

基于阻尼转矩分析的电力系统低频振荡源定位

李阳海¹, 黄莹², 刘巨², 姚伟², 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 准确定位低频振荡参与机组并采取有效的控制措施以提高系统阻尼、快速平息系统振荡是大电网安全稳定运行的重要保障。为此, 提出了一种基于总体最小二乘-旋转不变技术的信号参数估计(TLS-ESPRIT)和阻尼转矩分析(Damping Torque Analysis, DTA)方法进行低频振荡发生源定位的方法。该方法利用 TLS-ESPRIT 对发电机组的有功出力、角速度、功角信号进行模式分解, 提取发电机高度参与的振荡模式, 采用最小二乘拟合方法计算发电机高度参与振荡模式的阻尼转矩系数, 然后根据阻尼转矩系数判定发电机是否为该振荡模式的振荡源。分别以4机2区和10机39节点系统为例进行仿真验证。仿真结果表明, 所提出的振荡监测方法能够准确定位电力系统低频振荡源, 且通过振荡源对其自身的控制能够有效地平息系统中的低频振荡现象。

关键词: 阻尼转矩分析; TLS-ESPRIT; 多机电力系统; 低频振荡源定位

Power system oscillation source location based on damping torque analysis

LI Yanghai¹, HUANG Ying², LIU Ju², YAO Wei², WEN Jinyu²

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Locating low frequency oscillation sources exactly and taking appropriate control measures to enhance system damping and suppress system oscillations are an important guarantee for the secure and stable operation of power grids. Therefore, this paper proposes an effective oscillation source location method based on a total least squares-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques (TLS-ESPRIT) and damping torque analysis (DTA) for the power systems. In this method, the dominant oscillation mode of each generator is extracted from measured signals (e.g. rotor speed, rotor angle, and active power) at its side by means of TLS-ESPRIT, and then corresponding damping torque coefficient can be obtained through the least square fitting method to determine whether the generator is the oscillation source of this oscillation mode. Finally, case studies are carried out on the 4-machine 2-area system and 10-machine New England test system, respectively. Simulation results indicate that the proposed locating method can accurately locate the power system oscillation source, by which low-frequency oscillation can be effectively restrained using local control measures.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177057).

Key words: damping torque analysis; TLS-ESPRIT; multi-machine power system; low frequency oscillation location

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0084-08

0 引言

随着大区电网的互联, 低频振荡已成为影响大电网安全稳定运行的主要问题之一^[1-3]。关于低频振荡的机理, 主要有弱(负)阻尼功率振荡^[1]和强迫功率振荡^[2]两种解释。强迫功率振荡主要是指存在一个

周期振荡的扰动源, 通常由设备故障或特殊负荷所引起, 当扰动源振荡频率和系统中某个弱阻尼振荡模式的频率相近时, 有可能导致该弱阻尼振荡模式被激发。近年来, 关于强迫功率振荡扰动源定位的研究取得了较大进展, 提出了能量函数法^[4]、时延法^[5]、等效电路法^[6]等多种定位方法。

当电网由于阻尼不够而发生弱(负)阻尼低频振荡时, 针对主导振荡模式, 通常会有数台参与度

很高的机组, 本文将这些机组称为振荡源。如果能够从整个电网数量众多的发电机组中快速准确地定位这些振荡源, 并采取适当的控制措施, 如减少其有功出力、提高其 PSS 装置的增益系数等, 将可以有效平息振荡, 提高电网的安全稳定性^[1-2]。

目前关于负阻尼振荡源定位的研究还比较少, 主要有基于振荡能量的方法^[7-8]。文献[7]利用电网中的能量流进行振荡源的快速定位, 文献[8]提出了一种基于割集能量识别电力系统功率振荡源的工程实用方法。然而, 上述基于振荡能量的振荡源定位方法需要通过广域测量系统获取关键支路的实测数据并进行集中分析, 将其应用于实际大规模互联电网存在计算量很大的问题, 并且仅能用于定位负阻尼振荡源机组, 难以辨识弱阻尼振荡源机组。

由于电力系统发生弱阻尼低频振荡的根本原因是发电机的阻尼不够, 因此, 当系统发生低频振荡时, 利用发电机支路监测到的数据分析其对振荡的阻尼水平以及参与情况, 就能够判断自身是否是某种振荡模式的振荡源。发电机对振荡的阻尼水平和参与情况可以采用复转矩分析的方法得到^[9-12], 其关键是阻尼转矩系数的计算。文献[13-14]基于单机无穷大系统提出了利用最小二乘法计算发电机阻尼转矩系数的算法, 此外, 还有基于离散傅里叶算法^[15]、卡尔曼滤波^[16]和自适应神经网络^[17]的在线辨识方法。文献[18-21]探讨了阻尼转矩分析在多机系统中的适用性与前提条件, 发现只有对系统振荡信号进行模式分解才可以将阻尼转矩分析法应用到多机系统。常见的振荡信号模式分解的方法主要有 Prony 分析^[18]和 TLS-ESPRIT 算法, 其中, TLS-ESPRIT 算法能够克服噪声干扰, 可以使用较短观测时间的数据有效辨识电力系统低频振荡的主导模式, 非常适合在电力系统应用^[22-23]。

基于此, 本文提出了一种利用 TLS-ESPRIT 和阻尼转矩分析进行低频振荡源定位的方法。该方法首先采用 TLS-ESPRIT 法对发电机在电网振荡过程中的有功出力、角速度、功角等采样值进行模式分解, 根据能量比提取出该发电机高度参与的振荡模式, 即该发电机所在支路的主导振荡模式, 然后采用最小二乘拟合方法计算发电机针对该振荡模式的阻尼转矩系数, 判断该发电机对振荡的阻尼水平和参与情况, 从而判断该发电机是否为该振荡模式的振荡源。最后通过对 4 机 2 区系统和 10 机 39 节点

系统的仿真验证了本文所提出的振荡源定位方法的有效性。

1 电力系统阻尼转矩分析

1.1 单机无穷大系统阻尼转矩分析

在单机无穷大系统中, 文献[9]基于发电机转子运动方程提出了阻尼转矩的概念, 将发电机电磁转矩在表征机电关系的相平面上分解为阻尼转矩和同步转矩, 即

$$\Delta T_e(t) = K_d \Delta \omega(t) + K_s \Delta \delta(t) \quad (1)$$

式中: K_d 称为阻尼转矩系数; K_s 称为同步转矩系数; $\Delta \omega$ 是其角速度变化量; $\Delta \delta$ 是发电机功角变化量; ΔT_e 为电磁转矩变化量。阻尼转矩系数的大小决定了系统的小扰动稳定性, 阻尼转矩系数过小或者为负值是电网低频振荡的主要原因。

发电机转子二阶运动方程为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e - D\Delta \omega) \\ \frac{d\Delta \delta}{dt} = \omega_0 \Delta \omega \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_0 为转子同步角速度; H 为发电机的惯量常数; ΔT_m 为原动机机械转矩变化量; D 为转子摩擦阻尼转矩系数。

假设原动机机械转矩恒定, 不考虑转子摩擦阻尼转矩系数, 且 $\omega_0 = 1$, 转子运动方程可以表达为

$$\Delta T_e(t) = K_d \Delta \omega(t) + K_s \Delta \delta(t) \quad (3)$$

将式(1)代入式(3), 可以得到

$$\frac{d^2 \Delta \delta(t)}{dt^2} + \frac{K_d}{2H} \frac{d\Delta \delta(t)}{dt} + \frac{K_s}{2H} \Delta \delta(t) = 0 \quad (4)$$

可见, 依照系统等值观点, 当电磁转矩用式(1)表达时, 转子运动方程中仅包含 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 这两个状态变量, 单机无穷大模型可等值为二阶模型, 如式(4)所示, 该二阶模型的特征根等价于原系统的机电特征根。

1.2 多机电力系统阻尼转矩分析

对于多机系统而言, 扰动后的离散时序信号可能包含有多个低频振荡模式, TLS-ESPRIT 算法可以提取出各机组高度参与的主导振荡模式^[23], 将阻尼转矩分析推广到多机电力系统。

针对多机电力系统, 有学者提出了如下电磁转矩表达式^[21,24]:

$$\Delta T_{ei}(t) = K_{di}\Delta\omega_i(t) + K_{si}\Delta\delta_i(t) \quad (5)$$

式中, $\Delta\omega_i$ 、 $\Delta\delta_i$ 分别是第 i 台发电机的角速度变化量、功角变化量。

利用 TLS-ESPRIT 算法对 ΔT_{ei} 、 $\Delta\omega_i$ 、 $\Delta\delta_i$ 进行模式分解, 提取出各信号的主导振荡分量, 分别记为 $\Delta T'_{ei}$ 、 $\Delta\omega'_i$ 、 $\Delta\delta'_i$, 满足如下关系式:

$$\Delta T'_{ei}(t) = K_{di}\Delta\omega'_i(t) + K_{si}\Delta\delta'_i(t) \quad (6)$$

仿照单机无穷大系统等值分析, 式(6)将多机系统等值为如下形式:

$$\frac{d^2\Delta\delta'_i(t)}{dt^2} + \frac{K_{di}}{2H} \frac{d\Delta\delta'_i(t)}{dt} + \frac{K_{si}}{2H} \Delta\delta'_i(t) = 0 \quad (7)$$

式(7)表明, 第 i 台发电机组的主导振荡可以通过求解一个相对独立的二阶微分方程, 得到与之对应的一个振荡模式。

文献[13]认为不同的振荡模式对应不同的阻尼转矩系数与同步转矩系数, 动态过程中的电磁转矩可写成以下形式:

$$\Delta T_e = \sum_{i=1}^n [K_d(\lambda_i)\Delta\omega(\lambda_i) + K_s(\lambda_i)\Delta\delta(\lambda_i)] \quad (8)$$

式中: $K_d(\lambda_i)$ 为振荡模式 λ_i 下的阻尼转矩系数; $K_s(\lambda_i)$ 为振荡模式 λ_i 下的同步转矩系数。

式(8)表明: 多机系统中发电机组的不同振荡模式对应不同的阻尼转矩系数与同步转矩系数, 这些系数反过来可以等值体现该机组的某个特定振荡模式。在多机系统中将电磁转矩主导振荡分量表达成式(6)的前提条件是所研究的机组只有一个主导振荡模式^[21], 这也是电力系统发生低频振荡时的常见情况。

在应用阻尼转矩分析法对多机电力系统进行稳定性分析时, 我们更关心的是研究能够评估某个运行状态下发电机电磁转矩对某种振荡模式的阻尼水平。因此, 当系统发生低频振荡的时候, 可以通过判断各发电机组在其主导振荡模式下 K_d 的大小, 有效评估机组对该振荡模式的阻尼水平。

2 多机系统阻尼转矩系数在线辨识方法

运用 TLS-ESPRIT 算法提取出各机组的主导振荡模式信号为多机系统中发电机的阻尼转矩系数在线辨识提供了理论支持。具有单一主导振荡模式的发电机有功、角速度、功角变化量之间的关系满足式(6)。

对式(6)进行离散化处理可得到

$$\begin{bmatrix} \Delta T'_e(T) \\ \Delta T'_e(2T) \\ \vdots \\ \Delta T'_e(MT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega'(T) & \Delta\delta'(T) \\ \Delta\omega'(2T) & \Delta\delta'(2T) \\ \dots & \dots \\ \Delta\omega'(MT) & \Delta\delta'(MT) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_s \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

式中: M 为采样时间内总的采样点数; T 为采样周期; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 代表线性估值的误差。

发电机同步转矩系数和阻尼转矩系数的求解就可以转化成为如下的一个线性估值的数学问题:

$$\Delta T'_e = [\Delta\omega', \Delta\delta']\mathbf{K} + \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A}\mathbf{K} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (10)$$

其中:

$$\Delta T'_e = [\Delta T'_e(T), \Delta T'_e(2T), \dots, \Delta T'_e(MT)]^T \in \mathbf{R}^M$$

$$\Delta\delta' = [\Delta\delta'(T), \Delta\delta'(2T), \dots, \Delta\delta'(MT)]^T \in \mathbf{R}^M$$

$$\Delta\omega' = [\Delta\omega'(T), \Delta\omega'(2T), \dots, \Delta\omega'(MT)]^T \in \mathbf{R}^M$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^M, \quad \mathbf{K} = [K_d, K_s]^T$$

定义代价函数 $J(x)$:

$$J(x) = [\Delta T'_e - \mathbf{A}\mathbf{K}]^T \cdot [\Delta T'_e - \mathbf{A}\mathbf{K}] \quad (11)$$

当 $J(x)$ 达到最小值时, \mathbf{K} 估计值为

$$\mathbf{K} = [\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}]^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \Delta T'_e = \mathbf{A}^+ \cdot \Delta T'_e \quad (12)$$

式中, \mathbf{A}^+ 为广义逆矩阵, 当 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 可逆时存在。通过求解式(12)即可得到相应运行点的 K_d 、 K_s 。

基于 TLS-ESPRIT 的多机系统阻尼转矩系数计算步骤如下:

1) 从在线测量装置获取扰动后系统发生低频振荡时段 t 内各机组有功出力、角速度、功角的离散时序数据。

2) 计算各机组有功出力、角速度、功角的变化量:

$$\begin{cases} \Delta T_e = T_e - T_{e0} \\ \Delta\omega = \omega - \omega_0 \\ \Delta\delta = \delta - \delta_0 \end{cases}$$

3) 利用 TLS-ESPRIT 对 ΔT_e 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\delta$ 进行辨识, 根据能量比确定各发电机的主导振荡模式, 并根据各机组支路在主导振荡模式下的阻尼比、频率、幅值和初始相角的辨识结果, 提取出各信号的主导振荡分量。

4) 将各机组在其主导振荡模式下三种信号数据的离散时序数据代入式(12), 得到各机组在其所在支路主导振荡模式下的阻尼转矩系数。

3 基于阻尼转矩分析的低频振荡源定位

上一节提出的基于 TLS-ESPRIT 的多机系统阻尼转矩系数算法能够有效计算出各机组在其支

路主导振荡模式下的阻尼转矩系数, 为阻尼转矩分析在多机系统低频振荡中的应用提供了一种新的思路。当系统发生低频振荡(负阻尼振荡或者弱阻尼振荡)的时候, 可以通过各发电机组在其主导振荡模式下 K_d 的大小, 判定该发电机组对振荡的阻尼和参与情况, 准确定位系统中的振荡源。因此, 在上一节算法的基础上, 本文提出图 1 所示的基于阻尼转矩分析的低频振荡源定位方法。

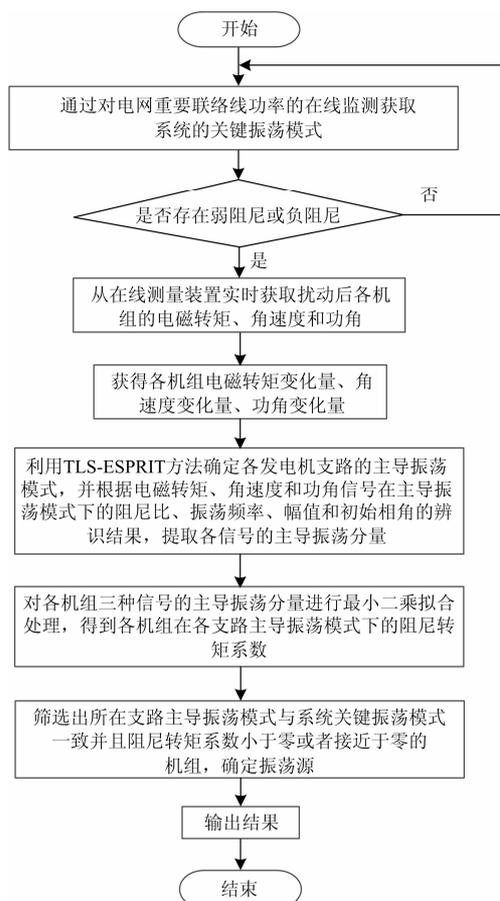


图 1 基于阻尼转矩分析的低频振荡源定位流程图

Fig. 1 Flowchart of low frequency oscillation location based on DTA

在多机电力系统中, 当系统发生了低频振荡, 各机组在其支路主导振荡模式下的阻尼转矩系数能够用于评估其对该振荡模式的阻尼能力。根据对电网重要联络线功率的在线监测获取的系统关键振荡模式, 当一台机组在其机端辨识出来的主导振荡频率与该模式一致, 可根据其阻尼转矩系数判断它对该振荡模式的阻尼水平。如果该机组的阻尼转矩系数为负值或者接近于零, 可以认定上述机组在主导振荡模式下为系统提供了负阻尼或者阻尼特性很弱, 可以将低频振荡的振荡源定位在该机组内; 通过采用合理的控制措施, 如减少其发电出力、提高

PSS 装置增益系数来增强系统阻尼等, 能够有效抑制该负阻尼振荡。

4 算例分析

4.1 算例 1: 4 机 2 区系统

基于 Matlab/Simulink^[25] 平台建立典型的 4 机 2 区系统。发电机 G1、G2 不投入 PSS, 并将 G2 的励磁系统的放大倍数扩大为原来的 10 倍。在母线 4 处发生一个持续时间为 0.1 s 的瞬时三相短路故障。根据特征值分析结果, 系统存在三个机电振荡模式, 其中机组(G1,G2)对应的局部振荡模式的振荡频率为 0.967 4 Hz、阻尼比为 0.003 2, 属于典型的弱阻尼振荡模式。取振荡时段 $t=8$ s (为了保证 K_d 和 K_s 估计值的准确性, 且通常情况下 t 至少要包括一个振荡周期) 内的数据, 对扰动后 1~9 s 时段内的发电机 G2 侧三种信号 ΔT_e 、 $\Delta \delta$ 、 $\Delta \omega$ 进行 TLS-ESPRIT 分析, 可以得到其所在支路主导振荡模式, 如表 1 所示。可以看出, 由 TLS-ESPRIT 方法辨识出的三种信号在主导振荡模式下的频率、阻尼比和对系统进行特征值分析结果一致, 说明 TLS-ESPRIT 分离出来的主导振荡模式是可信的。

表 1 G2 侧三种信号的 TLS-ESPRIT 分析结果

Table 1 TLS-ESPRIT analysis results of three signals of G2

信号	频率/Hz	阻尼比	幅值	初始相位
ΔP_e	0.981 2	0.004 1	0.467 4	-37.367 4
$\Delta \omega$	0.981 2	0.004 1	0.000 1	51.915 5
$\Delta \delta$	0.981 2	0.004 1	0.031 7	-38.290 0

根据已获得的辨识数据, 按照第二节的算法计算 5 个不同时段内 G1 与 G2 的阻尼转矩系数, 结果如表 2 所示。可以看出, 对于 G1 与 G2 所在支路的主导振荡模式, 在不同的 TLS-ESPRIT 分析时段内所得到的阻尼转矩系数在辨识误差允许的范围是稳定不变的。基于 TLS-ESPRIT 的多机系统阻尼转矩系数计算仅在主导振荡模式情况下具有良好的可靠性^[23]。

表 2 G1 与 G2 的阻尼转矩系数计算结果

Table 2 Damping torque coefficient calculation results of G1 and G2

发电机	1~9 s	2~10 s	3~11 s	4~12 s	5~13 s
G1	-0.013 5	-0.013 8	-0.013 8	-0.013 6	-0.014 0
G2	0.033 7	0.034 1	0.033 5	0.033 2	0.032 3

针对上述 4 机 2 区系统的弱阻尼振荡模式, 考察阻尼转矩分析在弱阻尼振荡源定位的有效性。分别选取振荡初期(1~9 s)与振荡中期(8~16 s)的两个时段, 利用第 2 节的算法分别计算每台发

电机在其主导振荡模式下的阻尼转矩系数，结果如表 3 所示。其中，由于振荡初期(1~9 s)从 G3、G4 侧的三种信号辨识出来的主导振荡频率不一致，故无法准确得到 G3、G4 的阻尼转矩系数，在表 3 中表示为“*”。

表 3 4 机 2 区系统各发电机在其主导振荡模式下的阻尼转矩系数

Table 3 Damping coefficients of all generators with respect to the dominant oscillation mode on 4-machine 2-area system

振荡时段	1~9 s		8~16 s	
	主导振荡频率/Hz	阻尼转矩系数	主导振荡频率/Hz	阻尼转矩系数
G1	0.981 2	-0.013 5	0.981 2	-0.013 5
G2	0.981 2	0.033 7	0.981 2	0.032 3
G3	*	*	0.981 4	0.422 3
G4	*	*	0.981 3	0.708 8

表 3 表明，在振荡初期(1~9 s)，从 G1、G2 侧辨识出来的振荡模式与系统的关键振荡模式一致，并且 G1 的阻尼转矩系数小于零，G2 的阻尼转矩系数接近于零；振荡中期(8~16 s)，G1、G2 的结果基本不变，G3、G4 的主导振荡模式也一致，且阻尼转矩系数较大。由于扰动后系统的动态响应是不同振荡模式分量的线性组合，对于发电机 G3、G4，在振荡初期其他振荡模式占主导地位，但由于相应阻尼较大其振荡随着时间很快平息，一段时间后，我们所关心的弱阻尼振荡模式开始占据主导地位。因而，G1、G2 主导了该弱阻尼振荡，可以将弱阻尼振荡源定位在 G1、G2，振荡源定位与仿真设置一致。

4.2 算例 2：10 机 39 节点系统

10 机 39 节点系统如图 2 所示。在两种不同的运行方式下考察阻尼转矩分析在多机系统负阻尼振荡源定位的有效性。

4.2.1 运行方式 A

采用文献[25]中的 10 机 39 节点系统，发电机 G2、G3 不投入 PSS，并将 G2、G3 的励磁系统的放大倍数变为原来的 10 倍。在母线 4 处发生一个持续时间为 0.1 s 的瞬时三相短路故障。根据特征值分析，系统有 9 个低频振荡模式，包含一个振荡频率为 1.238 3 Hz、阻尼比为 -0.008 8 的负阻尼振荡模式，对应区域 2 的局部振荡，而区域间的振荡模式频率为 0.583 2 Hz，阻尼比为 0.037 0。

选取振荡时段 $t=8$ s，计算 5 个不同时段内 G2 的阻尼转矩系数，如表 4 所示。在不同时段内，计算得到的发电机阻尼转矩系数基本保持在 -0.05 左

右。表明基于 TLS-ESPRIT 的多机系统阻尼转矩系数算法也适用于复杂系统。

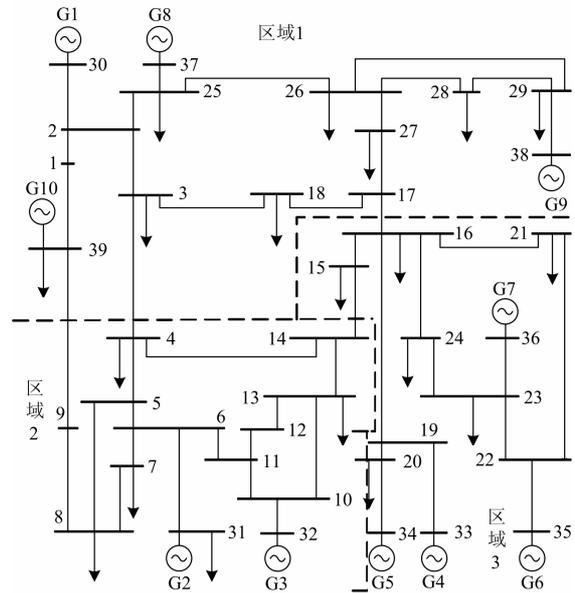


图 2 10 机 39 节点系统网络结构图

Fig. 2 Diagram of 39-bus system with 10 generators

表 4 G2 的阻尼转矩系数计算结果

Table 4 Damping torque coefficient calculation results of G2

发电机	1~9 s	2~10 s	3~11 s	4~12 s	5~13 s
G2	-0.046 8	-0.050 3	-0.050 8	-0.050 4	-0.049 7

对扰动后 0~18 s 内联络线 L_{14-15} 的功率进行录波，仿真曲线如图 3 所示。对 0~8 s 数据进行 TLS-ESPRIT 分析，频率为 0.583 6 Hz 区域间振荡模式为系统关键振荡模式，但由于其阻尼比为 0.037 4，该振荡在 10 s 左右渐渐平息，然后对 10~18 s 数据进行 TLS-ESPRIT 分析，该时段内系统关键振荡模式是频率为 1.255 0 Hz、阻尼比为 -0.007 2 的负阻尼振荡。

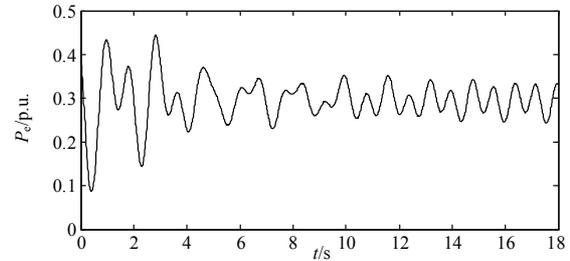


图 3 联络线 L_{14-15} 的功率曲线

Fig. 3 Curve of active power of line L_{14-15}

选取振荡初期 $t=8$ s 内的数据进行分析，计算

每台发电机在其支路主导振荡模式下的阻尼转矩系数, 结果如表 5 所示。由于从 G1 侧的三种信号辨识出来的主导振荡频率不一致, 故在表 5 中没有列出。可以看出, 对于其他 9 台发电机, 只有 G2、G3 的主导振荡模式与系统关键振荡模式(1.255 0 Hz)一致, 并且阻尼转矩系数小于零。如果系统中的某一发电机组引起了负阻尼振荡, 该机组侧各信号由于具有相同的衰减系数和振荡频率所辨识出的振荡模式应该是显著一致的; 该机组在该振荡模式下为系统提供了负阻尼, 且负阻尼会通过机组间的阻尼耦合关系传递到同区域的其他发电机上^[26]。因此, 可以判断三种信号主导振荡模式不一致的机组不是振荡源所在。表 5 结果表明, 发电机 G2、G3 为系统提供了负阻尼, 负阻尼振荡的振荡源位于 G2、G3, 振荡源定位结果与仿真设置一致。

表 5 10 机 39 节点系统运行方式 A 下各发电机在其主导振荡模式下的阻尼转矩系数

Table 5 Damping coefficients of all generators with respect to the dominant oscillation mode on 10-machine 39-bus system under operating condition A

发电机	主导振荡频率/Hz	阻尼转矩系数
G2	1.255	-0.050 3
G3	1.254	-0.051 0
G4	0.584	0.015 2
G5	0.584	0.013 6
G6	0.584	0.028 1
G7	0.584	0.012 5
G8	0.584	0.014 9
G9	0.583	0.027 0
G10	0.584	0.643 5

为了进一步验证上述结论, 在扰动后第 40 s 投入 G2 侧 PSS, G3 的功角曲线如图 4 所示。时域仿真曲线表明, 投入 G2 侧 PSS 可以有效地平息功角的大幅度摆动, 对抑制低频振荡具有显著的效果, 进而验证了振荡源定位的准确性。

4.2.2 运行方式 B

同样在 10 机 39 节点系统上, 将 G7 的 PSS 的增益整定值设为原始数据的相反数。在母线 4 处发生一个持续时间为 0.1 s 的瞬时三相短路故障。根据特征值分析, 系统包含一个振荡频率为 1.313 4 Hz、阻尼比为-0.018 5 的负阻尼振荡模式, 对应(G6,

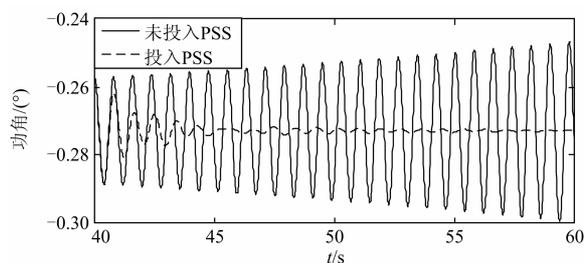


图 4 G2 投入 PSS 后 G3 的功角变化曲线

Fig. 4 Curves of $\Delta\delta$ of G3 after adopting PSS of G2

G7) 的局部振荡, 而区域间振荡模式是频率为 0.579 1 Hz、阻尼比为 0.017 1 的弱阻尼振荡。

对振荡发生后 18 s 内联络线 L₁₄₋₁₅ 的功率响应数据进行 TLS-ESPRIT 分析, 在开始阶段, 频率为 0.583 6 Hz、阻尼比为 0.017 1 的弱振荡模式占主导地位, 该振荡随着时间渐渐平息, 频率为 1.313 2 Hz、阻尼比为-0.018 3 的负阻尼振荡模式逐渐增强, 逐步表现出占主导地位的趋势。

选取振荡初期 $t=8$ s 内的数据进行分析, 计算每台发电机在其支路主导振荡模式下的阻尼转矩系数, 结果如表 6 所示。可以看出, 发电机 G6 和 G7 的主导振荡模式与区域内负阻尼振荡模式(1.313 4 Hz)一致, 且它们对应的阻尼转矩系数均为负值; 而其他的 7 台发电机的主导振荡模式与系统区域间弱阻尼振荡模式(0.579 1 Hz)一致, 且除 G10 外, 其余 6 台发电机对应的阻尼转矩系数

表 6 10 机 39 节点系统运行方式 B 下各发电机在其主导振荡模式下的阻尼转矩系数

Table 6 Damping coefficients of all generators with respect to the dominant oscillation mode on 10-machine 39-bus system under operating condition B

发电机	主导振荡频率/Hz	阻尼转矩系数
G1	0.579 0	-0.008 3
G2	0.579 0	-0.013 3
G3	0.579 0	-0.008 8
G4	0.579 0	-0.015 3
G5	0.579 0	-0.014 1
G6	1.313 4	-0.072 0
G7	1.313 2	-0.074 4
G8	0.579 0	-0.015 2
G9	0.579 0	-0.013 0
G10	0.579 0	0.594 8

也都为负值，为该弱阻尼振荡模式提供了负阻尼，而 G10 为该振荡模式提供了正阻尼。因此，在我们关注的系统负阻尼振荡模式下，发电机 G6、G7 为系统提供了负阻尼，因此负阻尼振荡模式的振荡源定位于 G6、G7。该振荡源定位结果与仿真设置一致，这验证了本文所提出的振荡源定位方法的准确性和有效性。

5 结论

本文提出了一种利用 TLS-ESPRIT 和阻尼转矩分析法定位低频振荡源的方法，分别以 4 机 2 区域和 10 机 39 节点系统为算例进行仿真验证，研究结果表明：

(1) 利用 TLS-ESPRIT 对发电机组的功率、角速度和功角信号进行模式分解可以将阻尼转矩分析推广到多机系统中，利用最小二乘拟合可以准确得到机组主导振荡模式的阻尼转矩系数。

(2) 发电机组对某一振荡模式的阻尼转矩系数表征了机组对该振荡的阻尼水平。通过监测系统中各机组的阻尼转矩系数就能定位系统中的弱阻尼或者负阻尼振荡源。

(3) 所提出的振荡源定位方法能够准确定位电力系统低频振荡发生源，对系统低频振荡的实时监测与抑制提供了有益的帮助。

参考文献

[1] 陆超, 陆秋瑜. 电力系统低频振荡模式的自动分类研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 35-38.
LU Chao, LU Qiuyu. Research on power system low frequency oscillation modes classification[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 35-38.

[2] 马燕峰, 赵培龙, 赵书强. 多机电力系统的强迫功率振荡特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 23-29.
MA Yanfeng, ZHAO Peilong, ZHAO Shuqiang. Research on characteristics of forced power oscillation in multi-machine power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 23-29.

[3] 孙建波, 赵娴, 李大虎, 等. 利用储能抑制互联电力系统联络线功率振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 10-17.
SUN Jianbo, ZHAO Xian, LI Dahu, et al. Study on energy storage in damping tie line power oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 10-17.

[4] 董超, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于能量函数的电网低频

振荡及扰动源定位研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 175-181.
DONG Chao, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on low frequency oscillation in power grid and location of disturbance source based on energy function[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 175-181.

[5] 董清, 张玲, 颜湘武. 低频振荡扰动源机组的自动定位方法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 265-269.
DONG Qing, ZHANG Ling, YAN Xiangwu. Automatic location of generation units behaving as disturbance source of low-frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 265-269.

[6] 杨毅强, 刘天琪, 李兴源, 等. 电力系统强迫功率振荡的等效电路定位分析法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 101-108.
YANG Yiqiang, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. An equivalent circuit approach to locate source of power system forced power oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 101-108.

[7] 文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46.
WEN Feng, GUO Jianbo, LI Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on wams part 1: method of cutset energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46.

[8] CHEN L, MIN Y, HU W. An energy-based method for location of power system oscillation source[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 828-836.

[9] DEMELLO F P, CORCORDIA C. Concept of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1969, 88(4): 316-329.

[10] 陈中, 胡吕龙. 基于阻尼转矩分析法的广域阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 36-40.
CHEN Zhong, HU Lulong. The study of design of wide area damping controllers based on DTA method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 36-40.

[11] 姜齐荣, 陈湘, 王天, 等. 多机系统复转矩系数分析及 PSS 参数计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 20-25.
JIANG Qirong, CHEN Xiang, WANG Tian, et al. Analysis of complex torque coefficient in multi-machines system and PSS parameters assignment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 20-25.

[12] 陈中, 杜文娟, 王海风, 等. 基于阻尼转矩分析法的储能系统抑制系统低频振荡[J]. 电力系统自动化,

- 2009, 33(12): 8-11.
CHEN Zhong, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Power system low-frequency oscillations suppression with energy storage system based on DTA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 8-11.
- [13] ALDEN R T H, SHALTOUT A A. Analysis of damping and synchronizing torques I a general calculation method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1979, 98(5): 1696-1700.
- [14] SHALTOUT A A, ALDEN R T H. Analysis of damping and synchronizing torques II Effect of operating conditions and machine parameters[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1979, 98(5): 1701-1708.
- [15] MATSUKI J, OKADA T. On-line calculation of synchronizing and damping torque coefficients of a synchronous generator[C] // Electrical Machines and Drives, 1991. Fifth International Conference on, 1991(341): 316-320.
- [16] FEILAT E A, YOUNAN N. On-line adaptive assessment of the synchronizing and damping torque coefficients using Kalman filtering[C] // Southeast Con '99. Proceedings. IEEE, 1999: 145-148.
- [17] FEILAT E A. Fast estimation of synchronizing and damping torque coefficients using an adaptive neural network[C] // Universities Power Engineering Conference, 2007, UPEC 2007. 42nd International, 2007: 1049-1053.
- [18] 胡昊明, 郑伟, 徐伟, 等. Prony 和 HHT 算法在低频振荡在线辨识中的适用性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 33-40.
HU Haoming, ZHENG Wei, XU Wei, et al. Comparison of the applicability of Prony and HHT algorithms for on-line identification of low-frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 33-40.
- [19] 王青, 闵勇, 张毅威. 多机电力系统电磁转矩分析方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(1): 9-12.
WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yiwei. Electrical torque analyses in multi-machine power systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2008, 48(1): 9-12.
- [20] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 2-5.
XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 2-5.
- [21] 郝正航, 王映康, 李健波, 等. 电力系统电磁转矩系数的性质及其计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 86-91.
HAO Zhenghang, WANG Yingkang, LI Jianbo, et al. Character of electric torque coefficients in power system and its computation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 86-91.
- [22] 于兴林, 李慧敏, 李天云. 基于 EEMD 和 TLS-ESPRIT 的谐波间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 67-72.
YU Xinglin, LI Huimin, LI Tianyun. An harmonic and inter-harmonic detection method based on EEMD and TLS-ESPRIT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 67-72.
- [23] 张静, 徐政, 王峰, 等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 84-88.
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng, et al. TLS-ESPRIT based method for low frequency oscillation analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 84-88.
- [24] SHALTOUT A A, ABU AL-FEILAT K A. Damping and synchronizing torque computation in multimachine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 280-286.
- [25] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 基于 Matlab/Simulink 的电力系统仿真工具箱的开发[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 95-101.
YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Development of a Matlab/Simulink based power system simulation toolbox[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 95-101.
- [26] 赵书强, 常鲜戎, 潘云江, 等. 多机系统低频振荡模式阻尼分配规律分析[J]. 电网技术, 1999, 23(7): 26-27.
ZHAO Shuqiang, CHANG Xianrong, PAN Yunjiang, et al. Analysis of damping apportionment in multi-machine power system[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 26-27.

收稿日期: 2014-10-01; 修回日期: 2015-01-23

作者简介:

李阳海(1980-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真、热力设备自动化、热力系统经济性分析; E-mail: neilli2008@gmail.com

黄莹(1989-), 女, 研究生, 研究方向为大电网大机组安全稳定与控制; E-mail: huangying_ariel@qq.com

刘巨(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为大电网大机组安全稳定与控制、储能与新能源并网。E-mail: liu1988wo@126.com

(编辑 魏小丽)