

电力互感器对同步相量测量的影响

刘灏, 毕天姝, 周星, 薛安成, 杨奇逊

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区 102206)

Impact of Instrument Transformers on Synchronous Phasor Measurement

LIU Hao, BI Tianshu, ZHOU Xing, XUE Ancheng, YANG Qixun

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Instrumental voltage and current transformers are necessary devices to connect primary system with synchronous phasor measurement units (PMUs) and they are also the key links by which whether the PMU can accurately acquire information of primary system, and their transmission and transformation precision as well as their dynamic characteristics directly impact the phasor measurement accuracy of PMU. The authors firstly summarize the dynamic signal models corresponding to dynamic processes in power system, including aperiodic components, abrupt change of amplitude and system oscillations caused by faults; then analyze the impacts of instrument transformers on phasor measurement during above-mentioned dynamic processes occurred in power system; special emphasis are laid on the analysis of ferromagnetic resonance and transient response of capacitor voltage transformer as well as saturation of instrumental current transformer to research the impacts of instrument transformers on phasor measurement results under various dynamic processes. Based on the analysis results, some suggestions are proposed to provide reference for drafting evaluation criteria of dynamic behavior of PMU and to provide bases for rationally choosing instrument transformers used in wide area measurement system.

KEY WORDS: phasor measurement unit (PMU); capacitor voltage transformer; transient response; ferro-resonance; current transformer

摘要: 电力互感器作为连接一次系统和同步相量测量单元(phasor measurement units, PMUs)的必要设备, 是PMU能否准确获取一次系统信息的重要环节, 其传变精度和动态特性直接影响PMU相量测量的精度。首先总结了电力系统动态现象所对应的动态信号模型, 包括故障引起的非周期分量、幅值突变和系统振荡; 分析了电力系统在发生以上动态

过程时电力互感器对相量测量的影响; 并侧重分析了电容式电压互感器的铁磁谐振和瞬变响应问题以及电流互感器的饱和问题, 以此来观察电力互感器在不同动态情况下对相量测量结果的影响。

关键词: 同步相量测量单元; 电容式电压互感器; 瞬变响应; 铁磁谐振; 电流互感器

0 引言

近年来我国互联电网已基本形成, 系统容量日益增大, 系统结构与运行方式日趋复杂, 这对电网的实时监测和反事故能力提出了更高的要求^[1]。

随着卫星授时技术、数字信号处理技术和通信技术的发展, 以同步相量测量技术为基础的动态安全监测系统(wide-area measurement system, WAMS)已成为目前电力系统动态过程监测与控制的重要工具^[2-9]。

同步相量测量单元(phasor measurement units, PMU)作为WAMS的核心^[10-11], 负责对电网各枢纽点的电压、电流相量进行准确测量, 以同步获取电网动态运行断面。因此, 在动态情况下PMU能否准确跟踪一次信号尤为重要^[12-15]。文献[16]提出了通过计算综合矢量误差(total vector error, TVE)来综合评价PMU稳态性能, 为测试和评价PMU提供了可靠依据, 但并未涉及动态情况下的评价标准。文献[17]从实验室测试和现场测试两方面对PMU的动态行为进行了评价, 重点分析了实验室测试中PMU的滤波特性对测量结果的影响。文献[18]提出了一种离散傅里叶改进算法, 可以减小传统离散傅里叶算法由于频谱泄露造成的计算误差, 从相量算法方面进行了误差分析和改进。

在实际系统中, 电力互感器是PMU能否准确获取一次系统信息的重要环节, 其传变精度的高低及动态行为特性直接影响PMU相量测量的精度。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837002); 国家自然科学基金重大国际合作项目(50920105705); 高等学校学科创新引智计划项目(B08013)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837002, 50920105705); Project Supported by the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities(B08013).

在电力系统动态情况下,电力互感器由于内部结构的特点会产生一些问题,例如电容式电压电容器铁磁谐振、电流互感器饱和等,对电压电流量的传变有一定影响,从而影响二次侧的测量和控制^[19]。

本文将首先总结电力系统动态信号,针对PMU所应关注的动态信号建立模型,然后对电力互感器在上述动态信号下对相量测量的影响进行分析,其中着重分析电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)的铁磁谐振和瞬变响应问题以及电流互感器(current transformer, CT)的饱和问题,对PMU系统的动态行为研究及其电力互感器选型提供基础。

1 电力系统动态信号模型

1.1 电磁暂态

电力系统暂态过程可以分为2类:电磁暂态与机电暂态^[20]。2种暂态过程均会对电网中基频电压、电流信号产生不同程度的干扰。

电磁暂态为发生短路等故障时,线路、变压器的电压、电流等电气运行参数量快速变化的过程。主要包括以下几类:

1) 阶跃突变。当雷击输电线路或绝缘子污闪引起系统短路后,保护迅速将其切除,而后又自动重合闸成功,在这过程中出现的电压下凹现象;或者在中性点不接地系统中,发生瞬时单相接地故障时,正常相的对地电压会升高,出现电压上凸现象;以及开关分合闸时引起的电压、电流幅值突变现象等。若 t 时刻发生突变,则表达式为

$$x(t)=[X_m \varepsilon(t)+X_t \varepsilon(t-\tau)]\sin(2\pi ft+\varphi) \quad (1)$$

式中: X_m 为突变前幅值; X_t 为幅值突变大小; $\varepsilon(t)$ 为阶跃函数。

2) 短路故障。当存在电弧时,会产生高频干扰信号,约为 10^4 Hz以上。若靠近发电机端故障,在定子回路和传输线上会产生非周期分量。若考虑高频分量可被低通滤波器滤除,则故障后信号包括周期分量和非周期分量2部分,即

$$x(t)=x_1(t)+x_0(t)=X_1 \sin(2\pi ft+\varphi_1)+X_0 e^{-t/\tau} \quad (2)$$

式中: $x_1(t)$ 为周期分量; $x_0(t)$ 为非周期分量; X_1 为周期分量幅值; φ_1 为相量初相角; X_0 为非周期分量幅值; τ 为非周期分量的衰减时间常数。

3) 此外,电网谐振、铁磁谐振、雷电、开关浪涌、行波等电磁现象产生的噪声信号频率在 $10^3 \sim 10^5$ Hz以上。除极少一部分外,大多数的高频分量都会被PMU的低通滤波器滤除。因此,电磁

暂态中仅关注信号幅值阶跃突变以及故障产生的非周期分量对PMU相量测量的影响。

1.2 机电暂态

机电暂态为电机角位移、角速度等机械运行参数的慢速变化过程。稳态下,电网中各发电机转子以同步速度旋转。当发生短路等扰动时,由于发电机的原动机输入功率与电磁功率不再平衡,转子不再以同步速度旋转,功角偏离稳定值。各发电机发出的信号频率不再相同,且不同程度地偏离额定频率。因此,各节点电压由几个幅值不同但频率接近额定频率的电压信号叠加而成。叠加后电压信号的幅值、相角、频率都将以一定的频率振荡。现假设有一电压信号由2个电压信号叠加而成,为

$$x(t)=X_1 \sin(\omega t)+X_2 \sin(\omega+\Delta\omega)t \quad (3)$$

式中: ω 为信号 X_1 的角速度; $\Delta\omega$ 为两信号之间的角速度偏差。则有

$$x(t)=X_3 \sin(\omega t+\phi) \quad (4)$$

式中: $X_3=\sqrt{X_1^2+X_2^2+2X_1X_2 \cos(\Delta\omega t)}$; $\tan\phi=[X_2 \sin(\Delta\omega t)]/[X_1+X_2 \cos(\Delta\omega t)]$ 。

假设2个电压信号因距离远近不同, X_2 远小于 X_1 ,则 $X_3 \approx X_1+X_2 \cos(\Delta\omega t)$, $\tan(\phi) \approx 0$ 。这便是典型的幅值振荡信号的模型,也称为功率振荡。可表示为

$$x(t)=[X+X_d \cos(2\pi f_1 t+\varphi_1)]\cos(2\pi ft+\varphi) \quad (5)$$

式中: X_d 为幅值调制深度; f_1 为调制频率; f 为信号频率; φ 为电压初相角; φ_1 为调制部分初相角。

当系统中发生故障时,同步发电机可能产生各种频率的电磁转矩。如果该频率与发电机轴系转动部分的扭动振荡频率互补,则发生共振。最低的扭动振荡频率可达1.51~1.67 Hz,而最高的扭动振荡频率可达47.5~55 Hz。此时,发电机转子转速在同步转速的基础上叠加了一个以轴系扭动频率振荡的转速,其机端电压频率相应的以此频率发生振荡。振荡频率从1.51~55 Hz不等。

角速度在 ω_0+A 和 ω_0-A 之间以余弦函数变化,即

$$\omega=\omega_0+A \cos(\omega_1 t+\varphi_1) \quad (6)$$

相量的角度用积分计算为

$$\phi=\int \omega dt=\omega_0 t+\frac{A}{\omega_1} \sin(\omega_1 t+\varphi_1) \quad (7)$$

因此频率调试信号模型为

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \sqrt{2}X \cos(\phi + \phi_0) = \\
 &\sqrt{2}X \cos[\omega_0 t + \frac{A}{\omega_1} \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \phi_0] = \\
 &\sqrt{2}X \cos[2\pi f_0 t + \frac{f_d}{f_1} \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) + \phi_0] \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中： f_0 为额定频率； f_d 为频率调制深度； f_1 为调制频率。调制频率的选择从区域间低频振荡、区域内低频振荡、次同步振荡以及 Nyquist 频率的倍数 4 个方面考虑。

2 电容式电压互感器动态行为研究

2.1 电容式电压互感器模型

目前现场广泛使用的电压互感器有电磁式和电容分压式互感器 2 种，电磁式电压互感器是根据电磁感应原理变换电压；电容式电压互感器采用电容分压原理，电路如图 1 所示。

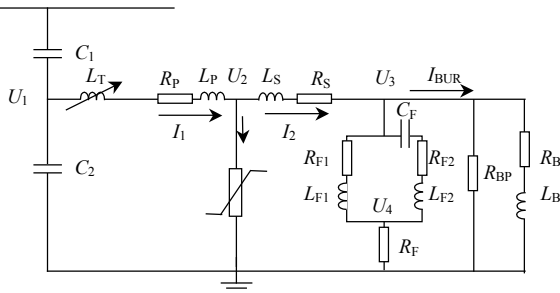


图 1 CVT 等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of CVT

采用频谱分析的方法来计算上述动态信号模型经 CTV 后幅值衰减情况和相移情况，其中研究采用的 CVT 参数为 230 kV 系统中一个实际的保护用互感器模型参数，准确等级为 3P，稳态条件下相移不超过 2°。

2.2 出现非周期分量时 CVT 对相量测量的影响

当线路发生故障时，经 CVT 后二次侧也会出现非周期电压分量。当一次侧输入非周期分量时，CVT 二次侧输出的非周期分量由周期分量、强制非周期分量和自由非周期分量组成。自由非周期分量在二次电压的非周期分量中起决定作用^[21-22]。

一次电压中含有非周期分量时 CVT 的传变结果如图 2 所示，可见 50 Hz 基频幅值衰减为 0.94%，这个误差比较小，相角误差也较小。

2.3 电压幅值突变时 CVT 对相量测量的影响

针对 CVT 的瞬变响应和铁磁谐振问题，模拟了当出现上述问题时 CVT 对相量测量的影响。

1) 瞬变响应。模拟电网发生对地短路时，互感器一次侧电压突然降为零的情况，如图 3 所示。

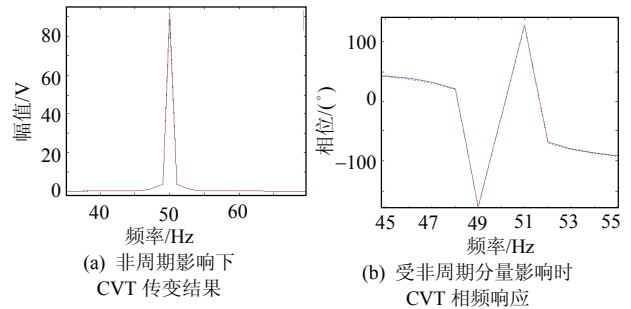


图 2 非周期分量影响下 CVT 幅频及相频响应放大图
Fig. 2 Enlargement pictures of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of CVT under non-periodic input

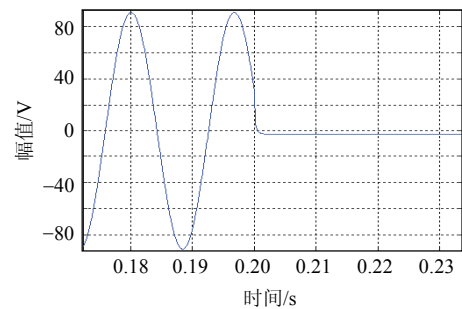


图 3 一次电压突变为 0 时 CVT 跟踪结果
Fig. 3 The tracking results of CVT when the primary voltage drops to zero

从图中可以看出，当系统在 0.2 s 发生故障，一次电压变为零后，CVT 的二次值大约 1~2 ms 即可降至 2 V 以内，短路前电压最大值为 91V，在很短时间内就可降低至 2.2% 以内，对相量测量的影响时间和程度很小。假设相量计算需要一定数据窗时长 t ，再加上 2 ms 的 CVT 跟踪延时，PMU 需经过大约 $t+2$ ms 后才能得到有意义且误差较小的相量测量结果。

对于性能不佳的 CVT，在最严重情况下电压需要一个周期或者更长的时间才能降到 10% 以下^[14]。此时，PMU 需要更长的时间才能测量到正确的相量，时间延时较大，应特别注意。

2) 铁磁谐振。模拟当线路从故障状态下恢复时，一次侧电压的突然变化可能会引起铁心饱和，并与并联分压电容器发生铁磁谐振。虽然铁磁谐振不会扩散到电网，但谐振过电压会对 CVT 传变精度产生影响。仿真时采用线路短路故障持续一个工频周期后消失的方法模拟，结果如图 4 所示。

由图 4 可见，二次电压高于一次输入电压，可见 CVT 发生铁磁谐振时过电压对其存在一定影响，现对其进行定量分析。

CVT 发生铁磁谐振后幅频响应如图 5 所示，经 CVT 传变后 50 Hz 信号幅值从 88.5 V 增加至 89.7 V，比差为 1.45%，可见由于 CVT 内部结构的

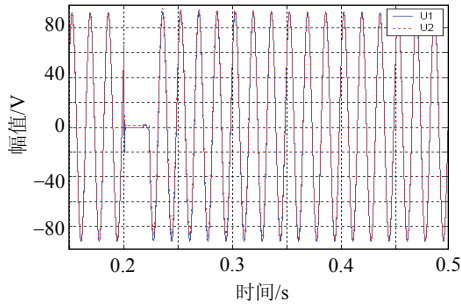


图 4 短路 1 个工频周期消失后电压波形

Fig. 4 The voltage waveform for the short-circuit fault which disappears after one cycle

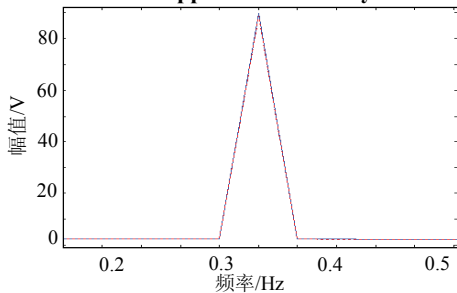


图 5 铁磁谐振后 CVT 幅频响应

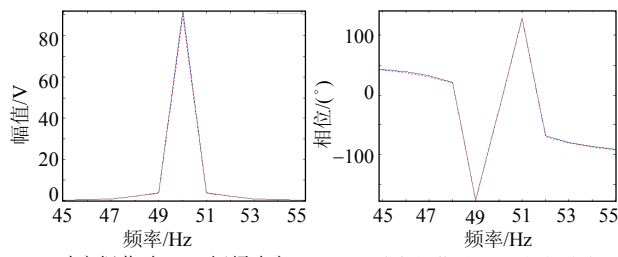
Fig. 5 The enlargement picture of amplitude-frequency characteristic of the CVT with ferromagnetic resonance

原因, 发生铁磁谐振时将影响 CVT 的传变精度。内部增加阻尼器的作用使得误差减小, 但是此过电压误差仍需引起注意。

在电力系统动态情况下, CVT 的传变误差修正相对困难, 目前为止还没有文献作出相关的算法改进。因此, CVT 瞬变响应延时以及铁磁谐振造成的信号失真只能通过 CVT 正确选型来减小相量测量误差。选型时要选择瞬变能力快, 且有较好消除铁磁谐振能力的 CVT。

2.4 幅值振荡时 CVT 对相量测量的影响

系统发生功率振荡时, 由于铁心不易饱和, 对 CVT 传变影响很小, 因此这种情况下其对相量测量的影响也会很小。系统发生功率振荡时, 一、二次电压基频信号的幅值衰减情况如图 6 所示。由图 6 可见, 功率振荡时幅值衰减 0.523%, 相移 1.28°。



(a) 功率振荡时 CVT 幅频响应 (b) 功率振荡时 CVT 相频响应

图 6 功率振荡时 CVT 幅频及相频响应

Fig. 6 The enlargement pictures of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of CVT when the power oscillation occurs

2.5 频率以低频和次同步频率振荡时 CVT 对相量测量的影响

模拟系统发生低频振荡时 CVT 对相量测量的影响。频率调制深度为 0.2 Hz, 调制频率为 1.2 Hz, 次同步振荡时调制深度为 0.2 Hz, 调制频率为 22.9 Hz。结果表明, 低频振荡时幅值衰减 0.506%, 相移 1.28°。当系统发生次同步频率振荡时仿真结果与上述结果类似。

通过对 CVT 动态仿真结果可以看到, 系统振荡情况下, 由于 CVT 铁心不易饱和, 因此对相量测量的影响也较小。而当发生幅值突变时, CVT 的瞬变响应延时、铁磁谐振会产生传变误差, 对相量测量有一定的影响。因此, 在稳态运行较多的线路建议采用准确级别高的测量用互感器用于相量测量; 而对于动态情况较多的线路, 鉴于某些情况下互感器对相量测量的影响较大, 建议使用暂态性能较好的保护用互感器或者是暂态保护类互感器用于相量测量。其中, 在开断开关比较多的线路, 应选择瞬变能力好的 CVT, 即金属性短路后, 二次电压需在额定频率 1 个周期内降低到短路前电压峰值 10%或 5%以下, 以减少对相量测量的影响。

3 电流互感器动态行为

3.1 故障产生非周期分量时 CT 对相量测量的影响

电流互感器的等值电路如图 7 所示。

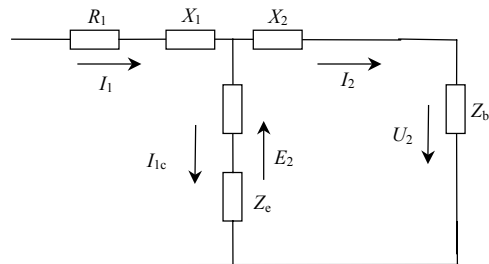


图 7 电流互感器原理图

Fig. 7 The equivalent circuit of current transformer

采用频谱分析的方法来计算各动态信号模型经电流互感器后幅值衰减情况和相移情况, 其中电磁式电流互感器模型参数选自文献[23], 为 10P15 级保护电流互感器(current transformer, CT), 一次额定电流为 600 A, 二次额定电流为 5 A。

3.2 故障产生非周期分量时 CT 对相量测量的影响

当电流互感器一次侧通过大电流而使铁心饱和, 特别是存在非周期分量时, 会致使二次电流大大减小, 其波形出现严重畸变[24]。从频谱分析和离散傅里叶算法计算结果两方面比较了输入输出信号的幅值衰减和相移情况, 以此来分析当故障引起

非周期分量时，CT 对相量测量的影响。

图 8 为一、二次电流瞬时值波形和磁通、励磁电流波形。

从图中可以看出，由于励磁电流的影响，二次电流从 0.25τ (τ 为非周期分量的衰减时间常数， $\tau=0.32\text{ s}$) 开始发生严重畸变，使得跟踪一次电流的能力大大降低，从而引起相量测量的误差增大。

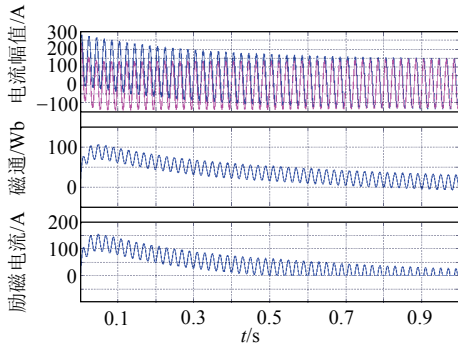


图 8 CT 一、二次电流瞬时值和磁通、励磁电流波形
 Fig. 8 The waveforms of the instantaneous values of primary and secondary currents magnetic flux and excitation current

从输入输出信号的幅频特性出发，比较衰减非周期分量中 50 Hz 信号经 CT 后的幅值衰减情况。仿真时将信号分为几个时间段，分别对其幅频特性进行了分析。

1) 故障发生时刻至 0.25τ ，励磁电流向饱和方向发展，由于铁心未饱和，且励磁电流也较小，因此误差相对较小，比差为 -0.012% 。

2) $0.25\tau\sim 0.5\tau$ ，铁心饱和，励磁电流相对较大，相量计算误差较大，这段时刻二次波形开始发生严重畸变，比差为 -4.82% ，如图 9 所示。

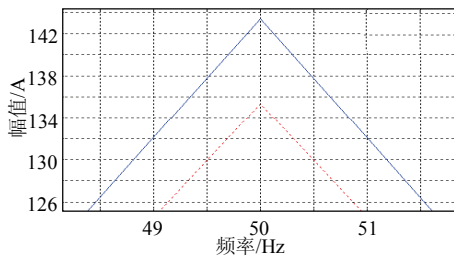


图 9 $0.25\tau\sim 0.5\tau$ 信号幅频响应
 Fig. 9 The enlargement picture of amplitude-frequency characteristic at $0.25\tau\sim 0.5\tau$ interval

3) $0.5\tau\sim 2\tau$ ，铁心持续趋于饱和，误差持续增大，比差已达到 -5.3% 。此段时间对相量计算的影响最大，如图 10 所示。

4) $2\tau\sim 3\tau$ ，铁心饱和程度逐渐降低，误差也呈减小趋势，比差减小为 -2.79% ，如图 11 所示。

5) 3τ 以后，铁心从饱和区中退出，比差控制在 -1.9% 以内。

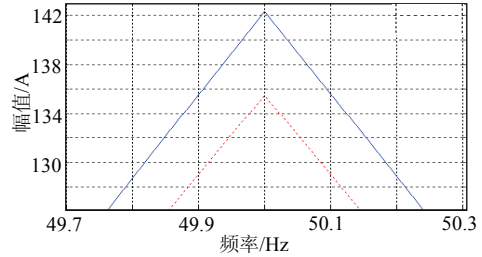


图 10 $0.5\tau\sim 2\tau$ 信号幅频响应
 Fig. 10 The enlargement picture of amplitude-frequency characteristic at $0.5\tau\sim 2\tau$ interval

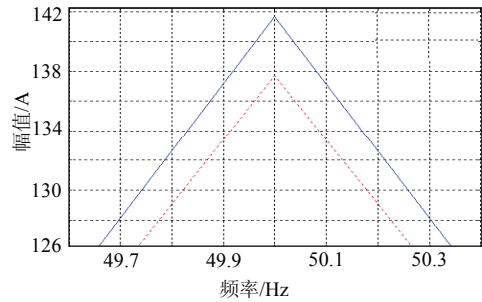


图 11 $2\tau\sim 3\tau$ 信号幅频响应
 Fig. 11 The enlargement picture of amplitude-frequency characteristic at $2\tau\sim 3\tau$ interval

若从 PMU 通常所采用的 DFT 算法出发，比较包含衰减非周期分量信号中 50 Hz 部分经 CT 传变后 DFT 计算所得幅值的衰减情况，其结果如图 12 所示。与频谱分析相似，DFT 算法所得幅值误差在 $0.25\tau\sim 2\tau$ 之间最大， 3τ 之后误差逐渐减小并基本消失。

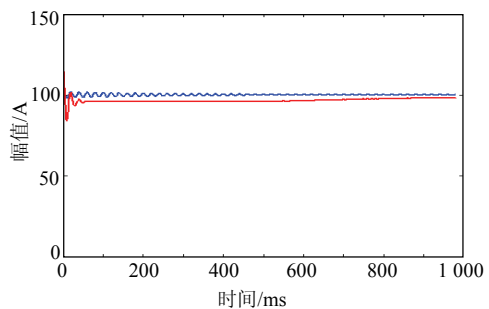


图 12 DFT 算法计算所得相量幅值
 Fig. 12 The amplitude of the phasor calculated by DFT algorithm

当系统发生短路时，都伴随着幅值阶跃突变。相量计算的第 1 个时间窗内，PMU 计算出的相量没有任何意义。但由于 CT 饱和造成的波形畸变将进一步延长 PMU 得到正确相量的时间。在上面的算例中，PMU 需在 1 s 后才能得到相对正确的相量，误差在 1% 以内。与 CVT 相似，很难对由非周期分量引起的 CT 铁心饱和造成的相量计算误差做算法上的修正，只能通过 CT 正确选型，来减小相量测量误差。

3.3 故障产生幅值突变时 CT 对相量测量的影响

系统发生故障或者断路器开断时都会发生电流突变的情况,当电流发生幅值突变时一、二次电流的频谱如图 13 所示。

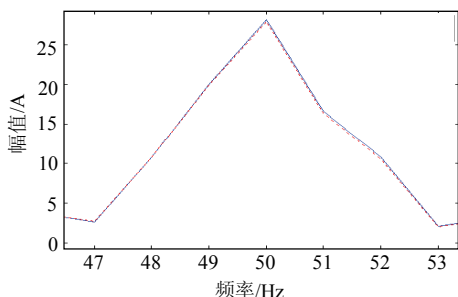


图 13 幅值频谱

Fig. 13 The enlargement picture of amplitude-frequency characteristic

从结果中看出 50 Hz 电流信号经 CT 后幅值衰减 0.9%,可见当信号发生幅值突变,而没有使铁心发生饱和的情况下,经 CT 后的电流基波幅值衰减很小。

3.4 幅值振荡时 CT 对相量测量的影响

当系统发生幅值振荡时,由于互感器的铁心还处于线性范围,因此传变效果依然较好。当系统发生功率振荡时,电流幅值周期性变化,50 Hz 信号经 CT 后幅值衰减为 0.85%,相移 0.11°。具体结果见图 14。

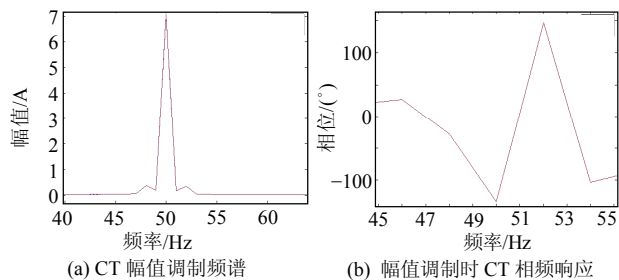


图 14 幅频及相频响应

Fig. 14 The enlargement pictures of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics

3.5 频率以低频和次同步频率振荡时 CT 对相量测量的影响

频率调制深度仍为 0.2 Hz,调制频率为 1.2 Hz,次同步振荡时调制深度为 0.2 Hz,调制频率为 22.9 Hz。仿真表明当系统发生低频振荡时,由于互感器的铁心还处于线性范围,因此传变效果依然较好。仿真时 50 Hz 信号经 CT 后幅值衰减为 0.86%、相移 0.118°。当系统发生次同步振荡时情况类似。50 Hz 信号经 CT 后幅值衰减为 0.86%,相移 0.12°。

因此,如果故障后的 CT 一次电流中没有非周期自由分量,仅有周期分量,其二次侧一般不会出

现饱和,相应对相量测量的影响较小;如果故障后 CT 一次电流含有非周期分量,易于出现饱和,此时对相量测量的影响较大,建议在动态和暂态情况出现较多的线路中加装保护用互感器,对于 330 kV 及以上时间常数较大的高压系统则建议用暂态保护类电流互感器,以此来减小饱和对相量测量的影响。

4 结论

本文就广域同步测量系统中 CT、CVT 对相量测量的影响进行了仿真分析,并对结果进行了详细分析。重点关注了衰减非周期分量引起的 CT 饱和问题,及 CVT 的铁磁谐振和瞬变响应问题。观察电力互感器在不同动态情况下对相量测量结果的影响,可以为制定 PMU 动态行为评价标准提供参考,也可以为广域同步测量系统中合理选择电力互感器提供依据。

参考文献

- [1] Xu Y F. Measures to ensure the security and stability of the Central China Power System[C]//1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, China: IEEE, 1998: 1374-1377.
- [2] Phadke G. Synchronized phasor measurements in power systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [3] 韩英铎,王仲鸿,林孔兴,等. 电力系统中三项前沿课题: 柔性输电技术、智能控制、基于 GPS 动态安全分析与监测系统[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(7): 1-6. Han Yingduo, Wang Zhonghong, Lin Kongxing, et al. Three new front subjects in power system: FACTS, intelligent control and dynamic security analysis and monitoring system based on GPS[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(7): 1-6(in Chinese).
- [4] Taylor C W. The future in on-line security assessment and wide-area stability control[C]//Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore: IEEE, 2000: 78-83.
- [5] 张保会,谢欢,于广亮. 基于广域轨迹信息的多机系统暂态不稳定性快速预测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 53-58. Zhang Baohui, Xie Huan, Yu Guangliang. Fast prediction method for multi-machine system transient instability based on wide area trajectory information[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 53-58(in Chinese).
- [6] 常乃超,兰洲,甘德强. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52. Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [7] 刘道伟,谢小荣,穆钢. 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, 25(1): 13-17. Liu Daowei, Xie Xiaorong, Mu Gang. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17(in Chinese).
- [8] 许树楷,谢小荣,辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.

- Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).
- [9] 滕林, 刘万顺, 贺志皓. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 64-69.
Teng Lin, Liu Wanshun, Yun Zhihao. Study of real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69(in Chinese).
- [10] 张胜, 王健, 贺春. 相量测量单元性能评价标准和测试方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 102-105.
Zhang Sheng, Wang Jian, He Chun. Evaluating standard and test method on function of phasor measurement Unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 102-105(in Chinese).
- [11] 许勇, 王慧铮, 李倩. 智能变电站同步相量测量装置研制[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 1-5.
Xu Yong, Wang Huizheng, Li Qian. Development of synchronized phasor measurement units for smart substations[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 1-5(in Chinese).
- [12] 周泽昕, 张道农, 张晓莉, 等. 《电力系统同步相量测量装置检测规范》的编制[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 38-41.
Zhou Zexin, Zhang Daonong, Zhang Xiaoli, et al. Compilation of inspection criterion for power systems synchronized phasor measurement unit[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 38-41(in Chinese).
- [13] 李大路, 李蕊, 孙元章. 利用 PMU 数据提高电力系统状态估计精度的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 74-78.
Li Dalu, Li Rui, Sun Yuanzhang. An algorithm improving precision of power system state estimation by PMU data[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 74-78(in Chinese).
- [14] 薛辉, 贾清泉, 王宁. 基于 PMU 量测数据和 SCADA 数据融合的电力系统状态估计方法[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 44-49.
Xue Hui, Jia Qingquan, Wang Ning. A novel power system state estimation method based on merging PMU-measured data into SCADA data[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 44-49(in Chinese).
- [15] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.
Wang Keying, Mu Gang, Chen Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of hybrid measurement system with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33(in Chinese).
- [16] IEEE Std C37.118-2005 IEEE standard for synchrophasors for power systems[S].
- [17] Huang Zhenyu. Haue J F, Martin K E. Evaluation of PMU dynamic performance in both lab environments and under field operating conditions[C]//Power Engineering Society General Meeting. USA, Tampa: IEEE, 2007: 1-6.
- [18] Li Jian, Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, et al. The framework and algorithm of a new phasor measurement unit[J]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004(2): 826-831.
- [19] 白忠敏. 电力用互感器和电能计量装置设计选型与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 35-40.
- [20] Phadke A G, Thorp J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. Germany: Springer Press, 2008: 95-99.
- [21] 康小宁, 张新, 索南加乐, 等. 电压互感器和电流互感器暂态特性对距离保护算法的影响[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(8): 955-959.
Kang Xiaoning, Zhang Xin, Suonan Jiale. Influence of transient characteristics of capacitor voltage transformer and current transformer on distance protection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(8): 955-959 (in Chinese).
- [22] 李一泉, 何奔腾. 基于电容式电压互感器暂态误差估计的自适应距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 72-76.
Li Yiquan, He Benteng. An adaptive distance relay based on transient error estimation of CVT[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 72-76(in Chinese).
- [23] 袁季修, 盛和乐, 吴聚. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社. 2003: 73-94.
- [24] Kang Sanghee, Lee donggyu, Nam soonryul, et al. Fourier transform-based modified phasor estimation method immune to the effect of the DC offsets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1104-1111.



刘灏

收稿日期: 2010-11-10。

作者简介:

刘灏(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为广域同步相量测量技术, E-mail: sunsetzixhao@yahoo.cn;

毕天姝(1973), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 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其应用与故障诊断等。

(编辑 张磊)