

[电能质量]

MS双电源快速切换成套装置在配电网自愈线路的应用

文/樊强强¹ 陈作伟¹ 赖汉柯¹ 崔 琪²

1. 深圳供电局有限公司; 2. 安徽大学

提出两种MS双电源快速切换成套装置在配电网自愈线路内部的安装方案。首先详细介绍了该装置的结构及原理, 然后介绍并分析了两种安装方案的优劣势, 最后通过实际算例验证, 装置可在5 ms内切换, 说明了方案的有效性, 为企业提供了参考与解决思路。

由于电网发展逐步多元化, 电源侧风电、光伏等新能源的广泛接入, 用户侧变频器、逆变器等非线性电气设备的大量运用, 催生了非常复杂的电能质量扰动问题。为减少用电设备出现故障, 保证生产的正常进行, 电网企业在配电网中积极运用自动化技术, 建成了配电网自愈系统, 进一步提高了供电可靠性。

电压暂降是指因雷击、短路或其他原因造成的电网电压有效值降低至10%~90%, 且持续时间为10 ms~1 min的现象, 造成企业低压进线断路器出现失电压脱扣, 严重的会引起重要负荷停机事故, 导致企业生产被迫中断, 造成巨大的经济损失。由于电压暂降发生频次高、具有较强的随机性、危害性强等特点, 暂无彻底有效的解决方案, 许多电力用户饱受其困扰。

目前已有的电压暂降治理策略主要有双电源切换方案, 即当一路电源出现电压暂降等故障时, 通过切换开关将负荷切换至另一条母线上, 从而实现不同母线间的负荷转移。

MS双电源快速切换成套装置(简称“MS快切”)是一种新型的快切装置将MS快切装置与配电网自愈系统相结合, 可以有效降低电压暂降对用户造成的影响。快速切换装置在配电网自愈线路中的安装位置将直接影响用户供电的可靠性、经济性与

实用性, 因此需要综合用户数量以及他们分别对供电质量的敏感程度进行分析, 研究MS快切装置在配电网自愈系统中的安装方案, MS快切装置在配电网自愈线路上的安装方案同样是研究企业供电方案的重点。因此, 本文基于MS快切装置, 首先介绍了其工作原理与基本拓扑结构, 提出了两种MS快切装置安装在配电网自愈线路的方案并分别分析其优点与缺陷, 最后根据实际案例, 验证了MS快切装置的快速性与准确性, 同时证明了所述安装方案的有效性, 为企业高质量供电提供了新的解决思路。

MS快切结构及检测算法

MS双电源快速切换成套装置的主体部分包括基于涡流斥力驱动的快速开关、MS-820快速切换控制器及人工过零装置。涡流斥力开关是一种新型切换开关, 是基于涡流斥力原理的操作机构, 具有运动时间短、可靠性高、结构简单及成本低廉等优势。MS-820快速切换控制器为MS快速装置的“大脑”, 负责协调线路中多个涡流斥力开关的通断, 它将综合电压有效值检测模块与暂降源定位模块的运算结果对比, 对涡流斥力开关发出开断指令。人工过零装置为一个RLC谐振电路, 与涡流斥力开关相互结合, 可以在切断电路时产生高频大电流, 与

流经快速开关的电流互相抵消，使得切换过程中流经快速开关的电流为零，从而达到关断快速开关的目的。

1. 基于涡流斥力驱动的快速开关

普通断路器、SSTS等设备存在切换时间长、占地面积大和产品应用成熟度低的缺陷。基于涡流斥力驱动的快速开关的切换装置性能优越，产品应用成熟度高，是治理电压暂降等电能质量问题的首要选择。三种不同装置应用于双电源快速切换方案的利弊见表1。

表1 不同切换方案的比较

比较维度	双电源快速切换方案		
	基于涡流斥力驱动快速开关的快切装置	ABB切换控制器+普通断路器	SSTS固态切换开关
整体切换时间/ms	≤10	≥100	≤10
产品价格	中	略低	较高
产品应用成熟度	高	高	较低
占地面积	中	中	较高
运行发热损耗	低	低	较高

基于涡流斥力驱动的快速开关的基本原理：当检测到动作信号时，预先充电完成的电容会向分闸或者合闸的线圈放电，变化的电流产生变化的磁场，线圈中产生的脉冲电流激发了交变的磁场，同时在涡流盘上感应出反向的涡流，涡流产生的磁场与线圈电流产生的磁场相互作用产生电磁斥力，产生初始加速度使得触头运动，从而实现了开关的快速动作。基本结构如图1所示。

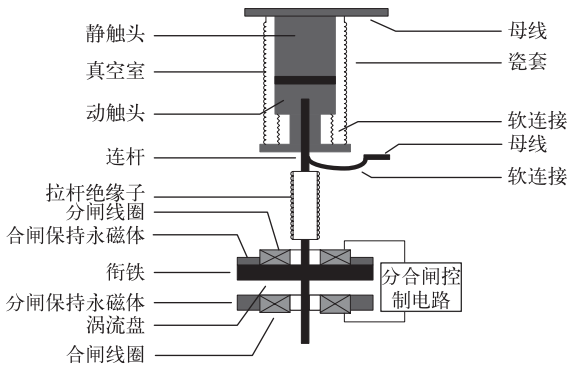


图1 基于涡流斥力原理的快速开关结构

产生分合闸脉冲电流的储能模块充放电回路如图2所示。当接收到切换指令后，晶闸管导通电容储能得到释放，迅速在涡流盘上建立磁场，斥

(吸)力带动拉杆实现分（合）闸。

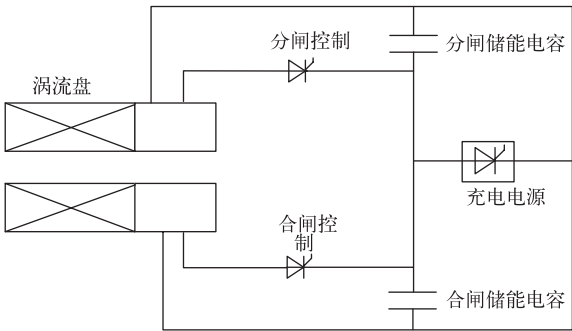


图2 储能模块充放电回路结构简图

2. 人工过零方案

基于人工过零技术的典型直流真空分断技术方案如图3所示。其中S为基于涡流斥力的快速开关。换流电路CLR中，脉冲电容C按图示参考方向预先充电储能，电阻R为等效线路电阻，电感L用于限制脉冲电流的变化率。电容C的预充电电压一般取为直流系统电源电压值；根据直流系统储能大小及分断过电压要求，压敏电阻R_V由多组高能压敏电阻单元进行适当的串并联构成。

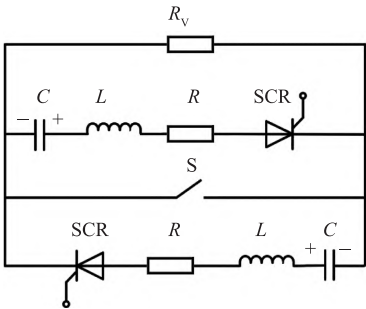


图3 人工过零装置结构示意图

- 1) 正常工作阶段，快速开关S闭合导通负荷电流，晶闸管SCR断开，电容C上预先充电。
- 2) 当系统发生故障时，控制元件通过电流检测设备对故障电流的幅值和相位进行判断，并发出快速开关S的开断命令，根据电流方向选择性导通晶闸管。二阶电路规律产生脉冲大电流，迫使S电流过零分断，电流电压计算式为

$$\begin{cases} u_c(t) = \frac{U_{c0}\omega_0}{\omega} e^{-\delta(t-t_2)} \sin[\omega(t-t_2) + \beta] \\ i_c(t) = \frac{U_{c0}}{\omega L} e^{-\delta(t-t_2)} \sin[\omega(t-t_2)] \end{cases} \quad (1)$$

式中，U_{c0}为电容C预充电电压，其他参数为

$$\begin{cases} \delta = \frac{R}{2L} \\ \omega^2 = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2 \\ \omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_c(t) = U_0 + \frac{I_r}{\omega C} e^{-\delta(t-t_3)} \sin[\omega(t-t_3)] + \frac{\omega_0(U_r - U_0)}{\omega} e^{-\delta(t-t_3)} \sin[\omega(t-t_3) + \beta] \\ i_c(t) = \frac{I_r \omega_0}{\omega} e^{-\delta(t-t_3)} \sin[\omega(t-t_3) - \beta] + \frac{C \omega_0^2 (U_0 - U_r)}{\omega} e^{-\delta(t-t_3)} \sin[\omega(t-t_3)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, U_0 为分闸时电源瞬时电压; U_r 、 I_r 分别为 $t=t_3$ 时由式 (2) 确定的电容电压和电流值, 其他参数为

$$\begin{cases} \delta = \frac{R + R_0}{2(L + L_0)} \\ \omega^2 = \frac{1}{(L + L_0)C} - \left(\frac{R + R_0}{2(L + L_0)}\right)^2 \\ \omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \end{cases} \quad (4)$$

4) 当换流回路中的电磁能量被电阻 R_V 完全吸收以后, 分断过程结束。

3. 电压暂降检测原理

目前MS快切装置普遍采用的电压有效值检测是基于dq变换的方法, 包括信号构造、abc/dq变换、低通滤波以及电压有效值计算等环节, 具体过程如图4所示。

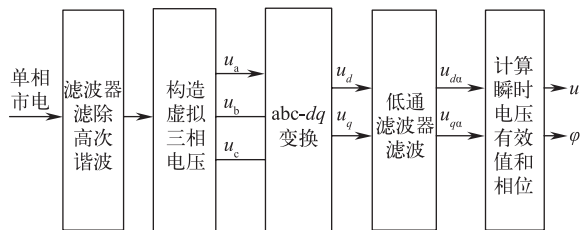


图4 电压有效值检测算法原理图

基于瞬时无功功率理论的dq变换方法只适用于三相对称电力系统电压扰动检测, 对于单相故障引起的电压暂降, 不能直接使用该方法。以单相电压 U_a 为例, 将其延迟 60° 得到, 然后根据 $U_b = -U_a - U_c$, 从而构造出三相电压。同时, 通过锁相环 (PLL) 得到A相的相位。经过abc/dq变换后, 可以得到构造三相电压的分量。将这两个分量通过低通滤波器后, 得到直流分量 U_{da} 、 U_{qa} , 最后计算得到电压有效值。abc/dq变换的计算公式以及A相电

3) 此后电流完全转移至换流电路中, 在系统电源作用下, C按照式 (3) 二阶电路规律反向充电, 由此引发S两端电压增加到压敏电阻 R_V 开通后, R_V 开通耗能, 即

压有效值、相位计算公式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{u_{da}^2 + u_{qa}^2} \quad (6)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{u_{qa}}{u_{da}}\right) \quad (7)$$

4. 暂降源定位原理

目前暂降源的定位主要是指上游、下游的定位, 这类方法主要是利用数据采样单元记录到的电压、电流波形, 计算相关特征量来判断故障源 (一般为电压暂降源) 相对于监测点的位置, 上游一般指系统侧, 下游为用户侧。目前应用在MS快切装置内部的定位方法主要为基于扰动功率及扰动能量的定位法。

扰动功率 (DP) 与扰动能量 (DE) 的定义为

$$DP = p(t)_f - p(t)_s \quad (8)$$

$$DE = \int DP(t) dt \quad (9)$$

式中, $p(t)_f$ 为扰动期间三相瞬时功率; $p(t)_s$ 为稳态三相瞬时功率。

根据扰动能量最终值 DE_{end} 的极性与扰动功率初始峰值 $DP_{firstpeak}$ 的极性判断上下游, 极性为正, 故障源在上游; 极性为负, 故障源在上游, 如果两个指标极性不一致, 定位可能出错。

MS快切装置在配电网自愈线路的应用场景分析

1. MS快切安装在配电网自愈主干线路

图5为配网线路安装MS快切位置, 图中红色为

合闸，绿色为分闸，智能柜都为断路器柜，负荷2和负荷3为企业重要电源负荷。正常运行时，变电站1主供负荷1。负荷2和负荷3，变电站2为负荷4的主供电源。

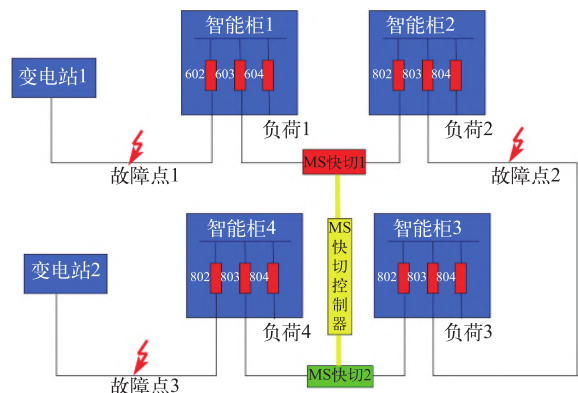


图5 配网自愈主干线路安装MS快切示意图

当MS快切装置主供电源变电站1出现电压暂降或失电故障时（如图5故障点1所示），MS快切装置可实现5 ms内动作，即MS快切1分闸，MS快切2合闸，将负荷2和负荷3切入到备用电源变电站2恢复供电，而5 ms的电压暂降时间均不会使用户10 kV电动机及0.4 kV变频及低压变频、接触器、继电器出现跳闸及停机事故，不会造成负荷2和负荷3停产损失。由于变电站1和变电站2出线线路为自愈线路，当发生故障点1故障时，变电站1站内开关跳闸，自愈启动，断开智能柜1的602开关，隔离故障，由于MS快切1分闸，导致自愈失败，负荷1将受到停电影响。

如果故障发生在故障点2，MS快切装置将会闭锁，即MS快切1为合闸，MS快切2分闸，线路自愈启动，断开智能柜2的603开关，断开智能柜3的603开关，隔离故障，由于MS快切2分闸，导致自愈失败，负荷3将受到停电影响。

如果故障发生在故障点3，MS快切装置不受影响，即MS快切1为合闸，MS快切2分闸，变电站2站内开关跳闸，自愈启动，断开智能柜4的602开关，隔离故障，由于MS快切2分闸，导致自愈失败，负荷4将受到停电影响。

通过分析该方案可以发现，该方案在主供电源线路出现故障时有效地保证重要企业生产不受外部电源故障和电压暂降的影响，但与配电网自愈系统相冲突，配电网自愈系统可以在配电网故障后1.5 s

内实现故障定位、故障隔离及非故障区域自动复电。如果MS快切安装在配电网自愈主干线路，故障点发生在配电网线路的主干线路上，配电网自愈系统自动隔离故障，但无法实现非故障区域快速复电，造成部分非重要用户受停电影响，无法通过自愈来快速复电。

2. MS快切安装在企业配电线路

图6为企业配电线路安装MS快切位置，图中红色为合闸，绿色为分闸，智能柜都为断路器柜，负荷2和负荷3为企业重要电源负荷，正常运行时，仍为变电站1主供负荷1、负荷2和负荷3，变电站2为负荷4的主供电源。

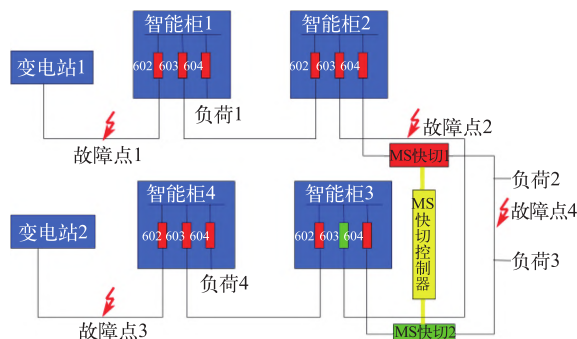


图6 企业配电线路安装MS快切示意图

当故障发生在故障点1时，MS快切装置动作，即MS快切1分闸，MS快切2合闸，负荷2与负荷3不受故障1的影响，变电站一站内开关跳闸，自愈启动，断开智能柜1的602开关，合上智能柜3的603开关，自愈成功，用户不受停电影响。

当故障发生在故障点2时，MS快切装置不动作，断开智能柜2的603开关，用户不受停电影响。

当故障发生在故障点3时，MS快切装置不动作，自愈启动，断开智能柜4的602开关，合上智能柜3的603开关，用户不受停电影响。

当故障发生在故障点4时，MS快切装置闭锁，断开智能柜2的604开关，负荷2和负荷3受停电影响，用户自身企业配电线路故障。

通过分析此方案可以发现，MS快切装置安装在企业配电线路，与配电网自愈系统不冲突，既可以有效地保证重要企业生产不受外部电源故障和电压暂降的影响，保证企业不会造成停产损失，又能够保证配电网自愈系统在配电网故障后1.5 s内实现故障定位、故障隔离及非故障区域自动复电。其

缺点是对主电源与备用电源的联络开关选择有限制,同时需要对企业内部电网进行改造,加大资金投入。

案例分析

某地配电网自愈线路中存在四个用户,分别由两个10 kV变电站对其进行供电。该地还装有MS双电源快速切换成套装置,接线方案为MS快切安装在配电网自愈主干线路,用户2和用户3为精密仪器加工制造企业,属于重要电力用户。正常运行时,变电站1主供用户1、用户2和用户3,变电站2为用户4的主供电源。

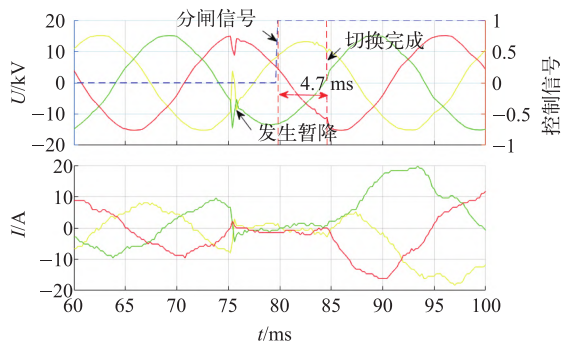
在三个不同的时间点内分别在图5所示中的故障点1、故障点2、故障点3的位置出现电压暂降故障,三次故障中受保护的用戶上的供电电压、电流波形如图7所示。

由图7可知,当电压暂降发生时,该地配电网自愈系统中安装的MS快切装置可以有效切换,有效保障敏感用户的不间断供电。三次故障中,控制分闸信号至切换柜到整个切换过程分别用时4.7 ms、4.6 ms与4.8 ms,从出现电压暂降到切换供电电源至备用电源总过程用时均不超过10 ms。根据电流波形还可以看到,整个切换过程中,流经负荷的电流较小,接近于零,说明人工过零装置可靠运行,避免了切换过程中出现电弧,从而导致人身事故或设备的损坏,验证了该装置的有效性。

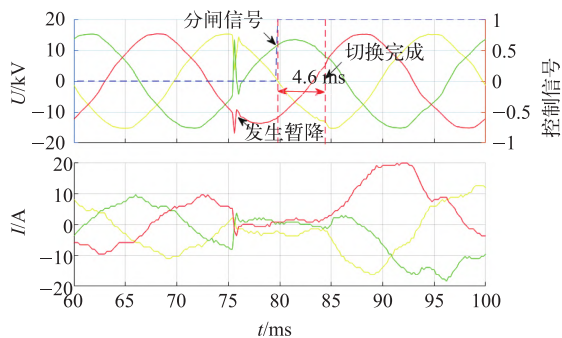
结束语

本文针对MS双电源快速切换成套装置,首先介绍了内部主要结构与算法,包括快速开关结构、电压有效值计算原理以及故障源定位原理;其次根据主备电源实际应用场景,分析了两种MS快切装置接入配电网自愈线路的安装方案,分别介绍了两种不同方案中故障点出现在不同位置时的MS快切装置的切换逻辑;最后通过某地区实际安装算例,进一步验证了所述的MS快切装置安装方案的有效性,MS快切装置均在5 ms内迅速切换,保障了敏感负荷的不间断供电,保障了重要用户生产的正常运行,避免了因电能质量事故而造成的经济损失,充分说明了安装方案性能优越。

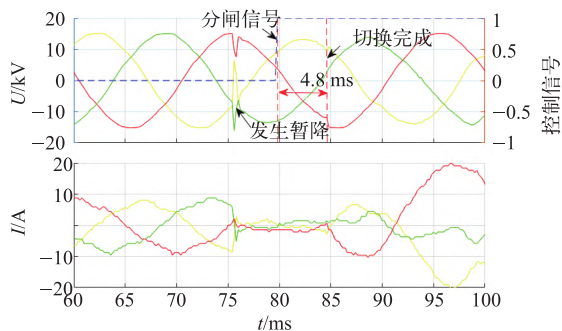
文章提出的两种MS快切装置安装方案不仅提升



(a) 第一次故障时电压电流波形



(b) 第二次故障时负荷电压电流波形



(c) 第三次故障时负荷电压电流波形

图7 发生故障时负载上电压与电流波形

了用户满意度,而且增加了企业经济效益,充分运用了配电网自愈系统和MS双电源快切装置,既可以治理重要企业的电压暂降,又可以用于为公用线路的其他用户提供可靠用电,实现用户与企业双赢。

EA

(收稿日期:2022-2-19)

参考文献

- [1] 刘广艳,何春.简述动态电压恢复器(DVR)在配电网中的应用[J].电气时代,2022,488(5):51-55.
- [2] 孙建军.现代配电网电压暂降问题及其运行韧性提升[J].电气应用,2019,38(3):4-7.