

基于广域测量系统和 CELL 理论的强迫振荡在线感知与定位

蒋长江¹, 刘俊勇¹, 刘友波¹, 苟 竞¹, 陈 晨¹, 刘若凡¹, BAZARGAN Masoud²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 阿尔斯通电网研究与技术中心, 英国 斯塔福德 ST17 4LX)

摘要: 为了快速准确地定位电网强迫功率扰动源, 根据“先感知, 再分类, 后定位”的思想, 提出基于广域测量系统的空间特征椭球和决策树混合定位扰动源的新方法。通过对比分析不同强迫功率振荡信号, 将实测的不同受扰轨迹信息映射到多维特征椭球, 通过计算椭球的空间形状及其形态参数变化, 实现强迫功率振荡态势的定量化描述; 在抽取空间椭球特征参数的基础上, 将不同扰动下强迫振荡瞬态阶段的特征椭球参数形成决策树样本集, 利用 C4.5 算法离线训练, 在线匹配以快速分类定位扰动源。算例结果表明, 该方法可以在强迫功率振荡瞬态阶段快速分类定位不同扰动源, 定位振荡主要参与机组和负荷的准确率很高。

关键词: 强迫振荡; 扰动源定位; 广域测量系统; 特征椭球; 决策树

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.021

0 引言

随着以特高压电网为骨架的全网互联的推进, 电网规模日益扩大, 大型互联电网的高非线性与强动态耦合性导致近年低频振荡现象越来越频繁。强迫功率振荡作为特殊的低频振荡在实际电网中多次发生^[1], 严重地影响了电网安全稳定运行, 降低了联络线输电能力。常规的负阻尼振荡控制措施很难抑制强迫功率振荡, 快速准确切除强迫功率扰动源是现有最好的抑制方法。

随着相位测量单元 PMU (Phasor Measurement Units) 在实时监测电网动态行为的应用, 相关学者提出利用广域测量系统在线识别定位强迫功率扰动源。文献[2]提出运用混合动态仿真技术进行扰动源

定位。文献[3-6]在能量函数的基础上, 利用广域测量数据计算能量流向定位扰动源, 取得了较好的效果。文献[7]利用 PMU 采集不同地点的电压数据, 提出利用行波检测定位扰动源。文献[8]提出利用动态近似简化轨迹在线检测强迫功率振荡, 但只针对单一的有功振荡轨迹进行检测, 很难满足全局的动态可视化要求。上述几种方法丰富了基于广域测量系统在线识别定位强迫扰动源的研究, 但在强迫振荡发生时, 大量的受扰信息涌入调度中心, 因此如何简化轨迹信息, 提高全局的动态可视化能力, 利用提取的关键特征量先感知再定位扰动源的混合方法需要进一步研究。

通过深入分析强迫振荡信号特征与关键属性, 本文提出基于广域系统实测数据的特征椭球 CELL (Characteristic ELLipsoid) 和决策树 DT (Decision Tree) 的扰动源在线感知与定位混合算法。该算法首先将 PMU 实时采集的不同受扰轨迹信息映射到多维空间, 通过观察 CELL 的形状和参数变化, 在线感知强

收稿日期: 2013-12-13; 修回日期: 2014-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261130472); 英国 ALSTOM 公司国际科研合作项目(11H0207)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51261130472) and the British Company ALSTOM International Research Cooperation Project(11H0207)

Islanding detection based on positive feedback of voltage unbalance factor

SUN Bo, ZHENG Jianyong, MEI Jun

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A method of islanding detection based on the positive feedback of voltage unbalance factor is proposed to realize the nondestructive detection without dead-zone. During islanding, the positive feedback circuit will enlarge the voltage unbalance factor of PCC (Point of Common Coupling), which can be calculated to detect the islanding. The duration of the voltage unbalance factor greater than a preset threshold ε^* is introduced as a criterion and a true islanding is detected only when it is larger than the preset time, which is used to avoid the incorrect operation under the false islanding situation. The simulative results indicate that, the proposed method detects the islanding rapidly and accurately under the most severe conditions defined in IEEE Std.1547 and the incorrect operations under false islanding condition are avoided.

Key words: islanding detection; positive feedback; active current; voltage unbalance factor; false islanding

迫功率振荡态势。在此基础上,针对不同的电网工况,对各个发电机和负荷施加强迫功率扰动源,通过决策树 C4.5 算法对各个 CELL 参数进行离线训练,在线匹配快速分类定位扰动源。最后,通过 IEEE 39 节点算例验证了该方法的正确性和有效性。

1 不同类型强迫功率振荡信号特点

以经典的单机无穷大系统为例,假设发电机机械功率周期性扰动为 $\Delta P_T = \Delta P_{Tm} \sin(\omega t)$, 负荷有功功率周期性扰动为 $\Delta P_L = \Delta P_{Lm} \sin(\omega t)$, 其中 ΔP_{Tm} 、 ΔP_{Lm} 为扰动的幅值, ω 为周期扰动源的角频率。发电机线性化的转子运动方程为:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{K_D}{\omega_0} \frac{d \Delta \delta}{dt} + K_S \Delta \delta = \Delta P_T - \Delta P_e \quad (1)$$

其中, T_J 为发电机惯性时间常数; $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为系统基准频率; δ 为发电机功角; K_D 为发电机阻尼系数; K_S 为发电机同步转矩系数; ΔP_e 为电磁功率周期扰动; ΔP_T 为机械功率周期扰动。

当系统发电机仅受机械功率扰动时, 则 $\Delta P_e = 0$, 整理得:

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\xi\omega_n \Delta \dot{\delta} + \omega_n^2 \Delta \delta = \Delta P_{Tm} \sin(\omega t) \quad (2)$$

其中, 系统固有振荡角频率 $\omega_n = \sqrt{\omega_0 K_S / T_J}$; 阻尼比 $\xi = K_D / (2\sqrt{\omega_0 K_S T_J})$ 。文献[9]指出此方程是一个二阶微分方程, 其解由通解和特解构成。设特解为 $\Delta \delta(t) = B_T \sin(\omega t - \varphi)$, 代入式(2), 则由机械功率扰动引起的强迫功率振荡幅值为:

$$B_T = \frac{\Delta P_{Tm} / K_S}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega / \omega_n)^2}} \quad (3)$$

当系统只受周期性负荷波动时, 则 $\Delta P_T = 0$ 。负荷的周期性波动, 扰动源没有直接作用于转子, 而是通过改变发电机转子输出的有功功率间接改变转子转速, 引起系统强迫功率振荡^[10]。因此可设 $\Delta P_e = C_d \Delta P_L$, 其中 C_d 是负荷扰动机组功率分配因子, $0 < C_d < 1$ 。此时线性化转子运动方程为:

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\xi\omega_n \Delta \dot{\delta} + \omega_n^2 \Delta \delta = -C_d \Delta P_{Lm} \sin(\omega t) \quad (4)$$

式(4)与式(2)有相似的形式, 故由负荷侧引起的强迫功率振荡幅值为:

$$B_L = \frac{-C_d \Delta P_{Lm} / K_S}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega / \omega_n)^2}} \quad (5)$$

通过对比式(3)和式(5)发现, 当发电机侧和负荷侧受到相同的周期性扰动时, 发电机引起的振荡幅值要大于负荷引起的振荡幅值, 即 $B_T > B_L$ 。当发生强迫振荡时, 不同发电机和负荷对系统的强迫振荡的影响因子不同^[10], 系统各个状态量发生变化, 这些状态量反映了不同扰动源的特性。以上为基于 CELL 构建决策树的方法在瞬态阶段分类定位扰动源提供

了理论依据。

2 基于 CELL 的强迫振荡在线感知算法

2.1 CELL 理论原理

CELL 是一个包含系统特定部分轨迹的多维最小封闭椭球, 通过椭球的性质, 如椭球形状、体积、轴半径、体积变化率等, 来判断系统的状态和动态行为^[11]。假设系统由 m 个 PMU 观测数据形成 CELL, 则 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m \in \mathbf{R}^n$, 其中 n 为可观测 PMU 的个数, \mathbf{R}^n 对应 n 维相位测量数据空间, m 为 PMU 采集的特定有序数据的个数, 如节点电压幅值、相角、频率或支路的功率等。令 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_m]$, 则 \mathbf{Y} 是一个 $n \times m$ 维矩阵。矩阵 \mathbf{Y} 包含系统在受扰时的全部数据集, 其反映了系统的动态行为。则 CELL 的数学定义如下:

$$\mathbf{E}_{A,c} = \{\mathbf{y}_i \in \mathbf{R}^n \mid (\mathbf{y}_i - \mathbf{c})^T \mathbf{A} (\mathbf{y}_i - \mathbf{c}) \leq 1\} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{E}_{A,c}$ 为 n 维 CELL; 向量 \mathbf{c} 为 CELL 的中心; 正定矩阵 \mathbf{A} 决定了椭球的形状和方向。

2.2 CELL 理论的优化求解

由上可知, 需要一个优化算法求解最小封闭椭球。该问题等效为求解矩阵 \mathbf{A} 最大行列式值的问题, 其数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{A}} & \frac{1}{\sqrt{\det \mathbf{A}}} \\ \text{s.t.} & (\mathbf{y}_i - \mathbf{c})^T \mathbf{A} (\mathbf{y}_i - \mathbf{c}) \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (7)$$

本文采用文献[12]所提 KY(Kumar and Yildirim) 一阶算法。KY 算法把原问题用对偶问题描述:

$$\begin{aligned} \min_s & (-\ln(\det \mathbf{V}(s))) \\ \text{s.t.} & \mathbf{e}^T \mathbf{s} = 1, \quad s \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^n$ 为对偶问题的优化目标; \mathbf{e} 为全 1 的列向量; $\mathbf{V}(s) = \sum_{i=1}^m s_i \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^T$ 。该算法时间复杂度为 $\xi(n^2 / \varepsilon)$, ε 为算法精度。通过 KY 算法可以求得形成最小封闭椭球的中心向量 \mathbf{c} 和正定矩阵 \mathbf{A} 。

2.3 CELL 的性质

由于 CELL 包含所有反映系统动态行为的数据, 故系统的动态变化可以用椭球的形态和参数来定量描述。其特征量如下。

a. 椭球体积。

CELL 的体积表达式如下:

$$V(\mathbf{E}_{A,c}) = \frac{\pi^{n/2}}{\Gamma\left(\frac{n+2}{2}\right)} \frac{1}{\sqrt{\det \mathbf{A}}} \quad (9)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为标准的伽马函数。当系统受扰时, 椭球所包含的数据会波动, 椭球体积会改变。因此椭球体积用于衡量系统受到扰动的状态。

b. 椭球的中心。

设 n 维 CELL 的中心点为 $\mathbf{O}=[\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \dots, \mathbf{O}_n]$, 其中 \mathbf{O}_j 为第 j 个 PMU 采集数据平均值, $\mathbf{O}_j=\sum_{i=1}^m \mathbf{y}_i/m$ 。CELL 的中心点运动轨迹反映了系统的动态过程。

c. 椭球的偏心率。

偏心率表达式如下:

$$e_p = \sqrt{(r_{\max}/r_{\min})^2 - 1} \quad (10)$$

其中, r_{\max} 和 r_{\min} 分别为 CELL 的长半轴和短半轴。椭球偏心率用于反映受扰动后系统偏离球形的程度。

d. 椭球体积变化率。

将椭球的体积变化率作为监视系统动态行为的指标,并将其称为系统广域阻尼,即 $D_e(t)=\Delta V/\Delta t$ 。当 $D_e>0$ 时,表明系统正在受到扰动;当 $D_e<0$ 时,表明扰动正在消失。

e. 多维椭球投影子空间。

对求得的实对称正定矩阵 \mathbf{A} 进行奇异分解:

$$\mathbf{A}=\mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{U}^T \quad (11)$$

其中, $\mathbf{D}=\text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为矩阵 \mathbf{A} 的特征值。单位向量 \mathbf{E} 和 \mathbf{U}^T 代表了椭球的轴方向。 $\lambda_1^{-1/2}, \lambda_2^{-1/2}, \dots, \lambda_n^{-1/2}$ 代表了椭球的不同维度轴半径,其最大值为长轴,最小值为短轴^[13]。如图 1 所示,最小封闭三维椭球包含的 3 个不同 PMU 采集的全部数据 (X, Y, Z) , 将其投影在各个子平面就是对应的受扰轨迹。其中 R_{\max}, R_{\min} 分别表示椭球的长半轴和短半轴;中心点 \mathbf{O}_3 的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) 。因此椭球的各个特征量可以简化复杂的轨迹信息,定量地描述系统动态行为。

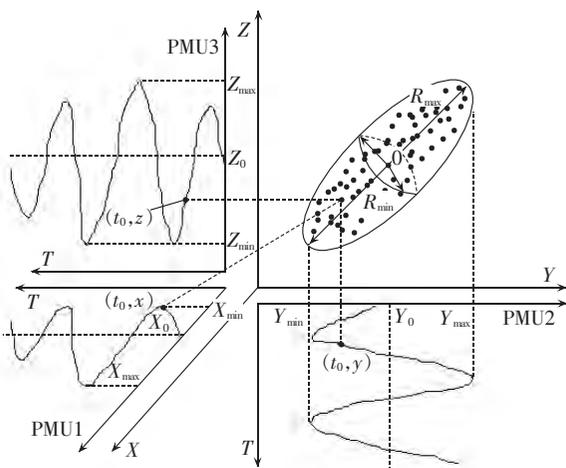


图 1 各个轴平面的椭球投影

Fig.1 Projections of CELL on different axial planes

2.4 基于 CELL 理论的强迫功率振荡检测原理

理论情况下,当电网正常运行时,联络线有功功率不会改变,CELL 各参数为 0。电网发生强迫功率振荡时,在瞬态阶段系统呈现增幅振荡,此时 CELL

的形状也随之改变,椭球的相关参数将发生突变,由于不同受扰轨迹的瞬态响应时间不同,导致 CELL 参数在瞬态阶段凸显,易于决策树捕捉变化特征,从而进行分类定位。在稳态阶段系统呈现等幅振荡,此时椭球的形状将不变且趋于圆球形状,椭球的各个参数也趋于稳定值。在扰动源切除后,系统减幅振荡,由于不同受扰轨迹衰减时间不同,椭球参数再次凸显。振荡消除后,椭球各个参数又趋于 0。因此可以根据 CELL 的形状和各个参数的变化在线感知强迫功率振荡态势。

实际工程应用时,利用 PMU 采集受扰轨迹实时电气信号,运用 CELL 理论在线计算椭球参数。在远端的监控中心,可以显示三维椭球的动态变化过程以及椭球参数的变化趋势。根据 CELL 的形状和参数特征在线监测和识别强迫功率振荡。CELL 理论可以将复杂的受扰轨迹信息简化为明确的单一特征轨迹信息,从而提高调度员对系统动态行为的态势感知能力。同时,各项椭球参数因其可靠捕捉强迫振荡轨迹变化特征的能力,还可方便地用于构建基于样本规律挖掘的决策树以定位扰动源。

3 基于 CELL 与决策树混合算法的强迫扰动源分类与定位

3.1 决策树概念

决策树是一种对样本进行分类的数据挖掘方法,构建决策树是一个复杂的机器学习过程^[13]。决策树由一系列结点和分枝组成,从决策树的根结点到叶结点的每条路径都对应着一条 IF-THEN 规则。本文采用决策树 C4.5 算法^[16],该算法的核心思想是利用信息熵原理,选择信息增益率最大的属性作为分类属性,递归地构造决策树的分枝,完成决策树的构造。

3.2 样本的生成

高质量的样本集是构造性能良好的决策树的基础。为了获得大量有效样本,本文模拟电网不同工况,在每个发电机和负荷处设置不同的周期性扰动源,通过仿真模拟 PMU 实时采集的各类关键电气量轨迹,实际工程应用时,采集实际 PMU 布点数据。将采集数据映射到多维空间,通过 KY 算法找到最小封闭椭球并计算 CELL 参数,以形成椭球特征参数的场景样本。为了降低椭球维度和计算负担,只采集母线电压和线路的有功功率分别形成 CELL,如表 1 所示将椭球的体积、体积变化率、偏心率、中心点的位置作为决策树样本的特征属性,总共 A_1-A_8 8 个样本属性。

3.3 动态采样

本文采集强迫振荡瞬态阶段的数据映射到多维

表 1 样本属性的形成
Table 1 Formation of sample attributes

CELL	属性
线路有功功率形成 CELL1	A_1 : 体积 (V_1)
	A_2 : 中心 O_1
	A_3 : 偏心率 (e_1)
	A_4 : dV_1/dt
	A_5 : 体积 (V_2)
母线电压幅值形成 CELL2	A_6 : 中心 O_2
	A_7 : 偏心率 (e_2)
	A_8 : dV_2/dt

空间。利用瞬态阶段椭球参数形成决策树的样本集, 决策树更容易进行分类定位, 并且缩短了故障定位时间。由于 CELL 参数是时变的, 数据采样周期等于强迫功率振荡周期, 这样就可以完整地将每个周期瞬态阶段的数据封装在最小 CELL 里, 椭球参数就能及时完整地反映系统强迫振荡时的动态特性。

3.4 CELL 与决策树混合算法流程

本文基于“先分类, 后定位”的思想, 将决策树分为 2 层: 第一层用于强迫功率振荡的分类, 将振荡源分为发电机侧和负荷侧; 第二层对不同位置的扰动进行定位, 找到具体的受扰动机组或负荷。CELL 与决策树混合算法流程如图 2 所示。图 2 中虚线右侧为规则抽取的离线计算, 决策树分为 2 层, 先抽取分类规则, 再抽取具体定位发电机和负荷规则; 左侧为在线匹配离线规则, 定位具体的强迫扰动源位置, 其中样本集定时在线刷新。

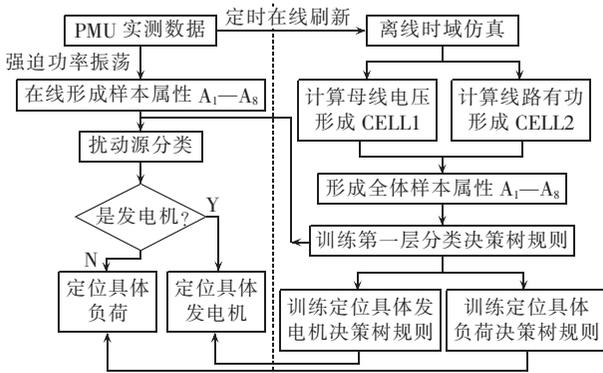


图 2 基于 CELL 与决策树混合算法定位强迫功率振荡扰动源流程图

Fig.2 Flowchart of forced power oscillation disturbance source identification based on hybrid algorithm of CELL and decision tree

4 算例分析

4.1 基于 CELL 理论在线识别强迫功率振荡

采用电科院 PSD-BPA 仿真软件对 IEEE 39 节点系统进行强迫功率振荡仿真。其具体参数见文献[16]。系统的发电机采取五阶模型, 负荷采取恒阻抗模型。通过小干扰分析发现, 该系统存在固有频率为 0.921 Hz

的机组 G_2 、 G_3 相对于机组 G_4 — G_7 的区间振荡模式。

情况 1: 在发电机 G_2 设置周期性机械功率扰动 $\Delta P_T = k \sin(2\pi f_0 t)$, 扰动幅值 $k = 20$ MW, 频率 $f_0 = 0.921$ Hz, 扰动持续时间为 5~40 s, 仿真时间为 75 s。

情况 2: 在负荷节点 4 设置周期性功率扰动 $\Delta P_L = k \sin(2\pi f_0 t)$, 扰动幅值 $k = 20$ MW, 频率 $f_0 = 0.921$ Hz, 扰动持续时间为 0~35 s, 仿真时间为 60 s。

选取线路 15-16、20-34、19-16 的有功功率作为椭球输入信息。时间滑动窗口设为 1 s, 约等于强迫功率振荡周期 (50 个数据点), 通过 KY 算法不断计算不同采样周期的椭球参数。在情况 1 和情况 2 下, 椭球的体积、体积变化率、椭球不同维度半径变化如图 3、4 所示, 图中纵轴均为标幺值。CELL 的形状变化如图 5 所示。

对于情况 1 和情况 2, 选取联络线 15-16 观察强迫功率振荡现象, 如图 6 和图 7 所示。对于情况 1, 联络线在 $t = 5$ s 时开始起振, 经过 10 个周期后达到等幅振荡, 在 25 s 后振荡逐渐平息。相应的 CELL 各个指标变化如图 3 所示, 椭球的三维形状变化如图 5 所示, 在 $t \in [0, 5]$ s 时, 联络线的功率未发生变化, 故 CELL 的各个指标几乎为 0; 在 $t \in (5, 15]$ s 时, 强迫功率振荡进入瞬态阶段, 此时有功功率呈现增幅振荡, 由于各条受扰轨迹瞬态响应时间不同, 椭球的各个指标迅速发生突变, 椭球的形状变大并趋于

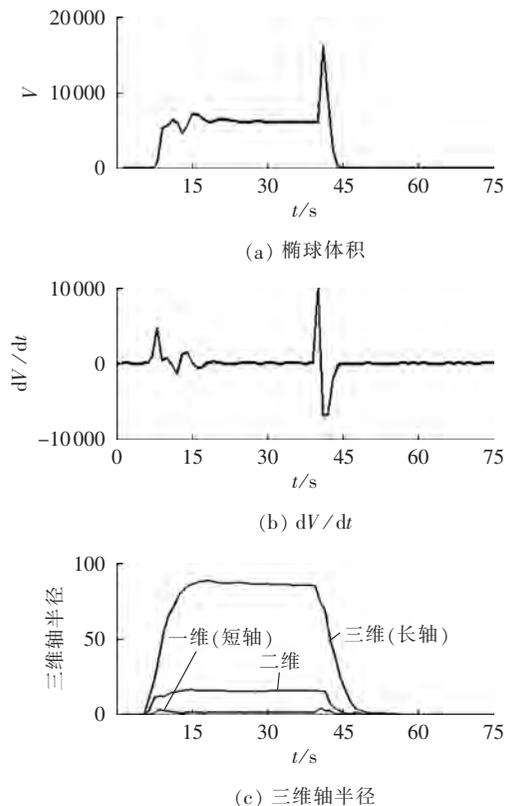


图 3 情况 1 下特征椭球的各个指标曲线
Fig.3 Index curves of CELL in case 1

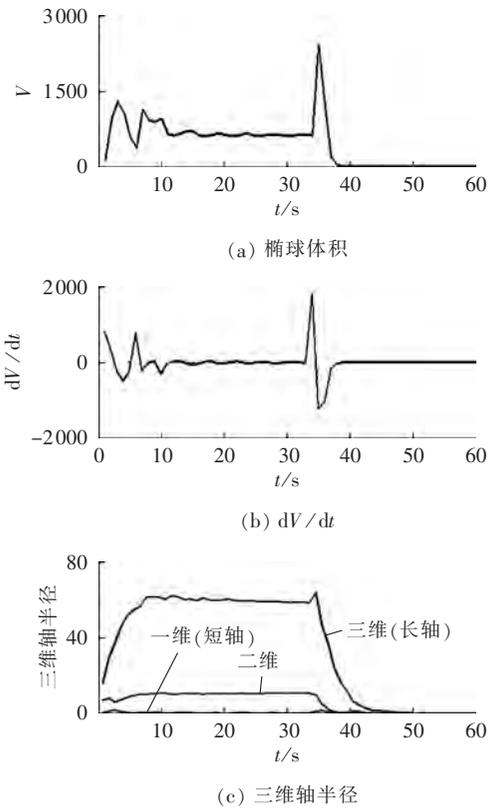


图 4 情况 2 下特征椭球的各个指标曲线
Fig.4 Index curves of CELL in case 2

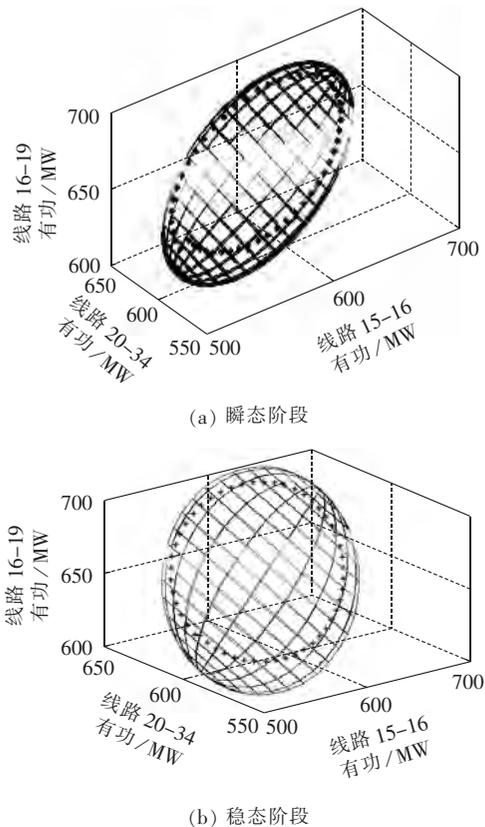


图 5 椭球形状
Fig.5 Shape of CELL

稳定;在 $t \in (15, 40]$ s 时,由于有功功率振荡趋于周

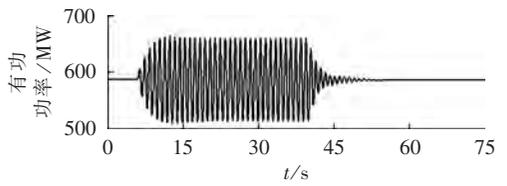


图 6 情况 1 下的联络线有功功率强迫振荡曲线
Fig.6 Active power curve of tie line during forced power oscillation in case 1

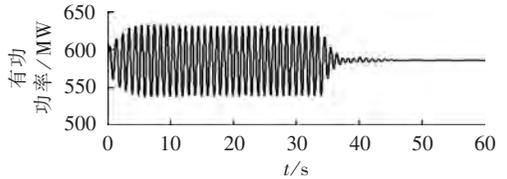


图 7 情况 2 下的联络线有功功率强迫振荡曲线
Fig.7 Active power curve of tie line during forced power oscillation in case 2

期性稳定变化,椭球形状变为球形,椭球的各个指标趋于稳定;在 $t \in (40, 50]$ s 时,故障切除后,有功功率呈现减幅振荡,由于各条受扰轨迹衰减时间不同,此时椭球的参数反而突变,椭球形状迅速增大又变小。当 $t \in (50, 60]$ s,联络线有功功率恢复到稳态值,此时椭球的各个参数又几乎为 0。综上,得到的 CELL 可以简化复杂的受扰信息,定性地描述强迫功率振荡过程,其形状和参数变化的趋势能够反映强迫振荡的发展态势。

对于情况 2,对 CELL 识别原理不再进行赘述。在相同的扰动下,由于发电机和负荷扰动对系统振荡的影响不同,其中最突出的特征是振荡幅值的差异。通过情况 1 和情况 2 对比发现,发电机和负荷相对应的 CELL 参数区分度较大,比如负荷的 CELL 体积小于发电机,说明 CELL 的参数能够很好反映不同扰动源的特性,这样就为决策树的分类定位提供了分析基础。另外,在强迫功率瞬态阶段,CELL 的各个指标变化明显,由此提供了瞬态阶段快速定位扰动源的可靠判据,有利于缩短故障定位时间。

4.2 基于混合算法的扰动源分类定位技术

4.2.1 样本构造

用上述 IEEE 39 节点系统验证算法有效性。为了获得大量有效的样本,使得负荷水平在 90%~110% 随机波动,发电机均摊负荷变动量。在 10 台发电机和 19 个负荷分别设置相同周期性功率扰动源 $\Delta P = k \sin(2\pi f_0 t)$,为了更好地模拟实际系统强迫功率振荡场景,使得 f_0 在 0.8~1.0 Hz 波动,扰动幅值 k 波动的范围等于不同扰动源引起强迫振荡与造成系统失稳的幅值区间,共生成 6 536 个样本。其中发电机 2 481 台,负荷 4 055 个,训练集和测试集的样本比例为 2:1。本文样本的产生是利用 neatbeans 7.3 开发的 Java-BPA 平台,该平台可以不断改变 BPA 输入数据,

获得有效的强迫功率振荡分类定位样本数据。

4.2.2 受扰轨迹的选取

根据实际电网 PMU 的布点,选择能够全面反映系统动态特性的受扰轨迹。PMU 的选址需要满足系统的可观性,并且尽可能减少 PMU 的安装个数。PMU 的优化选址问题不是本文研究重点,借鉴文献[17]所提出的方法对 IEEE 39 节点系统进行 PMU 布点,选择表 2 所示布点方案。采集所选方案母线电压幅值和线路有功功率的瞬态阶段数据形成 CELL,计算 8 种不同的样本属性。

表 2 IEEE 39 节点 PMU 布点

Table 2 PMU distribution of IEEE 39-bus system

PMU 布点母线	量测属性
3, 8, 10, 16, 20, 23, 25, 29	母线 3、8、10、16、20、23、25、29 电压幅值
3, 8, 10, 16, 20, 23, 25, 29	线路 2-3、5-8、10-32、16-21、20-34、23-24、25-37、29-38 有功功率

4.2.3 决策树分类定位规则提取

利用 C4.5 算法,训练出图 8 所示的强迫振荡源分类决策树,决策树每一个内部结点表示样本属性 A_1 — A_8 ,每一个分支表示分裂属性大小,树叶结点(终端结点)表示分类结果发电机和负荷扰动源,决策树的大小为 43,树叶结点数为 22,分类正确率高达 99.67%。可以从分类决策树得到,发电机和负荷扰动源分类规则取决于 22 条分类路径,并且每条路径的分类属性不同。其中属性分布 A_1 5 次、 A_3 6 次、 A_4 2 次、 A_6 3 次、 A_7 5 次。由于线路有功功率形成 CELL 的属性 (A_1, A_3, A_4) 在决策树分类中多于母线电压幅值形成 CELL 的属性 (A_6, A_7),可以得到有功功率振荡信号相较于电压信号更加能够反映系统的强迫功率振荡特性;由于决策树以 CELL 体积 (A_1) 以及椭圆偏心率 (A_3, A_7) 分裂属性为主,可以说明负荷和发电机对系统强迫振荡影响不同。第一层扰动

源分类正确率较高,为第二层准确定位具体的发电机和负荷扰动源位置提供了保障。

4.2.4 决策树性能测试

第二层发电机扰动源的定位决策树大小为 67,树叶结点数为 34,由于篇幅限制未列出定位规则,表 3 列出了发电机定位正确率。由表 3 可以得知主要参与振荡机组定位准确率极高,达到 97.3% 以上,其中 G_5 的正确率达到 100%,满足实际工程准确定位主振机组的需求。剩余机组 G_1, G_8 — G_{10} 对主振模式影响较小,椭圆参数不明显,故定位准确率比主振机组的定位准确率低。

表 3 决策树定位发电机侧扰动源性能测试

Table 3 Performance test of generator-side disturbance source identification by decision tree

发电机	正确定位	错误定位	正确率/%
G_1	196	14	92.8
G_2	307	4	98.7
G_3	276	2	99.3
G_4	258	7	97.3
G_5	234	0	100
G_6	227	6	97.3
G_7	259	6	97.7
G_8	231	10	95.7
G_9	284	19	93.3
G_{10}	209	9	95.7

第二层负荷扰动源的定位决策树大小为 84,树叶结点数为 45,由于篇幅限制未列出定位规则,表 4 列出了负荷定位正确率。由表 4 可以得知主要参与负荷定位准确率达到 96.1% 以上,其他负荷的准确率相对较低。这是因为负荷节点对振荡的影响与负荷到主振机组的电气距离有关,与主振机组越近的负荷影响越大,特征参数越明显,定位准确率越高。其中 L_{31} 的电气距离最近,正确率最高,达到 99.1%。本文的负荷定位的准确率与文献[11]给出的负荷扰动

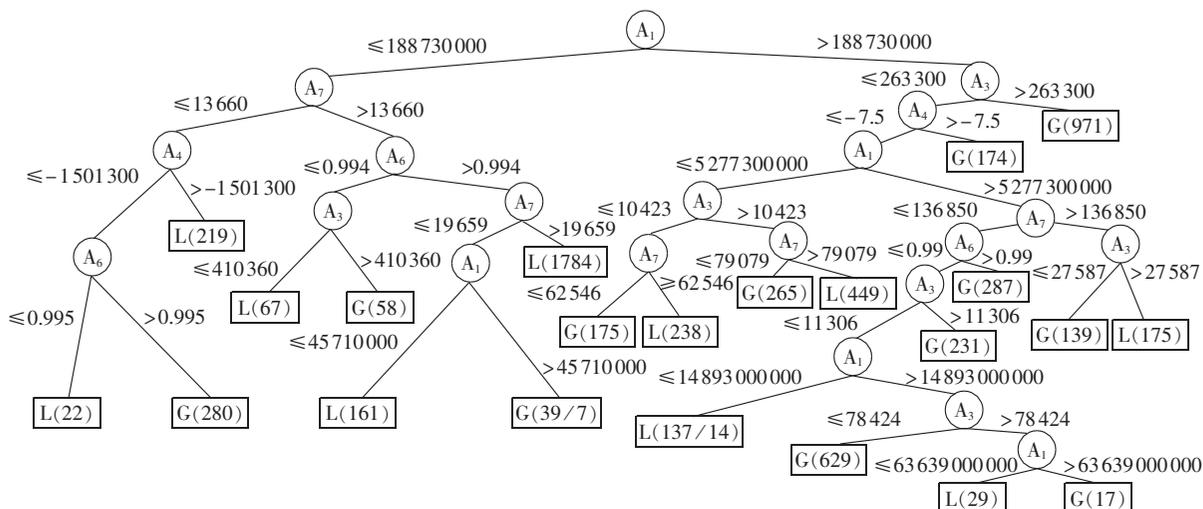


图 8 强迫功率振荡分类定位决策树

Fig.8 Decision tree of forced power oscillation disturbance source classification and identification

表 4 决策树定位负荷侧扰动源性能测试

Table 4 Performance test of load-side disturbance source identification by decision tree

负荷侧	正确定位	错误定位	正确率/%
L ₃	207	26	87.4
L ₄	193	18	90.1
L ₇	235	9	96.2
L ₈	257	7	97.3
L ₁₃	241	7	97.1
L ₁₅	200	19	90.5
L ₁₆	179	15	91.6
L ₁₈	238	37	84.4
L ₂₀	251	5	98.1
L ₂₁	233	9	96.1
L ₂₃	206	3	98.5
L ₂₄	217	4	98.1
L ₂₅	167	11	93.4
L ₂₆	189	23	87.8
L ₂₇	202	19	90.6
L ₂₈	212	23	89.1
L ₂₉	197	14	87.8
L ₃₁	219	2	99.1
L ₃₉	212	12	94.3

对系统固有振荡模式影响因子大小一致,影响因子越大,负荷扰动源定位准确率越高。

5 结论

本文提出了一种基于 CELL 构建决策树定位强迫功率振荡的新型混合算法。该方法首先利用 CELL 理论将大量受扰轨迹信息映射到多维空间,将状态参数变换为形态参数,简化了受扰信息,提高了系统全局动态可视化能力,有利于调度员在线感知强迫功率振荡态势。其次,CELL 理论可凸显强迫振荡瞬态阶段信号的特征,提取关键特征量,能够很好地反映不同扰动源引起强迫功率振荡的特性,为决策树在瞬态阶段定位扰动源提供保障,有力地缩短了故障定位时间。算例仿真表明决策树可训练出性能良好的分类定位规则,第一层决策树故障分类的正确性达到 99.67%,第二层决策树对振荡模式主要参与机组和负荷定位的准确性达到 96.1%,满足实际电网快速准确定位扰动源的要求,具有一定的工程价值。

但仍有一些问题值得深入研究,本文所提方法目前只针对强迫功率振荡,实际系统中负阻尼振荡波形与强迫功率振荡极易混合,如何利用本文方法识别这 2 种振荡是下一步的研究重点。

参考文献:

[1] 宋墩文,杨学涛,丁巧林,等. 大规模互联网低频频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术,2011,35(10):22-27.
SONG Dunwen,YANG Xuetao,DING Qiaolin,et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures[J]. Power System

Technology,2011,35(10):22-27.

- [2] MA Jin,ZHANG Pu,FU Hongjun,et al. Application of phasor measurement unit on locating disturbance source for low-frequency oscillation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2010,1(3):340-346.
- [3] 王娜娜,廖清芬,唐飞,等. 基于割集能量及灵敏度的强迫功率振荡扰动源识别[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):75-80.
WANG Nana,LIAO Qingfen,TANG Fei,et al. Disturbance source identification based on cutset energy and sensitivity for forced power oscillation [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):75-80.
- [4] 杨毅强,刘天琪,李兴源,等. 电力系统强迫振荡的同心松弛现象分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2013,45(4):163-170.
YANG Yiqiang,LIU Tianqi,LI Xingyuan,et al. An analysis to the concentric relaxation phenomenon of power system forced oscillations [J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2013,45(4):163-170.
- [5] 杨东俊,丁坚勇,李继升,等. 基于参数辨识的强迫功率振荡扰动源定位方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):26-30.
YANG Dongjun,DING Jianyong,LI Jisheng,et al. A disturbance source location method for forced power oscillation based on parameter identification [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(2):26-30.
- [6] 陈磊,闵勇,胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位:(二)振荡源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):1-5.
CHEN Lei,MIN Yong,HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part two method for oscillation source location and case studies [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(4):1-5.
- [7] 董清,梁晶,颜湘武,等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):78-83.
DONG Qing,LIANG Jing,YAN Xiangwu,et al. Locating method of disturbance source of low frequency oscillation in large scale power grid [J]. Proceeding of the CSEE,2012,32(1):78-83.
- [8] 杨小明,刘涤尘,廖清芬,等. 动态近似熵在强迫功率振荡在线检测中的应用[J]. 电网技术,2012,36(11):129-133.
YANG Xiaoming,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Application of dynamic approximate entropy in real-time detection of forced power oscillation [J]. Power System Technology,2012,36(11):129-133.
- [9] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术,2006,30(10):29-33.
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system [J]. Power System Technology,2006,30(10):29-33.
- [10] 余一平,闵勇,陈磊,等. 周期性负荷扰动引发强迫功率振荡分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):7-11.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei,et al. Analysis of forced power oscillation caused by continuous load disturbances [J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):7-11.
- [11] 丁涛,顾伟,万秋兰. 基于 MVEE 理论和广域测量的扰动识别算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):38-42.
DING Tao,GU Wei,WAN Qiulan. Disturbances identification based on minimum volume enclosing ellipsoid theory and wide area measurement system [J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2013, 37(3):38-42.
- [12] KUMAR P, YILDIRIM A. Minimum volume enclosing ellipsoids and core sets[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2005, 126(1):1-21.
- [13] MA Jian, MAKAROV Y V, DIAO Ruisheng, et al. The characteristic ellipsoid methodology and its application in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2206-2214.
- [14] 刘友波, 刘俊勇, TAYLOR G, 等. 面向同步相量轨迹簇规则的电力系统暂态稳定实时评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16):32-28.
- LIU Youbo, LIU Junyong, TAYLOR G, et al. Rule-based combined algorithm for power system real-time transient stability assessment using synchronized phasor trajectory clusters[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(16):32-38.
- [15] QUINLAN J R. C4.5: programs for machine learning [M]. San Francisco, USA: Moran Kaufmann Publishers Inc, 1993:95-100.
- [16] PAI M A. Energy function analysis for power system stability [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publisher, 1989:26-33.
- [17] MILOSEVIC B, BEGOVIC M. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1):69-75.

作者简介:



蒋长江

蒋长江(1989—),男,四川巴中人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析(E-mail: jchj08@163.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析及电力市场;

刘友波(1983—),男,四川成都人,讲师,博士,通讯作者,研究方向为电力系统安全稳定与脆弱性评估。

Online forced oscillation detection and identification based on wide area measurement system and CELL theory

JIANG Changjiang¹, LIU Junyong¹, LIU Youbo¹, GOU Jing¹, CHEN Chen¹, LIU Ruofan¹, BAZARGAN Masoud²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. ALSTOM Grid Research & Technology Centre, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: According to the concept of “detection-classification-identification”, a hybrid method applying space CELL (Characteristic ELLipsoid) and decision trees based on the wide area measurement system is proposed to quickly and accurately identify the disturbance source of grid forced power oscillation. Different forced power oscillation signals are compared and the information of different measured perturbed trajectories is mapped to a multi-dimensional CELL. The space of CELL and its shape parameter variation are calculated to realize the quantitative description of forced power oscillation. The characteristic parameters of CELL during the transient phase of forced power oscillation under different disturbances are extracted to form the decision tree set, which is offline trained by C4.5 algorithm and online matched to fast classify and locate the disturbance source. Results of case study show that, the different disturbance sources are quickly classified and identified during the transient phase of forced power oscillation and the main contributing units and loads are identified with very high accuracy.

Key words: forced oscillation; disturbance source identification; wide area measurement system; characteristic ellipsoid; decision tree