

电力系统次同步振荡检测与在线定位技术综述

吴熙¹, 陈曦¹, 吕万¹, 袁超², 杨宏宇²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:随着电网规模扩大以及新能源发电并网容量增加,次同步振荡(SSO)问题日益凸显,对电网安全稳定运行造成了较大的威胁。及时检测出系统中的SSO并对其进行在线定位,对保障电力设备安全与系统稳定运行具有重要意义。首先对SSO的检测方法进行了介绍,并归纳总结了各类方法的优缺点。然后,介绍了SSO定位方法,并对现有研究存在的不足进行了探讨。最后,介绍了适用于SSO在线检测定位的量测系统架构以及相量测量单元/广域测量系统(PMU/WAMS)升级改造方案,并对SSO检测与定位技术未来的发展趋势进行了展望。

关键词:电力系统;次同步振荡;检测技术;在线定位;相量测量单元;广域测量系统

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009032

0 引言

随着能源改革的深化推进,新能源发电逐步进入大规模发展阶段,电网中风力、光伏发电等新能源并网容量不断增加^[1]。与此同时,电力系统中还存在大量的高压直流输电设备、串联补偿设备以及动态无功补偿设备^[2-5],这些设备可以提高电网输电能力,改善系统稳定性,为大规模新能源的并网奠定了基础^[2],但也使得电力系统内的薄弱环节增多,导致次同步振荡SSO(Sub-Synchronous Oscillation)问题日渐凸显^[6]。近年来,美国德州^[7]、美国Buffalo Ridge地区^[8]、我国华北沽源地区^[9]、我国新疆哈密地区^[10]和我国吉林通榆^[11]等地风电场发生了多起SSO事故,SSO不仅会造成谐波污染,影响电能质量^[10],还可能导致新能源设备损坏和新能源大面积脱网^[12-13],严重影响新能源的并网消纳,甚至可能导致火电机组轴系疲劳,致使发电机轴系断裂^[14],进而诱发区域电网连锁事故,对电网中机组、电力设备的安全和整个电力系统的稳定运行构成了巨大威胁,应予以高度重视。

及时检测出电力系统中的SSO,获取振荡的频率、阻尼、相位、幅值等信息,并进一步基于数据分析SSO传播与发展过程,有望实现SSO薄弱环节或SSO扰动源的在线定位,对振荡发生后快速采取有效措施保障机组安全和电力系统稳定运行、防止事故影响范围扩大具有重大意义。

以相量测量单元PMU(Phasor Measurement Unit)

为基础的广域测量系统WAMS(Wide Area Measurement System)的发展使得基于量测数据实现SSO在线检测与定位成为了可能。目前大量学者对SSO检测技术进行了研究,通过量测数据得到了SSO分量的频率、幅值、相位等信息,然而现有的SSO检测方法种类繁多,且在抗噪性、运算速度、辨识精度以及实现难度等不同方面各有优劣,但少有文献对其系统地进行归纳、分类和比较。目前对SSO薄弱环节或SSO扰动源在线定位技术的研究已取得一定的研究基础和成果,其作为一个具有重要应用价值的研究方向,对已有研究进行总结,并对未来研究进行展望具有重要意义。

因此,本文将对电力系统SSO检测与在线定位技术进行详细综述,首先整理归纳了现有SSO的检测方法,将其分为利用PMU子站瞬时值数据对SSO进行检测和利用WAMS主站相量数据对SSO进行检测两大类,并对2类方法分别进行了评价与比较,给出了SSO检测技术未来的研究方向。进一步地,介绍了现有的SSO定位方法,主要介绍了目前学术界已有的成果,总结了尚待解决的问题,并展望了该方向的未来研究前景。最后,为使读者了解检测方法 with 定位方法如何工程化应用,介绍了PMU/WAMS升级改造方案,并列出了未来在线检测与定位系统的可能发展方向。本文所综述的内容旨在帮助相关方向的研究者系统、清晰地了解SSO检测与在线定位技术已取得的成果,同时把握未来研究的方向,以期推动SSO领域相关技术的发展。

1 SSO现象介绍

为了便于读者更深入地了解SSO检测方法如何利用PMU量测数据获取SSO分量的频率、幅值、相位等信息,本节从SSO的定义、机理、表征、信号模型以及检测的难点等角度作简要介绍。

收稿日期:2020-06-11;修回日期:2020-07-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407028);江苏方天电力技术有限公司科技项目(KJ201930)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407028) and the Science and Technology Project of Jiangsu Frontier Electric Technology Co.,Ltd.(KJ201930)

1985年IEEE次同步谐振工作组将SSO定义为:电力系统受到扰动偏移其平衡点后出现的一种运行状态,在这种运行状态下,电网与汽轮发电机组之间在一个或多个低于系统同步频率的频率下进行显著能量交换^[15-16]。随着新能源发电的大规模并网,SSO的产生原理不再局限于汽轮机与电网之间的交互作用,新能源机组这类含有变流器的电源与电网之间的交互也会产生SSO现象^[7-11]。其作用机理可大致分为源于旋转电机的轴系扭振、源于电网中电感与电容构成的电气振荡和源于电力电子变流器之间或其与交流电网相互作用产生的振荡这3类^[3]。在目前新能源大规模并网的背景下,3种机理的振荡可以共存,其SSO的频率、阻尼及稳定性受变流器和电网诸多参数,乃至风、光等外部条件的影响,表现出多源、多形态和幅频特性大范围时变等复杂特征^[3,16]。其信号模型可表示为:

$$x(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + \sum_{i=1}^n A_{si} e^{\alpha_{si} t} \cos(2\pi f_{si} t + \varphi_{si}) \quad (1)$$

其中, $x(t)$ 为电网中相关变量的瞬时值信号; A_1 、 f_1 、 φ_1 和 A_{si} 、 f_{si} 、 φ_{si} 分别为基波分量和第*i*个次同步分量的幅值、频率、初始相位; α_{si} 为第*i*个次同步分量的阻尼因子。其中幅值 A_{si} 、频率 f_{si} 等可能是时变的,频率范围一般为5~45 Hz^[17]。而原有PMU装置在测量同步信号时,没有对这一特性进行针对性处理,使得SSO信号检测难度大于低频振荡的检测难度。

2 SSO检测方法

低频振荡检测方法已在实际PMU/WAMS中得到广泛应用^[18-19],但由于SSO频率更高、表征更复杂,对检测方法准确性和实时性的要求更高,使得低频振荡检测方法难以直接用于SSO检测,因此需要研究SSO检测方法。

目前大量文献对此进行了研究,取得了丰富的成果,但由于现有PMU/WAMS受限于自身硬件结构、通信协议等,还存在如下不足:①现有PMU装置在相量测量时,无法保留所有次同步频段的信号^[20];②瞬时值量测数据只能从PMU子站的故障录波器中获得,不易实时调取,使得WAMS主站难以收集到这些数据^[21];③PMU仅能传输振荡的主频率和幅值,无法将多个振荡频率和幅值信息完整地传输至WAMS主站^[20,22]。这使得现有SSO检测方法在应用时需要配合系统的改进,导致现有方法在实际电网中仅有少量应用^[23-24]。

本节重点对SSO的检测方法进行介绍,系统的改造升级方案将在第4节进行详细介绍。目前对SSO信号检测的研究主要分为2种类型:利用PMU子站瞬时值数据对SSO进行检测和利用WAMS主站相量数据对SSO进行检测。下面将分别对以上2类

方法进行综述。

2.1 基于子站瞬时值数据的SSO检测方法

以子站瞬时值数据为分析对象具有理论难度小、测量频带范围宽、测量精度较高的优点^[22]。目前利用瞬时值数据进行SSO检测的研究内容非常丰富,按技术手段可分为基于数字信号分解的检测方法和基于信号模型估计的检测方法。

2.1.1 基于数字信号分解的检测方法

基于数字信号分解的检测方法通常直接对瞬时值数字信号进行分解,然后通过分解信号的叠加处理等手段获取各SSO分量的信息。一般可以分为傅里叶变换FT(Fourier Transform)类和模态分解类,但也有一些文献使用了其他的信号分解方法。

(1) FT类的检测方法。

FT是常用的信号分析法,其可以将信号由时域转变至频域以分析其模态参数信息,常用方法包括快速傅里叶变换FFT(Fast Fourier Transform)、离散傅里叶变换DFT(Discrete Fourier Transform)等。FFT、DFT是用于SSO检测最基本的方法^[25-27],但将其应用于SSO检测之中易产生栅栏效应及频谱泄漏^[28],在分析SSO信号时,会增大SSO信号参数的估计误差。文献[26-30]针对此类问题对FFT/DFT进行了改进,文献[26-28]使用插值算法对误差进行修正以减小栅栏效应给SSO检测带来的影响,文献[28-30]分别采用了不同的加窗方法改善了FFT/DFT在SSO检测中的频谱泄漏。较长的窗口长度可以提高SSO检测的精确性,但是会延长计算分析时间,影响SSO检测的实时性,而如果窗口长度太短,基波和其他频次谐波的频谱泄漏将会严重干扰SSO的频谱^[31],又会使得SSO参数辨识出现巨大误差。为克服上述问题,文献[31-32]采用了泰勒傅里叶多频分析TFM(Taylor-Fourier Multifrequency)及其改进方法,能够有效减少SSO与其他谐波的相互干扰,并且检测精度高、计算速度快,但缺点是初始模态频率的选择对检测精度影响较大。

此外,DFT、FFT类的方法还需要加以改进才能应对频率时变的SSO的检测,文献[29]提出了基于滑窗FFT的时变幅频SSO的检测方法,文献[33]提出了利用基于短时傅里叶变换STFT(Short-Time Fourier Transform)的傅里叶同步挤压变换FSST(Fourier-based SynchroSqueezing Transform)对频率时变的SSO信号进行检测,但由于实际含噪信号中不能事先确定各谐波间谐波分量信息,导致确定FSST模态分解层数比较困难。

总之,以FFT为代表的FT类SSO检测方法具有快速、简单的特点,可获取SSO的频率与幅值。FT类方法检测精度与检测速度之间的平衡以及对幅频时变的SSO信号的检测适应性值得深入研究。

(2) 模态分解类的检测方法。

模态分解类的检测方法通常将信号分解为一组内蕴模态类函数 IMF (Intrinsic Mode Function), 然后再对各 IMF 进行参数辨识。该方法主要包括经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition) 类和小波分解类等。

EMD 方法是一种自适应信号分解方法, 其假设任何复杂的时间信号都是由一系列简单且相互独立的 IMF 组成, 该方法特别适合对非线性、非平稳时间序列 (如幅频时变的 SSO 信号) 进行平稳化处理^[34], 目前多数文献直接将 EMD 与不同参数辨识方法相结合, 如基于旋转不变技术的信号参数估计 ESPRIT (Estimating Signal Parameter via Rotational Invariance Technique) 算法^[35]、Prony 算法^[36]等, 从而获取 SSO 频率、幅值、相位及阻尼比等参数信息。著名的希尔伯特-黄变换 HHT (Hilbert-Huang Transform) 则是将 EMD 方法与希尔伯特变换 HT (Hilbert Transform) 相结合, 文献^[37]研究了 HHT 在 SSO 参数辨识中的运用, 指出 EMD 可以滤除信号中的噪声干扰。但是 EMD 方法在分解两频率接近而能量相差大的次同步模态时, 会出现模态混叠的情况, 同时也有文献指出这种方法的计算负担相对较重, 影响了其在线检测中的应用^[21]。

目前, EMD 的各种改进方法在低频振荡检测中应用较多^[38-40], 如频移 EMD 方法^[38]、总体平均 EMD (EEMD) 方法^[40]等, 可以消除 EMD 中出现的模态混叠现象。文献^[41]利用 EEMD 对 SSO 进行了检测。但总体而言, 这些改进方法在 SSO 检测中仍少有应用。因此, 研究如何将 EMD 各种改进方法应用于 SSO 检测中以及进一步缩短 EMD 类方法的计算时间, 有助于 EMD 类方法在 SSO 在线检测中的应用。

小波分解的原理是将能量有限的函数作为基函数, 通过对该基函数进行平移和缩放实现对信号的时间频率特征的分析。利用该方法可以对信号进行多尺度的分解, 得到不同尺度下的信号分量。目前已有文献利用小波分解方法对 SSO 进行检测^[42-45], 文献^[42]提出了一种基于小波分解的类噪声信号风电场 SSO 辨识方法, 文献^[43-45]对应用于 SSO 检测的小波变换方法进行了多种改进, 分别提出了同步压缩小波变换 SWT (Synchrosqueezed Wavelet Transform)、基于小波的同步提取变换 SET (Synchronous Extraction Transform) 以及频率切片小波变换 FSWT (Frequency Slice Wavelet Transform), 成功辨识出了 SSO 的频率与衰减系数。小波分解可以有效克服噪声对 SSO 检测精度的影响, 不需要额外滤波, 但需要根据实际情况设定小波分解层数, 目前小波基函数和阈值也没有具体的选取原则, 而这些因素对检测结果影响较大。

总之, 模态分解类的方法可以提取信号的瞬时值模态信息, 检测精度高, 可以处理幅频时变的 SSO 信号, 但一般而言该类方法的计算量相对较大, 研究如何对其改进以减少计算量, 有助于其在 SSO 在线检测中的应用。

(3) 其他检测方法。

除了以上两大类对数字信号进行处理的 SSO 检测方法, 还有一些文献研究了其他方法对数字信号进行处理以实现 SSO 的检测, 这些方法大多通过一些不属于上文分类的方法提取出 SSO 分量, 再对其进行参数辨识。如文献^[46-48]直接利用各种数字滤波器提取出 SSO 信号, 并结合辨识算法实现了 SSO 的参数辨识。文献^[49]采用改进后的阻尼正弦原子分解算法辨识 SSO 模态参数。文献^[50]将线路看作滤波器, 结合线路的电阻、电抗和串联电容值, 利用线路两端的电压与电流波形, 通过计算滤除掉基波分量, 提取出 SSO 波形, 并获得模态参数。文献^[51-52]利用包络线对电压信号进行解调, 获得解调信号, 再利用 FFT 对解调信号进行分析实现 SSO 的检测。文献^[6, 53]则对正常运行环境下的发电机转子信号进行了辨识, 采用随机减量技术 RDT (Random Decrement Technique) 识别出了环境扰动激励信号中的微弱 SSO 模态。文献^[54]同时使用多个时域与频域技术, 对负阻尼次同步振荡进行自动检测。上述这些方法对多模态、幅频时变的 SSO 信号能否适用可以作进一步研究。另外, 文献^[6, 53]所提的利用正常运行环境下的量测数据进行 SSO 检测的思路, 具有较强的实际意义, 值得进一步挖掘。

2.1.2 基于信号模型估计的检测方法

基于信号模型估计的检测方法通常需要建立信号的准确模型 (如信号阶数等), 然后对模型参数进行估计以实现 SSO 的检测。包括参数化模型谱估计类方法、子空间类方法以及状态估计类算法等。

(1) 参数化模型谱估计类方法。

参数化模型谱估计类方法通过建立参数模型来逼近真实过程, 常见的有 Prony 算法和自回归滑动平均 ARMA (Auto Regressive Moving Average) 方法。

Prony 算法通过指数函数的线性组合, 对扰动信号数据进行等间隔采样的拟合, 并由此获取信号中包含的振荡幅值、振荡相位、系统阻尼、扰动频率等信息。有文献指出实际系统中 SSO 信号含有的大量噪声, 会对 Prony 算法检测精确度产生较大影响^[55]。此外, Prony 算法的模型定阶对 SSO 检测结果影响也很大, 定阶过低会使检测结果误差较大, 定阶过高则会大幅增加计算量, 进而难以满足在线检测的要求^[56-57]。目前已有较多文献从增加定阶准确度^[55-56]、抑制信号噪声^[57-58]角度对 Prony 算法进行改进以满足 SSO 在线检测的要求。

ARMA方法的本质是假设输入信号为白噪声时的系统高阶微分方程组的一种差分形式。ARMA方法与Prony算法同样存在定阶困难的问题^[59-60]。文献[61]对其进行了一定改进,使用基于贝叶斯信息准则的方法对ARMA模型进行定阶,并使用加权递推最小二乘法对ARMA模型进行参数估计,辨识出了SSO的模式参数。

(2)子空间类方法。

子空间类方法对信号的自相关矩阵进行奇异值分解,得到信号子空间和噪声子空间,进而利用两者的正交性对信号子空间进行分析。此类方法主要包括ESPRIT算法、随机子空间SSI(Stochastic Subspace Identification)算法、矩阵束MP(Matrix Pencil)算法等。

ESPRIT算法基于相关状态矩阵特征分解的信号频率进行估计,可以获得信号的频率、衰减因子和幅值等丰富信息,适用于包含SSO在内的多种系统功率振荡^[62-64]。常见的改进算法有基于总体最小二乘法的ESPRIT(TLS-ESPRIT)算法等,文献[64-65]将其应用于SSO的检测中,但ESPRIT及其改进算法也存在定阶困难的问题^[66]。文献[66]提出了一种利用相对差异图估计ESPRIT算法模型阶数的方法,改善了ESPRIT算法在SSO检测中定阶难的状况,但是该改进算法的计算量相比FFT还是偏大。另外,ESPRIT算法对SSO信号的信噪比较为敏感,低信噪比条件下的估计结果误差较大^[67],所以还需要结合滤波算法消除噪声影响。

SSI算法是基于线性系统离散状态空间方程的识别方法,适用于平稳激励,识别精度高。其在检测SSO时面临的问题与ESPRIT类似,文献[68]使用奇异值差值法确定SSO信号的阶数,并将SSI算法与最小二乘法相结合,进行SSO参数检测。

MP算法也是较常运用于SSO信号检测的一种算法^[69-71],可以获得频率、幅值、衰减系数、阻尼比等信息。但MP算法在对SSO信号的衰减系数和阻尼比参数进行辨识时受高斯有色噪声影响较大,需要对SSO信号进行预处理。文献[69-70]提出了一种将快速独立成分分析(FastICA)与MP算法相结合的方法,提高了MP算法在SSO检测时的抗噪性和准确度。文献[71]将信息熵引入MP算法,也提升了SSO在线检测的抗噪能力。

上述基于信号模型估计的检测方法在模型定阶较为准确、信号信噪比较高时,辨识结果十分准确,但本身存在定阶、抗噪等方面的困难或劣势。受以上因素的制约,上述方法需要改进算法内核或结合其他方法才可应用于SSO在线检测。

(3)状态估计类算法。

状态估计类算法通过建立信号的状态空间模

型,然后对该状态空间模型进行状态估计从而获得信号参数,目前将该类方法用于SSO检测的研究还较少,主要有递推最小二乘法RLS(Recursive Least Squares)和卡尔曼滤波KF(Kalman Filtering)等。

RLS基于最小二乘法对系统状态进行估计,该方法常用于系统的状态估计^[72]及谐波检测^[73-74]。文献[46,75]尝试将其应用于SSO的检测中,文献[46]提出用RLS对次同步电压分量进行检测,文献[75]利用站端环境数据,基于RLS连续追踪次同步模式频率、阻尼等级和模态。但利用该方法进行SSO的准确辨识需要事先知道SSO信号所在的较为准确的频率范围。

KF是一种利用线性系统状态方程,通过系统输入输出观测数据,对系统状态进行最优估计的算法,也常用于系统状态估计^[76-78]。目前已有文献将其应用于SSO检测中^[79-80],文献[79]提出了一种利用KF从线路电流中提取次同步分量并抑制SSO的算法,文献[80]使用一种递归KF来准确估计基波频率分量,然后将剩余部分视为次同步频率分量,并对其进行参数辨识,此时KF与一个实时自适应陷波滤波器作用相同。在应用于SSO检测时,KF面临的难题与RLS相似,即需要知道SSO信号频率这个先验知识。

状态估计类算法在运用于SSO检测时具有抗噪能力强、检测精度高、可处理非平稳信号的优势,未来的研究可结合如自适应算法、智能算法来降低SSO频率的先验知识难度。

表1对本节提到的不同SSO检测方法进行了比较。通过表1的横向比较,就单一方法而言,没有各方面性能指标都完美的方法。在今后的研究中,可以重点关注对方法计算复杂度、检测精确度的优化以及对时变信号的处理,可将各个方法相互组合,弥补单一方法的缺陷,同时从环境噪声中提取SSO模态也是值得研究的方向。

2.2 基于主站相量数据的SSO检测方法

虽然利用子站瞬时值数据进行SSO检测的频带范围宽、测量精度高,但在目前的测量系统中,瞬时值数据只能从子站的故障录波器中获得,它们很难轻易地被主站收集并用于SSO的广域监测^[81],这就导致了利用子站数据只能检测出SSO的模式参数,但无法从全局角度对SSO的传播和发展过程进行检测与分析。采用WAMS主站的同步相量数据对SSO进行检测是一种具有优势的解决方案^[21-22],WAMS主站集中了大量来自不同地点子站的相量量测数据,对这些数据进行分析,可以得到SSO传播和发展的信息。

文献[82-84]对此开展了早期研究,文献[82]利用非参数Welch方法和参数自回归方法从同步相量中估算出SSO频率。文献[83]基于对PMU相量测

表 1 不同 SSO 检测方法之间的比较
Table 1 Comparison of different SSO detection methods

方法		提取结果		噪声处理	优点	缺点
基于数字信号分解的检测方法	FT 类	DFT、FFT、TFM	频率、幅值	需要	简单、快速	频谱泄漏,栅栏效应,需要加以改进才能处理非平稳信号
	模态分解类	EMD、HHT	频率、幅值、相位、阻尼比	不需要	检测精度高、可处理非平稳信号	存在模态混叠的情况,计算负担较重
		SWT、SET、FSWT	频率、阻尼比	不需要	检测精度高、可处理非平稳信号	分解层数以及小波基函数和阈值没有具体选取原则且对检测结果影响较大
	其他	滤波器类	频率、幅值、相位、阻尼比	不需要	可靠性高、实现简单	会引入额外的延时
		阻尼正弦原子分解	频率、幅值、阻尼比	不需要	可处理非平稳信号	引入了匹配追踪和优化算法,因此模态分辨率和动态特性尚待评估
		线路滤波	频率、幅值、阻尼比	不需要	计算速度快、鲁棒性高	—
		包络线解调	频率、幅值	不需要	计算速度快	需要信号基频幅值恒定,且当幅值较大时,准确度降低
		RDT	频率、幅值、阻尼比	不需要	适用于环境噪声激励下微弱信号的 SSO 模态辨识	—
基于信号模型估计的检测方法	参数化模型谱估计类	Prony、ARMA	频率、幅值、相位、阻尼比	需要	检测精度高	抗噪性差、定阶困难、计算速度不如 FFT、不适合处理非平稳信号
	子空间类	ESPRIT、SSI、MP	频率、幅值、相位、阻尼比	需要	检测精度高	抗噪性差、定阶困难、计算速度不如 FFT、不适合处理非平稳信号
	状态估计类	RLS、KF	频率、幅值、相位、阻尼比	不需要	检测精度高、可处理非平稳信号	获取 SSO 频率先验知识难度大

量数据的频谱含量分析,测量出了大型涡轮发电机组的次同步扭振频率。文献[84]对 PMU 上传的同步相量幅值数据进行频谱分析,检测出了 SSO 的频率,同时,文献[84]认为 SSO 的存在相当于是对同步相量的幅值和相位进行调制,但并没有给出 SSO 幅值与相位的检测结果。这些早期的研究都只能从相量数据中检测出 SSO 的频率,无法获得 SSO 的幅值和相位信息。

后来的研究则发现由于 SSO 频率与工频的偏差远高于低频振荡的频率,不能用在工频分量上叠加低频调制来分析 SSO^[21,81]。由于现有同步相量算法的原因,PMU 只能消除整数次谐波对基波相量的影响,无法消除 SSO 这种间谐波的影响^[85]。对于基波相量而言,SSO 是一个谱泄漏分量,从基波相量的谱分析中无法直接获得 SSO 的幅值、相位等信息。为了解决该问题,文献[86-87]研究了 SSO 对瞬时功率与测量相量的影响,揭示了间谐波会导致瞬时功率和相量发生 SSO 现象的本质原因,在此基础上,提出了对 PMU 测量相量的复数形式进行 FFT 分析的 SSO 检测方法,成功获取了 SSO 的频率与幅值参数。但由于该方法所用 FFT 观察窗口太长,导致其检测延时过长,不利于在线检测^[31]。文献[81]针对次同步分量会导致基波相量的谱泄漏问题,对基波相量进行谱分析,并用枚举法进行修正,从谱泄漏分量中恢复 SSO 信息,检测出了 SSO 的频率与幅值。但仍有诸多问题,如为了获取高分辨率,频谱分析所用数

据窗太长;提出的修正方法对于包含多个频率与幅值的 SSO 情况,计算耗时长;忽略了 SSO 的阻尼系数;在动态条件下的准确度未知。文献[21]为了解决上述问题,在文献[81]的基础上进行了改进,采用插值 DFT 对复相量进行频谱分析获取 SSO 的频率与阻尼比,并采用加 Hanning 窗的 DFT 获取 SSO 的幅值。但在系统运行点偏离额定工况较多、SSO 频率很高的情况下,该方法可能会失效。

总体而言,利用主站相量数据对 SSO 进行检测,可实现对 SSO 的大面积检测,为全网范围内的 SSO 溯源与定位提供了有利条件。但相关研究起步较晚,研究难度较大,还存在诸多不完善的地方与诸多待解决的问题,因此具有较大的研究潜力与价值。

图 1 展现了目前已有的电力系统 SSO 检测方法的分类。

现有的 2 类 SSO 检测方法各有优劣:以 PMU 子站瞬时值数据为分析对象的检测方法虽然测量频带范围宽、测量精度较高,但很难将其检测结果用于广域检测中;以 WAMS 主站相量数据为分析对象的检测方法虽然可以进行广域检测,但是仍有许多问题亟待研究,离实际应用还有一段距离。将 2 种类型的方法相互组合,分别突出其优点,从而对 SSO 进行检测,将是今后 SSO 检测领域研究的趋势。

3 SSO 定位方法

目前对 SSO 扰动源进行定位的方法可分为基于

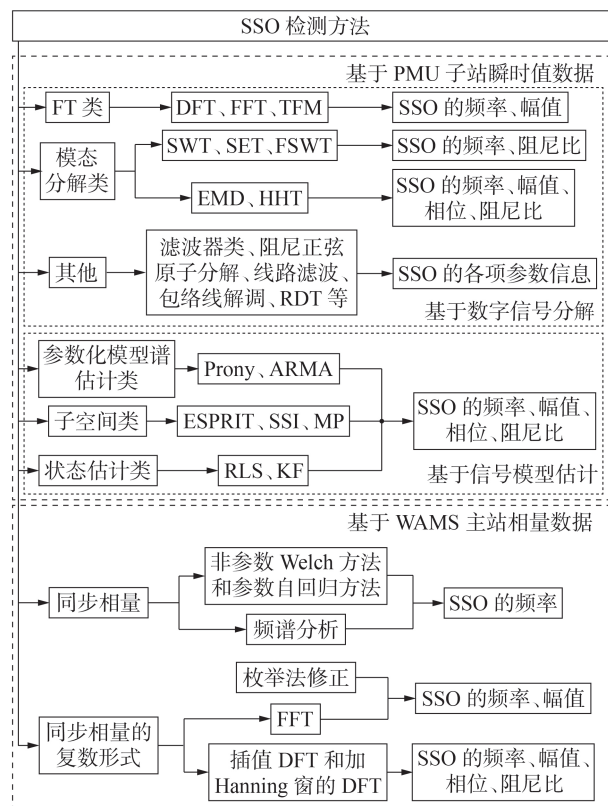


图1 电力系统SSO检测方法分类

Fig.1 Classification of detection methods for SSO in power system

模型^[88-90]的方法和基于量测数据^[91-96]的方法,其中基于模型的方法存在难以准确建模以及维数灾等问题而难以在线应用^[96]。而基于量测数据的定位方法具备在线应用的潜力。当局部电网发生SSO时,区域内的风电/火电机组将一同参与振荡,且邻近的母线和线路电气量中均可能存在SSO分量,仅仅通过孤立的局部信息无法定位SSO薄弱环节或SSO扰动源。因此实现基于量测数据的SSO定位,需要将SSO的广域检测作为基础。WAMS可为SSO的定位提供量测条件,而检测技术的发展使得SSO薄弱环节或SSO扰动源在线定位成为可能。

目前,对基于量测数据的SSO定位的研究已取得一定的研究基础和成果,有文献从能量^[91-92]、阻抗数据^[93]和次同步潮流^[94-96]的角度进行SSO扰动源定位。文献[91-92]将暂态能量流应用于SSO,采用瞬时电压电流计算能量流,建立了暂态能量流与发电机组电功率以及阻尼之间的联系,并实现了次同步强迫振荡的振荡源定位。但该研究的推导都是以汽轮机组为核心展开的,尚未考虑风电并网等扰动源不明确、振荡机理不同的场景,需进一步研究现有SSO薄弱环节定位判据的适应性。文献[93]提出了一种定位SSO薄弱环节的联合阻抗判据,首先通过量测数据在线测量风电场的阻抗,将获得的阻抗结果上传到控制中心,并在控制中心计算整个系统在

振荡频率处的聚合阻抗,通过判断聚合阻抗中电阻的符号,实现基于次同步控制相互作用(SSCI)机理的SSO扰动源的快速定位与切除。文献[94-96]通过测量电压与电流的次同步相量,基于次同步相量计算次同步潮流,并给出了基于次同步潮流的判据,实现了次同步控制作用机理扰动源的辨识。虽然基于量测数据的SSO定位具有重要意义,但目前对其研究还不完善,如尚未考虑新能源场站内部振荡的耦合传播,尚未研究不同机理SSO情形下判据的适用性。

低频振荡与SSO同属电力系统功率振荡问题,由于电网中低频振荡发生条件容易达成、发生概率更高,因此对于低频振荡的研究早于SSO,对低频振荡扰动源定位的研究也已取得较大进展,学术界已提出了能量法^[97-99]、行波法^[100]、等效电路法^[101]、力矩分解法^[102-103]等多种低频振荡源定位方法,可为SSO的定位研究提供一定参考。其中能量法作为基于量测数据的方法,在低频振荡定位中获得了十分广泛且有效的运用,可以用于评估元件的阻尼特性、定位负阻尼发电机和外施周期性扰动的位置^[92]。文献[91-92]已对能量法应用于次同步强迫振荡的定位作了初步探究,表明了能量法应用于SSO定位中的可能性。但由于SSO频率比低频振荡更高,机理更为复杂,目前进一步开展研究的难点在于如何重塑暂态能量流或端口能量使其广泛适用于SSO的定位,以及如何推导得到暂态能量流或者端口能量与参与振荡元件的参与度之间的关系。

4 SSO在线检测和定位系统

上文对现有PMU/WAMS的不足作了简要介绍,并指出对现有PMU/WAMS进行改进可以使其应用第2节和第3节提到的检测方法与定位方法。我国新疆哈密地区电网已对测量系统作了初步改造,并获得了实际应用^[23-24,104-106]。另外也有诸多学者提出了其他的PMU/WAMS改进方法,以满足SSO快速检测与在线定位实际应用的需求。

文献[24]对已在我国新疆哈密地区获得应用的SSO监测系统进行了介绍,该系统由改进PMU、次同步监测控制装置(SMU)以及监测分析主站构成,其架构如图2所示。其中,改进PMU增加了长时间连续录波功能以及接收监测分析主站召唤命令及时上传连续录波数据的功能。SMU部署在关键节点,独立采集电流瞬时值信号,并对其进行SSO的就地辨识,根据辨识结果向监测分析主站发出警告或者采取一定控制措施;监测分析主站接收到SMU发出警告或动作信息后,对区域电网相关改进PMU下发召唤记录数据命令;收到所有改进PMU的数据后,统一计算全网各支路SSO的特征频率及谐波含量,分

析SSO的影响范围。该系统已在哈密地区成功监测到多起SSO事件并发出告警^[106]。

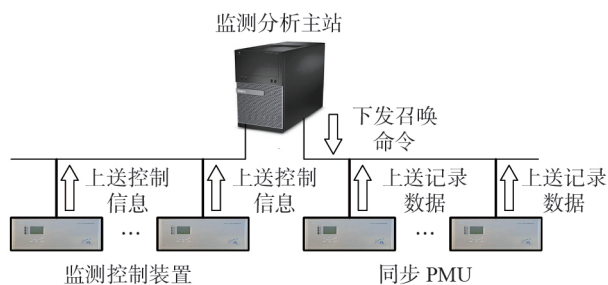


图2 新疆哈密地区监测系统架构

Fig.2 Architecture of monitoring system in Hami, Xinjiang

文献[94-95]则基于文献[107]提出的次同步相量测量方法,设计了次同步相量测量单元(S-PMU)及次同步相量集中器(S-PDC),并提出一种用于SSO的广域监测与预警系统(S-WAMS),该系统结构如图3所示,由S-PMU、S-PDC和位于数据中心的次同步动态分析系统(DC&SDA)构成,可通过对现有的PMU/WAMS技术进行扩展实现。其中S-PMU可以将SSO信号计算为相量数据并上传至S-PDC,再由S-PDC上传至DC&SDA,或者直接将S-PMU上传至DC&SDA。DC&SDA收集到来自多个地区的S-PMU数据后,则可以应用现有的多种方法对SSO进行检测,建立SSO的全局视角,测量次同步潮流和振荡路径,实现SSO的在线定位。

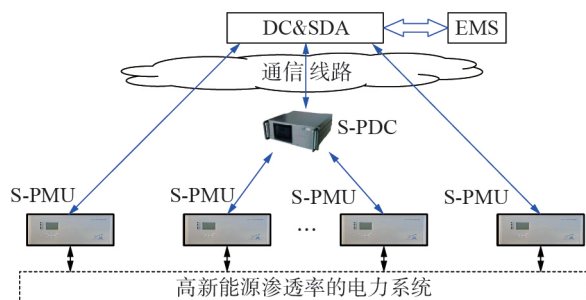


图3 文献[94-95]提出的S-WAMS架构

Fig.3 Architecture of S-WAMS proposed in Reference [94-95]

文献[20]提出了对现有WAMS进行改造的宽频测量技术,以期在满足未来电力电子化电网测量需求的同时有效兼容现有测量技术体系。该系统整体架构与当前架构完全一致,如图4所示。其在站端间隔层设计了宽频测量装置,该装置将现有保护、测控、PMU及计量装置等功能打包,并包含了独立的次同步测量装置。原始量测数据由宽频测量装置统一采集,并按照不同需求在宽频测量装置中进行分类处理,如PMU专注于基波信号测量,而次同步测量装置则优先开展SSO信号的频谱分析。宽频测

量装置既可向控制中心提供高频采集原始数据,也可提供计算处理后的测量数据及初步分析结果,还可根据外部需求进行变频传输。控制中心可根据实时收集到的数据进行SSO的广域检测与在线定位。

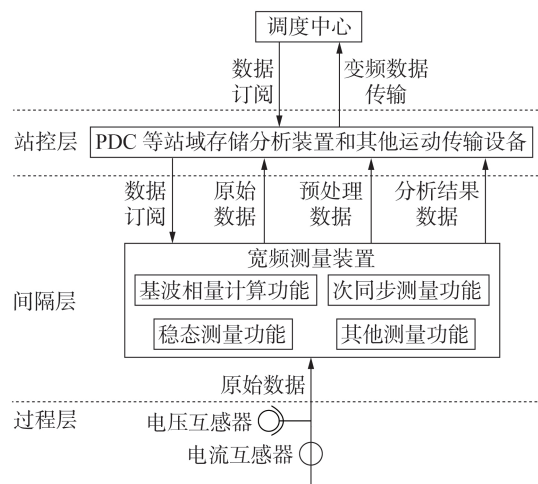


图4 文献[20]提出的宽频测量系统架构

Fig.4 Architecture of wide-frequency measurement system proposed in Reference [20]

上述对PMU/WAMS的改造可总结为:①通过对PMU的改造或者新增装置,使测量系统中的就地装置能够将采集到的原始数据用于SSO的实时就地分析;②就地装置采集到的原始数据可实时上传至主站,或者将其中的次同步分量转化为相量实时上传至主站;③WAMS主站需具备对多个就地装置上传的瞬时值数据或者次同步相量数据进行全局分析的功能,如对SSO进行广域检测分析影响范围、定位SSO扰动源等。值得一提的是,将瞬时值数据实时上传至主站对传输频率要求也需相应提高^[20]。经过上述对PMU/WAMS的改造,现有的SSO检测与定位方法将有望广泛应用到实际系统中。

但这些改造后的系统都是集中式的,随着上传瞬时值数据的就地测量装置增多,调度中心(主站)通信负担会大幅增加,并可能出现数据爆炸,使得在主站进行全网数据实时分析面临巨大挑战。文献[108]为解决此问题进行了尝试,将现有集中式WAMS系统改造为分布式结构,提出了一种分层分布式振荡监测定位框架,如图5所示。该框架分为本地层和控制中心层,PMU将量测数据上传至本地的相量数据集中器(PDC),通过本地PDC之间的交互实现振荡定位,而控制中心只负责自适应下发交互规则。研究表明,文献[108]提出的分层分布式系统框架相比于现有集中式框架,定位振荡源所需时间大幅减少。虽然该框架目前只应用于低频振荡的定位,但是在SSO在线检测与定位的实现方面仍值得参考。

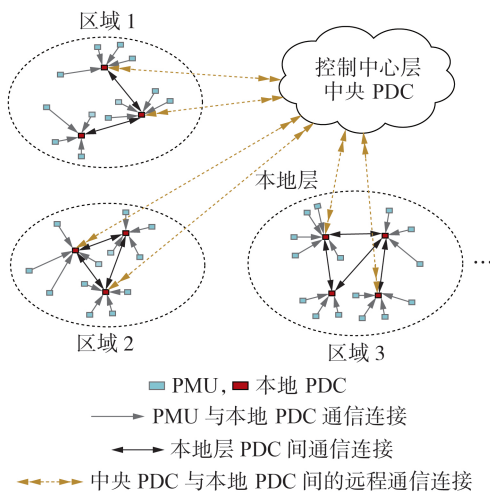


图5 文献[108]提出的分层分布式定位架构

Fig.5 Hierarchical distributed architecture for location proposed in Reference [108]

5 总结

本文首先对现有电力系统SSO检测方法进行了较为细致的整理与归类,并进行了比较总结,然后综述与展望了现有SSO定位方法,最后介绍了SSO检测与在线定位系统的升级改造方案,得到以下结论。

(1)基于数字信号分解的各类检测方法在检测精度、检测速度以及对非平稳SSO信号的处理能力方面各有优劣:FT类检测方法检测速度快但需要对其改进才能检测非平稳SSO信号;模态分解类检测方法适用于非平稳SSO信号的检测且精度较高,但计算量偏大;属于该类的其他检测方法是否适用于非平稳SSO信号也需进一步研究。

(2)基于信号模型估计的检测方法检测精度高,但前提是解决抗噪性差与定阶困难的问题,同时其对非平稳信号处理的考虑也不够全面。

(3)基于主站相量数据的检测方法具有实现SSO广域检测的潜力,但从相量数据中还原SSO信号的难度仍较大,可获得的参数不够全面。

(4)目前SSO定位方法已取得一定研究成果,但现有定位判据对不同机理、不同场景下SSO的适用性需要进一步研究,理论体系尚不完善。

(5)通过对现有PMU/WAMS的升级改造可使现有的SSO检测与定位方法得到实际应用。由于在处理SSO问题时,上传至主站的数据量多于处理低频振荡时的数据量,监测系统主站可能面临数据爆炸问题,使得检测与定位的实时性受到巨大挑战。

6 未来研究趋势展望

根据上文总结,对未来研究趋势作以下展望。

(1)需重点关注对非平稳SSO信号的处理方法,对现有检测方法作进一步优化,并尽量减少计算复

杂度,提高检测精确度,为实现SSO在线检测提供关键性技术支撑。

(2)研究基于环境噪声激励响应信号的SSO检测方法,从正常运行环境下的量测数据中提取微弱SSO模态,可一定程度上对SSO风险进行预警,具有较强的实际意义,值得深入挖掘。

(3)对现有SSO定位方法作深入研究,可借鉴已成熟应用的低频振荡定位方法,夯实SSO定位方法的理论基础,优化SSO定位判据,使其可以广泛适用于不同机理的SSO,将是未来研究的重点。

(4)引入人工智能方法进行评判/校正,融合基于环境噪声激励响应与扰动激励响应信号的检测方法,判断数据关联特性,实现SSO的快速检测与定位也是今后SSO检测领域的研究趋势之一。

(5)针对集中式监测系统在处理SSO问题时因数据爆炸而面临的实时性问题,应用分布式的SSO检测与定位系统框架,并基于该框架对检测与定位方法进行分布式化处理,以提高检测与定位速度,将是SSO检测与定位方法实现在线应用的一个新选择。

参考文献:

- [1] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):25-32.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 25-32.
- [2] 薛安成,王子哲,吴雨,等. 次同步扰动下并网电压源换流器电气量的频率分布及其幅值特性[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):23-29.
XUE Ancheng, WANG Zizhe, WU Yu, et al. Frequency distribution and amplitude characteristic of electric flux for grid-connected voltage source converter under subsynchronous disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 23-29.
- [3] 谢小荣,王路平,贺静波,等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术,2017,41(4):1043-1049.
XIE Xiaorong, WANG Luping, HE Jingbo, et al. Analysis of subsynchronous resonance/oscillation types in power systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1043-1049.
- [4] 吴熙,关雅静,宁威,等. 双馈风机转子侧变换器参数对次同步振荡的交互影响机理及其应用研究[J]. 电网技术,2018,42(8):2536-2543.
WU Xi, GUAN Yajing, NING Wei, et al. Mechanism of interactive effect of RSC parameters in DFIG on SSO and its application[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2536-2543.
- [5] 王晓宇,杨杰,吴亚楠,等. 渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):188-194,202.
WANG Xiaoyu, YANG Jie, WU Yanan, et al. Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 188-194, 202.
- [6] 李娟,白淑华,焦邵华. 微弱次同步振荡模态参数的在线实时辨识方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(增刊1):63-71.
LI Juan, BAI Shuhua, JIAO Shaohua. Online real-time identification method for weak subsynchronous oscillation modal para-

- meters[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(Supplement 1): 63-71.
- [7] GROSS L C. Sub-synchronous grid conditions: new event, new problem and new solutions[C]//Western Protective Relay Conference. Spokane, Washington, USA: Wash State University, 2010: 1-19.
- [8] NARENDRA K, FEDIRCHUK D, MIDENCE R, et al. New micro-processor based relay to monitor and protect power systems against sub-harmonics[C]//IEEE Electrical Power and Energy Conference. Winnipeg, MB, Canada: IEEE, 2011: 438-443.
- [9] 董晓亮, 田旭, 张勇, 等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 321-328.
- DONG Xiaoliang, TIAN Xu, ZHANG Yong, et al. Practical SSR incidence and influencing factor analysis of DFIG-based series-compensated transmission system in Guyuan farms[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 321-328.
- [10] 李景一, 毕天姝, 于钊, 等. 直驱风机变流控制系统对次同步频率分量的响应机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 37-43.
- LI Jingyi, BI Tianshu, YU Zhao, et al. Study on response characteristics of grid converter control system of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) to subsynchronous frequency component[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 37-43.
- [11] 王春华, 宋晓喆, 高培生, 等. 吉林通榆风电基地次同步振荡现象研究[J]. 电气自动化, 2017, 39(4): 88-91.
- WANG Chunhua, SONG Xiaozhe, GAO Peisheng, et al. A research on sub-synchronous oscillation at Tongyu wind power base in Jilin[J]. Electrical Automation, 2017, 39(4): 88-91.
- [12] VARMA R K, MOHARANA A. SSR in double-cage induction generator-based wind farm connected to series-compensated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2573-2583.
- [13] WANG L, XIE X, JIANG Q, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [14] FARMER R G, SCHWALB A L, KATZ E. Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(4): 1226-1232.
- [15] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Term, definitions and symbols for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PSA-104(6): 1326-1334.
- [16] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.
- XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [17] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 292-329.
- [18] 海威, 李峰. 内蒙古电力广域测量系统的结构及功能分析[J]. 内蒙古电力技术, 2012, 30(1): 30-34.
- HAI Wei, LI Feng. Analysis to structure and function of wide area measurement system in Inner Mongolia electric power system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2012, 30(1): 30-34.
- [19] 张彦军, 张娟, 常喜强, 等. 低频振荡预警及分析功能在新疆电网WAMS系统中的应用及改进[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 36-40.
- ZHANG Yanjun, ZHANG Juan, CHANG Xiqiang, et al. Application of low frequency oscillation early-warning and analysis function to WAMS system of Xinjiang Power Grid[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(4): 36-40.
- [20] 樊陈, 姚建国, 常乃超, 等. 面向电力电子化电网的宽频测量技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 1-10, 57.
- FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Calculation method for maximum penetration ratio of wind power in wind-thermal bundled HVDC sending system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 1-10, 57.
- [21] YANG X, ZHANG J, XIE X, et al. Interpolated DFT-based identification of sub-synchronous oscillation parameters using synchrophasor data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2662-2675.
- [22] 刘灏, 李珏, 毕天姝, 等. 基于PMU相量的次/超同步间谐波识别方法[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3237-3243.
- LIU Hao, LI Jue, BI Tianshu, et al. Subsynchronous and super-synchronous inter-harmonic identification method based on phasor measurements[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3237-3243.
- [23] CHEN Y, SUN G, ZHAO X. Wide area and broadband measurement system for modern power grid[C]//IEEE Conference on Energy Internet & Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2017: 1-6.
- [24] 刘革明, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136.
- LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.
- [25] 王茂海, 齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 149-154.
- WANG Maohai, QI Xia. Fast online detection method for power system sub-synchronous oscillation components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 149-154.
- [26] LIN H C. Power harmonics and interharmonics measurement using recursive group-harmonic power minimizing algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1184-1193.
- [27] 李宁, 左培丽, 王新刚, 等. 基于改进DFT和时域准同步的间谐波检测算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 170-178.
- LI Ning, ZUO Peili, WANG Xingang, et al. Inter-harmonic detection based on improved DFT and time-domain quasi-synchronization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 170-178.
- [28] 张超, 王维庆, 邱衍江, 等. 大规模风电并网地区次同步谐波检测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2194-2202.
- ZHANG Chao, WANG Weiqing, QIU Yanjiang, et al. Detection method of subsynchronous harmonic in regions with large scale wind power paralleled in grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2194-2202.
- [29] 杨京, 王彤, 唐俊刺. 基于滑窗FFT的次同步振荡时变幅频在线监测方法[J/OL]. 中国电力. (2019-09-30)[2020-06-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20190930.1255.010.html>.
- [30] 赵黎丽. 基于相关Hanning窗插值的间谐波分析算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 153-158.
- ZHAO Lili. Inter-harmonics analysis based on correlation Hanning window and interpolation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 153-158.
- [31] CHEN L, ZHAO W, WANG F, et al. An interharmonic phasor and frequency estimator for subsynchronous oscillation identification and monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(6): 1714-1723.

- [32] BERTOCCO M, FRIGO G, NARDUZZI C, et al. Compressive sensing of a Taylor-Fourier multifrequency model for synchrophasor estimation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(12): 3274-3283.
- [33] 童涛, 张新燕, 刘博文, 等. 基于傅里叶同步挤压变换和希尔伯特变换的谐波间谐波检测分析[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4200-4208.
- TONG Tao, ZHANG Xinyan, LIU Bowen, et al. Analysis of harmonic and inter-harmonic detection based on Fourier-based synchrosqueezing transform and Hilbert transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4200-4208.
- [34] 刘云鹏, 许自强, 董王英, 等. 基于经验模态分解和长短期记忆神经网络的变压器油中溶解气体浓度预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3998-4007.
- LIU Yunpeng, XU Ziqiang, DONG Wangying, et al. Concentration prediction of dissolved gases in transformer oil based on empirical mode decomposition and long short-term memory neural networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3998-4007.
- [35] 李宽, 李兴源, 胡楠, 等. 基于经验模态分解自适应滤波的次同步振荡 ESPRIT 分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 18-23.
- LI Kuan, LI Xingyuan, HU Nan, et al. ESPRIT analysis of subsynchronous oscillation based on the empirical mode decomposition self-adaptive filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 18-23.
- [36] 胡允东, 王西田, 刘石. 基于 EMD 和 Prony 算法的次同步扭振模态参数辨识[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 788-792.
- HU Yundong, WANG Xitian, LIU Shi. Modal parameter identification of subsynchronous oscillations based on EMD and Prony algorithm[J]. East China Electric Power, 2012, 40(5): 788-792.
- [37] 李宽, 李兴源, 赵睿, 等. 基于希尔伯特-黄变换的次同步振荡检测研究[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 67-71.
- LI Kuan, LI Xingyuan, ZHAO Rui, et al. Subsynchronous oscillation detection based on the Hilbert-Huang transform method [J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 67-71.
- [38] 李成鑫, 刘俊勇, 姚良忠, 等. 基于改进频移经验模态分解的低频振荡参数提取[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 8-13.
- LI Chengxin, LIU Junyong, YAO Liangzhong, et al. Extraction of low frequency oscillation parameters based on refined frequency shift empirical mode decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 8-13.
- [39] RAY P, LENKA R K. Low frequency mode estimation of a dynamic power system by noise assisted empirical mode decomposition [C]//International Conference on Information Technology. Bhubaneswar, India: IEEE, 2017: 190-195.
- [40] 汪颂军, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于 EEMD-NExT 的低频振荡主导模式工况在线辨识与预警[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 111-116.
- WANG Songjun, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Online dominant mode identification and warning based on EEMD-NExT for low-frequency oscillation in operating conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 111-116.
- [41] 王天施. 间谐波检测方法及对电力系统影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- WANG Tianshi. Study on interharmonic detection methods and influences on power system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [42] 马俊杰, 刘芳, 吴敏, 等. 基于类噪声小波分解的风电场次同步振荡辨识[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1294-1300.
- MA Junjie, LIU Fang, WU Min, et al. Wind farm sub-synchronous oscillation mode identification based on wavelet decomposition of ambient noise signals[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1294-1300.
- [43] ZHAO Y, CUI H, HUO H, et al. Application of synchrosqueezed wavelet transforms for extraction of the oscillatory parameters of subsynchronous oscillation in power systems [J]. Energies, 2018, 11: 1-18.
- [44] 赵妍, 崔浩瀚, 荣子超. 次同步振荡在线监测的同步提取变换和朴素贝叶斯方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 187-193.
- ZHAO Yan, CUI Haohan, RONG Zichao. On-line monitoring of subsynchronous oscillation based on synchro-extracting transform and naive Bayes method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 187-193.
- [45] 赵妍, 李武璟, 聂永辉. 次同步振荡的频率切片小波变换检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 106-114.
- ZHAO Yan, LI Wujing, NIE Yonghui. A method for subsynchronous oscillation detection using frequency slice wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 106-114.
- [46] BONGIORNO M, SVENSSON J, ANGQUIST L. Online estimation of subsynchronous voltage components in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 410-418.
- [47] DISENFELD H. A methodology for subsynchronous oscillations detection in generators using Butterworth-like filters [J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2015, 5(4): 1-9.
- [48] 刘林, 李海峰, 罗凯明, 等. 用于次同步振荡模态提取的柔性原子滤波[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 98-105.
- LIU Lin, LI Haifeng, LUO Kaiming, et al. Flexible atom filtering for subsynchronous oscillations mode extraction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 98-105.
- [49] 董飞飞, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于 IBBO 的原子分解算法在次同步振荡抑制中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 107-113.
- DONG Feifei, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Application of IBBO-based atomic decomposition algorithm in subsynchronous oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 107-113.
- [50] GAO B, TORQUATO R, XU W, et al. Waveform-based method for fast and accurate identification of subsynchronous resonance events[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3626-3636.
- [51] ORMAN M, BALCEREK P, ORKISZ M. Effective method of subsynchronous resonance detection and its limitations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 915-920.
- [52] ABDEEN M, LI H, JING L. Improved subsynchronous oscillation detection method in a DFIG-based wind farm interfaced with a series-compensated network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119: 105930.
- [53] 李娟, 杨远洪, 焦邵华. 利用环境激励下的发电机组转子动态响应识别次同步振荡模态的方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5408-5415.
- LI Juan, YANG Yuanhong, JIAO Shaohua. Real-time identification of subsynchronous oscillation modal parameters based on dynamic characteristics of generator rotors under ambient excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5408-5415.
- [54] SALEHI F, MATSUO I B M, BRAHMAN A, et al. Sub-synchronous control interaction detection: a real-time application [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 106-116.

- [55] 杨玉坤,杨明玉. Prony算法在谐波、间谐波参数辨识中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(3):125-130.
YANG Yukun, YANG Mingyu. Application of Prony algorithm in parameter identification of harmonics and inter-harmonics[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2012, 24(3): 125-130.
- [56] 彭莉萍,魏辉,刘桂平,等. 通过改进Prony算法辨识交流串补引起的次同步谐振模式参数[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(增刊1):63-67.
PENG Liping, WEI Hui, LIU Guiping, et al. Detection of sub-synchronous resonance caused by series capacitive compensation based on improved Prony[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2015, 27(Supplement 1): 63-67.
- [57] 董青迅,李兴源,穆子龙,等. 基于Prony算法的次同步谐振检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(2):1-4,34.
DONG Qingxun, LI Xingyuan, MU Zilong, et al. New method for detection of sub-synchronous resonance based on Prony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2012, 24(2): 1-4, 34.
- [58] GU Y, CHEN D, JIN T, et al. Modified segmentation Prony algorithm and its application in analysis of subsynchronous oscillation[C]//Intelligent Information Technology Application Association, Electronics and Signal Processing. Nanchang, China: Springer, 2011: 229-235.
- [59] 吴超,陆超,韩英铎,等. 基于类噪声信号和ARMA-P方法的振荡模式辨识[J]. 电力系统自动化,2010,34(6):6-11.
WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo, et al. Identification of mode shape based on ambient signals and ARMA-P method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 6-11.
- [60] 陈刚,段晓,张继红,等. 基于ARMA模型的低频振荡模式在线辨识技术研究[J]. 电网技术,2010,34(11):48-54.
CHEN Gang, DUAN Xiao, ZHANG Jihong, et al. A new approach for online identification of low frequency oscillation modes based on auto-regressive moving-average model[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 48-54.
- [61] 董飞飞,刘涤尘,涂炼,等. 基于MM-ARMA算法的次同步振荡模式参数辨识[J]. 高电压技术,2013,39(5):1252-1257.
DONG Feifei, LIU Dichen, TU Lian, et al. Subsynchronous oscillation modal parameter identification based on MM-ARMA algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1252-1257.
- [62] 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.
- [63] TRIPATHY P, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. A modified TLS-ESPRIT-based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 719-727.
- [64] 蒋平,吴熙,罗曦. 基于TLS-ESPRIT算法的附加励磁阻尼控制抑制次同步振荡[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):25-29.
JIANG Ping, WU Xi, LUO Xi. SSO mitigation using supplementary excitation damping controller based on TLS-ESPRIT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 25-29.
- [65] 李天云,于海峰,任慧超,等. TLS-ESPRIT算法在次同步谐振在线监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):37-41.
LI Tianyun, YU Haifeng, REN Huichao, et al. Application of TLS-ESPRIT algorithm in sub-synchronous resonance on-line monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 37-41.
- [66] JAIN S K, SINGH S N. Exact model order ESPRIT technique for harmonics and interharmonics estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(7): 1915-1923.
- [67] 胡楠. 基于四阶混合平均累计量的TLS-ESPRIT算法在高压直流输电次同步振荡辨识中的应用[J]. 电气工程学报,2017,12(12):33-39,51.
HU Nan. A TLS-ESPRIT method based fourth-order mixed mean cumulant applying for identification of subsynchronous oscillation modes in high voltage DC system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(12): 33-39, 51.
- [68] 李天云,许洁,袁明哲,等. 基于SSI-LS的次同步谐振参数检测新方法[J]. 现代电力,2011,28(2):28-31.
LI Tianyun, XU Jie, YUAN Mingzhe, et al. A new method to detect parameters of subsynchronous resonance based on SSI-LS[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 28-31.
- [69] 赵兰明,李宽,张友泉,等. 基于FastICA-MP算法的次同步振荡模式参数辨识[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(8):37-42.
ZHAO Lanming, LI Kuan, ZHANG Youquan, et al. Parameter identification of subsynchronous oscillation based on FastICA-MP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 37-42.
- [70] LI K, ZHANG W, WANG H, et al. Parameter identification of subsynchronous oscillation based on FastICA and MP algorithms[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 2454-2457.
- [71] 李宽,李兴源,赵睿. 基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测[J]. 电网技术,2012,36(4):128-132.
LI Kuan, LI Xingyuan, ZHAO Rui. Detection of subsynchronous oscillation in HVDC transmission system based on improved matrix pencil method[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 128-132.
- [72] SETAREH M, PARNIANI M, AMINIFAR F. Non-stationary stabilized fast transversal RLS filter for online power system modal estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2744-2754.
- [73] 李萍,刘小河. 基于RLS算法的APF电流检测[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):50-53.
LI Ping, LIU Xiaohu. APF current detection based on RLS adaptive algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 50-53.
- [74] 刘国海,吕汉闻,刘颖,等. 基于改进RLS算法的谐波电流检测方法[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):46-49.
LIU Guohai, LÜ Hanwen, LIU Ying, et al. Harmonic current detection based on improved RLS algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 46-49.
- [75] KHALILINIA H, VENKATASUBRAMANIAN V. Subsynchronous resonance monitoring using ambient high speed sensor data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1073-1083.
- [76] LIU H, HU F, SU J, et al. Comparisons on Kalman-filter-based dynamic state estimation algorithms of power systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 51035-51043.
- [77] ZHAO J. Dynamic state estimation with model uncertainties using H_{∞} extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1099-1100.
- [78] ZHAO J, MILI L. A decentralized H-infinity unscented Kalman filter for dynamic state estimation against uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4870-4880.
- [79] THIRUMALAIVASAN R, JANAKI M, XU Y. Kalman filter based detection and mitigation of subsynchronous resonance with SSSC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1400-1409.

- [80] SHAIR J, WU C, HUANG W, et al. Extracting time-varying subsynchronous oscillation in wind power systems through Kalman filtering[C]//IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference-Asia. Chengdu, China: IEEE, 2019: 3162-3167.
- [81] ZHANG F, CHENG L, GAO W, et al. Synchrophasors-based identification for subsynchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2224-2233.
- [82] VANFRETTI L, BAUDETTE M, DOMÍNGUEZ-GARCÍA J L, et al. A PMU-based fast real-time sub-synchronous oscillation detection application[C]//IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Rome, Italy: IEEE, 2015: 1892-1897.
- [83] RAUHALA T, GOLE A, JARVENTAUSTA P. Detection of sub-synchronous torsional oscillation frequencies using phasor measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 11-19.
- [84] 王茂海, 高洵, 王蓓, 等. 基于广域测量系统的次同步振荡在线监测预警方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 98-102.
WANG Maohai, GAO Xun, WANG Bei, et al. Online early-warning of sub-synchronous oscillations based on wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 98-102.
- [85] 谢小荣, 王银, 刘华坤, 等. 电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 189-194.
XIE Xiaorong, WANG Yin, LIU Huakun, et al. Detection method for sub-synchronous and super-synchronous harmonic phasors in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 189-194.
- [86] LIU H, BI T, LI J, et al. Inter-harmonics monitoring method based on PMUs[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(18): 4414-4421.
- [87] 刘灏, 许苏迪, 毕天姝, 等. 基于同步相量数据的间谐波还原算法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 153-160.
LIU Hao, XU Sudi, BI Tianshu, et al. Inter-harmonic reduction algorithm based on synchrophasor measurements[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 153-160.
- [88] OSTADI A, YAZDANI A, VARMA R K. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.
- [89] MOHAMMADPOUR H A, SANTI E. Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1022-1033.
- [90] 付强, 杜文娟, 王海风. 多端柔性直流输电控制引发的开环模式谐振及其传播[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4379-4389.
FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Open-loop modal resonance and propagation of VSC-MTDC with different control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4379-4389.
- [91] 陈磊, 王文婕, 王茂海, 等. 利用暂态能量流的次同步强迫振荡扰动源定位及阻尼评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 1-8.
CHEN Lei, WANG Wenjie, WANG Maohai, et al. Disturbance source location of subsynchronous forced oscillation and damping evaluation using transient energy flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 1-8.
- [92] 任怡娜, 陈磊, 闵勇, 等. 次同步振荡中暂态能量流与电功率和阻尼转矩的关系[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 52-58.
REN Yina, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Relationship between transient energy flow, electric power and damping torque in subsynchronous oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 52-58.
- [93] XIE X, LIU W, LIU H, et al. A system-wide protection against unstable SSCI in series-compensated wind power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3095-3104.
- [94] XIE X, ZHAN Y, LIU H, et al. Wide-area monitoring and early-warning of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of renewables[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 108(6): 31-39.
- [95] XIE X, ZHAN Y, SHAIR J, et al. Identifying the source of subsynchronous control interaction via wide-area monitoring of sub/super-synchronous power flows[J/OL]. IEEE Transactions on Power Delivery. (2019-12-31) [2020-07-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8946593>. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2963336.
- [96] GAO B, WANG Y, XU W, et al. Identifying and ranking sources of SSR based on the concept of subsynchronous power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 258-268.
- [97] 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, 86.
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, 86.
- [98] 陈磊, 陈亦平, 闵勇, 等. 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, 27.
CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong, et al. 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, 27.
- [99] CHEN L, MIN Y, CHEN Y, et al. Evaluation of generator damping using oscillation energy dissipation and the connection with modal analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1393-1402.
- [100] 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]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 78-83.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] SHU Y, ZHOU X, LI W. Analysis of low frequency oscillation and source location in power systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(1): 58-66.
- [104] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 风火打捆外送系统 220 kV 电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 138-144.

- ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 138-144.
- [105] 李自明, 王维庆, 姚秀萍, 等. 直驱风电场次同步振荡监测系统的构建与应用[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 218-224.
- LI Ziming, WANG Weiqing, YAO Xiuping, et al. Construction and application of sub-synchronous oscillation monitoring system for direct-drive wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 218-224.
- [106] 邱衍江, 张新燕, 张超, 等. 新能源汇集地区广域次同步振荡监测系统研究与构建[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 88-94.
- QIU Yanjiang, ZHANG Xinyan, ZHANG Chao, et al. Research and construction of wide-area subsynchronous oscillation monitoring system in new energy influx area[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 88-94.
- [107] XIE X, LIU H, WANG Y, et al. Measurement of sub- and supersynchronous phasors in power systems with high penetration of renewables[C]//IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [108] WU X, CHEN X, SHAHIDEHPOUR M, et al. Distributed cooperative scheme for forced oscillation location identification in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 374-384.

作者简介:



吴熙

吴熙(1987—),男,江苏靖江人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统次同步振荡分析与控制、含FACTS电网规划与分析(E-mail: wuxi@seu.edu.cn);

陈曦(1991—),男,江苏高邮人,博士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡检测与定位技术(E-mail: 592234385@qq.com);

吕万(1996—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡检测技术(E-mail: czflslw@126.com)。

(编辑 李玮)

Review of detection and online localization technology of sub-synchronous oscillation in power system

WU Xi¹, CHEN Xi¹, LÜ Wan¹, YUAN Chao², YANG Hongyu²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: With the expansion of the power grid scale and the increase of the renewable energy power generation capacity, SSO (Sub-Synchronous Oscillation) has become an increasingly prominent problem which poses a great threat to the safe and stable operation of power grid. Timely detection and online localization of SSO in system contribute significantly to the safety of power equipment and the stable operation of system. The SSO detection methods are firstly introduced, the pros and cons of which are also sorted and summarized. Secondly, the localization methods of SSO source are introduced, and the weaknesses of the existing researches are discussed. Finally, the measurement system architecture for SSO online detection and localization, and the improvement scheme of PMU / WAMS (Phasor Measurement Unit / Wide Area Measurement System) are introduced, then the development trend of SSO detection and localization technology in the future is prospected.

Key words: electric power systems; sub-synchronous oscillation; detection technology; online localization; phasor measurement unit; wide area measurement system