



5G 技术在配电网电流差动保护业务中的应用

吕玉祥, 杨阳, 董亚文, 汪玉成

(国网信息通信产业集团安徽继远软件有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 智能配电网建设随着国家电网公司“三型两网”战略的实施, 正不断向网格化、多源化的配电物联网方向发展, 传统的配电网保护以及馈线自动化已难以满足坚强配电网的自愈要求, 电流差动保护由于其优越的速动性、灵敏性和选择性而被广泛应用, 现有的应用方法多采用专用光纤通道、230 MHz/1.8 GHz 电力无线专网等通信技术承载实现, 但上述方式存在成本高、稳定性差、实时性低等多样化问题。提出了一种基于 5G 的配电网电流差动保护业务应用方案, 该方案基于 5G 通信系统实现差动保护装置之间的采样数据传输, 能够根据配电网拓扑变化动态调整差动保护配置, 降低配电网改造成本及维护成本。

关键词: 智能配电网; 差动保护; 5G

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020032

Application of 5G to current differential protection of distribution network

LV Yuxiang, YANG Yang, DONG Yawen, WANG Yucheng

State grid information and communication industry group Anhui Jiyuan Software Co. Ltd., Hefei 230088, China

Abstract: Driven by the strategy of grid as a Platform, Hub, and Sharing as well as the construction of Energy Internet and Ubiquitous power Internet of Things declared by Sate Grid Corporation of China, the intelligent distribution network evolves towards Distribution Internet of Things in a gridding and multi-source manner. The traditional distribution network protection and feeder automation barely meets the self-healing requirements of a strong distribution network. The current differential protection is prevailing due to its favorable quick-acting, sensitivity and selectivity. The existing communication solutions baring protection signals includes: fiber channel, 230MHz/1.8GHz private wireless network, etc. However, the above methods are usually costly and perhaps with poor stability and low real-time performance. An realistic baring scheme for current differential protection of distribution network over the fifth generation communication system (5G) was proposed, where the of sampling data transmission between differential protection devices was realized based on 5G new radio technology. Thanks to the advantages of low latency, high capacity, security, etc., 5G-based differential protection can dynamically adjust the configuration to accommodate the topology changes, and thus can reduce the transformation and maintenance cost of distribution network.

Key words: intelligent distribution network, differential protection, 5G wireless systems

收稿日期: 2019-10-01; 修回日期: 2020-02-11

基金项目: 国家电网公司科技项目 (No.5700-201919236A-0-0-00)

Foundation Item: State Grid Corporation Science and Tech-nology Project (No.5700-201919236A-0-0-00)



1 引言

配电网作为智能电网生产过程中承上启下的重要环节,直接面向广大用户,是社会发展中不可或缺的基础设施,而配电网作为坚强电网的主要薄弱环节,在“三型两网”建设进程中,分布式电源、储能、电动汽车、“三站合一”“配电物联网”等建设直接关联配电网的安全稳定运行,使得配电网由单电源辐射形状向多电源复杂供电网络转变^[1]。已有的配电网故障处理方式难以满足智能配电网建设的快速自愈需求,面临以下主要难题:

- 配电网故障处理设备生产厂商众多,其执行通信标准不一致,业务故障处理信息通用性差、互换性差;
- 配电网覆盖面广,分布式电源接入离散,传统差动保护系统难以满足广域的分布式差动保护应用需求;
- 配电网电流差动保护装置应用多采用光纤通信、SDH/PDH、4G 等通信方式,存在应用不灵活、可靠性不高、时延高等问题。

无线通信方式具有成本低、部署简单、适应性强、覆盖面广等特点,在配用电网端被广泛应用于业务信息采集与传输的情况下,由于已有公网无线通信技术及电力无线专网通信技术的带宽小、时延高、稳定性不足等问题,使无线通信技术难以适用于实际配电网生产控制业务^[2]。

目前在配电网电流差动保护业务应用方面,主要采用的通信方式研究有:

- 参考文献[3]提出了基于 4G 无线通信的自适应分布式差动保护系统,它利用电力无线专网技术,实现配电自动化终端与主站通信,同时结合 IEEE 1588 协议保证时钟同步,其总体结构与本文提出的 5G 配电网电流差动保护业务应用有一些相似的设计理念;
- 参考文献[4]提出了基于 EPON 通信的智能

配电网馈线差动保护,它利用无源光网络通信技术,实现分布式的配电网馈线差动保护应用;

- 参考文献[5]针对传统差动保护故障研判的不足,对大规模、分布式网络提出了基于光纤的差动保护应用模型。

2 “5G+”智能电网业务应用分析

2.1 5G 网络应用架构

5G 技术作为 4G 技术的演进,它利用超高频段、新型多天线、同时同频全双工、D2D、密集网络及新型网络架构实现超低时延、超高带宽、海量接入的通信网络,主要定义了 eMBB(增强型移动宽带)、mMTC(海量物联网通信)以及 uRLLC(超高可靠与低时延通信)三大应用场景。其中,eMBB 场景是对已有移动通信数据业务的进一步增强,提供更高的系统速率;mMTC 提供低速率、大连接业务以满足万物互联的需求;uRLLC 主要面向控制等领域,提供高可靠与低时延业务能力。

相较于既有 4G 技术,5G 网络架构在核心网及基站侧进行演进,具体演进架构如图 1 所示。演进架构及 5G 技术特点主要有 2 个部分:核心网分离、接入网重构。5G 网络架构将核心网分为核心网控制面以及分布式核心网用户面,分别提供 5G 核心云、5G 边缘云服务,其中,5G 边缘云实现无线高层协议处理、业务应用边缘侧处理,能够满足未来通信网络对于新兴业务中的视频会议、视频监控、虚拟/增强现实等对于时延敏感业务的需求,同时,结合云计算、NFV、SDN 以及分布式云架构技术,通过 5G 核心层统一的编排使网络具备管理与协同能力,从而将网络通道按照业务特性需求,如安全性、移动性、时延和可靠性等方面,将实际物理网络划分成多个虚拟网络,适配不同应用场景的业务应用需求。

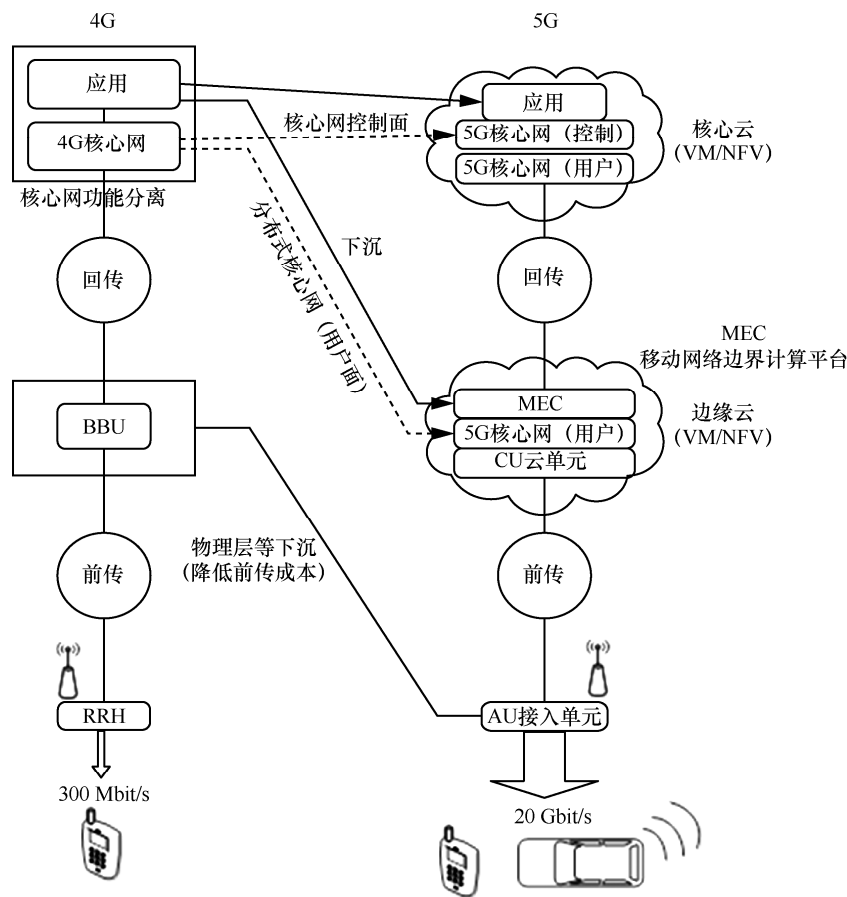


图 1 5G 网络架构及 4G 演进策略模型

2.2 “5G+智能电网”应用需求分析

相对 4G 网络，5G 将逐步引入增强型移动宽带（eMBB）、超可靠低时延通信（uRLLC）、大规模机器类通信（mMTC）等典型业务场景，5G 与智能电网的结合，将形成“5G+智能电网”新的垂直应用研究领域。

智能电网业务按照基本业务应用类型进行分类，可分为生产控制类业务、数据采集类业务、状态监测类业务，而针对配电网段，主要基本业务包括配电自动化、用电信息采集、分布式电源、精准负荷控制等，5G 相较于 4G 网络性能指标分析见表 1。

由于 5G 技术具备超低时延、超高带宽、更高移动速率以及海量接入的优势性能，4G 无法承载的时延敏感及大带宽业务将通过 5G 网络承载应用，结合典型业务的 QoS 指标，“5G+智能电网”

业务应用场景分析见表 2。

表 1 5G 与 4G 关键指标对比分析

指标	5G	4G
空中接口时延	1 ms	10~50 ms
峰值吞吐率/每用户	>10 Gbit/s	100~1024 Mbit/s
连接数/每平方千米	1 000 000	10 000
高速移动性	500 km/h	350 km/h

3 基于 5G 技术的电网生产与管理业务应用设计

3.1 应用设计思路

通过 4G 向 5G 技术的演进，现有 5G 示范应用中基站的架设多采用 4G 基站共站建设方式，以 5G 无线公网，将业务场景应用下的业务终端、通信终端与主站系统之间进行串联，基础应用架构



表 2 “5G+智能电网”业务应用场景

业务场景	通信时延	可靠性	带宽	终端规模	业务隔离	对应 5G 场景
智能分布式配电自动化	高	高	低	中	高	uRLLC
毫秒级精准负荷控制	高	高	中低	中	高	uRLLC
低压用电信息采集	低	中	中	高	低	mMTC
智能配电巡检	高	高	高	中低	中	eMBB
分布式电源	中高	高	低	高	中	mMTC
高清安防视频业务	高	高	高	中低	中	eMBB
无人值守业务	高	高	高	中低	中	uRLLC、eMBB

设计如图 2 所示。

业务主站系统与业务终端之间通过 5G 通信网进行连接,包括接入节点、边缘节点、核心节点以及云端管理平台,业务信息采用原有协议进行数据封装,不改变现有业务模式,实现业务主站系统的互联互通。

其中,接入节点主要完成 5G 专用业务通信终端的无线接入,通过边缘节点对接收业务信息进行选择性就地边缘侧处理或远程传输,能够提升 D2D 的应用效率,降低远程传输时延^[6];同时在核心节点根据行业类型及业务场景对现有 5G 网络进行端到端的网络切片,具体采用网络虚拟化(network function virtualization, NFV)技术对网络进行软硬件分离并完成资源重组,切分出多个逻辑网络支撑多业务场景应用。

3.2 “5G+”配电网差动保护应用关键技术

3.2.1 配电网电流差动保护同步应用

配电网电流差动保护的信号同步要求主要包

括两方面:一是线路两侧的采样时刻必须严格同时刻;二是差动继电器使用两侧相同时刻的采样数据计算差动电流。

常见的信号同步方法主要有:基于数据通道的同步方法和基于全球定位系统同步时钟的同步方法。其中,基于数据通道的同步方法包括:采样时刻调整法、采样数据修正法和时钟校正法,尤以采样时刻调整法应用较多。而基于全球定位系统同步时钟的同步方法则采用 GPS 系统进行时钟同步^[7]。

本文以我国自主研发的北斗卫星导航系统为核心,采用北斗授时同步方法,采样时钟部署在线路两端的保护装置中,由高稳定性的晶振体构成,每过 1 s 被秒脉冲信号同步一次,保证晶振体产生的脉冲前沿与国际标准时钟具有 1 μ s 同步精度,在线路两端采样时钟给出的采样脉冲之间具有不超过 2 μ s 的相对误差,实现了两端采样的严格同步。

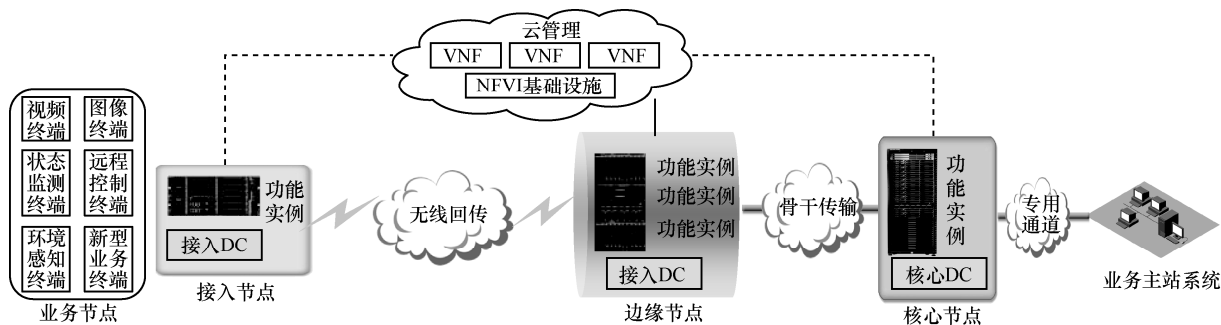


图 2 5G 无线网业务应用基础架构

3.2.2 “5G+”配电网电流差动保护应用

配电主站系统和配电网业务终端之间根据现场部署情况采用5G通信系统、光纤、4G无线专网或以太网方式进行数据传输,其中作为配电网线路保护降低停电时长、提高抢修效率的配电网电流差动保护装置,主要完成采样值和跳闸信号的传递,当前配电网保护配置以及保护原理面临以下问题。

(1) 分布式电源并网导致原有配电网保护原理不可用^[8]。分布式电源中的电力电子器件耐受过电压和过电流的能力弱,故障期间提供的故障电流水平低,将导致配电网原有继电保护方案(如三段式电流保护)性能恶化,保护原理不可用^[9]。

(2) 配电网网架拓扑变化导致保护无法灵活配置。分布式电源的接入导致原有的配电网从单端放射式网络演变为多电源网络,不同于输电网,配电网保护无法随网络拓扑的变化实现灵活配置^[6]。

(3) 现有保护通信通道建设以及无线通信技术的特点限制了配电网快速保护的发展。现有的230 MHz电力无线专网和部分1.8 GHz电力4G无线专网,由于通信性能的局限性,无法满足配电网快速保护低通信延时和高通信资源带宽的要求。

结合5G通信网络,提出配电网电流差动保护信号同步关键技术,将配电主站、差动保护装置、配电自动化终端等进行有序串联,如图3所示。

针对110 kV变电站之间的常用联络线作为配电网电流差动保护场景设计,为该线路环网柜分

别配置了电流差动保护、测控装置和5G CPE通信模组,按照图4的典型应用模式,将电流差动保护以两端考虑,每个智能配电终端分别采集两侧CT的各相电流以及零序电流,各自计算被保护线路的差动电流和制动电流,并通过5G基站及核心网电力uRLLC切片^[10],当发生区内故障时,2个智能配电终端的差动保护逻辑各自动作,保护动作出口,实现配电网电流差动保护应用。

3.3 “5G+”变电站巡检业务应用关键技术

结合5G典型应用场景eMBB,以智能电网变电站巡检监控摄像头为典型应用,将摄像头与5G CPE设备连接,接入5G通信网实现360°全景监测及远程VR应用,应用架构如图4所示。

“5G+”巡检监控摄像头挂载5G CPE,采用NSA非独立式组网应用结构,通过5G基站与4G基站的混合接入,结合5G核心网eMBB应用场景,在后端现场分路显示至监控大屏、VR头显应用,解决现有通信网无法满足实时、大带宽数据传输难题,提升变电站巡检远程可视、可控的智能化水平。

4 试点验证工程综述

(1) 在“5G+”配网差动保护试点验证方面,南方电网公司联合中国移动通信集团有限公司、华为公司共同在深圳完成了国内首个基于5G NSA网络的分布式配网差动保护外场测试,验证了单基站覆盖下的配网DTU之间传输时延小于10 ms,且由5G提供的空口授时精度可达300 ns,

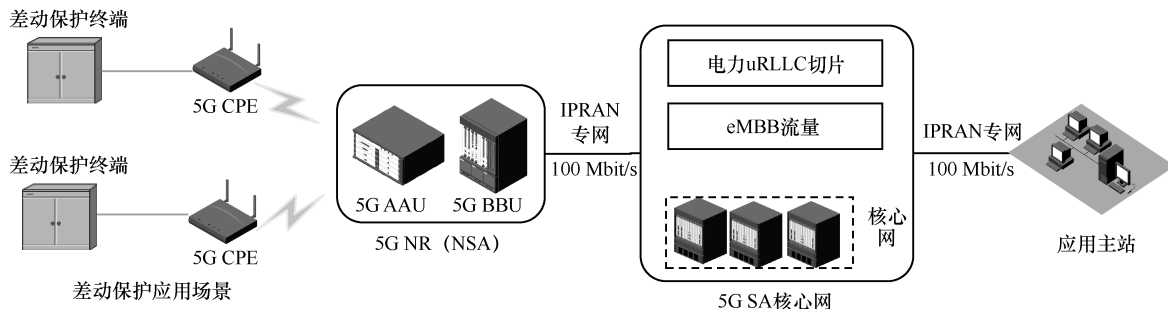


图3 基于5G的配电网电流差动保护应用架构

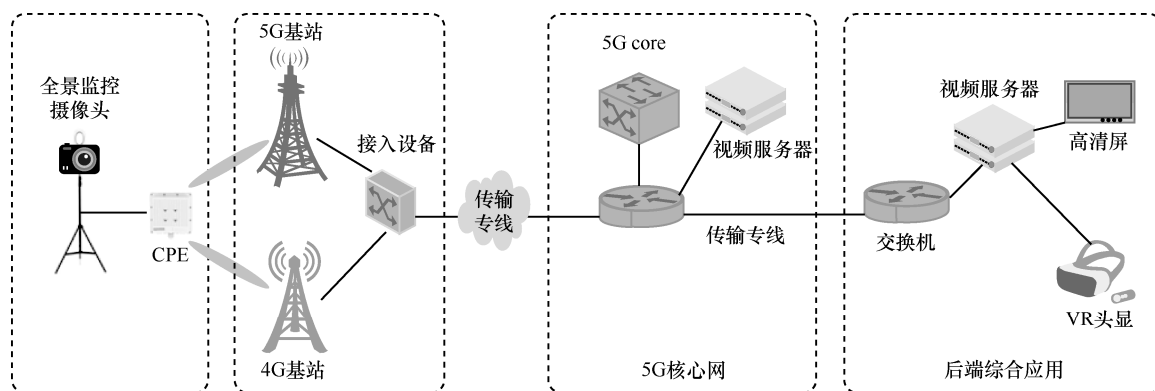


图4 “5G+”变电站巡检业务应用架构

达到了配网分布式差动保护毫秒级通信时延与纳秒级授时精度的业务要求,同时外场验证还初步论证了网络切片技术的安全隔离效果与QoS保障机制,结果表明切片化网络能够支撑承载时延敏感与高可靠的电力工控业务。

(2) 在“5G+”电力智能化巡检试点验证方面,南方电网广东东莞供电公司以及国网浙江电力有限公司基于5G技术分别开展了网联无人机智能化巡检示范应用,以大带宽、低时延的5G网络为无人机提供精准定位和授时服务以及高清视频/图像等“大颗粒”业务实时回传服务,无人机在变电站、输电线路附近巡航时,变电站设备上的铭牌信息、字迹、线路状态均清晰可见,能够有效提升巡检工作效率。

(3) 在“5G+”同步相量测量技术(phasor measurement unit, PMU)的智能配电网试点验证方面,国网上海电力有限公司基于5G低时延、大带宽特性开展业务应用的外场试验,试验结果为配网PMU到电力模拟主站通信时延小于10 ms、通信频次达到100 帧/s,测试数据和结果充分证明了5G网络高可靠性、低时延特性能够满足配电网PMU通信测量点多、通信频次高、时延要求小、数据类型复杂等要求。

5 结束语

5G 技术广泛应用于工业控制、监测业务领

域,借助现有的5G网络实现智能电网业务经济可行,具有广阔的应用空间。分析了智能电网业务通信需求与5G eMBB、mMTC以及uRLLC三大应用场景的适配性,提出了典型业务场景的应用策略,并针对配电网电流差动保护业务应用场景,设计了同步应用方式及组网应用架构,将电力业务终端、业务主站系统通过5G网络及其电力切片技术进行串联,同时针对电力管理业务场景,通过eMBB技术分析了变电站巡检视频监控业务应用方式,提出了“5G+”视频监控与VR互联的应用解决方案,对5G支撑泛在电力物联网建设,开展“5G+”电力生产业务与管理业务应用具有一定的指导意义。

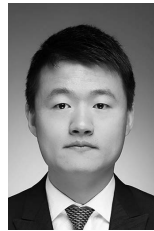
参考文献:

- [1] 吕军盛, 盛万兴, 刘日亮, 等. 配电物联网设计与应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1681-1688.
LÜ J S, SHENG W X, LIU R L, et al. Design and application of power distribution Internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1681-1688.
- [2] 曹津平, 刘建明, 李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 76-80.
CAO J P, LIU J M, LI X Z. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 76-80.
- [3] 黄维芳, 金鑫, 文安, 等. 基于4G无线通信的自适应分布式差动保护系统[J]. 电器与能效管理技术, 2017, (6): 47-50.
HUANG W F, JIN X, WEN A, et al. Adaptive distributed differential protection system based on 4G wireless communica-

- tion[J]. Electrical & energy management technology, 2017, (6): 47-50.
- [4] 徐光福, 张春合, 严伟, 等. 基于 EPON 通信的智能配电网馈线差动保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 76-80.
XU G F, ZHANG C H, YAN W, et al. Feeder differential protection based on EPON communication for smart distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 76-80.
- [5] 黄景光, 梅李鹏, 林湘宁, 等. 故障行波特性对光纤差动保护时延的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 76-82.
HUANG J G, MEI L P, LIN X N, et al. Influence on the optical fiber differential protection delay based on characteristic of fault traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 76-82.
- [6] 杨武军, 李超群, 张继荣. 5G 网络 D2D 通信模式与资源分配算法[J]. 西安: 西安邮电大学学报, 2017, 22(4): 26-30.
YANG W J, LI C Q, ZHANG J R. D2D communication mode and resource allocation algorithm in 5G network[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2017, 22(4): 26-30.
- [7] 张浩, 杨鸿珍, 邵炜平, 等. 北斗-RNSS 授时技术在智能电网雷电定位系统中的应用[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 140-147.
ZHANG H, YANG H Z, SHAO W P, et al. Application of BeiDou RNSS timing technology in smart grid lightning locating system[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 140-147.
- [8] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
LIU Y H, WU Z Q, TU Y Q, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.
- [9] 王敏, 丁明. 含分布式电源的配电系统规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 5-8.
WANG M, DING M. Distribution network planning including distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2004, 16(6): 5-8.
- [10] 鲜永菊, 张艳. 5G 网络中基于用户需求的频谱资源分配方案[J]. 重庆: 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2018, 30(5): 15-21.

XIAN Y J, ZHANG Y. Spectrum allocation scheme based on user requirements in 5G network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2018, 30(5): 15-21.

[作者简介]



吕玉祥(1989—), 男, 国网信息通信产业集团安徽继远软件有限公司工程师, 主要研究方向为电力通信技术。



杨阳(1989—), 男, 国网信息通信产业集团安徽继远软件有限公司工程师, 主要研究方向为电力通信技术。



董亚文(1990—), 男, 国网信息通信产业集团安徽继远软件有限公司助理工程师, 主要研究方向为无线通信技术。



汪玉成(1980—), 男, 国网信息通信产业集团安徽继远软件有限公司高级工程师, 主要研究方向为计算机应用。