

文章编号:0254-0096(2020)01-0217-08

基于SWT的风电汇集地区非同步振荡 PMU暂态录波数据分析

刘博文¹, 张新燕^{1,2}, 常喜强³, 李国庆³, 邸强¹, 薛忠⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830047; 3. 新疆电力公司电力调度控制中心, 乌鲁木齐 830002; 4. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 210000)

摘要: 考虑风电汇集地区非同步振荡问题对电网安全稳定运行产生的影响,提出一种将同步相量测量装置(PMU)暂态录波与同步挤压小波变换(SWT)相结合的方法,并对非同步振荡问题进行分析。首先介绍PMU装置结构及测量及SWT原理;其次运用SWT算法对含有间谐波的电力信号做连续小波变换,划分频率区间,求时频面内的离散同步挤压,提取各谐波间谐波及基波分量信号;然后以哈密风电汇集地区一次非同步振荡为例进行暂态电压、联络线电流、上网有功分布录波数据分析;最后基于该算例发生的非同步振荡问题,提供治理措施。

关键词: 风电汇集地区; 同步挤压小波变换(SWT); 同步相量测量装置(PMU); 非同步振荡; 暂态

中图分类号: TM712

文献标志码: A

0 引言

电网次同步振荡问题是电网安全稳定防控考虑的主要问题之一^[1-3]。目前,随着风电规模的增加,其对电网的影响也越来越大,特别是近年来在直流近区的风电汇集地区出现的非同步振荡问题,对电网安全稳定运行提出挑战。如何利用现有的PMU动态监测装置,构建风电汇集地区非同步振荡动态监测系统,收集风电场及风力机的秒级运行信息,深入挖掘分析并掌握其运行特性,实现实时动态报警和控制,对于调控风电运行意义重大。

由于大量电力电子元件应用于新能源场站,使得新能源并网产生的次同步振荡与汽轮发电机组诱发次同步振荡相比,呈现出多源、多形态、随机幅频特性的多类振荡问题相互耦合与影响的特点^[4]。目前使用寻找汽轮机诱发次同步振荡问题的方法及抑制措施,在新能源场站不能完全适用。次同步振荡高压直流输电^[5]、静止无功补偿器^[6]、电力系统稳定器^[7]等功率快速调节装置使汽轮发电机组诱发次同步振荡的研究机理及相应的抑制措施研究目前已较为成熟,而对风电等新能源并网产生次同步振荡的研究还处于探讨阶段,尤其对非串补系统的新能源次同步振荡问题鲜有研究。传统提取

次同步振荡间谐波的方法主要有快速傅里叶变换算法(discrete Fourier transform, FFT)、希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)等。FFT算法对整数次谐波分析很精准,但间谐波和基波非同步变化,很难确定其波形周期,无法避免因非同步采样而引起的频率泄漏和栅栏效应而造成的误差^[8]。HHT算法在经验模态分解过程中采用3次样条插值不精确,容易出现欠包络、过包络的现象,且经验模态分解易引入虚假成分,该方法存在频率混叠效应,HHT变换后会产生无法解释的负频率,HHT方法对噪声也非常敏感^[9]。文献[10]提出基于PMU相量的次/超同步间谐波识别方法,但间谐波引起的相量振荡频率较高,导致PMU相量测量误差较大,会影响间谐波的识别精度。文献[11]通过仿真风力机网侧换流器前馈控制的响应特性对次同步振荡频率分量影响,并结合PMU相量测量的现场实测数据,验证理论分析的正确性。文献[12]提出建立双馈风力发电机模型,采用频率扫描法分析感应发电机效应和次同步控制的相互作用进而寻找诱发振荡机理;文献[13]从换流器控制的角度出发,提出一种基于大型双馈风电场经模块化多电平换流器型高压直流输电(MMC-HVDC)并网次同步振荡电流抑制的送端换流站控制策略;文献[14]提出结合电力系统分析软件对风电场详细建

收稿日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(51667018; 51367015)

通信作者: 张新燕(1964—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源发电控制与并网技术方面的研究。xjcxzy@sina.com

模研究风电场次同步振荡的原因和影响其振荡的控制参数。

综合看来,目前针对风电汇集地区次同步振荡问题的研究大多是对风电场发生次同步振荡的仿真分析、研究方法探讨和抑制策略的研究,通过 PMU 暂态录波与间谐波数据挖掘相结合的方法对造成风电汇集地区非同步振荡问题的研究分析几乎空白。本文提出一种将 PMU 暂态录波与同步挤压小波变换相结合的方法,对非同步振荡问题进行分析。首先介绍 PMU 装置结构及测量及 SWT 原理;其次运用 SWT 算法对含有间谐波的电力信号做连续小波变换,划分频率区间,求时频面内的离散同步挤压,提取各谐波间谐波及基波分量信号;然后以哈密风电汇集地区一次非同步振荡为例进行暂态电压、联络线电流、上网有功分布录波数据分析;最后基于本次算例发生的非同步振荡问题,提供几点治理措施。

1 PMU 装置结构及测量原理

目前,国内外大型机组主要依靠次同步振荡监测分析装置对次同步振荡进行监测。我国电网已安装约 8500 台 PMU,美国电网也安装了约 3200 台,它们已成为电力系统动态过程监测、分析与控制的基础^[15-16]。因此,PMU 动态行为规律及其性能评估的研究显得尤为重要。PMU 是一种以 GPS 为基础,达到整个电力系统时间同步化的测量装置。将多个 PMU 分散放置于各地,用于测量联络线电压相量、电流相量、功率及频率等电气量^[17]。在电力系统重要的变电站和发电厂安装 PMU 装置,构建电力系统实时动态监测系统,并通过调度中心分析中心站实现对电力系统动态过程的监测和分析。并与 SCADA/EMS 系统及安全自动控制系统相结合,加强对电力系统动态安全稳定的监控。基于 GPS 的同步向量测量示意图如图 1 所示。PMU 装置录波包括暂态录波和动态录波,暂态录波采样频率为 1200 Hz 以上,分为正序、负序、零序越限等异常情况触发录波,录波时长通常较短,仅几秒钟,用于分析次同步谐波数据精度满足要求;动态录波为每分钟自动持续录波,便于分析电网持续振荡过程,采样频率为 100 Hz,录波时长 60 s,测量的电气量均为有效值,由于暂态录波采样频率远远大于动态录波采样频率,在发生振荡时通常分析其暂态录波数据。本文采用 PMU 暂态录波数据对风电汇集地区非同步振荡的分析。PMU 装置原理图如图 2 所示。

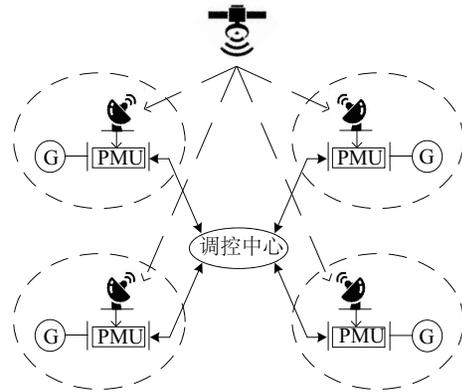


图1 基于GPS的同步向量测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of synchronous vector measurement based on GPS

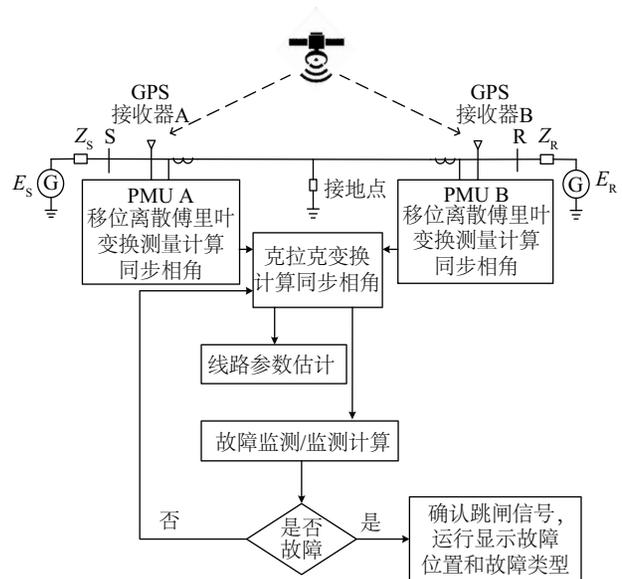


图2 PMU装置原理图

Fig. 2 Principle diagram of PMU device

2 基于同步挤压小波变换间谐波提取

2.1 同步挤压小波变换

由于间谐波幅值较小/对频谱泄露现象敏感/易被噪声淹没,而各谐波和间谐波成分往往不能事先确定,进行间谐波分析时易产生虚假成分,不能较好地确定信号的实际频率分量^[18],所以间谐波的提取比谐波困难。由文献[19]提出的 SWT 算法以小波变换为基础,首先对信号 $f(t)$ 进行连续小波变换:

$$W_f(p, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) p^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-q}{p}\right) dt \quad (1)$$

式中, ψ 满足条件 $\int_0^{+\infty} \left(\left| \hat{\psi}(\eta) \right|^2 / \eta \right) d\eta < +\infty$, 其中 $\hat{\psi}$ 为 ψ

的傅里叶变换。

$W_f(p, q) \neq 0$ 时, 瞬时频率可用式(2)计算:

$$\omega_f(p, q) = \frac{-i}{W_f(p, q)} \frac{\partial(W_f(p, q))}{\partial q} \quad (2)$$

同步挤压小波变换, 通过挤压时频面上小波系数 $W_f(p, q)$ 在中心频率 ω_l 附近区间 $[(\omega_l + \omega_{l-1})/2, (\omega_l + \omega_{l+1})/2]$ 的值获得同步挤压变换量值 $T_f(p, q)$:

$$T_f(\omega_l, q) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{p_k: |\omega_f(p, q) - \omega_l| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_f(p, q) p_k^{-\frac{3}{2}} (\Delta p)_k \quad (3)$$

式中, ω_l ——信号 $f(t)$ 第 l 个频率分量的中心频率; p_k ——连续小波变换尺度 p 的离散值, $(\Delta p)_k = p_k - p_{k-1}$; $\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$ 。

由式(3)可知, SWT 将 $W_f(a, b) \neq 0$ 重分配到 (ω_l, q) 坐标系, 即把时间-尺度平面转化到时间-频率平面上。在对小波系数 $W_f(p, q)$ 进行挤压时, $W_f(p, q)$ 被限制在中心频率 ω_l 附近, 和中心频率 ω_l 的距离不超过邻近频率距离的一半, 使得各频率曲线细化, 不存在交叉项, 从而有效避免频率混叠。由式(3)可重建信号中的第 k 分量 f_k :

$$f_k(t_a) \approx \frac{2}{R_\psi} \text{Re} \left(\sum_{l \in L_k(t_a)} \tilde{T}_f(\omega_l, t_a) \right) \quad (4)$$

式中, $f_k(t_a)$ ——围绕在 f_k (f 的第 k 个分量) 曲线的窄频带附近的 ω_l 的下标集合; $R_\psi = 0.5 \int_0^{+\infty} \tilde{\psi}(\eta) d\eta/\eta$ 。重构值与信号的第 k 个分量之间的误差小于 $C\epsilon^{1/3}$ (C 为常数), 通过式(4)可实现信号中各分量 $f_k(t)$ 的近似完全重构。

2.2 非同步振荡间谐波提取

SWT 算法对间谐波提取主要分为 4 个步骤:

1) 对含有间谐波的电力信号 f 做连续小波变换 $W_f(p, q)$, $W_f(p, q)$ 离散化得到 $\tilde{W}_f(p_j, t_a)$, 对由式(2)得到的瞬时频率的离散化得到 $\tilde{\omega}_f(p_j, t_a)$ 。

2) 划分频率区间: 假设含间谐波电力信号 $f(t)$ 的长度 $n = 2^{l+1}$ 采样时间间隔为 Δt , 取 $n_v = 32$, 令 $n_b = Ln_v$, $\Delta\omega = [\log_2(n/2)]/(n_b - 1)$, $\omega_0 = 1/(n\Delta t)$ 。规定 $\omega_l = 2^{l\Delta\omega} \omega_0$, $l = 0, 1, \dots, n_b - 1$, 则可根据 Nyquist 采样定理, 将电力系统中的谐波信号所处的频率范围划分为不同的频率区间 $W_l = [(\omega_{l-1} + \omega_l)/2, (\omega_l + \omega_{l+1})/2]$ 。

3) 求时频面内的离散同步挤压 $\tilde{T}_f(\omega_l, q)$: 信号在中心频率 ω_l 处的同步挤压小波变换:

$$\tilde{T}_f(\omega_l, q) = \sum_{0 \leq j \leq n_p - 1, |\tilde{\omega}_f(p_j, t_m)| \in W_l} \tilde{W}_f(p_j, t_m) \frac{\log_2 2}{n_v} a_j^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

4) 各谐波间谐波及基波分量信号的提取: 由式(5)可重建第 k 个分量 f_k :

$$f_k(t_m) = \frac{2}{R_\psi} \text{Re} \left(\sum_{l \in L_k(t_m)} \tilde{T}_f(\omega_l, t_m) \right) \quad (6)$$

式中, $L_k(t_m)$ ——围绕在 f_k 曲线窄频带附近 ω_l 的下标集合。

3 算例分析

截至 2015 年 9 月底, 哈密电网部分网架结构图如图 3 所示。哈密风电汇集 I 区风电装机 444 MW、II 区风电装机 643.5 MW、III 区装机 99 MW、IV 区风电装机 343.5 MW。大规模风电机组通过电缆、架空线汇集到单个风电汇集站后经过串供接力送电汇集到 750 kV 汇集站后送入电网。

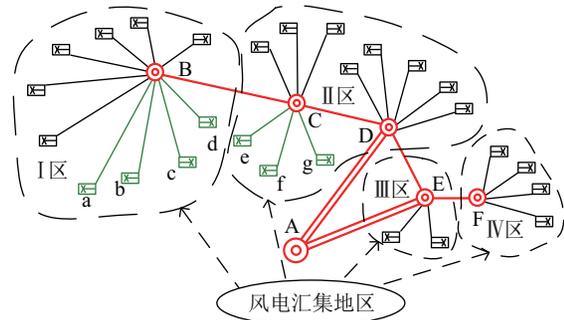


图3 哈密电网部分网架结构图

Fig. 3 Structure of a regional power grid in Hami

图 3 中 A 为 750 kV 变电站, B~F 为 220 kV 变电站, a~d 为此次哈密风电汇集 I 区发生非同步振荡过程中 PMU 装置发生动作进行暂态录波的场站, e~g 为 II 区 PMU 装置进行暂态录波的场站。风电汇集地区网架结构薄弱、稳定性较差。由于直驱、双馈风力机的变频器效益, 风力机与电网之间控制耦合的相互作用, 在特定情况下产生非同步功率波动, 并表现在联络线电压、电流及上网有功的波动上。为有效研究造成此次非同步振荡的机理, 本文对 PMU 暂态录波数据中的 A 相基波电压及主要间谐波、A 相基波电流及主要间谐波和发生振荡场站的上网有功分别进行对比分析。

3.1 暂态电压稳定性分析

暂态电压稳定性主要研究电力系统受到大扰动冲击后各负荷节点的电压稳定性。哈密地区发生的此次振荡造成暂态电压失稳。发生振荡时, 风电汇集 I、II 地区 110 kV 联络线上 PMU 装置启动暂态录波。图 4、图 5 分别为风电汇集 I、II 区联络线 A 相电压录波图。

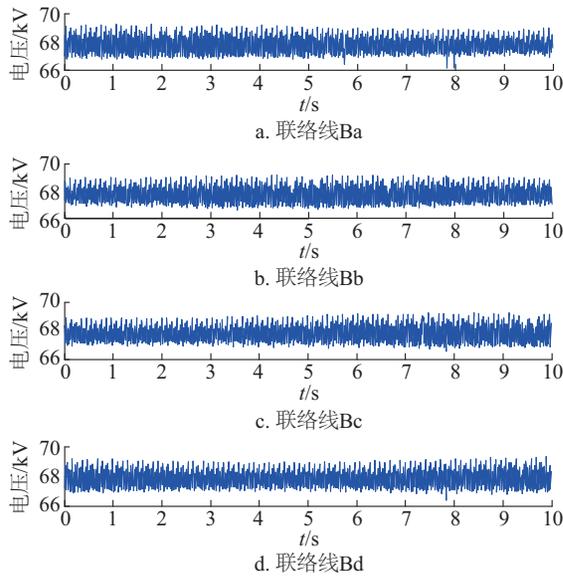


图4 风电汇集I区联络线A相电压录波图

Fig. 4 Contact line A phase voltage waveform of wind collecting area I

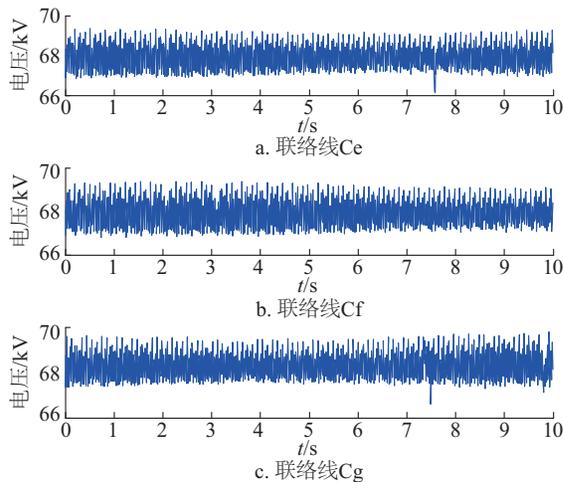


图5 风电汇集II区联络线A相电压录波图

Fig. 5 Contact line A phase voltage waveform of wind collecting area II

通过 FFT、HHT、SWT 这 3 种不同算法对各联络线上 A 相电压数据进行间谐波提取,得到风电汇集 I、II 区各联络线上 A 相暂态电压分量情况分别如表 1 和表 2 所示。从表 1 与表 2 可看出,此次振荡联络线上均为超同步分量(大于 50 Hz)间谐波,各场站联络线上均存在在约 83.80 Hz 的超同步频率分量电压。由于 HHT 算法易受噪声影响,风电汇集 I 区联络线 Bd 上 HHT 算法得到间谐波分量为 86.54 Hz 较 FFT 与 SWT 算法得到的间谐波分量(83.90 Hz)偏高。联络线 Cf 除存在约 83 Hz 的间谐波分量外,还存在 71.70 Hz 的间谐波,但由于间谐

波幅值较小,FFT 算法对频谱泄露现象敏感,易被噪声淹没。

表1 不同算法下风电汇集I区暂态电压

Table 1 Transient voltage of wind power collection area I with different algorithms

算法	联络线	A相基波电压/kV	间谐波分量/Hz	占比/%
FFT	Ba	67.94	83.56	2.14
	Bb	67.85	83.74	1.08
	Bc	68.03	83.75	2.07
	Bd	67.34	83.90	0.96
HHT	Ba	67.95	83.76	2.25
	Bb	67.76	83.56	1.13
	Bc	68.02	83.83	2.09
	Bd	67.36	86.54	1.02
SWT	Ba	67.94	83.70	2.21
	Bb	67.74	83.40	1.13
	Bc	68.02	83.80	2.09
	Bd	67.35	83.90	0.98

表2 不同算法下风电汇集II区暂态电压

Table 2 Transient voltage of wind power collection area II with different algorithms

算法	联络线	A相基波电压/kV	间谐波分量/Hz	占比/%
FFT	Ce	68.02	83.78	1.85
	Cf	67.87	82.60	4.71
	Cg	77.26	83.87	2.02
HHT	Ce	68.03	83.80	1.90
	Cf	67.88	71.70/82.61	0.51/4.78
	Cg	77.28	83.91	2.05
SWT	Ce	68.03	83.80	1.90
	Cf	67.88	71.70/82.60	0.51/4.75
	Cg	77.28	83.90	2.04

3.2 联络线电流分析

发生振荡时,风电汇集 I、II 地区 110 kV 联络线上 PMU 装置启动暂态录波。图 6、图 7 分别为风电汇集 I、II 区联络线 A 相电流录波图。

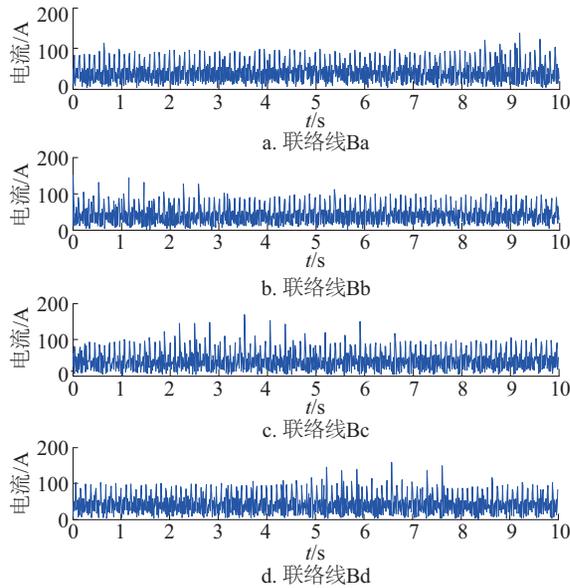


图6 风电汇集 I 区联络线 A 相电流录波图

Fig. 6 Contact line A phase current waveform of the wind collecting area I

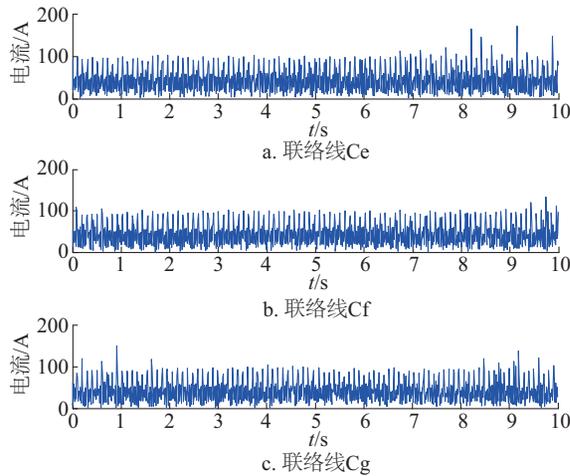


图7 风电汇集 II 区联络线 A 相电流录波图

Fig. 7 Contact line A phase current waveform of the wind collecting area II

通过 FFT、HHT、SWT 这 3 种不同算法对各联络线上 A 相电流数据进行间谐波提取,得到风电汇集 I、II 区各联络线上 A 相电流间谐波分量情况分别如表 3 和表 4 所示。从表 3 与表 4 可看出,PMU 暂态录波电流数据间谐波较为丰富,既包含次同步振荡分量(16.2 和 28.7 Hz),也包含超同步振荡分量,超同步分量以 83.8 Hz 为主。由于 HHT 算法易受噪声影响,风电汇集 I 区联络线 Bd 上 HHT 算法得到间谐波分量为 86.54 Hz 比 FFT 与 SWT 算法得到的间谐波分量(83.90 Hz),偏高。由表 4 不难看出,联络线 Ce、Cf 同样存在除约 83 Hz 的

间谐波分量外,还分别存在 16.20 与 28.70 Hz 的间谐波,但由于间谐波幅值较小,FFT 算法对频谱泄露现象敏感,易被噪声淹没。

表3 不同算法下风电汇集 I 区联络线电流

Table 3 Line current of wind power collection area I with different algorithms

算法	联络线	A 相基波 电流/A	间谐波 分量/Hz	占比/%
FFT	Ba	1.22	83.70	11.14
	Bb	25.03	89.90	10.08
	Bc	9.95	83.75	12.07
	Bd	33.62	83.90	4.56
HHT	Ba	1.22	83.76	12.25
	Bb	25.05	89.90	10.73
	Bc	9.96	83.83	13.79
	Bd	33.63	86.54	4.92
SWT	Ba	1.22	83.70	11.59
	Bb	25.04	89.90	10.63
	Bc	9.96	83.80	13.73
	Bd	33.63	83.90	4.79

表4 不同算法下风电汇集 II 区联络线电流

Table 4 Line current of wind power collection area II with different algorithms

算法	联络 线	A 相基波 电流/A	间谐波 分量/Hz	占比/%
FFT	Ce	28.38	83.81	27.35
	Cf	9.77	82.60	72.37
	Cg	8.25	83.90	8.82
HHT	Ce	28.40	16.20/83.80	2.28/27.61
	Cf	9.78	28.70/82.61	1.04/72.38
	Cg	8.25	83.91	8.90
SWT	Ce	28.38	16.20/83.80	2.24/27.49
	Cf	9.77	28.70/82.60	1.03/72.37
	Cg	8.25	83.90	8.89

3.3 上网有功分布分析

除电压、电流外,功率也是分析电网稳定的重要电气量,对于风电大范围接入电网,监测风电场的上网有功对研究电网稳定至关重要。本次振荡 PMU 装置监测到各风电场运行方式、振荡情况如表 5 所示。由表 5 可知,风电汇集 I 区场站 b 和 d 处于上网状态,场站 c 处

于下网状态,场站 a 处于上下网振荡状态,且振荡幅度较大。风电汇集 II 区场站 e 处于上网状态,场站 g 处于下网状态,场站 f 处于上下网振荡状态,振荡幅度也较大。

表 5 上网有功振荡

Table 5 Positive-power oscillation of on-grid

监测区域	场站名称	运行方式	上网有功/MW	振荡范围/MW
I 区	a	上下网振荡	0	1
	b	上网	1.25	0.60
	c	下网	0.42	0.40
	d	上网	0.65	0.45
II 区	e	上网	1.24	0
	f	上下网振荡	0	1
	g	下网	0.30	0

综合分析表 1~表 4 可知,所有启动 PMU 暂态录波的场站,在录波数据中均存在约 83 Hz 的超同步间谐波分量。风电汇集 I、II 区存在约 83 Hz 的超同步间谐波分量原因分析如下:

1)由图 3 中网架结构分析可知,哈密风电汇集 I、II 区网架结构不合理。I 区 220 kV 汇集站 B 串联经过 II 区 220 kV 汇集站 C 后接入 III 区 220 kV 变电站 D,电网的短路比小于 3,此种网架结构薄弱、稳定性较差,串联接线对于风电场接入来说属于不合理结构。

2)在低风速、风力机出力不稳定等状态下,间谐波各频率分量较多。由于双馈风力机励磁电压与机端电网电压之间的频率不同步,变流器易产生间谐波,且其控制回路对 80 Hz 附近的间谐波具有放大作用。

3)由于电力电子的快速响应特性,安装在风电场附近的 SVC 与 SVG 装置会将端电压反馈回路中约 80 Hz 的间谐波分量幅值通过控制回路的高放大倍数,进一步增幅。

由于 16.20 与 83.80 Hz 互补(两者相加为 100 Hz)、28.70 与 71.70 Hz 近似互补,它们均可认为是一种模态,由此可看出 2 个风电汇集地区存在 2 种次同步振荡模态(约为 16 和 28 Hz)。综合分析表 1~表 5 可知,SWT 算法较传统的 FFT、HHT 算法对噪声具有较好的鲁棒性,当信号中混有较强噪声时,SWT 算法仍可较好地将间谐波逐一提取。风电场非同步振荡对场站有功上网状态有一定影响,为减少有功波动对电网稳定性的影响,研究非同步振荡非常必要。

4 结 论

风力发电系统的结构、并网方式与传统火力发电机组相比均有本质区别,风电汇集地区包含多种类型的风电机组,并经过多级电压等级串供接力送电,导致大规模风电基地外送的非同步振荡问题十分复杂。传统的次同步振荡研究方法和手段应用与规模化风电非同步振荡问题还需进一步研究,通过对现有 PMU 装置的改造和功能完善,利用现有 PMU 装置实现对风电汇集地区运行数据全信息覆盖,对信息上传召唤并利用分析软件对其进行振荡频率的电压、电流幅值及上网有功同步对比,即可确定非同步振荡的传播路径、能量传播范围以及振荡起源,从而为风电汇集地区非同步振荡的研究及机理分析创造条件。基于本次算例发生的非同步振荡问题,本文提供 4 点治理措施:

1)双馈风力机由于励磁电压与机端电网电压之间的频率差异,变流器会产生间谐波,且变流器的控制回路对 80 Hz 附近间谐波具有放大作用,双馈风力机变流器生产厂家应切实改进变流器滤波与控制策略。

2)风电场附近装设 SVC 与 SVG,由于电力电子的快速响应特性,如果端电压的反馈回路 80 Hz 附近间谐波分量未被滤除,再加上控制回路的高放大倍数,那么 SVC 与 SVG 设备会对 80 Hz 附近间谐波分量起到明显的放大作用。所以 SVG 与 SVC 生产厂家应切实改进反馈回路滤波环节,降低放大倍数,改进控制策略,至少对 80 Hz 附近间谐波无放大作用,争取有抑制作用。

3)由于 I 区 220 kV 汇集站 B 串联经过 II 区 220 kV 汇集站 C 后接入 III 区 220 kV 变电站 D,此种网架结构薄弱、稳定性较差,串联接线对于风电场接入来说属于不合理结构,需改造一次网架,使风电汇集站 B 直接接入风电汇集站 E。

4)大量电力电子元器件应用于新能源场站造成了现场复杂的、微小的非同步信号,需利用精度更高、功能更强大的测试仪器用于测试、改进,从而提高非同步振荡监测装置的分辨能力。

致 谢:感谢国网新疆电力调度控制中心、国电南瑞科技股份有限公司、北京四方公司提供的实时录波数据支撑。

[参考文献]

- [1] 肖湘宁,张剑,高本锋,等.多电厂频繁低幅次同步振荡的现象模拟及抑制措施研究[J].中国科学:技术科学,2013,43(8):930-942.

XIAO X N, ZHANG J, GAO B F, et al. Simulation and

- suppression measures of frequent low amplitude subsynchronous oscillation in multi power plant[J]. Science in China: technology and science, 2013, 43(8): 930-942.
- [2] 田宽引, 王鹏, 韩肖清, 等. 电力系统次同步振荡对风力发电机轴系疲劳损伤影响的可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 586-592.
TIAN K Y, WANG P, HAN X Q, et al. Reliability analysis of wind turbines shafts caused by sub-synchronous oscillations during power system faults [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(3): 586-592.
- [3] MORTENSEN K, LARSEN E V, PIWKO R J. Field tests and analysis of torsional interaction between the coal Creek turbine-generators and the CU HVDC system [J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1981, 100(1): 336-344.
- [4] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.
XIAO X N, LUO C, LIAO K Y. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.
- [5] 高本锋, 赵成勇, 肖湘宁, 等. 高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制器的设计与实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 501-506.
GAO B F, ZHAO C Y, XIAO X N, et al. Design and implementation of additional subsynchronous oscillation damping controller for HVDC transmission system [J]. High voltage engineering, 2010, 36(2): 501-506.
- [6] 刘洪涛, 徐政, 周长春. 静止无功补偿器对发电机组次同步振荡特性的影响[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 1-4.
LIU H T, XU Z, ZHOU C C. A study on synchronous oscillation of generator set connected to static var compensator [J]. Power system technology, 2003, 27(1): 1-4.
- [7] 吴熙, 蒋平, 胡弢. 电力系统稳定器对次同步振荡的影响及其机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 56-63.
WU X, JIANG P, HU T. Impact of power system stabilizer on subsynchronous oscillation and its mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 56-63.
- [8] 惠锦, 杨洪耕. 基于谐波泄漏估算的谐波间谐波分离检测法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 183-190.
HUI J, YANG H G. Harmonics and interharmonics separate: Detection method based on estimation of leakage values caused by interharmonics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 183-190.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis [J]. Proceedings of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] 刘灏, 李珏, 毕天姝, 等. 基于PMU相量的次/超同步间谐波识别方法[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3237-3243.
LIU H, LI Y, BI T S, et al. Subsynchronous and supersynchronous inter-harmonic identification method based on phasor measurements [J]. Power system technology, 2017, 41(10): 3237-3243.
- [11] BI T S, LI J Y, ZHANG P, et al. Study on response characteristics of grid-side converter controller of PMSG to sub-synchronous frequency component [J]. IET renewable power generation, 2017, 11(7): 966-972.
- [12] 栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3073-3079.
LI R, LU Y, LIU H L, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation [J]. Power system technology, 2013, 37(11): 3073-3079.
- [13] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经MMC-HVDC并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
LYU J, DONG P, SHI G, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860.
- [14] 顾威, 徐梅梅, 邵梦桥, 等. 大规模风电场次同步振荡分析[J]. 电力建设, 2015, 36(4): 95-103.
GU W, XU M M, SHAO M Q, et al. Subsynchronous resonance of large-scale wind farms [J]. Electric power construction, 2015, 36(4): 95-103.
- [15] ZHANG Y C, MARKHAM P, XIA T, et al. Wide-area frequency monitoring network (FNET) architecture and applications [J]. IEEE transactions on smart grid, 2010, 1(2): 159-167.
- [16] 杨东俊, 丁坚勇, 周宏, 等. 基于WAMS量测数据的

- 低频振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 24-28.
- YANG D J, DING J Y, ZHOU H, et al. Mechanism analysis of low-frequency oscillation based on WAMS measured data[J]. Automation of electric power systems, 2009, 33(23): 24-28.
- [17] 万丽丽. PMU应用于区域电网保护与电压稳定监测的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- WAN L L. Research of applying PMU to the regional power grid protection and stability monitoring in voltage stability [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [18] 张惠娟, 汪友华, 王艳廷, 等. 基于AR模型的电力系统间谐波分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 144-149.
- ZHANG H J, WANG Y H, WANG Y T, et al. Power system interharmonics analysis based on autoregression model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 144-149.
- [19] DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and computational harmonic analysis, 2011, 30(2): 243-261.

ANALYSIS OF NON-SYNCHRONOUS OSCILLATION BASED ON SWT AND TRANSIENT WAVE RECORDED DATA OF PMU IN WIND FARM INTEGRATION AREA

Liu Bowen¹, Zhang Xinyan^{1,2}, Chang Xiqiang³, Li Guoqing³, Di Qiang¹, Xue Zhong⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology, Urumqi 830047, China; 3. Xinjiang Communication Center for Power Dispatching, Urumqi 830002, China; 4. Nanjing NARI-RELAYS Electric Limited Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: Considering the influence of non synchronous oscillation on the safe and stable operation of the power grid, a method combined method of transient wave recorded data of synchronous phasor measurement unit (PMU) and based on transient recording and synchrosqueezed wavelet transform (SWT) was proposed to analyze the problem of non synchronous oscillation. Firstly, the structure of PMU device and the principle of SWT were introduced. Secondly, the SWT algorithm was used to do the continuous wavelet transform of the power signal containing interharmonics, divide the frequency range, solve discrete synchrosqueezed in time-frequency domain and extract signals of harmonic, inter harmonic and fundamental component. Subsequently, transient voltage, tie line current and positive-power distribution of on-grid were analyzed by a non synchronous oscillation that were analyzed in wind collecting area of Hami. Finally, several controlling measures were proposed based on the non synchronous oscillation problem of this example.

Keywords: wind farm integration area; synchrosqueezed wavelet transform (SWT); phasor measurement unit (PMU); non synchronous oscillation; transient state