

调频用储能电源的技术经济选型分析

黎淑娟¹, 李欣然¹, 黄际元², 阳小丹², 欧阳璐璐², 毕素玲¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 长沙 410015)

摘 要: 从技术、经济层面对储能电源参与电网调频的选型进行研究。总结提炼不同形式储能电源的技术经济指标, 技术上采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)进行排序选型, 得到技术排序结果; 经济性上利用年均值法进行排序选型, 得到经济排序结果; 对技术/经济排序结果赋权计算, 得到技术经济综合最优的选型结果, 并对各成本因素进行灵敏度分析, 总结得到影响各类型储能经济性的敏感因素。最后针对典型二次调频场景, 利用该文方法进行选型, 知 Li-ion、PHS、CASE 是技术占优的储能方案, CASE、飞轮储能(FW)、LAB 经济占优, 而 CASE、Li-ion、PHS 是技术经济综合最优方案, 由灵敏度分析知进一步降低 Li-ion 的功率成本, 将使其成为技术经济两者同时最优的储能电源。

关键词: 储能电源; 调频应用; 综合选型; 技术经济性; 灵敏度分析

中图分类号: TM712

文献标识码: A

0 引 言

全球能源互联网内容包括特高压电网、清洁能源和智能电网^[1]。风能、太阳能等波动性清洁能源大规模并网会加剧电网的调频压力^[2], 特高压直流输电线路闭锁导致的电网有功缺额也将造成频率的急剧跌落^[3], 因此全球能源互联网的发展会对电网频率稳定提出巨大挑战。此外, 传统电源由于调频容量不足、响应速度慢等问题已不能适应电网调频的需求。将响应速度快、转换效率高的储能电源引入电网调频能有效解决这一问题。选择满足调频需求的储能类型是将其引入电网的前提^[4,5]。因此, 研究储能电源的选型、保证储能电源高效运行和投资经济合理等均是储能应用规划的重要环节, 也是推动其进入调频市场的基础^[6]。

目前, 储能应用研究主要集中在容量配置及控制策略设计等方面, 而选型研究正处于起步阶段。文献[7]对储能电源在电网中的3种应用场景(包括跟踪出力、平抑波动、削峰填谷)进行了选型研

究, 基于给定额定容量与功率, 利用年均费用法进行经济性的比较选型; 文献[8]通过分析铅酸电池、钠硫电池、钒液流电池、镍镉电池的技术特性, 对负荷转移、削峰填谷和电网调频应用场景下的储能电源进行简单分析选型; 文献[9]通过定性比较各类型储能电源的技术特征进行选型分析, 重点研究铅酸电池的特点; 文献[10]对风储联合应用提出计算年累计运行成本的储能选型方法, 以一次调频为例, 对比分析各类储能电源的经济性进而选型。总体而言, 目前储能研究主要集中在新能源并网应用方面, 针对调频的选型研究较少, 且已有的储能电源选型研究多是考虑技术可用性和价格因素进行简单对比得出, 并未形成系统、典型的技术和经济选型方法, 更未形成全面考虑技术经济性的综合选型方法。为此, 针对应用场景要求, 对储能电源进行系统的技术经济选型研究是有必要的。

本文对调频用储能电源的选型进行研究, 利用技术、经济及综合选型方法筛选出技术、经济分别占优及二者综合最优的储能方案, 并利用灵敏度分

收稿日期: 2016-08-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0903400); 国家自然科学基金(51477043); 湖南省科技重大专项(2016GK1003); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A1170002)

通信作者: 黄际元(1988—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事储能建模及其在电力系统中的应用方面的研究。hjycm@hnu.edu.cn

析方法,找出敏感因素,为储能电源的发展方向提供参考。

1 储能电源技术经济特性

1.1 储能电源的技术特征

储能电源按储能方式主要有包括抽水蓄能(pumped hydro storage, PHS)、压缩空气储能(compressed air energy storage, CASE)、飞轮储能(FW)等机械储能方式,及包括锂电池(Li-ion)、钒液流电池(vanadium redox flow battery, VRB)、铅酸电池(lead-acid battery, LAB)、镍镉电池(Ni-Cd)、钠硫电池(NaS)等电化学储能方式和包括超导磁储能(superconducting magnetic energy storage, SMES)、超级电容(electrochemical capacitor, EC)等电磁储能方式。据功能特点又可将高能量输入/输出的蓄电池等归为能量型,将高功率输入/输出的超级电容等归为功率型。

各类型储能电源由于运行机理、化学组成、物理结构、电压和电流输出特性等不同,而使其在能量转换效率、自放电率、放电时间、循环寿命、功率密度、能量密度、环境影响程度等技术指标上均存在差异,附录中附表1、附表2为各类型储能电源的部分重要技术经济指标^[11-13]。储能电源的实际运行寿命是电池容量折损过程的反映。影响循环寿命的主要因素为充放电次数 N 、充/放电深度(depth of discharge, DOD)、温度和峰值电流等。其中,DOD是最为重要的一个影响因素,即放电程度越深,寿命循环的折损就越严重。

1.2 储能电源的经济特性

储能电源的成本是评判其经济合理性的重要因素。经济合理的储能电源不仅可提高可再生能源并网的渗透率和电力系统的供电质量,还可促进其商业化应用,从而推进其市场化发展。储能电源的总成本(C_{total})主要由容量成本、功率成本、辅助设备成本和运行维护成本组成,其中容量成本(C_{storage})是储能电源主要成本,与储能的额定容量成正比;功率成本(C_{PCS})主要来自于PCS功率转换装置,与储能电源的功率成正比;辅助设备成本(C_{BOP})主要包括运行环境控制设备的成本,可用储能电源的容量或功率来折算。

储能电源的成本为:

$$\begin{cases} C_{\text{total}} = C_{\text{storage}} + C_{\text{PCS}} + C_{\text{BOP}} \\ C_{\text{storage}} = (C_E \cdot E_{\text{rate}}) / \eta \\ C_{\text{PCS}} = C_p \cdot P \\ C_{\text{BOP}} = C_{\text{phop}} \cdot P_{\text{rate}} \text{ 或 } C_{\text{BOP}} = C_{\text{ebop}} \cdot E_{\text{rate}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_E ——单位容量成本,\$/kWh; E_{rate} ——储能电源的容量,kWh; η ——储能电源的转换效率; C_p ——单位功率成本,\$/kW; P ——功率,kW; C_{phop} ——单位功率辅助成本,\$/kW; C_{ebop} ——单位容量辅助成本,\$/kWh。

考虑维持储能电源处于良好运行状态的年运行维护成本。用 C_{BOP} 来表示运维成本,单位为\$/kW,计算公式为:

$$C_{\text{OM}} = C \cdot P_{\text{rate}} \quad (2)$$

式中, C ——年运行维护成本,\$/kW·a。

$C_{\text{annual_ave}}$ 是储能电源寿命周期内的年均投资成本,由总成本(C_{total})与资本回收系数(R)确定。

年均成本为:

$$C_{\text{annual_ave}} = C_{\text{OM}} + C_{\text{total}} \cdot R \quad (3)$$

$$R = i(1+i)^T / [(1+i)^T - 1] \quad (4)$$

式中, i ——利率,取15%; T ——循环使用周期(利用雨流计数法换算得到),a。

2 技术经济选型方法

采用技术经济分析方法对调频用储能电源进行选型。技术上以各类储能电源技术特征为基础,利用AHP法得到技术选型排序结果;经济上基于各类型储能电源的经济特征,利用雨流计数法测算寿命,结合全寿命周期成本模型计算得到经济选型排序结果。最后,利用主观赋权法,综合分析得到适合电网调频的技术经济综合最优选型结果。图1为调频用储能电源的技术、经济及综合选型方法的流程。

技术经济选型方法的基本步骤:

1)确定储能电源的应用场景(电网调频),提炼出该场景要求的储能电源的技术、经济特征指标;

2)基于储能电源的技术特征,以技术可行性为原则进行选型。首先,以储能电源的技术指标为基准,分析各指标相关性,利用“1-9”的标度法建立图2所示层次对应的判断矩阵,随后利用一致性指标验证其是否满足一致性要求,若满足便得到技术选型

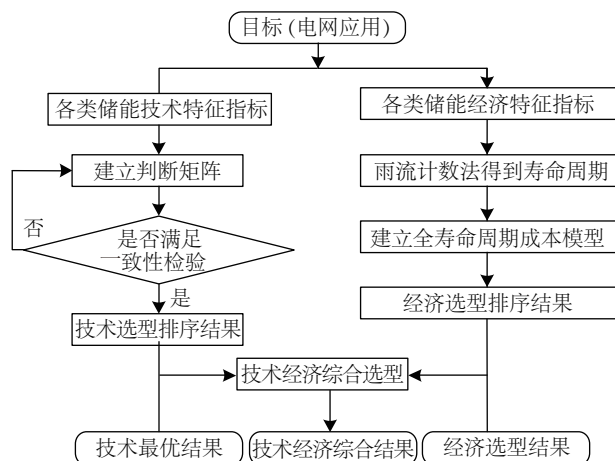


图1 技术经济选型方法的流程

Fig. 1 Process of technical and economic selection method

排序结果,否则,修改判断矩阵并重新计算,直至满足一致性检验指标要求;

3)基于储能电源的经济特征,以经济合理性为原则进行选型。首先根据相应储能电源的成本经济特征建立其经济成本模型,并利用雨流计数法对寿命进行等效折算,得到相应的全寿命周期成本模型,最后,利用相应成本数据对运行工况下各类型储能电源年均成本进行计算,从而得到经济选型排序结果;

4)根据上述步骤得到的技术、经济方面选型结果,针对不同应用场景的需求,利用主观赋权法确定技术、经济选型结果的权重,加权计算后排序得技术经济综合最优的选型结果。

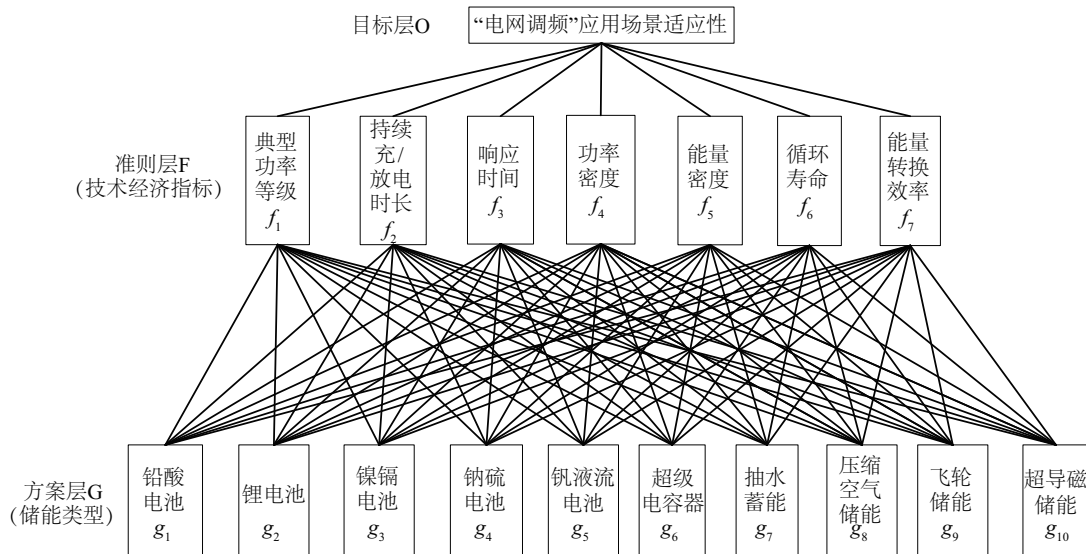


图2 AHP分析法层次图

Fig. 2 Chart of AHP analysis hierarchy

利用 AHP 方法进行技术排序选型,一致性检验指标 CR 公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI - (n - 1)} \quad (5)$$

式中, λ_{\max} ——相应判断矩阵最大特征根; n ——矩阵阶数; RI ——随机性指标,可查阅表 1 得到。若 $CR \leq 0.1$,则认为该层次排序结果具有满意的一致性。

表1 判断矩阵的 RI 值数表Table 1 Value for RI of judgment matrix

n	6	7	8	9	10	11	12
RI	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

利用雨流计数法对各类型储能电池的使用寿命进行等效折算,查阅相关资料^[14,15],总结得到各类型储能电源 DOD 与 N 的实测数据(见附录中附表 3、附表 4),对数据进行拟合得到各类型储能电源的 N 与 DOD 的关系曲线。限于篇幅,下面仅展示锂电池 N 与 DOD 的关系如图 3 所示。抽水蓄能和压缩空气的等效寿命较大,一般直接采用固定值。

利用灵敏度分析方法对调频用储能电源的经济性因素(功率成本、容量成本、寿命、效率及利率)进行分析,得到各类型储能的敏感因素,为其经济性改善方案提供参考依据。

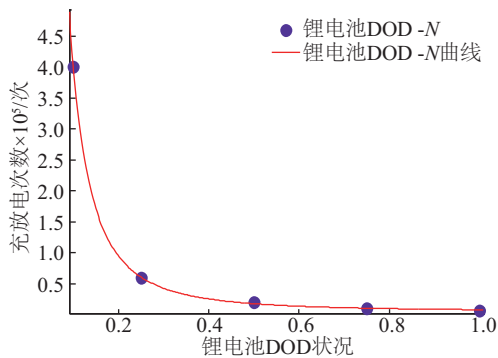


图3 锂电池 DOD-N 关系曲线图

Fig. 3 Curve of DOD-N relationship for lithium ion battery

3 算例分析

以前述各类型储能电源的技术经济特性为基础,结合技术经济选型方法的流程对参与电网调频的储能电源进行选型。

3.1 技术经济选型分析

对某电网的实际二次调频功率需求曲线(鉴于篇幅限制,功率需求曲线在文中省略),进行相应处理(以最大需求功率为储能额定功率,累计需求电量为额定容量, P_i 为实时需求功率, SOC_0 为初始荷电状态,利用 $SOC = SOC_0 + \int_0^{k\Delta T} P_i dt / E_{rate}$ 进行换算,

ΔT 为采样时间)得到储能电源的 SOC 曲线。利用雨流计数法对其进行等效寿命的折算。得到各类型储能的功率、容量需求如表 2 所示。

表2 各类储能电源的计算参数

Table 2 Parameters of kinds of energy storage power

储能类型	P_{rate}/MW	E_{rate}/MW	周期/a
Li-ion	412.16	110.46	13/13.96
LAB	511.08	413.40	5/5.74
NaS	450.96	223.24	11/11.81
VRB	479.14	314.39	10/10.58
EC	403.49	89.08	25/25.44
Ni-Cd	589.71	650.91	19/19.13
FW	425.90	143.50	18/18.78
SMES	421.22	132.35	18/18.21
CASE	547.59	526.56	30
PHS	479.14	314.39	40

注:寿命部分 13/13.96, 13.96 为等效折算得到的寿命周期,仿真计算过程中寿命年限取值取整为 13 a,其他数据类似。

根据图 2 所示层次结构,分别对单准则下的排序和准则层对目标层的排序构造判断矩阵,利用最大特征根法得到相应的排序权重,并进行归一化处理,得到表 3 所示的技术选型排序结果。

表3 储能选型的技术选型总排序表

Table 3 Ranking of energy storage technology selection

w	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	总排序
$O-F$	0.2321	0.3561	0.1276	0.0887	0.0701	0.0630	0.0624	—
g_1 (LAB)	0.1335	0.1322	0.0968	0.0539	0.1180	0.1306	0.0451	0.1145
g_2 (Li-ion)	0.0839	0.1642	0.1311	0.1273	0.2518	0.0644	0.1367	0.1362
g_3 (Ni-Cd)	0.1553	0.0810	0.0596	0.0950	0.1353	0.0529	0.0283	0.0955
g_4 (NaS)	0.0587	0.0720	0.0846	0.0747	0.2313	0.0655	0.0976	0.0831
g_5 (VRB)	0.0481	0.1008	0.0981	0.0650	0.0932	0.0324	0.0614	0.0777
g_6 (EC)	0.0255	0.0407	0.1884	0.2030	0.0310	0.1554	0.1744	0.0853
g_7 (PHS)	0.2194	0.1688	0.0418	0.0230	0.0150	0.1514	0.0746	0.1337
g_8 (CASE)	0.1766	0.1859	0.0312	0.0207	0.0417	0.1225	0.0765	0.1284
g_9 (FW)	0.0334	0.0322	0.1208	0.1664	0.0624	0.1094	0.1532	0.0702
g_{10} (SMES)	0.0656	0.0221	0.1477	0.1710	0.0202	0.1154	0.1522	0.0753

技术选型的排序结果为:锂电池、抽水蓄能、压缩空气储能、铅酸电池、镍镉电池、超级电容、钠硫电池、钒液流电池、超导磁储能和飞轮储能,即 Li-ion、PHS、CASE 是技术占优的调频用储能电源方

案,其中 PHS、CASE 发展成熟,但使用受环境、地理条件限制,而 Li-ion 是电化学储能电源,其使用不受客观条件限制。

利用式(1)~式(4),结合各类储能电池的经济

特征及等效寿命周期成本模型,得到经济选型排序结果如图 4 所示。由图 4 知,对各类型调频用储能电源进行成本年均值计算,得到 CASE、FW、LAB 是经济占优的储能电源方案。

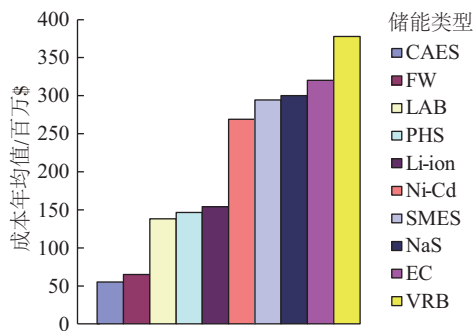


图4 成本年均值排序图

Fig. 4 Ranking of average cost

对于储能电源参与电网调频的技术经济的综合选型应优先满足电网对调频电源的技术需求,在此基础上,兼顾考量经济指标。因此,对技术方面选型结果赋权重为 0.65,经济方面选型结果赋权重为 0.35。得到考虑技术与经济特性的综合选型结果,如表 4 所示。根据综合选型结果知,CASE、Li-ion、PHS 是技术和经济方面综合最优,能较好地满足电网调频对储能电源要求的方案。

表4 技术经济综合选型结果

Table 4 Result of technical and economic selection

储能类型	加权值	储能类型	加权值
CASE	2.30	EC	7.05
Li-ion	2.40	FW	7.31
PHS	2.70	NaS	7.35
LAB	3.65	SMES	8.30
Ni-Cd	5.35	VRB	8.70

注:表中数据数值越小排名次序越占优势。

对比技术、经济占优和二者综合最优选型结果知,单独经济选型和单独技术选型结果为经济占优或技术占优,具有片面性,也存在一定偏差。这是因为方法自身存在限制与不足:年均值法选型时无法考虑储能电源的功率等级、持续响应时间等对调频应用十分重要,但却不易量化、不具公度性的指标的影响;而 AHP 法技术选型存在资料信息整合难度大、判断矩阵构成不精确等问题。因此,技术经济综合选型方法结合二者的长处,形成互补,得

到更全面、合理的选型结果,一般来说,技术经济综合选型结果也更具工程应用价值。该调频用储能电源选型结果对电网侧和用户侧均适用,具有一定指导意义。

3.2 灵敏度分析

针对各类型储能电源经济选型方法,通过分析利率、功率成本、容量成本、寿命、效率等因素对成本的影响,找出敏感性因素,为选型结果的改善提供参考意见。利率从 10%到 20%变化过程中,各类型储能的成本年均值(以利率为常用值 15%时的各成本值为基准进行标幺化)的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知,利率从 10%到 20%的变化过程中,PHS、EC、CASE、SMES 这 4 种储能的年均值增长变化最大,即对利率的敏感程度最高,降低利率能有效降低其成本;Ni-Cd、NaS、Li-ion 对利率的敏感程度次之,而飞轮、VRB、LAB 年均值在利率增长变化过程中变化较小,即利率变化对其成本影响不大。

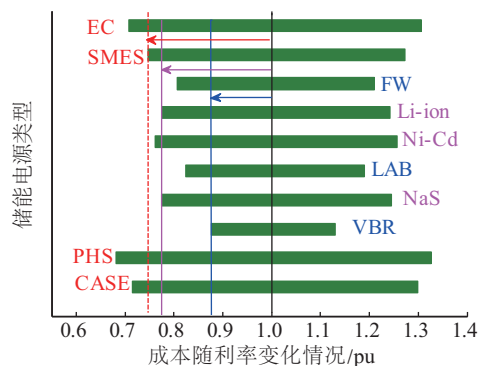


图5 各类型储能年均费用利率变化曲线

Fig. 5 Curves of annual cost for each type of energy storage power in different rates

利用灵敏度计算分析容量、寿命、功率、效率等因素对成本费用影响数据,可得到各因素的灵敏度分析如图 6 所示。由图 6 可知,效率变化 5%对各类型储能成本值影响较小,而寿命、容量成本和功率成本对其成本值影响较大。减小功率成本能有效降低 CAES、LAB、NaS、VBR、Li-ion、PHS 的年均成本,而容量成本的减少能有效降低 EC、Ni-Cd、SMES 的年均成本;对 LAB 来说,功率和容量成本的降低以及寿命的延长都能达到降低年均成本值的效果,降低功率成本和容量成本均能有效降低 FW 的年均成本。

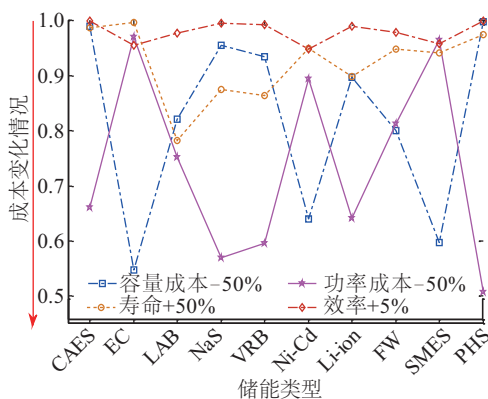


图6 各因素变化的灵敏度分析图

Fig. 6 Sensitivity analysis diagram of change factors

结合选型和灵敏度分析结果知,锂电池是技术经济综合最优储能电源之一,但存在经济性限制而未能成为技术经济同时最优的方案。降低功率成本是降低锂电池经济成本的最有效方法,当锂电池功率成本降至 286 \$/kW 时,其经济性可与 CASE 媲美,成为技术、经济两项同时最优的储能电源,届时,锂电池的应用将远超其他类储能电源。

4 结 论

在电网调频场景下,利用技术、经济及技术经济综合的选型方法,对各类型储能电源进行选型,得到如下主要结论:

1) 利用 AHP 法技术选型知 Li-ion、PHS、CASE 是技术占优的储能方案;利用年均值法经济选型,知 CASE、FW、LAB 是经济占优的储能方案。

2) 利用技术经济综合选型方法,将不易定量比较的技术特征的和基本计算的经济特征相结合,得到 CASE、Li-ion、PHS 是技术经济综合最优的储能方案。通常情况下,综合选型结果更全面、更具参考价值 and 工程应用价值。

3) 通过灵敏度分析知,降低功率成本能有效改善 Li-ion 经济性,锂电池功率成本降至 286 \$/kW 时,可成为技术、经济两项同时最优的调频用储能电源。该储能电源技术经济综合选型方法适用范围不限于调频,对储能参与电网其他场景(如平滑波动等)的选型也具有推广价值。

【参考文献】

[1] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1—10.

[1] Cao Junwei, Yang Mingbo, Zhang Sehua, et al. Energy internet: An infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1—10.

[2] Takahashi Rion, Tamura Junji. Frequency control of isolated power system with wind farm by using flywheel energy storage system [A]. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines [C], Vilamoura, Portugal, 2009, 1—5.

[3] 刘拥军, 励刚, 高伏英, 等. 淮沪特高压交流输电示范工程投产后华东电网频率仿真研究[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2764—2769.

[3] Liu Yongjun, Li Gang, Gao Fuying, et al. Frequency characteristics of east china power grid after the operation of Huai-Hu UHV AC transmission demonstration project [J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2764—2769.

[4] 俞恩科, 陈梁金. 大规模电力储能技术的特性与比较 [J]. 浙江电力, 2011, (12): 4—8.

[4] Yu Enke, Chen Liangjin. Characteristics and comparison of large-scale electric energy storage technologies [J]. Zhejiang Electric Power, 2011, (12): 4—8.

[5] 黄际元, 李欣然, 黄继军, 等. 不同类型储能电源参与电网调频的效果比较研究 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 49—53.

[5] Huang Jiyuan, Li Xinran, Hang Jijun, et al. Comparison of application of different energy storages in power system frequency regulation [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(3): 49—53.

[6] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145—153.

[6] Li Xinran, Huang Jiyuan, Chen Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145—153.

[7] Sundararagavan S, Baker E. Evaluating energy storage technologies for wind power integration [J]. Solar Energy, 2012, 86(9): 2707—2717.

[8] Oudalov A, Chartouni D, Ohler C, et al. Value analysis of battery energy storage applications in power systems [A]. IEEE Power Systems Conference and Exposition [C], Atlanta, 2006, 2206—2211.

[9] 叶季蕾, 薛金花, 吴福保, 等. 可再生能源发电系统

- 中的储能电源电池选型分析[J]. 电源技术, 2013, 37(2): 333—335.
- [9] Ye Jilei, Xue Jinhua, Wu Jinbao, et al. Application analysis and capacity configuration of battery energy storage in renewable generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(2): 333—335.
- [10] Świerczyński M, Stroe D I, Stan A I, et al. Selection and performance- degradation modeling of $\text{LiMO}_2/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and LiFePO_4/C battery cells as suitable energy storage systems for grid integration with wind power plants: An example for the primary frequency service [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 90—100.
- [11] Hadjipaschalis I, Poullikkas A, Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6-7): 1513—1522.
- [12] 陈大宇, 张粒子, 王 澍, 等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化, 2013, 27(1): 9—13.
- [12] Chen Dayu, Zhang Lizi, Wang Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of united states and its enlightenment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 27(1): 9—13.
- [13] 李建林, 马会萌, 惠 东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1—10.
- [13] Li Jianlin, Ma Huimeng, Hui Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1—10.
- [14] Świerczyński M, Stroe D I, Stan A I, et al. Selection and performance-degradation modeling of $\text{LiMO}_2/\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_1$ and LiFePO_4/C battery cells as suit-able energy storage systems for grid integration with wind power plants: an example for the primary frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 90—101.
- [15] Li Jianwei, Gee A M, Zhang Min, et al. Analysis of battery lifetime extension in a SMES- battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model[J]. Energy, 2015, 86: 175—185

TECHNICAL AND ECONOMIC SELECTION ANALYSIS OF ENERGY STORAGE POWER SUPPLY FOR FREQUENCY REGULATION

Li Shujuan¹, Li Xinran¹, Huang Jiyuan², Yang Xiaodan², Ouyang Lulu², Bi Suling¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Corporation Limited, Changsha Power Supply Company, Changsha 410015, China)

Abstract: The technical and economic selection method of energy storage power supply for grid frequency regulation is studied. First, the technical and economic indicators of different forms of energy storage power supply are summarized, the analytic hierarchy process (AHP) is technically used for rank and selection, and technical rank results are obtained; in economic aspects, the annual average cost of energy storage power supply is used to get the rank and selection. The weighted calculation of technical/economic selection and rank results is carried out to get the comprehensive optimal technical/economic selection results, and analyze the sensitivity of each cost factor, and summarize the sensitive factors affecting the economy of all types of energy storage. Finally, aiming at the typical secondary frequency regulation scene, this method is used for selection, the results show that Li-ion, PHS, CASE are technology-preferred energy storage solution, CASE, Flywheel (FW), LAB are economically dominant, CASE, Li-ion and PHS are the technical and economic comprehensive optimal plan. It is known from the sensitivity analysis that reducing further the power cost of Li-ion, which will make it become the optimal energy storage power supply for both technology and economy.

Keywords: energy storage power supply; frequency regulation; comprehensive selection; techno- economics; sensitivity analysis

附录

附表1 各类储能电源的重要技术经济指标(一)

Attached Table 1 Important technical and economic indicators for various types of energy storage power sources(I)						
储能电源类型	能量密度		功率密度		单位功率	单位能量
	Wh·kg ⁻¹	Wh·L ⁻¹	W·kg ⁻¹	W·L ⁻¹	成本/\$.kW ⁻¹	成本/\$.kWh ⁻¹
铅酸电池	30~50	75~300	50~80	10~400	300~600	200~400
锂电池	75~200	200~500	150~315	—	1200~4000	600~2500
镍镉电池	50~75	60~150	150~300	—	500~1500	800~1500
钠硫电池	150~240	150~250	150~230	—	1000~3000	300~500
全钒液流	10~30	16~33	50~140	—	600~1500	150~1000
超级电容	2.5~15	—	500~5000	>100000	100~300	300~2000
抽水蓄能	0.5~1.5	0.5~1.5	—	0.5~1.5	600~2000	5~100
压缩空气	30~60	3~6	—	0.5~2.0	400~800	2~50
飞轮储能	10~30	20~80	400~1500	1000~2000	250~350	1000~5000
超导磁储能	0.5~10	0.2~5	500~2000	1000~4000	200~300	1000~10000

附表2 各类储能电源的重要技术经济指标(二)^[15]

Attached Table 2 Important technical and economic indicators for various types of energy storage power sources(II) ^[15]						
储能电源类型	功率等级	循环次数	运行年限/a	响应时间	能量转换效率	持续充放电时间
铅酸电池	0~20 MW	500~1000	3~20	s级	75%	s~h级
锂电池	0~10 MW	1000~10000	5~15	20 ms~s级	85%~90%	min~h级
镍镉电池	0~40 MW	2000~2500	10~20	—	60%~70%	s~h级
钠硫电池	1 kW~10 MW	1500~5000	10~15	20 ms~s级	75%~90%	s~h级
全钒液流	30 kW~10 MW	>12000	5~10	20 ms~s级	65%~85%	s~10 h级
超级电容	10 kW~1.5 MW	10000~100000	8~20	1~20 ms级	85%~97%	s级
抽水蓄能	100~2000 MW	20000~50000	30~60	s~min级	70%~85%	>1~24 h
压缩空气	10~300MW	8000~12000	20~40	s~min级	65%~79%	>1~24 h
飞轮储能	5 kW~5 MW	>21000	15~20	1~20 ms级	80%~95%	ms~15 min
超导磁储能	10 kW~10 MW	>100000	>20	1~5 ms级	92%~95%	ms~8 s

附表3 各类型储能电池的最大循环次数*N*与DOD实验数据(一)

Attached Table 3 Maximum cycle number <i>N</i> and DOD experimental data of various types of energy storage batteries(I)											
DOD- <i>N</i>	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Li-ion	362300	98200	21420	10370	5800	3500	2430	1820	1360	1100	1000
LAB	15000	7000	3300	2050	1475	1150	950	780	675	590	500

附表4 各类型储能电池的最大循环次数*N*与DOD实验数据(二)

Attached Table 4 Maximum cycle number <i>N</i> and DOD experimental data of various types of energy storage batteries(II)					
DOD- <i>N</i>	1.00	0.75	0.50	0.25	0.10
NaS	2000	4100	6500	8900	25000
VRB	10000	35000	60000	90000	175000
超级电容器	300000	450000	600000	750000	1200000
Ni-Cd	2000	7000	10000	20000	46000
飞轮	20000	30000	40000	50000	110000