

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.024

储能技术在风电并网中的应用研究进展

李 强¹,袁 越¹,谈定中²

(1.河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098;2.江苏省电力公司,江苏 南京 210024)

摘要:简要介绍了储能技术的分类与应用范围,指出了大规模风电并网面临的主要问题.针对风电并网带来的系统稳定性、风电机组的低电压穿越、风电穿透功率、电能质量及系统运行经济性等方面的问题,详细阐述了基于储能技术的解决方案,并分析了各方案的优缺点.基于已有的研究成果,结合储能技术的特点,提出了储能技术在风电并网中应用的原则意见.

关键词:储能技术;风电并网;电压稳定;低电压穿越;风电穿透功率

中图分类号:TM715 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2010)01-0115-08

在能源安全 and 环境保护的双重压力下,技术成熟、具备规模化开发条件的风力发电在世界范围内取得飞速发展.尤其是进入 21 世纪以来,世界风力发电规模发展迅猛,总装机容量自 2000 年的 1 804 万 kW 增至 2008 年的 12 119 万 kW,年均增长 26.88%,且呈现增速逐步加快趋势^[1].

风电是典型的随机性、间歇性电源,大规模风电并网将给电力系统带来一系列挑战.风电接入电网造成的影响主要有:(a)风电的随机波动性使得风电成为扰动源,对电力系统的稳定运行构成威胁;(b)电网故障时风电机组受低电压穿越能力(low voltage ride through, LVRT)限制将自动脱网,导致电网运行状况恶化;(c)由于电网承受扰动的能力有限,超过电网容纳能力的风电将难以消纳;(d)风电的波动性还会造成系统接入点的电压波动,带来闪变等电能质量问题;(e)作为电源,风电接入电网将影响原有电力系统的运行方式,增加系统备用容量的需求,对系统运行的经济性产生影响.

储能系统(energy storage system, ESS)具有动态吸收能量并适时释放的特点,能有效弥补风电的间歇性、波动性缺点,改善风电场输出功率的可控性,提升稳定水平.此外,储能系统的合理配置还能有效增强风电机组的 LVRT 功能、增大电力系统的风电穿透功率极限(wind power penetration, WPP)、改善电能质量及优化系统经济性.

本文首先介绍了储能技术的分类及在电力系统中的应用范围,然后对风电并网给电力系统及风电机组自身带来的问题进行了分析,在此基础上详细探讨了储能技术用于解决相关挑战的可行性,最后给出了储能技术在风电并网中应用的建议.

1 储能技术的分类与应用

根据能量转换形式的不同,可以将储能技术分为 4 类:机械储能、电磁储能、化学储能和相变储能^[2-3].

机械储能的典型特征是将电能转化为机械能进行储存,常见的储能方式有 3 种:抽水蓄能^[3-5](pumped hydro storage, PHS)、压缩空气储能^[6](compressed air energy storage, CAES)和飞轮储能^[7](flywheel energy storage, FES).电磁储能的典型特征是将电能转化为电磁能进行储存,常见的储能方式有 2 种:超导储能^[8](superconducting magnetic energy storage, SMES)和超级电容储能^[9](super capacitor energy storage, SCES).化学储能的典型特征是将电能转化为化学能进行储存,常见的储能方式有 3 种:铅酸电池^[10]、液体电池^[11]以及 NaS 和 Li 等新型电池^[12].

常见的储能技术及其在电力系统中的应用方向如表 1 所示.

收稿日期:2008-12-18

基金项目:“十一·五”国家科技支撑计划(2008BAA14B02);江苏省研究生创新工程(CX09B-156Z)

作者简介:李强(1981—),男,河南正阳人,博士研究生,主要从事储能技术在可再生能源发电中的应用研究.E-mail:liqiang@hhu.edu.cn

表 1 常见的储能技术及其在电力系统中的应用方向^[2]

Table 1 Common energy storage technologies and their application in power system^[2]

分 类	储能技术	功率范围/MW	响应时间	效率/%	应用方向
机械储能	抽水蓄能	100 ~ 2 000	4 ~ 10 h	60 ~ 70	能量管理、频率调整与备用
	压缩空气储能	100 ~ 300	6 ~ 20 h	40 ~ 50	调峰、系统备用
	飞轮储能	0.005 ~ 5	15 s ~ 15 min	70 ~ 80	电能质量控制、频率控制
电磁储能	超导储能	0.01 ~ 20	1 ms ~ 15 min	80 ~ 95	系统稳定性、电能质量
	超级电容储能	0.001 ~ 0.1	1 s ~ 1 min	70 ~ 80	系统稳定性、电能质量
化学储能	铅酸电池	0.001 ~ 50	1 min ~ 3 h	60 ~ 70	备用、黑启动、电能质量
	NaS, Li	0.001 ~ 10	1 min ~ 9 h	70 ~ 80	平滑负荷、备用电源
	液体电池	0.01 ~ 0.1	1 ~ 20 h		平滑负荷、备用电源等

2 大规模风电并网面临的主要问题

2.1 稳定性问题

由于受到风资源随机波动性和间歇性的影响,风电场输出功率会随机变化,因此,大规模风电并网会引发系统稳定性问题.由于异步风电机组在启动及运行过程中需吸收大量无功,从而导致风电接入电网公共连接点(point of common coupling, PCC)的电压波动,容易引起电网薄弱地区的电压稳定性问题.而在有功备用不足的孤立电网中,过高比例的风电将会导致系统调频困难,频率稳定问题突出.

2.1.1 电压稳定性问题

风电并网引起的电压稳定问题,主要包括静态电压稳定和动态电压稳定问题.

静态电压稳定是指电力系统受到小扰动后,系统电压保持在允许的范围内,不发生电压崩溃的能力.静态电压稳定通常借助电压稳定裕度指标来衡量.当风电接入电网后,若风电场吸收无功,则风电场的容量越大系统的无功裕度越小,静态电压稳定问题越突出.文献[13]从静态电压稳定的角度探讨了风电接入电力系统的稳定性问题,分别采用 $V-Q$ 分析法、灵敏度分析法和模态分析法对一个 6 节点系统进行了分析,结果表明,随着风电容量的增加,系统无功储备逐渐减小.文献[14]结合实际电网,研究了双馈风电机组(double fed induction generator, DFIG)和定速异步风电机组引起的静态电压稳定问题,结果表明,定速异步风电机组需从系统吸收大量无功,恶化系统的电压稳定水平,而 DFIG 能够吸收或发出无功,暂态电压稳定特性远优于普通异步风电机组.

动态电压稳定性的分析需要考虑电网和风电机组发生严重故障的情况下,电力系统的动态电压变化情况.文献[15]采用线路故障极限切除时间为风电场的暂态电压稳定性指标,分别研究了恒速和变速风电机组的暂态电压稳定性,结果表明,随着风电场接入容量的增大,系统的暂态电压稳定水平明显降低,但变速风电机组的暂态电压稳定性优于恒速风电机组.文献[16]从电网的角度研究了风电并网的电压稳定性问题,结果表明, PCC 短路容量越小同一风电场接入引起的电压稳定问题越突出,风电场接入电网输电线路阻抗比 (x/r) 越大电压波动越严重.

2.1.2 频率稳定性问题

风电并网的频率稳定性问题主要表现在 2 个方面:(a)有功波动带来的频率变动;(b)风电改变系统的惯性时间常数导致频率波动速度的增加.

受风速波动的影响,风电机组有功输出也时刻发生变化,在备用容量不足的孤立电网中,频率稳定问题明显.文献[17]基于北爱尔兰电网的实际情况,认为风电比例增加到系统总容量的 10% 时,旋转备用需在目前的基础上增加 25%,否则难以保证系统的频率稳定性.

惯性时间常数表征发电机利用其转动动能提供额定功率输出的持续时间,惯性时间常数越小,转动动能越小,故障期间系统频率变化越快. DFIG 已被广泛应用于新建风电场,由于 DFIG 转速与电网频率的完全解耦控制,使得电网频率发生改变时 DFIG 无法对电网提供频率响应,因此,变速恒频 DFIG 的固有惯量对系统的惯性常数贡献为 0,无法帮助电网降低频率的变化速率^[15].分别采用 DFIG、普通异步机和同步机替代风电场,在系统损失同样的功率时, DFIG 接入电网引起的系统频率偏移最大^[15].

2.2 低电压穿越问题

风电机组的 LVRT 是指风电机组在 PCC 电压跌落时保持并网状态,并向电网提供一定的无功功率以支

撑电网电压,从而穿越低电压区域的能力^[18]. PCC 的电压跌落会使风电机组产生一系列过电压、过电流问题,危及风电机组的安全,为保护风电机组免遭损坏,通常电网故障时风电机组自动解列,不考虑故障的持续时间及严重程度.文献^[19]指出,故障发生时,若大规模风电机组同时从系统解列,电网将失去支撑,可能导致连锁反应,严重影响电网的安全运行.德国 E.ON 电力公司对并网风电机组的 LVRT 提出了严格的技术要求,如图 1 所示.

在风电比例较高的地区,若风电机组不具备 LVRT,电网的瞬间严重故障将导致大量风电机组自动切除,严重威胁电网安全运行.因此,研究如何提升风电机组的 LVRT 具有重要的理论及应用价值.

2.3 穿透功率极限问题

风电穿透功率极限 f_{WPP} 通常定义为系统所能容纳的最大风电装机容量占系统最大负荷的比例^[20],即

$$f_{WPP} = \frac{C_{\max}}{L_{\max}} \times 100\%$$

式中: $C_{\max}$ ——系统所能容纳的最大风电装机容量; $L_{\max}$ ——系统最大负荷.

f_{WPP} 主要取决于系统所能容纳的最大风电装机容量.在不同电网或同一电网的不同运行方式下,限制风电准入容量的主导因素不同,因此应具体问题具体分析.文献^[21]研究了频率稳定为主导因素的 WPP 问题,结果表明,要使系统的频率偏差不超过 1%,风电装机容量不应超过系统火电装机容量的 5%.文献^[22]通过对丹麦等风电比例较高的电网研究得出:电网互联能有效增大备用水平,提升 WPP 水平.随着电力系统中风电比例的逐步增长,研究系统如何容纳更多的风电显得非常必要.

2.4 电能质量问题

风速的随机变化以及风电机组本身固有的塔影效应、风剪切、偏航误差等均会导致 PCC 的电压波动,进而引起闪变等电能质量问题,而 DFIG 等风电机组中的换流器会产生一定的谐波污染,从而带来电压波动与闪变、谐波等电能质量问题.

文献^[23]基于新疆达坂城电网研究了风电接入所引起的电能质量问题,结果表明,在达坂城接入 400 MW 的风电机组后,达坂城电网的电压波动与闪变、谐波均能满足国标(GB 12326—2000,GB 14549—93)要求,风电的接入不会对地区电网的电能质量产生严重影响.但相关计算结果表明,风电并网会给电网带来一定的谐波污染,对电能质量要求较高的地区,风电引起的电能质量问题值得关注.

2.5 经济性问题

风电并网的经济性问题主要源于风电的随机间歇性使得电力系统为风电提供全容量备用,导致备用容量增加,经济性降低.此外,在欧洲 Nord Pool 等电力市场环境下,风电自身可控性差的特点使其参与市场竞争的时候缺乏竞争力,难以取得最大的经济效益^[24].

文献^[25]结合美国 FCRPS(Federal Columbia River Power System),探讨了大规模风电接入电网的经济性问题,认为风电只能作为负的负荷考虑,会增加系统的备用容量,降低系统的经济性,并提出了采用风电-水电联合运行来改善系统经济性的设想.

3 储能系统在风电并网中的应用

3.1 利用储能系统增强风电稳定性

增强电力系统稳定性的根本措施是改善系统平衡度,储能系统能够快速吸收或释放有功及无功功率,改善系统的有功、无功功率平衡水平,增强稳定性.

针对电压稳定性问题,文献^[14]探讨了储能系统改善电压稳定性并增加系统的风电接入容量问题,但该文仅对储能系统做了理想的假设,缺乏有效的动态仿真及理论分析.文献^[26-27]分别探讨了利用超导储能和超级电容储能系统增强风电稳定性的问题,设计了相应的控制策略,结果显示,超导储能和超级电容储能

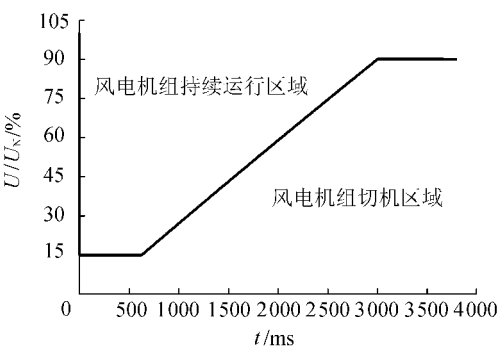


图 1 德国 E.ON 公司对并网风电机组 LVRT 的要求
Fig. 1 Requirements for LVRT of wind generator of E.ON Company in Germany

系统均能有效降低风电并网 PCC 的电压波动,平滑风电机组的有功输出,增强系统稳定性.

频率稳定性问题的研究主要集中在储能系统平滑风电输出功率方面.文献[28]研究了采用超导储能系统改善频率稳定性问题,仿真结果表明,超导储能系统在文中既定的条件下使得系统的最大频率偏差从 0.369 Hz 降为 0.095 Hz,有效改善了系统的频率稳定性,且超导储能系统容量越大系统频率偏差越小.此外,文献[26,29-30]分别研究了超导储能和超级电容储能系统用于平滑风电场有功输出的性能及相关控制策略,结果表明,超导储能和超级电容储能系统能有效改善风电输出功率及系统的频率波动.文献[15,31]针对变速风电机组设计了附加频率控制环节,分别通过对转子和风轮机的附加控制,使得 DFIG 对系统的一次调频有所贡献.针对这些控制方案将降低风电机组效率的缺陷,文献[32]提出了采用飞轮储能系统辅助风电机组运行,通过对飞轮储能系统的充放电控制,实现平滑风电输出功率、参与电网频率控制的双重目标,并通过仿真验证了方案的可行性.

可以看出 增强风电并网系统的稳定性需要配备快速响应能力的储能系统,如超导储能、超级电容储能、飞轮储能和蓄电池等储能技术,它们能在暂态过程中快速补偿功率不平衡量,增强系统稳定性.用于提升系统稳定性的储能系统通常对储能容量的要求不高,但应具备短时释放或吸收高功率的能力,只有配备合适的储能系统及容量并采取适当的控制策略才能取得最优的效果.

3.2 利用储能系统增强风电机组 LVRT 功能

在风电机组比例较高的电力系统中,LVRT 是影响系统稳定性的关键因素之一.文献[20,33-34]比较了有、无 LVRT 功能的风电机组在故障情况下的电网电压恢复情况,结果显示,有 LVRT 功能的风电机组并网能够有效解决风电并网所产生的电压稳定性问题,有利于系统稳定性的增强.

LVRT 功能实现的途径主要有 2 种^[20]:(a)改进控制策略;(b)增加硬件电路.改进控制策略只能降低电网故障时风电机组的暂态过电压、过电流,从能量守恒角度来看,不可能从根本上解决故障过程中的暂态能量过剩而产生的过电压、过电流问题,只能在电压、电流之间达到较好的一种均衡状态,减小故障期间过电压、过电流对风电机组的影响,仅适用于故障电压跌落不十分明显的状况^[35-36].而增加硬件电路则能从根本上解决风电机组故障期间的过电压、过电流问题,极大地增强风电机组的 LVRT 功能,尤其是储能系统的引入,为这一问题提供了较好的解决方案.文献[34]比较了改善风电机组 LVRT 功能的 2 种措施:(a)在变流器直流部分并联储能系统或在电机转子侧增加 Crowbar 电路,电路如图 2 所示;(b)通过改进电机磁通 Flux 的控制策略来控制转子电流.结果表明,这 2 种措施均能较好地改善风电机组的 LVRT 功能,但增加储能系统或 Crowbar 电路具有更好的效果.

文献[37]研究了 STATCOM/BESS(battery energy storage system)用于增强风电机组 LVRT 功能的问题,并设计了相应的控制策略,仿真结果表明,STATCOM/BESS 储能能有效增强风电机组的 LVRT 功能.增强 DFIG 风电机组的 LVRT 功能属于 ms 级的动态过程,仅有响应时间常数为 ms 级的储能系统方能在电网故障期间迅速吸收多余的能量,保证风电机组不受过电压、过电流的损害,实现增强风电机组 LVRT 功能的目标.

储能系统用于增强风电机组 LVRT 功能的研究主要集中在 2 个方面:(a)储能系统的选择;(b)控制策略的设计.鉴于 LVRT 属于电磁暂态过程,为吸收此瞬态过程中的多余能量以保护风电机组免遭损坏,必须选择快速响应的储能系统,采用合适的储能系统配以合理的控制策略才能达到理想的效果.

3.3 利用储能系统增加风电穿透功率极限

不同电网,限制 WPP 水平的主导因素不同,采用的储能系统也不同.

文献[38]探讨了采用飞轮储能、电池储能和超导储能系统增加 WPP 的问题,结果表明,这 3 种储能系统都能有效增加系统的 WPP,并能改善 PCC 的电压波动性.文献[39]结合新疆电网的实际情况探讨了该地区 WPP 的主导因素,计算结果表明,在冬季大方式和夏季小方式两种极端工况下,频率偏移和线路功率约束是限制 WPP 的主要因素.

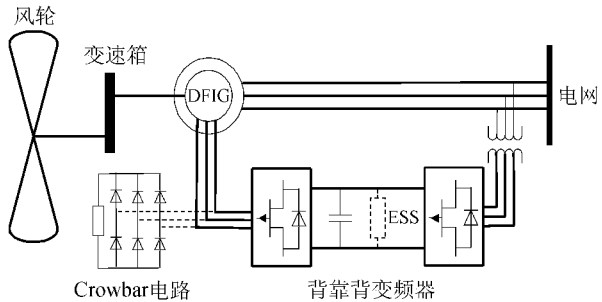


图 2 采用附加电路提升 DFIG 的 LVRT 结构

Fig. 2 Diagram of appendix circuit for LVRT of DFIG

可见,不同的系统限制 WPP 的主导因素不同.欲增加系统的 WPP,应首先确定限制 WPP 水平的主导因素,根据主导因素来寻求解决方案,方能起到良好的效果.

3.4 利用储能系统提高供电电能质量

储能系统在提高电能质量方面的应用主要集中在降低电压波动、电压暂降等方面.

文献[40]研究了采用 DSTATCOM/BESS 来提高电能质量的问题,结果表明,该储能系统能实现与系统的快速有功、无功功率交换,有效改善电压波动性,改善电压暂降、电压电流波形畸变及闪变等,适用于解决风电并网带来的电能质量问题.文献[27]设计了超级电容器的串并联混合型补偿方案,该方案通过并联系统实现超级电容与系统的功率交换以平滑风电输出功率,通过串联系统有效改善供电电压可靠性,抑制电压暂降.

可以看出,提高电压波动、电压暂降等电能质量主要是短时功率的动态补偿,需要储能系统具备 ms 级功率动态调节的能力,因此,选择超级电容储能、超导储能和电池储能系统是比较合适的.

3.5 利用储能系统优化风电经济性

随机波动的间歇性风电接入电网,将导致系统备用容量增加,系统运行经济性降低.合适的储能系统能够有效解决这一问题,实现电网与风电场的双赢.此外,在电力市场环境下,风电的竞争力较差,采用储能系统配合风电场运行,能够实现风电效益最大化.

风电-储能电站联合系统已在西班牙等地得到实际应用.文献[41-42]通过对岛屿电力系统中风电与抽水蓄能联合运行的建模分析,并结合西班牙 Canary 岛的实际情况,得出风电-抽水蓄能联合系统的最优运行策略.文献[43-44]研究了峰谷电价下风电和水电联合运行最优运行策略,指出联合运行能够取得可观的经济效益和环境效益.文献[45]探讨了峰谷电价下抽水蓄能配合风电场运行的能量转化效益,结果表明,采用 20 MW 的蓄能电站配合 50 MW 风电场运行的日能量转化效益达 1.9 万~6.6 万元,同时还能有效平抑风电输出功率的波动,降低风电引起的备用容量需求.

可见,采用抽水蓄能和压缩空气储能等储能系统能够有效解决风电随机性带来的对系统备用容量需求增加的问题,改善系统运行的经济性.尤其是在电力市场峰谷电价下,储能系统能实现风电在时间坐标上的平移,使风电参与电力调峰,优化系统经济性.

4 结 论

a. 为增强风电并网后的系统稳定性,应选择响应时间较快的超导储能、超级电容储能及飞轮储能等具备短时快速功率调节能力的储能技术,它们的快速功率响应能有效增强系统稳定性.

b. 为增强风电机组的 LVRT 功能,应采用具备 ms 级响应能力的超导储能和超级电容储能等电磁储能技术,它们能快速吸收电磁暂态过程中过剩的能量,保证风电机组的安全.

c. 为提高风电穿透功率极限水平,应根据限制穿透功率的主导因素来确定合适的储能系统.若系统暂态稳定性为 WPP 的主要制约因素时应选用飞轮储能、超导储能等具备快速响应能力的短时储能技术,而当系统调峰调频能力为主导因素时则应选用抽水蓄能、压缩空气储能等大容量长时间储能技术.

d. 为提高系统供电电能质量,应选用超导储能、超级电容储能和电池储能等具备快速功率交换能力的储能技术,以实现电压和电流的瞬时动态补偿,改善供电电能质量.

e. 为优化风电运行的经济性,应选用储能容量大的长时间储能系统,如抽水蓄能和压缩空气储能等储能系统,通过能量存储实现风电在时间坐标上的平移,并降低风电引起系统备用增加的幅度,从而实现经济效益的最大化.

参考文献:

- [1] World Wind Energy Association. Highlights of the world wind energy report 2008 [EB/OL]. (2009-02-12) [2009-02-28]. <http://www.wwindea.org/home/index.php>.
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] TER-GAZATIAN A. Energy storage for power systems[M]. Stevenage: Michel Faraday House, 1994.

- [4] SCHOENUNG S M, BURNS C. Utility energy storage applications studies[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 658-665.
- [5] Energy Storage Association. Energy storage technologies and applications [EB/OL]. (2008-05-10) [2008-12-10]. <http://www.energystorage.org>.
- [6] SCHAIKNER R B, NAKHAMKIN M. Compressed-air energy storage (CAES): overview, performance and cost data for 25 MW to 220 MW plants[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(4): 791-795.
- [7] AKAGI H, SATO H. Control and performance of a double-fed induction machine intended for a flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(1): 109-116.
- [8] REHTANZ C. Systemic use of multifunctional SMES in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1422-1427.
- [9] 张慧妍, 韦统振, 齐智平. 超级电容器储能装置研究[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 92-96. (ZHANG Hui-yan, WEI Tong-zhen, QI Zhi-ping. Study on ultracapacitor energy storage[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 92-96. (in Chinese))
- [10] ANTHONY G C, ALVIN J S, JOHN L S, et al. Rigid separator lead acid batteries[C/OL]//Proceedings of the 11th Battery Conference on Application and Advances. Long Beach California, USA: [s. n.], 1996: 279-282 (2002-08-06) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=485009.
- [11] HAWKINS J M, ROBBINS T P. A field trial of a vanadium energy storage system[C/OL]//Proceedings of the 23th International Telecommunications Energy Conference. Edinburgh Scotland, UK: [s. n.], 2001: 652-656 (2002-08-07) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=988634.
- [12] KAMIBAYASHI M, NICHOLS D K, OSHIMA T. Development update of the NaS battery[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission & Distribution Conference and Exhibition. Yokohama, Japan: [s. n.], 2002: 1664-1668 (2003-02-19) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1176850.
- [13] HA T L, SURYA S. Analysis of voltage stability and optimal wind power penetration limits for a non-radial network with an energy storage system[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa Florida, USA: [s. n.], 2007: 1-8 (2007-07-23) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4275501.
- [14] CHI Yong-ning, LIU Yan-hua, WANG Wei-sheng. Voltage stability analysis of wind farm integration into transmission network[C/OL]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Chongqing, China: [s. n.], 2006: 1-7 (2007-02-26) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4115920.
- [15] 迟永宁. 大型风电场接入电力系统的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [16] ZHOU Feng-quan, JOOS G, ABBEY C. Voltage stability in weak connection wind farms[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, USA: [s. n.], 2005: 1483-1488 (2005-08-01) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1489210.
- [17] HORNE J, FLYNN D, LITTLER T. Frequency stability issues for islanded power systems[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Power Systems Conference and Exposition. New York, USA: [s. n.], 2004: 299-306 (2005-04-18) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1397455.
- [18] 关宏亮, 赵海翔, 迟永宁, 等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 78-82. (GUAN Hong-liang, ZHAO Hai-xiang, CHI Yong-ning, et al. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 78-82. (in Chinese))
- [19] 王伟, 孙明东, 朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 84-89. (WANG Wei, SUN Ming-dong, ZHU Xiao-dong. Analysis on the low voltage ride through technology of DFIG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 84-89. (in Chinese))
- [20] 廖萍, 李兴源. 风电场穿透功率极限计算方法综述[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 50-53. (LIAO Ping, LI Xing-yuan. A survey on calculation methods of wind power penetration limit[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 50-53. (in Chinese))
- [21] LUO C L, BOON-TECK O. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-716.
- [22] LENNART S, LUTZ H, ANTJE O, et al. Experience from wind integration in some high penetration areas[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 4-12.
- [23] 李渝, 范高峰, 李庆, 等. 达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 88-92. (LI Yu, FAN Gao-feng, LI Qing, et al. The impact of Dabancheng wind farm integration on power quality of Xinjiang power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 88-92. (in Chinese))

- [24] HOLTINEN H. Optimal electricity market for wind power[J]. Energy Policy, 2005, 33: 2052-2063.
- [25] BROOKS D, KEY T, FELTON L. Increasing the value of wind generation through integration with hydroelectric generation[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, USA :[s. n.], 2005 :1923-1925(2005-08-01) [2008-12-12]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1489544.
- [26] 陈星莺,刘孟觉,单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66. (CHEN Xin-ying, LIU Meng-jue, SHAN Yuan-da. Application of super conducting magnetic energy storage system—SMES in wind power system of network-forming[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2001, 21(12): 63-66. (in Chinese))
- [27] 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. (in Chinese))
- [28] TOMKOI A, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Smoothing control of wind power generator output by superconducting magnetic energy storage system[C/OL]//Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems. Seoul, Korea :[s. n.], 2007 :302-307(2007-12-26) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4412245.
- [29] MOHD H A, TOSHIKI M, JUNJI T. Stabilization of power system including wind generator by fuzzy logic-controlled superconducting magnetic energy storage[C/OL]//Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drives Systems. Kuala Lumpur, Malaysia :[s. n.], 2005 :1611-1616(2006-04-18) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1619946.
- [30] ABBEY C, JOOS G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.
- [31] JENKINS E J N. Comparison of the response of double fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 800-802.
- [32] 孙春顺,王耀南,李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 111-116. (SUN Chun-shun, WANG Yao-nan, LI Xin-ran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(29): 111-116. (in Chinese))
- [33] RICHARD P, NICHALAS M, JUAN S, et al. Integrating large wind farms into weak power grids with long transmission lines[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission & Distribution Conference and Exhibition :Asia and Pacific. Dalian, China :[s. n.], 2005 :1-7(2005-12-05) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1546993.
- [34] JOOS G. Wind turbine generator low voltage ride through requirements and solutions[C/OL]//Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh Pennsylvania, USA :[s. n.], 2008 :1-7(2008-08-12) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4596605.
- [35] HE Yi-kang, HU Jia-bing, ZHAO Ren-de. Modeling and control of wind turbine used DFIG under network fault conditions[C/OL]//Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China :[s. n.], 2005 :986-991(2006-06-19) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1574925.
- [36] XIANG Da-wei, LI Ran, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [37] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Stabilization of wind farms connected with multi-machine power system by using STATCOM/BESS[C/OL]//Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems. Seoul, Korea :[s. n.], 2007 :232-237(2007-12-26) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4412232.
- [38] LI Wei, JOOS G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm[C/OL]//Proceedings of Power Electronics Specialists Conference. Orlando Florida, USA :[s. n.], 2007 :1280-1285(2007-10-08) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4342177.
- [39] 雷亚洲. 随机规划理论在风电并网系统分析中的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2001.
- [40] MOLINA M G, MCRCADO P E. Control design and simulation of DSTATCOM with energy storage for power quality improvement[C/OL]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission & Distribution Conference and Exposition :Latin America. Caracas, Venezuela :[s. n.], 2006 :1-7(2006-08-18) [2008-12-15]. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4104667&isnumber=4104474.
- [41] BUENO C, CARTA J A. Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems part I: model development[J]. Solar Energy, 2004, 78: 382-395.
- [42] BUENO C, CARTA J A. Technical-economic analysis of wind-powered pumped hydrostorage systems part II: model application to the island of El Hierro[J]. Solar Energy, 2004, 78: 396-405.

[43] EDGARDO D C, PECASLOPES J A. Optimal operation and hydro storage sizing of a wind hydro power plant[J]. International Journal of Electric Power & Energy Systems, 2004, 26(10): 771-778.

[44] 谭志忠, 刘德有, 欧传奇, 等. 风电-抽水蓄能联合系统的优化运行模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 58-62. (TAN Zhi-zhong, LIU De-you, OU Chuan-qi, et al. Optimal operation model for wind-powered pumped storage system[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(1): 58-62. (in Chinese))

[45] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 13-18. (LI Qiang, YUAN Yue, LI Zhen-jie, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind power and pumped hydro storage system considering peak-valley electricity price[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 13-18. (in Chinese))

Progress on application of energy storage technology in wind power integration

LI Qiang¹, YUAN Yue¹, TAN Ding-zhong²

- (1. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The classification and application range of energy storage technology are briefly introduced. Challenges for large-scale wind power integration are summarized. With regard to the problems in system stability, low voltage ride-through ability of wind the turbine generator, wind power penetration, power quality and economical operation of the power system induced by the grid integration of wind power, the recent progress of solutions based on the energy storage technology is discussed, and the advantages and disadvantages of various schemes are analyzed. Based on the existing research achievements and the characteristics of the energy storage technology, some suggestions are proposed for the application of energy storage technology in wind power integration.

Key words: energy storage technology; wind power integration; voltage stability; low voltage ride-through; wind power penetration

·简讯·

河海大学获准建设“江苏省水灾害监控与决策支持系统工程中心”

江苏省发展和改革委员会已批准河海大学立项建设“江苏省水灾害监控与决策支持系统工程中心”。

水问题是全世界共同面临的关系到人类生存发展的重要问题。我国当前面临的主要水问题是水资源短缺、水环境恶化、城市防洪、水灾害频繁、水土灾害流失加剧和水安全保障等。这些问题已经影响到我国经济社会的可持续发展,成为迫切需要解决的问题。江苏省是我国水利工程化程度和城市化程度最高的地区,又处在大江大河下游,水问题更显突出,传统工程的作用已接近极限,必须依托信息技术为代表的高技术手段,迅速提高非工程措施的能力。“江苏省水灾害监控与决策支持系统工程中心”将以河海大学为依托单位,与水利部南京水利水文自动化学研究所以及南京通达海科技股份有限公司共同组建。中心的技术研究与开发领域主要有:冰信息的自动采集与水工程监控技术与产品;冰信息的快速传输与可靠汇集关键技术及产品;冰信息在城市防洪预警预报与决策支持、保障饮用水安全和节水灌溉自动化等方面的应用系统软件产品等。

“江苏省水灾害监控与决策支持系统工程中心”也是河海大学计算机与信息学科的第1个省部级研究基地和跨学科高水平人才培养基地。

(本刊编辑部供稿)