

基于变电站开关柜的三相交流电 相位核序方法

吴昊¹, 韩浩江¹, 柴俊¹, 陆增洁¹, 雍耿飙¹, 孙雷²

(1. 国网上海市电力公司市北供电公司, 上海 200072;

2. 上海电力实业有限公司, 上海 200001)

摘要: 基于变电站开关柜的三相交流电的核相操作过程, 针对人工核相安全性不高且效率低下的弊端, 在变电站开关柜自动巡检机器人的基础上, 设计了一种三相交流电的核相方法, 主要包括信号的采集、滤波、幅值相位及频率的计算和结果分析等过程, 可用于变电站的自动核相巡检机器中, 在高压电力系统的自动核相过程中有着较为广泛的应用前景。

关键词: 高压交流电; 相序核对; 变电站

Three-phase alternating current phase sequence checking method based on substation switch cabinet

WU Hao¹, HAN Haojiang¹, CHAI Jun¹, LU Zengjie¹, YONG Gengbiao¹, SUN Lei²

(1. China Shanghai Municipal Electric Power Company North Power Supply Company, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Power Industrial & Commercial Co., Ltd., Shanghai 200001, China)

Abstract: Based on the checking phase operation process of the three-phase AC power of the substation switchgear, this paper designs a three-phase AC phase sequence checking based on the automatic inspection robot of the substation switchgear, aiming at the disadvantages of artificial phase checking safety and low efficiency. This method mainly includes signal acquisition, filtering, calculation of amplitude, phase and frequency, result analysis, etc. It can be used in automatic checking phase inspection machines in substations. It is widely used in the automatic phase inspection process of high-voltage power systems. Application prospects.

Key words: high voltage alternating current; phase sequence checking; substation

0 引言

变电站是电力系统中的一种对电压、电流进行变换, 同时根据不同的需求对电能进行分配的场所。通常在变电站布置有多个开关柜, 主要功能是利用断路器接通或者断开电路来对电网和电气设备进行控制。

核相, 即相序核对, 具体是对三相交流电

的电压幅值、频率、相位以及相序进行校核。在电力系统中, 发电机等电气设备在并网操作之前, 都必须进行核相操作。如果相序不对, 轻则会损坏设备, 造成经济损失; 重则会引起大范围的停电, 影响到社会的正常运行。对于变电站内的开关柜, 在对电网和设备进行控制之前, 也都要进行核相操作, 确保相序一致。

目前的核相方式在测量手段上主要还是采

用人工测量的方法，且需要多人相互配合。变电站内都为高压电，进行人工核相风险性较大，同时效率也较低。而利用机器人设备进行核相验电，可以做到多个设备自主巡检，其风险性较小，效率和准确度较高。本文基于变电站开关柜的自主核相验电机器人设计了一种完备的核相方法，可以对三相交流电的幅值、频率以及相位差进行检测，并由结果信息给出核相的结论。

1 系统方案

交流电的核相过程中，涉及交流信号的采集、滤波、幅值计算、频率计算、相位计算以及核相并网的结果判断等过程。

完整的核相流程如图 1 所示，首先由采集芯片对需要核相的电压信号进行采集，采集后的数据由信号处理软件完成数字滤波，去除噪声干扰。滤波后的数据经由算法程序算出信号的幅值、相位以及频率信息，最后对比两个信号的信息，给出核相的结果。

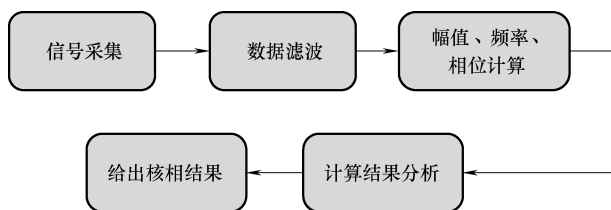


图 1 核相流程示意图

Fig. 1 phase sequence checking flow diagram

在本方法中涉及的硬件部分如图 2 所示，包括核相传感器、信号调理电路、采集芯片、环境传感器、嵌入式控制器、通信模块和监控管理单元在内的多个部件。

信号调理电路功能为对被采集的高压信号进行调整，通过内部的电路将高压信号转换为合适的电压信号，并提供给采集芯片。

系统的嵌入式控制器是硬件部分的核心，其功能为根据指令对核相的过程进行控制，利用内部算法实时处理采集的数据信息，将计算

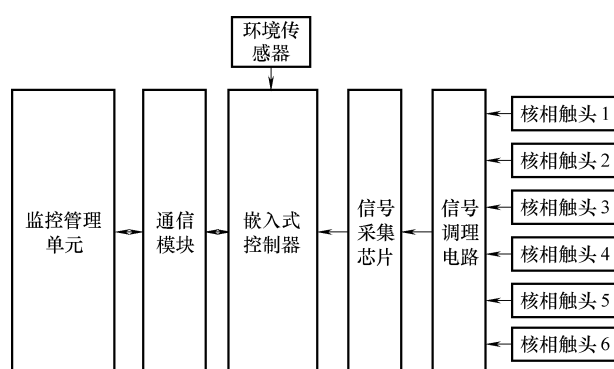


图 2 硬件系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of hardware system structure

的结果发送给监控管理单元。并且配有环境传感器，对周围环境的温度、烟雾信息和 O_2 浓度实时检测，一旦发生异常可以立刻停止核相过程。

监控管理单元包含 CPU、主板、内存、硬盘和显示器等部件，可通过通信模块向嵌入式控制器发送指令，以开始或者结束核相过程；同时可以接收来自嵌入式控制器的计算结果，利用内部的程序分析结果，将结果通过显示器显示。该监控管理单元支持人机交互，可对结果进行分析、保存和调用等。

本方法中涉及的软件处理部分如图 3 所示，包括滤波算法、相位计算算法、幅值计算算法、频率计算算法、结果处理分析以及系统综合控制部分。



图 3 软件系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of software system structure

软件系统中的滤波、相位计算、幅值计算

和频率计算部分被集成在嵌入式控制器中，用于对数据滤波和对相位、幅值和频率值进行计算。结果分析处理和系统综合控制部分位于监控管理单元中。结果分析处理利用核相的结果判别方法对计算出的幅值等信息进行对比分析，得出核相的最终结果。系统综合控制部分则是对核相起止、结果的存储、显示和调用等进行控制。

在该软件处理部分中，最关键的为嵌入式控制器中的三个计算算法，其计算结果的精确性会直接影响到最终的分析结果。

2 硬件系统设计

2.1 嵌入式控制器设计

嵌入式控制器的控制芯片选用意法半导体的 STM32 系列的 STM32F103ZET6 芯片，该芯片是一款基于 Cortex-M3 内核的高性能微控制处理器，集成有 512 KB 的 FLASH 和 64 K 字节的 SRAM，具有 USART、SPI、CAN 和 I²C 等数据通信接口，其最高的工作频率为 72 MHz，可进行单周期的乘法和硬件除法，能够高效完成一系列复杂的计算处理任务。同时该芯片连接简单，只需一些基本电路即可正常工作。该芯片控制器电路基本构成如图 4 所示。

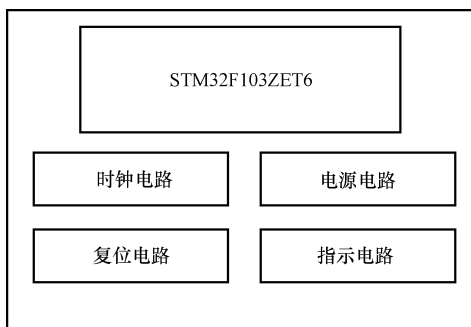


图 4 嵌入式控制器电路的基本构成

Fig. 4 The basic structure of embedded controller circuit

2.2 信号采集设计

本核相方法基于变电站开关柜内的交流电相序核对，通常其电压较高，一般可达 110 kV，因此在对其进行高压信号采集前必须

对其进行降压处理，然后将降压后信号经由采集芯片采集。

(1) 信号频率分析

采样定理表明，对于频带有限的信号，当系统的采样频率 f_s 至少大于原始信号的最高频率 f_m 的两倍时，采样后的数字信号可以完整恢复出原始信号。在实际的应用中，通常令 $f_s = 10f_m$ ，本系统中为了更好地恢复出原始信号，采用的信号采集频率为 20 倍的原始信号最高频率，即 $f_s = 20f_m$ 。由于变电站的交流电频率一般为 50 Hz，因此采样频率为 1 kHz。

系统对于采样芯片没有严格要求，但由于需要对两对三相交流电进行采样，采样的过程共有 6 次，若采用的采样芯片为多通道非同步采样芯片，当采样的频率为 1 kHz 时，由此产生的相位误差可达 36° 。对于系统来说，这个误差巨大到足以影响到核相的结果。因此对于异步采样芯片，必须通过提高采样频率减小该误差。若采用的芯片为多通道同步芯片，系统对多个通道同时采样同时转换，则该误差可以避免。

(2) 信号调理

系统的信号调理部分主要包括高压触头和相应调理电路。图 5 为信号调理电路示意图，高压触头与高压交流电触头相连接，另一端连接两个串联的电容 C_1 、 C_2 ，将 C_1 和 C_2 之间的信号经由电阻和指示灯连接至信号采集芯片。

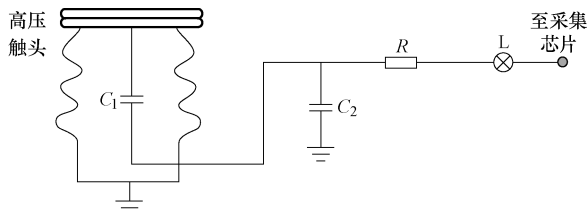


图 5 信号调理电路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of signal conditioning circuit

电容 C_1 和 C_2 的作用为串联分压，高压触头采集到的高压电为 110 kV 左右的高压交流

电，其最大瞬时电压可达 156 kV，该电压必须降压采集，方案中采用两个电容分压，其分压的原理如下。

电容 C_1 和 C_2 由于串联，则电荷量始终相等，即

$$Q_1 = Q_2 \quad (1)$$

由

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

可得

$$Q_1 = Q_2 = U_1 C_1 = U_2 C_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (3)$$

即在任何瞬时，电容两端的电压与其电容容值成反比，通过选择合适 C_1 、 C_2 的倍数关系，可以将采集点处的电压调成合适范围。

(3) 信号采集芯片设计

本方法中采用的信号采集芯片的具体型号为 AD7606 模数转换器。该芯片具有 16 位同步采样模数数据采集系统，共有 8 个数据采集通道，采样 5 V 的单电源供电，支持 ± 10 V 的双极性信号的输入，所有的通道都可以以最高 200 Kbit/s 的速率采样，芯片上集成的模拟输入钳位保护可以承受最高达 ± 16.5 V 的电压。

该 AD 采集芯片电路 8 通道输入中的 6 通道作为信号的输入来源，并进行信号的采集。为了提高转换的准确度，AD 的基准电压选择输入为外部的基准电压，采用以 RER2933 芯片为主的基准电压回路提供基准电压。采集芯片和嵌入式控制器之间的数据传输方式采样并行数据传输，以提高数据转换的速率。

2.3 通信模块设计

监控管理单元和嵌入式控制器之间的数据传输采用有线方式，具体的通信方式为串口通

信。串口通信设计电路如图 6 所示。

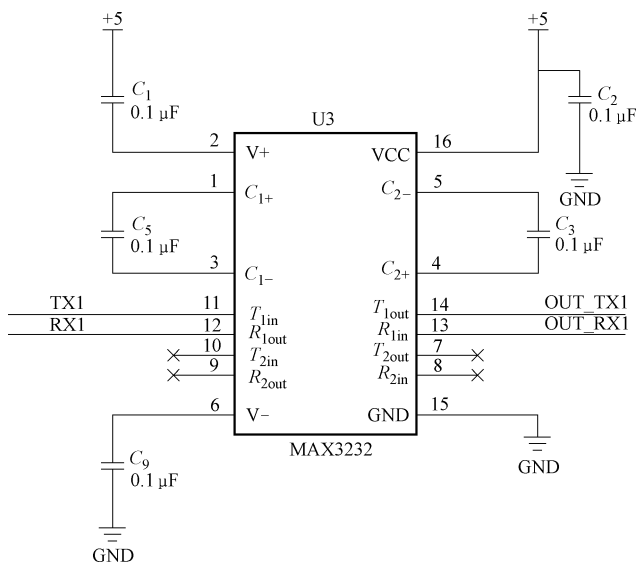


图 6 串口通信设计电路

Fig. 6 Design of serial communication circuit

通信芯片选择 MAX3232 芯片，其功能是将 TTL 电平转换为 RS 232 电平，以便于嵌入式控制器和监控管理单元可以正常通信。该芯片所需要的外部电路较为简单，即使是在高速的传输速率下，也可以保持要求的 ± 5 V 最小发送器输出电压，性能上满足要求。

2.4 监控管理单元设计

监控管理单元的主要组成部分包括 CPU、主板、内存、硬盘和触控屏。监控管理单元如图 7 所示。

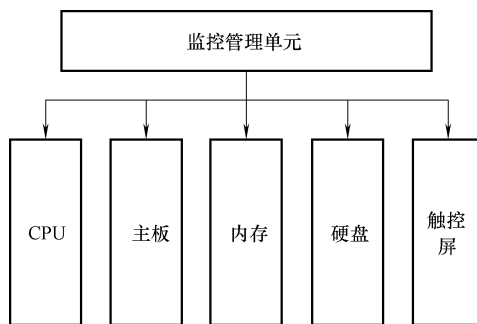


图 7 监控管理单元

Fig. 7 Monitoring management unit

根据系统对于监控管理单元的功能需求，其硬件性能要求并不高，因此对于监

控管理单元部件的具体型号选择如下表所示。

表 监控管理单元部件选型
Tab. Component selection of monitoring management unit

序号	硬件组件	型 号
1	CPU	I3-6100
2	主板	AIMB-285
3	内存	金士顿 8 G
4	硬盘	三星 256 G 固态硬盘
5	触控屏	EYOYO 11.6 寸工业触控屏

该监控管理单元的操作系统采用 Windows 系统,利用触控屏进行人机交互,性能上满足系统的工作需求。

3 软件系统设计

3.1 信号滤波原理

采集的信号通常包含有一些噪声干扰,因此不能直接用于统计计算,需要进行滤波处理。

滤波器作为一种选频设备,可以让采集的信号中的某一特定频率的信号通过或者截止,从而滤过不需要的频率成分的信号。对于本系统,交流电信号的频率在 50 Hz,属于低频信号,可选择数字低通滤波器进行滤波。

滤波器的阶数指的是过滤谐波的次数,通常来说,其阶数越高,滤波的效果就会越好,但是阶数越高,其收敛的速度就会越慢。针对本系统,可采用二阶滤波器。

对于二阶低通滤波器,其开环传递函数为

$$G = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (4)$$

式中, ω_c 为二阶低通滤波器的截止频率; ξ 为系统的阻尼比。

通过双线性变换法可以将此传递函数转变为在离散时域上的传递函数,即

$$S = \frac{2z-1}{Tz+1} \quad (5)$$

则传递函数可以转化为

$$G(z) = \frac{\omega_c^2}{\left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}\right)^2 + 2\xi\omega_c \left(\frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}\right) + \omega_c^2} = \frac{\omega_c^2 T^2 (z^2 + 2z + 1)}{z^2 (\omega_c^2 T^2 + 4\xi\omega_c T + 4) + z(2\omega_c^2 T^2 - 8) + (\omega_c^2 T^2 - 4\xi\omega_c T + 4)} \quad (6)$$

$$\text{令} \quad b_0 = \omega_c^2 T^2 \quad (7)$$

$$a_0 = (\omega_c^2 T^2 + 4\xi\omega_c T + 4) \quad (8)$$

$$a_1 = (2\omega_c^2 T^2 - 8) \quad (9)$$

$$a_2 = (\omega_c^2 T^2 - 4\xi\omega_c T + 4) \quad (10)$$

则该式可改写为

$$G(z) = \frac{b_0(z^{-2} + 2z^{-1} + 1)}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (11)$$

由 z 变换的性质可得

$$\frac{Y(n-1)}{Y(n)} = z^{-1}; \quad \frac{Y(n-2)}{Y(n)} = z^{-2}$$

$$\frac{X(n-1)}{X(n)} = z^{-1}; \quad \frac{X(n-2)}{X(n)} = z^{-2} \quad (12)$$

可将其改写为差分方程的形式

$$a_0 Y(n) + a_1 Y(n-1) + a_2 Y(n-2) = b_0 X(n) + 2b_0 X(n-1) + b_0 X(n-2) \quad (13)$$

即

$$Y(n) = \frac{b_0 X(n) + 2b_0 X(n-1) + b_0 X(n-2) - a_1 Y(n-1) - a_2 Y(n-2)}{a_0} \quad (14)$$

利用该差分方程可以编写相应的程序,对采集到的数据序列进行滤波处理,滤波后的信号与实际的信号相一致,可以用于后续的幅值、相位以及频率的计算过程中。

3.2 相位计算原理

信号的相位计算至关重要,其后续是否同相的结果判断依赖于此处的相位计算结果。

相位的计算方法采用过零点检测法,基本原理是检测两个同频率信号的过零点的时间差,然后将该时间差转变为相位差即可。过零点检测法示意图如图 8 所示。

由图 8 可知, U_1 和 U_2 为两个同频率的正弦信号,其中信号 U_2 滞后于 U_1 , t_1 和 t_2 是这两个信号过零点的时刻, Δt 为对应过零点的

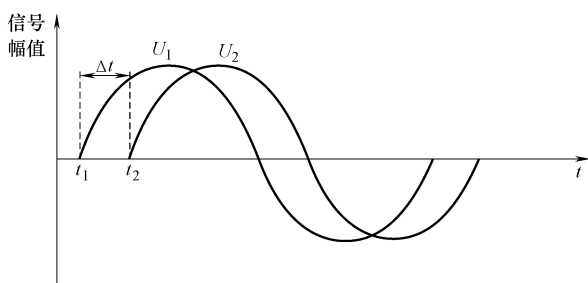


图8 过零点检测法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of zero crossing detection method

时间差。通过采样芯片的采样次数 n 和采样频率 f_s 计算出该段时间差, 该时间差通过信号的频率 f 即可得出相位差为

$$\varphi = 2\pi f \Delta t = 2\pi n f / f_s \quad (15)$$

对于该方法, 当系统的采样频率越高时, 求出的相位差也越准确, 因此应尽可能地提高系统的采样频率获得高准确度。

3.3 幅值计算原理

幅值的计算采用迭代傅里叶变换法, 该方法利用每次的采样数据进行一次加减法计算, 可以获得准确的电压幅值信息, 计算过程较为简单, 准确度较好, 适用于系统中的幅值计算。

假设被检测的信号的表达式为

$$U(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (16)$$

式中, A_n 、 $n\omega$ 和 φ_n 分别为 n 次谐波的振幅、角频率和初始相位。

按照离散傅里叶的原理, 在 t 时刻, 该表达式可以被表示为

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (17)$$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+(N-1)T_s} U(t) \\ a_n = \frac{2}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+(N-1)T_s} U(t) \cos(n\omega t) \\ b_n = \frac{2}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+(N-1)T_s} U(t) \sin(n\omega t) \end{cases} \quad (18)$$

式中, t_0 为大于零的任意时刻。

在采样时刻 $t_0 + kT_s$ 时刻, a_n 和 b_n 可以表示为

$$\begin{aligned} a_n(t_0 + kT_s) &= \frac{2}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+(N-1)T_s} U(t) \cos(n\omega t) + \\ &\quad \frac{2}{N} U(t_0 + kT_s) \cos[n\omega(t_0 + kT_s)] = \\ &\quad a_n[t_0 + (k-1)T_s] + \\ &\quad \frac{2}{N} U(t_0 + kT_s) \cos[n\omega(t_0 + kT_s)] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} b_n(t_0 + kT_s) &= \frac{2}{N} \sum_{t=t_0}^{t_0+(N-1)T_s} U(t) \sin(n\omega t) + \\ &\quad \frac{2}{N} U(t_0 + kT_s) \sin[n\omega(t_0 + kT_s)] = \\ &\quad b_n[t_0 + (k-1)T_s] + \\ &\quad \frac{2}{N} U(t_0 + kT_s) \sin[n\omega(t_0 + kT_s)] \end{aligned} \quad (20)$$

可以看出, 式(19)和式(20)的前半部分为利用时刻 $t_0 + kT_s$ 之前的数据进行计算的结果, 后半部分为当前的采样数据计算的结果, 故 a_n 和 b_n 的计算便转化为了以迭代形式的单步计算。

当 $k \geq N$ 时, 在采样时刻 $t_0 + kT_s$, 根据迭代原理, 可以将 a_n 和 b_n 表示为

$$\begin{aligned} a_n(k) &= a_n(k-1) + \frac{2}{N} U(t_0 + kT_s) \cos[n\omega(t_0 + kT_s)] - \\ &\quad \frac{2}{N} U[t_0 - (k-N)T_s] \cos[n\omega(t_0 - (k-N)T_s)] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} b_n(k) &= b_n(k-1) + \frac{2}{N} U(t_0 + kT_s) \sin[n\omega(t_0 + kT_s)] - \\ &\quad \frac{2}{N} U[t_0 - (k-N)T_s] \sin[n\omega(t_0 - (k-N)T_s)] \end{aligned} \quad (22)$$

在实际的采样过程中, 可以令 $t_0 = 0$, 则 $\cos(n\omega kT_s)$ 和 $\sin(n\omega kT_s)$ 可以转化为一个信号周期中的采样点。

由傅里叶级数的表达式, 可以得出电压的

表达式为

$$U(t) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (23)$$

则 n 次电压的幅值为

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (24)$$

基波电压的幅值的计算公式为

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (25)$$

利用该公式可以计算出测量信号的幅值信息。

3.4 频率计算原理

交流电的频率计算采用基于傅里叶变换的频率测量方法，其基本原理如下。

假设采集的交流电信号是理想的交流电信号，即它只有基波分量，那么在负载的干扰下，该信号的频率在 50 Hz 附近抖动，那么实际的频率 f 可以表示为

$$f = f_0 + \Delta f \quad (26)$$

式中， f_0 为理想频率 50 Hz； Δf 为频差。

则被采集的信号可以表示为

$$x(t) = U_m \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \alpha_0) \quad (27)$$

式中， U_m 和 α_0 为输入信号的幅值和初相角。

用理想角频率 ω_0 代替实际的角频率 ω ，得出的傅里叶变换为

$$a = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \sin \omega_0 t dt \quad (28)$$

$$b = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cos \omega_0 t dt \quad (29)$$

将原信号 $x(t)$ 代入后可得

$$a = \frac{2U_m f_0}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \cos(\pi \Delta f T_0 + \alpha_0) \sin \pi \Delta f T_0 \quad (30)$$

$$b = \frac{2U_m (f_0 + \Delta f)}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \sin(\pi \Delta f T_0 + \alpha_0) \sin \pi \Delta f T_0 \quad (31)$$

采用同样的计算方法，即可在第二个采样周期内进行近似的傅里叶变换

$$a' = \frac{2U_m f_0}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \cos(3\pi \Delta f T_0 + \alpha_0) \sin \pi \Delta f T_0 \quad (32)$$

$$b' = \frac{2U_m (f_0 + \Delta f)}{\pi T_0 \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \sin(3\pi \Delta f T_0 + \alpha_0) \sin \pi \Delta f T_0 \quad (33)$$

利用 a 、 b 、 a' 和 b' 可计算出测量频率的基本公式为

$$|\Delta f| = \frac{1}{2\pi T_0} \arccos \frac{ab + a'b'}{ab' + a'b} \quad (34)$$

$$f = f_0 \pm |\Delta f| \quad (35)$$

在计算过程中，利用该基本公式即可通过采样的数据点计算出被检测信号的实际频率。

3.5 结果分析与判断

本系统的最终结果判断程序集成在监控管理单元中，采用的是国标 A 级的标准，即同异相的判别以 30° 为界，当两相的相位差 $\geq 30^\circ$ 时，结果判断为异相；而当两相的相位差 $< 30^\circ$ 时，系统判断为同相。在完成结果的分析与判断之后，系统会将检测计算的信息结果等显示在屏幕上，供操作人员查看和存储。

在实践过程中，在对变电站的开关柜进行了核相操作之后，还需要进行能否并网操作的判断。其中判断的因素为相序、电压、相位和频率，当交流电的这四个方面都分别相同时，即可进行并网操作。

并网的条件为：电压的幅值差不应超过 5%~10%，频率差不应超过 0.2%~0.5%，相位差不应超过 10° ，并且相序应该相同。当核相验电的操作结果满足此条件时，可以进行并网。对于某些要求严格的场所，并网的条件可以在此基础上进一步提高。

4 结束语

本文基于变电站的开关柜内的三相交流电的核相过程展开研究，提出了一种高压交流电完整的核相验电方法。该方法涉及信号的采集、数字滤波、相位和幅值等计算过程，并根据并网的条件对是否可以并网给出结论，在电力系统行业有着较广阔的应用前景。EA

(下转第 102 页)

可以在不同的上位机软件、测试仪乃至测试装置间达到很好的兼容性。当然，这需要软件开发厂商、测试仪厂家和继电保护厂家等各方面达成共识，共同完善对通用描述信息模型的标准化，并进一步推进自动化测试系统测试软件、测试仪和继电保护装置三者间接口标准化的工作。**EA**

参考文献

- [1] 应战煌, 胡建斌, 赵瑞东, 等. 继电保护装置自动测试系统研究和设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (17): 142-146.
- [2] 韩民畴, 顾明远. 智能变电站继电保护自动测试系统研究 [J]. 智能电网, 2015, 3 (10): 937-942.

- [3] 胡红兵, 李丽君, 韩民畴. 继电保护装置自动化测试系统的设计与实现 [J]. 江苏电机工程, 2013, 32 (2): 54-56.
- [4] 王忠, 张晓丽, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (5): 130-134.
- [5] 继电器及装置基本实验方法: GBT 7261—2000 [S].

作者简介



侯攀科

侯攀科 (1983—), 男, 本科, 工程师, 主要从事中压 继电保护装置研发, 应用和自动化测试的研究。

(收稿日期: 2021-03-15)

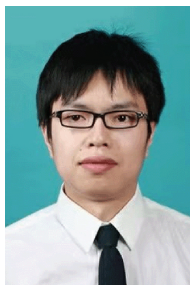
(上接 92 页)

参考文献

- [1] 苏根. 手持式无线核相仪的研究与设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [2] 张金波, 王俊, 范梅荣, 等. 实用高压电力线路无线核相仪的设计 [J]. 电力自动化设备, 2005 (10): 65-67.
- [3] 刘姝廷, 莫静雯. 交流电网幅值检测系统的仿真研究 [J]. 福建质量管理, 2016 (3): 176.
- [4] 牟龙华, 邢锦磊. 基于傅里叶变换的精确频率测量算法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (23): 67-70.

- [5] 张华军, 谢德华, 崔思鹏. 基于迭代傅里叶变换的交流电压基波幅值与相位检测 [J]. 电工电气, 2013 (1): 14-16, 34.
- [6] 何靖玲, 吴一波, 朱国军, 等. 核相验电一体化小车的研制 [J]. 集成电路应用, 2019, 36 (12): 72-73.

作者简介



吴昊

吴昊 (1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程。

(收稿日期: 2021-03-21)