

文章编号:1000-582X(2010)08-046-06

风电场储能容量合理取值范围分析

卢继平¹,朱三立¹,韩涛¹,吕东²,刘蕾²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

2. 重庆市电力公司城区供电局,重庆 400013)

摘要:风电场配置适当的储能容量可以有效改善因风速变化而造成的输出功率波动。针对怎样选取储能容量较为经济合理问题,在结合一种所需储能容量计算方法的基础上,提出了评判风电场输出改善效果的两种指标。通过详细分析储能容量合理取值受到的各种影响因素,利用储能容量成本及风电场输出功率平滑效果辅助判据,得出风电场储能容量合理的取值范围。

关键词:并网风电场;优化输出;储能系统;储能容量

中图分类号:TM911

文献标志码:A

Analysis of reasonable wind farm energy storage capacity range

LU Ji-ping¹, ZHU San-li¹, HAN Tao¹, LV Dong², LIU Lei²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology

Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing Urban Power Supply Bureau,

Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400013, P. R. China)

Abstract: The wind farm output power fluctuations caused by changing wind speed can be improved by configuring the appropriate storage energy capacity. For the problem that how to select the storage capacity more economical, two indicators for the judgment of the optimization wind power output are mentioned, which is based on a method calculating storage energy capacity. By detailed analysis of the all kinds of factors that can influence the reasonable value of storage capacity, and by using the cost of storage capacity and the smoothing effect of wind farm output as assistant criterion, a reasonable storage capacity range is discussed.

Key words: grid-connected wind farm; optimizing output; energy-storage system; energy-storage capacity

全球风能资源蕴藏量巨大,若能充分利用风能将大大改善世界能源结构,缓解全球能源供应紧张和环境问题,为世界可持续发展做出重大贡献。然而随着风电场规模的不断扩大,风电特性对电网的负面影响愈加显著,大规模风电场并网对系统稳定性和电能质量带来的影响不容忽视,如果这些问题得不到合适的处理,不仅会危及到负荷端用电,甚至

可能导致整个电网崩溃,这严重阻碍了风能的利用和风电的发展。

新能源、智能电网、电动汽车,这未来三大新兴产业的发展瓶颈都指向了同一项技术——储能技术。储能技术的应用将会在传统的电力系统设计、规划、调度、控制等各方面带来重大变革^[1]。目前热门研究的储能技术有:蓄电池储能技术、超级电容器

收稿日期:2010-03-24

基金项目:重庆市科委科技计划攻关项目(CSTC2008AB3047)

作者简介:卢继平(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力系统运行与控制等方向研究,

(E-mail)lujiping@cqu.edu.cn.

储能技术、压缩空气储能技术、超导储能技术、抽水蓄能技术和飞轮储能技术。

蓄电池储能技术^[2-3]成熟、成本低、可靠性好,但使用寿命短。超级电容器储能^[4-5]具有能量密度高、充放电循环寿命长、能量储存寿命长、维护工作极少等特点。压缩空气储能^[6-8]安全系数高、寿命长、可以冷启动、响应速度快。超导储能^[9-11]具有良好的动态特性、四象限运行能力和无损储能等优势。抽水蓄能^[12]启动迅速,运行灵活、可靠,反应快,但造价较高且受到地理条件的限制。飞轮储能^[13-14]具有储能密度大、充放电速度快且无环境污染的优点。

储能技术研究是一个方面,另一方面风电场储能容量合理取值也是一个不容忽视的课题。储能容量过小,会使其改善效果不明显,如果过大则会造成不必要的投资。目前关于这方面的研究还比较少,文献[15]以风电机组输出功率特性函数和风电场风速概率分布函数为基础,提出了一种计算大型风电系统长时间稳定输出所需储能容量的方法,并用实际风电场数据验证了该方法的有效性。但没有给出改善效果的判据,也没讨论储能容量合理取值的影响因素。

在文献[15]的基础上,首先给出了 2 种判定储能设备对风电场输出功率波动改善效果的指标,并结合实际因素(包括技术、成本等因素),详细讨论了储能容量合理取值的各种影响因素,得出风电场合理的取值范围。

1 风电场输出策略

1.1 传统输出策略

目前有两种解决并网风电场输出不稳定的策略。一种是风力发电机始终以最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)方式运行,当负荷较轻(如夜间)时,储存部分电能,当负荷重且遇到弱风时,将储能设备中的电能用于补偿。由于电网负荷的波动特性往往并不与风电功率的波动特性一致。这种方法仍存在如何合理选取储能容量大小的问题。如果夜间风速特别强,就需要很大的储能容量,否则将会引起风能浪费,于是很容易出现储能容量不够而造成的夜间风能浪费和白天储能不足的情况。另一种办法是采用降额发电,即在正常情况下,风电场不按照最大功率点跟踪的方式运行,而是按照最大功率的一定百分比进行发电。当风力上升或下降时,相应地降低或提升发电能力,以减缓发电量的随机波动。但是这种方法直接影响了风能利用的效率,降低了运营利

润,并且存在调节能力有限的问题。表 1 对风电场采用不同方式进行了比较。

表 1 风电场采用不同输出策略的比较

输出策略	优点	缺点
直接输出	无储能成本	对系统造成影响
降额发电	调节方便、控制灵活	容易形成资源浪费
最大功率点跟踪	输出平滑对系统影响小	储能容量大、成本较高

1.2 改善风电场输出的优化策略

文献[15]在结合双馈机组风速功率特性曲线和风电场风速概率密度函数的基础上,提出将储能设备用于改善风电场输出时容量大小的优化选取策略。具体步骤如下:

1) 根据风速概率密度曲线计算风电场输出功率的数学期望,其计算公式为

$$E = \int_{v_{in}}^{v_n} f(v)q(v)dv + \int_{v_n}^{v_{out}} q(v)dv, \quad (1)$$

式中: $f(v)$ 为风电机组输出功率特性函数; $q(v)$ 为风电场风速概率密度函数; v_{in} 、 v_n 和 v_{out} 分别为切入、额定和切出风速。

2) 将上述计算得到的输出功率期望值设定为风电场平均功率水平。

3) 找出与平均功率水平对应的风速值 v_1 , 该值比风电机组额定风速小。

4) 以风速 v_1 为基准值,将超过该值的能量用储能设备储存起来。用式(2)计算储能设备容量,其中 H 为启动风速以下时期望风电场持续输出的小时数。

$$S = E \times H. \quad (2)$$

上述计算方法可称之为实时储能补偿法,即风电场按照计算出的期望值对系统输出,将超出期望值的部分储存起来,当风速下降后,风电场的输出达不到期望值时,由储能设备补充,仍以期望值输出。

2 风电场优化输出效果

以甘肃某风电场为例,其 2006 年全年风速概率分布柱状图如图 1 所示。

结合风电机组输出功率特性函数计算得 $E = 0.59$ pu,即一个 100 MW 风电场经计算后得出的期望值为 59 MW。首先以 H 等于 5 h 时为例来说明并网风电场装设储能设备后对其输出功率波动的改善效果,可认为该风电场应装设的储能容量值为 $59 \text{ MW} \times 5 \text{ h} = 295 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。

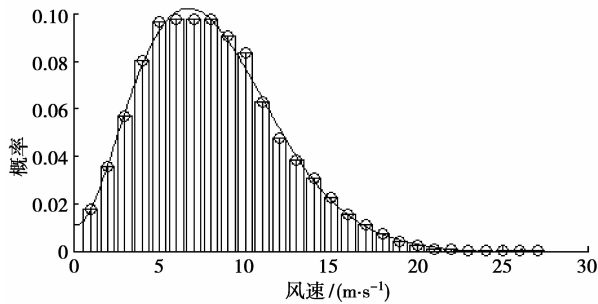


图 1 风速概率分布柱状图及其概率分布曲线

图 2~图 4 分别给出了风电场采用直接输出、最大功率点跟踪方式输出和实时储能补偿法时储能容量和风电场输出功率之间的关系。

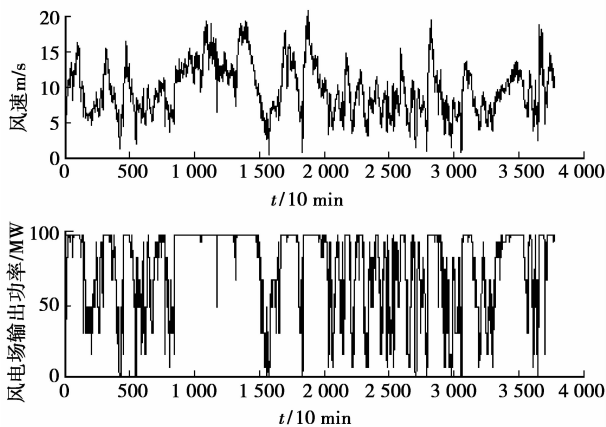


图 2 无储能设备时风电场的风速及输出曲线

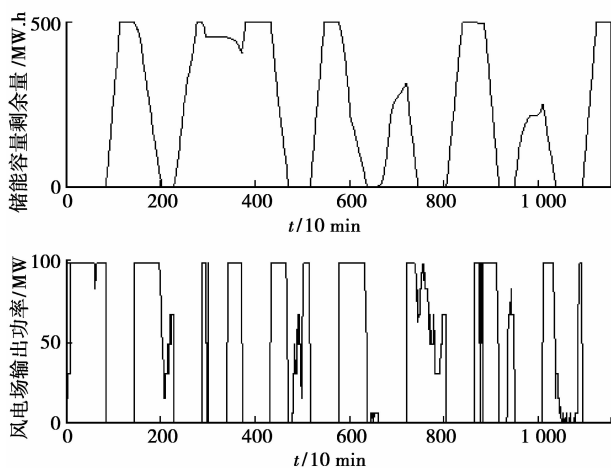


图 3 最大功率点跟踪方式下风电场输出曲线

对比图 2~图 4 可以得出风电场不设储能装置,其输出功率的波动性非常大。采用最大功率点跟踪方式储能时,风电场输出功率会大致呈矩形,而且白天仍然会出现功率输出不稳的情况,说明夜间存储的能量仍不能满足白天的功率缺口。而采用

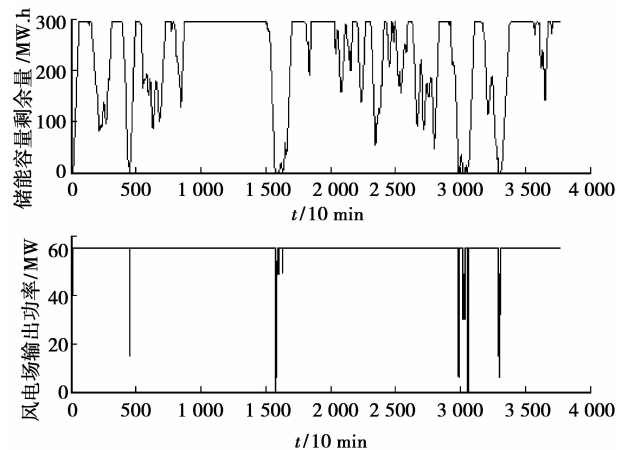


图 4 储能容量变化及风电场输出曲线

文献[15]所提出的实时储能补偿法后风电场能在相当长的时间内持续保持稳定输出,但仍有个别时间段不能实现稳定输出。这是因为当风电场持续低风速后,储能设备中的容量已经用完,而风电场的风速状况并没有好转,这时只能有多少风力发多少电了。

3 风电场平稳输出判据

风电场装设储能装置以后,其输出的不稳定性必然会得到改善。目前,关于要达到什么样的效果才算合理这方面的研究很少,也没有相关的定义和标准。如果储能容量过小就不会起到明显的储能效果,容量过大又不经济。故需要给出判定依据来判断风电场输出功率改善后的效果。

图 5 给出了采用储能设备平滑风电场输出后,风电场出力可能会出现的情况示意图,一是储能容量变化迅速,幅度大,另一种是储能容量变化幅值小,但持续时间长,还有则是这两种叠加在一起,当然还有介于这 2 种之间的情况。

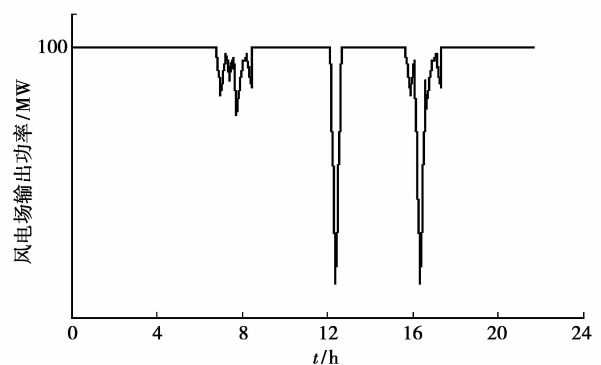


图 5 2 种典型的风电场输出功率变化曲线

判定风电场稳定性指标的方法是计算出不稳定输出时功率曲线包围的面积,再除以总面积,以百分

比的形式表示,如式(3)所示。

$$\eta = \left(1 - \frac{S_{\Sigma}}{S_{\Sigma}'}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中: η 表示输出功率的稳定系数; S_{Σ} 表示不平稳时段输出曲线包含的面积; S_{Σ}' 表示整个时间段期望输出曲线包含的面积。

这种计算方式将所有不平稳输出的情况都包含在里面,称之为指标一。

实际上,按照国家标准,只要风电场的输出功率波动不超过标准规定值就可以了。假定电网的旋转备用系数、发电机组频率静态特性系数、负荷的频率静态特性系数及风电所带负荷功率占总功负荷的百分比都确定的情况下,要达到标准要求,则风电场可以允许退出一部分功率。故可以认定,如果采取储能补偿措施后,风电场仍出现了功率波动大于限值的情况就判定为不稳定状态。于是风电场输出功率的平稳度系数可以修改为式(4)表示:

$$\eta = \left(1 - \frac{S'_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中: S'_{Σ} 为风电场输出功率波动大于标准规定时其超出部分功率曲线包含的面积,称之为指标二。

例如电网旋转备用系数 $\rho = 1.05$; 发电机组频率静态特性系数 $K_g = 10.4$; 负荷的频率静态特性系数 $K_l = 1.5$; 风电所带负荷功率为总有功负荷的15%,则按标准规定,系统能允许风电场退出的功率为48 MW,于是 S'_{Σ} 为风电场输出功率波动超过48 MW是其输出曲线包围的面积。

4 风电场储能容量合理取值范围

风电场储能容量合理取值受到多方面因素的影响,主要有以下几方面:

- 1) 技术因素
- 2) 成本因素
- 3) 风电场出力预测准确度因素
- 4) 风电场在电网中的比重因素
- 5) 电网调峰调频能力因素

如果按照第2节所举的例子,储能容量选取为295 MW·h,就目前而言,还没有那一种储能方式能够达到如此大规模商业运作。虽然5 GW·h级超导储能已通过可行性分析和技术论证^[1],但离真正生产出产品还有很长的路要走。即便是已经投入运行的几十 MW·h 级的蓄电池储能技术和飞轮储能技术,若是通过累加的方式达到这么大规模的储能容量也会出现比如占地面积等新问题。即是说以目前能够做到的储能设备从技术成面而言,还达不

到 $H=1$ h 的情况。

提出含大型并网风电系统储能容量计算方案的意义在于希望能找到一个尽可能小的储能容量值,使得风电场输出能够尽量平稳,这样就可以使储能技术尽快的大规模应用于风力发电。当某个风电场的期望输出由公式(1)计算得出之后,储能容量大小的决定性参数就是期望风电场持续稳定输出的小时数 H 值。为了能够合理的确定 H 的取值,文中从储能成本因素和风电场的输出稳定性之间的关系出发,用表2列出了不同储能容量(也即不同 H 值)与风电场稳定系数(2种计算方法)及储能成本之间的关系(甘肃某风场2006年3月数据)。储能成本按100美元/kW·h计算,表中储能成本数据是目前蓄电池储能的平均价格(该价格是在依据文献[16-19]中提到的成本范围和随着技术发展成本不断下降等因素后综合考虑而得出,目的是作为成本计算的基准),若是采用其它方式储能,该费用还要高。另外,如果风电功率的波动特性与电网负荷的波动特性一致,这时风电就有自然调峰的作用,反之,将会使电网的调峰问题更加突出。但考虑到风功率波动和负荷波动是2个基本独立的随机过程,故暂时不考虑负荷的波动。

表2 储能容量与输出功率平稳度的关系 ($E=0.59$ pu)

储能容量 /(MW·h)	H 值 /h	方法一	方法二	方法一	方法二	储能成本(万 美元)
		累计不 稳时间 /h	累计不 稳时间 /h	稳定系 数/%	稳定系 数/%	
15	0.25	242	107.8	76.9	86.1	150
30	0.5	225	106.7	77.9	86.2	300
60	1	205	103	79.5	86.7	600
120	2	177	92.3	82.1	88.1	1 200
180	3	156	82	84.1	88.4	1 800
240	4	137	71.8	85.9	90.7	2 400
300	5	124	63.3	87.5	91.8	3 000
360	6	112	56.5	88.8	92.7	3 600
420	7	102	49.5	89.9	93.6	4 200
480	8	92	45	90.9	94.2	4 800
2 400	40	15	7.5	98.6	99.1	24 000

从表2中可以清楚的看到,储能容量越小,风电场累计不稳的输出的时间越长,其稳定系数越小,不过需要的储能投资也越小。如果要想风电场达到像传统火电、水电一样的输出效果的话,所需要的储能容量就相当大。而且从表2中还可以看出,即便是储能容量达到了2 400 MW·h,风电场的输出还是

没有达到百分之百的稳定输出,这是由于风电场出现了长时间的无风状况,而在此之前风电场的储能容量积累也不够,这样的话无论如何也不可能保证风电场稳定输出。不过,这种情况一是比较少,二是可以通过历史数据和气象预测较为准确的提前知道,风电场和调度中心可以提前做好相关准备。

从表 2 中可以看到,2 种方法计算出的稳定系数差距比较大。这是因为采用指标一计算时,只要风电场出现输出功率不为期望输出功率,就会判定为不稳定的情况,这样计算出的不平稳度就较高,而指标二相对而言就低一些,采用第一种平稳度指标较为严格。若期望该风电场的稳定系数达到 80% 以上,采用第一种平稳度指标,则至少需要的储能容量为 120 MW·h (H 取 2 h),最保守估计需要的储能投资为 1 200 万美元,而一个 100 MW 级的风电场如果不设储能装置的话其总投资为 8~10 亿元^[17],所以要想保证风电场的稳定系数达到 80%,其储能投资成本就目前而言还是相当高的。如果采用第二种平稳度指标,只需较小的储能容量就能达到 80%,如果装设 240 MW·h 的储能设备就可以使风电场输出稳定性达到 90% 以上。

下面讨论另外一种情况,换一个风电场,它的风速概率密度函数算出的期望 $E = 0.7$ pu,说明这个风电场的风速状况好于前文举例时的风电场,表 3 列出了不同储能容量与风电场稳定系数及储能成本之间的关系。

表 3 储能容量与输出功率平稳度的关系 ($E = 0.7$ pu)

储能容量 /(MW·h)	H 值 /h	方法一	方法二	方法一 稳定系 数/%	方法二 稳定系 数/%	储能成 本(万 美元)
		累计不 稳时间 /h	累计不 稳时间 /h			
17.5	0.25	294	159	70.1	77.3	175
35	0.5	280	106.7	71.1	77.6	350
70	1	262	103	72.6	78.4	700
140	2	241	92.3	74.8	80.1	1 400
210	3	219	82	76.9	81.8	2 100
280	4	204	71.8	78.6	83.1	2 800
350	5	190	63.3	80.1	84.3	3 500
420	6	177	56.5	81.2	85.2	4 200
490	7	168	49.5	82.2	85.9	4 900
560	8	163	45	82.8	86.4	5 600
2800	40	107	7.5	89.1	91.6	28 000

从表 3 中可以得出采用第一种评判指标,该风

电场需采用 350 MW·h 的储能容量才可以使风电场的输出稳定系数达到 80% 以上。而且采用第二种指标也需要 140 MW·h 的储能容量才能使稳定系数超过 80%。

表 4 给出了期望 $E = 0.5$ pu 时不同储能容量与风电场稳定系数及储能成本之间的关系。

表 4 储能容量与输出功率平稳度的关系 ($E = 0.5$ pu)

储能容量 /(MW·h)	H 值 /h	方法一	方法二	方法一 稳定系 数/%	方法二 稳定系 数/%	储能成 本(万 美元)
		累计不 稳时间 /h	累计不 稳时间 /h			
12.5	0.25	220	66	82.8	92.6	125
25	0.5	205	64	83.8	92.8	250
50	1	181	60	85.3	93.3	500
100	2	148	52	87.6	94.1	1 000
150	3	129	45	89.1	94.9	1 500
200	4	115	39	90.5	95.6	2 000
250	5	103	33	91.7	96.3	2 500
300	6	87	28	92.9	96.8	3 000
350	7	73	23	94.2	97.4	3 500
400	8	60	18	95.4	97.9	4 000
1 000	40	5	0	99.7	100	10 000

从表 4 看出,风电场的输出期望降低,则需求的储能容量也跟着降低。采用较小的储能容量(125 MW·h)就可以使风电场输出稳定系数达到 80% 以上(第一种指标),如果采用第二种指标的话则可以达到 90% 以上。

对比表 2~表 4 可以得出,风电场的风速条件较好的话,其对储能容量的需求反而相对较高一些,这是因为风电场期望输出越高,他对系统输出的功率越大,存储起来的容量就越小,所以不稳定的情况越多。说明风电场的风速状况对储能容量的选择也是一个很重要的影响因素。

5 结 论

目前,大规模储能设备用于风电场的案例在国内还没有。要想充分利用风能且随着风电场规模的扩大,必将用到储能等设备。文中研究了如何利用储能设备选取合理的储能容量来平滑大型风电场因风速不均而造成的输出波动,进而减小风电场对电力系统的影响。并详细讨论了储能容量合理取值的影响因素,所提出的判断指标考虑到风电场的输出波动要符合相关标准规定。另外如果从风能利用率的角度出发还可以更加完善该判定方法。

参考文献:

- [1] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.
ZHANG WEN-LIANG, QIU MING, LAI XIAO-KANG. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7):1-9.
- [2] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术,2006,30(15):54-59.
ZHANG BU-HAN, ZENG JIE, MAO CHENG-XIONG, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system [J]. Power System Technology,2006,30(15):54-59.
- [3] SUZUKI I, SHIZUKI T, NISHIYAMA K. High power and long life lithium-ion battery for backup power sources [C]//The 25th International Telecommunications Energy Conference, Brazil, 2003:317-322.
- [4] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(4):1-4.
ZHANG BU-HAN, ZENG JIE, MAO CHENG-XIONG, et al. Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(4):1-4.
- [5] MADAWALA U K, THRIMAWITHANA D J, NIHAL K. An ICPT-supercapacitor hybrid system for surge-free power transfer [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007,54(6):3287-3297.
- [6] BUENO C, CARTA J A. Technical economic analysis of wind-powered pumped hydro storage systems. Part II: model application to the island of El Hierro[J]. Solar Energy, 2005,78(3):396-405.
- [7] SWIDER D J. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007,22(1):95-102.
- [8] LEE S S, KIM Y M, PARK J K, et al. Compressed air energy storage units for power generation and DSM in Korea[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, 2007:1-6.
- [9] SIMO J B K. Exploratory assessment of dynamic behavior of multi-machine systems stabilized by a SMES unit[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995,10(3):1567-1571.
- [10] 崔林,文劲宇,程时杰. 超导磁储能系统抑制风力发电功率波动的研究[J]. 电力科学与技术学报,2008,23(1):24-30.
CUI LIN, WEN JIN-YU, CHENG SHI-JIE. Research on the application of superconducting magnetic energy storage unit to damp wind generation power fluctuating [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008,23(1):24-30.
- [11] NOMURA S, OHATA Y, HAGITA T, et al. Wind farms linked by SMES systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005,15(2):1951-1954.
- [12] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004(2):441-448.
- [13] 阮军鹏,张建成,汪娟华. 飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电力科学与工程,2008,24(3):5-9.
RUAN JUN-PENG, ZHANG JIAN-CHENG, WANG JUAN-HUA. Improvement of stability of wind farms connected to power grid using flywheel energy storage system [J]. Electric Power Science and Engineering, 2008,24(3):5-9.
- [14] RUTBERG P G, GONCHARENKO R B, KASHARSKY E G, et al. About prospects of application of the fly wheel stabilizer of frequency in a power system [J]. Pulsed Power Plasma Science, 2001, (2):998-999.
- [15] 韩涛,卢继平,乔梁,等. 大型并网风电场储能容量的优化方案[J]. 电网技术,2010,1(1):169-174.
HAN TAO, LU JI-PING, QIAO LIANG, et al. Optimized scheme of energy-storage capacity for grid-connected large-scale wind farm [J]. Power System Technology, 2010,1(1):169-174.
- [16] 普能和汇能: 储能领域双雄 [EB/OL]. [2009-12-11]. <http://finance.sina.com.cn/leadership/case/20091211/17197092531.shtml>.
- [17] 温兆银. 钠硫电池及其储能应用[J]. 上海节能, 2007(2):7-11.
WEN ZHAO-YIN. Sodium sulfur cell and its energy storage application [J]. Shanghai Energy Conservation, 2007(2):7-11.
- [18] 程苗苗,康龙云,徐大明,等. 风光复合发电系统中储能单元的容量优化设计[J]. 电气应用, 2006, 25(6):87-90.
CHENG MIAO-MIAO, KANG LONG-YUN, XU DAMING, et al. Optimal capacity of energy-storing section in pV/wind hybrid system [J]. Electrotechnical Application, 2006,25(6):87-90.
- [19] 贾宏新,何维国,张宇,等. 分布式钠硫电池储能系统在美国的安装与应用[J]. 华东电力, 2009, 37(12):2032-2034.
JIA HONG-XIN, HE WEI-GUO, ZHANG YU, et al. Installation and application of distributed NAS energy storage systems in USA [J]. East China Electric Power, 2009,37(12):2032-2034.

(编辑 陈移峰)