

配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统设计与实现

张庆杰,袁海文

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

摘要:为减少电力系统中断路器投切无功补偿电容器组时产生的电磁暂态效应,研究了一种配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统:给出了中性点不接地星形方式连接的并联电容器组的同步分合闸控制策略,以数字信号处理器(DSP)为核心设计了同步分合闸控制系统的原理样机,给出了同步分合闸控制算法流程。通过分析影响永磁机构动作时间的因素,研究了同步分合闸控制的关键技术,包括设计 FIR 数字滤波器以准确提取系统电压电流过零点、径向基函数神经网络(RBF)预测控制、机构老化与触头磨损的自适应补偿控制等。最后给出并分析了同步分合闸控制精度的实验结果。实验结果表明,同步分合闸操作时的动作分散性基本保持在 ± 0.5 ms 以内。

关键词:永磁机构;真空断路器;同步分合闸;FIR;径向基函数;DSP

中图分类号: TM 561

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0098-05

0 引言

电力系统中的断路器在关合与开断电力设备的瞬时,系统的电压与电流的初相角是随机的和不确定的,当应用于投切容性负载(如电容器组、空载输电线路等)或感性负载(如空载变压器、电抗器组、大容量电动机等)时,断路器的分合闸操作所带来的开关暂态过程会对系统产生各种干扰,引起过电压和涌流,从而影响电力系统的正常运行^[1-3]。同步控制技术^[4-5]是指断路器动、静触头在控制系统的控制下,在电网电压或电流的指定相位完成电路的断开或闭合,使电力设备在对自身和系统冲击最小的情况下投入或切出电力系统的智能控制技术。永磁机构结构简单,具有高的机械可靠性,动作时运动部件少且连接紧密,使得配永磁机构的真空断路器的分合闸时间比较短而且稳定,分合闸时间的分散性可以控制在 ± 1 ms 内,比其他任何机构(如直流电磁机构、弹簧操动机构等)都更加符合同步控制对机构动作时间分散性的要求^[6-7]。

针对中低压等级电力系统的无功补偿研制了配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统,用于同步投切并联电容器组,既实现了电力系统的无功补偿,节约了电能,又减小了系统电磁暂态效应,从而保护了补偿电容器和其他电力设备,提高经济效益^[8]。

1 同步分合闸控制策略

对于中低压等级电力系统,并联电容器组通常采用中性点不接地的星形连接方式,此时同步合闸控制策略是在某两相电压之差为零时,同时投入这两相的补偿电容器组,这时中性点电压为两相电压

的平均值,该中性点电压经过 90° 后变为 0,此时也是第三相电压过零时刻,再投入第三相补偿电容器组^[8-10]。与合闸过程不同,同步分闸的目标是在保证开关触头不发生重燃的情况下,使燃弧时间最短。对中性点不接地星形连接方式,其控制策略是在某相电流过零前 5~7 ms 切除该相补偿电容器组,再过 10 ms 同时切除其他两相。经仿真实验证实,上述分合闸策略对电网的冲击影响最小。

本控制系统采用根据机构分合闸动作时间,经 CPU 选定某相过零点,通过延时发令的方法来实现同步分合闸策略。具体如下:对于单相同步合闸操作,根据机构动作时间及电压过零点,再经过必要的延时发出合闸指令,使机构在电压过零处合闸到位。对于单相同步分闸操作,其分闸策略与合闸策略大致是相同的。区别只是合闸是选电压过零点而分闸选电流过零点为参考基准。对于三相同步合闸操作,根据中性点不接地的同步投切策略,首先对这三相机构动作时间进行比较。在选到电压过零点后,动作时间最长的机构先发令,其他两相经相应延时后发令,使得前两相在电压相等处合闸到位,第三相在电压过零处合闸到位。而对于三相同步分闸操作,同样先对这三相机构的动作时间进行比较。在选到电流过零点后,仍然是以动作时间最长的机构先发令,其他两相延时后发令,使先发令那相在电流过零前 5~7 ms 分闸,而后两相在 10 ms 后同时分闸,这样保证了开关触头不会发生重燃。以 A 相机构合闸时间最长、C 相次之、B 相最小为例,给出三相同步合闸中 A 相的具体关合过程,B、C 相与此类似,如图 1 所示。

图 1 中 t_z 是检测到 A 相电压零点之后,到 CPU 发 A 相合闸命令之间的延时, t_{ch} 是 CPU 发 A 相合闸命令后的传输延迟和 A 相合闸的时间,10 n 是半周波(10 ms)的 n (整数)倍。

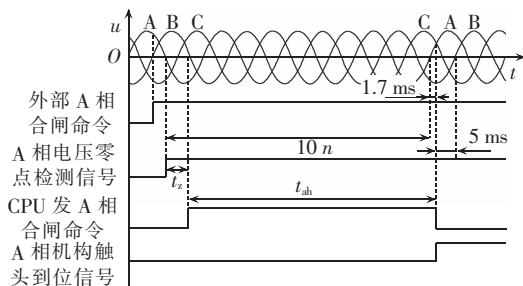


图 1 中性点不接地时的同步合闸过程示意图

Fig.1 Synchronous switch-on process of neutral non-grounding power system

2 同步分合闸控制系统的工作原理

同步分合闸控制系统工作原理图如图 2 所示。

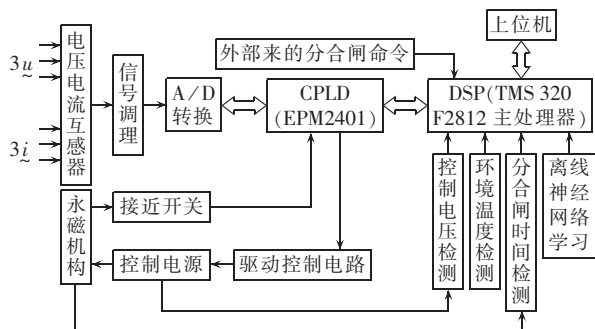


图 2 同步分合闸控制系统的工作原理图

Fig.2 Schematic diagram of synchronous switching control system

当外部设备随机地发出分合闸命令时,主处理器会在接收到这一命令时启动同步操作需要的计算和检测功能,并接收离线学习好的神经网络模型,完成对所有信号的分析处理,执行同步操作算法,准确输出相应的控制命令,从而在最佳时刻发出分合闸操作命令,以实现同步操作。又因为断路器的分合闸动作要求有高的实时性,所以训练采用离线方式。

2.1 硬件设计

同步分合闸控制系统的硬件主要由信号采集处理单元、主控制单元、驱动控制电路和控制电源装置以及人机交互等几部分组成,信号采集处理单元完成对电网电流、电压信号、开关量信号、环境温度、控制电压等信号的采集与处理。主处理器单元采用 32 位定点 DSP 芯片 TMS320F2812,其任务是接收来自继电保护与无功补偿装置的动作命令,驱动电路和电源装置接收控制器发出的分合闸动作命令信号,控制电源装置对永磁机构合分闸线圈放电;待放电后还要完成对电源装置的充电控制。人机交互部分完成键盘和液晶显示操作命令;另外还要实现与上位机进行 RS-485 串口通信。

2.2 同步控制算法设计

同步分合闸控制系统的软件主要包括三相电压、电流数据采集和处理部分;控制电压和环境温度以及开关量输入的调理部分;同步动作执行部分;断路器机构动作时间测量部分;断路器动作时间预测部

分和通信部分等。

下面以 A 相机机构动作时间最长为例,给出三相同步合闸控制算法流程如图 3 所示,同步分闸控制算法流程与此类似。其中的门限值是判断外部继电保护发同步动作命令时刻线路是否为空载状态,若为空载,直接进行分合闸操作,不进行同步操作。

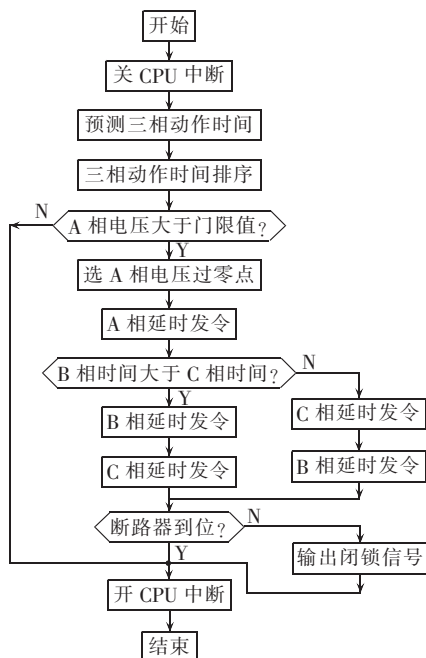


图 3 三相同步合闸控制算法流程图

Fig.3 Flowchart of synchronous switching control algorithm

3 同步分合控制关键技术分析

由同步控制的实现方案可以看出,要实现断路器的同步分合操作,有 2 个关键技术问题需要解决。首先,同步分合控制系统必须能获取系统电压或电流过零点的准确时刻,以作为同步分合操作时间的基准。其次,虽然永磁操动机构本身动作时间的分散性很小,但由于外界条件(包括控制电压、环境温度、机构老化与触头磨损等)的变化,使得永磁机构每次的动作时间并不是固定不变的^[11-12]。因此,如何准确预测出永磁机构的下次动作时间便成为能否实现同步分合控制的关键。下面将就上述 2 个关键问题进行分析,并提出相应的具体检测算法和控制策略。

3.1 系统电压电流过零点检测

在同步分合控制的具体实现中,电压和电流零点时刻的提取是很关键的,只有知道电压或电流的过零点时刻后,才能以此为基准预测出电压、电流的同步分合点时刻,并进一步确定永磁机构合分闸信号的发出时刻。一般可以采用高精度电压比较器来实现零点时刻的提取,但由于比较器存在失调电压,交流信号中也存在谐波和噪声,这些都会给基波信号的零点提取带来较大的误差。为此可采用 FIR 数字滤波器对原始采样信号进行低通滤波,线性插值来提取基波电压或电流的零点^[13]。

FIR 滤波器的差分方程为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cdot x(n-k) \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 为输入序列, $y(n)$ 为输出序列, $h(k)$ 为滤波器系数, N 为滤波器的阶数。

本文用窗函数法设计线性相位 FIR 带通滤波器, 选用具有较好频谱分辨率的布莱克曼窗(Blackman)。设计滤波器阶数 N 为 64, 通带上下截止频率为 55、45 Hz, 通带内衰减小于 3 dB, 阻带上下截止频率为 60、40 Hz, 阻带内衰减不小于 60 dB, 采样频率 f_s 为 3.2 kHz, 用 Matlab 软件中的函数 fir1 求得滤波器系数, 然后用定点 DSP 芯片 TMS320F2812 具体编程实现 FIR。具体实现方法是: 首先在 DSP 的存储器区定义 2 个缓冲区(数组), 第 1 个缓冲区存储由 Matlab 软件得到的滤波器系数, 存储格式是第 1 个系数位于该缓冲区开始的位置单元, 最后一个系数位于该缓冲区最后的位置单元; 第 2 个缓冲区存储延时抽样数据, 存储格式是最新的抽样 $x(n)$ 位于该缓冲区的开始位置, 最早的抽样 $x[n-(N-1)]$ 位于该缓冲区的最后位置。然后在程序中设置 2 个循环子程序, 第 1 个循环实现在特定的 n 时刻 N 个系数和 N 个抽样的卷积, 第 2 个循环更新延时的抽样, 并计算 $n+1$ 时刻的输出 $y(n+1)$, 新采集的输入抽样始终在抽样缓冲区的开始位置单元, 该过程一直这样继续, 即实现循环缓冲^[14]。设计的带通滤波器频率响应如图 4 所示(图中, ω 指归一化后的频率)。

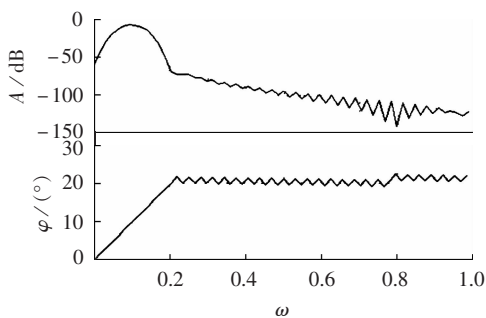


图 4 带通滤波器频率响应

Fig.4 Frequency response of band-pass filter

N 阶线性相位 FIR 滤波器的输出延时为

$$t_d = NT_s / 2 \quad (2)$$

其中, T_s 为采样周期。代入数据得 $t_d = 64 / (2 \times 3.2 \times 10^3) = 10(\text{ms})$, 即原始信号经 FIR 滤波器后相位滞后 180° , 说明 FIR 输出零点与参考电压或电流零点一一对应。

采样数值通过一个 45~55 Hz 的窄带滤波器后, 保证了采样数值过零点的唯一性。当采样周期足够短时, 信号过零处的正弦曲线可以近似为直线, 从而可利用线性插值法计算其过零点时刻。例如, 当滤波器输出 $y(k+1)$ 和 $y(k)$ 异号时, 可由线性插值法求得零点时刻:

$$t_0 = t_k + \frac{y(k)}{y(k+1) - y(k)} T_s \quad (3)$$

其中, t_0 为电压或电流过零点的时刻; t_k 为第 k 个数

据 $y(k+1)$ 的采样时刻。

在得到电流或电压的零点时刻后, 即可根据频率的大小预测出机构的下一次分合闸时刻。

3.2 基于神经网络的动作时间预测和自适应补偿

3.2.1 永磁机构动作时间的影响因素分析

永磁机构在运动过程中受电、磁、热、机械力的综合作用, 即在电路上遵循电压平衡方程, 在运动上遵循达朗贝尔运动方程, 在磁场上遵循麦克斯韦方程, 在热路上遵循热平衡方程。这些方程间存在着相互联系与耦合, 具体表现为控制电压、环境温度、触头老化与磨损等因素的影响, 使得准确预测机构的动作时间非常困难。

控制电压是加在永磁机构分合闸线圈两端的电压, 一般由充电后的电解电容供给, 它的大小直接影响着线圈中放电电流的大小, 因此它必然对机构的动作时间产生影响。该电压由于永磁机构在动作过程中铁心的运动使线圈电感在不断变化, 因此, 控制电压与动作时间的关系非常复杂。实验表明, 随着控制电压的升高, 各相机构的分合闸动作时间均随之减小, 同时机构的动作时间随控制电压的变化率也减小。

环境温度对分合闸时间的影响主要体现在以下几个方面: 首先, 温度的变化会引起分合闸线圈回路各种电气参数的变化, 如分合闸线圈的电阻值和充放电电容值的变化等。其次, 环境温度的变化也会对永磁体的性能将产生影响, 尤其会使永磁体的矫顽力发生明显变化。最后, 环境温度的变化还会对断路器的运动阻尼带来影响。因此, 环境温度对动作时间的影响也非常复杂。

机构老化与触头磨损的影响也不可忽略, 在开关动作若干次后, 触头弹跳和电弧燃烧等都会使触头材料产生磨损和老化, 可能导致分合闸行程的变化, 同时运动的阻尼系数也可能发生变化, 触头磨损还可能导致预击穿耐压特性曲线的变化, 从而使分合闸时间发生变化。

3.2.2 基于神经网络的动作时间预测

从上文分析可看出, 控制电压、环境温度、机构的老化与触头磨损等都会对永磁机构动作时间带来影响, 其中, 控制电压和环境温度的影响是主要的。由于控制电压和环境温度对动作时间的影响非常复杂, 因此几乎不可能用解析方法建立动作时间与控制电压、环境温度之间的数学表达式。本文基于径向基函数(RBF)神经网络对同步分合闸的控制算法进行了研究。径向基函数神经网络是前馈神经网络中的一类特殊的 3 层神经网络, 其隐含层单元的特性函数采用非线性的径向基函数, 以对输入层的激励产生局部化响应, 即仅当输入落在输入空间某一指定的小范围内时, 隐含层单元才会作出有意义的非零响应。输出节点则对隐含层节点的基函数输出进行线性组合。

针对配永磁机构的真空断路器同步分合闸问

题,建立了径向基函数神经网络。该网络共有3层,前一层的输出等于后一层的输入。第1层输入层的节点数 $N=2$,即有2个输入变量,分别为控制电压和环境温度。第3层输出层的节点数 $M=1$,即有1个输出变量,分闸或合闸时间。第2层隐含层采用高斯型径向基函数作为网络的激活函数,其节点数 L 在样本训练过程中确定。因此,学习样本采用 $2-L-1$ 的网络结构形式。

用 $X_k(k=1,2)$ 代表输入层的输入, $V_j(j=1,2,3,4)$ 代表隐含层的输出, $Y_i(i=1)$ 代表输出层的输出。设给定的输入模式为 $X_k^u(u=1,2,\dots,p)$, 其中 p 为输入模式数,则隐含层节点的输出为

$$V_j^u = R_j^u / \sum_{j=1}^L R_j^u \quad (4)$$

其中, $R_j^u = \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left(\frac{X_k^u - c_{jk}}{\sigma_j} \right)^2 \right]$ 为高斯型径向基函数, $C_j = (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jk}, c_{jN})^T$, 表示隐含层节点基函数的中心, σ_j 表示隐含层节点基函数的宽度, V_j^u 为归一化的径向基函数。输出层节点的输出为

$$Y_i^u = \sum_{j=1}^L W_{ij} V_j^u \quad (5)$$

其中, W_{ij} 为隐含层节点与输出层节点之间的连接权值,其值可根据线性函数数值逼近的最小二乘法原理,使误差函数为最小,即通过 $\partial E / \partial W_{ij} = 0$ 计算得到。误差函数计算式为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (T_i - Y_i)^2 \quad (6)$$

考虑到控制电压和环境温度的量纲不相同,量级上也有很大差别,为避免其对网络识别精度造成影响,在学习训练前,先将全部输入、输出因子规范化到 $[0,1]$ 之间,即

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

其中, X 、 X' 分别为样本原始数据和规范化后的数据; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为每组输入数据的最大值与最小值。取40组样本数据,前20组样本作为训练数据,后20组样本作为检验数据,在Matlab的神经网络工具箱中用Newrb函数设计该径向基函数网络,用其作函数逼近时,可以自动增加径向基网络的隐含层神经元数,直至到达均方误差为止。以A相合闸时间样本训练为例,经训练,RBF神经网络隐含层神经元个数为10时,其均方误差已经非常小,为 5.4083×10^{-5} ,从而可使预测工作很快到达预期的效果。A相合闸时间的RBF拟合结果见图5,拟合误差曲线见图6。图中, t_A 、 $t_{A, \text{err}}$ 分别指合闸时间及误差。

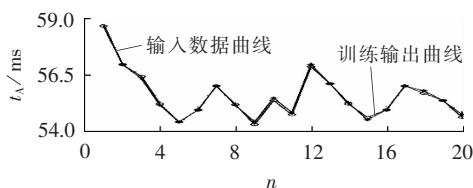


图5 RBF拟合结果

Fig.5 Fitting result of RBF

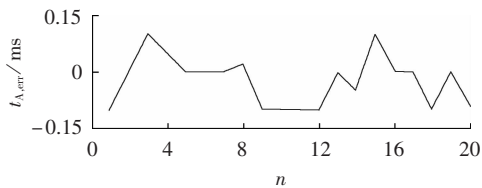


图6 RBF拟合误差

Fig.6 Fitting error of RBF

从图5、6可以看出,本文建立的RBF拟合精度比较高,拟合误差在0.1ms以内,满足工程要求。其他相的分合闸时间样本训练方法同上。所有相的样本训练好后,根据训练的结果可得到隐含层节点与输出层节点之间的连接权值 W_{ij} ,然后利用上面的算法即可得到输出层神经元的数学表达式,即分合闸时间与控制电压、环境温度的关系表达式,最后在DSP上编程实现。这样DSP就可根据检测到的当前控制电压与环境温度计算(预测)出机构在该条件下的分合闸时间。

3.2.3 机构老化与触头磨损的自适应补偿

为了更准确地预测机构的动作时间,触头的老化和机械磨损对分合闸时间的影响也不容忽视。由于机构的老化与触头磨损是一个缓慢的过程,为了减小偶然因素造成的干扰,取8次历史操作的动作时间误差作为依据,采用加权滤波的方法,调整对下一次的分合闸动作时间的估计:

$$\begin{cases} \Delta t(n) = \sum_{i=0}^7 \lambda_i \Delta t(n-8+i) \\ \lambda_{i+1} = k \lambda_i \\ \sum_{i=0}^7 \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\Delta t(n)$ 是对第 n 次断路器动作时间的预测误差; λ_i 是滤波权值; k 是自适应因子,一般取1.2~1.4。

4 同步动作实验结果

并联电容器组的同步投切能否获得预期的效果主要取决于同步开关分合闸相位选取的准确性,因此需要对所设计的同步分合闸功能进行精度测试,从而验证采用算法的正确性和硬件的合理性。为此,将大功率三相可编程交流电源的输出分别接入同步开关控制系统对应电压端子,并通过可变负载箱把三相电流信号引入对应电流端子。在实验中,按照中性点不接地情况下的同步投切并联电容器组的策略进行操作,并选用Tektronix TDS2024四通道示波器对同步分合闸的精度进行测量。三相同步分闸波形如图7所示;三相同步合闸波形如图8所示。图7中, $CH_1 \sim CH_3$ 分别指A、B、C相开关触头分闸到位信号,图8中 $CH_1 \sim CH_3$ 分别指三相开关触头合闸到位信号; CH_4 指基准电流经调理后的电压信号。

由测试结果可知,同步开关控制系统很好地满足了三相的同步分合闸操作要求,并使其控制精度小于 ± 0.5 ms,实现了对无功补偿电容器组的同步投切。

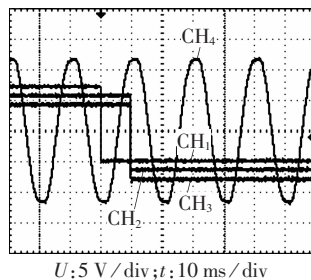


图7 三相同步分闸波形

Fig.7 Waveforms of three-phase synchronous switch-off

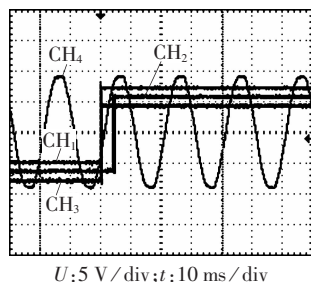


图8 三相同步合闸波形

Fig.8 Waveforms of three-phase synchronous switch-on

5 结论

对所设计的配永磁机构真空断路器同步分合闸控制系统,按照相应的实验标准进行了多次分合闸实验,结果证明了该控制系统的稳定性和可靠性。研究的同步分合闸操作的关键控制技术,如设计的 FIR 数字滤波器用于提取系统参考零点的方法较传统模拟方法有更好的抗干扰性和经济性;设计的径向基函数神经网络控制系统克服了传统建模方法难以精确建立断路器同步控制数学模型的缺点,能使系统在各种不同条件下均可以保持相对一致的分合闸操作时间,改善了控制系统的动态性能。

参考文献:

- [1] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 107-110.
- [2] 王季梅. 真空开关技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 271-290.
- [3] 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.
- [4] 段雄英, 邹积岩, 顾丕冀, 等. 相控真空断路器同步关合电容器组的研究[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 28-30.
DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, GU Piji, et al. Investigations on synchronized closing capacitor banks with phase-control vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 28-30.
- [5] 丁富华, 邹积岩, 段雄英. 相控开关的最佳投切相位研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 408-411.
DING Fuhua, ZOU Jiyan, DUAN Xiongying. Research on optimum switching phase of phasing switches[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 408-411.
- [6] WOO K I, KWON B I. Characteristic analysis and modification of PM-type magnetic circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Mag-

netics, 2004, 40(2): 691-694.

- [7] 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.
- [8] CIGRE Working Group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers(1st Part/2nd Part)[J]. Electra, 1999, 8(7): 183-185.
- [9] 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.
- [10] 丁富华, 段雄英, 邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 30-35.
DING Fuhua, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan. An intelligent reactive power compensator based on synchronous vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 30-35.
- [11] 段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 等. 基于真空断路器的并联电容器组相控投切装置[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 78-84.
DUAN Xiongying, LIAO Minfu, DING Fuhua, et al. Controlled vacuum circuit breaker for shunt capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 78-84.
- [12] 方春恩, 周承鸣, 邹积岩. 同步断路器的统计特性分析及自适应控制[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 183-185.
FANG Chun'en, ZHOU Chengming, ZOU Jiyan. Statistical characteristic analysis and self-adaptation control of synchronous circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 183-185.
- [13] 丁富华, 邹积岩, 段雄英, 等. 采用数字信号处理器的永磁机构同步控制系统[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 39-42.
DING Fuhua, ZOU Jiyan, DUAN Xiongying, et al. Synchronous control system of permanent magnetic actuator applying digital processor[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 39-42.
- [14] Rulph Chassaing. DSP applications using C and the TMS320C6x DSK[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2002: 116-118.
- [15] 靳蕃. 神经计算智能基础[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000: 156-159.
- [16] 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 Matlab 仿真程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 101-106.
- [17] 周小涵, 白申义. 智能真空断路器的同步关合控制[J]. 低压电器, 2009(11): 21-24.
ZHOU Xiaohan, BAI Shenyi. Synchronous closing control of intelligent vacuum circuit breaker[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(11): 21-24.
- [18] 邹积岩, 丛吉远, 董恩源. 真空开关的电子操动与同步开关技术[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 30-33.
ZOU Jiyan, CONG Jiyuan, DONG Enyuan. Electronic actuator and synchronous switching technology of vacuum switch[J]. Electrotechnical Journal, 2001(4): 30-33.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

张庆杰(1979-), 男, 山东莱芜人, 博士研究生, 研究方向为嵌入式系统、电力电子技术及计算机测控(E-mail: buaazqj@163.com);

袁海文(1968-), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为嵌入式系统、电力电子技术及计算机测控、现场总线技术。

Design and implementation of synchronous switching control system for vacuum breaker with permanent magnetism actuator

ZHANG Qingjie, YUAN Haiwen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to reduce the electromagnetic transient effect caused by the circuit breaker switching for reactive power compensation with capacitor groups in power system, a synchronous switching control system of vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator is developed. A concrete synchronous switching control policy of neutral non-grounding and star-type connected shunt capacitor groups is presented, a prototype of synchronous switching control system with DSP as its kernel is developed, and the flowchart of synchronous switching algorithm is given. The influencing factors of actuator action time is analyzed and the key technologies are studied, including the design and implementation of digital FIR filter, the predictive control of Radial Basis Function neural networks, the adaptive compensation for mechanism aging and contactor wear, etc. The experimental results of synchronous control accuracy are analyzed, which show the synchronous control error is within ± 0.5 ms.

Key words: permanent magnetic actuator; vacuum circuit-breaker; synchronous switching; FIR; radial basis function; DSP