

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18156

# 大电网运行控制面临的形势、问题与挑战

刘家庆, 徐峥

(国家电网公司东北分部, 辽宁省 沈阳市 110180)

## The Situation, Problems and Challenges of Large Power Grid Operation and Control

LIU Jiaqing, XU Zheng

(Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110180, Liaoning Province, China)

**摘要:** 多项特高压交直流输变电工程的相继建成投产, 标志着我国电网建设已处于国际领先水平。同时, 我国当前大电网运行与控制也面临着前所未有的问题与挑战。该文介绍了当前大电网运行面临的形势, 即具备新能源占比不断增加, 电力跨大区大容量远距离输送等特点, 分析了电网运行与控制面临的问题与挑战。以东北电网为例, 介绍了应对大电网运行的措施。东北电网通过调峰辅助服务市场、高频紧急控制系统等技术手段促进网源协调, 提高了新能源消纳水平。

**关键词:** 大电网; 运行与控制; 新能源; 跨区直流

**ABSTRACT:** Numerous UHVAC and UHVDC projects built and put into operation successively, has marked power grid construction in China at the international leading level. Meanwhile, the operation and control of large power grid in China is facing unprecedented problems and challenges. The article introduces the situation of large power grid, which has the characteristics of increasing proportion of new energy and long-distance transmission of power with high capacity across large areas. The problems and challenges of power grid operation and control were analyzed. Several measures were taken by Northeast China Grid, such as peak regulation ancillary service market and high frequency emergency control system, which promote coordination of grid and source and new energy integration.

**KEY WORDS:** large power grid; operation and control; new energy; direct current transmission across areas

## 0 引言

新能源占比不断增加, 电力跨大区大容量远距离直流输送是当前我国大电网运行的两大主要特点和发展趋势。

由于新能源和特高压直流输电自身特性以及伴随而来的大量新型电力电子技术的应用, 电力系统的运行与控制发生了显著变化, 产生了诸如电力电量平衡困难, 频率、电压稳定问题更加复杂, 转动惯量不足等问题。东北电网位于风力资源丰富的三北地区, 也是国家电网最早形成跨区、跨国联网的区域电网之一, 同样面临着大电网运行带来的问题与挑战。2017年至今, 随着蒙东扎鲁特-山东广固特高压直流(鲁固直流)及其配套交流输变电工程的相继投产, 东北电网作为送端电网, 频率及电压稳定问题进一步突出, 给电网安全运行带来隐患。

针对上述问题, 东北电网在电网实际运行控制中采取多项针对性措施, 通过调峰辅助服务市场、高频紧急控制系统、风电机组耐频耐压技术改造等技术手段, 提升新能源消纳水平, 保障系统运行安全, 促进电网协调发展。这些技术手段对各区域大电网运行控制具有重要的参考价值和借鉴意义。

## 1 当前大电网运行面临的形势

几十年的发展和技术进步使电力系统特性和控制手段发生了深刻变化, 1000 kV 特高压交流、±800 kV 特高压直流等多项输变电工程的相继投产, 标志着我国已经站上了国际电力发展的制高点。对于我国电网而言, 有 2 个变化非常显著而且影响深远, 使电网运行控制进入了新的领域, 以前未曾出现的问题, 或者曾经不成为问题的问题, 都需要以新的角度去审视。这 2 个变化即为:

第一，新能源在电源构成中占比不断增加，逐渐发生质变；第二，电力跨大区大容量远距离直流输送，运行控制面对全新格局。

### 1.1 新能源占比不断增加

加快清洁替代和电能替代，实现清洁能源优化配置是我国能源发展的必由之路<sup>[1]</sup>。近年来，随着新能源开发利用水平不断提高，远距离输电规模不断增大，新能源发展迅猛，在电源构成中占比不断增加。2017年，我国新增新能源发电装机占比53.7%<sup>[2-5]</sup>，首次超过50%，“2个替代”效果显著。

以东北电网为例，风电装机容量近十几年来增长迅猛，如图1所示。2017年，东北电网新能源装机总容量达3398万kW，占总装机容量的24.4%，其中风电2762.17万kW，光伏635.44万kW，同比增加16.2%，如表1所示。截至2018年6月底，东北电网光伏装机容量已达到842万kW，超过水电(813万kW)成为东北地区第三大电源。

2017年东北电网新能源发电量585.09亿kW·h，同比增长27.8%，占总发电量比重的12.6%，其中风电533.95亿kW·h，光伏51.14亿kW·h，如表2所示。风电、光伏年发电量均创历史新高。

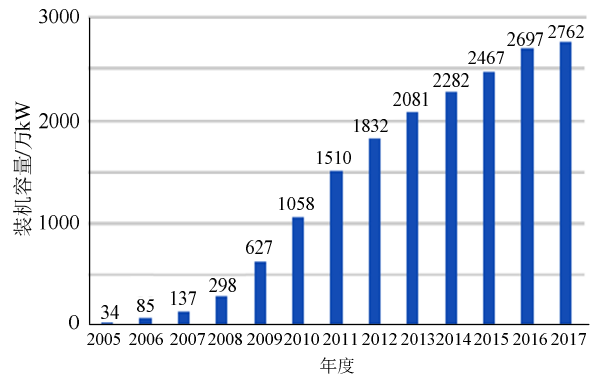


图1 东北电网历年风电装机增长情况

Fig. 1 The growth of wind power installed capacity over the years

就全国来看，2017年新能源装机容量2.94亿kW，同比增长30.4%；新能源发电量4239亿kW·h，同比增长37.0%，占总发电量比重的6.6%<sup>[2]</sup>。新能源发电占比全国分布不均，作为新能源发电基地的蒙东地区，2017年新能源发电量占该地区总发电量比重已达到20.2%。

随着新能源的大比例接入电网，系统中电源成分逐渐发生质变，引起电网运行特性的一系列变化，衍生出新的问题<sup>[6]</sup>：一是新能源的波动性与不确定性使得电力电量平衡更加困难；二是电网频率、电压调节能力下降；三是分布式电源大量接入带来的运行控制问题。

表1 2017年东北电网新能源装机容量

Tab. 1 Northeast power grid new energy installed capacity by the end of 2017

地区	风电			光伏			新能源(风光合计)		
	装机容量/万kW	占比/%	同比/%	装机容量/万kW	占比/%	同比/%	装机容量/万kW	占比/%	同比/%
辽宁	710.64	14.60	2.30	222.56	4.60	328.00	933.2	19.20	25.00
吉林	504.68	17.60	0.00	159.23	5.60	183.90	663.91	23.20	18.40
黑龙江	570.45	19.20	1.70	94.13	3.20	467.00	664.58	22.40	15.10
蒙东	976.4	31.90	4.20	159.52	5.20	57.70	1135.92	37.20	9.40
全网	2762.17	19.90	2.40	635.44	4.60	181.30	3397.61	24.40	16.20

表2 2017年东北电网新能源发电量

Tab. 2 Northeast power grid new energy generation by the end of 2017

地区	风电			光伏			新能源(风光合计)		
	发电量/(亿kW·h)	占比/%	同比/%	发电量/(亿kW·h)	占比/%	同比/%	发电量/(亿kW·h)	占比/%	同比/%
辽宁	149.64	8.4	15.8	11.59	0.7	214.4	161.23	9.0	21.3
吉林	86.86	11.1	29.8	13.14	1.7	287.6	100.00	12.8	42.2
黑龙江	108.01	11.3	23.3	5.73	0.6	334.1	113.74	11.9	27.9
蒙东	189.44	18.2	23.5	20.68	2.0	68.9	210.12	20.2	26.9
全网	533.95	11.5	22.1	51.14	1.1	147.8	585.09	12.6	27.8

## 1.2 电力跨大区大容量远距离直流输送

我国负荷中心与新能源分布严重不均衡,大型清洁能源基地需要通过特高压电网大规模、大容量、高效率的将电力安全外送至负荷中心<sup>[7-8]</sup>。2017年全国共投产5条特高压直流,2条特高压交流项目,电网新增跨区输电能力4600万kW<sup>[2]</sup>,极大提升了电网跨大区能源优化配置能力和清洁能源消纳能力<sup>[9]</sup>。

2017年,东北电网骨干网架结构发生了根本性改变。东北电网第一个特高压直流工程:额定电压±800kV、额定功率为1000万kW的蒙东扎鲁特-山东广固特高压直流(鲁固直流)及其部分配套500kV交流输变电工程相继投产。截至2018年6月底,鲁固直流配套工程已全部投运。

至此,东北电网已发展成为在西部通过鲁固特高压直流与华北联网,在南部与华北电网通过高岭直流“背靠背”联网,在北部与俄罗斯通过黑河直流“背靠背”联网,自北向南交直流环网运行,且包括柔性输电的复杂区域性电网,是国家电网的三大送端电网之一。

鲁固直流投产后,东北电网的整体格局发生重大变化,电网结构一体化特征进一步增强,局部安全稳定问题缓解,全局安全稳定问题凸显。鲁固直流打开了东北电网电力外送的空间,但不可避免的是,电网运行和控制同时面临着诸如频率稳定和电压稳定等新的矛盾和问题。

## 2 大电网运行控制面临的问题与挑战

### 2.1 电力电量平衡更加困难

由于新能源的波动性与不确定性,当新能源高比例接入系统后,常规电源不仅要跟随负荷变化,还要为平衡新能源的波动而调节出力<sup>[10]</sup>。

电网负荷变化规律性强,用电高峰、低谷明显;然而新能源出力不确定性、波动性强,风、光功率预测难度大,大规模接入后给电网带来了极大的平衡难题。

#### 1) 波动性。

2018年4月1日,如图2所示,东北电网风电最大出力1734万kW,风电出力创历史新高,

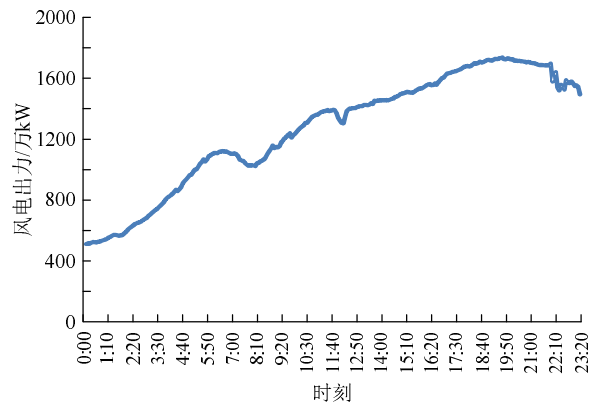


图2 2018年4月1日东北电网风电出力曲线

Fig.2 Northeast power grid wind power curve on April 1, 2018

最小出力511万kW,日内波动达1223万kW(波动量占当日最大负荷的23.7%),与之类似的波动情况较为普遍,给常规电源的日内出力调节带来很大困难。

#### 2) 不确定性。

2018年4月5日13时45分,东北电网风电预测出力907.5万kW,实际出力仅581.8万kW,偏差达325.7万kW。实际出力比预测偏小的情况发生,使得电网需多留备用电源以防止电源不足,然而常规备用电源留取过多的同时也会导致清洁能源消纳空间减少,增加新能源限电。

随着光伏装机的不断增长,光伏发电占比不断提高,光伏功率预测准确性也变得越发重要。然而,由于缺乏相应的考核准则以及分布式光伏预测难于统计,当前光伏预测准确率亟待提高。2018年10月12日11时30分,东北电网光伏发电出力529万kW,创历史新高,占当时全网用电负荷的10.7%。然而,此时东北电网光伏预测出力仅为294万kW,偏差高达235万kW。2018年10月12日东北电网光伏实发及预测出力曲线如图3所示。

### 2.2 电力跨大区输送影响送受端频率、电压稳定

随着特高压工程的不断投运,交直流系统发生故障扰动产生的有功、无功冲击,可导致送受两端出现严重的频率、电压稳定问题<sup>[6]</sup>。

#### 1) 频率方面。

当发生特高压直流闭锁时,送端和受端都会出现严重的功率不平衡,诱发严重的频率问题。

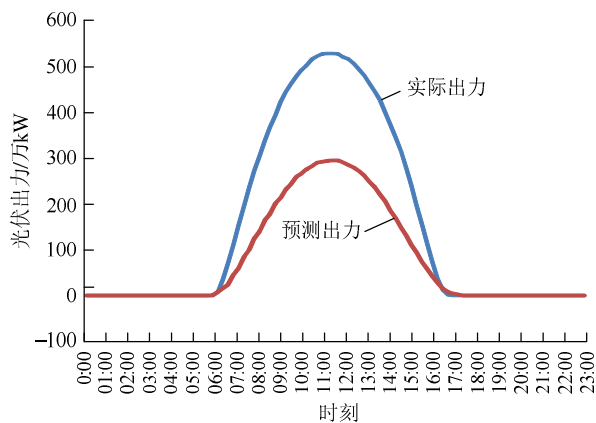


图3 2018年10月12日东北电网光伏实发及预测出力曲线

Fig.3 Northeast power grid PV actual and predicted power curve on October 12, 2018

送端电网可能因系统高频导致发电机组无序脱网，进一步诱发系统低频问题甚至导致频率反复振荡直至崩溃；受端电网可能因系统低频引发低频减载大规模动作，诱发频率振荡以及大面积停电风险。

#### 2) 电压方面。

对于送端系统，当发生特高压直流换相失败或闭锁时，换流站近区电网会出现暂态过电压问题，耐压性能不足的机组将无序脱网，进而引发系统频率稳定控制风险。

对于受端系统，由于直流大规模馈入并替代常规电源，500kV及以上系统短路容量大幅降低，系统动态无功支撑能力明显下降。

### 2.3 电力系统故障形态更加复杂

新能源的高比例接入和跨大区大容量输送使得电力系统故障形态更加复杂，主要体现在2方面：一是故障“连锁性”突出，二是电力电子化特征凸显，宽频稳定问题突出。

#### 1) 故障“连锁性”突出。

交直流混联电网中，交流N-1故障可能引发直流群、风机群巨大的有功、无功波动，交直流、直流间、源网间、一二次产生连锁反应，对送受端电网产生较大影响。

#### 2) 电力电子化特征凸显。

与常规电源占主导的传统交流系统相比，海量微小的电力电子型电源群、直流群替代传统机组后，系统“宽频”稳定形态与传统的工频暂态、

电压、动态稳定形态叠加，系统稳定特性更加复杂<sup>[11]</sup>。

2016年，吉林电网随瞻榆变所接入的风电机组陆续调试并网运行，瞻榆变及该地区各风电场220kV母线电压出现次同步谐波振荡现象，振荡频率在6Hz左右，采取提高无功支撑能力及限制风电场运行方式等措施后，系统电压波动有所减少，但问题仍然存在。针对此问题，在瞻榆变加装了次同步振荡监测装置实现了实时监测及切除线路功能。

随着新能源并网容量不断扩大，电力电子设备的大量使用，未来电力系统故障“连锁性”和宽频稳定将更加突出，需研究制定有效措施予以解决。

### 2.4 转动惯量不足的问题

电力系统在发生故障扰动，产生功率冲击、频率波动时，依靠大量旋转设备的转动惯性进行调节，称之为“转动惯量”<sup>[12]</sup>。转动惯量的大小代表了系统的动态稳定能力。

风机叶片等效转动惯量小，光伏基本无转动惯量。东北、西北地区目前仍以火电为主要电源，随着风电、光伏等新能源的大面积规模化开发，新能源大量替代火电的情况下可能出现因转动惯量不足影响新能源外送、降低系统动态稳定裕度的情况。

以东北电网为例，在5500万kW负荷水平下，损失300万kW功率，若将1000万kW火电开机容量替换为等量风电，频率动态特性将明显下降，极端情况下，下跌幅度相差可能达到0.3Hz以上。

应对电力电子大规模接入造成的转动惯量不足的问题，可采取以下几种措施：

1) 采用新一代调相机，新一代调相机具有更强的动态无功支撑能力与暂态电压调节能力，更适合于我国当前的电网结构特点<sup>[13]</sup>，目前扎鲁特工程已投运2台；研制大转动惯量的调相机，有望将有功、无功、转动惯量部分实现解耦调节。

2) 大力发展抽水蓄能机组，可以同时解决电网调峰、调频和转动惯量不足等问题，为新能源接纳创造良好技术条件。

3) 深度开发应用储能技术，利用电网中电池

的化学能源重新通过电力电子器件提供虚拟转动惯量。

### 2.5 分布式电源带来的运行控制问题

受资源禀赋限制, 新能源开发需要集中式与分布式并举。近年来, 随着节能减排政策、光伏扶贫项目的推行, 分布式发电技术的提高, 配电网侧接入了大量的分布式光伏、风电。分布式电源的大量接入使得配电网潮流、负荷特性发生显著变化, 部分配电网主变存在潮流上送情况。这部分电源装机运行容量难于实时统计。随着分布式电源装机容量不断增加, 传统的模型已不能很好地描述区域特性<sup>[14]</sup>, 这对于电网电源计划安排及电力系统安全稳定分析造成了很大的困扰<sup>[15]</sup>, 急需深入研究考虑分布式电源特性的建模方法。

## 3 东北电网应对措施

面对大电网运行与控制的问题与挑战, 针对新能源大量接入带来的平衡问题, 鲁固特高压投运引发的送端频率、电压稳定问题, 东北电网积极实践, 多措并举, 通过调峰辅助服务市场、高频紧急控制系统、风电高电压穿越技术改造等手段, 提升新能源消纳, 保障系统安全, 促进电网协调发展。

### 3.1 东北电力调峰辅助服务市场构建与运行

2014年起, 东北电网建设并运行了中国第一家电力调峰辅助服务市场<sup>[16]</sup>。市场运行至今近4年的时间里, 通过电力辅助服务市场的机制, 利用经济杠杆, 挖掘了现有火电机组的深度调峰潜力, 极大改善了因新能源大量接入带来的电力电量平衡问题, 促进了清洁能源消纳。

2017年, 东北电力调峰辅助服务市场发生有偿调峰辅助服务电量25.12亿kW·h, 全网风电受益电量共计105.72亿kW·h, 风电分摊费用5.97亿元, 折合风电每度受益电量分摊费用0.056元。2017年新能源消纳同比增长27.8%。

辅助服务市场成功推动了东北多家火电企业开展灵活性改造工程, 实现“热电解耦”。截至2018年6月底, 已有12家火电厂完成灵活性改造, 提高低谷时段风电上网能力240万kW, 进

一步提升了电网调节能力。

### 3.2 东北电网高频紧急控制系统研究与实施

为抵御鲁固特高压直流大功率运行时闭锁引起的高频风险, 东北电网建设了国内覆盖区域最广、控制站点数量最多、策略最复杂的高频紧急控制系统(包括1座主站, 49座风电执行站, 14座水电执行站, 24座火电执行站, 高岭、黑河2个直流换流站), 可切电源容量5389万kW(约占全网电源总量40%)。2018年7月19日, 东北电网高频紧急控制系统正式投入运行, 大幅度提高了东北富余电力送出能力和电力资源跨大区优化配置能力。

### 3.3 扎鲁特近区风电高电压穿越技术改造

鲁固直流大功率送电时一旦发生直流闭锁或者连续换相失败, 扎鲁特换流站近区暂态过电压最高可达到1.3倍额定电压, 原有的风电机组耐压性能(超过1.1倍额定电压时脱网)无法满足鲁固直流大功率送电的安全要求, 可能导致扎鲁特换流站近区近千万kW风电机组不受控脱网<sup>[17]</sup>, 对东北电网的安全运行构成严重威胁。

如果按照常规电网安全稳定控制模式, 类似于安全断面潮流控制, 需要将影响电网安全运行的发电机组出力控制在安全运行区间内。为减少或避免因此新增弃风限电, 充分发挥鲁固特高压直流跨大区输电能力, 东北电网推动了扎鲁特换流站近区风电场高电压穿越技术改造工作, 风电机组高电压穿越曲线如图4所示, 要求改造后风电机组在图中红线以下区域不脱网连续运行, 即具备1.3倍额定电压下500ms不脱网的能力。

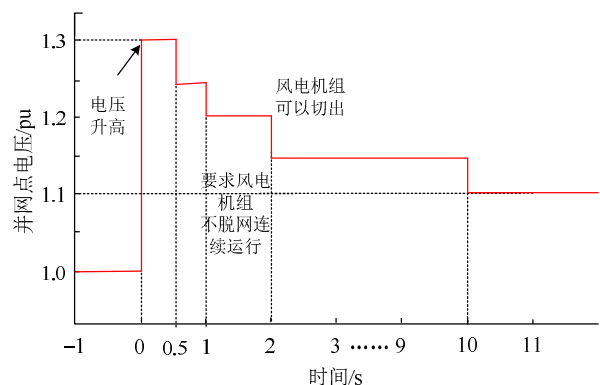


图4 风电机组高电压穿越曲线

Fig. 4 High voltage ride through curve of wind power unit

## 4 结语

新能源大规模接入和大容量特高压直流输电使电网在机理特性、认知难度、控制体系等方面面临着新一轮挑战。当前，以新能源大规模开发利用为标志，以电力电子化为路径的新一轮能源革命，正在深入展开。东北电网应对大电网运行，多措并举，提升了新能源消纳水平，保障了系统运行安全。

## 参考文献

- [1] 冷喜武. 服务大电网安全和新能源发展 服务智能电网运行控制[N]. 国家电网报, 2013-12-10(001).
- [2] 中国电力行业年度发展报告[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2018.
- [3] 马世英, 王青. 大规模新能源集中外送系统源网协调风险及仿真评估[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 112-117.
- [4] 陶佳, 丁腾波, 宁康红, 等. 智慧能源战略框架及全过程实施方案[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 129-134.
- [5] 韩晓娟, 艾瑶瑶, 李相俊. 储能在电网中的应用价值及其商业模式[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 77-83.
- [6] 陈国平, 李明节, 许涛, 张剑云, 王超. 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.
- [7] 杨万开, 印永华, 班连庚, 曾南超.  $\pm 1100\text{kV}$  特高压直流系统试验方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2815-2821.
- [8] 李明节. 多管齐下确保特高压交直流电网安全稳定[J]. 国家电网, 2016(6): 30-31.
- [9] 马坤, 叶鹏, 郭帅, 张涛, 李家珏, 王超. 特高压交流电网运行与控制研究综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2017, 13(1): 37-42,49.
- [10] 李明节. 基于国际先进技术的风电调度研究与实践[J]. 中国电力, 2012, 45(11): 1-6.
- [11] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [12] 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.
- [13] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [14] 张剑, 孙元章. 含有分布式电源的广义负荷建模[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 41-46.
- [15] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 346-351.
- [16] 刘永奇, 张弘鹏, 李群, 等. 东北电网电力调峰辅助服务市场设计与实践[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 148-154.
- [17] 韩平平, 张海天, 丁明, 等. 大规模高压直流输电系统闭锁故障下送端风电场高电压穿越的控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1086-1095.

收稿日期: 2018-04-02。

作者简介:



刘家庆

刘家庆(1963), 男, 硕士, 教授级研究员, IEEE 电力与能源协会东北分会常务理事, 辽宁省政府命名的优秀专家, 现任国家电网东北电力调控中心副主任, 长期从事电网调度和运行管理工作, baodan3494@126.com;

徐峥(1990), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源消纳、新能源功率预测、电力市场, xz\_9054@sina.com。

(责任编辑 车德竞)