

考虑关键节点信息缺失的低频振荡扰动源定位方法

李红俊¹,董 彧²,赵文祥¹,孟 涛³,潘 捷³,商显俊⁴(1. 江苏大学 电气信息工程学院,江苏 镇江 212000;2. 新南威尔士大学 电气与通信工程学院,澳大利亚 悉尼 1466;
3. 国网山西省电力公司,山西 太原 030000;4. 国网江苏省电力公司常州供电公司,江苏 常州 213000)

摘要:目前电力系统中相量测量单元(PMU)的配置无法满足电网整体的可观测性要求,关键节点的数据缺失是扰动源定位的一大硬伤。在结合电网数据采集与监视控制(SCADA)系统和广域测量系统(WAMS)的基础上,提出一种考虑关键节点数据缺失的低频振荡扰动源定位方法。首先定义低频振荡的耗散能量,分析耗散能量具有方向性的物理机制;然后综合 PMU 和 SCADA 的数据进行曲线回归分析,补偿缺失的关键节点数据。某电网算例结果表明,所提方法能够满足扰动源准确定位的要求。

关键词:电力系统;低频振荡;扰动源定位;信息缺失;回归分析;稳定

中图分类号:TM 712

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.030

0 引言

电力系统低频振荡是电网运行控制过程中关注的一个重要问题。华中电网广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 主站系统在 2007 年 7 月到 2009 年 3 月期间,总共监测到 2 360 次低频振荡事件,证明电网时刻都处在低频振荡的威胁之中^[1]。低频振荡问题日益凸显的原因主要有 4 个方面:一是高放大倍数、快速响应励磁系统的采用;二是日益加重的线路传输功率;三是电网故障造成的网络强度减弱;四是发电机控制系统参数不当^[2-5]。目前,互联系统之间的低频振荡极少发生,更为常见的是由局部扰动源引发的点对网的振荡,主要包括强迫功率振荡和局部负阻尼振荡 2 类^[6-8]。

局部扰动源引发的低频振荡存在明显的扰动源,扰动源切除后振荡即可平息,相关学者已经就如何快速、准确地定位扰动源进行了一定的研究。目前,WAMS 的技术正得到不断完善,这使得获取高质量的网络实时动态数据成为了可能,基于 WAMS 的低频振荡在线控制方法是扰动源定位研究的主要方向。文献[9-11]提出了一种计算能量流的实用方法,减少了网络振荡能量流中的暂态能量分量,只计算支路消耗或产生的能量,根据能量流的方向定位扰动源。文献[12-13]在此基础上,基于关键线路的 WAMS 动态信息构建不同层次的网络割集,将振荡能量流出的割集判断为振荡源,并根据励磁转矩和调速转矩的振荡能量排查控制系统的异常。

由于价格和通信技术的限制,目前电网中的相量测量单元 PMU (Phasor Measurement Unit) 配置尚无法完全满足可观测性的要求,因此在扰动源在线定位的过程中,面临着关键线路或节点信息缺失的问题。如何利用仅有的 PMU 信息实现低频振荡扰动源准确定位成为目前工程上较为现实的问题。一

个可以尝试的思路是综合数据采集与监视控制(SCADA)系统和已有的 PMU 信息进行广域动态实时状态估计,补全扰动源定位所需的电气量信息^[14-15]。文献[16]尝试对该问题进行了探索,但是该文献方法对于全网 PMU 的配置提出了一定的要求,在实际工程中实施难度较大。

本文提出了一种考虑广域测量信息缺失的低频振荡扰动源定位方法。首先对低频振荡耗散能量的物理意义进行分析,证明了耗散能量的传播方向是扰动源定位的充分必要条件;然后建立电气量的振荡方程,借助 SCADA 系统的静态数据和邻近 PMU 的动态数据,采用回归分析法拟合振荡曲线,利用拟合数据计算网络的耗散能量,从而判别振荡源的位置;最后,基于华中电网仿真数据构造振荡算例,证明了本文所提方法的有效性。

1 耗散能量

1.1 耗散能量的定义

文献[17-18]提出一种发电机、线路和负荷的能量函数构造方法,并推导了系统的能量守恒方程。支路 L_{ij} 在振荡发生后由母线 i 向 j 传输的振荡能量为:

$$E_{ij} = \int \text{Im}(\mathbf{I}_{ij}^* d\mathbf{U}_i) = \int \text{Im} \left[\frac{P_{ij} + jQ_{ij}}{U_i} d(U_i e^{j\theta_i}) \right] = \int \text{Im} \left[\frac{P_{ij} + jQ_{ij}}{U_i e^{j\theta_i}} (e^{j\theta_i} dU_i + jU_i e^{j\theta_i} d\theta_i) \right] = \int P_{ij} d\theta_i + \frac{Q_{ij}}{U_i} dU_i \quad (1)$$

其中, $\mathbf{I}_{ij}^*$ 为支路 L_{ij} 电流相量的共轭; $\mathbf{U}_i$ 为母线 i 的电压相量; θ_i 为母线 i 的电压相角; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为从母线 i 向母线 j 传输的有功功率和无功功率。

文献[9]将式(1)中各变量用相对于稳态值的变化量表示,并忽略了网络中无功功率和节点电压

的变化,得到母线 i 向母线 j 传输的耗散能量为:

$$E_{\text{dis}} = \int (P_{ij} - P_{ij,s}) d(\theta_i - \theta_{i,s}) = 2\pi \int (P_{ij} - P_{ij,s}) (f_i - f_{i,s}) dt \quad (2)$$

其中, P_{ij} 和 $P_{ij,s}$ 分别为线路有功功率的动态值和稳态值; θ_i 和 $\theta_{i,s}$ 分别为母线电压相角的动态值和稳态值; f_i 和 $f_{i,s}$ 分别为频率的动态值和稳态值。

根据文献[9],扰动源机组发出耗散能量,受扰机组吸收耗散能量,由耗散能量的传播方向可实现扰动源定位。计算发电机耗散能量时, P_{ij} 应取发电机的电磁功率, θ_i 和 f_i 分别应取机端母线的电压角度和频率;计算线路耗散能量时, P_{ij} 应取线路有功功率, θ_i 和 f_i 分别应取一端母线的电压角度和频率。

1.2 耗散能量的方向性

如图1所示两机简化系统,两侧发电机的等效电动势分别为 E_M 和 E_N ,假设 M 侧发电机为扰动源机组, N 侧发电机为受扰机组, S 为两机联络线上任意一点。

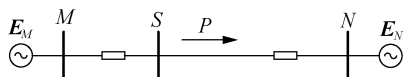


图1 两机简化系统

Fig.1 Simplified two-machine system

M 侧发电机的功-角特性曲线如图2所示。在低频振荡过程中,发电机电磁功率和转子角度均围绕其稳态运行点 s 波动;若振荡为负阻尼,运行点的波动轨迹为 $s-b-a-b'-a'-b''-a''-\dots$;若振荡为零阻尼,运行点的波动轨迹为 $s-b-a-b-a-b-\dots$ 。

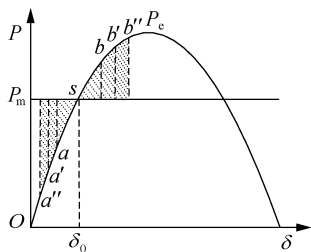
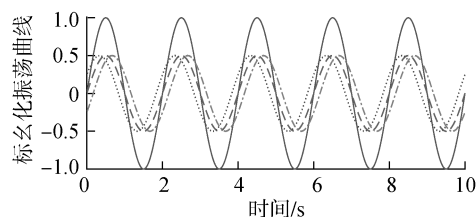


图2 发电机功-角特性曲线

Fig.2 Power-angle characteristic curve of generator

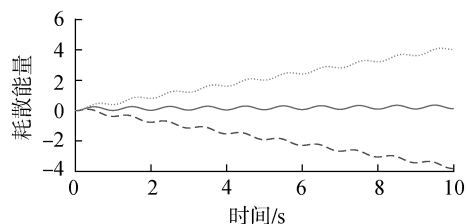
发电机电磁功率达到最大值时,其转子角度也达到最大值,因此发电机电磁功率与转子角度的振荡相位相同。图3(a)中显示了发电机电磁功率和转子角度的标么化振荡曲线,并将转子角度的相位分别超前和滞后了 $\pi/6$,可以认为其为发电机机端的电压角度振荡曲线。将式(2)中的 θ_i 分别取正常相位以及超前和滞后的相位计算耗散能量,结果见图3(b)。

θ_i 取发电机转子角度时,耗散能量的含义为发电机加速和减速能量的累加,由于振荡围绕的稳态



—电磁功率, -- 转子角度, 相位超前, -.- 相位滞后

(a) 标么化振荡曲线



—转子角度, -- 相位超前, 相位滞后

(b) 耗散能量

图3 耗散能量计算结果

Fig.3 Calculation results of dissipation energy

点不变,其结果必然无明显方向性; θ_i 振荡相位超前转子 $\pi/6$ 时,耗散能量计算结果呈明显下行趋势; θ_i 振荡相位滞后转子 $\pi/6$ 时,耗散能量计算结果呈明显上扬趋势。故耗散能量存在方向性的根本原因是转子角度和机端电压角度间存在一定的相位差。

1.3 振荡相位分析

在一个电力网络中,任一发电机发出的功率是该发电机电势相对于其他发电机电势相量的相角差的函数,即:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{j=1, j \neq i}^n E_j |Y_{ij}| \sin(\delta_{ij} + \beta_{ij}) \quad (3)$$

其中, P_{ei} 为发电机 i 的电磁功率; E_i 、 E_j 分别为发电机 i 和 j 的电动势; Y_{ij} 为发电机电势节点 i 和 j 之间的互导纳; G_{ii} 为发电机 i 的自电导; $|Y_{ij}|$ 为 Y_{ij} 的模值; n 为发电机的总台数; δ_{ij} 为 E_i 与 E_j 相量间的夹角; $\beta_{ij} = \arctan(G_{ij}/B_{ij})$ 。

由式(3)可知,扰动源机组转子主动的振荡会影响受扰机组的电磁功率,导致受扰机组转子的转矩不平衡而被迫振荡。当扰动源机组的电动势角度增大时,受扰机组的电磁功率将减小,其机械转矩将大于电磁转矩,从而受扰机组的电动势角度也开始增大,并趋向于保持两机的转子角度差与初始值一致。在振荡过程中,受扰机组的转子角度始终在追赶扰动源机组的转子角度,并且由于其转子惯性的存在,其振荡相位滞后扰动源机组。

由于式(3)中包含了节点之间的互导纳,因此某台发电机的电磁功率主要受其附近机组的电动势相角影响。在振荡过程中,扰动源主要影响其近端的机组,近端机组受扰后再进一步影响远方的机组,沿着

振荡能量的传播方向,机组转子的振荡相位依次滞后。在其他条件相同的情况下,机组间的电气距离越小,相互间的同步力越大,则振荡相位差越小。

1.4 耗散能量判据的充分必要性

在两机振荡简化模型中,扰动源机组的机械振荡导致了网络的电磁振荡,而网络的电磁振荡又导致了受扰机组的机械振荡。在多机系统中,这种由机械振荡导致电磁振荡,电磁振荡由近及远传播,最终再由电磁振荡导致机械振荡的传播机制并没有改变。主动振荡的电气量在相位上总要超前被动振荡的电气量,在同步力的作用下,被动振荡的电气量在相位上总是在追赶主动振荡的电气量。因此,发电机转子与其机端的振荡相位关系仍然存在。

当式(1)中的 θ_i 取为机端电压角度时,由于其振荡相位超前或滞后转子角度,导致耗散能量呈现出方向性。当机端电压角度振荡相位超前电磁功率时,耗散能量呈下行趋势,该机组为受扰机组;当机端电压角度振荡相位滞后电磁功率时,耗散能量呈上扬趋势,该机组为扰动源机组。因此,耗散能量的方向是判断扰动源的充分必要条件。

2 动态信息的补偿

2.1 动态信息补偿思路

目前,我国电网 PMU 测点设置的基本情况是:500 kV 及以上电压等级和重要电厂基本实现了完整配置,220 kV 电压等级配置率大致为 50%。在这种情况下,PMU 配置无法满足所有设备的可观测性要求,在扰动源在线定位的过程中,关键节点的 PMU 数据缺失成为难以避免的问题。

文献[12]提出先通过 Prony 分析进行振荡模式分解与识别,再进行耗散能量计算的思路。Prony 分解后,主振荡模式可以用三角函数表示:

$$y(t) = y_0 + Ae^{\sigma t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

其中, y_0 为振荡的稳态运行点; A 为振荡幅度; σ 为阻尼比; ω 为振荡频率; φ 为初始相位。

电网 SCADA 系统约 2 s 刷新一次数据,可提供一组静态数据用于动态数据拟合。由第 1 节分析知,耗散能量的方向性主要取决于电磁功率和机端电压相角的振荡相位差。拟合出的数据若能保持正确的超前或滞后关系,即可判断耗散能量的传播方向。对一个未配置 PMU 的节点而言,稳态运行点可取振荡开始前的 SCADA 数据;在振荡过程中,临近点的振荡频率可认为近似相同,因此只要振荡区域内存在一个 PMU 测点,则可知本次低频振荡的振荡频率。

综上所述,式(4)中真正未知的参数只有 3 项,采取在 3 个时标下的 SCADA 静态数据联立方程,即可求解未知变量。考虑到 SCADA 数据的误差及其

与主振荡模式数据之间必然存在的数值差异,采用曲线回归分析的方法求取未知参数。

2.2 曲线回归分析

曲线回归分析是以最小二乘法分析数据变化特征和规律的方法^[19]。其主要内容包括:确定 2 个变量之间遵循的数学模型或规律;估计表示该种曲线关系特点的重要参数,通过方差和相关系数评价拟合效果(方差越小,相关系数越接近 1,说明拟合效果越好);为获取动态数据进行内插,或在论据充足时作出理论上的外推。

在低频振荡过程中,式(4)即可作为电气量主振荡模式遵循的数学模型。SCADA 系统能够提供一组离散点(至少获取 3 个点),根据最小二乘法可确定式(4)中的参数;参数确定后,即可获取整个振荡过程的动态数据,从而补全 PMU 数据。

为优化曲线回归分析的拟合结果,宜采用以下 2 种办法。

a. 在振荡过程中,由于网架结构和负荷等因素可能发生变化,振荡模式也会随之改变,同一个振荡模型很难适应长时间的振荡数据,宜采用分时段辨识的方法,避免长时间的计算不准确;

b. 补偿数据的振荡频率采用的是邻近 PMU 测点数据的 Prony 分析结果,由于 Prony 算法本身可能存在误差,在该振荡频率下的拟合效果可能并不理想。在拟合效果欠佳的情况下,应对振荡频率进行微调。本文以 0.01 Hz 为步长,在 Prony 分析结果 ± 0.1 Hz 的范围内进行搜索最佳振荡频率,直至方差最小或相关系数最大。

3 算例验证

以华中电网为例验证本文所提方法,华中电网部分 500 kV 网架结构如图 4 所示。通过更改锦一

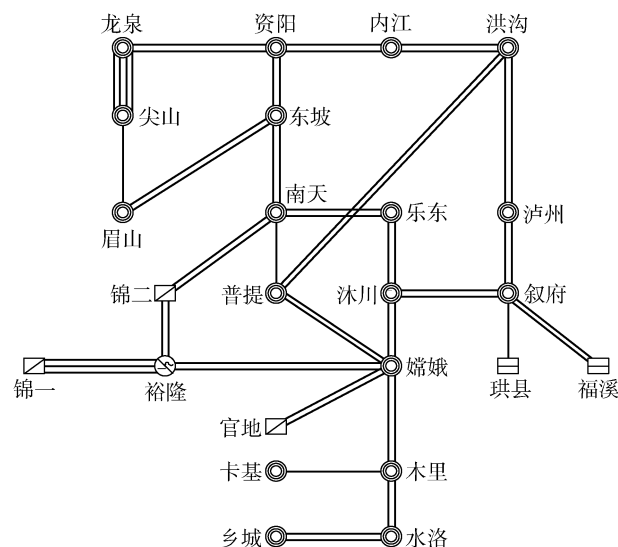


图 4 华中电网地理接线图

Fig.4 Geography diagram of Central China Power Grid

电厂机组的控制系统参数和出线电抗以弱化厂内机组阻尼。设置锦一电厂1回出线无故障跳闸,激发局部负阻尼振荡。假设SCADA系统提供了系统第1 s、3 s、5 s、7 s、9 s的静态数据,并且网络中只有一部分电气设备设置了PMU测点,在部分信息缺失的情况下对振荡的扰动源进行定位。

3.1 扰动源机组

假设锦一电厂并未配置PMU测点,对锦一电厂附近的PMU测量数据进行Prony分解,可知其主振荡模式的振荡频率为0.644 Hz,该振荡频率可视为锦一电厂电气量的振荡频率。借助曲线回归分析法对该厂1号机组进行动态信息补偿,采用式(4)作为其数学模型,计算结果如表1所示,表中,频率偏差是真实频率与额定频率的差值。

表1 回归分析计算结果

计算结果	有功功率	频率偏差
稳态点	600 MW	0 Hz
振荡幅度	92.25 MW	0.049 37 Hz
振荡频率/Hz	0.644	0.644
初始相位/rad	6.203	-4.98
阻尼比	-0.000 614 7	-0.065 83
方差	81.86	1.749×10^{-5}
相关系数	0.995 9	0.998 7

有功功率和频率偏差的拟合数据与原数据对比如图5所示。

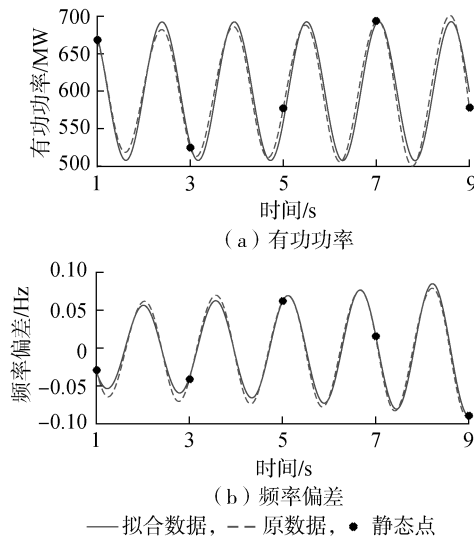


图5 拟合数据与原数据对比图

Fig.5 Comparison between fitting data and original data

由于回归分析计算采用的振荡频率为0.644 Hz,有功功率的拟合效果一般,方差较大,相关系数较小。为获取最优拟合结果,对振荡频率进行了微调,其计算结果如表2所示。

表2 回归分析计算结果

计算结果	有功功率	频率偏差
稳态点	600 MW	0 Hz
振荡幅度	89.6 MW	0.050 66 Hz
振荡频率/Hz	0.647	0.647
初始相位/rad	2.955	1.208
阻尼比	-0.003 751	-0.063 14
方差	21.91	1.811×10^{-7}
相关系数	0.998 9	1

有功功率和频率的拟合数据与原数据对比如图6所示。

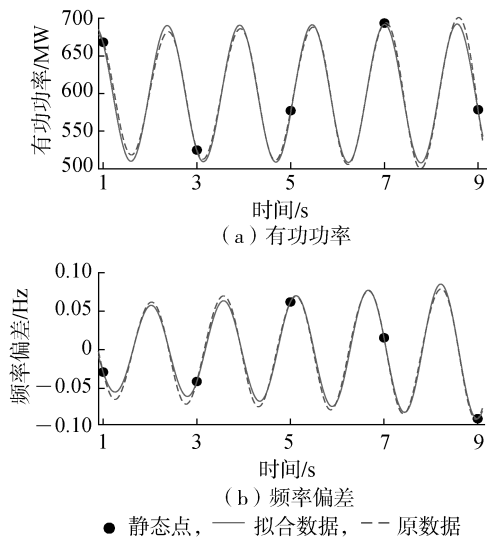


图6 拟合数据与原数据对比图

Fig.6 Comparison between fitting data and original data

在图6中,拟合出的动态数据与原数据重合度较高,且振荡相位差别不大。根据式(2)分别用拟合数据和原数据计算1~9 s的耗散能量,结果见图7。

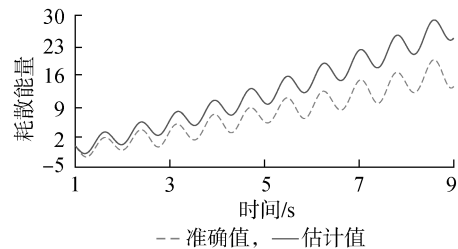


图7 耗散能量对比图

Fig.7 Comparison of dissipation energy

由于拟合数据只是原数据的主振荡模式,两者之间必然存在一定的数量差距,这是采用回归分析无法避免的。但只要准确把握电磁功率和频率偏差的振荡相位关系,就能够保证耗散能量传播方向的准确性。根据图7显示的计算结果,锦一电厂1号机组为扰动源。

3.2 受扰机组

假设官地电厂未配置 PMU,对官地 1 号机组的动态数据进行补偿,初始振荡频率仍然采用 0.644 Hz,拟合计算结果如表 3 所示。

表 3 回归分析计算结果

Table 3 Calculation results of regression analysis

计算结果	有功功率	频率偏差
稳态点	600 MW	0 Hz
振荡幅度	19.27 MW	0.014 69 Hz
振荡频率/Hz	0.679	0.658
初始相位/rad	0.154 4	-0.362 7
阻尼比	-0.042 98	-0.017 1
方差	9.105	4.029×10^{-9}
相关系数	0.992 7	1

有功功率和频率偏差的拟合数据与原数据对比如图 8 所示。

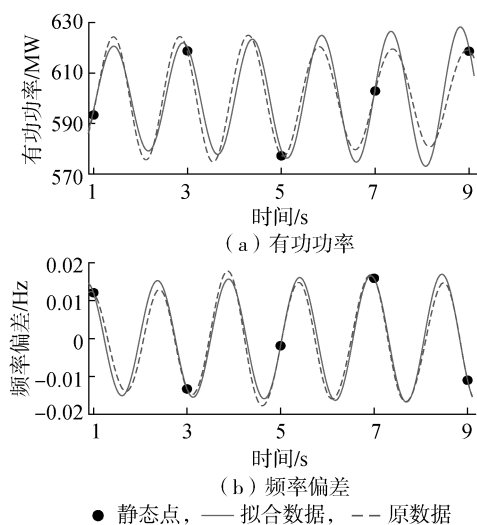


图 8 拟合数据与原数据对比图

Fig.8 Comparison between fitting data and original data

在振荡的初始阶段,振荡往往需要经历短暂的调整过程,该厂机组电磁功率的振荡幅度在初始阶段经历了增大-减小的过程,后期才稳步发散,因此原数据中除主振荡模式外的其他振荡模式占有较高的比例。回归分析法只能得到一个单调变化的分量,因此图 8(a)中原数据和拟合数据的差距相对比较明显。耗散能量的估计值和准确值计算结果见图 9。

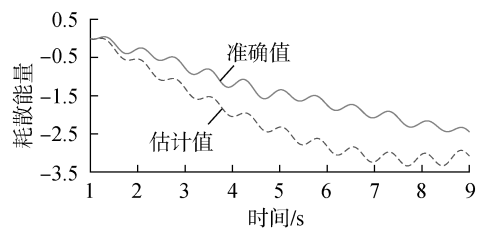


图 9 耗散能量对比图

Fig.9 Comparison of dissipation energy

由于拟合数据和原数据在振荡相位上差异较小,因此耗散能量的估计值方向性明确,并不影响扰动源定位的准确性。根据图 9 的计算结果,官地电厂 1 号机组并非扰动源。

4 结论

本文提出了一种考虑 PMU 信息不可观测性的低频振荡扰动源定位方法,可解决工程实践中面临的关键节点 PMU 数据缺失的问题。本文分析得出了耗散能量的方向性是基于电磁功率与电压相角之间的振荡相位差,振荡幅值只是影响了能量的大小。对关键节点 PMU 数据缺失利用曲线回归分析进行动态数据补偿是可行的。经过大量计算实践发现,如果原数据中主振荡模式之外的其他振荡模式占比较高,拟合效果往往欠佳,这是因为回归分析所用的模型只是单个的振荡模式,必然难以拟合出原数据多个振荡模式叠加的效果。但只要能够保持各个电气量之间正确的振荡相位差,就能够准确判断扰动源的位置。算例验证结果表明,本文所提方法能够保证定位计算的准确性,具有工程应用价值。

参考文献:

- [1] 奚江惠,胡济洲. 基于 WAMS 记录的川渝-河南振荡模式特点变化分析[J]. 华中电力,2010,23(2):25-27.
XI Jianghui, HU Jizhou. Chuanyu-Henan oscillation mode performance analysis based on WAMS record[J]. Electric Power of Central China,2010,23(2):25-27.
- [2] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:260-266.
- [3] 贾勇,何正友,廖凯. 基于广域时空随机响应的低频振荡模式辨识[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):50-56.
JIA Yong, HE Zhengyou, LIAO Kai. Low-frequency oscillation mode identification based on wide-area spatio-temporal stochastic responses[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):50-56.
- [4] 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.
- [5] 杨海涛,丁茂生,宋新立. 电力系统动态稳定机理和稳定措施分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(14):35-39.
YANG Haitao, DING Maosheng, SONG Xinli. Analysis on power system dynamic stability mechanisms and stabilizing measures[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(14):35-39.
- [6] 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.
- [7] 杨东俊,丁坚勇,邵汉桥,等. 基于 WAMS 的负阻尼低频振荡与强迫功率振荡的特征判别[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):57-62.
YANG Dongjun, DING Jianyong, SHAO Hanqiao, et al. WAMS based characteristic discrimination of negative damping low-frequency oscillation and forced power oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):57-62.

- [8] 董清,王莹. 发电厂内强迫共振型低频振荡源的定位方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):110-114.
DONG Qing,WANG Ying. Disturbance source locating for compelled resonance low-frequency oscillation of power plant [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):110-114.
- [9] 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(一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化,2012,36(3):22-27.
CHEN Lei,MIN Yong,HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy,part one: mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(3):22-27.
- [10] 陈磊,陈亦平,闵勇. 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,CHEN Yiping,MIN Yong. 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李文锋,李莹,周孝信,等. 基于 WAMS 的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(2)力矩分解法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):47-53.
LI Wenfeng,LI Ying,ZHOU Xiaoxin,et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS,part 2: method of torques decomposition[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):47-53.
- [14] GOL M,ABUR A. A hybrid state estimation for systems with limited number of PMUs[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014, PP(99):1-7.
- [15] 李大虎,曹一家. 基于 SCADA/PMU 混合量测的广域动态实时状态估计方法[J]. 电网技术,2007,31(6):72-78.
LI Dahu,CAO Yijia. Wide-area real-time dynamic state estimation method based on hybrid SCADA/PMU measurements[J]. Power System Technology,2007,31(6):72-78.
- [16] 商显俊,顾雪平,梁海平,等. 计及相量测量单元信息不可观性的强迫功率振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):56-62.
SHANG Xianjun, GU Xueping, LIANG Haiping, et al. Location identification method of disturbance source in forced power oscillation considering unobservability of PMU information[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(10):56-62.
- [17] 蒋平,郑斌青,冯双. 基于功率及频率波动相位的强迫扰动源定位[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):112-117.
JIANG Ping,ZHENG Binqing,FENG Shuang. Forced disturbance-source locating based on phase-angle between power and frequency fluctuations[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):112-117.
- [18] MOON Y H,LEE E H,ROH T H. Development of an energy function reflecting the transfer conductances for direct stability analysis in power systems[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution,1997,144(5):503-509.
- [19] 何晓群. 应用回归分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2015:145-155.

作者简介:



李红俊

李红俊(1985—),男,江苏丹阳人,主要研究方向为电力系统低频振荡扰动源定位(E-mail:527595264@qq.com);

董 或(1990—),女,吉林长春人,硕士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(E-mail:475332673@qq.com)。

Disturbance source location method for low frequency oscillation considering information loss of key nodes

LI Hongjun¹, DONG Yu², ZHAO Wenxiang¹, MENG Tao³, PAN Jie³, SHANG Xianjun⁴

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China; 2. University of New South Wales, Sydney 1466, Australia;

3. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030000, China;

4. State Grid Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213000, China)

Abstract: The current configuration of PMU(Phasor Measurement Unit) in power system can not meet the observability requirement of overall grid, the information loss of key nodes is a mishap in disturbance source location. Based on the SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) system and WAMS(Wide Area Measurement System), a disturbance source location method for low frequency oscillation with the consideration of information loss of key nodes is proposed. The dissipation energy of low frequency oscillation is defined, and the physical mechanism of its directivity is analyzed. The curve regression analysis is carried out based on the data of PMU and SCADA for compensating the missing data of key nodes. The results of a power grid case show that, the proposed method can satisfy the requirement of accurate location of disturbance source.

Key words: electric power systems; low frequency oscillation; disturbance source location; information loss; regression analysis; stability