

# 低压交流电磁电器集成技术综述\*

叶泓伟<sup>1</sup>, 缪希仁<sup>1,2</sup>, 张琳辉<sup>1</sup>, 庄胜斌<sup>1,2</sup>

[1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室  
(河北工业大学), 天津 300401]



叶泓伟(1997—),男,硕士研究生,研究方向为智能电器及在线监测技术。

**摘要:** 随着电网容量的不断扩大以及智能电网的发展,对供电的可靠性、安全性提出了更高要求。低压开关电器的性能以及各开关电器之间的协调配合与电力系统的可靠性密切相关。从提高电力系统控制与保护功能可靠性需求出发,阐述低压配电网主回路中常用的电磁电器如接触器与断路器的现状、技术要求以及存在的不足,指出低压电磁电器集成技术发展的必要性;综述新型原理结构技术的国内外研究现状,总结出该技术的3种实现形式;分析集成化过程中必要的智能控制技术,包括故障辨识与运动过程最优控制技术;最后探讨了低压电磁电器集成技术趋势。

**关键词:** 接触器; 断路器; 新型原理结构技术; 智能控制技术

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 2095-8188(2023)01-0008-08

DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2023.01.002

## Overview on Integration Technology of Low Voltage AC Electromagnetic Apparatus

YE Hongwei<sup>1</sup>, MIAO Xiren<sup>1,2</sup>, ZHANG Linhui<sup>1</sup>, ZHUANG Shengbin<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** With the continuous expansion of power grid capacity and the development of smart grid, higher requirements are put forward for the reliability and safety of power supply. The performance of low voltage switching devices and the coordination between various switching devices are closely related to the reliability of power system. Starting from improving the reliability requirements of power system control and protection functions, the present situation, technical requirements and shortcomings of electromagnetic apparatus commonly used in the main circuit of low voltage distribution network such as contactors and circuit breakers are expounded, and the necessity of the development of integration technology of low voltage electromagnetic apparatus is pointed out. The research status of the new principle structure technology at home and abroad and three realization forms of this technology are summarized. The necessary intelligent control technology in the integration process is analyzed, including fault identification and optimal control of motion process. Finally, the trend of low voltage electromagnetic apparatus integration technology is discussed.

**Key words:** contactor; circuit breaker; new principle structure technology; intelligent control technology

缪希仁(1968—),男,教授,博士生导师,研究方向为电器及其系统智能化技术、电气设备在线监测与诊断等。

张琳辉(1997—),女,硕士研究生,研究方向为新型电器技术。

\* 基金项目: 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学)开放课题(EERI\_KF2020005)

## 0 引言

随着电网容量的不断扩大以及智能电网的发展,对供电的可靠性、安全性提出了更高要求<sup>[1]</sup>。电器作为对电力系统与自动控制系统的电或非电对象实现检测、切换、控制、保护功能的设备,其性能直接关系到电力系统运行的可靠性与经济性<sup>[2]</sup>。伴随着新能源发电规模的持续扩大,电力系统正加速向大容量方向发展,对大容量、高性能低压电器的需求更加急迫<sup>[3]</sup>。接触器、断路器作为电力系统主回路中最为常用的电磁电器,其性能成为制约电力系统安全稳定的重要因素<sup>[4]</sup>。

低压交流配电网常采用交流接触器、断路器等控制保护电器组成控制与保护系统来实现对低压配电网及电动机等元件的频繁控制与保护功能。该种保护方式存在以下问题:① 低压电器产品的生产厂家不同,产品质量也不尽相同,且安装操作人员水平有限,对产品了解程度存在局限性,在对低压电器进行安装与选型时易出现偏差<sup>[5]</sup>;② 分立元件串联的控制与保护系统要考虑各元件的散热问题,占设备空间较大;③ 分立元件串并节点数较多,导致节点处发热现象严重,降低了控制与保护系统的可靠性。若使交流接触器具有分断短路电流的功能,或断路器能实现频繁操动功能,则可大大减少电路节点数,解决各电器之间的协调配合问题,提高电力系统控制与保护功能的可靠性。为此,低压交流电磁电器集成技术应运而生。

低压交流电磁电器集成技术是指将接触器、断路器、热继电器及隔离器等开关电器的控制与保护功能集成于一体,组成一个多功能的低压开关电器,使其在正常运行条件下可以频繁操作接通或分断电路,在非正常运行状态下具有保护功能,特别是在短路故障时能及时开断短路电流。

本文在综述低压交流接触器与断路器现状基础上,指出低压交流电磁电器集成化的应用需求,从新型原理结构与智能控制技术两个方面,阐述低压交流电磁电器集成化过程中的关键技术及其发展趋势,为低压交流电磁电器集成技术研究提供借鉴。

## 1 低压交流电磁电器现状

### 1.1 接触器现状

交流接触器的机械结构有传统结构式与混合

结构式两类。传统结构式采用电磁装置操动主触头系统,利用单片机控制电磁装置实现基本功能<sup>[6-7]</sup>。按保持方式不同又可分为电磁式接触器和永磁式接触器。永磁式接触器采用永磁机构保持,结构简单,零部件少<sup>[8]</sup>,但其分合闸频率受控制单元温升的限制,在一定程度上影响了使用寿命。混合结构式采用电力电子器件与传统电磁开关并联结构,分断电路时先打开触头再关断电力电子器件,导通时顺序相反,从而实现无弧分断。由于应用较多电力电子器件,成本较高,未能得到广泛应用<sup>[9]</sup>。随着新型触头材料的应用,交流接触器机械寿命可达数百万次,但电磁式接触器固有的工作原理决定其在工作过程中还存在一些问题<sup>[10]</sup>:

(1) 吸合过程中,较大的吸力裕量会造成触头运动末期动能较大,从而造成动、静触头撞击严重;此外由于惯性作用产生的触头弹跳现象会引起触头电弧侵蚀、加速触头磨损、降低电寿命。

(2) 分断过程中,触头材料会因触头间产生的电弧灼烧和强电场的作用产生转移,从而造成电寿命损耗<sup>[11]</sup>。

(3) 在合闸状态下,线圈需通电产生电磁吸力来保持吸合状态,电网电压波动会产生触头振动与噪声污染;永磁式接触器虽能避免线圈通电产生交流电的影响,但会增加接触器的质量与体积。

迄今,交流接触器作为机电一体化产品,在智能控制方面已取得了许多研究开发成果,利用微型计算机控制交流接触器的动态全过程,应用闭环斜率控制策略、串级控制策略、模型预测控制技术、位移控制技术、无模型自适应控制方案等智能控制方法,在一定程度上减少了触头弹跳与熔焊<sup>[12-17]</sup>。

### 1.2 断路器现状

断路器是电力系统运行过程中实现保护功能的关键设备。随着大容量发电机组与新能源的接入,系统的短路容量和短路电流水平不断提高,而对断路器的分断能力与动热稳定性提出了更高要求<sup>[18-19]</sup>。研究表明,提高触头分断速度可增大开关电器的极限短路分断能力<sup>[20-22]</sup>。为提高断路器开断速度,国内外专家学者对断路器操动机构进行了深入研究。

国内外采用拍合式电磁铁设计的过流脱扣器

和半导体脱扣器存在短路分断能力不足、可靠性不高等问题。随着航天技术的发展,应用微机控制技术的电子式过电流脱扣器使断路器的经济技术指标和保护性能大大提高<sup>[23-24]</sup>。文献[25-26]将涡流斥力技术应用于中压断路器的机械开关中,突破原有机构动作原理,提高了断路器的分闸速度,降低了开关运动时间的分散性,但涡流斥力机构运动速度较快,运动末期动能较大,将其应用在低压领域的研究还有待进一步开展。新型原理操动机构的出现简化了机械传动机构,改进了操动的可控性,提高了断路器触头的分断速度,但在提高分断速度的同时,还需解决分断过程动作特性的优化等问题。

随着新型原理断路器操动机构的设计研发,其励磁控制方式也发生了极大变化。电磁脱扣器采用短路电流为激励源,当短路电流流过线圈时产生较大磁场力,该力与弹簧反力相配合来实现断路器分闸时的快速动作,仅能实现短路保护功能而分闸速度较慢;电子脱扣器则通过检测主电路电流,并将其进行放大来驱动脱扣机构,除了短路保护外,还可实现过载保护、欠压保护等功能,但结构较为复杂。永磁操动机构与涡流斥力机构采用外加电容器释放脉冲电流作为激励电源。励磁方式的改变为断路器的智能励磁控制提供了实现基础,为提高断路器的开关特性提供了新的解决思路。

## 2 低压交流电磁电器应用需求

对于交流接触器而言,智能控制技术的应用为提高其动作一致性、优化运动特性、提高电寿命提供了一条切实可行的技术路线,但由于电磁操动机构本身存在响应时间长、运动速度慢等不足,导致交流接触器通断大电流的能力受限,常与断路器串联使用构成控制与保护系统来实现对负载的控制与保护功能。此外,根据 GB/T 14808—2016《高压交流接触器、基于接触器的控制器及电动机起动器》,高压真空接触器的极限分断电流应大于等于额定工作电流的 10 倍,这样规定的目的就是当系统短路电流较小时,可以直接用接触器开断,无须断路器动作。而对于工作在 AC4 类别下的接触器来说,要求能接通和开断 6 倍额定电流。综上,接触器应具有一定的短路电流开断能力。如何进一步提高交流接触器的通断能力

是目前低压交流接触器发展的一大问题。

对于断路器而言,励磁方式的改变为实现其智能控制提供了可能。但由于断路器运动速度较快,对其运动过程控制极为困难,导致在动静触头接触时动触头仍具有较大动能,这些动能小部分会被触头间的摩擦、介质的阻尼消耗,而另外的大部分则由接触面的形变吸收,导致断路器使用寿命降低。

对于低压配电网的控制与保护系统而言,存在接触器与断路器在短路电流下的协调配合这一关键技术问题。根据 GB/T 14808—2016 和 IEC 60947,有两类配合要求:第一类要求在短路试验后,接触器更换零件后继续使用;第二类要求接触器无须更换零件、可继续安全可靠地使用。第一类协调配合较易实现,第二类协调配合较难实现,通常选用较大容量的接触器来解决,但这会增大控制与保护系统所需的安装空间。此外,安装人员操作失误、产品质量出现问题等不可控事件时有发生,严重影响控制与保护系统的可靠性。

低压交流电磁电器集成技术可以集各分立元件的优点于一体,克服接触器、断路器的固有缺点,解决各开关电器之间的协调配合问题,成为新一代低压电器技术与产品的重要发展方向。低压交流集成电器具有连续工作性能,可以减少电力系统主回路中的节点数量、安装空间,具有高可靠性、高机械寿命及高电气寿命等优势<sup>[27]</sup>。低压电磁电器集成技术包括新型原理结构技术与智能控制技术两方面。新型原理结构技术是采用新型的原理操动机构(如涡流斥力原理机构)代替传统的电磁电器励磁操作机构,在优化电磁电器机构的同时使单一机械结构的开关电器可实现多种操作功能(如分合闸功能);智能控制技术则是利用智能化控制技术,控制集成电器机械结构实现接触器与断路器的基本功能,并改善集成电器的动态特性,实现保护分闸与控制分合闸过程的动态优化控制。

## 3 新型原理结构技术

新型原理结构技术经历了 3 个重要发展阶段。一是将不同功能产品或模块组装形成组合电器;二是利用不同操动机构控制同一触头实现控制与保护功能;三是利用单一操动机构操动同一

触头实现一体化集成电器,真正实现新型原理结构在集成电器中的应用。

(1) 组合电器。将不同功能产品加以组合排布,整合为一体,采用与传统控制保护系统相似的连接顺序与接线方式,减小体积,同时避免用户选型问题。但该类产品只是将不同功能的开关电器加以叠加,并未从本质上解决不同产品的功能配合问题,且结构复杂,分断能力与可靠性并无明显提高。采用该类原理结构的典型电器产品有:将电磁式脱扣器和延时过载脱扣器装配在转动式接触器上实现多种功能的“Standard”系列产品,日本户上公司研制出的直动式组合型 UNK 系列产品,TE 公司于 20 世纪 80 年代推出的控制与保护开关电器产品方案等。

(2) 利用断路器的快速短路脱扣装置与接触器的电磁机构对同一套触头系统进行控制,以实现配电线路或电动机的短路保护与控制功能,分断能力大大提高。该类开关电器的基本配置包括基座、电磁机构、操作机构、主回路接触组、电源模块、智能检测模块,还可附加热磁脱扣器等不同功能模块实现过载保护等其他功能,结构设计巧妙。

该开关电器利用操作机构控制电磁机构线圈的通断电,实现开关正常分合闸功能。当发生短路故障时,由限流式快速短路脱扣器在 2 ~ 3 ms 内冲击动触头实现分断,同时智能控制模块提供给操作机构分闸信号,以切断电磁机构线圈回路。其短路故障保护方式仍为脱扣方式。由微控制单元(MCU)构成的智能控制模块可以实时检测线路过载、短路等故障并对操作机构发出分闸信号,检测方法见第 4 节。LD 系列、TeSysU 系列、3RA6 系列以及上海电器科学研究院设计的 KBO 系列产品均是采用这一结构。KBO 系列结构示意图如图 1 所示。

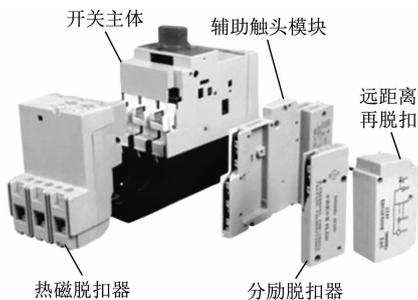


图 1 KBO 系列结构示意图

采用该结构的控制与保护开关电器体积大大减小,可靠性也有所提高,但机械结构较为复杂,难以实现机构控制功能的智能化开发。

(3) 沈阳明鑫公司生产的 SDMK1 系列产品以交流接触器为基础通过触头改造<sup>[28]</sup>,使其满足对短路电流的分断保护要求,简单可靠,可操作性强,控制合闸时间为 40 ~ 50 ms,短路瞬时保护动作时间小于 0.2 s。SDMK1 系列结构示意图如图 2 所示。在分断短路电流时,利用电弧电阻来限制短路电流,分合闸时间较长,且较大短路电流产生的电弧易造成触头烧蚀,连续工作性能较差。可利用智能控制技术对其动态过程进行优化控制以降低能耗,减小交流噪声。

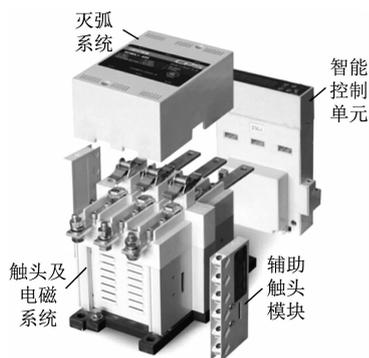


图 2 SDMK1 系列结构示意图

文献[29]在传统交流接触器的框架基础上,设计一种替代电磁操动机构的双线圈涡流斥力机构,实现新型原理结构在集成电器中的应用,明显减少了控制与保护开关电器的体积及整体机械结构的复杂程度。低压控制与保护开关电器结构示意图如图 3 所示。

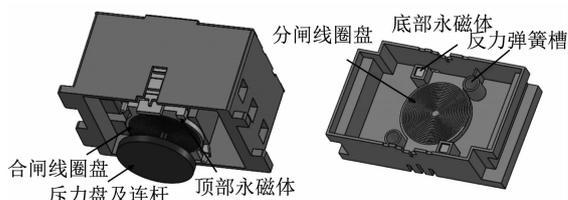


图 3 低压控制与保护开关电器结构示意图

触头部分采用双断点触头系统加装灭弧栅结构来提高灭弧能力,利用永磁保持盘与反力弹簧提供分/合闸保持力。利用涡流斥力机构动作速度快、斥力形成时间短的优势实现短路电流快速分断,同时采用新型励磁电路模块,将储能电容分

为大容量电容组与小容量电容组以实现短路保护和控制分合闸两种动作需求。励磁电路工作原理示意图如图4所示。此外,该新型原理结构技术

结合短路电流早期检测技术来提高短路电流分断能力,实现微弧甚至无弧分断;采用运动过程动态优化控制技术,提高开关电器使用寿命。

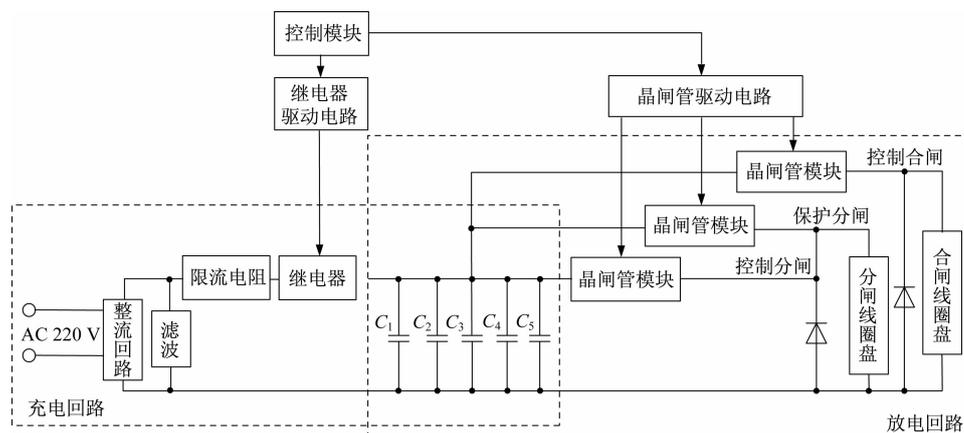


图4 励磁电路工作原理示意图

为了兼顾断路器的高分断能力与接触器的高操作频率、高使用寿命,减小能耗与安装空间,真正集成控制与保护功能,必须采用一体化设计,使用同一套操动机构操动同一套触头系统。

## 4 智能控制技术

### 4.1 故障辨识技术

正确分辨故障电路与正常工作电路是对智能电器的基本要求,低压集成电器也不例外。若不能正确辨识故障与正常工作电路,以控制分闸指令开断短路电流,会导致短路电流开断失败,甚至有可能扩大故障范围;以保护分闸指令开断正常工作电路,则会降低开关电器的使用寿命。因此,控制与保护开关电器的智能控制系统更需灵敏准确地区分短路故障状态与正常工作状态,并发出正确的控制指令。

智能控制系统通过对主回路电流电压中的奇异信号进行检测来判断故障情况,并发出分断指令使操动机构动作。常采用的短路故障检测方法有电流检测法、电压检测法和功率检测法等。由于采用这些检测方法对短路故障进行检测耗时稍长,短路电流已有较大数值,导致分断时电弧燃烧剧烈,严重影响开关电器的分断能力。为补偿故障检测时长的问题,LD系列、TeSysU系列、3RA6系列以及上海电器科学研究院设计的KBO系列控制与保护开关电器依靠短路脱扣装置实现快速

切除故障功能;SDMK1系列控制与保护开关电器则通过对其触头所受电动斥力进行研究设计,在短路电流达到一定数值时利用电动斥力来提高触头分闸速度<sup>[30]</sup>。

新型原理结构的控制与保护开关电器采用短路电流早期检测技术来识别短路故障。将数学形态学滤波器作为多尺度小波变换的前置滤波单元,形成一种新型的形态小波算法模型,利用TMS320F2812数字信号处理(DSP)芯片研制的低压系统短路故障早期检测装置,可在大部分故障初相角下,对短路故障在约0.2ms内完成判断并提供保护电器分断动作信号<sup>[31]</sup>。该低压短路故障早期检测装置的快速性效果十分显著,从检测快速性与准确性上达到了短路故障早期检测的要求,为短路电流预测与短路故障前期快速分断提供了条件<sup>[32-33]</sup>。文献[34]将短路电流早期检测技术与新型原理结构的低压控制与保护开关电器相结合,基于低压配电短路故障实验系统,测得不同故障电压初相角下,低压控制与保护开关电器均可在约5ms内切断单相短路电流。

采用短路电流早期检测技术,在短路电流达到峰值之前切除故障,避免了高能量电弧的产生,提高了开关电器分断短路电流的能力。基于短路电流早期检测技术的新型原理结构的控制与保护开关电器,可有效实现低压配电网短路故障限流抑制与快速分断功能。

## 4.2 运动过程最优控制

对低压集成电器运动过程进行优化控制,可减小分合闸弹跳与撞击等问题,提高使用寿命。动态过程包括合闸过程与分闸过程。除新型原理结构的低压集成电器以外,其余控制与保护开关电器结构中均含有传统接触器原理的电磁操动机构,因此可将传统接触器运动过程优化控制方法迁移使用。对于新型原理结构的控制与保护开关电器,可采用脉冲成型网络(Pulse Forming Network, PFN)控制技术。

### 4.2.1 合闸关键技术

合闸过程中的触头弹跳与撞击问题会造成触头熔焊,严重影响开关电器的机械寿命与电寿命,集成后的开关电器更应注意触头弹跳问题。合闸关键技术包括交流激磁和直流激磁两种励磁方式,在合闸过程中通过控制电力电子器件定时定相导通线圈激磁电压或激磁电流来实现智能控制。

#### (1) 交流激磁技术。

福州大学为减小触头弹跳,通过实验分析得出触头弹跳情况由合闸相角、触头末速度决定,并以大量实验数据为支撑,采用观察法检测触头弹跳情况,找出最佳合闸相角<sup>[35]</sup>。这种方法需进行大量实验,较为繁琐;且易受观察者本身的生理限制,得出的结果并不完全准确。随着仿真技术和智能模拟算法的发展,西安交通大学通过虚拟样机技术模拟接触器动态闭合全过程,以得到的铁芯最小运动末速度为依据,反推求得该条件下最佳合闸相角<sup>[36]</sup>。河北工业大学在此基础上建立基于Game的多目标优化算法求取最佳合闸相角。此外,文献[37-38]则在LabVIEW软件中建立了交流接触器运动特性仿真系统,利用蚁群算法进行寻优找出最优合闸相角和最佳强激磁时间。

以上方法都是通过控制手段与优化算法结合实现合闸动态过程的优化,在一定程度上降低了合闸弹跳,提高了开关电器的各项性能指标。但这些属于开环控制,系统简单,无自动修正与补偿的能力,系统稳定性不高;控制精度低,易受外界干扰,输出一旦出现误差无法补偿。因此,在合闸过程的智能控制方面,提出具有闭环控制的直流激磁技术。

#### (2) 直流激磁技术是指激磁电压由交流电压

改为直流电压。其可以通过控制供电电压的导通时间与电压大小来改变激磁能量,从而改变触头运动速度,达到运动过程中吸反力的最佳配合。

文献[39]提出一种带电压反馈的接触器脉宽调制智能控制方案,结合触头接触电阻对接触器进行弹跳仿真的研究,优化不同电压下智能接触器脉宽调制波的占空比,并将最优结果存储于微处理器中;采用等效直流电压作为反馈信号实现对接触器激磁电压的实时调整。文献[40]提出模型预测策略可有效提高接触器驱动电压及作用时间的预测精度,以响应时间最短为优化准则,确保动、静触头相接触时速度为零,依此给出驱动电压的最佳取值。

常用的反馈控制方法主要是通过对合闸过程进行精确建模,采用各种优化算法对激磁电压数值、激磁时间等参量进行寻优,将最优控制方案存储于微处理器中,在开关电器的实际运行过程中,利用电压、电流、位移等反馈量,依据微处理器中存储的最优电压取值、最优运动曲线等作为参考量来进行反馈控制,明显减少了触头一、二次弹跳,提高了动作一致性。但开关电器在使用过程中存在弹簧老化、安装位置变化等不确定因素均可能导致控制失效。因此研究者引入新型智能控制算法,使接触器在使用过程中具有自适应、自调整、自校正功能。文献[41]利用无模型自适应控制方案对电磁机构运动过程进行实时优化,抑制电磁机构固有的动作时间分散性。该控制策略不依赖于任何受控对象结构参数,无须增设设备,根据在线数据实时优化电磁机构吸合过程控制策略,能够智能、快速地适应外部环境的变化和开关自身机械结构的磨损。前述这些直流激磁控制策略还有待于工程化开发与应用验证完善。

### 4.2.2 分闸关键技术

分闸关键技术包括保护分闸与控制分闸两个方面,无论是哪一方面,都希望实现微电弧甚至零电弧分断。实现微弧分断的关键是过零分断技术,其中存在两方面相互矛盾的影响因素:一方面是触头刚分时的电流相位角,其决定电弧能量大小。若触头刚分时刻与电流过零点距离较远,电弧中积蓄能量较大,弧隙易被击穿。另一方面是动、静触头的开距,触头间隙的绝缘恢复能力与开距正相关,若开距过小,其恢复能力不强,易导致

触头间电弧重燃,弧隙击穿。由此可见,触头分断时间与触头初始加速度是过零分断的关键。

带有脱扣装置的低压集成电器采用短路脱扣装置来提高触头初始运动速度。主电路接触组构成示意图如图 5 所示。出现短路故障时,用于检测短路电流的短路脱扣装置发出动作指令,在短路电流产生的强大电磁场的作用下脱扣器内部动、静铁心吸合,带动顶杆碰撞铝推杆,铝推杆联动触头支持向下移动加速分开触头,当铝推杆下移一定距离时对锁扣的限位消失,锁扣在扭簧的作用下旋转至一定角度,旋转过程中带动操作机构内部的短路推杆滑移,从而引起操作机构的脱扣动作<sup>[42]</sup>。

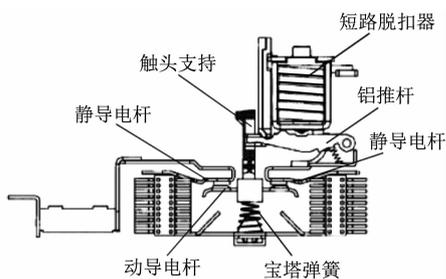


图 5 主电路接触组构成示意图

新型原理结构的控制与保护开关电器,由于采用涡流斥力机构,初始加速度较快,可在较短时间内运动较大距离,使触头间隙满足绝缘恢复能力;同时采用短路电流早期检测技术,在短路电流达到峰值前检测出故障并切断电路,积蓄的电弧能量较小,从而实现微弧开断,新型原理结构集成电器构成示意图如图 6 所示。

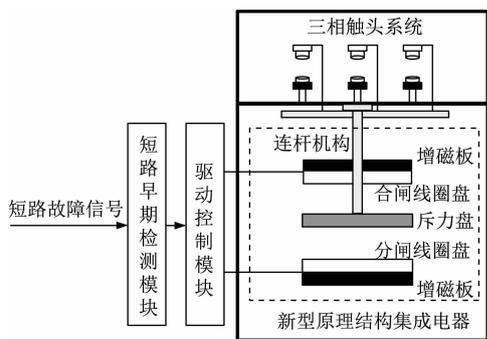


图 6 新型原理结构集成电器构成示意图

考虑到涡流斥力机构运动末期动能较大,可采用电磁缓冲方式:在开关运动末期对缓冲线圈进行放电,从而在斥力盘上感应出与运动方向相反的力,减小触头运动末速度,提高开关电器使用

寿命<sup>[43-44]</sup>。

## 5 结 语

电力系统容量的扩大以及智能电网的发展对电力系统的可靠性提出了更高要求,本文从提高低压配电网可靠性的角度分析了低压交流电磁电器技术趋势,阐述了新型原理结构技术与智能控制技术,并对低压交流电磁电器集成技术加以展望,得到以下几点结论:

(1) 新型原理结构及其一体化设计。低压交流电磁电器已出现新型原理机构及一体化的发展趋势,采用一体化设计的开关电器机械结构简单、体积小、可靠性高。以低压配电系统负载频繁控制与保护功能为核心,采用一体化设计结构,配以不同功能的智能控制模块,实现对各类负载的控制与保护。

(2) 智能控制技术应根据不同工况合理选择操动机构的励磁控制方案,优化机构的动态特性。其中,结合低压控制与保护开关电器的频繁通断正常电流及快速分断短路电流的功能需求,涡流斥力机构可以通过合理控制电容放电的时间间隔,选择电磁缓冲控制方案或二次加速控制方案,以适应低压控制与保护开关电器的常规分合闸、分断短路电流两种工况。

(3) 将短路电流早期检测技术与一体化集成电器尤其是快速分断机构相结合,可有效提高开关电器的短路分断能力。

## 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 李小峰. 国家电网促进清洁能源发展[J]. 科技风, 2018(22):188.
- [ 2 ] 张培铭. 智能低压电器技术研究[J]. 电器与能效管理技术,2019(15):10-20.
- [ 3 ] 韩民晓,王皓界. 直流微电网——未来供用电领域的重要模式[J]. 电气工程学报,2015(5):1-9.
- [ 4 ] BIAGINI V, SIMONIDIS C, DELPOZZO A, et al. Development and prototyping of a rotary-linear actuation drive for vacuum contactors [ C ] // IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,2016;530-535.
- [ 5 ] 缪希仁,巫锡华,王田,等. 基于涡流斥力原理的低压控制与保护电器研究[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(9):2708-2717.

- [6] 汪先兵. 智能永磁接触器设计与控制技术研究[D]. 南京:东南大学,2011.
- [7] 许志红. 交流接触器智能化控制与设计技术的研究及实现[D]. 福州:福州大学,2006.
- [8] 王伟,邵立雪,曾祥明,等. 大功率永磁直流接触器特性分析及试验研究[J]. 电器与能效管理技术,2019(7):1-5,29.
- [9] 郑昕,许志红,张培铭. 智能混合式无弧交流接触器的研究[J]. 低压电器,2005(9):10-12.
- [10] 高雪. 交流接触器智能控制系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- [11] 卜浩民. 交流接触器的智能化综述[J]. 电器与能效管理技术,2017(1):32-38.
- [12] 杨程,刘向军. 基于多条件判断的交流接触器电流斜率闭环反馈控制策略[J]. 电器与能效管理技术,2022(6):24-31.
- [13] 张长坤,许志红. 基于磁链反馈的智能交流接触器串级控制策略[J]. 中国电机工程学报,2020,40(4):1329-1338,1424.
- [14] 庄杰榕,许志红. 智能电磁接触器自抗扰电流模型预测控制[J]. 电工技术学报,2018,33(23):63-72.
- [15] 郭凯伟,王立国,张超羽,等. 基于模型预测控制的接触器开关弹跳抑制研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(9):2717-2724.
- [16] 汪先兵,林鹤云,房淑华,等. 永磁接触器位移分段PWM控制及吸合过程动态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(3):113-118.
- [17] 吴敬轩,许志红. 电磁接触器吸合过程无模型自适应控制策略[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1663-1673.
- [18] 张运洲,单葆国. 中国电力系统发展运营面临的挑战和对策[J]. 中国电力,2017(1):2-6.
- [19] 郭银婷,缪希仁. 低压配电短路电流检测与分断机构技术[J]. 低压电器,2013(7):18-22.
- [20] 曾宜,陈卢明,吴建生,等. 双断点塑壳断路器触头机构在极限短路分断能力试验中的振动性研究[J]. 电器与能效管理技术,2022(1):31-34.
- [21] 蒋顾平,顾翔,唐丰田. 触头灭弧系统增容提高塑壳断路器短路分断能力的研究[J]. 电器与能效管理技术,2018(8):16-20,33.
- [22] 沈先,王冰青. 小型断路器机构脱扣速度的优化设计[J]. 电器与能效管理技术,2020(6):36-40,45.
- [23] 房淑华,林鹤云,蔡彬,等. 永磁接触器磁场有限元分析及控制单元设计[J]. 中国电机工程学报,2006,26(22):164-168.
- [24] 王建华,宋政湘,耿英三,等. 智能电器理论与关键技术研究[J]. 电力设备,2008(3):1-5.
- [25] HOLAUS W, FROHLICH K. Ultra-fast switches- a new element for medium voltage fault current limiting switchgear [C] // 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002:299-304.
- [26] 李博. 高速斥力机构及故障电流快速监控装置的研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [27] 曾萍,胡景泰,朱文灏,等. 智能化控制与保护开关电器的现状与发展[J]. 低压电器,2010(22):1-4.
- [28] 王丹利. SDMK1 智能型控制与保护开关电器[J]. 低压电器,2006(5):48-50,61.
- [29] 王田,缪希仁,孙秦阳. 基于涡流斥力机构的低压交流接触器技术[J]. 电器与能效管理技术,2015(2):13-18.
- [30] 郭占男. 1 250 A 控制与保护开关电器的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [31] 缪希仁,李飙,吴晓梅,等. 基于短路早期检测的中压故障电流快速限制技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):75-81.
- [32] 柏林,刘小峰,秦树人. 小波-形态-EMD 综合分析法及其应用[J]. 振动与冲击,2008,27(5):1-4,35.
- [33] 郑昕,张培铭. 基于 dsPIC33F 的短路电流快速检测与控制系统[J]. 福州大学学报,2010,38(6):850-855.
- [34] 王一,侯成,程旭,等. 交直流混合配电网控制保护技术研究与应用[J]. 广东电力,2020,33(12):90-101.
- [35] 李光辉,张培铭,张冠生. 交流接触器智能技术的探讨[J]. 低压电器,1996(2):21-25.
- [36] 刘颖异,陈德桂,袁海文. 一种针对交流接触器动态特性仿真的改进方法[J]. 低压电器,2011(17):1-6.
- [37] 汪淑妮,许志红. 交流接触器特性分析[J]. 福州大学学报:自然科学版,2014(1):90-97.
- [38] 许志红,张培铭. 智能交流接触器全过程动态优化设计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):156-161.
- [39] 刘颖异,陈德桂,纽春萍,等. 带电压反馈的智能接触器动态特性及触头弹跳的仿真与研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):20-20.
- [40] 郭凯伟,王立国,张超羽,等. 基于模型预测控制的接触器开关弹跳抑制研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(9):269-277.
- [41] 吴敬轩,许志红. 电磁接触器吸合过程无模型自适应控制策略[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1663-1673.

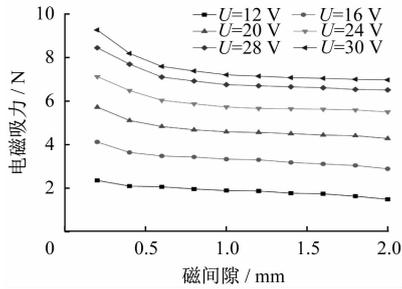


图8 不同线圈电压下静态电磁吸力特性曲线

降趋势随着线圈电压的变大而逐渐变陡;当磁间隙大于0.6 mm后,电磁吸力与线圈电压呈线性关系,且减小的斜率与线圈电压为12 V的相同,始终保持在 $-0.4$ 。上述分析表明在较大的磁间隙下,螺管式电磁铁的电磁吸力与磁间隙具有良好且稳定的线性关系。此外,在磁间隙从0.6 mm增至2.0 mm过程中,不同线圈电压条件下,电磁吸力的减少量均稳定在0.55~0.66 N,变化较小。这验证了螺管式电磁铁在动作过程中可提供稳定电磁吸力的结论。

### 3 结 语

本文设计并实现了螺管式电磁铁的静态电磁吸力测试装置,得到了电磁铁静态电磁吸力与线圈电流的典型波形,拟合得到了电磁铁线圈电感值。实验确定了螺管式电磁铁的电磁吸力随线圈电流的增加先呈二次增长,而后由于漏磁通产生螺管力,使得电磁吸力呈线性增长。电磁吸力与线圈电压始终保持线性关系。在较大的磁间隙或

较小的线圈电压条件下,电磁吸力与磁间隙呈稳定的线性关系,且随着磁间隙的增大,电磁吸力变化较小,表明螺管式电磁铁在动作过程中可提供较为稳定的电磁吸力。

### 【参考文献】

- [1] 许志红. 电器理论基础[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 房淑华,林鹤云,蔡彬,等. 永磁接触器合闸过程的动态仿真及实验[J]. 电工技术学报,2007,22(2):45-50.
- [3] 梁慧敏,翟国富. 航天电磁继电器三次设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.
- [4] 娄路亮,王海洲. 电磁阀设计中电磁力的工程计算方法[J]. 导弹与航运载技术,2007(1):40-45.
- [5] LEE G S, SUNG H J, KIM H C. Multiphysics analysis of a linear control solenoid valve[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 135(1):011104. 1-011104. 10.
- [6] 赵靖英,姚帅亮,赵纪新,等. 一种螺管式电磁铁的设计及静态特性研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16):22-27.
- [7] 李峰. 利用 ANSYS 分析螺管式直流电磁铁衔铁锥角对吸力特性的影响[J]. 电工技术, 2021(15):36-37,41.
- [8] 刘灿辉,黄丽容. 基于 ANSYS 的电磁铁仿真分析及其实实验验证[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(4):49-51,78.
- [9] 王宾,陈金学,肖斌,等. 三维有限元分析在直流电磁铁优化设计中的应用[J]. 机电元件, 2016, 36(2):30-32.

收稿日期:2022-07-21

(上接第15页)

- [42] 黄世泽,郭其一,陈杨,等. CPS 短路分断能力仿真及试验[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5):149-153.
- [43] 何俊佳,袁召,经鑫,等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(12):3809-3818.
- [44] WEN W J, HUANG Y L, AL-DWEIKAT M, et al. Research on operating mechanism for ultra-fast 40.5-kV vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6):2553-2560.

收稿日期:2022-10-17

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告