

# 快切在石化行业应用存在问题的思考

曹祯<sup>1</sup>, 董桂城<sup>2</sup>, 朱庆海<sup>2</sup>, 刘志雄<sup>1</sup>, 李俊鸿<sup>1</sup>

(1. 西门子电力自动化有限公司, 江苏 南京; 2. 万华化学集团股份有限公司, 山东 烟台)

**摘要:** 近几年, 随着国内石油化工行业的迅猛发展, 快速切换装置也得以在石油化工行业内大规模应用, 从而大大提高企业控制的自动化水平, 运行效果显著, 但同时也遇到了一些新的应用方式及需要解决的问题, 探索新的快速切换解决方案从而更加适用于石油化工行业具有积极意义。文章主要针对这些新的应用方式及问题思考归纳, 并结合一定理论分析及应用经验提出解决方案。

**关键词:** 快切; 石油化工; 电动机启动识别; 电机群起; 大型应用;

## Application Problems and Solutions when using High Speed Transfer in Petrochemical

Cao Zhen<sup>1</sup>, Dong Guicheng<sup>2</sup>, Zhu Qinghai<sup>2</sup>, Liu Zhixiong<sup>1</sup>, Li Junhong<sup>1</sup>

(1. Siemens Power Automation Co. LTD, Nanjing Jiangsu; 2. Wanhua Chemical Group Co. LTD, Yantai Shandong)

**ABSTRACT:** In recent years, with the rapid development of the domestic petrochemical industry, the high-speed busbar transfer devices have been widely applied in the petrochemical industry, thus greatly improving the level of automation of enterprise control, and the benefit is remarkable. Meanwhile, some new application challenges require to explore new high-speed busbar transfer solutions, to be more suitable for the petrochemical industry. This paper mainly focuses on the summarize of these new applications and challenges, and proposes solutions combining with a certain theoretical analysis and application experience.

**KEY WORDS:** High Speed Busbar Transfer; Petrochemical; Motor Group Startup; Large-scale application; Synchronous Motor

中图分类号: ??? 文献标识码: ??

## 0 引言

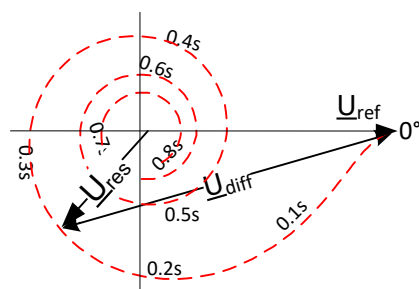
快速切换装置最初源于发电厂厂用电系统, 现已在工业系统中得到了广泛应用。石化连续性生产企业内部也拥有着大量动机负荷, 变压器或者线路故障会造成电动机负荷停止运行, 给企业带来巨大的损失<sup>[1]</sup>。近年来, 适用于工企变电站接线及运行方式的快速切换装置相继问世, 较之前采用的备自投和双电源切换模块, 快速切换装置大大提高了工业企业控制的自动化水平, 运行效果显著。

本文首先提出现阶段石油化工行业应用快切的几个典型问题, 在此基础上, 分析了这些典型问题产生的原因及影响。其次, 针对这些典型问题提出一系列解决方案。

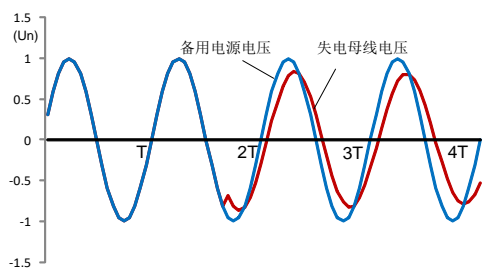
## 1 快速切换技术原理

快速切换技术的应用前提是母线上有大量的

电动机感性负荷, 当工作母线失去供电电源时, 电动机存储的能量给母线反供电, 在母线上形成残压, 其变化趋势如图 1 所示。快速切换装置以备用电源为基准, 判断母线失电后的母线残压与备用电源之间的频差、角差或压差(相量差)。当频差、角差和压差满足一定条件时, 将失电母线切换到备用电源运行。



(a) 残压向量图



(b) 某相失电残压与备用电压对比图

图 1 母线失电残压曲线

目前，快速切换装置较为推崇的两种切换模式为快速模式和同期切换模式<sup>[2]</sup>。统计得出，目前快速切换常用的整定值频差为 1Hz，相角差 30°，低电压闭锁为 70%Un，现场实践指出，快速切换模式对电动机自启动极为有利，但是由于要求太高，切换成功率太低。同期切换常用的整定值频差为 5Hz，角差为 5°~10°，压差为 30%~40%左右，但是同相捕捉模式过度依赖相角，切换时母线失电已经一段时间，再加上合闸延时，切换成功时母线电压较低，容易导致电动机负荷停转。

## 2 快切在石化企业的应用及典型问题

石化企业中所带的电动机负荷占 70%左右，其供电系统接线较为复杂，母线的出线分支较多，供电系统内部发生故障的概率较高。经统计，石化企业中母线电压波动大部分原因由以下几种类型<sup>[3]</sup>：一是母线内部故障，低压馈线和用电设备发生故障导致母线电压波动；二是电动机启动，大容量电动机（或机群）启动时导致母线电压下降；三是外部故障，外部电网发生短路故障或者解列，导致供电电源中断。

现阶段快切在石化行业应用中遇到的典型问题有以下几个：

- 快速切换模式成功率低导致负载掉电时间较长，最终可能导致电机负荷停转。
- 母线内部故障或大容量电机（或机群）启动均会引起母线电压波动，从而导致快切误启动和误切换。
- 大规模快切装置在电力系统各电压等级应用后带来电动机群群起问题，如备用电源进线过流保护误动。
- 大量高压变频器、电容器及同步电机与快切配合问题

- 系统复杂度越来越高，多于三个断路器的大型系统应用越来越多，单个快切装置难以满足需求，往往需要多个快切装置通过逻辑关联共同完成，复杂度高且可维护性差

## 3 典型问题解决方案探讨

### 3.1 快速切换模式成功率低

现阶段石化企业遇到最大的困扰是快切成功率低，虽然投入了大量资金引进快切产品，但很多情况实际动作并非快切模式，相当于把快切当作慢切用，导致负载掉电时间长，最终可能导致电机负荷停转。提高快切成功率的思路主要有两个方面：

- 整体系统方案设计优化
- 快切产品设计优化

#### 3.1.1 整体系统方案设计优化

很多大型石化企业的电力系统从 110kV 到 400V 都用到快切，因此如何解决上下级快切的配合就成为必须考虑清楚的问题。

上下级配合最简单的方案是在启动延时整定上做级差配合，越往下级快切启动延时越长，为保险起见，往往会在延时上放足够余量，10kV 及 400V 快切的启动延时可能会很长甚至一秒以上，这样一来，快速切换模式必然形同虚设，进而导致切换直接进入残压切换模式或者长延时切换模式。

更优方案是通过上下级逻辑闭锁来确保上一级快切启动时下一级快切不误动。设计框架如图 2：

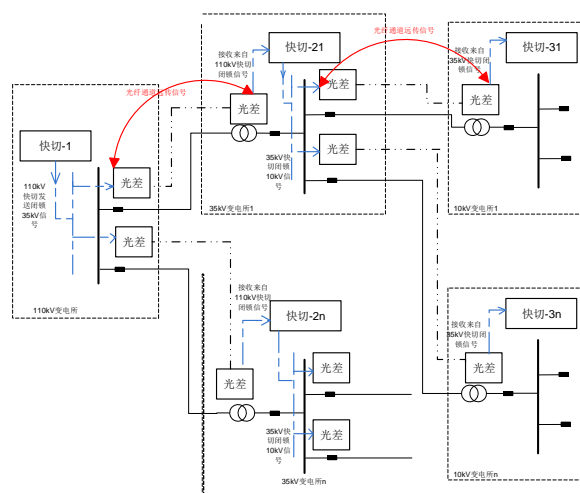


图 2 快切上下级异常启动配合示意图

上下级之间的逻辑闭锁可以借助光差保护的光纤通道传输远传信号之外，也可以通过电缆硬结

点或者 GOOSE 传输来实现，可根据实际系统工况选择最优方案。

在设计上下级联闭锁方案时，还需要考虑一些异常工况的处理，比如上级快切失败后需要解锁下级快切。

除上下级联闭锁方案外，还有以下系统优化可以在一定程度上提升快切成功率：

- 对于断路器选型，尽可能选取分合闸时间较短的断路器，可以为快速切换模式争取更多空间。
- 对于快切启动条件，尽可能用快速跳闸的保护功能来启动快切，原则上只要配了快切就要差动跳闸来配合启动。
- 尽可能减少中间环节的时间消耗。如尽可能少用出口继电器从而节省约 20ms~30ms 的跳合闸延时；如果用到 GOOSE 通讯则尽可能选择高性能数据传输，且要确保网络的数据安全及可靠性。

### 3.1.2 快切算法优化

国内常用的快切算法由快速切换和同相捕捉切换组成，其动作区域如图 3 所示。理论上快速切换可以将母线上的电力中断保持在最短的时间内并能保证电动机及其负载不会受到过度的或累积的损害，所以优选快速切换。如果快速切换的判据没有得到满足，失去快速切换的时机后同相捕捉切换将被启动，即同相捕捉切换是快速切换的后备<sup>[4]</sup>。

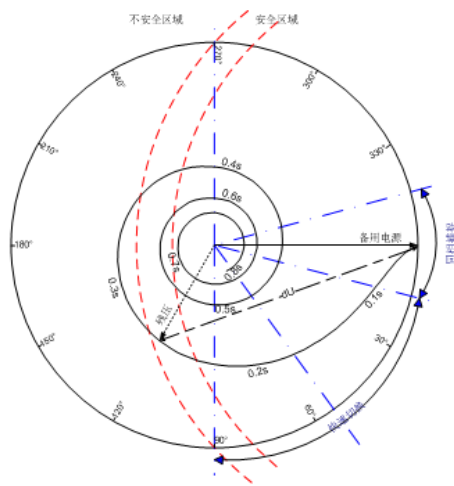


图 3 传统快切动作区域

针对快速切换和同相捕捉切换的不足，通过深入研究母线残压特性和感应电动机的静态特性，并根据 ANSI/NEMA C50.41-2012 关于电机母线快速切换的指导性原则对该算法进行了改进。该原则指出合闸时刻，电机母线残压与参考电源电压之间的

V/Hz 向量差不超过 1.33 倍标么值，因此，新型的改进算法引入母线失电后实时的电压幅值，相角以及频率等，动态计算残压和备用电源之间的角差变化率  $d\phi/dt$  以及电压幅值变化率  $dU/dt$ ，并预测 V/Hz 向量差，以确保合闸时刻的相关判据条件在定值之内，对负荷及电网的影响较小，实时快速切换的切换应用区域如图 4 所示。用户无须因残压特性的改变而调整先前的设定，方便用户进行操作。该算法引入后快切区域采用快速和实时快速两种模式，大大提高了快切成功率。

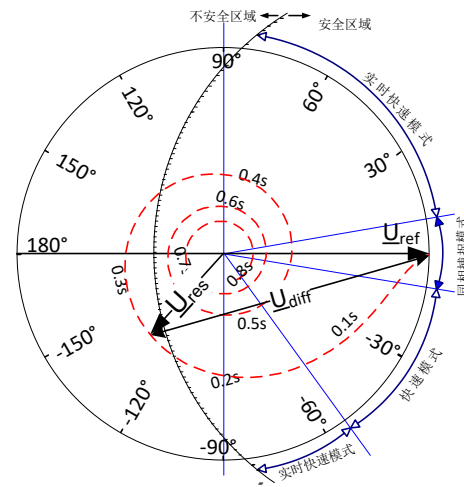


图 4 实时快速切换应用区域

## 3.2 母线内部故障或大容量电机（或机群）启动导致快切误切换

### 3.2.1 电动机启动识别

同母线失电类似，当母线上有电动机启动时，均会引起的电压突降。其电压降落与电网的运行方式、系统阻抗、电动机参数以及电动机启动方式有密切关系。仿真结果显示大功率异步电机启动可能会造成母线电压有效值下降 20%以上。与母线失电不同的是，电动机启动引起母线电压突降后，电压会逐渐趋于正常，而母线失电时残压会逐渐趋于 0V，图 5 给出了电机启动和电源失电的电压特性区别。快切装置需要根据母线电压在电机启动时和失压时突降后的不同变化趋势，对两种情况进行区分，可有效的预防在电机启动时快切装置误动的现象。

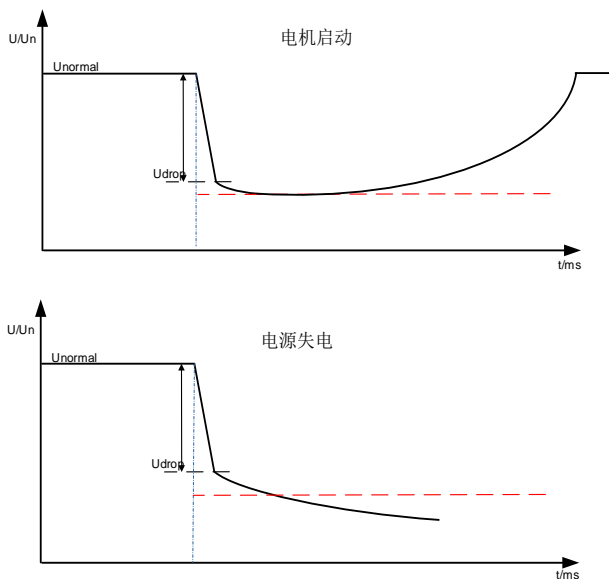


图 5 电机启动和电源失电的电压特性对比

### 3.2.2 故障识别

异常起动方式均需在母线无故障的情况下起动。在工作母线故障时，快切装置可迅速将母线切换到备用电源上，使备用电源变压器遭受一次故障冲击，同时对开关的冲击非常大，扩大事故的范围；在无法收到保护闭锁信号时，快切装置需要通过对电压模拟量信号尤其是不平衡电压的分析，来识别母线及负荷支路是否存在故障点，从而预防发生母线内部故障时快切不会误切换。

## 3.3 大规模快切应用后带来的电动机群起问题

快切在石化企业电力系统中应用的数量越来越多，应用的电压等级也越来越高，国内某些石化企业甚至将快切应用在了 220kV 电压等级。随之而来的电机群起问题也越来越突显。最直接的影响就是造成备用电源短时过负荷，进而造成保护误动作而全厂失电。

针对电机群起问题，解决思路有如下三个方向：

- 从系统设计角度优化
- 从保护产品角度优化
- 从快切方案角度优化

### 3.3.1 从系统设计角度优化

最有效的方案还是从整体电力系统设计角度考虑最大运行工况，从而确保电源容量的设计余量足够大。提高系统余量的措施可以通过多电源接入

或者增设自备发电厂来实现。

另外，从整体快切方案角度需要考虑尽可能提升企业最高电压等级进线端的切换速率，确保切换过程中电机不停转，从而确保最终切换成功后系统的冲击电流可控制在较低水平。具体措施可以通过参数整定和配置来实现，比如 220kV 及 110kV 的快切仅投入“快速切换模式”及“同相捕捉模式”，不允许投入“残压切换模式”及“长延时切换模式”。

### 3.3.2 从保护产品角度优化

为防止电机群起后备用电源被“顶跳”，最简单的措施是通过参数整定和配置实现。比如在备用电源过流保护中增设“复合电压闭锁”元件，但问题是复合电压的阈值整定原则难以把握，因为电机群起的过程是动态变化的，如果复合电压阈值整定过松可能锁不住，整定过紧又可能影响真实故障的敏感度。更好的方案是在进线保护中增加“电机群起识别算法”，根据电机群起过程的电压及电流变化特征有效识别出真正的电机群起，即确保了进线保护的灵敏度和选择性，又避免了参数整定给客户带来的困扰。

### 3.3.3 从快切方案角度优化

现阶段市面上的快切产品在判断切换条件时仅考虑了最基本的合闸条件，也即待合断路器两端压差、角差、频差，而并未考虑系统运行余量。更优的切换策略应该从系统角度考虑运行工况及系统余量分布，从而在满足最基本合闸条件的基础上有选择性地“分群分批”将电机机群切换到最合适的电源上，这样可以最大程度地将系统潮流波动控制在合理范围内。

## 3.4 高压变频器/电容器/同步电机等设备应用与快切的配合

### 3.4.1 高压变频器的应用

高压变频器内部的回路构成如图 6，“整流/逆变电路”会对电动机的交流残压返送到母线起到隔离作用，当母线上只有部分电动机配置高压变频器时，整体母线残压衰减特性仍呈指数曲线衰减，总体来说高压变频器的应用不会影响快切的理论依据。

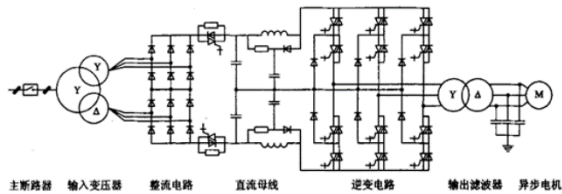


图 6 高压变频器内部回路示意图

另外，很多高压变频器都实现了“失电跨越功能”，且失电跨越时间可设置。例如 ACS5000 变频器，在失电跨越时间内（最大可设置 5 秒）电动机不会被解开，快切的时间整定需要考虑变频器的失电跨越时间，从而实现快切装置和高压变频器之间的完美配合。

### 3.4.2 高压电容器的应用

最常遇到的工程设计问题是“在快切之前是否应该把电容器切除？”某些工程规范中明确指出了需要在快切或者备用投切换之前将高压电容器切除，以确保电容器不至于过电压而损坏。

实际工程应用中，也有很多带着电容器完成切换的案例，但成功切换的前提需要确保快速切换，至少是同相捕捉切换模式动作。在快切模式下，母线残压仍保持在较高水平，且母线残压和备用电源电压之间的频差、角差都被控制在较小范围内；在同相捕捉切换模式下，虽然母线残压幅值已经有一定程度衰减，但角差被严格控制在很小范围内，所以两种切换都不会造成电容器过电压。残压切换模式动作的情况下，由于残压幅值已经降低到额定电压的 30% 以下，所以电容器保护自带的低电压保护会提前将电容器从系统中切除。

### 3.4.3 同步/异步电机混用情况下的切换策略

现阶段很多石化企业的 10kV 或 6kV 母线上混带有同步机和异步电动机，同步机可能是同步电动机或者自备发电机。

同步电机和异步电动机在失电后的动态模型存在巨大差异。异步电动机可以在远离额定工况下，例如 80% 额定转速，直接并网并达到额定运行状态。甚至部分小容量异步电机，支持零转速直接并网启动，即冷启动。经典的快速切换理论基于异步电动机模型，可以保证在较宽区域（压差、频差、角差等条件）安全并列到备用电源上并达到额定运行状态。而同步电机由于独立励磁系统的存在，非同步条件下的合闸，同步过程会出现比较大持续时间比

较长的扭矩震荡。

依据 IEEE Std C50.13-2014，同步电机同期并列条件建议条件如下：

Breaker closing angle	$\pm 10^\circ$
Generator side voltage difference relative to system	0% to +5%
Frequency difference	$\pm 0.067$ Hz

不正确的同期并列会造成系统震荡，甚至造成同步机永久性损伤，所以同步电机的操作规程明确禁止重合闸操作，快切操作则是未定义的灰色地带。然而母线上同时存在同步机和异步机的场景，相关理论几乎空白，如何处理同步/异步电机混用情况下的快切切换策略需要研究。

为确保切换过程中同步机和系统安全性，严格符合操作规定的策略是把同步异步电机混用的切换分解为多个理论和实践都较为成熟的操作：1. 异常识别启动快切，将母线从主电源系统中断开。2. 在断开主电源同时，或者合于备用电源前，切除所有同步电机。3. 按照纯异步电机母线切换策略，合于备用电源，完成异步电机群快切。4. 待母线电压稳定后，将同步电机调整到同期并列条件下，逐一完成并网。

上述方案最大缺点是同步电机退出运行时间较长，对相关功能影响较大，完成切换需要配合调频调压及同期并列装置完成并网，操作周期较长，复杂度较大，不利于保证安全的情况下提高成功率。因此不切除同步电机的切换策略可行性研究具有积极意义。

应用案例中比较典型的是 110kV 母线经过变压器混带有 10kV 异步电动机母线和 10kV 同步发电机母线，如此，110kV 母线及以下元件组成的子系统可被认为是带有分布式电源的微网。通过 PSCAD 仿真显示，110kV 子系统相比电机机端母线，更容易达到功率平衡，电源断开后频差角差等切换合闸的条件也更有利，不切除同步发电机的快切，不仅降低了操作复杂度，同时还提高了切换性能和成功率。因此从工程应用角度，可以在一次系统设计时为负荷匹配相近容量的同步发电机，快切启动后不切除同步电机，在 110kV 母线进行快切操作。为确保同步电机的安全性，合闸时刻的压差、频差、角差等条件需要遵循同步电机同期并列的条件。

### 3.5 系统复杂度越来越高，多于三个断路器的大型系统应用越来越多

现阶段单台快切装置适用的典型系统接线如图 7，包括单母双进线、单母分段双进线、单母三进线。

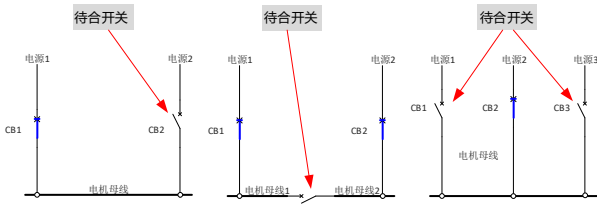


图 7 快切适用典型系统

上述几种典型系统接线包含的断路器数量不超过三个，运行工况和切换逻辑都相对简单。但近些年随着快切在 110kV 甚至 220kV 应用的扩展，快切逻辑需要考虑更加复杂的运行工况，比如双母双分段及多电源接入的复杂系统接线。图 8、图 9、图 10 是几种石化行业典型的大型应用场景。针对图 8 系统接线，通常需要三台快切装置通过硬结点连接或通过 GOOSE 传输互锁信号来完成整体切换逻辑，类似解决方案对于图 9 系统接线需要 6 台快切装置联合完成，对于图 10 系统接线需要更多台快切。

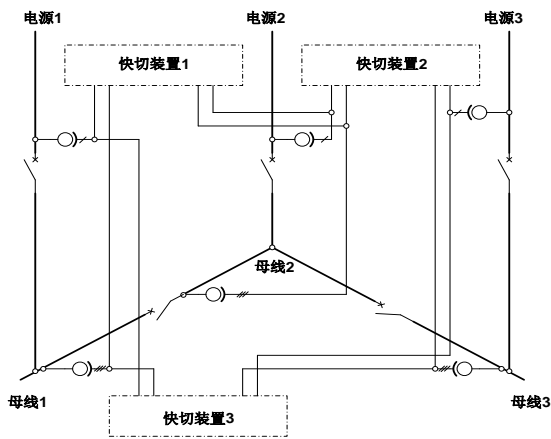


图 8 三母三进线接线方式

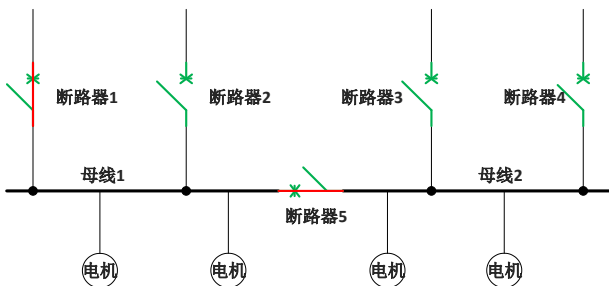


图 9 单母分段四进线接线方式

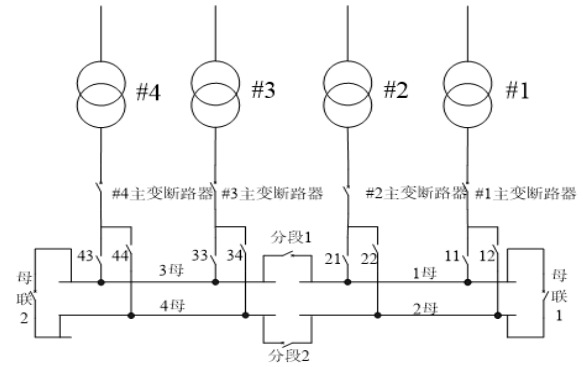


图 10 双母双分段四进线接线方式

此类解决方案复杂度非常高，对于用户来说存在很多弊端：

- 整体方案的硬件成本昂贵。
- 从设计、配置、接线、工程调试角度都非常复杂。且如果系统在后期有任何修改或扩展，会带来大量的硬件接线和实现逻辑的调整，费时费力，可操作性很低。
- 由于整体方案依赖硬结点连接或 GOOSE 传输，所以受 EMC 干扰及通讯数据干扰的影响较大。
- 故障录波存于各装置，遇到问题不便对快切过程有整体的分析。

更优解决方案应该以实际应用为中心，从以下几个方面考虑提高易用性：

- 单台装置独立完成全部快切逻辑，避免多台装置间开放互锁逻辑，大大降低配置、接线、调试的复杂度，同时也可以规避 EMC 干扰及通讯数据干扰带来的影响。
- 配置简单，化繁为简。根据企业的实际运行方式计划实现最优电源切换策略。
- 设置可视化接口。当系统中有多组备用电源时，预定义切换优先级，并实现客户定制化服务。
- 软硬件实现模块化设计，后期扩展简单方便。从而确保在系统扩展后原有接线及软件逻辑均无需修改。

以图 9 系统为例，其典型切换方向如图 11 所示，在快切装置中定义 4 个断路器及 3 个切换方向对应的断路器，如所需方向有变化，只需更改或增加切换方向即可，无需二次接线。

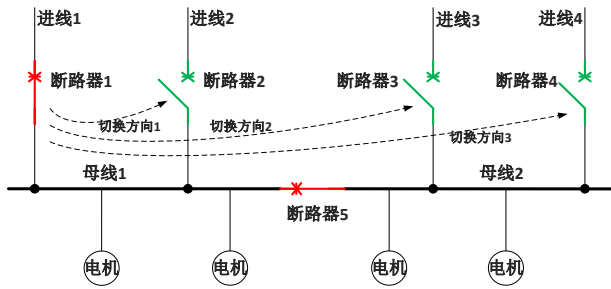


图 11 单母分段四进线典型切换方向

以上设计理念提供可视化的优先级定义，如图 12 所示，根据系统设计定义切换方向的优先级，当快切启动时即可自动按优先级启动相应的切换方向，从而避免了复杂的闭锁逻辑。

	进线1为工作电源
优先级1	切换方向2
优先级2	切换方向3
优先级3	切换方向1

图 12 切换方向优先级定义

#### 4 结语

石油化工企业的供用电系统和操作流程比较复杂，且石油化工企业具有易燃易爆、连续性生产等特点，对供电可靠性及安全性要求极高。一旦出现供电的中断，会造成生产停止，甚至会危及人身、设备的安全，造成严重的后果。这就对应用在石油化工行业中的快速切换装置提出了更高的要求，因此探索新的快速切换算法和模式，并采用适合于石油化工行业的切换模式和整体解决方案具有积极的意义<sup>[5]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 苗世华, 李杰, 宗洪良. 工业企业电源快速切换装置在低压母线的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (6): 76-79.
- [2] 党杰, 刘涤尘, 叶念国. 发电厂厂用电源切换技术研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (6): 89-90.
- [3] 梁俊涛, 陈曙玲. 厂矿企业电源无扰动切换方案的探讨[J]. 第十届全国石油和化学工业电气技术年会, 2009.
- [4] 秦雷鸣, 曹祯等. 新型电源快速切换方法的研究与实现[J]. 电气技术, 2012, 6: 16-20.
- [5] 冯小兰, 李杰等. 新型电源快速切换装置在工业企业变电站的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (4): 139-142.

收稿日期: 2020-08-xx

作者简介:

曹祯 (1982-), 男, 西门子电力自动化有限公司, 继电保护研发方向, 分部门经理, 电话: 13770689632, 邮箱: zhen.cao@siemens.com。地址: 江苏省南京市江宁区挹淮街 37 号 (211100)

董桂城 (1971-), 男, 万华化学股份有限公司, 高级工程师, 电话: 18953558865, 邮箱: gcdong@whchem.com。地址: 山东省烟台市开发区重庆大街 59 号 (264006)

朱庆海 (1979-), 男, 万华化学股份有限公司, 高级工程师, 电话: 18153517229, 邮箱: qhzh@whchem.com。地址: 山东省烟台市开发区重庆大街 59 号 (264006)

刘志雄 (1980-), 男, 硕士研究生, 西门子电力自动化有限公司, 继电保护研发方向, 研发工程师, 电话: 15094311045, 邮箱: zhixiong-liu@siemens.com。地址: 江苏省南京市江宁区挹淮街 37 号 (211100)

李俊鸿 (1991-), 男, 西门子电力自动化有限公司, 继电保护研发方向, 研发工程师, 电话: 15295778996, 邮箱: junhong.li@siemens.com。地址: 江苏省南京市江宁区挹淮街 37 号 (211100)