

# 基于握手式交互策略智能复合开关研究

胡天祥,黎军华

(乐山一拉得电网自动化有限公司,四川 乐山 614000)

**摘要:**近年来,随着低压配电系统智能化程度不断提高,复合开关在0.4 kV无功补偿系统中的应用逐渐广泛,其保护功能丰富、投切电容器冲击涌流小、稳态损耗低等优点被用户认可。据不完全统计,2015—2021年间全国新增复合开关厂家数十家,良莠不齐的技术水平导致产品在使用过程中问题频出。针对无功补偿系统中复合开关在运行过程中存在的问题,提出了基于握手式交互控制策略的概念,文中从复合开关的运行现状、故障案例、问题分析、提出解决方案、方案实施和实际工程应用效果方面进行阐述,设计了一种稳定可靠的硬件输出及反馈电路、软件控制策略和切实可行的解决方案,通过在工程中的实际应用,验证了控制策略的有效性和可靠性。

**关键词:**复合开关;磁保持继电器;可控硅;过零;交互;步进

**中图分类号:**TM 714.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0031-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220506

## Research on Intelligent Compound Switch Based on Handshake Interaction Strategy

HU Tianxiang, LI Junhua

(Leshan ELECT Electrified Wire Netting Automation Co., Ltd., Leshan 614000, Sichuan, China)

**Abstract:**In recent years, with the continuous improvement of the intelligence of low-voltage power distribution systems, the application of compound switches in 0.4 kV reactive power compensation systems has gradually been widely used. Its advantages such as rich protection functions, small inrush current of switching capacitor and low steady loss, are acknowledged by the users. According to incomplete statistics, dozens of new manufacturers have been added to develop the compound switches from 2015 to 2021, but the uneven technical level leads to frequent problems in the use of products. Aiming at the problems existing in the operation of compound switches in reactive power compensation system, the concept of interactive control strategy based on handshake is proposed. The application effect is described, and a stable and reliable hardware output and feedback circuit, software control strategy and practical solution are designed. And the effectiveness and reliability of the proposed control strategy are verified through the practical application in engineering.

**Key words:** compound switch; magnetic latching relay; thyristor; zero-crossing; interaction; stepping

## 0 引言

随着近年来智能电网的发展,低压配电新技术、新产品也伴随着智能电网的发展不断涌现。国内外低压无功补偿装置的投切开关通常选用接触器、晶闸管开关或复合开关,接触器在投入电容器时冲击涌流大。晶闸管在稳态导通过程中损耗大、温升高、谐波重。智能复合开关融合了二者的优点,具有投入涌流小、稳态损耗小、温升低且功

能丰富的优势。因此相关电力设备厂家开展了智能复合开关的研发。复合开关的一次回路由继电器和可控硅构成,采集和控制回路以中央处理单元(central processing unit,CPU)为核心。其最大的特点是投切电容器时无涌流且功能丰富,有着接触器和晶闸管开关无可比拟的优势。电力工业发展在保持适度增长的同时,须切实转变电力增长方式,实现从重视增加数量和规模到重视提高质量和效率的转变<sup>[1]</sup>。因此,各供电公司、电力设备成套厂和广大的电力用户更愿意采用复合开替代

传统接触器,复合开关是传统的投切开关的升级换代产品。

## 1 复合开关的运行现状

复合开关在低压无功补偿系统中运用日益广泛,但复合开关的研制厂家水平参差有别,产品质量良莠不齐,低压复合开关运行时的安全、可靠性问题没有从根本上得到解决,严重地影响了电力系统的安全运行。

由于复合开关的硬件门槛并不高,从 2016 年初到 2020 年年底,中国的复合开关生产厂家由当初的几家迅猛增加到数十家,复合开关的应用从当初的尝试阶段逐渐转为大面积推开。很多复合开关虽然解决了传统接触器投切涌流大的弊端,也出现了一些新的问题:复合开关在运行 2~3 年后有 20%~40% 左右出现故障;更为严重的是,约 3%~10% 的复合开关在投运初期或使用过程中出现炸裂损坏,造成了主变压器 0.4 kV 进线断路器跳闸或线路损坏等诸多风险<sup>[2]</sup>。

## 2 运行故障案例

某采矿厂采用容量为 800 kVA(10 kV/0.4 kV) 的 S11 配电变压器<sup>[3]</sup>,无功补偿装置配置容量为 12×30 kvar,补偿装置主开关采用 500 A 的塑壳断路器。无功补偿装置中的投切开关采用低压复合开关。配电系统运行 2 个月后,部分复合开关出现故障且有明显的灼烧痕迹,同时补偿装置进线塑壳断路器出现了多次跳闸。

电能质量在线监测装置的录波数据,清晰地反映了复合开关在出现故障瞬间补偿柜电流峰值为额定电流的数倍,已超出示波表所能显示的范围。由此可以看出,原厂家复合开关的设计由于出现异常导致故障,给用电单位甚至配电系统带来严重的安全隐患。

复合开关在电压过零偏移 50 μs 处导通时的冲击波形,如图 1 所示。

## 3 故障问题分析

低压智能复合开关出现运行故障,一般有以下原因:

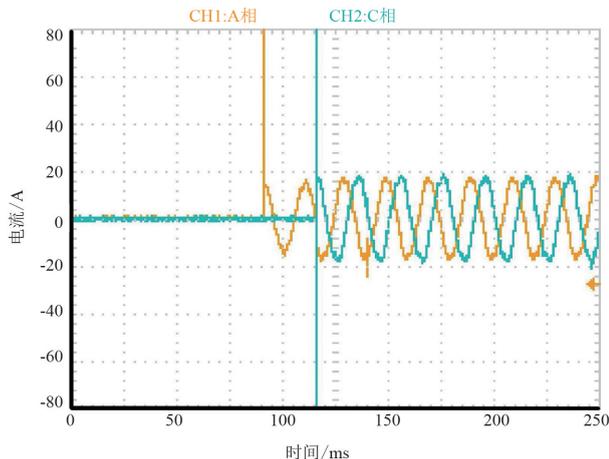


图 1 复合开关在电压过零偏移时间 50 μs 处导通时的冲击波形

- 1) 设备的运行环境恶劣,如运行环境温度、湿度、尘埃含量、海拔高度等外部环境的影响<sup>[4]</sup>;
- 2) 电能质量、电容器质量的影响<sup>[5]</sup>;
- 3) 复合开关自身质量缺陷的影响。

从现场采集的信息来看,产品自身质量的缺陷是复合开关运行故障最主要的原因。低压复合开关的主要实现原理是将可控硅与磁保持继电器并联,由 CPU 对可控硅和磁保持继电器进行时序控制<sup>[6]</sup>,动作步骤如下:

- 1) 初始时刻,可控硅和磁保持继电器均为断开,电容器为切除状态。
- 2) 投入电容时,CPU 控制可控硅在电压过零点瞬间导通并持续导通,此时电容电流流经可控硅。
- 3) 电流稳定后,CPU 控制磁保持继电器闭合,待其可靠接通后断开可控硅,继电器担任长时间的续流任务。
- 4) 切除电容器时,CPU 控制可控硅处于接通状态。待可控硅接通状态稳定后。随即断开磁保持继电器,此时可控硅担任续流任务。
- 5) 待磁保持继电器分开状态稳定后,CPU 撤消可控硅的触发信号,可控硅在电流过零自动断开,完成一次投、切过程的全部动作。

通过基本工作原理可以看出:复合开关在电压过零处投入电容器、在电流过零处退出电容器,具备电压过零投入、电流过零退出的特性。可控硅与磁保持继电器的动作时序均由 CPU 协调。无功补偿装置通常就近安装于低压配电变压器,电源内阻很小,又因补偿装置中复合开关所接负载为电容器,异常干扰可使 CPU 失效致一次元件动作时序失控,导

致复合开关在电压波形非过零处投入电容器,从而产生数倍甚至数十倍于额定电流的短时过流现象,引起复合开关炸裂甚至配电变压器进线断路器跳闸的严重后果<sup>[7]</sup>。

## 4 实施方案和算法

### 4.1 方案设计要点

#### 4.1.1 精准的电压过零点获取

复合开关中的可控硅只在接通与断开电容器的瞬间使用,损耗很小,无需散热片。但是可控硅对电压变化率( $dv/dt$ )很敏感,对过电流的承受能力不强,可见可控硅部分是复合开关的薄弱环节。同时,在可控硅的终身寿命中,任何一次非过零点导通将会产生极大涌流,使可控硅瞬间过流损坏及复合开关整体炸裂<sup>[8]</sup>。因此,如何确保可控硅始终在电压过零点导通是设计首要解决的问题。

#### 4.1.2 可靠的部件失效闭锁

复合开关中可控硅与磁保持继电器的配合动作时序是:CPU通过对光耦反馈的方波进行扫描,以此找出电压过零点位置,并在此时发出控制信号;该信号通过脉冲回路触发可控硅使其在电压过零点导通;可控硅导通后接通磁保持继电器;最后,撤消可控硅脉冲信号使可控硅断开,磁保持继电器负责长时间稳态接通。复合开关的长时间运行,必定存在内部元件如CPU、可控硅等关键元件逐渐失效的情况。CPU或可控硅元件的失效同样可能会导致可控硅误导通,从而引起过流、过压现象的严重后果。因此,在关键元件失效的情况下要保证复合开关的安全性,设计中必须要考虑通过软硬件结合的方式实现复合开元件失效时的动作闭锁。

### 4.2 硬件实施方案

关键硬件控制及反馈回路的核心部分<sup>[9]</sup>,如图2所示。

为了克服目前低压复合开关普遍存在的性能不稳定、投入电容器涌流大、动作风险高等弱点,设计方案提供了一种电压过零点精准检测电路,配合专用的软件算法:在软件上采取反馈信号与CPU步进式脉冲互为推挽,实现可控硅触发全过程的实时跟踪保护,防止可控硅不可靠导通时磁保持继电器闭合造成的炸裂、损毁设备等严重后果。软件专用算法流程如图3所示。

### 4.3 软硬件交互策略

#### 4.3.1 输入部分

在复合开关没有投入时,磁保持继电器与可控硅均断开,220 V的压降全部加在复合开关上下两端,通过互感器隔离变压器SPT204A(T2)将复合开关上下两端的电压转化为弱电信号,电压过零比较器LM311(U2)及相关电路将弱电信号转换为标准方波(方波的跳变处即是电压正弦波的过零处),标准方波经高速光耦6N137(U3)隔离输出,转变为0~5 V、跳变沿 $<0.2 \mu\text{s}$ 、占空比为50%的方波并传送到CPU的I/O口作为过零方波反馈输入。

#### 4.3.2 输出部分

软件中首先设置好脉冲序列数和脉冲频率,并将输出口线设置为推挽结构。CPU在检测到方波上升沿的同时,推挽结构的I/O口采用程序步进的方式发送第一个脉冲,在发送下一个脉冲前对反馈波形进行分析,判断可控硅导通情况:如果输入口线为低电平,说明当前时刻可控硅为导通状态,则继续发送下一个脉冲并进行导通判断,依此循进,直至整个过程可控硅均导通方可闭合磁保持继电器。

在整个发送脉冲与通断判断过程中,若发送某一个脉冲后CPU判断口线为高电平,说明当前时刻

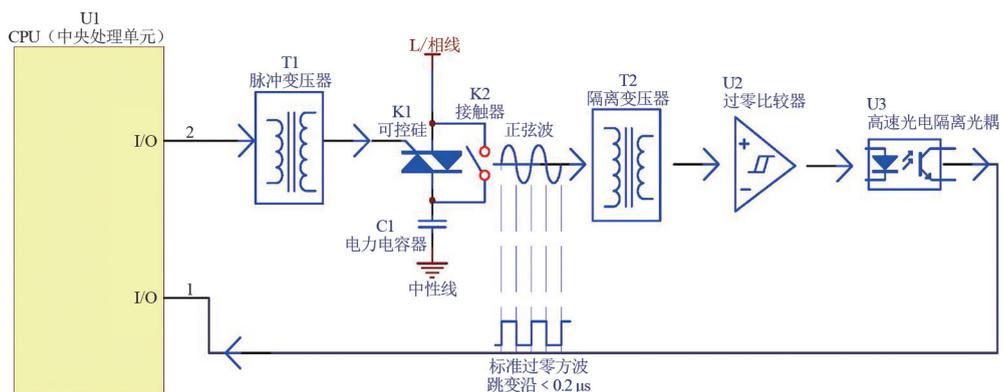


图2 复合开关关键硬件控制及反馈回路

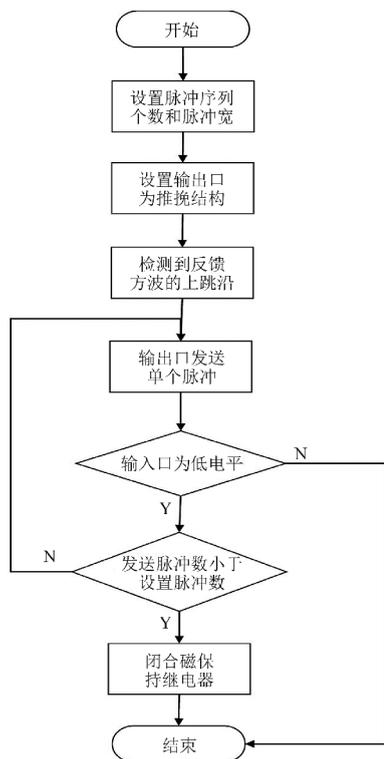


图3 软件专用算法流程

可控硅没有导通,则放弃后续的脉冲发送及闭合磁保持继电器的动作,有效地杜绝了可控硅不可靠导通时磁保持继电器盲目闭合造成的隐患。

#### 4.4 误差引起的冲击涌流定量分析

按 S9 系列变压器考虑,其高压侧系统短路容量为 100 MVA<sup>[10]</sup>、变压器容量为 630 kVA;变压器单相接地相保阻抗  $Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = 25.759\ 9\ \text{m}\Omega$ ;隔离光耦初级 LED 的点亮电压  $U_0 = 1.2\ \text{V}$ ;短路冲击电流  $i_{\text{ch}} = \frac{U_0}{Z_{\Sigma}} = 46.58\ \text{A}$ ;可控硅正向重复峰值电流  $I_{\text{T(RMS)}}$  为 75 A。 $i_{\text{ch}} < I_{\text{T(RMS)}}$ ,故即使考虑极端情况,投入时的冲击涌流仍不高于可控硅耐受值。

## 5 实际工程运行效果

四川某织布厂新建配电工程,电源变压器型号 S11-800 kVA-10/0.4,主要负荷是照明设备、变频器、纺丝机和通风机。计量装置设置在 10 kV 高压侧,规范要求配电变压器低压侧并联电容器装置容量按照变压器容量的 10%~30% 进行配置<sup>[11]</sup>。考虑到电容器电压亏损,实际补偿容量按照变压器容量的 30% 进行配置,即低压无功补偿装置配置 8 组电容器单元,单组电容器容量为 30 kvar,每组电容器与

电抗率为 7% 的电抗器串联<sup>[11]</sup>,标称补偿总容量为 240 kvar。

在设备投入运行不到 2 周,用户反映补偿装置故障。经对配电现场进行检查,无功补偿监控装置显示功率因数在 0.6~0.7 之间,功率因数明显偏低,负荷电流的总谐波畸变率在 5%~8% 之间,电压的总谐波畸变率在 1.0%~1.5% 之间。每组补偿单元的熔断器均有 2~3 只已经断开,熔断器的断开率近 85%,整个补偿柜没有补偿电流,复合开关有烧灼的痕迹。

经分析,现场电流总谐波畸变率和电压总谐波畸变率均在正常范围内,故排除了电能质量问题对设备损坏的可能性,同时对复合开关硬件结构进行拆解分析,其内部结构存在严重的炸裂和灼烧痕迹,结合硬件电路、软件控制策略进行综合研判并经试验分析,得出的结论是软硬件协同配合不当应是造成复合开关损坏的根本原因。

采用所提出的基于握手式的交互控制策略,其硬件设计架构和软件控制算法按前述方案进行优化。按所提方案设计的智能复合开关在该织布厂重新挂网运行,历经 2 年多的运行,8 组智能复合开关均运行良好无一损坏,其可靠性和耐用性高于常规接触器,该厂每月平均功率因数均在 0.93~0.96 之间,保证了设备安全稳定运行<sup>[12]</sup>。

## 6 结论

上面针对智能低压复合开关常规设计方案存在的缺陷,提出了一种全新的基于握手式交互控制策略。该策略结合智能低压复合开关的硬件结构,采取反馈信号与步进脉冲互为推挽,实现了可控硅触发全过程的实时跟踪保护,规避了常规实施方案的不足,防止了可控硅误导通时存在的炸裂风险,极大地提高智能低压复合开关运行的安全性和可靠性,强化了配电网设备运行的稳定和安全。

#### 参考文献

- [1] 国务院. 国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知[EB/OL]. (2021-12-28) [2022-01-04]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/Content\\_5670202.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/Content_5670202.htm).

- inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(1): 234-246.
- [5] XIE Chuan, LI Kai, ZOU Jianxiao, et al. Passivity-based design of grid-side current-controlled LCL-type grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(9):9813-9823.
- [6] 王磊,张凌博.多逆变器并网等值建模及谐振抑制优化[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):19-29.
- [7] SONG Yipeng, WANG Xiongfei, BLAABJERG F. High-frequency resonance damping of DFIG-based wind power system under weak network [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2017, 32(3): 1927-1940.
- [8] COBRECES S, WANG Xiongfei, PEREZ J, et al. Robust admittance shaping approach to grid current harmonic attenuation and resonance damping[J]. IEEE Transactions on industry applications, 2018, 54(5): 5039-5053.
- [9] ZHOU Leming, WU Wenhua, CHEN Yandong, et al. Harmonic voltage distortion damping method for parallel-connected LCL-type inverters in islanded operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 9032-9044.
- [10] AZZOUZ M A, EI-SAADANY E F. Multivariable DG impedance modeling and reshaping for impedance stabilization of active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2166-2179.
- [11] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(1):12-23.
- [12] GUO Yan, LU Xiaonan, CHEN Laijun, et al. Functional-rotation-based active dampers in AC microgrids with multiple parallel interface inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2018,54(5):5206-5215.
- [13] JIA Lei, RUAN Xinbo, ZHAO Zhiheng, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(11): 9561-9574.
- [14] 雷一,赵争鸣,袁立强,等.LCL滤波的光伏并网逆变器阻尼影响因素分析[J].电力系统自动化,2012,36(21):36-40.
- [15] 杨秋霞,李坤,王虎,等.PDFI控制下单相光伏并网逆变器的混合阻尼控制策略[J].电力系统保护与控制,2016,44(16):22-27.
- [16] 阮新波,王学华,潘冬华,等.LCL型并网逆变器的控制技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [17] 郭超,杨洪耕.考虑弱电网下逆变器稳定性的LCL滤波器参数优化方法[J].电网技术,2018,42(3):949-956.
- [18] 陈伟,张岩,屠一鸣,等.LCL型并网逆变器临界无源阻尼参数设计[J].电力建设,2022,43(1):70-77.
- [19] 陶海军,周犹松,张国澎,等.LCL型并网逆变器并联谐振机理分析及抑制方法[J].上海交通大学学报,2020,54(10):1065-1073.

#### 作者简介:

郑嘉龙(1987),男,硕士,高级实验师,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(收稿日期:2022-04-07)

(上接第34页)

- [2] 黎伟烧.浅谈低压智能复合开关的发展现状[J].电工文摘,2017(2):38-40.
- [3] 杜毅威.新能效标准下变压器的选择[J].建筑电气,2021,40(6):3-11.
- [4] 韩晗.高海拔环境对电气试验设备电场及绝缘影响研究[J].电力设备管理,2021(6):150-152.
- [5] 岑旭.谐波对电力电容器寿命及保护影响的研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [6] 金晨.低压电网无功补偿中的复合开关设计[D].合肥:安徽大学,2020.
- [7] 中国电力企业联合会.并联电容器装置设计规范:GB 50227-2017[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [8] 杨洁,王彪,王平平.ESD作用下晶闸管dV/dt触发导通规律研究[J].电波科学学报,2019,34(4):512-517.
- [9] 乐山一拉得电网自动化有限公司.复合开关步进式触发同步保护及其核心单元:201110081669.4[P].2012-11-21.
- [10] 张欢畅,王鑫,王莹玉,等.火力发电厂电气一次设计[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [11] 电力行业电力电容器标准化技术委员会.电网无功补偿配置技术导则:DL/T 2114-2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [12] 中国机械工业联合会.供电系统设计规范:GB 50052-2009[S].北京:中国计划出版社,2009.

#### 作者简介:

胡天祥(1979),男,高级工程师,主要从事配电网无功补偿技术研究及其实际工程应用;

黎军华(1979),男,硕士,工程师,主要从事电力自动化产品的研发。

(收稿日期:2022-04-14)