

风电并网下含核电受端电力系统调峰问题研究

卢斯煜, 郑敏嘉, 吴伟杰, 周保荣, 姚文峰

引用本文:

卢斯煜, 郑敏嘉, 吴伟杰, 等. 风电并网下含核电受端电力系统调峰问题研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 100–109.

LU Siyu, ZHENG Minjia, WU Weijie, et al. Research on Peak-shaving Problem of Receiving Power System with Nuclear Power Under Wind Power Grid Connection[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 100–109.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

基于调峰能力分析的电网弃风评估方法及风电弃风影响因素研究

Research on the Evaluation Method and Influencing Factors of Wind Power Curtailment Based on System Regulation Capability Analysis
南方能源建设. 2018, 5(2): 71–76 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.010>

中国煤电机组调峰运行现状分析

Analysis on Peak Load Regulation Status Quo for Coal-fired Power Plants in China
南方能源建设. 2017, 4(1): 18–24 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.003>

热电联产机组的电力调峰运行模式研究

Research of Cogeneration Units Acting on Electric Peak-shaving Operating Mode
南方能源建设. 2015(3): 51–56 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.010>

燃气热电联产机组选型、调峰能力及电价机制分析

Research on Unit Selection, Peak Regulation Capability and Electricity Pricing Mechanism of Gas-fired Cogeneration
南方能源建设. 2015, 2(1): 66–70 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.012>

分布式供能系统协同电网调峰是历史的必然

Distributed Energy System in Coordination with Peak Load Regulation of Power System is Historically Inevitable
南方能源建设. 2016, 3(4): 8–12 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.002>

风电并网下含核电受端电力系统调峰问题研究

卢斯煜^{1,✉}, 郑敏嘉², 吴伟杰², 周保荣¹, 姚文峰¹

(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663;
2. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510620)

摘要: [目的] 随着风电装机规模和比重的不断提升, 受风电反调峰特性的影响, 含核电的受端电力系统(如广东电网)在汛期的调峰问题将更为凸显。为了保障多类型电源协调发展和电网的安全可靠运行。[方法] 针对风电并网下含核电的受端电力系统调峰问题, 在充分分析国内外核电机组参与调峰情况及其技术经济性的基础上, 结合常规确定性调峰校核方法存在的不足, 提出了确定性与概率性相结合、典型周/典型日和全年8760 h全景模拟相结合的系统调峰平衡分析方法。[结果] 以我国某沿海省级电网为例, 采用所提方法, 分析不同风电和外电场景下电网的调峰形势, 并提出相应措施建议。[结论] 所述方法能够发挥确定性与概率性两种方法各自的优点, 对系统调峰平衡进行更为全面和有效的分析与校核。

关键词: 调峰平衡; 运行模拟; 核电调峰; 风电并网; 受端系统

中图分类号: TM7; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)01-0100-10

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Peak-shaving Problem of Receiving Power System with Nuclear Power Under Wind Power Grid Connection

LU Siyu^{1,✉}, ZHENG Minjia², WU Weijie², ZHOU Baorong¹, YAO Wenfeng¹

(1. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, China;
2. Grid Planning and Research Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510620, China)

Abstract: [Introduction] With the continuously increasing of the installed capacity and proportion of wind power and other new energy sources generation, the peak-shaving problem of receiving power system with nuclear power (such as Guangdong Power Grid) in flood season will be more prominent due to the influence of wind power anti peak shaving characteristics. In order to ensure the coordinated development of multiple types of power supply and the safe and reliable operation of power grid. [Method] Aiming at the peak shaving problem of the receiving end power system with nuclear power under the wind power grid connection, based on the full analysis of the domestic and foreign nuclear power units' participation in peak shaving and their technical economy, combined with the shortcomings of the conventional deterministic peak shaving check method, a peak shaving balance analysis method combining certainty with probability, typical week / typical day and whole year 8760 h panoramic simulation was proposed. [Result] Taking the coastal provincial power grid as an example, the proposed method was applied to analyze the peak-shaving situation of receiving power system under different scenarios, and then some suggestions was presented. [Conclusion] The proposed method can give full play to the advantages of both deterministic and probabilistic methods and carry out more comprehensive and effective analysis and verification of the system peak regulation balance.

Key words: peak-shaving analysis; operation simulation; peak-shaving of nuclear power; wind power integration; receiving power system

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2020-07-24 修回日期: 2020-08-11

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助(2019B111109001);中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20180556)

在当前电网运行中, 核电机组出于安全角度考虑, 一般承担基荷运行, 在非紧急情况下不参与电力系统调峰^[1-2]。同时, 核电安全条件较高, 一般就近建于沿海等负荷受端地区。风电出力具有随机性、波动性、间歇性和反调峰特性^[3], 在大多数情况下对电力系统调峰平衡具有负面影响, 而随着风电规模和占比的快速增长, 这种影响将愈发凸显。此外, 由于我国资源条件和用电需求存在逆向分布, 远距离的输电将长期存在。远距离输电的受端系统, 由于外来电多为水电等清洁能源、且规模一般较大, 在水电汛期为了保障送端水电等清洁能源的充分消纳, 其外来电调峰能力非常有限。因此, 随着风电等新能源装机规模和比重的不断提升, 含核电的受端电力系统调峰问题将更为凸显。

为了研究大规模风电并网条件下含核电的受端电力系统调峰形势和对策, 以保障多类型电源协调发展和电网的安全可靠运行, 本文在充分分析国内外核电机组参与调峰情况及其技术经济性的基础上, 针对常规确定性调峰校核方法存在的不足, 提出了确定性与概率性相结合、典型周/典型日和全年8760h全景模拟相结合的系统调峰平衡分析方法, 能够发挥两种方法各自的优点, 对系统调峰平衡进行更为全面和有效的分析与校核。以我国某沿海省级电网为例, 采用所提出的方法, 分析不同风电和外电场景下电网的调峰形势, 并提出相应措施建议。

1 国内外核电机组参与调峰情况分析

1.1 国外核电机组参与调峰情况

通过对国外(主要为法国EDF、西班牙、加拿大Ontario、美国PJM、日本东京TEPCO、韩国等)电力系统及核电运行方式开展调研, 结果显示核电机组主要存在两种运行方式^[4-6]: (1) 调峰运行方式: 该方式主要存在于法国。法国电网核电比例相对较高(装机占比53%, 发电量占比77%, 2009年), 缺乏调峰电源, 存在显著的调峰困难, 因此核电机组在电网中参与日负荷调节; (2) 基荷运行方式: 除法国以外的国家和地区, 电源结构与负荷特性较为适应, 核电机组保持稳定基荷的运行方式。

1.2 国内核电机组参与调峰情况

我国核电起步于上世纪90年代, 第一座核电站秦山核电站(一期)于1991年并入华东电网发电, 初期由于规模较小(300 MW, CNP300压水堆), 并未对电网产生明显影响。后期随着秦山核电二期(CNP650堆型)、三期(CANDU 6重水堆)的投产, 虽然总装机规模达到656.4 MW, 但由于华东电网总装机容量大, 调峰手段丰富, 对秦山核电的并网发电有着较好的保护与缓冲作用。因此, 秦山核电基本处于带基荷运行的状态, 仅在少数情况下(春节、国庆等特殊负荷日)降功率运行参与调峰。

大亚湾核电站是我国大陆首座大型商用核电站, 1994年投入商业运行, 而随着后续岭澳一、二期的建成投产, 以及广东电网调峰压力的增大, 大亚湾核电基地机组在重要节假日、台风等特殊负荷日下会降额参与系统调峰。据统计, 2016年大亚湾核电站、岭澳核电站(一期、二期)因外部原因减载等效损失天数分别为0.789 d、20.108 d、33.197 d。

2016年8月, 海南昌江核电一期2台650 MW机组(CNP650压水堆)实现全面投产发电, 由于海南电网规模较小, 且配套的琼中抽蓄需2018年才能投产, 导致电网“大机小网”问题更为突出、调峰压力进一步加剧。根据海南电网调度中心统计, 2016年昌江核电参与调峰共45台次。在正常情况下, 昌江核电保持75%功率平台稳定运行; 2016年, 在春节、台风、强降雨等特殊负荷日以及秋季主汛期水电大发、冬季峰谷差较大时期, 昌江核电进一步降功率至50%~60%平台运行, 甚至低至20%。

1.3 核电机组参与调峰的技术经济可行性

1.3.1 核电调峰的安全性

核电机组参与电网负荷调节的安全隐患主要包括^[7]: (1) 功率调节过程中, 控制棒插入堆芯将形成轴向氙振荡, 导致轴向功率偏差振荡, 运行点超出可控范围的风险加大; (2) 由于核燃料芯块与包壳的热膨胀率不同, 核电机组负荷变化时, 容易导致燃料包壳局部疲劳破损; (3) 负荷调节过程中, 核电站废液排放量成倍提高(负荷调节时日均处理量约47 m³, 基荷运行时约10 m³), 增加了硼回收系统(TEP)负担, 影响三废系统对放射性废水的处理和存储能力, 带来人身与环境安全隐患; (4) 频繁参与负荷调节, 将降低控制棒系统、关键阀

门、汽轮机叶片等设备的运行可靠性。

1.3.2 核电调峰的技术性

以大亚湾基地的M310堆型和CPR1000堆型核电机组为例^[8-9]：

1) 作为法国早期的压水堆核电技术，M310堆型的功率控制模式在设计时均为G模式（灰棒模式）。传统意义上，G模式设计的机组可实现在燃料的前80%循环寿期内具有日负荷跟踪能力，可按照“12-3-6-3”模式^[6-7]参与调峰，负荷变动速率最快可达到5%FP/min，并在15%~100%功率范围内，具备10%FP功率阶跃变化的能力。但实际上，大亚湾、岭澳核电站一期与法国同类核电机组在影响负荷调节能力的关键设计上存在差异，包括：（1）使用的运行图左边界较窄（FQ=2.25，法国同类型的核电站FQ=2.35），安全运行范围相对降低；（2）下泄管线由孔板控制压力（法国EDF核电机组由控制阀控制压力），机组功率变化过程中将产生很大瞬变，对一回路产生较大冲击，加大电站的运行风险。

2) CPR1000堆型是在M310基础进行改进形成的，反应堆功率控制的绝大多数关键部分均沿用了M310的原有设计。从设计上，机组具有G模式的运行方式，但目前仍需结合实际运行进一步验证。

1.3.3 核电调峰的经济性

核电机组参与调峰对其经济性的影响主要体现在^[7,10-11]：（1）核电调峰将直接降低电厂发电利用小时和利润。例如采用“12-3-6-3”方式调峰（调峰深度假定为额定负荷的50%），日负荷因子约为81.25%，较满负荷情况下下降近20个百分点，进一步考虑机组参与调峰后蒸汽能量的贬值以及厂用电率的升高，核电厂的经济效益将明显下降；（2）核电调峰易造成核废料。对于核电机组，需要根据发电量制定核电换料计划（一般按照基荷运行的方式制订）。核电机组参与调峰或降出力运行，将导致核燃料的损耗率增加或使用不充分，造成弃料，影响核电运营的经济性；（3）核电调峰将增加废水处理费用。核电机组参与调峰运行，会相应增加废水排放，对电厂废水存储和处理能力提出更高的要

求，增加电厂废水处理的费用，影响经济性；（4）核电调峰将提高电站厂用电率。当核电机组出力水平下降，电站中厂用电较高的设备的用电量并不下降，使厂用电占电站总发电量的比例增加。

2 确定性与概率性相结合的调峰分析方法

2.1 确定性调峰分析方法

确定性调峰分析方法是指通过对电力系统各边界条件进行科学地假定或设定（典型系统负荷曲线与风电出力曲线）后展开系统调峰平衡分析的方法^[12-16]。

确定性分析的场景主要从负荷曲线、风电出力曲线和外来电特性三个维度来建立：对于负荷，选取最大负荷典型日、典型周、典型节假日等不同负荷场景；对于风电，选取风电平均出力、典型反调峰、理论反调峰（根据95%置信度下的风电最大出力与最小出力构建理论反调峰曲线）等不同的风电出力场景；对于外来电，可根据其参与受端系统调峰的程度来设置不同的外来电场景。对每个确定性场景，分别使用CSPS_ProS软件^①进行典型日/典型周运行模拟计算，校核各场景下系统的调峰平衡，分析不同场景因素对系统调峰平衡的影响。

2.2 概率性调峰分析方法

相比于确定性调峰分析方法基于风电典型日出力曲线，概率性调峰分析方法是基于概率性分析场景开展的，此处的所提的概率性主要体现在风电全年8760h时序出力序列的随机模拟。

采用南方电网节能经济运行平台^[17-18]，采用Weibull分布描述风电出力分布情况，采用随机差分方程模拟生成全年8760h的风电时序出力^[19-20]，进一步将风电时序出力与时序负荷一一对应，则得到全年365d含随机风电场景的概率性场景，对全年所有场景进行运行模拟，校核系统调峰平衡。

2.3 确定性与概率性相结合的调峰分析方法

确定性的调峰分析基于典型周/典型日模式开展，其优点是考虑了系统运行的典型场景和较极端场景，能够对系统调峰运行边界进行有效的校核，同时模拟场景数目较少、仿真效率高；其缺点是其调峰弃电只代表典型场景，无法反映全年尺度下的

①CSPS ProS 2013,为南方电网科学研究院与华中科技大学联合开发的南方电网电力系统运行模拟分析软件,源于华中科技大学和华中电力集团公司于1999年合作扩展并完善的“联合电力系统运行模拟软件(WHPS 2000)”^[21-23],属于WHPS 2000的全新升级产品,WHPS2000在我国各电网公司、电力设计院中得到广泛应用。

弃电水平, 同时也无法计及一些概率极低的场景的影响。概率性的调峰分析是基于 8 760 h 的全景模拟开展, 其优点是基本能覆盖运行中大多数的场景, 调峰弃电能反映全年水平; 其缺点是对风电出力时序模拟的精确度、时序负荷预测的精确度依赖性较大, 同时模拟场景数目多、仿真效率低。因此, 本文提出将两者进行结合应用的工程化调峰分析方法, 具体分析步骤如下:

1) 对规划期内不同电源方案采用确定性调峰分析方法进行初步的调峰平衡评估, 在该步骤中, 风电可采用平均出力曲线或典型反调峰出力曲线, 负荷曲线可采用逐月典型日曲线及典型节假日曲线。

2) 针对步骤 1 筛选出的建议方案, 采用概率性调峰分析方法进行全时序的详细模拟, 评估全年弃风情况, 并据此对电源结构进行优化调整。

3 风电并网下含核电的受端电力系统调峰问题研究

本节以某规划水平年下某沿海电网为例, 采用所提出的确定性和概率性相结合的方法, 分析不同场景下受端电力系统的调峰形势, 并提出相应措施建议。

3.1 确定性调峰分析

电网实际运行中, 核电一般保持稳定出力运行, 需要其他机组(如抽水蓄能电站等)配合参与电网调峰; 而风电反调峰特性显著, 导致系统调峰压力日趋严峻。风电并网对含核电系统调峰形势的影响, 主要体现在系统调峰能力对于不同风电出力形态的适应性。基于确定性分析方法, 研究在不同负荷场景(最大负荷典型日、典型周、典型节假日)、新能源出力场景(风电平均出力场景、风电典型反调峰场景等)、西电调峰方式(西电按调峰原则规定参与调峰、西电充分参与调峰)下系统的调峰情况。设置三类场景开展仿真模拟:

1) 基础场景: 风电采用平均出力场景、西电按调峰原则参与调峰。

2) 风电反调峰场景: 风电采用典型反调峰场景、西电按调峰原则参与调峰。

3) 西电充分调峰场景: 风电采用平均出力场景、西电更为充分地参与调峰。

3.1.1 基础场景(场景 I)

基础场景下, 调峰平衡模拟结果: (1) 最大负荷日, 该电网不存在弃水或弃风, 表明低谷时段压负荷调峰基本不存在问题; (2) 典型周, 系统仅在个别月份周一存在少量弃风调峰; (3) 春节期间, 由于系统负荷较低, 当保安开机大于 50% 时, 系统火电和核电整体开机规模过大, 若保证西电完全消纳, 则将造成本地系统全天弃风弃水。以保安开机 70% 为例(图 1), 系统全天均存在弃水弃风, 低谷时段存在 331 MW 左右的调峰缺额, 调峰形势十分严峻。此时, 若要满足调峰平衡并完全消纳水电和风电, 需要东区核电机组整体降额运行于 63% 左右的功率平台。对电网保安开机开展进一步的敏感性分析(具体结果见表 1), 若要完全消纳水电、风电, 需要电网保安开机约束调减至 40% (此时电源开停机和发电调度计划均重新进行了优化); (4) 国庆期间, 系统调峰形势相对缓和, 在调减保安开机至 60% 时可基本解决调峰问题(具体见表 1)。

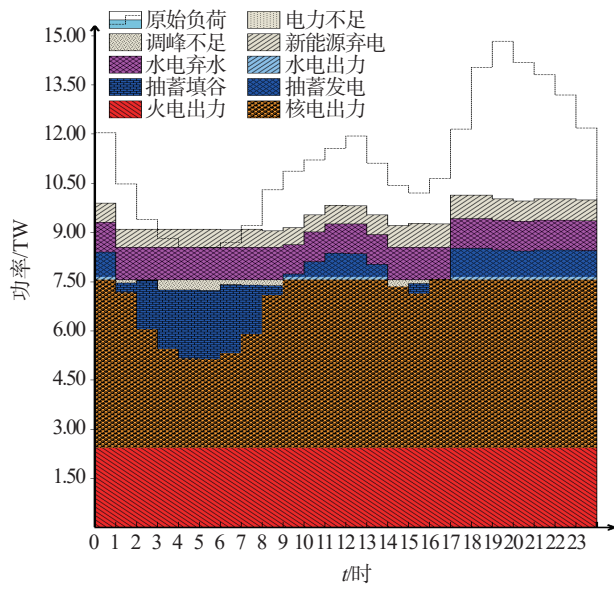
表 1 基础场景下典型节假日调峰平衡情况

Tab. 1 Peak shaving balance during typical festival in

负荷类型	节假日保安开机	base scenario				MW	
		70%	60%	50%	40%	70%	60%
节假日	系统调峰需求	4 425	4 425	4 423	4 370	3 709	4 927
	调峰不足	331	0	0	0	425	0
	含: 热备用亏	0	0	0	0	0	0
	1. 弃水调峰	980	712	350	0	1807	0
	2. 弃风调峰	549	549	549	0	223	0
节后工作日	系统调峰需求	17 261	17 261	17 261	17 261	18 940	18 940
	调峰不足	0	0	0	0	0	0
	含: 热备用亏	0	0	0	0	0	0
	1. 弃水调峰	0	0	0	0	0	0
	2. 弃风调峰	104	104	104	104	0	0

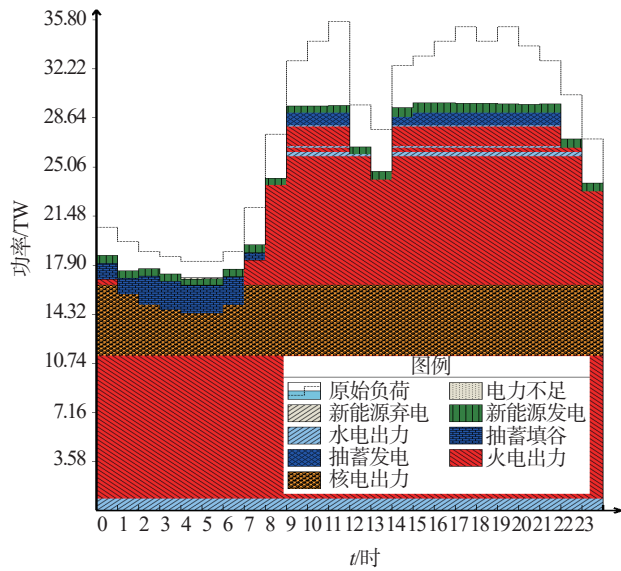
3.1.2 风电反调峰场景(场景 II)

基础场景中, 风电出力采用夏(冬)季日平均出力曲线, 整体波动不大且呈现正调峰(如图 2), 对系统调峰造成的压力较小。相关统计数据显示, 该地区风电场在一年中日出力曲线出现反调峰的概率接近 50%, 风电反调峰出力场景将进一步加剧电网调峰压力。为进一步研究风电反调峰的影响, 本节选取了该地区风电夏季和冬季典型反调峰曲线(如图 3), 探讨该场景下的调峰形势。



(a) 2020年平水年广东东区2月周六日24小时电站工作位置示意图 (方案1, 周六)

(a) 春节期间

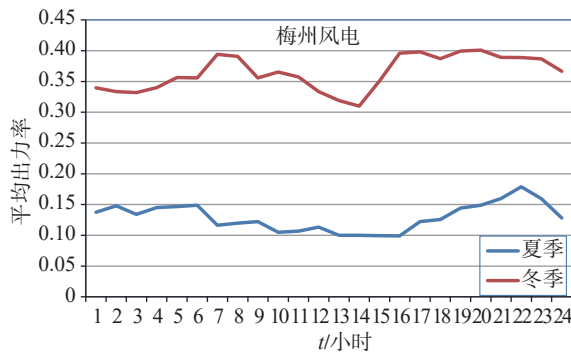


(b) 2020年平水年广东东区2月周一日24小时电站工作位置示意图 (方案1, 周一)

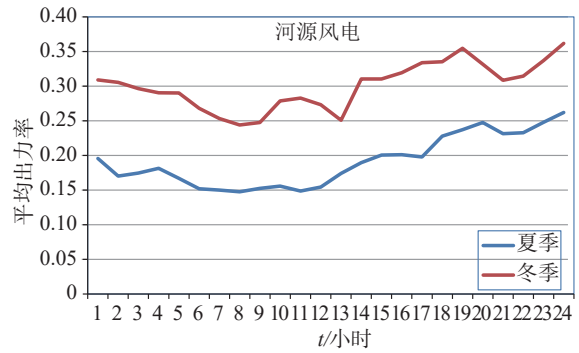
(b) 春节后工作日

图1 基础场景下春节及节后工作日电站工作位置图(保安开机70%)

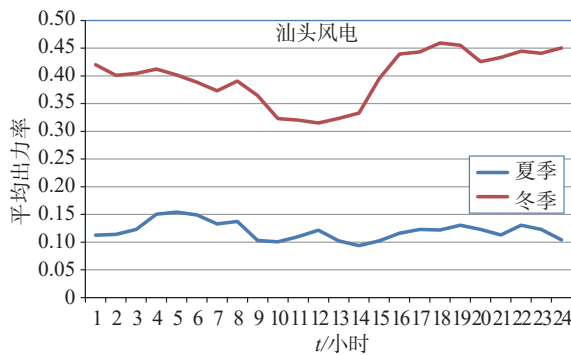
Fig. 1 Generation schematic in base scenario during spring festival and on working days after the festival



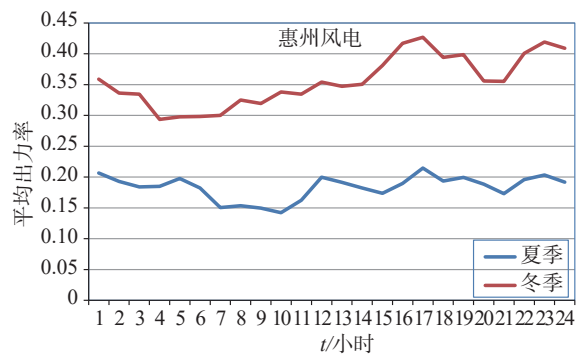
(a) 梅州风电



(b) 河源风电



(c) 汕头风电



(d) 惠州风电

图2 风电夏(冬)季日平均出力曲线

Fig. 2 Average wind generation curve during summer and winter

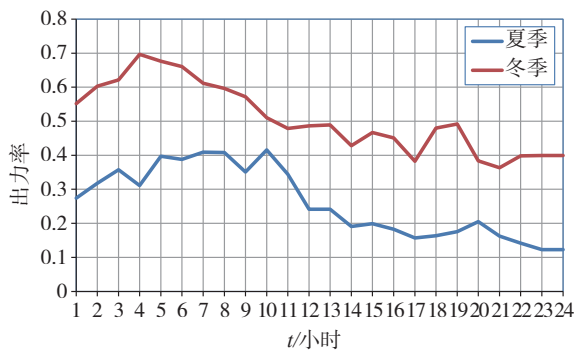


图 3 风电夏(冬)季典型反调峰出力曲线

Fig. 3 Typical wind generation curve under anti peak shaving during summer and winter

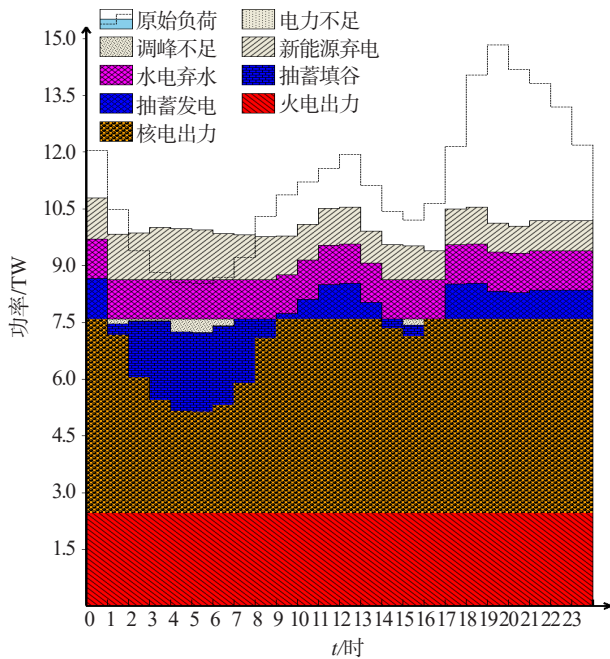
该场景下调峰平衡模拟结果: (1) 最大负荷日及周末典型日均不存在调峰问题, 而周一存在少量弃风调峰。同时, 对比基础场景, 该场景下东区周一出现弃风的月份及弃风的总量, 均有所增加; (2) 春节期间, 该场景下调峰形势更趋严峻, 当保安开机大于 50% 时 (表 2), 系统火电和核电整体开机规模过大, 若保证西电完全消纳, 则将造成本地系统全天弃风弃水, 且弃风弃水规模较基础方案有明显增加。随着保安开机约束的进一步调减, 调峰

问题将得到缓解, 但即便调减至 40% 的保安开机, 弃风依然存在。以保安开机 70% 为例 (图 4), 系统水电及风电全额弃电 (弃水调峰 1 037 MW、弃风调峰 1 311 MW), 同时还存在 361 MW 的调峰不足。若要满足调峰平衡并完全消纳水电和风电, 需要东区核电机组整体降额运行于 47% 左右的功率平台。对电网保安开机开展进一步的敏感性分析发

表 2 风电反调峰场景下典型节假日调峰平衡情况

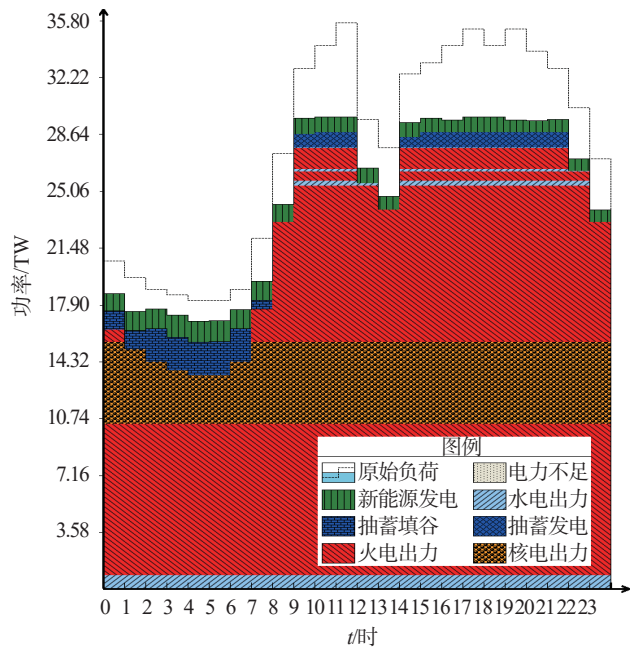
Tab. 2 Peak shaving balance during typical festival in scenario II (wind-power anti peak shaving scenario)

负荷类型	节假日	春节期间				国庆期间	
	保安开机	70%	60%	50%	40%	70%	60%
节假日	系统调峰需求	4 561	4 561	4 228	4 228	2 977	3 171
	调峰不足	361	0	0	0	23	0
	含:热备用亏	0	0	0	0	0	0
1. 弃水调峰		1 037	382	0	0	3071	0
	2. 弃风调峰	1 311	1 311	1 271	471	324	0
节后工作日	系统调峰需求	17 245	17 245	17 245	17 245	18 940	18 940
	调峰不足	0	0	0	0	0	0
	含:热备用亏	0	0	0	0	0	0
1. 弃水调峰		0	0	0	0	0	0
2. 弃风调峰		1	1	1	1	0	0



(a) 2020年平水年广东东区2月周六日24小时电站工作位置示意图 (方案1, 周六)

(a) 春节期间



(b) 2020年平水年广东东区2月周一日24小时电站工作位置示意图 (方案1, 周一)

(b) 春节后工作日

图 4 风电反调峰场景下春节及节后工作日电站工作位置图(保安开机 70%)

Fig. 4 Generation schematic in scenario II (wind-power anti peak shaving scenario) during spring festival and on working days after the festival

现, 在该场景下, 即便系统保安开机调减至 40% 时, 依然在负荷低谷时段存在 471 MW 的弃风调峰; (4) 国庆期间, 系统调峰形势相对缓和。

3.1.3 外电充分调峰场景(场景 III)

在上述场景中, 考虑到西电东送通道的安全性和经济性, 通道的调峰特性按照预定的原则进行, 西电调峰深度在 25%~40% 范围。整体而言, 此原则下西电的调峰参与程度较低, 虽然能有效保证西部清洁能源的跨区消纳, 但也给受端电网带来较大的运行压力。

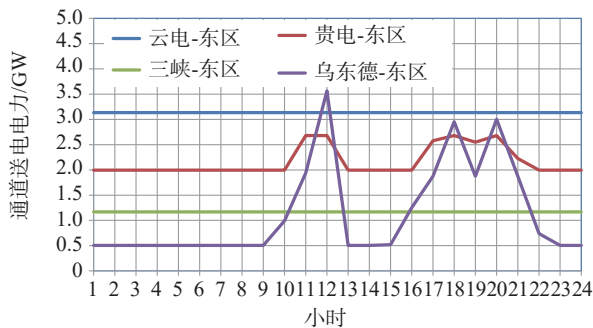
为进一步研究西电调峰场景对受端电网调峰的影响, 本节考虑西电更为充分地参与调峰的场景(即西电东送曲线最低传输功率为 0), 探讨该地区的调峰形势。

该场景下调峰平衡模拟结果: (1) 最大负荷日及典型周均不存在调峰问题。图 5 对比了基础方案与本方案在该水平下 4 月和 9 月周一典型日的西电各通道送电曲线, 由图中可见, 西电充分参与调峰之后, 西电各通道送电曲线的峰谷差增大, 调峰能力和参与程度提高; 尤其是云电通道, 送电峰谷差大幅增加, 显著降低了该电网的调峰压力; (2)

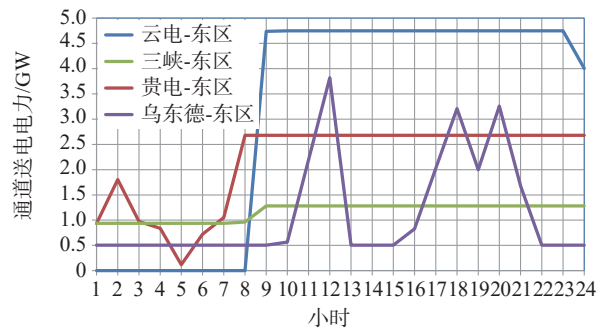
春节期间, 当系统保安开机为 70% 时, 东区依然存在严重的调峰问题, 水电及风电出现全额弃电(表 3, 弃水调峰 981 MW、弃风调峰 549 MW), 同时还存在 540 MW 的调峰不足。值得注意的是, 虽然本方案中西电调峰能力和参与程度有所提高(见图 6), 但由于基荷机组开机(核电全开机 6 120 MW)过高, 西电在削峰的同时也压缩了抽蓄电站在峰荷

表 3 西电充分调峰场景下典型节假日调峰情况
Tab. 3 Peak shaving during typical festival in Scenario III (full west-power peak shaving scenario)

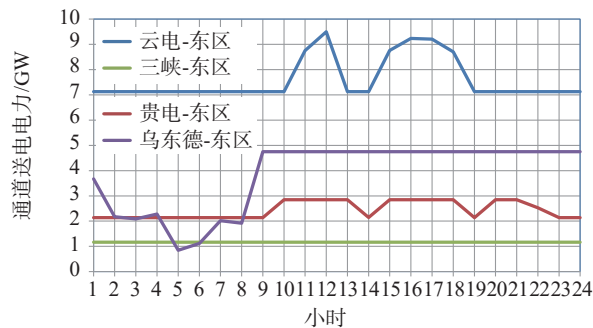
负荷类型	节假日 保安开机	春节期间			国庆期间	
		70%	60%	40%	70%	60%
系统调峰需求		3 313	3 313	2 962	4 207	4 207
调峰不足		540	0	0	0	0
节假日	含:热备用亏	0	0	0	0	0
	1. 弃水调峰	981	891	0	0	0
	2. 弃风调峰	549	549	218	0	0
节后 工作日	系统调峰需求	11 946	11 946	11 946	11 265	11 265
	调峰不足	0	0	0	0	0
	含:热备用亏	0	0	0	0	0
	1. 弃水调峰	0	0	0	0	0
	2. 弃风调峰	0	0	0	0	0



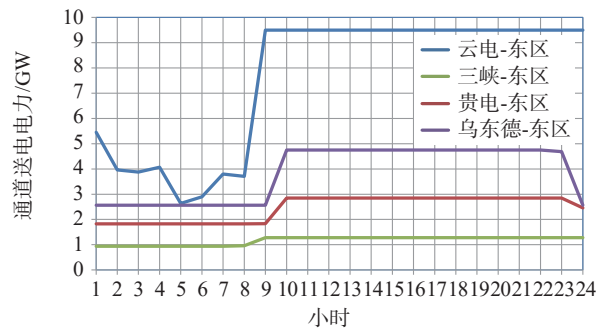
(a) 西电少量调峰(4月)



(b) 西电充分调峰(4月)



(c) 西电少量调峰(9月)



(d) 西电充分调峰(9月)

图 5 4 和 9 月周一典型日西电不同调峰模式下送电曲线

Fig. 5 Transmission curve under different west-power peak shaving modes on Monday, the typical day, in Apr. and Sept.

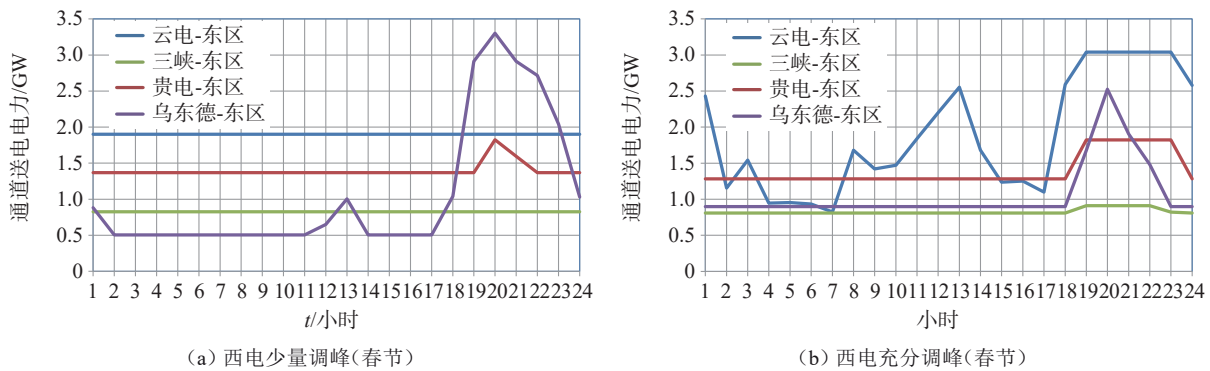


图 6 春节典型日西电不同调峰模式下送电曲线(保安开机 70%)

Fig. 6 Transmission curve under different west-power peak shaving modes on the typical day of spring festival

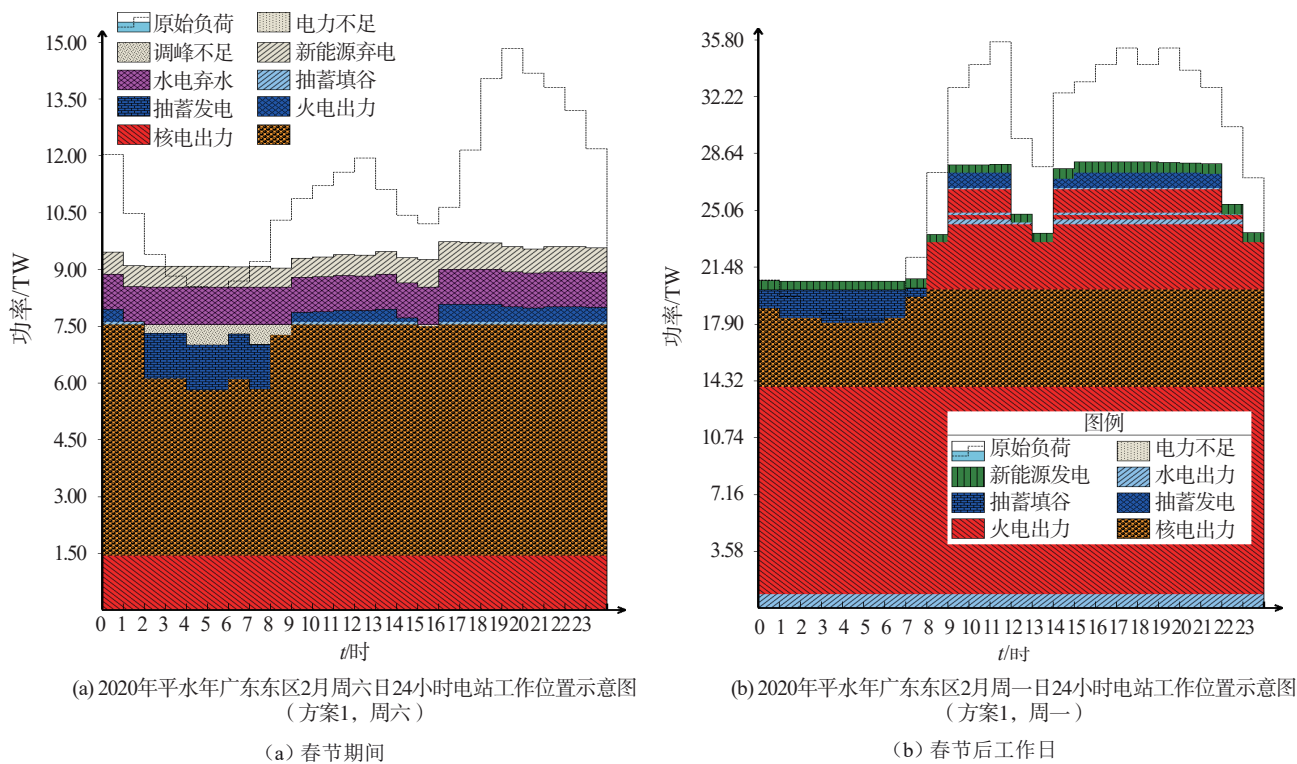


图 7 风电反调峰场景下春节及节后工作日电站工作位置图(保安开机 70%)

Fig. 7 Generation Schematic during Spring Festival and on working days after the festival in wind-power anti peak shaving scenario

的发电空间, 使得抽水蓄电站在谷荷时段抽水空间不足, 造成谷荷时段调峰缺口较基础方案增大。且这种情况在各个西电调峰的场景中均存在。

春节期间, 保安开机 70% 条件下 (图 7), 若为保证调峰平衡并完全消纳水电、风电, 核电机组需至少降额运行于 66% 左右的功率平台。

此外, 本方案下, 受益于西电调峰能力的提高, 国庆期间东区净负荷峰谷差较低, 调峰基本不存在问题。在保安开机 70% 条件下, 系统不存在弃

风弃水和调峰缺额 (表 3)。

3.2 概率性调峰分析(场景 IV)

基于概率性分析方法, 通过模拟全年 8 760 h 的风电出力, 对该水平年下该地区的调峰问题进行全年逐日细化分析。

图 8 对比了概率性方法和确定性方法 (风电反调峰场景) 下的全年逐月最大单日调峰弃风/弃水电力结果。由图中可见, 概率性分析方法下, 最大单日弃风电力要明显高于确定性分析方法下的数

值。这是由于在概率性方法下,每个时刻的风电出力都是根据概率分布随机生成的,其随机性更为显著。模拟生成的风电最大单日出力反调峰特性较确定性场景下的更为严重,导致单日最大弃风电力显著增加。

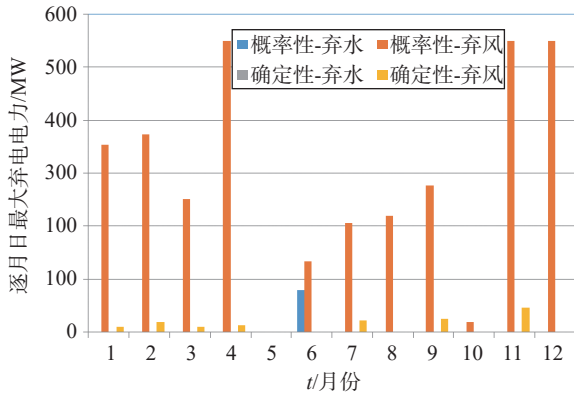


图8 概率性方法与确定性方法(风电反调峰场景)下全年逐月单日最大弃风/水电力

Fig. 8 Abandoned Wind/hydro power under the probabilistic method and deterministic method in wind-power anti peak shaving scenario

图9对比了概率性方法和确定性方法(基础场景和风电反调峰场景)下的全年调峰弃风电量结果。需要说明的是,确定性场景下的全年弃风电量为根据各月典型周的弃风电量折算而成。由图中可见,概率性分析方法下,系统全年的弃风水平介于采用确定性方法的基础场景和风电反调峰场景之间。这是因为,在基础场景下,风电出力采用平均出力曲线,其特性与负荷特性较为匹配,弃风水平

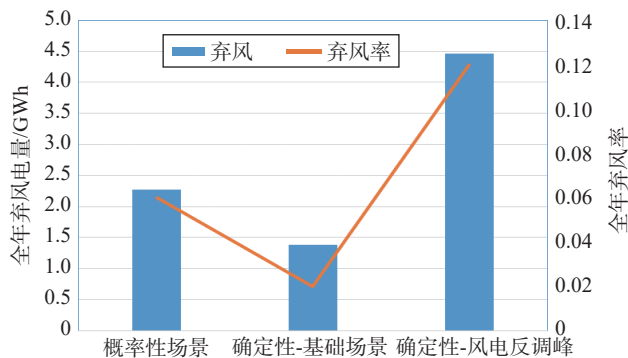


图9 概率性方法与确定性方法(基础场景&风电反调峰场景)下全年弃风电量及弃风率

Fig. 9 Abandoned electric quantity of wind power and wind abandoning ratio under the probabilistic method and deterministic method in basic scenario and wind-power anti peak shaving scenario

最低;而风电反调峰特性场景下则风电出力与负荷匹配性最差,显然其弃风水平最高;而概率性方法则由于风电出力为随机生成,存在一定概率是反调峰特性,也存在一定概率是正调峰特性,因此整体的弃风水平介于上述两个方案之间。总体而言,概率性方法下,由于仿真模拟的时间尺度较为精细(全年8760h时序模拟),贴近电网实际运行情况;同时风电也采用全年8760h的时序随机模拟出力,因此,其风电弃风水平更能代表实际运行的结果,具有较大的参考意义。

4 结论

本文针对常规确定性调峰校核方法存在的不足,提出了确定性与概率性相结合、典型周/典型日和全年8760h全景模拟相结合的系统调峰平衡分析方法,在具体应用中,采用确定性方法进行初步的调峰平衡评估和方案筛选,采用概率性方法进行全时序的详细模拟,评估全年弃风情况,并据此对电源结构进行优化调整。

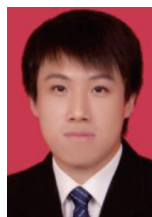
本文并以某沿海电网为例,分析不同场景下受端电力系统的调峰形势,研究表明:(1)确定性与概率性相结合的调峰分析方法,既能对系统调峰运行边界进行有效且快速的校核,也能合理反映全年的调峰弃电水平;(2)受端电力系统在春节、国庆等典型节假日期间及极端气候条件下面临较为严重的调峰问题,需采取一定的调峰手段(如弃风弃水、部分核电机组关停或降出力运行等)才能保持系统调峰平衡;(3)建议核电机组提前开展机组灵活调峰可行性和相关技术改造研究,以适应未来电力系统对多类型能源(尤其是可再生能源)的消纳需求。此外,考虑未来电力市场的发展,建议结合电力现货市场,提前开展相关市场成本和风险分配机制研究,在维持电力系统安全稳定运行的基础上合理保障各参与主体的利益。

参考文献:

- [1] 王建军,程倩. 核电机组参与电网调峰的方式研究[J]. 华东电力,2012,40(8):1392-1395.
WANG J J, CHENG Q. Methods of peak regulation through nuclear power units [J]. East China Electric Power, 2012, 40 (8): 1392-1395.
- [2] 陈汉雄,郑勇. 大容量核电机组接入川渝电网适应性及参与系统调峰研究[J]. 中国电力,2011,44(3):1-5.

- CHEN H X, ZHENG Y. Adaptability of large-capacity nuclear power plants accessing Sichuan and Chongqing grids and ability of participating in system peak-load regulation [J]. *Electric Power*, 2011, 44(3): 1-5.
- [3] 陈雷, 卢斯煜. 风电场出力特性与集群效应分析方法研究 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(1): 31-37.
- CHEN L, LU S Y. Research on the analysis method for wind power generating output characteristic and cluster effects [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(1): 31-37.
- [4] 彭波, 余文奇, 刘云. 国外核电机组参与系统调峰情况分析 [J]. *南方电网技术*, 2011, 5(3): 23-26.
- PENG B, YU W Q, LIU Y. Overview of foreign nuclear power plants in load-following [J]. *Southern Power System Technology*, 2011, 5(3): 23-26.
- [5] 叶鹏, 马晓东, 朱钰, 等. 核电机组参与电网联合调峰策略研究综述 [J]. *东北电力技术*, 2014, 35(9): 55-59+62.
- YE P, MA X D, ZHU Y, et al. A research summary on combined peaking load strategies of nuclear power plant [J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2014, 35(9): 55-59+62.
- [6] 马晓东. 核电参与电网调峰的运行策略研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [7] 马习朋. 探讨大型压水堆核电机组参与电网中间负荷调峰 [J]. *现代电力*, 2007(4): 28-33.
- MA X P. Large-scale PWR power plants participating in peak-load regulation of grid middle load [J]. *Modern Electric Power*, 2007(4): 28-33.
- [8] 郑秀波, 刘云, 孙景强. 广东电网核电机组调峰分析 [J]. *电力技术*, 2010, 19(Z2): 82-85+81.
- ZHENG X B, LIU Y, SUN J Q. The peak load regulation of nuclear power [J]. *Electric Power Technology*, 2010, 19(Z2): 82-85+81.
- [9] 宋卓然, 商文颖, 宋颖巍, 等. 核电发展现状及调峰可行性分析 [J]. *东北电力技术*, 2015, 36(5): 40-44.
- SONG Z R, SHANG W Y, SONG Y W, et al. Development of nuclear power and analysis on peak shaving [J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2015, 36(5): 40-44.
- [10] 曾森. 核电机组参与电网调峰的经济性分析 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [11] 陈世和, 方彦军, 方源. 分时电价下核电机组调峰的经济性探讨 [J]. *广东电力*, 2012, 25(4): 1-4+15.
- CHEN S H, FANG Y J, FANG Y. Discussion on economy of peak shaving of nuclear power units in tou price [J]. *Guangdong Electric Power*, 2012, 25(4): 1-4+15.
- [12] 傅旭, 黄明良. 基于电力平衡的西北电网核电接纳能力分析 [J]. *电网与清洁能源*, 2011, 27(10): 60-65.
- FU X, HUANG M L. Analysis on the acceptance capacity of nuclear power integrated with northwest power grid based on power balance [J]. *Power System and Clean Energy*, 2011, 27(10): 60-65.
- [13] 王志磊. 含大规模新能源的电力系统短期优化运行研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [14] 张滋华. 含大规模风电电力系统中长期优化运行研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [15] 卢洵, 左郑敏, 林勇, 等. 广东“十三五”电源调峰联合运行策略优化 [J]. *广东电力*, 2018, 31(7): 98-105.
- LU X, ZUO Z M, LIN Y, et al. Strategy optimization for combined operation of power source and peak load regulation in the 13th five-year plan period of guangdong province [J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(7): 98-105.
- [16] 程鑫, 卢洵, 樊扬, 等. 广东调峰电源调用序位研究 [J]. *广东电力*, 2018(5): 56-63.
- CHENG X, LU X, FAN Y, et al. Research on dispatching order of peak load regulation power source in Guangdong [J]. *Guangdong Electric Power*, 2018(5): 56-63.
- [17] 杨柳, 吴鸿亮, 门锷. 南方电网节能与经济评价方法 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 31-38, 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 Systems*, 2014, 38(17): 31-38, 86.
- [18] 吴鸿亮, 杜尔顺, 门锷, 等. 面向低碳目标的电力系统节能与经济评价系统 [J]. *电网技术*, 2015, 39(5): 1179-1185.
- WU H L, DU E S, MEN K, et al. A low-carbon oriented energy-saving and economic operation evaluation system [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(5): 1179-1185.
- [19] 李驰. 基于波动特性的新能源出力时间序列建模方法研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2015.
- [20] 刘纯, 吕振华, 黄越辉, 等. 长时间尺度风电出力时间序列建模新方法研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(1): 7-13.
- LIU C, LV Z H, HUANG Y H, et al. A new method to simulate wind power time series of large time scale [J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(1): 7-13.
- [21] WU Y W, LOU S H, LU S Y. A model for power system interconnection planning under low-carbon economy with CO emission constraints [J]. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2011, 2(3): 205-214.
- [22] LU S Y, LOU S H, WU Y W, et al. Power system economic dispatch under low-carbon economy with carbon capture plants considered [J]. *IET Gener., Transm., Distrib.*, 2013, 7(9): 991-1001.

作者简介:



卢斯煜

卢斯煜 (通信作者)

1986-, 男, 广东潮州人, 高级工程师, 电力系统及其自动化专业博士, 主要从事电力系统规划、新能源并网等方面研究工作 (e-mail) lusu@csg.cn。

(责任编辑 李辉)