

基于 DSP 及永磁机构真空断路器的同步分合闸控制装置

张永斌, 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 100083)

摘要: 为了减小在投切电容器组时对电力设备造成的危害, 笔者采用 DSP、CPLD 及高速 A/D 等技术, 实现了交流电压、电流同步采样, 能准确计算电压、电流、有功功率、无功功率及功率因数等参数, 通过测量控制电源电压、环境温度以及同步开关分合闸的数据预测开关动作时间, 实现电容器组的同步投切, 减小涌流及过电压的危害并依据电压无功综合控制策略完成无功补偿。试验验证, 在相同温度及控制电压下, 机构本身分散性小, 通过补偿温度及控制电压的影响, 断路器满足同步控制要求。

关键词: 同步操动; 无功补偿; 真空断路器

中图分类号: TM571; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0116-04

A Control Device for Synchronized Switch Based on DSP and Vacuum Circuit-breakers with Magnetic Drive

ZHANG Yong-bin, YUAN Hai-wen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: A control device to synchronously sample AC voltage and current and to accurately compute the parameters, including voltage, current, active power, reactive power and power factor, is presented, which is based on the technologies of DSP, CPLD and high-speed A/D converter. By measuring the DC voltage of capacitors, environmental temperature, and historical switch-on and switch-off data of circuit-breakers, the acting time of the circuit-breakers can be predicted with this device, and the synchronous switch of capacitor bank can be realized. Moreover, reactive power can be compensated, and the harm of inrush current and overvoltage can be reduced by using the device with integrated control policy. A number of tests indicate that the dispersion of the device is smaller under similar environment of temperature and voltage, and the circuit-breaker can realize synchronous control through temperature and voltage compensation.

Key words: synchronization action; reactive power compensation; vacuum circuit-breaker

0 引言

在 10 kV 的配电系统中常用电容器组的容性无功功率来平衡感性用电设备的感性无功功率。传统的无功补偿装置存在功能简单、联网能力薄弱、抗干扰能力差、控制精度低等问题^[1], 在投切电容器组时会产生涌流、过电压, 易对电力设备造成危害, 甚至产生谐波干扰、降低电能质量、影响电力系统稳定^[2]。采用同步(选相控制)技术投切电容器组, 能够有效地抑制暂态冲击, 减少冲击电流及过电压对电网的危害。

笔者论述的被控对象是基于永磁机构的 3 个独立单极的三相真空断路器, 由西安高压电器研究所设计, 南阳机械电子研究所制造, 已通过型式试验, 主要用于 10 kV 线路电容器组的同步投切。控制装

置采用 TMS320F2812、Altera 新一代 CPLD 及高速高精度 A/D 转换器设计, 以三相电压、电流为基本监测物理量, 同步采样电压、电流信号, 实现实时高速电量计算。通过对数据的综合处理及分析, 利用电压无功综合控制策略, 实现变压器分极有载调压, 控制永磁机构真空断路器完成电容器组的同步投切, 减小浪涌电流及过电压对电网的危害, 减少损耗, 保证无功功率就地平衡。

1 系统组成及工作原理

电压无功综合控制装置的核心任务是实时检测断路器运行环境和工作线路的参数, 预测断路器的动作时间, 计算并检测同步操作点, 依据控制策略在电压或电流最有利的相位完成合闸或分闸, 完成电容器组的同步投切, 以主动消除开关过程所产生的

收稿日期: 2008-04-05; 修回日期: 2008-10-13

作者简介: 张永斌(1966-), 男, 博士研究生, 高级讲师, 研究方向为自动化科学与电气工程, 嵌入式系统、现场总线及计算机测控。

涌流和过电压等电磁暂态效应。

电压无功综合控制装置主要由中央控制单元、信号采集处理单元、充电控制单元、驱动电路和电源装置以及键盘和显示器5部分组成。中央控制单元是系统的核心,主要是依据电压无功综合控制策略或接收来自继电保护的動作命令,利用同步关合技术使断路器在系统的控制下,在电压、电流波形的指定相角处关合,使得电容器在对自身和系统冲击最小的情况下投入或切出电力系统。信号采集单元主要完成电网电压、电流信号、开关量信号、环境温度、控制电压等信号的采集。充电控制单元完成对电源装置的充电。电源装置控制对永磁机构分合闸线圈放电。I/O接口通过光电耦合器驱动继电器实现变压器分极有载调压,键盘及显示器完成人机交互功能。同步控制部分原理框图见图1。

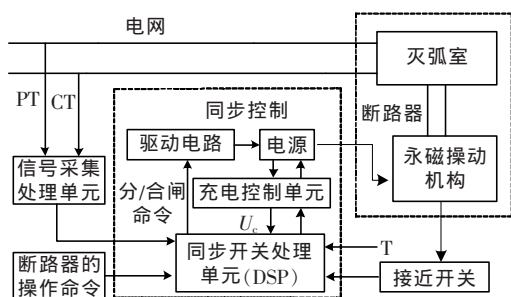


图1 同步开关部分工作原理框图

2 硬件设计

2.1 处理器及接口

电压无功综合控制装置采用 TMS320F2812 处理器设计。TMS320F2812 芯片内含 128 k×16 位的片内 Flash 存储器,有外部存储器及丰富的外设接口,时钟频率高达 150 MHz。它既具有数字信号处理能力,又具有强大的事件管理能力和嵌入式控制功能,特别适用于有大量数据处理的测控场合,是目前国际市场上最先进、功能最强大的 32 位定点 DSP 芯片^[3]。

在控制器输入输出接口电路的设计中,使用了磁珠、电容构成的 LC 滤波器,增加了 TVS 保护器件及光电耦合器,增强了抗干扰能力。

2.2 信号采集与处理

信号采集与处理单元主要完成交流电压、电流、电容器电压及环境参数的采集,完成电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等基本量计算及同步操作点的选取。该单元选用了两片 AD7656 用于交流信号及电容器电压的检测,利用 F2812 的内部 A/D 完成环境参数的测量。交流信号采集电路见图2。

在交流信号测量电路中,选用电流互感器 SCT254AK、电压互感器 SPT204A 实现电网与终端在电气上的隔离。

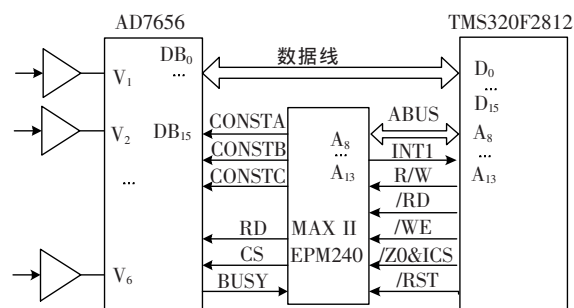


图2 信号采集电路

在图2所示电路中,使用了 Altera 公司的新一代 MAX CPLD 芯片,实现 AD7656 的时序控制。

2.3 功率输出单元

同步开关控制单元采用大容量储能电容器作为永磁机构的直流操作电源。永磁机构的操动电压为 DC 110 V 左右,选用电容器的充电电源为 DC 85~125 V,通过继电器触点可以控制充电回路。

当 CPU 发出分/合闸动作命令时,信号通过驱动电路触发 MOSFET 或 IGBT 导通,电容器即对机构线圈放电,操动机构动作。

3 控制策略及影响因素

3.1 电压无功综合控制策略

电压无功综合控制(VQC)已成为保证电力系统电压合格和无功平衡、提高电网运行的可靠性和经济性必不可少的措施。无功综合控制策略基本原则是:保证电压合格,无功基本平衡,尽量减少调节次数,尤其是减少变压器分接头的调节次数。无功综合控制策略经过了一个不断发展完善的过程,利用电压和无功构成综合判据,按照电压上、下限和无功上、下限将运行区域划分为9个区,形成了目前应用最广泛的“九区图”控制理论。控制器依据外部命令和电压无功综合控制策略两种方式投切电容器组,实现无功平衡。

3.2 同步关合操作的控制策略

电容器组在电网中运行时具有不同的连接方式(中性点接地连接、中性点不接地连接),在实现电容器组同步关合时,应根据系统的连接方式采用相应的关合策略。

笔者使用的同步开关分合闸控制策略依据西高所提供的技术文档。在实现电容器组同步关合时,选用相电压作为参考基准,分断时选用电流作为参考基准。

在中压等级系统中,并联电容器组经常采用中性点不接地星形连接方式,此时电容器组投入顺序是:在某两相电压之差为零时,同时投入该两相的补偿电容器组,此时电容器组中性点电压为该两相电压的平均值,此中性点电压经过 90°后将为零(5 ms),此时也是第三相电压过零点的时刻,这时投入第三相

电容器组,将大大减小过电压。以 A 相合闸为例,具体合闸过程见图 3。

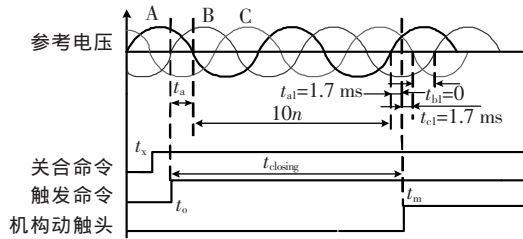


图 3 中性点不接地时的同步合闸过程

10n 表示 n 个半周波。当控制器接在 t_x 时刻收到外部合闸命令时,根据环境参数及历史操作数据预测出机构的动作时间 t_{closing}。通过选取电压的过零点或计算出的动作命令发出时的电压幅值 x, 准确地在 t_o 时刻发出合闸命令, 经过动作时间 t_{closing} 后, 断路器在 t_m 时刻合闸到位。

电容器分断的最佳时刻是在电流过零点前 5~7 ms 将开关的触头分开, 以保证当电流过零熄弧时有足够长的触头开距, 从而大大减小重燃的几率。

3.3 机构动作时间的影响因素

3.3.1 永磁机构真空断路器分散性

永磁机构结构简单, 零部件数量少, 没有容易出现故障的机械锁扣和其它高速运动部件, 具有非常高的机械可靠性。这种简单、直接的传动方式使得永磁机构的分、合闸时间比较短而且稳定。

图 4 是使用武汉力源公司研制的高压开关动态特性测试仪测量永磁机构某相的动作时间数据, 合闸线圈电阻为 2.02 Ω, 超程为 3.4 mm, 开距为 10.5 mm。合闸时间分散性 t_{max} - t_{min} = 63.41 - 63.10 = 0.31 ms;

图 4 A 相合闸动作时间分散性 t_{max} - t_{min} = 63.41 - 63.10 = 0.31 ms; 分闸情况与此类似。

由测量数据可知, 在控制电压和环境温度一定的条件下, 分、合闸时间的分散性很小, 完全能满足实现同步开关的机械结构分散性所要求的条件。

3.3.2 温度对机构动作时间的影响

环境温度的变化将引起机构分、合闸线圈的电阻值的变化, 也会使储能电容器的容量发生变化。同时, 对永磁体的性能将产生影响, 导致永磁机构的保持力、合成磁场变化, 从而使断路器的动作时间发生变化。

环境温度的变化还会对断路器的运动阻尼带来影响。断路器的运动阻尼包括摩擦阻尼、粘滞阻尼和空气阻尼。温度的变化可能会引起阻尼系数的改变, 引起断路器运动反力特性的改变, 从而对机构的动作时间产生影响。

为了研究温度对机构动作时间的影响规律, 在控制电压为 121.2 V 时, 在不同的温度环境下分别进行分、合闸操作, 得到机构合闸动作时间与环境温度的关系。最小二乘曲线拟合见图 5。从图 5 可以看出, 随着环境温度的升高, 机构的合闸时间随之增大。公式为

$$t_{H} = -0.0016 \times T^2 + 0.1374 \times T + 51.9425 \quad (1)$$

分闸时间与环境温度的关系与合闸类似, 温度越高, 时间越长。最小二乘拟合公式为

$$t_{F} = -0.0004 \times T^2 + 0.0556 \times T + 34.9132 \quad (2)$$

3.3.3 控制电压对永磁机构动作时间的影响

对额定参数为 10 kV 的永磁机构真空断路器进行实验, 在温度为一定值时, 通过调整开关电源的输出改变控制电压(即电容器充电电压)的大小, 在不同的电压值下分别进行分、合闸操作, 并选用武汉力源公司研制的高压开关动态特性测试仪来测量断路器的分、合闸时间。控制电压与机构合闸动作时间的关系见图 6。从图 6 可以看出: 随着控制电压的升高, 机构的合闸动作时间随之减小, 同时机构的动作时间随控制电压的变化率也减小。当控制电压在 114~117 V 的电压范围内变化时, 机构合闸动作时间与控制电压关系近似为线性变化。

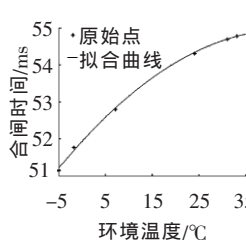


图 5 环境温度与机构合闸时间的关系曲线

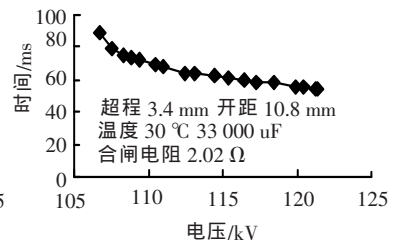


图 6 控制电压与机构动作时间的关系曲线

3.3.4 其他因素对机构动作时间的影响

在开关动作若干次后, 触头弹跳和电弧燃烧都会使触头材料产生磨损和老化, 可能导致合闸行程的变化, 同时运动的阻尼系数也可能发生变化, 触头磨损还可能引起预击穿耐压特性曲线的变化, 从而使合闸时间发生变化。

3.4 机构动作时间的补偿

永磁机构的动作时间存在着多种影响因素, 其中控制电压和环境温度对机构动作时间的影响最为显著。因此在对机构动作时间进行补偿时, 着重考虑这两个因素的变化给机构动作时间带来的直接影响。

为了实现对断路器下次动作时间的预测, 根据测量的控制电压、环境温度与机构动作时间的关系, 获得机构动作时间随环境温度和电压变化的补偿值。同步开关控制器在运行时, 实时监测系统的控制电压和环境温度。接受外部操作命令后, 控制器根据断路器的历史操作数据, 通过比较断路器前两次操作时的控制电压和温度与现在的控制电压和温度

的关系,由前两次断路器的动作时间预测出这次断路器的动作时间。

设 n 为断路器的已操作次数, u_n 为第 n 次操作时的控制电压, T_n 为第 n 次操作时的环境温度, t_n 为第 n 次操作时断路器的实际动作时间, t_{n+1} 为控制器预测出的第 $n+1$ 次断路器的动作时间。

控制器根据目前的控制电压 u_{n+1} , 由前两次的操作数据 (u_{n-1}, t_{n-1}) 和 (u_n, t_n) , 采用线性插值算法获得断路器的控制电压补偿时间为

$$\Delta t_u = \frac{t_n - t_{n-1}}{u_n - u_{n-1}} (u_{n+1} - u_n) \quad (3)$$

控制器再根据环境温度 T_{n+1} , 由前两次的操作数据 (T_{n-1}, t_{n-1}) 和 (T_n, t_n) , 采用线性插值算法获得断路器的环境温度补偿时间为

$$\Delta t_T = \frac{t_n - t_{n-1}}{T_n - T_{n-1}} (T_{n+1} - T_n) \quad (4)$$

最后, 考虑控制电压和环境温度两者的影响, 进行补偿后断路器的动作时间为

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t_u + \Delta t_T \quad (5)$$

4 模拟同步控制实验

将三相电压、电流接入控制器相应端子, 机构的触头一端经 $10 \text{ k}\Omega$ 电阻接地, 另一端加直流电压, 选用 Tektronix TDS2024 四通道示波器, 按照并联电容器组中性点不接地的星型连接方式的控制策略。该机构的动作时间顺序依次为: B-C-A, 对于合闸操作来说, B、C 两相在电压幅值相等处合闸到位, 而 A 相则在电压过零处合闸到位。对于分闸操作, 则是 B 相在电流过零前 $5 \sim 7 \text{ ms}$ 分闸, 10 ms 后 C 和 A 同时分闸。图 7 是利用示波器观测到的模拟三相同步合闸试验波形。

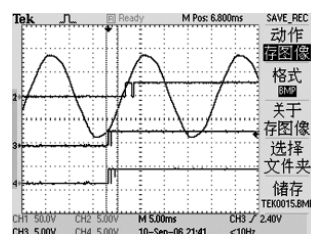


图 7 模拟三相同步合闸波形

5 结语

同步分合闸控制装置的设计采用了 DSP 及新一代 CPLD 等新技术, 完成了电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等基本量的测量及计算, 预测同步开关的动作时间, 依据电压无功综合控制策略, 完成变压器分极有载调压及电容器组同步投切。同步开关设计要求合闸误差小于 1 ms , 分闸误差小于 2 ms 。同一机构在不同温度及控制电压下, 累计完成 2 万次以上试验, 不同机构累计完成 5 万次以上试验。试验证明机构本身的动作时间误差是一个浴盆曲线, 在开始阶段的几百次及后几百次分散性较大, 在中间阶段分散性小。在实验室不同温度及控制电压下, 模拟同步控制试验累计近 3 千次, 经测试, 三相同步分、合闸误差小于 0.5 ms , 满足要求, 能够较好地实现对补偿电容器组的同步投切, 减小涌流及过电压对电网的危害。

参考文献:

- [1] 苏文博, 于洲春, 徐志恒, 等. 变电站 10 kV 系统电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 72-74.
- [2] 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, 2006, 25(6): 30-35.
- [3] 张卫宁. TMS320C28x 系列 DSP 的 CPU 与外设[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.