

# 新能源电力系统中的储能技术研究综述

丛晶<sup>1</sup>, 宋坤<sup>2</sup>, 鲁海威<sup>3</sup>, 高晓峰<sup>3</sup>, 肖白<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林省吉林市 132012; 2. 辽宁省电力有限公司  
电力经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015; 3. 吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 该文综述了以风力发电为代表的新能源电力系统中储能技术的研究现状。首先讨论储能技术对含高比例风电电力系统的重要意义;其次系统地比较目前各种储能技术的研究进展,其中阐述了多种储能技术的原理,分析了各种储能技术的特性,总结了不同储能技术的优点和存在的主要问题及其应用范围。然后针对新能源电力系统,采用多种储能技术协调配合的、具有大容量、快响应能力的复合多元的综合储能技术。最后指出优化配置多种储能电源是有待深入研究的课题。

**关键词:** 新能源电力系统; 储能技术; 风力发电; 可再生能源

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2014)03-0053-07

## 0 引言

随着经济高速发展,整个社会对能源的依存度不断提高,风能、太阳能、海洋能、地热能等可再生能源(新能源)的开发和利用已经引起电力部门的高度关注。虽然这些可再生能源广泛地应用于电力系统发电中,并占据着越来越大的比重,但是因其随机性、间歇性等特点,使得这些可再生能源的利用受到了制约。采用储能技术能够使间歇性、波动性很强的可再生能源变得“可调、可控”,促进新能源的利用,保证新能源电力系统稳定运行。

从国家电网研究机构获悉,我国已经在甘肃、江苏沿海、吉林等风能资源丰富地区建立 10 个千万千瓦级风电基地,所以本文以含风电的电力系统为主要研究目标。

本文分类阐述了目前各种储能技术的基本原理,概述了不同储能技术的优、缺点,总结了其应用范围,指出了以风力发电为代表的新能源电力系统中储能技术需解决的关键技术问题。

## 1 储能技术在新能源电力系统中的作用

在新能源电力系统中,储能技术的主要应用包括电力调峰、抑制新能源电力系统中的传输功率的波动性、提高电力系统运行稳定性和提高电能质量。储能装置能够适时吸收或释放功率,低储高发,有效减少系统输电网络损耗、实现削峰填谷、获取经济效益<sup>[1]</sup>。

以时间为线索来描述国内外储能技术发展的关键节点,明确地显示出储能技术相关研究的基本发展过程,如图 1 所示。

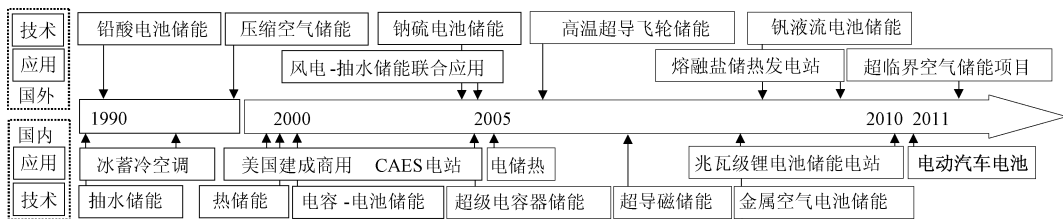


图 1 储能技术发展的关键节点

Fig. 1 Key nodes of energy storage technology development

收稿日期: 2013-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177009)、吉林省教育厅科技项目(吉教科合字[2012]第 101 号)

作者简介: 丛晶(1987-),女,满族,吉林籍,硕士研究生,主要从事电力系统储能技术及储能电源规划研究;  
肖白(1973-),男,吉林籍,教授,博士,从事电力系统规划、风险评估、继电保护等研究与教学工作。

大规模风电场群的发展,一方面拓展了电力系统一次能源的结构;另一方面,增加了电网在稳定方面的复杂性。由于风力资源具有不可控性,为了保证含高比例风电的区域电网的安全稳定运行,电力系统中需要配置一定容量的、具有灵活调节性能的储能电源。储能技术对风电并网具有重要作用。首先,采用具有快速响应和动态调节能力的储能技术能有效提高新能源电力系统的稳定性。

其次,选择具有快速响应能力的储能技术加上合理的配置策略,能吸收多余能量,保护风电机组,从而增强风电机组低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力。

最后,储能技术能优化新能源电力系统的经济性。采用大容量的抽水储能和压缩空气等储能技术,通过实现风电在时间轴上的平移,从而优化系统经济性,获取最大经济效益<sup>[2,3]</sup>。

## 2 各种储能技术分析

根据储能技术的特性,将储能技术分为:能量密度高、储能容量大的能量型储能技术:压缩空气储能、抽水储能、电池储能等;功率密度高、响应速度快、可频繁充放电的功率型储能技术:飞轮储能、超导储能、超级电容器储能等。

根据电能转化存储形态的差异,将储能技术分为物理储能、化学储能、电磁储能和相变储能四类。

### 2.1 物理储能

常用的物理储能方式有抽水储能、压缩空气储能和飞轮储能三种。

#### 2.1.1 抽水储能技术

抽水储能技术<sup>[4-7]</sup>(Pumped Hydro Storage Technology)利用低谷电价来储存能量,运行成本较低,由于水资源极易蒸发、泵水耗功率高等因素,使能量转换效率一般仅达到70%左右。

抽水储能技术分传统的江河大坝储能和新型海水抽水储能、地下水抽水储能。传统抽水储能电站需配备上、下游两个储水池,新型海水抽水储能系统的“下储水池”是大海,节省建设费用,但需考虑抽水设备的耐腐蚀性和海洋生物附着等方面的特殊要求。

抽水储能具有储能容量大、运行灵活、出力变率快、运行费用低等优点,但受水文和地质条件的制约,储能电站站址受限制。

抽水储能可在承担系统调峰、调频和事故备用等

方面发挥着极其重要的作用。利用抽水储能电站爬坡速度快、抽水—静止—发电三种状态转换灵活的特点,可作为紧急事故备用、频率调整、负荷跟踪等旋转备用容量。

抽水储能电站效益通常只考虑削峰填谷所带来的静态效益。随着电力系统的发展,抽水储能不再仅仅是储能发电,在实际电力系统运行中,承担多种动态任务,获得动态、静态相结合的综合效益。文献[7]基于系统调峰和旋转备用的综合要求,建立抽水储能电站的容量规划模型,分析抽水储能电站在电力系统运行中的综合效益。

#### 2.1.2 压缩空气储能技术

压缩空气储能<sup>[8]</sup>(Compressed Air Energy Storage, CAES)工作时分为储能和释能两个过程:储能时,风电机组输出功率较大,富余风电注入压缩空气储能电站,通过电动机驱动压缩机将空气压缩并降温后存储到储气室,储气室包括报废矿井、沉降的海底储气罐、山洞、过期油气井或新建储气井等;释能时,风电机组输出功率不能满足负荷需求,将高压空气升温后,进入燃烧室助燃,燃气膨胀驱动燃气轮机,带动发电机发电。

CAES的能源转化率较高,在75%左右。德国一座装机容量为29万kW的压缩空气储能电站的能源转化效率高达77%,若再配备一些先进技术,能源转化效率有望提升到80%以上。

CAES的储能容量大,燃料消耗少,成本较低,安全系数高,寿命长;但其能量密度低,并受岩层等地形条件的限制。压缩空气储能特别适用于解决大规模集中风力发电的平滑输出问题,文献[8]验证结果表明:压缩空气储能电站能调节波动功率,使风电注入电网的有功功率波动减小,从而达到平抑风电场功率波动,提高CAES装置应用的可行性的目的。

#### 2.1.3 飞轮储能技术

飞轮储能系统(Flywheel Energy Storage System, FESS)由飞轮、电机、轴承支撑系统、电子控制系统组成<sup>[9]</sup>,可看作是一个能量“电池”,效率达到70%~80%。储能时,FESS电能驱动电动机带动飞轮高速旋转,将电能以旋转体动能形式存储在高速旋转的飞轮体中;释能时,高速旋转的飞轮作为原动机带动发电机发电,将机械能转化为电能,输出给外部负载使用<sup>[10]</sup>。

飞轮主要分为机械轴承的低速飞轮和磁悬浮轴

承的高速飞轮两种,低速飞轮主要应用于系统稳定控制;高速飞轮适合峰谷调节等储能应用。

运行中,为了降低飞轮轴承损耗,提高飞轮转速和储能效率,提出非接触式磁悬浮轴承技术,将电机和飞轮都密封在真空容器内,减少空气阻力。高温超导飞轮储能系统(HTS-FESS)利用高温超导磁体轴承(SMB)无机械接触、自稳定等优点,可以实现高速无机械摩擦旋转,从而有效降低飞轮轴承损耗<sup>[11]</sup>。

FESS具有能量密度大、瞬时功率大、无充放电循环次数限制、充放电迅速、清洁高效等优点,但一次性购置成本较高。

## 2.2 化学储能

化学储能的主要方式是电池储能系统<sup>[12-18]</sup>(Battery Energy Storage System, BESS),通过电池正负极的氧化还原反应充放电,实现电能和化学能的相互转化<sup>[12]</sup>。BESS具有快速功率吞吐能力<sup>[13,14]</sup>,是目前最成熟可靠的储能技术。

电池种类繁多,应用于储能的主要有锂电池、铅酸电池、钠硫电池、液流电池和金属空气电池。经过对各种储能技术的能源转化效率、储能容量、技术成熟度、实施成本、风险分析等多方面分析,初步认可电池储能在新能源电力系统中的储能方面具有优势,且性能方面锂电池优于钠硫电池、液流电池和铅酸电池。

### 2.2.1 锂电池

锂离子电池是一种高能源效率、高能量密度的储能电池。锂电池储能系统主要由单体电池、充放电系统、电池管理系统等组成,综合效率约为85%。

锂电池储能具有能量密度高、充放电效率高、安全性高等优点,可以串联或并联来获得高电压或大容量,但成本也相对较高。

目前锂电池储能电站额定容量较小,对于配合新能源应用或提供应急电源、旋转备用等对储能功率要求较高的应用很有效<sup>[15]</sup>。

### 2.2.2 钠硫电池

钠硫电池<sup>[16]</sup>是以Na-beta-氧化铝为电解质和隔膜,以熔融金属钠为负极,硫和多硫化钠为正极的储能电池,其工作效率约为70%。

钠硫电池能量密度是铅酸电池的3倍,空间需求仅是其1/3。钠硫电池具有能量密度高、充放电效率高、运行成本低、空间需求小、维护方便等优点;但放电深度和循环寿命有待提高,运行时需要维持

300℃左右的高温。

### 2.2.3 液流电池

液流电池又称氧化还原液流电池,是将正负电解液分开,各自循环的一种高性能电池。输出功率取决于电池组的面积和单电池的节数,增大电解液容积和浓度,即可增大储电容量。

液流电池配置灵活,能实现规模化储能、深度放电和大电流放电且无需保护,适用于新能源发电的储能系统、应急电源和不间断电源系统。

液流电池储能系统具有高功率输出、快响应、能量转换率高、易于维护、安全稳定等优点<sup>[17]</sup>,是大规模并网发电储能和调节的首选技术之一,但是材料受限和成本昂贵是液流电池储能系统发展的薄弱环节。

### 2.2.4 铅酸电池

铅酸电池采用稀硫酸做电解液,二氧化铅和绒状铅作为电池正、负极的一种酸性蓄电池,具有储能容量大、技术成熟、成本低、维护简单等优点,但比能低、自放电率高、循环寿命较短、重金属污染且深度放电对电池损伤极大。

### 2.2.5 金属空气电池

金属空气电池是绿色电池,以氧气为正极,金属铝、锌、铁、镁等活泼金属为负极,KOH、NaOH、NaCl及海水为电解液,氧气扩散到化学反应界面与金属反应而产生电能。

金属空气电池比能高,其中铝空气电池的比能约为铅酸电池的8~10倍。它的制造成本低、绿色环保、原材料可回收利用、性能优越。而且金属空气电池无需充电设备,能在几分钟内更换金属燃料,快速完成充电过程。

目前,锌空气电池最接近产业化;铝空气电池可以获得较高的电池电压。文献<sup>[18]</sup>综述了铝空气电池的关键技术和研究现状,铝空气电池含有较高比能量,但充放电速度缓慢,常用作备用电源;阳极过腐蚀、氧电极极化和电池不稳定等因素制约其商业化应用。

## 2.3 电磁储能

电磁储能是一种将电能转化成电磁能储存在电磁场的储能技术。主要有超导磁储能和超级电容器储能两种储能方式。

### 2.3.1 超导磁储能技术

超导储能系统(Superconductive Magnetic Energy Storage, SMES)<sup>[19-21]</sup>工作时把能量储存在流过超导

线圈的直流电流产生的磁场中,效率高达80%~95%。

SMES具有高效率、快响应、无污染等优点,由于在超导状态下线圈不计电阻,能耗很小,可以长期无损耗地储能。但超导线圈需要置于极低温液体中,成本太高,增加系统复杂性。SMES能实现新能源电力系统对电压、频率的控制,提高风力发电机的输出稳定性;同时可实时交换大容量电能并实现功率补偿,有效提高瞬态电能质量及暂态稳定性。

文献[19]设计一套控制策略用于研究SMES能否增强风力发电稳定性和平滑风电场有功输出。仿真结果显示,SMES能够有效降低系统中的功率和电压波动,平滑有功输出,增强电力系统稳定性。文献[20]经过分析证实把电压偏差作为SMES有功控制信号能够有效提高风力发电系统稳定性,平滑功率输出。文献[21]利用SMES对电力系统稳定性进行控制,从根本上改善了电力系统稳定性。

### 2.3.2 超级电容器储能技术

超级电容器<sup>[22-28]</sup>依据双电层原理直接存储电能,是一种介于常规电容器和电池之间的储能装置<sup>[22]</sup>,充放电过程具有良好的可逆性,可以反复储能数十万次,超级电容储能的效率达到70%~80%。

超级电容器在承袭常规电容器优点的基础上,又具备温度范围宽、安全稳定等特点,适合短时充放电<sup>[23]</sup>。超级电容器可向新能源电力系统提供备用能量、改善电网动态电压变化、提供电动汽车瞬时高功率<sup>[24]</sup>。

由于超级电容器响应快、循环寿命长;电池能量密度高、循环寿命低,将二者结合形成的储能系统能发挥各自优点的同时互补不足。文献[25]在满足储能需求的前提下,通过超级电容器提高电池充放电效率,减少循环次数,延长电池寿命。文献[26]在合理设计双层控制模型和充放电控制器的辅助下,提出的蓄电池和超级电容器混合储能系统可广

泛应用于风电场抑制风电功率波动。文献[27]超级电容器和蓄电池混合储能系统中储能元件根据各自特性平抑不同类型的风电波动功率,使得风电输出功率在平抑后能够符合电力系统实时调度的要求。

文献[28]在基于异步发电机的电力系统中应用串、并联混合的超级电容器储能系统,可同时双向、大范围、快速调节有功和无功功率,改善系统稳定性。

### 2.4 相变储能

相变储能<sup>[29-32]</sup>是利用相变材料吸、放热量从而存储和释放能量的储能技术,不仅能量密度高,且所用装置简单、设计灵活、使用方便且易于管理。主要分为电储热、熔融盐储热及冰蓄冷技术。

电储热技术<sup>[29]</sup>的方式是水储热和金属储热。水储热技术是以水为介质存储热能,具有维修方便、投资少等优点。高温金属储热技术是以金属为储热介质,通过金属固液变换实现热能的存储和释放,具有储热温度高、导热系数高等优点<sup>[30]</sup>。

熔融盐储热技术的基本原理是先将固态无机盐加热到熔融状态,再利用热循环实现传热储热。熔融盐具有腐蚀性低、使用温度范围广、传热性能高、价格低廉等优点,但导热系数较低直接导致其储热利用率低<sup>[31]</sup>。

冰蓄冷技术的基本原理通过蓄冷介质结冰融冰实现冷量的存储和释放。冰蓄冷技术能够减少制冷机组容量,提高制冷机组效率,满足空调等制冷设备的高峰负荷<sup>[32]</sup>。

## 3 结论

本文综述了目前已有的多种储能技术与原理,以及国内外相关的研究进展与应用情况,总结了各种储能技术的优缺点及其应用范围。文中所述各种储能技术的特性比较见表1。

表1 储能技术特性比较

Tab.1 Contrast of energy storage technology's characteristics

特性	功率额定 响应时间	优缺点	应用范围
抽水储能	100~2000MW 4~10h	容量大、出力变率快、运行费用低,受环境制约	日负荷调节、频率控制、系统备用
飞轮储能	5kW~5MW 15s~15min	高效率、快响应、寿命长、成本高、技术待完善	适合短时小容量储能和长时间大容量储能之间的场合
压缩空气储能	100~300MW 6~20h	储能容量大,受地质条件影响更大、需要气体燃料	分布式储能和发电系统备用

续表 1

特性 储能技术	功率额定 响应时间	优缺点	应用范围
锂电池	$\frac{1\text{kW} \sim 10\text{MW}}{1\text{min} \sim 9\text{h}}$	储能密度高,循环寿命长,成本高、安全性差	新能源储能,电动汽车
钠硫电池	$\frac{1\text{kW} \sim 10\text{MW}}{1\text{min} \sim 9\text{h}}$	储能密度大、效率高、成本高、安全性差	适合电力储能使用
液流电池	$\frac{10 \sim 100\text{kW}}{1 \sim 20\text{h}}$	快响应、高输出、充放电转化效率高、自放电率低、能量密度低	电能质量、可靠性、备用电源、削峰、能量管理、再生能源集成
铅酸电池	$\frac{1\text{kW} \sim 50\text{MW}}{1\text{min} \sim 3\text{h}}$	成本低、技术成熟、寿命短、污染环境、需要回收	电能质量、可靠性、备用电源、频率控制、UPS
金属空气电池	$\frac{1 \sim 10\text{kW}}{\text{数小时}}$	结构紧凑、能量密度非常高、充电性能不佳、效率低	中小型移动电源、便携式电子装置电源、水下军用电源
超导磁储能	$\frac{10\text{kW} \sim 20\text{MW}}{1\text{ms} \sim 15\text{min}}$	功率高、能量密度低、成本高、需维护	输配电系统稳定性、电能质量调节
超级电容器储能	$\frac{1 \sim 100\text{kW}}{1\text{s} \sim 1\text{min}}$	储能大、充放电速度快、能量密度低、放电时间短	高峰值功率、低容量的场合
相变储能	$\frac{\text{kW 级}}{\text{数小时}}$	储能密度大	冰蓄冷、熔融盐储热

在新能源电力系统中,要求储能技术要同时具有大容量储能能力和快响应能力,从当前储能技术发展情况来看,一种储能技术很难同时满足这两种需求,需要同时采用多种储能技术,配置多元的储能电源,彼此间协调控制、综合规划,最大限度发挥储能电源的效用。因此,如何合理地建立各种储能电源的运行模型,如何优化地整合利用现有各种储能技术及提出更为先进的储能新方法,使含高比例风电的电力系统能够稳定、高效地运行,是有待深入研究的课题。

#### 参考文献 (References):

[1] 尚志娟, 周晖, 王天华 (Shang Zhijuan, Zhou Hui, Wang Tianhua). 带有储能装置的风电与水电互补系统的研究 (Research of complementary system for wind power with energy storage devices and hydro power) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (2): 99-105.

[2] 程时杰, 余文辉, 文劲宇, 等 (Cheng Shijie, Yu Wenhui, Wen Jinyu, et al.). 储能技术及其在电力系统稳定控制中的应用 (Energy storage and its application in power system stability enhancement) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, 31 (20): 97-108.

[3] 李强, 袁越, 谈定中 (Li Qiang, Yuan Yue, Tan Dingzhong). 储能技术在风电并网中的应用研究进展 (Progress on application of energy storage technology in

wind power integration) [J]. 河海大学学报 (自然科学版) (Journal of Hohai University (Natural Sciences)), 2010, 38 (1): 115-122.

[4] Bueno C, Carta J A. Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10 (4): 312-340.

[5] Bueno C, Carta J A. Technical economic analysis of wind powered pumped hydro storage systems, part I: model development [J]. Solar Energy, 2005, 78 (3): 382-395.

[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] 娄素华, 崔继纯 (Lou Suhua, Cui Jichun). 考虑动态功能的抽水蓄能电站综合规划模型 (An integrated planning model of pumped-storage station considering dynamic functions) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2009, 33 (1): 27-31.

[8] 谭靖, 李国杰, 唐志伟 (Tan Jing, Li Guojie, Tang Zhiwei). 基于压缩空气储能的风电场功率调节及效益分析 (Design and economic analysis of compressed air energy storage based wind farm power regulation system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (8): 33-37.

[9] 戴兴建, 唐长亮, 张凯 (Dai Xingjian, Tang Changli-

- ang, Zhang Kai). 先进飞轮储能电源工程应用研究进展 (Progress of advanced power system using flywheel energy storage) [J]. 电源技术 (Chinese Journal of Power Sources), 2009, 33 (11): 1026-1028.
- [10] 戴兴建, 邓占峰, 刘刚, 等 (Dai Xingjian, Deng Zhanfeng, Liu Gang, et al.). 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况 (Review on advanced flywheel energy storage system with large scale) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26 (7): 133-140.
- [11] 邓自刚, 王家素, 王素玉, 等 (Deng Zigang, Wang Jiasu, Wang Suyu, et al.). 高温超导飞轮储能技术发展现状 (Status of high  $T_c$  superconducting flywheel energy storage system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008, 23 (12): 1-10.
- [12] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等 (Zhang Buhan, Zeng Jie, Mao Chengxiong, et al.). 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 (Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (15): 54-58.
- [13] Lin C E, Shiao Y S, Huang C L, et al. A real and reactive power control approach for battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (3): 1132-1140.
- [14] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成 (Yao Yong, Zhu Guiping, Liu Xiucheng). 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用 (Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (1): 85-89.
- [15] 丁明, 徐宁舟, 毕锐, 等 (Ding Ming, Xu Ningzhou, Bi Rui, et al.). 基于综合建模的3类电池储能电站性能对比分析 (Analysis and computation of effective reactive power reserve of generators) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (15): 34-39.
- [16] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等 (Ding Ming, Zhang Yingyuan, Mao Meiqin, et al.). 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化 (Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (4): 7-14.
- [17] 刘素琴, 黄可龙, 刘又年, 等 (Liu Suqin, Huang Kelong, Liu Younian, et al.). 储能钒液流电池研发热点及前景 (The development and research progress in an energy storage unit—the vanadium redox flow battery) [J]. 电池 (Battery Bimonthly), 2005, 35 (5): 354-356.
- [18] 马景灵, 许开辉, 文九巴, 等 (Ma Jingling, Xu Kaihui, Wen Jiuba, et al.). 铝空气电池的研究进展 (Progress of research on aluminum air batteries) [J]. 电源技术 (Chinese Journal of Power Sources), 2012, 36 (1): 139-141.
- [19] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达, 等 (Chen Xingying, Liu Mengjue, Shan Yuanda, et al.). 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用 (Application of superconducting magnetic energy storage system-SMES in wind power system of network forming) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21 (12): 63-66.
- [20] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜 (Wu Junling, Wu Wei, Zhou Shuangxi). 超导储能改善并网风电场稳定性的研究 (Study on SMES unit for improving the stability of power system connected with wind farms) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2004, 23 (3): 59-63.
- [21] 王少荣, 彭晓涛, 唐跃进, 等 (Wang Shaorong, Peng Xiaotao, Tang Yuejin, et al.). 电力系统稳定控制用高温超导磁储能装置及实验研究 (Apparatus and experiment of high temperature superconducting magnetic energy storage used for power system stability enhancement) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (22): 44-50.
- [22] 王司博, 韦统振, 齐智平 (Wang Sibao, Wei Tongzhen, Qi Zhiping). 超级电容器储能的节能系统研究 (Energy saving system based on supercapacitor) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (9): 105-110.
- [23] 邹和平, 于芑, 周玮, 等 (Zou Heping, Yu Peng, Zhou Wei, et al.). 基于超级电容器储能的双馈风力发电机低电压穿越研究 (Study on the low voltage ride through of doubly fed wind generator based on the supercapacitor storage) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (10): 48-52.
- [24] 张慧妍, 程楠, 景阳 (Zhang Huiyan, Cheng Nan, Jing Yang). 超级电容器储能系统的应用研究综述 (A review of super capacitor energy storage system application research) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2011, 45 (12): 51-53.
- [25] 张国驹, 唐西胜, 齐智平 (Zhang Guojun, Tang Xisheng, Qi Zhiping). 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用 (Application of hybrid energy stor-

- age system of super-capacitors and batteries in a micro-grid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (12): 85-89.
- [26] 于芑,周玮,孙辉,等 (Yu Peng, Zhou Wei, Sun Hui, et al.). 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计 (Hybrid energy storage and control system design for wind power balancing) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (17): 127-133.
- [27] 于芑,赵瑜,周玮,等 (Yu Peng, Zhao Yu, Zhou Wei, et al.). 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究 (Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2011, 39 (24): 35-40.
- [28] 张步涵,曾杰,毛承雄,等 (Zhang Buhan, Zeng Jie, Mao Chengxiong, et al.). 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用 (Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2008, 28 (4): 1-4.
- [29] 毛兆明 (Mao Zhaoming). 国外用于太阳热发电和工业加工的热储能的研究 (Study of thermal energy storage technology in solar power generation system and industrial processing abroad) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 1984, 3 (4): 16-22.
- [30] 柯秀芳,张仁远 (Ke Xiufang, Zhang Renyuan). 高温金属储热元件释热过程的传热研究 (A study on heat transfer in heat releasing process of high-temperature metallic heat-storage element) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2002, (10): 5-8.
- [31] 王建楠,李鑫,常春 (Wang Jiannan, Li Xin, Chang Chun). 太阳能塔式热发电站熔融盐吸热器过热故障的影响因素分析 (Analysis of the influence factors on the overheat of molten salt receiver in solar tower power plants) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (29): 107-114.
- [32] 李铁华 (Li Tiehua). 内融式盘管蓄冰系统实验研究 (Experimental study on internal melt ice-on-coil thermal storage system) [J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2009, 36 (2): 64-68.

## Review of energy storage technology for new energy power system

CONG Jing<sup>1</sup>, SONG Kun<sup>2</sup>, LU Hai-wei<sup>3</sup>, GAO Xiao-feng<sup>3</sup>, XIAO Bai<sup>1</sup>

- (1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;  
2. Liaoning Provincial Electric Power Company Limited Power Electronic Research Institute, Shenyang 110015, China; 3. Jilin Electric Power Co. Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** This paper reviews the research status of energy storage technology for the new energy power system which contains wind power. Firstly, the great significance of energy storage technology for power system containing a high proportion of wind power is discussed. Secondly, the present research progress of various energy storage technologies are systematically compared. On one hand, the paper described the theory of various energy storage technologies and analyzed the characteristics of energy storage technologies. On the other hand, it also summarized the advantages, problem and application range of various energy storage technologies. Thirdly, it adopted a new method that coordinates a variety of energy storage technologies for new energy power system and combines energy storage technology with large capacity and quick response. Lastly, it pointed out that optimal allocation of energy storage in the new energy power system has become a subject which needs further research.

**Key words:** new energy power system; energy storage technology; wind power generation; renewable energy