

DOI: 0.61369/NPS.2025030002

电缆故障综合在线监测技术的研究与应用

邵久柠¹, 刘海¹, 宋延良¹, 童雪燕², 杨新州³

(1. 华电新疆公司有限公司新能源分公司, 新疆 乌鲁木齐 832000;

2. 安徽合凯电气科技股份有限公司, 安徽 合肥 231131;

3. 上海昆拓电气科技有限公司, 上海 201612)

Research and Application of Comprehensive On-line Monitoring Technology for Cable Faults

SHAO Jiuning¹, LIU Hai¹, SONG Yanliang¹, TONG Xueyan², YANG Xinzhou³

(1. New Energy Branch of Huadian Xinjiang Company Ltd., Urumqi, Xinjiang 832000;

2. Anhui Hekai Electric Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 231131;

3. Shanghai Kuntuo Electric Technology Co., Ltd., Shanghai 201612)

摘要:【目的】电力系统的电缆故障会引发供电中断、设备损坏及系统稳定性下降等问题, 针对传统电缆故障检测方法实时性差、定位滞后等问题, 通过应用在线监测技术提升电缆运行可靠性。【方法】研究基于电磁感应原理, 针对传统电缆故障检测方法实时性差、定位滞后等问题, 探索电缆故障综合在线监测技术, 开发了电缆故障监控、预警及定位系统 (SHK-ECTL)。该系统通过在电缆屏蔽层安装高频电流传感器, 实时采集暂态行波和稳态电流信号, 结合温度补偿、信号滤波及数字化处理技术, 实现对电缆温度、局部放电和绝缘状态的在线监测。系统架构包含现场传感器、主站服务器及云端平台, 支持故障预警、精准测距 (精度达 ± 5 m)、故障选线和环流监测等功能, 并通过 4G/5G 网络实现微信、APP 实时报警及远程数据分析。【结果】在某企业 15 回 10 kV 电缆的实际应用中, 系统半年内成功预警多起隐患, 避免经济损失 200 余万元。试验验证其接地故障识别准确率 100%, 测距误差控制在 5 m 内, 显著缩短故障定位时间。系统还提供历史数据追溯、MODBUS 通信接口及云平台管理功能, 实现无人值守运维。【结论】结果表明, 所研制系统能早期发现电缆接头老化、绝缘薄弱等隐患, 有效预防燃爆事故, 将事故检修转为预知性维护, 可为电力系统安全稳定运行提供保障。

关键词: 电力系统; 电缆故障; 综合在线监测技术; 故障预警; 定位效率; 状态检修

ABSTRACT: [Objectives] Cable faults within power systems can lead to power supply interruptions, equipment damage, and degradation of system stability. To address issues such as poor real-time performance and delayed fault location inherent in traditional cable fault detection methods, this study applies online monitoring technology to enhance cable operational

reliability. [Methods] Based on the principle of electromagnetic induction, this research explores integrated online monitoring technologies for cable faults to overcome limitations of traditional methods. A cable fault early warning and location system (SHK-ECTL) was developed. The system employs high-frequency current sensors installed on cable shields to collect transient traveling waves and steady state current signals in real time. Integrating temperature compensation technology, signal filtering, and digital processing, it enables online monitoring of cable temperature, partial discharge, and insulation status. The system architecture comprises field sensors, master station servers, and cloud platforms, supporting functions including fault early warning, precise ranging (accuracy ± 5 m), fault line selection, and sheath current monitoring. Real-time alerts via WeChat/ APP and remote data analysis are facilitated through 4G/5G networks. [Results] In practical deployment across 15 circuits of 10 kV cables at an enterprise, the system successfully issued early warnings for multiple potential failures within six months, preventing economic losses exceeding RMB 2 million. Tests verified 100% accuracy in ground fault identification, with ranging errors controlled within 5 m, significantly reducing fault localization time. The system also provides historical data traceability, MODBUS communication interfaces, and cloud based management capabilities, enabling unattended operation and maintenance. [Conclusion] Results demonstrate that the developed system effectively detects early stage hazards such as cable joint aging and insulation weaknesses, preventing fire and explosion accidents. It shifts maintenance strategies from post failure repair to predictive maintenance, providing reliable safeguards for the secure and stable operation of power

systems.

KEY WORDS: power system; cable failure; comprehensive on-line monitoring technology; fault warning; positioning efficiency; condition maintenance

0 引言

现代社会中,电力供应的稳定运行具有至关重要的意义。作为电力传输与分配的核心载体,电力电缆广泛应用于工业和民用设施。然而,在长期服役过程中,电缆持续承受机械应力、电气应力、热应力以及复杂环境因素(如潮湿、腐蚀)的综合作用,其绝缘性能不可避免地逐步劣化,最终引发各类故障。^[1-2]电缆故障不仅直接导致供电中断,扰乱生产生活秩序,还可能酿成严重安全事故,造成重大的经济损失。特别值得注意的是,各类故障(如短路、断路)会直接影响关键用户(如医院、交通系统、数据中心),并引发电网电压波动、畸变或不平衡。例如,单相接地故障可能导致非故障相电压异常升高,威胁相连设备的绝缘安全。故障电流的热效应和电动力效应更会直接损害电缆本体及关联的变压器、开关设备,长时间过流加速绝缘老化甚至造成设备瞬间损毁。严重时,电缆故障会破坏系统功率平衡与稳定性,诱发振荡、解列等事故,在大型系统中可能因潮流剧变引发连锁反应,导致大面积停电风险。^[3-4]因此,对电缆运行状态实施实时、精准的故障监测,是保障电力系统安全、可靠、高效运行的核心需求。

传统的电缆故障检测手段,如人工巡检、定期维护及事后诊断,存在显著局限。人工巡检受制于人力与时间,难以实现全方位、实时化监控,漏检率高;定期维护虽可识别部分潜在隐患,但其周期性特点难以捕捉早期故障征兆;事后诊断则在供电中断后才启动,过程复杂耗时,不利于快速恢复供电。^[5-6]为应对这些挑战,电缆故障在线监测技术应运而生,并成为研究与应用的热点。

该技术通过实时监测电缆温度、局部放电、绝缘电阻等关键参数,能够持续感知运行状态,及时发现潜在隐患。这种前瞻性的预警使得运维人员有足够时间介入处理,有效防止故障发生和蔓延。更重要的是,在线监测为准确评估电缆状况奠定了数据基础,便于科学安排检修计划,规避非计划停电。^[7-8]同时,其强大的故障定位能力可大大缩短故障查找与抢修时间,显著提升供电可靠性。通过

对海量运行数据的分析,运维人员还能把握电缆老化规律,优化运维策略(如调整检修周期、合理配置资源),提高运维效率并降低成本。作为电力系统的“感知神经”,在线监测技术为实时掌控电缆安全、预防大面积停电、保障社会正常运转提供了强有力的支撑。

1 电缆故障电流在线监测技术

1.1 电缆故障电流在线监测技术

当前针对电缆故障,特别是电缆头过热问题,主要采用3种监测手段:传统人工巡视测温、缆式测温系统(热敏线测温系统)以及电缆在线监测技术。它们各有特点,适用性也各不相同。

(1) 人工巡视测温的局限性。

多数企业目前仍沿用人工巡视测温。该方法在电缆运行时,由人员定期使用温度计或红外测温仪进行检测。虽然能在一定程度上发现部分电缆头过热并避免个别事故,但其技术手段相对落后,存在测量误差大、实时性差的显著缺陷。^[3-5]当电缆负荷或环境温度波动频繁时,这种离散式的检测无法提供连续监测,可能导致隐患无法被及时发现,甚至引发电缆燃爆事故,难以切实保障电缆的运行安全。

(2) 缆式测温系统的不足。

缆式测温系统依赖一条热敏材料制成的双绞线(热敏线)作为核心测温元件,通常以S形敷设于电缆表面。其主要问题在于:仅在温度超过预设阈值时报警,正常状态下无法提供连续的温度数据和变化趋势,用户难以进行全面的动态观察或定量趋势分析。此外,电缆表面的不平整导致S形敷设的热敏线主要接触高点,低凹部位覆盖不足,测温结果缺乏全面性。^[3,5]其报警只能指示问题区域,无法精确定位到具体超温电缆,仍需人工排查,适用性较差。

(3) 在线监测技术的优势。

电缆在线监测技术是融合计算机技术、通信技术、数字信号处理、抗电磁干扰及先进数字传感器的高科技解决方案。其核心优势在于能够全面、实时地监测隧道或沟道内每一条电缆的关键绝缘参数(如反映温升的电流等)的变化趋势。

该技术能够在电缆发生燃爆前对潜在故障进行预测、预警并辅助定位,极大地提升了预防性维护能力。同时,它通常还具备对隧道内其他重要环境

参数（如温度、湿度）的综合监测能力。

1.2 电缆故障综合在线监测技术

（1）电缆故障电流在线监测技术原理。

该技术的核心在于在电缆内部或邻近位置部署微型传感器，实时捕捉流经电缆的电流信号。捕捉到的信号被传输至数据采集装置或服务器进行深度处理和分析。其基本原理基于电磁感应现象：电缆正常运行时，电流稳定，传感器输出信号也相对恒定；一旦发生短路、断路等故障，电流会急剧变化，传感器能灵敏感知这种异常并将其转化为可被系统识别的电信号。

（2）关键设备与信号处理。

监测的准确性与可靠性高度依赖于传感器的正确选型，常见的有霍尔传感器和电磁传感器。霍尔传感器利用霍尔效应，可精确测量电流的大小和方向变化；电磁传感器则通过探测电缆周围磁场变化间接反映电流波动。关键信号处理流程包括：滤波（去除噪声干扰，保证信号纯净）、放大（增强微弱传感器信号以满足设备输入需求）和模数转换（将模拟信号转为数字信号，便于计算机存储、传输和复杂分析）。

（3）环境干扰与应对策略。

实际应用中，电缆所处环境显著影响监测效果。^[7]例如：温度波动可能导致传感器性能漂移，影响精度；高湿度环境既会降低电缆绝缘性能，也可能腐蚀传感器和设备；周围强磁场则会干扰传感器的信号探测能力。为应对这些挑战，采取的策略包括：针对温度影响，采用温度补偿技术，通过在传感器或设备内集成温度传感器实时监测温度，并用算法动态校准数据；针对湿度问题，对监测设备进行严格密封处理并使用防潮材料制造关键部件；为抵御强磁场干扰，则对传感器和信号传输线路实施电磁屏蔽措施，最大程度阻隔外界磁场干扰。

2 电缆故障监测与预警系统功能要求

2.1 某企业的电缆使用情况和需求

随着某企业规模的持续扩大，其馈出电缆数量显著增加。该企业电缆线路呈现距离长、分支多、网状结构复杂的特点。在35 kV及以下供电系统的电气事故中，电缆故障占据了相当大的比例。进一步分析表明，^[9]80%~90%的电缆故障发生在中间接头、终端头或绝缘薄弱环节处。这些部位常

因制作工艺问题或材料氧化导致接触电阻增大，引发局部升温。温度的持续升高会逐步劣化电缆内部绝缘，最终可能导致绝缘击穿，引发短路燃爆事故。^[10]值得注意的是，这类潜在缺陷在每年例行的电缆预防性试验中往往难以被发现。因此，实时监测电缆温度变化及精确锁定局部绝缘损伤位置，对于保障电缆安全运行至关重要。

另一方面，电缆绝缘薄弱环节故障也频繁发生。由于该企业电缆敷设距离长、分支众多，故障排查通常十分困难，耗费大量人力物力。因此，实现对电缆故障的早期预警与精确定位，能够快速判断故障线路、确定故障点位置，极大缩短故障查找时间，便于及时修复，有效提升供电系统可靠性，并切实改善线路的实际维护效率。近年来，一些大型企业发生的电缆火灾事故，造成了巨大的经济损失，其根本原因即在于此。该企业也曾多次发生电缆燃爆事故，导致大范围停电，严重影响生产经营活动（见表1）。

表1 某企业近年来电缆故障统计表

Tab.1 Cable fault statistics of an enterprise in recent years

故障线路	故障原因	影响范围	经济损失 / 万元	
			直接	间接
701	中间接头发热着火	某开关所全部停电	5	160
703	中间接头发热着火	某开关所全部停电	4	150
747	中间接头发热着火	某开关所全部停电	4	150
709	中间接头发热着火	两个二级厂区	7	190

综合所述，对电缆绝缘故障进行有效监测，掌握其变化规律，及早发现事故隐患以防止绝缘劣化引发的超温现象，是解决电缆燃爆问题、确保电缆安全运行的关键措施。

2.2 电缆在线监测系统功能要求

电力电缆在线监测及故障预警测距系统旨在通过对电缆运行状态的持续监测，收集运行过程中的暂态行波和稳态分量数据，并进行深入分析与处理，从而预测电缆运行状况。该系统须具备对故障电缆发出报警、提供故障诊断信息的能力，能够对电缆的绝缘状态进行长期监测，对即将发生的永久性故障进行预警，并实现故障测距和故障选线功能。这为设备状态检修提供了可靠依据，推动电

缆线路的维护模式由传统的定期检修向更科学的状态检修转变。此举不仅能有效减少计划停电时间,更能降低高压预防性试验本身可能对电缆造成的损伤。

因此该系统应能利用无线通信技术及时将信息传递至检修和运维人员,实现事故前的计划性检修,有效防止事故扩大,避免不必要的经济损失。系统须具备较强的抗干扰能力,确保预警、选线和测距结果的准确性。

该系统核心功能涵盖多个方面。^[7,11-12]首先在故障预警方面,系统通过高速采集装置捕获电力电缆的电流暂态行波及接地绝缘信息,能够有效识别表征电缆老化的暂态过程,在永久性接地故障形成之前,提前预测故障发生位置。这一功能显著延长了电力电缆的使用寿命,降低了因电缆故障导致的停电停产事故发生率,提高了供电可靠性。系统利用先进的电压行波与电流行波故障测距技术实现高精度定位,测距精度可达2.25 m。其次,当系统发生非电缆性接地故障时,系统需能基于行波选线技术准确判断出故障线路,为后续故障处理提供关键数据支持。

系统还须具备环流监测能力,特别针对单芯电缆线路,实时监测其外护套的绝缘状况,绘制环流曲线,并在外护套绝缘异常时及时发出故障报警。在通信与数据管理层面,系统利用4G/5G网络,使装置能够实时接入云服务大数据中心。用户可通过浏览器随时查询系统的实时运行状况和历史记录数据。当系统触发异常报警时,云服务中心可通过微信推送、手机APP等方式,将报警信息和相关故障波形直接发送至用户指定的手机设备上。

系统后台安装在主站内,配置有一次系统图,集成实现了故障预警、选线及测距功能,并实时显示母线电压、系统图状态;在发生故障时,后台界面能够实现故障线路闪烁提示、弹窗报警和声音报警。电子值班功能旨在实现无人值守,系统可将报警信息及工作状态通过短信或APP推送方式直接发送至相关责任人员。提供远程技术支持也是系统的重要组成部分,承诺提供7*24小时不间断的远程服务,内容包括故障波形辅助分析以及系统程序的远程升级维护。最后,系统具备完善的历史数据存储与查询功能,能够实时存储运行信息,供用户

后续回溯和分析历史数据。

3 电缆故障在线监测、预警及定位系统

3.1 电缆故障监测、预警及定位系统的解决方案

为解决10 kV系统现场电缆因老化或绝缘薄弱受损难以有效判断且故障点定位困难的问题,该企业在以下15条关键电缆回路上部署安装了30组故障检测装置,分布在:2#高炉主控楼I段、2#高炉矿槽I段、2#高炉水泵站I段、80 MW发电启备电源、高炉鼓风机站1#风机、高线空压站I段、二期污水变电所I段、高炉鼓风机站备用风机、2#高炉煤气余压发电机、2#高炉主控楼II段、2#高炉矿槽II段、2#高炉水泵站II段、高炉鼓风机站2#风机、高线空压站II段、二期污水变电所II段等处。具体方案是在10 kV系统中加装一套由某公司研制的电缆故障预警及定位系统(简称SHK-ECTL)。

SHK-ECTL系统对10 kV总降系统内的10 kV电缆进行在线监测,采用站内集中式监测方案,具体如下:

(1) 系统主站。

部署于变电站内。主站包含系统主屏柜,屏柜内集成系统服务器、电流行波采集单元、电压行波采集单元、智能综合管理单元、环流采集单元、4G路由器等模块。主站安装需在主柜位置提供DC 110 V—220 V或AC 220 V电源。

(2) 高频传感器。

安装于被监测电缆的金属屏蔽层接地线上,用于检测电缆的暂态电流行波信号。传感器需按一致方向固定于电缆屏蔽线,安装前需对屏蔽线进行绝缘处理。传感器与采集单元之间通过多芯屏蔽线连接。

(3) 通信网络。

系统主站内部通信采用内部以太网或光纤通道;系统主站与云端服务通过4G无线宽带网络进行通信。

综上,在该企业10 kV系统加装了一套SHK-ECTL系统,控制系统安装于变电所10 kV中控室,电缆出线处安装高频电流传感器,其电流信号传送至控制系统电流行波采集单元;PT柜安装高频电压传感器,其信号传送至电压行波采集单元。

3.2 SHK-ECTL系统结构



图 3 SHK -ECTL 现场应用照片
Fig.3 Field application photo of SHK-ECTL system

标准通信接口。
支持标准 MODBUS 规约，可实现与其他设备的无缝通信。

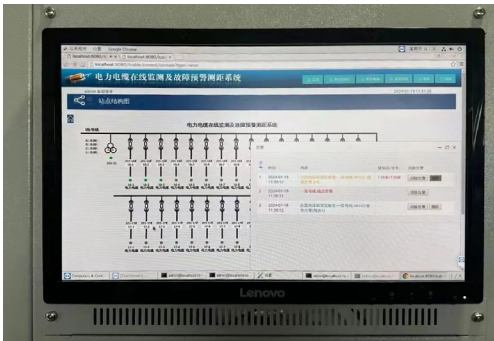


图 4 SHK-ECTL 系统显示图
Fig.4 SHK-ECTL system display diagram

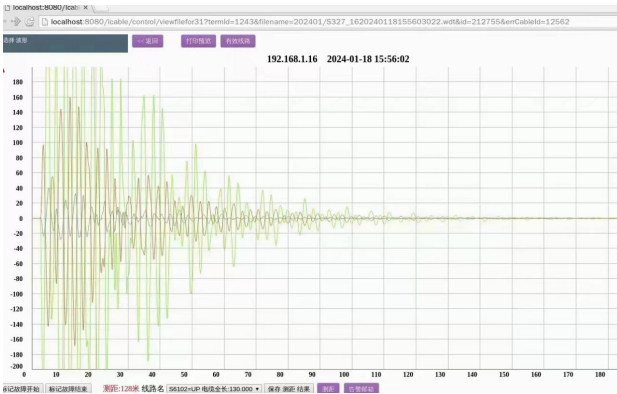


图 5 SHK-ECTL 测距录波图
Fig.5 Ranging waveform recording diagram of SHK-ECTL system

(4) 移动端功能拓展（可选）。
SHK-ECTL 系统可提供配套手机 APP，除发送故障报警信号外，更可实时查看系统所有运行数

据、调阅历史故障记录，并具备故障录波回放功能。

- (5) 微信告警推送。
支持通过装置配置，向授权用户推送故障告警信息至微信。
- (6) 云端平台与数据管理。
基于合凯云平台及物联网技术的系统大数据管理与分析界面参见图 6 与图 7。

5 结束语

SHK-ECTL 电力电缆故障综合在线监测、预警及定位系统在实际场景中应用成效显著，成功预警并避免了多起电缆燃爆事故，为企业园区电力安全提供了可靠保障。该系统通过实时监测与精准故障定位，显著提升了电缆运行可靠性和园区运营效率，将事故隐患消除于萌芽阶段。实际运行数据表明，该解决方案技术先进、预警准确率高，在保障工业生产连续性的同时展现出优异的投资回报率。SHK-ECTL 系统具有较低的部署成本与显著的安全经济效益，具有工程应用价值。



图 6 合凯无线网云服务平台大数据
Fig.6 Big data of Hekai wireless network cloud service platform

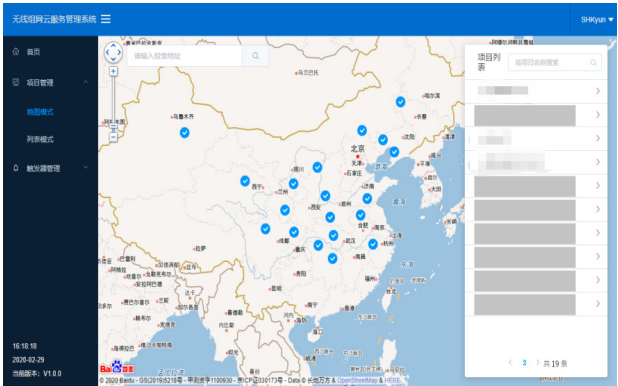


图 7 合凯无线网云服务平台管理系统
Fig.7 Management system of Hekai wireless network cloud service platform

参考文献

- [1] 张龙钦.现代配电网单相弧光接地过电压[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [2] 内蒙古电力(集团)有限责任公司培训中心.配电网故障检测定位技术及典型案例[M].北京:电子工业出版社,2021.
- [3] 高岭,胡琦,高雪婷,等.电力电缆诊断检测技术综述[J].电线电缆,2025(4):1-11.
GAO Ling,HU Qi,GAO Xueting,et al.A Review of Diagnostic Testing Techniques for Electrical Power Cables[J].Wire & Cable,2025(4):1-11.
- [4] 唐丹,吴浩,蔡源.电力电缆早期故障诊断研究综述[J].电线电缆,2023(6):1-5.
TANG Dan,WU Hao,CAI Yuan.Research Review of Cable Early Fault Diagnosis[J].Wire & Cable,2023 (6): 1-5.
- [5] 赵明.电力电缆典型故障分析及预防[M].北京:中国电力出版社,2022.
- [6] 杨隆凯,夏向阳,周正雄.基于利萨如图形与温度 Pettitt 检测的高压电缆故障诊断方法[J].电力科学与工程,2021,37(7):34-41.
YANG Kailong,XIA Xiangyang,ZHOU Zhengxiong. Fault Diagnosis Method of High Voltage Cable Based on Lissajous Diagram and Temperature Pettitt Detection[J].Electric Power Science and Engineering, 2021,37(7):34-41.
- [7] 童雪燕,吴桂林.基于4G/5G物联网技术的无线组网选线系统在配电网的应用及展望[C]//第五届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛论文集.南京,2021: 140-146.
- [8] 王雪亮,郭海全,丁伯松,等.局放检测技术在电力电缆故障在线监测中研究及应用[J].东北电力大学学报,2024,44(2):58-63,87.
WANG Xueliang,GUO Haiquan,DING Bosong,et al. Partial Discharge Detection Technology in Power Cable Faults Research and Application in Online Monitoring[J].Journal of Northeast Electric Power University, 2024,44(2):58-63,87.
- [9] 于坤生,庞丹,齐明泽,等.考虑互热影响的直埋电缆温度场解析计算[J].东北电力大学学报,2022,42(2):85-91.
YU Kunsheng,PANG Dan,QI Mingze,et al.Analytical Calculation of Temperature Field of Buried Cable Considering Mutual Thermal Effect[J].Journal of Northeast Electric Power University,2022,42(2):85-91.
- [10] 陆宇升,李筠,杨海马,等.基于 Levenberg-Marquardt 优化算法的双路电缆温度预测[J].电力科学与工程,2022,38(1):1-7.
LU Yusheng,LI Jun,Yang Haima, et al.Prediction of Two-

way Cable Based on Levenberg-Marquardt Optimization Algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022,38(1):1-7.

- [11] 蒋礼.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].电力设备管理,2024(15):30-32.

JIANG Li.On-Line Monitoring and Fault Diagnosis Technology of High-Voltage Power Cable Sheath Current[J].Electric Power Equipment Management, 2024 (15):30-32.

- [12] 林阳,王耀,李续照,等.电缆故障在线监测及定位系统方案及应用[J].仪器仪表用户,2023,30(12):47-50,87.

LIN Yang,WANG Yao,LI Xuzhao,et al.Scheme and Application of On-Line Monitoring and Locating System for Cable Fault[J].Instrumentation,2023, 30(12):47-50,87.

收稿日期:2024 年 12 月 10 日

作者简介:



邵久柠

邵久柠(1987),男,工程师,研究方向为电力工程施工,电气设备自动化技术,shaojiuning@126.com



刘海

刘海(1973),男,研究方向为电力工程建设及与之相关的新技术、新工艺、新材料研发及其运用,108865297@qq.com



宋延良

宋延良(1991),男,工程师,研究方向为工程建设管理,289641728@1qq.com



童雪燕

童雪燕 1976(), 女, 高级机电工程师、高级电气工程师、BIM 高级工程师、装配式高级工程师、二级机电建造师。企业研究生导师。深耕中压配电网故障防控及电能质量治理领域, 在短路电流超标治理、电压暂降治理等复杂技术难题上具备深厚的理论分析与系统优化能力。13866778709@126.com



杨新州

杨新州 (1974), 男, 硕士, 工程师, 工程师, 研究方向为过电压过电流保护、快速识别与判断测控技术以及快速开关、连续稳定供电和项目管理。