DOI:10.3969/j.issn.1674－1951.2019.11.015

金沙江上游川藏段可再生能源基地能源利用模式探索

Exploration on utilization models for renewable energy of Sichuan-Tibet section in the Jinsha River upper reaches

胡贵良
HU Guiliang

（华电金沙江上游水电开发有限公司，成都　610041）
（Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Company Limited, Chengdu 610041, China）

摘　要：风电和太阳能发电受资源条件影响，出力具有较强的波动性、间歇性和随机性，大规模风电和太阳能集中并网会对电网的安全、稳定、经济运行带来较大冲击。通过水电、风电和太阳能发电特性分析，3 种能源在发电特性上具有互补性。金沙江上游川藏段水能资源、风能资源和太阳能资源十分丰富，水电整体调节性能较好，具备建设水风光互补可再生能源基地的条件。依托金沙江上游川藏段水电梯级，对可再生能源基地能源利用模式进行探索，提出水风光互补协同开发的思路，以期为其他地区开展类似工作提供参考和借鉴。

关键词：金沙江上游；发电特性；水风光互补；可再生能源基地；能源利用模式

中图分类号：F 323　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－1951(2019)11－0062－04

Abstract: Generating capacities of wind power and solar energy are affected by their conditions. Therefore, their outputs are highly unstable, intermittent and random. Large-scaled grid-connecting of wind power and solar energy may cause considerable impact on the safety, stability and economic operation of the power grid. It is found out that hydropower, wind power and solar energy are complementary to each others by characteristic analysis. There is abundant hydropower, wind power and solar energy of Sichuan-Tibet section in the Jinsha River upper reaches, so it is possible to build a hydro-wind-solar complementary renewable energy station since hydropower is of great regulating capacity. Utilization models of the renewable energy was explored based on cascade hydropower system of Sichuan-Tibet section in the Jinsha River upper reaches. The coordinated development concept of the hydro-wind-solar complementary system proposed can provide reference for the similar projects in other areas.

Keywords: upper reaches of the Jinsha River; characteristics of power generation; hydro-wind-solar complementing; renewable energy station; energy utilization model

0　引言

为实现 2020 年和 2030 年非化石能源分别占一次能源消费比重 15% 和 20% 的目标[1-2]，加快建立清洁低碳的现代能源体系，我国加大了新能源发展力度，2018 年国内风电、光伏发电装机容量分别达到 184，175 GW。新能源大规模发展，在提供清洁电量、推动能源结构转型发面发挥了重要作用，与此同时，由于风电、光伏发电出力存在间歇性、波动性和随机性等不稳定特点，大规模风光电并网对电网建设、电源结构配置和运行调度模式等提出了新的要求。

收稿日期：2019－11－05；**修回日期**：2019－11－15

《能源发展“十三五”规划》《可再生能源发展“十三五”规划》中均提出要开展水风光互补基地示范[3-4]，即利用水风光发电出力的互补特性，在不增加弃水的前提下，在西南和西北等水能资源丰富的地区，借助水电站外送通道和灵活调节能力，建设配套的风电和光伏发电项目，协同推进水风光互补示范项目建设。

金沙江上游川藏段水能资源丰富，规划水电规模近 10 GW，其沿江 6 县太阳能、风能资源也较丰富，具备形成水、风、光可再生能源基地的条件。华电金沙江上游水电开发有限公司紧跟国家和中国华电集团有限公司（以下简称华电集团）能源发展战略，依托金沙江上游川藏段水电梯级，深入开展了水

风光互补相关研究工作,以期为其他地区开展类似工作提供参考和借鉴。

1　金沙江上游川藏段资源概况

1.1　水能资源

金沙江是长江的上游河段,其主源沱沱河发源于青藏高原唐古拉山脉主峰格拉丹东雪山的西南侧。金沙江上游川藏段从洛须至昌波(麦曲河口),规划河段河道长约 518 km,天然落差 979 m,流域面积 104.59 万 km^2,水力资源丰富,开发条件较好,共规划 8 级电站,自上而下依次为岗托(年调节)、岩比、波罗、叶巴滩(季调节)、拉哇(季调节)、巴塘、苏洼龙、昌波电站[5]。其中,岩比电站为远期规划项目;其余 7 座梯级电站为近期开发工程,总装机容量超过 9 GW。截至 2019 年 9 月,苏洼龙、巴塘、叶巴滩、拉哇等 4 座电站已经核准开工建设。金沙江上游水电规划推荐方案纵剖面图如图 1 所示。

1.2　太阳能资源

金沙江上游川藏段沿江 6 县分别为西藏昌都市的江达县、贡觉县、芒康县和四川甘孜州的德格县、白玉县、巴塘县,太阳能资源丰富。根据昌都、甘孜气象站的数据,NASA 数据和 Meteonorm 数据之间的数值关系进行分析比对,金沙江上游川藏段沿江 6 县的年均太阳总辐射量为 5 900 ~ 6 200 MJ/m^2,属太阳能资源很丰富地区[6]。金沙江上游川藏段沿江 6 县太阳能辐射量见表 1。

表 1　金沙江上游川藏段沿江 6 县太阳能辐射量

Tab. 1　Solar radiation amounts of six counties along the Jinsha River upper reaches in Sichuan-Tibet section

省(区)	县	太阳能辐射量/($MJ \cdot m^{-2}$)
西藏	江达县	5 900
	贡觉县	6 080
	芒康县	6 140
四川	德格县	6 060
	白玉县	5 920
	巴塘县	6 100

1.3　风能资源

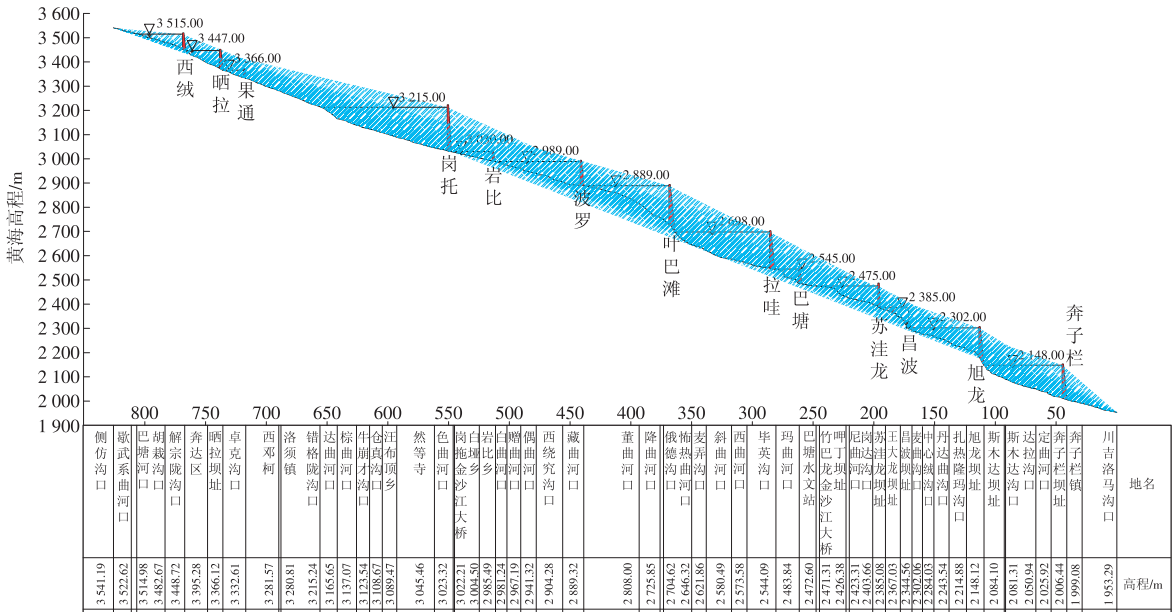
金沙江上游受西南季风影响盛行西南风,依据中尺度再分析数据模拟结果,该区域 100 m 高度年平均风速 6.60 ~ 8.20 m/s,年平均风功率密度 190 ~ 330 W/m^2;50 m 高度年平均风速 5.80 ~ 7.40 m/s,年平均风功率密度 100 ~ 240 W/m^2。根据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002),该区域风电场风功率密度等级为 1 ~ 2 级[6]。金沙江上游川藏段沿江 6 县风能资源情况见表 2。

2　金沙江上游川藏段能源利用模式探索

2.1　水风光互补可行性分析

2.1.1　资源具有客观互补性

金沙江上游川藏段沿江 6 县风能资源、太阳能资源均呈现冬春季略大、夏秋季略小的特点,而水力



地名	高程/m	里程/km
侧仿沟口	3 541.19	825.80
歇武系曲河口	3 522.62	811.13
胡塘河口	3 514.98	806.66
裁沟口	3 482.67	785.41
解宗陇沟口	3 448.72	767.19
奔达区	3 395.28	748.38
晒拉坝址	3 366.12	735.76
卓克沟口	3 332.61	716.95
西邓柯	3 281.57	689.74
洛须镇	3 280.81	688.71
错格陇沟口	3 215.24	655.85
达曲河口	3 165.65	641.63
棕曲河口	3 137.07	623.59
牛朝才沟口	3 123.54	615.03
仓真沟口	3 108.67	604.55
汪布顶乡	3 089.47	592.67
然等寺	3 045.46	561.64
色曲河口	3 023.32	541.84
白拖乡	3 022.21	540.73
岗垭乡	3 004.50	524.71
岩比乡	2 985.49	510.05
白曲河口	2 981.24	506.36
赠曲河口	2 967.19	497.19
偶曲河口	2 941.32	477.85
西绕究沟口	2 904.28	456.09
藏曲河口	2 889.32	438.74
董曲河口	2 808.00	390.96
降曲河口	2 725.85	367.17
俄拖德沟口	2 704.62	364.34
热曲河口	2 646.32	349.93
麦弄沟口	2 621.86	337.93
斜曲河口	2 580.49	312.74
西曲河口	2 573.58	306.62
毕英沟口	2 544.09	280.59
玛曲河口	2 483.84	259.19
巴塘水文站	2 472.60	240.95
呷丁坝址	2 471.31	238.18
竹巴龙金沙江大桥	2 426.38	220.70
尼曲河口	2 423.31	218.01
岗达沟口	2 403.66	201.79
苏洼龙坝址	2 385.08	194.83
王大龙坝址	2 367.03	184.76
昌波坝址	2 344.56	177.37
麦曲沟口	2 302.06	171.47
绒沟口	2 284.03	168.72
中心沟口	2 243.54	158.10
丹曲沟口	2 214.88	123.76
达热降玛沟口	2 148.12	109.32
旭龙坝址	2 084.10	88.27
斯木达坝址	2 081.31	87.21
达拉沟口	2 050.94	66.66
定曲河口	2 025.92	54.09
奔子栏坝址	2 006.44	41.20
奔子栏镇	1 999.08	35.15
川吉洛马沟口	1 953.29	0.00

图 1　金沙江上游水电规划推荐方案纵剖面

Fig. 1　Longitudinal profile of the recommended hydropower development plan on the Jinsha River upper reaches

表 2　金沙江上游川藏段沿江 6 县风能资源情况

Tab. 2　Wind energy conditions of six counties along the Jinsha River upper reaches in Sichuan-Tibet section

省(区)	县	100 m 高度年平均风速/(m·s^{-1})	年平均风功率密度/(W·m^{-2})
西藏	江达县	7.0	200
	贡觉县	7.9	300
	芒康县	6.6 ~ 6.8	200 ~ 220
四川	德格县	6.8 ~ 7.2	220 ~ 260
	白玉县	8.2	330
	巴塘县	6.7	190

资源的来水量通常在冬春季较小,在夏秋季较大,因此金沙江上游川藏段沿江 6 县水力资源与风能、太阳能资源具有客观互补性。

2.1.2　电源发电特性具有互补性

风电、光伏电站受季节、天气、温度等的变化,发电出力具有一定的波动性、随机性和间歇性,是发电稳定性较差的电源;水电站具有运行灵活、启动迅速、适应于负荷变动等特点,利用水电站的调节性能与补偿能力,可以与风光电等不稳定电源互补运行,平滑新能源出力,提高电能品质,促进新能源消纳。金沙江上游川藏段规划有年调节水库 1 座、不完全年调节水库 2 座和日调节水库 3 座,水电整体调节性能较好,可以与新能源发电出力进行很好的互补运行。

具有日调节及以上调节能力的水电站,在风、光电出力较大时,通过蓄水等方式降低水电站出力;在风、光电出力较小时,加大水电站出力,相当于把新能源电量以水库蓄水量的形式进行转化和在时间上重新分配,达到共同承担系统需求的目的[6]。水风光互补原理示意如图 2 所示。

2.1.3　多能互补技术日益成熟

龙羊峡水光互补电站、波波娜水光互补电站、甘肃酒泉基地、青海海南州基地等大量多能互补项目的建设和运行,有力证明了多种能源互补运行的技术可行性,而多能互补技术的日益成熟也将进一步促进多能互补项目的开发建设。

2.2　主要开展工作及研究成果

自 2016 年开始对金沙江上游川藏段水风光互补进行研究,主要开展了以下 3 个阶段的工作。

(1)沿江 6 县新能源资源规划研究工作(2016—2017 年)。金沙江上游川藏段水能、风能和太阳能资源十分丰富、具备建设水风光互补基地建设的基础条件[7]。综合考虑资源条件、地形地质条件、交通运输条件、电网接入和环境影响等因素,金沙江上游川藏段沿江 6 县初选光伏场址 31 个,总装机容量约 20 GW[8];初选风电场址 22 个,总装机容量约 3 GW[9]。

(2)设立 6 座测风(光)塔,开展现场测风、测光工作(2017—2018 年)。2017 年 10—12 月,在沿江 6 县共设立了 6 座测风(光)塔,风、光实测数据现已达 1 年零 9 个月。现场实测积累的大量测风、测光数据,为详细分析当地太阳能资源和风能资源奠定了扎实的基础。

(3)开展水风光互补专题研究,提出新能源合理开发规模(2018—2019 年)。水风光互补专题研究主要内容包括水风光互补的必要性、电力市场、资源分析、发电特性研究、水风光容量配比研究、风光项目布局、送出方案、平价上网分析等。

金沙江上游川藏段实施水电规模超过 9 GW,通过水风光互补分析计算,推荐开发的新能源规模为 8 ~ 12 GW[6],受高原风机和交通运输条件等因素制约,风能资源现阶段开发价值不大,因此,金沙江上游川藏段新能源开发以光伏电站为主。

3　金沙江上游川藏段开展水风光互补的意义

3.1　践行五大发展理念,落实国家能源发展战略

能源关系国家经济发展、社会稳定和国家安全。为落实创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,遵循国家能源发展战略,构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,优化能源结构,实现清洁低碳发展,是推动我国能源革命的本质要求,是我国经济社会转

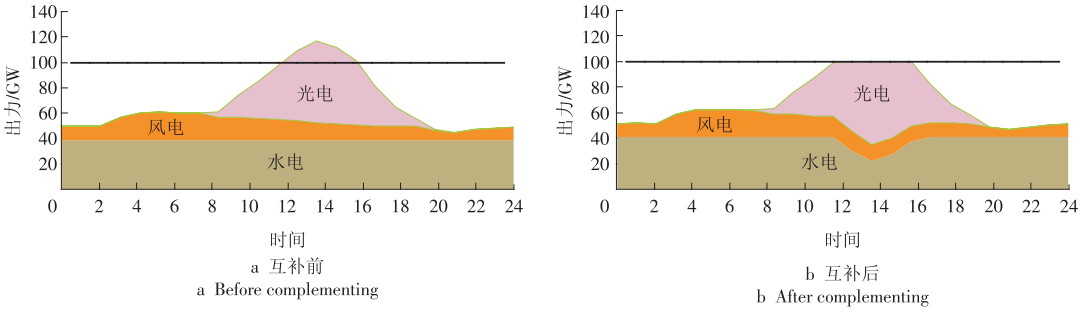


图 2　水风光互补原理示意

Fig. 2　Complementary principle of hydro-wind-solar power

型发展的迫切需要。水能、太阳能、风能具有分布广、开发潜力大、环境影响小、清洁低碳的特点,是人与自然和谐发展的能源资源。

科学合理地开发和利用金沙江上游川藏段丰富的水能、太阳能、风能,推进水风光多能互补形式开发利用,是贯彻能源生产和消费革命的有力抓手,也是加快生态文明建设,实现美丽中国的有效途径。

3.2　壮大藏区可再生能源产业,促进新能源与水电协同可持续开发

西藏自治区产业发展总体规划思路:充分利用资源优势,加快能源基础设施建设,优化能源生产消费结构,改善民生用能条件,构建水电为主、多能并举、互联互通的稳定、清洁、经济、可持续发展综合能源体系,积极推进重要的"西电东送"接续基地建设,进而把西藏自治区打造成为国家可再生能源基地。

金沙江上游川藏段水能资源丰富,现已开工建设 4 座水电站,借助水电站的外送通道建设配套的新能源项目,可以促进新能源与水电协同可持续开发,有利于壮大藏区可再生能源产业,并带动当地经济的发展。

3.3　积极发展多能互补项目,落实集团公司发展战略

中国华电集团有限公司以新发展理念统领发展全局,积极践行清洁、低碳的发展思路。2019 年 5 月,华电集团正式发布《综合能源服务业务行动计划》[10],明确提出"试点先行、全面推进、引领提升" 3 个阶段,逐步完成加快布局综合能源服务业务、构建"互联网 +"综合能源服务平台、提升综合能源服务业务支撑能力等 3 大任务。其中,"统筹布局多能互补清洁能源基地"位列重点任务中的各项业务之首。

因此,以水风光互补形式开发金沙江上游川藏段丰富的可再生能源,建设水风光互补可再生能源基地,是积极贯彻落实集团公司发展战略的有力体现。

3.4　减小风光电单独并网对电网的影响,降低电站建设成本,提高输电通道利用率

水电站是优良调峰电源,可以补偿不稳定电源运行。风电、光伏电站是发电稳定性较差的电源,但可为电网提供清洁电量。基于水力资源及风、光资源客观的互补性,利用水电站的调节性能与补偿能力,与附近的风、光电互补运行,可以减小风光电单独并网对电网的影响,促进新能源消纳。

金沙江上游川藏段实施水电规模超过 9 GW,推荐开发的光伏电站规模为 8 ~ 12 GW,可见,借助水电的外送通道,可以大大促进新能源的发展,是防治大气污染的重要措施之一。此外,"水风光互补"综合开发,可以节约送电成本,提高送出线路的利用率和经济性;同时,风、光电在与水电打捆后可以因为水库的灵活调节作用而减少对电网的影响,电能质量更高。

3.5　为其他流域开展类似工作提供借鉴和参考

由于风、光电出力不可调,所以水风光互补项目必须由水电来承担调节出力的主角,即当新能源出力发生较大变化时,利用具有调节能力水电的快速反应能力,及时跟踪新能源的出力变化,达到互补的目的;而具有调节能力的大中型水电站一般在电网中都要承担备用、调峰等任务,同时水库往往又具备防洪、灌溉、供水、航运等综合任务。如何权衡各方利弊,既要满足各用水部门综合用水要求,又要最大程度地配合新能源补偿运行,达到水电与风光电无缝对接,是一项十分重要的课题。

目前,国内建成的水风光互补基地项目较少,统一调度经验有限,因此,开展金沙江上游川藏段水风光互补示范项目,建立流域梯调中心,对水风光进行统一调度,对今后大规模水风光互补协调运行是一种有益的探索,同时可以为其他流域开展类似工作提供借鉴和参考。

4　结束语

金沙江上游川藏段水能资源、太阳能资源和风能资源十分丰富,采用水风光互补模式开发,建设金沙江上游川藏段可再生能源基地可以实现 100% 清洁供电,此举既符合我国能源政策,也符合西藏自治区和四川省能源发展战略,同时契合华电集团发展战略。风、光电在与水电打捆后可以因为水库的灵活调节作用而减少对电网的影响,电能质量更高,大大促进新能源的发展;同时,借助水电的外送通道进行水风光互补综合开发,可以节约送电成本,提高送出线路的利用率和经济性,推动新时代能源高质量发展。

参考文献:

[1]国家能源局. 风电发展"十三五"规划[EB/OL]. (2016 - 11 - 16)[2019 - 08 - 22]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201611/t20161130_2323.htm.

[2]国家能源局. 太阳能发展"十三五"规划[EB/OL]. (2016 - 12 - 08)[2019 - 08 - 22]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201612/t20161216_2358.htm.

[3]国家发展改革委,国家能源局. 能源发展"十三五"规划[EB/OL]. (2016 - 12 - 26)[2019 - 08 - 22]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201701/t20170117_835278.html.

(下转第 84 页)

参考文献：

[1]田兴涛. 中国天然气分布式能源发展现状及建议[J]. 能源与节能,2019(3):2 - 4.

[2]杨锦成,骆建波,康丽惠,等. 区域能源互联网构架下的综合能源服务[J]. 上海节能,2017(3):137 - 146.

[3]刁培滨,邓亚男. 燃气分布式能源站智能生产管理系统开发及应用[J]. 华电技术,2019,41(8):20 - 23.

[4]葛志伟,刘战礼,周保中,等. 火力发电厂数字化发展现状以及向智能化电厂转型分析[J]. 发电与空调,2015,36(5):45 - 47.

[5]余莉. 浅析楼宇式天然气分布式供能系统的开发与设计[J]. 华电技术,2018,40(5):73 - 74.

[6]胡静,姚峻,艾春美,等. 分布式冷热电三联供智能集控平台研究及应用[J]. 中国电力,2019,52(5):42 - 47,62.

[7]陈世和. 智能电站发展现状及展望[C]//智能化电站技术发展研讨暨电站自动化 2013 年年会论文集. 上海:中国动力工程学会,2013.

[8]北京能源投资(集团)有限公司,西门子电站自动化有限公司,艾默生过程控制有限公司. 燃气 - 蒸汽联合循环发电机组自启停控制技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

[9]王继强,刘亚峰. 燃气 - 蒸汽联合循环机组自动发电控制优化[J]. 华电技术,2016,38(10):20 - 21,24.

[10]李书才,张力,张华. 燃气 - 蒸汽联合循环机组自启停系统设计[J]. 电力勘测设计,2017(6):29 - 32,37.

[11]高鹏里. 智能化电厂建设探索[J]. 市场周刊(理论研究),2013(11):9 - 11,76.

[12]顾志祥,孙思宇,孔飞,等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术,2019,41(3):8 - 13.

[13]卢海勇,虞正发,刘波. 天然气分布式能源项目优化配置研究[J]. 上海节能,2019(2):90 - 96.

[14]陈霖新. 燃气冷热电联供分布式能源系统合理配置研究[J]. 华电技术,2014,36(9):64 - 67.

[15]余莉,张珍. 楼宇式天然气分布式能源系统年均综合能源利用效率提升方案[J]. 华电技术,2018,40(7):74 - 76.

[16]高世楫,郭焦峰. 能源互联网助推中国能源转型与体制创新[M]. 北京:中国发展出版社,2017.

(本文责编:齐琳)

作者简介：

周金顺(1975—),男,福建莆田人,高级工程师,从事电厂生产和基建管理方面的工作(E-mail:jinshun - zhou@ chd. com. cn)。

鞠明(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,从事电厂热控专业管理方面的工作(E-mail:ming - ju@ chd. com. cn)。

(上接第 65 页)

[4]国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划[EB/OL]. (2016 - 12 - 10)[2019 - 08 - 22]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201612/t20161216_830264.html.

[5]中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 金沙江上游水电规划报告[Z]. 2011.

[6]中国电建西北勘测设计研究院有限公司. 金沙江上游川藏段水风光互补研究报告[Z]. 2019.

[7]四川省能源协会. 金沙江上游风光水互补清洁能源基地研究报告[Z]. 2016.

[8]中国电建贵阳勘测设计研究院有限公司. 金沙江上游川藏段沿江六县太阳能资源开发规划报告[Z]. 2017.

[9]中国电建贵阳勘测设计研究院有限公司. 金沙江上游川藏段沿江六县风能资源开发规划报告[Z]. 2017.

[10]中国华电集团有限公司. 中国华电集团综合能源服务业务行动计划[Z]. 2019.

(本文责编:齐琳)

作者简介：

胡贵良(1967—),男,江西黎川人,高级工程师,从事电力企业经营管理方面的工作(E-mail:huguiliang@ chd. com. cn)。