

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200767

# 基于激励惩罚机制和变权法的配电网每日运行效能评价方法

贺心达<sup>1</sup>, 吕林<sup>1</sup>, 许立雄<sup>1</sup>, 宋占党<sup>2</sup>, 魏弋然<sup>2</sup>, 张竹青<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网新疆电力有限公司  
乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 电网评价方法一直是电力行业研究的热点问题, 科学、合理的电网评价方法对电网未来的规划和改造起着重要的指导作用。构建了一种基于激励惩罚机制和变权法的配电网每日运行效能评价模型。首先, 提出了一套配电网运行效能评价指标体系。其次, 运用激励惩罚评价模型和变权理论对配电网进行单一时间断面上的评价。然后对一天内配电网的运行效能进行综合评价。最后, 通过算例和对比分析, 验证该评价模型的合理性。算例分析结果表明, 所提出的方法能够提高运行效能评价系统的区分度和灵敏度, 提升评价方法的反应能力。

**关键词:** 配电网; 运行效能; 激励惩罚机制; 变权重; 每日评价

## Evaluation method for daily operational efficiency of a distribution network based on an incentive-punishment mechanism and a variable weight method

HE Xinda<sup>1</sup>, LÜ Lin<sup>1</sup>, XU Lixiong<sup>1</sup>, SONG Zhandang<sup>2</sup>, WEI Yiran<sup>2</sup>, ZHANG Zhuqing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Urumqi Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The evaluation method of a power network is always a hot topic in the power industry. Scientific and reasonable evaluation methods of power grids play an important guiding role in the planning for and reconstruction of a power grid. An evaluation model based on an incentive-punishment mechanism and a variable weight method for the daily operational efficiency of a distribution network is constructed. First, this paper presents an evaluation index system for operational efficiency of a distribution network. Secondly, an incentive-penalty evaluation model and a variable weight theory are used to evaluate the distribution network over a single time section. Then, the operational efficiency of the network over one day is evaluated comprehensively. Finally, the rationality of the evaluation model is verified by an example and a comparative analysis. The result shows that the method proposed can improve the discrimination and sensitivity of the operational efficiency evaluation system and promote the response ability of the evaluation method.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. SGXJWLOOYJJS1801742) and the Key Research and Development Program of Sichuan Science and Technology Department (No. 2019YFG0152).

**Key words:** distribution network; operation efficiency; incentive and punishment mechanism; variable weight; daily evaluation

## 0 引言

电网评价方法一直是电力行业研究的热点问题, 科学、合理的电网评价方法能够提高电网规划评价、运行评价等工作的科学性和准确性。在电改背景下, 电网盈利模式向“准许成本”加“合理收

益”转变, 这就要求电网企业通过精益管理降低成本来扩大企业自身盈利的空间。因此, 电力企业在提高电网供电能力的同时, 还注重电网运行的“降本增效”, 并提出了配电网运行效能评估。

配电网运行效能随时间而变化, 在单个时间断面对配电网进行运行效能的评价存在片面性, 不能够反映配电网运行效能的整体态势, 评价结果不够准确。因此, 有必要研究一种配电网运行效能评价方法, 能够对配电网每日运行效能的变化做出灵敏

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(SGXJWLOOYJJS 1801742); 四川省科技厅重点研发项目资助(2019YFG0152)

的反应, 将配电网一天内的运行状况及其波动情况充分反映到评价结果中, 从而为配电网运行方式的调整和规划提供决策依据。

目前, 对配电网评价指标体系和方法的研究主要集中在配电网的静态评估上, 对配电网进行每日评估的研究内容较少。配电网评价指标体系的研究日益完善, 指标主要涵盖电网的可靠性<sup>[1-3]</sup>、安全性<sup>[4-5]</sup>、灵活性<sup>[6-7]</sup>、经济运行<sup>[8]</sup>、电能质量<sup>[9-10]</sup>、电网规划<sup>[11]</sup>等方面, 虽然已经考虑到了运行效率和运行经济性, 但是缺乏针对每日运行效能评估的指标。综合评价方法研究也趋于成熟, 可用于电网评价的方法有灰色关联分析法<sup>[12-13]</sup>、数据包络分析法<sup>[14]</sup>、层次分析法<sup>[15-16]</sup>、熵权法<sup>[17]</sup>、模糊综合评价法<sup>[18-20]</sup>和多种组合赋权方法<sup>[21-25]</sup>等, 但是上述方法区分能力有限, 无法对时序上数据变化做出反应, 极容易损失特征数据导致评价不准确。在运行效能评估方面, 主要是针对单一电气设备进行运行效能评估, 例如变压器、变电站的二次设备<sup>[26-28]</sup>等, 缺乏将配电网作为整体进行运行效能评估的研究。

配电网评价的模式比较固定, 一般分为求取指标的评价价值和计算指标的权重两个方面。指标评价价值方面, 文献[9]引入激励惩罚评价模型对各个时刻的指标进行评价, 文献[12]运用灰色关联分析法求取指标的评价价值; 虽然都能得到较为客观的评价价值, 但是评价价值不反映电网变化趋势, 不能实现对指定时间内运行状况的反映。在指标权重方面, 文献[29-30]提出了基于变权理论的综合评价方法, 但是缺乏适用电网每日效能评价的变权函数。文献[31]将评价方法的时间尺度进一步缩小, 虽然提出了每日电网运行综合评价模型的框架, 但指标体系过于宽泛缺乏针对性。

综上, 本文提出了一种基于激励惩罚机制和变权法的配电网每日运行效能评价模型。首先, 提出了一套能够适用于配电网运行效能评价的指标体系。其次, 提出一种变权函数, 运用激励惩罚机制和变权理论对配电网进行单个时间断面上的评价, 使评价价值能够反映电网变化趋势。最后, 对一天内配电网的运行效能进行综合评价, 通过算例和对比分析, 验证该评价模型的合理性。

## 1 配电网运行效能评价指标体系

效能一词来源于政府效能建设, 是指某系统为达到其目标而显现的工作能力与效率。配电网在电力系统中发挥分配电能的作用, 而清洁能源的接入赋予了配电网新的使命。配电网运行效能由电网运行能力和电网运行效率两部分组成。本文定义配电网

运行能力为: 配电网将安全、优质的电能分配给用户, 并积极配合清洁能源消纳的能力。定义配电网运行效率为: 配电网在现有投资下, 运用现有设备最大可能地满足配电网运行要求的效率。

由于配电网运行效能随时间而变化, 其评估周期应尽量缩短, 不能够将静态的规划指标和长期性的统计指标列入配电网运行效能评价指标体系中。本文经凝练提出的配电网每日运行效能评价指标体系层次结构如图 1 所示。

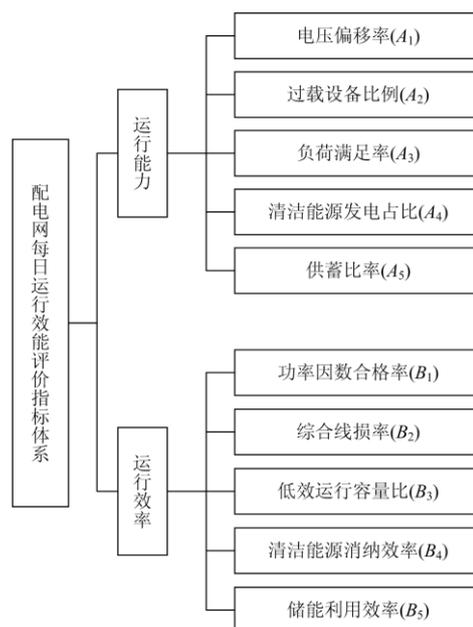


图 1 配电网每日运行效能评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for daily operation efficiency of distribution network

电压偏移率、设备负载率、功率因数合格率和综合线损率等指标都是能够良好反映配电网运行能力与效率的传统关键指标。面对大量接入的清洁能源, 配电网的运行目标发生变化, 需要新增对清洁能源消纳及相关设备运行效能的评价指标。现对部分指标进行说明如下。

### 1) 负荷满足率

负荷满足率定义为

$$A_3 = \frac{P_{\text{real}}}{P_{\text{Load}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{Load}}$  表示负荷的需求功率;  $P_{\text{real}}$  表示配电网实际能够满足的功率。负荷满足率实时反映配电网对电能的供应能力, 是衡量配电网运行能力的重要指标。

### 2) 供蓄比率<sup>[32]</sup>

配电网的供蓄比率定义为

$$A_5 = \frac{P_{\text{res}}}{P_L + P_{\text{in}}^{\text{max}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $P_{\text{res}}$ 为配电网中清洁能源实际的有功功率； $P_L$ 为配电网中有功负荷； $P_{\text{in}}^{\text{max}}$ 为配电网中可用的最大蓄电功率。配电网的供蓄比率实时反映电网对清洁能源的消纳能力，也反映储能备用对清洁能源间歇性的应对能力。

### 3) 低效运行容量比

配电网中运行的设备出现轻载和重载均会影响配电网运行效率，故低效运行容量比定义为

$$B_3 = \frac{S_{\text{eLight}} + S_{\text{eHeavy}}}{S_{\text{eN}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $S_{\text{eN}}$ 表示配电网中设备额定容量之和； $S_{\text{eLight}}$ 、 $S_{\text{eHeavy}}$ 分别表示轻、重载设备容量。

### 4) 清洁能源消纳效率

清洁能源消纳效率定义为

$$B_4 = \frac{P_{\text{res}}}{P_{\text{res}}^{\text{max}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $P_{\text{res}}$ 为配电网中清洁能源发电实际的有功功率； $P_{\text{res}}^{\text{max}}$ 为实际环境下的清洁能源发电最大允许出力。清洁能源消纳效率指标能够实时反映配电网对清洁能源发电的利用效率和兼容性，防止盲目增加清洁能源渗透率而出现大量弃风、弃光现象。

### 5) 储能利用效率

储能利用效率定义为

$$B_5 = \frac{P_{\text{in}} + P_{\text{out}}}{P_{\text{ESS}}^{\text{max}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $P_{\text{in}}$ 为配电网中所有储能设备的充电功率； $P_{\text{out}}$ 为配电网中所有储能设备的放电功率； $P_{\text{ESS}}^{\text{max}}$ 为配电网中所有储能的额定功率。储能利用效率指标反映了配电网中储能设备的实际使用情况，是判断电网清洁能源消纳能力的辅助性指标。

本文提出的配电网运行效能的评价指标框架，能够筛选出“低效高能”和“高效低能”等情况，使配电网每日运行评价体系对于电网的“效”和“能”更具有针对性，提升评价结果的辅助决策能力。

## 2 配电网每日运行效能综合评价模型

本文提出的配电网每日运行效能综合评价模型主要包括两大部分。一是运行效能的评价方法，采用激励惩罚评价法进行评价。二是指标权重计算，分别运用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和熵权法计算指标的权重，以“主观为主，客观为辅”的原则将指标权重进行线性组合得到常权重。然后，根据变权思想，以常权重为基础，构造

变权函数对常权重进行修正。

### 2.1 运行效能指标归一化方法

本文参考劣化度<sup>[16]</sup>对数据处理的思想，将指标分为越大越优型、越小越优型和中间型三大类，并对其进归一化处理。但是该方法指标上下限固定，某些指标无法达到100%，存在理论缺陷。而且，清洁能源发电占比、储能利用效率等指标受物理条件限制，在不同时段会有不同表现，若都采取同一上下限归一化，会导致加权后结果不准确。因此，为适应每日运行效能评估目标，本文采取变上下限归一化方法，即采用两条随时间变化的目标曲线，代替劣化度归一化方法中的固定上下限。以越大越优型指标为例，计算方法为

$$x = \begin{cases} 1, & x' > \alpha_t \\ \frac{0.4(x' - \beta_t)}{\alpha_t - \beta_t} + 0.6, & \beta_t \leq x' \leq \alpha_t \\ \frac{0.6x'}{\beta_t}, & 0 < x' < \beta_t \end{cases} \quad (6)$$

式中： $x'$ 为原数据； $x$ 为归一化的数据； $\alpha_t$ 、 $\beta_t$ 分别为 $t$ 时刻指标上下限，其值一般取相关标准规定值、历史运行最优(劣)值或每天给定的运行目标。

### 2.2 激励惩罚评价机制

本文应用激励惩罚评价机制的主要目的：一是提高指标评价价值之间的区分度，使得评价方法对指标数值的变化更加灵敏；二是考虑到了指标的变化过程，评价价值还受到指标数据趋势变化的影响，能够体现电网运行效能变化态势。

通过加权计算的综合评价方法会掩盖表现优秀指标和低劣指标之间的差距，使各指标的评价结果相差不大。因此，本文在指标维度和时间维度上应用激励惩罚机制，使评价结果的区分度更高，突出指标数据的动态差异特性。

为了在指标维度增加区分度，引入电能质量评价中基于双激励控制线的信息集结算法<sup>[9]</sup>。假设 $S$ 个评价指标中的最大平均增长率、最小平均增长率和全局平均增长率分别为 $r_{\text{max}}$ 、 $r_{\text{min}}$ 和 $r_{\text{avg}}$ ，计算公式为

$$\begin{cases} r_{\text{max}} = \max\left(\frac{x_{iT} - x_{i1}}{T-1}\right) \\ r_{\text{min}} = \min\left(\frac{x_{iT} - x_{i1}}{T-1}\right) \\ r_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^S (x_{iT} - x_{i1}) / (T-1)}{S} \end{cases} \quad (7)$$

$(i=1, 2, \dots, S)$

式中,  $x_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,T$ ) 为第  $i$  项指标在第  $j$  时刻的指标值。

激励、惩罚控制线的斜率计算公式为

$$\begin{cases} k_i^+ = r_{iavg} + v^+(r_{imax} - r_{iavg}) \\ k_i^- = r_{iavg} - v^-(r_{iavg} - r_{imin}) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $v^+$  和  $v^-$  分别为激励惩罚控制线斜率的修正系数, 反映激励或惩罚的程度, 若取 1, 则表示完全体现激励或惩罚的作用。

综上所述可以建立激励惩罚控制线方程为

$$\begin{cases} x_i^+ = k_i^+ t + b \\ x_i^- = k_i^- t + b \end{cases} \quad (9)$$

式中, 时间变量  $t \in (t_1, t_2, \dots, t_T)$ , 初始值  $b$  一般为具有较强解释性的关键点, 可取初始点的平均值。

假设各项指标在时间轴上的变化都是连续且均匀的, 则某一指标的变化轨迹可由折线图表示, 如图 2 所示。

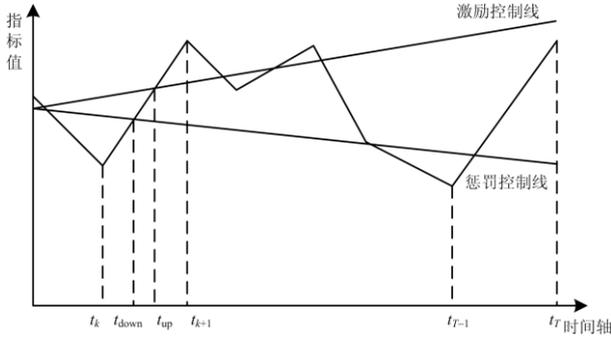


图 2 动态指标轨迹示意图

Fig. 2 Dynamic indicator trajectory

图 2 所示的第  $i$  项指标在  $(t_k, t_{k+1})$  内的固有评价价值可用式(10)计算。

$$y_i'(t_k, t_{k+1}) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} [x_{ik} + (t - t_k) \frac{(x_{i,k+1} - x_{ik})}{(t_{k+1} - t_k)}] dt \quad (10)$$

在有激励、惩罚控制线时, 指标的激励评价价值  $y_i^+(t_k, t_{k+1})$  和惩罚评价价值  $y_i^-(t_k, t_{k+1})$  的计算公式为

$$\begin{cases} y_i^+(t_k, t_{k+1}) = \int_{t_{up}}^{t_{k+1}} [(t - t_k) \frac{(x_{i,k+1} - x_{ik})}{(t_{k+1} - t_k)} + x_{ik} - x_i^+] dt \\ y_i^-(t_k, t_{k+1}) = \int_{t_k}^{t_{down}} [-(t - t_k) \frac{(x_{i,k+1} - x_{ik})}{(t_{k+1} - t_k)} - x_{ik} + x_i^-] dt \end{cases} \quad (11)$$

那么该项指标在  $(t_k, t_{k+1})$  内带激励惩罚效果的综合评价价值为

$$y_i(t_k, t_{k+1}) = y_i'(t_k, t_{k+1}) + u^+ y_i^+(t_k, t_{k+1}) - u^- y_i^-(t_k, t_{k+1}) \quad (12)$$

式中,  $u^+$  和  $u^-$  分别为激励、惩罚因子, 均为正数, 由式(13)求解得到。

$$\begin{cases} u^+ + u^- = 1 \\ u^+ \sum_{k=1}^{T-1} y_i^+(t_k, t_{k+1}) = u^- \sum_{k=1}^{T-1} y_i^-(t_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (13)$$

为了实现对指标时间维度的激励惩罚作用, 本文根据其相邻两点变化情况进行修正, 得到指标一个时间段内的评价修正值。修正公式为

$$y_i(t_k, t_{k+1}) = x_{i,t_k} \cdot e^{\omega \Delta x_{i,t_k}} \quad (14)$$

式中:  $\Delta x_{i,t_k}$  为第  $i$  项归一化后的指标值在  $(t_k, t_{k+1})$  时间段上的变化量;  $x_{i,t_k}$  为上述方法得到的第  $i$  项指标在  $(t_k, t_{k+1})$  时间段的评价值;  $\omega$  为给定常数, 可以控制激励惩罚程度, 本文取  $\omega = 2$ 。

### 2.3 指标变权重

变权思想是在评价时依据指标评价值, 对指标权重进行动态调整, 使得权重能反映指标评价值的变化过程对评估结果的真实影响。若采用常权重评价模型评价配电网运行效能, 当某一指标评价值变高而其他指标评价值较低时, 也会较大提高综合评价值; 同理, 当某一指标评价值变低而其他指标值较高时, 也不会大幅降低综合评价值。这表明采用常权重的评价模型对时序动态数据的处理存在不足, 不适用于每日运行效能评估。

因此, 本文为了提高配电网运行效能评价的灵敏度, 运用变权方法, 构造了一种状态变权函数, 对传统方法得到的常权重进行修正, 让某一指标评价值低时, 系统运行效能大幅降低; 某一指标评价值高时, 系统运行效能适度增加。

#### 2.3.1 常权重确定方法

本文采用层次分析法与熵权法相结合的混合权重计算方法确定常权重。

首先运用熵权法计算各项指标权重。由评价值矩阵  $\mathbf{Y}$ , 各指标的信息熵的计算公式为

$$E_i = -\ln(T-1)^{-1} \sum_{j=1}^{T-1} p_{ij} \ln p_{ij} \quad (15)$$

式中:  $p_{ij} = y_{ij} / \sum_{j=1}^{T-1} y_{ij}$ ; 若  $p_{ij} = 0$ , 则定义  $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

通过信息熵计算得到各项指标的权重为

$$w_{li} = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{i=1}^m E_i} \quad (16)$$

利用熵权法计算得到的各项指标权重记为

$w_1 = [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1m}]$ 。

然后, 利用层次分析法计算各项指标权重。一般采用 1-9 标度方法列写判断矩阵, 记为  $C$ 。

层次分析法计算权重的公式为

$$\begin{cases} M_i = \prod_{j=1}^n c_{ij} \\ \bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i} \\ w_{2i} = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $n$  为判断矩阵阶数。

利用层次分析法计算得到的各项指标权重记为

$w_2 = [w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2m}]$ 。

最后确定组合权重, 设置合适的系数构成线性组合<sup>[33]</sup>, 计算公式为

$$w_{ci} = \alpha w_{1i} + \beta w_{2i} \quad (18)$$

为体现以主观权重为主, 取  $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.7$ , 将组合权重记为  $w_c = [w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cm}]$ 。

### 2.3.2 变权重确定方法

为了实现某一指标评价值低时, 系统运行效能大幅降低; 某一指标评价值高时, 系统运行效能适度增加的目标。本文提出了一种变权函数, 指标变权计算公式为

$$w_{vij} = \frac{w_{ci}(\mu + e^{-\delta y_{ij}})}{\sum_{i=1}^m w_{ci}(\mu + e^{-\delta y_{ij}})} \quad (19)$$

式中:  $\mu > 0$ , 控制变权函数曲线形态, 本文取  $\mu = 1$ ;  $\delta$  为给定常系数,  $\delta$  越大, 权重的区分度越小, 反之亦然, 本文取  $\delta = 2$ ;  $y_{ij}$  为第  $i$  项指标第  $j$  个时刻的评价值;  $w_{ci}$  为第  $i$  项指标的常权重;  $w_{vij}$  为第  $i$  项指标第  $j$  个时刻的变权重。得到变权重矩阵, 将其记为  $w_v$ 。

设静态评价得到第  $i$  个时间段内的运行效能评价值为  $a_i$ , 每个时间段的权重记为  $w_i$ , 一般权重值相等, 那么在  $T$  时间内的综合评价值为

$$P = w_{11}a_1 + w_{12}a_2 + \dots + w_{1,T-1}a_{T-1} \quad (20)$$

综上, 基于激励惩罚机制和变权法的配电网每日运行效能评价方法流程图如图 3 所示。

## 3 算例分析

为验证本文提出的配电网每日运行效能评价方法的有效性, 选取修改后的 IEEE 33 节点系统作为算例系统, 如图 4 所示。

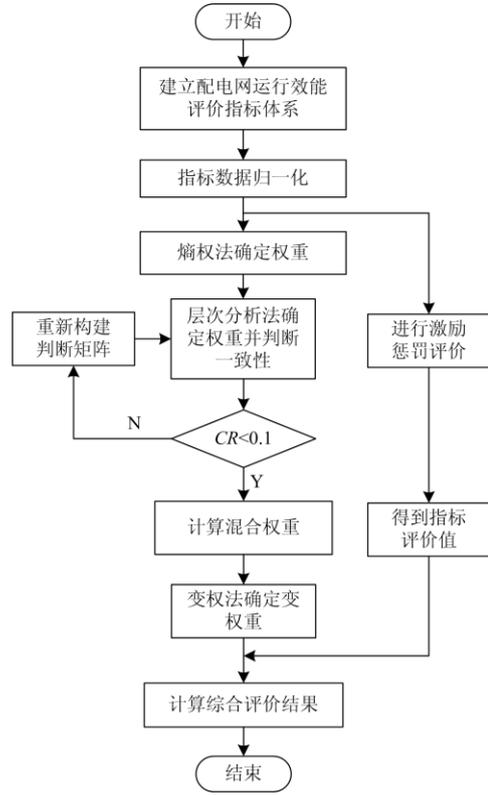


图 3 每日运行效能评价方法流程图

Fig. 3 Flow chart of evaluation method for daily operational efficiency

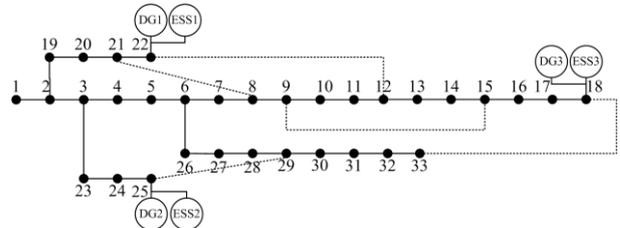


图 4 修改后的 IEEE33 节点算例系统

Fig. 4 Modified IEEE33 node test system

算例中各分布式电源(Distributed Generation, DG)和储能系统(Energy Storage System, ESS)的参数如表 1 所示, 峰值负荷为 4.05 MW, 清洁能源接入比例为 49.4%。

风、光出力及负荷曲线如图 5 所示, 储能充放电功率如图 6 所示。

为了方便分析, 本文用四种方法进行对比, 如表 2 所示。储能利用效率用方法 1 和方法 4 归一化的指标值如图 7 所示。需要注意的是, 由于储能主要用于削峰填谷, 夜间存在较长时间需要储能持续充电, 受限于储能容量, 其利用效率不会很高。故根据本文储能参数, 储能利用效率目标曲线低谷时段取 50%、高峰时取 100%为参考进行归一化。

表 1 DG/ESS 参数

Table 1 Parameters of DG/ESS

名称	类型	额定功率/kW	能量容量/(kW h)
DG1	光伏机组	500	—
DG2	光伏机组	500	—
DG3	风电机组	1 000	—
ESS1	电池储能	100	400
ESS2	电池储能	100	400
ESS3	电池储能	100	400

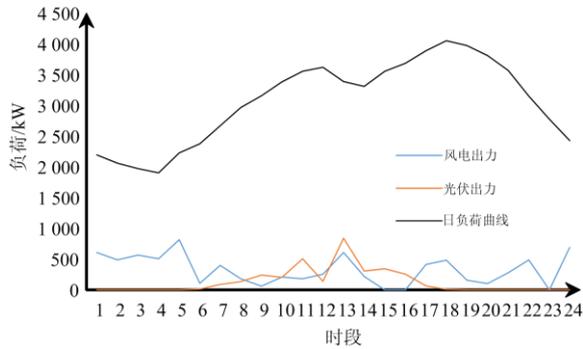


图 5 风、光出力和日负荷曲线

Fig. 5 Wind power output, photovoltaic output and daily load curve

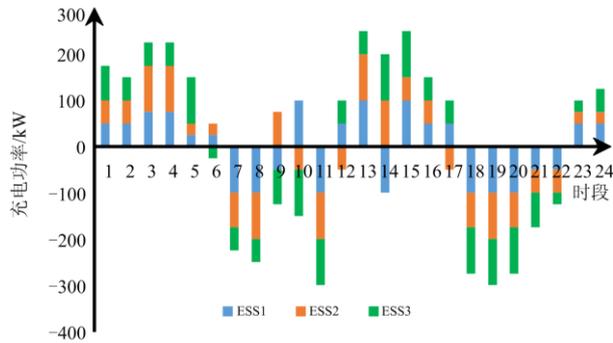


图 6 储能充放电功率

Fig. 6 Charging and discharging power of ESS

表 2 评价方法对比

Table 2 Comparison of evaluation methods

	归一化方法	评分方法	权重方法
方法 1	目标曲线改进的归一化方法	激励惩罚机制评价法	本文提出的以常权重为参考的变权方法
方法 2	目标曲线改进的归一化方法	激励惩罚机制评价法	混合常权重
方法 3	目标曲线改进的归一化方法	灰色关联分析法	混合常权重
方法 4	劣化度归一化方法	灰色关联分析法	混合常权重

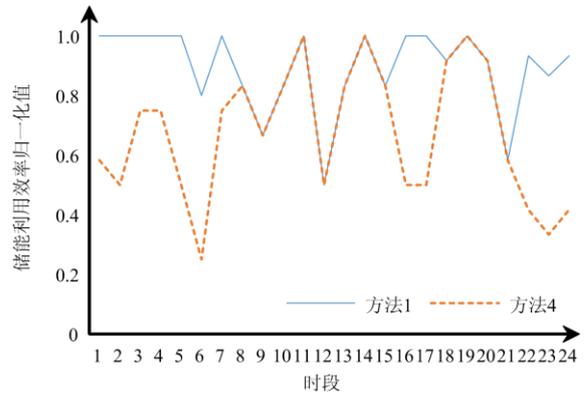


图 7 储能利用效率指标归一化值

Fig. 7 Normalized value of ESS efficiency index

由图 7 可以看出, 虽然储能已经充分利用了, 普通归一化方法仍使得评价在低负荷时期过低。而用目标曲线改进的归一化方法能够很好地反映这种情况。对比方法 1 和方法 3, 由层次分析法、熵权法得到的权重如表 3 所示, 两种方法指标评价价值不同, 熵权法得到的权重不同。

由表 3 可以看出, 由于配电网未发生弃风、弃光, 清洁能源消纳效率保持在 100%, 熵权法得到的权重为 0; 清洁能源发电占比和供蓄比例的主客

表 3 评价指标权重

Table 3 Weight of evaluation index

指标序号	层次分析法	熵权法		组合权重	
		方法 1	方法 3	方法 1	方法 3
A1	0.253 9	0.017 9	0.072 4	0.183 1	0.199 4
A2	0.194 0	0.019 4	0.081 9	0.141 6	0.160 4
A3	0.440 6	0.069 6	0.139 2	0.329 3	0.350 2
A4	0.064 3	0.517 6	0.419 4	0.200 3	0.170 8
A5	0.047 2	0.375 5	0.287 1	0.145 7	0.119 2
B1	0.270 7	0.096 6	0.121 4	0.218 5	0.225 9
B2	0.357 2	0.232 2	0.310 9	0.319 7	0.343 3
B3	0.174 5	0.254 0	0.265 7	0.198 3	0.201 9
B4	0.112 4	0	0	0.078 7	0.078 7
B5	0.085 2	0.417 2	0.302 0	0.184 8	0.150 2



观权重有较大矛盾；这是由于熵权法原理造成的，清洁能源消纳效率被认为信息量很小，反之，清洁能源发电占比和供蓄比率指标的不确定性更大，包含的信息量更大。

本文以综合线损率指标为例，将方法 1 和方法 3 得到的该指标的评价值进行比较，得到的评价值归一化后曲线如图 8 所示。

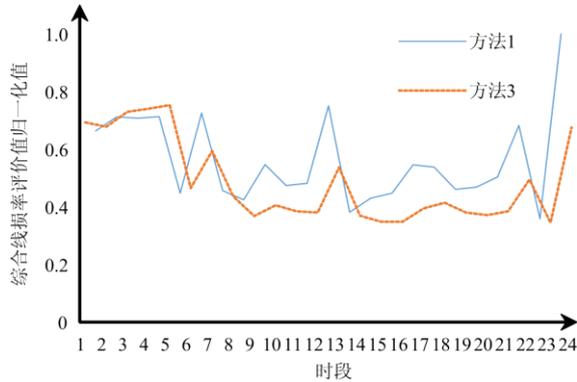


图 8 综合线损率指标对比图

Fig. 8 Contrast chart of comprehensive line loss rate

由图 8 可以看出，方法 1 给出的评价值波动幅度更大，在线损率出现异常时较方法 3 能够更加明显、迅速地做出反应，对指标数值的变化更加灵敏，波动更充分，提高了评价方法的区分度。

图 9 给出了方法 1 和方法 2 得到的电压偏移率指标变权重和常权重的对比。可以看出，对于评价值较高时，变权重会小幅减少使得运行效能分数适度增加；评价值较低时，变权重适当增加使得运行效能分数适当降低。表明此方法具有良好的数据跟随能力，提高了运行效能评价的灵敏度，符合预期目标。

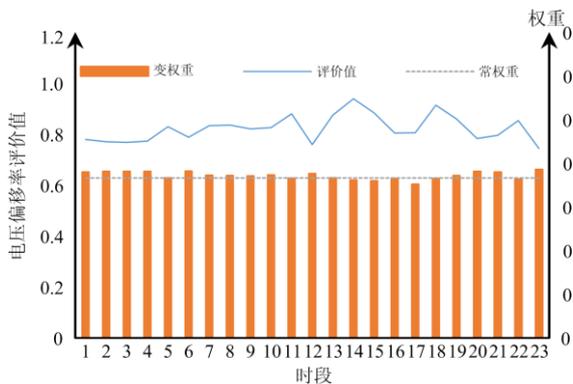


图 9 电压偏移率指标的变权重

Fig. 9 Variable weight of voltage deviation index

为方便分析变权重在时间轴上对总体评价产生的影响，本文以运行能力和运行效率两方面的得分为例，方法 1、方法 2 和方法 3 得到的分数曲线如

图 10 所示。将所有时段评价值加权平均，得到该系统能力值为 89.21 分，效率值为 84.51 分。可以看出系统一天内负荷水平较高时，系统运行能力较低；负荷增加到正常范围，此时系统运行效能较高；整天效能的降低主要来源于运行效率偏低。图 10 表明采用变权重配电网运行效能评价模型后，在系统运行状态波动时评价分数分布更广，可以更加灵敏地反映系统运行状态的变化趋势，能够直观反映运行效能是否满足运行目标。

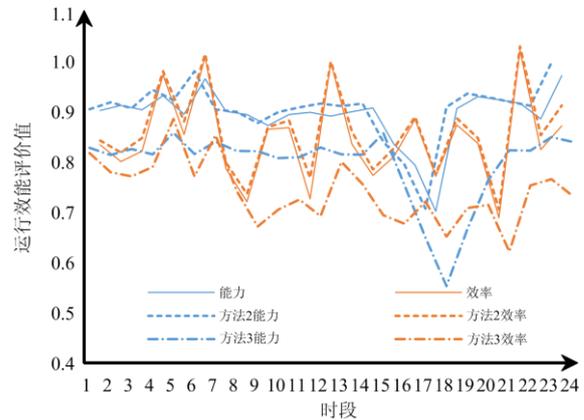


图 10 运行能力和效率分数对比图

Fig. 10 Contrast chart of operation capability and efficiency scores

现研究运行数据采样频率对该评价模型结果的影响，图 11 展示了间隔 1 h 采样和间隔 15 min 采样两种方法得到的配电网运行效能的总体情况。

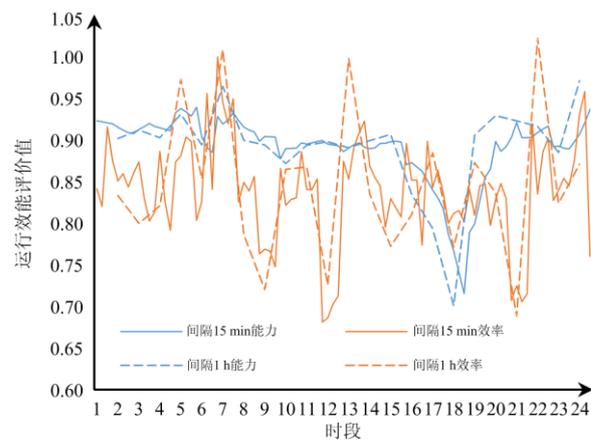


图 11 不同采样频率方法对比图

Fig. 11 Comparison of different sampling frequency methods

间隔 15 min 采样得到的能力值为 89.08 分，效率值为 83.89 分。采样频率越高，对系统运行效能的描述就越精确。可以看出，不同采样频率对该方法总体评价结果的影响较小，总分误差最大为 0.74%，运行效能曲线变化趋势大致相同。但是，若要分析某一指标变化情况，则需要尽可能提高采

样频率, 以提高计算精度。

将系统每日运行效能指标 24 h 的评价值通过加权平均综合, 可以得到配电网运行效能各指标评分如图 12 所示。通过图 12 可以直观看出运行能力方面, 一天内设备运行安全性、负荷满足率的情况优秀; 运行效率方面, 系统综合线损率、低效运行容量比表现较差。出现这种情况是因为系统内轻重载设备较多, 导致电能损耗过大。故该配电网的总体表现为“高能低效”系统, 需要针对线损率、负载率进行提升, 补齐短板。

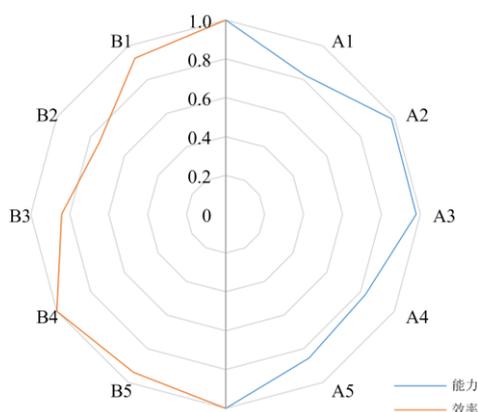


图 12 配电网每日运行效能评分图

Fig. 12 Distribution network daily operation efficiency score chart

## 4 结论

本文通过研究配电网每日运行效能评价的特性, 选出一些能够直观反映配电网运行状态并且实际运行数据获取较方便的指标, 由此提出了一种考虑配电网运行能力和运行效率这两个方面的配电网每日运行效能评价指标体系。为满足配电网每日运行效能评估的要求, 引入激励惩罚评价机制和变权重方法, 构建了基于激励惩罚机制和变权法的配电网每日运行效能评价模型, 并基于修改的 IEEE33 节点系统将本方法与传统评价方法进行比较, 得到以下结论:

1) 在每日运行效能评估中, 指标评价值之间的动态差异特性对评估结果的准确性有重大影响。采用激励惩罚机制的每日运行效能评估能够有效提升指标评价值的区分度, 提高评价方法对异常情况的分辨能力, 提升评价方法的反应能力。

2) 采用常权重的评价模型缺乏对数据的跟随能力, 导致评价结果区分度不大, 灵敏度不足, 故不适用于每日运行效能的评价。而运用变权重的评估能够弥补以上不足, 提高评价模型的灵敏度。

3) 本文提出的配电网每日运行效能评价模型可以将配电网在一天内的运行状况及其波动情况充分反映到评价结果中。而且, 不同采样频率对该方法最终结果的影响较小。因此, 有利于电网调度运行人员掌握电网每天运行效能的情况, 从而发现当前系统运行效能短板和进一步改进的空间, 为配电网运行方式的调整和规划提供决策依据。

## 参考文献

- [1] 南钰, 宋瑞卿, 陈鹏, 等. 基于改进熵权-灰色关联法的配电网可靠性影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 101-107.  
NAN Yu, SONG Ruiqing, CHEN Peng, et al. Study on the factors influencing the reliability analysis in distribution network based on improved entropy weight gray correlation analysis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 101-107.
- [2] YONG Pei, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. MPLP-based fast power system reliability evaluation using transmission line status dictionary[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1630-1640.
- [3] 张军六, 王金浩, 常潇, 等. 基于网络等值的直流配用电系统可靠性评估方法研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 107-112.  
ZHANG Junliu, WANG Jinhao, CHANG Xiao, et al. Reliability evaluation of DC distribution system based on reliability network equivalent[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 107-112.
- [4] MAKAROV Y V, DU Pengwei, LU Shuai, et al. PMU-based wide-area security assessment: concept, method, and implementation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1325-1332.
- [5] AKABER P, MOUSSA B, GHAFOURI M, et al. CASeS: concurrent contingency analysis-based security metric deployment for the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2676-2687.
- [6] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [7] MOHANDS B, MOURISI M S E, HATZIARGYRIOU N, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3140-3155.
- [8] 刘旭娜, 魏俊, 张文涛, 等. 基于信息熵和模糊分析法

- 的配电网投资效益评估及决策[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 48-56.
- LIU Xuna, WEI Jun, ZHANG Wentao, et al. Investment benefits evaluation and decision for distribution network based on information entropy and fuzzy analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 48-56.
- [9] 袁金晶, 欧阳森, 石怡理, 等. 基于激励惩罚机制的区域电网电能质量综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 55-59.
- YUAN Jinjing, OUYANG Sen, SHI Yili, et al. Power quality comprehensive evaluation of regional power grid based on incentive and punishment mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 55-59.
- [10] LI Huixin, YI Benshun, LI Qingxian, et al. Evaluation of DC power quality based on empirical mode decomposition and one-dimensional convolutional neural network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 34339-34349.
- [11] 李阳, 刘友波, 黄媛, 等. 配电网中长期动态规划投资的标尺激励评价方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 95-102.
- LI Yang, LIU Youbo, HUANG Yuan, et al. Yardstick motivation evaluation method for mid-and long-term dynamic planning investment of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 95-102.
- [12] 彭涛. 基于灰色关联度分析法的电网评价体系建模仿真[J]. 电子设计工程, 2018, 26(20): 114-118.
- PENG Tao. Optimal modeling and simulation of grid evaluation system based on grey relational grade analysis[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(20): 114-118.
- [13] 刘小平, 刘谋海, 黄瑞, 等. 基于灰色关联度的智能电能表性能评价方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 136-141.
- LIU Xiaoping, LIU Mouhai, HUANG Rui, et al. Research on performance evaluation method of smart energy meter based on grey correlation degree[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 136-141.
- [14] 李阳, 刘俊勇, 刘友波, 等. 省地一体化电力信息监控平台信息化的动态标尺评价模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 134-141.
- LI Yang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Dynamic yardstick evaluation method for informatization capability assessment of provincial and local integrated electricity utility information monitoring platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 134-141.
- [15] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150, 195.
- YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150, 195.
- [16] 刘万勋, 于琳琳, 张丽华, 等. 基于 AHP 和多级模糊综合评判的电网发展水平评估[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 80-85.
- LIU Wanxun, YU Linlin, ZHANG Lihua, et al. Evaluation of power grid development level based on AHP and multi-level fuzzy comprehensive evaluation[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 80-85.
- [17] 郭勇, 程春萌. 基于序关系法-熵权法的县域电网评价体系研究[J]. 农村电气化, 2019(6): 21-25.
- [18] 李辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 103-109.
- LI Hui, HU Yaogang, TANG Xianhu, et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 103-109.
- [19] WU Jiahui, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Performance evaluation for sustainability of wind energy project using improved multi-criteria decision-making method[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1165-1176.
- [20] 谭煌, 李媛, 马刚, 等. 智能电网低压台区运行状态模糊综合评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 110-115.
- TAN Huang, LI Yuan, MA Gang, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of smart grid low-voltage station operating state[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 110-115.
- [21] 颜湘武, 赵帅帅, 董清, 等. 电动汽车充电机性能综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 164-171.
- YAN Xiangwu, ZHAO Shuaishuai, DONG Qing, et al. Comprehensive evaluation of electric vehicle charger performance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 164-171.
- [22] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.
- [23] WANG Jidong, PANG Wenjie, WANG Lipeng, et al. Synthetic evaluation of steady-state power quality based on combination weighting and principal component

- projection method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(2): 160-166.
- [24] 孙辉, 张国庆, 高博, 等. 采用组合赋权法的智能变电站继电保护设备状态模糊综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 23-28, 34.  
SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of relay protection equipment status in intelligent substations based on combination weighting method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 23-28, 34.
- [25] 范洁, 杨世海, 武文广, 等. 基于组合赋权的非介入式终端辨识能力灰色 TOPSIS 评价[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 110-116, 131.  
FAN Jie, YANG Shihai, WU Wenguang, et al. Grey TOPSIS evaluation of non intrusive terminal identification ability based on combination weighting[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 110-116, 131.
- [26] 陶文伟, 王玉磊, 李金, 等. 基于 ADC 的智能变电站二次设备效能评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 118-124.  
TAO Wenwei, WANG Yulei, LI Jin, et al. ADC based effectiveness evaluation of secondary equipment in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 118-124.
- [27] 尹卿宇, 徐启峰, 周洁. 配电网设备利用率的组合智能评价方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 55-61.  
YIN Qingyu, XU Qifeng, ZHOU Jie. Combined intelligent evaluation method of equipment utilization rate in distribution network[J]. Smart Power, 2020, 48(11): 55-61.
- [28] 王燕, 蒋逸雯, 李黎, 等. 多源异构数据融合的避雷器运行状态评价方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(19): 132-139.  
WANG Yan, JIANG Yiwen, LI Li, et al. Operating condition assessment method of arresters based on multi-source heterogeneous data fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(19): 132-139.
- [29] 张壮, 李琳琳, 魏振华, 等. 基于变权-投影灰靶的指控系统动态效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 801-809.  
ZHANG Zhuang, LI Linlin, WEI Zhenhua, et al. Dynamic effectiveness evaluation of command and control system based on variable weight-projection gray target[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 801-809.
- [30] 谭贵生, 曹生现, 赵波, 等. 基于关联规则与变权重系数的变压器状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 88-95.  
TAN Guisheng, CAO Shengxian, ZHAO Bo, et al. An assessment of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 88-95.
- [31] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 等. 电网每日运行评价指标体系研究[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1611-1616.  
DAI Yuanhang, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Study on the daily operation assessment system of power grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1611-1616.
- [32] 钟清, 余南华, 尤毅, 等. 主动配电网技术特性及评估指标体系[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 122-127.  
ZHONG Qing, YU Nanhua, YOU Yi, et al. Technical characteristics and evaluation index system of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 122-127.
- [33] 蒲天骄, 陈乃仕, 葛贤军, 等. 电力电量平衡评价指标体系及其综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 250-256.  
PU Tianjiao, CHEN Naishi, GE Xianjun, et al. Research on evaluation index system and synthetical evaluation method for balance of electric power and energy[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 250-256.

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-12-31

作者简介:

贺心达(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析; E-mail: 873659451@qq.com

吕林(1963—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统分析, 配电网自动化方面的研究; E-mail: lvlin@scu.edu.cn

许立雄(1982—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: xulixiong@163.com

(编辑 周金梅)