

DOI: 10.7667/PSPC160182

# 基于层次分析和改进逼近理想解法的 分层储能系统综合评估

雷琪<sup>1</sup>, 苗世洪<sup>1</sup>, 郭宝甫<sup>2</sup>, 孙芊<sup>3</sup>, 叶畅<sup>1</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 为了评估分层储能系统用于含高渗透光伏发电区域配电网中的适用性问题, 考虑其平抑光伏出力及为电网提供辅助服务等实际功能, 提出考虑多利益主体的分层储能系统综合评估指标体系, 基于层次分析法(AHP)和改进逼近理想解法(TOPSIS)提出了多模型综合评估算法。针对层次分析法中判断矩阵生成权重的主观性问题, 引入变异系数法计算客观权重, 并改进了逼近理想解法中的判定策略, 提出基于距离接近度与夹角接近度的综合判断方法, 进一步提高评估结果的精度。算例表明: 所提出的指标体系具有较好的完备性, 综合赋权方法可以提升、发掘优势指标, 改进的综合评估算法可信度更高, 对分层储能系统的推广应用有一定的实际意义。

**关键词:** 分层储能系统; 综合评估; 层次分析法; 逼近理想解法; 变异系数

## Comprehensive evaluation of hierarchical storage system based on analytic hierarchy process and improved technique for order preference by similarity to ideal solution

LEI Qi<sup>1</sup>, MIAO Shihong<sup>1</sup>, GUO Baofu<sup>2</sup>, SUN Qian<sup>3</sup>, YE Chang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In order to evaluate the applicability of hierarchical storage system (HSS) used in regional distribution network with high permeability photovoltaic, the HSS index system for multi-interest subject is proposed considering its practical functions as smoothing photovoltaic output and providing ancillary service, and the comprehensive evaluation algorithm based on analytic hierarchy process (AHP) and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is established. Furthermore, the variation coefficient method is adopted to solve subjective deviation problem of judgment matrix by calculating the objective weight, and the improved TOPSIS method considering distance approach degree and angle approach degree is used to increase the evaluation precision. Numerical results show that the HSS index system has preferable completeness feature, the synthetic weighting method can locate the important index, the results of improved comprehensive evaluation algorithm is more authentic and the work in this paper is meaningful for HSS application.

This work is supported by 2015 Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGHADK00PJS1500060).

**Key words:** hierarchical storage system; comprehensive evaluation; AHP; TOPSIS; variation coefficient

## 0 引言

在推广新能源发电应用的大背景下, 光伏发电的并网规模不断扩大, 分布式光伏在配电网中的渗

透率水平不断提高。光伏发电具有随机性、波动性等固有特点, 给电网的规划与运行带来了许多新的问题, 电压稳定、备用容量规划、保护配置及电能质量调节等工作都面临着严峻的挑战<sup>[1]</sup>。针对上述问题, 研究者将储能系统引入含高渗透光伏的配电网, 通过一定的储能充放电控制策略, 配合光伏昼夜不同的出力情况及负荷状态, 可有效改善系统运

基金项目: 2015 年国家电网公司科技项目 (SGHADK00PJS1500060)

行稳定性，并提高光伏渗透率水平<sup>[2-3]</sup>。

含高渗透率光伏区域电网中集中式和分布式储能的分层协调控制技术具有重要的战略意义和实用价值。但分层储能系统的应用在给电网带来新机遇的同时，也会付出一定的成本代价，建立一套完整合理的分层储能系统适用性综合评估模型和指标体系对于其规模化应用十分关键。

分层储能系统技术经济适用性评估的研究，包含技术经济性分析、指标体系构建、综合评估算法、权重分配及模糊结果判定等内容。在经济效益方面，文献[4-7]运用规划方法建立了储能电站成本计算模型及包括发电侧、电网侧、用户侧的收益计算模型。在指标体系方面，文献[8-9]从技术、经济、环境三个方面构建了电池储能技术的层次评估体系，但其经济性分析较为简单。在评估算法方面，文献[10-11]基于层次分析法研究了配电网接纳电动汽车能力及电压节点评估问题，文献[12-13]运用逼近理想解法研究了风电场评估及电压暂降评价问题。现有储能系统的评估模型与体系所考虑的因子相对简单，综合考虑技术指标、经济效益的相关研究还不多见，针对分层储能系统的综合评估也未见报道。

本文将层次分析与逼近理想解法应用于分层储能系统的适用性评估问题，发掘了分层储能系统的评估指标体系并进行聚类组合，评估指标的综合权重由基于判断矩阵的主观权重与基于变异系数的客观权重合成求得，提高了权重的可信度。针对逼近理想解法中最终评估结果导出时的特殊情形，运用评估对象间夹角接近度进行修正，基于距离接近度与夹角接近度两项参数，可以给出不同分层储能系统的优劣等级，并基于评语等级给出定性评估结果。

### 1 含高渗透光伏配电网中的分层储能系统

分层储能系统接入含高渗透光伏区域电网的典型结构如图 1 所示。集中储能为大规模储能系统，集中部署在某一特定地区，一般由数量众多的蓄电池串并联组成；分布式储能则是指分布在配电网各处的小规模蓄电池储能单元，通常与分布式光伏接入相同或相近节点，构成分布式光储联合发电设备或分别接入同一交流母线。集中式储能用以实现配电网能量的整体协调优化控制，分布式储能则主要用于实现分布式电源的就地平衡调节。分布式储能、集中式储能及其能量管理系统一起组成了分层储能系统，通过分布式储能和集中式储能局部和整体的调节作用，实现含高渗透光伏配电网的协调优化运行。各个“高渗透光伏-分层储能系统”内部，集中式储能与分布式储能的配置情况可以不同，储能装

置的类型也可以根据实际需求进行选择。

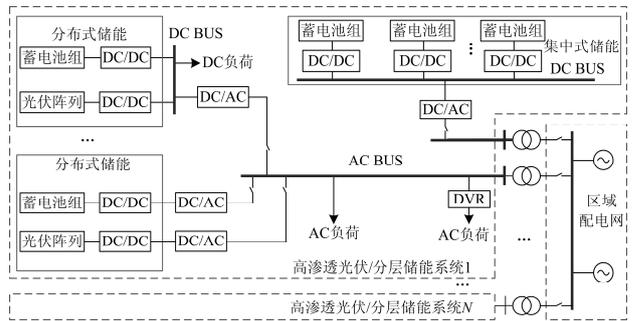


图 1 分层储能系统接入区域配电网结构图

Fig. 1 Structure of distribution grid with hierarchical storage system

### 2 分层储能系统适用性评估指标体系

高渗透分布式光伏发电区域中分层储能系统的应用评估是一个复杂的多变量决策问题。评估中需考虑包含电网、电力用户、社会大众等多个不同的利益主体，不同主体的利益诉求存在差异。本文基于层次分析法的基本原则，考虑分层储能系统的组成内容及结构特征，建立了如图 2 所示的综合评估指标体系，基于指标、因子间的聚类分析结果，提炼了涵盖技术因素、效益成本及社会影响三个大类的指标层。根据各指标层指标的具体涵义，明确集中式储能因子与分布式储能等效因子对其贡献度，进行属类判断，各底层因子到上层指标、指标层指标到目标层的汇聚均基于层次分析和改进的逼近理想解法实现。

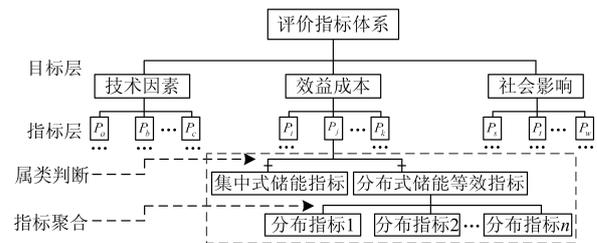


图 2 综合评估指标体系示意图

Fig. 2 Diagram of index system for comprehensive evaluation

#### 2.1 技术因素分析

分层储能系统可以由超级电容、钠硫电池、铅酸电池及锂电池等不同的储能介质组成。储能系统内部控制方法、拓扑结构等细节的差异也会造成分层储能系统适用性的不同，基于对不同储能方案的对比分析，形成的技术因素指标如下：

1) 储能设备的能量密度( $Wh \cdot kg^{-1}$ )，记为指标  $P_1$ ，反映了一定容量的储能系统对设备载体强度、

安装位置的要求。

2) 储能设备的比容量( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 记为指标  $P_2$ , 反映了一定容量的储能设备所需的占地面积与安装空间。

3) 储能设备的转换效率  $\eta$ , 记为指标  $P_3$ , 反映了储能设备因自放电、发热等因素影响造成的能量损耗情况。

4) 储能设备的循环寿命  $L$ , 记为指标  $P_4$ , 反映了储能设备的耐用年限, 可以通过不同放电深度及放电速度下的寿命损耗评估, 依据等效充放电系数计算电池的循环寿命。

## 2.2 效益成本分析

分层储能系统是实现削峰填谷、平抑光伏出力波动性、提升配电网接入光伏电站能力及实现电网辅助服务过程中, 都会产生显性或隐性的经济效益, 但也需要付出初始投资、运行维护费用等成本代价。

考虑到不同类型功能之间在充放电状态、工作时段、所需容量上的互斥性, 简单地将不同功能带来的收益累加将造成较大误差。为避免总收益评估时某些成分的重复计算问题, 本文提出两种衡量分层储能系统效益优劣的方法: (1) 盈利系数法, 按照储能系统提供服务的效益与成本计算其盈利系数, 利用盈利系数指标的高低反映分层储能系统的经济性; (2) 等效成本法, 考虑当以水电、燃煤电站、燃气电站等手段替代分层储能系统提供电网辅助功能时, 计算分层储能系统的投资成本与相应替代手段成本的比值, 以此体现分层储能系统的经济性指标。

基于盈利系数法与等效成本法的指标计算能够体现分层储能系统在功能及控制目标上的多样性, 保证效益类型的完备性, 对不同功能的收益分类整合, 提出分层储能系统的效益成本指标如下。

### 1) 削峰填谷效益成本

基于日负荷曲线的峰谷特征, 分层储能系统遵循在负荷低谷时期充电, 在负荷高峰时期放电的原则, 实现削峰填谷的操作机制。考虑到峰谷电价机制及补贴政策等因素, 分层储能系统进行削峰填谷操作时可以实现降低网损、延缓电网升级投资、低储高发直接套利、政府补贴等效益<sup>[14]</sup>。这些效益因储能装置在指定时段内转移一定的电量产生, 可用盈利系数法计算, 记为指标  $P_5$ 。

$$P_5 = \sum E_i / [(c_p + c_w) / (L \cdot DOD) + c_m] \quad (1)$$

式中:  $c_p$ ,  $c_w$  及  $c_m$  分别为储能系统的单位功率成本、能量成本及维护成本;  $DOD$  及  $L$  分别为等效放电深度及寿命年限;  $E_i$  表示降低网损、低储高发套利及政策补贴等收益。

### 2) 平抑光伏出力效益成本

因为光伏出力的随机性和间歇性, 为应对大规模光伏接入对配电网安全运行的影响, 系统中必须投建一定容量的具备快速调节功能的备用电源, 分层储能系统可以平抑光伏出力, 提升其可调度性, 进而降低了所需备用电源的容量<sup>[15]</sup>。本文将减少以其他方式投建备用电源的成本来表示平抑光伏出力效益, 用盈利系数法计算, 记为指标  $P_6$ 。

$$P_6 = \kappa D_E C_B / \bar{C}_i \quad (2)$$

式中:  $\kappa$  为备用容量补偿系数;  $C_B$ ,  $\bar{C}_i$  分别为储能系统成本及典型备用电源的平均成本;  $D_E$  为依据式(3)、式(4)所示 Beta 型概率密度分布求得的光伏出力的方差值。

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$D_E = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)} P_{\max}^2 \quad (4)$$

### 3) 辅助服务效益成本

集中式储能在响应电网调度需求的同时, 可以实现频率响应、电压支撑、电能质量治理及提升系统运行稳定性等辅助功能<sup>[16]</sup>。提供辅助功能时, 需依据调度指令在一定时间内输出指定的功率水平。本文将储能系统与常用作调度电源的水电机组、燃气机组及燃煤机组进行比较, 考虑单位容量投资成本及调度响应性能, 响应性能以  $T = \{\text{爬坡能力, 响应时间, 响应精度, 调差幅度}\}$  表示, 利用等效替代法计算, 记为指标  $P_7$ 。

$$P_7 = \sum_{i=1}^4 \frac{T_{br} C_B}{\bar{T}_i \bar{C}_i} \quad (5)$$

式中,  $T_{br}$ ,  $\bar{T}_i$  分别为储能系统与其他电源设备的响应性能指标。

### 4) 环境效益成本

储能在实现上述服务的过程中, 部分降低了燃煤电站、燃气电站等高排放机组的出力, 进而减轻了污染, 另一方面, 储能提高了分布式光伏的利用率与渗透率, 促进了清洁能源使用, 因此具有环境效益, 用盈利系数法计算, 记为指标  $P_8$ , 式中  $E_e$  为单位容量储能系统的等效碳排放补贴效益。

$$P_8 = E_e / [(c_p + c_w) / (L \cdot DOD) + c_m] \quad (6)$$

## 2.3 社会影响分析

1) 储能系统的安全性, 记为指标  $P_9$ , 反映了储能系统因技术不成熟, 对极端环境条件的预设安全裕度不足, 造成设备储能系统出现设备重大故障的情况, 基于寿命周期内的统计案例求得。

2) 储能系统的可靠性, 记为指标  $P_{10}$ , 反映储能

系统因设备故障造成的不良影响,用储能系统中电池、转换设备、开关等的可靠性系数累乘求得。

### 3 综合评估算法流程

#### 3.1 针对评估对象建模

层次分析法可以针对复杂问题建立清晰的层次结构,通过相对标度将指标对结果的重要性程度进行量化。本文利用层次分析法建立分层储能系统的结构模型,将评估对象划分为目标层、指标层及因子层,目标层对应不同的评估对象,指标层对应指标体系中隶属于技术性、经济性及社会影响的具体指标 $P_i$ 。针对一般情形,设评估对象个数为 $m$ ,指标层中有 $n$ 个指标,建立基于模糊评估方法的5级评语等级集 $V = \{v_k\}, k=1,2,\dots,5$ , $v_k$ 取值为好、较好、一般、差、较差。基于综合评估算法,得出评估对象的优劣排序,同时给出基于评语等级的判断结果。

#### 3.2 求解判断矩阵与主观权重

首先确定评估指标对于目标层的主观权重,基于专家咨询结果,建立判断矩阵。判断矩阵 $A$ 中元素 $a_{ij}$ 的值反映了对于目标层而言,指标层因素 $A_i$ 对于 $A_j$ 的相对重要性,即: $a_{ij} = p_i / p_j$ , $p_i$ 与 $p_j$ 为依据Satty提出的1-9标度法确定的相对重要性标度值。 $a_{ij}$ 满足如下关系: $a_{ij} > 0$ ;  $a_{ii} = 1$ ;  $a_{ij} = 1 / a_{ji}$ 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

基于判断矩阵,采用方根法计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量。

$$\omega_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (8)$$

对向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 进行归一化处理,并计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ :

$$\hat{\omega}_i = \omega_i / \sum_{j=1}^n \omega_j \quad (9)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\hat{\omega})_i}{\hat{\omega}_i} \quad (10)$$

为避免主观估值的误差太大,需对判断矩阵的一致性进行检验,基于最大特征值计算一致性指标值 $C_1$ 、 $R_1$ 为平均随机一致性指标,可从文献[17]中查表获得。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

$$C_R = C_1 / R_1 \quad (12)$$

当一致性比例 $C_R < 0.10$ 时,判断矩阵满足一致性要求,否则,需进行经验修正,并调整判断矩阵,直至满足一致性校验为止。向量 $\hat{\omega}$ 即为各指标因素的主观权重,记为 $W_S$ 。

#### 3.3 求解变异系数与客观权重

变异系数法确定评估指标权重的依据是评估对象各因素的变异程度,是一种较客观的赋权方法。权重的确定基于原始指标得分数据构成的评估矩阵 $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$ ,依据式(13)对评估矩阵的元素进行去量纲及归一化处理,针对指标层中的负向指标,据式(14)对其进行同向化处理,统一表示为指标值越大效果越好的正向指标,式中 $\max |Y_j|$ 表示指标所在列向量中的最大指标值。

$$y_{ij}^{(1)} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}}, j=1,2,\dots,n \quad (13)$$

$$y_{ij}^{(2)} = 1 / (0.1 + \max |Y_j| + y_{ij}^{(1)}) \quad (14)$$

基于处理后的评估矩阵,依据式(15)与式(16)计算各评估对象所有指标值的平均值与标准差。

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}^{(2)}, j=1,2,\dots,n \quad (15)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_{ij}^{(2)} - \bar{y}_j)^2}, j=1,2,\dots,n \quad (16)$$

各评估对象的变异系数依据式(17)求得,进而可以计算各指标的权重 $\gamma_j$ ,向量 $\hat{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ 即为各指标因素的客观权重,记为 $W_O$ 。

$$c_j = \sigma_j / |\bar{y}_j|, j=1,2,\dots,n \quad (17)$$

$$\gamma_j = c_j / \sum_{j=1}^n c_j, j=1,2,\dots,n \quad (18)$$

#### 3.4 权重合成

依据主观权重向量 $W_S$ 与客观权重向量 $W_O$ ,基于式(19)可以求得 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ ,即为评估指标的最终综合权重。

$$w_j = \frac{\omega_j \gamma_j}{\sum_{j=1}^n \omega_j \gamma_j}, j=1,2,\dots,n \quad (19)$$

#### 3.5 基于改进理想逼近解的综合评估结果分析

基于评估矩阵 $Y$ 与综合权重向量 $W$ ,建立评估对象的决策矩阵 $Z = [z_{ij}]_{m \times n}$ ,其中 $z_{ij} = w_j \cdot y_{ij}$ 。用决策矩阵中各项指标元素的最大值构成正理想解 $Z^+ = [z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+]$ ,用各项指标元素的最小值构成负理想解 $Z^- = [z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-]$ 。分别依据式(20)与式(21)计算各评估对象到正理想解及负理想解的向量距离 $d_i^+$ ,  $d_i^-$ 。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2}, i=1,2,\dots,m \quad (20)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2}, i=1,2,\dots,m \quad (21)$$

$$rc_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-), i=1,2,\dots,m \quad (22)$$

传统的逼近理想解排序法中, 最后的评估结果基于评估对象到正、负理想解的相对距离接近度用  $rc$  表示,  $rc$  得分越高表示评估对象效果越好。但仅依据向量距离进行判断的方法会在特殊情形下造成较大误差甚至出现错误的结果。如图 3 所示的向量空间, 设  $Z_s$ 、 $Z_t$  为决策矩阵中两个评估对象的指标得分向量, 存在图 3 中所示情形(a),  $Z_s$  与  $Z_t$  的  $rc$  得分相同, 但  $Z_s$  与正理想解的向量夹角更小, 需进行特别考虑; 对于情形(b),  $Z_s$ 、 $Z_t$  与正、负理想解的向量夹角相同, 但向量模值不同; 对于情形(c),  $Z_s$ 、 $Z_t$  与正、负理想解的向量夹角及  $rc$  得分均不同, 但需评估向量夹角与  $rc$  得分的优先级别。

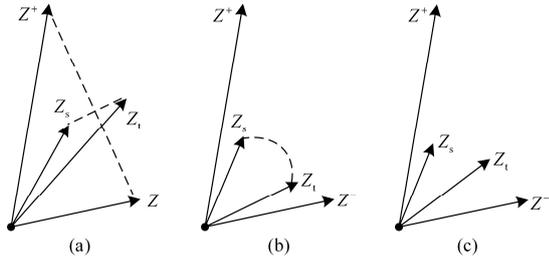


图 3 逼近理想解排序算法的应用情形分析

Fig. 3 Application analysis of TOPSIS method

考虑上述情形, 本文提出基于相对夹角接近度  $va$  的计算方法, 如式(23)所示。综合评估时, 首先

$$Y = \begin{bmatrix} 0.4132 & 0.4859 & 0.5098 & 0.5012 & 0.4399 & 0.5122 & 0.5483 & 0.3945 & 0.5174 & 0.4707 \\ 0.5479 & 0.5166 & 0.5231 & 0.6173 & 0.1724 & 0.2602 & 0.5222 & 0.6246 & 0.4537 & 0.3964 \\ 0.2571 & 0.4503 & 0.4940 & 0.3657 & 0.7521 & 0.8063 & 0.4961 & 0.4109 & 0.6127 & 0.5574 \\ 0.6803 & 0.4036 & 0.4713 & 0.4838 & 0.4596 & 0.1406 & 0.4243 & 0.5342 & 0.4085 & 0.5582 \end{bmatrix}$$

#### 4.2 结果分析

基于评估矩阵  $Y$ , 依据变异系数法计算客观权重, 聘请专家打分生成判断矩阵  $A$  并计算主观权重, 进行加权合成, 权重计算结果如表 2 所示。

分析三种权重向量, 权重分配结果如图 4 所示, 加权综合权重方法的分配结果与初始权重的变化趋势大致相同, 但能够更好地放大各项指标的重要性差异, 显著提高了削峰填谷效益指标  $P_5$  与平抑光伏处理指标  $P_6$  的权重, 这与  $P_5$  及  $P_6$  两项指标涵盖更多影响因子的实际情形相吻合, 其他单一性指标的权重则相应降低; 另一方面, 主观权重与客观权重的

依据  $rc$  得分计算初始排序, 当出现图 3 所示特殊情形时, 依据式(19)中所示相同的计算方法, 利用  $va$  得分进行修正, 求得综合评估得分, 基于文献[18]中介绍的典型正相关隶属度函数, 根据最终评估得分得出各评估对象的相对优劣程度。

$$va_i = \cos \theta_{i+} / \cos \theta_{i-}, i=1,2,\dots,m \quad (23)$$

$$\cos \theta_{i+} = \sum_{j=1}^n y_{ij} y_j^+ / \sqrt{\sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \sum_{j=1}^n y_j^{+2}} \quad (24)$$

$$\cos \theta_{i-} = \sum_{j=1}^n y_{ij} y_j^- / \sqrt{\sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \sum_{j=1}^n y_j^{-2}} \quad (25)$$

## 4 分层储能系统综合评估算法应用

### 4.1 算例

基于典型储能方式及其应用特点的现状分析, 选取典型情形, 建立 4 个不同类型的分层储能系统算例, 其集中储能与分布式储能的大致组成如表 1 所示。

表 1 分层储能系统算例

| Table 1 Different cases of hierarchical storage systems |        |                  |
|---|--------|------------------|
| 分层储能系统  | 集中储能方式 | 分布式储能方式          |
| HSS1  | 锂离子电池  | 锂离子电池 20%、铅酸 80% |
| HSS2  | 锂离子电池  | 锂离子电池 80%、铅酸 20% |
| HSS3  | 铅酸电池   | 锂离子电池 50%、铅酸 50% |
| HSS4  | 钠硫电池   | 锂离子电池 50%、钠硫 50% |

运用历史数据分析、推导计算及专家咨询等方法, 给出指标层各项指标的量化得分, 经过去量纲及归一化处理后, 得出 4 个分层储能系统算例的标准评估矩阵如下:

分配曲线较为贴合, 表明综合赋权方法保留了权重分配的准确性, 同时提升了重要指标的相对权重。

表 2 评估指标权重向量

| Table 2 Weight value vectors of evaluation index |  |
|--|--|
| 向量   | 权重值  |
| $w_s$  | (0.1465, 0.0401, 0.0171, 0.0802, 0.1991, 0.2629, 0.0411, 0.0848, 0.0681, 0.0602) |
| $w_o$  | (0.0814, 0.0628, 0.0469, 0.0920, 0.2138, 0.2371, 0.0832, 0.0704, 0.0542, 0.0583) |
| $w$  | (0.0827, 0.0175, 0.0056, 0.0512, 0.2953, 0.4326, 0.0237, 0.0414, 0.0256, 0.0244) |

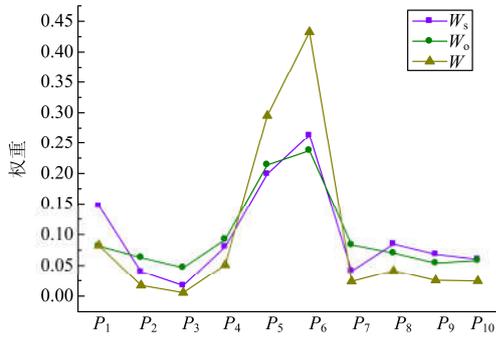


图 4 权重向量分配比较

Fig. 4 Comparison of weight vector distribution

基于加权综合权重，通过改进的逼近理想解算法计算 4 个算例的  $rc$ 、 $va$  及加权接近度  $t$ ，图 5 说明评估方法改进前后的评分进行归一化后的结果，可见  $va$  参数的引入，算例的归一化得分有大幅度变化，HSS1 及 HSS3 得分升高，HSS2 及 HSS4 得分降低，这是因为  $rc$  侧重反映评估对象各项指标的突出性，而  $va$  体现了评估对象不同性能的均衡性，表明综合评估方法能保证指标整体得分的准确度，同时体现了指标间均衡性的优劣，具有更高的可信度。

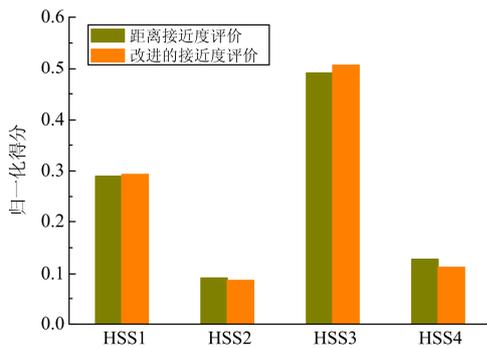


图 5 改进前后的评估结果比较

Fig. 5 Comparison of evaluation results before and after the improvement

表 3 中展示了 4 个算例  $rc$ 、 $va$  及加权得分  $t$  的具体数值，根据各算例加权得分  $t$  的分布情况，基于典型的正相关隶属度函数，分别为 4 个算例赋予相应的评语等级如表 3 中所示。

表 3 算例评估结果

Table 3 Comprehensive evaluation results

| 算例   | $rc$   | $va$   | $t$    | 评语等级 |
|------|--------|--------|--------|------|
| HSS1 | 0.5305 | 1.0444 | 0.2932 | 一般   |
| HSS2 | 0.1689 | 0.9788 | 0.0875 | 差    |
| HSS3 | 0.8972 | 1.0672 | 0.5068 | 较好   |
| HSS4 | 0.2347 | 0.9058 | 0.1125 | 较差   |

## 5 结论

1) 针对分层储能系统应用于高渗透光伏配电网中的典型场景，建立了可以综合反映分层储能系统适用性情况的指标体系及层次分析模型。提出了判断矩阵与变异系数法相结合的综合权重计算方法，新的赋权方法在保留了一定主观性的同时，可以充分发掘优势指标的性能，并提高权重分配的可信度。针对传统逼近理想解法的评估结果较为单一的问题，提出利用向量夹角接近度及加权接近度进行综合评判的方法，改进算法可以更好地反映评级对象各项指标的整体性及均衡性，实现评估精度的提升，能提供更加丰富的评估结果。

2) 基于典型分层储能系统算例验证，分析了不同电池储能方式的适用性特点及差异。锂电池技术性能优异，但投资较大，铅酸电池及钠硫电池性能及投资成本较为均衡。基于本文介绍的评估方法，可对其他形态的储能技术进行综合评估，提出改进分层储能系统应用中的劣势与问题的方向，为储能介质类型选择、集中及分布式储能的配置比例及增强与高渗透光伏适应性等问题的决策提供指导，对于分层储能系统的推广应用有一定的积极意义。

## 参考文献

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2-14.
- [2] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223. YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [3] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79. YANG Guohua, YAO Qi. Simulation study of the influence of photovoltaic power on line protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79.
- [4] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 224-230. XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 224-230.
- [5] 娄素华, 易林, 吴耀武, 等. 基于可变寿命模型的电池

- 储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 265-271.
- LOU Suhua, YI Lin, WU Yaowu, et al. Optimizing deployment of battery energy storage based on lifetime predication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 265-271.
- [6] CHACRA F A, BASTARD P, FLEURY G, et al. Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 684-691.
- [7] KALDELLIS J K, ZAFIRAKIS D, KAVADIAS K. Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(2): 378-392.
- [8] 方彤, 王乾坤, 周原冰. 电池储能技术在电力系统中的应用评价及发展建议[J]. 能源技术经济, 2011, 23(11): 32-36.
- FANG Tong, WANG Qiankun, ZHOU Yuanbing. Evaluation on the application of battery energy storage technologies in power system and development suggestions[J]. Energy Technology and Economics, 2011, 23(11): 32-36.
- [9] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
- BIE Zhaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [10] 陈卫, 杨波, 张兆云, 等. 计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 27-35.
- CHEN Wei, YANG Bo, ZHANG Zhaoyun, et al. Distribution networks supportability evaluation and optimization considering electric vehicles charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 27-35.
- [11] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵权模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
- DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [12] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2741-2746.
- HANG Wenchao, GU Xueping. Comprehensive evaluation of wind farms using variation coefficient method and technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2741-2746.
- [13] 杨晓东, 李庚银, 周明, 等. 基于交互式逼近理想解排序法的电压暂降治理投资最优分配策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 27-30.
- YANG Xiaodong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Optimal allocation of investment to control and mitigate voltage sag based on interactive technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 27-30.
- [14] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
- CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [15] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
- ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [16] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.
- DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [17] 陈奎, 韦晓广, 牛俊萍, 等. 基于 AHP-DEA 模型的电网规划方案综合评判决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 40-46.
- CHEN Kui, WEI Xiaoguang, NIU Junping, et al. Comprehensive judgment for power system planning alternatives based on AHP-DEA[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 40-46.
- [18] 柳顺, 杜树新. 基于数据包络分析的模糊综合评价方法[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(2): 93-98.
- LIU Shun, DU Shuxin. Fuzzy comprehensive evaluation based on data envelopment analysis[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2010, 24(2): 93-98.

收稿日期: 2016-02-02

作者简介:

雷琪(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能技术应用与电力需求侧管理;

苗世洪(1963-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、变电站综合自动化及微电网技术。E-mail: sa2000999@126.com

(编辑 魏小丽)