

DOI: 10.7667/PSPC180002

# 新能源汇集地区广域次同步振荡监测系统研究与构建

邱衍江<sup>1</sup>, 张新燕<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力公司电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 新能源汇集地区广泛使用的电力电子设备容易产生大量次同步谐波, 引发电力系统次同步振荡现象。为了实时监测及收集次同步振荡信息以研究振荡产生机理和控制方法, 提出基于次同步谐波传播通道的 PMU、SMU 子站部署原则, 将子站与 WAMS 主站呈辐射型互联构建广域次同步振荡监测系统。最后, 将系统应用于新疆哈密地区后能实时精准、有效地监测到大量次同步振荡信息, 直观地展示了次同步振荡的动态发展过程, 为后续研究提供数据基础。

**关键词:** 次同步振荡; 监测系统; 传播通道; WAMS 主站

## Research and construction of wide-area subsynchronous oscillation monitoring system in new energy influx area

QIU Yanjiang<sup>1</sup>, ZHANG Xinyan<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, CHANG Xiqiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Communication Center for Power Dispatching, Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** The power electronic devices which are widely used in the dense new energy areas are easy to produce a large number of subsynchronous harmonic, which leads to the subsynchronous oscillation in the power system. In order to monitor and collect subsynchronous oscillation information in real time to study the generation mechanism and control methods of oscillation, this paper proposes the deployment principle of PMU and SMU substations based on the subsynchronous harmonic propagation path, and connects the substations with the WAMS main station to build a wide area subsynchronous oscillation monitoring system. Finally, when the system is applied to Hami area of Xinjiang, the system can monitor a large number of subsynchronous oscillation information accurately and effectively, and intuitively display the dynamic development process of subsynchronous oscillation, so as to provide data basis for further research.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51667018 and No. 51367015) and State Grid Xinjiang Electric Power Company (No. SGXJ0000DKJS1440234).

**Key words:** subsynchronous oscillation; monitoring system; propagation path; WAMS master station

## 0 引言

新能源汇集地区发电机组种类较多, 新能源发电出力不稳定; 动态无功补偿装置(SVC、SVG)等电力电子设备对新能源发电机组产生的谐波反作用<sup>[1-2]</sup>; 次同步谐波在传播过程中可能发生的混叠效应等都可能引起次同步振荡<sup>[3-4]</sup>, 不仅影响电力系统电能质量, 还可能导致火电机组发生轴系扭振, 造成轴系损坏, 甚至危害整个电力系统安全稳定运行<sup>[5-6]</sup>。

当前新能源并网研究主要关注高次谐波(50 Hz

的整数倍), 采用大量硬件滤波器改善设备高次谐波特性, 对次同步谐波(10~40 Hz)与超同步谐波(60~90 Hz)分量的研究主要集中在谐波产生机理及谐波源定位<sup>[7-8]</sup>。而实际电网中次同步谐波的传播与监测则缺乏相关研究, 现有的广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)不够成熟, 不能满足当前对次同步振荡监测系统的研究, 需对传统的广域测量系统进行改善<sup>[9-11]</sup>。

在新能源汇集地区次同步振荡源不唯一、振荡机理不明确的情况下, 为了能够直观了解次同步振荡动态发展过程, 充分收集次同步振荡信息, 便于研究振荡产生机理和控制方法<sup>[12]</sup>, 本文通过分析改进的同步相量测量装置(Phasor Measurement Unit,

PMU)及专用次同步谐波监测装置(SMU)的工作原理, 提出沿次同步谐波传播通道部署 PMU、SMU 子站; 在电力调度控制中心的 WAMS 系统开发具有次同步谐波分析功能的主站; 监测子站与主站辐射型联接构成广域次同步振荡监测系统。将监测系统应用于新疆哈密新能源汇集地区电网, 实现对哈密地区次同步振荡瞬时值快速、准确地监测。

## 1 次同步振荡在线监测装置

### 1.1 改进的 PMU 装置

PMU 指采用 GPS(全球定位系统)秒脉冲作为同步时钟构成的相量测量单元<sup>[13-14]</sup>, 用于进行同步相量的测量和数据动态记录、存储。

由于广域测量系统原有 PMU 实时记录数据的速率不满足对现在的电力系统监测需求, 需对原有 PMU 进行升级<sup>[15]</sup>。升级后的 PMU 如图 1 所示, 长录波功能可连续记录 60 s 的 1 200 Hz 原始电压、原始电流采样值波形, 每分钟生成一个录波文件; 存储插件能够连续记录约 72 个小时数据; 当系统发生频率、相电流越限和线路低频振荡等事件时, 装置建立事件标识, 通过标识获取事件发生时段的实时记录数据<sup>[16-20]</sup>。

改进后 PMU 装置采用定间隔采样, 采样数据以离散傅里叶变换为核心算法来计算向量的幅值和相角。下文将改进后的 PMU 均简称为 PMU。

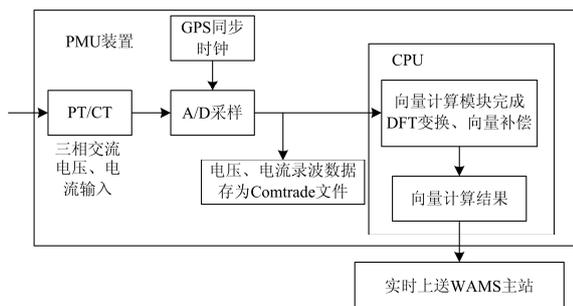


图 1 PMU 装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of PMU

### 1.2 SMU 装置

基于次同步多振荡模式自适应辨识的专用次同步谐波监测装置(SMU 装置)主要实现次同步电流的监测、次同步电流定时限过电流告警以及将告警数据上送次同步振荡监测系统主站等功能。SMU 装置通过滤波算法检测出线路电流中的次同步与超同步谐波分量, 并进行保护计算、告警。SMU 装置由 AI 采集插件、CPU 插件、DI 插件和 DO 插件组成, 如图 2 所示。

SMU 装置通过 AI 采集插件对接入的电压、电

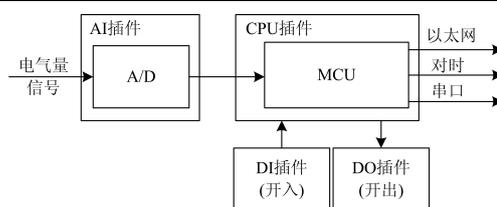


图 2 SMU 硬件原理示意图

Fig. 2 Hardware schematics of SMU

流信号通过高精度 A/D 采样芯片进行采样, 采样频率为 1 000 Hz。当电气量信号送至 CPU 插件, CPU 插件对 A/D 采样得到的电流信号进行滤波处理, 得到 10~40 Hz 的次同步谐波电流信号、60~90 Hz 的超同步谐波电流信号, 实时计算次同步和超同步电流信号的峰值。当次同步电流峰值持续超过设定门限值后, SMU 装置输出次同步电流定时限过电流告警信号, 通过装置、屏柜指示灯以及就地工控机后台进行显示, 并进行录波。

## 2 广域次同步振荡监测系统构建

新能源汇集地区广域次同步振荡监测系统由电力调度数据通信网络构成的通信信道, 将监测子站和主站联接构成。

### 2.1 监测子站的构建

监测子站指部署有 PMU、SMU 装置的新能源场站、汇集站及常规变电站, 能监测和发送实时测量数据, 并存储暂态录波数据, 能与变电站自动化系统或发电厂监控系统交换数据, 具备自动对时与守时功能等。

监测子站部署前应对该区域电网进行谐波潮流分析。将新能源场站产生的次同步谐波等效成谐波源, 将其注入到电网仿真模型中进行谐波潮流计算, 分析该区域电网次同步谐波的传播通道。如图 3 所示, 当某风电场中风电机组产生次同步谐波时, 次同步谐波可能由通道 1 向相邻新能源场站传播; 沿着通道 2 向交流系统扩散; 或随着通道 3 经过相邻新能源汇集站向其他区域新能源场站传播; 或经过通道 4 到达火电厂, 导致火电机组发生扭振现象。

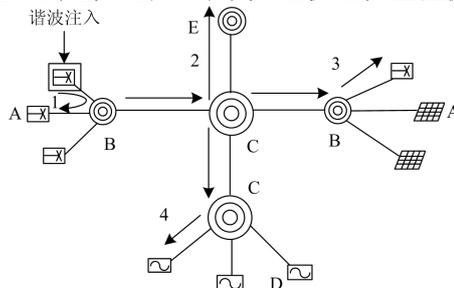


图 3 次同步谐波传播通道

Fig. 3 Subsynchronous harmonic propagation paths

鉴于次同步谐波源及振荡机理不明确的情况下,为进一步监视谐波,防范电力系统运行风险,本文提出结合改进的 PMU、SMU 装置功能,沿次同步谐波传播通道部署监测子站的部署原则如下。

1) 风电场、光伏站等新能源场站 A;多类型新能源汇集站 B;直流近区、交流系统薄弱环节 E 等应装置 PMU 子站。

2) B、C、D 等传播通道、重点新能源汇集站、变电站、电厂应部署 SMU 子站。

3) 考虑次同步振荡监测子站部署的经济性与资源的合理分配,在谐波传播通道的布点基础上对新能源场站并网点(汇集站、变电站)高压侧母线利用短路比(Short-Circuit Ratio, SCR)计算进行次同步振荡风险评估,使次同步振荡监测装置的利用更为经济合理。短路比表征系统短路容量除以新能源场站额定容量,表示为

$$SCR = \frac{SCC}{\sum_{s=1}^n P_s} \quad (1)$$

式中: SCC 为新能源场站并网点的短路容量;  
 $\sum_{s=1}^n P_s$  ( $s=1, 2, 3, \dots, n$ ) 为该并网点接入的所有新能源场站的额定容量。

短路比越大,指新能源场站接入的电力系统稳定性越强,新能源场站投切对电力系统稳定性的影响越小。当  $SCR < 3$ , 相关场站需部署次同步振荡监测装置;若  $3 \leq SCR < 6$ , 根据新能源场站并网次谐波计算分析报告,电力系统存在振荡风险时应部署监测系统子站;若结果未存在振荡风险,暂可不部署监测装置;若  $SCR \geq 6$ , 系统相对稳定,考虑监测系统经济性,暂可不部署监测装置。

### 2.2 监测主站的构建

监测系统主站指具有实现 SMU 子站告警信息显示、离线录波分析和展示;PMU 子站长录波分析、相量数据分析和展示等功能的 WAMS 主站。主站设在电力公司调度系统,能收集、分析和管理来自子站的监测数据,监测电力系统的次同步振荡状态,并以数字、曲线的形式显示谐波频率、谐波幅值,对子站上传的告警标志进行监视告警。

传统 WAMS 主站不具备次同步振荡监测与分析功能,需对传统 WAMS 主站进行次同步振荡应用扩展。传统 WAMS 主站其他监测功能不变的前提下,在 WAMS 前置服务器上部署离线数据查询代理模块;在 WAMS 应用服务器上部署离线数据查询服务和次同步振荡监视应用模块;在数据采集与监视控制系统(SCADA 工作站)部署离线数据查询客户

端和面向次同步谐波的频谱分析工具。改进后的 WAMS 主站功能模块部署如图 4 所示。

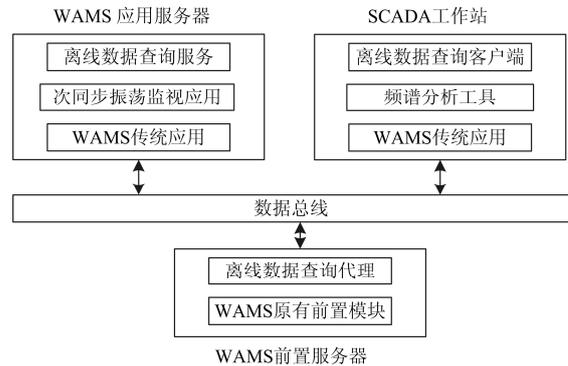


图 4 改进的 WAMS 主站功能模块部署

Fig. 4 Function module deployment of improved WAMS master

### 2.3 监测系统子站与主站互联

监测系统子站与主站之间采用通道带宽不低于 2 Mbps 的电力调度数据通信网络构成通信信道实现辐射型互联,如图 5 所示。次同步振荡监测系统的底层网络传输协议(PMU 规约)应采用传输控制协议(TCP 协议),应用层协议应符合 GB/T26865.2 的要求。

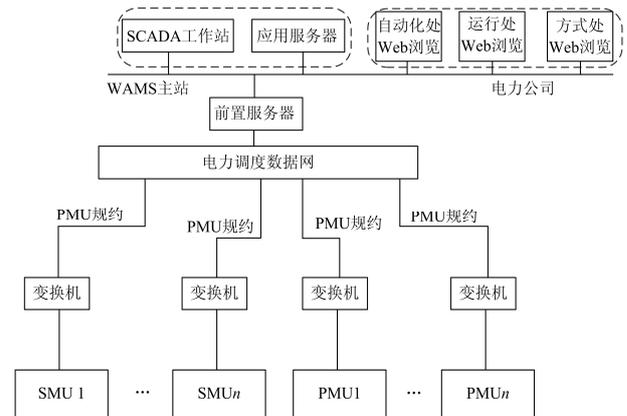


图 5 辐射型监测系统

Fig. 5 Radial monitoring system

监测系统数据流过程如图 6 所示。系统对次同步谐波电流的测量精度应满足幅值测量误差不大于  $\pm 1.0\%$ ; 频率测量取值为 10~40 Hz 和 60~90 Hz; 频率测量误差不大于  $\pm 0.1$  Hz。

### 3 广域次同步振荡监测系统的应用

大规模风电、光伏等新能源的接入增大了哈密地区电网稳定的不确定性,曾诱发次同步振荡等严重的系统安全稳定事故。因此本文将广域次同步振荡监测系统应用于哈密新能源汇集地区电网并展开分析。电力系统中次同步谐波与超同步谐波伴生存

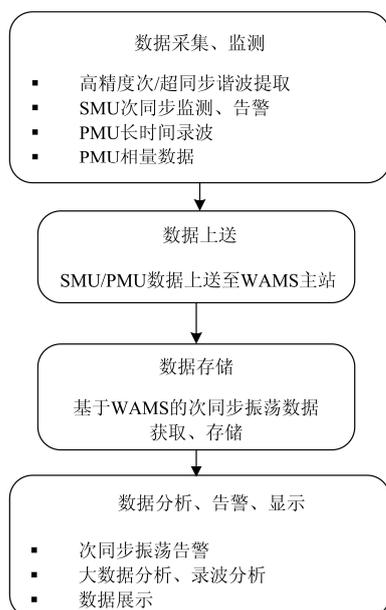


图 6 次同步振荡监测系统数据流

Fig. 6 Data stream of subsynchronous oscillation monitoring system

在, 监测系统对次同步谐波分量监测的同时也能对超同步谐波分量进行提取, 为了体现监测系统精确性, 下文将对监测系统记录的次/超同步谐波数据进行分析。

### 3.1 系统应用情况

哈密地区新能源发电厂集中在三塘湖地区与山北地区, 在对哈密地区部署监测系统子站前, 将 25 Hz 次同步谐波与 75 Hz 超同步谐波作为谐波源向新能源场站并网点 750 kV 三塘湖变电站、220 kV 山北变电站注入, 进行次/超同步谐波潮流计算, 得到次/超同步谐波潮流与传播通道如图 7 所示。新能源场站次/超同步谐波在三塘湖变电站、山北变电站上网, 经过哈塘线、哈山线, 在哈密变电站汇集后向互联的外送系统、750 kV 交流系统、天中换流站扩散, 甚至到达接入换流站的火电厂。

结合次/超同步谐波传播通道与监测子站部署原则, 部署哈密地区广域次同步振荡监测系统子站情况如图 8 所示。考虑到监测系统子站工程实施的经济性与可靠性, 哈密地区原有 WAMS 系统中所有新能源场站、汇集站、变电站、电厂都部署了 PMU 子站; 而 750 kV 三塘湖变电站、220 kV 山北变电站是谐波传播的汇集点, 应加装 SMU 子站。由于 750 kV 三塘湖站为数字化站, 重新配置振荡监测功能的工程量及风险大, 因此只配置了 PMU 子站; 而 220 kV 山北站为常规站, 改动起来相对简单, 因此在山北站加装 SMU 子站。

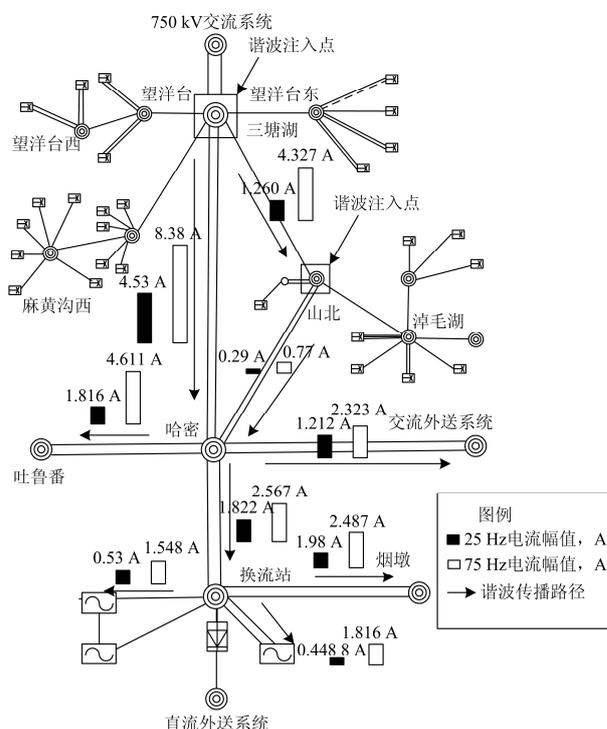


图 7 哈密地区次/超同步谐波潮流结果

Fig. 7 Calculation results of sub/supersynchronous harmonic currents in Hami

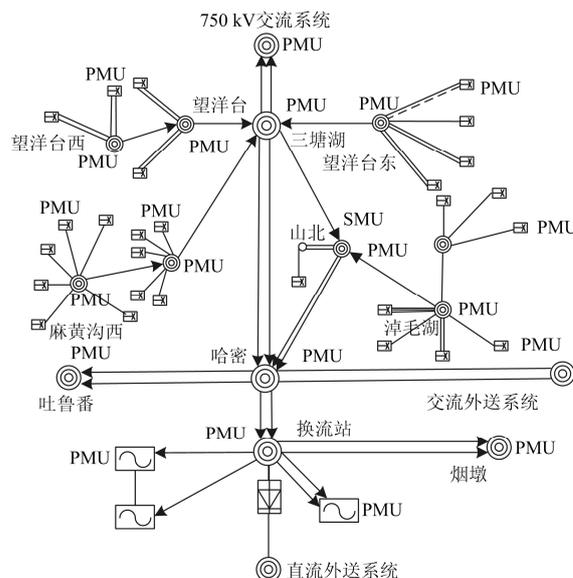


图 8 哈密地区监测系统子站部署

Fig. 8 Sub-station deployment of monitoring system in Hami

由于输电线路中电流存在 15.38 Hz、18.25 Hz、20.89 Hz、25.27 Hz、30.76 Hz、31.45 Hz、33.28 Hz、39.45 Hz 次同步振荡频率分量, 根据发电机组模态频率与电力系统侧频率互补的原则, 电力系统侧对应的特征频率为 34.62 Hz、31.75 Hz、29.11 Hz、

24.73 Hz、19.24 Hz、18.55 Hz、16.72 Hz、10.55 Hz，每个频率偏差在-1.5~1.5 Hz 内。因此在哈密地区安装的次同步振荡监测子站所告警的特征频率范围固定值为 33.5~36 Hz、30.5~33 Hz、27.5~30.5 Hz、23.5~26 Hz、15.5~20.5 Hz、9~12 Hz。次同步电流告警的门槛值为输电线路当前功率与前 10 s 平均功率差的绝对值与额定电压的比值，当监测子站判断特征频率满足上述任一定值且幅值达到告警门槛值时，监测子站产生告警信息。

监测系统主站是基于新疆电力公司电力调度控制中心的 WAMS 系统进行开发的。SMU、PMU 子站将采集到的数据通过电力调度数据网，上传至电力调度控制中心的 WAMS 应用服务器提供给次同步振荡分析模块，进一步向子站查询 SMU、PMU 次同步告警信息。当子站产生次同步告警信息时，子站通过 PMU 规约方式将实时告警信息以文件形式上送至 WAMS 主站，主站以表格、告警信息等形式展示子站次同步告警。现场发生次同步振荡告警后，也可以通过主站召唤子站长录波，使用离线分析工具对长录波数据进行分析。

### 3.2 系统监测效果

将辐射型广域次同步振荡监测系统构建于哈密地区后，成功监测到多次次同步振荡事件并发出告警，收集了大量录波数据。以哈密地区次/超同步谐波重点传播通道——哈山双线为例进行监测系统监测效果分析。

哈密电网某次次同步振荡事件，次同步电流超过门槛值(6 mA)，广域次同步振荡监测系统哈密变电站 PMU 子站实时监测到的哈山双线电流波形如图 9 所示。从监测系统实测电流波形可以看出，哈山双线 A、B、C 三相均含大量的谐波，导致电流波形畸变严重。将哈山双线三相电流分别进行频谱分析，归一化频谱分析结果如图 10 所示。图 10(a)、图 10(b)、图 10(c)分别为哈山一线 A、B、C 三相归一化频谱分析结果；图 10(d)、图 10(e)、图 10(f)分别为哈山二线 A、B、C 三相归一化频谱分析结果。由图 10 可看出，哈山双线次同步谐波频率范围较宽，取值为 10~90 Hz，有 11.13 Hz、21.09 Hz、31.05 Hz、64.14 Hz、78.52 Hz、88.48 Hz 等多个频率段且动态漂移，存在次同步、超同步两种频带且高于 50 Hz 的超同步分量成分较大，主导频率为 31.05 Hz、78.52 Hz。其中，处于告警频率范围中且幅值大于告警门槛值 6 mA 的次同步谐波分量只有 31.05 Hz (30.5~33 Hz)，因此认为本次次同步告警事件主要由 31.05 Hz 次同步谐波引起。

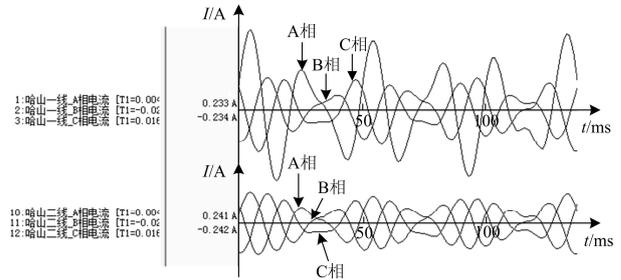


图 9 哈山双线实测电流波形

Fig. 9 Current waveform of Hashan transmission lines

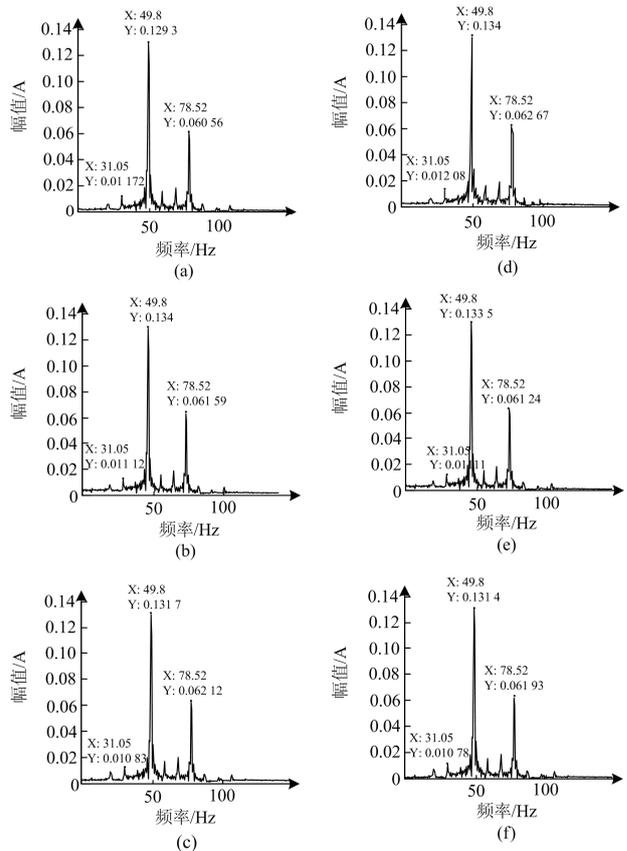


图 10 哈山双线电流频谱分析

Fig. 10 Spectrum analysis of Hashan transmission lines

同时，广域次同步振荡监测系统对哈密地区其他部分新能源并网线路及重要输电线路主导频率为 31.05 Hz、78.52 Hz 次/超同步谐波的监测结果统计如表 1 所示。

由图 10 可知，哈山双线次/超同步谐波电流的幅值误差最大为 0.001 3，在误差允许的±1.0%内；频率误差为零。表 1 各线路中，与 31.05 Hz 误差最大的是 31.12 Hz，误差为 0.07；与 78.52 Hz 误差最大的是 78.57 Hz，误差为 0.05；均在误差允许的±0.1 Hz 范围内。由广域次同步振荡监测系统对哈密

地区的次同步振荡监测结果统计与分析可看出, 该监测系统的建立能够精准可靠地对新能源汇集地区进行次同步振荡监测并收集及储藏大量次/超同步谐波信息, 为次同步振荡产生机理及控制策略提供可靠依据。

表 1 哈密其他部分线路监测结果

Table 1 Other monitoring results of Hami

线路	31.05 Hz 附近电流		78.52 Hz 附近电流	
	幅值/A	频率/Hz	幅值/A	频率/Hz
哈天一线	0.304	31.05	0.415	78.52
哈天二线	0.287	31.05	0.383	78.52
吐哈一线	0.094	31.07	0.085	78.56
吐哈二线	0.092	31.07	0.084	78.56
哈塘一线	0.477	31.05	0.532	79.49
哈塘二线	0.411	31.02	0.577	78.49
山淖线	0.404	31.02	0.796	78.50
黄麻线	0.167	31.03	0.376	78.51
塘黄线	0.301	31.09	0.499	78.57
烟天一线	0.053	31.09	0.115	78.57
烟天二线	0.051	31.09	0.101	78.57
广望东风一线	0.916	31.12	0.958	78.52
广望东风二线	0.976	31.12	0.941	78.52
望西线	0.098	31.12	0.21	78.54
塘望线	0.577	31.12	0.795	78.54
国华望风一线	0.187	31.05	0.201	78.52
国华望风二线	0.151	31.05	0.196	78.52
园天一线	0.459	31.09	0.916	78.52
园天二线	0.46	31.09	0.966	78.52

#### 4 结论

本文通过分析改进的 PMU、SMU 装置的工作原理, 提出沿次同步谐波传播通道的监测子站部署原则。监测主站与多个子站呈辐射型互联, 形成广域次同步振荡监测系统。每个监测子站单独将采集到的数据通过电力调度数据网上传至 WAMS 主站进行大数据分析及录波分析实现次同步振荡告警, 简化了数据处理及储存程序。

将辐射型广域次同步振荡监测系统应用于新疆哈密新能源汇集地区电网后, 系统能实现对电网各线路次/超同步谐波实时精准监测和数据收集、分析, 为研究新能源汇集地区次同步振荡产生机理和控制方法提供了数据基础, 同时对其他地区次同步振荡监测策略的研究也具有参考价值。

#### 参考文献

- [1] WALL P, DATTARAY P, JING Zhaoyang, et al. Creating a WAMS for the GB power system and the lessons learned so far[C] // Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, November 6-9, 2016, Belgrade, Serbia: 1-8.
- [2] XIE Xiaorong, LIU Huakun, WANG Yin, et al. Measurement of sub-and supersynchronous phasors in power systems with high penetration of renewable[C] // 2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), September 6-9, 2016, Minneapolis, MN, USA: 1-5.
- [3] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 风火打捆外送 220kV 电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 138-144.
- ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 138-144.
- [4] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-118.
- SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC\_HVDC and VSC\_HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-118.
- [5] 于淼, 谢欢, 宋玮. 大规模风电场汇集地区次同步振荡研究[J]. 华北电力技术, 2016(8): 18-23.
- YU Miao, XIE Huan, SONG Wei. Study of subsynchronous oscillation problem in large-scale wind power influx area[J]. North China Electric Power, 2016(8): 18-23.
- [6] 边晓燕, 施磊, 周歧斌, 等. 基于概率法的并网双馈风电场次同步相互作用及其抑制措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2740-2747.
- BIAN Xiaoyan, SHI Lei, ZHOU Qibin, et al. Subsynchronous interaction and its suppression measurement caused by grid-integration of DFIG-based wind farms using probabilistic method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2740-2747.
- [7] 宋瑞华, 郭剑波, 李柏青, 等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4662-4670.
- SONG Ruihua, GUO Jianbo, LI Baiqing, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation in direct-drive wind power generation system based on input-admittance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4662-4670.
- [8] AMIN M, MOLINAS M. Understanding the origin of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected

Topics in Power Electronics, 2017, 99: 1-1.

[9] 施秀萍, 白铮, 张道农, 等. 基于 PMU 数据的网源动态性能监测评价系统研发[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(增刊 1): 42-45.  
SHI Xiuping, BAI Zheng, ZHANG Daonong, et al. Research and development of online monitoring and evaluating system for the dynamic performance of generators-power grid based on PMU data[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(S1): 42-45.

[10] 彭静, 卢继平, 汪洋, 等. WAMS 中的通信网络平台构建[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 62-67.  
PENG Jing, LU Jiping, WANG Yang, et al. Communication infrastructure design for WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 62-67.

[11] 干磊, 康河文, 何敏. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 152-155.  
GAN Lei, KANG Hewen, HE Min. The dynamic monitoring of voltage stability based on wide-area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 152-155.

[12] 王茂海, 高洵, 王蓓, 等. 基于广域测量系的次同步振荡在线监测预警方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 98-102.  
WANG Maohai, GAO Xun, WANG Bei, et al. Online early-warning of sub-synchronous oscillations based on wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 98-102.

[13] 吴星, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于 WAMS/SCADA 数据兼容和改进 FCM 聚类算法的 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 756-761.  
WU Xing, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Optimal configuration of PMU based on data compatibility of WAMS/SCADA and improved FCM clustering algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 756-761.

[14] ZHAO Jinquan, ZHANG Yujie, ZHANG Pan. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI: 10.1186/s41601-016-0013-1.

[15] 郑明忠, 张道农, 张小易, 等. 基于节点集合的 PMU 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 138-142.  
ZHENG Mingzhong, ZHANG Daonong, ZHANG Xiaoyi, et al. PMU optimal placement based on node set[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 138-142.

[16] 闫玲玲, 刘中印, 艾永乐, 等. 基于 0-1 整数规划算法的 PMU 量测点优化配置新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 101-106.  
YAN Lingling, LIU Zhongyin, AI Yongle, et al. A new method of the optimal placement PMU based on 0-1 integer program[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 101-106.

[17] 沈健, 周斌, 汪昀, 等. 提升 PMU 动态测量性能的若干方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 89-94.  
SHEN Jian, ZHOU Bin, WANG Yun, et al. Methods for improvement of dynamic performance of PMU[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 89-94.

[18] 张敏, 沈健, 侯明国, 等. 相量测量单元实现次同步振荡在线辨识和告警的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 143-146.  
ZHANG Min, SHEN Jian, HOU Mingguo, et al. Discussion on on-line identification and warning of subsynchronous oscillation for phasor measuring unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 143-146.

[19] 徐岩, 郅静. 基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 55-62.  
XU Yan, ZHI Jing. Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 55-62.

[20] SU H Y, LIU C W. Estimating the voltage stability margin using PMU measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 3221-3229.

收稿日期: 2018-01-01; 修回日期: 2018-01-26

作者简介:

邱衍江(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统次同步振荡监测与控制; E-mail: xjdxqyj@163.com

张新燕(1964—), 女, 通信作者, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为新能源发电控制与并网技术;

张超(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统次同步振荡监测与控制。

(编辑 许威)