

电弧光保护作为母线主保护在中低压开关柜的应用和讨论

周林, 曹天怡

(杭州瑞胜电气有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘要: 如何在故障发生时最大限度保护运行人员人身安全, 减少设备的损害是电力系统保护工程师重点关注的问题。文章总结了过去10多年来在中国变电站中低压配电领域内电弧光保护的应用和运行经验, 并结合最新发布电力行业标准和即将发布国家标准, 讨论电弧光保护的配置、应用和关键点。电弧光保护技术可以作为中低压开关柜主保护的一种新选择, 因其动作速度快、灵活性高、可靠性高及选择性灵活的特点而被广泛应用, 并且具有很高的性价比。在中国绝大部分中低压母线没有主保护的情况下, 尤其是针对加装母线保护的技改项目, 电弧光保护具有无可比拟的简单方便的优势。

关键词: 电弧光保护装置; 中低压配电柜; 母线主保护; 弧光传感器

中图分类号: TM591 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19421/j.cnki.1006-6357.2016.12.010

0 引言

6kV(10kV)厂用/配电中压开关柜为全厂辅机/供电系统的供电枢纽。在发生内部故障时, 是否能迅速地切除故障, 对全厂/配电系统的安全运行至关重要。按目前的保护方案: 中压母线尚没有配置任何专门的保护, 而是由进线开关的相关后备保护来兼顾。但是进线开关与出线开关的保护需要相互配合, 一般速断保护延时的级差至少为300ms, 甚至500ms; 而过流保护的配合级差更是长达1~2s。

所以, 厂用/配电系统中压母线上所发生的任何故障都至少要延时切除。而现有的厂用中压母线能在第一时间切除故障的保护还是个空白。鉴于中压母线的重要地位, 都不愿看到任何故障延时切除的状况。因为开关柜内的各种故障, 其短路电流所产生的电弧及其大量的高温, 使柜内气体急剧膨胀, 可在极短的时间内达到顶峰, 严重危及人身和

设备安全。

所以, 针对国内现有的厂用和配电中压母线保护配置的现状, 非常有必要增设快速保护, 以降低对开关柜的损害, 减小对变压器低压侧的绝缘冲击, 延长变压器使用寿命并有效保障人身安全。

1 国内外电弧光保护技术背景和发展综述

在中低压配电柜系统中, 电弧光保护装置的发展和使用始于20世纪80年代末或90年代初。于2004年该电弧光保护技术作为一种独立的保护被引入中国市场。

1.1 欧洲和美国相关的电弧光保护标准

自从1890年电力网开始发展以来, 中低压开关柜的电弧故障一直是电力保护工程师主要关心的问题之一。因电弧故障对操作运行人员的人身安全造成严重威胁, 以及严重损坏电力设施, 欧洲IEC标准

委员会于1981年修订了相关标准 IEC60298^[1]。该标准描述了电弧产生的原因、测量及检验流程。作为IEEE成员之一的Ralph Lee^[2]于1987年对中低压开关柜内的电弧进行了全面的研究, 为80年代末电弧光保护发展奠定了理论基础。同年, 美国IEEE^[3]和加拿大EEMAC^[4]也针对中低压开关柜金属封闭开关设备和控制设备出版了相应的标准, 其中包含了电弧光故障的预防。至2003年, IEC62271-200^[5]代替IEC60298作为中低压开关柜开关设备和控制设备的新标准, 包含了更多对于电弧故障预防的限制措施。2004年, 美国消防协会(NFPA)发布了一个标准作为国家电气规程(NEC)的一部分来进一步规定中低压开关柜的运行安全和因电弧故障引起的火灾预防^[6]。

1.2 中国相关的电弧光保护标准

从20世纪30年代开始, 许多发达国家便逐渐开始将阻燃型母线差

动保护方案作为中低压母线主保护。但是,在国内几乎没有针对中低压母线主保护的方案,可能的主要原因有:

1) 母差保护方案设计、整定值计算、安装调试、运行维护太过复杂。

2) 对于早期电网运行而言,比起人身安全可能更注重系统稳定。

3) 国家电气保护设计规程^[7]针对继电保护和电气控制装置并没有提出在中低压开关柜强制加装母线主保护的要求。在国内,电弧光保护技术经过10多年推广应用,在2014年国家标准化委员会(SAC)和中国电力企业联合会(CEC)分别组建专家工作组来起草和编写电弧光保护装置的相应国家标准和电力行业标准草案。经过两年的编写和讨论,电弧光保护装置的国家标准GB/T 14598.302—2016《弧光保护装置技术要求》和行业标准DL/T 1504—2016《弧光保护装置通用技术条件》分别于2016年9月1日和2016年6月1日正式颁布和实施。国家标准^[8]和电力行业标准^[9]分别对弧光保护装置的技术要求、试验方法、检验规则、应用范围、配置及整定原则等内容作了定义和规定。这对电力生产运行中的人身安全及中低压配电开关设备安全可靠来说无疑是一大进步。

1.3 电弧光保护原理

电弧光保护的原理如图1所示,它的动作断为故障时产生的两个条件,即弧光和电流增量。当同时检测到弧光和电流增量时系统发出跳闸指令。当仅检测到弧光或者电流增量时发出报警信号,而不会发出跳闸指令。

针对各种不同的中性点接地方式,图2中所示的电弧光保护逻辑图更加全面,可供进一步研究和应用。



图1 针对所有相间故障的电弧光保护逻辑图

Fig.1 Logic diagram of arc protection for phase faults

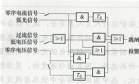


图2 综合全面的电弧光保护逻辑图

Fig.2 Logic diagram of arc protection for all phase and earth faults

在我国,对于中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统来说,当母线发生相对地故障后,由于故障电流小且三相间的线电压基本保持不变,故考虑到供电可靠性仍然允许运行2h进行带电故障检测,但需在此期间及时切除故障。因此,针对这种应用弧光保护装置增加零序电压作为辅助判据。当同时检测到弧光和零序电压增量时,如果运行时间不足2h,则装置仅发出报警信号;如果运行时间超过2h,则直接发出跳闸指令。

在我国一些大城市,如北京的配电系统多以电缆线路为主,因此采用中性点经电阻接地方式。当母线发生相对地故障后应及时跳闸。相对于中性点直接接地系统,此系统的故障电流较小,因此建议采用零序电流作为辅助判据。当同时检测到弧光和零序电流增量时,系统可直接发出跳闸指令或根据设计要求延时后发出跳闸指令。

此外,若相电流增量较小不宜采集,弧光保护装置也可以采用低

电压作为辅助判据。当弧光保护装置同时检测到弧光和低电压信号时系统发出跳闸指令,当仅检测到弧光或者低电压时发出报警信号。

1.4 电弧光保护系统的组成及性能简介

电弧光保护系统主要由主控单元、辅助单元和弧光传感器几部分组成。

主控单元用于管理、控制整套电弧光保护系统。它检测弧光和电流增量信号,并对收到的两种信号进行处理、判断。在满足跳闸条件时,发出跳闸指令以切除故障。主控单元的跳闸及报警信号逻辑编程极易操作,可根据不同母线结构和运行方式选择跳闸逻辑。此外主控单元根据弧光传感器或弧光单元输入的信号,能准确的判断和显示故障点位置。

辅助单元包括弧光单元和电流单元等。当主控单元的弧光输入路数小于实际需求时,可使用弧光单元进行扩展。弧光传感器先将检测到的弧光信号传输到弧光单元,弧光单元再通过光纤将信号反馈给主控单元。电流单元用于检测三相电流信号,A、B、C三相电流均可检测。

弧光传感器一般选用无源透视镜式传感器,主要安装在开关柜内。

1.5 电弧光保护与母线差动保护的比较

电弧光保护是否可以作为一种母线主保护来替代传统的母差保护?下面列出了一张关于电弧光保护和母差保护的比较表,见表1。该表中讨论和描述了一些关键的保护特性。作为现代数字式继电保护,所有保护装置都需要通过型式试验,依据IEC/GB等标准,例如绝缘性能检验,环境试验和EMC/EMI电磁兼容/电磁干扰试验等。另外还有一些功能假设可以实现,就不在列表

表1 电弧光保护和母差保护比较表

Table1 Comparisons between the arc protection and the busbar differential protection

	电弧光保护	母差保护
原理	利用弧光电流/电压等判据,检测相对相故障和相对地故障	利用差动电流判断,检测相对相、相对地故障
动作速度	在21ms时,典型动作时间<15ms; 在无电流/电压判据时,典型动作时间<3ms	在21ms时,典型动作时间在20~45ms
稳定性	由于电弧光保护工作原理的特性,使得其在电流/电压设定值很低的情况下也能保证稳定性	在区外故障发生时必须保持稳定; 复杂的数值运算; 不应误动
选择性	可以选择性跳开同一区域内的某些或全部馈线断路器,进线断路器,其他断路器; 具有断路器失灵保护	总是跳开同一区域内的全部断路器; 具有断路器失灵保护
灵活性	可变的逻辑编程适用于各种接线和运行方式; 可包含全部的开关柜和断路器安装	根据母线保护设备和管理的设计,保护有限数量的主控和区域
可靠性	采用无源式弧光传感器,并在保护装置之间采用全光纤通信及通信,传输信号,没有电磁干扰; 具有故障定位功能	主单元和辅助单元均采用铜绞线连接,传输电流信号,抗电磁干扰能力相对较差; 不具备故障定位功能
其他功能	弧光保护装置特别适用于主母线没有安装保护的中低压开关柜改造项目; 弧光保护装置可以加装到已经存在的开关柜中,且不影响现有保护的设计; 系统性价比优(1X)	对于已经存在的开关柜几乎不可能增加母差保护装置; 需要额外安装专用保护用电流互感器; 系统价格相对较高(1.5X)

格中讨论了,如事件日志记录,故障录波及波形存储,时间同步,标准化通信协议等。

1.6 在国内中低压开关变电站推荐使用电弧光保护的主要原因

在中低压开关变电站推荐安装或改装弧光保护作为主母线保护的主要原因有:

- 1) 最大程度降低和(或)避免中低压开关柜内的弧光故障对人身安全的伤害或损害。
- 2) 最大程度降低和(或)避免弧光故障对中低压开关柜的损坏和毁坏。
- 3) 安装弧光保护后,在母线发生弧光故障时可以快速跳闸,能够

减少对功率变压器二次绕组的绝缘损坏。

- 4) 清除母线故障后产品可以快速恢复运行,能够将间接成本的损失减小到最少。

2 电弧光保护在不同中性点非有效接地系统中的应用

2.1 中性点不接地系统

在我国绝大多数中低压配电系统是中性点不接地系统,这种接地处理方式允许系统在发生单相接地故障时继续供电2h。而80%的中低压开关柜母线故障起初都是相对地故障,并且迅速发展为相对相故障,故目前安装的弧光保护装置只

能对开关间隔中发生的相间故障进行探测和操作。为了更早期地探测到相间故障,零序电压被考虑为一种探测依据。需要进一步的研究和测试表明在母线发生相对地故障后增加早期告警功能,可以使在相对地故障延时2h后且发展为相对相故障前清除故障。

2.2 中性点经电阻(消弧线圈)接地系统

在我国也有很多中低压配电系统安装消弧线圈(即在中性点装设变压器)以限制故障电流,从而消除接地处的电弧,与中性点不接地系统情况相同,安装的弧光保护装置只能对开关间隔中发生的相间故障进行探测和操作。所以类似地,在母线发生相对地故障且在2h允许运行时间内,增加零序电压判据报警提示。

2.3 中性点经电阻接地系统

随着中国城市化进程的快速发展,越来越多的大城市,例如北京、上海等,也开始考虑使用中性点经电阻接地系统。这种方式可以检测出接地故障并立即跳闸或者一段延时之后跳闸。由于此接地方式取决于电阻值的选取,所以故障电流可以被控制在一定范围内。这种情况下,对于灵敏性接地故障(SEF)和(或)零序电压接地故障的检测,可以考虑利用电流和(或)电压作为弧光保护的判据,用以检测母线相对地故障以及故障时跳开进线断路器开关。

3 电弧光保护在不同接线方式配电系统中的应用

3.1 双进线单母分段供电示例

双进线单母分段供电方式常见于220/35kV、110/10kV和35/10kV变电站。双进线单母分段弧光保护配置如图3所示。

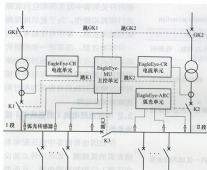


图3 双进线单母分段弧光保护配置图

Fig.3 Single busbar with two incoming feeders and a busbar

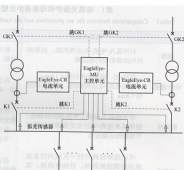


图4 双进线单母线（无分段）弧光保护配置图

Fig.4 Single busbar with two incoming feeders and no busbar

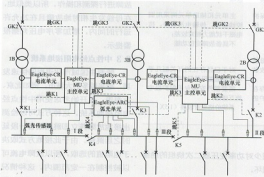


图5 单母分段（三段或多段母线）弧光保护配置图

Fig.5 Three or more single busbars with busbars

需要注意的是，经常有其他电源系统，例如小型水电站，可能与变电站的出线柜相连倒送电。这种情况下，也需要采集相应出线柜的电流信号，一旦母线发生弧光故障，则同时跳开出线柜断路器开关，以便完全切除故障。

3.2 双进线单母线（无分段）供电示例

双进线单母线（无分段）供电方式常见于火力或天然气发电厂。双进线单母线（无分段）弧光保护

配置图如图4所示。

3.3 单母分段（三段或多段母线）供电示例

单母分段（三段或多段母线）供电方式常见于水电站，其优点是更安全的保证电源供电。如果有一段母线电源发生故障，其他两段母线可以作为备用供电。外来电源也需要检测电流信号。单母分段（三段或多段母线）弧光保护配置图如图5所示。

3.4 单进线单母线（无分段）供电示例

单进线单母线（无分段）供电方式常见于风电场和光伏电站。单进线单母线（无分段）弧光保护配置图如图6所示。

3.5 双进线单母线（馈线保护）供电示例

为了使弧光保护更有选择性，可以在出线柜电缆室加装弧光传感器。一旦电缆室发生弧光故障，可以先跳开本柜断路器开关。如果开关柜其他室仍然有弧光存在，同时检测到电流超过整定值，则再跳开进线断路器开关，以便消除故障。双进线单母线（馈线保护）弧光保护配置图如图7所示。

3.6 双母分段供电示例

弧光保护有一种特别的应用即用于双母分段供电系统。铁路线路上的变电所就是采用双母分段供电系统。双母分段弧光保护配置图如图8所示。

4 应用中的关键要素

4.1 CT和VT的选型

在大多数情况下，弧光保护装置和其他保护装置（例如过流和/或

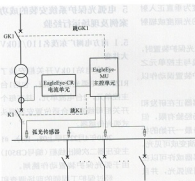


图6 单进线单母线（无分段）弧光保护配置图
Fig.6 Single busbar with a single incoming feeder

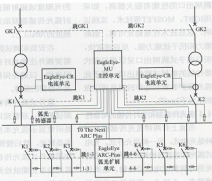


图7 双进线单母线（馈线保护）弧光保护配置图
Fig.7 Single busbar with all feeders tripping

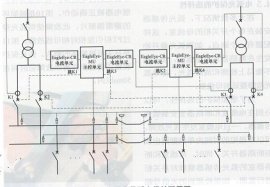


图8 双母分段弧光保护配置图
Fig.8 Double busbars with busbars

接地故障保护装置)一样,采集的是现存的和/或常用的保护级CT。可以与现有的馈线保护装置串联连接。如今CT的负载可以承受现代数字继电器,但当CT到保护装置的线缆很长时,装置和线缆的整体负载需要被评估和检查。有些时候,例如故障电流很小的时候,检测开口三角形接线方式下VT的不平衡零序电压很有必要。

4.2 电流和弧光整定值的推荐

在技术要求更为严格的电力行业标准里,弧光动作门槛值范围是 $5\sim 20\text{ kLux}$ 或 $1\sim 10\text{ mW/cm}^2$,误差不超过 $\pm 20\%$;电流整定值范围是 $0.1\sim 20\text{ In}$,误差不大于 $\pm 5\%$ 或 0.04 In 。

但是在实际应用,中比如变电站,电流整定值一般推荐设定为变压器二次侧额定电流的 $1.2\sim 1.3$ 倍。

如果有出线柜与电动机相连,那么电流整定值的设定应该考虑大于电动机启动的最大值。

光照度的设定一般取决于弧光传感器的灵敏度和现场光照条件,电力行业标准出的要求值相对通用,经验告诉我们弧光整定值设置在 $20\sim 40\text{ kLux}$ 更为合适。

4.3 动作时间

弧光保护装置可以以单一的弧光信号判据和基于弧光信号和电流信号的综合判据。在单一的弧光信号判据条件下,装置动作时间要求不大于 10 ms 。具体的动作时间,主要由装置本身所采用的出口继电器类型决定。而在基于弧光信号和电流信号的综合判据条件下,当电流整定值为2倍额定电流时,装置动作时间要求不大于 20 ms 。

需要特别说明,动作时间越短,对于人身安全和设备安全的损害越小。传统的电子式跳闸出口性能不稳定,不可靠,因此在国内继电保护领域不允许使用电子式跳闸出口,习惯上多要求使用机械式跳闸出口,经过多年的技术改进,目前电子式

跳闸出口的性能有很大提高。如采用IGBT、MOSFET等技术。实践证明,这些技术性能稳定可靠,熔断能力和抗干扰能力强,反应速度快,所以电子式跳闸出口可以满足和代替传统的机械式跳闸出口。基于此,弧光保护装置的动作时间是可以做到不大于3ms的。

4.4 弧光传感器和光纤传输的可靠性

市面上有两种弧光传感器,一种是光电式,另一种是光纤式。光电式弧光传感器当检测到弧光后,会将光信号转换成电信号传输。这类传感器有一个缺点,那就是二次低压电气保护线缆会从高压母线室穿过。

光纤式弧光传感器分为探头式和光带式两种。探头式传感器安装在开关柜各间隔室,当弧光产生并燃烧时,光的强度将突然增加,弧光传感器通过光感应的变化发出信息,判断弧光传感器的数值变化,超过整定值后直接由光纤传送到辅助单元和主控单元。光带式传感器是依靠光纤线缆本身探测弧光,所以在布置的时候需要贯穿整排开关柜母线室,以便监测弧光。探头式弧光传感器的优点是便于故障定位并且具有抗电磁干扰能力。光带式弧光传感器的性价比比较高,但是对于故障定位来说比较困难,除非是用隔离的方法设计安装。探头式弧光传感器示意图如图9所示。



图9 探头式弧光传感器示意图

Fig.9 A Fiber Optical Point Light Sensor

一般来说,若光照度或辐射照度大于弧光动作门槛值的垂直正入射光,弧光传感器能够灵敏检测;若光照度或辐射照度大小相同的人射光,水平入射时弧光传感器获取

的光照度或辐射照度为垂直正入射时弧光传感器获取的光照度或辐射照度的70%以上。

在安装和调试弧光保护装置时,需要额外注意光纤线与主控单元之间连接,以避免保护装置误动作以及不必要的报警。

紫外式弧光传感器正在研发和测试阶段。尽管现场经验有限,但是研究显示弧光本身最一开始的状态是紫光,然后慢慢演变成可见光。使用紫外式弧光传感器或许可以在弧光发生初期就检测到弧光,并且有效的与其他可见光区分,使得弧光保护更加可靠。

通常情况下,弧光传感器不需要任何日常维护的工作。

4.5 电弧光保护的选择性

在大多数情况下,弧光传感器安装在每个开关柜的母线室。这样配置有一个缺点,如果弧光最开始发生在断路器室和电缆室,那么就不能马上检测和清除弧光,除非弧光故障蔓延到母线室。

为了增加保护的选择性,可以分别在电缆室和断路器室安装弧光传感器。一旦电缆室发生弧光故障,可以在最短的时间内单判跳出线柜断路器开关。同时,母线室和断路器室的弧光传感器继续对开关柜进行监测,如果检测到的光信号超过弧光整定值且电流信号也超过整定值,那么断开进线断路器开关以便清除母线弧光故障。如果考虑降低弧光保护系统的成本,可以将弧光传感器和光纤结合使用。

在大城市中,例如北京和上海,由于地下铺设大量的线缆,所以使用经电阻接地系统。这种系统推荐使用上述描述的保护方法,断开所有与母线连接的断路器,以便完全消除因电容放电倒送故障电流至母线而重新引起的弧光故障。

5 电弧光保护系统安装的成功案例及现场运行经验

5.1 南方电网广东茂名110/10kV大井变

此变电站10kV开关柜安装了RIZNER电弧光保护系统,包括1台主控单元,2台电流单元,并在每个开关柜母线室的合适位置安装探头式弧光传感器。

2010年4月22日早上08:16分,#1主变压器二次侧出线柜(编号CB501)由于弧光保护装置动作跳闸。

经过保护工程师的现场调查和故障分析,得出的结论是10kV PT柜母线A相避雷器可能由于二次雷击或诱发的瞬态电压切换而引起爆炸,尽管之后过电流保护/接地故障保护继电器被正确动作。图10是被损坏的避雷器照片,此故障使得弧光穿过PT柜引发相对相母线故障。图11是开关柜被损坏的照片。弧光保护装置正确动作并清除故障总时间在50ms以内。



图10 母线A相避雷器故障

Fig.10 Surge arrester of phase A failure



图11 相对相母线故障

Fig.11 The phase to phase busbar fault

电流整定值设置在1.3倍的额定电流,弧光整定值设置在30kLux。电弧光保护系统作为母线主保护可以又好又快的对母线进行保护,同时减少对开关柜的损害以及在最短时间内为客户恢复供电。

5.2 国家电网浙江丽水110/35kV龙石变

龙石变35kV段安装RIZNER电弧光保护装置,配置了1台主控单元,5台电流单元,并在每面开关柜母线室安装1个探头式弧光传感器。国家电网浙江丽水110/35kV龙石变电站如图12所示。

龙石变这样配置的原因是因为I段母线和II段母线是并列运行的(母联断路器开关闭合),且II段母线上编号为3528和3530的出线柜连接2个小水电站。

2011年6月17日下午15:30分左右,II段母线PT柜A相发生接地故障。在15:31:37,A相接地故障扩大到B相,此时弧光保护装置检测到大于50kLux的光强并且II段进线过流值为14.6A。因此弧光保护装置跳开II段进线断路器开和母联断路器开



图12 国家电网浙江丽水110/35kV龙石变

Fig.12 State grid zhejiang lishui 110/35kV substation



图13 PT绝缘击穿故障
Fig.13 PT insulation breakdown failure

关,同时正确跳开3528和3530两出线柜断路器开关。全部故障清除时间(从检测到相对相故障到跳闸指令发出)是150ms。PT绝缘击穿故障如图13所示。

经过保护工程师的现场调查和故障分析,得出的结论是PT绝缘击穿引起A相对地故障,继而快速引发相对相故障。由于跳闸逻辑设计得当,电流和弧光整定值都设定在可接受的范围内(电流整定值设定在1.2倍的额定电流,即6A;弧光整定值设置在50kLux),使得弧光保护装置正确快速动作,并且尽可能的减少故障损害。

6 结语

综上所述,电弧光保护装置的主要特点是简单,灵敏,快速,灵活,可靠,可选择。

为了最大限度保护运行人员人身安全和减少设备的损害,同时依据国家标准和电力行业标准,建议在今后中低压母线主保护的设计中采用电弧光保护作为母线主保护。这也符合国际惯例和IEEE/IEC的相关标准。

无论在国内还是国外,作为中低压开关柜中替代母差保护的母线主保护,电弧光母线保护设计具有明显的优势,尤其适用于加装母线保护的技改项目。

参考文献

- [1] IEC 60298—1981 额定电压1kV以上和包括52kV的交流金属封闭开关设备和控制设备[S].
- [2] Lee R H. Pressures developed by arcs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 1987. 23 (4): 760-763.
- [3] IEEE Standard C37.20.7—2007 内部电弧故障用压力等级小于38kV的金属外壳开关装置的测试用指南[S].
- [4] EEMAC G14-1-1987 Procedure for Testing the

Resistance of Metal-clad Switchgear Under Conditions of Arcing Due to an Internal Fault [S].

- [5] IEC 62271.200—2005 额定电压1kV以上和包括52kV的交流金属封闭开关设备和控制设备[S].
- [6] NFPA 70E—2009 工作场所电气安全标准[S].
- [7] GB/T 50062—2008 电力装置的继电保护和自动装置设计规范[S].
- [8] GB/T 14598.302—2016 弧光保护装置技术要求[S].
- [9] DL/T 1504—2016 弧光保护装置通用技术条件[S].

收稿日期: 2016-10-20

作者简介:

周林(1963—),男,硕士,澳大利亚工程师协会会员,总经理兼总工程师,研究方向为智能电网,电力系统自动化,保护测控及在线电气设备状态监测。

曹天怡(1989—),女,售前技术主管兼助理工程师,研究方向为智能电网,电力系统自动化,保护测控及在线电气设备状态监测。

(下转第57页 continued on page 57)