

# 适用主动配电网的差动保护方案研究

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电缆型配电网保护影响,分析了DER接入电缆型配电网对保护带来的问题,提出了适用于主动配电网的差动保护方案。差动保护方案配置集中式线路差动与就地式母线差动保护,适用于电缆线路的配电自动化。DTU采用内置以太网通信技术,采用专用光纤通道“手拉手”连接。基于光纤通道实现DTU数据同步,DTU进出电流传输至集中式差动保护装置,由集中式差动保护装置实现配电网线路保护,DTU就地实现环网柜母线保护,能很好地满足电缆线路ADN接入DG对保护的要求。设计开发了相应的DTU及集中式差动保护装置,应用在实际的电缆线路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; 配电自动化; 集中式线路差动; 就地式母线差动

## Differential protection scheme to apply to active distribution network

LI Ruisheng

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

**Abstract:** To solve the cable line distribution network protection impact of active distribution network bi-directional current, this paper analyzes the protection problem of the DER access and puts forward the scheme adapt to active distribution network differential protection. The scheme disposes centralized line differential protection and decentralized bus differential protection locally, which is suitable for cable line distribution automation. DTU adopts built-in Ethernet port technology, uses dedicated fiber channel hand in hand to connect. Based on fiber channel to realize synchronous sampling, DTU transfers current-in line and current-out line to centralized differential protection device, centralized differential protection device realizes distribution network line protection, DTU realizes ring main unit bus protection, which can well solve those problems of DG access. Corresponding DTU and centralized protection device are designed and used in the practical cable line ADN system, which has good application prospect.

**Key words:** active distribution network; distributed generator; distribution automation; centralized line differential; decentralized bus differential

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)12-0104-06

## 0 引言

传统配电网潮流是单向的,由发电厂流向用户,分布式发电接入配电网,改变了配电网潮流流向,由单向潮流改变为双向潮流。随着分布式发电(Distributed Generator, DG)技术的发展,配电网接入的分布式发电增多,国际电网界越来越关注配电网技术。2003年国际大电网会议(CIGRE)配电系统和分布式发电专业委员会(C6)工作组启动项目7“有源配电网的开发与运行(Development and operation of active distribution networks)”,2008年CIGRE C6重点关注配电网从单纯的被动配电网向有源配电网转

变,并提出Active Distribution Network(ADN)技术<sup>[1]</sup>,文献[1]把ADN翻译为“有源配电网”。2009年国际供电会议(CIRED)主旨报告“接入分布式能源的双向配电系统管理”,概要介绍了双向配电系统的重要发展,指出了传统配电自动化技术与分布式能源管理一体化面临的挑战,分布式能源整合的信息模型,以及能够与分布式能源整合的自适应保护系统<sup>[2]</sup>。2010年CIGRE C6启动“主动配电网的规划和优化方法研究”<sup>[3]</sup>,第一次把ADN翻译为“主动配电网”,其术语解释为:ADN是分布式或分散式能源且具有控制和运行能力的配电网。构成ADN的发电形式有DG,分布式能源(Distributed Energy

Resource, DER), 微电网(Microgrids, MG), 与之相对应的传统配电网称为被动配电网(Passive Distribution Network, PDN)。2010年CIRED主旨报告“德国电网的挑战: 关注配电网的发展”及技术讲座“IEC 61850 在配电网中的应用”, 体现了国际电网界日益重视配电网以及配电技术研发与推广应用<sup>[4]</sup>。2012年CIGRE保护与自动化专业委员会(B5)学术研讨会的主题之一: 含分布式电源的非放射式(网络化)配电网等要求采用新原理的继电保护技术, 适应未来ADN, 在配电网引入了输电网继电保护技术, 通过电流差动保护和方向比较保护来解决ADN继电保护问题, 并利用基于GPON(Gigabit-Capable PON)的光纤到驻地(Fibre to the Premise, FTTP)通道、IEEE1588地面时钟解决保护通信和同步采样问题。CIGRE比以往更加关注配电网方面的技术, 与CIRED签署了合作协议。由CIGRE B5牵头, 联合CIGRE C6、CIRED组建了联合工作组JWG B5/C6.26-CIRED“含分布式能源的配电网继电保护”。另一个联合工作组JWG C6/B5.25-CIRED“未来配电网控制和自动化”将由CIGRE C6牵头组建<sup>[5]</sup>。2013年CIRED圆桌会议专门讨论“有源配电网保护新方案”及两个技术讲座“继电保护基础知识与保护继电器在当今配电网中的应用”和“配电管理系统在现代配电网中的应用”这些均是ADN的热点问题<sup>[6]</sup>。

在ADN的热点研究上, 文献[7]概要分析了DG接入配电网, 对配电网的规划、运行、短路水平和设备选型、故障处理过程和保护的非常态方式孤岛运行等方面带来不容忽视的影响。文献[8-9]分析了DG接入配电网, 而ADN双向潮流特性, 使得传统配电网的保护不能适用于ADN, 给传统配电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、相邻线保护误动、重合闸不成功等问题。文献[10]提出了基于虚拟节点网络拓扑结构的配电网纵联保护方案, 适用于架空线路的配电网, 该方案采用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。本文与文献[10]相互补充, 重点分析电缆线路主动配电网的保护方案。

## 1 DER接入对电缆网接线FA的影响

配电自动化(Distribution Automation, DA)根据配电网的架空网接线方式及电缆网接线方式不同, 采取不同的配网馈线自动化(Feeder Automation, FA)保护方案。

电缆网接线的常见四种形式: 1) 电缆单侧电源

双射式; 2) 电缆双侧电源单环式; 3) 电缆双侧电源双环式; 4) 电缆双侧电源对射式。电缆网采用的开关设备有断路器、环网柜。电缆配网馈线自动化保护方案有两种: 1) 电缆网分布式FA; 2) 电缆网集中式FA。

### 1.1 电缆网分布式FA

电缆网分布式FA, 配电网保护就地实现, 采用馈线分段保护方案, 断路器装设馈线终端(Feeder Terminal Unit, FTU), 环网柜装设配电终端(Distribution Terminal Unit, DTU), 各终端之间通过专用通信通道连接, 实现相邻FTU(DTU)点对点的通信。对分段开关, 故障判别采用识别相邻FTU(DTU)过流状态, 相邻FTU(DTU)支路过流状态一致, 保持合闸, 相邻FTU(DTU)过流状态不一致, 识别出故障区域, FTU(DTU)跳闸, 隔离故障。如图1, 为双电源环网故障处理, K1故障, DTU1-2支路相邻支路过流状态不一致, 识别出故障在DTU1-2与DTU2-1支路之间, 跳DTU1-2及DTU2-1, 隔离故障。对联络开关, 采用识别相邻FTU(DTU)过流状态, 相邻FTU(DTU)支路过流状态一致, 分段开关合闸, 相邻FTU(DTU)过流状态不一致, 分段开关保持分闸。

无DG接入时, 以上馈线分段DA保护方案能很好地实现电缆网故障隔离。有DG接入时, 如: DG接入DTU2支路, K1发生故障, DG提供故障电流, 故障电流流过DTU2-1, 相邻FTU(DTU)过流状态一致, 识别不出故障区域, 无法隔离故障。

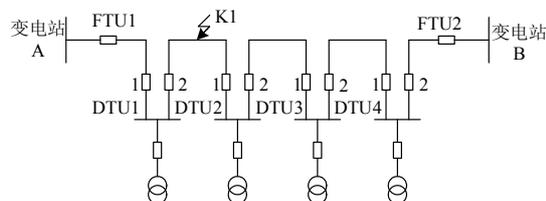


图1 双电源环网故障处理

Fig. 1 Double power ring network fault handling

### 1.2 电缆网集中式FA

集中式FA, 配电网保护是采用主站(子站)与馈线终端配合方式实现。还以图1为例, 断路器装设FTU, 环网柜装设DTU。FTU、DTU通过通信方式接主站(子站)。

无DG接入时, 区内故障, FTU1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、DTU上送故障信息到主站(子站), 主站(子站)判断相邻支路过流状态, 判定故障在支路过流状态不一致的区域, 主站(子站)遥

控相应DTU分闸，隔离故障区域。

有DG接入时，会造成FTU1区外电源侧发生故障，DG提供故障电流，故障电流流过FTU1，造成FTU1误动；区内瞬时性故障，FTU1跳闸后，由于DG存在，可能造成不能息弧，重合不成功；永久性故障时，重合失败，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)判断相邻支路过流状态一致，无法判定故障区域，不能隔离故障。

### 2 主动配电网差动保护方案

在输电网中，潮流双向流动是很普通的送电形式，输电网继电保护技术很好地解决了这一问题。差动保护在输电网的线路、母线、变压器、发电机保护中广泛采用，应用很好，是一种最简单，最可靠的保护，作为以上被保护对象的主保护，已有很多文章论述，这里不再赘述。智能变电站技术的发展，IED设备可实现同步采样<sup>[11]</sup>，网络技术及计算机技术的发展，区域电网可实现集中式保护<sup>[12]</sup>，本文引入输电网差动保护技术，实现主动配电网差动保护。

#### 2.1 IEEE1588(或B码)的智能变电站同步技术

智能变电站间隔层保护控制设备、过程层智能终端设备，统称智能电子设备(Intelligent Electric Device, IED)，采用IEEE1588信号、IRIG-B码信号实现了智能变电站间隔层、过程层定时微秒级精度的要求。IEEE1588定时是采用IEEE1588标准解决网络的时钟同步问题，通过网络连接的分散在测量分离节点上独立运行的时钟，同步到一个高精度和高准确度时钟上。IEEE1588定时采用分布式测量和控制精密时间协议(Precision Time Protocol, PTP)定时方法。智能变电站中同步时钟装置接受GPS信号，作为主时钟源给网络交换机(支持1588定时)，通过过程层网络，连接过程总线上IED作为从时钟，通过1588协议时钟同步，把智能变电站的IED同步到统一的时钟源上，1588定时网络在物理连接上需要多端口网络交换机，如图2所示。

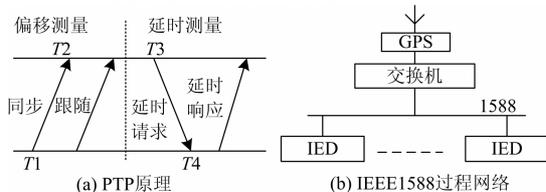


图2 IEEE1588定时

Fig. 2 IEEE1588 timing

IRIG-B 码是 IRIG 委员会专为时钟传送制定的

时钟码，智能变电站中 IRIG-B 码定时是通过 B 码发生器，将 GPS 接收器输送的 RS232 数据及 1PPS 输出转换成 IRIG-B 码，通过 IRIG-B 码输出口及 RS232/RS422/RS485 串行接口输出，待对时的 IED 根据 B 码解码器，将 B 码转换成标准的时间信息及 1PPS 脉冲信号，IRIG-B 定时网络在物理连接上需要多端口 B 码发生器，如图 3 所示。

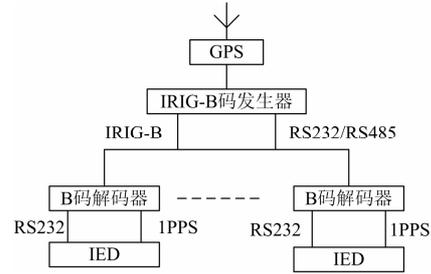


图3 IRIG-B码定时

Fig. 3 IRIG-B timing

#### 2.2 输电线路多端差动保护同步技术

基于光纤通道的电流差动保护，实现了输电线路双端差动保护的同步采样。输电线路除双端差动外，T接线路的三端差动保护也已广泛应用，利用光纤通道可实现三端差动的同步采样<sup>[13]</sup>。在利用光纤通道构成的四端同杆并架双回线的新型继电保护中，文献[14-15]研究了同杆并架双回线的四套保护通过光纤通道环形连接，实现同步采样，构成纵差保护及横差保护。

如图4所示为基于通道同步原理，(从)同步端T1采样时刻发同步命令，(主)参考端T2时刻接收到同步命令，并在T3采样时刻向同步端发参考信息，同步端在T4时刻收到参考信息，计算出通道延时及采样偏差。

通道延时为

$$T_{\text{Delay}} = ((T2 - T1) + (T4 - T3)) / 2$$

采样偏差为

$$T_{\text{Offset}} = ((T2 - T1) - (T4 - T3)) / 2$$

同步端根据采样偏差修正采样时刻，实现采样同步。

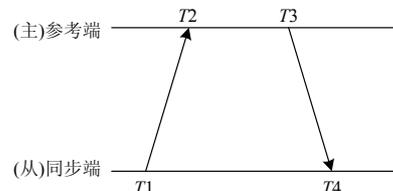


图4 基于通道同步原理

Fig. 4 Synchronization principle of based on channel

### 2.3 内置以太网交换的主动配电网DTU同步技术

基于IEEE1588(或B码)信号的智能变电站同步技术实现智能变电站IED同步,采用多端口网络交换机,由于变电站IED距离较近,适用于变电站内的集中安装设备。环网柜是“手拉手”环网结构,距离远,不适合采用图2、图3所示的网络连接方式。为适应环网柜的“手拉手”环网连接方式,提出DTU采用内置以太网方式,即每个DTU都是个网络交换机,设置两个光以太网接口,每个光以太网接口具备一发(TX)一收(RX),实现DTU之间的“手拉手”连接。如图5是内置以太网交换的主动配电网DTU组网方式,组网结构简单,只需电缆线路具备专用光纤通道即可。如图6是设计开发的内置以太网接口单板。

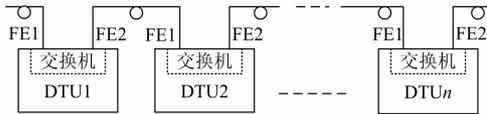


图5 DTU“手拉手”组网方式(FE1,FE2内置光以太网接口)  
Fig. 5 Hand in hand to connect DTU (FE1, FE2 built-in optical Ethernet port)



图6 内置以太网接口单板  
Fig. 6 Built-in Ethernet port board

主时钟选择有两种方式,一种方案是变电站内配置支持IEEE1588的交换机,站内交换机做主时钟源,变电站出线的DTU接变电站内对时网络交换机,实现各个环网柜节点的同步数据采集,该方案需要变电站内配置支持IEEE1588的交换机,站内交换机做主时钟源,DTU内置交换机做从时钟。另一种方案是不依赖IEEE1588的交换机,任选一个DTU作主端,其他DTU作从端,利用光纤通道实现同步。

### 2.4 集中式线路差动与就地式母线差动

采用基于基尔霍夫电流定理的电流差动保护在高压线路保护、母线保护中广泛应用,是一种简单,理想的保护。输电线路差动保护仅需线路两侧同步电流信息,比较两侧电流实现输电线路的保护功能,母线保护根据流入流出母线电流构成的差动区域,实现母线的保护功能。根据配电网环网柜接线特点采用配置集中式线路差动与就地式母线差动方案。

根据图1双电源环网配电网电缆接线形式,建立差动保护区域模型,如图7所示。 $L_n$ 是配电网线路差动区域, $B_n$ 是环网柜母线差动区域。 $L_n$ 线路差动区域同步采样电流:变电站出线电流、环网柜DTU进线及出线电流,这些同步采样电流数据通过“手拉手”级连的专用光纤,连至集中式差动保护装置,集中式差动保护实现配电网线路保护功能。

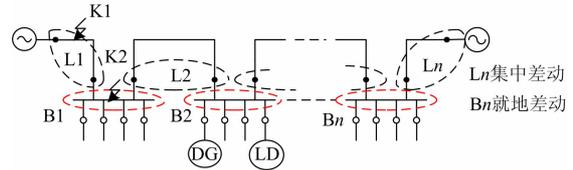


图7 配电网接线差动保护区域模型

Fig. 7 Distribution network differential protection zone model

$L_n$ 配电网线路保护差动判据如下。

启动判据为

$$I_d > I_{QD} \quad (1)$$

比率制动判据为

$$I_d > kI_r \quad (2)$$

式中:  $I_d = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2|$ , 为差动电流;  $I_r = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2|$  为制动电流;  $k$  是制动比例系数;  $I_{QD}$  为差流启动门槛。

$\dot{I}_1, \dot{I}_2$  为环网线路两侧电流,采用线路两侧电流差的绝对值做制动量,提高区内故障灵敏度。

对就地的环网柜,考虑到环网柜负荷侧开关不能分断故障电流,且为了减少集中式差动保护同步数据量,环网柜母线故障采用DTU就地实现母线差动保护方案。 $B_n$ 是环网柜母线差动区域,其差动保护判据同式(1)、式(2),其中  $I_d = \left| \sum_{j=1}^n \dot{I}_j \right|$ ;  $I_r = \sum_{j=1}^n |\dot{I}_j|$ ;

$\dot{I}_j$  为母线上支路电流。

图8(a)是DTU终端与集中式差动保护装置的物理连接,图8(b)是保护逻辑框图,环网接线闭环运行时,配电网线路故障,集中差动保护装置判别出故障,通知相应DTU跳故障线路两侧断路器,环网柜母线故障,DTU就地母线差动直接跳环网柜进出线断路器,以最快时间隔离故障。环网接线开环运行时,配电网线路故障,集中差动保护装置判别出故障,通知相应DTU直接跳故障线路两侧断路器,集中差动保护装置在跳开后通知相应DTU直接合分断开关,以最快时间隔离故障,恢复供电,环网柜母线故障,就地母线差动直接跳环网柜进出线断路器,集中差动保护装置在跳开后通知相应DTU直接合分断开关。

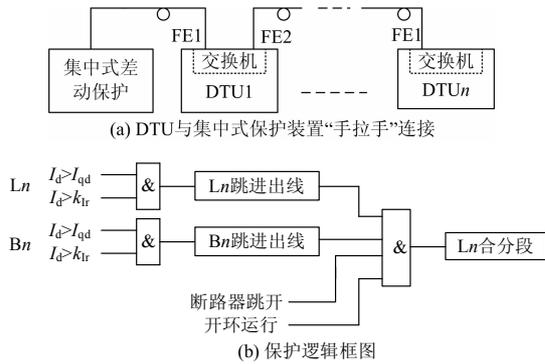


图 8 装置连接及保护逻辑框图

Fig. 8 Logic diagram of device connection and protection

### 3 工程应用案例

图9是《国家电网智能电网研究院微电网示范工程》项目的主动配电网接线，采用10 kV双环接线方式。微电网部分：I段低压母线(400 V)接300 kW/600 kWh磷酸钛锂储能，450 kW光伏发电，负荷720 kW；II段低压母线(400 V)接450 kW光伏发电，负荷720 kW；两段低压母线通过母联开关相连。工程采用IEEE1588网络时钟同步DTU，配置集中式差动保护装置实现主动配电网的保护，通过光纤通信，实现ADN的保护案例，已于2013年10月投入运行。在环网供电方式下，事故发生后，集中式差动保护装置判断出事故区间，进行事故隔离，将事故处理

过程信息上送到配电自动化主站系统。

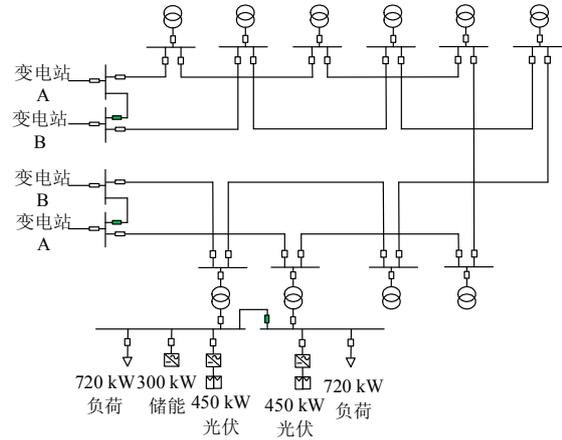


图 9 智网院主动配电网主接线图

Fig. 9 Main wiring diagram of State Grid Smart Grid Research Institute AND

图10是《珠海万山海岛新能源微电网示范项目》东澳岛微电网示范工程主接线图。采用10 kV电缆接线，其中柴油机发电6×1 000 kW，风力发电4×75 kW，储能500 kW/3 000 kWh(其中一期柴油机发电2×1 000 kW，微电网独立运行)，工程采用基于光纤同步DTU，配置微电网动态稳定控制装置，实现独立微电网的保护及控制。图11是这两个工程采用的DTU及集中式保护装置。

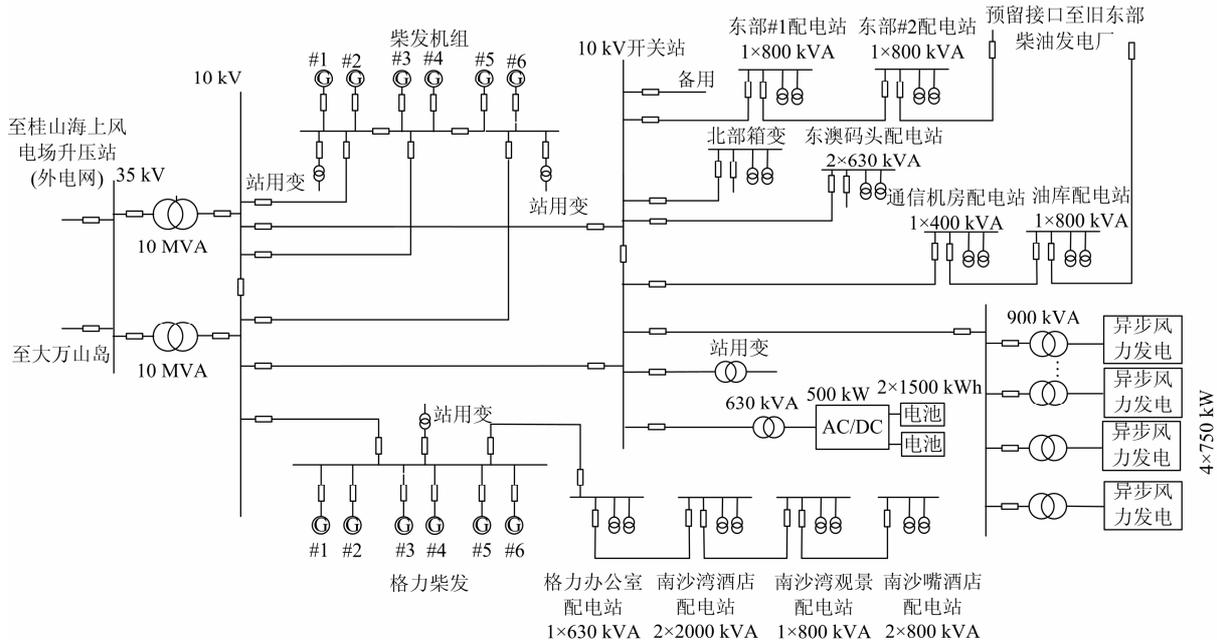


图 10 东澳岛微电网示范工程主接线图

Fig. 10 Main wiring diagram of DongAo Island micro grid demonstration project





(a) DTU

(b) 集中式保护装置

图 11 DTU及集中式保护装置

Fig. 11 DTU and centralized protection device

## 4 结论

采用配置集中式线路差动与 DTU 就地式母线差动的电缆线路主动配电网保护, 环网柜仅进出线同步电流上送集中式保护装置, 负荷侧电流不上送集中式保护, 减少集中差动保护同步数据量, DTU 就地实现母线差动, 直接跳电源进出线, 配电网保护层次清晰, 分工明确, 保护配合协调简单, 能很好适应电缆线路配电网接线要求, 并满足 ADN 接入 DG 对保护的要求。设计开发了相应的 DTU 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 的配电网继电保护问题, 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. 配电系统与分散发电集成研究的国际动态: CIGRE 2008 中 C6 的研究方向[J]. 动力和电力工程师, 2008(4): 33-34.
- [2] 范明天. 2009 年第二十届国际供电会议综述[J]. 供用电, 2009, 26(5): 16-20.  
FAN Mingtian. A summary of the 20th CREID Conference in 2009[J]. Distribution & Utilization, 2009, 26(5): 16-20.
- [3] 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.
- [4] 范明天. 2011 年第二十一届国际供电会议综述[J]. 供用电, 2011, 28(4): 8-13.  
FAN Mingtian. A summary of the 21th International Council on Electricity Distribution (CREID) in 2011[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(4): 8-13.
- [5] 李力, 赵希才. 2012 年国际大电网会议系列报道-电力系统保护与自动化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 1-5.  
LI Li, ZHAO Xicai. A review of CIGRE 2012 on protection and automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 1-5.
- [6] 徐丙垠. 2013 年国际供电会议系列报道-运行、控制与保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 1-5.  
XU Bingyin. A review of CIGRE 2013 on operation, control and protection session[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 1-5.
- [7] 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.
- [8] 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.
  - [9] 孙鸣, 余娟, 邓博. 分布式发电对配电网线路保护影响的分析[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 104-107.  
SUN Ming, YU Juan, DENG Bo. Analysis of impact of DGs on line protection of distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 104-107.
  - [10] 李瑞生. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.  
LI Ruisheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.
  - [11] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波, 等. 基于 IEEE1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.  
ZHAO Shanglin, HU Minqiang, DOU Xiaobo, et al. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.
  - [12] 宋小会, 郭志忠, 倪传坤, 等. 区域电网集中式网络保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 43-47.  
SONG Xiaohui, GUO Zhizhong, NI Chuankun, et al. Research on centralized network protection of regional power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 43-47.
  - [13] 李瑞生, 贺要锋, 樊占峰, 等. T 型输电线路三端差动保护工程应用实践[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 119-125.  
LI Ruisheng, HE Yaofeng, FAN Zhanfeng, et al. Application of current differential protection for T connection transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 119-125.
  - [14] 张太升, 鄢安河, 赵一, 等. 同杆双回线的新型继电保护方案研究[J]. 继电器, 2008, 32(8): 16-19, 30.  
ZHANG Taisheng, YAN Anhe, ZHAO Yi, et al. The study of a new relay protection scheme for double circuit lines on the same pole[J]. Relay, 2008, 32(8): 16-19, 30.
  - [15] 李瑞生, 鄢安河, 樊占峰, 等. 同杆并架双回线继电保护工程应用实践[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 83-85.  
LI Ruisheng, YAN Anhe, FAN Zhanfeng, et al. Application of relay protection for double-circuit lines on the same pole[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 83-85.

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2014-10-21

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

(编辑 周金梅)