平抑风电出力波动储能技术比较及分析

张 川[1]，杨 雷[2]，牛童阳[3]，张梦瑶[4]

(1.内蒙兴安供电公司,内蒙 兴安 137400；2.郑州供电公司,河南 郑州 450052；
3.洛阳供电公司,河南 洛阳 470009；4.美国南加州大学，美国 洛杉矶)

摘要：风电出力波动影响到其利用效率及电网安全，若利用储能设备可以减轻风电出力波动的影响。开展不同储能技术的特性和效能研究，目的是找到可用的平抑风电出力波动的设备。收集并研究了现有技术下储能设备的技术参数，并对其接入电网的方式、效能及规模效应等方面进行分析和技术经济对比。经过大量的数据分析，借助其他相关课题的研究成果，发现电网是唯一可聚集巨大调节能力的储能系统，也是目前最有效、最经济的储能系统。最终论证了中国减轻能源行业污染、增强能源安全，应该大规模开发三北的风电，而建设大电网才是我国开发大风电的出路。

关键词：风电；波动；储能；平抑；大电网

Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output

ZHANG Chuan[1], YANG Lei[2], NIU Tongyang[3], ZHANG Mengyao[4]

(1. Xingan Power Supply Company, Xingan 137400, China; 2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450052, China;
3. Luoyang Power Supply Company, Luoyang 470009, China; 4. University of Southern California, Losangeles USA)

Abstract: Wind power output fluctuation affects its efficiency and power system security. Using energy storage device can reduce the influence of the wind power output fluctuation. The characteristics and efficiency of different energy storage technologies are researched in order to find the available devices for stabilizing wind power output fluctuation. This paper collects and studies various technical parameters of existing energy storage devices, and makes technical and economic comparison of the methods connected to the grid, functions and scale effect. By use of a lot of data analysis and the findings of other related topics, this paper finds out that power grid is the only energy storage system can gather a huge ability of regulate, which is currently the most effective and economical energy storage system. Ultimately it proves that China should develop wind power in the three-north region on a large scale to reduce pollution in energy industry and enhance energy security, while the construction of large power grid is the way of the development of wind power in China.

Key words: wind power; fluctuations; energy storage; balance; large grid

中图分类号： TM732 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)07-0149-06

0 引言

中国的快速发展，需要大量的能源，2012年中国消耗原煤超过37.4亿吨[1]，能耗总量为世界第一位。2013年底我国发电装机达12.47亿kW，2013年最大负荷7.3亿kW，风电并网容量7 548万kW[2]，发电量可观[3]。同时面临着煤炭供应趋紧、减少碳排放及保护环境等日益增大的压力。

可再生能源很多，现阶段符合技术和经济可行性的能源中，规模最大的是风电。为了节约化石能源，保障我国能源安全，改善环境，必须考虑尽快大规模利用风电。

平抑风电出力波动，从而大大减轻了电网稳定运行(电压稳定、频率稳定、潮流可控及有序调度)的压力[4-5]，风电的大规模应用也就有了重大突破，这实际上是解决大规模电能的储存和释放的问题[6]。然而，到目前为止，详细的分析不够多，只是在争论如何更多地开发风电。

现有技术下，已知主要的储存电能的设备或系统有[7-8]：化学电池、氢燃料电池、超导体储能、飞轮、压缩空气、电容器、抽水蓄能电站和电网等。这些设备利用了不同的原理，只要形成规模，都可

以完成大型风电场储能的任务。

1 国情和需求

中国是一个以煤炭为主要能源的国家，煤炭占总能源消耗的78%以上，减排任务很重，特别是近些年的越来越严重的雾霾天气，引发是人们对环境的忧虑。这种消耗煤炭的方式，减少了能源储备，威胁到可持续发展。所以，大规模应用可再生能源，节约化石能源是一项具有战略意义的课题。

利用风电，必须考虑风电的特点。由于风电受气候影响较大，出力不稳定(如图 1 所示)，其主要特性表现在风电出力的波动性、不均匀性、不可控性、随机性等[9]。风电的接入对电网的安全运行影响很大，因此欧洲等国对并入电网运行的风电规模、风电出力严格限制，这样降低了风电的利用效率和收益。

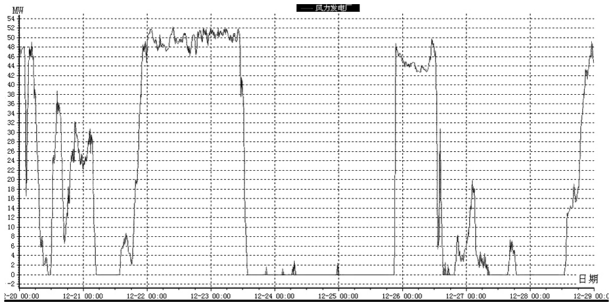


图 1 某风电场冬季发电功率曲线

Fig. 1 Waveform of a wind farm power output in winter

中国可利用的风电储量比较大，根据中国气象局全国风能资源数次普查结果和最新分析结论，我国风能资源总储量约 32 亿 kW，经济开发风能储量约 10 亿 kW，年发电量大于 2.4 万亿 kWh 。对我国而言，风电数量巨大而且集中在三北地区，当地根本吸纳不了且需要远距离输送，集中的风电对电网的影响可想而知[10]。还应该看到，中国处于季风控制之下，风的不均匀程度更加明显。我国冬春季节一次气候变化持续时间约 3~7 天，也就是在这段时间中三北的风电机组大都处于最佳发电期，若较好保证风电机组的均衡发电，必须结合中国的这个特别国情。这就是说，最好在约 7 天以内利用储能装置吸收多余的风电出力，过后再有序地释放电能。

充分利用不确定的风电，应该在风电最大可能发电出力时，吸纳风电出力的波动，把超过预计的风电出力转换成其它能量储存起来。如果考虑局部电网输送能力，避免出现建设电网投资过多的浪费，从一个区域考虑的话，应该以风电最佳发电季节的平均功率高值的 80%~90%来计算一个风电场的最大功率。这样，最小平均抑制风电出力的能力可以用吸纳多余风电出力的数量、速度和存储的电量来计算。如果以风电装机容量的 50%为可接受的平均功率，储能设备吸纳多余风电出力的能力应该可吸纳 30%~40%以上的风电装机容量在数天内的发电量。

按照三北风电装机 5 亿 kW 计算，要想吸纳至少 30%的风电出力，储能设备的装机规模应该达到约 1.5 亿 kW 。如果实现 7 天内风电出力波动不超过装机容量的 50%，那么，储能设备的能力为

$$E = P \cdot T \cdot D \tag{1}$$

式中：E 为储存的能量(kWh)；P 为功率(kW)；T 为每天的小时数；D 为天数。代入前述数据，有

$$E = 1.5 \cdot 24 \cdot 7 = 252 \text{ 亿 kWh}$$

上式反映了最大效率利用风电的对储能数量的要求，如果快速吸纳的风电出力数量大，存储的电量多，持续时间长，那么保证风电出力均衡的能力也就强，电网安全运行的可靠性也增加了。但是，实际应用中有一个最佳比例，这样，就会浪费一点风能。由于一个局部风电场日常出力可能在 0~P_e(P_e 为额定功率)之间，所以风电的不可控性影响到了它的大规模应用。

2 分类和原理

2.1 抽蓄电站

抽水蓄能电站的结构实际上就是一个水电站，以常规方式接入电网。其建设有上水库和下水库，水轮机、发电机等。上水库不像常规的水电站依靠有一定水量的河流，常年有水流入以发电，仅是一个可容纳一定水量的水库。它的运行只能依赖两个水库的水上下交替流动而运作。当电网需要电力时，电站把上库的水通过管道送给水轮机带动发电机发电；当电网处于负荷低谷的时候，电站的发电机以电动机方式运行，利用电网的电力带动水轮机把下库的水抽到上库存储起来，周而复始[11]。

由于环境和条件限制，抽蓄电站上下水库的容量也不够大，能够达到周调节已经比较困难。上下水库不是天然形成的，往往有一定的渗漏，因此抽蓄电站的效率一般在 75%~80%之间。运用比较好的电站，机组发电加抽水起动次数每年几百次到一千多次，因其一次起动的磨损相当 10 h 运行，机组多年平均可用率较低(85%)。统计表明，目前年运行小时数多在 2 000~3 000 h，只有个别的超过 3 000 h。

抽蓄电站的建设费用约 5 000~10 000 元/kW，按均值 7 500 元/kW 、使用 30 年计算、每年调节风电运行 1 100 h，不计及运行、输电的费用，一个

kWh 分摊的费用约 0.227 元。因为抽蓄电站的使用效率约 75%，这样，按 0.5 元/kWh的电价计算，损耗增加的费用约$0.5/0.75-0.5=0.16$ 元，两项共计 0.387 元/kWh 。

2.2 超导储能

超导储能(SMES)是利用超导线圈将电磁能直接储存起来，需要时再将存储的电磁能返回电网的装置。超导储能装置一般由超导线圈、低温容器、制冷装置、变流装置和测控系统几个部件组成。其中超导线圈是超导储能装置的核心部件，它可以是一个螺旋管线圈或是环形线圈。只要温度保持在临界温度以下，导体电阻≈0，电流便会持续下去。试验表明，其电流的衰减时间可≥10 万年。

超导储能装置的目标之一是在电网运行负荷处于其低谷时把多余的电能储存起来，而在电网运行处于用电高峰时，将储存的电能送回电网[12]。超导储能装置不仅可用于调节电力系统的峰谷，而且可用于降低甚至消除电网的低频振荡从而改善电网的电压和频率特性[13]，同时还可用于无功和功率因素的调节以改善电力系统的稳定性。

超导储能装置的重量轻、体积小、损耗小、反应快，功率也可以做的非常大，需经电子设备接入电网。因为超导储能装置建设和运行费用很高，商品化有待时日，目前储能量还不大[14]，无法将其列入经济比较范围。

2.3 压缩空气储能

压缩空气储能一般用在电网负荷低谷期将电能用于压缩空气，将空气高压密封在特定的空间存储。如报废矿井、沉降的海底储气罐、山洞、过期油气井等，在电网负荷高峰期释放压缩空气推动汽轮机发电的储能方式[15]。

尽管这种“压缩气体能源储备”的概念已经提出了 30 多年，但目前全世界仅有两家压缩空气发电厂：德国的压缩空气发电厂和美国阿拉巴马州的压缩空气发电厂，目前，两家运行多年压缩空气发电厂都运营正常，是非常成功的尝试。德国 1978 年建立的 290 MW 发电厂把压缩空气储存在盐坑中，储存 8 h 的压缩空气，足够使发电机全力运行 2h。另一个是美国 1991 年建立的发电厂，其把压缩空气储存在地下 450 m 的废盐矿中，可以为 110 MW 的汽轮机连续提供 26 h 的压缩空气。然而，压缩空气储能相比较效率不太高。

2.4 大型氢燃料电池及蓄电池

燃料电池本质是水电解的“逆”装置，主要由三部分组成，即阳极、阴极、电解质。其阳极为氢电极，阴极为氧电极。通常，阳极和阴极上都含有一定量的催化剂，用来加速电极上发生的电化学反应，两极之间是电解质。将氢气送到燃料电池的阳极板(负极)，经过催化剂(铂)的作用，氢原子中的一个电子被分离出来，失去电子的氢离子(质子)穿过质子交换膜，到达燃料电池阴极板(正极)，而电子是不能通过质子交换膜的，这个电子，只能经外部电路，到达燃料电池阴极板，从而在外电路中产生电流。由于供应给阴极板的氧，可以从空气中获得，因此只要不断地给阳极板供应氢，给阴极板供应空气，并及时把水(蒸气)带走，就可以不断地提供电能[16]。

氢燃料电池应用的关键技术就是离子膜，目前的技术，离子膜的成本太高，铂催化剂受环境影响容易中毒损坏、铂产量低等因素，氢燃料电池价格高昂，难以大规模应用。若计及电池较低造价 12 000 元/kW 、运行 12 年、每年调节风电运行 1 100 h，氢燃料电池的平均转换效率 70%，利用其储能增加的费用约是$0.5/0.7-0.5+0.909=1.12$ 元/kWh 。

一组 220V、500Ah 的蓄电池约 35 万元，按照寿命 5 年、每年调节风电运行 1100 h，那么利用其储能增加的费用约是：

$$350000/5/1100/110=0.578 \text{ 元/kWh}$$

2.5 电容器

电容器是一种能够储藏电荷的元件，也是最常用的电子元件之一，用字母 C 表示。电容器电容的大小，由其几何尺寸和两极板间绝缘介质的特性来决定。

制造工艺简单，价格便宜，能得到较大的电容量。实际中用多个电力电容器组成的电容器组，容量可达 1 万千乏甚至更大。

最近出现的超级电容器(supercapacitor，ultracapacitor)，又叫双电层电容器(Electrical Doule-Layer Capacitor)、法拉电容，通过极化电解质来储能。但是，由于超级电容器极间距离很小，其耐压水平比较低，一般不超过 5V，所以，大规模储能还不能使用[17]。

一个电容器存储的电能与电容量和电压的平方相关，即：

$$E=\frac{1}{2}CU^2 \tag{2}$$

式中：E 为储存的能量(kWh)；C 为电容器容量(法拉)；U 为电容器两端的电压(伏特)。

以一个耐压 35kV 三相电力电容器的容量 Qc＝1 千乏为例，能够存储的电量为

$$E=\frac{1}{2}\cdot\frac{Qc\cdot U\cdot U}{2\cdot\sqrt{3}\cdot\pi\cdot f\cdot U\cdot U}=\frac{1}{1088.3}\ \text{kWh} \tag{3}$$

式中：Qc 为无功功率(千乏)；f 是系统频率。

可见，存储的电量数是很少的。若存储 1 kWh

的电量，需要这样的电容器组 1088 组，造价达 $P=40\cdot1088=43530$ 元。如果设电容器使用 30 年、风电机组年运行 2200 h 且 50%时间电容充电，不考虑其它费用，仅造价而形成的费用是 $43530/30/1100=1.32$ 元/kWh 。

2.6 飞轮储能

飞轮储能是指利用电动机带动一个有一定转动惯量的飞轮高速旋转，将电能转化成机械能储存起来，在需要的时候再用飞轮带动发电机发电的储能方式。

旋转时的飞轮是纯粹的机械运动，飞轮在转动时的动能为

$$E=\frac{1}{2}J\omega^2 \tag{4}$$

式中：J 为飞轮的转动惯量；ω 为飞轮旋转的角速度。

飞轮的转动惯量正比于飞轮的直径和飞轮的质量，过于庞大、沉重的飞轮在高速旋转时，会受到极大的离心力作用，往往超过飞轮材料的极限强度，很不安全。因此，用增大飞轮转动惯量的方法来增加飞轮的动能是有限的。而角速度 ω 与转速相关，这是提高飞轮储能数量的关键，当前电机中飞轮转速达 700 ~2000 转/s，有人设想将来会达到 10 万转/s 以上。所以，解决新材料、高功率高速电机问题，是飞轮储能研究的重要方面。

设计完美、维护精细的飞轮储能设备寿命能够达到 15 年以上，超过常规的蓄电池。现在设计的电驱储能飞轮在真空中旋转，更先进的是磁悬浮飞轮，因此能量在输入、输出以及保持的过程中损耗非常小，美国比较优良的飞轮储能设备已经做到每天仅耗费所储能量的 2%以下。影响飞轮储能使用的重要问题是储能时间太短，这是因为旋转设备自身的损耗。

相比较飞轮储能的功率密度大，而且能量密度也大。增加飞轮储能的容量可以平抑风电的超短期出力波动，对应兆瓦级风电机组容量下，目前技术最多可稳定出力平稳达到分钟级，初步可满足限制短期波动的要求，关键是降低造价[18]。

上述几种储能设备，除了抽蓄电站外，都需要电子器件连接到电网，控制较复杂。它们平抑风电的方式为风电出力超出一定数值后，吸收多余的电能，待到电网需要时，释放所存储的能量。

2.7 电网

电网是最廉价、高效、快速、实用的变相储能系统，理论上可快速储能的数量接近于电网的最大可调节容量，现代大型风电场的运行，实际上就是利用了电网所具有的调节能量的能力。若机组出力受到限制、电网结构不合理或管理欠力，其能力受影响。

就象大船能承受更大的风浪一样，大电网的频率稳定性、电压稳定性是不言而喻的。大电网的频率瞬时稳定性基于两点：其一是电网的等效转动惯量非常大。当一个电网实际负荷达数千万千瓦甚至上亿千瓦时，一台百万千瓦的机组跳闸，对系统的频率影响很小。其二是发电机组的一次调频效应。发电机的原动机都配备了与转速成反比例的调整出力的系统，称一次调频。

电网的等效转动惯量可用电网的频率效应系数 K 衡量，根据计算，大电网的频率效应系数接近 $K=5$，可知功率变化值与频率变化值的比为

$$\frac{\Delta P}{\Delta f}=\frac{2KP}{100}=0.1P \tag{5}$$

式中：P 是电网的总负荷(kW)；f 是系统频率。

这就是说，频率变化 1Hz电网可容纳的波动功率是电网总功率的 10%。例如，华北与华中联网后 2013 年的经常性总负荷约 3 亿 kW，若保持频率在合格范围之内(±0.2Hz)，快速平抑的波动出力约 1200 万 kW 。

电网计及了发电机的一次调频能力后，电网的等效综合频率效应系数 $K_z=15$(分钟级)，对于我国平常近 6 亿 kW 的负荷而言，若保持频率在合格范围，电网快速自动调节的能力——可平抑的波动出力约 7 200 万 kW 。

只要电网具有足够的输电能力，就可用充分利用电网的自动调节能力，也就是解决了风电的波动问题——能量暂时的存储问题。这里，电网的输送能力为发挥电网的调节能力起到了桥梁的作用。

总费用计算(利用原有输电网，所以未计算电网建设费用，若需建设专用线路则应计入)。

未来大规模输送北方的风电，需要借助大容量的直流输电线路，一般情况下远距离直流输电的损耗约为 10%，火电厂调峰 50%时效率降低约 3%~6%计算，整体高压网损 2%，合计约增加费用 18%。仍取上网电价 0.5 元/kWh，调节的风电数量是其总容量的 50%，则电网的调节费用——每 kWh 增加的费用是：$0.5\times0.18\times0.5=0.045$ 元/kWh，大大低于其它方法的费用。

电网平抑风电的方式如下：风电出力快速增加时，系统频率也会增加，相关发电机的一次调频会自动减少自己的出力，以保持系统频率在合格的范围。超出发电机自动调整范围，电网的 AGC 便展开二次调整，并且可以根据电网的潮流，有选择地

调节相关发电机的出力，保持电网在最佳运行状态。

3 对比分析

几种储存电能的效率有较大的差别，电容器、超导储能装置效率最高，可超过 90%；利用电网的传输和调节能力，电网的效率(平均值)也可到 90%左右；抽水蓄能电站的效率可到 75%~80%；而根据氢燃料电池的工作特性，其效率可达 60%~80%，如果考虑到制氢和电子转换的效率，能量存储的效率只有 55%~75%。但是这些不同方案的比较，还有另外的技术指标，主要是对电网稳定运行的支持，对电网传输能力的要求等。上述设备的对比见表 1。

表 1 不同储能设备对比(电价单位:元/kWh)

Table 1 Comparison of different energy storage equipment

名称	化学电池	电容器	超导体	飞轮、空气	抽水蓄能	氢电池	电网
储能方式	化学	电荷	电磁能	机械	机械	化学	综合
寿命 a	3~5	＞25	＞20	＞20	＞30	＞10	~
工作温度	要求高	中等	严格	要求低	要求低	中等	无
环境污染	严重	低	无	无	低	低	无
体积	最大	大	中	较小	最大	中等	不计
反应速度	慢	快	中	快	快	中等	快
储能密度	较小	中	小	大	大	较大	巨大
电价增量	＞0.578	1.32			0.387	＞1.12	≈0.045

4 结论和展望

中国要跟上能源转向的趋势，必须大规模利用风电并远距离输送[19]。在现有的技术条件下，若大规模开发及高效利用风电，所有的储能方式中，最经济并且可行的方案就是利用电网的储能能力。而我国利用大电网的快速调节能力，可以应对风电出力的数千万千瓦的瞬间波动；若再计及大电网的 AGC 功能和统一调度的管理，可以平抑超过 1 亿 kW 以上风电出力的缓慢波动。这就是说，如果我国有了更大的电网，就能充分开发利用南方的水电，进一步增加电网的调节能力，中国风电装机突破 10 亿 kW 不成问题(还不包括太阳能发电)，我国就有希望在新能源革命中占据制高点。

有关研究估计太阳辐射到地球的能量约 2%转变为风能，世界气象组织预计全球风能总资源量约 53 万亿 kWh/年，约是水力资源的 10 倍。现在全世界都在发展可再生能源，包括大多数第三世界国家。

欧盟在逐步修订可再生能源规划的基础上，最近则提出了从现在的混合能源阶段到 2050 年发电完全过渡到使用可再生能源。由此可见，我国须尽快建设大电网，才能消除风电发展的瓶颈，实现大规模使用风电和太阳能电力。

感谢：本文得到了鄢安河导师的悉心指点，在此表示真诚的谢意。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[2] 2013 年全国发电装机增长情况[N]. 电信息, 2014-02-15(3).
The national power generation installed growth in 2013 [N]. Electrical News, 2014-02-15(3).

[3] 董永平, 何世恩, 刘峻, 等. 低碳电力视角下的风电消纳问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 12-16.
DONG Yongping, HE Shien, LIU Jun, et al. Wind power consumption problem in the view of low carbon power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 12-16.

[4] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含风电接入的电网规划方案电能质量评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 56-66.
WANG Shenzhe, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Evaluation of power quality in grid planning scheme with wind power integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 56-66.

[5] 杨楠, 王波, 刘涤尘, 等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-239.
YANG Nan, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-239.

[6] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108-114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 108-114.

[7] 周宇, 蒋书运, 赵雷. 磁悬浮储能飞轮系统研究进展[J]. 机械工程学报, 2000, 36(11): 5-9.
ZHOU Yu, JIANG Shuyun, ZHAO Lei. Progression of research on flywheel energy storage system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(11): 5-9.

[8] 王成亮. 飞轮储能电机在风力发电系统中的应用[J].

新能源与可再生能源发电, 2009(1): 75-78.
WANG Chengliang. Application of flywheel energy storage motor in wind power generation system[J]. New and Renewable Energy Power Generation, 2009(1): 75-78.

[9] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Impacts of large-scale wind power receive on electric power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.

[10] 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, 33(4): 70-75.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 33(4): 70-75.

[11] 张娜, 董化宏, 何学铭. 我国抽水蓄能电站建设必要性和前景[J]. 中国三峡, 2010(11): 16-20.
ZHANG Na, DONG Huahong, HE Xueming. Necessity and the prospect of construction of pumped-storage power station in China[J]. China Three Gorges, 2010(11): 16-20.

[12] 周雪松, 权博, 马幼捷, 等. 超导磁储能装置在风电系统控制中的应用[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 5-9.
ZHOU Xuesong, QUAN Bo, MA Youjie, et al. Applications of a super-conducting magnetic energy storage system in a wind power system[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 5-9.

[13] 周双喜, 吴畏, 吴俊玲. 超导储能用于改善暂态电压稳定性的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 1-5.
ZHOU Shuangxi, WU Wei, WU Junling. Application of superconducting magnetic energy storage to improve transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 1-5.

[14] 李勇, 刘俊勇, 胡灿. 超导储能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 四川电力技术, 2009, 32(12): 33-36.
LI Yong, LIU Junyong, HU Can. Application and prospect of technology in the power system of superconducting magnetic energy storage[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(12): 33-36.

[15] 陈海生. 压缩空气储能技术的特点与发展趋势[J]. 高科技与产业化, 2011(6): 55-56.
CHEN Haisheng. Characteristics and development trend of compressed air energy storage technology[J]. High-Technology & Industrialization, 2011(6): 55-56.

[16] 钱伯章. 各种燃料的燃料电池发展动向[J]. 能源技术, 2002(3): 18-21.
QIAN Bozhang. The development of fuel cell with different fuel[J]. Energy Technology, 2002(3): 18-21.

[17] 王培波, 张建成. 超级电容器储能系统并网控制研究[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(6): 1-5.
WANG Peibo, ZHANG Jiancheng. Research on grid cut-in control of super capacitor energy storage system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(6): 1-5.

[18] 刘世林, 孙海顺, 顾明磊, 等. 一种新型风力发电机与飞轮储能联合系统的并网运行控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 249-255.
LIU Shilin, SUN Haishun, GU Minglei, et al. Novel Structure and operation control of a flywheel energy storage system associated to wind generator connected to power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 249-255.

[19] 王顺超, 吴金城. 应对风电机组高压脱网的继电保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 147-152.
WANG Shunchao, WU Jincheng. Relay protection methods for preventing disconnection of wind turbines from grid due to voltage rising[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 147-152.

收稿日期：2014-06-06； 修回日期：2014-10-18

作者简介：

张 川(1988-)，男，本科，助工，从事电力自动化和新能源工作；E-mail: zhangc-88.8@163.com

杨 雷(1979-)，女，在读博士，高工，研究方向为电力系统、新能源的利用；

牛童阳(1987-)，男，本科，助工，从事电力调控及电网运行工作。

(编辑 张爱琴)