

电力系统在线安全稳定计算分析技术综述与展望

韩英铎, 陆超*, 宋文超, 吴沛萱, 方浩男, 刘维承

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Review and Prospects of Online Calculation and Analysis Techniques for Power System Security and Stability

HAN Yingduo, LU Chao*, SONG Wenchao, WU Peixuan, FANG Haonan, LIU Weicheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Online security and stability calculation and analysis technologies provide crucial support for the accurate perception of real-time grid operation status and correct decision-making for the power dispatching sector. With the increasingly complex and stochastic dynamic characteristics of new power systems, traditional online security and stability analysis systems based on steady-state and asynchronous measurement data have shown deficiencies in real-time and accuracy. In contrast, the new generation of online security and stability analysis technology based on dynamic and synchronous phasor measurement data has attracted attention from research and engineering communities both domestically and internationally. In this context, this paper reviews the key technologies and bottlenecks involved in the existing online security and stability calculation and analysis systems, focusing on real-time state perception, dynamic parameter identification, and online stability assessment as core components. Furthermore, the overall framework and possible future research directions for the next generation of online security and stability computation and analysis systems are proposed, with the aim of providing reliable technical support for the safe and stable operation of new power systems.

KEY WORDS: stability and safety calculation; real-time state awareness; dynamic parameter identification; online stability assessment

摘要: 在线安全稳定计算分析技术是电力调度部门准确感知电网实时运行状态并做出正确评估决策的重要支撑。随着新型电力系统动态特性愈发复杂与随机, 以稳态、非同步量测数据为基础的传统在线安全稳定分析体系逐渐表现出实时性和准确性上的不足, 而以动态、同步相量量测数据为基础的新一代在线安全稳定分析技术愈发受到国内外相关科研

及工程领域的关注。基于此, 该文就实时状态感知、动态参数辨识和在线稳定评估 3 个核心组成部分对现有在线安全稳定计算分析体系所涉及的关键技术及瓶颈难题进行综述, 并进一步提出新一代在线安全稳定计算分析技术的总体框架和未来研究方向, 以为新型电力系统安全稳定运行提供可靠技术保障。

关键词: 安全稳定计算; 实时状态感知; 动态参数辨识; 在线稳定评估

0 引言

在“碳达峰”和“碳中和”的国家战略目标引领下, 新能源高比例接入、大规模交直流联网及电能大规模远距离传输是未来电力系统的重要发展趋势^[1-2]。上述趋势会使电力系统动态特性变得更加复杂和随机, 给电网安全稳定运行带来新的挑战。

电网安全稳定运行依赖于调度自动化系统。如图 1 所示^[3], 现有调度自动化系统以数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)和远程测量单元(remote terminal unit, RTU)作为其获取电网数据和信息的来源, 通过实时状态感知得到整个系统的状态和潮流, 并以此结果为基础辨识模型动态参数, 然后综合潮流数据和动态参数实现在线安全预警与预防控制。

近年来国外的大停电事件表明^[4-5], 现有调度自动化系统中, 在线安全稳定计算分析模块在应对复杂和随机的电力系统动态特性时具有局限性, 导致调度员对电网运行状态缺乏及时准确的掌握和研判^[6]。具体来讲, 目前基于远程终端单元(remote terminal unit, RTU)稳态、非同步量测数据建立起来的在线安全稳定计算分析体系的准确性和实时性存在不足。在准确性方面, 在线潮流数据和动态

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2066601)。

Project Supported by National Science Foundation of China (U2066601).

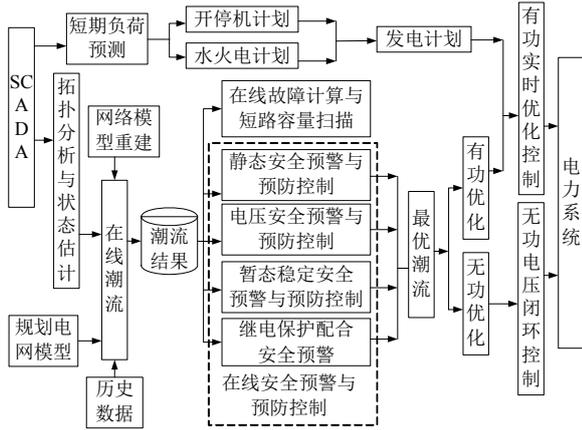


图1 调度自动化系统示意图

Fig.1 The diagram of dispatch automation system

模型参数存在偏差^[7-8]；在实时性方面，从数据采集、分析到评估所需要的时间尺度在分钟级，难以满足新型电力系统在线运行的实时性要求^[9]。因此，亟需研究实时性和准确性更高的在线安全稳定计算分析系统。

随着相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)和广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)的大力发展，同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)数据为调度自动化系统的发展和创新的提供了新的契机^[10-12]。PMU量测数据因其高精度、高分辨量测和良好的同步性而备受业界青睐，通过广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)实时采集的系统内各节点PMU数据充分反应全网的广域动态响应特性，为系统在线安全稳定监测、评估与控制提供了海量信息源。但是，在目前已有的调度自动化系统应用PMU量测数据的工程案例中，PMU数据主要用于系统振荡的实时监视与阻尼控制^[13-15]，在线安全稳定计算分析方面的应用还比较少。图2给出了电力系统在线安全稳定分析的关键技术，包括实时状态感知、动态参数辨识、在线稳定计算与评估。针对这3部

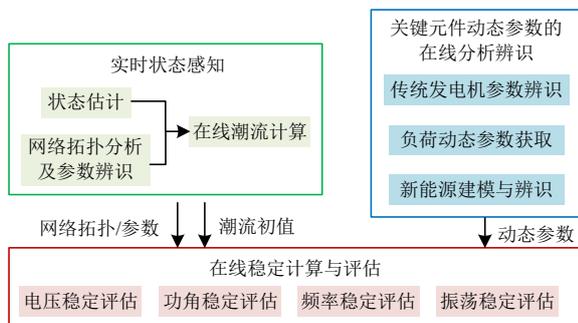


图2 电力系统在线安全稳定分析的关键技术

Fig.2 The key techniques of online analysis for power system safety and stability

分内容，学术和工业界开展了一定的应用示范。

针对实时状态感知，美国、瑞士等国家面向小规模电网已经开展了一些基于PMU状态估计的工程^[16-18]；在中国，南方电网公司在海南电网实现基于PMU的状态估计，但是其估计时间断面间隔达秒级，没有发挥PMU数据的特点和优势^[19]。2018年，清华大学在南方电网500kV输电网中实现全PMU线性状态估计，计算周期达10ms级；2024年，在上海电网500和200kV输电网中实现全PMU状态感知，计算周期达10ms级^[20]。

针对动态参数辨识，以PMU为基础的测辨法在国内外均有工程案例。南方电网基于PMU等平台提供的录波数据，以广东电网、云南电网等为分析对象，开发了相应的动态负荷离散参数辨识算法^[21-22]；基于PMU量测数据的系统动态特性建模在澳大利亚电网^[23]和中国台湾省电网^[24]也有相应实现；清华大学基于类噪声数据和扰动数据开发的负荷参数辨识算法已嵌入负荷辨识装置并投入生产，在东北电网、北京电网、南方电网等落地应用^[25-26]。

针对在线稳定评估，河南电网开发了基于WAMS的电压稳定在线评估系统^[27]；华东电网为了满足复杂大电网的安全、优质、经济运行的要求，基于PMU数据尝试开发并运行了广域监视分析保护系统^[28]，为后续实现全PMU数据的在线安全稳定分析计算提供借鉴意义。

综上所述，PMU数据在现有调度自动化系统中的应用较为缺乏，基于PMU数据的在线安全稳定计算分析的工程实践尚处于起步阶段。但是，相较于RTU数据，PMU数据具有独特的优势，以PMU数据为基础的在线安全稳定计算新方法、新系统将会成为进一步提高电网运行分析和稳定决策准确性与实时性的重要手段。

扎实充分的研究工作是在实际电网中推广应用的前提，因此本文将重点针对在线安全稳定计算和评估中3部分基础功能的研究进展进行综述和分析，即实时状态感知、动态模型参数辨识以及在线稳定评估的现有研究路径及关键问题，分别在1—3节进行阐述。在上述工作的基础上，4节提出在线安全稳定计算分析的新架构，并讨论适应新型电力系统的发展方向。

1 实时状态感知

状态感知实现电网状态和潮流的实时准确获

取，是调度自动化系统的重要功能。准确的状态和潮流由准确的量测数据、正确的网络拓扑关系和准确的网络参数共同确定。但在实际工程中，量测数据存在由量测装置造成的量测误差，网络拓扑关系可能存在由遥信数据上送不及时造成的错误，线路参数存在由于气候变化等因素造成的误差，从而使得状态感知结果准确性降低。

因此，为得到收敛、平衡且准确的系统潮流分布，需要通过状态估计减小量测误差，并得到准确量测数据，通过网络拓扑分析和网络参数辨识得到准确模型参数，最终通过在线潮流计算得到系统潮流分布。以下对状态估计、网络拓扑分析及参数辨识、在线潮流计算等 3 个基本环节分别展开综述。

1.1 状态估计

状态估计是基于量测数据和网络参数来估计电力系统状态量的计算过程。根据状态估计使用的量测数据，可以将状态估计分为静态状态估计和动态状态估计两大类^[29]。

静态状态估计是以系统中某一个时刻断面的量测数据为基础，估计系统在该时刻断面的状态^[30-32]，这类方法以加权最小二乘(weighted least square, WLS)方法为代表，也是工业应用的主流算法。加权最小二乘法是一种基于最大似然估计的方法，概念清楚、模型简单、易于编程实现，但是计算量较大，尤其模型为非线性时需要迭代计算。

动态状态估计以系统中多个时间断面的量测数据为基础，预测系统在下一个时刻断面的状态，并和下一时刻断面测量值结合估计电网的状态^[33]。目前动态状态估计方法大部分是基于卡尔曼滤波法的基本思想实现的^[34-36]，其基本原理是利用当前时刻之前的所有量测矢量得到当前时刻状态变量的估计值，并通过系统状态转移方程得到下一时刻状态变量的预测值；最后利用下一时刻的量测矢量对状态变量的预测值进行修正。

随着 PMU 的广泛应用，电压和电流相角也可以被实时测量，并应用于状态估计^[37-40]。针对电力系统的某条支路，图 3 给出基本的 PMU 线性量测模型，由此引出 PMU 线性状态估计的基本概念，其具有非常高效的计算速度^[37]。文献[38]同样研究了完全基于 PMU 的状态估计，采用线性加权最小二乘法，其主要重点放在对 PMU 测量和伪量测的不确定性。文献[39]将状态估计从正序扩展到三相，提出三相状态估计，但是基本的线性测量方程和计

算方法并没有改变。

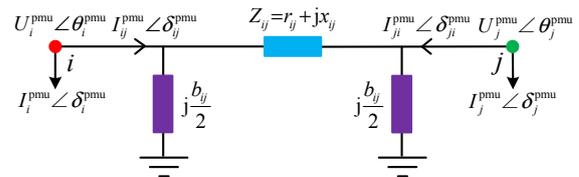


图 3 基于 PMU 的支路线性量测模型

Fig. 3 The linear measurement model based on PMU

由于早期 PMU 终端的成本较高，导致 PMU 的布点相对有限，而在电网中又存在大量的传统测量终端，因此基于 PMU 和 SCADA 的混合状态估计也曾经被广泛的研究^[41-45]。文献[43]将 PMU 电压相量测量引入传统状态估计，引入母线电压的相角测量值和幅值测量值可减小相关母线的状态估计误差的方差。文献[44]将 PMU 状态测量的电压值转化为支路电流值，加入到状态估计算法中，提出 3 种支路变化的方法。文献[45]提出应用 PMU 电流相量量测的状态估计方法，通过量测变换可以将电流值转换为功率或者电压测量，再进行状态估计，可以一定程度上提高状态估计精度。

上述的相关方法大多是只使用部分时刻的 WAMS 数据来进行混合状态估计，没有充分利用 PMU 量测数据，文献[46-48]探索了采用更多或者全部 PMU 数据与传统状态估计进行结合的方法。文献[46]利用 PMU 相量数据和电气定律产生与 PMU 节点相邻节点的虚拟量测，再利用传统的状态估计和数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)数据进行状态估计。但是其产生的虚拟量测的精度是有待商榷的。文献[47]提出多种利用 PMU 电流相量量测，分别是极坐标、直角坐标下将电流量转换为虚拟电压量测的方法，利用传统状态估计方法进行估计。

PMU 测量的测量频率更高，数据断面间隔更小，因此比 SCADA 数据更适用于动态状态估计，目前主流的 PMU 动态状态估计研究也是以卡尔曼滤波思想为主。文献[49]利用潮流预测方法，将 SCADA 数据密度提高到动态水平，将 PMU 数据转换成 SCADA 数据，进行传统状态估计。文献[50]提出基于电压灵敏度的状态估计方法，在部分节点配备 PMU 的情况下，以 SCADA 数据为初始值，利用电气联系即电压灵敏度来估计没有装配 PMU 节点的状态，有一定的估计精度。文献[51]将 PMU 数据运用到状态估计中，对电力系统进行实时状态估计和监控，对电力系统采用的还是传统卡尔曼滤

波方法。

1.2 网络拓扑分析及参数辨识

正确的网络拓扑和模型参数是准确获取电网状态的前提，也是电力系统其他检测分析、评估控制等应用的基础，它能够为用户提供状态估计、在线潮流、安全分析等提供网络结构和参数。在电网实际运行中，通常假设网络参数及拓扑确定且已知，但是在新型电力系统中，网络拓扑及参数频繁变化，因此对网络拓扑分析和参数辨识的可靠性和实时性提出了更高的要求^[52]。

1.2.1 网络拓扑分析

电力系统网络拓扑分析是根据电网中开关设备的运行状态，得到电力系统的节点支路模型，其数学实质上可以等价求解图的连通性问题。拓扑分析方法主要有搜索法^[53-54]和矩阵法^[55-56]。搜索法根据遍历搜索顺序的不同，可以分为深度优先搜索和广度优先搜索。深度优先法实现起来较为方便，但需要重复搜索支路，导致搜索效率低；广度优先法按层搜索，搜索过程对每个节点只进行一次，但对复杂结线方式和环网的适应能力较差。矩阵法是用关联矩阵表征节点和支路的连接关系，基于矩阵乘法运算进行网络拓扑的分析。矩阵分析法数据架构简单，具有直观的物理意义，适用于任何复杂的结线方式，但随着电力系统规模数的增大其计算量成指数增加，计算效率较低，不适用于大型网络。

经过多年研究，基于遥信数据的拓扑分析方法较为成熟，一定程度上能够满足目前基于 SCADA 相关应用的需求，其基本流程如图 4 所示^[57]。此类方法仍存在以下问题：1) 拓扑分析数据源单一，只利用遥信量测的开关状态，但 SCADA 遥信数据不同步且实时性差，并且全拓扑分析的计算比较耗时，导致目前网络拓扑分析的刷新时间间隔达到了分钟级别，时效性不足；2) 缺乏对拓扑错误有效

辨识并处理的方法，遥信错误将造成网络拓扑错误，在错误拓扑上进行的各种分析应用是不可靠的，因此辨识拓扑错误尤为关键，基于数据驱动辨识和分析拓扑错误的研究较为广泛^[58-60]。

1.2.2 网络参数辨识

网络参数通常是指变压器分接头位置、输电线路和变压器参数等体现在量测方程中的模型参数。获取线路或者变压器参数主要依靠实测法，通常在设备建成或者停电检测时测量获取，而线路参数却会随着运行状态的改变和时间的推移发生改变。因此线路参数存在较多不准确情况，而且随着柔性交流输电系统的发展，线路无功补偿设备在量测方程中通常被等效为参数，使得线路参数的不确定性大大增加。目前处理线路、变压器参数错误的方法主要有增广状态估计方法、基于残差分析和残差灵敏度的方法、基于多个断面数据的参数估计方法等。

增广状态估计方法^[61-63]将可能错误的模型参数作为系统状态变量的一部分进行估计求解，因此这类方法需要先利用其他方法辨识出可能错误的参数，之后在量测方程中将可疑参数松弛为状态变量。增广状态估计方法由于量测对参数的求导分量容易造成雅可比矩阵的条件数大增，使增益矩阵在某些运行工况出现奇异，因此可能会引起严重的数值问题，同时状态变量的增加和耦合使得计算效率也显著下降。

基于状态估计后的残差分析，尤其是残差灵敏度分析是有效发现电力系统中不良参数的方法。其基本原理是获得参数偏差与残差值的灵敏度关系，进而可根据残差值大小来辨识存在错误的模型参数，更典型的应用方法是两步估计法^[64-65]，可利用更多量测冗余进一步提高参数估计的准确性。另一种类似残差的指标——拉格朗日乘子也被广泛应用到不良参数辨识中。文献[66]最早将拉格朗日乘子应用于拓扑错误的辨识，文献[67-69]首次将拉格朗日乘子应用于检测线路的不良参数，并且从理论上证明了拉格朗日乘子和残差方法辨识不良参数和不良数据的可区分性。拉格朗日乘子方法虽然原理简单且便于计算，但是其存在着辨识能力不足的问题。系列研究提出了通过 PMU 测量值辅助传统 SCADA 测量来提升拉格朗日乘子方法的辨识能力的方法^[70-73]，文献[74-75]进一步研究了使用多个测量断面的数据来提高辨识能力。文献[76]在包含 FACTS 和高压直流的状态估计中使用拉格朗日乘

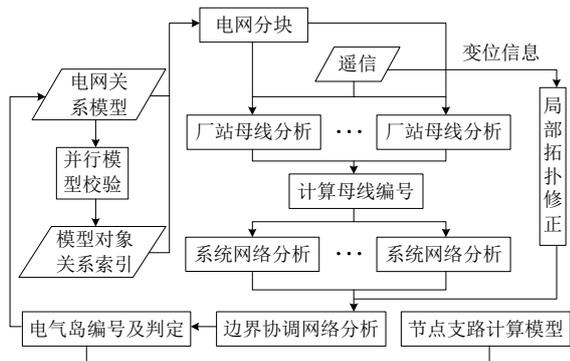


图 4 网络拓扑分析流程图

Fig. 4 The flow chart of power grid topology analysis

子方法来辨识不良参数。

增广状态估计方法和基于残差灵敏度的方法都依赖于状态估计，可能存在着互相影响干扰的问题。而基于多个断面数据的参数估计方法是通过测量值直接估计参数值，这种方法通常假设输电线路参数、变压器参数等在测量数据所在的时间段内保持不变^[77-81]。此类方法不依赖于状态估计，可单独依靠测量值完成参数辨识，而 PMU 数据高密度的特点使得此类方法有更好应用前景。大部分方法都是通过多时段数据建立量测模型，通过最小二乘类方法^[77-78]，或者均值估计等统计方法^[79-81]求解参数。除此之外，为了克服参数估计中数值稳定问题，一些启发式的智能算法也被应用到参数估计中如粒子群优化算法^[82]、遗传算法^[83]和量子进化算法^[84]等。智能算法虽然能克服传统方法数值不稳定的问题，但是由于启发性算法本身的特点，存在计算结果多变不唯一、求解速度较慢等问题。

1.3 在线潮流计算

基于误差减小的量测数据、准确的网络拓扑和参数模型，在线潮流计算通过求解潮流方程组给出平衡的全网潮流分布。

传统在线潮流计算是将电力系统所有节点划分为 PQ、PV 和 Vθ 节点，依据节点类型构建非线性潮流方程组，并采用适当的迭代算法求解此非线性方程组。最常用的潮流非线性方程组迭代求解算法为牛顿-拉夫逊法^[85]，其迭代思路如图 5(a)所示。牛顿-拉夫逊法的迭代初值选取对计算准确性影响较大，因此文献[86]提出初值是否能够使得牛顿-拉夫逊法收敛的判断准则。在牛顿-拉夫逊法基础上，文献[87]提出牛顿-拉夫逊预测校正法，如图 5(b)所示，改进了雅克比矩阵计算方式和迭代思路。

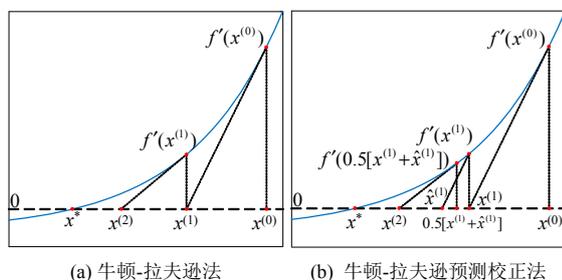


图 5 典型的非线性方程组求解算法迭代思路

Fig. 5 Iterations for typical algorithms for solving nonlinear equations

文献[88]采用四阶龙格库塔法来求解潮流非线性方程组，在此基础上，文献[89]将其与拟牛顿法

相结合，形成四阶龙格库塔-拟牛顿法求解潮流非线性方程组。列文伯格-马夸特法在求解最优值方面具有牛顿法和梯度法的优点，因此文献[90]采用高阶列文伯格-马夸特法实现潮流方程组的快速求解；文献[91]将牛顿-拉夫逊法与列文伯格-马夸特法相结合，改进了牛顿-拉夫逊法的收敛性能。

此外，文献[92]对比了算法领域中 4 种具有三次收敛特性^[93-96]的非线性方程组求解算法，但其并没有被应用于电力系统潮流计算。文献[97]通过仿真对比了常用的非线性方程组求解算法在系统不同运行状态下的收敛性。对于上万节点的电力系统，在正常运行条件下，潮流非线性方程组的求解耗时在 2 s 以上；而在系统发生暂态突变、新能源出力大幅变化、病态潮流^[98]等情况下，大量算法出现无法收敛情况。

这些迭代算法带来的潮流误差取决于算法收敛判据，与具体的迭代算法无关。当迭代算法的收敛性难以保证时，潮流准确性较低且求解潮流结果花费时间较长。因此，现有研究考虑近似的直流潮流模型用于兼顾计算准确性的同时提高计算实时性，其误差将与直流潮流模型直接相关。

标准直流潮流模型^[99]忽略支路电阻与电纳，将节点电压幅值近似为基准值，求解节点电压相角，进而再得到支路功率等物理量。因此标准直流潮流模型的求解变量为各节点电压相角，从而使得方程与待求解变量之间的关系是线性关系。但是，这样的近似处理较为粗糙，只有在系统稳态运行且输电线路电抗远大于电阻的情况下，潮流结果才较为准确。因此相关研究对标准直流潮流模型进行了优化，将电压幅值以不同形式纳入潮流求解变量中，形成平方线性和对数线性的直流潮流模型^[100-103]。

面向电力系统的不同特征，这些改进模型各有优势。文献[104]提出一种线路解耦等值线性化模型；更重要的是，其对比了交流模型、标准直流模型、直流改进模型^[105]、无功修正类线性化模型^[106]、网损等值负荷模型^[107-108]、拟直线性化模型^[100-103]等常见直流潮流模型，直观地描述了潮流计算结果的准确性。进一步地，文献[109-110]提出潮流方程中最优潮流求解变量的选取方法，讨论了潮流求解变量的函数形式与潮流计算误差之间的关系，针对实际电力系统不同的性能要求，指导选择最优的直流潮流模型。

以上所有直流潮流模型均是准确非线性潮流

模型的近似, 这些近似处理本质上是用潮流准确性换取潮流实时性, 现有直流潮流模型构建方法难以做到在兼顾准确性的同时提高实时性。

2 关键元件动态参数的在线分析辨识

在潮流计算基础上, 开展电力系统仿真与在线安全稳定分析, 准确的动态元件模型和参数非常关键, 众多学者很早就意识到电力系统元件建模的重要性, 并对动态元件建模开展了大量研究, 20世纪90年代后, IEEE组织专门的委员会, 对电力系统同步发电机、负荷、励磁系统等各种元件的模型和获得方法进行归纳总结^[111-112]。中国在1990年的全国电网会议统计报告中, 也将电力系统元件建模列举为亟需解决的课题之一。

由于电力系统的动态元件特性会受到运行状态等因素的影响^[113], 在线建模一直是电力系统动态元件建模的研究探索方向之一, 而SCADA系统、PMU/WAMS系统、高级计量架构(advanced metering infrastructure, AMI)智能电表等智能量测终端在电力系统中愈发广泛的部署, 为电力系统提供了更加多元的数据, 为元件在线建模的发展提供了新的机遇与可能性。因此, 本部分讨论电力系统中经典元件发电机和负荷在线分析辨识技术的研究现状, 同时针对新能源广泛接入带来的动态元件建模新挑战, 概述新能源元件建模和分析辨识技术的研究进展, 如图6所示。

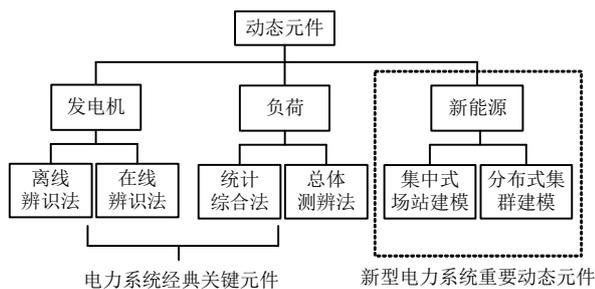


图6 电力系统关键元件和建模方法

Fig. 6 Key components of power system and its modeling method

2.1 传统发电机参数辨识

发电机是电力系统的主要有功源和无功源, 是电力系统中最为重要的动态元件, 因此, 同步发电机的建模准确性对电力系统的分析至关重要。发电机参数辨识方法根据同步发电机所处状态的不同则可以分为离线辨识法和在线辨识法。

离线辨识法是指在同步发电机出厂或并网前, 通过严格规范的试验测试获得同步发电机的参数,

而根据试验类型离线辨识法又进一步可以分为短路试验、抛载试验和静态频域试验^[114]。离线辨识法方法成熟, 流程规范, 是目前主要获得同步发电机暂态参数的方法。但是离线试验条件和同步发电机真实运行状态有一定的差异, 无法模拟真实运行时存在的涡流、饱和等因素的影响, 因此得到的暂态参数依然有一定的局限性。

在线辨识法是指同步发电机处于并网运行状态时基于扰动信息辨识同步发电机参数, 因为考虑了真实的涡流和饱和等因素, 因此建模结果会更接近真实同步发电机。

根据在线辨识的扰动来源, 同步发电机在线辨识方法可以分为人为施加扰动法或者捕捉系统自然扰动法。人为施加扰动法主要通过调整发电机控制系统来产生动态响应进行辨识, 其中文献^[115]通过给自动电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)的参考信号注入伪随机二进制序列产生扰动实现同步发电机参数的在线估计。文献^[116]分别给励磁参考电压注入阶跃信号和白噪声信号, 对比两种激励信号下同步发电机参数的辨识精度。此外, 通过给电力系统稳定器施加扰动也是产生能用于发电机参数估计的响应的可行手段^[117]。人为施加扰动法工程实现简单, 但是, 实验仍需要额外成本, 且产生的扰动数据量较少。基于系统自然扰动的同步机参数辨识则是利用电力系统运行方式改变或短路断路等故障产生的响应来进行辨识, 这些扰动信息能通过PMU自动采集, 辨识过程简单且成本更低。文献^[118]提到利用功角值获得同步发电机 dq 轴电气信息, 从而实现发电机参数的解耦辨识。文献^[119]介绍了利用PMU校准同步发电机参数的方法, 讨论了数据预处理、辨识参数筛选、辨识和校验的相关流程, 并基于实际数据进行验证。同步机在线辨识提高了运行状态下同步发电机模型的可信度, 对提高仿真结果的可靠性, 保障系统安全稳定运行具有重要意义。

2.2 负荷动态参数获取

电力负荷特性非常复杂, 具有非线性、分布性和时变等特点。而瑞典电压崩溃、北美大停电和阿根廷电压崩溃等一系列事故的调查又说明电力负荷模型对系统安全稳定分析有着至关重要的作用, 因此负荷建模一直是电力系统元件建模中的关键问题和公认难题。根据负荷建模的技术理念不同可以分为自下而上的统计综合法和自上而下的总

体测办法^[120]。

统计综合法是一种自下而上的建模方法，通过走访调查等方式获得用户负荷构成，并基于典型负荷的模型结构和参数，从低压节点逐层向上聚合最终得到高压负荷节点对应的负荷模型。2012 年 WECC 采用统计综合法得到 12 个气候区、4 种馈线类型在 5 个典型日下 24h 的统计负荷模型参数^[121]。传统统计综合法不依赖量测，得到的负荷模型具有清晰的物理含义。但是另一方面，传统统计综合法需要人工统计大量底层负荷数据，人力物力成本高且难以保证调研范围覆盖的完整性，更重要的是，调研结果反映的是某段时间的负荷构成情况，难以解决负荷的时变性难题。而 PMU、AMI 等智能量测设备的发展和普及，为克服上述统计综合法缺陷，实现在线统计综合提供了新的可能。统计综合法的关键是确定负荷的构成情况。而智能量测设备能提供海量的实时负荷运行数据，这些数据中包含大量的用户用电特征信息，因此，基于量测数据，根据不同类型负荷用户的用电特征差异，可以分析估计负荷变电站下的实时负荷构成情况，进而可以通过统计综合在线更新负荷模型，追踪负荷时变性，如图 7 所示。

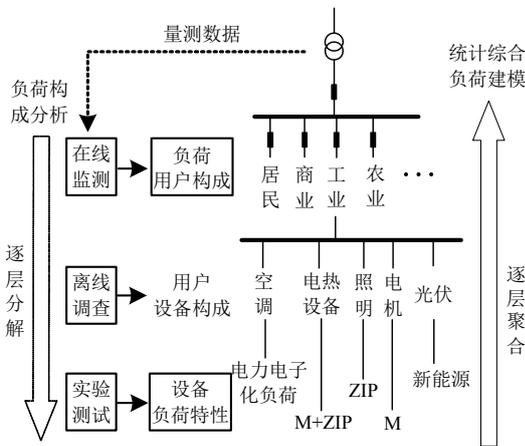


图 7 在线统计综合法基本思路

Fig. 7 Principle of online component-based load modeling

离线统计综合法的基本单元是元件，但由于量测设备密度和颗粒度的限制，基本不可能对所有负荷元件都进行在线监测，因此在线统计综合法分解的基本单元通常为典型用户或典型行业。文献[122]初步探究了利用营销数据和 EMS 数据进行在线统计综合的方法，将用户分解为工业和非工业两类，结合调查得到的两类用户不同日的综合负荷模型，通过综合加权和线路折算得到 110kV 侧负荷建模结果。文献[123]以行业为分解单元，收集用户的日

负荷曲线，基于聚类获得典型行业负荷曲线，进而解析负荷变电站实时行业构成，综合加权得到变电站综合负荷模型。在线统计综合法改善了对负荷时变性的追踪问题，但其基本负荷模型参数还是依赖于离线获取，和在线运行负荷间可能存在差异。

总体测辨法则是一种自上而下的辨识方法，它将节点下的所有负荷看作整体，根据特定负荷模型结构，利用量测装置记录的动态数据获得模型参数^[124]。辨识基本思路如图 8 所示。

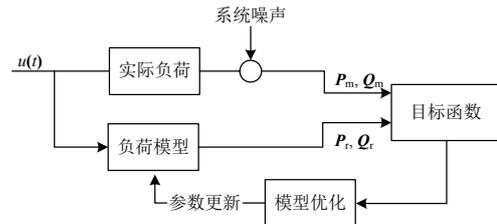


图 8 总体测辨法基本思路

Fig. 8 Principle of measurement-based load modeling

总体测辨法无需繁琐的统计工作，基于变电站量测数据就能够在线捕捉负荷真实的运行特性，为跟踪负荷时变性提供了行之有效的手段。目前，国内外基于总体测辨法已开展了大量负荷建模的研究和实践。文献[125]采用改进综合负荷模型，通过多曲线拟合的方式实现对负荷点的建模。文献[126]则基于 2 次东北大扰动实验，利用安装在电网关键节点的广域量测系统装置记录的扰动数据，验证了基于综合负荷模型的实测建模方法的有效性。经典的综合负荷模型(classical load model, CLM)为三阶感应电动机和静态负荷的组成，没有考虑配电系统阻抗的影响，因此文献[127]提出一种考虑配电网络的综合负荷模型(synthesis load model, SLM)模型，它在 CLM 模型和负荷并网点间串联了等值阻抗模拟配电网络的影响，并加入配网无功补偿系统，该模型能较为完整的模拟配电系统阻抗和无功补偿的影响，更加符合实际电力系统负荷结构。文献[128]则利用某电网的实际负荷测量数据辨识了对应的 SLM 负荷模型参数。SLM 模型也是目前国内实际电网中使用最广泛的负荷模型。近几年，负荷侧新能源的接入规模不断扩大，使得负荷侧特性更加复杂。对于含新型负荷元件的电力负荷建模问题，目前主要研究采用在传统负荷模型结构基础上并联新型负荷元件模型，主要创新在模型结构创新。其中负荷中的风光新能源动态结构常基于新能源场站模型或并网逆变器控制模型，相关研究在 2.3 节新能源建模和辨识中进行了详细介绍。此外，考虑

开断特性的非线性电力电子化负荷、单相电动机等新型负荷元件模型也在研究中被考虑,例如文献[129]研究了一种基于强化学习的方法辨识考虑单相电动机、电力电子负荷的 WECC 综合负荷模型,并在仿真中进行了验证。而随着 SCADA/EMS、PMU/WAMS 等量测系统的发展,电力系统能提供海量多源数据,使总体测辨法拥有了更广泛的应用空间,在美国^[130]、加拿大^[131]、澳大利亚^[132]、中国台湾省^[133]、中国东北^[126]、中国西北^[134]等地都陆续开展了基于实测数据的负荷建模验证。

一般总体测辨法是基于大扰动开展,因为大扰动能够充分激发电力负荷特性,有利于负荷参数辨识。但是大扰动依赖于电力系统中出现的故障、拓扑改变等突发事件,不能完全实现实时辨识。而一种基于类噪声的负荷辨识方法为实现实时辨识,克服负荷时变性提供了新的解决思路。类噪声是指电力系统在正常运行状态下,由于负荷波动、电容投切、分接头变化等产生的小幅扰动,这些扰动富含丰富的动态信息,可以用于辨识。文献[135]研究并提出一种基于类噪声的负荷辨识方法和流程,并在仿真中进行了验证。文献[136-137]分别基于实测类噪声数据进行负荷建模的研究和验证。文献[138]指出类噪声负荷辨识机理上属于闭环辨识问题,和传统大扰动辨识存在性质差异,并提出一种预报误差法的辨识方法。目前,基于类噪声的负荷建模还处在初步研究阶段,机理性质和方法有效性仍需要深入研究和进一步验证。

2.3 新能源建模与辨识

近年来,新能源在电力系统中的渗透率不断上升,对电力系统安全稳定的影响越来越大。且新能源常通过电力电子设备接入,表现出明显不同于传统发电机和负荷的复杂动态特性。因此,需要建立准确有效的新能源模型,以描述其动态对电力系统的影响。根据新能源的接入方式,可以分为集中式和分布式两类,如图9所示。

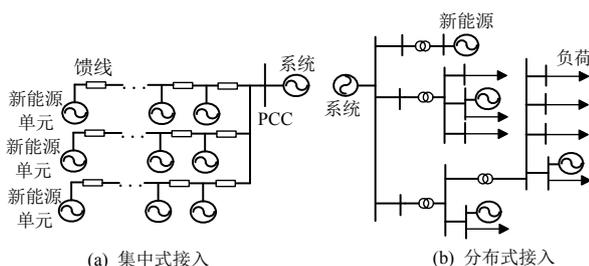


图9 新能源接入方式

Fig. 9 Integration method of renewable energy

集中式场站指在某一地区中集中配置新能源发电设备、大规模统一并网的新能源场站。模型结构是元件建模的基础问题,对于集中式新能源场站建模,最直接的思路是建立新能源各环节的机理模型,综合连接形成并网单元,文献[139-140]基于风力机、发电机和控制系统模型建立了双馈风机并网模型;而针对光伏、直驱风机等全部通过电力电子设备并网的新能源,文献[141-142]建立了一种以逆变器控制策略为基础的新能源并网模型。集中式新能源场站通常具备控制调节能力,因此有研究将建模侧重点放在考虑控制的场站聚合输出特性,WECC 采用模块化建模的思想,提出一种分为场站级控制、电气控制和简化变流器模型 3 部分的新能源场站模型,以表征场站整体输出特性,实现对有功无功控制和故障穿越等场站级控制策略的模拟^[143]。对于以机理模型为基础的集中式新能源场站建模,最理想的是所有并网单元均建立详细模型,但是这种精细化建模计算代价太大,因此研究和应用中常采用等值的方式降低复杂性,目前常用的等值建模方法包括单机倍乘法和多机等值^[144]。单机倍乘法将所有新能源单元视作完全一致,操作简单但误差相对较大;多机等值则是基于聚类等方法将特性相似的新能源单元划分为群,同一群内的新能源单元进行等值,用几台特性有差异的新能源机组来模拟场站的总特性。

分布式新能源则是指在系统中分散式接入的装机容量较小的小型新能源发电系统集群,通常在负荷侧、低压侧、配网侧接入,就地消纳。分布式新能源由于规模较小,因此早期研究中常简化处理为负恒功率源^[145]。但是,随着近几年分布式新能源规模的迅速增长,对分布式新能源的建模也愈发受到重视。分布式新能源建模和集中式场站建模思路类似,一般以机理模型为基础,其中基于逆变器控制结构的电源模型就是一种在研究中广泛使用的分布式新能源模型^[146-147]。同时,WECC 也提出一种描述分布式新能源聚合特性的模型 DER_A,该模型主体结构和 WECC 场站模型的电气控制模块类似,同时增加了模拟分布式新能源故障部分脱网特性的模块^[148]。目前分布式新能源很少考虑附加控制,但随着分布式新能源规模的不断增加,对分布式新能源的标准也会更完善,2024 年发布的标准^[149]就对配电网侧接入的光伏发电系统提出了功率控制和故障穿越的新标准,未来随着标准的进一

步完善，对分布式新能源模型建模会更加统一而合理。

如今越来越多的集中式新能源场站和分布式新能源投入运行，在线运行的集中式新能源场站会因为元件老化、更换发生模型参数改变，分布式新能源也会因为集群各部分运行状态的改变导致集群特性改变，因此新能源模型参数的辨识和更新校验是非常重要的。对于集中式场站的参数获取，主要沿用传统负荷和发电机辨识的思路，通过优化方法对新能源场站动态响应拟合获得参数。文献[150]采用人为施加虚拟量测激励，并基于粒子群算法实现对逆变器的分步辨识。文献[151]则通过开展故障穿越实验测试，利用多元线性回归辨识场站级新能源机电模型的控制模式和参数。分布式新能源由于其常从负荷侧接入，因此常作为广义负荷模型的拓展部分进行参数辨识。文献[146-147]以基于逆变器控制结构的新能源模型作为负荷模型的拓展部分，以启发式算法辨识得到了模型参数。文献[152]则使用强化学习辨识了带 DER_A 模型的 WECC 负荷模型。因为新能源模型的动态响应可以通过人工实验或利用 PMU 等量测设备捕捉系统扰动得到，因此参数获取既可离线进行，也可在线进行。但相较于新能源装机规模的迅速增长，新能源在线建模和辨识研究的应用还是相对滞后，需要进一步研究和推进以描述实际中愈发重要的新能源动态。

3 在线稳定计算和评估

稳定评估是电力系统运行的重要保障，随着新型电力系统的发展，电力电子设备和可再生能源广泛接入，电力系统的动态行为和稳定机理正在发生深刻变化。由于各类电气设备的复杂动态和相互作用，新的失稳类型被引入，给传统的稳定分析方法带来挑战。此外，高度复杂和非线性的系统动态和高度多样化的运行方式也对电力系统实时高性能仿真和稳定分析提出了更高的要求。总体来讲，在线的安全稳定分析与评估可以分为两大类，分别是基于机理和模型/仿真的方法，及数据驱动或人工智能类的方法。

3.1 基于机理和模型的稳定分析方法

3.1.1 面向在线应用的电力系统稳定分析技术

电力系统暂态稳定分析方法主要包括时域仿真法和直接法。时域仿真法利用数值积分方法，在

一定的时间长度上求解描述系统动态过程的微分代数方程组，从而判断系统是否稳定。直接法基于暂态能量函数和能量积分与不稳定平衡点概念^[153]及后续发展出的李雅普诺夫函数^[154-155]和势能界面法 (potential energy boundary surface, PEBS)^[156]。薛禹胜院士提出扩展等面积法则 (extended equal area criterion, EEAC)，随后扩展出其动态和紧急扩展方法 (dynamic extended equal area criterion, DEEAC 和 emergency extended equal area criterion, EEEAC)，显著提高了分析精度^[157-158]。近年来，针对含电力电子设备的新型电力系统的能量函数构建与分析，学术界进行了广泛研究。文献[159]研究了构造考虑结构保持模型的交直流系统能量函数。文献[160]提出一种交直流混联系统的向量能量函数法。文献[161]基于端口能量表示风机系统与光伏发电系统的暂态能量。然而，由于系统的复杂性，新型电力系统的能量函数分析仍然是重要挑战。

随着电力系统运行的复杂性指数级提升，电力系统在线稳定分析的重要性逐渐凸显。面向实际系统的电压稳定在线监测，基于戴维南等值和线路传输极限，在考虑动态负荷影响的基础上，研究者提出不少稳定性评估指标，并据此建立稳定性和稳定裕度的快速评估方法^[162-165]。对于振荡稳定性，可以采用信号分析方法进行如 Prony 算法、快速傅里叶变换进行在线振荡辨识^[161]，并与设定的失稳阈值进行比较。然而，由于现有量测装置的分辨能力限制，现有的动态稳定分析方法对宽频振荡的存在一定局限性。

基于 WAMS 的在线暂态稳定辨识方法是现代电力系统中一种重要的实时分析技术，常与直接法相结合。文献[166]利用实时量测数据计算暂态不稳定能量变化率，快速判断受扰严重的机组。文献[167]基于实时量测数据，对大电网进行动态等值处理，并使用穷举法求取紧急控制策略。文献[168-169]通过轨迹凹凸性和功角空间降维变换特征判断系统暂态稳定性。近年来，该方法往往与人工智能技术相结合，例如文献[170]提出基于矩阵谱分布特性的电力系统扰动在线识别框架，文献[171]利用深度学习模型进行暂态稳定性预警，文献[172]利用支持向量机 (support vector machine, SVM) 实现基于实时量测数据的暂态稳定性评估。考虑到仿真方法的准确性，也可采用实时仿真法进行在线稳定分析，通过

高性能仿真算法、高度模型简化以及结合广域量测数据实现超实时时域仿真,实时评估电力系统的稳定性并进行相应控制决策。文献[173]提出一种小仿真窗口的逐步仿真决策算法,文献[174]提出一种基于超实时暂态仿真的电力系统稳定分析和控制方法。然而,由于大电网的高复杂度,该方法目前仅满足在小规模系统的性能需求,大电网超实时仿真仍是需要解决的重要课题。

3.1.2 面向在线稳定性分析的仿真技术

由于高比例可再生能源的随机性,新型电力系统具有高度多样化的运行方式,传统的基于离线仿真的稳定分析方法难以实现运行方式的完全覆盖。通过在线超实时仿真技术,可基于当前运行方式进行稳定分析,提高稳定分析的准确性。这类方法的关键在于仿真计算的效率和超实时性能,电力系统仿真基于数值积分方法,经典的数值积分方法有前向欧拉法、后向欧拉法、梯形积分法、临界阻尼调整法等,这些方法在计算效率、精度和数值稳定性上各有优劣。为提高仿真计算效率,可以采用快速计算方法,主要包括稀疏技术和并行技术。稀疏技术,包括稀疏矩阵技术、节点编号算法及稀疏矢量法,利用电力系统的稀疏特性减少计算次数,显著提高计算效率。并行技术则通过空间并行算法和其他并行计算方法,使得可以采用大规模集群算力进行同时计算,从而实现计算加速。文献[175]采用组合稀疏矩阵技术,解决了电力系统输电线路中过电压数值模拟的计算效率问题。在其基础上,文献[176]结合块广义向后差分法和扩展的隐式梯形积分法,解决了非线性常微分初值问题中的维数灾问题。近年来,针对电力系统数值仿真基本算法和加速计算方法,文献[177-178]进一步通过矩阵分解提升了数值计算效率。

新型电力系统含有高比例电力电子设备,为兼顾仿真效率和精度,需要建设高性能电磁和机电暂态耦合仿真体系。首先,需要基于上述并行计算方法,建立电力系统高效并行计算框架。可利用 GPU 对并行计算和大规模矩阵计算的性能优势,采用基于 GPU 或 GPU-CPU 结合的硬件平台,利用各类并行方法实现计算加速。文献[179]将电磁暂态模型转化为矩阵指数模型,用并行矩阵指数算法进行仿真,实现了系统的并行化处理。文献[180]提出高阶泰勒级数与块对角加边(bordered block diagonal form, BBDF)算法结合的混合算法,优化了子系统

与联络系统之间的导纳矩阵三角因子分解递归利用率。文献[181]进一步发展了该算法,提出一种基于矩阵 Schur 补的双层域分解算法。其次,可以针对电力电子元件,建立适应大系统并行仿真的模型。文献[182]对电压源换流器(voltage source converter, VSC)和基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)建立了通用平均值模型。文献[183]利用时变傅里叶思想建立了动态向量模型。文献[184]从并行计算角度触发,建立了各桥臂同步计算的 MMC 模型。过往的研究初步建立了高性能电磁和机电暂态耦合仿真体系,然而仍处于起步状态,为满足实时稳定分析的要求,在相关算法和硬件性能等方面仍需进一步突破。

3.2 基于人工智能的稳定分析方法

由于新型电力系统高度复杂非线性,面临运行方式多样、机理建模困难等问题,给传统的机理方法带来困难。此外,电力系统量测装置的覆盖率提升提供了海量电力系统运行数据。人工智能在利用海量数据和处理非线性问题方面的优势为新型电力系统稳定分析问题提供了新的富有潜力的解决方案,电力系统稳定领域中人工智能分析方法的基本框架如图 10 所示,针对新型电力系统的功角、频率、电压和振荡稳定,学术界开展了广泛的研究。

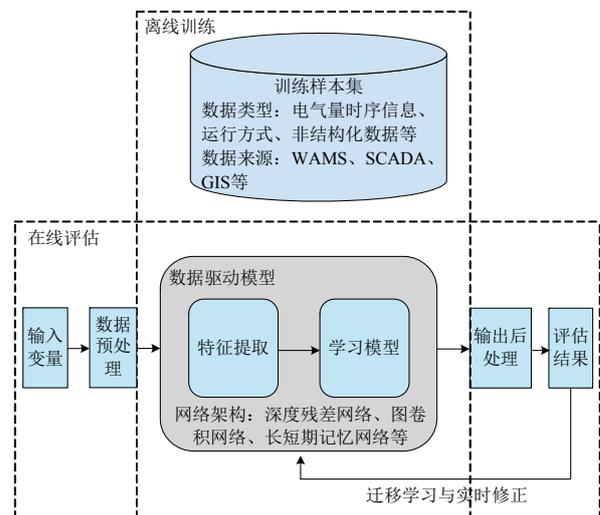


图 10 人工智能电力系统稳定分析方法的基本框架

Fig. 10 The basic framework of artificial intelligence methods for power system stability analysis

3.2.1 基于人工智能的功角稳定评估

在电力系统的功角稳定性分析中,人工智能技术特别是机器学习和深度学习,被用于从大量的系统数据中提取关键特征以预测稳定性。传统的人工智能技术如 SVM 等被广泛应用于分类和回归问

题,通过学习输入特征如系统参数和状态来分类系统稳定性^[185]。此外,深度学习技术如堆叠自编码器、深度信念网络以及卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)和递归神经网络(recursive neural network, RNN)可以分析电力系统的时间序列数据和动态行为,提高对系统稳定性边界的预测准确度^[186-187]。结合深度学习和强化学习的混合方法也表现出强大的潜力,如利用深度卷积网络提取的特征作为双重 Q 学习和竞争 Q 学习模型的输入,以优化控制策略和应对电网中的非线性挑战^[188]。这类智能评估方法往往具有较快的评估速度,在电力系统遭受扰动时可实现在线稳定评估。例如,递归神经网络特别适用于处理电力系统的动态数据,可以根据系统状态的历史和当前值预测未来的稳定性,从而在系统不稳定前采取措施^[189]。

3.2.2 基于人工智能的频率稳定评估

频率稳定问题表现出时空动态特征,相关研究结合具体问题,利用人工智能领域的相关技术和网络结构进行针对性分析。一些在计算机工业界得到广泛应用的网络结构,如长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)、CNN 和图卷积网络(graph convolutional network, GCN),已被应用于电力系统频率稳定性评估,这些方法能有效融合时空特征并处理高维非线性问题^[190-192]。频率稳定性的评估模型通常利用由量测系统提供的发电和负荷时序数据、系统各节点的电压幅值和相角等信息,以预测系统受扰后的动态特征并制定紧急控制措施^[193-195]。其关键输出指标包括最大频率偏差、频率变化率及受扰后的稳态频率偏差等,反映了系统的频率动态趋势,为实时监控和控制提供依据^[196-197]。

3.2.3 基于人工智能的电压稳定评估

近年来,人工智能方法在电压稳定性评估领域也得到了较为广泛的应用。其输入特征通常包括稳态特征如发电机出力、负荷水平、支路潮流及节点电压等^[198-201],及故障特征,包括故障位置、故障后的变化率和动态电气响应等^[202-203],通过神经网络模型进行稳定评估,给出稳定判断或裕度。结合问题形式和机理信息,模型可以实现高精度评估,例如,一些研究利用时序数据和电压无功灵敏度矩阵等特征来预测电网的稳定性^[204]。近期的研究通过设计适应于电力系统的神经网络模型和损失函数,如图时空网络结构和代价敏感的损失函数,进一步提升了评估的准确性和对失稳案例的判断

能力^[205-207]。

3.2.4 基于人工智能的宽频振荡稳定评估

由于包含高比例的新能源和电力电子设备,电力系统中的振荡模式愈发复杂,频率范围从传统的低频振荡为主扩展到宽频振荡,给基于机理的稳定分析方法带来挑战。人工智能凭借其处理复杂非线性问题和非机理建模的强大能力成为新型电力系统宽频振荡稳定分析的热点。在宽频振荡稳定性评估方面,通过深度神经网络、图卷积网络等人工智能技术,可以利用振荡过程的电压、电流、功率等广域量测信息,实现对振荡稳定性的判断及对振荡模式、阻尼比等关键参数的准确识别^[208-210]。在宽频振荡源定位方面,集成学习和 K 最近邻算法已被应用于考虑测量误差和系统变化的振荡源定位^[211-212],自编码器结合长短期记忆网络也被用于宽频信号压缩与振荡源定位^[213]。然而,由于宽频振荡数据难以获得,人工智能方法在训练往往面临数据不足和数据质量不佳的问题。研究者正在探索使用仿真数据生成和迁移学习策略来扩充训练集和增强模型的适应能力。文献[214]采用深度迁移学习实现强迫振荡的定位,文献[215]通过在源域使用仿真得到大量振荡样本,并在目标域进行迁移学习尝试解含风机系统次同步振荡的评估。

宽频振荡包含次同步振荡、超同步振荡、电磁振荡等较为广泛的频率范围,目前的 PMU 量测系统主要针对工频附近的相量信息进行量测,其采样和传输频率难以满足宽频振荡准确分析的要求^[216]。为解决宽频振荡的监测问题,多种宽频振荡量测系统和装置正被研制和应用,如包含宽频振荡监测单元、宽频振荡数据集中器、包含宽频振荡数据分析中心等宽频振荡广域监测与预警系统框架^[217]等,未来研究中应关注新型宽频量测系统在基于人工智能的宽频振荡分析中的应用,以充分挖掘宽频振荡信息。

4 新一代安全稳定计算分析技术总体框架与研究思路展望

4.1 基于 PMU 的安稳在线计算分析新框架

随着新能源装机规模的快速增长与大规模交直流联网的持续推进,新型电力系统的动态特性愈发复杂,系统安稳计算分析的实时性和准确性亟待进一步提升。为此,在当前基于 RTU 稳态、非同步量测数据建立起来的成熟的调度控制体系上,本

文提出基于全 PMU 的电网动态安全在线态势分析和决策新框架,如图 11 所示。

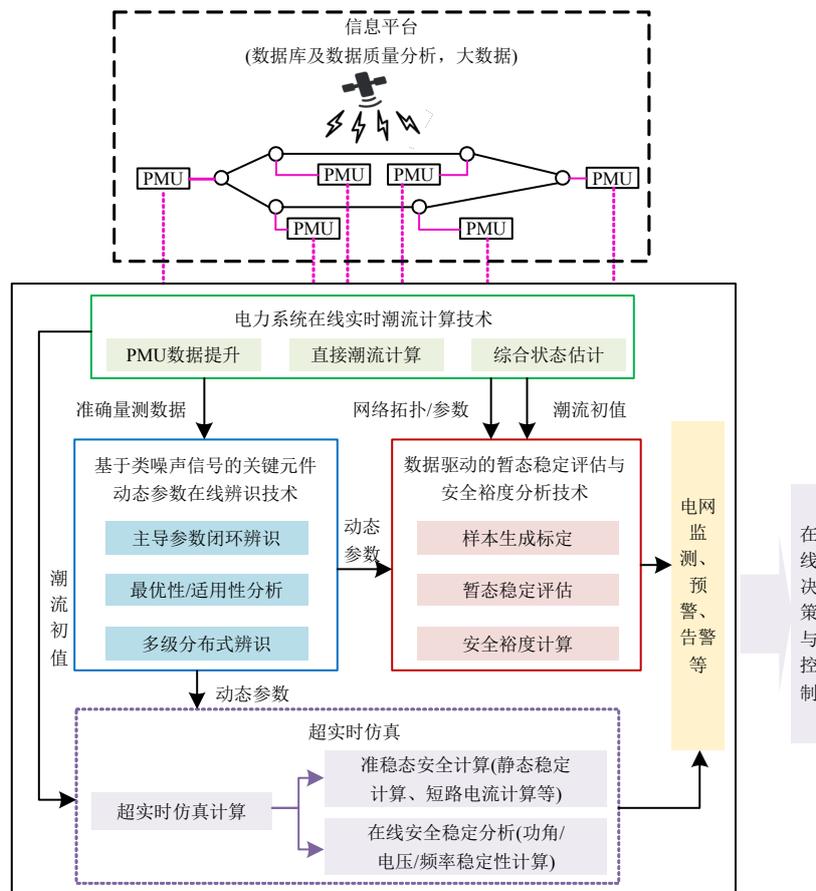


图 11 基于 PMU 的安稳在线计算分析框架

Fig. 11 PMU-based online calculation and analysis framework for power system safety and stability

首先,提出基于 PMU 的电力系统在线实时潮流计算技术,为在线安稳分析提供准确潮流初值以及网络拓扑/参数;其次,提出基于类噪声信号的关键元件动态参数在线辨识技术,实现对源侧、荷侧等值动态参数的全时、差异化辨识,为在线安稳分析提供准确动态模型;在此基础上,提出数据驱动的暂态稳定评估与安全裕度分析技术,建立更加全面、更具针对性的暂态失稳在线判据,并给出量化的安全稳定裕度估计;同时,以超实时仿真技术为基础,执行准稳态安全计算和基于机理的在线安全稳定分析,结合数据驱动的暂态稳定评估与安全裕度分析技术共同支撑系统在线预决策和校正控制。

4.2 关键技术介绍

4.2.1 电力系统在线实时潮流计算技术

准确实时的电力系统在线潮流能够反映电网当前的运行状态,同时也是调度自动化系统中高级应用的数据基础,现有以 RTU 为数据源的 10s 级在线潮流计算体系难以满足新型电力系统对在线潮流实时性和准确性所提出的新需求,而基于 PMU

量测数据开展电力系统在线潮流计算还面临着以下关键技术瓶颈:一方面,PMU 量测误差分布特性不明确、坏数据情况较为普遍,常用最小二乘类状态估计算法对于非高斯量测误差和坏数据较为敏感;与此同时,电力系统状态量测误差、网络参数误差和拓扑错误 3 者对状态感知的交互影响机理不清晰,非同步数据量测对状态感知准确性的影响不明确。

针对上述难题,首先基于电力系统的时空相关信息,获取 PMU 量测误差的分布形态及统计信息,实现无真值情况下全网 PMU 数据的坏数据辨识与恢复^[218-219];接下来研究潮流误差最小化理论,合理化 PMU 线性量测方程,提出快速实时的直接潮流计算方法;最后,基于状态估计模型中参数和状态以及测量数据的紧密耦合,区分不良测量和不良参数对状态估计的影响,研究同时进行系统状态值的估计以及拓扑和参数估计的电力系统综合状态估计方法^[220-221]。

上述在线潮流计算关键技术已实际部署于南

方电网 OS2 调度控制系统，能够以 40 ms 为计算间隔实现对南方电网 500 kV 输电网络的实时动态监测。图 12 展示了 2018 年南方电网某 500 kV 线路甲线发生短路故障后乙线有功功率的波动情况^[222]，相较于基于 SCADA/EMS 的传统状态估计系统，基于 PMU 的新一代实时状态感知系统能够更及时、准确地捕捉系统状态的快速动态过程，为后续在线安稳应用提供更可靠的数据基础。

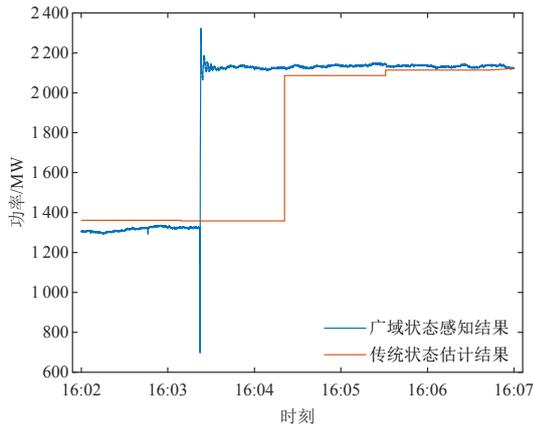


图 12 故障场景下某 500 kV 线路有功功率波动情况

Fig. 12 The active power fluctuations of a 500 kV transmission line in fault scenarios

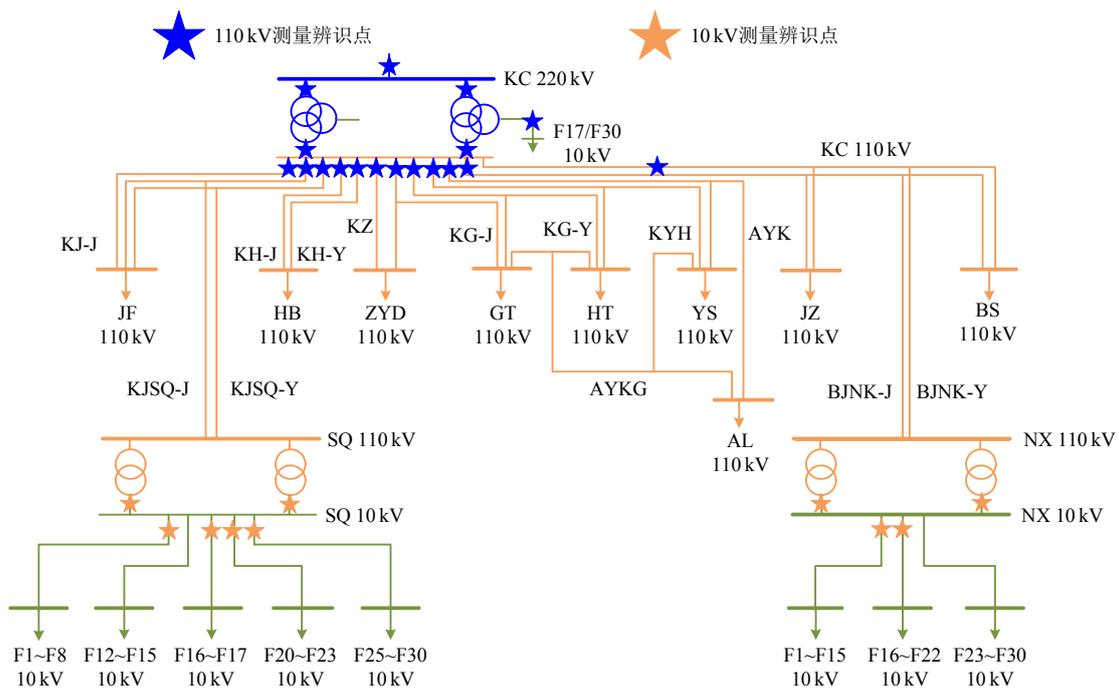
4.2.2 基于类噪声信号的关键元件动态参数在线辨识技术

发电机、负荷及新能源等关键元件动态参数的时变性和准确性很大程度上制约着系统暂态稳定分析的可靠性，目前获取参数常采用的统计综合法

和大扰动测辨法难以克服动态参数的时空变化特性，而适用于在线、差异性建模的类噪声辨识理论方法仍有待进一步完善：一方面，当前研究缺乏说明类噪声辨识全局最优性和扰动适应性的基础理论，且对于参数的闭环辨识问题考虑不足；另一方面，区域网络构成复杂性以及分布式能源大量渗透对于类噪声辨识准确性带来的影响仍不明确，获取的辨识参数难以直接应用于在线暂态稳定评估。

为此，应首先构建关键元件动态参数的闭环辨识基础框架，研究不同程度的量测误差和内外扰动对于辨识结果准确性的影响^[223]；其次，开展基于 PMU 类噪声辨识的最优性与适用性分析，简化各元件动态模型，实现对主导动态参数的全局最优辨识^[135,224]；最后，提出多级分布式负荷、新能源的主导参数辨识方法^[225-226]，研究现有动态模型对于不同电压等级和区域网络结构的等效性，校验待辨识等值节点所在位置与拓扑结构变化对于参数辨识准确性的影响^[227]。

上述基于类噪声信号的关键元件动态参数辨识技术已实际应用于南方电网、上海电网内多个 220/110/10 kV 变电站，能够不依赖故障大扰动实现发电机、等值负荷及新能源的全时段在线动态参数辨识。图 13 举例展示了南方电网某 220 kV 站及下属网络测点设置及 110/10 kV 站点对应动负荷比例参数在一天内的类噪声辨识结果，图 14 展示了南方电网负荷辨识结果的时空分布性。一方面，类噪



(a) 220 kV 某站及下属网络测点设置图

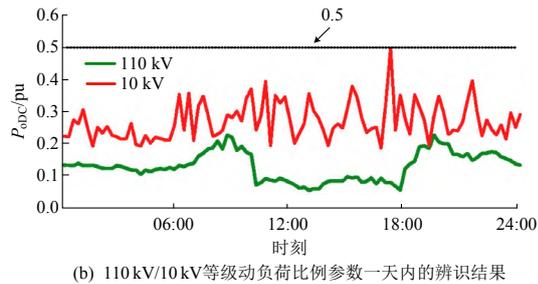
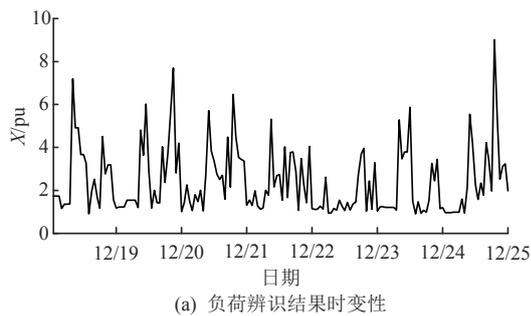
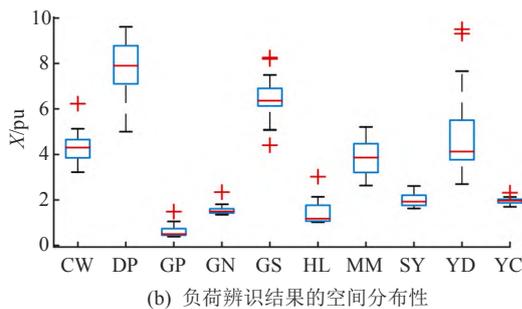


图 13 南方电网多电压等级等值负荷参数辨识结果

Fig. 13 Identification results of multi-level equivalent load model parameters in CSG



(a) 负荷辨识结果时变性



(b) 负荷辨识结果的空间分布性

图 14 南方电网负荷辨识结果时空分布特性

Fig. 14 Temporal and spatial distribution characteristics of load identification results in CSG

声在线辨识能够有效克服等值负荷的时空变化特性，及时更新不同站点对应的等值负荷参数；另一方面，随着电压等级的升高，等值负荷所包含的网络拓扑阻抗增加，对应静负荷比例升高、动负荷比例下降。

4.2.3 数据驱动的暂态稳定评估和安全裕度分析技术

动态负荷的持续增长和多直流密集馈入使得复杂电网暂态稳定问题日益突出。然而，传统暂态稳定工程判据缺乏理论和数据的支撑，运用于实际复杂电网时可靠性和适应性不足；同时，现有暂态稳定评估方法大多没有考虑暂态失稳的时空演变特征，难以应对新能源大规模接入后运行点不断变化的复杂场景；此外，传统暂态稳定安全域方法过度依赖预想事故信息，缺乏对未知事故的适应性。

为此，应首先建立复杂电网暂态稳定时序轨

迹、空间分布特征与稳定评估方法框架，通过空间电压和功率融合时空信息，得到系统电压和功率分布特性和变化速率，提出复杂电网“电压/无功低谷”的时序变化和空间分布主导动态特征提取方法，建立暂态失稳的动态时空分布数据模型^[228-229]；接下来，面向复杂电网海量数据，研究海量数据样本的高效可靠标定技术及样本失衡和代价敏感问题，并从机器学习角度对系统失稳特性和规律进行分析，进一步说明数据驱动方法的物理可解释性^[203,230]；最后，研究基于数据驱动的暂态稳定安全裕度即时估计方法，对事故后的电网状态量进行连续评估，给出量化的安全稳定裕度估计，为系统在线预决策和校正控制提供强有力的辅助信息^[231-232]。

依据上述思路，在南方电网中基于暂态电压稳定评估决策树，应用 shaplet 技术，形成适用于南方电网的实用稳定判据，如图 15 所示。同时，上述暂态稳定评估技术在国家电网华中分部进行了示范应用，实际部署的软件包含离线训练程序、在线评估程序、增量学习程序等，还进一步开发了暂态电压稳定评估的界面，如图 16 所示，并且将提取到的稳定与失稳特征做了更直观的可视化处理，可以向调度人员直观地反映当前的稳定状态以及稳定裕度，辅助其进行决策。

4.3 上海电网实际工程应用情况

如图 17 所示，在上海电网现有主、配网大量 PMU 量测布点的基础上，完成了新型复杂电网实时感知与在线稳定评估系统的综合示范工程，验证了上述关键技术的实际可行性，实现了国际上首个覆盖了某个完整区域 220 kV 和 500 kV 电压等级的全 PMU 安全稳定在线计算分析系统。

上述系统基于“即测-即辨-即控”的总体思路，实现了 10 ms 级的准确在线实时潮流计算、秒级的负荷和分布式电源动态参数分层在线辨识、100 ms 级的数据驱动暂态电压稳定判据及不依赖故障信息的稳定裕度估计 3 项核心功能的有效集成，能够有力支撑调度部门开展实时安全稳定分析、运行调度和辅助决策，提升系统即时感知评估能力和实时决策能力，支撑新型电力系统安全稳定运行。

4.4 进一步展望

目前以动态、同步相量量测数据为基础的新一代在线安全稳定分析技术的研究和应用已经取得了初步的进展，但完全实现暂态稳定的在线评估和实时决策仍面临若干挑战，未来可从以下几个方面

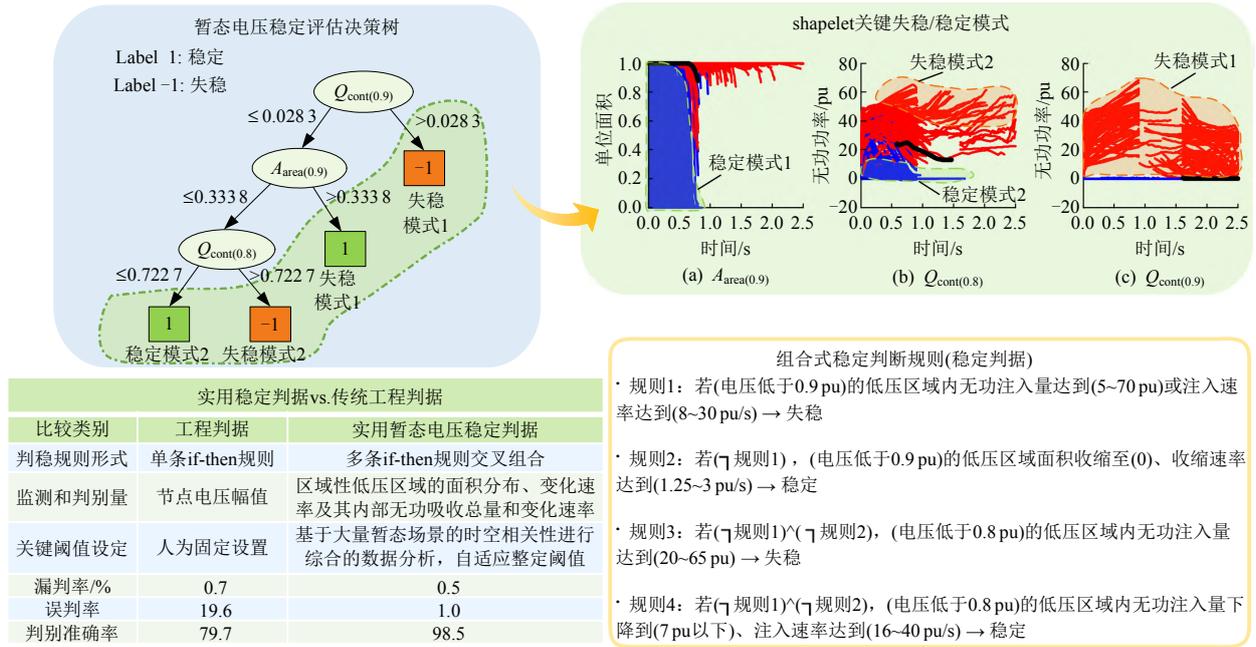


图 15 用于暂态电压失稳评估的关键 shapelet 及代表性暂态响应轨迹片段

Fig. 15 Critical shapelet and transient trajectories for voltage stability assessment

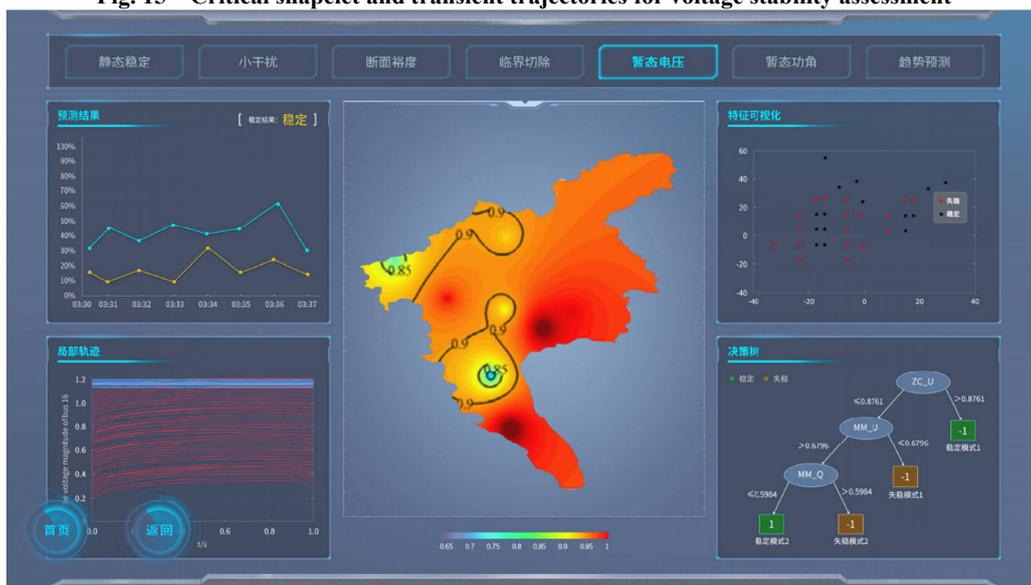


图 16 华中电网暂态电压稳定评估界面

Fig. 16 Transient voltage stability assessment interface for Central China Power Grid

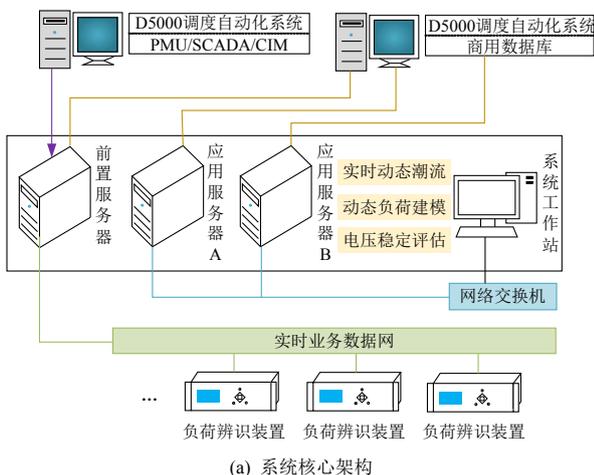


图 17 上海电网全 PMU 安全稳定在线分析计算系统

Fig. 17 PMU-based online calculation and analysis system for power system safety and stability in Shanghai Power Grid

进一步推动研究和应用:

1) 在线实时潮流计算技术方面, 从电力系统调度运行角度分析状态估计和潮流计算的异同点, 探究将两者合二为一的可能性。同时, 10 ms 级状态感知体系能够准确实时监视系统的运行状态, 所基于的潮流模型以稳态代数模型为主, 而 10 ms 时间尺度下也应该考虑系统的暂态微分代数模型, 后续需要研究用稳态代数模型代替暂态微分代数模型的边界。最后, 电力系统状态的计算更新时间尺度在 10 ms 级, 但受限于相关算法执行时间, 拓扑和参数的计算更新时间尺度较长, 后续需要研究如何在保证计算经济性的前提下, 解耦系统状态、拓扑和参数的实时计算, 快速更新系统拓扑和参数。

2) 关键元件动态参数在线辨识技术方面, 为提高关键元件动态参数在线辨识结果的可靠性, 首先应关注模型结构的拓展和完善。电力电子设备从负荷侧大量接入是电力系统发展的必然趋势, 而高渗透率的电力电子型负荷会使负荷特性进一步复杂化, 因此需要研究建立平衡模型表征能力和模型复杂度的合理负荷模型。同时, 类噪声辨识理论和方法也仍需完善。类噪声辨识属于闭环辨识问题, 为提高其辨识结果的理论可靠性, 应深入了解类噪声产生机理和类噪声信号性质, 研究减少闭环环境下内部激励源对辨识干扰的方法。最后, 类噪声辨识基于海量数据辨识得到大量结果, 如何在系统中充分且合理地应用这些辨识结果, 为系统安全稳定运行提供保障也需要进一步探究。

3) 数据驱动的暂态稳定评估和安全裕度分析技术方面, 人工智能技术为高度复杂化的新型电力系统稳定分析提供了可行思路, 进一步的研究还应重点关注可解释性、安全约束、泛化性、样本效率等关键问题。研究高度可解释的人工智能稳定评估方法, 通过模型解释、采用可解释性网络、数据-模型融合等方法, 提升智能评估模型的可解释性; 融入开发能够处理复杂电力系统安全约束的智能评估方法, 满足电力系统调度运行对安全性的要求; 采用主动学习、迁移学习、领域自适应等技术, 优化模型的泛化性能、提升样本效率; 充分挖掘大模型等前沿人工智能技术在电力系统稳定评估领域应用的潜力, 提升人工智能技术的复杂场景分析能力。

通过对上述关键问题的研究攻关, 预期实现将“动态潮流+拓扑参数+负荷参数”+“超实时计算”应用于在线安全稳定分析系统。同时, 加以电力系

统在线实时决策控制技术, 完成“新一代电力系统综合防御关键技术”的示范应用, 真正实现暂态稳定的在线评估和实时决策。

作者按

今年适逢中国电机工程学会成立 90 周年、《中国电机工程学报》创刊 60 周年。在学会发展历史上, 与清华大学渊源颇深, 其中清华大学电机系首任系主任顾毓琇先生是中国电机工程学会的创始人之一, 并曾担任会长, 清华大学原校长高景德先生也曾多届担任中国电机工程学会的副理事长。笔者之一韩英铎教授有幸于 1992 年在清华园陪同高先生接待顾先生访问, 值此之际, 以当时珍贵留影以及本篇小文, 祝贺学会成立 90 周年、学报创刊 60 周年。



1992 年顾毓琇先生访问清华大学(从左至右依次为: 韩英铎、黄眉、高景德、顾毓琇、赵访熊、董树屏)

参考文献

- [1] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [2] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [3] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌. 电力系统调度自动化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin. Electric power system dispatch automation[M]. Beijing: Tsinghua

- University Press, 2011(in Chinese).
- [4] 钟海旺, 张广伦, 程通, 等. 美国德州 2021 年极寒天气停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 1-9.
ZHONG Haiwang, ZHANG Guanglun, CHENG Tong, et al. Analysis and enlightenment of extremely cold weather power outage in Texas, U.S. in 2021 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 1-9(in Chinese).
- [5] 屠竞哲, 何剑, 安学民, 等. 巴基斯坦“2023.1.23”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5319-5328.
TU Jingzhe, HE Jian, AN Xuemin, et al. Analysis and lessons of pakistan blackout event on January 23, 2023 [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5319-5328(in Chinese).
- [6] ZHOU Mike, YAN Jianfeng. A new solution architecture for online power system analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 250-256.
- [7] 刘峰. 调度员潮流理论与应用中若干问题探讨[J]. 电网技术, 2006, 30(S1): 279-283.
LIU Feng. Discussion on some problems in theory and application of dispatcher power flow[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 279-283(in Chinese).
- [8] 韩冬, 马进, 贺仁睦, 等. 负荷模型不确定性对电力系统动态仿真的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 69-74.
HAN Dong, MA Jin, HE Renmu, et al. Effect of uncertainty in load model on power system dynamic simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 69-74(in Chinese).
- [9] 周二专, 冯东豪, 严剑峰, 等. 秒级响应电网在线分析软件平台[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3474-3480.
ZHOU Erzhuang, FENG Donghao, YAN Jianfeng, et al. A software platform for second-order responsiveness power grid online analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3474-3480(in Chinese).
- [10] LU Chao, SHI Bonian, WU Xiaochen, et al. Advancing China's smart grid: phasor measurement units in a wide-area management system[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(5): 60-71.
- [11] XIE Xiaorong, XIN Yaozhong, XIAO Jinyu, et al. WAMS applications in Chinese power systems[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2006, 4(1): 54-63.
- [12] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
XU Shukai, XIE Xiaorong, XIN Yaozhong, et al. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).
- [13] KORBA P, UHLEN K. Wide-area monitoring of electromechanical oscillations in the nordic power system: practical experience[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(10): 1116-1126.
- [14] PHADKE A G, MORAES R M, DE MORAES R M, et al. The wide world of wide-area measurement[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(5): 52-65.
- [15] PHADKE A G, MORAES R M, DE MORAES R M, et al. The wide world of wide-area measurement[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(5): 52-65.
- [16] JONES K D, THORP J S, GARDNER R M. Three-phase linear state estimation using Phasor Measurements[C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013: 1-5.
- [17] PIGNATI M, POPOVIC M, BARRETO S, et al. Real-time state estimation of the EPFL-campus medium-voltage grid by using PMUs[C]//2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [18] ZHANG Lin, BOSE A, JAMPALA A, et al. Design, testing, and implementation of a linear state estimator in a real power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1782-1789.
- [19] 海南电网公司, 清华大学. 海南电网全 PMU 状态估计系统研发技术报告[R]. 2011.
Hainan Power Grid Company, Tsinghua University. Technical report of the full PMU state estimation system for Hainan power grid[R]. 2011(in Chinese).
- [20] 宋文超. 基于潮流误差最小化理论的电力系统在线潮流计算[D]. 北京: 清华大学, 2024.
SONG Wenchao. Online power flow calculation of power systems based on the theory of minimizing the error of power flow[D]. Beijing: Tsinghua University, 2024(in Chinese).
- [21] 李颖, 贺仁睦, 徐衍会. 广东电网基于 PMU 的负荷模型参数辨识研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 16-19.
LI Ying, HE Renmu, XU Yanhui. Research of PMU-based load model parameters identification of Guangdong power grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 16-19(in Chinese).
- [22] 贺仁睦, 王卫国, 蒋德斌, 等. 广东电网动态负荷实测建模及模型有效性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 79-83.
HE Renmu, WANG Weiguo, JIANG Debin, et al. Measurement-based dynamic load modeling and model validation on Guangdong grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 78-82(in Chinese).
- [23] 石景海. 考虑负荷时变性的大区电网负荷建模研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2004.
SHI Jinghai. Load modeling of large-scale power grid considering time-variant characteristic[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2004(in

- Chinese).
- [24] CHOI B K, CHIANG H D, LI Yin hong, et al. Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1276-1283.
- [25] 周运斌, 陈茜, 王颖, 等. 基于聚类算法和类噪声数据辨识的负荷模型特征参数提取[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(12): 12-18.
ZHOU Yunbin, CHEN Qian, WANG Ying, et al. Ambient signal and clustering algorithm based extraction for identified load model parameters[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 12-18(in Chinese).
- [26] WANG Ying, LU Chao, WU Peixuan, et al. Online realization of an ambient signal-based load modeling algorithm and its application in field measurement data[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7451-7460.
- [27] 刘道伟, 宋墩文, 王红印, 等. 基于 WAMS 和 EMS 的电压稳定在线评估系统[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1934-1938.
LIU Daowei, SONG Dunwen, WANG Hongyin, et al. Voltage stability online evaluation system based on WAMS and EMS[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1934-1938(in Chinese).
- [28] 曹路, 张涛, 汪德星, 等. 华东电网 WAMAP 系统的应用实践[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 97-101.
CAO Lu, ZHANG Tao, WANG Dexing, et al. Application of wide area monitoring analysis protection and control system in East China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 97-101(in Chinese).
- [29] HU Pengfei, GAO Wengen, LI Yunfei, et al. Detection of false data injection attacks in smart grid based on joint dynamic and static state estimation[J]. IEEE Access, 2023, 11: 45028-45038.
- [30] WANG J W, QUINTANA V H. A decoupled orthogonal row processing algorithm for power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(8): 2337-2344.
- [31] CLEMENTS K A, WOODZELL G W, BURCHETT R C. A new method for solving equality-constrained power system static-state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1260-1266.
- [32] KORRES G N. A robust algorithm for power system state estimation with equality constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1531-1541.
- [33] ZHAO Junbo, GÓMEZ-EXPÓSITO A, NETTO M, et al. Power system dynamic state estimation: motivations, definitions, methodologies, and future work[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3188-3198.
- [34] ZHAO Junbo, NETTO M, MILI L. A robust iterated extended kalman filter for power system dynamic state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3205-3216.
- [35] LIU Hui, HU Fei, SU Jinshuo, et al. Comparisons on kalman-filter-based dynamic state estimation algorithms of power systems[J]. IEEE Access, 2020(8): 51035-51043.
- [36] ZHAO Junbo. Dynamic state estimation with model uncertainties using H^∞ extended kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1099-1100.
- [37] PHADKE A G, THORP J S, KARIMI K J. State estimation with phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(1): 233-238.
- [38] CHAKRABARTI S, KYRIAKIDES E. PMU measurement uncertainty considerations in wls state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 1062-1071.
- [39] JONES K D, THORP J S, GARDNER R M. Three-phase linear state estimation using phasor measurements[C]// 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2013: 1-5.
- [40] SONG Wenchao, HE Jingbo, LIN Junjie, et al. Bias analysis of PMU-based state estimation and its linear bayesian improvement[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 1607-1617.
- [41] VALVERDE G, CHAKRABARTI S, KYRIAKIDES E, et al. A constrained formulation for hybrid state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1102-1109.
- [42] DOBAKSHARI A S, ABDOLMALEKI M, TERZIJA V, et al. Robust hybrid linear state estimator utilizing SCADA and PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1264-1273.
- [43] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 30-34.
WANG Keying, MU Gang, CHEN Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33(in Chinese).
- [44] 李卫国, 李虹, 付红军, 等. 基于广域测量系统的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 124-127.
LI Weiguo, LI Hong, FU Hongjun, et al. Power system state estimation based on wide-area measurement system [J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 124-127(in Chinese).
- [45] 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 Hongga, XUE Yusheng, WANG Dexing, et al. State estimation model with PMU current phasor

- measurements[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(17): 37-40(in Chinese).
- [46] 李大路, 李蕊, 孙元章, 等. 利用 PMU 数据提高电力系统状态估计精度的方法[J]. *电网技术*, 2009, 33(3): 74-78.
LI Dalu, LI Rui, SUN Yuanzhang, et al. An algorithm improving precision of power system state estimation by PMU data[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(3): 74-78(in Chinese).
- [47] CHAKRABARTI S, KYRIAKIDES E, LEDWICH G, et al. A comparative study of the methods of inclusion of PMU current phasor measurements in a hybrid state estimator[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [48] ZARGAR B, ANGIONI A, PONCI F, et al. Multiarea parallel data-driven three-phase distribution system state estimation using synchrophasor measurements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 6186-6202.
- [49] 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(in Chinese).
- [50] FARANTATOS E, STEFOPOULOS G K, COKKINIDES G J, et al. PMU-based dynamic state estimation for electric power systems[C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-8.
- [51] LIU Yong, ZHAN Lingwei, ZHANG Ye, et al. Wide-area-measurement system development at the distribution level: an FNET/GridEye example[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(2): 721-731.
- [52] 黄兴德, 方陈, 魏新迟, 等. 基于同步相量测量的电力系统网络拓扑分析方法[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(29): 12567-12576.
HUANG Xingde, FANG Chen, WEI Xinchu, et al. Power system network topology analysis based on synchrophasor measurements[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(29): 12567-12576(in Chinese).
- [53] BOSE A, CLEMENTS K A. Real-time modeling of power networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1987, 75(12): 1607-1622.
- [54] 万华, 李乃湖, 陈珩, 等. 基于广度优先的快速拓扑分析法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 1995, 7(2): 17-23.
WAN Hua, LI Naihu, CHEN Heng, et al. A new topology processor based on width-priority[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 1995, 7(2): 17-23(in Chinese).
- [55] SINGH H, ALVARADO F L. Network topology determination using least absolute value state estimation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(3): 1159-1165.
- [56] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. *电网技术*, 2001, 25(2): 10-13.
WANG Xiangzhong, LI Xiaolan. Topology identification of power network based on incidence matrix[J]. *Power System Technology*, 2001, 25(2): 10-13(in Chinese).
- [57] 郎燕生, 李静, 罗雅迪, 等. 基于图划分的大电网拓扑分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(23): 108-115.
LANG Yansheng, LI Jing, LUO Yadi, et al. Large power grid topology analysis based on graph partitioning [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 108-115(in Chinese).
- [58] MA Li, WANG Lingfeng, LIU Zhaoxi. Topology identification of distribution networks using a split-EM based data-driven approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(3): 2019-2031.
- [59] FARAJOLLAHI M, SHAHSAVARI A, MOHSENIAN-RAD H. Topology identification in distribution systems using line current sensors: an MILP approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1159-1170.
- [60] XU Zhiqi, JIANG Wei, XU Junjun, et al. Distribution network topology identification using asynchronous transformer monitoring data[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(1): 323-331.
- [61] 何桦, 卫志农, 顾全, 等. EMS 中基于量测置换的对地电容参数估计方法[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(13): 63-66.
HE Hua, WEI Zhinong, GU Quan, et al. Transmission line grounding capacitance estimation based on measurement transposition algorithm in EMS [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(13): 63-66(in Chinese).
- [62] ZARCO P, EXPOSITO A G. Power system parameter estimation: a survey[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(1): 216-222.
- [63] SLUTSKER I W, MOKHTARI S, CLEMENTS K A. Real time recursive parameter estimation in energy management systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(3): 1393-1399.
- [64] LIU W H E, WU F F, LUN S M. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation (power systems)[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, 7(1): 81-89.
- [65] 何桦, 柴京慧, 卫志农, 等. 基于量测残差的改进参数估计方法[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(4): 33-36, 96.
HE Hua, CHAI Jinghui, WEI Zhinong, et al. Improved method of parameter estimation based on measurement residuals[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(4): 33-36, 96(in Chinese).
- [66] CLEMENTS K A, COSTA A S. Topology error

- identification using normalized Lagrange multipliers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 347-353.
- [67] ZHU Jun, ABUR A. Identification of network parameter errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 586-592.
- [68] LIN Yuzhang, ABUR A. A new framework for detection and identification of network parameter errors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1698-1706.
- [69] LIN Yuzhang, ABUR A. Fast correction of network parameter errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1095-1096.
- [70] 李大路, 李蕊, 孙元章, 等. 计及广域测量信息的状态估计错误参数识别与修正[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 11-15.
LI Dalu, LI Rui, SUN Yuanzhang, et al. Recognizing and correcting the wrong parameters in state estimation considering the WAMS measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 11-15(in Chinese).
- [71] 曾兵, 吴文传, 张伯明. 基于 Karush-Kuhn-Tucker 最优条件的电网可疑参数辨识与估计[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 56-61.
ZENG Bing, WU Wenchuan, ZHANG Boming. A method to identify and estimate network parameter errors based on Karush-Kuhn-Tucker condition[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 56-61(in Chinese).
- [72] ZHU Jun, ABUR A. Improvements in network parameter error identification via synchronized phasors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 44-50.
- [73] ZHANG Liuxi, ABUR A. Strategic placement of phasor measurements for parameter error identification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 393-400.
- [74] ZHANG Liuxi, ABUR A. Identifying parameter errors via multiple measurement scans[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3916-3923.
- [75] LIN Yuzhang, ABUR A. Enhancing network parameter error detection and correction via multiple measurement scans[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2417-2425.
- [76] DE LA VILLA JAEN A, ACHA E, EXPOSITO A G. Voltage source converter modeling for power system state estimation: STATCOM and VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1552-1559.
- [77] 柴京慧, 李书敏, 何桦. 基于 PMU 及多时间断面的输电网络参数估计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 49-52.
CHAI Jinghui, LI Shumin, HE Hua. Parameter estimation based on PMU and multi-cases of SCADA for electricity transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 49-52(in Chinese).
- [78] 吴昊, 闫文瑾, 何桦. 基于多方式电网断面的输电网络参数估计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 89-92.
WU Hao, YAN Wenjin, HE Hua. Parameter estimation of power transmission network based on multi-cases of power flow operating conditions[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 89-92(in Chinese).
- [79] 陈晓刚, 易永辉, 江全元, 等. 基于 WAMS/SCADA 混合量测的电网参数辨识与估计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 1-5.
CHEN Xiaogang, YI Yonghui, JIANG Quanyuan, et al. Network parameter identification and estimation based on hybrid measurement of WAMS/SCADA [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 1-5(in Chinese).
- [80] BORDA C, OLARTE A, DIAZ H. PMU-based line and transformer parameter estimation[C]//2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, WA, USA: IEEE, 2009: 1-8.
- [81] 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, 31.
WANG Maohai, BAO Jie, QI Xia, et al. Online estimation of transmission line parameters based on pmu measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 25-27, 31(in Chinese).
- [82] 卞晓猛, 邱家驹, 许旭锋. 电力系统静态线路参数启发式估计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 41-46.
BIAN Xiaomeng, QIU Jiaju, XU Xufeng. A heuristic method for static line parameter estimation in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 41-46(in Chinese).
- [83] 宁辽逸, 孙宏斌, 吴文传, 等. 基于状态估计的电网支路参数估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 7-13.
NING Liaoyi, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. State estimation based branch parameter estimation method for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 7-13(in Chinese).
- [84] 颜伟, 项凤雏, 卢建刚, 等. 考虑单位长度参数变量的线路参数估计方法[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(5): 720-725.
YAN Wei, XIANG Fengchu, LU Jiangang, et al. Line parameter estimation method with per unit length parameter variables[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(5): 720-725(in Chinese).
- [85] TINNEY W F, HART C E. Power flow solution by newton's method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(11): 1449-1460.
- [86] 孙秋野, 陈会敏, 杨家农, 等. 牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2196-2200.
SUN Qiuye, CHEN Huimin, YANG Jianong, et al. Analysis on convergence of newton-like power flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2196-2200(in Chinese).

- [87] TOSTADO M, KAMEL S, JURADO F. Developed newton-raphson based predictor-corrector load flow approach with high convergence rate[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 105: 785-792.
- [88] MILANO F. Continuous newton's method for power flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 50-57.
- [89] TOSTADO - VÉLIZ M, KAMEL S, JURADO F. Development of combined Runge - Kutta Broyden's load flow approach for well - and ill - conditioned power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(21): 5723-5729.
- [90] POURBAGHER R, DERAKHSHANDEH S Y. Application of high - order Levenberg - Marquardt method for solving the power flow problem in the ill - conditioned systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(12): 3017-3022.
- [91] LAGACE P J, VUONG M H, KAMWA I. Improving power flow convergence by newton raphson with a levenberg-marquardt method[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [92] 孙志媛, 孙艳, 宁文辉. 具有三阶收敛速度的潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 5-8, 28. SUN Zhiyuan, SUN Yan, NING Wenhui. Power flow algorithm with cubic convergence[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 5-8, 28(in Chinese).
- [93] HOMERIER H. On newton-type methods with cubic convergence[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005, 176(2): 425-432.
- [94] WEERAKOON S, FERNANDO T G I. A variant of newton's method with accelerated third-order convergence [J]. Applied Mathematics Letters, 2000, 13(8): 87-93.
- [95] FRONTINI M, SORMANI E. Some variant of Newton's method with third-order convergence[J]. Applied Mathematics and Computation, 2003, 140(2-3): 419-426.
- [96] KOU Jisheng, LI Yitian, WANG Xiuhua. A modification of newton method with third-order convergence [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 181(2): 1106-1111.
- [97] TANG Kunjie, DONG Shufeng, SHEN Jie, et al. A robust and efficient two-stage algorithm for power flow calculation of large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5012-5022.
- [98] 彭慧敏, 袁虎玲, 鲍颜红, 等. 大电网病态潮流的识别和修正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 116-123. PENG Huimin, YUAN Huling, BAO Yanhong, et al. Identification and correction method for ill-conditioned power flow of large scale network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 116-123(in Chinese).
- [99] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. ZHANG Boming, CHEN Shousun, YAN Zheng. Advanced power network analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007(in Chinese).
- [100] ZHANG Hui, HEYDT G T, VITTAL V, et al. An improved network model for transmission expansion planning considering reactive power and network losses [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3471-3479.
- [101] YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3607-3617.
- [102] FATEMI S M, ABEDI S, GHAREHPETIAN G B, et al. Introducing a novel DC power flow method with reactive power considerations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3012-3023.
- [103] LI Zhigang, YU Jinyu, WU Q H. Approximate linear power flow using logarithmic transform of voltage magnitudes with reactive power and transmission loss consideration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4593-4603.
- [104] 卫志农, 张清松, 赵静波, 等. 电力系统线性化模型研究综述与改进[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2919-2927. WEI Zhinong, ZHANG Qingsong, ZHAO Jingbo, et al. Review and improvement of power system linearization models[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2919-2927(in Chinese).
- [105] STOTT B, JARDIM J, ALSAC O. DC power flow revisited[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1290-1300.
- [106] 李虎成, 於益军, 高宗和, 等. 一种提高计算精度的类直流潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 128-133. LI Hucheng, YU Yijun, GAO Zonghe, et al. A class DC power flow algorithm with higher calculation accuracy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 128-133(in Chinese).
- [107] 何天雨, 卫志农, 孙国强, 等. 基于网损等值负荷模型的改进直流最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 58-64. HE Tianyu, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Modified direct current optimal power flow algorithm based on net loss equivalent load model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 58-64(in Chinese).
- [108] 王虹富, 王毅, 高崇, 等. 基于网损等值负荷模型的直流潮流迭代算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):

- 99-103.
WANG Hongfu, WANG Yi, GAO Chong, et al. Iterative algorithm of DC power flow based on network loss equivalent load model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 99-103(in Chinese).
- [109] FAN Zhixin, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Minimize linearization error of power flow model based on optimal selection of variable space[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1130-1140.
- [110] 樊哲新, 杨知方, 冯楠, 等. 潮流方程线性化误差分析及最优状态空间选取[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 109-117.
FAN Zhixin, YANG Zhifang, FENG Nan, et al. Error analysis and optimal state space selection of linear power flow equation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 109-117(in Chinese).
- [111] IEEE. IEEE guide for load modeling and simulations for power systems: IEEE Std 2781—2022[S]. New York: IEEE, 2022: 1-88.
- [112] IEEE. IEEE guide for synchronous generator modeling practices in stability analyses: IEEE Std 1110—1991 [S]. New York: IEEE, 1991: 1-96.
- [113] 贺仁睦, 沈峰, 韩冬, 等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 62-67.
HE Renmu, SHEN Feng, HAN Dong, et al. The study of generator excitation system modeling and parameters estimation[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 62-67(in Chinese).
- [114] 王云. 电力系统动态参数辨识及暂态稳定紧急控制算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
WANG Yun. Research on dynamic parameter identification and transient stability constrained emergency control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014(in Chinese).
- [115] VERMEULEN H J, STRAUSS J M, SHIKOANA V. Online estimation of synchronous generator parameters using PRBS perturbations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 694-700.
- [116] 黄其新, 孙黎霞, 甄威, 等. 同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 50-53.
HUANG Qixin, SUN Lixia, ZHEN Wei, et al. Ant colony optimization algorithm and disturbance analysis of synchronous generator parameter identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 50-53(in Chinese).
- [117] ARASTOU A, RABIEYAN H, KARRARI M. A novel PSS-based online test procedure for parameter estimation of synchronous generator using the governor system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3178-3187.
- [118] 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 Yuqing, YUE Chenxi, 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(in Chinese).
- [119] TSAI C C, CHANG-CHIEN L R, CHEN I J, et al. Practical considerations to calibrate generator model parameters using phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2228-2238.
- [120] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Load modeling - a review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5986-5999.
- [121] Western Electricity Coordinating Council Modeling and Validation Work Group. WECC MVWG load model report ver.1.0[R]. 2012.
- [122] 陈谦, 黄文英, 李成, 等. 电力负荷建模的在线统计综合法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 8-10, 71.
CHEN Qian, HUANG Wenying, LI Cheng, et al. Component based on-line modeling for electric loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 8-10, 71(in Chinese).
- [123] 毛振宇. 基于电力大数据的智能化负荷建模技术与应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
MAO Zhenyu. Intelligent load modeling technology and application based on power big data[D]. Changsha: Hunan University, 2021(in Chinese).
- [124] RENMU H, JIN M, HILL J D. Composite load modeling via measurement approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 663-672.
- [125] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 18-22.
SHI Jinghai, HE Renmu. Parameter identification of dynamic load model using multi-curve fitting method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 18-22(in Chinese).
- [126] 贺仁睦, 徐衍会, 马进, 等. 人工三相短路试验数据验证的负荷实测建模方法[J]. 电网技术, 2007, 31(4): 59-64.
HE Renmu, XU Yanhui, MA Jin, et al. Measurement-based load modeling proved by the data recorded during artificial three phases ground tests in the power system [J]. Power System Technology, 2007, 31(4): 59-64(in Chinese).
- [127] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
TANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 34-38(in Chinese).
- [128] 陈谦, 孙建波, 蔡敏, 等. 考虑配电网综合负荷模

- 型的参数确定[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 45-50.
- CHEN Qian, SUN Jianbo, CAI Min, et al. Parameters determination of synthesis load model considering distribution network connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 45-50(in Chinese).
- [129] WANG Xinan, WANG Yishen, SHI Di, et al. Two-stage WECC composite load modeling: a double deep Q-learning networks approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4331-4344.
- [130] ZHANG Kaiqing, ZHU Hao, GUO Siming. Dependency analysis and improved parameter estimation for dynamic composite load modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3287-3297.
- [131] HOSHYARZADEH A S, ZAREIPOUR H, KEUNG P K, et al. The impact of CLOD load model parameters on dynamic simulation of large power systems[C]//2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe(EEEIC/I&CPS Europe). Genova, Italy: IEEE, 2019: 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783527.
- [132] AVILA N F, CALLEGARO L, FLETCHER J. Measurement-based parameter estimation for the WECC composite load model with distributed energy resources [C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [133] CHOI B K, CHIANG H D, LI Yinhong, et al. Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1276-1283.
- [134] JU Ping, WU Feng, CHEN Qian, et al. Modeling methods for electric loads in a real power grid[C]//2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering(ICEEE). Istanbul, Turkey: IEEE, 2018: 166-172.
- [135] ZHANG Xinran, LU Chao, WANG Ying. A two-stage framework for ambient signal based load model parameter identification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106064.
- [136] WANG Ying, SONG Wenchao, LIN Junjie, et al. Data improvement for ambient signal based load modeling via wide-area state estimation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108173.
- [137] QI Chuang, WANG Xiaozhe. Comparative study of data-driven dynamic load model identification methods based on simulated and actual PMU data[C]//2022 North American Power Symposium(NAPS). Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2022: 1-6.
- [138] 李尚远, 甘德强, 冯丽, 等. 小扰动环境下闭环负荷辨识机理分析及解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2152-2165.
- LI Shangyuan, GAN Deqiang, FENG Li, et al. The reason for closed-loop load model identification and corresponding solution under small disturbance condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2152-2165(in Chinese).
- [139] 金宇清, 赵泽, 鞠平, 等. 双馈感应风力发电机的参数辨识分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1700-1705.
- JIN Yuqing, ZHAO Ze, JU Ping, et al. Analysis on the identification of doubly fed induction generator[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1700-1705(in Chinese).
- [140] 李振磊, 摆世彬, 方若水, 等. 基于广域测量系统的双馈风力发电机组在线参数辨识方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 89-97.
- LI Zhenyao, BAI Shibin, FANG Ruoshui, et al. Online parameter identification method of doubly fed induction generator based on wide area measurement system [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 89-97(in Chinese).
- [141] TAMIMI B, CANIZARES C, BHATTACHARYA K. System stability impact of large-scale and distributed solar photovoltaic generation: the case of Ontario, Canada[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 680-688.
- [142] KAWABE K, TANAKA K, et al. Impact of dynamic behavior of photovoltaic power generation systems on short-term voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3416-3424.
- [143] ELLIOTT R T, ELLIS A, POURBEIK P, et al. Generic photovoltaic system models for WECC - a status report[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [144] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(二): 机电暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2190-2202.
- SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (II): electromechanical transient model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2190-2201(in Chinese).
- [145] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [146] 马亚辉, 李欣然, 徐振华, 等. 一种逆变并网型分布式电源统一模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 145-154.
- MA Yahui, LI Xinran, XU Zhenhua, et al. A unified model of grid-connected distributed generation through inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 145-154(in Chinese).

- [147] ZHANG Xinran, HILL D J, LU Chao. Identification of composite demand side model with distributed photovoltaic generation and energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 326-336.
- [148] POURBEIK P, WEBER J, RAMASUBRAMANIAN D, et al. An aggregate dynamic model for distributed energy resources for power system stability studies[J]. Cigre Science & Engineering, 2019, 14: 38-48.
- [149] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电系统接入配电网技术规定: GB/T 29319—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Technical requirements for connecting photovoltaic power system to distribution network: GB/T 29319—2024[S]. Beijing: China Standard Press, 2024(in Chinese).
- [150] 金宇清, 鞠平, 潘学萍, 等. 光伏逆变器控制参数的分步辨识方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 594-600.
JIN Yuqing, JU Ping, PAN Xueping, et al. A stepwise method to identify controller parameters of photovoltaic inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 594-600(in Chinese).
- [151] 王潇桐, 王彤, 邓俊, 等. 光伏逆变器机电暂态模型的控制模式及参数一体化辨识策略[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3547-3556.
WANG Xiaotong, WANG Tong, DENG Jun, et al. Control mode and parameter integration identification of photovoltaic inverter electromechanical transient model[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3547-3556(in Chinese).
- [152] BU Fankun, MA Zixiao, YUAN Yuxuan, et al. WECC composite load model parameter identification using evolutionary deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5407-5417.
- [153] MAGNUSSON P C. The transient-energy method of calculating stability[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1947, 66(1): 747-755.
- [154] EL-ABIAD A H, NAGAPPAN K. Transient stability regions of multimachine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, PAS-85(2): 169-179.
- [155] GLESS G E. Direct method of Liapunov applied to transient power system stability[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, PAS-85(2): 159-168.
- [156] KAKIMOTO N. Transient stability analysis of electric power system via Lur' e type Lyapunov function [J]. Trans. IEE of Japan, E, 1978, 98(5): 63-79.
- [157] XUE Y, VAN CUTSEM T, RIBBENS-PAVELLA M. A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 400-412.
- [158] XUE Y, LUO Y, XUE F, et al. On-line transient stability assessment in operation-DEEAC in northeast China power system[C]//Proceedings of TENCON' 93. IEEE Region 10 International Conference on Computers, Communications and Automation. Beijing, China: IEEE, 1993: 72-76.
- [159] PADIYAR K R, SASTRY H S Y. A structure-preserving energy function for stability analysis of AC/DC systems [J]. Sadhana, 1993, 18(5): 787-799.
- [160] DEMARCO C L, CAÑIZARES C A. A vector energy function approach for security analysis of AC/DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3): 1001-1011.
- [161] 陈乾, 沈沉, 刘锋. 端口能量及其在风电系统暂态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 9-16.
CHEN Qian, SHEN Chen, LIU Feng. Port energy and its application to transient stability analysis of power systems with wind generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 9-16(in Chinese).
- [162] 安成万, 郭星, 崔曦文. 基于戴维南等值的系统静态电压稳定极限及稳定裕度快速计算方法研究[J]. 山西电力, 2020(3): 6-12.
AN Chengwan, GUO Xing, CUI Xiwen. Research on fast calculation method of system static voltage stability limit and stability margin based on thevenin equivalence [J]. Shanxi Electric Power, 2020(3): 6-12(in Chinese).
- [163] 刘明松, 张伯明, 姚良忠, 等. 基于 PMU 和改进戴维南等值模型的电压稳定在线监视[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 6-10.
LIU Mingsong, ZHANG Boming, YAO Liangzhong, et al. On-line voltage stability monitoring based on PMU and improved thevenin equivalent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 6-10(in Chinese).
- [164] VERBIC G, GUBINA F. A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 576-581.
- [165] 杨德友, 王博, 蔡国伟, 等. 适用于电力系统非平稳功率振荡信号特征提取的自适应迭代滤波算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5431-5439.
YANG Deyou, WANG Bo, CAI Guowei, et al. Extracting oscillation modes from nonstationary signals for power system using adaptive local iterative filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5431-5439(in Chinese).
- [166] 宋方方, 毕天姝, 杨奇逊. 基于暂态能量变化率的电力系统多摆稳定性判别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 13-18.
SONG Fangfang, BI Tianshu, YANG Qixun. Multi-swing stability assessment approach based on variation rate of

- transient energy for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 13-18(in Chinese).
- [167] 王俊, 王建全. 一种新颖的电力系统实时紧急控制方案[J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 29-33.
WANG Jun, WANG Jianquan. A novel real-time emergency control scheme for power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(S1): 29-33(in Chinese).
- [168] 岑炳成, 唐飞, 廖清芬, 等. 应用功角空间降维变换的相轨迹判别系统暂态稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2726-2734.
CEN Bingcheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Transient stability detection using phase trajectory obtained by dimension reduction transform of power angles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2726-2734(in Chinese).
- [169] 张保会, 杨松浩, 王怀远. 电力系统暂态稳定性闭环控制(一)——简单电力系统暂态不稳定判别原理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 1-6.
ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability (1): transient instability detection principle of simple power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 1-6(in Chinese).
- [170] 吴茜, 张东霞, 刘道伟, 等. 基于随机矩阵理论的电网静态稳定态势评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5414-5420.
WU Qian, ZHANG Dongxia, LIU Daowei, et al. A method for power system steady stability situation assessment based on random matrix theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5414-5420(in Chinese).
- [171] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35.
BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35(in Chinese).
- [172] 刘俐, 李勇, 曹一家, 等. 基于支持向量机和长短期记忆网络的暂态功角稳定预测方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 129-136.
LIU Li, LI Yong, CAO Yijia, et al. Transient rotor angle stability prediction method based on SVM and LSTM network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 129-136(in Chinese).
- [173] ZWEIGLE G C, VENKATASUBRAMANIAN V. Wide-area optimal control of electric power systems with application to transient stability for higher order contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2313-2320.
- [174] TIAN Fang, ZHANG Xing, YU Zhihong, et al. Online decision-making and control of power system stability based on super-real-time simulation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(1): 95-103.
- [175] SANGIOVANNI-VINCENTELLI A, CHEN Likuan, CHUA L. An efficient heuristic cluster algorithm for tearing large-scale networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1977, 24(12): 709-717.
- [176] HASHIM N, HAMZAH N R, ARSAD P M, et al. Modeling of power system dynamic devices incorporated in dynamic computation for power systems (DCPS) for transient stability analysis[C]//2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2011: 647-652.
- [177] BUI U, OVERBYE T J, SHETYE K. Geomagnetically induced current sensitivity to multiple substation grounding resistances[C]//2017 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). College Station, TX, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [178] CHEN Yong, JIN Hai, JIANG Han, et al. Implementation and optimization of GPU-based static state security analysis in power systems[J]. Mobile Information Systems, 2017: 1897476.
- [179] ZHAO Jinli, LIU Juntao, LI Peng, et al. GPU based parallel matrix exponential algorithm for large scale power system electromagnetic transient simulation[C]//2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia). Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2016: 110-114.
- [180] XIA Shiwei, BU Siqi, HU Junjie, et al. Efficient transient stability analysis of electrical power system based on a spatially paralleled hybrid approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1460-1473.
- [181] ARISTIDOU P, LEBEAU S, VAN CUTSEM T. Power system dynamic simulations using a parallel two-level schur-complement decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3984-3995.
- [182] 周诗嘉, 林卫星, 姚良忠, 等. 两电平 VSC 与 MMC 通用型平均值仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 138-145.
ZHOU Shijia, LIN Weixing, YAO Liangzhong, et al. Generic averaged value models for two-level VSC and MMC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 138-145(in Chinese).
- [183] 鄂志君, 应迪生, 陈家荣, 等. 动态相量法在电力系统仿真中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 42-47.
E Zhijun, YING Disheng, CHEN Jiarong, et al. Application of dynamic phasor in power system simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 42-47(in Chinese).
- [184] SAAD H, DUFOUR C, MAHSEREDJIAN J, et al.

- Real time simulation of MMCs using the state-space nodal approach[C]//Proceedings of International Conference on Power Systems Transients. Vancouver, Canada: IPST, 2013: 18-20.
- [185] 唐文虎, 牛哲文, 赵柏宁, 等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 2985-2999.
- TANG Wenhui, NIU Zhewen, ZHAO Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985-2999(in Chinese).
- [186] 杨维全, 朱元振, 刘玉田. 基于卷积神经网络的暂态电压稳定快速评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 46-51, 136.
- YANG Wei-quan, ZHU Yuan-zhen, LIU Yu-tian. Fast assessment of transient voltage stability based on convolutional neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 46-51, 136(in Chinese).
- [187] 王怀远, 陈启凡. 基于代价敏感堆叠变分自动编码器的暂态稳定评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2213-2220.
- WANG Huaiyuan, CHEN Qifan. A transient stability assessment method based on cost-sensitive stacked variational auto-encoder[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2213-2220(in Chinese).
- [188] 刘威, 张东霞, 王新迎, 等. 基于深度强化学习的电网紧急控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 109-119.
- LIU Wei, ZHANG Dongxia, WANG Xinying, et al. A decision making strategy for generating unit tripping under emergency circumstances based on deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 109-119(in Chinese).
- [189] WANG Chunyi, LIU Yutian. Group intelligent decision support system for power system skeleton restoration [C]//2008 20th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Dayton, OH, USA: IEEE, 2008: 126-129.
- [190] 卢锦玲, 郭鲁豫. 基于改进深度残差收缩网络的电力系统暂态稳定评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2233-2244.
- LU Jinling, GUO Luyu. Power system transient stability assessment based on improved deep residual shrinkage network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2233-2244(in Chinese).
- [191] 王铮澄, 周艳真, 郭庆来, 等. 考虑电力系统拓扑变化的消息传递图神经网络暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2341-2349.
- WANG Zhengcheng, ZHOU Yanzhen, GUO Qinglai, et al. Transient stability assessment of power system considering topological change: a message passing neural network-based approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2341-2349(in Chinese).
- [192] XIE Jian, SUN Wei. A transfer and deep learning-based method for online frequency stability assessment and control[J]. IEEE Access, 2021(9): 75712-75721.
- [193] CONTE F, MASSUCCO S, PAOLONE M, et al. Frequency stability assessment of modern power systems: models definition and parameters identification [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2020(23): 100384.
- [194] XIE Jian, SUN Wei. A transfer and deep learning-based method for online frequency stability assessment and control[J]. IEEE Access, 2021(9): 75712-75721.
- [195] KRUSE J, SCHÄFER B, WITTHAUT D. Revealing drivers and risks for power grid frequency stability with explainable AI[J]. Patterns, 2021, 2(11): 100365.
- [196] RAKHSHANI E, GUSAIN D, SEWDIEN V, et al. A key performance indicator to assess the frequency stability of wind generation dominated power system [J]. IEEE Access, 2019(7): 130957-130969.
- [197] ZHANG Yi, SHI Xiaohan, ZHANG Hengxu, et al. Review on deep learning applications in frequency analysis and control of modern power system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(136): 107744.
- [198] KUMAR S, TYAGI B, KUMAR V, et al. PMU-based voltage stability measurement under contingency using ANN[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71): 9000111.
- [199] LIU Songkai, SHI Ruoyuan, ZHANG Tao, et al. An integrated scheme for static voltage stability assessment based on correlation detection and random bits forest [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(130): 106898.
- [200] XU Yan, ZHANG Rui, ZHAO Junhua, et al. Assessing short-term voltage stability of electric power systems by a hierarchical intelligent system[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1686-1696.
- [201] 朱林, 张健, 陈达, 等. 面向暂态电压稳定评估的卷积神经网络输入特征构建方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 85-93.
- ZHU Lin, ZHANG Jian, CHEN Da, et al. Construction method for input features of convolutional neural network for transient voltage stability assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 85-93(in Chinese).
- [202] HAGMAR H, TONG L, ERIKSSON R, et al. Voltage instability prediction using a deep recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 17-27.
- [203] 张凤, 李兴源, 胥威汀, 等. 基于交叠概率的暂态电

- 压稳定评估特征选择[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 116-121.
- ZHANG Feng, LI Xingyuan, XU Weiting, et al. An overlapping probability based feature selection method for evaluation of transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 116-121(in Chinese).
- [204] XU Yan, ZHANG Rui, ZHAO Junhua, et al. Assessing short-term voltage stability of electric power systems by a hierarchical intelligent system[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1686-1696.
- [205] HUANG Bin, WANG Jianhui. Applications of physics-informed neural networks in power systems-a review [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 572-588.
- [206] LUO Yonghong, LU Chao, ZHU Lipeng, et al. Data-driven short-term voltage stability assessment based on spatial-temporal graph convolutional network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(130): 106753.
- [207] 陈振, 肖先勇, 李长松, 等. 基于代价敏感极端学习机的电力系统暂态稳定评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 118-123.
- CHEN Zhen, XIAO Xianyong, LI Changsong, et al. Power system transient stability assessment based on cost-sensitive extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 118-123(in Chinese).
- [208] 姜涛, 刘方正, 陈厚合, 等. 基于多通道快速傅里叶小波变换的电力系统主导振荡模式及模态协同辨识方法研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 125-132.
- JIANG Tao, LIU Fangzheng, CHEN Houhe, et al. Cooperated identification method of dominant oscillation modes and mode shapes for power system based on multi-channel fast Fourier transform based continuous wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 125-132(in Chinese).
- [209] PANDE P W, CHAKRABARTI S, SRIVASTAVA S C, et al. A clustering-based approach for estimation of low frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4666-4677.
- [210] 冯双, 崔昊, 陈佳宁, 等. 人工智能在电力系统宽频振荡中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7889-7904.
- FENG Shuang, CUI Hao, CHEN Jianing, et al. Applications and challenges of artificial intelligence in power system wide-band oscillations[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7889-7904(in Chinese).
- [211] MENG Yao, YU Zhe, LU Ning, et al. Time series classification for locating forced oscillation sources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1712-1721.
- [212] UL BANNA H, SOLANKI S K, SOLANKI J. Data-driven disturbance source identification for power system oscillations using credibility search ensemble learning[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(2): 293-300.
- [213] 崔昊, 冯双, 陈佳宁, 等. 基于自编码器与长短期记忆网络的宽频振荡广域定位方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 194-201.
- CUI Hao, FENG Shuang, CHEN Jianing, et al. Wide-area location method of wide-band oscillations based on autoencoder and long short-term memory network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 194-201(in Chinese).
- [214] 冯双, 陈佳宁, 汤奕, 等. 基于 SPWVD 图像和深度迁移学习的强迫振荡源定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 78-87.
- FENG Shuang, CHEN Jianing, TANG Yi, et al. Location method of forced oscillation source based on SPWVD image and deep transfer learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 78-87(in Chinese).
- [215] 陈剑, 杜文娟, 王海凤. 采用深度迁移学习定位含直驱风机次同步振荡源机组的方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 179-190.
- CHEN Jian, DU Wenjuan, WANG Haifeng. A method of locating the power system subsynchronous oscillation source unit with grid-connected PMSG using deep transfer learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 179-190(in Chinese).
- [216] 刘灏, 任小伟, 田建南, 等. 基于 K-ESPRIT 的快速宽频测量方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 186-192.
- LIU Hao, REN Xiaowei, TIAN Jiannan, et al. Fast wide-frequency measurement method based on kurtosis-estimation of signal parameters via rotation invariance technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 186-192(in Chinese).
- [217] 马宁宁, 谢小荣, 唐健, 等. “双高” 电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2021, 61(5): 457-464.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, TANG Jian, et al. Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2021, 61(5): 457-464(in Chinese).
- [218] LIN Junjie, SONG Jie, LU Chao. Synchrophasor data analytics: transmission line parameters online estimation for energy management[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2022, 69(3): 671-681.
- [219] SONG Wenchao, LU Chao, LIN Junjie, et al. A low-quality PMU data identification method with

- dynamic criteria based on spatial-temporal correlations and random matrices[J]. *Applied Energy*, 2023(343): 121213.
- [220] LIN Junjie, SU Yinsheng, CHENG Yunfeng, et al. A robust complex-domain state estimator using synchrophasor measurements[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018(96): 412-421.
- [221] LIN Junjie, TU Mingquan, HONG Hongbin, et al. Spatiotemporal graph convolutional neural network-based forecasting-aided state estimation using synchrophasors[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 16171-16183.
- [222] LIN Junjie, LU Chao, SONG Wenchao, et al. Synchrophasor-based online state estimated in large-scale power grid[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023, 9(5): 1613-1622.
- [223] 王颖. 基于类噪声数据的负荷模型参数辨识及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
WANG Ying. Ambient signal based load model parameter identification and its application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019(in Chinese).
- [224] ZHANG Xinran, HILL D J, LU Chao, et al. A hierarchical framework for ambient signals based load modeling: exploring the hidden quasi-convexity[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5780-5791.
- [225] 吴沛萱, 张欣然, 周晋航, 等. 基于类噪声信号的等值负荷惯量两阶段辨识方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(9): 57-63.
WU Peixuan, ZHANG Xinran, ZHOU Jinhang, et al. Ambient signal-based two-stage equivalent load inertia identification method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(9): 57-63(in Chinese).
- [226] ZHANG Xinran, HILL D J, LU Chao. Identification of composite demand side model with distributed photovoltaic generation and energy storage[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 326-336.
- [227] WU Peixuan, ZHANG Xinran, LU Chao, et al. A composite load model aggregation method and its equivalent error analysis[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023(150): 109098.
- [228] WANG Ying, LU Chao, WU Peixuan, et al. Revealing the relationship between load aggregation and the percentage of the dynamic component with field ambient signals[J/OL]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2024. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10436590>.
- [229] ZHU Lipeng, LU Chao, KAMWA I, et al. Spatial-temporal feature learning in smart grids: a case study on short-term voltage stability assessment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1470-1482.
- [230] ZHU Lipeng, LU Chao, SUN Yuanzhang. Time series shapelet classification based online short-term voltage stability assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1430-1439.
- [231] 朱利鹏, 陆超, 黄河, 等. 基于时序轨迹特征学习的暂态电压稳定评估[J]. *电网技术*, 2019, 43(6): 1922-1931.
ZHU Lipeng, LU Chao, HUANG He, et al. Transient voltage stability assessment based on sequential trajectory feature learning[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(6): 1922-1930(in Chinese).
- [232] ZHU Lipeng, HILL D J, LU Chao. Hierarchical deep learning machine for power system online transient stability prediction[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 2399-2411.



韩英铎

收稿日期: 2024-07-29。

作者简介:

韩英铎(1938), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力电子与柔性输电技术, hanyd@mail.tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 陆超(1977), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统智能分析与控制、轨道交通牵引供电技术等, luchao@tsinghua.edu.cn;

宋文超(1996), 男, 博士, 研究方向为基于同步相量测量的状态估计和潮流计算, swcgryz@163.com;

吴沛萱(1997), 男, 博士, 研究方向为负荷建模及负荷可控性分析, 1048500856@qq.com;

方浩男(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为负荷建模和辨识, fhn22@mails.tsinghua.edu.cn;

刘维承(2001), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、数据驱动与人工智能应用技术, weicheng0309@outlook.com。

(责任编辑 邱丽萍)

Review and Prospects of Online Calculation and Analysis Techniques for Power System Security and Stability

HAN Yingduo, LU Chao*, SONG Wenchao, WU Peixuan, FANG Haonan, LIU Weicheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University)

KEY WORDS: stability and safety calculation; real-time state awareness; dynamic parameter identification; online stability assessment

Online security and stability calculation and analysis technologies provide crucial support for the accurate perception of real-time grid operation status and correct decision-making for the power dispatching sector. With the increasingly complex and stochastic dynamic characteristics of new power systems, traditional online security and stability analysis systems based on steady-state and asynchronous measurement data have shown deficiencies in real-time and accuracy. In contrast, the new generation of online security and stability analysis technology based on dynamic and synchronous phasor measurement data has attracted attention from research and engineering communities both domestically and internationally.

The three core components of security and stability calculation and analysis are shown in Fig. 1, including state awareness, dynamic parameter identification and online stability assessment. State awareness provides the initial values of power flow and the network topology for online stability assessment, as well as dynamic parameter identification provides the dynamic model parameters for online stability assessment. Focusing on these three core components, this paper reviews the key technologies and bottlenecks involved in the existing online security and stability calculation and analysis systems.

For state awareness, the current research status of the three parts strongly related is introduced, which are state estimation, network topology analysis and parameter identification, and online power flow calculation.

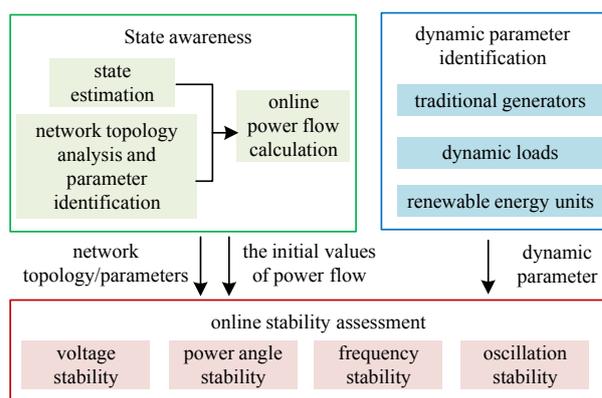


Fig. 1 The key techniques of online security and stability calculation and analysis systems

For dynamic parameter identification, the ideas and identification methods of common dynamic components in power systems, including traditional generators, dynamic loads and renewable energy units, are introduced.

For online stability assessment, the basic ideas and methods are introduced from both model-driven and data-driven technical routes for four common stability problems, which are voltage stability, power angle stability, frequency stability, and oscillation stability, respectively.

Finally, the overall framework and possible future research directions for the next generation of online security and stability analysis systems are proposed, with the aim of supporting the development of real-time security and stability analysis, operation dispatching, and auxiliary decision-making, enhancing the abilities of power system assessment and decision-making, and ensuring the safe and stable operation of modern power systems, respectively.