

广域测量系统的数据记录密度探讨

王茂海, 谢开, 徐正山

(华北电力调度通信中心, 北京 100053)

摘要: 国家电网公司对广域测量系统(WAMS)的定位是:“主要采集处理电力系统动态数据”。根据这一定位,对广域测量系统的数据记录密度进行了探讨。提出,随着串联补偿装置及直流输电的广泛应用,广域测量系统的数据记录密度应具备对次同步振荡过程进行监测分析的能力。同时,结合信号处理知识提出,要实现对次同步振荡动态过程的正确监测分析,动态数据的记录密度应达到100帧/秒以上。利用托克托电厂6#机做扭振试验时华北电网广域测量系统的实际记录数据,进行了不同数据记录密度下的频谱分析,分析结果充分论证了本文的观点。

关键词: 电力系统; 广域测量系统; 相量测量装置; 次同步振荡

Research of data record rate of WAMS

WANG Mao-hai, XIE Kai, XU Zheng-shan

(North China Power Dispatching Centre, Beijing 100053, China)

Abstract: In China, the functions of WAMS are oriented to “acquire and analyze dynamic data in power systems”. According to this orientation, this paper probes into the selection of data record rate in WAMS. Since more and more series compensator are deployed in China, the risk of SSO (sub-synchronous oscillation) is increased greatly. To analyze SSO, the frequency range of which is between 10Hz and 50Hz, data record rate of WAMS has to be 100 frames per second or above. Taking North China Power Grid as an example, this paper analyzes the disturbance data recorded by WAMS during torsional oscillation experiment performed in Toketo Power Plant. The analysis result of the example is identical with the analysis of this paper.

Key words: power systems; wide area measurement system (WAMS); phasor measurement unit (PMU); sub-synchronous oscillation (SSO)

中图分类号: TM764; TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)04-0054-04

0 引言

随着我国互联电网规模的扩大,电力系统的动态特性日趋复杂。作为互联电力系统动态过程监测分析的重要手段,近年来,广域测量系统(WAMS)在我国得到快速发展,其监测分析等高级应用功能也日益得到重视^[1~4]。

广域测量系统“主要采集、处理电力系统动态数据,是电网动态安全监测预警系统的重要组成部分”。要实现动态数据的分析处理,要求广域测量系统能够同步地采集到动态数据的准确信息。本文主要讨论广域测量系统的数据记录密度的选择问题。

为提高输电能力、改善系统稳定性,串联电容补偿装置在长距离输电线路上的使用越来越广泛。以华北电网为例,由于京津唐地区为典型的受端电

网,很大一部分电力需要通过西电东送通道输送。到2007年底,华北电网范围内将有十几台串补装置安装在长距离输电线路上。大量串补装置、无功补偿装置及直流输电调制、电力系统稳定器等控制装置的投入,使得电力系统发生次同步振荡的可能性大大增加^[5~7]。

目前,对于WAMS系统高级应用功能,受关注较多的是0.1~3 Hz范围内的低频振荡的监测与分析^[8~10]。对于大于10 Hz的次同步振荡等动态过程的监测分析,目前涉及较少。要实现次同步振荡过程的监测分析,我们需要重新考虑广域测量系统的数据记录密度。

合理的数据记录密度,既要保证信息的完整性,也要尽量减少数据传输与存储负担。本文结合信号处理知识提出,如果WAMS要实现次同步振荡动态过程的监测分析,动态数据记录密度应达到100帧/

秒以上。本文以华北电网 WAMS 系统记录实际数据为例论证了本文的观点。

1 低频振荡监测对数据记录密度的要求

发电机经输电线并列运行时,在扰动下会发生转子间的相对摇摆,并在缺乏阻尼时引起持续振荡,由于其振荡频率很低,一般为 0.1~3 Hz,因此称为低频振荡。低频振荡对整个电网的安全稳定有着十分不利的影响,因此,对低频振荡的监测分析是广域测量系统的重点目标之一。对低频振荡的监测分析,国内外的研究成果很多。从对数据记录密度的要求上来讲,10 Hz 的数据记录密度可以满足要求。

2 次同步振荡监测对数据记录密度的要求

2.1 次同步振荡 (SSO)

当发电机经由串联电容补偿的线路接入系统时,在一定条件下,会发生次同步谐振,谐振频率即系统 LC 谐振频率。对于此谐振频率,发电机相当于一台处于发电状态的异步电机,从而使谐振过程可能得以持续。

设次同步谐振频率为 ω_{er} ,三相定子绕组中的对称次同步频率的电流在气隙中产生以 ω_{er} 为角速度的旋转磁场,这一旋转磁场与转子的直流励磁电流(在空间中产生以同步转速 ω_0 旋转的磁场)会产生相互间作用力矩,这是一个交变电磁力矩,交变频率为 $\omega_0 - \omega_{er}$ 。这一交变频率如果与汽轮发电机轴系的自然扭振频率比较接近,就可能引起机械与电气的相互激励,如果这种激励能够抵偿或超过机械和电磁振荡中的各种阻尼和电阻中的功率消耗,则振荡就能够得以维持甚至发散。

对高压直流输电线路(HVDC)、静止无功补偿器(SVC)以及 PSS 等有源快速控制装置,当其控制参数选择不当时,也可能激发次同步振荡 SSO (Sub-Synchronous Oscillation)。

次同步振荡对机组安全影响很大。出现次同步振荡后,由于轴系中产生很大的扭矩,在严重情况下可能导致大轴出现裂纹甚至断裂,降低轴系寿命。因此,对次同步振荡应进行有效的监测和分析。

2.2 次同步振荡监测对数据记录密度的要求

对于有限带宽的连续信号 $x(t)$,设 $x(t)$ 的周期为 T_0 ,其复指数形式的数学表达式为:

$$x(t) = \sum_{k=-m}^m F_k e^{j(2\pi kt/T_0 + \varphi_k)} \quad (1)$$

式中: m 为最高谐波次数; F_k 为第 k 次谐波的傅立叶系数; φ_k 为 k 次谐波的相角; T_0 为信号周期。

以 T_s 为采样周期对 $x(t)$ 采样,得离散信号:

$$x(n) = \sum_{k=-m}^m F_k e^{j\varphi_k} e^{jk n \omega_0} \quad (2)$$

式中: $\omega_0 = \Omega_0 T_s = 2\pi T_s / T_0$ 。

设 $T_0/T_s = N$,将 $x(n)$ 用如下矩形窗 $d(n)$ 截短:

$$d(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1; \\ 0 & n < 0, n \geq N; \end{cases} \quad (3)$$

采样信号 $x(n)$ 和矩形窗函数 $d(n)$ 的离散序列傅立叶变换(DTFT)分别为

$$X(\omega) = 2\pi \sum_{k=-m}^{+m} F_k e^{j\varphi_k} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - k\omega_0 - 2n\pi) \quad (4)$$

$$D(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jn\omega} = e^{-j\omega(N-1)/2} \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} \quad (5)$$

$x(n)$ 经矩形窗截短后所得序列记为 $x_d(n) = x(n)d(n)$,其离散序列傅立叶变换为

$$X_d(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X(e^{j\theta}) D(\omega - \theta) d\theta \quad (6)$$

由式(6)可以得出,只有当 $N \geq 2m$ 时,才可以保证连续频谱没有混叠,式(6)简化为:

$$X_d(\omega) = \sum_{k=-m}^m \left[F_k e^{j\varphi_k} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-jn(\omega - k\omega_0)} \right] \quad (7)$$

对于由单一频率的纯正弦信号组成的周期信号来说,由于其频谱为线谱,采样频率仅仅等于被采样信号最高频率的两倍的时候,频域依然可能出现混叠。以单一频率正弦信号为例,设

$$x(t) = \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

如果每个周期只采样两个点(即采样频率为信号频率的两倍),则采样信号为一数值相同、正负跳变的序列,从而无法得到原始信号 $x(t)$ 的真实信息。

因此,对由正弦信号组成的连续信号,采样频率必须保证大于最高频率的两倍。在实际应用中,对于单一频率的正弦信号,一般要保证每个信号周期采样 3 个点。

由以上分析可知,要实现对的次同步振荡(频率范围为 10~50 Hz)的监测分析,PMU 的数据记录密度应达到 30~150 帧/s。根据电力系统的实际情况,100 帧/s 的数据记录密度可以满足绝大多数情况下的实用要求。

3 数据记录密度与通道带宽的关系

PMU 上传至 WAMS 主站的数据包括实时监测数据和离线文件数据。传送离线文件时,不能影响实时监测数据的正常传送。因此,PMU 子站向 WAMS 主站上传的最大数据流量为实时监测数据流量与离线文件数据流量之和。

带宽理论值计算过程如下:

1) 实时监测数据流量(bps)= 实时监测数据的 IP 报文长度(BYTE) $\times 8 \times$ 数据上传密度;

2) 离线文件数据流量(bps)= 离线文件数据的 IP 报文长度(BYTE) $\times 8 \times$ 数据上传密度;

3) 通道带宽=(实时监测数据流量+离线文件数据流量) $\times K$ (裕度系数 K 一般可取 1.5);

在计算实时监测数据流量时,实时监测数据 IP 报文包括测量数据以及数据帧报文中的 SYN、SOC、FRAMESIZE、STAT、CRC16 及 TCP 网络通信报文头等。

由以上分析可以看出,实时监测数据流量对通信带宽的要求与数据记录密度成正比。离线文件大小与数据记录密度也基本成正比。因此,数据记录密度的增加,意味着对带宽提出了更高的要求。目前,广域测量系统的数据传输通道包括 2M 专线、ATM 网络以及调度数据网几种形式,最终将统一过渡到调度数据网。以华北电网 WAMS 为例,数据上传速度为 100 帧/秒时,所有 PMU 子站对通道带宽的要求都不会超过 2M。因此,调度数据网完全可以满足 WAMS 系统的要求。

4 不同数据记录密度的比较

2007 年 1 月 12 日 22 点到次日 5 点,华北电网在托克托电厂进行扭振试验。试验过程中,托克托电厂 6 号机与托电其他机组解列,通过托源 IV 线接入浑源站。

图 1(a) 给出了 1 月 12 日 23:18:00 后 1 s 内浑源站 PMU 装置记录的托源 IV 线有功功率。数据记录密度为 100 帧/s。此时,试验设定的次同步振荡频率为 15.3 Hz。数据记录密度为振荡频率的 6.536 倍。图 1(b) 给出了图 1(a) 对应数据去除直流分量后的频谱分析结果。由图 1(b) 可以看出,该时间段内托源 IV 线有功功率存在频率为 15.3 Hz、幅值为 1.8 MW 左右的振荡。

图 2(a) 将数据记录密度降为 50 帧/s,数据记录密度为振荡频率的 3.268 倍。图 2(b) 给出了图 2(a) 对应数据的频谱分析结果。由图 2(b) 同样可以看出,该时间段内托源 IV 线有功功率存在频

率为 15.3 Hz、幅值为 1.75 MW 左右的次同步振荡。

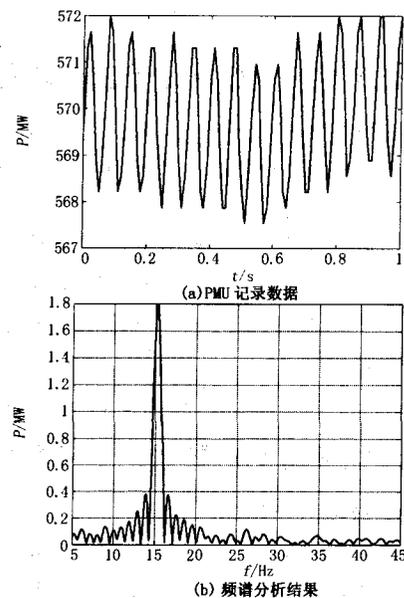


图 1 托克托电厂扭振试验记录波形及频谱分析结果 (数据记录密度: 100 帧/s)

Fig.1 PMU-recorded data and its frequency spectrum during Torsion Vibration Experiment in ToKeTo power plant (Data record Rate: 100 frames per second)

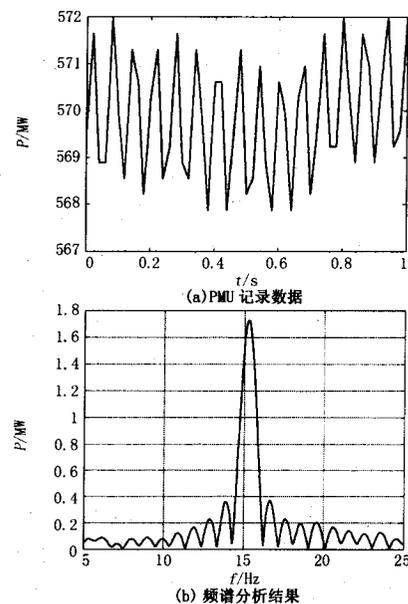


图 2 托克托电厂扭振试验记录波形及频谱分析结果 (数据记录密度: 50 帧/s)

Fig.2 PMU-recorded data and its frequency spectrum during Torsion Vibration Experiment in ToKeTo power plant (Data record Rate: 50 frames per second)

图 3(a) 的数据记录密度降为 25 帧/s,数据记录密度为振荡频率的 1.634 倍。图 3(b) 给出了图

3 (a) 对应数据的频谱分析结果。可以看出, 25 帧/秒的数据记录密度已明显不能满足分析要求, 数据有明显畸变, 频率谱分析结果显示振荡频率为 9.7 Hz, 明显与实际情况不符, 分析结果没有参考意义。

由以上算例可以看出, 对于频率为 15.3 Hz 的次同步振荡, 50 Hz 以上的 WAMS 数据记录密度可以保证数据分析的可靠性。但考虑到实际次同步振荡的频率范围为 10~50 Hz 左右, 如果要对次同步振荡的在线监测分析, WAMS 数据记录密度应取 100 Hz 左右。

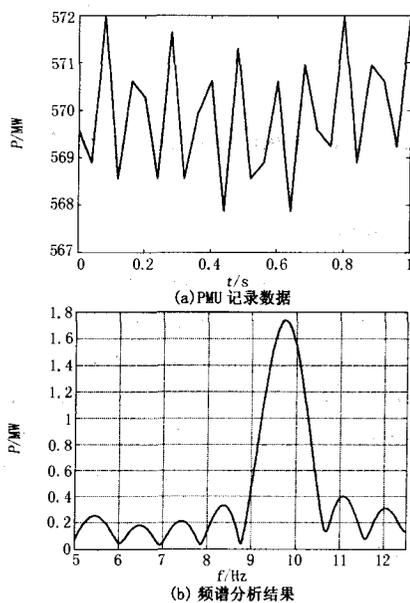


图3 托克托电厂扭振试验记录波形及频谱分析结果 (数据记录密度: 25 帧/s)

Fig.3 PMU-recorded data and its frequency spectrum during Torsion Vibration Experiment in ToKeTo power plant (Data record Rate:25 frames per second)

5 结论

结合信号处理知识和华北电网广域测量系统的实际记录数据, 本文指出, 要实现广域测量系统对次同步振荡过程的监测和正确分析, 理论上各子站 PMU 的数据记录密度必须达到次同步振荡频率的 2 倍以上。实际应用中, 为使对振荡波形的观察更直观, 数据记录密度最好在振荡频率的 3 倍以上。一般地, 100 帧/s 及以上的数据记录密度可以满足大部分情况下实际电力系统中分析次同步振荡的要求。

参考文献

[1] 段俊东, 郭志忠. 基于广域测量的在线电压稳定监视[J]. 继电器, 2006, 34(15):24-28.

- DUAN Jun-dong, GUO Zhi-zhong. On-line Assessment of Voltage Stability of Power System Based on Wide-area Measurement System[J]. Relay, 2006, 34(15):24-28.
- [2] 郑相华, 米增强, 赵洪山, 等. 基于 PMU 的状态估计的研究[J]. 继电器, 2004, 32(17):16-19.
ZHEN Xiang-hua, MI Zen-qiang, ZHAO Hong-shan, et al. Research on State Estimation Based on PMU[J]. Relay, 2004, 32(17):16-19.
- [3] 王建, 张胜, 贺春, 等. 国内外 PMU 装置性能对比[J]. 继电器, 2007, 35(6):74-76.
WANG Jian, ZHANG Shen, HE Chun, et al. Comparison of PMU Devices from Domestic and Overseas[J]. Relay, 2007, 35(6):74-76.
- [4] 刘道伟, 谢小荣, 穆刚, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005 (1): 13-17.
LIU Dao-wei, XIE Xiao-rong, MU Gang, et al. An On-line Voltage Stability Index of Power System Based on Synchronized Phasor Measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005(1):13-17.
- [5] 邓集祥, 华瑶, 韦春华. 次同步谐振中的分歧分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (12): 24-27, 39.
DENG Ji-xiang, HUA Yao, WEI Chun-hua. Bifurcation Analysis in Sub-synchronous Resonance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (12): 24-27, 39.
- [6] 王西田, 杨帆, 杨秀, 等. 含 HVDC 的电力系统次同步振荡参数稳定域的可视化分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (7): 39-43.
WANG Xi-tian, YANG Fan, YANG Xiu, et al. Visualization and Analysis of the Parametric Stability Region of Subsynchronous Oscillations in AC/DC Power System with HVDC Link[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (7): 39-43.
- [7] 徐源源, 廖勇, 陈国庆, 等. HVDC 互调谐波引起发电机次同步谐振的仿真[J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2006, 29 (1): 36-40.
XU Yuan-yuan, LIAO Yong, CHEN Guo-qing, et al. Influence of HVDC System on the Shaft of Hydro-generator Unit[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29 (1): 36-40.
- [8] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多项式拟合补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (20): 29-34.
HU Zhi-xiang, XIE Xiao-rong, TONG Lu-yuan. Characteristic Analysis and Polynomial Fitting Based Compensation of the Time Delays in Wide-area Damping Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (20): 29-34.

(下转第 62 页 continued on page 62)

- NIU Dong-xiao, CAO Shu-hua, ZHAO Lei, et al. The Technology of Power Load Forecasting and Its Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] HUANG Guang-bin, ZHU Qin-yu, Chee-Kheong Siew. Real-Time Learning Capability of Neural Networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2006, 17(4): 863-878.
- [3] 谢宏, 陈志业, 牛东晓, 等. 基于小波分解与气象因素影响的电力系统日负荷预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 5-10.
XIE Hong, CHEN Zhi-ye, NIU Dong-xiao, et al. The Research of Daily Load Forecasting Model Based on Wavelet Decomposing and Climatic Influence[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 5-10.
- [4] Hippert H S, Pedreira C E, Souza R C. Neural Networks for Shortterm Load Forecasting: a Review and Evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 44-55.
- [5] 胡子珩, 陈晓平, 刘顺桂, 等. 深圳电网自动运行的短期负荷预测系统[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 21-25.
HU Zi-heng, CHEN Xiao-ping, LIU Shun-gui, et al. An Autooperating Short-Term Load Forecasting System for Shenzhen Power Network[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 21-25.
- [6] Specht D F. A General Rergrression Neural Network[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1991, 2(6): 568-576.
- [7] 吴耀华. 基于GM-GRNN的电力系统长期负荷预测[J]. 继电器, 2007, 35(6): 45-48.
WU Yao-hua. Long Term Load Forecasting Based on GM-GRNN in Power System[J]. Relay, 2007, 35(6): 45-48.
- [8] 谷志红, 牛东晓, 王会青. 广义回归神经网络模型在短期电力负荷预测中的应用研究[J]. 中国电力, 2006, 39(4): 11-14.
GU Zhi-hong, NIU Dong-xiao, WANG Hui-qing, Research on Application of General Regression Neural Network in Short-term Load Forecasting[J]. Electric Power, 2006, 39(4): 11-14.
- [9] 李士勇, 等. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
LI Shi-yong, et al. Ant Colony Algorithms with Applications[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [10] 詹士昌, 徐婕. 用于多维函数优化的蚁群算法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3): 223-229.
ZHAN Shi-chang, XU Jie. An Ant Colony Algorithm Which Applying to the Multidimensional Function Optimization Problems[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003, 11(3): 223-229.
- [11] 马良. 基于蚂蚁算法的函数优化[J]. 控制与决策, 2002, 17(增刊): 719-722.
MA Liang. Ant Algorithm Based Function Optimization[J]. Control and Decision, 2002, 17(S): 719-722.
- [12] 赵宝江, 金俊, 李士勇. 一种求解函数优化的自适应蚁群算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(4): 40-43.
ZHAO Bao-jiang, JIN Jun, LI Shi-yong. Adaptive Ant Colony Algorithm for Function Optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(4): 40-43.

收稿日期: 2007-08-16; 修回日期: 2007-10-22

作者简介:

李如琦(1959-), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统最优运行与规划、人工智能; E-mail: liruqi59@gxu.edu.cn

杨立成(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统最优运行与规划、人工智能;

莫任勋(1970-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化控制。

(上接第 57 页 continued from page 57)

- [9] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60.
JU Ping, XIE Huan, MENG Yuan-jing, et al. Online Identification of Low-Frequency Oscillations Based on Wide-Area Measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60.
- [10] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.
XIE Xiao-rong, XIAO Jin-yu, TONG Lu-yuan, et al. Inter-are Damping Control of Interconnected Power Systems Using Wide-area Measurements[J]. Automation

of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 37-40.

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2007-08-22

作者简介:

王茂海(1976-), 男, 博士, 工程师, 主要从事广域测量系统的高级应用、EMS 高级应用等方面的工作; E-mail: wang.maohai@ncgc.com.cn

谢开(1971-), 男, 博士, 从事电网调度管理、自动化管理、电力市场等方面工作;

徐正山(1963-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网调度自动化方面的工作。