

基于层次分析法的调频用储能电源选型

黎淑娟^{1,2}, 李欣然¹, 黄际元³, 李靖³

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 武汉 430074; 3. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410015)

摘要: 对调频用储能电源的选型进行了研究。首先总结了各储能电源的技术和经济指标; 然后提出基于层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 以调频技术最优、经济最优和技术经济指标均衡最优为目标进行选型的方法; 最后, 以压缩空气、铅酸电池等11类储能电源为典型案例进行选型分析。结果表明, 抽水蓄能、压缩空气和锂离子电池技术占优, 压缩空气、超级电容器和超导磁储能经济占优, 压缩空气、抽水蓄能和铅酸电池是技术和经济综合最优的储能电源类型。

关键词: 储能电源; 调频; 选型; 层次分析法

Selection of energy storage power supply for frequency regulation based on analytic hierarchy process

LI Shujuan^{1,2}, LI Xinran¹, HUANG Jiyuan³, LI Jing³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. NARI GROUP Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Wuhan 430074, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Corporation Limited Changsha Power Supply Company, Changsha 410015, China)

Abstract: Selection of energy storage power supply for frequency regulation is studied on. First, the technical and economic indicators of each energy storage power supply are summarized; then, a method based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) to select the optimal energy storage power is proposed, forming technologically optimal, economical optimal, and the optimal balance of technical and economic indicators. Finally, 11 types of energy storage power sources such as compressed air and lead-acid batteries are used as typical cases for selection analysis. The results show that pumped storage, compressed air and lithium-ion battery are technologically dominant; compressed air, supercapacitors and superconducting magnetic energy storage are economically dominant; and compressed air, pumped storage and lead-acid batteries are the most technologically and economically optimal.

Key words: energy storage power supply; frequency regulation; type selection; analytic hierarchy process

0 引言

近年来, 由于风电等间歇性能源的大规模并

网, 显著增加了电网的调频压力^[1], 传统调频电源响应速度已不能满足电网的需求。因此, 为解

国家自然科学基金项目 (51477043); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2012CB215106)

决传统电源因惯性导致的响应速度缓慢^[2]及新能源大规模并网导致的电网调频容量不足等问题，在电网中引入储能电源参与辅助调频，利用其快速响应特性改善调频效果已成为研究热点^[3-5]。一方面储能电源应用场景广泛，不同应用场景对储能电源的特性存在差异，包括与新能源配合、削峰填谷、电网调频、孤网运行及电能质量治理等；另一方面储能电源的种类繁多，以超级电容为代表的功率型储能电源具有响应速度快、输出功率高的特点，以蓄电池为代表的能量型电化学储能电源具有能量存储时间长、响应速度慢的特点，各类储能电源的技术特性存在差异^[6]。因此，针对不同的应用场景选择合适的储能电源方案具有重要意义。

目前，针对调频应用场景的储能电源选型研究较为少见。文献[7]针对削峰填谷、平抑波动和跟踪出力三种应用场景，利用年均成本费用计算的方法进行了经济性的评估选型研究，并未计及各类储能电源的持续放电时间、典型功率等级等对其应用存在影响的技术特点。文献[8]对比分析了铅酸电池、钠硫电池、钒液流电池和镍镉电池的技术特性，并针对这几类储能电源的负荷转移、削峰填谷和电网调频应用进行了经济性评估研究，并未将相关技术指标进行系统的量化对比分析，经济模型较为简单。文献[9]通过比较各类型储能电源的技术特征进行定性的选型，着重总结铅酸电池的种类、原理和关键技术，并未考虑经济层面的因素。文献[10]提出风储联合发电厂中储能电源的选型方法，以一次调频服务为例，通过计算储能电源的年累计运行成本，对比分析各类储能电源的经济性，也未综合考虑其技术指标。文献[11]针对大型移动保供电电源储能元件进行选型分析，主要从应用的需求出发，考虑技术成熟度、功率比等，结合相应电池型号参数，利用基本算法计算其性能指标的优劣来进行选型，而对未市场化、规模化生产的调频用储能电源的选型并不适用。因此，综合技术经济指标，对参与电网调频的储能电源进行系统、全面的选型是有必要的。

本文对面向电网调频的储能电源的选型方法进行了研究，并通过总结各类型储能电源的技术经济指标，利用层次分析法对参与调频的储能电源进行选型，最后分别以技术最优、经济最优和技术经济均衡最优为目标进行验证分析，得到相应的选型结果。

1 调频用储能电源的技术和经济指标

1.1 储能电源的通用指标

各类型储能电源技术经济指标存在差异，通用指标是指各类储能电源共有的具有统一性的特征指标^[12-13]，具体如下：

1) 充/放电速率。也称为储能电源的功率爬坡率，类似于传统火电机组和水电机组爬坡速率的定义，指储能电源装置在一定的运行条件下充电或放电的速率。

2) 比特性。单位体积或单位质量物质所具备的有效储能电源容量或功率，称为比能量和比功率。通常比功率高的称为功率型储能电源，而比能量高的则称为能量型储能电源。

3) 循环寿命。储能电源系统经历一次完整的充/放电周期，称为一个循环周期。在一定的充/放电模式下，储能电源容量衰减至规定值时，经历的最高循环次数或持续使用的最高年限称为循环寿命。

4) 能量转换效率。指相对于外界吸收或输出的能量与理论上存入储能电源或从储能电源释放的能量之间的比值。一般情况下，能量在存储、释放过程中会存在一定损耗，能量转换效率不可能达到100%，而且能量存储的时间越短，损失就越少，即存储的能量也存在衰减过程。

5) 单位成本指标。储能电源的单位成本指标是经济性能^[14]方面最重要的参数，包括单位功率成本、单位容量成本和单位功率运维成本等，从投资、建设和运行维护等各方面表征储能电源的最基本的经济成本。

1.2 储能电源参与调频的特有指标

储能电源的快速响应特性在参与电力系统调

频时能更好地发挥效果^[15]。特有指标这里指储能电源针对电网调频应用场景下的重要指标，具体如下：

1) 典型功率等级。指常见或典型的储能电源额定功率或平均功率的数量级，单位为kW或MW。

2) 持续充/放电时长。指储能电源以最大功率运行时的连续充/放电时间，取决于系统的运行条件、充/放电深度以及运行模式等。电网调频的时间尺度因一、二次调频阶段不同而存在差异，因而对储能电源的持续充/放电时长具有一定要求。

3) 响应时间。指储能电源系统接收外部指令信号而进行相应动作所需的时间，也称为反应时间。电网调频是一个较迅速的过程，而飞轮储能电源、超导磁储能电源及超级电容器等具有快速响应特性，反应速度只有十几毫秒甚至几毫秒。

2 基于层次分析法的调频用储能电源选型流程

利用层次分析法选型，先建立层次分析法调频用储能电源选型的流程图，如图1所示。

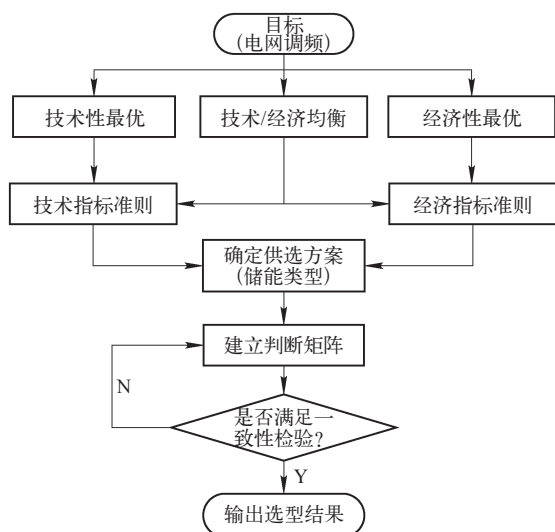


图1 层次分析法调频用储能电源选型流程图

Fig. 1 Flow chart of energy storage power supply selection for frequency regulation using analytic hierarchy process

层次分析法调频用储能电源选型的基本步骤如下。

1) 建立递进层次结构。理清研究对象的各种因素指标之间的关系，建立层次分析的结构模型。以储能电源参与电网调频的适应性为目标层，准则层分为两层：各项技术经济指标为第一层，而技术性 O_1 和经济性 O_2 为第二层，最后以各类型储能电源为方案层。

2) 构造判断矩阵。通过总结提炼各因素相关指标（其中各指标取值如表1、表2所示），并采用“1—9”的标度法，构建判断矩阵。

3) 单准则下的排序。递进层之间的权重排序，利用最大特征值的方法处理判断矩阵，得到权重排序。

4) 检验一致性。利用一致性指标CR检验判断矩阵的一致性，保证结果的合理性。

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

式中， $\lambda_{\max}$ 为相应判断矩阵的最大特征根； n 为矩阵阶数。RI为随机性指标， $n=3$ ， $RI=0.52$ ； $n=7$ ， $RI=1.36$ ； $n=9$ ， $RI=1.52$ 。

图2为储能电源综合评估选型层次体系。

3 算例分析

利用层次分析法进行储能电源面向电网调频应用的选型，以技术指标最优为目标时，取准则层技术性 O_1 对目标层的权重为1，而经济性 O_2 对目标层的权重为0；反之，以经济指标最优为目标时，分别取 O_1 、 O_2 对目标层的权重为0、1；以技术经济指标均衡最优为目标时，取 O_1 、 O_2 对目标层的权重各为0.5。

根据各类型储能电源的技术经济特点建立各层判断矩阵，利用层次分析法，针对技术性最优、经济性最优以及经济技术均衡最优得到权重排序情况，分别如表3～表5所示。

由表3可知，抽水蓄能、压缩空气和锂离子电池是技术占优的三种储能电源形式。调频应用对持续充放电时间、典型功率等级和响应时间等要求较高。结合表1、表2可知，抽水蓄能、压缩空气和锂离子电池的这几项指标优势较大，而超导磁储能电源、超级电容器和飞轮储能电源

表 1 各类储能电源的重要技术经济指标一

Tab. 1 Important technical and economic indicators 1 of various energy storage power sources

储能电源类型	能量密度/ (W·h/kg)	功率密度/ (W·h/L)	功率密度/ (W/kg)	功率密度/ (W/L)	单位功率成本/ (\$/kW)	单位能量成本/ (\$/kW·h)	年运维成本/ [\$/(kW·a)]
铅酸电池	30 ~ 50	75 ~ 300	50 ~ 80	10 ~ 400	300 ~ 600	200 ~ 400	10
锂电池	75 ~ 200	200 ~ 500	150 ~ 315	—	1 200 ~ 4 000	600 ~ 2 500	10
镍镉电池	50 ~ 75	60 ~ 150	150 ~ 300	—	500 ~ 1 500	800 ~ 1 500	15
钠硫电池	150 ~ 240	150 ~ 250	150 ~ 230	—	1 000 ~ 3 000	300 ~ 500	14
锌溴电池	30 ~ 50	30 ~ 60	—	—	700 ~ 2 500	150 ~ 1 000	26
全钒液流	10 ~ 30	16 ~ 33	50 ~ 140	—	600 ~ 1 500	150 ~ 1 000	28
超级电容	2.5 ~ 15	—	500 ~ 5 000	>100 000	100 ~ 300	300 ~ 2 000	13
抽水蓄能	0.5 ~ 1.5	0.5 ~ 1.5	—	0.5 ~ 1.5	600 ~ 2 000	5 ~ 100	3
压缩空气	30 ~ 60	3 ~ 6	—	0.5 ~ 2.0	400 ~ 800	2 ~ 50	6
飞轮储能	10 ~ 30	20 ~ 80	400 ~ 1 500	1 000 ~ 2 000	250 ~ 350	1 000 ~ 5 000	18
超导磁储能	0.5 ~ 10	0.2 ~ 5	500 ~ 2 000	1 000 ~ 4 000	200 ~ 300	1 000 ~ 10 000	10

表 2 各类储能电源的重要技术经济指标二

Tab. 2 Important technical and economic indicators 2 of various energy storage power sources

储能电源类型	功率等级	循环次数	运行年限/年	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 ~ 1 000	3 ~ 20	s 级	75	s-h 级
锂离子电池	0 ~ 100 kW	1 000 ~ 10 000	5 ~ 15	s 级	85 ~ 90	min-h 级
镍镉电池	0 ~ 40 MW	2 000 ~ 2 500	10 ~ 20	—	60 ~ 70	s-h 级
钠硫电池	50 kW ~ 8 MW	2 500 ~ 5 000	10 ~ 15	s 级	75 ~ 90	s-h 级
锌溴电池	50 kW ~ 2 MW	>2 000	5 ~ 10	—	75	h-month 级
全钒液流	30 kW ~ 3 MW	>12 000	5 ~ 10	s 级	65 ~ 85	s-10 h 级
超级电容	0 ~ 50 kW	>100 000	8 ~ 20	ms 级	85 ~ 97	ms-60 min
抽水蓄能	100 ~ 5 000 MW	20 000 ~ 50 000	30 ~ 60	min 级	70 ~ 85	>1 ~ 24 h
压缩空气	5 ~ 300 MW	8 000 ~ 12 000	20 ~ 40	1 s ~ 15 min	65 ~ 79	>1 ~ 24 h
飞轮储能	0 ~ 25 kW	>21 000	15 ~ 20	ms 级	80 ~ 95	ms-15 min
超导磁储能	100 kW ~ 10 MW	>100 000	>20	ms 级	92 ~ 95	ms-8 s

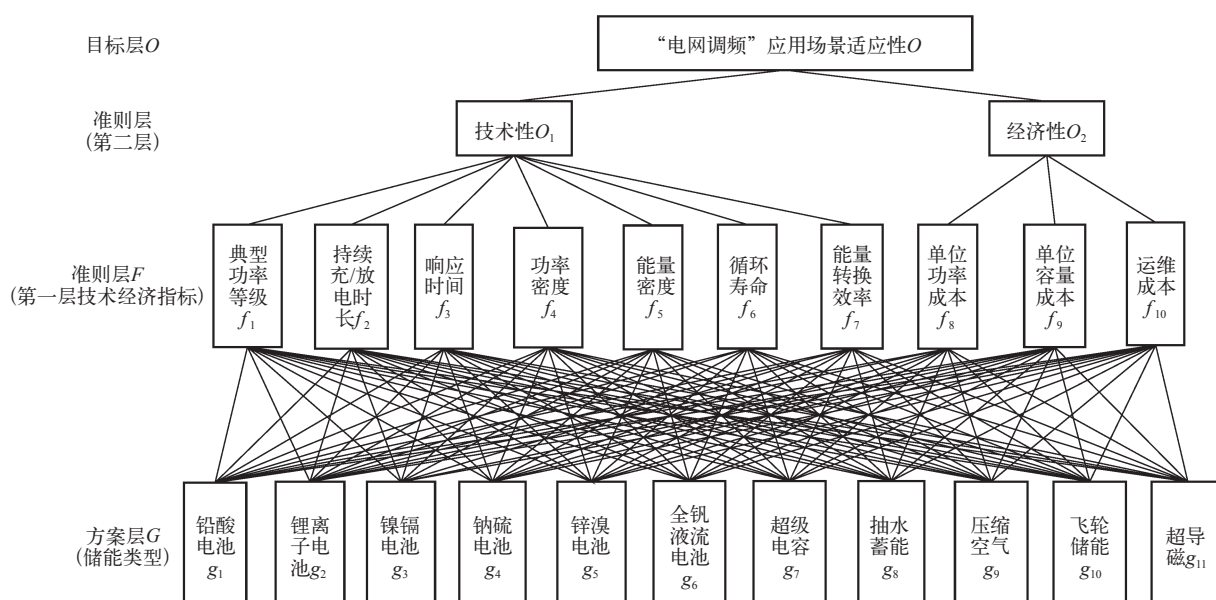


图 2 参与“电网调频”的储能电源综合评估选型层次体系

Fig. 2 The comprehensive evaluation and selection hierarchy of energy storage power sources participating in frequency regulation

表3 技术性最优排序表

Ta. 3 Technical optimal ranking table

w	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	总排序
$O-F$	0.232 1	0.356 1	0.127 6	0.088 7	0.070 1	0.063 0	0.062 4	
g_1	0.099 1	0.074 7	0.088 7	0.054 4	0.103 7	0.021 5	0.042 1	0.077 0
g_2	0.030 4	0.152 1	0.101 2	0.126 1	0.230 5	0.091 4	0.129 5	0.115 3
g_3	0.133 4	0.063 8	0.098 3	0.094 3	0.118 2	0.028 2	0.025 9	0.086 3
g_4	0.065 6	0.053 6	0.079 7	0.072 0	0.212 8	0.041 3	0.083 0	0.073 6
g_5	0.042 0	0.127 7	0.084 0	0.050 3	0.106 0	0.038 2	0.061 1	0.084 1
g_6	0.046 5	0.089 5	0.097 1	0.057 8	0.079 5	0.070 1	0.065 2	0.074 2
g_7	0.019 6	0.013 6	0.134 0	0.187 8	0.026 8	0.165 5	0.160 6	0.065 5
g_8	0.241 6	0.207 7	0.033 3	0.020 7	0.013 7	0.180 8	0.077 2	0.153 3
g_9	0.211 3	0.179 8	0.025 5	0.019 1	0.035 5	0.113 1	0.066 2	0.131 8
g_{10}	0.019 6	0.025 4	0.128 3	0.157 3	0.055 2	0.105 4	0.142 8	0.063 3
g_{11}	0.090 8	0.012 1	0.129 9	0.160 2	0.018 1	0.144 6	0.146 4	0.075 7

等持续充放电时间或响应时间明显不能满足调频应用。

表4 经济性最优排序表

Tab. 4 Economical optimal ranking list

w	f_8	f_9	f_{10}	总排序
$O-F$	0.368 1	0.549 8	0.082 1	
g_1	0.123 2	0.132 8	0.107 1	0.127 2
g_2	0.031 6	0.021 2	0.096 1	0.031 2
g_3	0.054 1	0.051 0	0.047 1	0.051 8
g_4	0.081 8	0.019 9	0.050 8	0.045 2
g_5	0.077 8	0.028 8	0.022 4	0.046 3
g_6	0.082 1	0.053 8	0.017 3	0.061 2
g_7	0.058 4	0.185 0	0.072 5	0.129 2
g_8	0.212 7	0.035 2	0.258 1	0.118 8
g_9	0.232 4	0.108 0	0.166 1	0.158 6
g_{10}	0.025 1	0.165 2	0.037 1	0.103 1
g_{11}	0.020 8	0.199 1	0.125 4	0.127 4

由表4可知,压缩空气、超级电容器和超导磁是经济占优的三种储能电源形式。压缩空气储能电源无论是功率成本还是容量成本都较低,而超级电容器和超导磁储能电源在功率成本上的优势显而易见,容量成本上也有一定优势。

表5 经济性、技术性均衡最优排序表

Tab. 5 The optimal ranking list of economic and technical balance

w	O_1	O_2	总排序
$O-O_x$	0.5	0.5	
g_1	0.077 0	0.127 2	0.102 1
g_2	0.115 3	0.031 2	0.073 2
g_3	0.086 3	0.051 8	0.069 0
g_4	0.073 6	0.045 2	0.059 4
g_5	0.084 1	0.046 3	0.065 2
g_6	0.074 2	0.061 2	0.067 7
g_7	0.065 5	0.129 2	0.097 3
g_8	0.153 3	0.118 8	0.136 1
g_9	0.131 8	0.158 6	0.145 2
g_{10}	0.063 3	0.103 1	0.083 2
g_{11}	0.075 7	0.127 4	0.101 5

由表5可知,压缩空气、抽水蓄能和铅酸电池是技术和经济综合最优的储能电源类型,其中压缩空气储能电源、抽水蓄能是在技术经济双项排名中都占很大优势的方式,而铅酸电池经济性方面的优势较大,技术性能也较好。

4 结束语

本文总结了各类型储能电源的技术经济指标,利用层次分析法进行选型分析,可得如下结论:

1) 抽水蓄能、压缩空气和锂离子电池是技术方面最能满足调频应用性能要求的形式。

2) 压缩空气储能电源、超级电容器和超导磁储能电源是在经济成本指标方面最能满足调频应用成本要求(即成本最低)的三种形式。

3) 压缩空气储能电源、抽水蓄能和铅酸电池是参与电网调频的储能电源综合技术性能指标和经济成本指标最佳的三种形式。

本文选型并未考虑一些复杂的、不可量化的指标,例如各类储能电源对环境的污染情况、对建设使用地理条件的限制等;另外,文中使用的经济指标均为成本因素,且均为静态指标,并未计及储能电源系统投入使用过程中的效益,也未考虑资金的时间价值,因而选型结果可能存在部分误差,下一步研究可加入效益指标,并计算资金的动态时间价值,使选型结果更全面、可靠。

参考文献

[1] 吴凯槟,彭旭东,杨秀芳,等.分布式能源面临

- 重大发展机遇[J]. 节能技术, 2013(5): 437-441.
- [2] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Fluctuation feature extraction of wind power[C]. IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, Tianjin, 2012: 1-5.
- [4] BANAKAR H, LUO Changling, OOI B T. Impacts of wind power minute-to-minute variations on power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 23(1): 150-160.
- [5] 崔杨, 刘嘉, 严干贵, 等. 联网风电功率波动对电力系统频率影响评估[J]. 太阳能学报, 2014, 35(4): 617-623.
- [6] 杨舒婷, 曹哲, 时珊珊, 等. 考虑不同利益主体的储能电站经济效益分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(5): 89-93, 101.
- [7] SANDHYA Sundararagavan, ERIN Baker. 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[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, October 29-November 1, 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.
- [10] SWIERCZYNSKI 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] 杜兆斌, 邓桂萍, 席云华, 等. 大型移动保供电电源储能电源元件选型分析[J]. 机电工程技术, 2013, 42(9): 47-50, 102.
- [12] 俞恩科, 陈梁金. 大规模电力储能电源的特性与比较[J]. 浙江电力, 2011(12): 4-8.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能电源展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.

作者简介



黎淑娟

黎淑娟 (1991—), 女, 硕士, 主要研究方向为储能在电力系统中的应用。

黄际元 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为储能在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2019-09-21)EA