

智能分布式馈线自动化系统 在多联络配电网中的应用研究

目前,智能分布式馈线自动化系统多是以“手拉手”环网作为研究对象,不能完全适应广泛存在的多联络复杂配电网的应用需求,首先分析现有智能分布式馈线自动化IEC 61850模型中存在的不足,提出适用于多联络配电网的终端设备信息模型,在此基础上分析了基于对等GOOSE通信的信息交换模型对多联络配电网的适应性。然后分析了多联络架空配电线路实现馈线自动化的动作流程和信息模型的数据流。最后研究了一种在对等通信方式下分布式馈线自动化系统中产生信号环流的抑制方法。

李兆拓¹ 杨波² 胡凯帆¹ 陈春艳²/1.国电南京自动化有限公司 2.国网湖北省电力公司武汉市东湖新技术开发区供电公司

0 引言

配电自动化是提高供电可靠性的有效手段之一,而馈线自动化(FA)作为配电自动化中最为重要的组成部分,可显著提高供电可靠性、减少短时停电问题^[1]。馈线自动化的核心内容是完成配电网故障时的供电恢复任务,主要包括通过故障信息量检测实现故障定位,控制开关动作完成故障隔离,根据配电网拓扑运行结构及负荷分配情况完成供电恢复。馈线自动化能够避免或减少中压配电线路故障给用户带来的停电损失,在配电自动化技术中具有举足轻重的地位^[2-3]。

智能配电网的发展使得传统的就地式FA模式与集中式FA模式已不能满足人们对供电可靠性的要求^[4]。随着高级传感和测控技术、现代计算机与通信技术的发展,大量的通信、控制设备应用到配电自动化中,配电监控终端之间可以通过对等通信交换信息,实现馈线的分布式故障区段定位、隔离与供电恢

复,避免了主站集中控制带来的通信与数据处理延时长的问题,较大地提高了故障处理速度,可将故障恢复时间缩短到秒级,是目前智能配电网FA技术的发展方向^[5-7]。

在配电网网架结构中,多联络配电网接线模式以其高负载率的优点使得其配电设备的利用率高,成为提高供电可靠性的另一种有效手段。由于实际配电网运行方式多变,相对于传统环网,多联络配电网其转供负荷路径多,因此运行方式更加灵活,具有效率高、经济性好等优点^[8]。但联络开关数量的增加,带来运行方式的复杂性,同时也使得配电网故障恢复时可供选择的供电恢复路径增多,现有设备信息模型已不能满足寻找最优故障恢复的需求。

已有文献中基于IEC 61850的信息模型^[9-11]都是以手拉手环网作为研究对象,未对在多电源点、多联络点情况下的应用场景进行描述。

本文在研究现有智能分布式馈线自动化IEC 61850模型的基础上^[12],提出适用于多联络配电网的终端设备信息模型,以及一种在对等通信方式下信号环流的抑制方法,可满足复杂配电网的应用需求。

1 多联络配电网

1.1 概述

传统辐射型接线方式的供电可靠性较低,随着城市配电网的发展,配电网



李兆拓/工程师

关键词/Keywords

多联络配电网·
馈线自动化·
IEC 61850·
对等通信·
终端信息模型·
信号环流·

接线应该符合“ $N-1$ ”可靠性准则,因此将两个或多个辐射网之间用联络开关连接起来,组成多电源有备用的接线方式。当一条线路故障时,仍然能够通过负荷转移,将故障线路隔离,同时使得没有故障的线路恢复供电。所有线路的末端通过联络开关连接,线路的平均负载率是 $(N-1)/N$,其中 N 为电源点数量,如果 $N=2$,则为常用的手拉手接线方式,两个电源点互为备用,有一个联络开关,线路的负载率不超过50%。如果 $N=3$,三个电源点互为备用,至少有两个联络开关,线路的负载率不超过67%。如果 $N=4$,就是四个电源点互为备用,至少有三个联络开关,线路的负载率不超过75%。

多联络配电网线路容量使用率比较高,具有运行效率高、经济性好的优点。同时联络开关数量的增多带来转供路径的灵活性,能够显著提高配电网的供电可靠性,但也使得其供电恢复更加复杂。典型的多联络线路如图1所示。

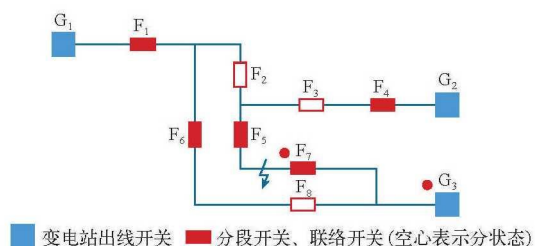


图1 典型多联络配电网

该多联络配电网由三个变电站电源点（ G_1 、 G_2 和 G_3 ），五个分段开关（ F_1 、 F_4 、 F_5 、 F_6 和 F_7 ）和三个联络开关（ F_2 、 F_3 和 F_8 ）组成。

1.2 馈线自动化流程

假设故障点发生在 F_5 、 F_7 之间,即变电站出口的线路故障,智能分布式FA处理流程如下。

1) 故障定位。根据开关的过电流信息,判断故障位置在开关 F_5 与 F_7 之间。

2) 故障隔离。如果 F_5 、 F_7 开关类型为断路器,则两开关直接跳闸隔离故障;如果 F_5 、 F_7 开关类型为负荷开关,则先由变电站出线断路器 G_3 跳闸,两开关再跳闸以隔离故障。考虑重合闸时,上述过程应在重合闸失败后开始。

3) 故障恢复。如果在隔离阶段断路器 G_3 跳闸,恢复阶段应使 G_3 合闸;根据联络点所关联电源点的实时负载,将故障损失负荷转供至负载率较小的电源点,如果 G_1 （或 G_2 ）负载率较小,则联络开关 F_2 （或 F_3 ）合闸。

下文将讨论在多联络配电网中,配电终端为实现智能分布式FA功能需要交互的内容。

2 终端信息模型

2.1 信息模型描述

应用于多联络配电网的智能分布式FA系统信息模型在整体结构上与“手拉手”环网信息模型基本相同。终端设备建模包含两个服务访问点, S_1 （MMS服务）和 G_1 （GOOSE服务），在 G_1 访问点建模一个SERVER类,用于配电终端间通信^[13-14]。对于智能分布式FA功能,建立专有的LD,实例名为FDIR,FDIR对象除了包含LD均有的LLN0和LPHD两个LN外,还包含OSFA（分布式馈线自动化功能）、TSFA（测试功能）和MSFA（状态信息）三个逻辑节点。其中TSFA、MSFA与原有信息模型相同,OSFA的数据属性需作相应修改。

OSFA逻辑节点负责FA中的拓扑识别、故障定位、故障隔离、非故障区域恢复供电以及异常状态处理等功能,上述功能建立在与拓扑相邻终端实时交换数据的基础上,交换的数据及数据属性如下。

(1) 数据Fa,FA流程相关信号,数据属性为Start、Block和Revert

1) OSFA.Fa.Start: fa启动信号（BOOL），电源侧向供电下游传出的信号,下游终端在接收到该信号后启动FA过程。

2) OSFA.Fa.Block: fa闭锁信号（BOOL），当终端检测到开关拒动、误动或通信异常等情况并需要闭锁Fa时,向外传出该信号。

3) OSFA.Fa.Revert: fa复归信号（BOOL），当自动复归停用时,该信号用于复归当前闭锁信息及其他故障标识。

(2) 数据Oc,装置过电流相关信号,数据属

性为Forward、Reverse

1) OSFA.Oc.Forward: 正向过电流信号 (INT8U), 该信号将向相邻终端送出。

2) OSFA.Oc.Reverse: 反向过电流信号 (INT8U), 该信号将向相邻终端送出。

(3) 数据Load, 系统负荷相关信号, 数据属性为Max、Remain、Fault和Ratio

1) OSFA.Load.Max: 电源最大可带负荷 (Float), 变电站出线向供电下游可以提供的最大电流值。

2) OSFA.Load.Remain: 电源可提供转供负荷 (Float), 变电站出线在当前运行工况下的剩余带载能力, 以电流值表示。

3) OSFA.Load.Fault: 故障待转负荷 (Float), 故障区域被隔离后, 故障区域下游需要转移的负荷。

4) OSFA.Load.Ratio: 电源负荷率 (Float), 在多电源点配电网中, 该数据反映各电源点的带载能力。

(4) 数据Action, FA动作执行相关信号, 数据属性为TripCB、RejStart、UpRec和DownRec

1) OSFA.Action.TripCB: 跳供电侧断路器信号 (BOOL), 故障区域负荷开关无法切断故障电流时, 向供电上游发送跳闸命令。

2) OSFA.Action.RejStart: 跳闸失灵起动信号 (BOOL), 故障隔离阶段发生开关拒动时, 该信号用于扩大隔离区域。

3) OSFA.Action.UpRec: 恢复电源侧供电信号 (BOOL), 在故障区域隔离成功后, 该信号用于恢复电源侧供电。

4) OSFA.Action.DownRec: 恢复联络侧供电信号 (BOOL), 在故障区域隔离成功后, 该信号用于恢复故障区域下游的供电。

(5) 数据Base, 基础拓扑相关信号, 数据属性为PowPath、LinkStat

1) OSFA.Base.PowPath: 供电路径信号 (BOOL), 该信号由电源点发出, 用于表明线路是否导通。

2) OSFA.Base.LinkStat: 通信状态信号

(BOOL), 该信号由各终端发出, 用于表明通信状态是否正常。

2.2 信息模型比较

相比于“手拉手”环网接线模式, 多联络配电网存在更多的分支与联络点, 使得智能分布式馈线自动化在拓扑识别、故障定位、故障隔离和故障恢复等多个阶段的流程算法发生改变, 对于终端信息模型的影响主要体现在负荷相关信号 (数据Load) 和恢复相关信号 (数据Action)。

“手拉手”环网的恢复供电操作, 只能通过故障下游区域的联络开关完成, 仅需考虑对端电源点能否负担待转负荷; 在多联络配电网供电恢复中, 待恢复区域与多个联络开关相连, 可选择不同的电源点恢复供电, 不同电源点的负荷率不同, 需要综合考虑负荷率和恢复策略择优选择供电路径, 因此在交互信息模型中加入了电源可提供转供负荷、电源负荷率等数据属性。

在起动恢复信号方面, “手拉手”环网的恢复合闸信号不必区分故障上游 (即电源点) 和故障下游 (即联络开关), 因为在上游、下游方向上至多只有一个可恢复的开关且不会混淆; 在多联络配电网中, 辐射状的线路可通过联络线互联, 在某个恢复方向上可能同时存在电源点及联络开关, 因此在交互信息模型中加入了恢复电源侧供电信号、恢复联络侧供电信号等数据属性。

多联络配电网故障恢复示例如图2所示。该配电网中除变电站出口断路器 G_1 、 G_2 和 G_3 是断路器外, 其余开关均为负荷开关, 示例中故障发生在 F_5 、 F_7 之间的线路上, 故障定位成功后变电站出线 G_3 跳开, 接着 F_5 、 F_7 跳闸隔离故障, 最后恢复非故障区域供电。在恢复阶段故障下游有 F_2 、 F_3 两个联络开关, 智能分布式FA需要根据 G_1 、 G_2 的负荷率

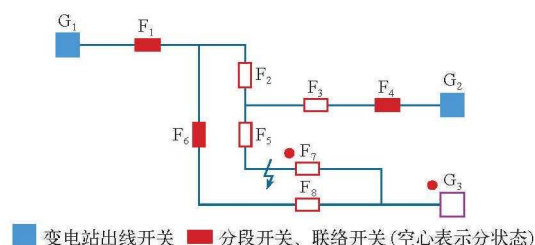


图2 多联络配电网故障恢复示例

情况选择其中一个联络开关合闸；在恢复故障上游开关时，应恢复跳开的 G_3 开关，如果不区分恢复信号，单一的恢复信号可能造成 G_3 、 F_8 同时合闸，造成合环事故，因此需用恢复电源侧供电信号使 G_3 合闸， F_8 不响应该信号保持分闸状态。

3 信息交换模型

3.1 信息交换模型

在多联络配电网中仍然采用基于GOOSE协议的对等通信实现信息交换，GOOSE报文的快速传输机制以及重传机制，可以满足智能分布式FA系统数据流量大且实时性要求高的特点^[15]。

与“手拉手”环网的通信方式类似，在多联络配电网中采用近区通信实现智能分布式FA全局数据交换方式，即在逻辑层面上将一台终端仅与其拓扑直接相连的终端进行通信，与非相邻终端的数据交互依靠相邻终端传递处理，各终端互为上下级，形成了全局数据交互通道。智能分布式FA执行过程信息沿交互通道逐级蔓延，实现全网信息的快速传递和共享。应用这个技术后，单台终端可以接收到网格内的全部所需信息，同时又不必对网格内远处某点的变动作出修改，当网格内出现节点增删时，仅对其相邻区域产生影响，这样可在工程实施中对一次网架更新在最大限度维持原有状态下快速反应，同时随着网格内节点数量的增加，通信量仅以正比例加法的规模平滑增长，有利于电网后期的规划发展。

3.2 拓扑自适应

受区域用电发展和供电网架规划、优化的影响，配电线路面临分支扩展、多电源互联等多种可能的变动，基于上述信息交互模式的智能分布式FA系统能在不改变原有动作逻辑的前提下，仅通过更新新增节点与附近原有节点的通信，即可完成分布式FA功能的拓扑拓展。

例如有配电网规划需求，将现有线路与另外两条线路互联，组成多电源点供电网络，以提高供电可靠性。原配电线路结构如图3所示，为单电源点辐射型接线，互联后的网架结构如图4所

示，为三个电源点、六个分段开关和两个联络开关组成的多联络结构。



图3 单电源辐射型配电线路

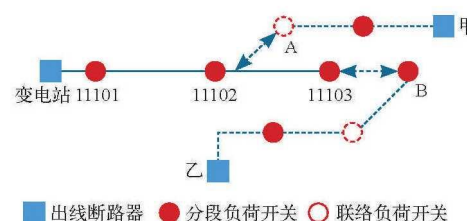


图4 互联后的多联络配电网

传统集中式FA需作较大的调整以适应此类更改，较大地影响了FA系统的灵活性和实用性，而智能分布式FA仅需更新11102开关与11103开关的通信对象，11102开关配置加入与A开关的通信，11103开关配置加入与A、B开关通信，即可完成对多电源点新拓扑的适应，拓展原有FA的适用范围，实现供电网格内多电源点间的协同处理。

4 动作流程分析

以国电南自DS6701智能分布式配电终端为基础，分析智能分布式馈线自动化在多联络配电网中的动作流程。

在多联络配电网中，智能分布式FA在故障定位和故障隔离阶段的信号传递参量和动作流程与“手拉手”环网基本相同，下面主要就重合闸和恢复供电阶段进行分析。

4.1 重合闸流程

架空线路绝大多数的故障都是瞬时性的，断路器跳闸后线路的绝缘性能（绝缘子和空气间隙）能得到恢复，再次重合能成功，这就提高了电力系统供电的可靠性。因此，自动重合闸广泛应用于架空线配电线路、架空线—电缆混合配电线路上。图5描述了线路上发生故障后的重合闸分析过程。

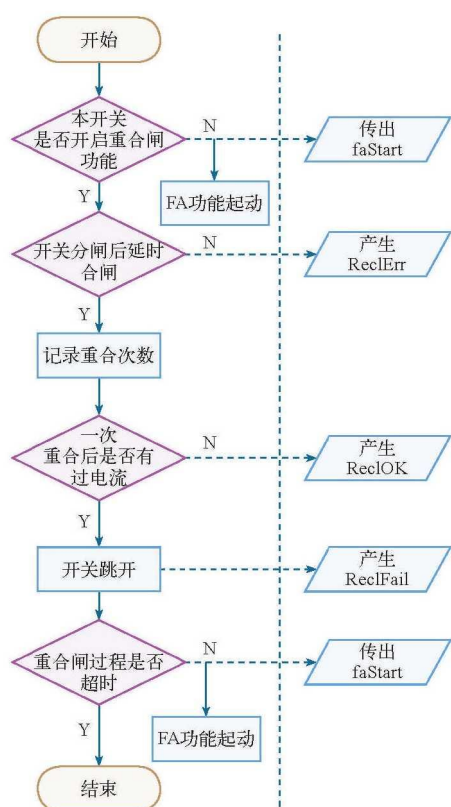


图5 重合闸功能的动作逻辑及数据流

当变电站出线断路器或线路分段断路器投入重合闸时，动作流程将进入到重合闸分析模块。如果重合后无故障电流，则重合成功，原有故障为瞬时故障；如果重合后仍有故障电流，则重合失败，断路器将再次跳开，故障为永久性故障，后续启动FA。

4.2 恢复供电流程

恢复供电流程包括故障上游供电恢复和故障下游供电恢复。在2.2节的讨论中分析了故障上游恢复供电时，可通过恢复电源侧供电信号直接恢复，不会对其他联络开关产生影响。故障下游恢复供电时，有多个联络开关与待转供区域相连，因此需要在满足运行约束的条件下选择合适的联络开关合闸，将负荷转移到其他电源点，下面主要分析故障下游恢复供电时的动作策略及动作流程。

根据实际运行经验，在供电恢复过程中将遵循以下原则：①先判转供后线路是否过载，若全部线路均过载，闭锁负荷转供；②若部分线路转供后会发生过载情况，则将负荷转供至未过载线

路；③若各条线路在转供后均不会过载，则优先转供负荷小的线路；④若各条线路在转供后均不会过载，且负荷相同，则转供至负荷率较小的线路。

在系统稳定运行时，各智能分布式终端按预设时间间隔统计网内的节点开关实时负荷、变电站最大可带负荷和变电站当前负荷等参数，使终端在故障恢复阶段具备恢复失电区域并兼顾网内负荷平衡的相关运行参量。故障成功隔离后的恢复流程如图6所示。

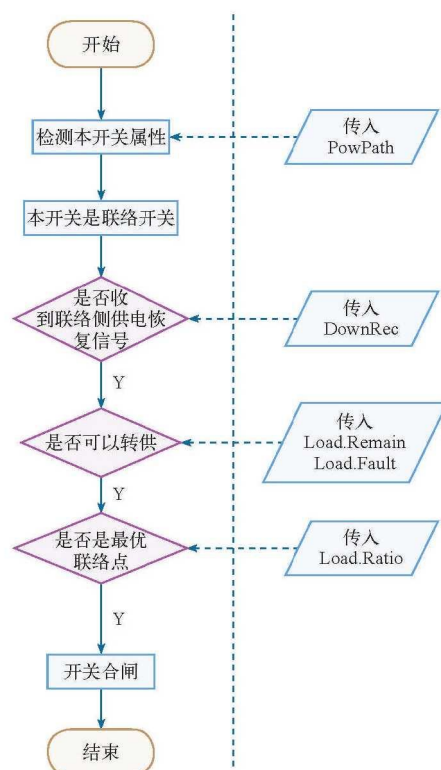


图6 联络开点的动作逻辑和数据流

当联络开关接收到恢复联络侧供电信号，会进行负荷转供的判断，比较联络开关两侧接收到的最大允许负荷及故障发生前的常态负荷，若 $\text{load.Remain} > \text{load.Fault}$ ，则联络点可以合闸，反之不可。然后在前者的基础上比较联络开关所属供电电源的负载率 Load.Ratio ，负载率较小的联络开关合闸。

5 信号环流的抑制方法

智能分布式FA系统基于对等通信方式运行，各终端相对独立，通过与周围拓扑直接相连的终

端交互信号，完成相应功能。当某终端产生需要传递转发的信号时，该信号将在流经传递方向上的其他终端，最终到达系统内特定终端接收处理。

在“手拉手”环网结构下，沿某一方向只有单一传递路径，信号全部单向传递处理，不会产生异常。而在多联络配电网中，传递路径可能存在多条，当拓扑中存在网孔结构时，某些信号传递会在网孔内形成信号环流，如图7所示，信号环流一旦形成，即使信号源消失，环流仍然会长时间持续，将对系统稳定性和安全性产生较大的影响。

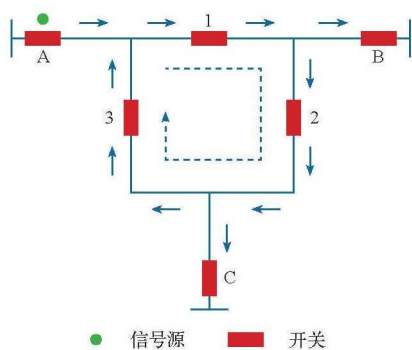


图7 分布式馈线自动化系统信号环流示意图

信号环流产生的原因是，传统处理方法在接收到信号后，首先由节点将接收信号保持，保持后的信号进入内部逻辑处理，同时向外传出。在信号源消失后，由于各节点对于接收信号的自身保持，使得信号发送仍将继续，成为产生信号环流的第一个因素。另外，在信号发送阶段并未对发送过程进行控制，这种直接发送是产生信号环流的第二个因素。

本文提出了一种抑制信号环流的处理流程，经信号保持后的接收信号只向内部逻辑应用方向输出，发送信号直接取自接收信号，避开产生信号环流的第一个因素，信号处理流程如图8所示。

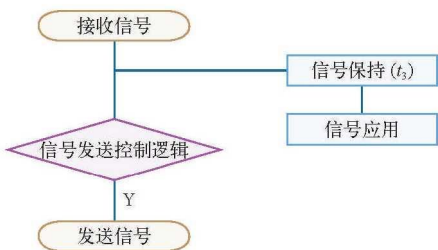


图8 分布式馈线自动化系统信号处理流程

信号经发送控制逻辑处理后向外发送，解决了产生信号环流的第二个因素，信号发送控制逻辑如图9所示。

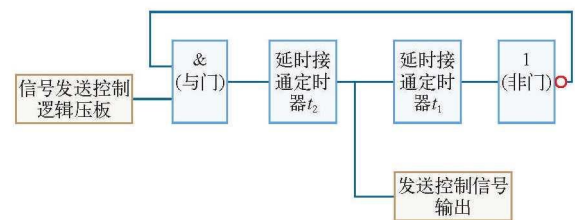


图9 分布式馈线自动化信号发送控制逻辑

t_1 、 t_2 为可设置的延时接通定时器时延，当信号发送控制逻辑压板投入时（投入为高电平1），将在发送控制信号输出端产生周期为 $t_1 + t_2$ 的占空比可调的方波控制信号。其中 t_1 为高电平持续时间，表示允许信号发送； t_2 为低电平持续时间，表示禁止信号发送。经信号发送控制后，以图7中节点1为例，分布式FA系统中的信号输出波形如图10所示（ t_3 为内部信号保持时间）。

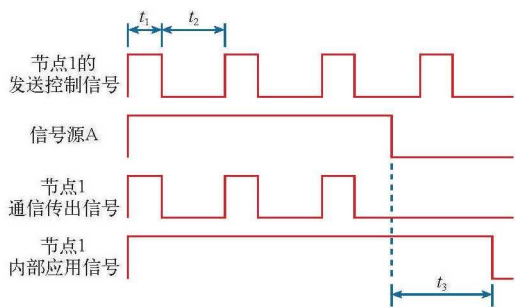


图10 分布式馈线自动化经信号控制后的信号输出波形

经信号控制后，系统中需要传送的持续信号转换为脉宽可调的占空比信号，当信号源消失时，各开关节点间传递的占空比信号同时消失，同时保证了内部应用信号的连续性。该方法可以在不增添附加信号的前提下，实现分布式FA系统信号环流的抑制，并可根据网络通信速率的不同，灵活调整占空比信号的时延，具有良好的自适应性。

6 结束语

研究了智能分布式馈线自动化在多联络配电网中的应用，多联络配电网可有效地提高线路利

用率和系统可靠性,智能分布式馈线自动化的投入进一步缩短了故障停电时间,增加了电网抗扰动能力。在现有智能分布式馈线自动化IEC 61850模型的基础上,提出适用于多联络配电网的终端设备信息模型,同时分析了基于对等GOOSE通信信息交换模型的馈线自动化动作流程,以及对配电网网架变动的适应性。本文还提出了一种在对等通信方式下分布式馈线自动化系统中产生信号环流的抑制方法,在不增添附加信号的前提下,实现分布式FA系统信号环流的抑制,提高系统稳定性。

参考文献

- [1] DL/T 814—2002 配电自动化系统功能规范[S].
- [2] 徐丙垠,李天友,薛永端.智能配电网与配电自动化[J].电力系统自动化,2009,33(17):38-41.
- [3] 赵月,何丽娟,姜海涛,等.配电网馈线自动化系统分析及技术实施要点[J].电力自动化设备,2005,25(9):65-68.
- [4] 刘健,赵树仁,张小庆,等.配电网故障处理关键技术[J].电力系统自动化,2010,34(24):87-93.
- [5] 李威,丁杰,姚建国.智能电网发展形态探讨[J].电力系统自动化,2010,34(2):24-27.
- [6] 刘健,贡保记,崔琪,等.一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J].电力系统自动化,2010,34(10):62-66.
- [7] 李永亮,李刚.IEC 61850第2版简介及其在智能电网中的应用展望[J].电网技术,2010,34(4):11-16.
- [8] 郑毅,刘天琪,洪行旅,等.中心城市大型配电自动化设计方案与应用[J].电力系统自动化,2012(18):49-53.
- [9] 凌万水,刘东,陆一鸣,等.基于IEC 61850的智能分布式馈线自动化模型[J].电力系统自动化,2012,36(6):90-95.
- [10] 韩国政,徐丙垠.基于IEC 61850标准的智能配电终端建模[J].电力自动化设备,2011,31(2):104-107.
- [11] 王凯.基于IEC 61850的智能配电终端模型的研究[D].北京:华北电力大学,2012.
- [12] 陈云国,戴胜,杨乘胜,等.基于IEC 61850的智能分布式馈线自动化系统建模[J].电力自动化设备,2016,40(8):189-193,222.
- [13] 徐斌,刘子英.基于IEC 61850的配电线路保护IED设计[J].电力自动化设备,2007,27(9):103-106.
- [14] 韩国政,徐丙垠,等.IEC 61850的配网自动化通信技术研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):62-66.
- [15] 辛红汪,丁巧林,李筱宁.基于GOOSE的配电自动化系统的研究[J].智能电网,2013(1):93-97.

(收稿日期:2017-08-17) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告