

# 可再生能源并网 面临的挑战及储能方案

——在中国电机工程学会2009年年会上的报告(摘要)

◆ 中国科学院电工研究所 齐智平

## 1 可再生能源融入电网面临的挑战

### 1.1 可再生能源发电的应用形式

将来的电网跟现在的电网有很大的不同,会有大量的可再生能源融入电网。可再生能源将来接入电网的形式可能有:①大规模光伏发电并网;②大型风电场并网;③各种形式的分布式发电并网,例如基于建筑物的屋顶光伏发电;④多能互补系统;⑤基于分布式能源的定制供电。

### 1.2 可再生能源发电并网带来的问题

可再生能源具有不可预测性和输出功率的波动性,所以可再生能源发电与现在基于火力发电、水力发电的这种集中发电有很大的不同。因此它会给电网带来很多问题,比如:①输出功率不稳定;②电压、频率波动;③电能质量;④供电可靠性;⑤相位不平衡;⑥输电阻塞;⑦故障检测与保护;⑧电力系统的规划面临一些新的困难。

图1和图2是国外关于风力发电和光伏发电输出功率的一些特性研究。由图可见,可再生能源的

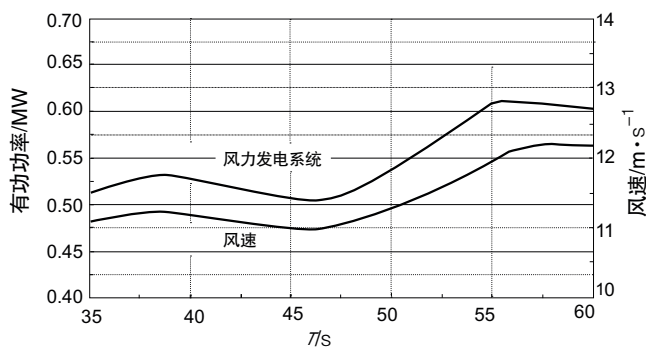


图1 风力发电系统的有功输出特性

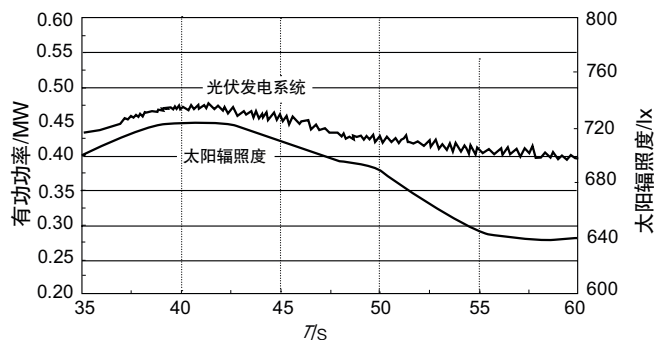


图2 光伏发电系统的有功输出特性

输出功率的波动还是很明显的,在20多s的时间段内幅度达几百kW之多波动。

### 1.3 分布式电源对配电网局部电压的影响

当分布式电源接入配电网的时候,也会给配电网的局部电压带来一些新的问题。

图3为分布式电源接入配电网时对局部电压的影响。图中的绿线就是配电网的局部电压分布曲线,因为输电距离的原因,局部电压呈逐步下降的趋势。如果在某一点接入光伏电源,那么在一定程度上就会抬高该处的电压。接入越多,电压抬高越多,甚至在某些情况下还会超过该处局部电压的额定值。在这种情况下,后续并入的分布式光伏电源就会受到限制,所以光伏电源的分布式接入就需要寻求一种新的解决方案。

### 1.4 分布式电源对继电保护的影响

分布式电源的并入还会对继电保护产生影响。

图4是传统的、目前在用的继电保护方案。图5为分布式电源接入继电保护的方式。由图可知,当

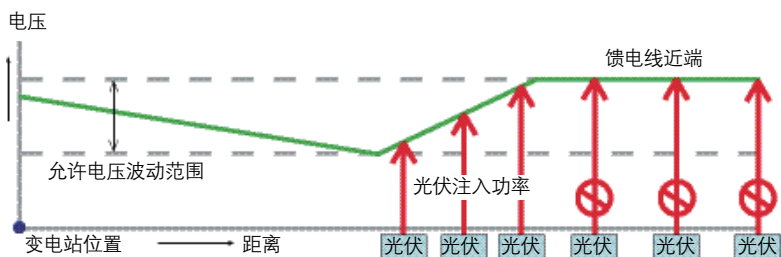


图3 分布式电源对配电网局部电压的影响

因为储能可以起到消峰填谷的作用，所以用户使用储能装置之后，可以从峰谷电价中获得经济效益。储能能够改善电力系统的供电质量，提高供电的可靠性，因此它可以减少或避免一些相关问题所带来的经济损失。比如芯片制造企业等有很精密的加工设备，有时受到电能质量的影响会造成很大的经济损失，

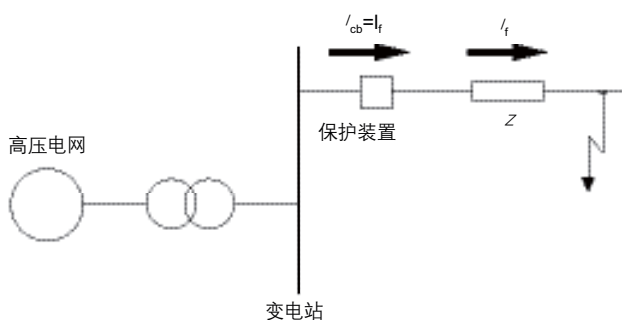


图4 传统继电保护方案

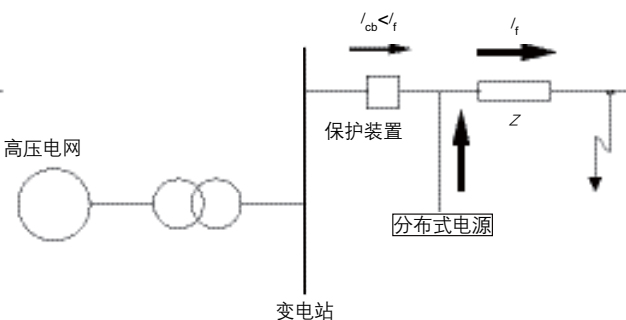


图5 接入分布式电源的继电保护

分布式电源接入电网以后，继电保护装置会出现检测不到后面分布式电源的接入的情况，所以就会导致对后端保护的失效。现有的保护方案都是基于电流单向的解决方案，但接入分布式电源后，就会产生逆向的电流。在这种情况下继电保护该怎样解决，这也是可再生能源或者分布式电源接入电网后的新问题。

## 2 基于电力储能技术的解决方案

储能具有很好的功率缓冲作用和能量缓冲作用。实际上储能可以为解决上述可再生能源并网时所产生的问题提供很好的解决方案。

### 2.1 电力储能在未来电网中的技术作用

储能对未来电网的技术作用有：①电网电压支撑（有功/无功功率的平衡）；②电网频率支撑（向电网输出有功功率，避免负荷与发电之间产生大的功率不平衡）；③电网相角稳定（通过注入和吸收有功功率，减小功率震荡）；④负荷平滑/削峰；⑤旋转备用；⑥改善电能质量（闪变、骤升、骤降等瞬态现象）；⑦提高供电可靠性（储能提供有功功率）；⑧穿越故障支撑（储能提供能量）；⑨不平衡负荷补偿（储能对某一相吸收或注入有功功率，以支撑不平衡负荷）。

### 2.2 电力储能在未来电网中的经济作用

储能技术还可以在经济上带来很多附加值。

所以装设储能装置后能改善电能质量和提高供电可靠性，其经济效益是十分巨大的。另外，如果有了大容量的储能装置，它就可以把可再生能源所发的电力先储存一下后再输出来，在一定程度上能够改善可再生能源输入功率的波动问题。

### 2.3 未来电网中储能与电网的集成

未来电网的各个层面都有可能接入储能装置或储能系统。在电网高压输电的线路中，可以接入储能系统以改善电网稳定性，平衡电网的功率波动。另外就是跟风力发电、风电场的集成。跟风电场集成后可以平滑和缓冲风力发电的波动。

在配电网，小型风电场和光伏电站，都必须要有储能的介入，以解决前述分布式电源接入电网以后的各种问题。关于光伏发电和储能的联合运营，例如日本在一个4MW的光伏电站中配1.5MW的钠硫电池和500kW的超级电容器，能收到比较好的平滑和改善可再生能源发电输入特性的效果。日本还开展了分布式发电与储能结合的定制供电系统研究与示范工作，系统中包含燃气轮机、燃料电池、光伏发电和储能单元等。这样的一个系统配置，可以实现对用户不同质量、不同需求的定制供电。

虽然电力储能技术有很多好处，但是在过去的电网中基本不用。因为过去在电网中可再生能源的比例比较小，而且用户对电能质量的要求不如现

在或者未来高。过去在电网中可以不接入储能装置，但是随着低碳经济的发展，在将来的电网中储能技术就会成为不可或缺的技术，虽然它有一些成本的问题。

### 3 电力储能技术及其发展水平

#### 3.1 储能技术的发展水平

目前有的储能技术包括：抽水蓄能、压缩空气储能、钠硫电池、液硫电池、铅酸蓄电池、锂电池、镍镉电池、超级电容器、超导储能、金属空气电池和飞轮储能。在众多储能技术里，目前只有抽水蓄能和铅酸蓄电池是成熟的储能技术，已经得到广泛的应用。其它的储能技术都还停留在技术研发和示范应用阶段。各种储能技术的特点也不一样，比如，抽水蓄能和压缩空气储能比较适合用于大容量、大规模的储能场合；超级电容器、飞轮储存的能量并不多。超导、超级电容器和飞轮有一个很重要的特点是响应速度很快，所以适合用于电能质量、电网运营稳定性要求较高的场合。

目前，各种储能技术的发展水平如下：

(1) 抽水蓄能：1~3000MW，10~10000MWh，效率75%~80%，启动时间15s，\$600~\$2000/kW，\$10~\$125/kWh。

(2) 压缩空气储能：1~300MW，10~3000MWh，效率<70%，启动时间12m，\$450~\$830/kW，\$80~\$180/kWh。

(3) 全矾液流电池：1~10MW，10MWh，\$1290~\$2620/kW，\$262~\$645/kWh。

(4) 钠硫电池：1~10MW，48MWh，450/kWh。

(5) 铅酸电池：10MW/40MWh，\$320/kW，

\$200/kWh。

(6) 超级电容器：1kW~5MW，1~10kWh，效率>95%，启动时间5ms，\$400~\$500/kW，\$750~\$1370/kWh。

(7) 飞轮储能：2kW~2MW，1~100kWh，效率70%~90%，启动时间5~25ms，\$460/kW，\$380/kWh(低速)，\$1000/kWh(高速)。

上述数据主要来自美国Business insights技术咨询公司。其中一些数字，笔者根据其它调查分析做了修正。

抽水蓄能和压缩空气储能的优点就是适用于大规模储能的场合，而且这两种储能技术的成本比较低。液硫电池和钠硫电池也可以实现比较大的储能规模，但不如抽水蓄能和压缩空气的储能规模，目前在示范应用的阶段。超级电容器和飞轮储能技术目前已比较成熟，但仍有很大的技术发展空间。

#### 3.2 储能技术的经济性

各种储能技术的安装成本见表1。

这里统计储能技术的经济性，是从单位kW成本和单位kWh成本来讲的。目前在很多场合储能已经具有应用价值，而且其经济成本也是可以接受的。另外，还要看它的运行、维护成本和储能效率。如果效率不高，则会严重制约储能技术的运用和推广。各种储能技术的运行、维护成本和效率见表2。

#### 3.3 储能技术的分类

储能可分为长期储能和短期储能。长期储能如抽水蓄能和压缩空气储能。包括钠硫电池、液硫电池等先进的储能技术，在电网中应用的主要目的是调峰。这些储能技术，要求它的放电时间要长，

表1 各种储能技术的安装成本

储能技术	典型功率等级/MW	典型容量等级/MWh	成本/\$·(kW) <sup>-1</sup>	成本/\$·(kWh) <sup>-1</sup>
抽水蓄能	1~3000	10~10000	600~2000	10~125
压缩空气储能	10~300	10~3000	450~830	80~180
铅酸电池	3~20	4.5~40	570~1580	390~590
钠流电池	0.5~6	0.7~48	810~2270	230~810
锌溴流电池	0.03~0.25	0.05~0.5	500~2000	400~800
钒电池	0.03~3	0.24~1.5	1300~2600	262~645
飞轮储能	0.002~2	0.001~0.1	460	7600~1500000
超级电容器	0.001~5	0.001~0.01	400~500	750~1375
超导储能	0.1~100	0.001~0.03	220~510	1000000

注：资料来源于Business insights公司

表2 各种储能技术的运行、维护成本和效率

储能技术	确定性成本/ $\$/\cdot(\text{kW}\cdot\text{a})^{-1}$	不确定性成本/ $\$/\cdot(\text{kW}\cdot\text{a})^{-1}$	效率/%
抽水蓄能	3		75~80
压缩空气储能	19~25	70	<70
铅酸电池	7~50	7~8	75~80
钠流电池	19~50	3~9	85
锌溴流电池	13~40	9~16	70~80
钒电池	28~55	2~7	75
飞轮储能	20	10	70~90
超级电容器	13	7	>95
超导储能	15~22	9~12	90%大型装置

注: 资料来源于EPR1-DOE, Sandia National Laboratory, Business Insights

可以达到h级,最少也要达到min级。而短期储能,比如超导、超级电容器、飞轮,它们储存的能量并不多,但是因为它们充放电速度快,所以它们在电网中最主要的应用价值是改善电能质量。

#### 4 超级电容器和飞轮储能技术的发展及应用前景

##### 4.1 超级电容器的结构、原理和技术特点

超级电容器的结构和原理如图6所示。

超级电容器的技术原理在100多年前就被发现了,但在近十几年内才得到了比较快速的发展。其基本原理是双电层,直接储存和释放电核的原理,因此超级电容器的效率是很高的,充放电速度非常快。它的内阻也很低,因为它没有电化学反应,循环寿命很长,工作温度范围也很宽,并且环境又好。因为它的两级采用的都是活性炭,电解质也是像稀硫酸、氢氧化钾这种环境比较友好的材料。但是超级电容器也受一定的限制,因为超级电容器在放电时的电压是线性下降的。超级电容器具有电容的特性,能量密度比较低,工作电压比较小。应用于电气系统时,需要几百只、上千只电容器串联和并联,这样也给应用提出了一些问题。此外,它的自放电率比较高,所以它不适合用做长时间的储能设备,而用做电能质量的改善比较合适。

##### 4.2 超级电容器的技术发展水平

- (1) 能量密度: 对称型超级电容器1Wh/kg~5Wh/kg, 不对称型超级电容器最高为20Wh/kg;
- (2) 功率密度: 5~10kW/kg;
- (3) 循环寿命: 100万次;
- (4) 工作温度: -40~70°C;

国内外现在都已有超级电容器的产品。如美国的Maxwell是全球在超级电容器技术方面做得最好的企业,此外还有俄罗斯的ESMA和韩国的NESS等。这几家都是对超级电容器研发和产业化做得比较好的公司。

##### 4.3 超级电容器的主要应用领域

超级电容器运用最成功的是在电动汽车上,特别是混合动力车,此外是电力机车。因为电力机车的功率比较大,而且是频繁地启动和制动,所以

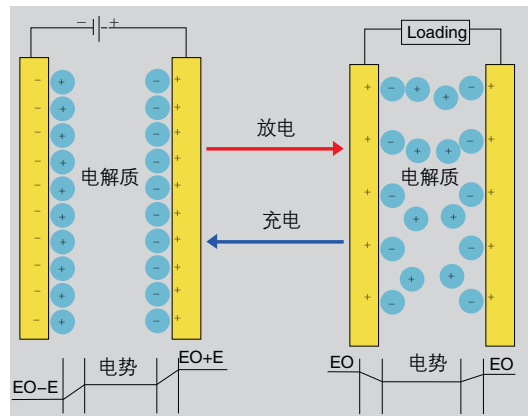


图6 超级电容器的结构和原理

在电力机车的供电的系统中,如果接入超级电容器储能系统来吸收制动能量、提供启动支撑,就会很好地改善此系统的特性。而且在电力机车的供电和驱动系统里,都必须接入制动电阻或者向电网回馈能量的装置。如果采用储能,既节能又改善了电能质量。但是目前还没有大规模应用,只是西门子公司有一些应用的示范。

日本用超级电容器做了一个5.8kWh的储能单元,目的是用于分布式可再生能源发电。美国TVA公司用超级电容器做了电能质量的调节设备。另外还有关于把超级电容器用于输电系统的一些探讨,目前还没有运行实例。在可再生能源发电中,还有一个典型的案例,就是把超级电容器用于风力发电变桨控制的不间断供电(UPS)。因为风机的运行环境是比较差的,特别是温差变化很大,有时运行于高温,有时运行于低温。目前,电动变桨的系统中大多采用铅酸蓄电池,由于工作环境的问题需要经常维护和更换,如果用超级电容器,就会有很大的改善。并且它所需要的储存能量并不是很多,正好适合超级电容器的特点。

#### 4.4 飞轮储能的基本原理及特点

飞轮储能的基本原理是把电能转化成机械能储存,释放的时候再把机械能转化成电能。其主要组成部分包括转子轴承、电动发电机和一个真空外壳。飞轮的一个很重要的特点是一个充放电循环的效率比较高。长时间储存能量的效率取决于轴承和风损,如果轴承做得好,长时间待机的效率也可以做得很高。国际上已出现了飞轮储能系统的产品,并获得实际应用。美国已开发成功基于碳纤维转子和高速磁悬浮轴承的先进飞轮储能技术,其成本比较高,但是可以获得较高的能量密度。这类飞轮储能示范系统已达到百kW级,可以储存50kWh电。目前正在研究MW级的、大容量的飞轮储能的阵列式飞轮储能电站。

#### 4.5 飞轮储能的主要应用领域

目前,大多数飞轮储能系统用于短时间供电支撑,也有一些用于长时间放电支撑的实例,如输出2kW/3h的飞轮储能系统。日本建成了世界上最大的飞轮储能系统340MW/30s。美国纽约地铁安装了1MW/6s飞轮储能系统,该系统为由10个100kW/1.6kWh飞轮组成的飞轮阵列,用于列车启动电压支撑和制动能量回收。美国能源部和California Energy Commission支持建设了100kW

的用于电网电压和频率控制的飞轮储能系统,并在2005~2006年内进行了18个月的运行测试。最终目标是建设1MW/250kWh的飞轮储能系统。

## 5 中科院电工所的相关研究工作

中科院电工所在储能技术用于可再生能源发电方面,做了几个方面的工作。首先建了一个微型电网的实验系统,有200kVA。这里包括模拟的风力发电单元、模拟光伏发电单元、微型燃气轮机和柴油机,另外还有蓄电池储能、超级电容器储能和飞轮储能系统,还有各种各样的负荷。

关于储能对微电网运行稳定性的作用和控制方法,在微型电网实验系统中做了相关的建模、仿真分析和实验。通过实验,验证了利用储能确实可以很好地改善微电网的运行稳定性。此外,关于储能对分布式可再生能源接入电网所产生的电能质量问题,以及它的作用和控制方法,电工所也开展了相关的研究和实验。另外在储能系统方面还做了超级电容器的动态UPS和基于超级电容器的电机驱动系统的节电装备,以及超级电容器和蓄电池的混合储能系统等方面的工作。

## 6 结束语

随着可再生能源发电技术的快速发展,电力储能技术将成为电网安全、稳定、高效运行必不可少的技术手段。现存的储能技术中,除抽水蓄能和铅酸电池外,其它储能技术均存在成本和一些技术限制因素,大规模推广应用还有困难。在储能技术研发方面,还需继续投入人力和物力,以满足可再生能源和电网发展的需求。

现在面临的现实,就是需要快速发展可再生能源发电技术,又需要储能技术。一种储能技术要解决所有问题是不大现实的,多种储能技术的综合和互补应用是值得探讨的一个技术路线。■



#### 作者简介:

齐智平,中国科学院电工研究所研究员,电力系统新技术研究部主任,所长助理。1983年毕业于北京航空学院第一分院计算机及其应用专业,获工学学士学位。1988年毕业于中国科学院电工研究所电工电能新技术专业,获工学硕士学位。主要研究方向包括:电力储能、分布式发电微型电网、电能质量控制和机电一体化。