



国家电网
STATE GRID

高比例新能源对我国电网运行的挑战

汇报人 郭剑波

工作组成员：郭剑波、王伟胜、刘纯、黄越辉、礼晓飞、许晓艳、胡菊

中国电力科学研究院

2016年11月

- 一、**新能源发展现状与规划**
- 二、**新能源波动特性**
- 三、**高比例新能源系统的情景**
- 四、**新能源对电力系统安全稳定的新挑战**

我国新能源发展速度快、装机规模大

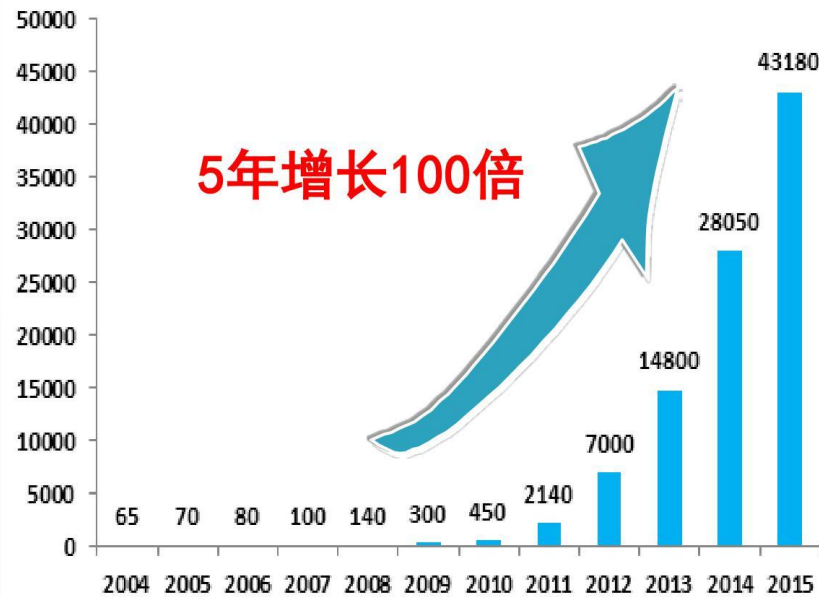


国家电网
STATE GRID

我国是全球新能源**规模最大、发展最快**的国家。风电并网容量10年增长100倍，光伏5年增长100倍，风电和光伏装机容量均居世界第一位。新能源已成为我国第3大主力电源。



风电并网容量 (MW)



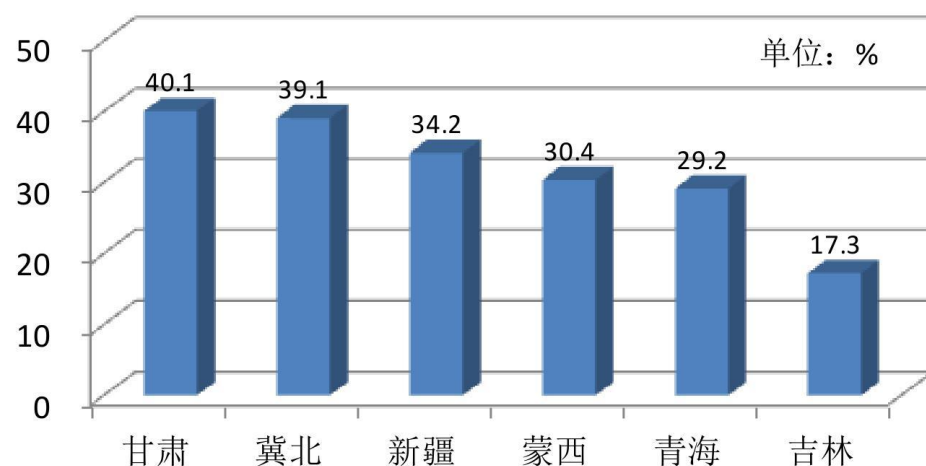
光伏并网容量 (MW)



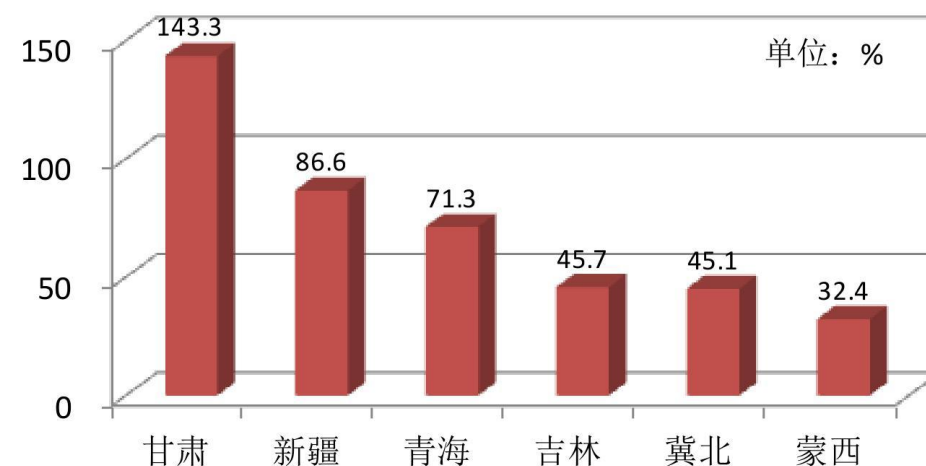
“三北”地区新能源比重大

“三北”地区4省区（甘肃、冀北、新疆、蒙西）新能源装机占比超过30%，甘肃新能源装机占比达到40.1%；5省区（甘肃、新疆、青海、吉林、冀北）新能源穿透率超过40%，其中甘肃、新疆新能源穿透率达143.3%、86.6%。“三北”地区高比例新能源的电力系统正在逐步形成。

新能源装机占比



新能源穿透率



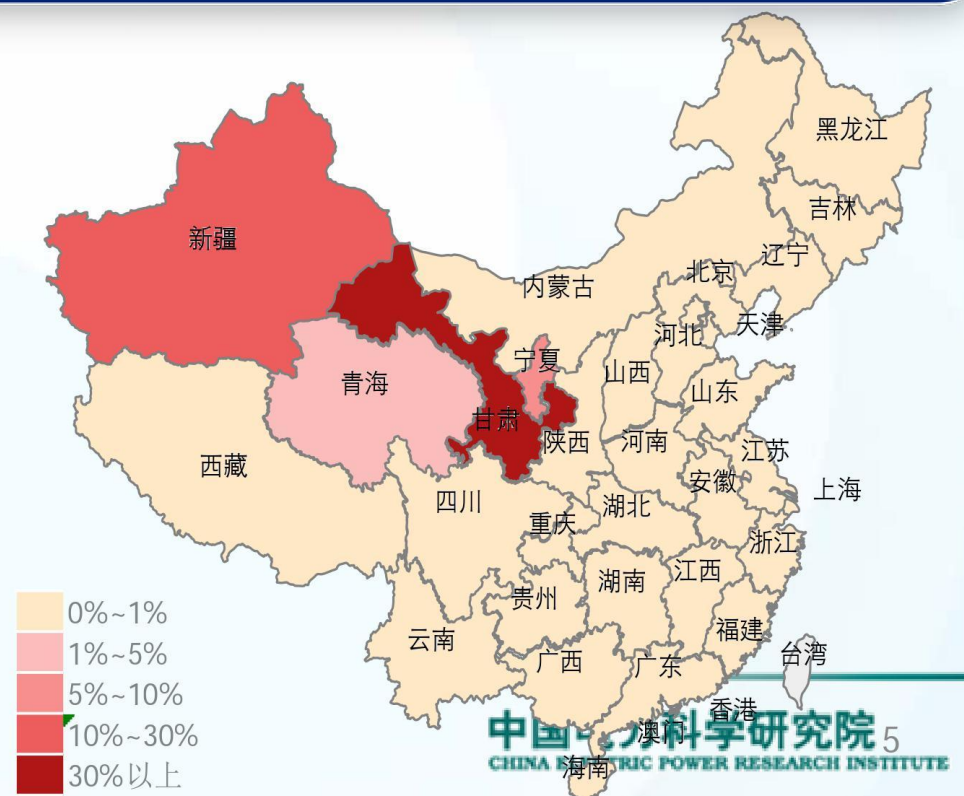
注：穿透率=新能源装机/最大负荷

弃风弃光主要集中在“三北”地区



国家电网
STATE GRID

- **弃风**比例超过30%以上省区：甘肃、新疆、吉林；
- 10% ~ 30%之间的省区：黑龙江、辽宁、蒙东、冀北、宁夏；
- **弃光**比例超过10%以上省区：甘肃、新疆；
- 10%以下的省区：宁夏、青海等。



新能源消纳困局的主要原因包括新能源高速发展超出了市场承载能力，新能源建设与电网规划相脱节，电网调峰能力不足

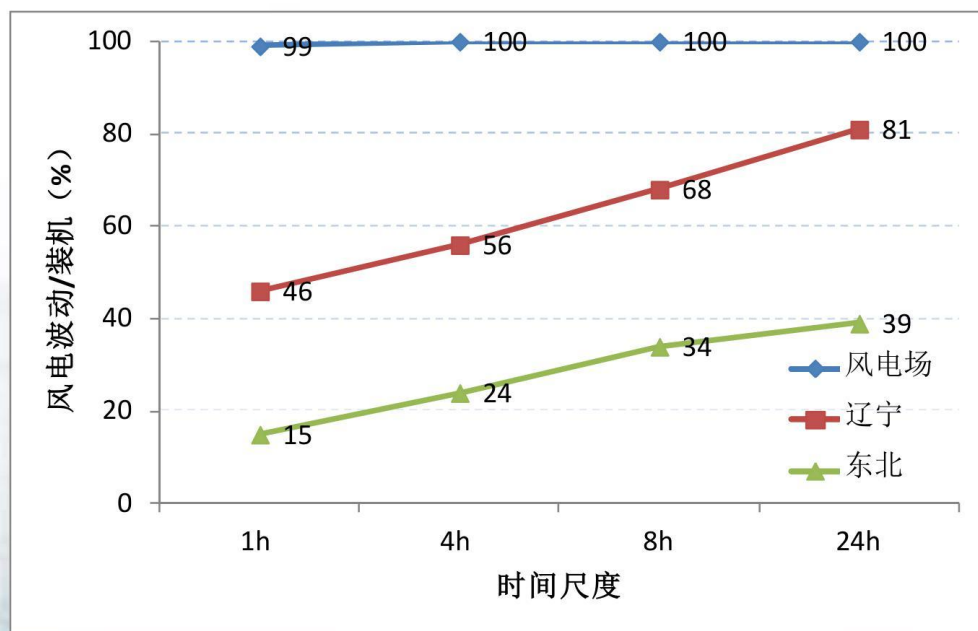
- （一）新能源超常规发展，局部占比过大，超过市场承载能力**
- （二）装机整体过剩，负荷增长趋缓，加剧新能源消纳矛盾**
- （三）新能源与电网规划脱节，电网输送能力不足**
- （四）电源结构不适应新能源发展，电源调节能力不足**
- （五）配套政策和机制不完善，制度保障能力不足**

- 一、新能源发展现状与规划
- 二、**新能源波动特性**
- 三、高比例新能源系统的情景
- 四、新能源对电力系统安全稳定的新挑战

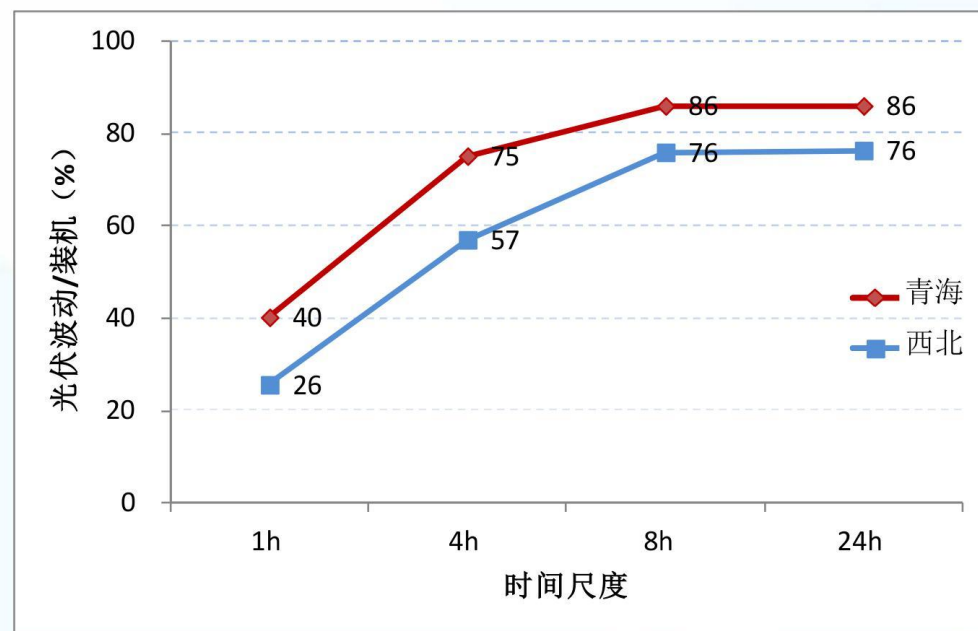
小时级波动

空间范围越大，风电波动越平滑。 对比区域电网和省级电网24h级波动，风电波动减少42个百分点，光伏波动减小10个百分点。

但从波动水平来看，区域电网风电和光伏发电24h级出力最大波动依然高达39%和76%。



风电出力波动



光伏出力波动

注：出力波动=波动功率值/装机容量

小时级波动

风电出力波动与大气中移动的天气系统及其带来的天气过程有关，风的波动过程对应着相应的天气过程：

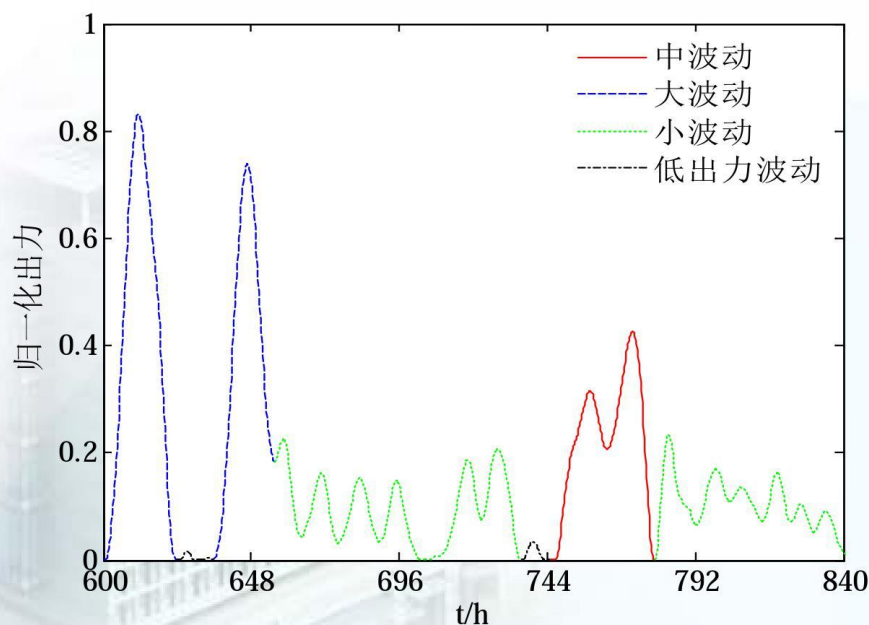
大波动过程： $50\% < \text{出力}$ ；

中波动过程： $30\% < \text{出力} < 50\%$ ；

小波动过程： $5\% < \text{出力} < 30\%$ 出力；

低出力波动： $< 5\%$ 。

**风电出力的大波动、
中波动提供主要能量**



风电出力波动分析

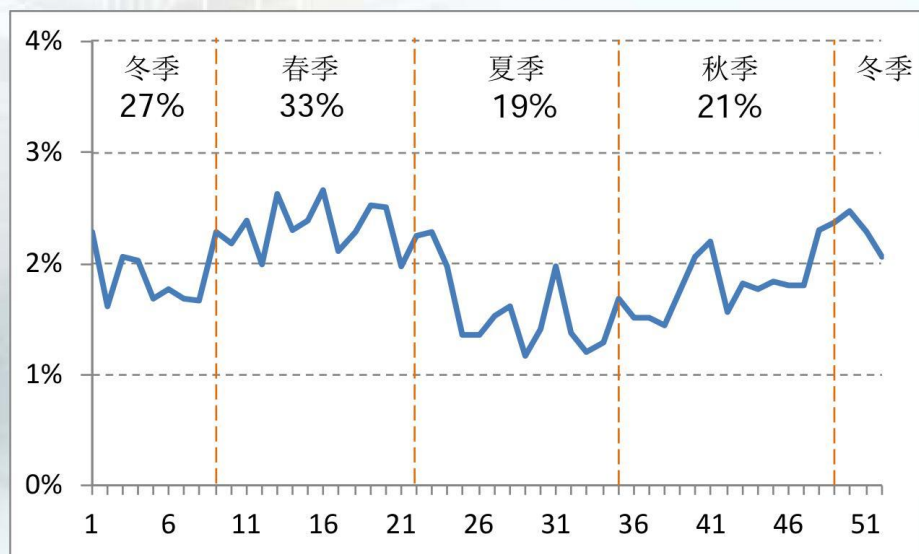
指标	持续时间	波动幅度	电量占比
单位	h	%	%
大波动	11	60	42
中波动	9	40	37
小波动	7	10	19
低出力	5	2	1

周波动

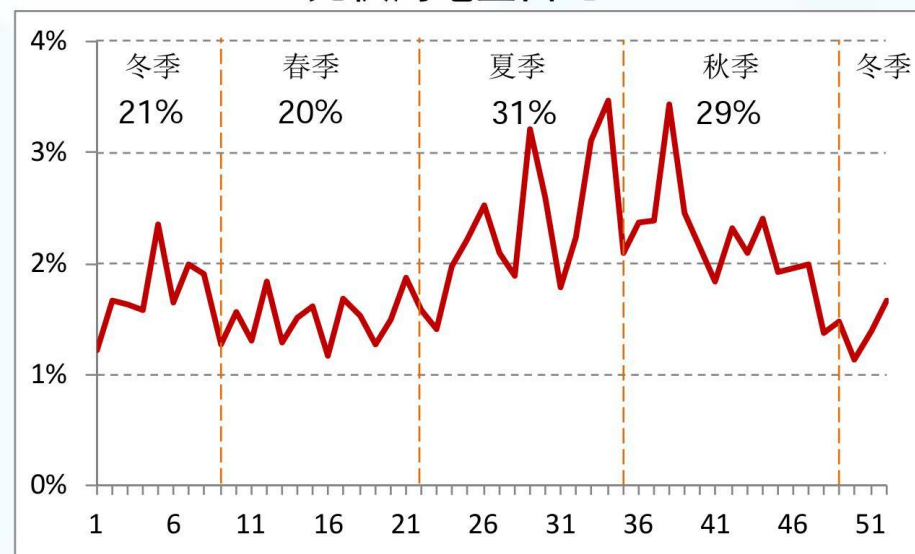
□ 以“三北”为例，风电、光伏周电量均呈季节性波动，其中：风电周电量占比最大为2.7%，最小为1.1%；光伏周电量占比最大为3.4%，最小为1.1%。

□ **风电电量主要集中在春、冬两季**，约占60%；**光伏电量主要集中在夏、秋两季**，同样约占60%；在周电量分布方面，风电、光伏发电具有一定的互补性。

风电周电量占比



光伏周电量占比



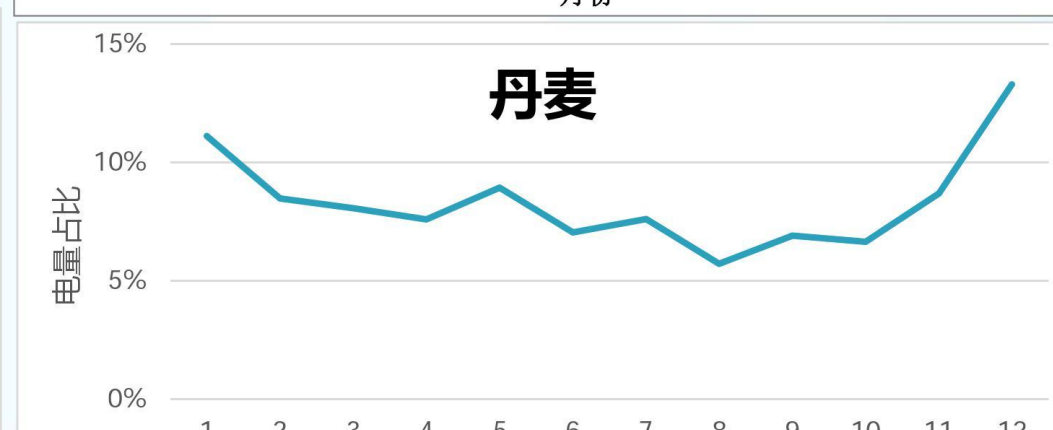
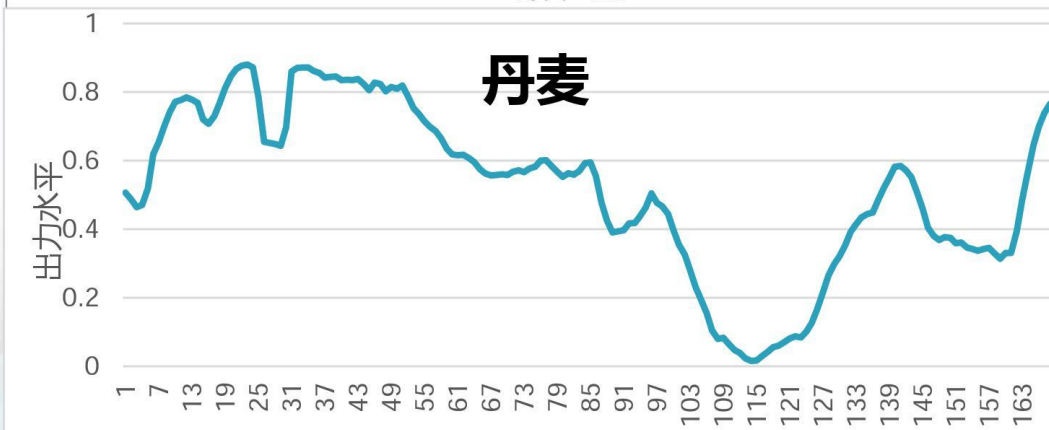
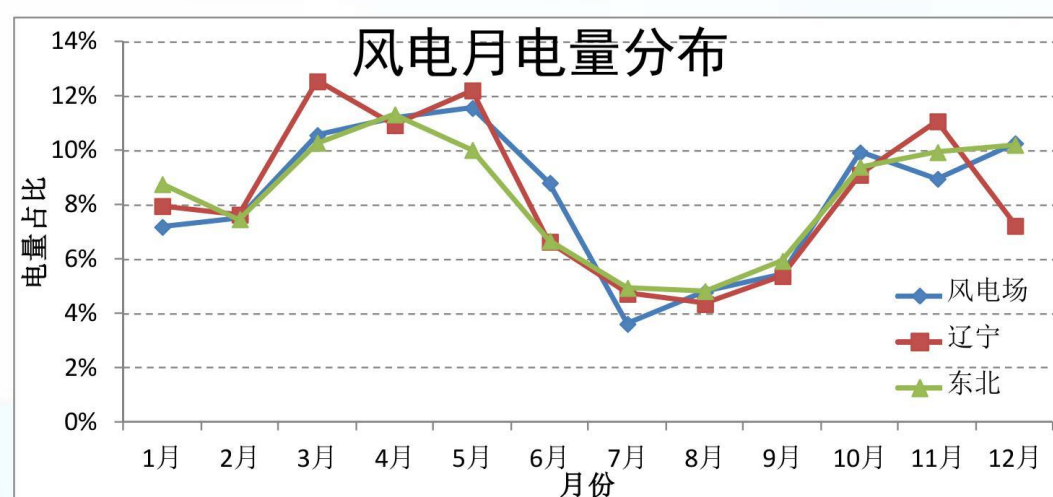
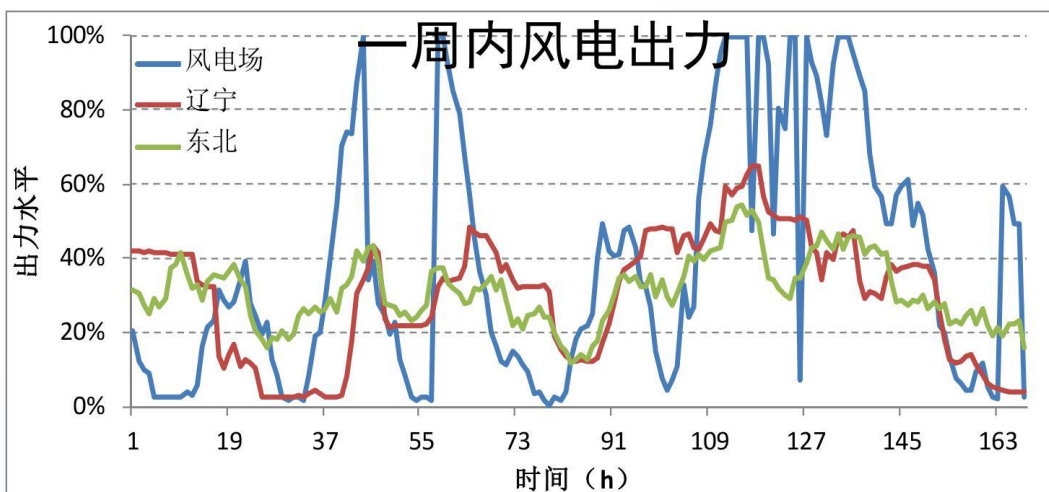
新能源出力波动



国家电网
STATE GRID

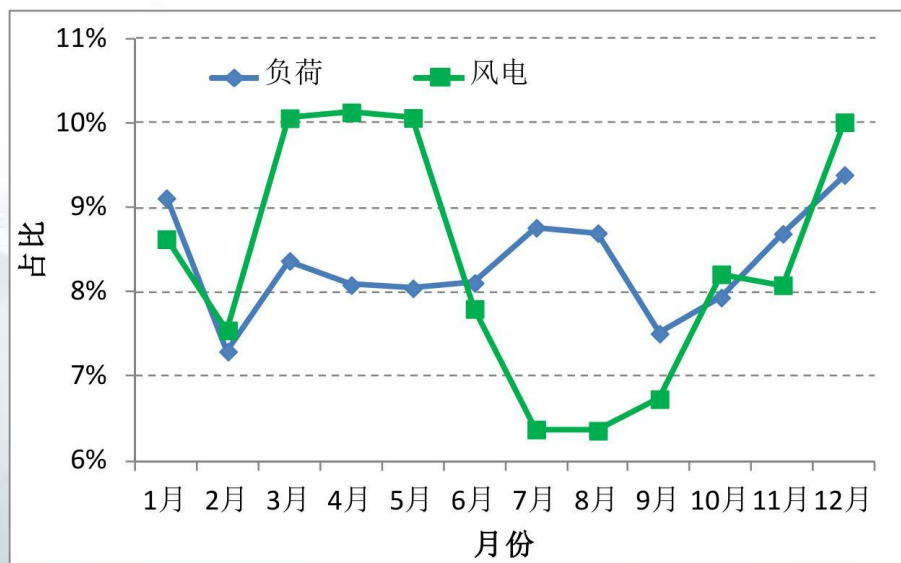
月度电量分布

- 东北单个风电场、省级电网、区域电网风电月电量分布基本一致。
- 从周出力来看，空间范围越大，风电波动越平滑；但从月电量分布来看，空间范围难以平滑风电的季节特性。

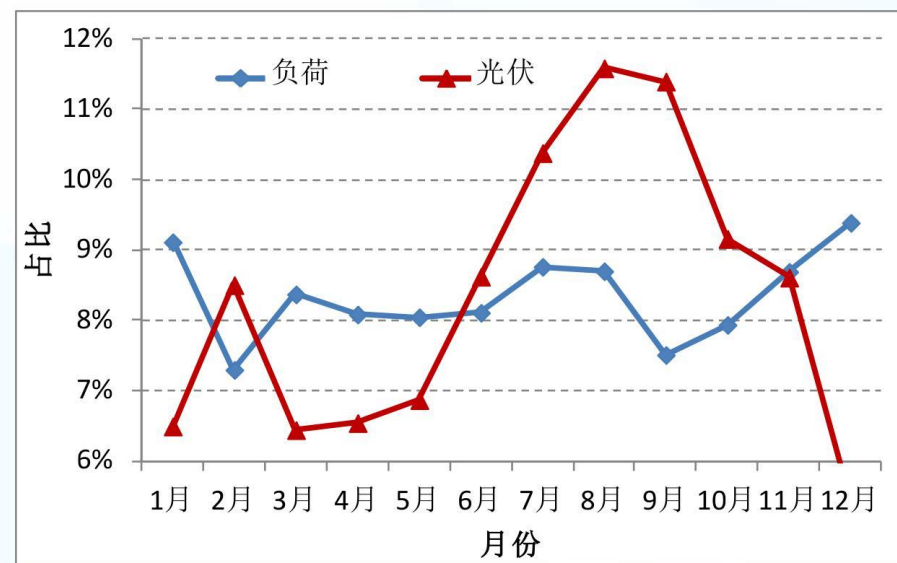


月度电量分布

- “三北”地区负荷表现为夏、冬高峰，风电为春、秋高峰，光伏发电为夏、秋高峰。
- 7、8月为负荷高峰月，但为风电发电低谷月；3、4、5月为负荷中等月，但为风电的高峰月。



风电月度资源量分布与负荷需求关系



光伏月度资源量分布与负荷需求关系

新能源出力波动

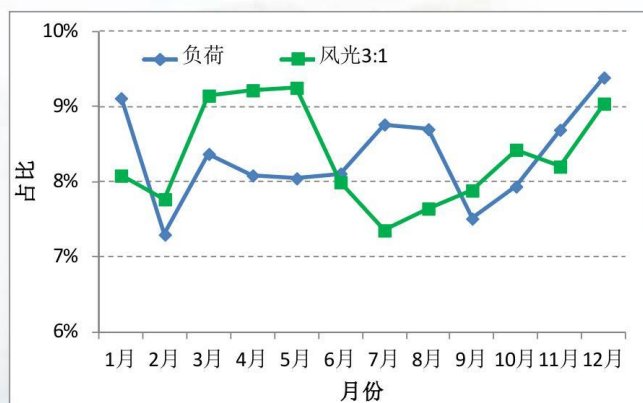


国家电网
STATE GRID

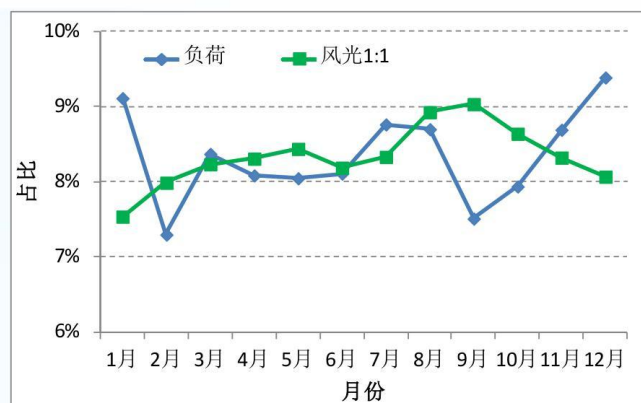
月度电量分布

□ “三北”地区风电、光伏发电月度电量分布具有一定的互补性，按电量平衡分析，风光互补可在一定程度上减少新能源季节性的影响。

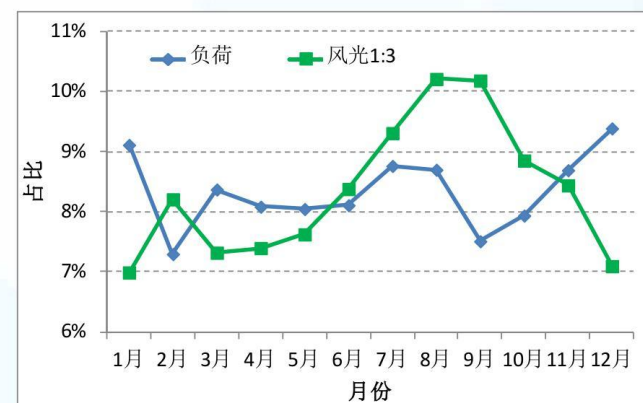
□ 新能源月度电量分布与负荷需求不匹配，发电量与用电量的不匹配使得100%新能源供电难度非常大。



风光3:1



风光1:1



风光1:3

新能源配比分析

以我国风光富集的“三北”地区为例：

- 风电、光伏出力具有波动性，小时~周级新能源出力在大范围内具有平滑性，但季节性波动特点仍然突出。
- 新能源出力与负荷需求在季节上具有一定的逆向分布特点，风光电量互补具有季节平滑作用。
- 实现高比例新能源电力系统，必须解决季节性消纳的难题。

- 一、新能源发展现状与规划
- 二、新能源波动特性
- 三、高比例新能源系统的情景
- 四、新能源对电力系统安全稳定的新挑战

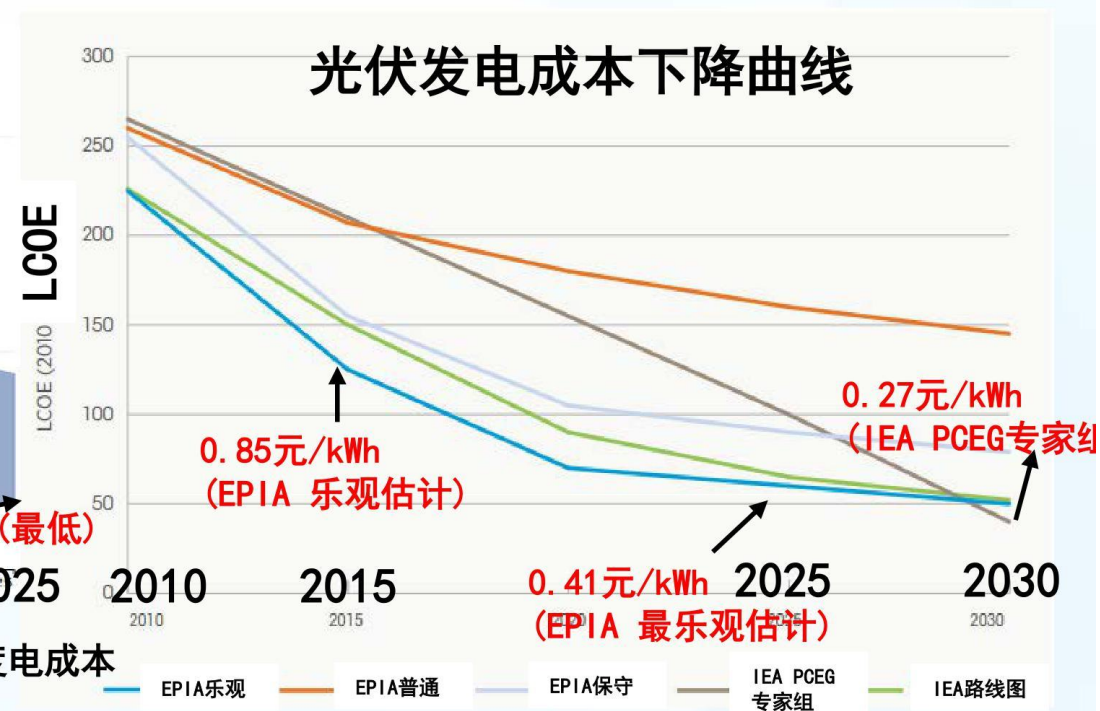
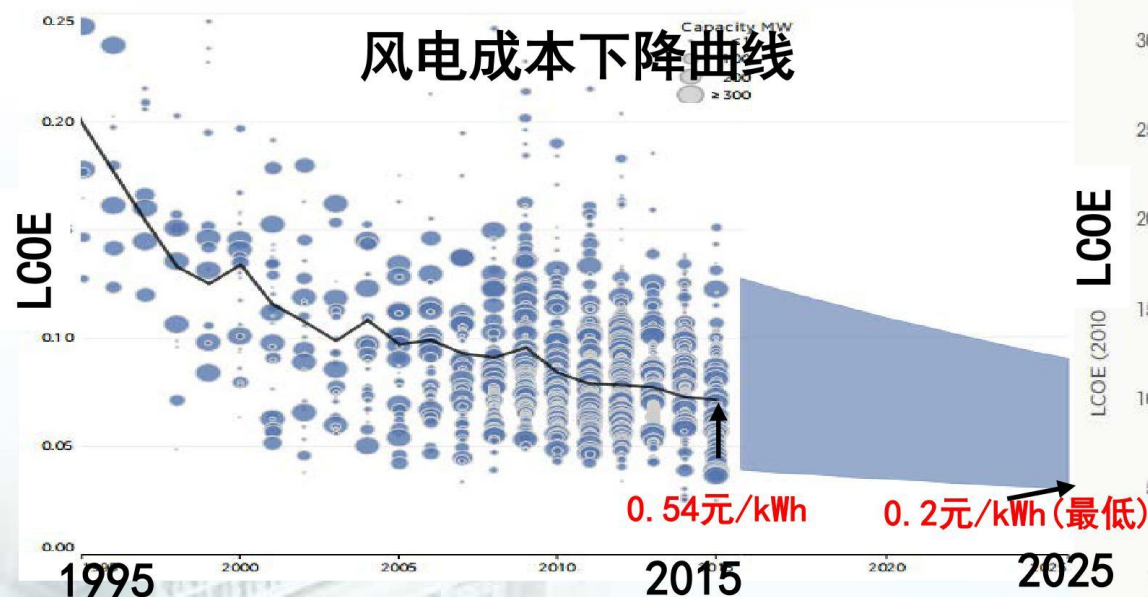
高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

未来新能源电量占比预计

- 周孝信院士此前预计：未来我国发电量总量约12万亿度，其中煤电占40%，水电占13.13%，**非水可再生能源电（太阳能、风能、生物质能）占21.88%**，核电占17.5%、天然气电量占7.5%。
- 未来高比例新能源电力系统中，局部地区新能源电量占比将超过40%。
- 风电、光伏发电成本将持续下降。



来源：IRENA 注：LCOE (Levelized Cost of Energy)，即平准化度电成本

高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

按目前火电调节能力(日启停)

□ 以吉林电网为典型构建计算案例。2016年吉林最小负荷率56%、平均负荷率85%、日峰谷差率平均32%；风电资源小时数约2150h，光伏资源小时数约1300h，吉林目前新能源穿透率达52%。供热机组在供热期最小技术出力63%，非供热期最小技术出力50%；非供热机组全年最小技术出力50%。

风电穿透率(%)	风电发电量占比(%)	火电开机穿透率(%)	全部风电供电时段(h)	全部风电供电次数	风电利用小时数(h)	火电利用小时数(h)	弃风率(%)
52	12	127	0	0	1419	3592	33

注：风电穿透率=风电装机/最大用电负荷

风电发电占比=风电发电量/负荷电量

火电开机穿透率=火电实际最大开机容量/最大用电负荷

高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

火电全年最小技术出力50%

风电穿透率(%)	风电发电量占比(%)	火电开机穿透率(%)	全部风电供电时段(h)	全部风电供电次数	风电利用小时数(h)	火电利用小时数(h)	弃风率(%)
58	18	127	0	0	1929	4117	5
100	26	111	0	0	1622	3717	20
222	40	111	248	13	1124	3034	45

- 随着风电穿透率的增加，风电发电量占比不断提高；
- 当风电发电量占比达到40%，全年全部由风电供电13次，全部由风电供电时段为248小时，但同时弃风率也高达45%。

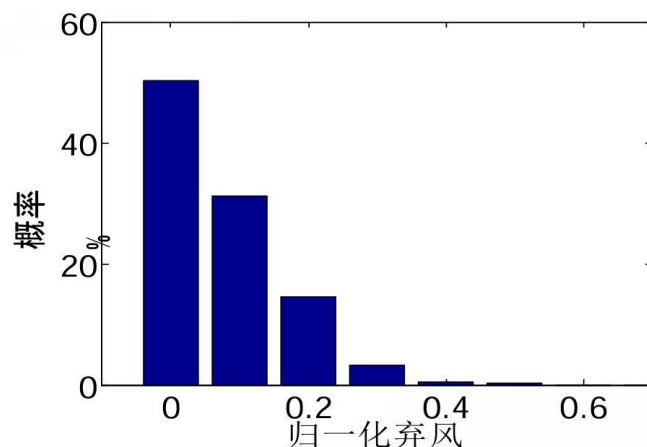
2016/11/21

高比例新能源系统的电力平衡

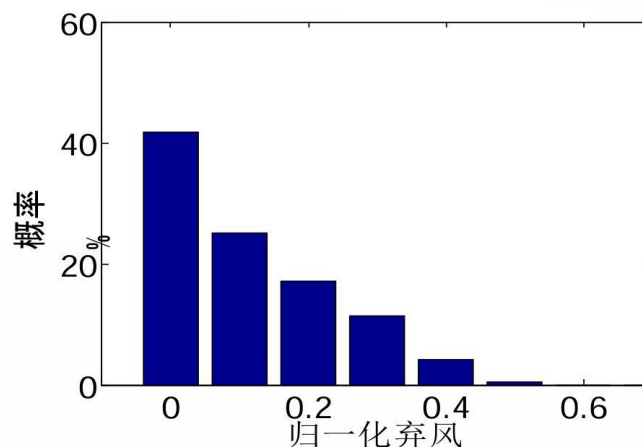


国家电网
STATE GRID

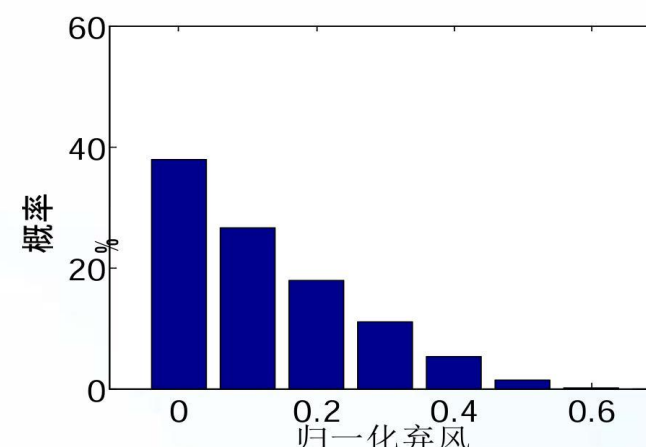
弃风序列概率分布



弃风5%



弃风20%



弃风45%

弃风率 (%)	风电装机 (MW)	弃风序列落在某一区间的概率 (%)						
		0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7
5	5500	50.2	31.3	14.6	3.2	0.5	0.2	0.0
20	9500	41.8	25.1	17.1	11.4	4.2	0.5	0.0
45	21000	37.8	26.5	17.8	11.1	5.3	1.4	0.1

□ 归一化弃风序列为实际弃风序列与风电装机容量的比值，随着弃风率的提高，弃风序列出现较大值的概率越来越大。

高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

弃风回收小时数

- 随着弃风率的升高，弃风回收小时数也逐渐升高，但总体小时数较低。
- 最大负荷 均为9474MW（吉林电网最大负荷）。

	弃风率5%	弃风率20%	弃风率45%
弃风电量（MWh）	615784	3980291	19260869
最大弃风功率（MW）	3201	5584	13401
弃风回收小时数（h）	192	713	1437

注：弃风回收小时数=弃风序列积分电量/弃风序列最大值

高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

弃风序列的间歇性

- 当弃风率较低时（5%），弃风电量主要集中于持续时长在**20小时以内**的弃风
- 随着弃风率的增加，持续时长在**20小时以上**的弃风电量占比明显提高；
- 当弃风率达到45%，持续时长**超过20小时以上**的弃风电量占总弃风电量比例高达87%。

弃风率 (%)	总弃风电量 (亿千瓦时)	持续该时长的弃风电量占总弃风电量比例%										
		10h以内	11-20h	21-30h	31-40h	41-50h	51-60h	61-70h	71-80h	81-90h	91-100h	100h以上
5	6.2	29	30	18	16	7	0	0	0	0	0	0
20	39.8	11	26	15	28	10	0	0	4	0	0	6
45	192.6	4	9	9	23	7	11	10	7	6	3	11

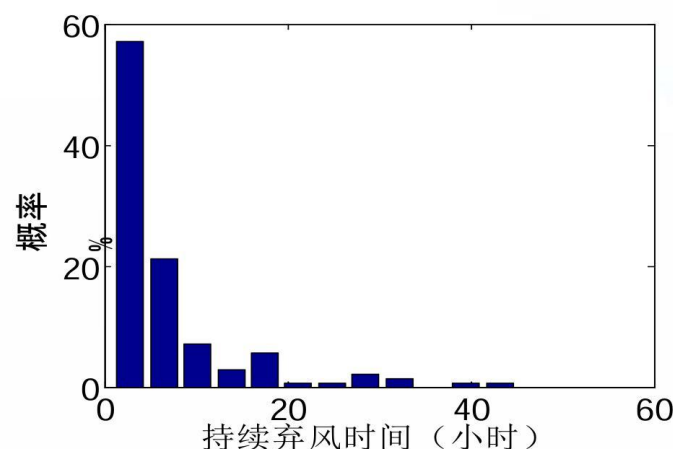
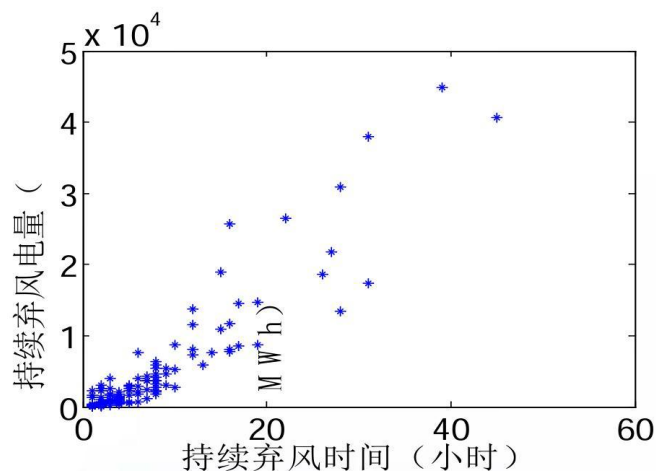
高比例新能源系统的电力平衡



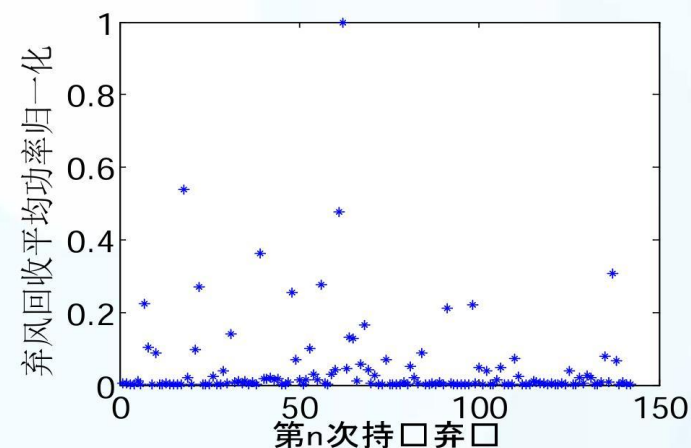
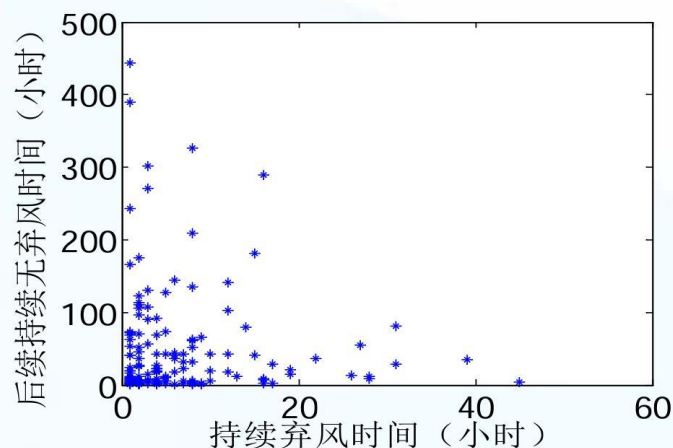
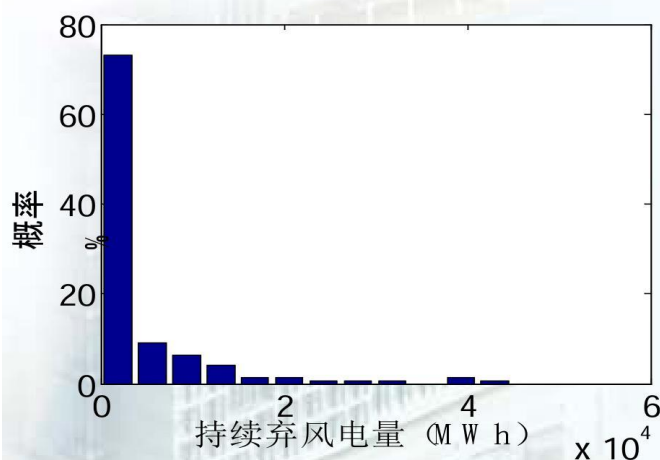
国家电网
STATE GRID

弃风序列的间歇性

弃风率5%算例：



- 全年弃风**142**次；
- 最长达**45**个小时；
- 最长持续不弃风**694**小时。



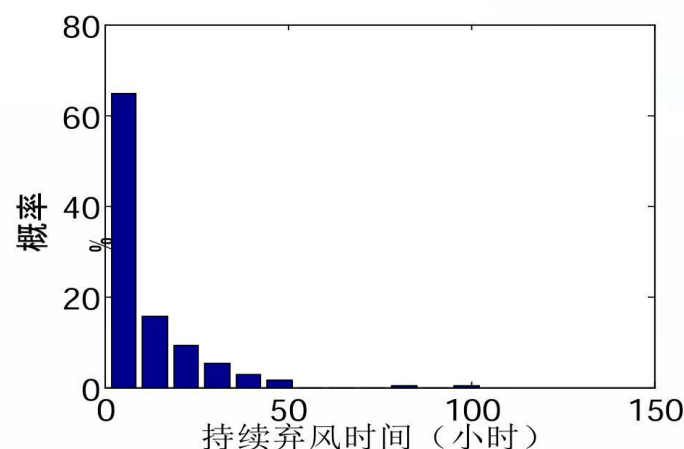
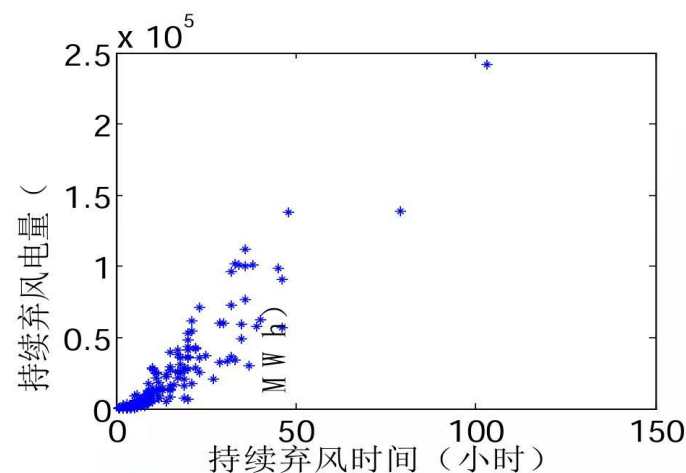
高比例新能源系统的电力平衡



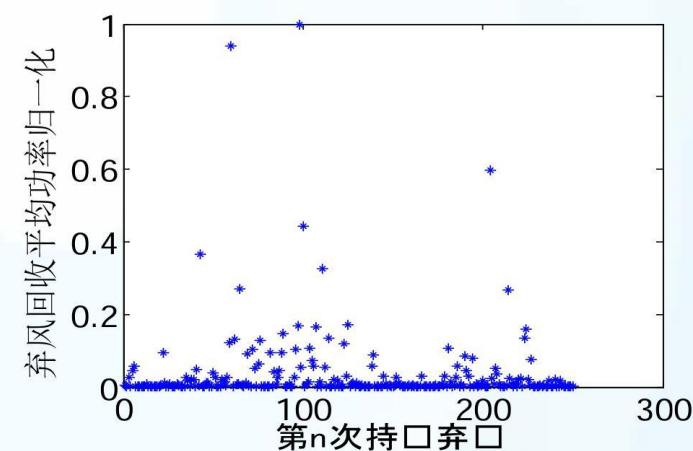
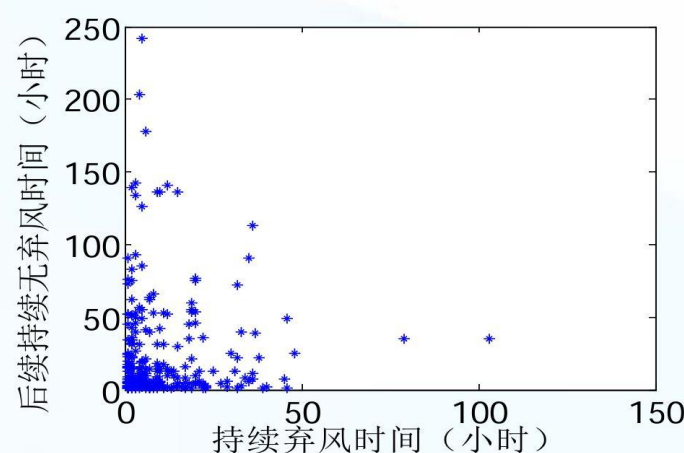
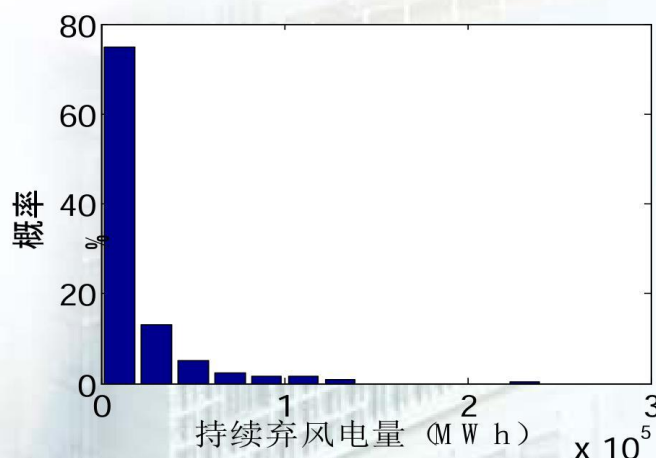
国家电网
STATE GRID

弃风序列的间歇性

弃风率20%算例：



- 全年弃风**250**次；
- 最长达**103**个小时；
- 最长持续不弃风**242**小时。



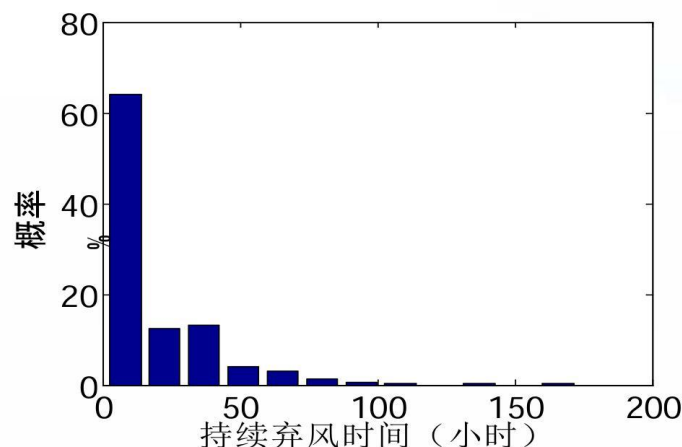
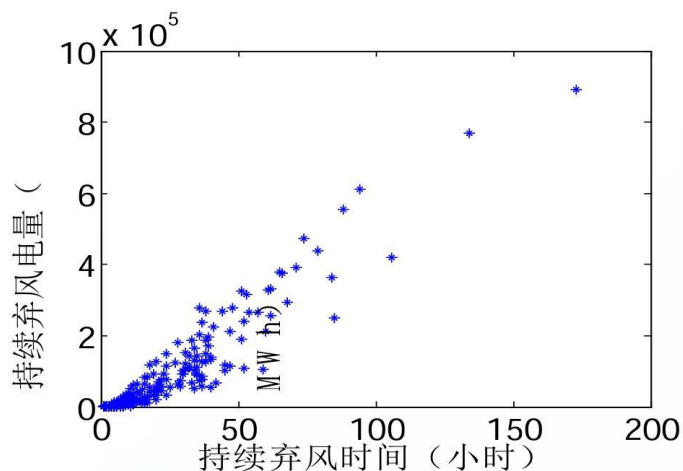
高比例新能源系统的电力平衡



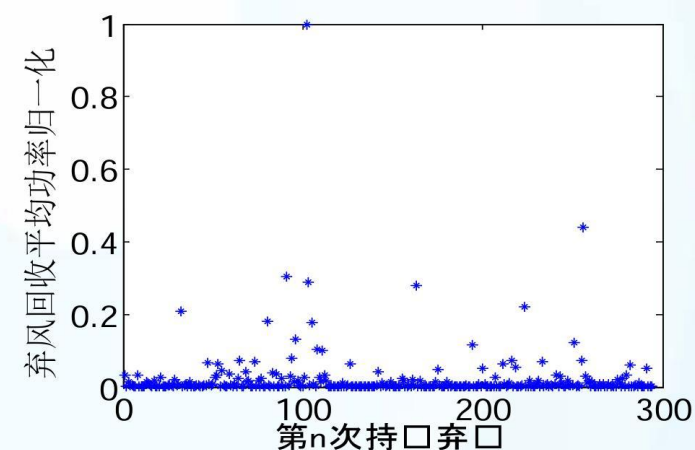
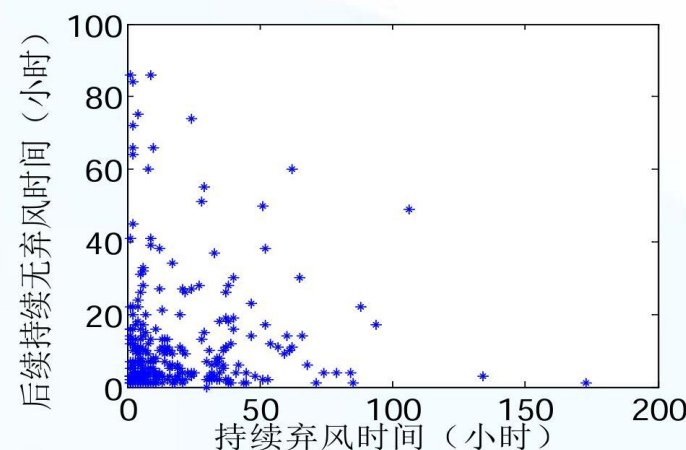
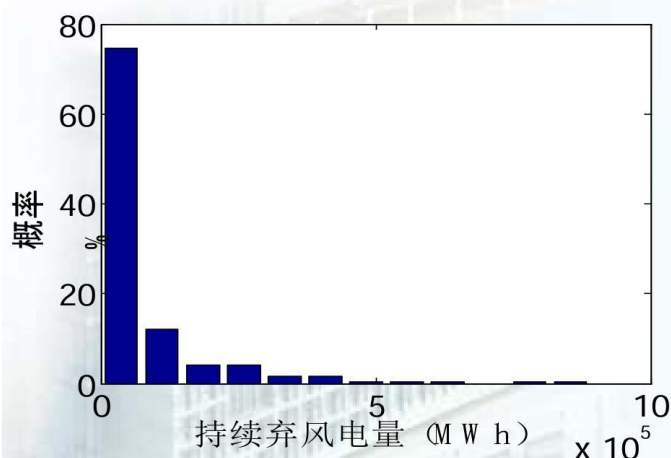
国家电网
STATE GRID

弃风序列的间歇性

弃风率45%算例：



- 全年弃风**294**次；
- 最长达**173**个小时；
- 最长持续不弃风**86**小时。



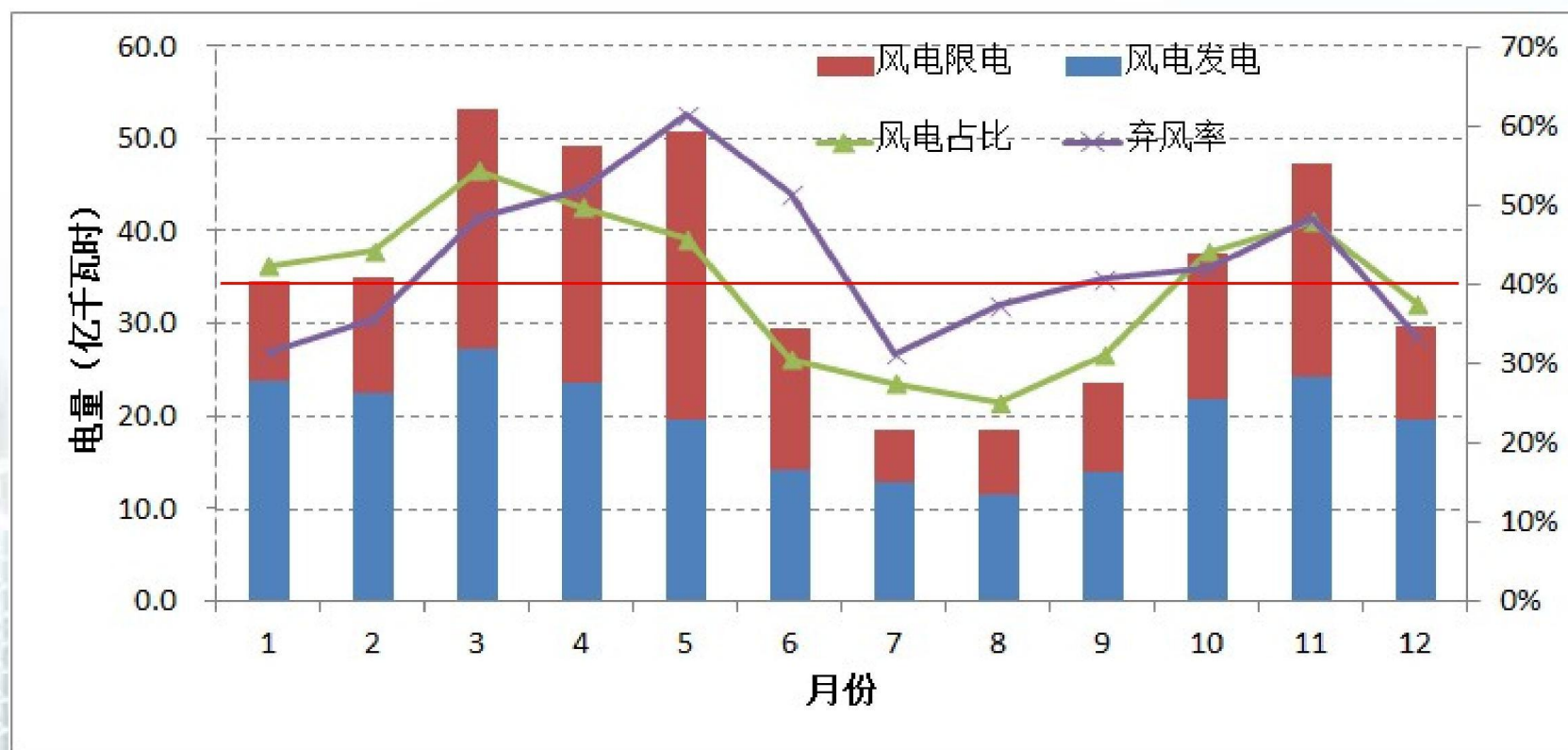
高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

弃风逐月分布情况

□ 由于风电季节性特征，春、冬季风电电量占比大（3、4月份超过50%），弃风电量较大，而夏季电量占比小（7、8月占25%），弃风电量较小。



风电逐月发电量图（火电最小技术出力50%、弃风率45%）

高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

减少弃风措施-火电机组深度调峰

- 以火电最小技术出力50%，弃风率45%的算例为基础，分析**火电机组深度调峰**、**提升通道送出能力**和**应用储能**三种措施对风电消纳能力的作用。

常规机组最小技术出力(%)	风电穿透率(%)	风电发电量占比(%)	火电开机穿透率(%)	风电利用小时数(h)	火电利用小时数(h)	弃风率(%)
40	222	41	127	1181	2935	42
30	222	47	127	1328	2677	35
0	222	57	127	1633	2143	20

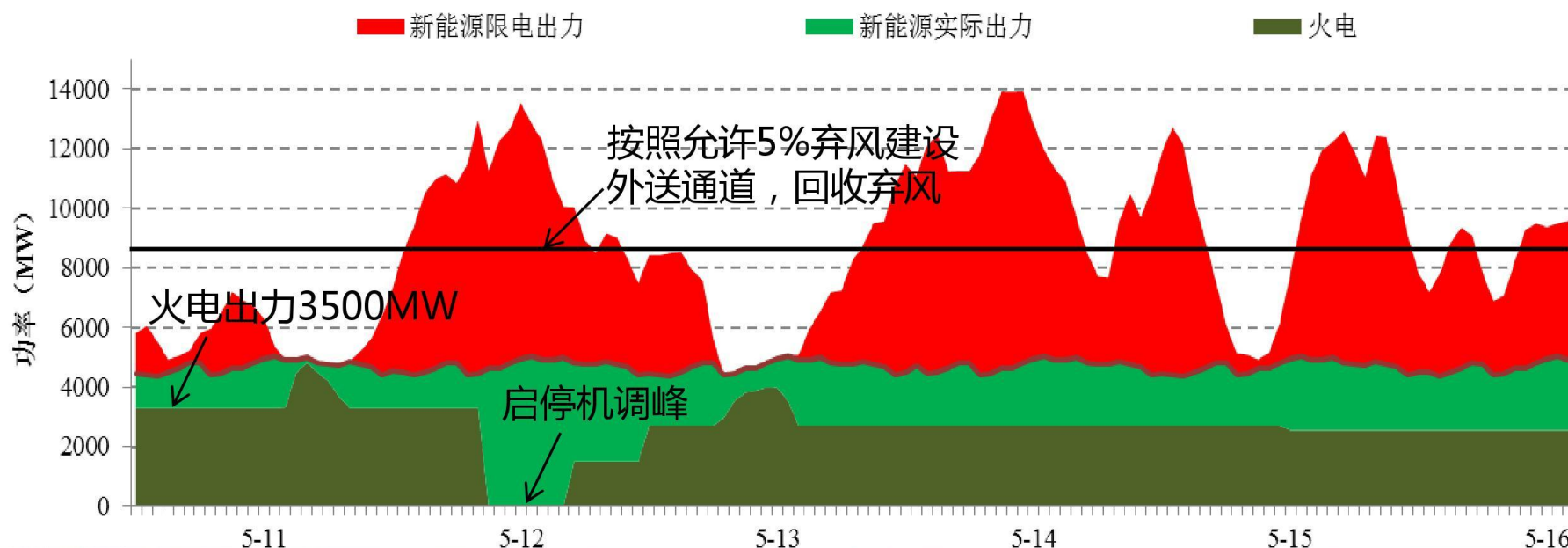
常规机组最小出力降到30%，弃风率由45%降低到35%，降低10个百分点。

高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

减少弃风措施-提升输电通道送出能力



风电逐月发电量图（火电最小技术出力50%，弃风率45%）

- ❑ 若要实现基本不弃风（弃风率由45%降低到5%），则额外的外送通道容量需为风电装机的30%，对应的外送通道年利用小时约为2800小时。
- ❑ 特高压直流将难以运行。

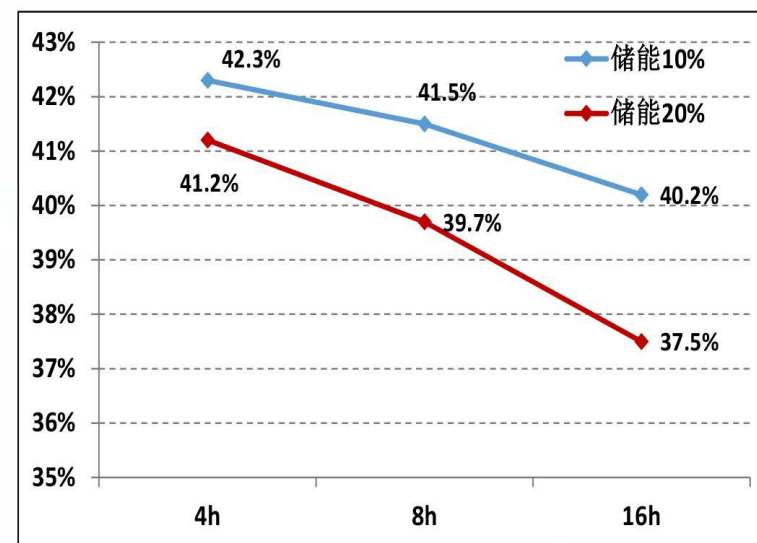
高比例新能源系统的电力平衡



国家电网
STATE GRID

减少弃风措施-储能应用分析

储能穿透率 (%)	储能时间 (h)	风电发电量占比 (%)	弃风率 (%)
0	0	40.3	45.0
10	4	42.2	42.3
10	8	42.9	41.5
10	16	43.8	40.2
20	4	43.1	41.2
20	8	44.2	39.7
20	16	45.8	37.5



储能对减少弃电的影响

注：储能穿透率=储能装机/最大负荷

储能穿透率20%，最大储存时间16h，弃风率仅减少7.5个百分点，
储能效果有限。

- 新能源电量占比为40%时，会带来电能消纳的季节性问题。
- 弃风序列具有间歇性，如果全部回收弃风序列，需要较大的负荷/储能容量，但其利用率不高。
- 通过常规机组深度调峰、提升通道送出能力和应用储能三种措施可提升风电消纳能力，但是全部回收弃风的代价将非常大。

- 一、新能源发展现状与规划
- 二、新能源波动特性
- 三、高比例新能源系统的情景
- 四、新能源对电力系统安全稳定的新挑战**

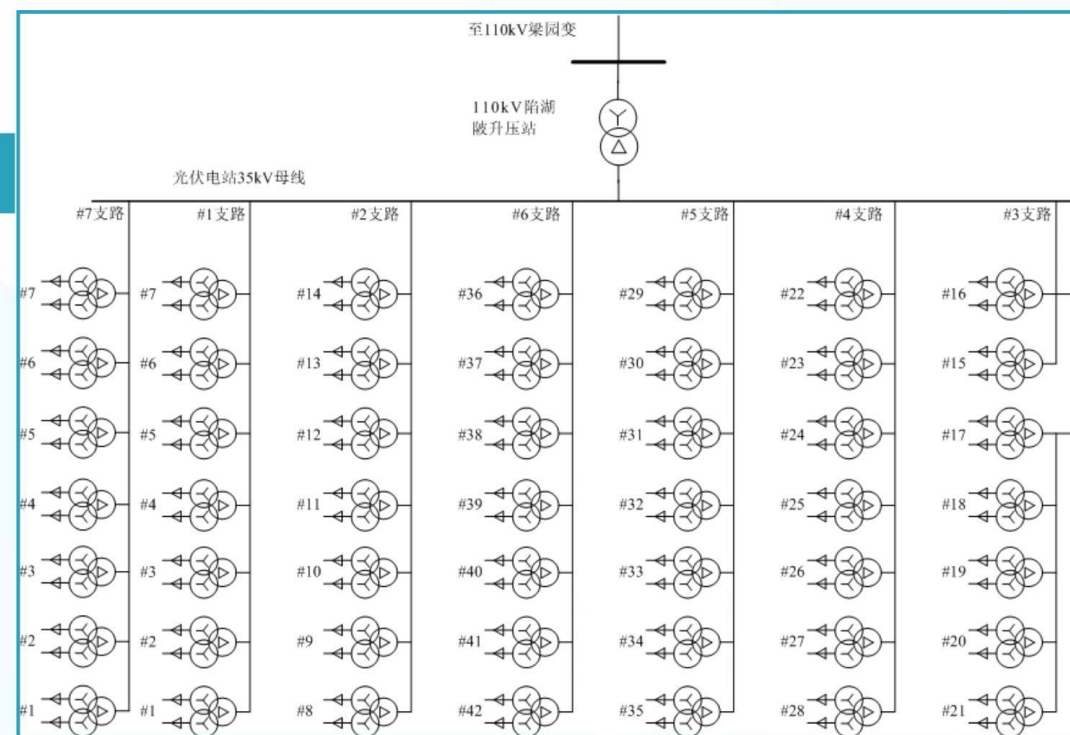
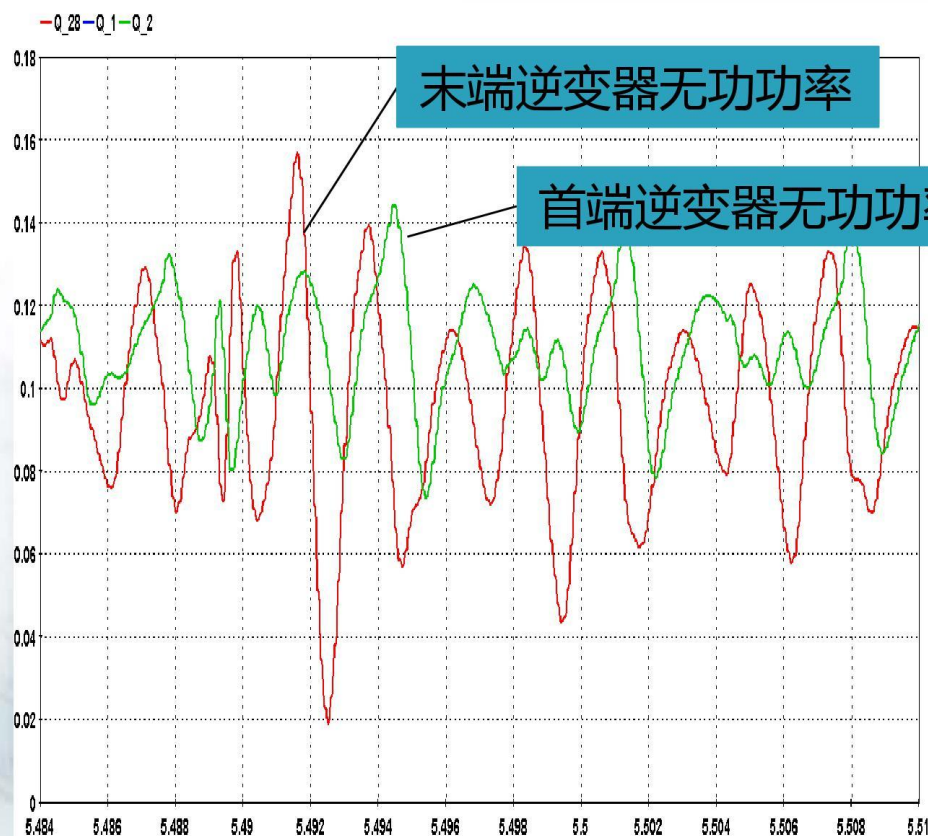
挑战1：新能源场站电压稳定



国家电网
STATE GRID

100MW光伏电站，通过110kV并网，并网点短路比为2.5，当并网点电压有0.01pu扰动时，系统发生振荡。

- ◆ 无功功率振荡频率150Hz。
- ◆ 末端逆变器无功振荡幅值大于首端，并且各逆变器振荡相位不同步。
- ◆ 短路比如果提高至10，不会出现无功功率振荡。

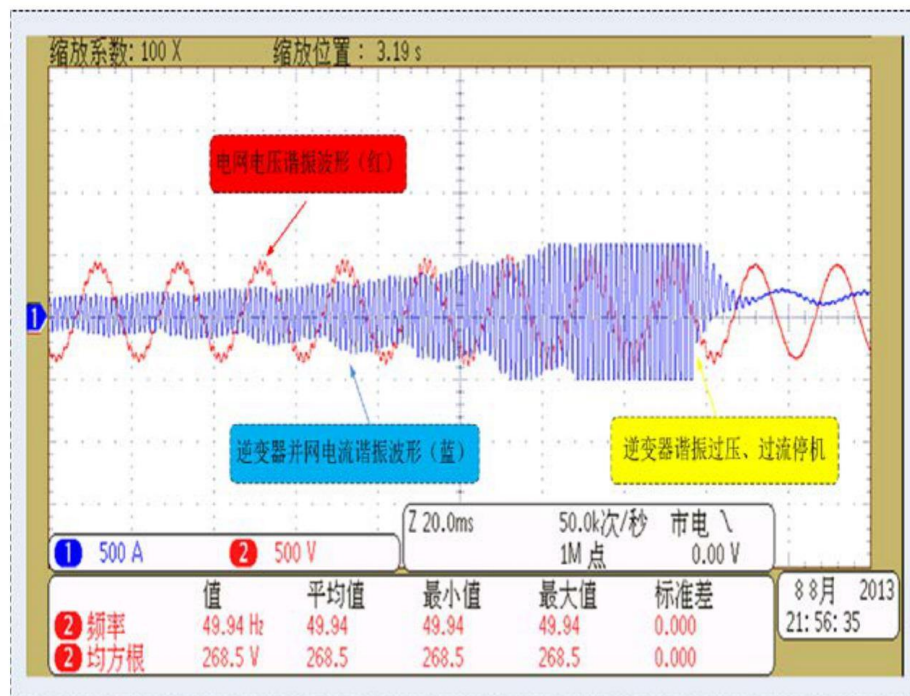


光伏电站拓扑结构图

挑战2：新能源引起的谐振



国家电网
STATE GRID



河南某20MW光伏并联谐振实测图

系统组成：4台500kW光伏并网逆变器接入10kV电网；

谐振现象：谐波电流特征为700Hz。



青海某分布式光伏与小水电的串联谐振

系统组成：13MW水电与2MW光伏组成独立供电系统，光伏电站与水电站距离30km；

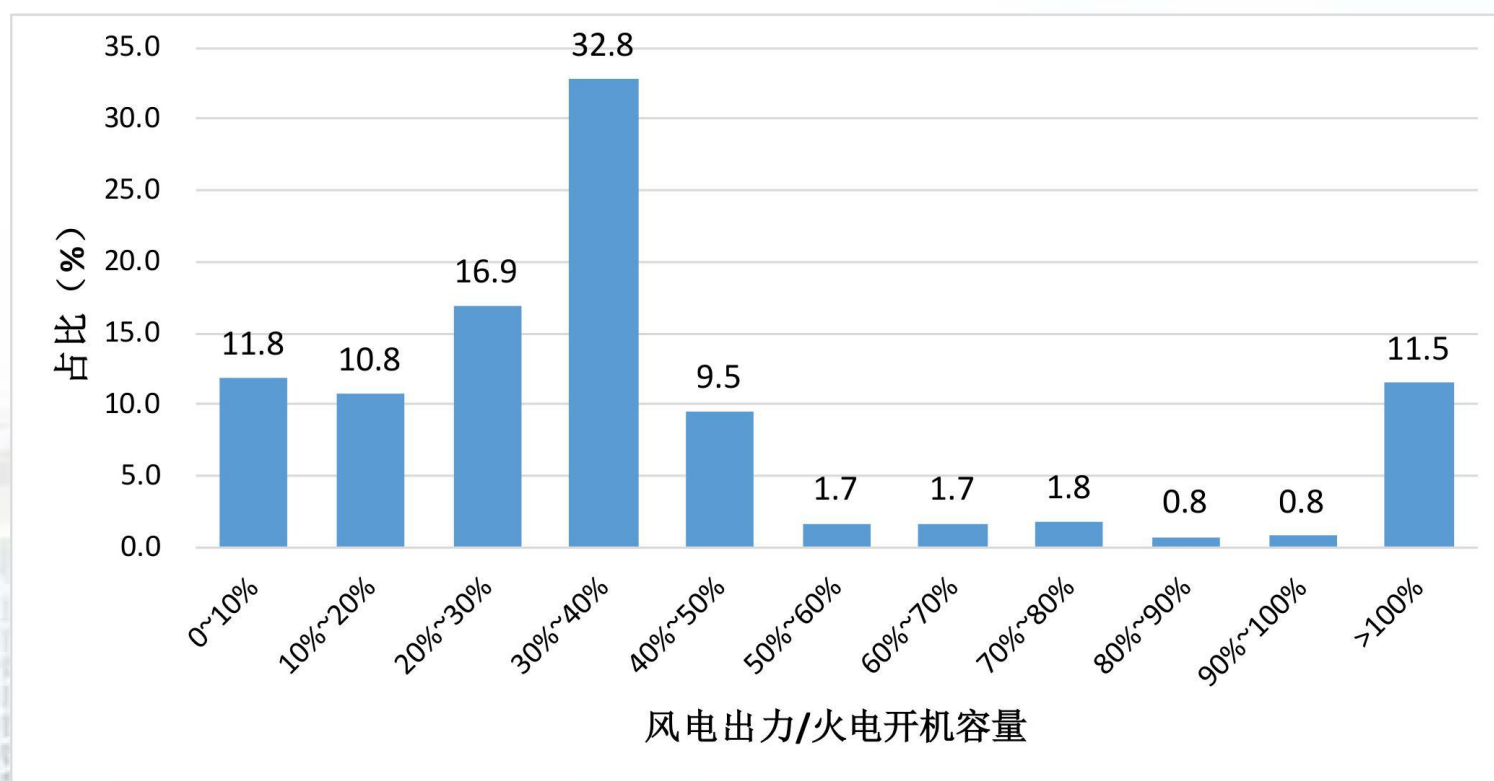
谐振现象：谐波电流特征为4次和6次谐波。

挑战3：系统转动惯量下降



国家电网
STATE GRID

□ 随着新能源出力的提高，常规机组运行台数减少，系统转动惯量随之降低。吉林电网全年有11.5%的时段新能源出力超过具有转动惯量的常规机组容量，对应全系统的转动惯量减小一半以上。



风电逐月发电量图（穿透率198%、电量占比40%、火电最小技术出力0.5）

谢谢！

