

· 电网技术 ·

基于电力系统主导振荡模式提取的区域负荷模型识别研究

郝丽丽¹, 汪成根², 方鑫², 谈怡君¹, 侯佳欣¹, 熊海波³

(1. 南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3. 国网丰县供电公司, 江苏 丰县 221700)

摘要:以区域负荷节点上不同用电性质负荷的构成比例为特征,进行负荷的分类及模型识别。选取充分参与系统主导振荡模式,且具有较高电压等级的关键母线作为观测对象,构建模型识别的目标函数,用梯度优化算法搜索负荷参数最优值。通过算例仿真检验了文中方法的有效性,并对不分类、按电气距离分类和按负荷用电性质构成比例分类这3种负荷节点分类方法进行比较,结果表明按负荷性质构成比例对系统负荷分类识别,其识别结果具有更好的准确性和适用性。

关键词:区域负荷;模型识别;主导振荡模式;用电性质构成比例

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)01-0032-08

0 引言

电力系统多次发生仿真结果无法复现事故真实情况的事件^[1-5],仿真的有效性问题亟待解决。模型的不准确是导致仿真结果异于系统实际运行状况的关键因素之一。通过信息采集和状态估计,可获得较为准确的电力系统网络拓扑模型。系统额定运行状态下,线路、变压器、电容、电抗器等元件的模型参数较为准确,通过厂家测试、独立建模与定期跟踪检验,发电机及其控制器的模型也较为可靠。然而,作为电力系统重要元件之一的负荷,在发输电网中其模型通常是由负荷、变压器、电源、储能、补偿设备等值得到。系统中负荷数目繁多、接入分散,且负荷具有随机性和时变性,所以负荷很难逐一、准确建模,负荷模型较系统的其它元件更加不可信,是仿真误差的主要来源之一^[6-8]。

将特征接近的空间负荷点归为一类,统一辨识各类负荷的方法兼顾了模型的准确性和计算效率^[9-11]。负荷分类涉及负荷特征向量的选取与聚类,选取的样本特征应能完全体现样本的本质^[12-14],且不影响识别结果的强壮性^[15-16]。需要基于不同的聚类原则与实际需要选择合适的聚类方法^[17-20]。此外,针对负荷的时变性,仿真系统中的负荷模型应能跟踪负荷实际变化,如何兼顾负荷的时间、空间分布规律,根据现场测量信息及实时

别并自动更新负荷模型,建立更为准确的自适应负荷模型,是探讨的重点。

通过分析系统主导振荡模式选取观测母线,制定模型识别的目标函数,以负荷用电性质构成比例作为负荷节点的特征,对空间负荷进行分类,同类负荷采用相同的模型参数,用梯度优化算法对系统各类负荷进行统一识别。文中分别在 IEEE 39 和 118 节点系统上进行验证,结果表明以负荷用电性质构成比例进行分类,得到的负荷识别结果强壮性更好,同时展示了负荷时变分类阈值的选取方法。

1 基于负荷用电性质构成比例的负荷分类

1.1 分类特征的选取

就用电性质而言,负荷一般可分为工业、商业、农业、居民负荷及其他4类。各类负荷的特征一般比较固定,如商业负荷、居民及其他负荷包含比重较大的静态用电设备,而工业负荷中电动机负荷比重较大,农业负荷多为灌溉负荷。统计表明,各种性质负荷的恒阻抗负荷比例 A_p, A_q , 恒电流负荷比例 B_p, B_q , 恒功率负荷比例 C_p, C_q 和电动机负荷比例 K_{pm}, K_{qm} 具有较为固定的分布规律^[21]。因此,可以根据各节点不同用电性质负荷构成比例得到近似的负荷模型参数。文中选取以上4种不同用电性质负荷占所接入负荷节点总负荷量的比例作为负荷节点的分类特征。一个样本周期内第 s ($s=1, 2, \dots, N_s$) 次采样得到的第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个负荷节点的负荷用电性质构成比例为 $X_{i,s} = (x_{is1}, x_{is2}, x_{is3}, x_{is4})$, 其中 $x_{is1}, x_{is2}, x_{is3}, x_{is4}$ 分别表示第 i 个负荷第 s 次采样时工业、商业、农业、居民负荷及其他所占

收稿日期:2017-09-13;修回日期:2017-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307078);江苏省“六大人才高峰”资助项目(XNY-020);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2017046)

的用电比例。

大规模电力系统数字仿真中,负荷节点可能是多个实际负荷的聚合,也可能是由多个元件聚合等效并折算到中、高压侧母线得到。对于前者,事先详细分析负荷节点所接每个实际负荷用户的用电性质,再根据采集到的各负荷用户的实时接入情况,计算得到该负荷节点的实时负荷用电性质构成比例进行负荷分类;对于后者,则需逐一分析各类元件的性质,将其归为某类用电性质的负荷,并按照每个元件的电压等级进行容量折算,再计入各元件的实时接入情况,计算得到等效负荷节点的实时负荷用电性质构成比例。

1.2 基于模糊 C 均值聚类算法的负荷分类

文中采用模糊 C 均值聚类算法,依据 1.1 节中所选负荷特征,用隶属度函数判断 n 个负荷节点的聚类情况,得到系统总的负荷分类数目为 C ,并求取每类的聚类中心,使得类内加权误差平方和最小。用 $[0,1]$ 间的隶属度 μ_{f_i} 来确定第 i 个负荷特征属于第 $f_i (f_i=1,2,\dots,C)$ 组聚类的程度,一个负荷点各组的隶属度总和为 1。

$$\sum_{f_i=1}^C \mu_{f_i} = 1 \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中: C 为聚类数; n 为负荷节点数; μ_{f_i} 为隶属度值。对负荷特征分类,优化 C 使得类内距离最小,类间距离最大。类内距离是指同类中与其类中心离差的平方和,表达式如下:

$$J_m = \sum_{i=1}^n \sum_{f_i=1}^C (\mu_{f_i})^m \|X_i - V_{f_i}\|^2 \quad (2)$$

不同类的类间距离函数表达式为:

$$d = \sum_{f_i, f_j=1}^C \|V_{f_i} - V_{f_j}\|^2 \quad (3)$$

式中: m 为权值, $1 \leq m \leq \infty$; X_i 为某次采样得到的第 i 个负荷的特征样本元素; V_{f_i}, V_{f_j} 分别为第 f_i 和 f_j 类负荷的聚类中心, $f_i \neq f_j, V_{f_i}$ 表示如下:

$$V_{f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{f_i})^m X_i}{\sum_{i=1}^n (\mu_{f_i})^m} \quad (4)$$

基于模糊 C 均值聚类算法的负荷分类步骤为:

步骤(1):初始化模糊 C 均值聚类算法各参数,选取模糊加权指数(文中取 $m=2$),定义聚类的类别数 $C (2 \leq C \leq \sqrt{n})$, n 为负荷样本数据的个数,迭代停止阈值 ε ,迭代次数 s ,定义 $V_{f_i}^0$ 为第 f_i 类负荷的初始聚类中心值;

步骤(2):计算由隶属度的值所组成的划分矩

阵 U ;

步骤(3):更新聚类中心值 $V_{f_i}^{s+1}$;

步骤(4):比较迭代结果是否满足收敛精度,即满足 $\|V_{f_i}^{s+1} - V_{f_i}^s\| < \varepsilon$,算法停止;若不满足误差收敛精度,转至步骤(2)。

2 各类负荷节点的统一识别

2.1 观测母线的选取

选择能充分、有效反映系统关键动态行为的母线作为观测对象,比较观测对象上实测与模型仿真响应的差异程度,作为模型识别的目标函数。扰动可能激发系统的多种振荡模式,与主导振荡模式相关的母线信息能够反映模型对系统关键动态过程的影响。此外,电压级别高或关键节点变电站,尤其是位于联络线上的电站,对系统有更广泛的影响。如果这些电站仿真响应曲线与测量信息接近,则临近母线的仿真结果也会与实测接近。因此,在电力系统模型识别中,应选择那些充分参与系统主导振荡模式,且位于联络线上并具有较高电压等级的关键变电站母线作为观测对象。基于 Prony 法从实测信号中提取系统振荡模式,过程如下。

电力系统是一个高阶非线性系统,对于小扰动,我们一般将系统在运行点附近线性化为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + b \Delta u \\ \Delta y_i = c_i \Delta x \end{cases} \quad i=1,2,\dots,m \quad (5)$$

式中: $\Delta \dot{x}$ 为状态向量; A 为系统状态矩阵; b 和 c_i 分别为输入、输出系数; $\Delta u, \Delta y_i$ 分别为输入和输出,二者间的传递函数如下:

$$G_i(s) = \frac{\Delta y_i(s)}{\Delta u(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (6)$$

式中: $R_i = c_i \varphi_i \psi_i b$, φ_i 和 ψ_i 分别为特征根 λ_i 的左、右特征向量。当采样间隔 Δt 恒定时, $y_j(t)$ 可以表示为下述离散形式:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n R_i z_i^k \quad (7)$$

式中: $z_i = \exp(\lambda_i \Delta t)$, $\lambda_i = \sigma_i + j\omega$ 为模型阶数; n 为未知量;第 i 个模式的参数 z_i ; R_i 可以通过 Prony 算法估算得到。

方程式(7)可以写成以下形式:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 z_i 满足关于未知系数 a_i 的 n 阶多项式的根:

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n z^0) = 0 \quad (9)$$

式(8)两侧左乘 $[-a_n, -a_{n-1}, \dots, -a_1, 1, 0, \dots, 0]$,可得到:

$$\begin{bmatrix} -a_n & -a_{n-1} & \dots & -a_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

式(8)左乘 $[0, -a_n, -a_{n-1}, \dots, -a_1, 1, 0, \dots, 0]$,等式右侧结果也为0。重复式(9)的计算可得下式:

$$\begin{bmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(n-1) & y(n-2) & \dots & y(0) \\ y(n) & y(n-1) & \dots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y(N-2) & y(N-3) & \dots & y(N-n-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

利用 Prony 法识别系统振荡可以同时对所有量测进行频率、阻尼比、模态的识别,概括为以下步骤:求解式(11)得到系数 a_i ,求解式(7)的根得到 z_i ,求解式(8)中的复数残差 R_i ,判别系统的主导振荡模式及模态,从而确定每个测点参与主导振荡的程度,进而选择模型识别的观测对象。

2.2 模型识别的目标函数

文中选用实际(或参考)系统与仿真(或模型)系统观测母线的电压均方误差作为负荷模型识别的目标函数 J 表达式为:

$$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{V_m(j) - V_s(j)}{V_m(j)} \right]^2} \quad (12)$$

式中: N 表示动态响应采样点数; $V_m(j)$ 表示观测母线的第 j 个电压实测值; $V_s(j)$ 表示仿真系统中观测母线的第 j 个电压响应。设置误差阈值 ε_j ,若 $J > \varepsilon_j$,则表明当前负荷模型无效,需要进行广域电力系统负荷的空间分类及识别;反之,则表明当前模型有效。

2.3 待识别参数的选取

由1.2节得到 C 类负荷,其中第 f_i 类负荷为 $\text{Load_area}_{f_i} = \{L_{f_i1}, L_{f_i2}, \dots, L_{f_i f_{in}}\}$, f_{in} 为属于第 f_i 类的负荷个数, $L_{f_i f_{in}}$ 为第 f_i 类负荷中的第 f_{in} 个负荷。将系统内同一类负荷均设为有相同的模型参数,设第 f_i 类负荷需识别的参数为 α_{f_i} ,含 m_{f_i} 个参数,则系统所需识别的总参数为 $\sum_{f_i=1}^C m_{f_i}$ 个:

$$\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{f_i}, \dots, \alpha_c\} =$$

$$\{\{\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1m_1}\}, \{\alpha_{21}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{2m_2}\}, \dots, \{\alpha_{f_i1}, \alpha_{f_i2}, \dots, \alpha_{f_i m_{f_i}}\}, \dots, \{\alpha_{c1}, \alpha_{c2}, \dots, \alpha_{cm_c}\}\} \quad (13)$$

目标函数 J 关于负荷模型参数的灵敏度越大,表明该参数对变量的影响越大,可以优先识别这些灵敏度大的参数;反之,那些灵敏度小的参数,其调整对仿真结果影响微弱,可以用典型值进行替代,从而减少系统待识别参数的个数,减少计算量。

2.4 参数优化算法

设置负荷初始值为 $\bar{\alpha}_0$,第 k 步迭代时以目标函数梯度方向作为迭代的搜索方向,迭代公式为:

$$\bar{\alpha}_{k+1} = \bar{\alpha}_k - \eta_k \nabla J(\bar{\alpha}_k) \quad (14)$$

式中: $\nabla J(\bar{\alpha}_k)$ 为目标函数在参数空间的梯度,利用数值摄动法计算该梯度; η_k 为步长因子,由黄金分割法来获取。误差阈值 ε_j 作为模型识别的启动和收敛判据。第 k 步迭代时,如 $J \leq \varepsilon_j$,则迭代收敛;否则,将继续迭代,直到求得满足迭代条件的使 J 取 $\min(J)$ 的负荷模型参数为止。电力系统空间负荷的分类及模型识别流程如图1所示。

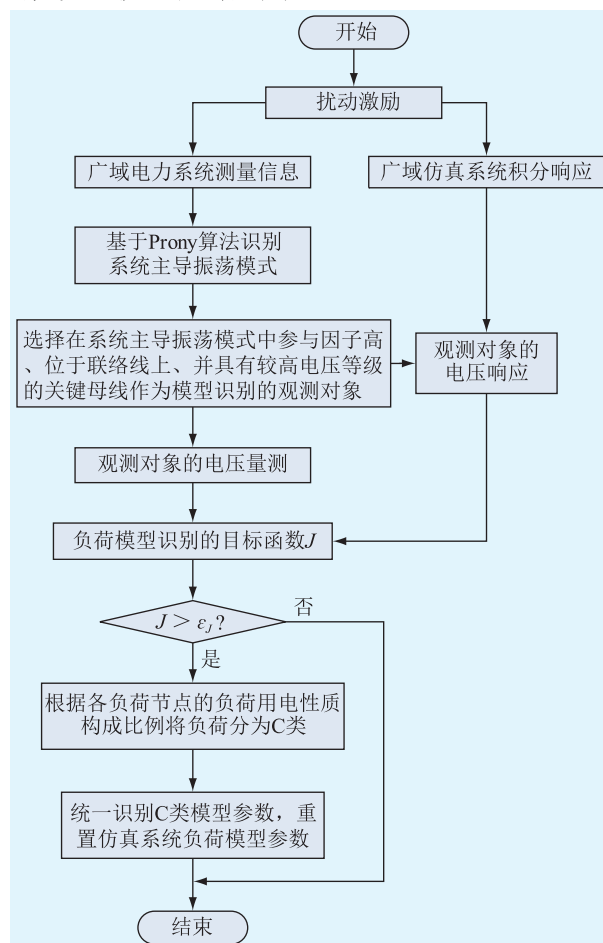


图1 电力系统负荷的识别模块流程

Fig.1 Identification sub-module of power system load model

3 算例仿真

3.1 IEEE 39 节点系统仿真

假设各节点感应电动机内部参数已明确,仅考虑负荷节点上各类静态负荷和动态负荷占总负荷大小的比例参数,其中 $C_p = 1 - A_p - B_p$, $C_q = 1 - A_q - B_q$ 。故所需识别的参数为 A_p , A_q , B_p , B_q , K_{pm} , K_{qm} 。选用 IEEE 39 节点系统进行分析,选择负荷节点 3, 15, 16, 18, 21, 25—29 为研究对象,它们各自的负荷用电性质构成比例如表 1 所示,根据文献[20]中各类负荷中静态和动态负荷的典型比例数据,得到这些负荷的综合模型参数,并将相应的系统仿真结果作为参考系统的实测值。

表 1 IEEE 39 节点系统的负荷用电性质构成比例
Tab. 1 Proportion of consumption component of loads of IEEE 39-bus system

负荷节点	工业负荷	商业负荷	农业负荷	居民及其他
3	0.80	0.20	0.00	0.00
15	0.05	0.00	0.65	0.30
16	0.50	0.25	0.20	0.05
18	0.20	0.50	0.15	0.15
21	0.65	0.05	0.30	0.00
25	0.55	0.20	0.05	0.20
26	0.20	0.20	0.55	0.05
27	0.00	0.20	0.60	0.20
28	0.45	0.20	0.15	0.20
29	0.25	0.25	0.25	0.25

基于文中所提特征对负荷分类并识别得到的负荷模型记为模型系统 I。为检验文中所提分类方法的优劣,选取了另外两种负荷分类策略,其一为按负荷间电气距离的大小分类,用该方法分类识别得到的负荷模型记为模型系统 II;其二为负荷节点不分类,即将待研究负荷节点设定为一类,且各节点具有相同的模型参数,识别得到的模型记为模型系统 III。设扰动场景为线路 16—19 距首端 20% 处发生三相短路,故障持续 0.04 s。将系统中所有电压母线作为候选观察对象,对其响应曲线进行 Prony 振荡模式计算,结果显示系统发生约 2.5 Hz 的区间振荡,振荡模式如图 2 所示,多条母线参与程度均较为接近,其中红色为母线 BUS16,绿色和蓝色代表其余母线,因该算例系统无法体现电压的有名值情况,因此,选取了参与振荡程度较好且跌落最严重的母线 BUS16 作为系统区域负荷模型识别的观测母线。

根据各节点负荷用电性质构成比例,基于聚类算法将负荷分为 3 类:第 I 类为负荷 3, 16, 21, 25;第 II 类为负荷 15, 26, 27;第 III 类为负荷 18, 28,

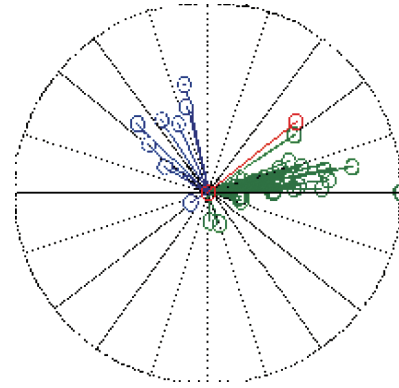


图 2 系统主导区间振荡模式分析

Fig.2 Mode shape of dominant interarea mode

29。每类负荷待识别参数为 A_p , B_p , A_q , B_q , K_{pm} , K_{qm} ,经灵敏度计算,参数 A_p , K_{pm} , K_{qm} 的灵敏度最高,将它们选取为待识别参数,则系统需识别的负荷参数共 9 个,为 A_{p/f_i} , K_{pm/f_i} , K_{qm/f_i} ($f_i = 1, 2, 3$),其余参数取典型参数值代替,模型系统 I 的负荷参数识别结果见表 2。

表 2 按负荷用电性质比例分类识别的负荷参数

Tab. 2 Identification results of load model using the proportion of load consumption component as the classification characteristics

参数	识别值	参数	识别值
A_{p1}	0.360 0	K_{pm3}	0.185 0
A_{p2}	0.395 0	K_{qm1}	0.365 0
A_{p3}	0.321 0	K_{qm2}	0.224 0
K_{pm1}	0.365 0	K_{qm3}	0.305 0
K_{pm2}	0.220 0	—	—

依据负荷节点间的电气距离将负荷分类为:3, 15, 21, 26, 27 为第 I 类;16, 18, 25 为第 II 类;28, 29 为第 III 类。在相同的扰动场景下进行参数识别,得到模型系统 II 的负荷参数结果。设所有负荷都有相同的模型参数,在相同的扰动场景下进行参数识别,得到模型系统 III 的负荷参数结果。图 3 给出了模型系统 I—III 与参考系统的电压响应。结果表明,不分类识别对应的仿真响应误差最大,以节点间电气距离分类识别得到的结果,其误差次之,以负荷用电性质特征分类识别的模型,其响应与参考系统的电压轨迹拟合很好。

在某一特定运行场景下识别得到的模型参数能否在其他场景下也较好的反映元件动态,即模型的适用性问题,需要进一步检验。各负荷大小及组成保持不变,分别改变系统扰动强度、扰动位置、系统潮流分布和网络拓扑结构,检验在某运行场景中识别得到的模型系统 I—III 的参数对其他运行场景的适用性。

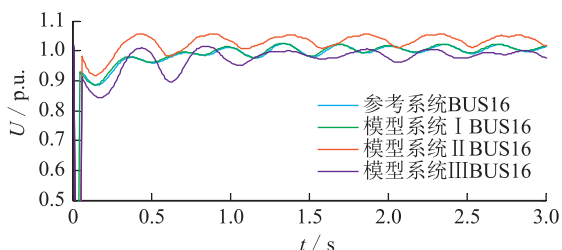


图3 参考系统和模型系统的观测对象电压响应

Fig.3 Voltage response of reference and model systems

(1) 扰动强度影响的检验。扰动场景为线路16—15距首端30%处发生三相短路,扰动持续时间 τ 。 τ 分别取为0.04 s,0.045 s,0.05 s。BUS15为参考系统观测母线,当 $\tau=0.04$ s时的电压响应曲线如图4所示,模型系统I与参考系统的电压响应基本重合,模型系统II的电压响应与参考系统拟合略差,而模型系统III的响应曲线与参考系统响应差别最大,其主导振荡模式频率明显增加。表3给出了 τ 取不同值时的响应误差 J ,随着扰动强度的增加,各模型系统误差值 J 都在不断增大,也显示出模型系统I的误差值 J 总能保持在相对较小的范围,而模型系统III的误差值最大。

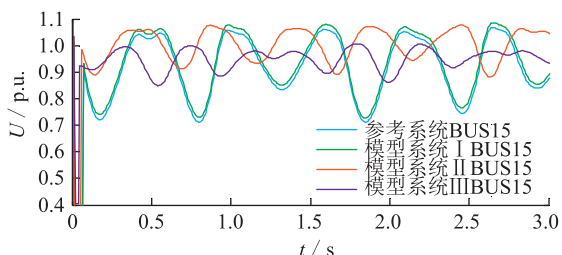
图4 $\tau=0.04$ s时模型与参考系统电压响应Fig.4 Voltage response of model and reference system while $\tau=0.04$ s

表3 扰动强度变化时的响应误差

Tab.3 Response error changed with the duration of disturbance

扰动持续时间 τ/s	模型 I 误差值 J	模型 II 误差值 J	模型 III 误差值 J
0.04	0.000 214	0.000 767	0.002 116
0.045	0.000 221	0.000 865	0.002 447
0.05	0.000 345	0.001 052	0.006 232

(2) 扰动位置影响的检验。扰动场景取为线路16—15距首端 $x\%$ 处发生三相短路,持续时间为0.04 s。分别取 x 为10, 20, 50, BUS15仍为参考系统观测母线。图5给出了当 $x=10$ 时的电压响应。表4给出了故障发生在不同位置时各模型系统与参考系统的电压误差值 J 。模型系统I与参考系统电压响应的接近程度明显优于模型系统II和III,且当

扰动地点变化时,模型系统I的适用性更好。

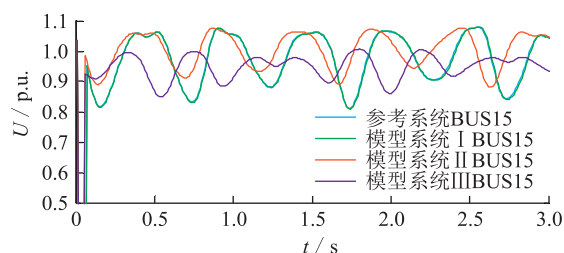
图5 $x=10$ 时模型与参考系统电压响应Fig.5 Voltage response of model and reference system while $x=10$

表4 扰动位置变化时的响应误差

Tab.4 Response error changed with the disturbance location

扰动故障位置 $x/\%$	模型 I 误差值 J	模型 II 误差值 J	模型 III 误差值 J
10	0.000 103	0.001 321	0.003 642
20	0.000 271	0.005 765	0.023 352
50	0.000 174	0.013 549	0.049 211

(3) 系统潮流分布影响的检验。在原始系统的基础上,仅改变部分机组出力,如表5所示,得到系统的潮流分布I—III,记初始有功功率为 P_0 ,调整后的有功功率为 P 。扰动场景仍为线路16—15距首端30%处发生三相短路故障,持续时间为0.04 s, BUS15为观测母线。图6给出了系统潮流分布为情况I时模型系统和参考系统的电压响应,表6给出了当潮流分布改变后,各模型系统与参考系统的电压误差值 J 。结果显示,虽然潮流分布变化,但模型系统I仍然可以很好的反映参考系统的动态,模型系统II和III的响应却与参考系统有较大差距。

表5 潮流分布情况I—III

Tab.5 Power flow distribution I—III

有功功率	潮流分布 I		潮流分布 II		潮流分布 III	
	Gen30	Gen31	Gen37	Gen38	Gen33	Gen34
P_0	3.2	4.2	5.4	6.3	5.2	8.8
P	2.2	5.2	7.4	4.3	4.4	9.6

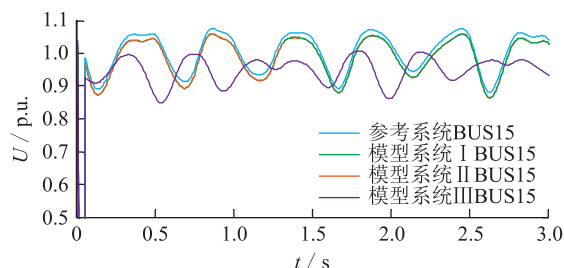


图6 潮流分布I下模型与参考系统电压响应

Fig.6 Voltage response of model and reference system with flow distribution I

表6 潮流分布变化时的响应误差

Tab. 6 Response error with flow distribution changed

潮流分布情况	I	II	III
模型 I 误差值 J	0.000 021	0.000 108	0.000 067
模型 II 误差值 J	0.001 781	0.002 109	0.003 215
模型 III 误差值 J	0.012 192	0.012 538	0.036 429

(4) 网络拓扑结构影响的检验。在原始系统基础上仅切除线路 5—6 得到拓扑结构 I, 仅切除线路 13—14 得到拓扑结构 II, 仅切除线路 6—11 得到拓扑结构 III。扰动场景为线路 16—15 距首端 10% 处发生三相短路, 扰动持续时间为 0.03 s。BUS15 为观测母线。图 7 给出了拓扑结构 I 时系统的电压响应, 表 7 给出了当拓扑改变后, 各模型系统与参考系统的电压误差 J 。结果表明模型系统 I 适应其他拓扑结构的能力更强。

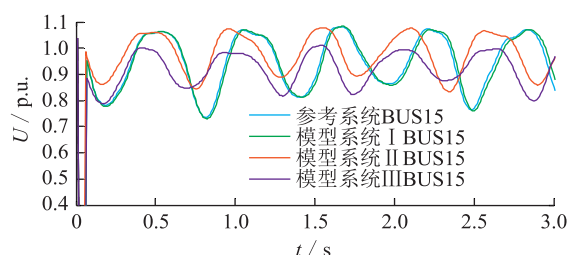


图7 拓扑结构 I 下模型与参考系统电压响应

Fig.7 Voltage response of model and reference system with grid topology I

表7 网络拓扑结构变化时的响应误差

Tab. 7 Response error changed with the grid topology

拓扑结构情况	I	II	III
模型 I 误差值 J	0.000 108	0.000 189	0.000 101
模型 II 误差值 J	0.003 776	0.008 471	0.053 626
模型 III 误差值 J	0.005 891	0.079 166	0.065 793

综上, 当保持各节点负荷的大小和组成不变, 仅改变系统其他运行条件, 按负荷用电性质构成比例分类得到的参数识别结果具有良好的精度和适用能力, 远优于按负荷节点所属区域分类和不分类两种情况下的识别结果, 而不分类的负荷模型识别结果, 其精度和适用性最差。

3.2 IEEE 118 节点系统仿真

本节选取 IEEE 118 节点系统再次对上述分类识别方法进行检验。选取 27 个负荷节点作为研究对象, 各节点负荷用电性质构成比例如表 8 所示。扰动场景为线路 6—7 距首端母线 30% 处发生三相短路, 持续时间为 0.05 s, 将系统中 220 kV 以上电压母线作为候选观察对象, 对其响应曲线进行 Prony 振荡模式计算, 结果显示系统发生约 0.4 Hz 的区间振荡, 振荡模式如图 8 所示, 其中红色为 500 kV 母

线 BUS20, 位于区域间的联络线上, 绿色和蓝色代表其余母线, 鉴于 BUS20 充分参与了系统的区间振荡, 且电压等级高, 因此将其选为系统区域负荷模型识别的观测母线。以负荷用电性质构成比例分类, 结果如表 9 所示, 经过灵敏度计算, 参数 A_p , B_p , K_{pm} 的灵敏度较大, 表 10 给出了模型参数的识别结果。

表8 IEEE 118 节点系统的负荷用电性质构成比例

Tab. 8 Proportion of load consumption component of loads in IEEE 118-bus system

负荷节点	工业负荷	商业负荷	农业负荷	居民及其他
1	0.88	0.04	0.06	0.02
2	0.69	0.07	0.11	0.13
3	0.15	0.26	0.22	0.37
4	0.25	0.15	0.14	0.46
6	0.62	0.17	0.06	0.15
7	0.18	0.66	0.05	0.11
11	0.02	0.71	0.16	0.01
12	0.75	0.12	0.03	0.10
13	0.18	0.06	0.14	0.62
14	0.21	0.03	0.70	0.06
15	0.81	0.02	0.10	0.07
16	0.89	0.02	0.02	0.07
17	0.23	0.74	0.01	0.02
18	0.18	0.67	0.05	0.10
19	0.04	0.26	0.45	0.25
20	0.01	0.40	0.54	0.05
21	0.22	0.15	0.52	0.11
22	0.16	0.07	0.60	0.17
23	0.24	0.29	0.20	0.27
27	0.32	0.26	0.28	0.14
28	0.29	0.16	0.05	0.50
29	0.02	0.17	0.57	0.24
31	0.83	0.02	0.07	0.08
32	0.02	0.10	0.78	0.10
114	0.66	0.16	0.09	0.09
115	0.69	0.12	0.08	0.11
117	0.04	0.85	0.07	0.04

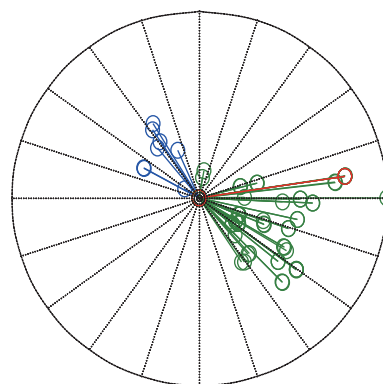


图8 系统主导区间振荡模式分析

Fig.8 Mode shape of dominant interarea mode

表9 根据负荷用电性质构成比例进行分类

Tab. 9 Load classification based on proportion of load consumption component

类别	第 I 类	第 II 类	第 III 类	第 IV 类	第 V 类
负荷	1,2,6,12,	7,11,17,	14,20,21,	4,13,28	3,19,
节点	15,16,31, 114,115	18,117	22,29,32		23,27

表10 按负荷用电性质比例分类识别的负荷参数

Tab. 10 Identification results of load model using the proportion of load consumption component as the classification characteristics

参数	识别值	参数	识别值	参数	识别值
A_{p1}	0.341 6	B_{p1}	0.280 0	K_{pm1}	0.675 0
A_{p2}	0.301 5	B_{p2}	0.324 8	K_{pm2}	0.453 2
A_{p3}	0.284 4	B_{p3}	0.246 8	K_{pm3}	0.358 4
A_{p4}	0.325 0	B_{p4}	0.277 2	K_{pm4}	0.435 5
A_{p5}	0.265 5	B_{p5}	0.318 6	K_{pm5}	0.256 9

同4.1节,选用不同分类特征对负荷分类识别得到的模型系统响应曲线如图9所示。通过计算,模型系统I、II和III与参考系统的响应误差值 J 分别为0.000 401,0.000 913,0.001 124,该算例进一步说明文中所提负荷分类识别方法的有效性。

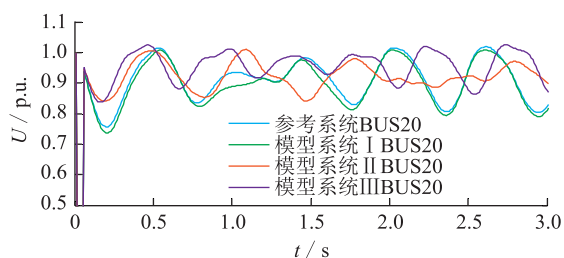


图9 参考系统和模型系统的电压响应

Fig.9 Voltage response of reference and model system

5 结语

选取不同用电性质负荷占所接入负荷节点总负荷量的比例作为负荷节点的分类特征,采用模糊C均值聚类算法对负荷节点进行分类,认为同一类负荷节点具有相同的负荷参数,进行负荷模型识别。为了在不增大观察维度的前提下充分反映区域负荷对电网动态的整体影响,利用 Prony 算法从实测信号中提取系统振荡模式,并识别其中的主导振荡模式,用参与主导振荡模式的高电压级别母线作为观测母线,并用观测母线的电压建立参数识别的目标函数及主导参数的选择方法,用优化算法对主导参数寻优,获得负荷模型。在 IEEE 39 节点和 IEEE 118 节点系统上进行检验,通过多种分类策略下的负荷参数识别结果优劣的比较,表明按负荷用电性质构成比例分类识别的方法,得到的负荷模型

识别结果具有更好的适用性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WALVE K. Modeling of power system components at severe disturbances[C]//CIGRE Meeting, Paris, France, 1986.
- [3] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [4] VENKATASUBRAMANIAN V, LI Y. Analysis of 1996 Western American electric blackouts[C]//Bulk Power System Dynamics and Control-VI, Cortina, Ampezzo, Italy, 2004.
- [5] 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.
- [6] CHICCO G. Overview and performance assessment of the clustering methods for electrical load pattern grouping[J]. Energy, 2012, 42(1):68-80.
- [7] 鞠平,金艳,吴峰,等. 综合负荷特性的分类综合方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1):64-68.
JU Ping, JING Yan, WU Feng, et al. Studies on classification and synthesis of composite dynamic loads [J]. Automation of electric power systems, 2004, 28(1):64-68.
- [8] MAHMOUDI-KOHAN N. An annual framework for clustering-based pricing for an electricity retailer[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(9):1042-1048.
- [9] 郑晓雨,贺仁睦,马进,等. 基于轨迹灵敏度的负荷分类[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9):145-150.
ZHENG Xiaoyu, HE Renmu, MA Jin, et al. A method of load classification based on the trajectory sensitivity [J]. Transactions of china electro technical society, 2010, 25(9): 145-150.
- [10] 李欣然,林舜江,刘杨华,等. 基于实测响应空间的负荷动态特性分类原理与方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8):39-44.
LI Xinran, LIN Shunjiang, LIU Yanghua, et al. A new classification method for aggregate load dynamic characteristics based on field measured response [J]. Proceedings of the CSEE. 2006, 26(8):39-44.
- [11] 石景海,贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报. 2004, 24(4):85-90.
SHI Jinghai, HE Renmu. Load time-variantion study in dynamic load modeling[J]. Proceedings of the CSEE. 2004,

- 24(4):85-90.
- [12] 张红斌, 贺仁睦, 刘应梅. 感应电动机负荷模型参数灵敏度分析及参数辨识策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 10-14.
ZHANG Hongbing, HE Renmu, LIU Yingmei. Analysis on parameter analytic sensitivity of induction motor load model and parameter identification strategy [J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 10-14.
- [13] 鞠平, 陈谦, 熊传平, 等. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 6-9.
JU Ping, CHEN Qian, XIONG Chuanping, et al. Load clustering and synthetic modeling based on daily load curves [J]. Automation of electric power systems, 2006, 30(16): 6-9.
- [14] WANG Z S, BIAN S R, et al. The load characteristics classification and synthesis of substations in large area power grid[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2013, 48(1): 71-82.
- [15] 汪小明, 刘涤尘, 吴军, 等. 电力系统暂态稳定分析广义负荷模型[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 44-48.
WANG Xiaoming, LIU Dichen, WU Jun, et al. A generalized load model for transient stability analysis of power system [J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 44-48.
- [16] 朱建全, 李颖, 谭伟. 基于特性融合的电力负荷建模[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1358-1364.
ZHU Jianquan, LI Ying, TAN Wei. Characteristic fusion based on electric load modeling [J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1358-1364.
- [17] 申定辉, 于晓蕾, 吴丹. 基于混合高斯模型的配电网负荷伪量测权重优化算法[J]. 广东电力, 2016, 29(5): 86-91, 123.
SHEN Dinghui, YU Xiaolei, WU Dan. Optimization algorithm for pseudo measurement weight of power distribution network load based on Gaussian mixture model[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(5): 86-91, 123.
- [18] HAN D, MA J, HE R M, et al. A real application of measurement-based load modeling in large-scale power grids and its validation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1756-1764.
- [19] 黄梅, 贺仁睦, 杨少兵, 等. 东北电网负荷模型分类与应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 85-87.
HUANG Mei, HE Renmu, YANG Shaobing, et al. Application of load model classification in northeast power network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 85-87.
- [20] 张树卿, 韩英铎, 于松泰, 等. 区域综合负荷动态等值参数在线测辨关键技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 114-121.
ZHENG Shuqing, HAN Yingduo, YU Songtai, et al. Key techniques for composite load area integral equivalence and online parameter identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 114-121.
- [21] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
JU Ping. Power system load modeling theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2010.

作者简介:



郝丽丽

郝丽丽(1979—),女,博士,副教授,研究方向为电力系统安全稳定控制(E-mail: lili_hao@163.com);

汪成根(1981—),男,博士,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析工作(E-mail: 9168623@qq.com);

方鑫(1987—),男,硕士,工程师,从事智能电网相关工作。

Study on the Regional Load Model Identification Based on the Dominant Oscillation Model Extraction of Power System

HAO Lili¹, WANG Chenggen², FANG Xing², TAN Yijun¹, HOU Jiabin¹, XIONG Haibo³

(1. College of Electrical Engineering & Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. State Grid Fengxian Power Supply Company, Fengxian 221700, China)

Abstract: Proportion of load consumption component is chosen as a characteristic of each load using for load classification and model identification in this paper. The crucial buses with high-voltage which fully participate in the system dominant oscillation mode are chosen as the observed objects in regional load model identification. The objective function of load model identification is established using the voltage of the observed objects. Gradient optimization algorithm is used for optimal value searching. Simulation results verifies the proposed method, and three load classification strategies including miscategorized method, classification according to the electrical distance between two loads and classification according to the proportion of load consumption component are compared with simulation tests. The results show that the load identification value based on classification according to the proportion of load consumption component is more accurate and applicable to other occasions.

Key words: regional load; model identification; dominant oscillation mode; proportion of load consumption component

(编辑 钱悦)