

# 南方区域西电东送输电效益提升措施研究

雷成<sup>1,✉</sup>, 黄豫<sup>1</sup>, 唐金锐<sup>2</sup>

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广州 510600; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 武汉 430070)

**摘要:** [目的] 针对现有水电消纳研究角度相对单一、定量和全局分析不足的问题, 系统性研究云南富余水电消纳措施, 量化分析未来一段时间内南方区域弃水形势。[方法] 提出云南富余水电消纳方向, 在此基础上明确西电东送通道输电能力及裕度。[结果] 基于统筹协调的原则, 有针对性地提出现有通道优化利用和两广断面输电能力提升两类清洁水电消纳措施。[结论] 首次实现规划环节和调度运行环节的协调统一, 进一步提高南方区域西电东送通道的利用效率和输电效益。

**关键词:** 水电消纳; 西电东送; 通道优化; 提升措施; 输电效益

中图分类号: TM7; TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)04-0048-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Measures to Improve the Transmission Benefit of West-to-East Power Transmission in Southern Region

LEI Cheng<sup>1,✉</sup>, HUANG Yu<sup>1</sup>, TANG Jinrui<sup>2</sup>

(1. Energy Development Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510600, China;

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** [Introduction] Aiming at the problems of relatively single perspective, inadequate quantitative and global analysis of existing research on hydropower absorption, this paper systematically studies the measures of Yunnan's surplus hydropower absorption, quantitatively analyses the situation of water releasing in the southern region in the future. [Method] This paper put forward the direction of Yunnan's surplus hydropower absorption, and defined the transmission capacity and margin of the west-to-east power transmission channel on this basis. [Result] Based on the principle of overall coordination, this paper purposefully puts forward two kinds of clean hydropower absorption measures, which are optimal utilization of existing channels and improvement of transmission capacity of Guangdong and Guangxi section. [Conclusion] This is the first time to achieve the coordination and unification of planning and dispatching operation links, and further improve the utilization efficiency and transmission benefit of the west-to-east power transmission in southern region.

**Key words:** hydropower absorption; west-to-east transmission; channel optimize; measure improve; transmission benefit

近年来, 作为南方电网的送端省份, 在水电集中投产和省内外负荷增长放缓的影响下, 云南弃水问题十分突出, “十三五”前三年年均弃水电量约250亿kWh。同时, “十三五”末“十四五”初南方电网将相继投产乌东德电站送电广东广西特高压多端直流示范工程和云贵互联通道工程, 西电东送主网架将发生深刻变化, 运行方式复杂多变, 预计未来

几年云南弃水电量仍可能处于较高水平。保障清洁水电充分消纳是南方区域西电东送战略实施的重要内容, 合理的水电消纳措施将提高西电东送输电效益和电网的安全稳定运行。

水电消纳涉及水电项目建设时序与规模、本地高载能产业发展、输电通道规划建设、电网安全运行等多方面, 是一个非常复杂的系统性问题。文献[1]从规划建设的角度研究云贵互联通道对消纳云南富余水电的作用, 文献[2-9]从电网运行、电力市场的角度分析西电东送规模和送电曲线对水电

收稿日期: 2020-01-16 修回日期: 2020-09-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助“配电网单相接地故障层次化零残流消弧关键技术研究”(51707139)

资源配置、受端电网安全稳定运行、新能源协调发展的影响,文献[10-16]从市场化和政策角度研究电力市场与电价、碳排放权、可再生能源电力配额制等激励机制来促进市场成员主动消纳可再生能源。上述文献侧重于宏观定性分析,研究角度相对单一,缺乏系统性研究。

本文基于我国第一个特高压多端直流将应用于南方区域西电东送背景,系统性研究云南富余水电消纳措施,量化分析未来一段时间内南方区域弃水形势,提出云南富余水电消纳方向,在此基础上明确西电东送通道输电能力及裕度,基于统筹协调的原则,有针对性地提出现有通道优化利用和两广断面输电能力提升两类清洁水电消纳的措施,首次实现规划环节和调度运行环节的协调统一,进一步提高南方电网西电东送通道的利用效率和输电效益。

### 1 南方区域供需形势

“十三五”末“十四五”初,云南集中投产乌东德、白鹤滩等水电站,同时省内负荷增速放缓,导致较多富余水电需外送,富余规模2 GW~12 GW。贵州电源以煤电为主,调节能力强,但受煤炭产能和环保空间约束,剩余煤电发展空间有限,电力供应将由盈余转为亏损。广东是南方区域最大负荷中心,占整个区域负荷的六成左右,电力市场空间最大,云南富余水电优先考虑送往广东消纳。广西接受金中、乌东德送电广东广西直流送入的6 GW电力后,丰水期存在2.9 GW~5.3 GW电力盈余。各省区丰水期电力供需形势如图1所示。

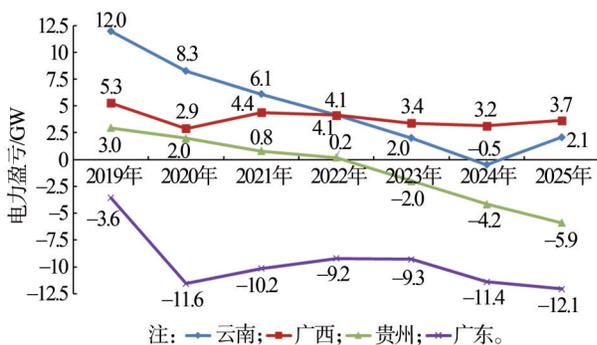


图1 南方区域丰水期电力供需形势

Fig. 1 Power supply and demand situation in Southern Region during high flow season

### 2 西电东送电网输电能力

目前,南方电网已形成“八交十直”+鲁西背靠背的西电东送主网架,输电能力超过49.5 GW,协议送两广规模达到44.5 GW。“十三五”末“十四五”初,乌东德送电广东广西直流投产后,西电东送输电能力超过57.5 GW,协议送两广规模达到52.5 GW。丰水期,西电东送协议外送直流基本处于满送状态。交流方面,云广断面包括鲁西背靠背和永富直流,输电能力5.9 GW(扣除网损),协议送电1.5 GW,其中有0.2 GW电力通过金中直流转送,通道输电裕度约4.6 GW;贵广断面包括金州-天二单回、独山-河池双回以及黎平-桂林双回共5回500 kV线路,通道输电能力2.95 GW,协议送电2.6 GW,其中送电广东2.0 GW、送电广西0.6 GW,通道输电裕度约0.35 GW;两广断面包括桂林-贤令山双回、贺州-罗洞双回、梧州-罗洞双回和玉林-茂名双回共8回500 kV交流线路,通道输电能力8.1 GW,协议送电5.78 GW,通道输电裕度约2.3 GW。南方电网西电东送各省(区)间交流断面情况如图2所示。



注:图中数值单位为GW。

图2 西电东送省(区)间断面示意图

Fig. 2 Diagram of West-to-East power transmission provincial (regional) intersections

由图可知,云广断面与两广断面通道裕度并不匹配,云南难以充分利用云广断面4.6 GW通道裕度将富余水电全部转送至广东消纳。针对该问题,文章提出了两类解决思路:(1)不改变现有各省(区)间断面输电能力,通过优化通道运行方式,来实现云广断面的充分利用;(2)提高两广断面输电能力,来满足云南富余水电转送广东的需求。

### 3 现有通道优化利用措施研究

#### 3.1 广东、广西、贵州消纳云南富余水电能力

广东电力缺口大、调峰能力强,可充分利用云广断面与两广断面通道裕度消纳云南富余水电。广西“十三五”末“十四五”期间存在少量电力盈余,但从接受优质电力,减少云南弃水,消纳清洁能源,实现水电资源的充分利用与优化配置角度,可在不增加广西弃水的原则下接受云南富余水电。贵州以火电为主,调峰性能好,与云南水电互补性较强,为减少云南弃水,缓解贵州电煤供应不足,应充分利用云贵互联通道和西电东送交流通道,开展水火发电权置换,丰期增送云南富余水电,贵州将丰期电煤留存枯期使用,维持黔电送粤协议规模。

#### 3.2 云南富余水电增送广东、广西措施

云南增送广东、广西各2.3 GW富余水电。考虑云南增送广东2.3 GW富余水电后,云广断面还有2.3 GW裕度,在不增加广西弃水的原则下,广西丰期接受云南水电。2019—2022年云南送广西最大电力2.3 GW、年送出电量39亿kWh~46亿kWh,2023年最大电力降至1.8 GW、送出电量约29亿kWh,2024年开始不具备送电能力。云南送广西的水电曲线如图3所示。

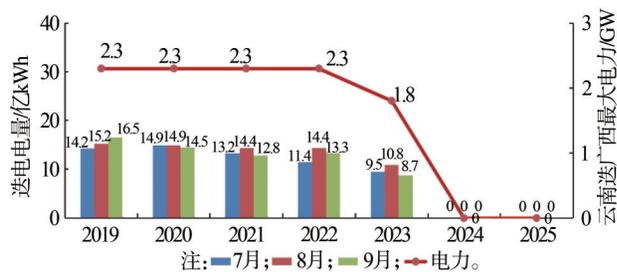


图3 云南水电送广西曲线

Fig. 3 Curve of hydropower transmission from Yunnan to Guangxi

#### 3.3 云南与贵州水火交流互济措施

受电煤供应和环保制约,贵州维持现有西电东送规模较为困难,考虑丰期交流通道不送广东。云南利用外送通道富余能力4.6 GW转送丰期盈余水电至广东,两广交流断面送电能力需达到8.2 GW(广东交流入口),现有断面送电能力基本满足要求。2019~2022年送出最大电力4.6 GW,年送出电量为6.6 TWh~8.2 TWh。2023~2025年送出最大电

力逐渐减小,2025年不具备互济能力。云南送广东的水电曲线如图4所示。

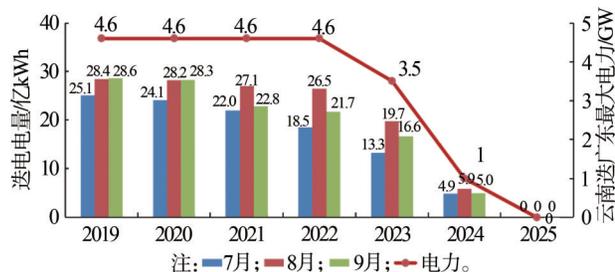


图4 云南水电送广东曲线

Fig. 4 Curve of hydropower transmission from Yunnan to Guangdong

### 4 两广断面输电能力提升措施研究

#### 4.1 两广断面输电能力提升需求

两广断面输电能力提升需求由其输送功率和输电能力决定的。两广断面输送功率与云电、贵电和龙滩电站送电广东容量密切相关。若贵电通过贵广断面减少送广东容量,两广断面输送功率将有所下降。相应地,丰水期云南水电通过云广断面增加送广东容量时,两广断面输送功率将升高。按照云电送粤、黔电送粤协议,计入天生桥、龙滩电站送电广东容量,扣减直流通道转送容量以及按5%扣除交流通道输电损耗,两广断面交流通道协议送电5.78 GW。若进一步利用云广断面裕度增送4.6 GW云南富余水电至广东,则两广断面输送功率将达到9.95 GW。

两广断面输电能力并不是一成不变,其大小受线路传输能力、潮流分布和广东部分500 kV变电站单相短路中开关拒动故障考核等因素的影响。目前,两广断面输电能力约8.1 GW,2020年受梧州地区负荷增长影响两广断面输电能力约7.9 GW,2021年乌东德直流广西侧投产后两广断面输电能力下降到7.2 GW。经测算,若及时实施来梧、柳桂线路温升改造,两广断面输电能力将维持8.1 GW。

因此,不考虑实施温升改造,2019~2021年两广断面输电能力提升需求分别为1.85 GW、2.05 GW、2.75 GW。实施温升改造,两广断面输电能力提升需求维持1.85 GW,如表1所示。

#### 4.2 温升改造措施

两广断面输电能力受来梧、柳桂线“N-1”热稳限制,而线路热稳极限主要由其载流量决定。根

表1 两广断面输电能力提升需求

Tab. 1 Increasing demand for transmission capacity of Guangdong and Guangxi section

年份	输送功率 /GW	实施温升改造		不实施温升改造	
		输电能力 /GW	提升需求 /GW	输电能力 /GW	提升需求 /GW
2019年	9.95	8.10	1.85	8.10	1.85
2020年	9.95	8.10	1.85	7.90	2.05
2021年	9.95	8.10	1.85	7.20	2.75

$$I = \left\{ \frac{9.92(\theta_1 - \theta_0)(\nu D)^{0.485} + \pi \varepsilon S D \left[ (\theta_1 + 273)^4 - (\theta_0 + 273)^4 \right] - \alpha \beta D}{kR} \right\}^{0.5} \quad (1)$$

式中:  $I$ 为导线载流量(A);  $\theta_1$ 为导线最高允许运行温度,取80℃;  $\theta_0$ 为环境温度,来梧线取36℃,柳桂线取35℃;  $\nu$ 为风速,取0.5 m/s;  $D$ 为导线外径(m);  $\varepsilon$ 为导线辐射系数,取0.9;  $S$ 为斯蒂芬-包尔茨曼常数,取 $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>;  $\alpha$ 为导线吸热系数,取0.9;  $\beta$ 为日照强度,取1 000 W/m<sup>2</sup>;  $k$ 、 $R$ 分别为导线温度为 $\theta_1$ 时的交直流电阻比和直流电阻。

表2 来梧、柳桂线温升改造前的基本情况

Tab. 2 Basic situation of Laiwu, Liugui transmission line before temperature rise modification

线路名称	导线截面/ mm <sup>2</sup>	设计环 温/℃	最高允许 温度/℃	载流量 /A	热稳极限/ GW
来梧线	4×300	36	70	2 228	1.92
柳桂线	4×400	35	70	2 656	2.29

对来梧、柳桂线实施温升改造,将导线最高允许运行温度提高到80℃,校核升温对导线及配套金具机械性能、对地及交叉跨越安全距离的影响,对局部地区导线弧垂对地及交叉跨越间距不满足要求的实施旧塔改造或增加新塔。温升改造后,来梧、柳桂线载流量分别达到2.689 kA、3.205 kA,热稳极限分别提高到2.32 GW、2.77 GW,提升两广断面2020年和2021年输电能力分别为0.2 GW、0.9 GW,两广断面输电能力将维持8.1 GW。

### 4.3 串补投退措施

南方电网实施异步联网工程后,稳定问题不再成为限制云电送粤输电能力的制约因素。两广断面上串补装置的功能逐步从提高系统的稳定水平转变为调控通道送电潮流。通过串补的投退,可实现对通道潮流的控制,使两广断面潮流分布更为合理,

据摩尔根简化载流量计算公式,见式(1),导线载流量不仅与导线材料、截面、吸热系数、辐射系数、允许温度等自身特性有关,而且与环境温度、风速、日照强度等外界环境条件有关<sup>[17]</sup>。来梧、柳桂线为已有线路,导线材料、截面、吸热系数、辐射系数一定,环境温度、风速、日照强度若按规程规范要求 and 线路运行地区自然条件综合设定,导线允许温度的取值就成为影响载流量的主要因素,来梧、柳桂线温升改造前的基本情况如表2所示。

从而提高断面输电能力。经测算,串补投退措施可提升两广断面输电能力约0.4 GW。

### 4.4 加装输电线路在线监测系统措施

由4.2节可知,线路载流量的计算与外界环境条件密切相关。通过输电线路在线监测系统对导线状态(线路温度、张力、弧垂等)和环境条件(环境温度、日照、风速等)进行动态监测,在不违背现行技术规程的条件下,根据实际运行环境核算载流量,充分挖掘输电线路的隐性容量。根据相关研究,加装输电线路在线监测系统可提高线路输送容量10%~30%。

利用载流量计算公式对两广断面受限线路在不同环境温度下的输送能力进行测算,结果如表3所示。当实际环境温度低于设计环境温度6℃时,受限线路来梧、柳贺、桂山线输送能力提升约6.6%,提升效果较明显。

表3 不同环温下输送能力比较

Tab. 3 Comparisons of circuits transmission capacity under different environmental temperatures

线路	允许温 度/℃	设计环境温度/36℃		实际环境温度/30℃		提升 /%
		载流量 /A	输送容量 /GW	载流量 /A	输送容量 /GW	
来梧线	80	2 689	2.32	2 866	2.47	6.6
柳贺线	80	3 158	2.72	3 366	2.90	6.6
桂山线	80	3 754	3.24	4 002	3.45	6.6

## 5 输电效益提升措施实效性评估

输电效益评估主要考虑经济效益和绿色效益两方面。经济效益包括各措施实施后可新增的西电东

送电量和过网费收入,绿色效益包括节省煤炭使用量、减少污染物排放、提升可再生能源电力总量配额指标等。现有通道优化利用类措施和串补投退措施无需新增投资,其增送电量和新增过网费为净收益,在排除电网运行风险的情况下优先实施。温升改造和加装在线监测系统的输电效益计算结果如表

4~表5所示,两个措施的新增过网费均远高于投资费用,经济效益较好。同时,各提升措施均是增送云南富余水电到广东消纳,绿色效益显著,不仅可以节省大量燃煤、降低污染物排放,同时也能有效提升广东可再生能源电力总量配额指标。

表4 经济效益评估

Tab. 4 Economic benefit assessment

措施	投资费用 /亿元	两广断面提升 /GW	年新增送电量 /亿kWh	利用小时数 /h	年新增过网费 /亿元	单位输电价格 /[元·(kWh) <sup>-1</sup> ]
温升改造	0.43	0.90	26.1	2 900	2.1	0.080 2*
加装在线监测系统	0.05*	0.81*	23.5	2 900	1.9	0.080 2*

注:1)同塔双回线路按每15 km装设1套10万元在线监测装置。

2)加装在线监测系统考虑提升两广断面现有输电能力10%。

3)输电价格按照《国家发改委关于调整宁东直流等专项工程2018—2019年输电价格的通知》中云南送广东价格。

表5 绿色效益评估

Tab. 5 Green benefit assessment

措施	年新增送 电量/亿 kWh	节省标煤 量/万t	节省原煤 量/万t	减排二氧 化碳量/万t	减排二氧 化硫量/万t	减少碳排放 当量/万t	等同造林量/ 万ha	广东可再生能源电力总量配额指 标提升(以广东2020年全社会用 电量为基准)/%
温升改造	26.1	78	109	205	0.12	56	0.56	0.35
加装在线监测系统	23.5	70	98	185	0.11	50	0.51	0.32

## 6 结论

本文基于我国第一个特高压多端直流将应用于南方区域西电东送背景,系统性地研究了云南富余水电消纳措施,量化分析了未来一段时间内南方区域弃水形势,提出了云南富余水电消纳方向,在此基础上明确西电东送通道输电能力及裕度,基于统筹协调的原则,有针对性地提出了现有通道优化利用和两广断面输电能力提升两类清洁水电消纳的措施,并利用经济效益和绿色效益等输电效益评估方法对其进行了实效性评估。首次实现了规划环节和调度运行环节的协调统一,进一步提高了南方电网西电东送通道的利用效率和输电效益,促进了云南清洁水电消纳,缓解了弃水压力,降低了污染物排放,提升了南方区域非化石能源消费比重。

### 参考文献:

[1] 赵岳恒,胡凯,何焯,等.云贵互联通道对消纳云南富余水电作用研究[J].云南电力技术,2019,47(1):92-95+98.  
ZHAO Y H, HU K, HE Y, et al. Study on the effect of Yunnan-Guizhou power grid interconnection project on absorbing sur-

plus hydropower in Yunnan [J]. Yunnan Electric Power, 2019, 47(1):92-95+98.

- [2] 胡飞雄,何广春.南方电网西电东送节能减排效益分析[J].电力系统自动化,2014,38(17):20-24.  
HU F X, HE G C. Energy-saving and emission reduction benefit analysis on west-to-east transmission project of China Southern power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):20-24.
- [3] 黄欣,左郑敏,孙雁斌,等.“十三五”广东可接纳西电能力研究[J].广东电力,2017,30(7):18-23.  
HUANG X, ZUO Z M, SUN Y B, et al. Research on ability of Guangdong province accepting western electricity in 13<sup>th</sup> five-year plan [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7):18-23.
- [4] 卢斯煜,王彤,金小明,等.南方电网“西电东送”特性对送受端电网新能源消纳能力影响分析[J].电力建设,2015,36(10):53-59.  
LU S Y, WANG T, JIN X M, et al. Impacts of west-east power transmission characteristics on renewable energy acceptability in China Southern power grid [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10):53-59.
- [5] 黄豫.电力直接交易的国内外发展情况及启示[J].南方能源建设,2015,2(增刊1):1-4.  
HUANG Y. Inspiration and situation of domestic and interna-

- tional development of electric power direct exchange [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(Supp. 1): 1-5.
- [6] 黄豫. 新加坡电力体制改革的历程及启示分析 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(1): 36-40.  
HUANG Y. Analysis of the process and inspiration of singapore's electric power system reform [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(1): 36-40.
- [7] 杨柳, 吴鸿亮, 门锬. 南方电网节能与经济运行评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 31-37+86.  
YANG L, WU H L, MEN K. An energy saving and economy operation evaluation method for China Southern Power Grid [J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(17): 31-37+86.
- [8] 蒙文川. 南方电网西电东送通道线损计算分析及降损措施 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 122-125.  
MENG W C. The loss calculation of CSG's west-to-east power transmission lines and the measures of decreasing loss [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 122-125.
- [9] 王志勇, 梁敬成, 熊小伏, 等. 西电东送输电通道损耗最小最优功率分配方法 [J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 38-41.  
WANG Z Y, LIANG J C, XIONG X F, et al. Optimal power distribution method with minimized loss of the west-to-east transmission lines [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 38-41.
- [10] 冷媛, 陈政, 王庆红, 等. 大用户电力直接交易对南方电网区域的影响分析及相关建议 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 99-103.  
LENG Y, CHEN Z, WANG Q H, et al. Analysis of the impact of direct power purchase by large consumers in CSG area and relative suggestions [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 99-103.
- [11] 李丰, 于超, 孔亮, 等. 南方电网西电东送输电价格定价机制 [J]. 中国电力, 2016, 49(12): 162-167.  
LI F, YU C, KONG L, et al. Research on pricing mechanism of west-to-east power transmission price for China Southern Power Grid [J]. Electric Power, 2016, 49(12): 162-167.
- [12] 赵岳恒, 周俊东, 程改红, 等. 云南水电外送的受端市场综合竞争力分析 [J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 82-87.  
ZHAO Y H, ZHOU J D, CHENG G H, et al. Analysis on comprehensive of Yunnan power transmission in receiving market [J]. Smart Power, 2018, 46(12): 82-87.
- [13] 陈俐, 张翔宇, 鞠立伟, 等. 南方电网西电东送碳排放权初始配额分配新方法 [J]. 中国电力, 2016, 49(4): 170-173.  
CHEN L, ZHANG X Y, JU L W, et al. Clean energy generation oriented initial quota allocation method for carbon emissions trading of west-east power transmission [J]. Electric Power, 2016, 49(4): 170-173.
- [14] 朱继忠, 冯禹清, 谢平平, 等. 考虑可再生能源配额制的中国电力市场均衡模型 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 168-176.  
ZHU J Z, FENG Y Q, XIE P P, et al. Equilibrium model of Chinese electricity market considering renewable portfolio standard [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 168-176.
- [15] 王辉, 陈波波, 赵文会, 等. 可再生能源配额制下跨省区电力交易主体最优决策 [J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1987-1995.  
WANG H, CHEN B B, ZHAO W H, et al. Optimal decision-making of trans-provincial power transaction subjects under renewable portfolio standard [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 1987-1995.
- [16] 张翔, 陈政, 马子明, 等. 适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究 [J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2682-2690.  
ZHANG X, CHEN Z, MA Z M, et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2682-2690.
- [17] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(19): 18-21.  
ZHANG Q P, QIAN Z Y. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line [J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 18-21.

## 作者简介:



雷成

雷成 (通信作者)

1987-, 男, 湖北武汉人, 工程师, 四川大学电力系统及其自动化硕士, 主要从事电力系统规划设计研究方向 (e-mail) leicheng@csg.cn。

黄豫

1978-, 男, 广东广州人, 高级工程师, 学士, 主要从事电力系统规划设计研究方向 (e-mail) huangyu@csg.cn。

唐金锐

1986-, 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 主要从事配电网继电保护和自动装置、配电自动化及信息化、交直流电网规划分析研究方向 (e-mail) tangjinrui001@126.com。

(责任编辑 李辉)