

“双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统

马宁宁¹, 谢小荣¹, 唐 健², 陈 垒¹

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学 电机工程与应用电子技术系), 北京 100084;

2. 国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010010)

摘 要: 高比例可再生能源和高比例电力电子设备(简称“双高”)接入电网引起的宽频振荡问题严重影响电力设备正常工作和电力系统安全运行。面对宽频振荡的多模态及振荡频率时变等新特征, 如何实现宽频振荡的在线监测与分析是“双高”电力系统面临的重要问题之一。现有广域监测系统可实时监测和分析电网的低频振荡动态特性, 但无法涵盖宽频电磁振荡。为解决该问题, 该文提出了“双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统框架。该系统兼顾现有广域监测系统的功能, 同时具备监测和分析“双高”背景下宽频电磁振荡的能力。基于该系统提出了宽频状态估计、宽频振荡溯源及宽频振荡安全风险评估的方法, 并通过模拟振荡场景验证了该系统的有效性。最后, 分析了该系统在“双高”电力系统中的应用前景。

关键词: “双高”电力系统; 可再生能源发电; 电力电子设备; 宽频振荡; 广域监测与预警系统

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2021)05-0457-08

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.21.014

Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems

MA Ningning¹, XIE Xiaorong¹, TANG Jian², CHEN Lei¹

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: The wide-band oscillation problem caused by the high penetration of renewable energy sources and the high proportion of power electronic equipment, “double-high” systems, seriously affects normal power equipment operation and power system stability. Such systems require on-line monitoring and analyses of the multi-mode and time-varying wide-band oscillation frequency. Traditional wide-area measurement systems (WAMS) can monitor

low-frequency oscillations in power grids in real-time. However, they cannot monitor wide-band electromagnetic oscillations. This paper presents a wide-area measurement and early warning system (WAMWS) for monitoring wide-band oscillations in “double-high” power systems. This system has all the functions in the existing WAMS while monitoring wide-band oscillations in “double-high” power systems. The warning system provides wide-band state estimates, oscillation source identification, and security and stability evaluations of the wide-band oscillations. The effectiveness of this system for monitoring wide-band oscillations is verified in simulations. Finally, this paper considers applications of WAMWS.

Key words: “double-high” power systems; renewable power generation; power electronic equipment; wide-band oscillations; wide-area measurement and early warning systems

随着大规模新能源并网、高压直流输电网络形成及电力电子负荷投运, 现代电力系统表现出高比例可再生能源和高比例电力电子设备(简称“双高”)特征^[1-3]。“双高”电力系统中电力电子设备与电网之间相互作用, 会引起频率在几 Hz 到数千 Hz 范围内的宽频振荡^[4-5]。宽频振荡可能会损坏电力设备, 导致新能源发电机组停运等, 严重影响设备安全和威胁系统稳定运行, 成为制约新能源高效消纳的重要因素。因此, 掌握宽频振荡的行为特征、探索宽频振荡的机理和实现宽频振荡的抑制, 是“双高”电力系统亟须解决的问题。

电力电子设备的异构型、非线性、时变性、不

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年项目(51925701);

国家自然科学基金重点项目(51737007);

清华大学-新南威尔士大学自主科研国际合作专项
(2020Z02NSW)

作者简介: 马宁宁(1987—), 男, 博士后。

通信作者: 谢小荣, 教授, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

确定性和复杂性,使“双高”电力系统宽频振荡分析面临诸多挑战^[6-7]。目前宽频振荡分析采用的方法主要是解析法和时域仿真分析法。其中,解析法可以得到物理意义明确的解析解,能够从定量的角度“完全透彻”地来分析宽频振荡机理及影响因素,但为了计算方便通常需要对电力系统模型进行简化等值处理,而且解析计算结果无法反映宽频振荡的整体变化行为^[8-9];时域仿真分析法是利用数值方法求解由各电力设备按照电网拓扑结构组成的电力系统数学模型,本质是求解代数-微分方程(组),然后根据计算结果分析宽频振荡的动态特性^[10-12]。但受电力电子设备多时间尺度、强非线性特征及设备之间耦合作用复杂等多方面的影响,解析法和时域仿真法都存在电气设备模型难以精确获取、无法进行实时在线分析的问题。

目前的广域监测系统(wide area measurement system, WAMS)是以同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)的监测数据为基础,能够实现大跨度电力系统动态的实时在线监测、分析和控制^[13]。但现有PMU只能监测工频(50或60 Hz)附近的相量信息,不能涵盖宽频振荡(如次同步振荡、超同步振荡和中高频电磁振荡等)的频率变化范围^[14]。因此,传统WAMS系统的应用主要集中于电网运行特征分析^[15]、低频振荡分析^[16]、暂态稳定控制^[17]等方面,无法实现宽频振荡的监测和分析。

为了解决该问题,本文提出了“双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统(wide-area measurement and early warning system, WAMWS)框架。系统子站可实现基波、谐波和间谐波相量的采集和计算;系统主站对子站捕获的同步相量数据进行综合分析,能够实现宽频振荡的在线监测与预警(如宽频状态估计、振荡溯源、宽频振荡安全风险评估、全景显示等),可为调度人员提供有效的决策依据。最终实现宽频振荡的保护控制,以达到消除宽频振荡、降低系统运行风险的目的。本文通过算例验证了该系统能够满足“双高”电力系统宽频振荡动态特性监测与分析的要求;最后,对该系统在宽频振荡稳定性评估、保护与控制等方面的应用前景进行了展望。

1 宽频振荡特征及危害

与传统电力系统相比,“双高”电力系统的“源-网-荷”都在向电力电子化方向发展。在电源侧,新

能源并网通常需要电力电子变流器来提高新能源发电效率及并网稳定性^[18];在电网侧,输电网络采用交直流混合形式运行,其中柔性直流输电系统需要采用大量可控性电力电子元件使其能够在四象限内灵活运行,另外还有大量柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)设备接入以保障电网的稳定运行^[19];在负荷侧,以电动汽车、轨道交通、大型计算机等为代表的电力电子型负荷接入电网,同时大规模分布式电源(如风电、光伏等)并网也给配网侧带来大量电力电子设备^[20]。

电力电子设备具有调节灵活、响应速度快的特征,给电力系统调控带来方便,但同时也给电力系统的运行带来新的振荡问题。例如,2011年以来河北沽源地区的风电场多次发生由风电机组变流器与电网之间相互作用引起的振荡频率为3~10 Hz的次同步振荡^[21];2015年,云南鲁西柔性直流输电系统的百色站、永安站发生了1270 Hz左右的振荡,该振荡主要是由柔直系统的负电阻、电感特性与电网的电容特性相互作用引起的^[22]。电力电子设备之间及其与电网之间相互作用引起振荡频率在较宽范围内变化的电磁振荡,通常称为宽频振荡^[23]。“双高”电力系统的宽频振荡一般是由负阻尼引起的发散性振荡,涉及电气设备繁多,而且振荡频率会随电网运行方式及电力电子设备运行点的变化而变化,表现出多模态和时变特征。例如,2015年7月1日新疆哈密地区由直驱风电机组引起次同步振荡,整个振荡过程中次同步振荡频率的变化趋势如图1所示^[24]。可以看出,在此振荡事故中次同步振荡频率在27~33 Hz随时间逐渐变化,具有明显的时变特性,而且在11:52—11:56时间段振荡频率与花园电厂3#火发电机组的轴系扭振频率耦合,引起火发电机组轴系扭振导致机组停运。

宽频振荡不是单一模式的局部振荡,而是涉及多电气设备的全局复杂问题,对电网造成的危害主要表现在:1)宽频电磁振荡危及新能源发电设备的正常运行,如次/超同步振荡造成风电机组撬棒电路损坏;2)宽频电磁振荡给电网带来了诸多电能质量问题,造成电力设备故障或损坏,如额外增加电力电子设备的过流应力,影响电气设备的使用寿命;3)宽频电磁振荡引起电网电压或电流越限,使电力系统保护装置动作,可能会导致大规模新能源发电机组或传统发电机组脱网;

4) 宽频振荡频率与电网中旋转设备的轴系频率相同时,使旋转设备转轴产生严重的扭转振动,导致旋转设备停运引起电网功率振荡,从而造成大规模的停电事故。

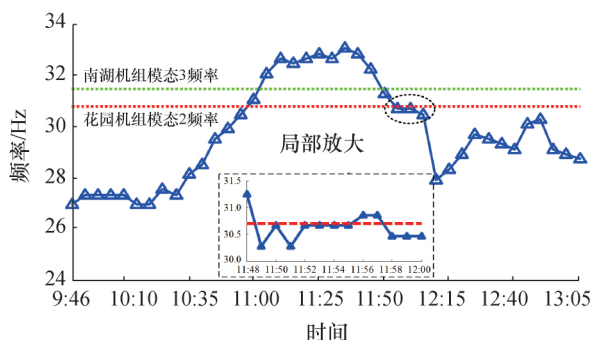


图1 (网络版彩图)次同步振荡频率的演变过程

综上,电力电子设备和/或新能源并网引起的宽频振荡对电能质量和系统稳定性都造成了严重影响。如何从设备级到系统级的角度,建立可靠的宽频振荡监测、分析和控制系统,是目前“双高”电力系统宽频振荡研究面临的重要问题之一。宽频振荡监测设备应满足可同时监测多个振荡模态且振荡频率时变的要求;广域监测系统应具有实现电磁振荡实时监测和分析,并向调度人员提供必要预警和决策信息的能力,最终实现宽频振荡的抑制。

2 宽频振荡广域监测与预警系统

2.1 系统框架

WAMWS的基本框架结构与传统WAMS的结构类似,如图2所示。该系统主要由子站和主站2部分构成,其中子站包含多个可安装于风电、光伏等新能源场站和变电站的宽频振荡监测单元(WOMU)、宽频振荡数据集中器(WODC);主站主要是对采集的宽频相量数据进行分析,包含宽频振荡数据分析中心(DAC)、实时数据库和历史数据库等。

2.2 系统子站

WOMU是以电力系统电压、电流及开关量信号为输入,实时检测基波、谐波和间谐波的同步相量,进而实现低频振荡、次同步振荡、超同步振荡和中高频等多模态振荡监测、预警的新型测量装置,适合含电力电子设备和/或可再生能源机组的电力系统,可为解决低频功率振荡、宽频电磁振荡和电能质量问题提供数据支撑,是保障电力系统稳

定高效运行的关键性基础设备。其中,同步相量监测是WOMU的基本功能,主要监测步骤为:1)实时采集母线电压和线路电流,并将模拟量转换成数字量;2)基于实时采集的电压和电流信号,计算所关注振荡模态正、负、零序的相量信息,包括频率、振幅和相位等;3)计算各振荡模态对应的复功率和阻抗;4)对所有相量数据进行打包,并标记同步时标,然后按照预定的通信协议发送至WODC或DAC。

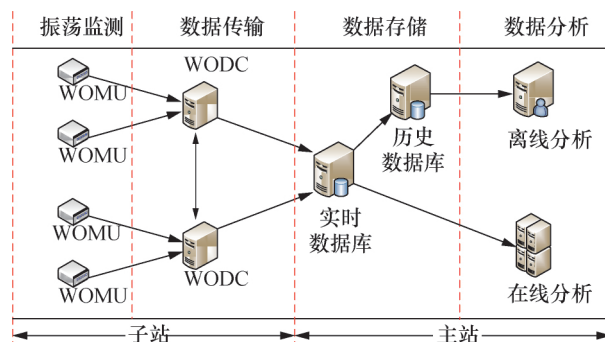


图2 WAMWS的结构示意图

WODC作为数据中转存储设备,从多个WOMU接收同步相量数据,对相量数据进行缓存和备份,并中转给监测主站,在系统故障或者通信中断时可保障数据的可用性。

2.3 系统主站

主站是同步相量数据及其他监测数据的存储中心,同时也是实现高级应用的计算中心。主站可采用松耦合的方式嵌入电力系统运行监控系统(Operation control system, OCS),以减小对现有OCS运行造成的影响,避免额外开发工作。另外,主站也可以作为单独系统运行,以满足更高的兼容性、稳定性和扩展性要求。本文按照后一种情况对主站的功能进行阐述。

主站DAC收集来自WOMU和WODC的相量数据,根据时标对相量数据进行重新同步,并存储到实时或历史数据库,以供后续应用调用。WAMWS主站中的应用根据用途和性质可分为基础应用和高级应用。其中,基础应用包括振荡数据采集、数据交换服务、数据分析工具、视图显示等;高级应用通过调用数据库中的数据信息实现宽频振荡综合分析,主要包括宽频相量处理、宽频状态估计、宽频振荡溯源及宽频振荡风险评估等。另外,根据不同的设计要求可对该系统主站的高级应用进行扩展,以满足电力系统的多种应用场景。

2.4 WAMWS 的特点

WAMWS 是传统 WAMS 升级版, 其中, 子站的 WOMU 是传统 PMU 的增强版, 可实现多个模态相量信息的监测; 主站的高级应用基于实时监测数据可实现多振荡模态的在线监测、分析和预警等功能。在实际应用中, 可重新建立一套新的系统, 也可通过合理地改造现有 PMU/WAMS 来实现。子站与主站之间可采用与 WAMS 相同的基础通信设施, 但需对子站-主站之间的传输协议(IEEE C37.118.1-2011 或 GBT 26865.2-2011)和实时数据库、历史数据库的存储结果进行适当扩展, 以满足宽频相量数据的传输和存储要求; 主站的高级应用可基于现有 WAMS 控制中心的服务器来实现以减少成本投入。

从上述分析可以看出, WAMWS 与传统 WAMS 的本质区别在于: 1) WAMWS 子站采用一套新型相量测量装置来实现宽频电磁振荡的监测; 2) WAMWS 主站不仅能够实现低频振荡分析, 还可以对次同步振荡、超同步振荡及中高频振荡等进行实时在线分析和预警; 3) 由于宽频电磁振荡具有多振荡模态特征, 监测数据具有容量大、实时性要求高的特点, WAMWS 中数据传输协议及数据存储方式都需要多数据通道。

3 宽频振荡监测与预警

3.1 宽频相量处理

主站对各子站发来的相量数据, 按照数据时标信息将其置于实时数据库和/或历史数据库, 从而获得各时间断面的宽频相量信息。但不同位置的 WOMU 对同一振荡模态监测到的振荡频率可能会存在一定差异, 而且宽频振荡可能会存在多个振荡模态。因此, 需要对分布于不同位置的同一振荡模态进行“统一化”处理, 即用相同的振荡频率来描述分布于电网不同位置的相同振荡模态。首先, 采用聚类分析法对同一时间断面所有监测线路的相量按频率进行聚类, 将其分为 n 个簇集, 即认为该时间断面含有 n 个振荡模态; 然后, 分别对每一簇集进行频率“统一化”处理, 得到不同振荡模态的振荡频率。在频率“统一化”处理过程中, 振荡频率的测量精度与模态电流幅值具有强相关性, 即认为模态幅值越大, 测量到的相应振荡频率就越精确。因此, 针对某个振荡模态频率可用不同位置测量的模态电流幅值和模态频率近似计算:

$$f_s = \frac{\sum_{i=1}^m I_{si} f_{si}}{\sum_{i=1}^m I_{si}} \quad (1)$$

式中: s 表示簇集序号, $s \leq n$; m 表示簇集 s 中包含的监测点数量; f_{si} 和 I_{si} 分别表示簇集 s 中第 i 个监测点采集的模态频率和模态电流幅值。

3.2 宽频状态估计

宽频状态估计是传统状态估计的扩展, 针对同一振荡模态下的电压和电流相量进行处理, 以得到电力系统的实时状态。宽频状态估计可纠正或剔除不良数据, 以提高监测数据精度和准确性, 是主站各高级应用实现的前提和基础。对于任意振荡频率为 f_s 的模态, 所有测量支路的线路电流和节点电压关系可表示为

$$I_m = [Y(f_s)A + Y_s(f_s)]U + e_i. \quad (2)$$

式中: I_m 表示电流相量的测量值; U 是节点电压相量的状态向量; $Y(f_s)$ 是由测量支路串联导纳构成的对角矩阵; $Y_s(f_s)$ 是由测量支路末端并联导纳构成的矩阵; A 是系数矩阵; e_i 代表电流的测量噪声, 一般认为测量噪声服从独立 Gauss 分布^[25]。

按照可观性原则, 在电网中适当位置部署 WOMU, 测量得到的节点电压和线路电流相量数据(测量值)作为状态估计的输入, 测量值与状态向量之间的关系可表示为

$$Z = \begin{bmatrix} U_m \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ Y(f_s)A + Y_s(f_s) \end{bmatrix} U + e = BU + e. \quad (3)$$

式中: E 是系数矩阵, 元素为 1 或 0 (1 表示对应节点安装有测量装置, 0 表示对应节点未安装测量装置); e 是误差向量; B 是系数矩阵。

一般 B 不是一个方阵, 但由于系统的可观性, 有 $\text{rank}(B) = N$ (N 表示监测系统的节点数)成立, 因此 B 存在广义逆。利用加权最小二乘估计法求解式(3), 得到状态向量为

$$U = (B^T W^{-1} B)^{-1} B^T W^{-1} Z = MZ. \quad (4)$$

式中: W 是预设的权重矩阵, 可以根据实际需要进行调整; M 是整体系数矩阵。

利用状态向量 U , 可以计算得到支路电流:

$$I = [Y(f_s)A + Y_s(f_s)]U. \quad (5)$$

由上述方法可以估计出每个振荡模态的相量数据, 进一步将相量数据用于 WAMWS 各高级应用, 例如基于状态估计结果计算各模态潮流在电网中的分布情况, 然后进行振荡源识别和振荡风险评估。

3.3 宽频振荡溯源

电力系统中将诱发振荡的电力元件定义为次同步振荡源,通常振荡源会向系统提供振荡能量,因此宽频振荡的振荡源可通过电网元件吸收或释放的模态功率直观地判断。对于单端口电力设备或电力网络,其第 i 个振荡模态下的复功率可通过相应模态的端口电压和电流计算得到,即

$$S_h = P_h + jQ_h =$$

$$U_h I_h \cos(\phi_{U_h} - \phi_{I_h}) + j U_h I_h \sin(\phi_{U_h} - \phi_{I_h}). \quad (6)$$

式中: U 、 I 分别表示电压、电流幅值; ϕ_U 、 ϕ_I 分别表示电压、电流相位; P 、 Q 分别表示相应模态下电力设备(网络)吸收的有功功率和无功功率; h 表示振荡模态序号。对于多端口设备,其吸收或释放的功率为其各端口功率之和。因此,根据各电力设备或电力网络端口功率即可进行振荡溯源。具体判据为:

1) $P < 0$ 表示该电力元件或电力网络为该模态振荡的有功功率源,反之则为有功功率汇;

2) $Q < 0$ 表示该电力元件或电力网络为该模态振荡的无功功率源,反之则为无功功率汇。

3.4 宽频振荡风险评估

1) 基于数据响应的评估方法。

振荡阻尼系数是反映振荡变化趋势的重要参数。可以从数据响应的角度,基于实测电压/电流相量数据进行振荡阻尼辨识,以此对宽频振荡风险进行评估。假设实测数据的振荡幅值随时间呈指数形式变化,即

$$x(t) = A_{t_k} e^{-\sigma(t-t_k)} \sin(2\pi f t_k + \theta), \quad t \in [t_k, t_k + mT_s]. \quad (7)$$

式中: A 是模态幅值; f 是振荡频率; θ 为模态相位; k 表示采样点的数量; m 是数据窗口的长度; T_s 是采样周期; t_k 表示当前采样时刻; σ 是阻尼系数。

通过振荡幅值构成的时间序列,可在不同时刻估算振荡阻尼系数^[26],即

$$\sigma(t_k) = \frac{\ln \frac{A(t_0)}{A(t_k)}}{2\pi(k-1) \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi(k-1)} \ln \frac{A(t_0)}{A(t_k)} \right)^2}}. \quad (8)$$

为了描述所有测量点的振荡模态特征,可通过加权平均近似计算系统整体阻尼系数:

$$\sigma_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sigma_i. \quad (9)$$

式中 M 是系统 MOMU 的数量。

若 σ_s 小于或等于 0,则判定该振荡不稳定;反之则认为该振荡稳定,振荡分量最后衰减为 0。

2) 基于阻抗网络的评估方法。

文[24, 27]研究表明,系统发生宽频电磁振荡特征时,表现出负电阻/容抗特性的电力设备一般与振荡源相关。因此,可基于实测阻抗对宽频振荡风险进行量化评估。首先,基于实测的电压、电流相量数据,计算电网中各电力设备的阻抗模型;其次,结合已知的输电线路、同步发电机组阻抗,按照电网的拓扑结构建立系统的阻抗网络模型,并沿着振荡路径将其聚合为单一聚合阻抗,即 $Z_s = R_s + jX_s$ ($X_s(f_s)$ 和 $R_s(f_s)$ 分别表示聚合电抗和电阻, f_s 是振荡频率);若 $R_s(f_s) < R_{th}$ (R_{th} 为设定的电阻阈值,通常设为接近于 0 的正数),则表明振荡频率 f_s 对应的模态不稳定。

基于阻抗网络的宽频振荡风险评估方法,可根据各电气设备阻抗模型中电阻的符号来判断该设备是否为振荡源,通过调整系统运行方式或切除振荡源来实现宽频振荡的保护和控制;进一步,根据各振荡模态的实测电压和电流计算得到各模态的有功功率,根据有功功率的分布可实时观测振荡路径,为宽频振荡抑制装置的部署提供重要的信息。基于数据响应的宽频振荡风险评估方法不依赖于电力设备模型和电网拓扑结构,仅取决于实测的电压/电流相量数据,但不能提供用于宽频振荡控制及抑制的有用信息(如振荡源、振荡路径等)。

4 验证算例

以某地区局部电网为例,验证基于 WAMWS 提出的宽频振荡溯源、宽频振荡风险在线评估等高级应用的有效性。该地区电网包含风电场 W_1 、 W_2 、 W_3 ,其中 W_1 汇集于变电站 A , W_2 、 W_3 汇集于变电站 B ;然后通过 220 kV 线路分别汇集到 500 kV 变电站 C 、 D ;最后通过多条 500 kV 线路并网至该系统主网。该地区电网的简化网架结构如图 3 所示,其中各变电站旁标注的数字表示与该站相连的线路数量,220 和 500 kV 线路共计 56 条。该系统 5 个变电站均配置 WOMU 对所有线路进行宽频振荡监测。假设在 $t=0$ s 时风电场 W_1 诱发系统发生次同步振荡,各变电站的 WOMU 监测各线路次同步电流相量和节点电压相量,并将监测到的相量数据上传至主站进行振荡溯源和振荡风险评估。

在 $t=1$ s 时,所有线路各振荡模态的电流幅值

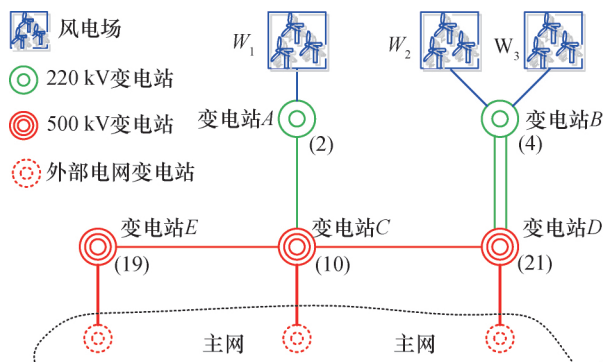


图3 某实际电网结构示意图

分布情况如图4所示(图中显示的电流幅值是折算到220 kV侧的数值)。经过聚类分析得到2个簇集,按照式(1)可计算得到各簇集所表示的模式频率分别为20.01 Hz(模式1)和79.90 Hz(模式2)。

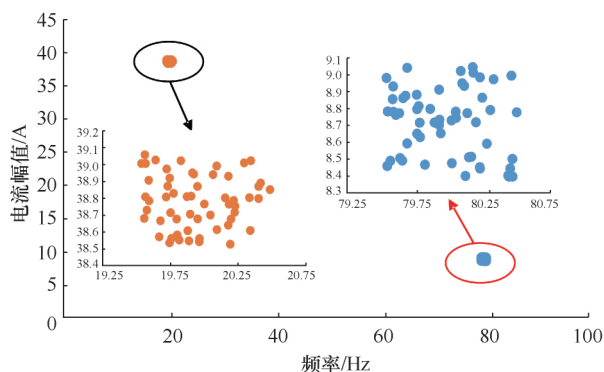


图4 (网络版彩图)各线路模式分布图

基于同一时间断面的电压、电流相量,按照式(6)可计算出该时间断面各模式的潮流分布情况,如模式1在 $t=1$ s时的有功功率分布如图5所示,其中变电站旁标注的是模式电压、线路上标注的是模式电流。可以看出该模式的有功功率从风电场 W_1 流出,而输电线和其他风电场吸收次同步有功功率,从而可判定模式1的振荡源来自风电场 W_1 。

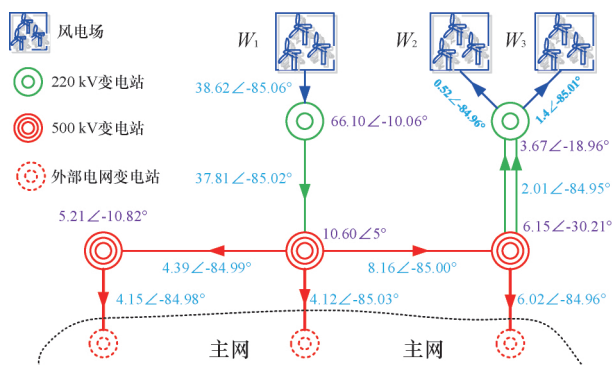


图5 (网络版彩图)模式1潮流分布图

从风电场 W_1 并网线路中监测到的模式1电流幅值变化曲线如图6所示。由电流幅值变化趋势可看出在该运行工况下振荡模式1呈发散趋势。通过式(8)、(9)可以计算出该振荡模式的系统整体阻尼系数为 -0.3 s^{-1} ,说明该振荡模式全局振荡发散。

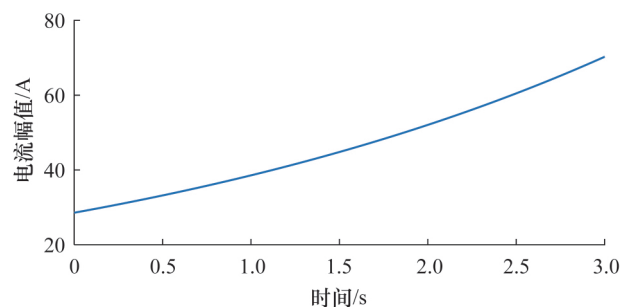


图6 模式1的电流幅值变化曲线

进一步,根据宽频振荡溯源和宽频振荡风险评估结果,可采取相应控制措施切除振荡源或施加抑制策略削弱振荡能量,以保障系统安全稳定运行。另外,将宽频振荡分析结果以曲线和表格形式显示于调度员操作界面,调度人员可直观清晰地掌握目标电网的全局动态特性,从而能够快速采取有效抑制措施。

5 应用前景分析

WAMWS在以下几方面将具有广泛的应用前景:

1) 基于WAMWS的宽频振荡稳定性评估。基于实时监测的宽频振荡数据,结合宽频振荡的相关理论基础,构建衡量系统发生宽频振荡风险的评价指标体系,对“双高”电力系统进行设备级到系统级的安全稳定评估,分析电力系统运行过程中存在的振荡风险;基于稳定性评估结果,从全局角度出发优化和调整电力系统运行方式,构建广域协同防御体系,降低宽频振荡风险。

2) 基于WAMWS的宽频振荡控制。基于实时监测的宽频相量数据,结合宽频振荡特征和机理,形成在线安全控制策略。一方面,根据本地监测信息将控制信号分散反馈至被控对象如新能源机组、直流输电系统等,形成就地闭环控制有效切除宽频振荡源,提高系统运行稳定性;同时,亦可基于广域监测系统远方监测信号和本地监测信号相结合反馈至控制设备,实现广域协同阻尼控制或紧急保护控制,预防宽频振荡发生或实现宽频振荡抑制。

3) 基于实测数据校准电力设备数学模型,尤

其是电力电子设备模型及其相互耦合作用的模型,以提高宽频振荡机理分析的准确性;基于深度学习的电力系统的稳态、动态分析都依赖于大量数据进行模型训练,而 WAMWS 可为其提供可靠的数据保障。另外, WAMWS 在电力系统重大事故的事后分析中也将发挥重要作用,可依据宽频振荡监测结果分析出导致系统发生振荡的电力设备及振荡能量的传播路径,并根据分析结果调整设备或系统运行参数和方式,重塑电力设备或系统阻抗模型,从而提供系统阻尼,避免宽频振荡引起系统事故再次发生。

6 结 论

为解决传统 WAMS 不能应对“双高”电力系统出现的宽频振荡问题,本文构建了 WAMWS 的基本框架。该系统是以宽频振荡监测装置实测数据为基础,实时获取电网动态运行数据,进行监测、分析和控制的有机整体,最终目标是实现电力系统的就地闭环控制、广域协同控制,达到消除或抑制宽频振荡的目的。通过综合分析 WAMWS 所管辖范围内所有子站的相量数据,实现宽频振荡溯源、振荡风险评估及全景显示等功能。

后续以 WAMWS 作为基础框架,可进一步融合稳定性分析方法、保护控制策略、振荡抑制方法等技术,形成一套“双高”电力系统宽频振荡在线分析系统,在宽频振荡数据挖掘、宽频振荡稳定性评估、宽频振荡保护控制、宽频振荡抑制实现及宽频振荡事故反演等多方面都具有潜在的应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Y F, YANG W F, WANG R H, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856. (in Chinese)
- [2] 白建华,辛颂旭,刘俊,等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.
BAI J H, XIN S X, LIU J, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705. (in Chinese)
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU X X, CHEN S Y, LU Z X, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904. (in Chinese)
- [4] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交流直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 1-14.
XIAO X N. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14. (in Chinese)
- [5] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828.
XIE X R, LIU H K, HE J B, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828. (in Chinese)
- [6] 姜齐荣,王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7201.
JIANG Q R, WANG Y Z. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201. (in Chinese)
- [7] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
YUAN X M, CHENG S J, HU J B. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395. (in Chinese)
- [8] 陈新,王赞程,龚春英. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2082-2094, 2223.
CHEN X, WANG Y C, GONG C Y. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094, 2223. (in Chinese)
- [9] LIU H K, XIE X R, GAO X D, et al. Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3118-3128.
- [10] 汤涌,印永华. 电力系统多尺度仿真与试验技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
TANG Y, YIN Y H. Multi-scale simulation and test technology of power systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013. (in Chinese)
- [11] 周俊. 交直流电网数字物理混合仿真技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
ZHOU J. Study on AC/DC power system digital and physical hybrid simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 刘云,蒋卫平,印永华,等. 特高压交直流大电网的数模混合实时仿真系统建模[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 52-56.

- LIU Y, JIANG W P, YIN Y H, et al. Modeling of analogue-digital hybrid real-time simulation system applied in the UHV AC/DC great power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 52-56. (in Chinese)
- [13] 黄丹, 陈树勇, 张一弛. 基于广域测量系统响应时间序列的电力系统暂态稳定在线判别 [J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1016-1025.
- HUANG D, CHEN S Y, ZHANG Y C. Online assessment for transient stability based on response time series of wide-area measurement system [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1016-1025. (in Chinese)
- [14] 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 H, REN X W, TIAN J N, 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)
- [15] KAWABE K, MASUDA M, NANAHAHA T. Excitation control method based on wide-area measurement system for improvement of transient stability in power systems [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 188: 106568.
- [16] 宋墩文, 温渤婴, 杨学涛, 等. 广域量测信息大数据特征分析及应用策略 [J]. 电网技术, 2017, 41(1): 157-163.
- SONG D W, WEN B Y, YANG X T, et al. Big data feature analysis and application strategy of wide area measurement information [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 157-163. (in Chinese)
- [17] ARPANAHI M K, ALHELOU H H, SIANO P. A novel multi-objective OPP for power system small signal stability assessment considering WAMS uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3039-3050.
- [18] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
- KANG C Q, YAO L Z. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11. (in Chinese)
- [19] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
- TANG G F, PANG H, HE Z Y. R&D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771. (in Chinese)
- [20] 祁琪, 姜齐荣, 许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势 [J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4664-4676.
- QI Q, JIANG Q R, XU Y P. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676. (in Chinese)
- [21] WANG L, XIE X R, JIANG Q R, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [22] MAN J F, XIE X R, XU S K, et al. Frequency-coupling impedance model-based analysis of a high-frequency resonance incident in an actual MMC-HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2963-2971.
- [23] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
- MA N N, XIE X R, HE J B, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732. (in Chinese)
- [24] LIU H K, XIE X R, HE J B, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [25] 刘晓莉, 曾祥晖, 黄翊阳, 等. 联合粒子滤波和卷积神经网络的电力系统状态估计方法 [J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3361-3367.
- LIU X L, ZENG X H, HUANG Y Y, et al. State estimation based on particle filtering and convolutional neural networks for power systems [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3361-3367. (in Chinese)
- [26] 李中付, 华宏星, 宋汉文, 等. 用时域峰值法计算频率和阻尼 [J]. 振动与冲击, 2001, 20(3): 5-8.
- LI Z F, HUA H X, SONG H W, et al. Identification of frequencies and damping ratios with time domain peak values [J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(3): 5-8. (in Chinese)
- [27] 谢小荣, 王路平, 贺静波, 等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043-1049.
- XIE X R, WANG L P, HE J B, et al. Analysis of subsynchronous resonance/oscillation types in power systems [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1043-1049. (in Chinese)

(责任编辑 刘森)