



受调峰和安全稳定约束的华东电网新能源承载规模研究

覃琴 苏丽宁 陈典 张尚 秦晓辉

Research on New Energy Power-carrying Capacity of East China Power Grid under the Constraints of Peak-shaving and Stability

QIN Qin, SU Lining, CHEN Dian, ZHANG Shang, QIN Xiaohui

引用本文:

覃琴, 苏丽宁, 陈典, 等. 受调峰和安全稳定约束的华东电网新能源承载规模研究[J]. *现代电力*, 2022, 39(3): 270–277. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0143

QIN Qin, SU Lining, CHEN Dian, et al. Research on New Energy Power-carrying Capacity of East China Power Grid under the Constraints of Peak-shaving and Stability[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(3): 270–277. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0143

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于虚拟同步机的微电网频率稳定控制研究

Research on Frequency Stability Control for Micro-grid Based on Virtual Synchronous Generator

现代电力. 2019, 36(1): 45–52 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I1/45>

风荷组合场景下计及调峰效益的电锅炉和储热系统容量优化配置

Optimal Capacity Configuration of Electric Boiler and Heat Storage System Considering Peak-shaving Benefit under Wind-Load Combination Scenario

现代电力. 2021, 38(1): 41–50 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0057>

基于广域信息的电压稳定在线评估与无功电压协调控制方法

Online Voltage Stability Assessment and Voltage-reactive Power Coordinated Control Method Based on Measuring Information of Phasor Measurement Unit

现代电力. 2018, 35(1): 78–83 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I1/78>

含新能源接入的配电网中储能系统协调控制策略

Coordinated Control Strategy of Energy Storage Systems in Distribution Network with the Integration of New Energy

现代电力. 2018, 35(1): 19–25 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I1/19>

青南新能源集中送出地区动态无功补偿方案对比研究

Comparative Study on Dynamic Reactive Power Compensation Scheme in the Concentrated Delivery Area of New Energy in Southern Qinghai

现代电力. 2021, 38(1): 87–93 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0348>

计及多类型交易的新能源与火电实时协调控制策略

Real-Time Coordinated Control Strategy for New Energy and Thermal Power That Takes Into Account Spot Transactions

现代电力. 2020, 37(1): 59–65 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2018.1452>

受调峰和安全稳定约束的华东电网新能源承载规模研究

覃琴, 苏丽宁, 陈典, 张尚, 秦晓辉

(电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市海淀区 100192)

Research on New Energy Power-carrying Capacity of East China Power Grid under the Constraints of Peak-shaving and Stability

QIN Qin, SU Lining, CHEN Dian, ZHANG Shang, QIN Xiaohui

(State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China)

摘要: 随着“十四五”新能源布局向中东部倾斜, 中东部的新能源发展速度高于西部、北部地区, 对受端电网新能源承载能力的研究变得越来越迫切。文中针对华东受端电网, 提出了一种评估新能源承载规模上限的方法。该方法依托中国电科院研发的生产模拟软件, 统筹直流规模、弃电率、交流断面限制、储能应用等因素, 在满足电力电量平衡、调峰平衡等约束前提下, 优化求解各类电源开发规模, 求得受调峰约束的新能源发展上限; 依托综合仿真试验研究系统 (Power system department-bonneville power administration, PSD-BPA), 兼顾直流规模、直流功率敏感性, 在满足单一直流功率缺额不触发低频减载、第一级安全稳定标准等约束条件, 利用时序仿真法求得受频率稳定、电压稳定约束的新能源发展上限; 通过比较论证, 提出制约华东电网新能源规划发展的主要影响因素、承载规模和应对措施。

关键词: 调峰; 频率稳定; 电压稳定; 新能源; 直流

Abstract: As the layout of new energy during the 14th Five-Year Plan is inclined to Central and Eastern China, the development speed of new energy in Central and Eastern China will be higher than that in Western and Northern China, so it leads to more and more urgent to study the power-carrying capacity of new energy in the receiving-end power grid. In allusion to East China power grid that was regarded as typical receiving-end power grid, a method to evaluate the upper limit of new energy

power-carrying capacity was presented. Firstly, relying on the electricity production simulation software which was independently developed by China electric power research institute, fully considering such factors as the scale of DC transmission, the abandoned electricity rate, the exchange section restrictions and energy storage application, in the context of satisfying the constraints of electric power and energy balance and peak balance the development scale of all kinds of power supply was optimally solved, thereby the upper limit of new energy power-carrying capacity constrained by peak-shaving was obtained. Secondly, based on the comprehensive simulation system called PSD-BPA, considering both the sensitivity of DC power and that of DC transmission scale, under the constraints of not triggering low-frequency load reduction by power vacancy of single DC transmission and satisfying the first level of security and stability standard, the timing simulation method was utilized to respectively obtain the upper limit of new energy power-carrying capacity constrained by frequency and voltage stability. Finally, by means of comparison and demonstration, the important influencing factors, power-carrying capacity and countermeasures restricting the development of new energy in East China power grid were proposed.

Keywords: peak-shaving; frequency stability; voltage stability; new energy; DC transmission

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0143

0 引言

为了响应习总书记提出的“碳达峰、碳中和”目标, 国家电网公司发布了行动方案^[1], 指出到 2030 年, 公司经营区风电、太阳能发电总装机容量将达到 10 亿 kW 以上, 并强调着力打造清洁能源优化配置平台, 支持新能源优先就地就近并网

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5100-202116005A-0-0-00) (电网承载电力电子化电源的规模及能力提升技术研究)

Project Supported by Science and Technology Foundation of SGCC (5100-202116005A-0-0-00) (Study on the HVDC and new energy scale and Evolution Law of Power Grid)

消纳的同时，加大跨区输送清洁能源力度。华东电网作为国家清洁能源消纳的主要市场^[2]，一方面海上风电、分布式光伏就近接入，预计“十四五”华东新投产新能源 9800 万 kW，占公司经营区负荷的 27.7%；另一方面通过跨区直流大规模受入西南水电、三北地区风光新能源，预计至 2025 年，跨区直流规模 13 回，电力流入 8580 万 kW，占最大负荷的 20.5%。

随着直流和新能源大规模馈入华东电网，系统的安全运行将面临一系列挑战^[3-9]：1) 新能源随机性、波动性、间歇性大，高峰电力供应保障和调峰难度增加；2) 直流和新能源对常规机组的大量置换，系统转动惯量和电压支撑能力下降，频率和电压稳定风险突出。针对典型受端电网开展新能源承载规模上限的研究，避免新能源的过度发展，并叠加与直流的相互作用对大电网安全、新能源消纳产生不利影响。

众多学者针对受端电网新能源承载能力进行了深入研究。文献 [10] 从满足富余可再生能源跨省区现货交易的需求出发，提出了省级、分中心多级协同方案的受端电网接纳能力评估分析方法；文献 [11] 提出了一套基于系统备用需求容量和调峰能力约束的风电接纳能力评估体系；文献 [12] 基于电力系统静态安全域，提出了多区域大规模新能源接纳能力评估方法；文献 [13] 通过光伏发电出力序列重构技术和对电力系统详细网络拓扑模型及线路约束的精细化建模，提出了基于时序运行模拟的可再生能源消纳特性分析方法；文献 [14] 通过建立新能源消纳系数和新能源承载系数两个指标与新能源装机、负荷、调峰率、备用率之间的关系，提出基于新能源承载力指标的新能源装机规划方法；文献 [15] 提出了考虑新能源出力特性改进的典型日法，用于评估电网的新能源消纳承载能力。这些评估分析方法大多围绕新能源消纳特性展开，或者基于静态安全特征，极少针对多直流馈入受端电网的系统特性，未能兼顾调峰、频率、电压等多方面影响因素，难以准确反映受端电网的新能源承载能力。

本文提出一种评估受端电网新能源承载规模的方法，以电力电量平衡和安全稳定研究为出发点，采用生产模拟和时序仿真相结合的方法，统筹考虑弃电率、交流断面限制、储能应用、单一直流最大功率等因素，剖析直流与新能源之间的

耦合关系，求得受调峰和安全稳定约束的华东电网承载新能源规模，提出新能源发展的制约因素及应对措施。本文研究思路及结论已应用于华东电网“十四五”规划。

1 受调峰约束的新能源承载规模及其影响因素

1.1 新能源承载规模

以《可再生能源发展“十四五”规划研究》^[16]中的风电、光伏装机容量为边界基础，确定 0% 和 5% 两种弃电率目标，兼顾交流断面是否约束、储能是否应用等敏感因素，拟定 4 类方案，如表 1 所示。

表 1 电力电量平衡分析比选方案

Table 1 Alternative option for balance analysis on power and electricity quantity

方案	弃电率/%	交流断面约束	储能应用
方案1	0	有约束	无储能
方案2	5	有约束	无储能
方案3	5	无约束	无储能
方案4	5	无约束	配置2000万kW储能

华东电网作为典型受端电网，直流受入将挤占新能源发电消纳的空间，直流规模越大，新能源消纳空间越小，因此直流规模按 15 回、16 回设定。

利用中国电科院自主研发的供需平衡分析工具-电力系统源网荷一体化生产模拟软件 (power system department-power energy balance, PSD-PEBL)，开展对电力电量平衡、调峰平衡等的计算分析，计算流程如图 1 所示。

计算求得受调峰约束的华东电网新能源最大接入规模及比例，如表 2 所示。可以看出，15 回直流规模场景下能够消纳的新能源接入比例均高于 16 回直流规模，其验证了直流将挤占新能源消纳空间的结论。

从调峰约束来看，按照 0% 和 5% 两种弃电率，以及是否放开省市分区间的交流断面限制，接入 16 回直流，至 2025 年华东电网能消纳的新能源装机容量 1.5~3.3 亿 kW，装机占比约 27.7%~45.8%，电量占比约 8.8%~18.4%。进一步增加 2000 万 kW 的储能，能够消纳的新能源装机

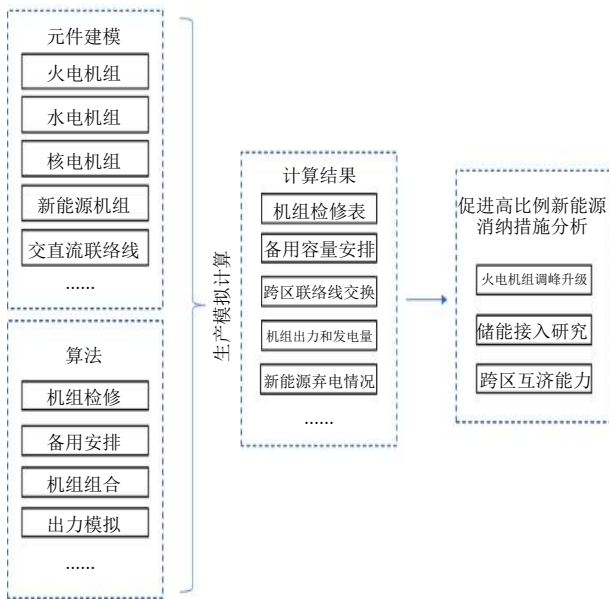


图1 生产模拟计算流程

Fig. 1 Flow path of production simulation

表2 不同直流规模下受调峰约束的新能源最大接入比例
Table 2 The maximum grid-connected proportion of new energy constrained by peak-shaving under different DC transmission scales

方案	风光装机/万kW		装机占比/%		风光电量/亿kW·h		电量占比/%	
	16回	15回	16回	15回	16回	15回	16回	15回
方案1	15117	15117	27.70	27.70	2979	2979	8.70	8.70
方案2	28160	29286	41.60	42.60	3581	3712	16.00	16.60
方案3	33257	34725	45.80	46.80	4132	4364	18.40	19.50
方案4	39216	40268	48.60	49.30	4983	5111	22.20	22.80

容量可提升至3.9亿kW，装机占比约48.6%，电量占比约22.2%。

1.2 影响因素

以16回直流规模受入为例，分析新能源承载规模影响因素。

1) 与风电相比，光伏对新能源消纳影响更大。

方案1的条件下，通过模拟计算得出风光电量占比8.7%、装机占比27.7%。开展逐日调峰计算得出，春节、五一、十一假期，调峰裕度明显下降，如图2所示。

观察典型日开机位置图3，当午间光伏大发、风电也具有一定规模的出力时，系统调峰能力不足造成弃风弃光。

从风电、光伏特性分析对消纳的影响。以图4安徽电网为例可以看出，对比风电、光伏的反调节特性更加明显。模拟结果显示，光伏装机的增

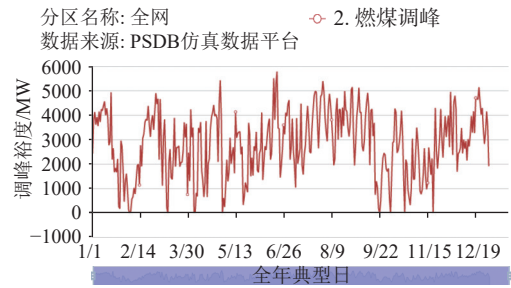


图2 调峰平衡裕度情况

Fig. 2 Margin of peak-shaving balancing

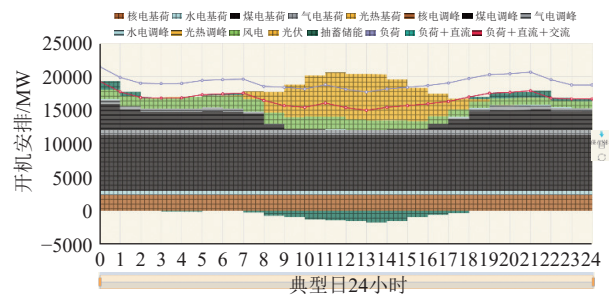


图3 典型日不同机组出力情况

Fig. 3 Output power by various types of generator on typical day

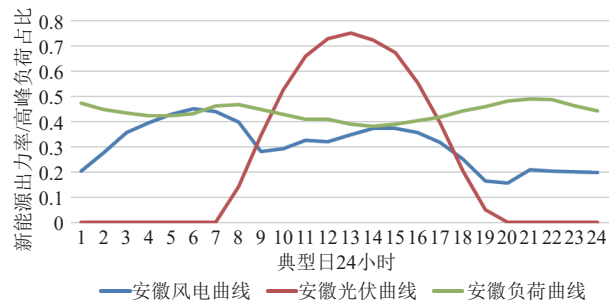


图4 安徽电网典型日新能源出力曲线

Fig. 4 Output power by new energy generator of Anhui power grid on typical day

长会加大调峰的难度，进而影响新能源消纳的电量占比。

2) 省市间调峰互济有助于新能源消纳。

方案2是在方案1的基础上，放宽弃电率指标至5%。此时风光电量占比和装机占比分别提升7.2%和13.9%。

受交流断面的约束，部分省市存在低谷调节缺口，同时其他省市存在调峰裕度，说明调峰互济未能充分发挥。以某典型日调峰平衡计算结果为例，系统调峰需求为5238.1万kW，通过抽蓄、水电、燃气、燃煤参与调峰的容量为5028.8万kW，低谷调节缺口为209.3万kW，但此时系统存在689.8万kW的调峰裕度。

方案 3 是在方案 2 基础上，放开交流断面的约束。省市分区间充分发挥了调峰互济的能力，可促进新能源的消纳，风光电量占比和装机占比分别提升 2.4% 和 4.2%。

虽然充分发挥了调峰互济能力，但在负荷低谷时段，仍存在部分弃电。以某典型日调峰平衡计算结果为例，系统调峰需求为 6191.2 万 kW，通过抽蓄、水电、燃气、燃煤参与调峰的容量为 5254.4 万 kW，虽然此时系统不存在调峰裕度，但仍有 936.8 万 kW 的低谷调节缺口。

3) 配置储能可提升新能源消纳水平。

方案 4 是在方案 3 基础上，增加 2000 万 kW 的储能。

由开机位置图 5 可以看出，增加储能后，储能出力明显增加，弃电情况显著改善。储能接入后，系统新能源弃电率从 5% 降至 3.5%，或者弃电率保持在 5%，风光电量占比和装机占比分别提升 3.8% 和 2.8%。

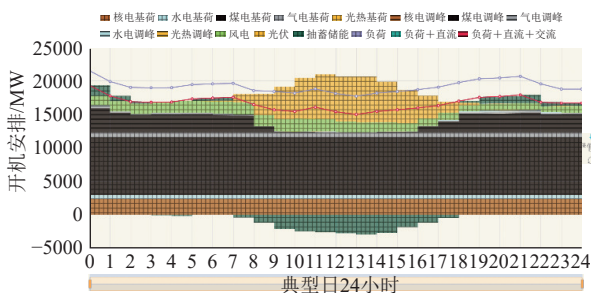


图 5 配置储能后的典型日不同机组出力情况

Fig. 5 Output power by various types of generator on typical day after installing energy storage

2 受安全稳定约束的新能源承载规模及其影响因素

2.1 研究边界

以国网公司“十四五”电网规划确定的华东电网目标网架为边界基础^[2]，选取系统特性相对恶劣的汛期轻负荷方式作为主要计算方式，在 13~16 回直流馈入规模场景下，用新能源机组替代常规机组、提高新能源渗透率（新能源出力占负荷的比例）的方式，重点从频率和电压两方面分析新能源发展的安全稳定约束，研究新能源承载规模上限。

采用的计算数据主要边界条件包括：负荷水平为最大负荷的 60%，即 2.26 亿 kW，负荷模型为

58% 马达和 42% 静态负荷，装机水平为 5.14 亿 kW，其中新能源装机 1.13 亿 kW，旋转备用为 12%。主网架结构如图 6 所示。本次研究放开网架约束的制约，对潮流过载、断面受限等加强或优化网架结构解决网架影响的因素均不考虑。

2.2 频率稳定约束

研究频率稳定问题时，一次调频容量为同步机组开机容量的 4%，低频减载第一轮动作频率 49.0 Hz，延时 0.5 s 切除母线 7% 的负荷。

以准皖直流（功率缺额 1200 万 kW）双极闭锁故障不触发低频减载动作为约束条件，求取受频率稳定约束的新能源承载规模上限，如表 3 所示，在 13 回、14 回直流场景下，直流与新能源出力占负荷比例不超过 41%。

可以看出，15 回、16 回直流场景下，直流受电比例分别为 43%、46%，已超出 41% 的发展上限，即在没有新能源接入时已触发低频减载动作。

与系统频率跌落直接相关的影响因素为功率缺额规模和常规机组开机水平^[16-18]。

1) 功率缺额规模。

采取预控单一直流最大功率的措施，进而达

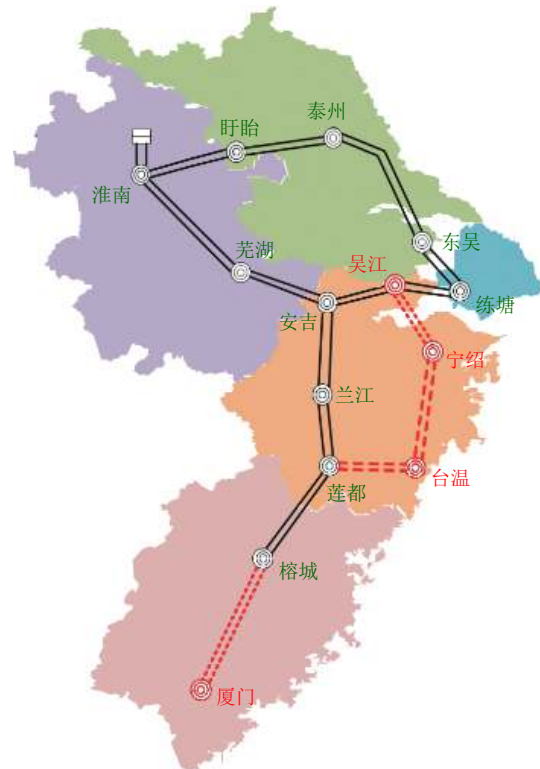


图 6 2025 规划水平年华东电网主网架

Fig. 6 The main grid frame of East China power grid in the planning year of 2025

表3 不同直流规模下受频率稳定约束的新能源出力上限

Table 3 The maximum output power of new energy generators constrained by frequency stability under different DC transmission scales

直流规模	直流占负荷比例/%	新能源出力占负荷比例/%	频率跌落深度/Hz	是否触发低频减载	直流+新能源出力占负荷比例/%
13回	36	5	0.99	否	41
14回	39	2	0.99	否	41
15回	43	0	1.02	是	< 43
16回	46	0	1.09	是	< 46

到减小系统需要应对的最大功率缺额的目的。假设新能源出力占负荷比例为5%，15回、16回直流场景下，需预控单一直流最大功率分别不超过1150万kW、1080万kW，如表4、图7所示。

2) 常规机组开机水平。

为了应对准皖直流满送时双极闭锁造成的功率缺额冲击，系统须保持足够的惯量和一次调频能力。由于系统惯量和调频能力主要由常规机组提供，因此系统的频率特性与常规机组开机容量密切相关。

在确定网架条件下，当系统最大功率缺额确定时，常规机组最小开机量随之可确定。针对本文研究的华东规划电网，系统最大功率缺额为1200万kW·h，为了不触发低频减载动作，常规机组开机量不低于1.64亿kW。

预控单一直流最大功率，可减小系统应对的最大功率缺额，降低对常规机组最小开机水平的要求，达到接纳更多直流和新能源的目的。由图8可以看出，预控直流功率至1000万kW、800万kW，常规机组最小开机要求下降至1.27亿kW、1.04亿kW。

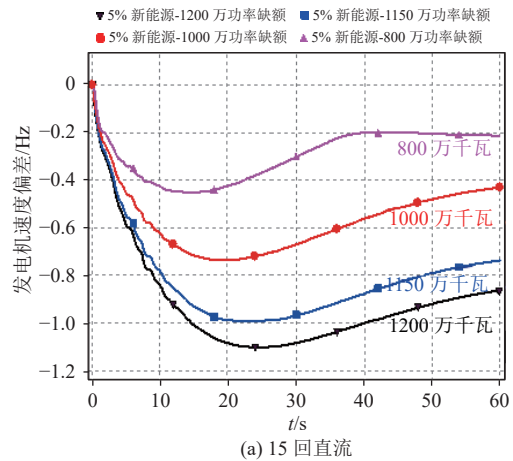
2.3 电压稳定约束

研究电压稳定问题，需要考虑交流系统故障引起直流连续换相失败的情况[19-20]。根据国调中心发布的《特高压直流换相失败保护加速段调整

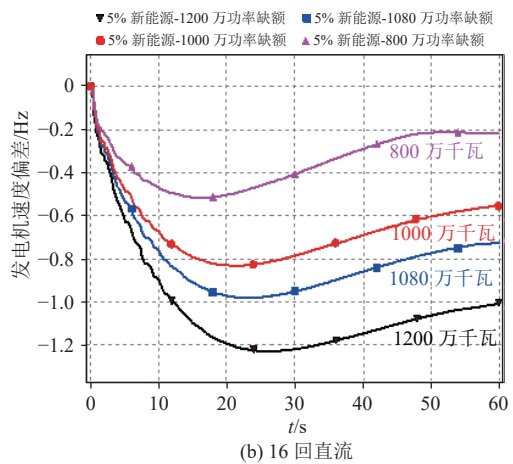
表4 预控直流功率效果

Table 4 The effects of precontrolling DC power

直流规模	直流占负荷比例/%	新能源出力占负荷比例/%	单一直流最大功率/万kW	频率跌落深/Hz	是否触发低频减载
15回	43	5	1200	1.12	是
			1150	0.99	否
16回	46	5	1200	1.23	是
			1080	0.99	否



(a) 15回直流



(b) 16回直流

图7 预控直流功率后的频率变化曲线

Fig. 7 Frequency curve after precontrolling DC power

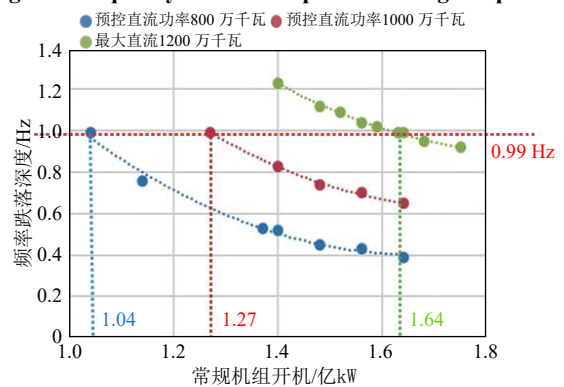


图8 不同功率缺额下，常规机组开机与频率跌落深度的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between operating capacity of conventional generator sets and dropping depth of frequency under different power vacancy

方案》(调继[2016]71号)规定，为防止特高压直流双极同时连续换相失败对交流系统稳定造成冲击，调整特高压直流换相失败保护策略，直流满送的情况下，复奉直流连续换相失败4次则闭

锁直流，宾金、锦苏、天中直流连续换相失败 3 次则闭锁直流。参考在运特高压直流运行情况，规划特高压直流均连续换相失败 3 次则闭锁直流。

通过对华东全网 1000kV 和 500kV 交流线路暂态稳定故障校核计算，以满足第一级安全稳定标准为约束条件，求取受电压稳定约束的新能源发展规模上限，如表 5 所示，此时的直流与新能源出力占负荷比例应不超过 60%。

表 5 不同直流规模下，受电压稳定约束的新能源出力上限

Table 5 The maximum output power of new energy generators constrained by voltage stability under different DC transmission scales

直流规模	直流占负荷比例/%	新能源出力/万kW	新能源出力占负荷比例/%	直流+新能源出力占负荷比例/%
13回	36	5650	25	61
14回	39	4610	20	60
15回	43	4380	19	62
16回	46	3390	15	61

当电力电子化电源比例超出最大承载能力，系统发生失稳的过程是一致的，如图 9 所示，均为交流线路三永 N-1 故障引起母线电压跌落，引发多回直流连续换相失败 3 次以上导致闭锁，同时，新能源机组并网点电压超出低电压穿越区域的范围，大量新能源机组脱网。直流与新能源的共同作用导致系统大量功率缺额引起华东频率持续下跌，触发低频减载动作，母线电压难以恢复，系统失稳。

3 结论

1) 从调峰看，华东电网能消纳的新能源装机容量上限为 1.5 亿 kW。采取差异化约束、降低弃电率标准、促进清洁能源跨省区交易、储能大规模成熟利用等措施，可提高新能源消纳水平。

2) 从安全稳定看，受频率稳定、电压稳定限制的直流与新能源出力占负荷的比例分别为 40%、60%。此时华东电网承载的新能源出力占负荷比例上限为 5%、容量为 1130 万 kW。参照 2019 年华东新能源实际出力统计数据，平均出力率为 0.1637，华东电网承载的新能源装机规模上限为 6900 万 kW。采取预控单一直流最大功率、

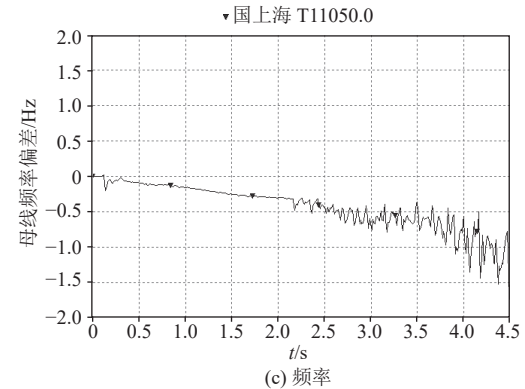
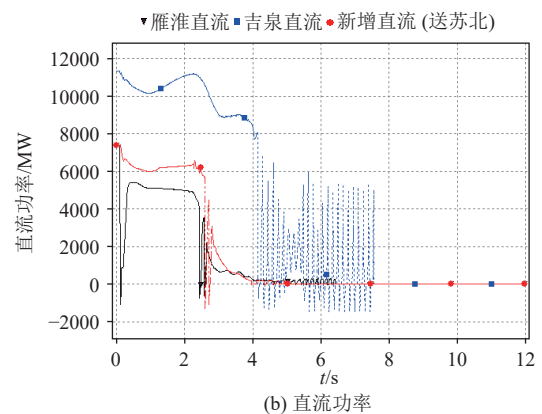
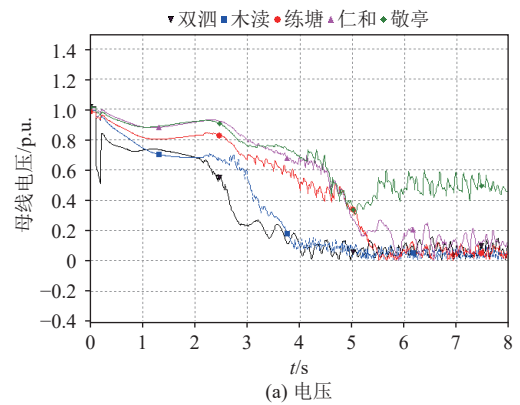


图 9 某交流线路三永 N-1 故障后系统稳定曲线

Fig. 9 System stability curve post N-1 fault occurred on certain AC line

提高常规机组开机水平等措施，可提高新能源的承载规模。

3) 制约华东电网新能源发展的首要因素是频率稳定约束，其次是电压稳定约束，最后是调峰约束。

参考文献

[1] 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[N]. 国家电网报, 2021-03-02(001).

- [2] 国家电网有限公司“十四五”电网规划研究报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2020.
- [3] 孙蓉, 张诚之, 陈兵, 等. 规模化新能源接入下受端电网调峰方式综合评估研究[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(06): 149-155.
SUN Rong, ZHANG Chengzhi, CHEN Bing, *et al.* Comprehensive evaluation of receiving end grid peak shaving modes under background of large-scale new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(06): 149-155(in Chinese).
- [4] 张俊涛, 程春田, 申建建, 等. 考虑风光不确定性的高比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5921-5932.
ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, *et al.* Short-term joint optimal operation method for high proportion renewable energy grid considering wind-solar uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5921-5932(in Chinese).
- [5] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, *et al.* Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986(in Chinese).
- [6] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, *et al.* Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27(in Chinese).
- [7] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, *et al.* Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9(in Chinese).
- [8] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, *et al.* Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103(in Chinese).
- [9] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991(in Chinese).
- [10] 张彦涛, 宋炳兵, 周毅, 等. 基于多级协同的受端电网接纳能力评估分析方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 121-126.
ZHANG Yantao, SONG Bingbing, ZHOU Yi, *et al.* Evaluation and analysis method of receiving end power grid acceptance capacity based multi-level collaboration and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 121-126(in Chinese).
- [11] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 70-76.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(4): 70-76(in Chinese).
- [12] 苏宜强, 刘盛松. 静态安全域约束的多区域大规模新能源接纳能力研究与应用[J]. 中国电力. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20210209.1417.004.html>
SU Yiqiang, LIU Shengsong. Research and application of multi-area large-scale new energy integration capability with steady-state security region constraints[J]. Electric Power(in Chinese).
- [13] 田鑫, 张健, 李雪亮, 等. 基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 34-43.
TIAN Xin, ZHANG Jian, LI Xueliang, *et al.* Evaluating photovoltaic accommodation ability for the Shandong power system based on sequential operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 34-43(in Chinese).
- [14] 张振宇, 王文倬, 张小奇, 等. 基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 632-639.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, ZHANG Xiaoqi, *et al.* Renewable energy capacity planning based on carrying capacity indicators of power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 632-639(in Chinese).
- [15] 胡佳怡, 李亦言, 周云, 等. 考虑新能源出力特性的华东电网新能源消纳承载能力分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(11): 212-216.
HU Jiayi, LI Yiyang, ZHOU Yun, *et al.* Analysis of east china power grid's ability of admitting new energy resources considering output characteristics of new energy[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(11): 212-216(in Chinese).
- [16] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5191.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, *et al.* Re-

- search on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179–5191(in Chinese).
- [17] 贺海磊, 张彦涛, 孙晓强, 等. 考虑频率安全约束的西北电网新能源开发及直流外送规模评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4753–4762.
HE Hailei, ZHANG Yantao, SUN Xiaoqiang, *et al.* Evaluation method of renewable energy development scale and DC transmission scale of China Northwest power grid by considering frequency security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4753–4762(in Chinese).
- [18] 陈雪梅, 陆超, 韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 1–9.
CHEN Xuemei, LU Chao, HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 1–9(in Chinese).
- [19] 周博昊, 李凤婷, 尹纯亚. 高压直流输电系统后续换相失败风险评估及抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 143–151.
ZHOU Bohao, LI Fengting, YIN Chunya. Risk evaluation and suppression methods for subsequent commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power System, 2021, 45(5): 143–151(in Chinese).
- [20] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 2–13.
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, *et al.* Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power System, 2020, 44(22): 2–13(in Chinese).

收稿日期: 2021-06-07

作者简介:

覃琴(1981), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 通信作者, 研究方向为大电网规划技术, E-mail: qinqin@epri.sgcc.com.cn;

苏丽宁(1990), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大电网规划技术;

陈典(1988), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为大电网规划技术;

张尚(1991), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为大电网规划技术;

秦晓辉(1979), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为大电网规划技术。