

# 40.5kV 真空断路器永磁无刷直流电机操动机构控制系统设计

谢寅志 马千里 王春雷 贾延恒 宋山山 刘俊岗  
天津平高智能电气有限公司 天津 300300

【摘要】结合智能电网及智能开关设备的发展要求，本文研究设计了一套应用于高压断路器永磁无刷直流电机操动机构的控制系统。该控制系统采用全压起动电机操动机构，运动过程中采用恒流控制保证电机操动机构提供动触头恒定的加速力矩；在分、合闸结束时快速切断电机机构电流，降低断路器合闸弹跳及分闸反弹。本文主要介绍控制系统功率器件主电路及其驱动模块、电机转子位置检测模块、电压/电流检测模块和控制器软件设计。在 40.5kV 电机操动机构真空断路器实验测得平均分闸速度达到 1.875m/s，平均合闸速度达到 0.83m/s。对比 40.5kV 真空断路器的控制要求：平均分闸速度 1.7-2.3m/s，平均合闸速度 0.6-1.0m/s，证明设计的控制器能够满足 40.5kV 无刷电机机构真空断路器的控制要求。

【关键词】高压断路器；永磁电机控制器；IGBT

电网智能化发展是国家电网发展计划的首要目标，电器设备智能化是电网智能化的基础，因此智能电器的发展将与智能电网的发展并驾齐驱。高压断路器作为主要电器设备在电网中发挥着重要作用，其智能化程度对电网智能化水平的发展具有重要意义。操动机构是高压断路器的重要组成部分，只有操动机构安全可靠工作，才能保证触头安全可靠分、合动作，达到开断和合电路的目的<sup>[1]</sup>。目前比较常用的操动机构主要有电磁操动机构、弹簧机构、气动操动机构和液压操动机构等。

近年来，以电子功率驱动器件驱动的电机操动机构以其运动部件少，动作分散小等优点逐渐受到关注。电机操动机构用电容代替弹簧或压缩空气来存储控制操动能量，能量从储能电容经过电力电子器件输出给电机操动机构。电机操动机构动作时间短，一般在毫秒级；断路器动触头开距小，一般在毫米级，在短时间、短行程内保证电机机构带动动触头运动到一定平均分闸速度，决定了电机操动机构的控制特殊性。因此，必须针对电机操动机构控制特殊性开发适合断路器电机操动机构的控制器。

本课题组在高压断路器新型电机操动机构方面有比较深入的研究，设计了永磁直线电机、直线感应电机和永磁无刷直流电机机构<sup>[2-3]</sup>，研究了基于单神经元 PID 控制算法的永磁直流直线电机的控制系统，研究了基于蚁群算法的直线感应电机的优化设计方法，制作了样机，并进行了联机性能试验。在前期研究工作的基础上本文着重介绍无刷直流电机控制器主要硬件设计和控制器软件设计。根据 40.5kV 断路器控制要求平均分闸速度 1.7~2.3m/s；合闸速度要求 0.6~1.0m/s 的控制要求，与 40.5kV 真空断路器及无刷电机操动机构的实验结果表明：控制器可以在短时间、短行程内让电机操动机构带动动触头达到平均分闸速度 0.83m/s，平均分闸速度 1.875m/s。

## 1 永磁无刷直流电机操动机构工作原理

图 1 是真空断路器永磁无刷直流电机机构断路器的结构简图。无刷直流电机操动机构是图中的一台配有制动装置的永磁无刷直流电机。无刷直流电机通过法兰与断路器转轴相连。无刷电机旋转带动转轴、拐臂、触头弹簧、绝缘拉杆和三角拐臂组成的一套四连杆机构带动动触头拉杆上下运动，实现断路器的分、合操作。

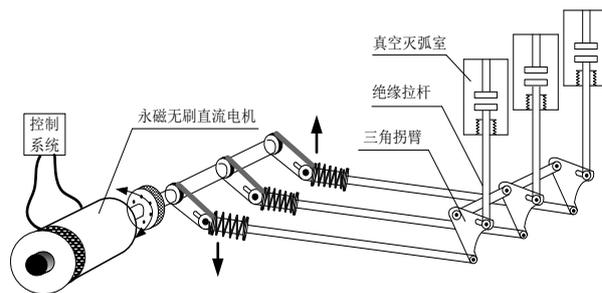


图 1 永磁无刷直流电机操动机构结构图

## 2 电机操动机构控制系统硬件方案

永磁无刷直流电机机构控制系统整体方案如图 2 所示。硬件电路分为 4 部分：主控电路模块、功率电路模块、位置检测模块和电压/电流检测模块。主控电路模块以 DSP 为核心，外围电路主要包括：调试仿真接口电路、模拟量控制接口、数字量控制接口、CAN 总线接口电路、PWM 控制输出模块。功率电路模块包括逆变器主电路、功率器件驱动电路。位置检测模块主要有霍尔元件和转子磁极对应的磁钢组成。控制系统工作原理：当控制器上电后，首先对电容器组进行充电，DSP 采集电容电压的信号并进行处理，当电压值达到系统操作要求时 DSP 发出停止充电指令，切断外界电源。按下相应的操作按钮，DSP 根据电机转子位置检测电路反馈的信号发出控制指令通过隔离驱动电路驱动相应的 IGBT 模

块导通，给电机绕组通电驱动电机带动断路器动作。最后 DSP 检测到断路器动作结束信号，停止控制信号的输出关断 IGBT 模块，使电机操动机构停止动作。

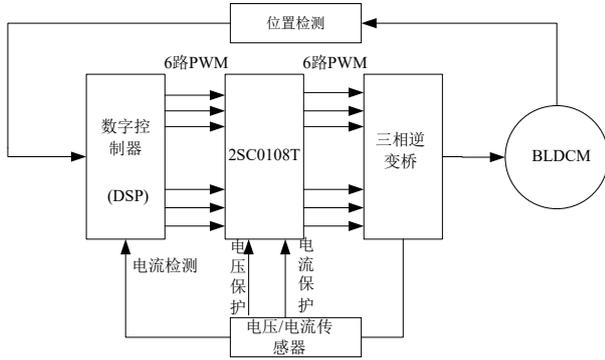


图 2 电机操动机构控制系统总体结构图

## 2.1 控制系统主要硬件设计

### 2.1.1 逆变器主电路

电机操动机构工作电流在 150A，IGBT 额定电流  $I_d$  选取根据公式 1：

$$I_d = 2 \times \sqrt{2} \times 150 = 424 A \quad (1)$$

根据计算，IGBT 采用 2MBI600U2E-060IGBT，额定电压 600V，额定电流 600A。在逆变主电路的 IGBT 关断时，电机绕组电感储存的能量要经过续流，否则会损坏 IGBT，因此设计 RCD 缓冲电路抑制瞬态过电压，降低器件开关损耗，保护器件安全运行。其中逆变主电路缓冲电路如图 3 所示，在图中 IGBT 功率器件 Q 关断时，电机绕组电感中储存的能量经过电容 C 通过二极管 D 向电源充电，吸收关断过程产生的  $du/dt$ ，IGBT 开通后，电容 C 储能通过电阻 R 放电。吸收二极管须选用快速恢复二极管，其额定电流应不小于主电路器件额定电流的 1/10。此外，应尽量减小线路电感，且应选用内部电感尽量小高频特性好的吸收电容。

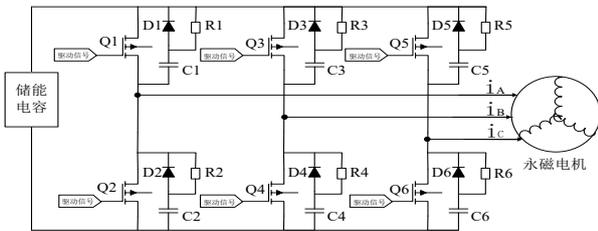


图 3 三相桥式功率驱动电路图及缓冲电路

### 2.1.2 IGBT 驱动电路

在高压断路器应用的场合中控制器可靠性必须高，驱动电路可靠驱动并保护 IGBT 是保证控制器可靠工作的前提之一。驱动 600V、600A 的 IGBT 的驱动功率需要 1W，驱动电路采用具有 IGBT 短路保护、过流保护、电压监控的集成电路 2SC0108T 并设计相应的前级驱动电路和后级功率驱动电路进行 IGBT 的驱动，电路如图 4 所示。DSP 的 PWM 信

号输入到驱动电路经过信号隔离和功率放大后驱动 IGBT，在后级功率驱动电路中设计有源钳位电路等保护 IGBT 正常工作。

### 2.1.3 霍尔位置检测电路

霍尔换相电路反映转子的实时位置，控制器根据霍尔信号控制相应的 IGBT 导通。控制器上电后，霍尔元件根据磁钢的位置输出高低电平，DSP 芯片根据高低电平信号判断电机转子位置，输出正确的驱动信号。随着电机转角的变化，霍尔元件的输出电平也发生变化，DSP 芯片根据霍尔元件的高低电平来确定 IGBT 的导通顺序，使电机连续转动达到要求的角度。霍尔换相电路信号调理电路如图 5 所示，为提高换相信号的抗干扰性，霍尔换相信号的高电平采用 +15V 电平传输，再经过隔离和电平转换输入 DSP。

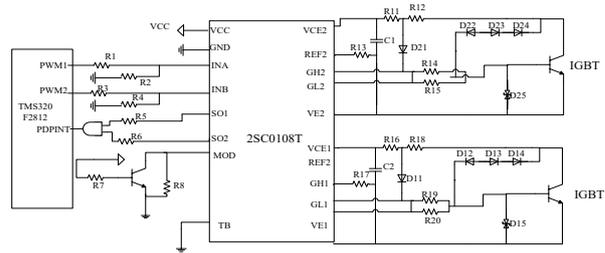


图 4 IGBT 驱动电路

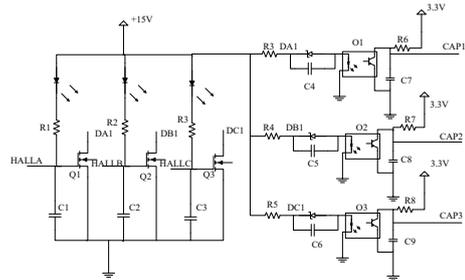
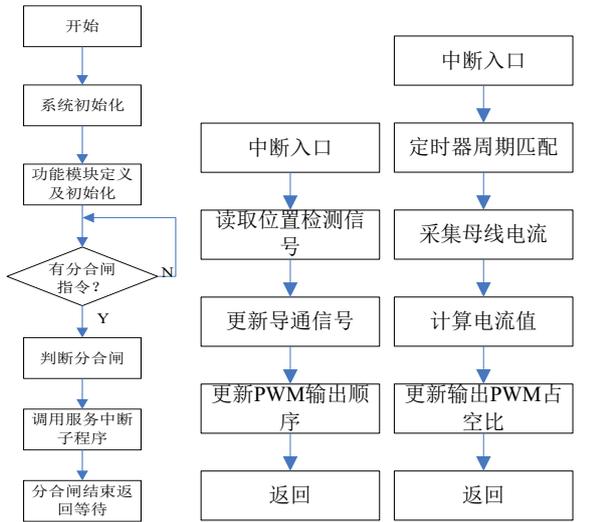


图 5 霍尔换相点电路

## 2.2 控制系统软件设计

由于控制器通过无刷直流电机机构直接对断路器进行控制，实时性要求很高，因此对于控制器的调控处理采用中断方式，既不影响断路器其他功能的实现，也可在第一时间接受分合闸指令，以提高断路器的动作响应速度。电机机构采用电容缓冲和储存断路器动作的能量，在断路器动作整个过程中电容储存的能量被消耗，电机旋转时产生反电势都会降低电机的驱动电流，从而很大程度上降低了断路器的平均分合闸速度和系统的控制效率。在程序中设计电流闭环，根据采集的电源母线电流值与设定值比较，调整 PWM 占空比改变母线电流解决上述问题。以下介绍系统程序的主程序和各个中断服务子程序设计思想。

主程序完成 PWM 模块、AD 采集模块等初始化，随时等待分、合闸信号指令和调用中断服务子程序。



(a) 主程序 (b) 恒流控制子程序 (c) 位置检测子程序  
图 6 主程序及各个子程序流程图

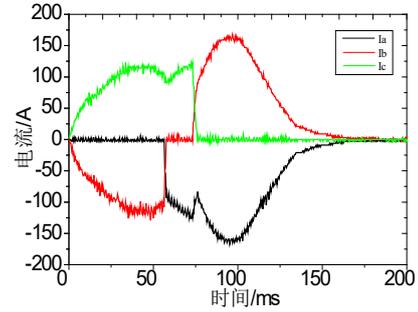
恒流控制子程序主要根据采集的电源母线电流提供电流反馈, 根据反馈的电流值, 调整 PWM 方波的占空比, 使电机以恒定的电流运转, 提供给断路器动触头恒定的加速力矩。程序流程图如图 6 中 b 所示, 接收到分、合闸指令, DSP 开始采集电源母线电流, 计算反馈电流和设定电流差值, 更新 PWM 方波占空比。起动阶段采用全压起动, 起动之后实时检测电源母线电流调整占空比保证电机驱动电流恒定。无刷直流电机机构电机采用三相六拍两两导通的方式, 每次控制逆变器不在同一桥臂的两个 IGBT 功率器件导通。位置检测子程序流程图如图 6 中 c 所示, 进入位置检测子程序中, 首先检测当前位置信号, 根据当前位置信号预测下一位置信号, 根据预测的位置信号更新 PWM 输出顺序, 控制逆变器主电路中 IGBT 功率器件的导通, 驱动永磁无刷电机操动机构运动。

### 3 实验结果分析

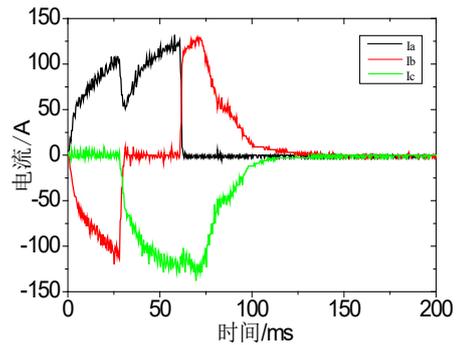
在控制系统硬件电路和软件程序调试成功的基础上, 将控制系统与 40.5kV 真空断路器及其无刷直流电机机构连接, 进行相应的实验分析。

#### 3.1 电机绕组电流特性

电机三相绕组实验电流曲线如图 7 所示, 分、合闸操作电流最大约为 120A。启动阶段采用全压启动, 达到电机峰值电流的时间在 20ms 左右, 之后采用恒流控制, 电流维持在 120A 左右, 运动到终点位置电机堵转, 电流上升到 150A, DSP 检测电流超过给定值后封锁驱动信号输出, 电机机构动作完成。合闸操作过程电机绕组也有两次换相, 绕组通电顺序与分闸相反。



(a) 合闸操作

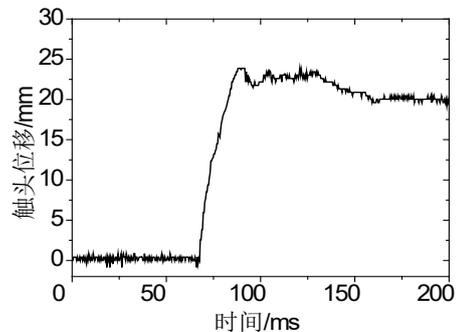


(b) 分闸操作

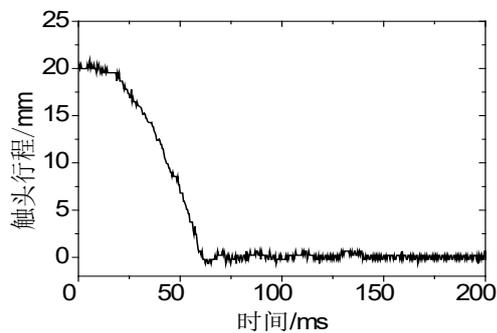
图 7 分合闸操作电机电流曲线

#### 3.2 动触头行程特性

通过实验运行调试, 测得分、合闸过程中动触头的行程曲线如图 8 所示。由图 8 (a) 可知, 刚分后 75% 开距所用时间约为 8ms, 平均分闸速度约为 1.875m/s。由曲线 2 可知, 刚合前 30% 开距时间约为 16ms, 平均合闸速度大约为 0.83m/s, 综上所述, 平均分合闸速度基本满足断路器的操作要求, 这为下一步电机操动机构的进一步实验研究提供了重要依据。



(a) 合闸操作



(b) 分闸操作

图 8 分合闸操作时断路器触头行程曲线

针对断路器动作速度快、时间短的特点，本文研究提出断路器电机操动机构采用全压起动，起动过后采用恒流控制保证在电机操动机构工作过程中提供恒定的加速力矩，工作结束时快速切断机构工作电流的控制系统，并设计了硬件电路及软件程序。

通过电机三相绕组电流曲线分析，在电机机构开始阶段采用全压起动，之后采用恒流控制能给动触头提供恒定的加速力矩，保证在短时间内达到分合闸平均速度要求。

根据 40.5kV 真空断路器平均分闸速度要求 1.7~2.3m/s，平均分闸速度要求 0.6~1.0m/s 的控制要求，与 40.5kV 真空断路器及永磁无刷电机操动机构进行联机调试，获得电机操动机构的动触头行程特性曲线，分析动触头平均分闸速度 1.875m/s，平均合闸速度 0.83m/s，基本满足断路器的分/合闸操作要求，为下一步电机操动机构在断路器上的应用奠定了基础。

## 4 结论

### 【参考文献】

- [1] 林莘. 现代高压电器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 283-299.
- [2] 林莘, 王德顺, 徐建源. 高压断路器直线伺服电机操动机构及控制技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27):137-141.
- [3] 李永祥, 林莘, 徐建源. 高压断路器永磁无刷直流电机操动机构的设计及动态仿真 [J]. 电网技术, 2010, 34(1):185-189.
- [4] 刘刚, 王志强, 房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 89-91.