

DOI: 10.7667/PSPC180216

四统一四规范同步相量测量装置关键技术研究

袁明军¹, 江浩¹, 黎强¹, 黄少雄², 王治华³

(1. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518004; 2. 国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230022;
3. 国网上海市电力公司电力调度控制中心, 上海 200122)

摘要: 智能电网建设的全面深入推进, 对变电站自动化系统安全可靠运行和智能分析应用提出了新需求。为此, 国家电网对自动化产品提出“四统一四规范”要求。介绍一种满足同步相量测量装置“四统一四规范”要求的装置, 论述装置功能模块基本架构。阐述了装置关键技术研究内容, 提出一种抑制带外频率的同步相量实时计算模型, 入网测试结果显示该算法远优于标准要求。提出基于 Hamming 窗的双插值 FFT 次/超同步振荡监测算法, 测试结果显示其有效性。揭示了直流换流站伪低频振荡/次同步振荡产生机理, 对直流换流站提出采样频率要求。描述了和电流计算及品质处理、多间隔 PT/CT 断线判断逻辑等功能。最后介绍了装置信息模型及通信服务相关内容。

关键词: 同步相量测量装置; 四统一四规范; 带外频率; 次/超同步振荡; 双插值 FFT

Research on key technology of four unified four standard phasor measurement unit

YUAN Mingjun¹, JIANG Hao¹, LI Qiang¹, HUANG Shaoxiong², WANG Zhihua³

(1. CYG SUNRUI Co., Ltd., Shenzhen 518004, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230022, China; 3. Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The comprehensive and in-depth development of smart grid has brought new demands for the safe and reliable operation and intelligent analysis of substation automation system. For this reason, State Grid Corporation of China has put forward the “four unification, four standard” requirements for automation products. This paper introduces a device that meets the requirements of the phasor measurement unit “four unification, four standard”. The basic structure of the function module is discussed. The research content of the key technology of the device is expounded. A real time calculation model of synchronous phasor for restraining out of band frequency is introduced, and testing results show that this algorithm is far better than the standard requirements. A double interpolating FFT subsynchronous and supersynchronous oscillation monitoring algorithm based on Hamming window is proposed, and simulation results show its effectiveness. The mechanism of the pseudo low frequency oscillation / subsynchronous oscillation in DC converter station is revealed, and the sampling frequency requirement for DC converter station is proposed. The functions of current calculation, quality processing, multiple interval PT/CT line judgment logic and so on are described. Finally, the device information model and the related content of communication service are introduced.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 520900160006).

Key words: phasor measurement unit; four unified four standard; out of band frequency; subsynchronous and supersynchronous oscillations; double interpolation FFT

0 引言

随着智能电网建设的推进, 变电站自动化系统

的定位和功能要求发生了明显变化。比如, 直流输电技术与新能源并网的快速发展, 对站端实时监测数据提出了更全面的要求, 除工频量外, 需拓展非工频量测量功能(包括谐波、次/超同步振荡、连续录波等)。为了满足自动化专业发展, 提升现场运维水平, 国家电网对自动化二次设备提出“四统一四规范”要求。同步相量测量装置“四统一四规范”

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(520900160006); 国网安徽省电力公司科技项目“面向未来的厂站自动化技术研究”

指: 统一装置的外观接口、信息模型、通信服务、人机交互操作方法, 规范参数配置、应用功能、版本管理、质量控制, 实现变电站同步相量测量装置的标准化。

同步相量测量装置作为电力系统实时动态监测系统的重要组成部分, 为大电网的振荡识别、稳定控制等动态安全稳定监控提供数据基础。随着电网技术发展, 同步相量测量的技术应用及功能实现均出现了新的特点^[1-9]。本文介绍一种满足国家电网四统一、四规范要求同步相量测量装置, 描述了装置的基本架构, 论述了考虑带外影响的同步相量算法模型、次/超同步监测算法、和电流计算及品质处理、伪低频振荡/次同步振荡等新技术, 介绍了同步相量测量装置信息模型。

1 同步相量装置基本架构及主要功能

根据应用场景, 将同步相量装置分为常规采样常规开入、常规采样 GOOSE 开入、SV 采样 GOOSE 开入 3 种类型。SV 采样 GOOSE 开入同步相量测量装置功能模块基本架构如图 1 所示。

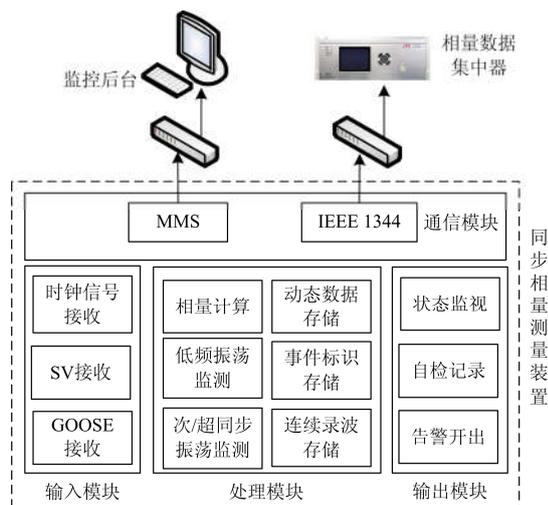


图 1 SV 采样 GOOSE 开入同步相量测量装置基本架构

Fig. 1 Basic architecture of SV sampling phasor measurement unit

同步相量测量装置主要功能如下。

- 1) 时间同步: 对时信号接收及时间同步监测功能。
- 2) 相量计算: 通过加窗傅里叶算法进行相量计算, 同步计算出频率、频率变化率、有功功率、无功功率等信息。
- 3) 低频振荡监测: 实时监测低频振荡。
- 4) 次/超同步振荡监测: 实时计算次/超同步振荡主导分量幅值及频率。

5) 动态数据存储: 循环存储不少于 14 天动态数据文件。

6) 事件标识存储: 记录幅值、频率、频率变化率越限等电网异常信息。

7) 连续录波存储: 循环存储不少于 3 天连续录波文件。

8) 实时数据上送: 通过 IEEE1344 或 GB/T26865.2 规约上送实时数据。

9) MMS 上送: 上送装置状态、告警等信息。

10) SV 接入: 适用于 SV 采样装置。

11) GOOSE 接入: 适用于 GOOSE 开入装置。

2 同步相量装置关键技术研究

本文就同步相量实时测量算法模型、次/超同步振荡在线监测算法、PT/CT 断线逻辑、和电流计算及品质处理、直流换流站采样要求等关键技术做出论述。

2.1 同步相量实时测量算法模型

根据采样定理, 相量由子站上传至主站过程中, 主站仅能准确量测一定带宽的电力系统信号, 此频带宽度以外的频率被称作带外频率。如果电力系统基波频率表示为 f_0 , 相量上传频率表示为 f_s , 则奈奎斯特频率为 $f_s/2$, 主站能够准确量测的电力系统信号频带为 $[f_0 - f_s/2, f_0 + f_s/2]$, 此频带范围以外的频率即称为带外频率。带外信号将对主站分析产生干扰, 应予以滤除。因此, 同步相量测量装置除了计算基波相量外, 还需根据上送频率对带外信号进行抑制及处理。

C37.118.1TM-2011 标准提出了一种基本同步相量算法模型, 若采用该模型抑制带外频率, 则该模型中低通滤波数据窗较长, 将影响动态情况下的相量数据响应速度。

文献[10]针对 DFT 类测量算法实现了相量和频率测量滤波器的最优设计, 该算法仅针对 P 类相量测量装置, 而实际现场应用的相量测量装置仍以 M 类为主。文献[11]提出一种实用的工程应用数字滤波器方案, 针对增加滤波器的幅值相位补偿问题和计算量过大问题提出了解决方案, 建议提高计算频率避免频谱混叠, 同时, 只要滤波器参数设计合理, 幅值相角误差进行简单补偿即可满足工程应用要求。文献[12]提出一种基于改进 DFT 的同步相量测量方法, 文献[13]提出一种基于对称平移 1/12 采样窗的自适应 DFT 同步相量测量算法, 这两种方法在纯基波情况下有较好的精度, 但未考虑谐波及带外信号影响。

本文对基本同步相量算法模型进行改进, 使得

装置在抑制带外频率的同时具备较快的响应速度,如图2所示。除了前端的模拟滤波器外,相量计算采用了2层数字滤波,第1层数字滤波滤除高频信号,第2层数字滤波滤除带外信号。其中,第2层数字滤波参数将根据上传相量频率自动进行调整。

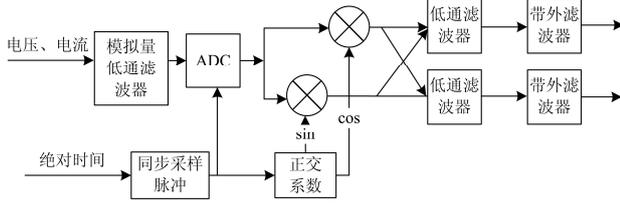


图2 同步相量算法改进模型

Fig. 2 Synchronized phasor algorithm model

将该改进模型用于常规采样同步相量测量装置入网测试,上送频率为100 Hz、带外信号含量10%时测试结果如表1所示。

表1 带外信号测试结果

Table 1 Test results of out of band signal

项目	标准要求	测试结果
幅值	≤0.5%	0.07%
相角	≤1°	0.03°
频率	≤0.025 Hz	0.00 Hz

2.2 次/超同步振荡在线监测算法

随着风电、光伏等新能源并网容量的增加以及直流输电的快速发展,电力电子技术得到广泛应用,以多源多变换复杂交直流系统为组成架构的新能源电力系统逐渐形成。风力发电、直流输电技术的应用,一方面增强了系统能源的清洁性和可控性,另一方面也带来了新的次/超同步扰动问题^[14]。

常见的次/超同步振荡监测算法有FFT、Prony、HHT、小波分析等等^[15-20]。FFT存在栅栏效应、频谱泄露等问题,Prony易受噪声影响,HHT存在端点效应及模态混叠问题,小波变换提取多频率成分信号时存在分辨率不高的问题。同时,Prony、HHT、小波变换计算量偏大,不利于在装置侧实现次/超同步振荡在线监测功能。

本文采用基于Hamming窗的双插值FFT算法,先用Hamming窗对采样数据加权,再用两次插值计算出次/超同步信号幅值、相角。

假设均匀采样的离散信号为

$$x(n) = \sum_{h=1}^k A_h \sin\left(\frac{2\pi f_h n}{N} + \theta_h\right) \quad (1)$$

式中: k 为频谱数目; f_h 为离散信号第 h 个频率值; A_h 为信号在 f_h 频率下的幅值; θ_h 为信号在 f_h 频率下

的初相角; N 为采样率。

对式(1)进行加窗卷积处理,其傅里叶表达式为

$$X_w(m\Delta f) = \sum_{h=1}^k \frac{A_h}{2j} e^{j\theta_h} W[2\pi(m-m_h)N/L] \quad (2)$$

式中: m 为 $1-L/2$ 之间的整数; L 为窗函数长度, $W[2\pi(m-m_h)N/L]$ 指窗函数在频率 $2\pi(m-m_h)N/L$ 下的幅频响应。

假设需测量第 i 项间谐波,忽略其余次间谐波的影响,式(2)变为

$$X_w(m\Delta f) = \frac{A_i}{2j} e^{j\theta_i} W[2\pi(m-m_i)N/L] \quad (3)$$

由于栅栏效应,第 i 项间谐波的频率很难正好位于采样频点上,即 m_i 一般不是整数。设在 $m_i\Delta f$ 附近幅值最大及次最大的谱线分别为 m_{i1} 、 m_{i2} , $m_{i1} \leq m \leq m_{i2}$ ($m_{i2}=m_{i1}+1$ 或 $m_{i1}-1$),这两条谱线的幅值分别为 y_1 及 y_2 ,则谱值比

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{W[2\pi(m-m_{i1})N/L]}{W[2\pi(m-m_{i2})N/L]} = \frac{W[2\pi\lambda_i N/L]}{W[2\pi(1-\lambda_i)N/L]} \quad (4)$$

式中, $\lambda_i = m_{i1} - m_{i2}$ 。

式(4)为一元方程,由于Hamming窗最大及次最大谱线均在主瓣内,同时,Hamming窗在主瓣范围内幅值衰减单调递增,即在主瓣范围内,对于每个 y_1/y_2 ,都有唯一的 λ_i 与之对应。将 λ_i [0, 1]范围分成 N_1 等份,对于每等份中间值,通过插值减小误差,可求得 λ_i 。最后,根据Hamming窗谱值比及 λ_i 求得间谐波频率、幅值。

对以下信号进行次同步算法仿真,信号叠加20 dB高斯白噪声。

$$u = \sqrt{2} \cos(2\pi f_0 t) + 0.25\sqrt{2} \cos(2\pi f_1 t) + 0.35\sqrt{2} \cos(2\pi f_2 t) \quad (5)$$

式中: f_0 为50; f_1 为26.3; f_2 为78.8;采样率为2 000 Hz,数据窗取2 s。

由表2可见:受栅栏效应及频谱泄漏影响,FFT

表2 次同步振荡监测算法仿真

Table 2 Simulation of sub synchronous oscillation monitoring algorithm

	理论值	加窗双插值 FFT计算结果	FFT计算 结果	Prony计 算结果
f_0	50.000	50.001	50.000	50.004
f_0 幅值	1.000	1.000	0.998	1.054
f_1	26.300	26.306	26.500	26.759
f_1 幅值	0.250	0.249	0.190	0.589
f_2	78.800	78.796	79.000	78.825
f_2 幅值	0.350	0.346	0.269	0.411

计算出的幅值及频率可能出现较大偏差; Prony 算法对噪声极为敏感, 无噪声影响时其计算结果十分准确, 加入 20 dB 噪声时, 频率及幅值误差明显增加; 加窗双插值 FFT 算法鲁棒性较好, 在噪声影响下误差极小, 能满足工程应用要求。

2.3 PT/CT 断线判断

PMU 标准要求装置具备 PT/CT 断线功能, 本文采用如下的多间隔 PT/CT 断线逻辑, 可以保证当 PT 二次回路出现一相、两相或三相断线时, 装置能够正确检测并发出 PT 断线告警信号; CT 二次回路出现单相、两相断线时, 装置能够正确检测并发出 CT 断线告警信号。

PT 断线判断逻辑为: 关联电流任一相大于 $0.5\%I_n$, 同时电压任一相小于 $30\%U_n$ 且正序电压小于 $70\%U_n$; 或者负序电压或零序电压大于 $10\%U_n$ 。

CT 断线判断逻辑为: 电流任一相小于 $0.5\%I_n$, 且负序电流及零序电流大于 $10\%I_n$ 。

2.4 和电流计算

二分之三接线方式普遍应用于 500 kV 以上电压等级变电站, SV 采样的同步相量测量装置具备二分之三接线方式和电流处理功能。

和电流计算及品质处理采用以下原则:

1) 装置正常运行状态下, 处于检修态的某一合并单元不参与和电流计算, 和电流对应的通道数据质量标识与非检修合并单元的品质保持一致;

2) 装置正常运行状态下, 参与该线路间隔和电流计算的合并单元均处于检修态时, 和电流值置 0, 和电流对应的通道数据质量标识置 1, 表示该通道数据不可用;

3) 装置检修状态下, 和电流正常计算, 所有通道的数据质量标识置 1, 表示该装置所有通道数据不可用。

2.5 直流换流站采样要求

频谱混叠现象源于数字式测量装置必须对连续时间信号进行采样处理, 如果待测量的信号中最高频率超过采样频率 f_s 的一半, 则高于 $f_s/2$ 的频率将作为低于 $f_s/2$ 的频率出现, 输出信号频率为

$$f_{out} = nf_s \pm f_1, f_1 \leq f_s/2 \quad (6)$$

式中: f_{out} 为信号实际频率; f_s 为采样频率; f_1 为混叠后频率。

换流变电站含有较大的谐波分量, 6 脉动换流器产生的特征谐波分量主要为 $(6k \pm 1)$ 次, 6 脉动换流器产生的特征谐波分量主要为 $(12k \pm 1)$ 次。装置采样率与特征谐波满足一定条件时, 频谱混叠可能导致伪低频振荡/次同步振荡现象出现。

例如, 电网实际频率为 49.995 Hz, 采样率为 1 200 Hz, 则 23 次谐波为 1 149.885 Hz, 因不满足采样定理, 根据式(6)得出其混叠后频率为 0.115 Hz。在此情况下, 直流站含量较高的 23 次谐波分量被误认为是低频振荡信号, 导致伪低频振荡现象发生。伪次同步振荡分析过程类似, 不赘述。

因此, 对于直流换流站, 同步相量装置不宜选取 1 200 Hz、2 400 Hz 等这一系列采样频率。

3 同步相量装置信息模型

3.1 逻辑节点

同步相量测量装置的建模及通信服务遵循 DL/T 860 的要求。一个同步相量测量装置物理设备建模为一个 IED 对象, 该对象是一个容器, 包含的逻辑设备对象主要有 LD0, CTRL, PIGO(SV 采样装置)和 PISV(GOOSE 采样装置)。

同步相量测量装置模型如表 3 所示。

表 3 同步相量测量装置模型

Table 3 Model of phasor measurement unit

功能	访问点	LD	LN类	描述
管理	S1	LD0	LLN0	工作模式、性能等信息
物理设备	S1	LD0	LPHD	设备状态、自检等信息
告警	S1	LD0	GGIO	装置异常告警等信息
事件	S1	LD0	GGIO	PT/CT断线事件信息
对时自检	S1	LD0	LTSM	对时信号状态、对时服务状态、时间跳变侦测状态等校时状态监测
光强监视	S1	LD0	SCLI	光口光强监测
电源电压监视	S1	LD0	SPVT	电源板/CPU板电压监视
装置温度监视	S1	LD0	STMP	装置内部温度监测
PT	S1	LD0	TVTR	PT变比信息
CT	S1	LD0	TCTR	CT变比信息
单点开入	S1	CTRL	GGIO	单点开入信息
双点开入	S1	CTRL	GGIO	双点开入信息
GOOSE输入虚端子	G1	PIGO	GGIO	GOOSE输入端子
SV输入虚端子	M1	PISV	GGIO	SV输入端子

3.2 数据集

同步相量测量装置可定义下列数据集:

1) 遥测(dsAin)

遥测数据集包含光强、电源电压、温度等测量数据。

2) 遥信(dsDin)

遥信数据集包含开入信号数据。

3) 告警信号(dsAlarm)

告警信号数据集包含告警信号数据。

4) 事件信号(dsWarning)

事件信号数据集包含事件信号数据。

5) 装置参数(dsParameter)

装置参数数据集包含设备参数数据。

6) 保护定值(dsSetting)

保护定值数据集包含功能投退控制字及越限定值数据。

4 结语

同步相量测量装置在电力系统得到广泛应用,其广域实时特性受到专家学者的更多关注^[21-24]。近年,风电/太阳能等新能源接入以及直流输电技术的发展对同步相量测量装置提出了新的需求。

为了促进自动化专业技术发展,国家电网制定了四统一四规范标准,相关装置已逐步投入应用。为了让专家学者了解四统一四规范同步相量测量装置新技术、新特点,就同步相量测量装置技术要点进行介绍,涉及装置基本功能、相量算法、次/超同步振荡监测、PT/CT断线判断、和电流计算及品质处理、伪次/超同步振荡产生原因、信息模型等。采用该文设计的同步相量测量装置已通过中国电力科学研究院入网检测,并成功应用于临沂变电站1000 kV交流工程。

参考文献

- [1] 白加林,高昌培,王宇恩,等.基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J].电力系统保护与控制,2016,44(18):157-162.
BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yuen, et al. Research and application of wide-area intelligent protection and control system based on the shared data source[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 157-162.
- [2] 童晓阳,王睿晗,王洪彬,等.基于有限PMU的电网故障在线识别算法研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(19):49-55.
TONG Xiaoyang, WANG Ruihan, WANG Hongbin, et al. Online detection algorithm of power system fault using limited PMUs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 49-55.
- [3] 陈剑,王茂海,刘连光.同步发电机辨识参数对数据误差的敏感性分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(8):1-6.
CHEN Jian, WANG Maohai, LIU Lianguang. Sensitivity of identification parameters to PMU data error of synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 1-6.
- [4] 刘革新,白杨,任祖怡,等.次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J].电力系统保护与控制,2018,46(2):131-136.
LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.
- [5] 张超,王维庆,王海云,等.风火打捆外送系统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.
- [6] MALLIKARJUNA B, SHANMUKESH P, ANMOL D, et al. PMU based adaptive zone settings of distance relays for protection of multi-terminal transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 126-140. DOI: 10.1186/s41601-018-0087-z.
- [7] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUNA B, REDDY M J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
- [8] 万蓉,薛蕙.考虑PMU的配电网潮流计算[J].电力自动化设备,2017,37(3):33-37.
WAN Rong, XUE Hui. Power-flow calculation for distribution network with PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 33-37.
- [9] 董清,马诚,韩锋.利用PMU测量相角数据计算不同测点间电压相角差的方法[J].电网技术,2017,41(9):2996-3002.
DONG Qing, MA Cheng, HAN Feng. Method for calculating phase angle difference between voltage phasors using phase angle data measured with DFT[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2996-3002.
- [10] 汪英平,赵伟,郭雷,等.同步相量和频率测量最优滤波器设计[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6691-6699.
WANG Fuping, ZHAO Wei, GUO Lei, et al. Optimal filter design for synchrophasor and frequency measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6691-6699.
- [11] 常乃超,刘思旭,余高旺,等.动态条件下同步相量测量装置的数字滤波器及计算优化[J].电力系统自动化,2017,41(20):92-96.
CHANG Naichao, LIU Sixu, YU Gaowang, et al. Digital filter and computational optimization of synchronized phasor measurement unit under dynamic conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 92-96.

- [12] 金涛, 陈毅阳, 段小华, 等. 基于改进 DFT 的电力系统同步相量测量算法研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 1-10.
JIN Tao, CHEN Yiyang, DUAN Xiaohua, et al. Research on synchronous phasor measurement algorithm of power system based on improved DFT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 1-10.
- [13] 刘世明, 郭韬, 吴聚昆, 等. 适用于频率偏移情况下同步相量测量的 DFT 算法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1522-1528.
LIU Shiming, GUO Tao, WU Jukun, et al. Study of DFT algorithm for synchrophasor measurement under frequency offset[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1522-1528.
- [14] 李立涅, 洪潮. 贵广二回直流输电系统次同步振荡问题分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 90-93.
LI Licheng, HONG Chao. Analysis of the SSO problem caused by Guizhou-Guangdong II HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 90-93.
- [15] 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 Hao, LI Jue, BI Tianshu, et al. Subsynchronous and supersynchronous inter-harmonic identification method based on phasor measurements[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3237-3243.
- [16] 谢小荣, 王银, 刘华坤, 等. 电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 189-194.
XIE Xiaorong, WANG Yin, LIU Huakun, et al. Detection method for sub-synchronous and super-synchronous harmonic phasors in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 189-194.
- [17] 王茂海, 齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 149-154.
WANG Maohai, QI Xia. Fast online detection method for power system sub-synchronous oscillation components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 149-154.
- [18] 张程, 金涛. 基于 ISPM 和 SDM-Prony 算法的电力系统低频振荡模式辨识[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1209-1216.
ZHANG Cheng, JIN Tao. Identification of low frequency oscillations in power systems using an improved smoothness priors method and second derivative method-Prony[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1209-1216.
- [19] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-141.
LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-141.
- [20] 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.
- [21] 李珊, 何怡刚, 项胜, 等. 基于故障电压比较与多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 92-98.
LI Shan, HE Yigang, XIANG Sheng, et al. A wide backup protection algorithm based on fault voltage comparison and multi-information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 92-98.
- [22] 余文辉, 王少荣, 柳斐, 等. 基于在线自组织同步 MAS 的电网广域保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 69-76.
YU Wenhui, WANG Shaorong, LIU Fei, et al. A wide area protection system based on synchronized MAS self-organizing online for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 69-76.
- [23] 丁伟, 何奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.
DING Wei, HE Benteng, WANG Huifang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.
- [24] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20.
XIE Xiaolei, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Development of novel PMU device for distribution network lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 15-20.

收稿日期: 2018-03-03; 修回日期: 2018-09-08

作者简介:

袁明军(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制、广域同步相量测量技术及应用;

E-mail: yuanmj22@163.com

江浩(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度自动化、广域同步相量测量技术及应用;

E-mail: jianghao@sznari.com

黎强(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度自动化。E-mail: Liqiang@sznari.com

(编辑 周金梅)