

# 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展

程云峰, 张欣然, 陆超

(清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 大规模交直流混合电网的建设和发展, 对电力系统稳定和控制的空间广度和时间维度上提出了更高的要求。广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)的同步量测数据在空间和时间上满足上述要求, 因而研究WAMS技术在电力系统中的应用十分必要。从WAMS的结构和原理出发, 总结了近五年来广域测量系统在电力系统动态监测与故障分析、辨识与估计、系统稳定控制和广域保护等方面的研究进展, 并详细分析了其中存在的问题。最后展望了广域测量技术需要进一步研究的问题, 指出基于WAMS技术构建大规模互联电力系统的广域安全监测及控制系统是一个很有意义的研究方向。

**关键词:** 广域测量技术; 电力系统稳定与控制; 动态监测; 参数辨识; 广域保护

## Research progress of the application of wide area measurement technology in power system

CHENG Yun-feng, ZHANG Xin-ran, LU Chao

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The developments of large-scale AC/DC hybrid power grid put forward higher requirement for power system stability and control in space and time. The synchronous measurement data of WAMS can meet the above requirements, thus it's quite necessary to study the application of WAMS technology in power system. Based on the structure and principle of WAMS, we give a detailed analysis and summary of the recent five year's research and application of WAMS in power system dynamic monitoring, fault analysis, identification and estimation, system stability and control and wide area protection, as well as the existing problems. Finally we look forward to the further research of wide area technology, point out that it's a very meaningful research to build a wide area safety monitoring and control system for large-scale interconnected power system based on WAMS technology.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215206) and National Natural Science Foundation of China (No. 51037002 and No. 51107061).

**Key words:** wide area measurement technology; power system stability and control; dynamic monitoring; parameter identification; wide area protection

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0145-09

## 0 引言

在“西电东送, 南北互供, 全国联网”原则的指导下, 随着中国电网规模的扩大以及特高压电网、西电东送等工程的建设, 中国正在加快建设适应大规模电能跨区传输的跨区域互联电网。跨区互联电网和远距离输电, 使得不同区域电网之间的联系进一步加强, 也带来了如区间低频振荡等威胁电网安

全稳定的新问题, 对电网的稳定运行和控制提出了新的更高的要求。

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)是基于同步相量测量技术和现代通信技术, 对地域广阔的电力系统运行状态进行监测、分析, 为电力系统实时运行和控制服务的系统<sup>[1]</sup>。测量的广域信息具备时间上同步、空间上广域的优点, 同时可以根据GPS时标得到同步相量测量的结果, 极大地改善了电力系统的可观性。WAMS得到的数据具有如下三个特点: 第一, 时间上同步。电网的广域互联会带来新的电网暂态和动态问题, 是原有的稳态监测系统所无法处理的, WAMS时间上

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB215206); 国家自然科学基金重点项目(51037002, 51107061)

同步的特点可以有效改善这些问题。第二，空间上广域。WAMS可以在时间同步性的基础上获得广域电网的数据，实现对广域信息的实时监测和处理。第三，可直接测量相角数据，与EMS相比具有更高的测量精度。这些大量的广域信息获取为系统控制提供了数据基础。本文从WAMS的结构与工作原理出发，介绍了近年来广域测量技术在电力系统动态过程监测、状态估计与参数辨识、系统安全稳定控制以及故障分析与广域保护等方面的应用，并展望其在电力系统当中进一步应用的前景。

## 1 PMU/WAMS 基本技术

### 1.1 相角测量算法

PMU是实现WAMS应用的基础，而相角测量算法是PMU的核心，优秀的PMU算法能提高测量数据的精度；算法的精度直接影响到电力系统稳定控制、故障分析及继电保护等高级应用的准确性。为提高PMU算法的测量精度并使之满足动态情况下工程应用的要求，国内外学者提出了多种相量测量算法并取得了一定成效。目前，常见的相量测量算法有：过零检测法<sup>[2]</sup>、离散傅里叶变换法（Discrete Fourier transform, DFT）<sup>[3-4]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[5]</sup>、瞬时值计算法<sup>[6]</sup>、小相量法<sup>[7]</sup>、小波变换法<sup>[8-9]</sup>、最小二乘法等。

当系统处于稳态情况时，上述的各种方法都能够达到相当精度，满足一般工程应用的需要。而在系统处于动态情况下，如何准确快速地测量到相应的相角，是各算法研究和改进的重点<sup>[10]</sup>。

### 1.2 广域测量系统

广域测量系统（WAMS）一般包括处于调度中心的主站服务器、分布于系统关键节点的子站以及联系两者的高速数字化通信网络组成，其拓扑结构一般采用主站——子站树状层级结构。

子站即发电厂或变电站安装的同步相量测量装置，广域测量系统对于同步相量测量技术的要求主要体现在可靠性、准确性和实时性三方面。主站即调度中心主站，一般由主站基础平台及其上的高级应用功能等组成。WAMS有望克服现有局部和分散控制系统的不足，实现全局优化协调控制。

## 2 WAMS 的应用

### 2.1 动态过程监测

广域动态监测与故障分析完全基于PMU的真实数据，不依赖电力系统的仿真模型，可以反映全网真实的动态行为。

目前国内外已经有几十个WAMS系统投入实际运行，其中动态监测作为WAMS的基本功能为调

度中心实时地提供系统的运行状态，为系统安全稳定分析以及故障原因分析提供了重要的数据。在系统动态过程的监测、报警与分析中，根据电网中关键变电站的实时动态测量数据在线监视电网的运行状态，在系统电压、相角、频率出现异常时进行越限（静态、动态）报警。对系统的异常运行状态、特征信号和故障类型进行观测、辨识和分析。通过观测分析可以为电力系统稳定控制策略的制定提供技术依据。如2004年3月，东北电网在进行人工大扰动试验时，东北电网的WAMS系统完整地记录了系统的动态过程信息，为后续分析提供了宝贵的动态数据<sup>[11]</sup>。

### 2.2 状态估计

当前基于SCADA的状态估计还存在着一些尚未解决的问题，一是由于采集和传送的时间限制，状态估计的周期比较长，为分钟级，另外由于缺乏统一的时标，同一断面数据的精度较差；二是状态估计模型为非线性，存在收敛性和快速性问题；三是在量测数据出现多个相关的不良数据的情况下，检测和辨识没有一个统一有效的方法。

WAMS的应用为上述问题的解决提供了思路。文献[12]首次提出可以将PMU测量数据用于状态估计。文献[13-14]研究将PMU量测数据引入到传统的状态估计中，形成混合模型状态估计。文献[15]首次提出了全部节点电压相量和部分支路电流相量可量测的情况下的状态估计问题，建立了线性状态估计器。文献[16]提出在PMU配置不能使网络完全可观测时，可将网络分解为线性可观区和非线性不可观测区，然后将线性估计器应用于线性可观区，将传统的估计器应用于非线性不可观测区，这种方法的难点在于边界节点的处理以及两个区域间参考相角的转化。近几年，受PMU覆盖率的影响，基于PMU和SCADA混合量测的状态估计成为一个活跃的研究方向，文献[17-20]分别提出了各种改进的思路和方法来实现混合状态估计。

另外，引入PMU量测数据后，动态状态估计、谐波状态估计以及不良数据的检测和辨识等研究方面也有所进展。目前，电力系统动态状态估计大多采用扩展式卡尔曼滤波的算法，文献[21]将动态状态估计和PMU的量测结合在一起，充分发挥了两者之间的优势，文献[22]分析了PMU的数量、安装位置和量测权重等因素对动态状态估计准确性的影响。文献[23-24]在理论、模型、求解算法、客观性和质量评价的方面对谐波估计进行了详细的论述，为问题的解决提供了思路。文献[25]研究了为能进行不良数据监测和辨识，PMU的优化配置问题。文

献[26]指出只要PMU量测数据达到一定的冗余度即可完成不良数据的监测和辨识。文献[27]指出最大残差剔除法只有在一定条件下才能有效,并提出了两种利用不良数据稀疏性的方法来检测和辨识不良数据。

### 2.3 线路参数辨识

WAMS技术的发展和普及为线路参数的辨识提供了新的途径。国内外提出了多种辨识算法,如最小二乘法、卡尔曼滤波法、模拟进化法、最大似然法等。这些算法都不同程度地反映了运行中的输电线路在各种因素影响下的动态参数。

文献[28]引入不对称增量法,可以随时提供线路的正序参数,在负荷不平衡度较大或所测线路附近发生不对称故障时,可在线辨识线路零序参数。文献[29]基于均匀传输线方程和PI形精确等值电路,给出了在两端电压、电流相量已知的情况下,输电线路参数的在线估计方法。文献[30]提出基于滑动窗口总体最小二乘的线路参数辨识算法,该方法对PMU数据采取窗口滑动处理,将目标函数变为窗口误差平方和最小,因而抗噪声能力较强;同时对大量辨识结果的可信度分别进行核密度估计和点估计,以获取参数辨识值的统计结果。

### 2.4 发电机参数辨识

目前同步发电机参数辨识的方法有频率辨识法和时域辨识法。在发电机组运行时附加一个扰动后,利用PMU记录的动态数据来进行参数辨识。文献[31]介绍了功角可测时在线频率响应(OLFR)辨识方法的原理,重点分析了OLFR方法的可辨识性,并将该方法与时域辨识方法进行了比较。文献[32]提出对多台发电机参数进行整体辨识的思路,根据WAMS采集到的发电机的功角轨迹,同时辨识多台发电机的参数。文中针对不同阶次的Park模型,采用基于轨迹灵敏度的可辨识性分析方法,研究了多台发电机参数的可辨识性,结果表明大部分参数能够区分辨识而一部分参数不能够区分辨识。

### 2.5 励磁系统和调速器参数辨识

同步发电机的励磁系统性能和参数影响系统的静态稳定和动态稳定,通常发电机励磁系统参数通过对系统动态电压的影响而影响到系统动态稳定。而调速器由于其响应稍慢,因此主要对系统扰动后的稳态值影响甚大。PMU可以清晰地记录下故障的波形及实测数据,通过对比由PMU实测的数据进行不断的修正和拟合,可以实现对励磁系统及调速器的参数辨识。文献[33]论证了基于实测扰动的励磁系统参数的可辨识性。文献[34]利用PMU的实测数据,实现发电机与励磁控制器解耦,利用遗传

算法单独辨识励磁控制器的参数,减少了因发电机模型及参数不准确而引入的误差,使辨识出来的励磁控制器参数更加精确。

### 2.6 负荷参数辨识

负荷特性对电力系统仿真结果有重要影响,不同的负荷特性对电力系统的暂态稳定、电压稳定、低频振荡等具有不同程度的影响。文献[35]用电力系统同步数据对负荷区域进行建模、网络化简和负荷模型辨识,提出了基于电力系统广域测量系统的综合区域负荷模型的概念,分析了该模型的参数可辨识性。文献[36]提出一种基于综合广域信息的负荷参数辨识方法,以发电机相对功角作为广域信息,综合分析多种运行及故障条件下发电机功角对负荷参数的轨迹灵敏度,根据灵敏度分析结果,可以确定参与负荷参数辨识的发电机功角以及各负荷参数的易辨识性,也可以选择有利于参数辨识的扰动地点。

### 2.7 频率稳定与低频减载

利用WAMS提供的实时信息进行电压稳定和频率稳定监视和预测已有不少研究。但利用WAMS进行稳定控制方面的研究还较少。目前的静态稳定控制方面的研究主要集中在低频减载方面。WAMS系统的最小采样时间为10ms,是最适合低频减载控制的数据源,可以避免响应过慢或者减载过多等问题。文献[37]利用WAMS提供的实时广域数据计算扰动功率,提出了一种同时考虑频率稳定与电压稳定的两步自适应减载策略。文献[38]使用WAMS提供的系统中心频率变化率作为负荷切除的启动信号,提出了用快速排序非支配遗传算法结合小生境技术对低频减载进行优化。

### 2.8 电压稳定评估

基于广域测量的在线电压稳定控制主要采用在线测量的局部指标法。近年来这方面的研究主要集中在利用广域信息的局部指标推导方面。电压稳定性指标通常是一个在0~1范围内波动的变量,其数值越小系统的电压稳定性越好,当这一指标达到1时系统失稳<sup>[39]</sup>。文献[40]利用被监测负荷节点的同步电压相量及与其相连接的等价电压相量所组成的局部相量信息,根据简单传输线模型建立一等价两节点系统,以被监测负荷节点的同步电压相量在等价电压相量的投影与等价电压相量幅值的一半之差作为计算电压稳定与否的指标。文献[41]推导了基于功率偏差的电压稳定线路指标,它能比较准确地反映运行点到功率传输极限点的距离,解决了此前的指标在处理多机系统时构造的无穷大等值母线电压幅值相对于被监测点的电压幅值有强耦合以及不

能监测系统联络节点的问题。文献[42]利用 WAMS 测得的广域电压相量、线路潮流等电气量, 根据线路潮流电压方程计算比较线路两侧电压水平, 提出了电压稳定性指标, 较以前的电压稳定性指标具有不用区分线路潮流受送端, 不用判别线路电阻是否为 0, 在临界点指标值很接近 1, 线性度好等优点。

## 2.9 暂态稳定监测

基于 WAMS 的暂态稳定评估与监测经常采用“超实时仿真计算, 实时匹配, 在线决策”的模式, 对可能出现的暂态稳定问题进行评估与预测。对于多机系统而言, 功角最超前和最滞后机组间的动态行为能够反映整个系统的稳定性, 即多机电力系统的暂态稳定问题等价于系统中这一特殊机组对是否保持相对同步的问题。文献[43]设计了一种同时利用 WAMS 数据的快速性与 EMS 系统详细模型来预测系统暂态稳定的方法, 可以处理单点故障和连锁故障, 分析了时间不一致性对预测精度的影响, 并且提出了二进制搜索的方法来提高预测精度。文献[44]提出一种直接将等面积准则(EAC) 应用于多机系统稳定评估的方法: 捕捉故障后最超前和最滞后的相对摇摆最厉害的机组对, 通过拟合其相对功角特性曲线并应用等面积法则进行暂态稳定类型的快速判别和稳定性指标的快速计算, 可以利用较少的关键 PMU 量测信息得到系统的暂态稳定情况。文献[45]利用系统操作连续性的定义而非系统的具体参数定义暂态稳定性, 得到了不连续的稳定性边界, 进而利用同步相量信息和突变理论把不连续的故障切除角稳定边界转化为连续的最超前与最滞后机组对之间的相对摇摆角稳定边界, 可以找到多机系统在不同情况下的共同稳定判据, 得到了多机系统暂态稳定的一种实时评估方法。

## 2.10 低频振荡辨识

基于扰动后 WAMS 测得的广域动态信息, 分析振荡数据, 计算振荡参数, 可以进行低频振荡的在线辨识, 主要的算法包括滤波器类方法、回归分析类方法、傅里叶类方法、Prony 方法<sup>[46]</sup>等。文献[47]采用复杂扩展卡尔曼滤波法检测多弱阻尼系统当中的低频振荡, 该方法是非线性的。文献[48]提出采用自回归滑动平均法对类噪声信号进行处理, 并且基于 ARMA 模型对应 Green 函数系数与低频振荡模态之间的比例关系, 实现对节点间相位关系的估计。此外, 还可以基于不加入干扰的电网运行信息进行低频振荡的在线辨识, 文献[49]采用快速傅里叶变换仅利用运行中的 PMU 数据来辨识低频振荡, 其优点是避免了辨识过程对于电网的干扰。文献[50]利用 WAMS 实测数据, 通过数据驱动随机子空间方

法对低频振荡的模式进行研究, 取得了较好的效果。

## 2.11 广域阻尼控制

利用广域阻尼控制系统可以实现多种电力系统监测与保护功能, 在国内外已经有很多工程实例采用了广域阻尼控制。加拿大魁北克水电局借鉴发电机 PSS 上的经验, 将 PMU 信号引入已有的可控串补和 SVC 的控制回路, 以提升对于 0.6 Hz 的区域振荡模式的阻尼<sup>[51]</sup>。清华大学电机系在南方电网进行了多直流广域阻尼控制系统的实施, 包括分布于 3 个省的 6 个测量点、位于南网总调的中央站和位于高肇、兴安两回直流整流站的 2 个控制子站等。到 2013 年 3 月, 该系统已经试运行 3 年半、正式运行 1 年。2008 年和 2009 年三次不同直流单极闭锁的现场大扰动试验表明: 控制系统投入可提高南方电网主导振荡模式阻尼比 10%以上、西电东送极限 650 MW 以上<sup>[52-53]</sup>。

近年来, 在广域阻尼控制方面的研究主要有如下四方面。一是现代控制理论在广域阻尼控制系统设计当中的运用。如文献[54]基于降阶模型与鲁棒控制理论, 通过求解多目标参数优化问题, 完成了针对多模态振荡电力系统的低阶鲁棒控制器的设计。二是研究通信系统对于控制性能的影响。如文献[55]基于时滞电力系统模型, 通过自由权重矩阵法和极点配置法完成了考虑延时的广域阻尼控制系统的控制器设计。三是通过柔性输配电设备与高压直流输电线路实现广域阻尼控制。如文献[56]利用广域测量信号为输入设计 SVC 的附加阻尼控制(PSDC), 提出了综合留数指标的概念, 并据此选择具体的控制输入信号; 接着基于测试信号法和留数根轨迹方法相结合进行参数设计。四是在 PMU 优化布点与输入输出信号优化选择方面。如文献[57]对于含有 UPFC 的广域阻尼控制系统, 讨论了 UPFC 的优化布点以及信号选择的问题, 通过比较节点产生阻尼的大小决定 UPFC 的选点, 根据特征向量在输出信号上的投影来选择输出信号。

## 2.12 故障定位和测距

准确的故障定位对于加速排除线路故障和尽快恢复供电具有重要的意义。故障定位中, 采用输电线路双端量测量的方案在理论上都明显优于仅采用单端量测量的方案。WAMS 的发展使同一时标下精确的双端测量成为可能, 从而可以大大提高故障定位的精度。

近年来, 在故障定位新算法方面的研究取得一定的成果。文献[58]基于故障距离分布特点将原 N 端输电线路的测距问题转化为一个内部包含故障点的 T 型线路测距问题, 而后提出一种 T 型线路故障

测距新算法。所提出的 N 端测距方法无测距死区, 较好地克服了传统方法在 T 节点附近有测距死区的不足。文献[59]把故障点位置和故障点两端电压加入到状态变量当中, 通过线性状态估计完成故障测距, 同时在状态估计当中采用了坏数据辨识。文献[60]提出一种利用广域测量信息进行故障定位的新方法, 该方法在系统正常运行时, 形成网络关联系数矩阵, 故障发生后, 对每条支路计算定位函数在每个步长点的值, 并据此确定故障位置, 在故障定位过程中, 无需修改网络矩阵, 能同时确定故障线路和故障位置。

### 2.13 广域保护

目前提出的广域继电保护原理主要是通过快速收集全网信息, 并利用网络通信进行多点综合比较判断, 将电流差动保护和方向比较式保护的功能推广到后备保护中, 实现快速、灵敏的后备保护, 克服现有后备保护的不足。此外, 基于广域信息的自适应整定在电网运行方式发生变化的情况下, 保护系统能够及时更正与其不相适应的保护定值并重新优化整定, 从而提高保护适应电网运行方式变化的能力<sup>[61]</sup>。

近几年, 广域保护方面的研究主要集中在通信系统可靠性、后备保护和多代理技术在广域保护中的应用等三部分。可靠的通信系统是广域保护可靠性的基础, 文献[62]提出了一种广域保护通信系统可靠性评估方法, 采用故障树分析和序贯蒙特卡洛模拟的指数计算方法, 通过静态处理的办法克服了以往的评估方法计算复杂、适应性弱等缺点。在后备保护方面, 文献[63]利用 PMU 数据联结保护单元与系统整体的保护, 通过故障时在控制中心比较每条母线的正序电压幅值来找到距离故障点最近的母线, 然后通过比较与该母线连接的线路上的正序电流相角来找到故障的线路。多代理技术是针对分布式系统的先进技术, 其在广域保护方面的应用是提高广域保护应对系统故障时出现的通信误码、保护失灵和断路器失灵等复杂运行情况的能力为目的。文献[64]基于分区域分布集中式多 Agent 广域保护系统结构, 结合多信息融合的广域故障识别保护算法, 研究广域保护主站和子站, 子站与子站间的信息动态协作机制, 详述了保护系统对故障识别、容错处理和执行处理等动态协作机制的处理过程, 并利用状态机描述多 Agent 系统的整体协作机制。

### 3 广域测量技术的发展前景

随着电力系统跨区互联的发展, 传统的分析手段和控制策略已经不能满足实际要求。因此需要构筑基于 WAMS 的安全监测稳定控制体系。随着广域

测量技术应用于电力系统稳定控制优越性的逐步体现。未来 WAMS 技术的发展前景非常可观。主要可能在以下方面:

(1) 目前 WAMS 平台一般以省调为单位建设, 要供跨区互联电网分析、监测和实时动态控制使用, 需构筑跨省跨区电网综合动态信息平台。

(2) 开发基于 WAMS 平台的高级应用, 对全系统进行动态安全分析、稳定预警及预决策。

(3) 基于 WAMS 的实时闭环控制。基于动态信息平台对电力系统进行动态稳定监测和分析, 形成在线预决策安全稳定控制策略。

### 4 结论

本文总结了 WAMS 技术在电力系统全网动态监测、状态估计、电力系统动态模型辨识和模型校正、电压和频率稳定监视及控制、暂态稳定预测、低频振荡分析及抑制、故障定位及保护等方面的研究进展和应用, 表明 WAMS 给电力系统中一系列问题的研究提供了新的思路和方法。展望了 WAMS 的发展前景, 说明基于 WAMS 技术构建大规模互联电力系统的广域安全监测及控制系统是一个很有意义的研究方向。

### 参考文献

- [1] 靳希, 吴文辉, 吴世敏, 等. 基于 PMU 的广域测量技术及其应用[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(10): 10-13.  
JIN Xi, WU Wen-hui, WU Shi-min, et al. Wide area measurement technology based on PMU and its applications[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(10): 10-13.
- [2] Nguyen C T, Srinivasan K. A new technique for rapid tracking of frequency deviations based on level crossings[J]. Power Engineering Review, IEEE, 1984, PER-4(8): 61.
- [3] 王茂海, 孙元章. 基于 DFT 的电力系统相量及功率测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 20-24.  
WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. A DFT-based method for phasor and power measurement in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24.
- [4] Belega D, Dallet D. Frequency estimation via weighted multipoint interpolated DFT[J]. Science, Measurement & Technology, IET, 2008, 2(1): 1-8.
- [5] Sunghan K, Mcnames J. Tracking tremor frequency in spike trains using the extended Kalman smoother[J].

- IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2006, 53(8): 1569-1577.
- [6] 周水斌, 杨敏, 陈小桥, 等. 一种不受信号频率影响的电压计算方法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 66-67. ZHOU Shui-bin, YANG Min, CHEN Xiao-qiao, et al. A voltage measurement algorithm uninfluenced by signal frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 66-67.
- [7] de la O Serna J A. Reducing the error in phasor estimates from phasorlets in fault voltage and current signals[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 856-866.
- [8] 苏鹏声, 王欢. 短窗 Morlet 复小波用于电力系统信号处理的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 36-42. SU Peng-sheng, WANG Huan. Discussion of the short window Morlet complex wavelet algorithm on the power system signal process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 36-42.
- [9] 陈祥训. 实小波变换提取相位信息方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 8-13. CHEN Xiang-xun. Methods to extract phase information using real wavelet transforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 8-13.
- [10] 麦瑞坤, 何正友, 薄志谦, 等. 动态条件下的同步相量测量算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 52-58. MAI Rui-kun, HE Zheng-you, BO Zhi-qian, et al. Research on synchronized phasor measurement algorithm under dynamic conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 52-58.
- [11] 辛雷, 肖广明. 广域实时动态监测系统及在东北电网中的应用[J]. 东北电力技术, 2007, 28(9): 11-14. XIN Lei, XIAO Guang-ming. Wide area real-time dynamic monitoring system and its application to Northeast Power Grid[J]. Northeast Electric Power Technology, 2007, 28(9): 11-14.
- [12] Thorp J S, Phadke A G, Karimi K J. Real time voltage-phasor measurement for static state estimation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(11): 3098-3106.
- [13] 赵红嘎, 薛禹胜, 汪德星, 等. 计及 PMU 支路电流相量的状态估计模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 37-40. ZHAO Hong-ga, XUE Yu-sheng, WANG De-xing, et al. State estimation modal with PMU current phasor measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 37-40.
- [14] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 31-35. LI Qiang, ZHOU Jing-yang, YU Er-keng, et al. A hybrid algorithm for power system state estimation based on PMU measurements and SCADA measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 31-35.
- [15] Phadke A G, Thorp J S, Karimi K J. State estimation with phasor measurements[J]. Power Engineering Review, IEEE, 1986, PER-6(2): 48.
- [16] Zivanovic R, Cairns C. Implementation of PMU technology in state estimation: an overview[C] // Africon, 1996, IEEE Africon 4<sup>th</sup>, Stellenbo Sch, South Africa, Sept 24-27, 1996, 2: 1006-1011.
- [17] Chakrabarti S, Kyriakides E, Ledwich G, et al. Inclusion of PMU current phasor measurements in a power system state estimator[J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2010, 4(10): 1104-1115.
- [18] Vide P S C, Barbosa F P M, Barbosa F P M, et al. State estimation model including synchronized phasor measurements[C] // Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International, 2011: 1-6.
- [19] Defu N, Bing Y, Weimin Z, et al. A new algorithm for power system state estimation with PMU measurements[C] // 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer(MEC), Jilin, 2011: 114-117.
- [20] Castro Vide P S, Maciel Barbosa F P, Ferreira I M. Combined use of SCADA and PMU measurements for power system state estimator performance enhancement[C] // Proceedings of the 2011 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, 2011: 1-6.
- [21] 刘辉乐, 刘天琪, 彭锦新. 基于 PMU 的分布式电力系统动态状态估计新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 34-39. LIU Hui-le, LIU Tian-qi, PENG Jin-xin. New distributed power system dynamic state estimation algorithm based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,

- 29(4): 34-39.
- [22] Jain A, Shivakumar N R. Impact of PMU in dynamic state estimation of power systems[C] // Power Symposium, 2008. NAPS'08. 40<sup>th</sup> North American, Calgary, AB, 2008: 1-8.
- [23] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I)——理论、模型与求解算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 64-68.
- WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements (I)——theory, model and solution algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 64-68.
- [24] 吴笃贵, 徐政. 基于相量量测的电力系统谐波状态估计(II)——可观性、质量评估与算例研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 76-81.
- WU Du-gui, XU Zheng. Power system harmonic state estimation based on phasor measurements (II)——observability analysis, quality evaluation algorithm and example studies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 76-81.
- [25] Jian C, Abur A. Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1608-1615.
- [26] Jun Z, Abur A. Bad data identification when using phasor measurements[C] // 2007 IEEE Lausanne Power Tech, 2007: 1676-1681.
- [27] DUAN Dong-liang, YANG Liu-qing, Scharf L L. Phasor state estimation from PMU measurements with bad data[C] // 2011 4<sup>th</sup> IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), San Juan, 2011: 121-124.
- [28] 范琦, 穆钢, 王克英. 基于同步相量测量的线路参数在线测量的实验研究[J]. 东北电力学院学报, 2002, 26(4): 1-5.
- FAN Qi, MU Gang, WANG Ke-ying. Studies on lines' parameter measurement based on synchronized phasor measurements[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 26(4): 1-5.
- [29] 王茂海, 鲍捷, 齐霞, 等. 基于 PMU 实测数据的输电线路参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 25-27.
- WANG Mao-hai, BAO Jie, QI Xia, et al. Online estimation of transmission line parameter based on PMU measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 25-27.
- [30] 毕天姝, 丁蓝, 张道农. 基于窗口滑动总体最小二乘法的输电线路参数辨识[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 5(2): 10-15.
- BI Tian-shu, DING Lan, ZHANG Dao-nong. Transmission line parameters identification based on moving-window TLS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 5(2): 10-15.
- [31] 金字清, 岳陈熙, 甄威, 等. 基于功角测量的同步发电机参数辨识频域法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 7-11.
- JIN Yu-qing, YUE Chen-xi, ZHEN Wei, et al. On-line frequency response method of synchronous machine parameter identification based on rotor angle measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 7-11.
- [32] 郭磊, 鞠平, 王红印, 等. 电力系统多台发电机参数的整体辨识[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 44-50.
- GUO Lei, JU Ping, WANG Hong-yin, et al. System wide parameter identification of multi-generators in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 44-50.
- [33] 沈峰, 贺仁睦, 谢永红. 基于实测扰动的励磁系统参数辨识可行性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 69-73.
- SHEN Feng, HE Ren-mu, XIE Yong-hong. Study on feasibility of excitation system parameter identification based on actual measurement of disturbance[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 69-73.
- [34] 郭小龙, 胥国毅, 薛安成, 等. 基于 PMU 的励磁系统参数辨识研究[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(上册), 北京, 2008.
- GUO Xiao-long, XU Guo-yi, XUE An-cheng, et al. Research of excitation system parameter identification based on PMU[C] // Proceedings of the 24<sup>th</sup> Conference on Power System and Automation Among Colleges and Universities of China, Beijing, 2008.
- [35] 张靖, 杨慧敏, 李悝, 等. 基于广域测量系统的电力系统综合区域负荷模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 34(20): 17-21.
- ZHANG Jing, YANG Hui-min, LI Li, et al. Power system aggregate load area model based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 34(20): 17-21.

- [36] 管秀鹏, 孙元章, 程林. 基于综合广域信息的负荷参数辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 29-32.  
GUAN Xiu-peng, SUN Yuan-zhang, CHENG Lin. Load parameter identification based on wide-area measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 29-32.
- [37] Seethalekshmi K, Singh S N, Srivastava S C. WAMS assisted frequency and voltage stability based adaptive load shedding scheme[C] // Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, Calgary, AB, 2009: 1-8.
- [38] 侯王宾, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于广域测量的受端孤网优化低频减载[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 880-885.  
HOU Wang-bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, et al. Optimization of low frequency load shedding for isolated power system based on WAMS[J]. East China Electric Power, 2011, 39(6): 880-885.
- [39] Innah H, Hiyama T. Neural network method based on PMU data for voltage stability assessment and visualization[C] // TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference, Bali, 2011: 822-827.
- [40] 黄志刚, 邬炜, 韩英铎. 基于同步相量测量的电压稳定评估算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 28-33.  
HUANG Zhi-gang, WU Wei, HAN Ying-duo. An algorithm for voltage stability assessment based on synchronized phasor measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 28-33.
- [41] 廖国栋, 王晓茹. 基于广域量测的电压稳定在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 8-13.  
LIAO Guo-dong, WANG Xiao-ru. An on-line voltage stability monitoring method based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 8-13.
- [42] 巩伟峥, 房鑫炎. 基于广域测量系统的电压稳定指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 71-75.  
GONG Wei-zheng, FANG Xin-yan. A on-line voltage stability index based on WAMS[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 71-75.
- [43] LIU Ming-song, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. PMU measurements and EMS models based transient stability on-line forecasting[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, Calgary, AB, 2009: 1-8.
- [44] 卢芳, 于继来. 基于广域相量测量的暂态稳定快速评估方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 24-28.  
LU Fang, YU Ji-lai. WAMS based power system transient stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 24-28.
- [45] WANG Zhen-hua, Girgis A, Aravnthan V, et al. Wide area power system transient stability assessment using catastrophe theory method and synchrophasors[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, San Diego, CA, 2011: 1-7.
- [46] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的作用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 140-145.  
WANG Hui, SU Xiao-lin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 140-145.
- [47] Peng J C H, Nair N K C, Jian Z, et al. Detection of lightly damped inter-area power oscillations using extended complex Kalman filter[C] // TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference, Singapore, 2009: 1-5.
- [48] 吴超, 陆超, 韩英铎, 等. 基于广域测量类噪声信号的节点间振荡相位辨识[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(10): 29-32.  
WU Chao, LU Chao, HAN Ying-duo, et al. Identification of oscillation phase relationship among nodes based on wide area measured ambient signals[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Nature, 2010, 50(10): 29-32.
- [49] Hashiguchi T, Yoshimoto M, Mitani Y, et al. Oscillation mode analysis in power systems based on data acquired by distributed phasor measurement units[C] // Circuits and Systems, 2003. ISCAS'03. Proceedings of the 2003 International Symposium on, 2003: 367-370.
- [50] 赵书强, 张一, 马燕峰. 基于数据驱动随机子空间方法在低频振荡辨识中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 81-86.  
ZHAO Shu-qiang, ZHANG Yi, MA Yan-feng. Data-driven based stochastic subspace identification for low frequency oscillation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 81-86.
- [51] Kamwa I, Beland J, Trudel G, et al. Wide-area monitoring and control at hydro-quebec: past, present and future[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Que, 2006: 12.
- [52] 李鹏, 贺静波, 石景海, 等. 交直流并联大电网广域阻

- 尼控制技术理论与实践[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 13-17.
- LI Peng, HE Jing-bo, SHI Jing-hai, et al. The theory and practice of wide-area damping control for bulk HVAC/HVDC hybrid power systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 13-17.
- [53] 李鹏, 吴小辰, 李立涅, 等. 南方电网广域阻尼控制系统及其运行分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 52-56.
- LI Peng, WU Xiao-chen, LI Li-cheng, et al. Wide-area damping control system in China Southern Power Grid and its operation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 52-56.
- [54] Chaudhuri B, Ray S, Majumder R. Robust low-order controller design for multi-modal power oscillation damping using flexible AC transmission systems devices[J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2009, 3(5): 448-459.
- [55] Liu F, Yokoyama R, Zhou Y C, et al. TCSC wide-area damping controller to enhance the damping of inter-area oscillation for power systems with considering the time delay of wide-area signals[C] // Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on, Hangzhou, China, 2010: 1-6.
- [56] 常勇, 徐政. SVC 广域辅助控制阻尼区域间低频振荡[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 40-46.
- CHANG Yong, XU Zheng. SVC supplementary controller based on wide area signals to enhance damping of inter-area oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 40-46.
- [57] Zarghami M, Crow M L. Optimal placement and signal selection for wide-area controlled UPFCs for damping power system oscillations[C] // Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES, Seattle, WA, 2009: 1-6.
- [58] 王增平, 林富洪. 基于同步相量测量的 N 端输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 154-160.
- WANG Zeng-ping, LIN Fu-hong. A new fault location algorithm for N-terminal transmission lines based on synchronized phasor measurement[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 154-160.
- [59] Shiroei M, Daniar S, Akhbari M. A new algorithm for fault location on transmission lines[C] // Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, Calgary, AB, 2009: 1-5.
- [60] 马静, 李金龙, 李金辉, 等. 基于故障模型的广域故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 74-78.
- MA Jing, LI Jin-long, LI Jin-hui, et al. A novel wide-area fault location algorithm based on fault model[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 74-78.
- [61] Sidhu T S, Baltazar D S, Palomino R M, et al. A new approach for calculating zone-2 setting of distance relays and its use in an adaptive protection system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 70-77.
- [62] DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun. Reliability evaluation of the communication network in wide-area protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2523-2530.
- [63] Eissa M M, Masoud M E, Elanwar M M M. A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 270-278.
- [64] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 广域保护多 Agent 系统动态协作机制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 36-40.
- LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Dynamic cooperation mechanism of wide area protection system based on multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 36-40.

收稿日期: 2013-05-23; 修回日期: 2013-09-16

作者简介:

程云峰(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为基于 WAMS 的电力系统状态估计; E-mail: chengyf1988@gmail.com

张欣然(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统网络化控制;

陆超(1977-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与稳定控制。