扰动点,

但其有功负荷非常小,因为过小负荷的参数变化对系统行为影响甚微,故也可能落入非主导区域。

针对具体参数而言,负荷有功功率的大小对静态负荷和电动机负荷比例参数的主导校准区域分布的影响更大;而关于负荷初始有功和无功功率参数的主导校准区域分布则与负荷节点距扰动点电气距离的远近更加密切。在实际工程应用中,为了简化计算,也可以用扰动点到各负荷节点的最短路径来近似反映相关节点间电气距离的大小。

5.2 实际电网验证

本节以某实际省网为研究对象,该电网最高电压为 500 kV,共有 79 台机组,395 个节点,节点用编号 1—395 表示,其中负荷节点 246 个,各节点电动机负荷参数已知。扰动场景为 242 kV 线路 171—190 距首端 20% 处发生三相瞬时短路,故障持续时间为 0.8 s。考察负荷参数同 5.1 节,取 $\theta_i=10\%$,故各参数所对应的主导节点个数为 25。计算得到共 34 个主导负荷节点,其分布情况、各节点负荷的有功功率、各节点距扰动点的电气距离如表 3 所示。主导节点负荷容量一般较大且距故障点较近,其中少数容量较小的负荷由于它们距故障点电气距离很小所以节点上稳定裕度关于功率的灵敏度较大,也被选入主导校准区域。

表 3 实际系统负荷主导校准区域分布
Table 3 Dominant calibration area distribution of practical power system

负荷节点	P_L/MW	$ Z _{ic}$	负荷节点	P_L/MW	$ Z _{ic}$
13	93.79	0.033	103	119.80	0.034
14	65.49	0.030	104	119.80	0.034
20	51.20	0.031	105	69.30	0.029
21	67.59	0.035	118	73.90	0.027
22	97.08	0.033	122	60.70	0.028
27	88.49	0.034	141	125.80	0.038
35	80.08	0.029	142	91.10	0.033
36	64.29	0.032	147	151.30	0.035
37	90.49	0.030	157	47.30	0.021
39	23.00	0.008	173	162.90	0.033
45	43.40	0.028	182	103.40	0.043
62	142.70	0.035	231	70.79	0.034
68	243.60	0.047	234	193.90	0.041
78	63.70	0.026	265	16.70	0.013
81	156.10	0.045	296	13.40	0.019
85	129.80	0.035	298	35.10	0.024
94	104.00	0.035	358	158.60	0.035

6 广域电力系统负荷模型校准方案

广域电力系统负荷数量繁多,利用本文第 2 节的 CN,将负荷校准对象缩小至对系统动态影响较大的主导校准区域中,然后利用该区域内各节点的负荷构成及稳定群属特征将负荷分类,各类负荷采用相同的模型参数。以从广域系统轨迹降维得到的系统动

态机理特征定义实际系统和仿真模型的差异度指标,作为模型校核的目标函数。为各参数中灵敏度绝对值最大者设置初始步长,其余参数的修正大小按其灵敏度大小等比例调整,以各参数灵敏度方向确定参数的修正方向,即逐步对主导校准区域中的各类负荷参数同时修正,在参数空间内使目标函数沿梯度下降,最终得到广域系统负荷模型的校准结果。非线性系统的参数灵敏度仅能反映系统运行点附近较小邻域内的参数影响,故初始步长不宜过大,如迭代过程中目标函数不能持续减小,还需进一步减小步长。也可以采用诸如遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等智能优化方法来解决负荷模型参数识别这一含约束的连续优化问题。对于离线的模型校核,优化算法的选择不受计算时间的限制。电力系统区域负荷参数的优化以满足工程可接受精度为终止条件,不应苛求。广域电力系统负荷模型校准方案如图7所示。

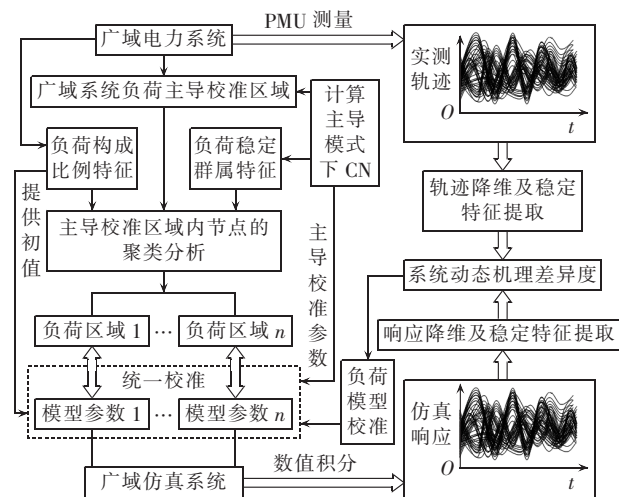


图 7 广域电力系统负荷模型校准方案

Fig.7 Load model calibration scheme for wide-area power system

根据前述分析,系统主导校准区域大多分布于扰动点附近,故每次扰动发生后,仅根据扰动数据对本次扰动的主导校准区域进行模型校准,其他非主导区域参数对系统动态影响不大,所以保留其模型不做调整,并不会给系统响应带来过多影响。随着数据库中历史扰动记录的增多,可以逐步分块地在各个扰动对应的主导校准区域内校准模型,逐渐覆盖全系统所有负荷节点的模型校准。

任意节点处的 PMU 量测很难将该量测所关联的多个区域解耦,但若某区域是非主导区域,该区域背景参数^[19]对系统动态较小的影响将使 PMU 数据能够更独立地反映其他区域校准对象的特性。

7 广域系统负荷模型适用性的讨论

对电力系统中各元件建立白箱模型难度很大,

元件模型的识别大多通过反复试探-校核,最终得到满足精度要求的模型结构和参数。而后的精度仍然密切依赖于该元件的运行条件。美国 EPRI 曾针对单台发电机进行模型检验:同样的模型和参数,不同运行条件下,仿真结果与实测不同;同样的模型、参数和运行场景,不同仿真软件的仿真结果不同。模型校核的难度可见一斑,更何况是对分散、时变、数目巨大的负荷模型按区域进行校准。

仿真模型的适用性是模型校核的关键,如果系统确实存在真实解,那么系统模型的适用性就取决于是否能找到该真实解;如果系统的真实解不一定实际存在(例如模型结构设置不准确,或存在类似“某区域所有负荷采用相同的参数”的简化设定等),则只能在设定好的模型结构下用最合适的参数使仿真结果尽量逼近 PMU 实测曲线,本文所讨论的问题即属于后者。电力系统是高维、强时变、强非线性系统,线性化的灵敏度分析结果仅能反映系统在该运行场景下,运行点附近很小的邻域内参数的特性,即使用很小的步长逐步搜索得到区域负荷的解,也很难判断其是否适用于下一个运行场景,只能通过搜集尽量多的系统负荷信息,找到最能代表实际系统负荷物理特征的参数,同时,尽量综合多运行场景下的系统信息去不断改进,找出能够适用于大多数常规运行场景的参数,或者按照运行场景分类动态更新模型参数。该问题的有效解决必然是基于系统每个元件的模型结构及参数的详细分析建模和仿真计算的不断改进。

8 结语

本文主要研究了广域电力系统负荷模型校准的主导对象选取问题,提出用系统主导模式下功角稳定裕度关于各节点负荷参数的灵敏度作为广域电力系统负荷模型的 CN, 由其区分系统负荷模型的主导校准区域和主导校准参数,还可以用其分析节点的稳定群属特征。针对负荷的静态、动态比例参数和初始功率,本文通过对两机系统的讨论,对仿真和实际系统的算例研究,观察了参数主导校准区域的分布规律及其影响因素,结果表明主导模式下系统模型具有更好的可观测性,此外,负荷模型主导校准区域的分布取决于扰动的位置和各节点负荷有功功率的大小。在此基础上,本文提出了广域系统负荷模型的校准方案,依据负荷模型校准导航选择主导区域和参数,确定主导区域内各负荷节点的稳定群属特征,结合各节点的负荷构成特征对主导区域分类,同一类负荷节点用相同的模型参数进行统一校准。该方案减少了广域系统负荷模型校准对象的维数,屏蔽了非主导校准区域的参数影响,可以提高广域电

力系统负荷模型校准的效率和精度。最后本文讨论了广域负荷模型的适用性问题。

因本文主要研究系统负荷模型主导校准区域分布的影响因素,故各负荷参数选取相同的主导节点比例参数影响不大,但如果在参数辨识过程中需要用灵敏度判断各负荷参数的辨识顺序,同类参数可直接比较灵敏度确定辨识顺序,不同类参数的灵敏度则需要进行加权比较,权值的选取有待研究。

参考文献:

- [1] HAUER J F, BESHIR M J. Dynamic performance validation in the Western power system[EB/OL]. [2015-02-15]. <http://eetd.lbl.gov/EA/EMP/reports>.
- [2] DMITRY N, CARSON W T, WILLIAM A M. Model validation for August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [3] 马进, 盛文进, 贺仁睦, 等. 基于广域测量系统的电力系统动态仿真验证策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 11-15.
MA Jin, SHENG Wenjin, HE Renmu, et al. A simulation validation strategy based on wide area measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 11-15.
- [4] 方勇杰. 美国 9.8 大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.
FANG Yongjie. Lessons from September 8, 2011 southwest America blackout for prevention and control of cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [5] 陈仟, 徐箭, 孙元章, 等. 考虑气温影响的负荷模型参数不确定性建模[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 17-21, 31.
CHEN Qian, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Modeling of load model parameter uncertainty considering temperature[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 17-21, 31.
- [6] YISHAN L, TAM K S, BROADWATER R. Load calibration and model validation methodologies for power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1393-1401.
- [7] ALLEN E, KOSTEREV D N, POURBEIK P. Validation of power system models[C]//IEEE Power Engineering Society 2010 General Meeting. Minneapolis, USA: [s.n.], 2010: 1-7.
- [8] JAIME D L R, VIRGILIO C, JAMES S T. Synchronized phasor measurement applications in power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 20-27.
- [9] 郝丽丽, 薛禹胜, DONG Zhangyang, 等. 电力系统受扰轨迹的差异度及其在参数识别中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 1-7, 47.
HAO Lili, XUE Yusheng, DONG Zhaoyang, et al. Difference degree of power system disturbed trajectories and its applications in parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 1-7, 47.
- [10] 张恒旭, 张宁, 刘玉田. 电力系统暂态稳定数字仿真有效性评价[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 13-16.
ZHANG Hengxu, ZHANG Ning, LIU Yutian. Validity assessment of power system transient stability numerical simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 13-16.
- [11] MUTANEN A, RUSKA M, REPO S, et al. Customer classification and load profiling method for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1755-1763.
- [12] NOURBAKHSH G, EDEN G, MCVEIGH D, et al. Chronological categorization and decomposition of customer loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2270-2277.
- [13] 郝丽丽, 岳浩永, 张恒旭, 等. 分类策略对广域系统负荷识别结果适应性的影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 381-387.
HAO Lili, YUE Haoyong, ZHANG Hengxu, et al. Influence analysis of classification strategy on wide area system load identification result adaptability[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 381-387.
- [14] 王琦, 张文朝, 汤涌, 等. 统计综合法负荷建模中的调查方法及应用[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 104-108.
WANG Qi, ZHANG Wenchao, TANG Yong, et al. A new load survey method and its application in component based load modeling[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 104-108.
- [15] 鞠平, 谢会玲, 陈谦. 电力负荷建模研究的发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 1-4, 64.
JU Ping, XIE Huiling, CHEN Qian. Research tendencies of electric load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 1-4, 64.
- [16] 韩冬. 大区电网实测负荷建模及仿真验证的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
HAN Dong. Research on measurement based load modeling and simulation validation in large scale power grids[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [17] CHEN Q, MU G, AN J, et al. A wide area pattern analysis method in power system model validation[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Shanghai, China: [s.n.], 2012: 1-6.
- [18] 郝丽丽, 薛禹胜, WU Qinghua, 等. 关于电力系统动态仿真有效性的评述[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 1-7.
HAO Lili, XUE Yusheng, WU Qinghua, et al. A review of validity analysis for power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 1-7.
- [19] 郝丽丽, 薛禹胜, 张广明, 等. 背景参数的不确定性对参数识别的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 10-13.
HAO Lili, XUE Yusheng, ZHANG Guangming, et al. The influence of background parameter uncertainty on parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 10-13.

作者简介:



郝丽丽

郝丽丽(1979—),女,河北昌黎人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(E-mail: lili_hao@163.com);

岳浩永(1978—),男,江苏新沂人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统安全调度(E-mail: 14951876@qq.com);

王昊昊(1979—),男,江苏响水人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(E-mail: wanghaohao@sgepri.sgcc.com.cn)。

(下转第89页 continued on page 89)

[11] 孟晓芳,刘文宇,朴在林,等. 基于网络拓扑分析的配电网潮流节点分析法[J]. 电网技术,2010,34(4):140-145.
MENG Xiaofang,LIU Wenyu,PIAO Zailin,et al. A nodal analysis method of load flow in distribution network based on network topology analysis[J]. Power System Technology,2010,34(4):140-145.

[12] 杨雄,卫志农,孙国强,等. 含分布式电源的配电网三相解耦潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):99-107.
YANG Xiong,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Decoupled three-phase power flow calculation for distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):99-107.

[13] 陈恳,李小锐,徐敏. 网损微增率新解法与转置雅可比矩阵法用于有功优化计算的比较[J]. 中国电机工程学报,2000,20(7):34-36.
CHEN Ken,LI Xiaorui,XU Min. Comparisons between new

method and transposed Jacobian matrix method for calculating incremental transmission losses in active power economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(7):34-36.

[14] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

作者简介:



江岳文

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,副教授,博士,研究方向为风电并网优化运行、电力系统优化运行(E-mail:jiangyuewen2008@163.com);

钱佳琦(1991—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为含分布式电源的配电网规划(E-mail:n130127020@fzu.edu.cn)。

Connection fee and use fee based on deep recovery mechanism for special user
JIANG Yuewen,QIAN Jiaqi

(College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350108,China)

Abstract: In order to rationally evaluate the impact of special user on the cost of distribution network,its connection fee and use fee on deep recovery mechanism are analyzed. The connection fee is the cost mainly caused by the premature network expansion due to the connection of special user and the use fee is the cost mainly caused by the network loss increase due to the connection of special user. Jacobi matrix is used to deduce the nodal marginal capacity cost matrix of distribution network with loop configuration for calculating the connection fee of special user on deep recovery mechanism. The nodal loss sensitivity of distribution network is used to research the use fee of special user on deep recovery mechanism. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: specialized project; distribution network; connection fee; use fee; deep recovery; nodal marginal capacity cost; nodal loss sensitivity

(上接第 81 页 continued from page 81)

Load model calibration based on calibration navigator
for wide-area power system

HAO Lili¹,YUE Haoyong²,WANG Haohao³

(1. School of Automation & Electrical Engineering,Nanjing University of Technology,Nanjing 211816,China;
2. State Grid Nanjing Power Supply Company,Nanjing 210019,China;3. NARI Group Corporation
(State Grid Electric Power Research Institute),Nanjing 211106,China)

Abstract: Based on the analysis of power-angle stability margin sensitivity to the load parameters of different nodes in system dominant mode,a calibration navigator is proposed for the load model of wide-area power system to distinguish the dominant calibration areas and parameters of system load model and analyze the stability clustering characteristics of load nodes. The law of dominant calibration area distribution and its influencing factors are discussed based on the static and dynamic load ratio parameters and initial load powers,which shows that,the dominant calibration area distribution depends mainly on the location of disturbance and the active power of nodal load. Its correctness is verified by simulation and practical example. A unified scheme of load model calibration for wide-area power system is proposed to improve its efficiency and accuracy,which selects the dominant calibration areas first,classifies their load nodes,and calibrates the load nodes of same type with the same model parameters.

Key words: calibration navigator; wide-area power system; load model; dominant calibration area; dominant calibration parameter; load classification