

基于 DSP 和人工神经网络的智能同步断路器研究

幸晋渝,刘念,郝江涛,薄丽雅,陈卓
(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 描述了智能同步断路器的工作原理及功能,提出了基于数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor)和人工神经网络的实现方法,并采用全波傅氏算法得出了系统电参数。以同步关合空载变压器为例,阐述了利用神经网络实现合闸时间预测、进行 Matlab 仿真及神经网络模型在 DSP 上的实现方法。

关键词: DSP; 人工神经网络; 同步断路器; 自适应控制

中图分类号: TM 56; TP 18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)01-0021-04

0 引言

传统的断路器是一个被动执行开断和合电路的装置,其操作指令来自于人工命令或继电保护单元,断路器本身无检测、判断电力系统故障和监视自身状态的能力。随着微电子、计算机、信号处理、人工智能等技术迅速发展,断路器的智能化成为可能。

断路器的智能化主要包括几个方面的内容:断路器的智能操作^[1](即根据电网参数自适应控制断路器的分闸速度)、自动重合闸的智能控制及选相分闸(同步操作)技术。

其中,断路器的选相分闸具有重要意义,它对提高电力系统稳定性、改善电能质量、延长设备使用寿命等方面有显著的作用。实际上,断路器同步操作技术的提出已有几十年的历史,但由于操动机构等方面原因而一直难以实现。近年来,出现了一种用于真空断路器的永磁保持、电子控制的电磁操动机构(简称“永磁机构”)^[2],它的主要运动部件只有一个,依靠永磁体的磁力将断路器保持在合、分闸位置。同时,由于动作部件少,中间转换和连接机构也很少,大大减小了动作时间的分散性和不可控性,能够满足同步控制对操动机构的要求。

本文给出了智能同步断路器的实现方法,包括同步控制器的原理、电参数计算方法及基于人工神经网络^[3]的合闸时间计算方法,并进行了相应的 Matlab 仿真^[4]。

1 智能同步断路器原理及功能

电力系统中的断路器在关合和开断电路的瞬间,系统电压、电流的相位通常是随机的,因此,在关合空载变压器、电容器和空载线路时,常会产生幅值和频率都很高的涌流和过电压^[5]。这不仅对系统中

的设备不利,还可能引起保护误动作,影响电力系统的稳定运行。理论分析表明,在系统电压相角 90° 时,关合空载变压器或电抗器;在电压相角 0° 时,关合电容器或空载线路,将大大降低合闸涌流和过电压。同步断路器即是针对这一目标而提出的,通过在普通断路器上增加一套智能同步控制器,即可实现断路器合、分闸相位的自适应控制。

智能同步控制器的原理如图 1 所示,图中虚线右边为智能同步控制器包含的部分。

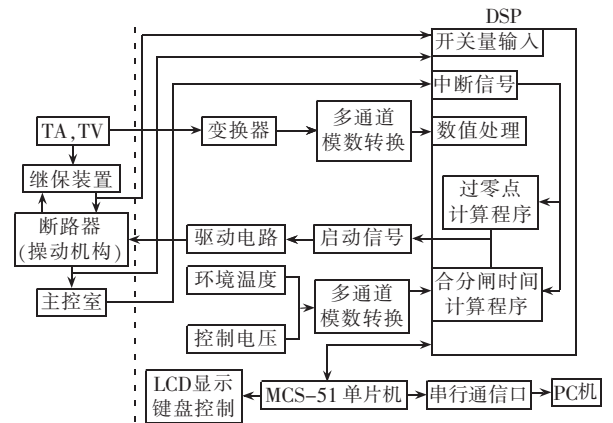


图 1 智能同步控制器原理图

Fig.1 The block diagram of intelligent synchronization controller

智能同步控制器在正常工作下实现系统三相电压、三相电流、有功、无功和功率因数等电参数的实时检测和计算;当接到主控室发来的分、合闸命令或就地投切命令后,引起数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor)^[6]中断,根据执行机构的控制电压、环境温度等参数,自适应预测出断路器操动机构的动作时间,并由 DSP 实时计算出断路器执行单元的触发延时,从而控制断路器在期望的电压、电流相角处分、合闸。在线路出现故障时,由继电保护装置直接启动断路器操动机构动作。

图2描述了同步断路器关合空载变压器或电抗器的动作时序。 t_1 为接到合闸指令到断路器在目标相位处关合的时间, t_d 为延迟时间, t_c 为永磁机构动作并带动断路器合闸所需时间。断路器在接到合闸指令后并不马上启动合闸信号,而由程序实时计算出当前条件下永磁机构合闸所需时间 t_c 和目标合闸时间 t_1 ,再根据 t_c 和 t_1 求出相应的延迟时间 t_d 。经过 t_d 的延迟时间后,发出合闸信号,启动永磁机构进行合闸操作。

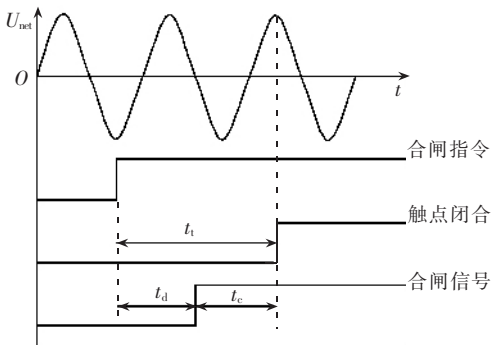


图2 同步关合的动作过程

Fig.2 The operation procedure of synchronized closing

2 智能同步控制器几个主要问题

2.1 系统电参数计算方法

智能同步控制器不仅能完成断路器的同步开关控制,而且能在断路器上实时测量并显示母线电压、回路电流、有功和无功功率、频率等参数。电网电压、电流等模拟信号经互感器、变换器变换为模数转换器允许的输入范围,DSP对这些数字采样值进行分析、计算可得所需参数。考虑到电力系统中除含有基频分量外,还包含恒定直流分量和各种谐波分量,为保证参数计算的准确性,采用全波傅氏算法进行计算。计算公式如下^[1]:

$$X_R = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cos \frac{2k\pi}{N} \quad (1)$$

$$X_I = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \sin \frac{2k\pi}{N} \quad (2)$$

式中 N 为每基频周期内的采样点数; $x(k)$ 为电流或电压采样值; X_R 为电流或电压基频分量幅值的实部; X_I 为电流或电压基频分量幅值的虚部,进一步可算出电流或电压基频分量的有效值和功率因数角。

$$X = \sqrt{(X_R^2 + X_I^2)} / 2 \quad (3)$$

$$\Phi = \arctan(X_I / X_R) \quad (4)$$

相应地,各相有功和无功等参数也可算出:

$$P = (U_R I_R + U_X I_X) / 2 \quad (5)$$

$$Q = (U_X I_R - U_R I_X) / 2 \quad (6)$$

此外,由于电网频率不是固定不变的,有一定的波动范围,必须实时测量出电网频率,才能保证合闸相位的精度。采用基于正、余弦 FIR 滤波器的输出

测量电力系统频率的方法,该方法首先从滤波结果获得 $\sin(2\pi f T_s)$ (T_s 是采样周期),再从 $\sin(2\pi f T_s)$ 的泰勒级数展开式中计算频率。

根据文献[7],滤波器的系数为

$$H_s(K) = \sin\left(\frac{2\pi K}{N} + \frac{\pi}{N}\right) \quad (7)$$

$$H_c(K) = \cos\left(\frac{2\pi K}{N} + \frac{\pi}{N}\right) \quad (8)$$

$X(n)$ 的两个正交分量为

$$X_1(n) = \sum_{K=0}^{N-1} U_{(n-K)} H_s(K) \quad (9)$$

$$X_2(n) = \sum_{K=0}^{N-1} U_{(n-K)} H_c(K) \quad (10)$$

推理可得:

$$2\sin(2\pi f T_s) = \frac{|X_1(n) - X_1(n-2)|}{|X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|} + \frac{|X_2(n) - X_2(n-2)|}{|X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|} \quad (11)$$

若采样频率 f_s 为 1 kHz,则 $N=20$,令 $f = f_0(1+a)$, f_0 为额定工频, a 为频率偏离额定值的比率,可得:

$$2\sin(2\pi f T_s) = 2\sin\left(\frac{\pi}{10} + \frac{\pi}{10}a\right) \quad (12)$$

将式(12)在 0 附近展开成泰勒级数,取前面两项可得:

$$2\sin(2\pi f T_s) \approx 2\sin\frac{\pi}{10} + \left(-\frac{\pi}{5}\cos\frac{\pi}{10}\right)a \quad (13)$$

令

$$b = 2\sin\frac{\pi}{10}, \quad c = \frac{\pi}{5}\cos\frac{\pi}{10} \quad (14)$$

$$k = \frac{|X_1(n) - X_1(n-2)|}{|X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|} - \frac{|X_2(n) - X_2(n-2)|}{|X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|} \quad (15)$$

联立求解可得: $a = (k-b)/c$,测量频率为

$$f = f_0(1+a)$$

2.2 电流、电压零点的提取

在智能同步控制器的具体实现中,电流和电压零点时刻的提取很关键,一般可采用高精度的集成电压比较器实现。但由于比较器存在失调电压,交流信号中存在谐波和白噪声,这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^[8],线性插值提取基波电压或电流的零点。

当滤波器输出 $y(n+1)$ 和 $y(n)$ 异号时,由线性插值可求得零点时刻:

$$t_0 = t_n + \frac{y(n)}{y(n+1) - y(n)} T_s \quad (16)$$

式中 t_0 为电流或电压过零点时刻; t_n 为第 n 个数据 $y(n)$ 的采样时刻; T_s 为采样周期。

2.3 断路器操动机构动作时间的自适应计算

在智能同步控制器的实现中,虽然永磁机构本身的运动分散性很小(在外界条件相同时),但由于

外界条件(包括环境温度、电容电压等)是变化的,断路器的动作时间 t_c 仍然存在一定的分散性,若不进行相应的处理,将不能满足同步控制的要求(ABB 提出的同步合闸时间允差为 ± 1 ms,分闸为 ± 2 ms)。本文用人工神经网络确定动作时间。

2.3.1 BP 网络建模及仿真

目前在人工神经网络的实际应用中,绝大部分网络模型是一种无反馈多层前向网络——BP 网络和其变化形式。BP 神经网络通常具有多层结构,除了输入层和输出层,中间部分称为隐含层。为简化 BP 网络的设计和减少网络的训练时间,采用三层 BP 网络。输入层与输出层的神经元数目根据实际情况确定。由于永磁机构动作时间主要受环境温度和电压的影响,因此,输入信号有 2 个(环境温度和电压)、输出量有 1 个(合闸动作时间)。从而可确定输入层节点数为 2,输出层节点数为 1;至于隐含层节点数在训练过程中确定。

下面以永磁机构合闸操作为例。训练样本数据由图 3 所示的曲线采集(图中 t_{ON} 为合闸时间; U_c 为控制电压;9 条曲线由上而下分别在温度为 -13.3°C , -11.6°C , -10°C , -8.3°C , -7.1°C , -4.3°C , 3.2°C , 11.1°C , 21.8°C 时采集),该曲线由实验数据获取^[2]。

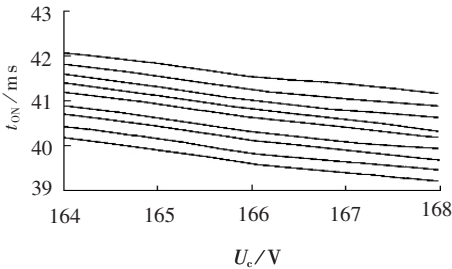


图 3 电压、温度与合闸时间的关系曲线
Fig.3 The relation curve of voltage, temperature and closing time

从图 3 所示曲线中选取 81 个点(每条曲线上选 9 个点)作为样本数据,选取不同的隐层数对 BP 网络进行训练。考虑到输出的取值范围较大,因此在输出层采用线性神经元,隐含层采用 S 形神经元。同时为提高 BP 网络的收敛速度,采用 Levenberg - Marquardt 算法对网络训练。通过对训练结果比较发现,隐层数取为 6 较合适,此时既有好的训练精度,又有快的收敛速度。BP 网络结构如图 4 所示。

采用图 3 所示实验数据对 BP 网络进行训练,表 1 列出了部分样本及结果。可以看出,仿真输出结果与实际结果非常接近,能够满足同步关合对合闸时间精确性的要求。

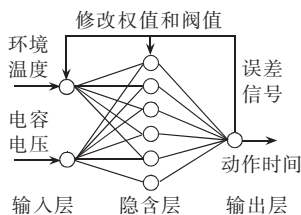


图 4 BP 网络结构
Fig.4 The BP network structure

对于永磁机构的分闸操作,可采用同样方法建立神经网络模型预测机构的分闸动作时间。

表 1 部分样本及结果

Tab.1 Parts of samples and outputs

$t/^\circ\text{C}$	U_c/V	t_r/ms	t_s/ms
-13.3	168.0	41.20	41.172 9
-10.0	166.0	41.00	41.046 4
-4.3	167.0	40.10	40.133 8
3.2	164.0	40.65	40.652 8
21.8	166.5	39.50	39.480 9

注: t 为环境温度; U_c 为控制电压; t_r 为实际合闸时间; t_s 为仿真合闸时间。

2.3.2 神经网络模型在 DSP 的实现方法

对上述网络模型采用 Matlab 神经网络工具箱完成训练后,可得到各个网络节点的权值和阈值,据此即可建立输入和输出间的数学模型。由于隐含层采用 S 形函数,涉及到大量指数函数 e^x 的计算,为便于在 DSP 实现这一运算,将 e^x 用泰勒级数展开为

$$e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{4!}x^4 + \dots \quad (17)$$

作为近似计算,可取无穷级数的前几项,比如取其中的前 6 项时,计算误差小于 $1.984 1 \times 10^{-4}$ 。因此,式(17)可转化为多项式的计算,这可通过在 DSP 中编程实现。

3 结语

断路器的智能同步操作具有重要意义。本文给出了智能同步断路器的工作原理,对于智能同步控制中的几个关键问题,比如电参数的计算、信号零点的提取及合闸时间的计算等给出了相应的解决方案。以同步关合空载变压器为例,详细阐明了关合动作时序,提出了基于人工神经网络的合闸时间计算方法,并给出了神经网络模型在 DSP 的具体实现办法。断路器的同步控制是一种新兴技术。由于同步控制的显著优点,今后必将有越来越多的断路器朝着这一方向发展。

参考文献:

[1] 杨纪明. 基于模糊-神经网络的 SF₆ 高压断路器智能操作控制的研究[D]. 西安:西安交通大学,2000.
YANG Ji-ming. The study at control of intelligent operation of high voltage SF₆ circuit breaker based on the fuzzy-neural network technology[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University, 2000.

[2] 林 莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
LIN Shen. Permanent magnetic actuator and vacuum circuit breaker[M]. Beijing:China Machine Press,2002.

[3] 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
YUAN Zeng-ren. Artificial neural network and its application[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1999.

[4] 闻 新,周 露,李 翔,等. Matlab 神经网络仿真与应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
WEN Xin,ZHOU Lu,LI Xiang,et al. Neural network simulation and application based on Matlab[M]. Beijing:Science Press,2003.

- [5] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
LIN Shen. Modern technology of high voltage apparatus [M]. Beijing:China Machine Press, 2002.
- [6] 苏 涛, 蔺丽华, 卢光跃, 等. DSP实用技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.
SU Tao, LIN Li-hua, LU Guang-yue, *et al.* Practical technology of DSP[M]. Xi'an:Xi'an University of Electronic and Science Technology Press, 2002.
- [7] 周大敏. 一种基于傅氏滤波原理的电力系统频率测量方法[J]. 继电器, 1997, 25(6):10-15.
ZHOU Da-min. A measuring method of power system frequency based on the Fourier filtering principle[J]. **Relay**, 1997, 25(6):10-15.

- [8] 方春恩, 邹积岩, 从吉远, 等. 基于 DSP 的无功补偿电容器组同步投切装置[J]. 高压电器, 2003, 39(6):21-23.
FANG Chun-en, ZOU Ji-yan, CONG Ji-yuan, *et al.* Synchronous switching device based on DSP for reactive power compensation capacitor banks[J]. **High Voltage Apparatus**, 2003, 39(6):21-23.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

幸晋渝(1971-),男,重庆巴县人,讲师,硕士研究生,研究方向为电气设备运行监测和故障诊断新技术 (E-mail: xingjinyu2005@sina.com);

刘 念(1956-),男,四川成都人,教授,博士,从事电气设备运行监测和故障诊断新技术研究。

Research of intelligent synchronous circuit breaker based on DSP and artificial neural network

XING Jin-yu, LIU Nian, HAO Jiang-tao, BO Li-ya, CHEN Zhuo

(Dept. of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The working principle and functions of intelligent synchronous circuit breaker are described and an implementation approach based on DSP (Digital Signal Processor) and artificial neural network is provided. The electrical parameters of power system are calculated with full-wave Fourier algorithm. With an example of synchronous closing an unloaded transformer, the way to predict the closing time based on artificial neural network is demonstrated, and the simulation with Matlab and modeling of artificial neural network in DSP are offered.

Key words: DSP; artificial neural network; synchronous circuit breaker; adaptive control