

永磁机构真空断路器同步关合控制系统设计

王喜利¹, 郭凤仪¹, 刘艳丽¹, 史艳影², 丁冠西³

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

2. 中国石油锦西石化公司电气车间, 辽宁 葫芦岛 125000; 3. 国网辽阳电力公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 针对配电网中性点接地时断路器投入补偿电容器组的情况进行了仿真分析, 给出了有效的合闸策略。设计了一种以浮点型 DSP 为核心的同步关合控制系统, 阐述了同步关合过程, 并对同步关合的关键技术进行了研究。提出了单相锁相环(SPLL)前置 FIR 工频窄带数字滤波器的方法准确跟踪信号相位, 避免了谐波对提取过零点的干扰。通过 BP 人工神经网络方法, 建立了不同控制电压和环境温度下预测合闸时间的数学模型, 运用改进的最快下降法修正权值和阈值, 选择足够多的样本训练网络, 具有精度高、容错性强等优点。自适应补偿动作时间, 减少三相触头动作不同期。多次试验结果表明, 同步控制误差保持在 ± 1 ms 内。

关键词: 同步关合; BP 人工神经网络; 真空断路器; DSP; 永磁机构; 过零点

中图分类号: TM56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0098-06

Design of Synchronous Closing Control System for Vacuum Breaker with Permanent Magnetism Actuator

WANG Xili¹, GUO Fengyi¹, LIU Yanli¹, SHI Yanying², DING Guanxi³

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China;

2. China Petroleum Jinxi Petrochemical Company, Liaoning Huludao 125000, China;

3. Liaoyang Electric Power Co. of State Grid, Liaoning Liaoyang 111000, China)

Abstract: Situations of circuit breaker in distributing network with neutral earthed closing for compensation capacitor groups synchronously are simulated and analysed, and effective synchronous closing strategies are given. The system of synchronous closing is designed based on floating-point DSP, the process of which is represented. The key technologies of synchronous closing are researched. The mathematical model of different control voltage and ambient temperature to predict the closing time is created by BP artificial neural network method. The steepest descent method is used to correct weights and threshold values. The network with the advantages of high accuracy and powerful fault tolerance capability is trained by a sufficient number of samples. Action time of circuit breaker is compensated adaptively, in order to reduce the dispersion of three-phase action time. Multiple test results reveal that synchronous control error is kept to within ± 1 ms.

Key words: synchronous closing; BP artificial neural network; vacuum circuit breaker; DSP; permanent magnetic actuator; zero-crossing point

0 引言

断路器是电力系统最重要的终端设备之一, 其智能化水平对电力系统的稳定性与自动化程度至关重要。目前, 除了遥测、遥信、遥控技术外, 断路器的同步控制也是电器智能化领域的前沿课题^[1-4]。电力

系统中的断路器在关合和开断电力设备瞬时, 断路器关合相对于系统电压和电流的初相角是随机的和不确定的, 因而会产生涌流、过电压, 很容易对电力设备造成危害并产生谐波干扰、引起继电保护的误动作、降低电能质量, 影响电力系统的稳定性^[5]。同步关合技术是一种经济有效的方法, 可以很大程度

上降低暂态效应对电网的冲击, 提高电力设备的寿命, 增强系统的稳定性, 改善电能质量, 省去预置合闸电阻和电感, 提高系统经济技术指标^[6-8]。永磁机构真空断路器克服了传统断路器的缺点, 分合闸时间的分散性可以控制在 $\pm 1\text{ ms}$ 以内, 并具有简单、可控、稳定可靠等优点, 是同步关合技术得以实现的优良载体^[9-10]。

针对配电网无功补偿电容器组的同步投入, 笔者设计了基于 DSP 的同步关合控制系统, 给出了具体实现方法, 包括同步控制技术原理、工作过程、电压过零点相位提取、触头动作时间预测等。试验结果表明, 该方法能够很好的实现断路器的同步控制。

1 同步投入电容控制策略

目前同步控制技术在一些场合得到了很好的应用, 其中最为广泛的是无功补偿电容器的同步投入。

对于单相投入无功补偿电容器, 根据永磁机构的动作时间、电压过零点及必要的延时, 使机构在电压过零点处合闸到位, 即可完成同步操作。图 1、2 分别为同步和异步投入电容器时的过电压、涌流波形。

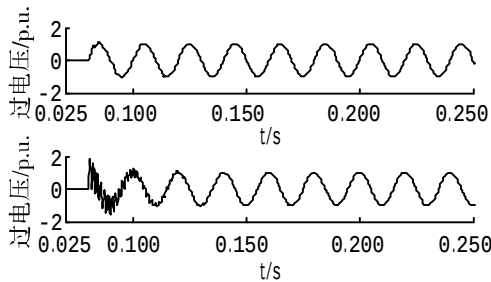


图 1 单相同步和异步投入电容时过电压波形

Fig. 1 Over-voltage waveform of one-phase electrical network closing capacitor synchronously and a synchronously

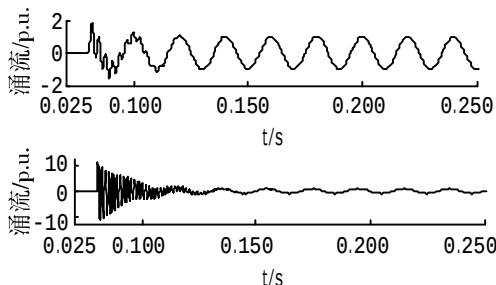


图 2 单相同步和异步投入电容时涌流波形

Fig. 2 Inrush current waveform of one-phase electrical network closing capacitor synchronously and a synchronously

从图 1、2 中可知, 当异步(在系统电压峰值)投入关合电容时, 母线出现 1.8 p.u.(对额定电压而言)左右过电压和 11.2 p.u.(对额定电流而言)的涌流。而同步(在系统电压过零点)关合电容器组时, 暂态冲击持续时间缩短, 母线过电压基本无震荡, 涌流幅值

降到 1.7 p.u.以下。

同步关合中性点接地连接的三相补偿电容器组时, 合闸策略与单组电容器基本一样, 最佳关合相位在每相电压过零时刻^[11]。

图 3、4 分别为同步和异步关合电容器组时的过电压和涌流波形。异步关合的过电压和涌流幅值分别可达 1.85、11.7 p.u., 而采取同步操作基本无过电压, 而涌流幅值也只有 1.8 p.u., 大大降低了电磁暂态效应。

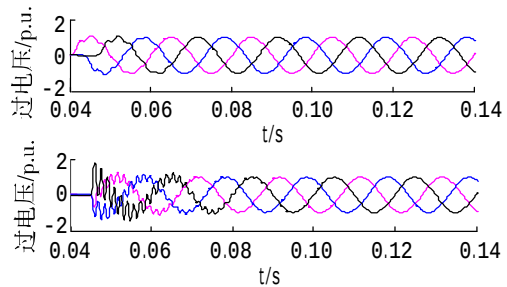


图 3 三相同步和异步投入电容时过电压波形

Fig. 3 Over-voltage waveform of three-phase electrical network closing capacitor synchronously and a synchronously

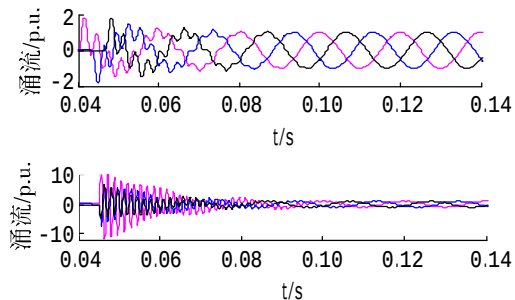


图 4 三相同步和异步投入电容时涌流波形

Fig. 4 Inrush current waveform of three-phase electrical network closing capacitor synchronously and a synchronously

图 5 为合闸过程示意图, 同步关合顺序为 C-B-A, 选取 A 相作为参考相和控制系统能源, 三相合闸相位分别滞后 60° (50 Hz 系统对应时间间隔为 3.33 ms)、 120° 、 180° 。为了避免对线圈两端的控制电压及控制系统电源产生干扰, 影响 C、B 关合精度, A 相最后关合。 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 分别为合闸发令时刻、电压过零时刻、信号触发时刻及断路器动作完成时刻; t_{ic} 、 t_{dc} 、 t_{dc} 分别为 C 相合闸时间、软件延时与断路器动作时间; N 为整数。

2 同步控制系统工作原理

针对永磁操动机构真空断路器的控制机理和触头动作特点, 笔者设计的同步关合控制系统见图 6。

选用 TI 公司浮点型 DSP 芯片 TMS320F28335 作为系统核心处理器, 可在单周期内完成浮点运算, 处理速度远远高于定点 DSP, 且动态范围大, 运算精

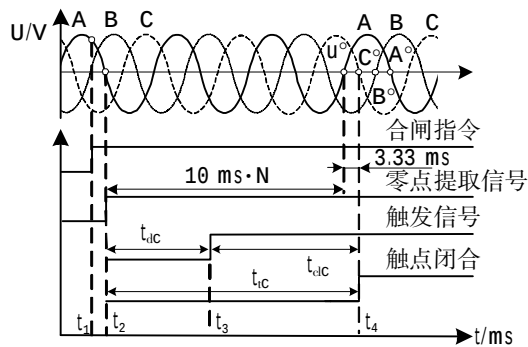


图 5 同步合闸时序

Fig. 5 Timing of synchronous closing

度高,较宽的寻址空间为大型复杂算法提供了可能。采用双稳态永磁操动机构作为执行单元,简化了 IGBT 驱动电路设计。与铅酸蓄电池形成冗余供电方式,故障时通过智能电源管理模块完成两种模式的自动切换。操作电源选用电解电容,当其电压低于阈值(190 V)后,DSP 采用位置式 PID 算法进行快速充电,补充连续分合闸时的能量损耗。由 16 位模数转换芯片 AD73360 完成对电网三相电压、电流同步采样,内置 6 路独立转换通道,可减少多路同步采样相位差。

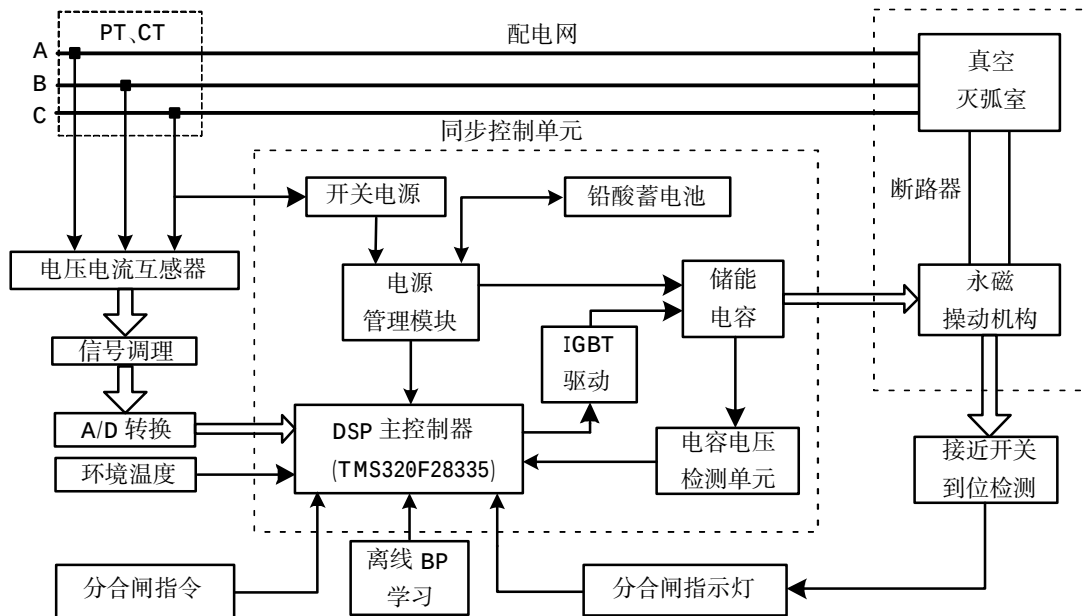


图 6 同步关合控制系统结构框图

Fig. 6 Block diagram of synchronous closing control system

当 DSP 检测到合闸指令,需查看当前条件是否满足,并启动 SPLL 程序和接收离线学习好的 BP 模型,完成三相动作时间预测并排序。首先 DSP 检测接近开关反馈回来的信号,判断断路器当前是否为分闸状态;其次检测储能电容的电压是否达到阈值。只有当以上条件同时满足,DSP 才继续执行合闸过程,否则放弃本次合闸操作。若均满足,锁相环入锁,检测参考相二次侧的电压过零点,经软件相应延时,三相触头依次动作。

3 同步关合关键技术分析

由图 5 可知,合闸时间由软件延时和机构动作两部分组成。其中动作所需时间受断路器、永磁操动机构及电气回路参数等综合作用,在一定温度和电压条件下为定值。为了能在指定相角处关合,需及时调整延时。因此信号过零点提取和动作时间预测的精确度决定着能否实现同步控制技术。

3.1 电压过零点相位检测

传统硬件过零检测方法通常采用高精度电压比较器实现,但其存在失调电压,抗干扰性差,导致零点提取误差较大。文中提出新的过零检测方法,通过 FIR 工频窄带数字滤波器完成采样信号的滤波处理,应用单相锁相环技术准确提取其过零点相位。

FIR 滤波器采用频谱分辨率良好的布莱克曼(Blackman)窗进行设计,滤波器阶数 $N=64$,通带上下限截止频率为 55、45 Hz,阻带上下限截止频率为 60、40 Hz,采样频率 $f_s=3\ 200$ Hz,通带衰减小于 3 dB,阻带衰减不小于 60 dB,频率响应特性曲线见图 7(a)。对输入信号 U 滤波处理,结果见图 7(b),其中 U_f 为基波信号, Y 为输出信号。

由图 7 知,该窄带滤波器保证了采样信号过零点的唯一性,并具有严格的线性相位和良好的幅频特性。滤波处理后的信号幅值与基波一致,相位滞后半个工频周期,过零点与基波一一对应。

单相锁相环参考了文[12]提出的方法,快速跟

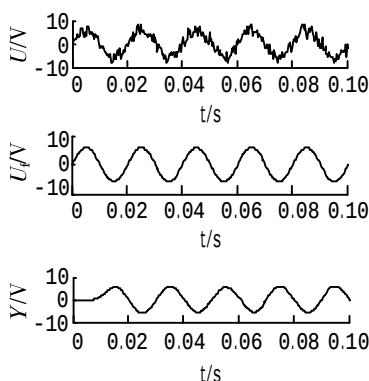
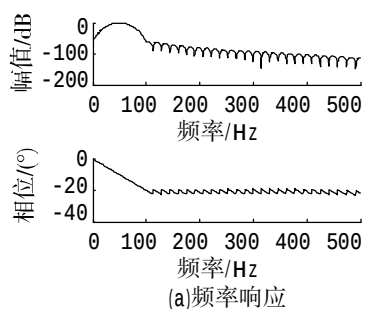


图7 线性相位 FIR 滤波器

Fig. 7 Linear phase FIR filter

踪输入电压相位的变化,锁相环结构简单,运算速率高,解决了内置环路滤波器带宽过窄导致系统动态性能下降的问题。前置 FIR 滤波器可避免电压谐波影响锁相性能,弥补了其不足。

图 8 为 SPLL 信号流示意图,包含 3 个部分:信号采样、相位检测、滤波环节和电压控制振荡器。AD73360 完成对电网电压 u_i 的同步采样,得到 SPLL 输入信号 $u_i(n)$,故参考信号频率为 50 Hz,采样频率设为 4 kHz。SPLL 运行时,系统时钟设为溢出中断,记每隔 $1/f_s$ 触发一次中断,更新 $u_d(n)$ 为 $u_d(n+1)$ 。

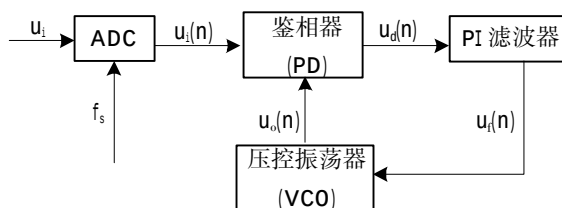


图8 SPLL 信号流

Fig. 8 Single flow of SPLL

图 9 为 DSP 检测到信号过零点(0 或 180°)后发出的同步跟踪脉冲与电网电压信号的相位关系。

可见,同步脉冲正跳变沿与电网电压过零点重合度高,误差在 50 μ s 范围内,而线性插值法和文[13]中零交越相位提取法受谐波影响较大,不能完全避免虚假过零点现象。

3.2 操动机构动作时间预测及补偿

永磁机构的运动过程受电、磁、机械力等综合作

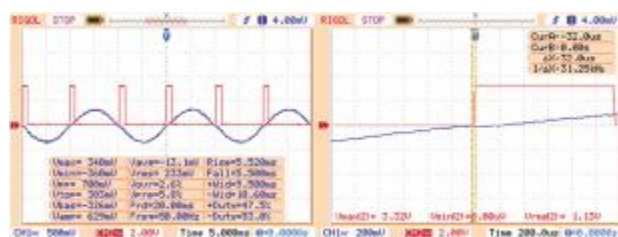


图9 同步跟踪脉冲与交流信号相位关系

Fig. 9 Phase relation between synchronous tracking pulse and AC signal phase

用,主要表现为控制电压、环境温度、触头磨损与老化等因素,它们之间相互联系与耦合,非常复杂,故文中采用人工神经网络对机构动作时间进行研究。

3.2.1 基于 BP 神经网络的动作时间预测

BP 模型是一种多层前向网络,具有很好的非线性映射能力、泛化能力、容错能力,结构简单、可控性好,已在各个工程领域中取得广泛应用。

为提高网络识别精度,对样本归一化处理

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

式(1)中: X 、 X' 分别为原始样本和规范化后数据; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为样本最大值和最小值。将隐层节点数先后设为 3、4、5、6、7、8,分别对合闸时间数据进行 3 500 次训练。每个节点仿真 8 次,取误差函数平均值。误差结果见表 1,可见,隐含层数量增多时,误差函数值并非一定减小,最终确定隐层神经元数目应选 5。

表1 误差函数值

Tab. 1 Function values of error

名称	参数				
隐层节点数	3	4	5	6	7
误差函数值	0.036 2	0.025 7	0.022 9	0.035 4	0.033 6

BP 网络结构见图 10,文中选用 3 层 BP 网络,由输入层 2 个节点、隐层 5 个节点和输出层 1 个节点组成。由于合闸时间与控制电压和环境温度的非线性关系,神经元作用函数选用 Sigmoid 函数,即 $f(x)=1/[1+\exp(-x)]$ 。该网络实质上实现了二维空间(电压—温度)到一维空间(时间)的映射,因此可以解决上述非线性问题。

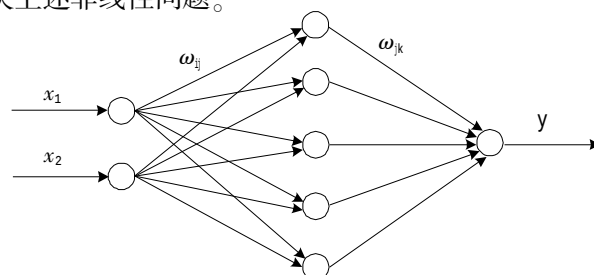


图10 BP 模型拓扑结构

Fig. 10 Model topology of BP

用 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表输入层 i 节点的输入, 则隐层节点 j 的输入、输出分别为

$$\begin{cases} h_j = \sum_{i=1}^n \omega_{ji} x_i - \gamma_j = \sum_{i=1}^{n+1} \omega_{ji} x_i \\ o_j = f(h_j) = 1 / [1 + \exp(-h_j)] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $j=1, 2, \dots, m$; $\gamma_j = \omega_{(n+1)j} x_{n+1}$; $x_{n+1} = -1$ 。输出 k 层节点的输入、输出分别为

$$\begin{cases} z_k = \sum_{j=1}^m \omega_{jk} o_j - \gamma_k = \sum_{j=1}^{m+1} \omega_{jk} o_j \\ y_k = f(z_k) = 1 / [1 + \exp(-z_k)] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $k=1$; $\gamma_k = \omega_{(m+1)k} o_{m+1}$; $o_{m+1} = -1$ 。

BP 训练算法是有指导的训练, 训练样本由输入输出对 $\{x^r, t^r\}$ 组成, 即 r 个样本。在已知教师 $\{t^1, t^2, \dots, t^r\}$ 的情况下, 通过学习算法训练得到实际输出值 $\{y^1, y^2, \dots, y^r\}$, 用其与实际测量值 $\{t^1, t^2, \dots, t^r\}$ 的误差来修正权值和阈值, 修正方法采用 Rumelhart、Hinton、Williams 等人提出的改进的最快下降法。

$$\begin{cases} \omega(\lambda+1) = \omega(\lambda) + \Delta\omega(\lambda+1) \\ \Delta\omega(\lambda+1) = \mu(-\partial E / \partial \omega) + \alpha \Delta\omega(\lambda) \\ \gamma(\lambda+1) = \gamma(\lambda) + \Delta\gamma(\lambda+1) \\ \Delta\gamma(\lambda+1) = \mu(-\partial E / \partial \gamma) + \alpha \Delta\gamma(\lambda) \end{cases} \quad (4)$$

$$E(x, \omega, \gamma) = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^r \sum_{k=1}^1 (t_{k1}^r - y_{k1}^r)^2 < \varepsilon。$$

式(4)中: γ 为迭代次数; μ 为修正系数; α 为惯量因子, $\mu, \alpha \in (0, 1)$; 权值和阈值的初值由 $[-1, 1]$ 之间的随机数产生。

从 A 相合闸时间样本数据中, 取 70 组作为训练, 20 组作为校验, 见表 2。

表 2 部分学习样本与训练结果

$\xi/^\circ\text{C}$	U_c/V	t/ms	t'/ms
-12.1	237	41.38	41.366 3
-8.7	235	41.30	41.314 9
-6.2	238	40.18	40.185 2
4.3	236	40.12	40.127 5
12.4	234	40.41	40.405 6
23.1	234	40.16	40.163 1

注: ξ 为环境温度; U_c 为控制电压; t 为实测合闸时间; t' 为仿真合闸时间。

图 11、12 分别为反归一化后的拟合结果与误差。可看出, 文中建立的 BP 神经网络预测合闸时间和实际测量值非常接近, 误差控制在 0.032 3 ms 以内, 拟合精度较文[4]高, 满足工程要求。所有样本采用 MATLAB 神经网络工具箱完成训练后, 得到各网络节点的权值和阈值 ω_{ij} 、 ω_{jk} 、 γ_j 、 γ_k , 从而建立输入和

输出间的数学模型, 即分合闸时间与控制电压和环境温度的关系表达式。通过 DSP 软件编程, 对采集到的当前控制电压和环境温度精确计算(预测)出该条件下的分合闸时间。将隐含层中 S 型函数涉及到的指数函数 e^x 采用泰勒级数展开, 即

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{4!}x^4 + \dots \quad (5)$$

取前 6 项计算, 误差小于 1.984×10^{-4} 。

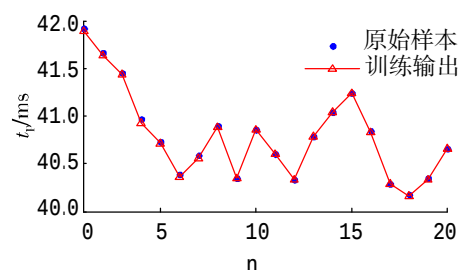


图 11 BP 拟合结果

Fig. 11 Fitting results of BP

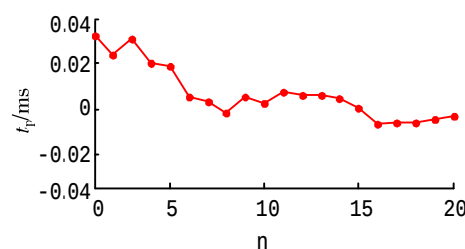


图 12 BP 拟合误差

Fig. 12 Fitting error of BP

3.2.2 老化和磨损自适应补偿

永磁机构老化与动静触头磨损过程缓慢, 为减少偶然因素影响合闸时间, 对 10 次历史操作的动作时间误差 Δt 加权滤波处理, 预测第 $n+1$ 次动作补偿时间。

$$\begin{cases} \Delta t(n) = \sum_{i=0}^9 \mu_i \cdot \Delta t(n-10+i) \\ \mu_{i+1} = \lambda \mu_i \\ \sum_{i=0}^9 \mu_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: μ_i 为滤波权值; λ 为自适应因子, 取值范围为 1.2~1.4。

4 同步关合试验结果

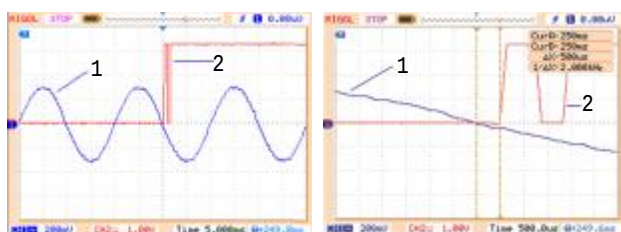
选择 12 kV、20 kA 真空断路器进行试验, 技术参数见表 3。

图 13 为投切补偿电容器时的单相同步合闸波形。示波器一通道为 A 相电网电压采样调理后的电压信号。二通道为合闸到位后, 接近开关经光耦 TLP521 隔离反馈给 DSP 的信号。图 14 为同步断路器控制板实物图。

表 3 断路器主要参数

Tab. 3 Main parameters of the breaker

参数	数值
储能电容/ $(\mu\text{F}\cdot\text{V}^{-1})$	22 000/250
永磁驱动电压/V	234.0
合闸线圈电阻/ Ω	2.2
分闸线圈电阻/ Ω	2.6
合闸平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.83 ± 0.2
分闸平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.49 ± 0.2
合闸平均时间/ms	40.7
分闸平均时间/ms	20.4
合闸分散性/ms	0.4
分闸分散性/ms	0.4



1—电网电压信号;2—合闸到位反馈信号。

图 13 同步合闸波形

Fig. 13 Synchronous closing waveform



图 14 同步操作控制板

Fig. 14 Control board of synchronous operation

试验结果表明,该系统成功的实现了无功补偿电容器的同步投切,同步分合闸最大误差小于 $\pm 1\text{ ms}$,满足 CIGRE 标准规定的动作精度要求。

5 结论

1)配电网中性点接地时,采用同步关合技术可以显著改善投入无功补偿电容器组瞬时引起的电磁暂态效应。

2)64 阶 FIR 工频窄带滤波器结合单相锁相环技术可快速跟踪信号相位变化,准确获取电压过零点,BP 神经网络能够很好的预测断路器动作时间。

3)多次分合闸试验测试结果一致性好,表明该同步关合控制系统稳定、可靠、动态性能好,并进一

步验证了硬件设计和软件算法的合理性与正确性。

参考文献:

- [1] HORINOUCI K, TSUKIMA M, TOHYA N, et al. Synchronous controlled switching by vacuum circuit breaker with electromagnetic operation mechanism[C]//Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference. Japan: IEEE, 2004:529-534
- [2] 林 莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 谢将剑, 李 鹏, 崔国荣. 基于永磁操动机构的同步关合关键技术的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(7):1-4.
- XIE Jiangjian, LI Peng, CUI Guorong. Research on key technologies of PMA based synchronous switching [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7):1-4.
- [4] 张永斌, 袁海文. 基于 DSP 及永磁机构真空断路器的同步分合闸控制装置[J]. 高压电器 2009, 45(1):116-119.
- ZHANG Yongbin, YUAN Haiwen. A control device for synchronized switch based on DSP and vacuum circuit breakers with magnetic drive[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1):116-119.
- [5] 王福忠, 王玉梅, 邹有明. 现代供电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] HORINOUCI K, TSUKIMA M, TOHYA N, et al. Synchronous controlled switching by vacuum circuit breaker (VCB) with electromagnetic operation mechanism [C]//Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference. Japan: IEEE, 2004:529-534.
- [7] DING F H, DUAN X Y, ZOU J Y et al. Controlled switching of shunt capacitor banks with vacuum circuit breaker [C]//Discharges & Electrical Insulation in Vacuum, 2006 XXII International Symposium. Dalian: IEEE, 2006:447-450.
- [8] LASZLO P, GYÖERGY B, GÁBOR B, et al. Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(8):642-649.
- [9] WOO K I, KWON B I. Characteristic analysis and modification of PM-type magnetic circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2):691-694.
- [10] 林 莘, 张 浩, 那 娜. 真空断路器永磁机构计算与分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(3):266-269.
- LIN Xin, ZHANG Hao, NA Na. Calculation and analyses of permanent magnetic actuator of vacuum breaker [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(3): 266-269.

(下转第 110 页)

- [8] CANDELA S R. A new algorithm for mixed Weibull analysis of partial discharge amplitude distributions [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(2):524-531.
- [9] JACQUELIN E. Inference of sampling on Weibull representation [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(6):231-238.
- [10] 杨 霁, 李 剑, 孙才新, 等. 基于小波多尺度变换的局部放电图像识别方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 64-67.
YANG Ji, LI Jian, SUN Caixin, et al. New method for recognition of partial discharge based on wavelet multi-resolution analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 64-67.
- [11] 李 剑, 孙才新, 杜 林, 等. 局部放电灰度图象分维数的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8):123-127.
LI Jian, SUN Caixin, DU Lin, et al. Study on fractal dimension of PD intensity image [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8):123-127.
- [12] MAZROUA A A. Discrimination between PD pulse shapes using different neural network paradigms [J]. IEEE Transaction on Electrical Insulation, 1994, 1(6):1119-1131.
- [13] 郑 重, 谈克雄, 高 凯. 局部放电脉冲波形特征分析 [J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 15-17.
ZHENG Zhong, TAN Kexiong, GAO Kai. Analysis of partial discharge pulse waveform characteristics [J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 15-17.
- [14] HANS-GERD K. Diagnosis of partial discharge signals using neural networks and minimum distance classification [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28 (6): 1018-1024.
- [15] 王国利, 郝艳捧, 李彦明. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-35.
WANG Guoli, HAO Yanpeng, LI Yanming. Pulse current parameter evaluation of typical partial discharge models in oil [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 34-35.
- [16] 李立学, 滕乐天, 黄成军, 等. GIS 局部放电超高频信号的包络分析与缺陷识别 [J]. 高电压技术, 2009, 35(2):260-265.
LI Lixue, TENG Letian, HUANG Chengjun, et al. Envelope analysis and defects identification of partial discharge UHF signals in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (2):260-265.
- [17] 李 剑, 王小维, 金卓睿, 等. 变压器局部放电超高频信号多尺度网格维数的提取与识别 [J]. 电网技术, 2010, 34 (2):159-163.
LI Jian, WANG Xiaowei, JIN Zhuorui, et al. Multi-scale grid dimension extraction and recognition of ultra-high frequency signals of transformer partial discharge [J]. Power System Technology, 2010, 34(2):159-163.
- [18] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc. R. Soc. Lond. A, 1998 (454): 903-995.
- [19] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [20] PARKER T S. Practical numerical algorithms for chaotic systems spring-verlag [M]. New York: World Publishing Corp., 1992.

李 化(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电气设备检修试验的技术管理工作。

程昌奎(1983—), 男, 博士, 工程师, 从事变电设备检修技术管理工作。

陈 娇(1985—), 女, 硕士, 工程师, 长期电力统计量检测工作。

(上接第 103 页)

- [11] 方春恩, 王佳颖, 邹积岩. 并联电容器组同步关合最佳目标相位的确定 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(1):24-27.
FANG Chun'en, WANG Jiaying, ZOU Jiyan. The investigation on optimal making phase for synchronous closing shunt capacitor banks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1):24-27.
- [12] 陶兴华, 李永东, 孙 敏, 等. 一种基于同步旋转坐标变换的单相锁相环新算法 [J]. 电工技术学报, 2012, (6):147-152.
TAO Xinghua, LI Yongdong, SUN Min, et al. A novel single-phase locked loop algorithm based on synchronous reference frame [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, (6):147-152.
- [13] 刘 斌, 段雄英, 邹积岩. 基于零交越相位提取方法的同步断路器设计 [J]. 电网技术, 2006(8):31-34.
LIU Bin, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan. Design of synchronous circuit breaker based on zero-crossover phase difference [J]. Power System Technology, 2006(8):31-34.
- 王喜利(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为机械设计及智能控制。
- 郭凤仪(1964—), 男, 教授, 博导, 研究方向为智能化电机与电器、电接触理论及其应用、节能型电力电子技术等。