

## 基于 WAMS 的强迫振荡源在线定位方法

郑斌青, 冯双, 吴熙

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为了进行电力系统强迫扰动源的快速定位, 基于广域测量系统(WAMS)的实测数据, 提出一种通过波动相位辨识的扰动源在线监测定位方法。根据稳态阶段振荡能量的转换特性以及相量关系, 提出了通过分析发电机角频率波动以及输出电气功率波动的相位差来判断扰动源是否位于发电机上。采用基于总体最小二乘法-旋转不变技术的信号参数估计(TLS-ESPRIT)算法提取出电气波动量中的主导分量的频率并求出相位参数。算例仿真验证所提方法的可行性以及有效性, 更加简洁、直观, 降低了系统在线监测分析的复杂性。

**关键词:** 强迫振荡; 扰动源定位; 相位辨识; 广域测量系统

**中图分类号:** TM712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2016)05-0032-03

我国电力系统飞速发展, 已初步形成“西电东送, 南北互供, 全国联网”的大区电网互联的局面<sup>[1]</sup>。但如此规模庞大的电力系统形成之后, 大电网的安全、稳定、高效运行面临更高的要求, 研究大区域电网的低频振荡问题也成为保障电力系统安全稳定运行的关键。实际电力系统多次发生低频振荡, 不仅是系统提供较大的负阻尼, 更多的情况是系统中存在持续性的周期小扰动引发的强迫振荡<sup>[2-5]</sup>。电力系统的强迫共振理论指出, 当外施扰动的频率与系统自然频率相等或接近时, 产生共振, 线路传输的功率将大幅波动。强迫振荡发生时起振快, 表现为持续的等幅振荡, 振荡幅值较高, 对系统安全运行造成威胁。当扰动源切除后, 振幅迅速衰减。因此, 强迫振荡关键在于扰动源的存在, 快速准确的定位扰动源是首要问题。

目前国内学者在研究扰动源定位的方法研究上取得了一些成果。当电网发生低频振荡时, 传播到电网中不同位置的特殊形状扰动行波具有相似性, 文献[6]提出一种比较多点测量数据波形相似度以确定低频振荡扰动源位置的定位方法。尽管系统强迫振荡的表现形式与弱阻尼振荡相似, 但是两者在能量转换方面却大不一样, 根据这些特点从能量函数的角度出发进行识别强迫振荡扰动源的位置<sup>[7-9]</sup>。在能量函数分析法的基础上, 文献[10]构建了不同层次的割集, 根据割集流出的振荡能量正负来判断扰动源是否位于割集内部, 实现扰动源大致方位的识别。近年来, 电力系统机电波理论<sup>[11]</sup>的提出为强迫振荡扰动源定位方法的研究提供了新思路。文献[12]采用滑动数据窗法计算机电波到达时间来确定扰动源的位置, 提高了定位的快速性。

文中通过力学中的能量共振特点构建出系统振荡能量的表达形式, 根据其能量转换与电路中的能量表现形式相类似的特点, 结合电路理论分析振荡能量, 提

出一种比较发电机频率波动以及电气有功功率波动这2个电气量稳态阶段的相位差关系, 判断强迫振荡扰动源是否位于机组原动机上的扰动源定位方法。利用 TLS\_ESPRIT 算法提取出主导频率下相应电气量的相位参数, 滤去了采集的电气量中非扰动源决定的分量。该方法基于广域测量系统(WAMS)实测的数据, 能够直接识别频率和有功功率这两个电气量的相位参数并进行判断, 为扰动源的在线监测定位提供了研究参考方向。

## 1 强迫振荡系统的能量共振

### 1.1 经典弹簧系统能量共振

在经典力学中, 对于受迫振动的系统, 一般从位移共振和速度共振这两方面进行分析。首先讨论经典的弹簧系统, 在其受迫振荡过程中从系统的动能以及势能的变化来分析能量共振特点<sup>[13]</sup>。

设某一振动系统由质量为  $m$  的物体, 弹力系数为  $k$  的弹簧组成, 其中阻力系数为  $\beta$ , 在外力  $F = F_0 \cos \omega t$  作用下发生强迫振动, 其运动微分方程为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \beta \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (1)$$

式中:  $x$  为物体偏离平衡位置的位移。其中, 系统在强迫振荡过程中, 动能为  $E_k(t) = mv^2/2$ , 势能为  $E_p(t) = kx^2/2$ , 总能量  $E(t) = E_k(t) + E_p(t)$ 。振荡系统的平均能量为:

$$\tilde{E}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T E(t) dt \quad (2)$$

式中:  $T$  为外力的振动周期。

当系统开始受迫振荡过渡到稳态时, 系统的平均能量  $\tilde{E}(t)$  不断增加直到不变, 且当外力的频率  $\omega$  与系统的固有频率  $\omega_0$  相等时, 系统发生共振, 平均能

量最大。此时外力  $F$  对系统做的功等于系统克服阻力  $-\beta v$  做功消耗的能量,而系统的动能和势能互相发生转化。

### 1.2 单机无穷大系统的振荡能量构建

根据经典力学中的弹簧系统受迫振荡的原理,首先以单机无穷大系统为例,对电力系统发生强迫振荡时振荡能量特点进行分析。

在平衡点附近线性化之后的发电机运动方程为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} + K_s \Delta \delta = \Delta P_m \quad (3)$$

式中: $M$ 为发电机的惯性常量; $D$ 为发电机阻尼系数; $K_s$ 为发电机同步系数; $\Delta \delta$ 为发电机功角相对于平衡点的偏移量。

不难看出,式(3)和式(1)存在着对偶关系。在电力系统发生强迫振荡过程中,对电力系统构建适当的振荡能量变量:

$$\Delta E_{ke}(t) = M \Delta \omega^2 / 2 = \int M \Delta \omega \Delta \dot{\omega} dt \quad (4)$$

式中: $\Delta \omega = d \Delta \delta / dt$ 。

$$\Delta E_{pe}(t) = K_s \Delta \delta^2 / 2 = \int \Delta P_e \Delta \omega dt \quad (5)$$

式中: $\Delta P_e = K_s \Delta \delta$ 。

当电力系统发生强迫共振且处于稳态阶段时:

$$\Delta \tilde{E}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta E_{ke}(t) + \Delta E_{pe}(t)] dt \quad (6)$$

式中: $\Delta \tilde{E}(t)$ 保持不变,且可得:

$$\frac{1}{T} \int_0^T [ \int D \Delta \omega^2 dt ] dt = \frac{1}{T} \int_0^T ( \int \Delta P_m \Delta \omega dt ) dt \quad (7)$$

## 2 强迫振荡能量转换特性

在电力系统发生强迫振荡且达到稳态时,功角偏差量、功率偏差量、频率偏差量等都能够用正弦函数来表示。对式(6)和式(7)两边同时进行求导,可得:

$$0 = \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta \dot{E}_{ke}(t) + \Delta \dot{E}_{pe}(t)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T [(M \Delta \omega \Delta \dot{\omega}) dt + (K_s \Delta \delta \Delta \dot{\omega}) dt] \quad (8)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T D \Delta \omega^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_m \Delta \omega dt \quad (9)$$

式(8)体现了振荡过程中非耗能的储能特性,而式(9)体现了发电机振荡能量的产生和消耗。

根据能量守恒定律可知,与节点相连的  $n$  条支路上流入节点的有功功率波动量  $\Delta P_i$  的代数和为零,线性化后可表示为  $\sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0$ ,等效于基尔霍夫电流定律(KCL)。相邻 2 个节点的频率波动量  $\Delta \omega_i$  和  $\Delta \omega_j$  之差  $\Delta \omega_{ij} = \Delta \omega_i - \Delta \omega_j$ ,则某一回路的代数和  $\Delta \omega = (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) + (\Delta \omega_2 - \Delta \omega_3) + \dots + (\Delta \omega_n - \Delta \omega_1) = 0$ ,等效于基尔霍

夫电压定律(KVL)。强迫振荡过程中,发电机组的振荡能量转换可以用电路理论进行分析。

## 3 强迫振荡源的定位判据

根据以上分析,强迫振荡的扰动源相当于一个电源,向系统注入振荡能量,可以根据这一特性来判断扰动源所在的机组。

在系统发生强迫振荡过程中,发电机的机械功率偏差量由两部分组成,外施的机械功率扰动  $\Delta P_{m0}$  以及调速系统调节产生的机械功率扰动:

$$\Delta P_m = \Delta P_{m0} + K(j\Omega) \Delta \omega \quad (10)$$

式中: $K(j\Omega)$ 为调速器的传递函数; $\Omega$ 为系统振荡的角频率。

(1) 当扰动源位于发电机上时,  $\Delta P_m = \Delta P_{m0} + K(j\Omega) \Delta \omega = K'(j\Omega) \Delta \omega$ 。根据式(3)可得:

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P_e} = \frac{1}{K'(j\Omega) - D - j\Omega M} \quad (11)$$

根据式(9)可知,在单机无穷大系统中,机械扰动功率注入的振荡都在发电机阻尼上所消耗,没有传播到系统中。在实际多机系统中,发电机上扰动源注入的振荡能量除了被阻尼消耗,还有部分输出到系统,被网络和其他发电机阻尼所消耗。

因此  $K'(j\Omega)$  的实部大于  $D$ ,式(11)中,分母的实部为正,该式实部为正。此时  $\Delta \omega$  和  $\Delta P_e$  之间的初始相位差小于  $90^\circ$ ,发电机扰动源等效的电压源向外输出能量为正,即扰动源位于发电机上。

(2) 当扰动源不在发电机时,  $\Delta P_m = K(j\Omega) \Delta \omega$ 。

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P_e} = \frac{1}{K(j\Omega) - D - j\Omega M} \quad (12)$$

由于  $K(j\Omega)$  具有负实部<sup>[14]</sup>,分母具有负实部,故式(12)具有负实部。此时  $\Delta \omega$  和  $\Delta P_e$  之间的初始相位差大于  $90^\circ$ ,发电机扰动源等效的电压源向外输出能量为负,即吸收振荡能量,扰动源不在发电机上。

根据以上分析,可以根据发电机的角频率偏差  $\Delta \omega$  以及输出电气功率偏差  $\Delta P_e$  之间的相角差的绝对值是否小于  $90^\circ$  来判断发电机原动机是否为强迫扰动源。

## 4 强迫振荡的在线监测定位

### 4.1 基于 TLS-ESPRIT 获取波动相位

以上强迫振荡源的定位是对振荡的稳态阶段的波动相位关系进行分析的,而电力系统在发生强迫振荡的初始阶段,除了含有由扰动引起的稳态分量,还包含由初始条件引起的瞬态分量。在电力系统实际振荡过程中,判断振荡进入稳态阶段的时间点比较困难,而且如果系统的固有频率较低或阻尼较弱,振荡的过渡时

间会比较长。因此需要尽快获取电气波动的稳态量。

TLS-ESPRIT 算法是旋转不变技术的信号参数估计(ESPRIT)算法的扩展,是一种基于子空间的高分辨率信号分析方法。利用同步相量测量装置(PMU)监测获取的实时数据,TLS-ESPRIT 算法能够计算出信号中各分量的频率大小、衰减系数以及阻尼比,通过最小二乘法求取信号幅值和初始相位。因此,可以提取出强迫振荡的主导频率,即共振频率,获取相应的波动相位。而且如果实测的数据中含有异常数据,经过预处理剔除之后,TLS-ESPRIT 算法仍能够准确地进行模态分析。

#### 4.2 振荡源定位步骤

$\Delta f$  和  $\Delta \omega$  同相,因此可以通过 PMU 实测的机组频率进行分析。基于 WAMS 获得的实测数据,根据模态的辨识结果,得到扰动源的在线监测定位方法,步骤如下:(1)对实测的发电机电气功率  $P_e$  和频率  $f$  数据进行分析,判断机组是否正处于强迫振荡;(2)实测数据预处理,剔除异常数据;(3)利用 TLS-ESPRIT 算法确定振荡模态并获取波动相位;(4)判断发电机频率偏差的相位( $\varphi_f$ )以及输出电气功率偏差的相位( $\varphi_p$ )之差的绝对值是否小于  $90^\circ$ ,若成立,则扰动源位于发电机上,否则扰动源不在发电机上。

### 5 算例分析

在四机两区系统验证文中提出方法的可行性及有效性。四机两区的系统结构如图 1 所示。根据小干扰分析可知,该系统包含 1 个区间振荡模式,频率为 0.64 Hz。从 0 s 开始对该模式的强相关机组 G1 额外施加持续性的原动机功率扰动,扰动频率为 0.64 Hz,扰动幅值为 0.01 p.u.,仿真时间为 20 s。此时,系统区域间发生强迫振荡。

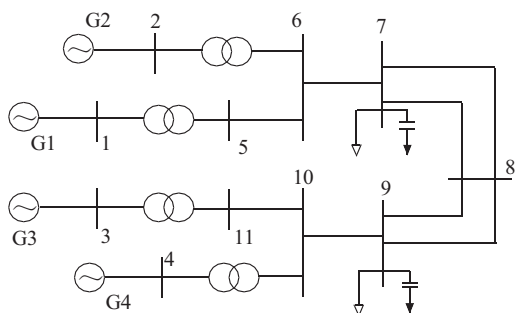


图 1 四机两区系统

TLS-ESPRIT 获取主导振荡频率下的波动相位并进行扰动源定位判断,其结果如表 1 所示。机组 G1 上频率波动相位与输出电气有功波动相位差的绝对值为  $32.8^\circ$ ,小于  $90^\circ$ ,满足扰动源定位判据,可以确定强迫扰动源位于该机组;同理,机组 G2、G3、G4 上频率波动相位与输出电气有功波动相位差的绝对值分别为

$254.3^\circ$ ,  $104.8^\circ$ ,  $109.5^\circ$ ,均大于  $90^\circ$ ,故可以判断这 3 台机组不是强迫振荡源,与实际情况一致。

表 1 波动相位及其判别结果

发电机组	$\varphi_f/(^\circ)$	$\varphi_p/(^\circ)$	$ \varphi_p - \varphi_f /(^\circ)$	是否为扰动源
G1	-17.4	-50.2	32.8	是
G2	-24.8	229.5	254.3	否
G3	229.3	124.5	104.8	否
G4	265.5	126	109.5	否

### 6 结束语

从能量共振系统中振荡能量转换特性的角度出发,结合交流电路理论进行分析,给出了分析发电机角频率波动以及输出电气功率波动的相位差来判断扰动源是否位于发电机上,从而实现强迫扰动源的定位。通过在四机两区系统进行仿真,验证了该方法的可行性及有效性。文中定位方法采用 TLS-ESPRIT 算法提取出主导频率下的相位信息,能够消除瞬态阶段自由分量以及异常数据对判别结果的影响。该方法只需获取机组输出有功功率以及机端电压频率的数据,均来自于 PMU 的实测数据,能够真实地反映外部系统与发电机组之间的振荡联系,实现单个机组解耦,分别进行分析。该定位方法简单、直观,很大程度上减少了在线监测分析的复杂性。

#### 参考文献:

- [1] 邓集祥,贺建明.大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J].电网技术,2008,32(17):78-82.
- [2] 汤涌.电力系统强迫功率振荡的基础理论[J].电网技术,2009,33(22):29-33.
- [3] 韩志勇,贺仁睦,马进,等.电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析[J].电力系统自动化,2009,33(3):16-19.
- [4] 余一平,闵勇,陈磊,等.周期性负荷引发强迫功率振荡分析[J].电力系统自动化,2010,34(6):7-11.
- [5] 韩志勇,贺仁睦,徐衍会.汽轮机压力脉动引发电力系统低频振荡的共振机理分析[J].中国电机工程学报,2008,28(1):47-51.
- [6] 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.
- [7] JING C,MACALLEY J D,KOMMAREDD Y M. An Energy Approach to Analysis of Interarea Oscillations in Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 734-740.
- [8] 余一平,闵勇,陈磊,等.基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J].电力系统自动化,2006,34(5):1-6.
- [9] 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.
- [10] 李文锋,郭剑波,李莹,等.基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与扰动源定位(1)割集能量法[J].中国电机工程学报,2013,33(25):41-46.

据的分布式在线浏览与功能审批等功能,有效解决了保护设备管理困难、不能高效利用的企业难题。

#### 参考文献:

- [1] 董晶晶. 浅谈二维码技术与应用[J]. 科技资讯, 2013(33):29-30.
- [2] 杨彦格, 杜杏兰. 二维码业务实现及其典型应用[J]. 信息通信技术, 2008(1):23-30.
- [3] 徐丹, 谢小杰, 吴俊. 基于二维码技术的自动化仓库管理系统的设计[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(12):2020-2023.
- [4] 高磊, 刘琦, 袁宇波, 等. 基于二维码的智能变电站光缆标签系统设计和实现[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10):169-173.
- [5] 殷鑫亮. 浅析二维码技术在实验室检测管理中的应用[J]. 计算机光盘软件与应用, 2013(17):102-103.
- [6] 赵宇峰, 杨洋, 贾鹏. 基于二维码技术的物流信息管理系统设计与实现[J]. 价值工程, 2014, 33(25):234-236.
- [7] 李明, 林湛, 宋泽, 等. 基于二维码技术的铁路科研企业固

定资产动态管理系统设计与实现[J]. 铁路计算机应用, 2014, 23(10):32-37.

- [8] 李志鹏. 二维条码军用包装物流管理系统总体方案设计[J]. 包装与食品机械, 2003, 21(5):15-17.
- [9] 王艳玮, 张平康, 李琪. 二维码在供电企业计量器具管理中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4):85-87.

#### 作者简介:

王治国(1978),男,河南周口人,高级工程师,从事电力系统智能化测试开发与研究工作;

笃峻(1975),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力系统自动化研究和管理工作的;

王肖立(1978),女,江苏常熟人,工程师,从事网站信息开发与维护工作的;

于哲(1979),男,山西运城人,工程师,从事电力系统继电保护及自动化测试工作的。

## Research on 2D-code-technology-based Management Method of the Protection Equipment in Smart Grid

WANG Zhiguo, DU Jun, WANG Xiaoli, YU Zhe

(Nanjing NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The operation information of intelligent protection equipment is changing during the equipment's life cycle, so it is difficult for managers in the intelligent protection equipment R&D or application enterprises to grasp the whole equipment information, not to say the efficient usage of equipment. According to the characteristics of intelligent protection equipment, the feasibility and advantage of the application of two-dimensional code technology were discussed. Finally according to the application requirements and based on the mature two-dimensional code technology, intelligent protection equipment management system was designed and developed on the basis of the existing equipment, gaining a quick access to equipment information and starting the approval process through the mobile terminal or computer. The practice shows that intelligent protection equipment management system by using two-dimensional code technology is superior and worth to be popularized.

**Key words:** two-dimensional code; information coding; electric power equipment; distributed management

(上接第34页)

- [11] 王德林, 王晓茹, THORP JAMES S. 电力系统的连续体系机电波模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17):30-37.
- [12] 燕跃豪, 毕天姝, 杨奇逊. 一种基于机电波理论的电网扰动在线定位方法[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(1):1-6.
- [13] 孟现磊. 受迫振动的能量共振[J]. 大学物理, 1996, 15(8):27-28.
- [14] 王茂海, 孙昊. 强迫功率振荡的在线定位分析技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6209-6215.

#### 作者简介:

郑斌青(1992),男,浙江杭州人,硕士研究生,从事电力系统稳定运行与控制方面的研究工作;

冯双(1990),女,江苏南京人,博士研究生,从事电力系统稳定运行与控制方面的研究工作;

吴熙(1987),男,江苏南京人,副研究员,从事电力系统稳定运行与控制方面的研究工作。

## Detection of Forced Oscillations Source Based on WAMS

ZHENG Binqing, FENG Shuang, WU Xi

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

**Abstract:** In order to obtain the accurate and rapid positioning of power oscillation source, based on the data of wide area measurement system (WAMS), a forced oscillation source location method by phase identification is presented. According to the conversion property of oscillation energy and phasor relationship, it is proposed that whether the source of the disturbance is located on the generator is determined by judging the absolute value of the phase difference between the generator total frequency and the output of electrical power. Utilizing the TLS-ESPRIT algorithm to extract the frequency and calculate the corresponding phase. The calculation results of examples show that the presented method to locate the disturbance source is feasible and effective, which is concise and intuitional and reduces the complexity of power system on-line detection and analysis.

**Key words:** forced oscillation; disturbance source location; phase identification; WAMS