

储能技术在新能源电力系统中的研究综述

艾 欣, 董春发

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

Review on the Application of Energy Storage Technology in Power System with Renewable Energy Sources

AI Xin, DONG Chunfa

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

摘 要: 在总结各种储能技术特点及其应用现状的基础上, 分析了新能源大规模并网存在的问题, 归纳阐述了储能技术在解决系统运行稳定性、功率波动、电能质量、风电低电压穿越等问题中的研究进展; 针对储能系统的前期规划, 综合考虑经济性能和技术性能要求, 重点研究了储能系统的组成结构和优化配置方法, 并对不同应用场合下储能系统的控制策略进行归纳; 最后对储能技术的研究方向做出展望。

关键词: 储能技术; 可再生能源; 电力系统; 并网运行; 优化配置; 控制策略

Abstract: Based on the summary on the characteristics of different energy storage techniques and their applications, the existing problems in large-scale grid-connected renewable energy sources are analyzed, and the research progress on the application of energy storage technique to solve such problems as system operation stability, power fluctuation, power quality and low voltage ride-through for wind power system are discussed. Furthermore, to meet the economic and technical requirements, the composition structure and optimal allocation method of energy storage system are mainly studied. In addition, control strategies of energy storage system in different operational situations are discussed. In the end, research direction and prospect of energy storage technology are forecasted.

Keywords: energy storage technology; renewable energy sources; power system; grid-connected operation; optimal allocation; control strategy

基金项目: 国家自然科学基金项目(513111122); 高等学校学科创新引智计划(“111”计划)(B08013)

0 引 言

能源紧缺、环境污染等问题日益突出, 开发与利用新能源, 改善能源结构成为世界各国的共识。风力发电、光伏发电作为主要的清洁能源利用形式, 具有与传统电源竞争的潜力, 得到了快速的发展。截止 2013 年底, 我国风力发电装机容量达 91.4GW, 光伏发电装机容量达 19.4GW, 均位列世界第一^[1-2]。

但是, 风电和光伏发电出力显示出较强的波动性和随机性, 影响电网运行的安全与稳定^[3]。这给电网的调度带来困难, 对供电的持续性和可靠性产生不利影响^[4], 同时限制了其自身的发展。

在新能源的并网过程中, 通过在出口侧安装储能装置, 可以平抑输出功率的波动^[5], 一定程度上将新能源电源转化为可调度的电源, 有助于减少对电力系统的冲击^[6], 提高电力系统的运行稳定性, 此外还可以提供电压支撑, 改善电能质量等^[7]。因此, 储能技术被认为是解决目前和将来电网中新能源渗透率持续增加等问题的可行方案。

本文首先简要总结了各种储能技术及其应用现状, 对储能系统解决新能源并网问题中的研究进展进行详细分析, 然后重点对储能系统的优化配置方法进行归纳, 并总结储能系统在不同运行状况时的控制策略, 最后, 对储能技术的研究方向和应用前景做出展望。

1 储能技术的分类及应用现状

电能可以转换为机械能、化学能、电磁能等形

式进行存储,按照方式的不同可分为机械储能、电化学储能、电磁储能和相变储能四大类型。其中机械储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等;电化学储能包括铅酸、镍隔、锂离子、钠硫、液流等电池储能;电磁储能包括超导、超级电容和高能密度电容储能等;相变储能通过储热物质发生

相变进而吸收或者放出潜热实现^[8],既可在夏季蓄热也可在冬季蓄冷,主要应用场合包括蓄冷空调系统,热电相变蓄热装置和建筑节能^[9](用于墙体、天花板中)等。表1对典型的储能形式的特点、应用和研究现状进行了总结。

表1 应用于电力系统的储能技术比较

储能方式	主要特点	功率范围	应用时间	应用场合
抽水蓄能	容量大、寿命长	100MW~2 000MW	日级	削峰填谷、系统备用、黑启动
压缩空气	功率范围广、环境友好	100MW~300MW	日级	频率控制、新能源出力平抑
飞轮储能	储能周期长、效率高	5kW~1.5MW	分钟级	调峰/频、平滑功率输出
锂电池	能量密度高、充放电快	千瓦级~兆瓦级	小时级	备用电源、电动汽车
液流电池	100%充放电、循环寿命长	100kW~100MW	小时级	抑制功率波动、新能源发电
超导储能	功率大、响应速度快	10kW~1MW	分钟级	电能质量、提高稳定性
超级电容器	功率密度高、寿命长	1kW~100kW	分钟级	平滑功率、电能质量、FACTS技术
相变储能	储能密度高、耐久性强	兆瓦级	日级	电力调峰

2 储能技术在新能源大规模并网中的应用

2.1 新能源大规模并网存在的问题

由于风能本身的随机性和波动性,风电出力表现出很大程度的波动性和不确定性^[10];同时风能的不可控使得风电具有弱致稳性和弱抗扰性^[11]。在我国风电大规模开发、远距离输送的模式下,风电出力的上述特性对电力系统的供电充裕性和运行稳定性^[5,12]的影响更为严重;此外,电网薄弱地区的电压稳定性问题^[13]和有功备用不足电网的频率稳定问题^[14-15]也值得关注。另一方面,风速的随机变化和风机本身特性,以及风电系统中电力电子器件应用,带来电压暂降^[16]、谐波^[12]等电能质量问题。风电机组的低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)问题也值得关注,故障发生时,若风电机组大规模同时从系统解列,可能导致连锁反应,严重影响电网的安全运行^[17]。

同样,光伏发电大规模接入公共电网后,其出力的波动性使得电网常规的调度及控制策略难以适应,电网自身的运行调整与控制能力被削弱,给电网安全稳定运行带来新问题^[18]。

分析上述问题,新能源出力缺乏可控性^[19]是

根本原因,风电、光伏等出力的波动性和不确定性使得电力系统的稳定运行面临严峻的挑战。对新能源发电出力进行有效控制,改善出力特性,将其变为可调度的电源,成为解决上述问题的关键。储能作为能量的转换手段,提供了能量高效利用和灵活转换的方式,可以在一定程度上改善可再生能源电源的出力特性,为新能源大规模并网问题的解决提供了途径。

2.2 储能技术在风电并网中的应用

2.2.1 提高含风电电力系统的运行稳定性

提高电力系统稳定性的根本措施在于改进系统的瞬时功率平衡水平,储能系统能够响应有功及无功功率需求,改善系统的瞬时功率平衡水平,增强运行的稳定性。

对于电压稳定性问题,文献[3]针对并网风电系统中经常出现的联络线短路故障和风速扰动,研究了超导储能(superconducting magnetic energy storage, SMES)在改善并网风电场运行稳定性中的作用。仿真表明网络故障后 SMES 能够有效地提高风电场的稳定性,而且在快速的风速扰动下能够平滑风电场的输出,降低风电波动对电网的冲击。文献[13]将 SMES 应用于并网型风力发电系统,建立了 SMES 模型和加入 SMES 后系统的线性化仿真模型,采用基因算法求最优反馈矩

阵, 仿真结果表明 SMES 单元对并网型风力发电系统中风力发电机的输出电压具有极大的改善作用。

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 [6] 提出了将飞轮储能系统应用于风电机组的运行控制中, 通过对控制飞轮储能系统充放电实现平滑风机输出功率、参与电网频率控制的任务, 仿真验证了方案的可行性。文献 [15] 将风能等可再生能源作为 SMES 装置的充电电源, 为可再生能源的使用提出一个新的思路, SMES 装置可以根据系统负荷变化快速调整出力来稳定系统频率及减少不必要的联络线功率流动, 同时改善系统旋转备用不足的问题。文献 [20] 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降低, 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。

因此, 增强风电并网系统的稳定性需要配备具有快速响应能力的储能系统, 如超导储能、飞轮储能等, 它们能够快速响应系统稳定性运行的要求, 补偿功率差额。但是, 由于风电出力本身的不确定性, 基于历史出力数据的储能系统合理配置及适当的控制策略成为研究的关键问题。

2.2.2 改善电能质量

储能系统在改善电能质量方面的应用主要集中在抑制电压波动、电压暂降等方面。

文献 [7] 针对微电网电能质量问题, 分析了储能解决电压骤降、电压跌落等电能质量问题的方案。文献 [21] 介绍了超级电容储能技术在分布式发电中的应用, 通过在 PSCAD 下建模仿真说明了其在解决分布式发电电能质量等问题方面有很好的效果。

改善电压波动、电压暂降等电能质量问题关键在于短时功率的动态补偿, 需要储能系统具备毫秒级功率动态调节的能力, 因此, 选择超级电容储能、超导储能等是比较合适的。

2.2.3 平抑功率波动

风电出力缺乏可控性是造成风电并网诸多问题的根本原因。储能系统能够有效改善其出力特性, 平滑风电出力, 在一定程度上使其成为可调度的电源。

目前针对储能技术平抑风电出力波动的研究

包括风电场和风电机组两个层面。文献 [12] 给出一种串并联型超级电容器储能系统的电路拓扑, 将其用于风力发电, 仿真表明并联补偿可以有效地改善风力发电的不确定因素, 平滑风力发电系统出力; 串联补偿可以有效地提高供电电压的可靠性, 抑制电压暂降, 提高风电场稳定性。文献 [22] 提出在基于全功率变频器的永磁同步风电机组的直流母线上并联飞轮储能装置, 并通过模糊控制, 从而实现抑制风电机组输出功率的波动。

考虑到大型风电场的输出功率在一定程度上具有互补性, 且大规模的集中储能有利于控制, 风电场层面的储能方式受到较大关注。

2.2.4 提高风电系统的低电压穿越能力

在风电穿透功率较高的电力系统中, LVRT 是影响电力系统稳定的关键因素之一。有 LVRT 功能的风电机组并网能有效解决并网中产生的电压稳定性问题, 有利于系统稳定性的增强^[23]。储能系统在提高风电机组低电压穿越能力的研究主要集中在储能系统的选择和控制策略的设计两个方面。

其中, 文献 [24] 提出一种利用飞轮储能提高永磁直驱风电系统低电压穿越能力的控制策略, 通过风电机组和飞轮储能的功率变换器的协调控制, 在电网故障期间, 利用飞轮储能的快速有功调节能力保持风电机组功率变换器的直流母线电压稳定, 同时控制风电机组的网侧变换器向电网发出一定的无功, 帮助电网电压的恢复, 从而提高风电机组 LVRT 能力。文献 [25] 研究了静止同步补偿装置/蓄电池储能用于增强风电机组 LVRT 功能的问题, 并设计了相应的控制策略, 仿真结果表明, 该方式可有效增强风电机组的 LVRT 能力。

2.3 储能技术在光伏并网中的应用

储能技术在光伏并网中的应用同样集中在平衡系统瞬时功率, 改善电能质量, 维持系统可靠运行等方面。

文献 [4] 建立了混合储能的数学模型, 提出一种无源式并联储能方案并应用于独立光伏系统, 仿真实验表明, 在光伏系统的发电功率和负载功率脉动的情况下, 蓄电池的充放电电流比较平滑; 文献 [10] 将能量密度大、环境友好的磷酸铁锂电池和功率密度高、循环使用寿命长的超级电容组合, 构成混合储能系统应用于独立光伏发电系

统,并设计了控制结构和控制方式。仿真结果表明,在光伏电池输出功率存在波动且负载发生脉动的情况下,储能系统能迅速平衡系统瞬时功率,维持系统可靠运行。

超级电容器蓄电池混合储能在该领域具有较大的应用价值和发展潜力,但目前相关的研究和应用还很少,将会成为重要的研究方向。

3 储能系统优化配置和控制策略研究

如前所述,储能系统在解决新能源并网的关键问题,提高电网对新能源发电的消纳能力等方面发挥着关键的作用。因此,为更好地发挥储能系统的作用,对其优化配置和控制策略等方面的深入研究显得尤为必要。

3.1 储能系统的组成结构

储能系统可分别由单种储能形式和多种储能形式构成。对新能源并网功率进行控制的过程中,综合考虑系统成本、体积等因素,需要储能系统具有高功率和高能量密度、寿命长等特点。

在风电和光伏等新能源发电大规模并网的系统中,两种储能结构均有应用;在小规模接入的微网中,由于新能源发电的间歇性要求储能单元具有高能量密度,同时,负荷的快速波动要求储能单元具有高功率密度,因此,由高功率密度和高能量密度的储能单元组成的复合储能系统在微网中有广阔的应用前景。

对于复合储能系统中储能单元的选择,由于微网的功率波动通常在几兆瓦范围内,蓄电池、超级电容器和飞轮储能是比较合适的选择,而蓄电池和超级电容器分别属于高能量密度和高功率密度的储能单元,它们的组合是很合适的选择。文献[26]表明在孤立的光伏发电系统中,蓄电池-超级电容器混合储能系统的性能优于单独的蓄电池储能系统。文献[27]表明蓄电池-超级电容器混合储能系统不仅具有高能量密度和高功率密度的特点,同时可延长蓄电池的使用寿命。文献[28]定性分析了该混合储能系统在蓄电池的功率和使用寿命方面的延长作用。

3.2 储能系统的优化配置

鉴于储能系统在新能源发电并网中起到提高系统运行稳定性、改善电能质量、平抑功率波动等重要作用,可明显改善系统的经济性能和技术

性能。因此,考虑储能系统的位置和容量,合理地对储能系统进行配置,使之在满足系统技术性要求的同时,尽可能地提高经济性能,成为目前亟待解决的问题。

储能系统的优化配置与新能源发电的运行特性、出力曲线以及电力系统运行数据等密切相关,对其优化配置的研究一般以新能源发电的出力曲线和负荷特性为基础,考虑系统技术性能和经济性能的要求,优化对象为含新能源发电的联合系统,图1为新能源并网中储能系统的优化配置框图。

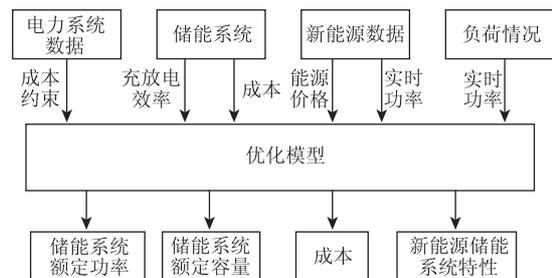


图1 新能源并网中储能系统的优化配置框图

3.2.1 新能源大规模并网系统中的优化配置

由于新能源出力固有的间歇性和波动性,加之出力预测误差的存在,使其无法具有类似传统发电形式的调度灵活性。因此,在新能源大规模并网的系统中,为积极响应电网调度,储能系统的应用主要集中在平抑出力波动和提高系统运行稳定性等场合。

考虑技术指标,文献[29-33]研究了储能系统在平抑新能源出力波动中的优化配置方法:文献[29]定义了输出功率波动率指标,并设定波动率的上限;文献[30]考虑混合储能系统能量损失率和能量缺失率等运行指标,建立优化配置模型;文献[31]考虑电池储能系统功率容量与风功率预测误差、准确率、合格率以及容量需求满足率等指标;文献[32]对大型并网风电场在不同储能容量配比关系下出力的平滑效果进行仿真分析,得到储能系统容量和风电场规模的合适配比关系,初步优化了储能系统的容量。此外,为提高系统运行的稳定性,文献[33]分析了储能装置在提高暂态运行稳定性中的作用,定义系统偏离原稳定状态的指标,并与经济性指标结合进行储能装置容量的配置。

在满足技术指标的基础上，储能系统的优化配置应尽可能提高新能源联合系统的经济性能。目前已有许多学者综合考虑系统的技术性能和经济性能进行研究，文献 [34-36] 中以并网新能源储能系统的净收益最大为目标，进行储能系统的优化配置：

$$\max F = \alpha P_d - \beta P_{\text{ess}} - \gamma E_{\text{ess}} \quad (1)$$

式中： α 为新能源发电的单位上网电价， β 、 γ 分别为储能系统的功率、容量的初始投资在研究周期 T 内每小时的摊销成本； P_d 为研究周期内新能源的并网功率， P_{ess} 、 E_{ess} 分别为储能系统的设计功率和设计容量。

文献 [34] 基于负荷峰谷差改善指标，综合考虑储能系统经济效益和投资成本，以储能系统运行年限内的总收益最大为目标，构建了容量配置优化目标函数，提出用于松弛调峰瓶颈的大规模储能系统容量优化配制方法，以改善风电穿透率较高时系统的运行稳定性；文献 [35] 在保证风电并网系统运行稳定和电压合格的前提下，建立了以风电-蓄电池联合系统净收益最大化为目标的优化函数，通过对蓄电池容量进行合理的配置，实现经济利益的最大化；文献 [36] 综合考虑复合储能系统的技术和经济性能，建立了反映复合储能系统特性参数-风电功率平滑度、复合储能系统成本特性的长期数学模型，通过遗传算法进行优化，该方法适用于不同等级的任意风电场的复合储能系统容量配置的选定；此外，文献 [37] 以风电场等效输出功率方差和最小为技术指标，建立波动水平的置信度约束，保证风电场的功率波动在合理的范围，以储能系统投资和运行成本最小为目标进行优化；文献 [38] 在保证风场功率波动在合理范围的基础上，引入蓄电池寿命周期成本函数，进行功率的配置，实现其运行成本的最小化。

3.2.2 配电网/微网中的优化配置

在包含风机、光伏阵列、储能装置和其他不间断电源等多种电源结构的微电网中，系统的首要任务是保证功率平衡，因此储能系统的应用主要集中于保证供需平衡和系统运行稳定性、改善电能质量等方面。

考虑供需平衡的要求，储能系统的配置考虑了相关的技术指标：文献 [39] 将补偿后各时段负荷与负荷均值偏差的平方和作为评判指标，同

时考虑可再生能源功率波动平抑的要求；文献 [40-41] 均考虑供电可靠性的要求，分别以微网缺电概率和失负荷概率作为优化配置的技术指标；此外，文献 [42-44] 也都对供需平衡问题分析了相应的技术要求。同时，储能系统在配电网和微网中的应用也需考虑电能质量的要求，文献 [45] 分析了储能系统对于配网电压质量的提升作用，并运用相应的节点电压指标和馈线电压指标作为技术标准。

与储能在新疆大规模并网中的配置类似，其在含新能源发电的配电网/微网的配置同样需要进行技术性能和经济性能的综合考虑。文献 [40-41, 43-44, 46-47] 中均以综合成本(包括初始投资和运行维护成本)最小为目标建立了储能系统的优化配置模型，有

$$\min \sum_{t \in T} \left(\sum_{s \in S} C_{t,s} + \sum_{r \in R} C_{t,r} + \sum_{h \in H} C_{t,h} \right) \quad (2)$$

式中： T 为研究的周期； t 为其中的时间段； S 、 R 、 H 分别为储能单元、新能源发电单元和传统机组的总台数； $C_{t,s}$ 、 $C_{t,r}$ 、 $C_{t,h}$ 分别表示在该时间段内储能单元、新能源发电单元和传统机组摊销的投资成本和运行维护成本之和。

其中，文献 [40]、文献 [41] 根据响应的供电可靠性指标要求——缺电概率和失负荷概率，建立了计及设备投资成本、运行和维护成本、燃料成本、环保折算成本的孤立风光储系统的优化配置模型，分别采用改进的细菌觅食算法和改进粒子群算法求解最优配置方案，得到微电网电源的类型及其容量的最优方案；文献 [43] 将设备的投资成本和运行维护成本等考虑在内，计及系统供需平衡约束，建立了成本最小化的优化模型，同时提出分散优化框架以解决大规模优化带来的求解困难问题；文献 [44] 将光伏辐射利用率和光伏阵列效率等概念用于孤立光伏系统的设计，在考虑初始投资成本和运行维护成本的基础上，考虑系统周期内电池的更换成本，进行蓄电池容量的配置；文献 [46-47] 均采用基于随机优化的储能系统定容，其中，文献 [46] 运用代表性的数据，考虑传输能量的成本、储能系统的效率等因素，文献 [47] 提出随机框架，通过储能技术增强系统稳定性和运行经济性，并运用遗传算法和概率最优潮流相结合的方法进行储能系统位置和容量的最优配置；文献 [48] 提出了基于机会

约束规划的混合储能容量配置方法,考虑混合储能装置的功率出力和荷电状态约束,以装置成本最低为目标,得到风电输出功率波动不超过某一区间的置信度与混合储能最佳配置成本间的关系,从而为配置混合储能容量时在电能质量和经济性间取得适度折中提供了定量依据。

此外,对于储能系统的优化配置,也有学者运用数学方法进行优化研究。文献[49]通过分析光伏出力短期预测误差和负荷短期预测误差的概率统计规律和随机过程,利用区间估计方法得出储能设备容量配置函数,进而得到储能容量的最优配置。

目前,储能系统优化配置的研究主要考虑含新能源发电系统的技术性能和经济性能,对于储能系统的合理配置与调度,优化方法的运用以及微网中电源结构的选择仍将是研究的热点。

3.3 储能系统的控制策略分析

储能系统配置完成后,设计准确高效的控制系统对于其补偿效果至关重要,而在其中,如何合理选择储能系统的控制信号和相应的控制策略,又成为控制系统的核心和关键。针对储能系统的不同应用场合,众多学者对其中的控制策略进行了研究。

在以平抑功率波动为主要应用目标的储能系统中,文献[50-52]分析了其中的控制策略:文献[50]给出了基于阀控式铅酸电池的储能系统主电路参数设计原则,并使用定周期比较法实现Buck-Boost电路的定功率控制,精确反馈线性化算法实现并网变流器VSC的定电压和无功控制;文献[51]基于风电功率短期预测技术,根据风电实发功率与预测功率与波动上下限的关系,提出了平抑风电功率波动的全钒电池储能系统运行控制策略,并给出控制算法流程;文献[52]采用飞轮储能系统辅助的微网方案,利用其大功率充放电的特点,设计了并网变流器的定功率控制方案,通过测量网侧功率决定变流器的输出电流,实现平抑微型电源功率和负荷波动的功能。

为提高储能系统在改善系统运行稳定性中的效果,文献[53-55]对其中的控制策略进行了研究。文献[53]提出了改善并网风电场暂态稳定性的超导磁储能装置控制策略,网侧采用以电压定向的矢量控制方案并通过附加前馈项来实现其输出有功、无功功率的解耦;文献[54]研究了

超导储能系统中不同控制信号的选取,如转速/功率/电压偏差量,分上层控制和底层控制两类对超导储能系统控制策略进行研究,分析了其中的自适应控制和鲁棒控制等;文献[55]提出了一种高渗透率大规模风电接入后风储孤立电网的控制策略,包括上层的广域功率平衡控制和下层储能设备电压/频率控制,通过实时检测电网电压和频率偏差生成有功和无功电流指令控制储能系统进行功率补偿,保证系统运行的稳定性。

此外,针对超级电容装置在改善系统电能质量中的应用,文献[56]基于超级电容储能的风电场功率调节装置的工作原理和结构特点,提出了一种网级控制、超级电容能量管理和变流器控制相结合的控制策略,进行环路控制器设计,以降低风场对电网电能质量的影响。

由于新能源出力的波动平抑和并网系统的稳定运行需要储能系统兼具高功率密度、高能量密度、高循环寿命的特点,而受储能机理影响,单种储能技术很难满足全部要求,对此很多学者提出采用高能量密度的蓄电池与高功率密度的超级电容器相结合的混合储能方法,以提高储能系统的整体性能,相关研究已经取得了一定成果。

文献[57]根据蓄电池和超级电容的荷电状态,采用模糊控制理论将超出目标值的功率偏差在两种储能介质之间进行分配,算例表明所提控制策略能够有效地平抑可再生能源功率波动;文献[58]针对风电波动功率的平抑需求,提出一种新型混合储能系统结构及其分层控制模型(能量层、系统层),根据预置的专家信息库,得到相应充放电控制器的控制算法;文献[59]根据超级电容器和蓄电池的输出特性和应用需求,以其能量为核心进行混合储能系统控制策略的设计,该策略具有中央管理单元和本地控制两个层次,并且具有自适应性。

需要指出,储能系统在新能源电力系统中的应用目标往往并不单一,关于其控制策略的选择涉及可行性、经济性和有效性等多个指标。多元复合储能系统的协调控制,风光储系统的联合协调控制等问题,仍将是研究的热点。

4 储能技术的研究方向与展望

随着新能源发电的日益普及,以及电网调峰、

提高电网运行稳定性和改善电能质量的迫切需求, 电力储能系统的重要性日益凸显^[60]。因此, 电力储能技术的应用前景非常广阔。目前在储能技术及其应用领域中, 研究的热点问题如下。

① 兼具高功率密度、高能量密度的多元复合储能系统是解决新能源并网中诸多问题的必然选择, 其中蓄电池和超级电容相结合的复合系统受到关注, 其优化配置、协调运行控制等问题将会成为储能技术的研究热点。

② 储能系统在新能源并网中应用场合的多样性和多元复合储能系统的协调控制等问题, 使得对于其控制策略的研究尤为必要。解决系统干扰和参数变动的储能自适应控制策略与用于非线性、时变、不确定系统的储能模糊逻辑控制策略具有广阔的发展前景。

③ 各种形式能量的相互转换是非常重要的, 必须解决大容量、快速、高效、低成本能量转换技术的问题, 电力电子技术将成为研究的重点。

5 结 语

本文在分析储能技术解决系统运行稳定性、电能质量、功率波动等问题的基础上, 重点研究归纳了储能系统的优化配置方法, 对不同储能系统的控制策略进行了总结归纳, 并对储能技术的研究方向和应用前景做出展望。主要结论如下:

① 储能技术是解决新能源并网诸多问题的有效途径, 其规模化应用取决于本身的可靠性和带来的经济效益。

② 新能源电力系统中储能系统的优化配置需同时考虑系统技术性能和经济性能的要求, 在满足不同应用场合技术指标的基础上, 力求经济指标的最优。

③ 储能系统的控制策略涉及其应用场合多样性和储能单元复杂性等多个问题, 其可行性、经济性和有效性是评价策略优劣的重要指标。

参 考 文 献

- [1] 中国风能协会. 2013年中国风电装机容量统计 [EB/OL]. (2014-03-26). http://www.cwea.org.cn/download/display_info.asp?id=55.
- [2] 国家能源局. 2013年光伏发电统计数据 [EB/OL]. (2014-04-28). http://www.nea.gov.cn/2014-04/28/c_133296165.htm.
- [3] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 59-63.
- [4] 唐西胜, 武鑫, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(2): 178-183.
- [5] 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): 54-58.
- [6] 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.
- [7] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
- [8] 张仁元, 柯秀芳. 相变储能技术在电力调峰中的工程应用 [J]. 中国电力, 2002, 35(9): 21-24.
- [9] 陈慧斌, 沈学忠. 电力调峰和相变储能技术 [J]. 陕西电力, 2008(5): 50-52.
- [10] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等. 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用 [J]. 电网技术, 2011, 35(5): 183-187.
- [11] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14-18.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Barton J P, Infield D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [15] 李红梅, 严正. 用可再生能源充电的 SMES 装置在系统调频中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2009(15): 94-97.
- [16] Carr J A, Balda J C, Mantooth H A. A Survey of Systems to Integrate Distributed Energy Resources and Energy Storage on the Utility Grid [C] //Energy 2030 Conference, Atlanta, 2008: 1-7.
- [17] 王伟, 孙明冬, 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, 2008, 31(23): 84-89.
- [18] 李碧君, 方勇杰, 杨卫东, 等. 光伏发电并网大电网面临的问题与对策 [J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(4): 52-59.

- [19] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.
- [20] Jung H, Kim A, Kim J, et al. A Study on the Operating Characteristics of SMES for the Dispersed Power Generation System [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 2028-2031.
- [21] 张华民, 周汉涛, 赵平, 等. 储能技术的研究开发现状及展望 [J]. 能源工程, 2005(3): 1-7.
- [22] Cimuca G O, Saudemont C, Robyns B, et al. Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1074-1085.
- [23] 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.
- [24] 姚骏, 陈西寅, 夏先锋, 等. 含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统低电压穿越控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 38-44.
- [25] Muyeen S M, Takahashi R, Murata T, et al. Stabilization of wind farms connected with multi-machine power system by using STATCOM/BESS [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, 2007: 232-237.
- [26] Glavin M E, Chan P K W, Armstrong S, et al. A standalone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system [C] // Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, 2008: 1688-1695.
- [27] Guoju Z, Xisheng T, Zhiping Q. Research on battery super-capacitor hybrid storage and its application in microgrid [C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chengdu, 2010: 1-4.
- [28] Dougal R A, Liu S, White R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-131.
- [29] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [30] 杨珺, 张建成, 桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置 [J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1209-1216.
- [31] 杨水丽, 李建林, 惠东, 等. 用于跟踪风电场计划出力的电池储能系统容量优化配置 [J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1485-1491.
- [32] 梁亮, 李建林, 惠东. 大型风电场用储能装置容量的优化配置 [J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 930-936.
- [33] 夏亚君. 储能提高电力系统暂态稳定性的优化配置研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [34] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27-35.
- [35] Wang X Y, Mahinda Vilathgamuwa D, Choi S S. Determination of Battery Storage Capacity in Energy Buffer for Wind Farm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 868-878.
- [36] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87.
- [37] 冯江霞, 梁军, 张峰, 等. 考虑调度计划和运行经济性的风电场储能容量优化计算 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 90-95.
- [38] Nguyen C, Chun T, Lee H. Determination of the optimal battery capacity based on a life time cost function in wind farm [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Denver, 2013: 51-58.
- [39] 谭兴国. 微电网复合储能柔性控制技术与容量优化配置 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [40] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
- [41] Wang J, Yang F. Optimal capacity allocation of stand-alone wind/solar/battery hybrid power system based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(5): 443-448.
- [42] Zheng Y, Dong Z Y, Luo F J, et al. Optimal Allocation of Energy Storage System for Risk Mitigation of DISCOs With High Renewable Penetrations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 212-220.
- [43] Yang P, Nehorai A. Joint Optimization of Hybrid Energy Storage and Generation Capacity with Renewable Energy [J]. arXiv preprint: 1309.5832, 2013.
- [44] Kolhe M. Techno-Economic Optimum Sizing of a Stand-Alone Solar Photovoltaic System [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 511-519.
- [45] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多

- 目标优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.
- [46] Abbey C, Joos G. A Stochastic Optimization Approach to Rating of Energy Storage Systems in Wind-Diesel Isolated Grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 418-426.
- [47] Ghofrani M, Arabali A, Etezadi-Amoli M, et al. Energy Storage Application for Performance Enhancement of Wind Integration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4803-4811.
- [48] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法 [J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
- [49] 林少伯, 韩民晓, 赵国鹏, 等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 25-33.
- [50] 李军徽, 朱昱, 严干贵, 等. 储能系统控制策略及主电路参数设计的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 7-12.
- [51] 李蓓, 郭剑波. 平抑风电功率的电池储能系统控制策略 [J]. 电网技术, 2012, 36(8): 38-43.
- [52] 黄宇淇, 方宾义, 孙锦枫. 飞轮储能系统应用于电网的仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 83-87.
- [53] 张占奎, 王德意, 迟永宁, 等. 超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 38-42; 47.
- [54] 周雪松, 权博, 马幼捷, 等. 超导磁储能装置在风电场中控制策略的研究 [J]. 低温与超导, 2009, 37(10): 12-16.
- [55] 施琳, 罗毅, 施念, 等. 高渗透率风电储能孤立电网控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 78-85; 15.
- [56] 李霄, 胡长生, 刘昌金, 等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 86-90.
- [57] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6; 184.
- [58] 于芃, 周玮, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127-133.
- [59] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [60] 贾宏新, 张宇, 王育飞, 等. 储能技术在风力发电系统中的应用 [J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 10-15.

收稿日期: 2014-09-18

作者简介:

艾欣(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源与电力系统, 电力系统分析、运行与控制; 董春发(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网优化调度, 电力系统分析、运行与控制, E-mail: chunfadong@163.com。

(责任编辑: 林海文)