

一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路 主动配电网的纵联保护方案

李瑞生

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了解决主动配电网双向潮流对配电网保护影响, 分析了DER接入对PDN保护带来的问题, 提出了基于虚拟节点网络拓扑结构多分支线路纵联方向保护, 适用于架空线路的配电自动化。基于虚拟节点网络拓扑结构的配电网纵联保护方案, 采用EPON技术, 利用EPON传输GOOSE机制、FTU传输启动及方向元件, 由集中式纵联方向保护装置实现配电网的保护, 能很好地满足ADN接入DG对保护的要求。设计开发了相应的FTU及集中式保护装置, 应用在实际的ADN系统, 实验测试了GOOSE上行、下行传输延时, 保护动作时间。实验结果表明基于虚拟节点网络拓扑结构的纵联保护方案适用于ADN系统, 具有很好的应用前景。

关键词: 主动配电网; 分布式发电; 虚拟节点; 架空配电自动化; 集中式保护

An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node

LI Ruisheng

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: To solve the impact of active distribution network bi-directional current on distribution network protection, this paper analyzes the protection PDN problem of the DER access, and puts forward the multi-branch pilot directional protection scheme based on topology of virtual node, which is suitable for aerial line distribution automation. The protection scheme adopts EPON technology, uses GOOSE transmission of EPON, FTU transfer starting component and directional component, and realizes the distribution network protection by using centralized pilot directional protection, which can well solve those problems of DG access. We design FTU and centralized protection device used in the practical ADN system, and test the up and down transmission delay of GOOSE and accurate tripping time of the protection. The experimental results show that multi-branch pilot directional protection scheme based on topology of virtual node is suitable for ADN, and has good application prospect.

Key words: active distribution network; distributed generator; virtual node; aerial line distribution automation; centralized protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0070-06

0 引言

传统配电网从输电网接受电能, 通过配电设施分配给用户, 用户被动接受电能, 配电网潮流单向流动, 不对配电网进行主动控制, 称为被动配电网(Passive distribution network, PDN)。分布式能源(Distributed energy resource, DER)接入PDN, 配电网潮流双向流动, 给PDN在短路水平和设备选型、无功功率和电压分布、配电网保护、配电自动化和故障处理过程、特殊情况下的孤岛运行等方面带来影响。文献[1]分析了DER接入对传统配电网的影响并提供了解决方案。

DER的基本构成是分布式发电(Distributed generator, DG)或分布式电源DR(Distributed resource, DR)、可控负荷(Controllable load, CL)等。DG主要为光伏发电、风力发电, DR是DG与储能装置(Energy storage, ES)的联合系统。由于PDN不是为DG接入设计的, 不适应大量DG接入, 2008年国际大电网会议(CIGRE)配电与分布式发电专委会提出ADN(Active distribution network)技术。文献[2]把ADN翻译为“主动配电网”, 并翻译描述其基本定义: 通过使用灵活的网络拓扑结构来管理潮流, 以便对局部的DER进行主动控制和主动管理的配电系统。

1 DER接入对PDN影响

单向辐射型非自动化型配电网，配电网馈线保护采用三段式电流保护，对配电网保护带来的影响主要有末端故障电流助增保护灵敏度降低、相邻线故障保护误动、重合闸不成功问题。配电网馈线保护改为采用馈线保护增加方向元件，采用方向型电流电压保护解决DG接入的影响^[3]，本文不再赘述。

自动化型配电网，配电自动化(Distribution automation, DA)根据配电网接线方式采取不同的配网馈线自动化(Feeder automation, FA)保护方案。配电网接线方式分为两种：1)架空网接线方式；2)电缆网接线方式。由于不同的接线方式对配电网保护方案差异较大，由于文章篇幅所限，本文重点分析架空网接线，电缆网接线方式不做分析。

如图1为四种架空网接线方式：1)单电源辐射网；2)双电源拉手式环网；3)分段两联络；4)分段三联络

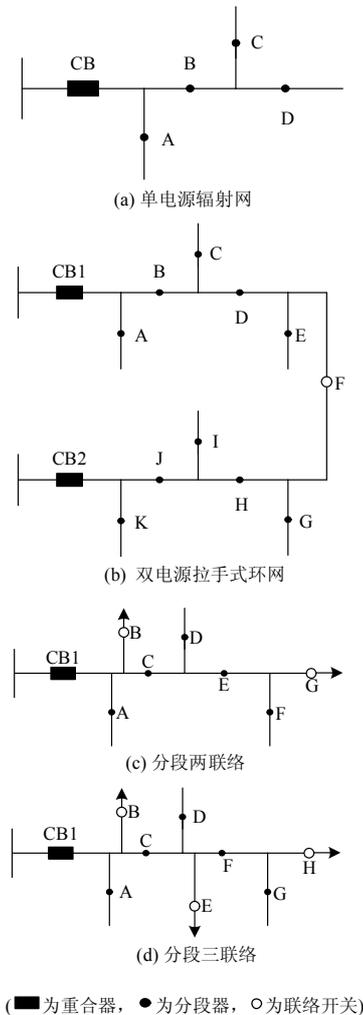


图1 架空线路配电网接线

Fig. 1 Aerial line distribution network

三联络。开关设备包括重合器、分段器、联络开关。架空网FA方案有两种：1)分布式FA；2)集中式FA。

1.1 架空网分布式FA

分布式FA，配电保护是就地实现，采用电流保护与重合器、分段器配合实现故障隔离，根据分段开关选择类型不同，又分为电压时间型、电流计数型及电流电压混合型。如图2为电压时间型典型环网故障处理，电流计数型及电流电压混合型与此类似，不再专门分析。

图2中，架空线路采用断路器与柱上负荷开关将线路分段、联络。断路器采用重合器实现电流保护及跳合闸，柱上负荷开关采用分段器实现无压时自动分闸，接线为典型的环网接线。故障处理过程，故障时CB1跳闸，分段器B、C无压自动分闸，CB1重合后，分段器B、C依次有压自动合闸，识别故障区段，故障隔离需多次重合，故障隔离时间一般需1~2 min。

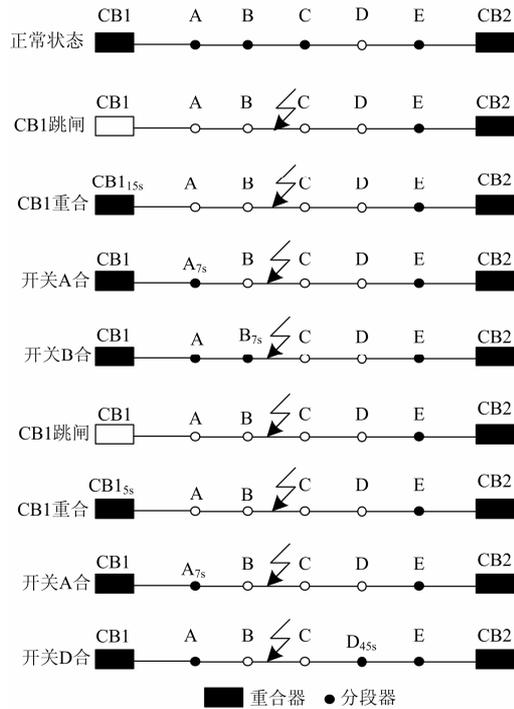


图2 电压时间型典型环网的故障处理

Fig. 2 Fault processing of voltage time type typical ring

无DG接入时，以上FA保护方案能很好地实现故障隔离。有DG接入时，如：DG接入B或C，CB1区外电源侧发生故障，DG提供故障电流，故障电流流过CB1，造成CB1误动，多次重合；区内发生故障，CB1跳闸后，由于DG存在，分段器B、C有压，对有孤岛检测功能的DG，需要等待DG的孤岛保护动作(最长检测时间2 s)，才能实现分段器B、C无压

自动分闸,若DG的孤岛保护动作不动作,不能自动分闸;对具有低电压穿越能力的DG,故障时电压低于 $0.9U_n$ 时设定动作时间3s,分段器B、C分闸更慢,若故障时故障电压不低于 $0.9U_n$,分段器B、C不能实现无压自动分闸。

1.2 架空网集中式FA

集中式FA,配电保护是采用主站(子站)与馈线终端(Feeder terminal unit, FTU)配合方式实现,确定故障区域。还以图2为例,重合器、分段器均装设FTU,FTU通过通信方式接入主站(子站)。

无DG接入时,区内故障,CB1过流跳闸,瞬时故障重合成功;永久性故障重合不成功,启动主站(子站)故障处理,FTU上送故障信息到主站(子站),主站(子站)判断相邻FTU过流状态不一致,判定故障在FTU不一致的区域,主站(子站)遥控相应FTU分闸,隔离故障区域。

有DG接入时,同样会造成CB1区外电源侧发生故障,DG提供故障电流,故障电流流过CB1,造成CB1误动;区内瞬时性故障,CB1跳闸后,由于DG存在,可能造成不能息弧,重合不成功;永久性故障重合不成功,启动主站(子站)故障处理,FTU上送故障信息到主站(子站),由于DG存在,主站(子站)判断相邻FTU过流状态一致,无法判定故障区域,不能隔离故障。

2 基于节点网络拓扑结构多分支线路纵联方向保护

2.1 三分支线路纵联方向保护

文献[4]分析介绍了传统高压线路保护中采用闭锁式纵联保护与收发信机配合实现高压分支线路的保护,该方案在光纤纵联三端电流差动保护没有出现之前,是高压分支线路继电保护的成熟工程应用方案,如图3为三侧均有电源的分支线路纵联方向保护。

区内F1发生故障,S1、S2、S3启动元件(I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_{S3})均大于启动定值 I_{QD} ,S1、S2、S3的正方向元件均动作($F_{S1}^+ = 1$, $F_{S2}^+ = 1$, $F_{S3}^+ = 1$),判断为区内故障。

$$\text{启动判据: } I_{S1} > I_{QD}, I_{S2} > I_{QD}, I_{S3} > I_{QD} \quad (1)$$

$$\text{动作判据: } F_{S1}^+ = 1, F_{S2}^+ = 1, F_{S3}^+ = 1 \quad (2)$$

区外F2发生故障,S1、S2、S3启动元件(I_{S1} 、 I_{S2} 、 I_{S3})均启动,S1、S2的正方向元件均动作($F_{S1}^+ = 1$ 、 $F_{S2}^+ = 1$),S3的正方向元件不动作($F_{S3}^+ \neq 1$),不满足式(2),判断为区外故障。

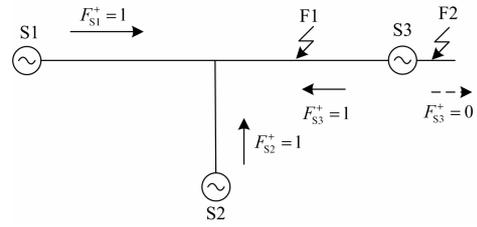


图3 有源三分支线路纵联方向保护

Fig. 3 Active three branch line pilot directional protection

2.2 有电源多分支线路纵联方向保护

从三分支扩展到多分支,采用纵联方向原理,如图4为均有电源的多分支线路纵联方向保护。

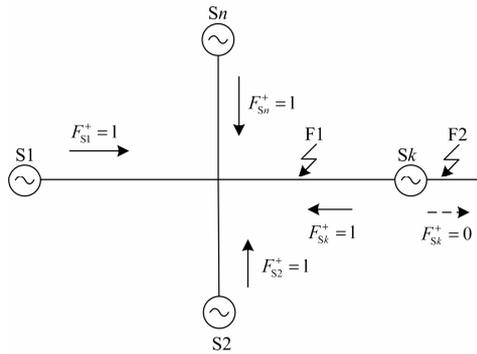


图4 有电源多分支线路纵联方向保护

Fig. 4 Active multi-branch line pilot directional protection

区内F1发生故障,S1、S2、 \dots 、 S_n 启动元件(I_{S1} 、 I_{S2} 、 \dots 、 I_{S_n})均大于启动定值 I_{QD} ,S1、S2、 \dots 、 S_n 的正方向元件均动作($F_{S1}^+ = 1$, $F_{S2}^+ = 1$, \dots , $F_{S_n}^+ = 1$),判断为区内故障。

$$\text{启动判据: } I_{S1} > I_{QD}, I_{S2} > I_{QD}, \dots, I_{S_n} > I_{QD} \quad (3)$$

$$\text{动作判据: } F_{S1}^+ = 1, F_{S2}^+ = 1, \dots, F_{S_n}^+ = 1 \quad (4)$$

K支路区外F2发生故障,S1、S2、 \dots 、 S_n 启动元件(I_{S1} 、 I_{S2} 、 \dots 、 I_{S_n})均启动, S_k 的正方向元件不动作($F_{S_k}^+ \neq 1$),其他支路正方向元件均动作,不满足式(4),判断为区外故障。

2.3 含无源多分支线路纵联方向保护

式(3)、式(4)适用均有电源的多分支线路,若某一支路无电源,线路故障,该支路不提供短路电流,装置不启动,方向元件不参与比较。修改式(3)、式(4),推广到无源多分支,如图5,其数学表达式如下。

启动判据

$$I_{S_i} > I_{QD}, I_{S_k} < I_{QD} \quad i \geq 1, k \leq n \quad (5)$$

动作判据

$$\prod F_{S_i}^+ = 1 \quad i \neq k \quad (6)$$

式中: I_{S_i} 为*i*支路的启动元件; $F_{S_i}^+$ 为*i*支路的方向元件。

其数学表达式物理意义：区内发生故障，有源支路 I_{Si} 启动元件启动，无源支路 I_{Sk} 不启动，有源支路 S_i 的正方向元件均动作($F_{Si}^+ \neq 1$)，无源支路不参与动作判别，判断为区内故障。区外发生故障，有源支路 I_{Si} 启动元件启动，无源支路 I_{Sk} 不启动，无源支路不参与动作判别，有源支路 S_i (背后故障)的正方向元件不动作($F_{Si}^+ \neq 1$)，其他有源支路正方向元件均动作，不满足式(6)，判断为区外故障。

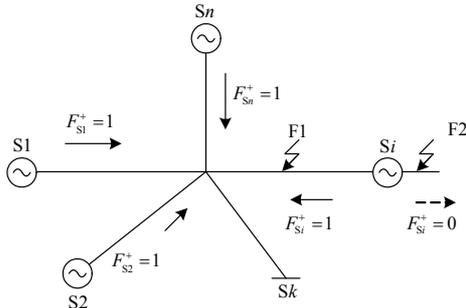


图5 含无源多分支线路纵联方向保护

Fig. 5 Pilot directional protection including passive multi-branch line

3 基于虚拟节点网络拓扑的架空线路配电网纵联保护

3.1 架空线路配电网网络拓扑虚拟节点划分

归纳图1的配电网网络拓扑结构，把重合器、分段器、联络开关归类为单元元件，把线路虚拟为一个节点，以节点为单元划分为不同的支路区域，采用含无源多分支线路纵联方向保护中式(5)、式(6)判据，实现配电网纵联保护。如图6以单电源辐射网接线及分段三联络接线为例，划分不同节点单元保护区域。图中单电源辐射网接线可划分为两个节点，每个节点有三个支路；分段三联络接线可划分为三个节点，节点1、节点2有四个支路，节点3有三

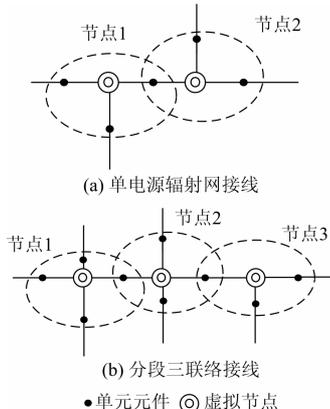


图6 节点单元保护区域

Fig. 6 Node unit protection zone

个支路。配电网中，均可按此方法，根据配电网网络结构，划分为不同的节点，每个节点按多分支纵联方向保护实现主动配电网的保护。

3.2 采用EPON通信的架空线路配电网纵联保护

以太网无源光网络(Ethernet passive optical network, EPON)技术特点是点到多点结构，适用于架空线路配电自动化通信方案建设^[5]，EPON通信技术不支持光网络单元(Optical network unit, ONU)之间的通信，光线路终端(Optical line terminal, OLT)和多个ONU之间通信采用下行1490 nm波长，上行1310 nm波长单纤波分复用技术。在一根光纤中上、下行采用不同波长的信号；上、下行传输延时不一致，不能实现基于光纤通道的采样同步，因此采用EPON通信技术的配电自动化不能采用基于同步要求的电流差动保护。采用分支线路纵联方向保护，对同步没要求，可利用EPON传输面向通用对象的变电站事件(Generic object oriented substation event, GOOSE)机制，FTU通过GOOSE上传启动及方向信息给集中式纵联方向保护，集中式纵联方向保护采用基于虚拟节点网络拓扑结构的纵联配电网保护，能很好地满足ADN接入DG对保护的要求。

DG发电具有间歇性的特点，如：光伏发电白天发电，晚上不发电，晴天发电，阴雨天不发电；风力发电在有风时发电，无风时不发电，接入DG的支路，可能有源，也可能无源，基于虚拟节点网络拓扑结构的配电网纵联保护方案很好地适应了DG的这种特点，在DG不发电时，自动不参与判别，作为正常的负荷支路。

在配电网的单元元件(重合器、分段器、联络开关)配置相应的FTU(内置ONU)，FTU采集就地电流、电压信息，按式(5)、式(6)判据的启动及方向元件，通过EPON通信的GOOSE传输机制，ONU上传到OLT。配置集中式纵联方向保护接OLT，集中式纵联方向保护按配电网网络拓扑结构设置多个节点保护区域，如图7为基于EPON通信的集中式纵联方向保护，实现ADN的保护。

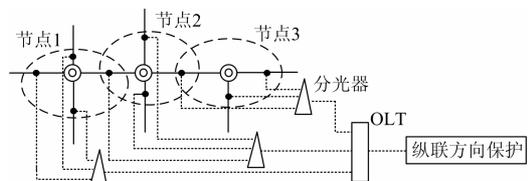


图7 EPON通信的集中式纵联方向保护

Fig. 7 Centralized pilot directional protection based on EPON technology

3.3 工程案例及实验

如图8所示是国家863项目南麂岛微电网示范工程中配电网接线，为架空线路，单电源辐射网，电源出线接1 MW风力发电DG，435 kW光伏发电DG，配电网辐射分支接110 kW光伏发电DG，微电网柴油机主电源1.6 MW。为两个单电源辐射型配电网(图中框内)，采用EPON通信，由FTU与一套集中式纵联方向保护通过EPON通信，实现ADN的保护案例。图9是为该工程开发的FTU(IDP831配电网保护

测控终端，内置ONU)及集中式保护(IDP801配电网集中式保护装置)。图10(a)是EPON通信传输时间实验接线。由于EPON传输的GOOSE机制上行采用分时复用方式，时间较长；下行采用广播方式，延时时间较短。实际测试结果为上行GOOSE延时1.34 ms、下行GOOSE延时0.04 ms，满足配电网保护对通道的要求。图10(b)是实际测试动作波形，在南麂岛工程应用中，电压采用V/V接线方式(B相接地)，电流采用A、C两相接线方式，集中式保护装置在设计时考

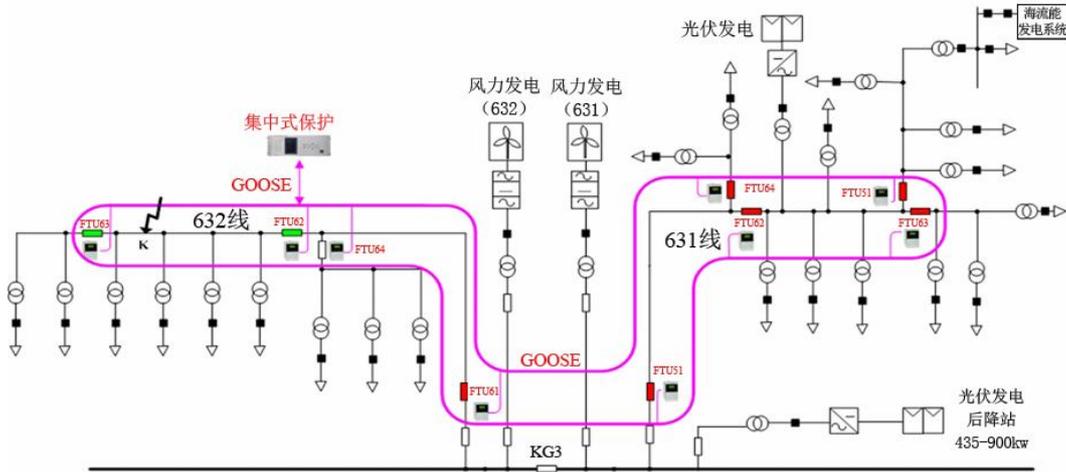


图 8 南麂岛微电网示范工程中配电网网络接线

Fig. 8 Distribution network connection of Nan-Ji island micro grid demonstration project



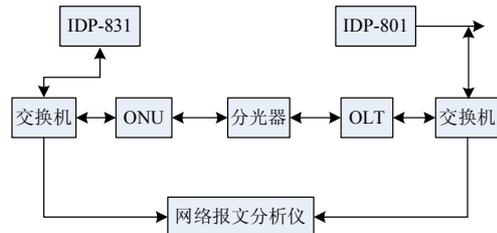
(a) FTU



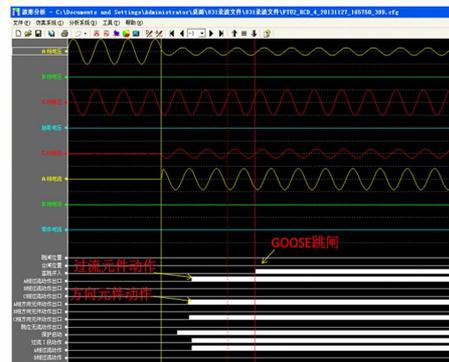
(b) 集中式保护装置

图 9 FTU 及配电网集中式保护装置

Fig. 9 FTU and ADN centralized protection device



(a) EPON通信GOOSE传输时间测试实验接线



(b) 实验动作波形

图 10 实验接线及实验动作波形

Fig. 10 Experimental wiring and wave

考虑到配电网对保护动作时间不如高压线路保护要求高,为了增加配电保护的可靠性,在保护判别时增加45 ms功率倒方向延时及GOOSE消抖延时,实际测试中过流启动元件及方向动作为23 ms,整组保护动作时间70 ms(接收到GOOSE跳闸时间)。

4 结论

基于节点网络拓扑结构的纵联配电网保护,采用EPON通信方式,利用EPON传输GOOSE机制,FTU传输启动及方向元件,由集中式纵联方向保护实现配电网保护,能很好地满足ADN接入DG对保护的要求。设计开发了相应的FTU及集中式保护装置,应用在实际的ADN系统,可彻底解决ADN接入DG配电网的继电保护问题,故障隔离快,不需要多次重合,具有较广泛的推广价值。

参考文献

- [1] 范明天,张祖平,苏傲雪,等.主动配电系统可行技术的研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [2] 范明天.2010年国际大电网会议配电系统及分散发电组研究进展与方向[J].电网技术,2010,34(12):6-10.

FAN Mingtian. Strategic plans of CIGRE distribution system & disperse generation (C6)[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 6-10.

- [3] 李富生,李瑞生,周逢权,等.微电网技术及工程应用[M].北京:中国电力出版社,2013:70-75.
LI Fusheng, LI Ruisheng, ZHOU Fengquan, et al. micro grid technology and engineering application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 70-75.
- [4] 朱声石.高压电网继电保护原理及技术[M].3版.北京:中国电力出版社,2005:248-250.
- [5] 梁芝贤,王剑,唐万里.智能配电网EPON技术应用研究及网络设计[J].电力系统通信,2012,33(232):85-90.
LIANG Zhixian, WANG Jian, TANG Wanli. Research and network design on EPON technology in smart distribution grids[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(232): 85-90.

收稿日期:2014-07-31; 修回日期:2014-10-25

作者简介:

李瑞生(1966-),男,教授级工程师,从事继电保护、分布式发电接入、微电网方面的研究。E-mail: ruishengl@139.com