

# 面向配网保护的集分联合馈线自动化控制方法

黄鸣宇<sup>1</sup>, 祁升龙<sup>1</sup>, 芦翔<sup>1</sup>, 周卓<sup>2</sup>, 蒋宏图<sup>2</sup>, 张新松<sup>3</sup>

(1.国家电网宁夏电力公司 电力科学研究院, 银川 750002;

2.上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233; 3.南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:**馈线自动化技术(Feeder Automation, FA)作为配电网安全运行的重要保障, 在提高供电可靠性方面有着至关重要的作用. 针对双电源配电网三相短路故障, 在集中式和分布式馈线自动化控制的基础上提出了一种集分联合馈线自动化控制方法, 即通过配电终端上下游间的交互通信快速定位并隔离故障, 再经主站控制联络开关, 下发控制命令, 恢复非故障区供电. 与集中式馈线自动化控制方法相比, 所提集分联合馈线自动化控制方法在保留主站检测, 遥控功能的前提下具有更快的故障区域隔离和供电恢复速度.

**关键词:**集分联合控制; 馈线自动化; 配电网; 配电终端; 电网故障

**中图分类号:** TM771

**文献标志码:** A

随着电力用户对供电可靠性的需求日益提高, 馈线自动化技术(Feeder Automation, FA)因其在维持配电网稳定性方面的重要作用受到广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 根据对配电网故障处理方式的不同, 馈线自动化技术大体可分为就地式 FA, 集中式 FA, 分布式 FA 三类. 就地式 FA 技术<sup>[5-6]</sup>主要基于具有重合闸功能的开关来实现一些简单的故障处理, 其仅依靠本地的电气信息得到开关控制逻辑, 达到隔离故障, 部分恢复供电的目的, 大多适用于偏远的农村地区等, 是我国最基本的 FA 模式. 集中式 FA 技术<sup>[7-9]</sup>需要配电终端将电压、电流等电气信息提交到配电主站, 主站通过拓扑计算实现精确故障定位, 然后下发开关控制命令, 最终实现故障的隔离, 恢复非故障区供电. 集中式 FA 系统不仅可以在配电网故障时启动, 在配电网正常运行时也具有监测和遥控等作用. 但是, 集中式 FA 系统需要建设主站和完备的通信系统, 工程造价比较高. 同时, 系统的可靠性过度依赖于电气信息的准确完成度, 对于一些结构复杂、数据量较大的配电网故障问题, 集中式 FA 系统处理时间过长. 分布式 FA 技术<sup>[10-15]</sup>不需要主站对全局信息进行集中处理, 其实现方式主要靠配电终端设备(Feeder Terminal Unit, FTU)上下游之间的相互通信快速隔离故障区, 恢复供电. 然而, 分布式 FA 系统在故障处理过程中对通信质量的要求较为严格, 需要建设专门的通信网络.

本文在分析集中式 FA 和分布式 FA 系统运行特性基础上, 提出了一种集分联合馈线自动化控制策略. 该策略中配电网故障的检测与隔离由上下游配电终端设备之间的交互通信实现, 非故障区供电的恢复由配电主站对全局信息综合分析后完成. 搭建了双电源配电网模型, 并对三相短路故障下的系统运行性能进行分析, 运行结果验证了所提方法的有效性.

## 1 集中式和分布式 FA 系统控制分析

集中式 FA 系统的基本部署结构如图 1 所示. 部署结构分为 3 层, 分别为终端层、通信层、主站层. 终端层包括一次设备和配电终端, 主要负责收集配网状态信息和执行 FA 开关逻辑控制; 通信层采用以太网通信或者光纤通信, 负责电气信息的传输; 主站层对采集的信息进行分析, 制定馈线自动化策略.

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-04-18.

基金项目: 国家自然科学基金(51877112)

作者简介: 黄鸣宇(1980-), 男, 江苏南通人, 国家电网宁夏电力公司正高级工程师, 研究方向为配电自动化, E-mail: 28331838@qq.com.

通信作者: 蒋宏图(1972-), 男, 江西宜春人, 博士, 研究方向为配电自动化技术管理, E-mail: 1715401967@qq.com.

集中式 FA 系统对双电源配电网故障区域的判别公式可归纳如下:

$$i_{FTUj} \geq I_e, \quad (1)$$

$$|i_{FTUj} - i_{FTUj+1}| \geq 2I_e, \quad (2)$$

$$|i_{FTUj} - i_{FTUj+1}| \geq I_e, \quad (3)$$

式中,  $i_{FTUj}$  为第  $j$  个配电终端处检测到的电流,  $I_e$  为电流限定值. 若配电终端上检测到的电流大于限定电流值  $I_e$ , 则定义流过对应开关的电流为故障电流; 闭环时, 若相邻配电终端之间的故障电流之差的绝对值大于等于  $2I_e$ , 则定义对应开关所包含区间为故障段. 开环时, 若相邻配电终端之间的故障电流之差的绝对值大于等于  $I_e$ , 则定义对应开关所包含区间为故障段.

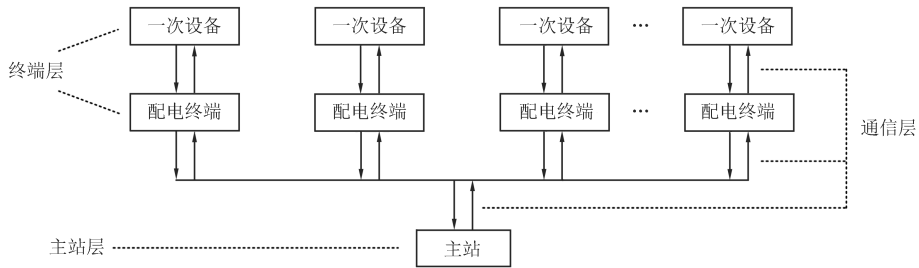


图1 集中式FA的部署结构

Fig.1 The schematic diagram of the centralized FA

集中式 FA 处理逻辑如图 2 所示, CB1, CB2 为断路器出线开关, S1~S6 为开关. 在每个开关处都连接一个配电终端 FTU 用来检测开关处的电流信息, 并和主站进行通信. 在图 2 中, 当配电网闭环运行时, S2 和 S3 之间发生三相短路故障, 所有配电终端检测到的电流均满足(1)式, 每个开关处均可检测到故障电流, 变电站 A, B 的出线开关 CB1, CB2 跳闸, 主站接收到跳闸保护信息后, 开始对配电终端收集到的异常电流信息进行分析. 由于流过 CB1-S2 的故障电流与流过 S3-CB2 的故障电流方向相反. 根据(2)式, 可把故障定位于 S2 与 S3 之间. 配电主站发出命令, FTU3 和 FTU4 分别跳闸 S2 和 S3, 隔离故障. 变电站出线开关重合闸, 对非故障区恢复供电. 当配电网开环运行时(联络开关 IS1 处于分闸状态), S2 与 S3 之间发生三相短路故障, 配电终端 FTU1~FTU3 检测到的电流满足(1)式, CB1, S1, S2 可以检测到故障电流, 变电站 A 出线开关 CB1 跳闸, 配电主站接收到 CB1 的开关状态变化信息后, 将异常电流信息上报到主站分析. 由于 S2 上有较大的故障电流, 而 S3 上无电流, 根据(3)式, 即可把故障定位于 S2 与 S3 之间. 配电主站下发控制命令, FTU3 和 FTU4 分别跳闸 S2, S3, 隔离故障区, 同时联络开关 IS1 合闸, 变电站 A 出线开关重合闸, 恢复供电.

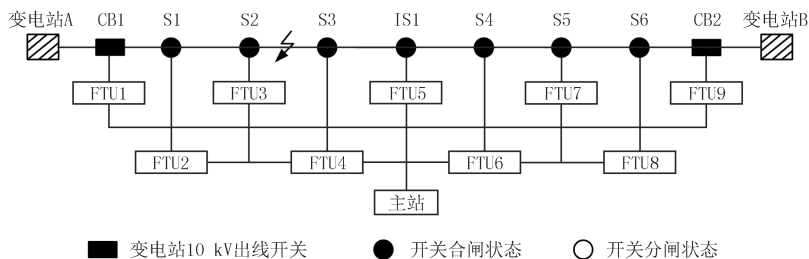


图2 集中式FA控制逻辑

Fig 2 Control logic for the centralized FA

分布式 FA 与集中式 FA 的结构大体相同, 其主要通过配电终端上下游之间的实时通信实现故障隔离, 恢复非故障区供电. 分布式 FA 处理逻辑如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 每个开关处都连接相应的配电终端, 配电终端上下游之间可实现实时交互通信. 当供电网闭环运行, S2 和 S3 之间发生三相短路故障时, 所有配电终端检测到的电流都满足(1)式. 每个开关处均可检测到较大的故障电流, 变电站 A, B 出线开关 CB1, CB2 跳闸, 由于流过开关 S2 与 S3 的电流方向相反. 根据(2)式, 即可把故障定位与 S2 与 S3 之间, 配电终端 FTU3 和 FTU4 分别向 S2 和 S3 发出跳闸命令隔离故障. 变电站 A, B 出线开关重合闸, 非故障区供电恢复.

当配电网开环运行时,S2 与 S3 之间发生三相短路故障,配电终端 FTU1~FTU3 检测电流满足(1)式,流过每个开关的电流具有以下特性:CB1,S1,S2 中可检测到故障电流.它们具有相同的方向,且电流的幅值增加.由于联络开关 IS1 处于断开状态,S3 中无电流.正常负载电流流经 S4,S5,S6,CB2.由于 S2 上有故障电流,S3 上无电流.根据(3)式,即可把故障定位 S2 与 S3 之间,然后配电终端 FTU3,FTU4 发出控制命令跳闸 S2,S3.故障隔离后,配电终端 FTU5 和 FTU1 分别向联络开关 IS1 和变电站 A 出线开关 CB1 发出合闸命令,快速完成非故障区的供电.

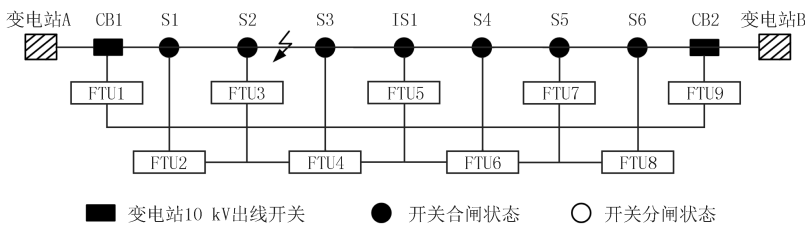


图3 分布式FA控制逻辑

Fig.3 Control logic for the distributed FA

## 2 集分联合 FA 保护控制策略

集中式 FA 控制策略需要配电主站综合分析全局信息后才能下发控制命令,故障响应速度偏慢;分布式 FA 控制策略只需根据配电终端上下游间通信即可隔离故障,恢复供电,但是无法对配电网进行检测和遥控.在集中式 FA 和分布式 FA 控制策略基础上,提出了一种集分联合 FA 控制策略,即故障识别以及隔离由配电终端上下游间的交互通信完成,非故障区供电的恢复由主站对全局信息合理分析后下发相应的联络开关控制命令完成.与现有方法相比,所提方法在保留主站检测,遥控功能的前提下具有较快的故障区域隔离和供电恢复速度.

集分联合 FA 处理逻辑如图 4 所示.图 4 中,每个开关处都连接一个配电终端,终端上下游之间交互通信.同时,每个终端又都与主站连接,经主站后通过终端 FTU5 控制联络开关.当配电网闭环运行,S2 与 S3 之间发生故障时,所有配电终端检测到的电流均满足(1)式,变电站 A,B 出线开关 CB1,CB2 跳闸.由于流过开关 S2 和 S3 的电流方向相反,根据(2)式,配电终端 FTU3 和 FTU4 跳闸 S2 和 S3,隔离故障区.假设第  $j$  个 FTU 上输出的逻辑信号为  $M_j$  和  $N_j$ , $M_j=0$  表示第  $j$  个 FTU 上检测到反向电流; $M_j=1$  表示第  $j$  个 FTU 上检测到正向电流.则闭环运行时集分联合 FA 控制策略对联络开关的控制逻辑可表示为:

$$M_{IS1} = (M_3 \ \& \ M_4) \ \parallel \ M_5. \tag{4}$$

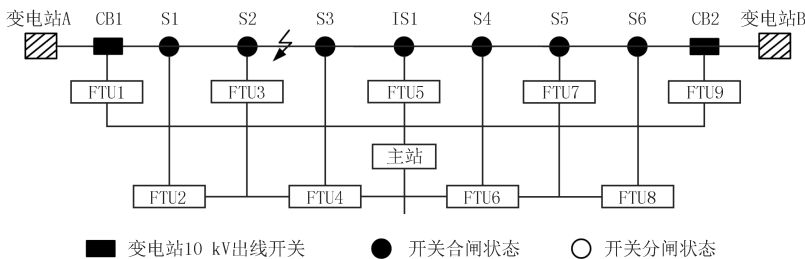


图4 集分联合FA控制逻辑

Fig.4 Control logic for combined centralized and distributed FA

根据(4)式计算结果,联络继续保持闭合.变电站 A,B 出线开关 CB1,CB2 重合闸,恢复非故障区供电.在配电网开环运行,S2 与 S3 之间发生故障时,配电终端 FTU1~FTU3 检测到的电流满足(1)式,流过开关 CB1,S1,S2 的电流为故障电流,变电站 A 出线开关 CB1 跳闸,检测到出线开关的保护动作后启动 FA 功能,根据(3)式,可判断出故障位于 S2 和 S3 之间,通过 FTU3 和 FTU4 发出命令,跳闸 S2 和 S3,迅速隔离故障区.开环运行时, $N_j=0$  表示第  $j$  个 FTU 上检测到的电流正常; $N_j=1$  表示第  $j$  个 FTU 上检测到过电流.集

分联合 FA 控制策略对联络开关的控制逻辑可表示为:

$$M_{IS1} = (N_3 \ \& \ N_4) \ \& \ N_5. \tag{5}$$

根据(5)式计算结果,联络开关闭合,变电站 A 出线开关 CB1,CB2 重合闸,恢复非故障区的供电.

在提出的集分联合 FA 控制策略中,由于主站不需要对全局信息进行综合分析,只通过配电终端上下游之间交互通信即可实现故障隔离,从而节省了大量时间.与传统的集中式 FA 相比,集分联合 FA 控制策略隔离故障,恢复供电的速度更快.此外,主站不仅在配电网络故障时运作,还可以监测和记录配电网络的运行状况.

### 3 集分联合 FA 运行分析

为了验证本文所提集分联合 FA 控制策略的有效性,搭建电压等级为 10 kV,频率为 50 Hz 的双电源配电网络,设置 6 个线路开关和 1 个联络开关,1 s 时在线路开关 S2 和 S3 之间引入永久性三相短路故障进行测试.

集中式 FA 控制策略和集分联合 FA 控制策略下的电压和电流如图 5 所示.由于两种控制策略中开关的合闸和跳闸以及故障检测时间均相同,测试中以上环节耗时不再考虑.为保证系统响应速度,终端交互通信中信号的传输时间一般为毫秒级<sup>[16]</sup>,设为 0.01 s.根据配电网络中 FTU 的个数,主站分析时间一般为数秒到数十秒<sup>[17]</sup>,设主站对单个 FTU 的分析时间为 1.20 s,FTU 独立分析的时间一般为毫秒级,参考现有分布式 FA 策略的 FTU 独立分析时间,设为 0.02 s<sup>[18]</sup>.

由图 5(a)可知,集中式 FA 检测到过电流后,启动馈线自动化功能,变电站出线开关 CB1,CB2 跳闸,配电终端将电压、电流信息上传,经主站综合分析后下发控制命令至相应的配电终端,控制开关 S2 和 S3 断开,隔离故障,联络开关闭合,恢复供电.在图 5(b)中,集分联合 FA 通过配电终端间的交互通信使 S2 和 S3 断开,快速隔离故障.主站分析故障信息后下发闭合联络开关控制命令,恢复供电.两种控制策略的工作流程及用时具体如表 1 所示.

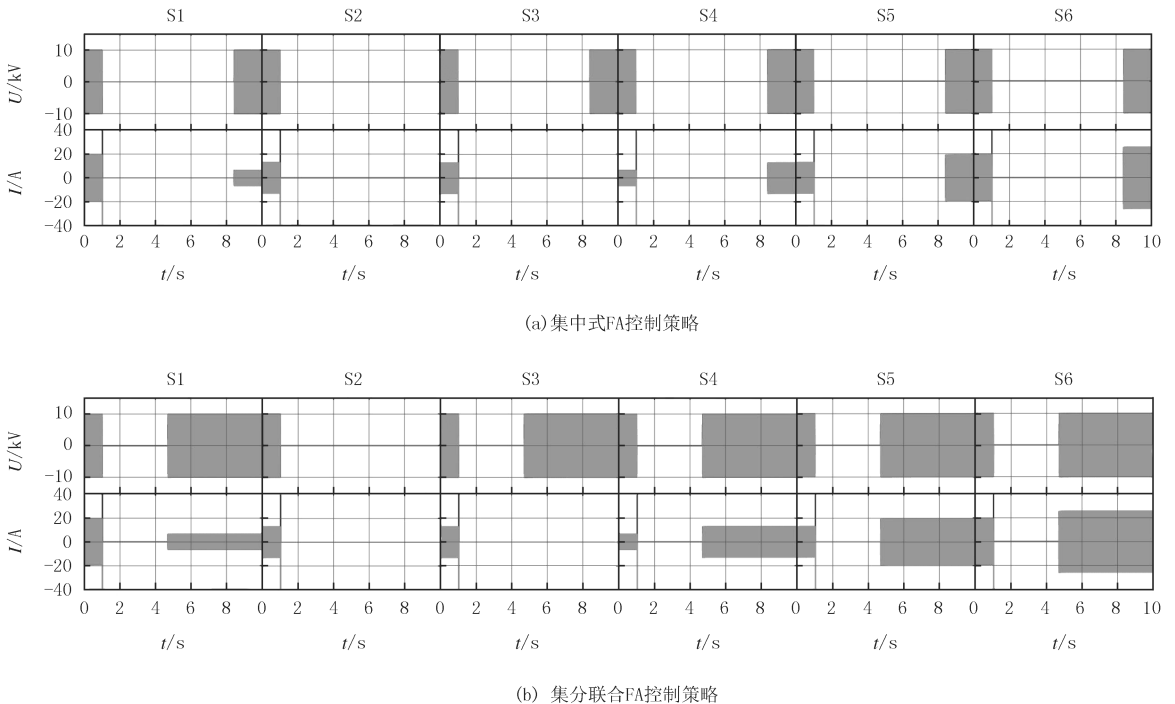


图5 两种不同FA控制策略下的电压和电流对比

Fig.5 Comparison of voltage and current under two different FA control strategies

根据表1可以看出,当双电源配电网络S2与S3之间发生三相短路故障时,集中式FA控制策略隔离故障,恢复供电所需时间为8.42s左右,而集分联合FA控制策略所需时间仅为3.65s.相比之下,集分联合FA控制策略响应速度更快.因此,本文提出的集分联合FA控制策略在配电网络故障隔离,恢复供电方面具有更好的时效性.

表1 集中式FA和集分联合FA运行过程及用时

Tab.1 Process time of centralized FA and combination of centralized and distributed FA

集中式FA	用时/s	集分联合FA	用时/s
FTU <sub>j</sub> 将信息上传主站	0.01	FTU <sub>j</sub> 交互通信	0.01
主站分析全局信息(7个FTU)	8.40	FTU <sub>j</sub> 上传主站	0.01
主站发送控制命令到每个FTU	0.01	FTU <sub>j</sub> 分析判断,隔离故障	0.02
		主站分析故障信息(3个FTU)	3.60
		主站发送控制命令到FTU5	0.01
总计	8.42	总计	3.65

## 4 结论

本文以双电源配电网络为例,详细分析了集中式FA,分布式FA在发生三相短路故障时的开关控制逻辑,在此基础上提出了一种集分联合馈线自动化控制方法.该方法通过配电终端上下游间的交互通信快速定位并隔离故障,再经主站控制联络开关,下发控制命令,恢复非故障区供电.搭建了双电源配电网络电路模型,分别对两种控制方法进行对比分析,结果表明与传统的馈线自动化方法相比,所提集分联合馈线自动化方法在保留主站检测功能的前提下可以更快隔离故障,恢复供电.

## 参 考 文 献

- [1] 董志辉,林凌霄,管霖,等.基于多代理技术的有源配电网供电恢复策略[J].电力自动化设备,2019,39(5):22-29.  
DONG Z H, LIN L X, GUAN L, et al. Service restoration strategy of active distribution network based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 22-29.
- [2] 曹明杰,邹晓松,袁旭峰,等.配电网接地故障测距改进方法研究[J].现代电子技术,2019,42(11):117-120.  
CAO M J, ZOU X S, YUAN X F, et al. Research on ranging improvement method for ground fault in distribution network[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(11): 117-120.
- [3] 张维,宋国兵,豆敏娜,等.基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(18):60-67.  
ZHANG W, SONG G B, DOU M N, et al. Fast fault location and isolation method for distribution network based on adaptive reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 60-67.
- [4] 张新松,袁越,曹阳,等.考虑损耗成本的电池储能电站建模及优化调度[J].电网技术,2017,41(5):1541-1548.  
ZHANG X S, YUAN Y, CAO Y, et al. Modeling and Scheduling for Battery Energy Storage Station With Consideration of Wearing Costs[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1541-1548.
- [5] 李兆拓,金松茂,张华.基于区域序号的自适应就地型馈线自动化故障处理方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):179-189.  
LI Z T, JIN S M, ZHANG H. Adaptive fault processing method for local type feeder automation based on region sequence number[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 179-189.
- [6] GANGOLU S, RAJA P, SELVAN M P, et al. Effective algorithm for fault discrimination and estimation of fault location in transmission lines[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2019, 13(13): 2789-2798.
- [7] 刘健,张志华,张小庆.配电自动化主站的容错故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):6-11.  
LIU J, ZHANG Z H, ZHANG X Q. Fault location with robustness for distribution automation systems(DAS)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 6-11.
- [8] 商海涛,吴林,赵渊,等.计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J].电力自动化设备,2017,37(5):129-135.  
SHANG H T, WU L, ZHAO Y, et al. Reliability evaluation model of distribution network considering centralized feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 129-135.
- [9] 王伟,李萌.基于分区分层模式的集中式馈线自动化方案研究[J].华电技术,2017,39(6):20-22.  
WANG W, LI M. Research on centralized feeder automation scheme based on partition and hierarchical mode[J]. Water Conservancy and

Electric Power Machinery, 2017, 39(6): 20-22.

- [10] 覃朝云, 梁东, 杨静, 等. 基于主站后备的分布式馈线自动化拓扑组网设计方案[J]. 电子设计工程, 2018, 26(13): 104-108.  
QIN Z Y, LIANG D, YANG J, et al. Design scheme on the ad hoc topology network of distributed feeder automation based on main station in support[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(13): 104-108.
- [11] 朱国防, 沈培锋, 王勇, 等. 基于拓扑片的智能分布式馈线拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 152-157.  
ZHU G F, SHEN P F, WANG Y, et al. Topological analysis of intelligent distributed feeder based on topology slices[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 152-157.
- [12] 嵇文路, 应俊, 梅军, 等. 基于主站的分布式馈线自动化系统配置方法研究[J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 62-65.  
JI W L, YING J, MEI J, et al. Configuration method of distributed feeder automation system based on main station[J]. Electrical Automation, 2018, 40(5): 62-65.
- [13] 李文汗, 赵冬梅, 王心, 等. 考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 117-123.  
LI W H, ZHAO D M, WANG X, et al. Adaptability evaluation for the distribution equipment considering distributed generations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 117-123.
- [14] 杜东威, 叶志锋, 许永军. 基于GOOSE的综合型智能分布式馈线自动化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 183-190.  
DU D W, YE Z F, XU Y J. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 183-190.
- [15] 方健美, 徐思敬, 喻晓苹. 某大型综合体配电网智能分布式馈线自动化技术方案[J]. 现代建筑电气, 2018, 9(11): 24-28.  
FANG J M, XU S J, YU X P. Intelligent distributed feeder automation technology for large complex distribution network[J]. Modern Architectural Electricity, 2018, 9(11): 24-28.
- [16] 张明, 朱国防, 嵇文路, 等. 基于通信质量检测的自适应分布式智能馈线自动化[J]. 南方电网技术, 2017(11): 61-67.  
ZHANG M, ZHU G F, JI W L, et al. Adaptive distributed intelligent feeder automation based on communication quality detection[J]. China Southern Power Grid Technology, 2017(11): 61-67.
- [17] 沈培锋, 张明, 嵇文路, 等. 基于主站的分布式馈线自动化组网技术研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(1): 56-59.  
SHEN P F, ZHANG M, JI W L, et al. Research on Networking Technology for Distributed Feeder Automation Based on the Main Station [J]. Electrical Automation, 2019, 41(1): 56-59.
- [18] 刘健, 张小庆, 陈星莺, 等. 集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理模式[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2608-2614.  
LIU J, ZHANG X Q, CHEN X Y, et al. Distribute fault processing mode of coordination and coordination of centralized intelligence and distributed intelligence[J]. Grid Technology, 2013, 37(9): 2608-2614.

## Combined centralized and distributed control method for distribution network protection

Huang Mingyu<sup>1</sup>, Qi Shenglong<sup>1</sup>, Lu Xiang<sup>1</sup>, Zhou Zhuo<sup>2</sup>, Jiang Hongtu<sup>2</sup>, Zhang Xinsong<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China;

2. China Shanghai Wiscom Sunest Power Technology Co. Ltd., Shanghai 200233, China;

3. College of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Feeder automation technique guarantees the safety operation of the distribution network, which is important for improving the reliability of power supply. To solve the problem of three-phase short-circuit fault in the dual-power distribution network, a combined centralized and distributed feeder automatic control method is proposed based on the centralized and distributed feeder automation control. The fault is located and isolated via the communication between the upstream and downstream of the feeder terminal unit. Then the switch is controlled by the master station and the power supply in the non-fault area is restored. Compared with the centralized feeder automation control method, the proposed control method is advantageous in maintaining the detection and remote control functions of the master station, and it is faster in isolating the fault and restoring the power.

**Keywords:** combined centralized and distributed control; feeder automation; distribution network; distribution terminal; grid fault