

基于功率及频率波动相位的强迫扰动源定位

蒋 平, 郑斌青, 冯 双

(东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了实现电网强迫扰动源的准确快速定位, 基于广域测量系统提出一种比较有功功率波动及电压频率波动之间的相位关系来实现扰动源在线监测定位的方法。如果扰动源位于发电机上, 则发电机角频率的波动相位超前于输出电气功率的波动相位且相位差小于 90° 。在此基础上, 根据能量函数及扰动传播对网络中的支路进行分析, 如果支路有功功率波动及电压频率波动的相位差的绝对值小于 90° , 则支路上振荡能量流向与有功方向一致, 据此可实现电网扰动源的定位。采用 TLS-ESPRIT 算法能够直接获取系统稳态时的波动相位, 无需判断振荡进入稳态阶段的时间点, 且能够消除瞬态分量以及异常数据的影响。实际算例验证了所提方法的可行性及有效性。

关键词: 低频振荡; 扰动源定位; 相量; 主导频率; 相位辨识; 广域测量系统

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.018

0 引言

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^[1]。在电网可靠性得到提高、资源配置得到优化的同时, 低频振荡问题也成为影响电力系统安全稳定运行的关键问题。关于低频振荡的起因, 除了传统观点上的系统存在负阻尼会引起低频振荡, 越来越多的研究发现持续性的周期小扰动会引发系统的强迫振荡^[2-4], 且当振荡频率与系统的固有频率相等时, 系统功率振荡幅值达到最大。强迫振荡具有明确的扰动源, 起振快, 表现为持续的等幅振荡, 当扰动源切除后, 振幅迅速衰减。因此, 快速准确地定位扰动源是抑制强迫振荡首先需要考虑的问题。

实际电网发生强迫振荡时, 扰动源很难及时被发现和切除, 扰动源的定位受到了国内外学者越来越多的关注。文献[5-7]基于能量函数计算网络中的振荡能量, 根据能量的转换识别定位电网强迫扰动源。文献[8-9]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。文献[10]基于能量趋势函数计算出的量化指标来判断扰动源位置, 在能量函数法的基础上做了改进, 能够提高定位的准确性。文献[11]提出基于广域测量系统(WAMS)的空间特征椭圆和决策树混合定位扰动源的新方法。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, 引进了机电波在振荡源定位方面的应用, 提高了定位的快速性。

广域测量系统的广泛建设为扰动源的定位提供

了有效的技术手段。本文基于同步发电机转子方程, 对发电机的机械功率波动、输出电气功率波动及角频率波动间的相量关系进行理论分析, 给出了通过比较输出电气功率波动和角频率波动之间的相位关系判断扰动源是否位于发电机上的理论依据; 在此基础上分析网络中线路上的电气量波动的相位关系, 提出一种通过比较频率波动与有功功率波动之间的相位关系, 判断支路上的振荡能量流向进行扰动源定位的方法。采用最小二乘法旋转不变(TLS-ESPRIT)算法提取出主导频率下电气波动量的相位参数, 能够直接利用振荡初始阶段获取的数据, 消除了采集的电气量中非扰动源决定的分量, 提高了扰动源定位的准确性。此外, 本文方法基于广域测量系统实测数据直接识别频率和有功功率这 2 个电气量的相位参数并进行判断, 相对传统的能量函数法, 更加简洁、直观, 降低了系统在线监测分析的复杂性。

1 强迫振荡系统的能量特性

假设电力系统在机械功率扰动 $\Delta P_m = A \cos(\omega t)$ 的扰动下发生强迫振荡, 在平衡点附近线性化之后的发电机运动方程为:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} + \Delta P_e = \Delta P_m \quad (1)$$

其中, M 为发电机的惯性常量; $\Delta \delta$ 为发电机功角相对于平衡点的偏移量; D 为发电机阻尼系数; ΔP_e 为发电机输出电气功率波动。

根据暂态能量函数建立的方法^[6], 对式(1)进行积分, 可得:

$$\int_0^t M \Delta \dot{\omega} \Delta \omega d\tau + \int_0^t D \Delta \omega \Delta \omega d\tau + \int_0^t \Delta P_e \Delta \omega d\tau = \int_0^t \Delta P_m \Delta \omega d\tau \quad (2)$$
$$\Delta \omega = d\Delta \delta / dt$$

收稿日期: 2016-03-15; 修回日期: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577032)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577032)

在电力系统发生强迫振荡且达到稳态时,功角波动量、功率波动量、频率波动量等都能够用正弦函数来表示^[2]。则式(2)中各个部分在振荡周期内的平均函数为:

$$\begin{cases} \frac{1}{T} \int_0^T M \Delta \omega \Delta \dot{\omega} d\tau = 0 \\ \frac{1}{T} \int_0^T D \Delta \omega \Delta \omega d\tau + \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_e \Delta \omega d\tau = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_m \Delta \omega d\tau \end{cases} \quad (3)$$

其中, T 为系统强迫振荡的周期。

由式(3)可知,系统振荡过程中,外施扰动注入的能量在发电机阻尼上消耗一部分之后,剩余的振荡能量从发电机流向系统。

2 强迫振荡定位方法

2.1 发电机上扰动源的定位

设某一机组原动机上产生机械功率扰动,从而引起电力系统发生强迫振荡。将式(1)转换为相量形式,可表示为:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = j\Omega M \Delta \omega + D \Delta \omega \quad (4)$$

其中, ΔP_m 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 分别为机械功率波动 ΔP_m 、电气功率波动 ΔP_e 以及角频率波动 $\Delta \omega$ 的相量形式; $\Omega = 2\pi/T$ 。

根据式(4)可得,振荡稳态阶段发电机机械功率波动 ΔP_m 、输出电气功率波动 ΔP_e 以及角频率波动 $\Delta \omega$ 的相量关系如图 1 所示。

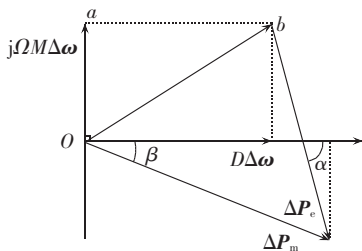


图 1 振荡过程中 ΔP_m 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 的相量关系图
Fig.1 Phasor relationship among ΔP_m , ΔP_e and $\Delta \omega$ during oscillation

图 1 中, α 为 ΔP_e 相对于 $\Delta \omega$ 的波动相位; β 为 ΔP_m 相对于 $\Delta \omega$ 的波动相位。由式(4)可以知道,相量 $j\Omega M \Delta \omega + D \Delta \omega$ 、 ΔP_e 和 ΔP_m 组成一个相量三角形,由图 1 可得 $\Delta \omega$ 的相位超前于 ΔP_e 的相位,且相位差 $\alpha < 90^\circ$ 。

由图 1 可知:当 β 增大时, α 也随之增大,直至 $\alpha = 90^\circ$,即表示单机无穷大系统发生强迫振荡时的相量图;当 D 减小时, ΔP_e 首端从点 b 向点 a 移动, ΔP_e 的幅值也随之增大,且其在 $\Delta \omega$ 正方向的投影也随之增大。因此,增大阻尼系数 D 是能够抑制强迫振荡的直接手段。

如果扰动源不在原动机上,此时有:

$$\Delta P_m = K(s) \Delta \omega \quad (5)$$

其中, $K(s)$ 为原动机及调速器的传递函数,具有负实部^[13]。式(5)表示原动机只含有由于转速反馈控制产生的机械功率波动,代入式(4)后,稳态阶段机械功率波动 ΔP_m 、输出电气功率波动 ΔP_e 和角频率波动 $\Delta \omega$ 的相量关系如图 2 所示。

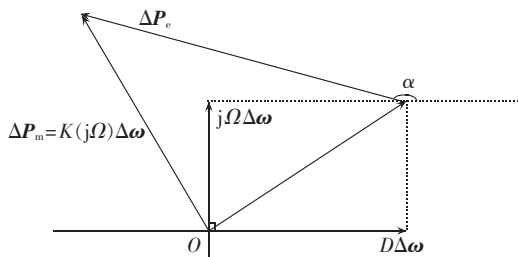


图 2 扰动源不在原动机上时振荡过程中 ΔP_m 、 ΔP_e 、 $\Delta \omega$ 的相量关系图

Fig.2 Phasor relationship among ΔP_m , ΔP_e and $\Delta \omega$ during oscillation when prime mover is not disturbance source

图 2 中, ΔP_m 位于第二象限,由此可得 $\alpha > 90^\circ$ 。

根据以上分析,可得扰动源是否位于发电机上的判据为:

$$0^\circ < \varphi_\omega - \varphi_{P_e} < 90^\circ \quad (6)$$

其中, φ_ω 、 φ_{P_e} 分别为发电机角频率波动的相位和输出电气功率波动的相位。如果式(6)成立,那么扰动源位于发电机上;否则,扰动源不在发电机上。

2.2 网络支路(非发电机)母线上扰动源的定位

根据第 1 节分析可知,发电机上扰动源注入的振荡能量除了消耗在阻尼上,剩余的能量向外输出。2.1 节根据发电机输出电气功率波动 ΔP_e 与角频率波动 $\Delta \omega$ 之间的相位关系判断扰动源是否位于发电机上,实际反映出发电机振荡能量的流向,若发电机是扰动源,则振荡势能从发电机流出;反之,则流入发电机。

在高压输电线中,电抗远远大于电阻,所以电阻可以忽略不计。由于电压幅值与有功功率的耦合非常小,因此在有功功率发生振荡时,节点电压幅值可看作不变。

假设一条与发电机相连的支路为 $L_{ei,j}$ 。虽然发电机所在母线以及变压器的等值电阻不可省略,但其等效电阻与电抗的比值仍然较小,对 $L_{ei,j}$ 上有功率波动影响非常小,几乎可以忽略不计。将线路 $L_{ei,j}$ 上的有功功率表达式线性化之后,可得:

$$\Delta P_{ei,j} = \frac{U_{ei} U_j}{X_\Sigma} (\Delta \delta_{ei} - \Delta \theta_j) = K (\Delta \delta_{ei} - \Delta \theta_j) \quad (7)$$

其中, U_{ei} 、 U_j 分别为发电机机端电压以及节点 j 的电压; X_Σ 为支路的电抗; $\Delta \delta_{ei}$ 、 $\Delta \theta_j$ 分别为发电机内节点电压相角波动和节点 j 的电压相角波动; $\Delta P_{ei,j}$ 为线路上的有功功率波动(发电机输出的电气功率波动); $K = U_{ei} U_j / X_\Sigma$ 。

对式(7)两边求导,并用相量表示为:

$$\frac{j\Omega}{K}\Delta P_{ei,j} = \Delta\omega_{ei} - \Delta\omega_j \quad (8)$$

其中, $\Delta\omega_{ei}$ 、 $\Delta\omega_j$ 分别为发电机内节点角频率波动 $\Delta\omega_{ei}$ 和节点 j 的角频率波动 $\Delta\omega_j$ 的相量形式。

分别在发电机为扰动源以及发电机不是扰动源的情况下,即振荡能量在 $L_{ei,j}$ 上从发电机流向节点 j 以及从节点 j 流向发电机,作出式(10)对应的相量图,分别如图 3、图 4 所示。图 3、4 中, α_1 为 $\Delta P_{ei,j}$ 与 $\Delta\omega_j$ 之间的夹角。图 3 中, $\alpha_1 < 90^\circ$, 节点 j 上的振荡能量的流向与有功功率流向一致。可以发现,随着 Ω/K 的大小变化, $\Delta\omega_j$ 的相位从超前 $\Delta P_{ei,j}$ 的相位变成滞后 $\Delta P_{ei,j}$ 的相位。图 4 中, $\alpha_1 > 90^\circ$, 节点 j 上振荡能量的流向与有功功率流向相反。

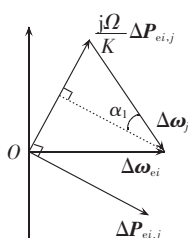


图 3 发电机是扰动源时振荡过程中 ΔP_{ei} 、 $\Delta\omega_{ei}$ 、 $\Delta\omega_j$ 的相量关系图

Fig.3 Phasor relationship among ΔP_{ei} 、 $\Delta\omega_{ei}$ 、 $\Delta\omega_j$ during oscillation when generator is disturbance source

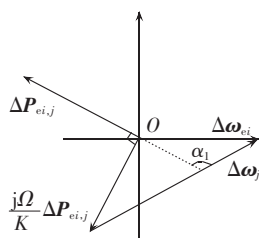


图 4 发电机不是扰动源时振荡过程中 ΔP_{ei} 、 $\Delta\omega_{ei}$ 、 $\Delta\omega_j$ 的相量关系图

Fig.4 Phasor relationship among ΔP_{ei} 、 $\Delta\omega_{ei}$ 、 $\Delta\omega_j$ during oscillation when generator is not disturbance source

将式(8)用时域表示并对两边进行积分,可得:

$$\int_0^t \Delta P_{ei,j} \Delta\omega_{ei} d\tau = \int_0^t \Delta P_{ei,j} \Delta\omega_j d\tau \quad (9)$$

从式(9)可以发现,振荡能量随着支路节点电压角频率变化和传输的有功功率变化而沿着支路流动,母线电压角频率偏差 $\Delta\omega_j$ 与支路有功功率偏差 $\Delta P_{ei,j}$ 之间的相量关系反映了振荡能量流向。其中,节点频率偏差 $\Delta f_i = \Delta\omega_i / (2\pi)$, 因此 Δf_i 与 $\Delta\omega_i$ 同相位。可将 2.1 节中的判据推广到网络中不含发电机的支路上,即:

$$|\varphi_{fi} - \varphi_{P_{ij}}| < 90^\circ \quad (10)$$

其中, φ_{fi} 、 $\varphi_{P_{ij}}$ 分别为节点电压频率波动量的相位和与节点相连支路上的有功功率波动的相位。如果式(10)成立,那么支路上振荡能量的流向与有功功率流向一致;否则,振荡能量的流向与有功功率流向相反。振荡过程中,电压幅值的波动很小,对有功波动的影响可以忽略不计。对于一般线路而言,由于电阻的存在,会使相位差发生变化,但偏差非常小且不影响判据的判定结果。

周期性负荷扰动等效于对发电机施加一个与周期性负荷扰动同步的强迫项。因此,当扰动源位于负荷上时,上述方法仍能实现扰动源的准确定位。

3 强迫振荡的在线监测定位

3.1 基于 TLS-ESPRIT 算法获取波动相位

第 2 节中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,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是比较困难的,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。

设波动信号 $f(n)$ 可以表示为一系列幅值按指数规律变化的正弦信号与白噪声的组合,在采样时刻 n ,其表达式为:

$$f(n) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\varphi_i} e^{(-\sigma_i + j\omega_i)nT_s} + w(n) \quad (11)$$

其中, T_s 为采样周期;由于采样信号为实信号, N 通常为信号实际含有的实正弦分量个数的 2 倍; a_i 、 φ_i 、 ω_i 、 σ_i 分别为第 i 个衰减分量的幅值、初始相位、角频率和衰减系数; w 为均值为 0 的白噪声。

TLS-ESPRIT 算法是 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^[14]。利用相量测量单元(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。

3.2 振荡源定位流程

根据以上分析,可以基于广域测量系统获得的实测数据,根据模态的辨识结果,得到扰动源的在线监测定位方法,步骤主要分为 3 步:(1)数据预处理,剔除异常数据;(2)获取相位,比较相位关系并判断支路振荡能量流向;(3)判断支路振荡能量是否都流出该母线,若是则振荡源位于该母线上。振荡源定位流程如图 5 所示。

4 算例分析

本文分别在 4 机 2 区系统和实际系统中进行仿真分析,验证本文提出方法的可行性及有效性。

4.1 4 机 2 区系统

4 机 2 区系统的结构图^[15]如图 6 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 G_1 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

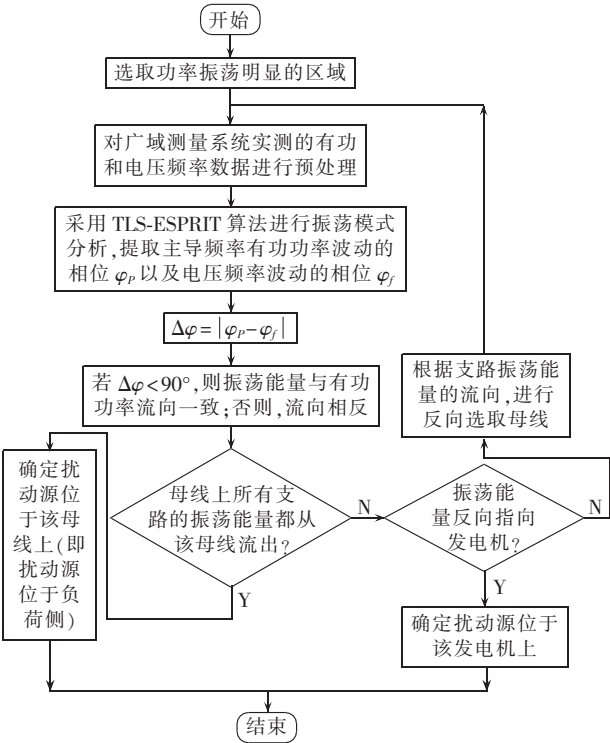


图 5 扰动源在线监测定位流程图
Fig.5 Flowchart of online disturbance source monitoring and locating

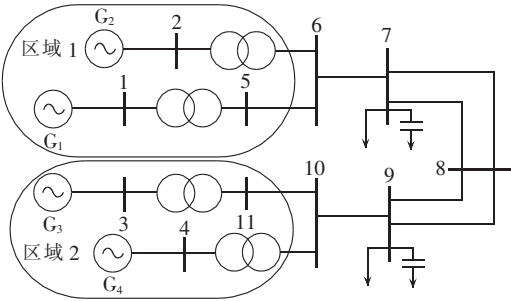


图 6 4 机 2 区系统
Fig.6 Four-generator two-area system

区域间发生强迫振荡,区域间联络线上有功功率 P_{12} 的波动曲线如图 7 所示。

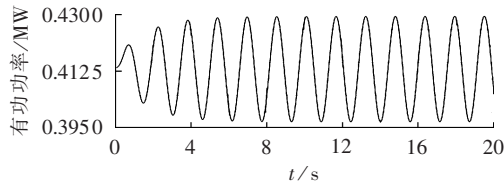


图 7 联络线有功功率振荡波形
Fig.7 Oscillation waveform of tie-line active power

TLS-ESPRIT 算法获取主导振荡频率下的波动相位并进行能量流向判断,其结果如表 1 所示。

由表 1 中判别结果,首先根据节点 7 的频率波动与支路 7-8 上有功波动的相位差的绝对值为 49° ,可以判断联络线 7-8 上的振荡能量与有功方向一致,振荡能量从区域 1 流向区域 2,故判定扰动源位

表 1 波动相位及其判别结果
Table 1 Fluctuation phase-angles and recognition results

母线节点	$\varphi_f/(^\circ)$	支路	$\varphi_P/(^\circ)$	$ \varphi_P-\varphi_f /(^\circ)$	振荡能量流向
7	-120.1	7-8	-169.1	49.0	7→8
1	-116.8	G ₁ -1	-141.5	24.7	G ₁ →1
2	-26.8	G ₂ -2	227.1	253.9	1→G ₂

于区域 1;同理,分别进行机组出线 G₁-1 和 G₂-2 上支路振荡能量流向判别,振荡能量从发电机 G₁ 流出,而从发电机 G₂ 流入,故可判断扰动源位于发电机 G₁ 上,与实际情况相符合。

如果在系统发生振荡过程中,测量数据存在异常,数据进行预处理后用 TLS-ESPRIT 算法进行模式辨识,曲线拟合结果如图 8 所示。获取主导频率下的相位 $\varphi_{P_{7-8}}=163.4^\circ$ 。

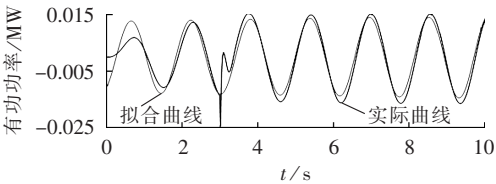


图 8 振荡模式辨识曲线拟合结果
Fig.8 Result of curve-fitting by oscillation mode identification

同理,获得主导频率下相应节点频率波动相位 $\varphi_{f7}=116.7^\circ$,求得相位差的绝对值为 46.7° ,这与计算结果 49° 相差不大,仍能够正常判断出振荡能量的走向,实现扰动源的准确定位。

4.2 实际区域电网仿真分析

现以某区域电网在某种常见运行方式下进行仿真,其局部接线图如图 9 所示。

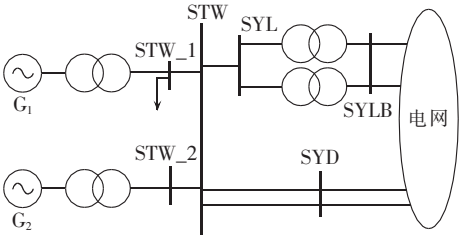


图 9 实际电网局部接线图
Fig.9 Partial diagram of actual power system

经过小干扰稳定分析得到某台发电机强相关的局部振荡模式,频率为 0.8 Hz。在该台发电机附近的负荷母线上施加幅值为 0.1 p.u.、扰动频率为 0.8 Hz 的持续性波动负荷,此时该系统发生强迫振荡。根据功率波动的情况,选取振荡情况较明显的支路进行分析。判别结果如表 2 所示。根据表 2,首先分析支路 SYL-SYLB 和 SYL-STW,获得有功波动相位与节点电压频率波动相位之差的绝对值分别为 52.5° 和 65° ,可以发现振荡能量流向与有功流向一致,从母线 STW 流入母线 SYL,又从母线 SYL 流入母线

表 2 波动相位及其判别结果

Table 2 Fluctuation phase-angles and recognition results

支路	$ \varphi_P - \varphi_r / (^\circ)$	振荡能量流向
SYL-SYLB	52.5	SYL→SYLB
SYL-STW	65.0	STW→SYL
STW-SYD	68.4	STW→SYD
STW-STW_1	240.6	STW_1→STW
STW-STW_2	273.4	STW→STW_2
STW_1-G ₁	270.3	STW_1→G ₁

SYLB,并由母线 SYLB 流向其他母线节点。

根据振荡能量流向逆向选取母线 STW。再分析支路 STW-SYD、STW-STW_1 及 STW-STW_2,根据相位差判据可以发现振荡能量由母线 STW 流入母线 SYD 和 STW_2,由母线 STW_1 流向母线 STW。

反向选取母线 STW_1,分析支路 STW_1-G₁,根据相位差可以发现振荡能量由母线 STW_1 流入发电机 G₁。因此,可判断扰动源位于负荷母线 STW_1 上,与实际情况一致。

5 结论

本文从有功功率波动和电压频率波动之间的相量关系角度,采用相量法进行理论分析,给出了振荡能量的流向判据,从而实现强迫扰动源的定位。通过在 4 机 2 区系统以及实际区域电网仿真,验证了该方法的可行性及有效性。本文定位方法采用 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。该方法只需获取支路有功功率以及母线电压频率的数据,均来自于母线上 PMU 的实测数据,从而能够具体对网络某条支路进行分析。该定位方法简单、直观,最大限度地减少了在线监测分析的复杂性。

此外正确区分振荡性质并进行识别定位扰动源,将会提高定位方法的应用广泛性以及实用性,这也将成为下一步研究的重要内容。

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.
DENG Jixiang,HE Jianming. Analysis of low frequency oscillation for Sichuan Power Grid in large scale interconnected power systems[J]. Power System Technology,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,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.
- [3] 余一平,闵勇,陈磊. 多机电力系统强迫功率振荡稳态响应特性分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):5-9.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei. Analysis of forced power oscillation steady-state response properties in multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(22):5-9.

- [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.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei,et al. Analysis of forced power oscillation caused by continuous cyclical load disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):7-11.
- [5] 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.
- [6] 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,2010,34(5):1-6.
YU Yiping,MIN Yong,CHEN Lei,et al. Disturbance source location of forced power oscillation using energy functions[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5):1-6.
- [7] CHEN Lei,MIN Yong,HU Wei. An energy-based method for location of power system oscillation source[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,28(2):828-836.
- [8] 李文锋,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.
LI Wenfeng,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.
- [9] 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):78-80.
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):78-80.
- [10] 褚晓杰,印永华,高磊,等. 基于经验模态理论的强迫振荡扰动源定位新方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4906-4912.
CHU Xiaojie,YIN Yonghua,GAO Lei,et al. A new forced oscillation disturbance source location method based on empirical mode theory[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(28):4906-4912.
- [11] 蒋长江,刘俊勇,刘友波,等. 基于广域测量系统和 CELL 理论的强迫振荡在线感知与定位[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):125-131.
JIANG Changjiang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Online forced oscillation detection and identification based on wide area measurement system and CELL theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):125-131.
- [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.
YAN Yuehao,BI Tianshu,YANG Qixun. An on-line disturbance location algorithm for power networks based on the electromechanical waves theory[J]. Journal of North China Electric Power University,2014,41(1):1-6.
- [13] 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.
WANG Maohai,SUN Hao. An analysis method for forced power oscillation source detection[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6209-6215.
- [14] 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.
[15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:Mc Graw-Hill,Inc., 1994:548-551.

作者简介:

蒋 平(1954—),男,江苏溧阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用(E-mail:jping@seu.edu.cn);



蒋 平

郑斌青(1992—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定运行与控制方面的研究工作(E-mail:18668172356@163.com);

冯 双(1990—),女,江苏南京人,博士研究生,主要从事电力系统稳定运行与控制方面的研究工作(E-mail:fengshuang429@139.com)。

Forced disturbance-source locating based on phase-angle between power and frequency fluctuations

JIANG Ping,ZHENG Binqing,FENG Shuang

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

Abstract: In order to accurately and rapidly locate the forced disturbance-source of power system,an online monitoring and locating method based on the wide-area measurement system is proposed,which compares the phase-angle between the active power fluctuation and the voltage frequency fluctuation. If generator is the disturbance-source,the angular frequency fluctuation phase-angle is in advance of the power output fluctuation phase-angle and the angle difference is less than 90°. On this basis,the branches of network are analyzed according to the energy function and disturbance propagation. If the absolute phase-angle difference between the active power fluctuation of a branch and the voltage frequency fluctuation is less than 90°,then the oscillation energy flow of the branch and the active power flow have same direction,the disturbance-source of power system can then be located accordingly. The TLS-ESPRIT algorithm is adopted to directly obtain the phase-angle of fluctuation when the system is in steady state,the time when the oscillation enters the steady-state stage is not required,and the influence of transient components and abnormal data could be eliminated. Calculative results of case study verify the feasibility and validity of the proposed method.

Key words: low-frequency oscillation; disturbance-source locating; phasor; dominant frequency; phase identification; wide-area measurement system

“新能源与新负荷背景下的电网安全”专题征稿启事

风电、光伏等新能源与电动汽车、高铁、变频调速等新负荷的快速发展和广泛接入是当前电网发展的重要趋势,其带来的功率随机性、波动性和源荷侧电力电子化问题正对电网的安全稳定运行造成重大挑战。针对这一热点问题,《电力自动化设备》编辑部特别推出“新能源与新负荷背景下的电网安全”专题,并邀请河海大学鞠平教授担任专题特约主编,组织本领域的优秀稿件,集中展现新能源与新负荷背景下电网安全分析和控制技术的最新研究进展。现诚邀高等院校、科研院所及相关企业的专家、学者踊跃投稿。专题拟于 2017 年 8 月出版(正刊)。

一、征稿范围

征稿涵盖新能源与新负荷背景下的电网安全相关技术领域,包括但不限于以下方向:

- (1) 新能源的特性与建模;
- (2) 新负荷的特性与建模;
- (3) 新能源与新负荷作用下电网安全稳定机理;
- (4) 多种随机因素作用下电网安全稳定分析;
- (5) 源荷侧电力电子化对电网安全稳定影响分析;
- (6) 新能源和新负荷作用下电网安全稳定分析方法;
- (7) 新能源和新负荷作用下电网安全稳定控制技术;

- (8) 源-网-荷协同的安全运行调度技术;
- (9) 新能源与主动负荷控制技术。

二、投稿截止日期

2017 年 4 月 15 日。

三、投稿要求

(1) 内容要求:所投稿件须是未公开发表的原创学术论文,具有较强的理论性、前瞻性和技术性,对实际应用有较好的参考价值;研究数据、过程、结果真实准确;无政治错误,无政治、军事和科学技术泄密情况。

(2) 排版要求:论文格式按照《电力自动化设备》杂志论文模板编排(模板可在电力自动化设备杂志社官网 www.epae.cn 下载),全文以不超过 7 页为宜。

(3) 署名及作者信息要求:须确认全体作者的署名及排序无争议。

四、投稿方式

请登录电力自动化设备杂志社官网 www.epae.cn 进行作者注册后在线投稿,投稿栏目请务必选择“新能源与新负荷背景下的电网安全专题”。