智能化电力设备

基于 IGBT 技术的隔离开关智能操控系统设计

刘志远[1],赵欣洋[2],陆洪建[2],梁守硕[3],赵健[3]
(1. 国网宁夏电力有限公司,宁夏 银川 750001;
2. 国网宁夏电力有限公司检修公司,宁夏 银川 750011;
3. 上海泽鑫电力科技股份有限公司,上海 201206)

摘　要: 针对目前高压隔离开关在操控过程中动触头运动缺少精准控制和控制回路较复杂不易排除故障的问题,提出了一种集中化、可视化、智能化的隔离开关智能操作控制系统。该系统基于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)变频调速技术,实现了隔离开关触头运动过程的精准控制;通过对原有控制回路的分析与整合,实现了隔离开关控制回路中各项逻辑的可视化。试验结果表明:该系统能够满足隔离开关分合闸的技术要求,可以有效提高隔离开关操作控制精准度与智能化水平。

关键词: 隔离开关;绝缘栅双极型晶体管(IGBT);变频调速;控制回路;可视化
中图分类号: TM564.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-3643(2019)05-0022-08
有效访问地址: http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2019.05.004

Smart isolating switch operation system design based on IGBT

LIU Zhiyuan[1], ZHAO Xinyang[2], LU Hongjian[2], LIANG Shoushuo[3], ZHAO Jian[3]
(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750001, China;
2. Maintenance Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan Ningxia 750011, China;
3. Shanghai Zexin Electric Power Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: Aiming at the movable contact motion of the isolating switch during the operation lack of precision control and complex control circuit leading to the difficult clearing of a fault, a kind of smart isolating switch operation system with centralization, visualization and intelligence are presented. The system based on insulated gate bipolar transistor(IGBT) variable voltage and variable frequency technology realized the precision control of the movable contact motion process of the isolating switch, by the analysis and integration of the original control circuit, each logic visualization of the isolating switch control circuit has been realized. The results show that the system can satisfy the technical demands for the isolating switch opening and closing, which effectively improve control precision and intelligent level of the switch operation.

Keywords: isolating switch; insulated gate bipolar transistor(IGBT); variable voltage and variable frequency technology; control circuit; visualization
DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2019.05.004

收稿日期:2019-08-01

作者简介:刘志远(1970),男,高级工程师,从事电力系统分析运行与控制、电力系统继电保护研究工作。

在输变电系统中,高压隔离开关起到与电源进行隔离从而建立可靠绝缘间隙的作用,是系统中最重要的设备之一,也是使用量最大的一种开关电器。隔离开关及其操作控制系统的性能优劣与可靠程度,对输变电系统的安全运行有着直接的影响[1]。目前 220 kV 及以上电压等级的隔离开关普遍使用电机操动机构,通过手动控制三相异步电动机的交流供电电源实现分合闸操作。因为对开关触头运动过程缺少精准控制,在操作过程中常常由于动作末期速度较大,发生触头碰撞弹跳、传动部件损坏变形的现象,最终导致拒分、拒合、分合闸不到位等常见故障,从而引发开关损坏或停电事故。隔离开关的控制回路主要由各类继电器搭建联接而成,元器件数量较大,状态接点多,在复杂恶劣的室外环境下,容易出现元器件老化、接线松动、接触不良等故障,而且这些故障只有在执行具体的分合闸操作时才能被发现,排查定位故障点比较困难,影响正常的操作计划,并且容易出现电气误操作的严重事故。

针对目前隔离开关操作控制系统存在的问题,为了提高分合闸可靠性,减少操作故障,本文提出一种集中化、可视化、智能化运行的隔离开关智能操作控制系统。该系统采用基于 IGBT 的变频调速技术,通过无传感器的矢量控制方式,实现了开关触头运动过程的精准操控。同时,将外部状态量、操作控制接点作为数字量输入,以可视化的信号灯方式显示各个接点的状态和输入状态与预置的分/合闸控制逻辑之间的对比关系,通过软件实时判断所有的控制逻辑,做出相应的分闸、合闸输出。试验表明该系统可以有效减少动触头与静触头之间的碰撞,消除弹跳,降低操作控制回路的故障率,提高隔离开关控制系统的可靠性。

1　电动操控系统设计

目前 220 kV 及其以上电压等级的隔离开关大都以三相交流异步电动机的电磁力矩做为操动机构的驱动力来源。为达到隔离开关动触头的全过程可控,需要对动触头驱动电机进行精准的调速控制。

1.1　电动机调速方式选择

根据三相交流异步电动机基本原理,电动机的转速公式为

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \tag{1}$$

式中:n— 电机转速;

f— 电源频率;

p— 极对数;

s— 转差率。

根据公式(1),要实现异步电动机的电气调速,即改变异步电动机的转速 n,主要有以下 3 种方式:

(1)变频调速。变频调速可以在较大范围内实现平滑调速,效率高,精度高,稳定性好。

(2)变极调速。变极调速需要使用几组不同极对数的独立绕组,或者通过改变绕组的接线方式来实现,属于有级调速,级数有限,级差较大。

(3)变转差率调速。通过定子调压、转子串电阻或级联控制等方式,调整与转差率相关的电气参数从而实现调速。其中,定子调压方式的调速范围比较窄,低速运行时的稳定性难以实现;转子串电阻调速,随串联电阻值而改变,难以实现灵活的无级调速。这 2 种方式中产生的转差功率,都会以电热转换的方式损耗在绕组中,导致绕组发热,因此效率较低。级联控制虽然能够实现一定范围内的平滑无级调速,但存在功率因数较低的缺点[2-4]。

结合高压隔离开关的实际运行特点以及现场运维经验,改进后的隔离开关控制方式,不宜选择有级调压,不宜对原有电动机进行改装或者在电动机内部附加新的元器件或设备。在以上几种调速方式中间,只有变频调速可以满足不同工程现场的应用需求,因此,在本设计中选择变频调速作为隔离开关驱动电机的调速方式。

1.2　变频控制方式选择

对三相交流异步电动机来说,有多种控制方式可以实现变频调速,常用的主要有恒压频比控制(V/F)、矢量控制(FOC)和直接转矩控制(DTC)3 种[5-7]。

1.2.1　恒压频比控制(V/F)

VF 控制可以实现近似的恒磁通,得到理想的转矩 - 速度特性,缺点是采用了开环控制方式,难以达到预期的控制效果,特别是在低频区域,转矩特性非常差,运行不稳定。

为了构成闭环控制,可以引入转差角频率做为反馈从而提高调速精度,这就需要在电动机上加装速度传感器以获取转差角频率,在实际应用中还需要针对具体电动机的机械特性调整控制参数,因此工程上的通用性较弱。

1.2.2　矢量控制(FOC)

因为进行了跟电磁相位相关的矢量变换计算与相应的控制实现,矢量控制的输出特性比 V/F 控制有了很大的改善。

有传感器的矢量控制较为简单,但是跟有速度反馈的 V/F 控制一样,速度传感器仍然需要按照一定的要求加装在电动机上,因此它的应用范围有限。

另外一种是不带速度传感器的矢量控制,可以在较宽的范围内实现稳定可靠的变频调速,但它需要进行比较复杂的矢量变换运算,计算量较大,对数据的运算精度和运算速度的要求很高,通常需要使用 1 个专用的 CPU 来进行计算。

1.2.3　直接转矩控制(DTC)

直接转矩控制不需要复杂的矢量变换计算,控制流程的结构简单,响应快;缺点主要在低速区,开关频率低而且不固定,转矩脉动大导致运行速度不稳定。

综合考虑隔离开关的电动机驱动需求以及现场的具体情况,在本设计中采用无速度传感器的矢量控制方式来实现三相异步电动机的变频调速,既满足电机转速的平滑控制,无论在低速区还是高速区都保持触头运动轨迹的稳定性,又不增加传感元件,并且适用于各种类型与特性的异步电动机及操作机构,满足不同工程现场的实际需要。

1.3　基于 IGBT 的变频控制实现

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor,IGBT)是一种新型的电力电子半导体器件,近年来已经被广泛应用于智能电网的发电、输电、变电和用电等各个环节。

与 MOSFET 和 GTR 相比,IGBT 具有高输入阻抗和低导通压降的优点,开关速度非常快,承受电流较大,阻断电压较高。集成化的 IGBT 驱动电路性能稳定,可靠性高,体积小,能耗低,安装维护简单,非常适合应用于隔离开关的变频调速系统。

在本设计中 IGBT 模块器件采用 A2C35S12M3,包含了三相桥式整流电路,6 + 1 个 35 A,1.2 kV 绝缘栅双极型晶体管(其中 1 个作为总开关)。该模块集成了先进的沟道栅场 - 停止技术,使导通效率和开关损耗之间取得最佳折衷,最大限度地提高了转换系统的效率,它的开关频率可高达 20 kHz。

主控 MCU 采用 STM32F303RBT7 芯片进行数据采集和控制运算,用于产生 SVPWM 波形,通过实时改变 PWM 占空比实现对电动机的无感 FOC 调速控制。该芯片是基于高性能 ARM Cortex - M4 内核的 32 位 RISC 微处理器,具有浮点运算能力和增强的 DSP 处理指令,FPU 工作频率可高达 72 MHz,完全满足对三相异步电机进行 FOC 控制的运算需要。

控制系统的硬件结构如图 1 所示。

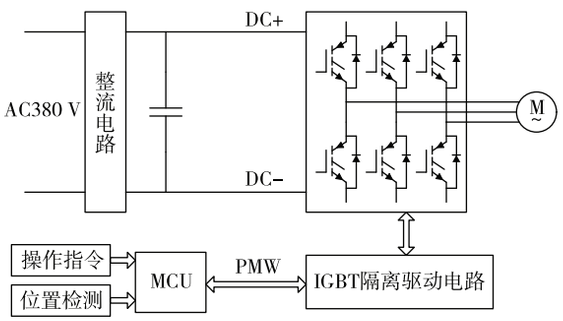


图 1　电动机控制系统硬件结构

为满足隔离开关操作过程的主要技术规范,保证开关触头动作的稳定性,本设计采用如下所述的控制策略:

(1)开关合闸控制策略。在合闸动作过程的前期,电动机启动之后,快速增加电动机的运行速度,使合闸速度达到技术指标的要求。在合闸动作过程的后期,适当降低电动机的运行速度,达到减少动静触头之间的机械碰撞从而消除弹跳的目标。

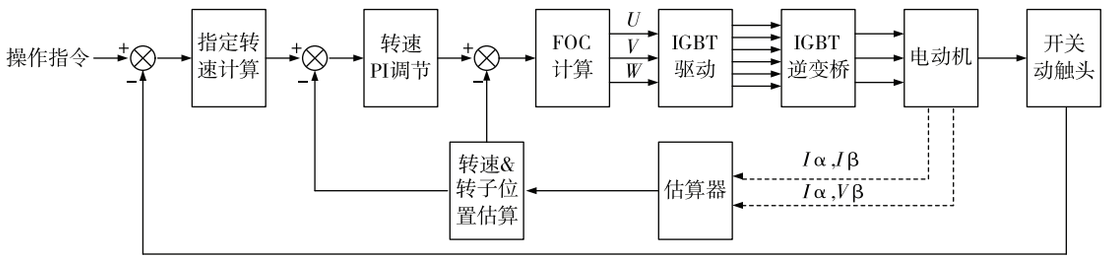


图 2　电动机速度控制原理

(2)开关分闸控制策略。在刚刚分开之前的行程阶段,使电动机以较慢的速度运行;在分闸点之后,在较短的时间内,达到足够大的分闸速度,以满足分闸时的技术规范要求。

为实现以上所述的控制策略,在采用无传感器的 FOC 算法实现电动机变频调速控制的基础上,利用自适应的变论域模糊控制算法对隔离开关机构的行程与分合闸速度进行精确控制。控制原理如图 2 所示。

主程序处理流程如图 3 所示。

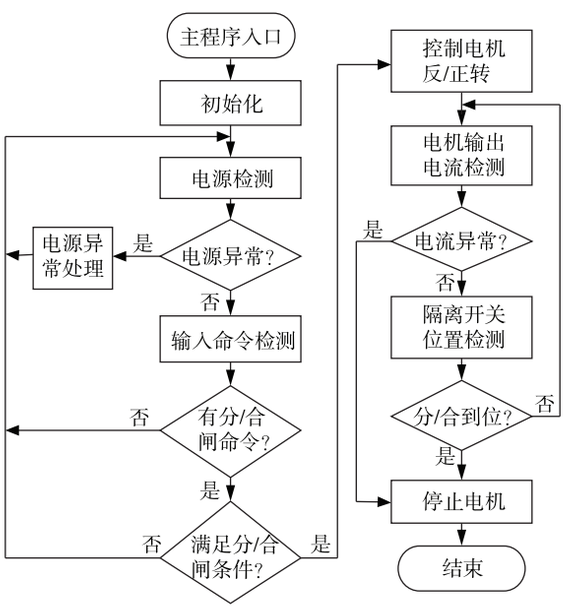


图 3　电动机控制主程序流程

主程序在收到隔离开关分合闸命令之后,按照预定的三相异步电机 FOC 控制原理和隔离开关分合闸过程的控制策略,启动电动机控制程序,完成相应的分合闸动作。分合闸动作完成,动触头运动确认到位以后,驱动电机停止运行。

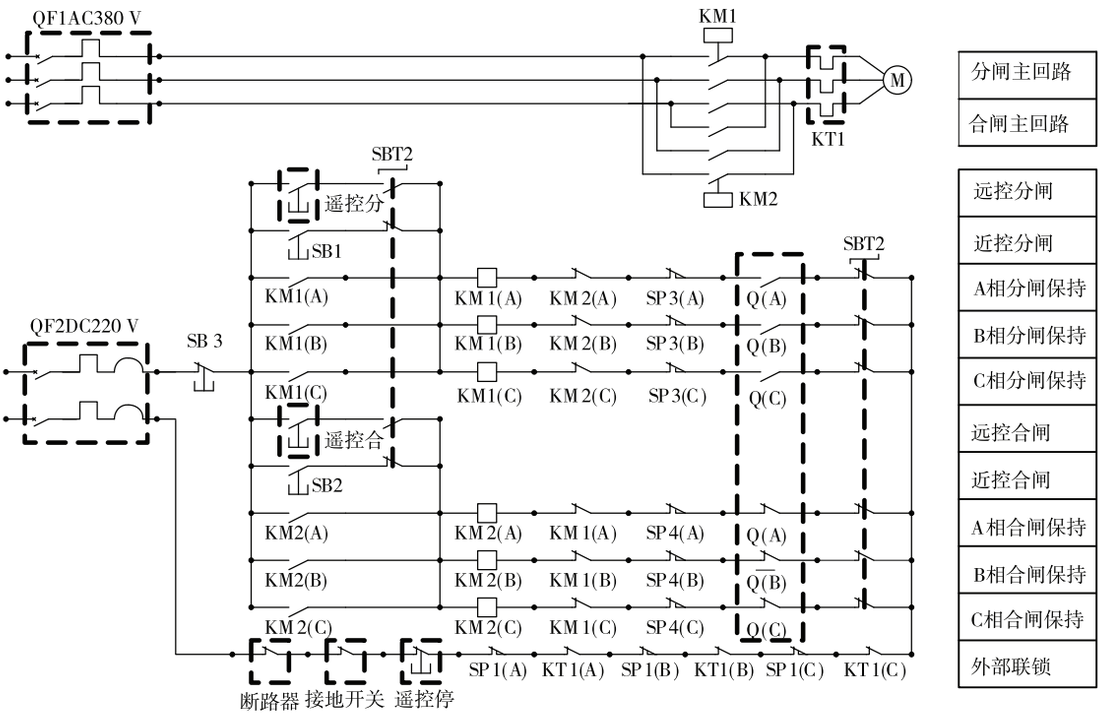
考虑到复杂恶劣的室外运行环境,针对可能出现的各类故障情况,系统可以在元器件层级、模块层级和系统层级,分别启动相应的保护逻辑,切断输出电流,中断电动机的运行[8-18]。

2　控制回路逻辑可视化设计

隔离开关控制回路,主要由远控分闸回路、远控合闸回路、近控分闸回路、近控合闸回路、A 相分闸保持回路、B 相分闸保持回路、C 相分闸保持回路、A 相合闸保持回路、B 相合闸保持回路、C 相合闸保持回路、外部联锁回路等部分构成,实现隔离开关的安全分合操作,并将相关状态作为告警信号上送至站内自动化系统。

典型的隔离开关的控制回路原理如图 4 所示。由图 4 可见,隔离开关操作控制回路由直流空开、遥控接点、合闸按钮、分闸按钮、停止按钮、远/近控转换开关、合闸控制接触器、分闸控制接触器、限位开关接点、门控开关、辅助开关、分相/三相联动操作转换开关、相序继电器、热继电器等元器件,以及断路器辅助接点、接地刀闸位置接点等外部状态量构成,存在元件和状态接点较多、接线复杂等特点,在复杂恶劣的室外环境下容易出现接线松动等控制回路故障,而且这些故障在分合闸操作前不易被发现。不同厂家提供的控制回路不尽相同,各回路的复杂程度不便于运行维护人员的熟悉与记忆,在控制回路出现异常的情况下,需对照图纸逐点排查问题,定位故障点比较困难,且时间较长,影响正常的操作计划[19]。

隔离开关的控制回路虽然比较复杂,但是经过对控制逻辑的详细分析研究,可以按照外部输入状态采集处理、内部控制逻辑运算、对外输出相应信号与命令这 3 个步骤,进行模块化集成。



KT1–热继电器；Q–辅助开关；SP3、SP4–行程开关；SP1–门控开关；SB1–分闸按钮；SB2–合闸按钮；SB3–停止按钮；SBT2–远控/近控转换开关；SBT3–三相联动转换开关；KM1–分闸接触器；KM2–合闸接触器；QF1–电动机电源开关；QF2–控制电源开关

图 4　隔离开关控制回路原理

隔离开关控制回路中使用到的外部输入状态如表 1 所示。

表 1　控制回路中的输入量

类别	输入量	输入状态
控制方式	远方/就地切换	就地/远控
	A/B/C/联动切换	A/B/C/三相
就地操作	就地分闸	分/合
	就地合闸	分/合
	就地停止	分/合
远控操作	远控分闸	分/合
	远控合闸	分/合
	远控停止	分/合
状态接点	分闸限位开关	分/合
	合闸限位开关	分/合
	辅助开关	分/合
	门控开关	分/合
外部联锁	断路器	分/合
	接地开关 1	分/合
	接地开关 2	分/合
动力电源	三相电源	$U_a/U_b/U_c$

隔离开关控制回路中的对外输出信号与命令如表 2 所示。

表 2　控制回路中的输出量

类别	输出量	输出状态
控制电源	三相电源	$U_a/U_b/U_c$
告警信号	远方操作	分/合
	就地操作	分/合
	开关合位	分/合
	开关分位	分/合
	分闸条件不满足	分/合
	合闸条件不满足	分/合
	装置失电/异常告警	分/合
	操作电机故障	分/合
	直流失电告警	分/合

基于对隔离开关操作控制回路中各项逻辑的详细分析，在已知输入状态的条件下，将图 1 控制回路原理中的硬接点之间的逻辑关系，转换成软件系统中各变量的逻辑关系，即可经过相同逻辑的运算，实现预定的输出状态。控制回路逻辑处

理主程序流程如图 5 所示。

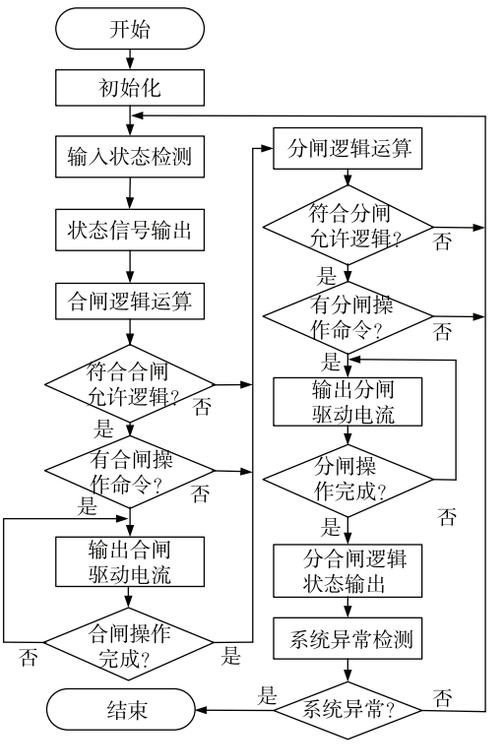


图 5　控制回路逻辑处理主程序流程

为了解决控制回路故障不易排除的问题，系统需要实现外部输入状态的可视化与分合闸条件逻辑判断的可视化，以指示灯方式实时显示各输入接点、输出接点的状态，并将当前的输入状态量与分闸/合闸条件分别做对照，以醒目的方式提示存在异常的输入状态与分合闸允许结果，为隔离开关的控制操作提供可视化的决策参考。

按照可视化要求设计的可视化用户界面如图 6 所示。

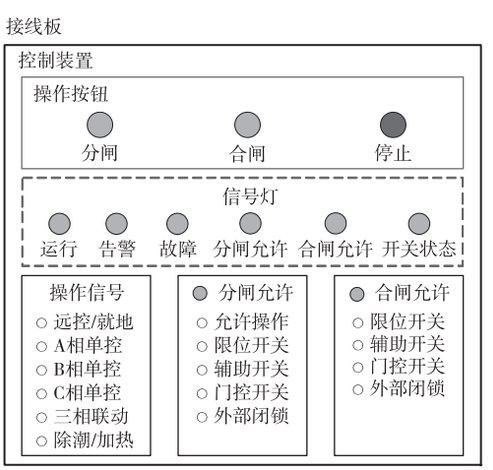


图 6　人机界面

图 6 中，接线板用于外部的电源线、信号线、通讯线的接入，控制装置嵌在接线板之上，便于安装、调试与模块配置。装置面板上的指示灯显示实时的输入状态和操作允许状态。当外部输入状态异常不符合预期逻辑时，以醒目的指示灯发出相应的告警，为分合闸操作和运维检修提供相对可靠的参考依据。

3　试验验证

为了验证改进后的控制系统功能和运行可靠性，试制了基于以上技术要求的智能型隔离开关操作控制装置，并进行了相关的系统试验。

3.1　隔离开关分合闸控制试验

使用实际的隔离开关及其配套的驱动电机，分别对合闸过程和分闸过程进行控制，并且记录隔离开关动触头的行程。隔离开关的触头开距为 172 mm，超行程为 58 mm，机构行程即电机转角为 80°。电机转角行程与动触头行程之间近似为线性关系，即 0 ~ 80°转角对应于动触头位置的 0 ~ 230 mm。试验中记录的开关合闸行程曲线如图(7)所示。

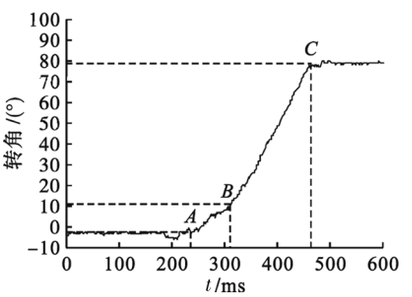


图 7　隔离开关合闸行程曲线

由图 7 可以看出，在 A 点与 B 点之间的启动过程阶段，机构转角速度均值为 214(°)/s，计算出对应的动触头的运动速度均值为0.6 m/s；在 B 点和 C 点之间的快速合闸阶段，经过了调速控制，转角速度提升到 433(°)/s，计算出动触头的运动速度均值为 1.2 m/s，调速效果明显；在 C 点附近的合闸完成阶段，基本消除了动静触点的碰撞与弹跳。

图 8 为试验中记录的开关分闸行程曲线。

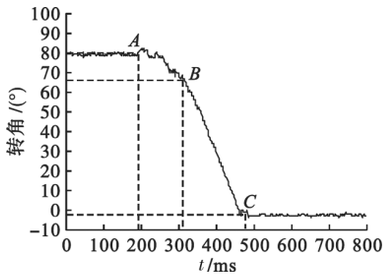


图 8　隔离开关分闸行程曲线

由图 8 可以看出,在 A 点与 B 点之间的启动过程阶段,转角速度均值为 125(°)/s,对应的动触头运动速度均值为 0.4 m/s;在 B 点与 C 点之间的快速分闸阶段,经过了调速控制,转角速度均值为 382(°)/s,对应的动触头的运动速度均值为 1.1 m/s,调速效果明显。

试验结果表明:系统能够满足隔离开关的分合操作要求,电动机运行过程平稳,调速效果明显,消除了弹跳现象,实现了对动触头行程过程的精准控制。

3.2　控制回路逻辑可视化试验

结合现场的实际情况,搭建试验平台,模拟控制转换开关和外部输入接点的各种可能的状态,分别测试各个状态接点和分合允许逻辑在人机界面上的指示灯状态。

测试结果表明:系统实现了控制回路逻辑可视化的预期设计目标,能够为分合闸操作控制提供准确的参考依据。

4　结　论

针对隔离开关在操控过程中动触头运动缺少精准控制和控制回路较复杂不易排除故障的问题,提出了一种集中化、可视化、智能化的隔离开关操作控制系统。

理论分析和试验证明,该智能型隔离开关操控系统能够满足不同工程现场的隔离开关分合闸的技术要求,实现了对动触头行程过程的精确控制,实现了控制回路的逻辑可视化,可以有效提高隔离开关的操作控制精准度和智能化水平。

在已经实现隔离开关电动机变频调速控制的基础上,如何进一步增强对隔离开关操作控制各环节的状态测量,例如通过增加压力传感器和温度传感器,对隔离开关的触指压力和触头温度进行状态监测,为操控系统提供准确的控制反馈,并且通过低成本、低功耗、低频次的无线通讯方式接入到相应的管理系统,实现隔离开关运行状态的在线监测与故障预警,是下一步需要继续研究的课题。

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.

[2] 刘爱民, 吴志恒, 徐建源. 高压隔离开关操动电机的调速控制技术研究[J]. 大电机技术, 2014(7): 189 – 193.

[3] 刘爱民, 吴志恒, 徐建源, 等. 高压隔离开关触头运动智能控制策略研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2014(7): 62 – 65.

[4] 陈富国, 何大伟, 周瑞敏, 等. 550 kV 高压隔离开关电机驱动智能控制系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(4): 78 – 82.

[5] 程启明, 程尹曼, 王映斐, 等. 交流电机控制策略的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 145 – 154.

[6] 蔡晓峰, 张鸿博, 李 鑫. 合并有源滤波功能的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 126 – 134.

[7] 孙自勇, 李广波, 侯强, 等. 基于 DSP 的无刷无位置直流电动机调速系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 106 – 110.

[8] 苏平, 张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23):164 – 171.

[9] 张明锐, 金鑫, 刘金辉, 等. 基于 IGBT 的固态断路器开断策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 123 – 126,131.

[10] 任先文, 张吉, 刘辉, 等. 一种基于 TMS320F2812 的交流电机控制方案的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(2): 54 – 57.

[11] 曾允文. 变频调速与 SVPWM 技术的原理、算法与应 用[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.

[12] 刘婷婷, 谭彧, 吴刚, 等. 基于SVPWM 的高转速永磁同步电机控制系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 11 – 19.

[13] 纪志成, 薛花, 沈艳霞. 异步电机调速系统的新型模糊控制方法[J]. 电机与控制应用, 2004, 31(3):28 – 32.

[14] 支长义, 王瑞玲, 唐道奎, 等. 无刷直流电动机模糊自适应 PID 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 35 – 37.

[15] 王光, 王旭东, 马骏杰, 等. 一种快速 SVPWM 算法

及其调制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 136 - 145.
[16] 陆原, 胡丙辉, 张军伟, 等. 基于SVPWM 调制的三段式算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 68 - 75.
[17] 赵辉, 胡仁杰. SVPWM 的基本原理与应用仿真[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 350 - 353.
[18] 齐昕, 王冲, 周晓敏, 等. 一种低硬件资源消耗快速 SVPWM 算法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 31 - 38.
[19] 孙亚辉. 电动操作隔离开关控制回路设计分析与应用[J]. 电气技术, 2010(9): 66 - 69.

(上接第 21 页)

况下 7 点开 1 台火电机组。由图 11 和 12 可知, D_2 开机和关机分别为 4 和 5 次, D_3 开机和关机分别为 2 和 4 次, D_3 调度下开关机均有所降低。

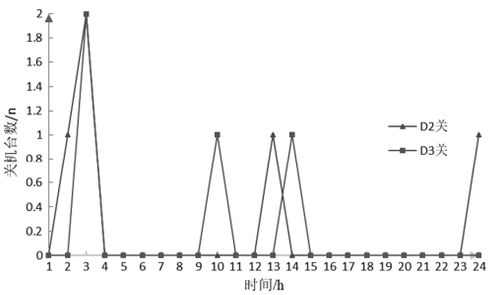


图 12　第 2 天 D_2 和 D_3 调度关机

由表 3 可知,不考虑机组启停下的 D_1 调度系统成本最高,为 1 422 万元,第 2 天的弃风弃光率为 68.4%;考虑机组启停的 D_2 的调度比含负荷侧调用的机组启停的 D_3 调度减少弃光 0.2 个百分点,多为新能源企业创造了 0.8 万元收益,但是系统成本增加了 17.4 万元。

表 3　调度方法对比

调度方法	火电运行成本/万元	火电启停成本/万元	火电总成本/万元	负荷侧调用补贴/万元	弃光价值/万元	系统成本/万元	第 2 天新能源限电量/(MW·h)	第 2 天新能源限电率/%
D_1	921	0	921	0	501	1 422	7 751.7	68.4
D_2	753.6	97.3	849.9	0	13.1	863	208.2	1.8
D_3	772.7	50.6	823.3	8.4	13.9	845.6	231	2

4　结　论

(1)在新能源功率较大而系统负荷较小的时候,如果不考虑启停机组,则会因为等效负荷大于系统的最小技术出力原因,产生新能源限电。

(2)本文提出的考虑机组启停下含负荷调用的电力系统调度方法与仅考虑机组启停下的电力系统调度方法相比,虽然新能源限电率相对高一点,但是相比增加的机组启停费用,本文的调度方法更加适合新能源占比较多的新疆地区。

(3)本文提出的考虑机组启停下含负荷调用的电力系统调度方法可以节约负荷侧的用电费用,维护多方的利益。

参考文献

[1] 童光毅. 关于当代能源转型方向的探讨[J]. 智慧电力,2018,46(10):1 - 3 + 25.
[2] 蔡佳铭,林其友,刘涌. 高占比可再生能源系统消纳能力指标评估与分析[J]. 电测与仪表,2018,55(7):53 - 61.
[3] 范高锋,张楠,梁志锋等. 我国"三北"地区弃风弃光原因分析[J]. 华北电力技术,2016(12):55 - 59.
[4] Ye Xi, Qiao Ying, Zongxiang Lu, etal. Study on multi - scale nit commitment optimization in the wind - coal intensive power system[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology,2013. 8(6):1596 - 1604.
[5] 周博,吕林,高红均等. 考虑热电联合调度的虚拟电厂交易策略研究[J]. 电测与仪表,2019,56(10):75 - 81.
[6] 梁捷. 基于特征负荷的用户日负荷削峰试验效果评估[J]. 青海电力,2019,38(2):34 - 39 + 44.
[7] 樊国旗,蔺红,程林,等. 基于 K 均值模式划分改进模糊聚类与 BP 神经网络的风力发电预测研究[J]. 智慧电力,2019,47(5):38 - 42 + 83.
[8] 邵琳,吴辰宁,田宏杰,等. 基于新能源消纳的电力交易管理模式[J]. 宁夏电力,2018(3):63 - 67.
[9] 黄华,常湧,李琦,等. 满意度和清洁度优先的电动汽车与新能源双层多目标优化调度[J]. 电测与仪表,2018,55(3):59 - 66 + 79.
[10] 樊国旗,樊国伟,蔺红,等. 基于现货交易下含柔性负荷的风 - 光 - 火联合调度[J]. 安徽电力,2019,36(3):43 - 48.