

5-8-2021

## An evaluation method of integrated energy-saving for distribution network considering total spatial-temporal factors

Zhendong Du

*Huayun Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310006 , China*

Chunlin Shen

*Huayun Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310006 , China*

Xiaobing Teng

*Huayun Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310006 , China*

Shuxin Tian

*Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 , China*

Zhenfeng Li

*Huayun Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310006 , China*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

Du, Zhendong; Shen, Chunlin; Teng, Xiaobing; Tian, Shuxin; and Li, Zhenfeng (2021) "An evaluation method of integrated energy-saving for distribution network considering total spatial-temporal factors," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 36: Iss. 2, Article 2.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.002

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol36/iss2/2>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# 计及全时空要素的配电网综合节能评价方法

杜振东<sup>1</sup>, 沈春林<sup>1</sup>, 滕晓兵<sup>1</sup>, 田书欣<sup>2</sup>, 李振锋<sup>1</sup>

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310006; 2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

**摘 要:**配电网损耗一直是供电企业考核的重要指标,配网线路复杂,分支多,精细化线损带来的成本效益计算困难。以配电网综合节能降损为目标,基于全时空节能要素特征,从时间、元件和费用维度建立全寿命周期内的全网成本指标和节能降损效益指标,并利用融合层次分析和基于交叉效率的数据包络分析的改进 VIKOR 方法对配电网综合节能效果进行评价,给出配电网综合节能降损的最优设计方案。最后,利用中国某地区配电网算例验证该文中提评价方法的可行性和有效性。

**关 键 词:**配电网;节能降损;全寿命周期成本;VIKOR 方法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.002

中图分类号:TM711

文章编号:1673-9140(2021)02-0013-11

## An evaluation method of integrated energy-saving for distribution network considering total spatial-temporal factors

DU Zhendong<sup>1</sup>, SHEN Chunlin<sup>1</sup>, TENG Xiaobing<sup>1</sup>, TIAN Shuxin<sup>2</sup>, LI Zhenfeng<sup>1</sup>

(1. Huayun Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310006, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The line loss of distribution network is an important assessment evaluation index of electric power company. For complicated circuits and many branches of distribution network, it is difficult to calculate the cost and benefit brought by refining line losses. Under this background, aiming for the comprehensive energy conservation and loss reduction of distribution network, the life cycle cost and energy conservation and loss reduction benefit indexes are put forward from the aspects of time dimension, component dimension and expense dimension on the basis of the spatial-temporal elements of energy-saving features. The comprehensive energy conservation and loss reduction results are evaluated to derive the optimal design scheme of distribution network comprehensive energy conservation and loss reduction by the improved VIKOR method based on AHP and CEDEA analysis. Then the feasibility and validity of the proposed evaluation method are verified and validated by the actual distribution network in China.

**Key words:** distribution network; energy conservation and loss reduction; life cycle cost; VIKOR method

智能配电网具有安全、可靠、经济、环保以及友好接入等特征,是未来电力工业的发展方向。针对

电力行业的高能耗问题,节能降损已经成为构建智能配电网的基本环保要求。随着分布式电源和多元

收稿日期:2019-01-09;修回日期:2019-09-28

基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(HYSZ-17)

通信作者:田书欣(1985-),男,博士,讲师,主要从事电力系统运行与分析研究;E-mail: tsx396@163.com

用户的快速发展,未来配电网电力低碳环保发展空间较为广泛,覆盖了源—网—荷多个层面的节能降损技术,不仅提高了不同配电网设备的利用能效,而且形成了“标准化”的清洁能源供应体系,可以获得显著的经济效益和潜在的社会效益,并为建设资源节约型和环境友好型社会提供支持。

目前,现有国内外研究主要是从低碳清洁能源的大规模应用、高效的线路降损设计以及用户需求低碳化发展等角度对配电网节能降损措施进行评估分析。文献[1-2]从变电站集中补偿、配变低压集中补偿和线路无功补偿等控制方式着手研究无功补偿单一节能要素量化技术,并对施加无功补偿节能技术前、后的配电网能耗状态进行优化评估;文献[3]提出了以更换配电网变压器为核心的节能改造方案,建立了适用于节能改造的经济性风险量化评估模型;文献[4]分析了线路结构、技术装备以及线路经济运行等单一要素对线损的影响,实现对拟改造线路的节能改造决策排序;文献[5]将导线更换与中低压无功配置两类节能要素进行协同优化,建立充分考虑投资效益的配电网节能改造优化模型,充分地挖掘配电网的降损空间;文献[6]从线路扩径改造、母线电压调整、缩小供电半径、线路绝缘化改造、高能耗配变置换、降低日负荷波动、三相不平衡度调整、无功补偿及控制策略优化等方面定量计算线路的损耗水平,明确系统的节能降损空间;文献[7]利用灰色关联理论分析了线损率和功率损耗因素之间的相关关系,并建立了配电网节能改造投资规划模型,评估配电网的节能改造潜力;文献[8-9]确定节能降损的要素集,并利用层次分析法确定各单项节能要素指标权重,进而评估配电网综合能效值,但并未考虑分布式能源接入后配电网节能降损过程中多属性指标之间的博弈均衡问题。

该文聚焦配电网“标准、低碳、节能”3条主线,根据不同的用电需求、配电网特征,建立配电网节能降损全时空要素体系,提出配电网设计改造前后的全网全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)、新增分布式电源(distributed generation, DG)成本指标和节能降损效益等指标,并利用基于组合赋权的多准则妥协解排序(vlse kriterijuska optimizacija i komoromisno resenje, VIKOR)方法,解决节能降

损设计方案经济、技术等方面之间的多属性冲突问题。

## 1 LCC 模型

LCC 不仅仅是对研究初期电力元件的一次投入成本进行分析,而更要考虑元件在整个网络系统全寿命周期内的支持成本,包括安装、运行、维修、改造、更新直至报废的全过程,其核心内容是对电网元件的 LCC 进行建模计算,并依据量化值进行决策<sup>[10]</sup>。该文基于全要素的时空特征,从时间、元件及费用维度建立配电网节能降损三维 LCC 模型。其中,当时间维度从时间的角度出发时,包括投资、运行、维护、故障和废弃 5 个阶段<sup>[11]</sup>;设备维度从空间的角度出发,表示空间维度上不同网络元件,如变压器、线路、无功补偿装置等;费用维度从成本的角度出发,指在相应阶段不同元件所包含的成本费用元素。故全网 LCC 的计算公式可表示为

$$C_{LCC} = \sum_{i=1}^{N_D} C_{Ii} + C_{Oi} + C_{Mi} + C_{Fi} + C_{Di} \quad (1)$$

式中  $i$  为不同类型的网络元件; $N_D$  为总的节能降损网络元件数; $i=1,2,3$  分别为变压器、线路、无功补偿元件; $C_{LCC}$  为配电网的全寿命周期成本费用; $C_{Ii}$  为各类型元件的投资费用,是在在全寿命周期初发生的非经常成本; $C_{Oi}$  为各类型元件的运行费用,是全寿命周期内经常成本,需要由等年值求现值的方法来折算; $C_{Mi}$  为各类型元件的维护费用,是全寿命周期内经常成本,需要由等年值求现值的方法来折算; $C_{Fi}$  为各类型元件的故障费用,属于全寿命周期内经常成本,采用由等年值求现值的方法来折算; $C_{Di}$  为各类型元件的废弃费用,是在全寿命周期末发生的非经常成本,需要由将来值求现值的方法来折算。

### 1.1 变压器的 LCC 分解

变压器元件的 LCC 费用  $C_{LCC1}$  包括投资费用  $C_{I1}$ 、运行费用  $C_{O1}$ 、维护费用  $C_{M1}$ 、故障费用  $C_{F1}$  和废弃费用  $C_{D1}$ 。 $C_{I1}$  包括变压器的置购成本和安装调试费用。 $C_{O1}$  指变压器运行成本,包括变压器的损耗,计算公式为

$$C_{O1} = c_{\text{pow}} \cdot \Delta A_s \quad (2)$$

式中  $c_{\text{pow}}$  为单位电能电价;  $\Delta A_s$  为变压器全年电能损失总值。

维护费用  $C_{M1}$  包括变压器校正维修成本及其预防维修成本,计算公式为

$$C_{M1} = p_{11} \cdot x_1 + p_{21} \cdot y_1 \quad (3)$$

式中  $p_{11}$  为变压器校正维修频率;  $x_1$  为单重故障下变压器每次校正维修成本;  $p_{21}$  为变压器预防维修频率;  $y_1$  为单重故障下变压器每次预防维修成本,包括人工、备品备件等。

故障费用  $C_{F1}$  是变压器元件停运概率、平均停用功率、停运持续时间和停运后维修成本的函数,可以用元件停运后造成的直接经济损失来衡量。由于配电网设备满足  $N-1$  供电安全准则,单一变压器元件停运一般不会造成直接停电损失,因而可以近似考虑  $C_{F1}$  为 0。

废弃费用  $C_{D1}$  包括改造旧变压器的报废处理,考虑旧元件的运行年限及其被替换时的年限,则这一部分成本可以表示为

$$C_{D1} = -C_{y1} = -a_1(1 - b_1c_1) \quad (4)$$

式中  $C_{y1}$  为旧变压器替换时的残值,由于残值是可以回收的,因而将以负值形式加入到 LCC 成本中;  $a_1$  为旧变压器设备成本;  $b_1$  为变压器折旧率;  $c_1$  为旧变压器已使用年限<sup>[12]</sup>。

## 1.2 线路的 LCC 分解

对配电网中低压线路而言,主要包括架空线路和电缆等元件。线路的 LCC 费用  $C_{LCC2}$  包括投资费用  $C_{I2}$ 、运行费用  $C_{O2}$ 、维护费用  $C_{M2}$ 、故障费用  $C_{F2}$  和废弃费用  $C_{D2}$ <sup>[13]</sup>。

$C_{I2}$  包括线路元件购置成本及其安装调试费用。 $C_{O2}$  指线路运行成本,主要是指线路的损耗成本,计算公式为

$$C_{O2} = c_{\text{pow}} \cdot N_L \cdot (\Delta P + \xi \Delta Q) \cdot \mu \cdot \tau \quad (5)$$

式中  $N_L$  为变电站出线总回数;  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  分别为负荷分段  $i$  上的有功和无功损耗;  $\xi$  为无功损耗的折算系数;  $\mu$  为线路负荷分布系数,一般可取 0.33;  $\tau$  为最大负荷损耗小时数,可根据最大负荷利用小时数  $T_{\text{max}}$  与功率因数  $\cos \varphi$  查表得到。

维护费用  $C_{M2}$  是指线路元件的校正维修成本,计算公式为

$$C_{M2} = p_{12} \cdot x_2 \quad (6)$$

式中  $p_{12}$  为校正维修频率,是将母线单重故障和馈线单重故障频率相加求和得到;  $x_2$  为单重故障下线路每次校正维修成本。

故障费用  $C_{F2}$  考虑在有冗余线路元件中,单点设备故障可快速隔离,因此主要考虑母线、线路的多重故障成本。

废弃费用  $C_{D2}$  包括旧线路元件的报废处理,考虑旧设备的运行年限及其被替换时的年限,则这一部分成本可以表示为

$$C_{D2} = -C_{y2} = -a_2(1 - b_2c_2) \quad (7)$$

式中  $C_{y2}$  为旧线路设备被替换时的残值,由于残值是可以回收的,因而以其负值加入到 LCC 成本中;  $a_2$  为相应旧线路设备成本;  $b_2$  为相应类型线路折旧率;  $c_2$  为该旧线路的已使用年限。

## 1.3 无功补偿装置的 LCC 分解

无功功率补偿装置在供电系统中所承担的作用是提高电网的功率因数,降低供电变压器及输电线路的损耗,提高供电效率,改善供电环境。合理选择补偿装置,可以做到最大限度减少网络的损耗,使电网质量提高。结合 LCC 理论,建立无功补偿装置的成本模型。

无功补偿元件的 LCC 费用  $C_{LCC3}$  包括投资费用  $C_{I3}$ 、运行费用  $C_{O3}$ 、维护费用  $C_{M3}$ 、故障费用  $C_{F3}$  和废弃费用  $C_{D3}$ 。 $C_{I3}$  包括无功功率补偿元件的购置安装费用;  $C_{O3}$  计算用于配电网节能改造的无功功率补偿设备运行损耗费用,其中,并联电容器的损耗较小,可以忽略不计;  $C_{M3}$  用于配电网节能改造的无功功率补偿元件的检修维护费用;  $C_{F3}$  为无功功率补偿元件的单重故障的故障成本;  $C_{D3}$  采取变压器和线路设备的类似折旧处理,用于配电网节能改造的无功功率补偿元件报废处置费用。

## 2 基于全时空要素的配电网节能降损效益

配电网通常以网损最小为目标函数,在满足供电可靠性的前提下,实现系统节能降损优化。基于全时空要素的配电网节能降损效益是指采用全要素技术进行配电网节能降损前后所取得的效益:

$$E_{\text{DS}} = \tau c_{\text{pow}} \Delta P_{\text{loss}} \quad (8)$$

式中  $\tau$  为最大负荷损耗小时数;  $\Delta P_{\text{loss}}$  为使用节能技术前后的网损减少量, 表示变压器、线路、无功补偿和分布式能源等不同节能要素取得的综合节能效果。

## 2.1 变压器的节能降耗

变压器的节能降耗效益  $E_{\text{DT}}$  可由变压器改造前后的损耗减少量计算得到。配电网变压器的损耗为①配电网中配电变压器铁芯上的损耗, 即固定损耗(铁耗); ②电流流过配变绕组上的损耗, 直接与配电网的运行负荷相关, 即可变损耗(铜耗)。配电网变压器的总损耗减少量:

$$\Delta P_{\text{Tloss}} = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \sum_i \Delta P_{0i,1} + \frac{K^2 S_L^2 t_1 R_{\text{Teq1}} \times 10^{-3}}{U^2 \cos^2 \alpha} - \left( \sum_i \Delta P_{0i,2} + \frac{K^2 S_L^2 t_2 R_{\text{Teq2}} \times 10^{-3}}{U^2 \cos^2 \alpha} \right) \quad (9)$$

式中  $\Delta P_{\text{Tloss}}$  为配变的总损耗减少量;  $\sum_i \Delta P_{0i,1}$ 、 $\sum_i \Delta P_{0i,2}$  为系统所有变压器改造前后的空载损耗之和;  $t_1$ 、 $t_2$  为配变改造前后运行时间, 此处的  $t_1$ 、 $t_2$  为虚拟的时间长度;  $K$  为系数, 其值为均方根负荷与平均负荷之比;  $S_L$  为计算期时间段内的平均运行负荷;  $U$  为配电网的额定电压;  $R_{\text{Teq1}}$ 、 $R_{\text{Teq2}}$  为变压器改造前、后总的等效电阻值。

## 2.2 线路的节能降耗

实际配电网损耗主要包括变压器和线路损耗两部分, 且在中低压配电网中, 线路损耗在配电网损耗中占有极其重要的一部分, 不可忽略<sup>[14]</sup>。配电网线路节能降耗量计算公式为

$$\Delta P_{\text{Lloss}} = \sum_{j=1}^{N_{l1}} \frac{R_{Lj1} (P_{Lj1}^2 + Q_{Lj1}^2)}{(U_{Lj1})^2} - \sum_{j=1}^{N_{l2}} \frac{R_{Lj2} (P_{Lj2}^2 + Q_{Lj2}^2)}{(U_{Lj2})^2} \quad (10)$$

式中  $\Delta P_{\text{Lloss}}$  为线路有功降耗量;  $N_{l1}$ 、 $N_{l2}$  均为配电网的支路数;  $P_{Lj1}$ 、 $P_{Lj2}$  为改造前、后线路  $j$  首端或末端的有功功率;  $Q_{Lj1}$ 、 $Q_{Lj2}$  为改造前、后线路  $j$  首端或末端的无功功率;  $U_{Lj1}$ 、 $U_{Lj2}$  为改造前、后对应的端点电压;  $R_{Lj1}$ 、 $R_{Lj2}$  为改造前、后线路  $j$  的电阻。

结合式(8)、(10), 可以计算得到线路设备节能降耗带来的效益  $E_{\text{DL}}$ 。

## 2.3 无功补偿装置的节能降耗

为了降低配电网的网损、改善配电网的电压质量, 应当尽量确保无功功率的就地平衡, 即进行分散无功补偿, 尽量避免长距离输送无功功率。根据式(10)可以推断出, 若采用额定容量为  $Q_c$  的电容器组来进行输电线路就地补偿, 则补偿前、后的有功损耗变化量为

$$\Delta P_{\text{Sloss}} = \sum_{j=1}^{N_1} \frac{R_{Lj} (P_{Lj}^2 + (Q_{Lj})^2)}{(U_{Lj})^2} - \sum_{j=1}^{N_1} \frac{R_{Lj} (P_{Lj}^2 + (Q_{Lj} - Q_c)^2)}{(U_{Lj})^2} \quad (11)$$

式中  $P_{Lj}$  为该段线路的有功功率;  $Q_{Lj}$  为该段线路的无功功率;  $U_{Lj}$  为第  $j$  段线路上的电压;  $R_{Lj}$  为第  $j$  段线路电阻;  $Q_c$  为无功补偿容量。

结合式(8)、(11), 可以计算得到无功补偿设备节能降耗带来的效益  $E_{\text{DS}}$ 。

## 2.4 分布式电源接入的节能降耗

配电网中的新能源通常采用中小型容量的分布式接入方式。在配电网未接入新能源前, 配电网的潮流是从首端流向线路末端的; 当新能源分布式接入后, 配电网的电压和电流都将改变, 同时对网损也有影响。分布式电源接入前、后配电网的网络损耗变化量为

$$\Delta P_{\text{Nloss}} = \frac{(rl' + R_T)}{3V_0^2} \cdot$$

$$(2P_l P_{\text{DG}} + 2Q_l Q_{\text{DG}} - P_{\text{DG}}^2 - Q_{\text{DG}}^2) \quad (12)$$

式中  $r$  为该段线路的单位长度电阻;  $l$  为该段线路长度;  $R_T$  为变压器电阻;  $P_l$ 、 $Q_l$  分别为该段线路末端负荷的有功和无功功率;  $P_{\text{DG}}$ 、 $Q_{\text{DG}}$  分别为分布式电源的有功和无功功率;  $V_0$  为分布式电源接入点的相电压。

结合式(8)、(10), 可以计算得到分布式电源接入带来的节能降耗效益  $E_{\text{DN}}$ 。

# 3 基于 VIKOR 的配电网综合节能评价方法

## 3.1 组合赋权法

该文采用主观赋权法与客观赋权法相结合的组合赋权法, 通过将层次分析法(analytic hierarchy



process, AHP)、数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)和交叉效率(cross efficiency, CE)多种赋权方法综合集成,确定各指标的权重系数。

### 3.1.1 层次分析法(AHP)

AHP 依据研究对象的相关决策元素之间的支配关系,建立递阶层次结构,并利用规范的标度形成专家的判断矩阵,进而量化各评价指标的权重。具体步骤如下<sup>[15]</sup>。

1)建立专家的优先关系判断矩阵。采用 Saaty 提出的九标度法<sup>[16]</sup>,根据最高层、中间层和最低层各决策因素间的从属或支配关系,构造两两重要性比较的判断矩阵  $T_1$ 。

2)计算判断矩阵的特征值。对判断矩阵的最大特征值及其特征向量进行计算,最大特征值所对应的特征向量即为各评价指标的权重。

3)评价判断矩阵的一致性。根据矩阵理论,当正互反矩阵满足一致性时,其最大特征根等于矩阵的阶数,于是可获取判断矩阵的一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

式中  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵  $T_1$  的最大特征根; $n$  为阶数。

若  $CI$  值为 0,则可认为判断矩阵具有完全一致性, $CI$  值越大,说明判断矩阵的一致性差,需要基于判断矩阵的随机一致性指标  $RI$  值来进行一致性检验<sup>[17]</sup>,对于 1~10 阶的  $RI$  值如表 1 所示。

表 1 1~10 阶判断矩阵的  $RI$  值

Table 1 RI value of judgment matrix for 1~10 orders

| $n$ | $RI$ | $n$ | $RI$ |
|-----|------|-----|------|
| 1   | 0.00 | 6   | 1.24 |
| 2   | 0.00 | 7   | 1.36 |
| 3   | 0.58 | 8   | 1.41 |
| 4   | 0.90 | 9   | 1.45 |
| 5   | 1.12 | 10  | 1.49 |

若阶数大于 2,可计算判断矩阵的一致性指标  $CI$  与同阶随机一致性指标  $RI$  的比值,并称之为随机一致性比率  $CR$ ,即

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (14)$$

当  $CR \leq 0.1$  时,认为判断矩阵具有较好的一致性,

否则需要调整构成判断矩阵内各评价指标之间的标度。

4)计算对应指标的权重系数。在判断矩阵满足一致性校验前提下,依据计算出来的最大特征值,得到相应的最优特征向量  $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]$ ,则有

$$T_1 B = \lambda_{\max} B \quad (15)$$

再将特征向量  $B$  归一化处理,得到  $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ ,其中

$$\omega_i = \frac{b_i}{b_1 + b_2 + \dots + b_n} \quad (16)$$

则  $\omega_i (i=1, 2, \dots, n)$  为对应的指标权重系数。

### 3.1.2 基于交叉效率的数据包络分析法(CEDEA)

数据包络分析(DEA)方法由于其客观性和非参性迅速成为通用的客观赋权方法<sup>[18]</sup>,但传统的 DEA 允许决策单元(decision making unit, DMU)根据其自身的投入产出特性来评价个体效率,可能导致决策单元的效率虚高。对此,可将交叉效率与数据包络分析相结合,集合所有被评价对象 DMU 的视角来分析某一 DMU 的评价效率,进而计算权重系数。具体步骤如下。

1)鉴于利用 DEA 求解的客观权重数值可能出现较基于 AHP 求解的主观权重数值过小而导致客观权重被削弱的情况,需要对研究对象的输入输出指标进行无量纲化处理,形成指标矩阵  $R = \{r_{ij}\}$ 。其中,正指标  $\{r_{ij}^+\}$  的无量纲化处理为

$$r_{ij} = \frac{r_{ij}^+}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij}^+)^2}} \quad (17)$$

逆指标  $\{r_{ij}^-\}$  的无量纲化处理为

$$r_{ij} = 1 - \frac{r_{ij}^-}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij}^-)^2}} \quad (18)$$

2)将  $m$  个被评价对象作为  $m$  个 DMU 单元,每个 DMU 单元具有  $e$  个投入和  $g$  个产出,则对应第  $k$  个 DMU 将无量纲化处理后的指标  $\{r_{ij}\}$  按输入、输出划分,则输入指标数据为  $X_k = [x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{ek}]$ ,输出指标数据为  $Y_k = [y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{gk}]$ ,其中,  $e+g=n$ ,共计  $n$  个指标。

3)引入输入权重向量  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_e)^T$ ,输出权重向量  $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_g)^T$ 。对于某一特定 DMU,可建立有效的 DEA 模型<sup>[19]</sup>:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} \max \delta_{it} &= \frac{\sum_{h=1}^g \xi_{ht} y_{ht}}{\sum_{l=1}^e \pi_{lt} x_{lt}} \\ \text{s. t. } & \frac{\sum_{h=1}^g \xi_{ht} y_{hj}}{\sum_{l=1}^e \pi_{lt} x_{lj}} \leq 1, j=1,2,\dots,m \\ & \xi_{ht}, \pi_{lt} \geq 0, h=1,2,\dots,g, \\ & l=1,2,\dots,e \end{aligned} \right. \quad (19)
 \end{aligned}$$

式中  $\delta_{it}$  为特定 DMU 的效率;  $\xi_{ht}$  和  $\pi_{lt}$  均为权重变量。通过 Charnes-Cooper 变换将式(19)转换为线性规划模型进行求解,其转化后的模型为

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} \max \delta_{it} &= \sum_{h=1}^g \xi_{ht} y_{ht} \\ \text{s. t. } & \sum_{l=1}^e \pi_{lt} x_{lt} = 1 \\ & \sum_{h=1}^g \xi_{ht} y_{hj} - \sum_{l=1}^e \pi_{lt} x_{lj} \leq 0, \\ & j=1,2,\dots,m \\ & \xi_{ht}, \pi_{lt} \geq 0; h=1,2,\dots,g, \\ & l=1,2,\dots,e \end{aligned} \right. \quad (20)
 \end{aligned}$$

4) 计算特定 DMU 的交叉效率  $\delta_i$ 。若  $\delta_{it}^*$ 、 $\xi_{ht}^*$  ( $h=1,2,\dots,g$ )、 $\pi_{lt}^*$  ( $h=1,2,\dots,e$ ) 为式(20)求得的解,则称  $\delta_{it}^*$  为特定 DMU 的自评效率;  $\delta_{dj}$  被称为特定 DMU 对第  $k$  个 DMU ( $k \neq t$ ) 的他评效率,其计算公式为

$$\delta_{dj}^* = \frac{\sum_{h=1}^g \xi_{ht}^* y_{hj}}{\sum_{l=1}^e \pi_{lt}^* x_{lj}}, j=1,2,\dots,m, j \neq t \quad (21)$$

综合评价目标的自评效率和他评效率<sup>[20]</sup>,计算特定 DMU 的交叉效率  $\delta_i$  的结果为

$$\delta_i = \sum_{k=1}^m \delta_{ki} / m \quad (22)$$

### 3.1.3 组合赋权

层次分析法和融合交叉效率的数据包络分析法从不同角度来衡量指标的权重,所以需要一种组合赋权的方法对以上赋权方法进行组合<sup>[21]</sup>。该文采用式(23)的“乘法集成法”,兼顾主客观方法的不同作用<sup>[22]</sup>,使得所得权重更加符合实际需要。

$$\omega_i = \frac{\prod_{k=1}^j \omega_i k^{p_k}}{\sum_{i=1}^n \prod_{k=1}^j \omega_i k^{p_k}} \quad (23)$$

其中,  $p_k$  为加权系数,且满足

$$\sum_{k=1}^l p_k = 1, 0 \leq p_k \leq 1 \quad (24)$$

### 3.2 VIKOR 多属性评价方法

VIKOR 方法是由 Opricovic 和 Tzeng 教授分别提出的多属性决策方法<sup>[23]</sup>。VIKOR 方法能够结合决策者的主观偏好,同时兼顾被评价对象的群效用最大化和个体遗憾最小化,从而使评估结果更加合理。在综合评价中,VIKOR 采用了由 Lp-metric 表征的聚合函数来估算待评价对象的指标值与理想解的距离:

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^n [\omega_i (g_i^* - g'_{ij}) / (g_i^* - g_i^-)]^p \right\}^{1/p} \quad (25)$$

式中  $\omega_i$  为权重;  $g_i^*$  为正理想解;  $g_i^-$  为负理想解;  $g'_{ij}$  为评价指标值;  $n$  为指标个数;  $p$  为聚合函数的距离参数。

假设待评价对象有  $m$  个,记为  $\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}^T$ ,评价指标有  $n$  个,记为  $\mathbf{H} = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}^T$ 。评价对象  $Z_j$  的第  $i$  个评价指标的值为  $f_{ij}$ ,其中,  $i=1,2,\dots,n$ ;  $j=1,2,\dots,m$ 。基于 VIKOR 方法的多属性评价步骤如下。

1) 确定各评估指标的权重。利用式(23)中组合赋权方法获取各评估指标的权重,记为  $\boldsymbol{\omega} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}^T$ 。

2) 规范化决策矩阵。利用公式规范化决策矩阵,获得规范后的矩阵中各指标记为  $g_{ij}$ ,即

$$g_{ij} = \frac{h_{ij}}{\max h_{ij}} \quad (26)$$

3) 根据式(27)、(28),设置正理想解为  $g_i^*$ ,负理想解为  $g_i^-$ ,有

$$g_i^* = \left[ (\max_j f_{ij} | i \in I_1), (\min_j f_{ij} | i \in I_2) \right] \quad (27)$$

$$g_i^- = \left[ (\min_j f_{ij} | i \in I_1), (\max_j f_{ij} | i \in I_2) \right] \quad (28)$$

其中,  $I_1$ 、 $I_2$  分别为正、逆指标的集合。

4) 计算各待评价对象综合评价的群体效益值

$S_j$  和个别遗憾值  $R_j$ , 有

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i (g_i^* - g_{ij}) / (g_i^* - g_i^-) \quad (29)$$

$$R_j = \max w_i (g_i^* - g_{ij}) / (g_i^* - g_i^-) \quad (30)$$

5) 计算各待评价对象综合评价的利益比率。

$$Q_j = v \cdot (S_j - S^*) / (S^- - S^*) + (1 - v) \cdot (R_j - R^*) / (R^- - R^*) \quad (31)$$

其中,  $S^* = \min\{S_j\}$ ,  $S^- = \max\{S_j\}$ ,  $R^* = \min\{R_j\}$ ,  $R^- = \max\{R_j\}$ ;  $v$  为决策机制系数, 反映最大群效应和个体遗憾值的博弈权重。一般为了平衡群效益和个体遗憾值, 可取  $v = 0.5$ 。

6) 确定待评价对象优先顺序。按照  $S_j$ 、 $R_j$ 、 $Q_j$  值升序排列, 待评价对象排在前面的更优。当满足 2 个条件时, 可根据利益比率  $Q$  值的大小进行排序,  $Q$  较小值为较优值, 即

条件 1  $Q(Z^{(2)}) - Q(Z^{(1)}) \geq 1/(m-1)$ , 其中  $Z^{(i)}$  是按  $Q$  值升序排列后的第  $i$  个评价对象;

条件 2  $Z^{(1)}$  是按  $S$  或  $R$  值排序后的排在前面的最优评价对象。

若条件 1 不满足, 则  $Z^{(1)}, Z^{(2)}, \dots, Z^{(i)}$  为折衷解; 若条件 2 不满足, 则  $Z^{(1)}$  和  $Z^{(2)}$  均取为折衷解。

## 4 算例分析

该文以中国某 10 kV 配电网线路为例, 计算配电网整体 LCC 成本指标和节能降损效益指标。其中, 配电变压器 T 152~T 162 均为该供电区域的公变, SC<sub>1</sub> 和 SC<sub>2</sub> 为无功补偿装置, LC-1 为电缆线路, LJ-2 为架空线线路。该地区 10 kV 配电网线路如图 1 所示。

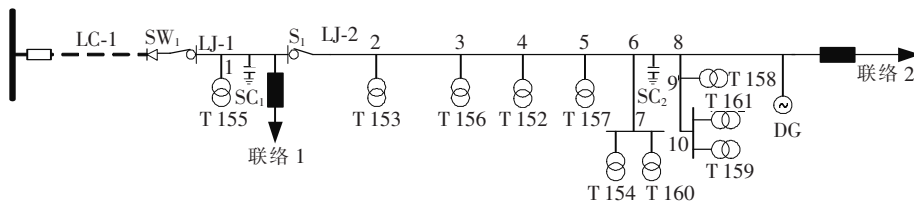


图 1 某 10 kV 配电网线路

Figure 1 Diagram of a certain 10 kV distribution network

图 1 中的配电变压器 T 152、T 153 和 T 158 的型号为 S 9-400/10; T 154、T 155 和 T 160 的型号为 S 9-315/10; T 156 的型号为 S 9-200/10; T 157、T 159 和 T 161 的型号为 S 9-160/10。电缆线路 LC-1 的型号为 YJV 22-10 kV-3×300; 架空线路 LJ-2 的型号为 JKLYJ-10/120。该供电区域属于 D 型供电区域, 其 10 kV 配电网接线模式为两分段两联络接线模式。该配电网结构指标如表 2 所示。

从线路选型、变压器选型、无功补偿量和分布式新能源接入容量等方面进行图 1 中某 10 kV 配电网线路节能改造, 设定 3 种全要素节能降损组合方案:

表 2 某地区实际 10 kV 中压配电网统计

Table 2 Parameter statistics of 10 kV distribution network in a certain actual zone

| 指标               | 单位   | 数值        |
|------------------|------|-----------|
| 10 kV 电网变电容量(公用) | kV·A | 2 825.000 |
| 无功补偿容量           | kVar | 315.000   |
| 10 kV 电网架空线路长度   | km   | 5.014     |
| 10 kV 电网电缆线路长度   | km   | 0.869     |

①将配电变压器型号由 S 9-160/10、S 9-200/10、S 9-315/10 和 S 9-400/10 改为 S 11-160/10、S 11-200/10、S 11-315/10 和 S 11-400/10, 架空线路由 JKLYJ-10/120 改为 JKLYJ-10/150, 增设 100 kV·A 的无功补偿装置, 接入 10 kW 的光伏电源; ②将配电变压器型号由 S 9-160/10、S 9-200/10、S 9-315/10 和 S 9-400/10 改为 S 13-160/10、S 13-200/10、S 13-315/10 和 S 13-400/10, 架空线路由 JKLYJ-10/120 改为 JKLYJ-10/185, 增设 200 kV·A 的无功补偿装置, 接入 20 kW 的光伏电源; ③将配电变压器型号由 S 9-160/10、S 9-200/10、S 9-315/10 和 S 9-400/10 改为 SH 15-160/10、SH 15-200/10、SH 15-315/10 和 SH 15-400/10, 架空线路由 JKLYJ-10/120 改为 JKLYJ-10/185, 增设 200 kV·A 的无功补偿装置, 接入 20 kW 的光伏电源。

LCC 成本的计算需要包含大量数据的处理内容, 对应的线路和变压器参数如表 3、4 所示。设定寿命周期为 15 a。3 种节能降损方案中相关变压器型号的技术经济参数见表 3; 10 kV 架空线路和电



缆线路部分型号对应的技术经济参数见表 4;根据三维 LCC 模型计算 3 个方案的配电网全网 LCC 费用,结果如表 5 所示。

将 10 kV 配电网 3 个方案的 LCC 成本折算到

建设当年,计算各方案的全网 LCC 成本,结果如表 6 所示。此外,3 个方案中的新增分布式电源成本  $C_{DG}$  的计算值也可参见表 6。结合式(8)~(12),计算各项效益指标值如表 7 所示。

表 3 线路参数  
Table 3 Line parameters

| 110 kV<br>线路 | 导线型号      | 导线单价/<br>(万元/km) | 单位长度导线直<br>流电阻/(Ω/km) | 单位长度导线直<br>流电抗/(Ω/km) | 百公里线路故<br>障率/(次/a) | 百公里线路平均每次<br>修复成本/(万元/a) |
|--------------|-----------|------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| 架空线          | JKLYJ 120 | 0.79             | 0.253 0               | 0.343 0               | 0.350              | 50                       |
|              | JKLYJ 150 | 0.95             | 0.206 0               | 0.335 0               | 0.350              | 50                       |
|              | JKLYJ 185 | 1.20             | 0.164 0               | 0.329 0               | 0.350              | 50                       |
| 电缆           | 标称截面 300  | 50.50            | 0.077 6               | 0.077 6               | 0.128              | 150                      |

表 4 变压器参数  
Table 4 Transformer parameters

| 变压器       | 容量/<br>(MV·A/台) | 采购成本/<br>(万元/台) | 空载损<br>耗/kW | 负载损<br>耗/kW |
|-----------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|
| S 9-160   | 0.160           | 1.060           | 0.400       | 2.20        |
| S 9-200   | 0.200           | 1.600           | 0.480       | 2.60        |
| S 9-315   | 0.315           | 2.160           | 0.670       | 3.65        |
| S 9-400   | 0.400           | 2.240           | 0.800       | 4.30        |
| S 11-160  | 0.160           | 1.614           | 0.270       | 2.20        |
| S 11-200  | 0.200           | 1.960           | 0.325       | 2.60        |
| S 11-315  | 0.315           | 3.300           | 0.475       | 3.65        |
| S 11-400  | 0.400           | 3.460           | 0.565       | 4.30        |
| S 13-160  | 0.160           | 2.040           | 0.200       | 2.20        |
| S 13-200  | 0.200           | 2.400           | 0.240       | 2.60        |
| S 13-315  | 0.315           | 3.400           | 0.340       | 3.65        |
| S 13-400  | 0.400           | 3.590           | 0.410       | 4.30        |
| SH 15-160 | 0.160           | 3.100           | 0.100       | 2.20        |
| SH 15-200 | 0.200           | 3.650           | 0.120       | 2.60        |
| SH 15-315 | 0.315           | 4.950           | 0.170       | 3.65        |
| SH 15-400 | 0.400           | 5.780           | 0.200       | 4.30        |

表 5 LCC 费用分解  
Table 5 Expense breakdown table of LCC 万元

| 方案 | $C_I$  | $C_O$ | $C_M$ | $C_F$ | $C_D$  |
|----|--------|-------|-------|-------|--------|
| 1  | 77.958 | 4.226 | 0.771 | 1.044 | -3.118 |
| 2  | 82.407 | 3.833 | 0.824 | 1.044 | -3.296 |
| 3  | 98.370 | 3.552 | 0.984 | 1.044 | -3.935 |

表 6 全网 LCC 成本和新增 DG 成本  
Table 6 Total network LCC and newly  
installed DG cost 万元

| 方案 | $C_{LCC}$ | $C_{DG}$ |
|----|-----------|----------|
| 1  | 495.696   | 2.984    |
| 2  | 476.480   | 5.968    |
| 3  | 483.811   | 5.968    |

表 7 配电网节能效益指标值  
Table 7 Energy conservation benefit  
index values 万元

| 方案 | $E_{DT}$ | $E_{DL}$ | $E_{DS}$ | $E_{DN}$ |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 1  | 9.25     | 2.71     | 1.11     | 0.113    |
| 2  | 16.01    | 4.81     | 2.19     | 0.225    |
| 3  | 23.97    | 4.81     | 2.19     | 0.225    |

结合表 6、7,基于式(13)~(24)计算成本效益 6 项指标的综合权重。先将指标两两对比,得到判断矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 1.000\ 0 & 0.666\ 7 & 0.500\ 0 & 0.500\ 0 & 0.666\ 7 & 0.666\ 7 \\ 1.500\ 0 & 1.000\ 0 & 2.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.428\ 6 & 1.500\ 0 \\ 2.000\ 0 & 0.500\ 0 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.428\ 6 & 2.000\ 0 \\ 2.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.428\ 6 & 1.666\ 7 \\ 1.500\ 0 & 0.700\ 0 & 0.700\ 0 & 0.700\ 0 & 1.000\ 0 & 1.666\ 7 \\ (1.500\ 0 & 0.666\ 7 & 0.500\ 0 & 0.600\ 0 & 0.600\ 0 & 1.000\ 0) \end{pmatrix}$$

其中,第 1~5 列分别对应全网 LCC、新增 DG 成本  $C_{DG}$ 、变压器设备节能降损效益  $E_{DT}$ 、线路设备节能降损效益  $E_{DL}$ 、无功补偿设备节能降损效益  $E_{DS}$  和

分布式电源接入的节能降损效益  $E_{DN}$ 。

基于式(13)~(16),获得 AHP 的评价指标权重向量:

$$[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] = [0.104 \quad 0.224 \quad 0.193 \quad 0.204 \quad 0.155 \quad 0.121]$$

基于式(17)、(18)对表 6、7 中的成本和效益指标进行无量纲化处理,形成矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} 0.410 & 4 & 0.666 & 7 & 0.305 & 6 & 0.370 & 1 & 0.337 & 4 & 0.334 & 6 \\ 0.433 & 3 & 0.333 & 3 & 0.528 & 9 & 0.656 & 9 & 0.665 & 6 & 0.666 & 3 \\ 0.424 & 5 & 0.333 & 3 & 0.791 & 8 & 0.656 & 9 & 0.665 & 6 & 0.666 & 3 \end{pmatrix}$$

然后利用式(20)~(22),求解线性模型得到 CEDEA 的评价指标权重向量:

$$[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] = [0.296 \quad 2 \quad 0.015 \quad 2 \quad 0.252 \quad 6 \quad 0.193 \quad 5 \quad 0.124 \quad 6 \quad 0.116 \quad 1]$$

采用式(23)中的“乘法”集成法对主观权重和客观权重进行集成,得到组合权重向量:

$$[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] = [0.197 \quad 0.022 \quad 0.312 \quad 0.254 \quad 0.125 \quad 0.090]$$

定量评估指标可以分为成本型和效益型两大类,指标数值越小越优即为成本型指标;指标数值越大越优即为效益型指标。结合式(25)~(30),计算方案 1、2 的群体效益值  $S_j$  和个体遗憾值  $R_j$ ,并基于式(31)计算各评价对象的利益比率  $Q_j$ ,其结果如表 8 所示。

表 8 基于 VIKOR 方法的方案排序结果

Table 8 Sorted results of energy conservation planning schemes based on VIKOR method

| 方案 | $S_j$   | $R_j$   | $Q_j$     | 按 $Q_j$ 排序 |
|----|---------|---------|-----------|------------|
| 1  | 0.617 1 | 0.197 2 | 1.000 000 | Ⅲ          |
| 2  | 0.315 1 | 0.189 6 | 0.125 064 | I          |
| 3  | 0.214 3 | 0.192 5 | 0.190 752 | Ⅱ          |

由表 8 可知,基于 VIKOR 评价方法,根据式(31)计算的  $Q_j$  优先顺序为  $Q_2$ (方案 2) $>Q_3$ (方案 3) $>Q_1$ (方案 1),即通过多属性指标的相互妥协,方案 2 优于方案 3,方案 3 优于方案 1。方案 1 的  $S_j$  和  $R_j$  的值较方案 2 和方案 3 均更大,说明其群体效益值和个体遗憾值都较差,对应的节能改造成本和效益都需要改善;方案 3 较方案 2 获得更高节能降

损效益,具有更优群体效益,但对应的 LCC 成本较高,个体遗憾值偏大;方案 2 立足于经济和技术两方面,通过对变压器和线路的经济改造方式使网络结构更加合理,避免线路过细造成的重载现象,取得成本和效益之间的最佳化妥协,更好地综合权衡各项相互冲突的指标,取得满意的整体效果。

## 5 结语

引入全寿命周期成本理论,建立了针对变电站、线路和无功补偿装置等要素的 LCC 模型,包括时间维度、元件维度、费用维度。考虑配电网中全时空要素对节能降损的影响,可以形成最优节能降损组合方案。基于 VIKOR 方法对节能降损组合方案进行评价,可以获得让决策者接受的妥协解,不仅能防止个别较差指标的消极影响被其他指标中和,而且能最大化群体效益和最小化个体遗憾,同时其评价过程立足于经济和技术方面综合考虑了各指标分别与最优值、最劣值的关系,从而使得评价更为完整,可以提升配电网线损精益化管理水平。

## 参考文献:

- [1] 陈冰斌,赵健. 配电网无功补偿节能计算方法优化研究[J]. 电网与清洁能源,2017,33(10):23-28+36.  
CHENG Bingbin, ZHAO Jian. Research on optimization of energy saving calculation method for reactive power compensation in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(10): 23-28+36.
- [2] 张晓虎,罗隆福,刘洁,等. 基于负荷实测的配电网无功优化及其降损节能效益分析[J]. 电网技术,2012,36(5):226-231.  
ZHANG Xiaohu, LUO Longfu, LIU Jie, et al. Load measurement based reactive power optimization for distribution network and analysis on its effects in loss reduction and energy conservation[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 226-231.
- [3] 葛江北,黄伟,李乐,等. 配电网节能改造经济性风险的量化评估[J]. 现代电力,2010,27(4):87-90.  
GE Jiangbei, HUANG Wei, LI Le, et al. Quantitative evaluation for economic risk of energy saving program

- in distribution network[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(4): 87-90.
- [4] 彭显刚,林卓琼,刘艺. 计及线损评估指标的中压配电线路节能改造决策[J]. 中国电力, 2017, 50(4): 87-93.
- PENG Xiangang, LIN Zhuoqiong, LIU Yi. Research on energy-saving reform decision-making of medium-voltage distribution lines considering line loss evaluation index[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 87-93.
- [5] 张勇军,陈超,廖民传. 配电网节能改造优化建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 60-64.
- ZHANG Yongjun, CHEN Chao, LIAO Minchuan. Research on optimal model for energy saving reconstruction of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 60-64.
- [6] 张勇军,石辉,许亮,等. 配电网节能潜力评估系统开发方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 51-55.
- ZHANG Yongjun, SHI Hui, XU Liang, et al. Systematic developing program of distribution network energy saving potential evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 51-55.
- [7] Zhang Yongjun, Zhang Xitian, Li Qin hao, et al. Gray theory based energy saving potential evaluation and planning for distribution networks[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2011, 57: 298-303.
- [8] 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, 38(15): 60-64.
- 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, 2013, 38(15): 60-64.
- [9] 郑志宇,李石东,凌毓畅,等. 中低压直流配电网线损计算与分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 23-28.
- ZHENG Zhiyu, LI Shidong, LING Yuchang, et al. Calculation and analysis of line loss of medium-low voltage DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 23-28.
- [10] 柳璐,程浩忠,马则良,等. 考虑全寿命周期成本的输电网多目标规划[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 46-54.
- LIU Lu, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Multi-objective transmission expansion planning considering life cycle cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 46-54.
- [11] 熊一,廖晓红,柯方超,等. 基于多体系数据融合的主变压器全寿命成本分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 3-11.
- XIONG Yi, LIAO Xiaohong, KE Fangchao, et al. Life cycle cost analysis of main transformer based on the multi-system data fusion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 3-11.
- [12] 王锦斌,张妍,耿鹏云,等. 基于优化正交偏最小二乘法的变电站全寿命周期成本预测分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 119-124.
- WANG Mianbin, ZHANG Yan, GENG Pengyun, et al. Substation life cycle cost prediction model based on optimized orthogonal partial least squares[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 119-124.
- [13] 杨文锋,王彬宇,程卓,等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604.
- YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium- and low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [14] 邓威,郭钊秀,李勇,等. 基于特征选择和 Stacking 集成学习的配电网网损预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 108-115.
- DENG Wei, GUO Yixiu, LI Yong, et al. Power losses prediction based on feature selection and stacking integrated learning[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 108-115.
- [15] 刘君,赵立进,黄良,等. 基于 TOPSIS 和灰色关联分析的变压器状态评价方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 63-68.
- LIU Jun, ZHAO Lijin, HUANG Liang, et al. State evaluation method for power transformer based on the topsis and grey relational analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 63-68.
- [16] 吴昊,朱自伟. 基于熵权—层次分析法综合指标的电网关键线路辨识[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 39-47+55.
- WU Hao, ZHU Ziwei. Key lines identification in power

- er grid based on comprehensive index calculated by the entropy weight-analytical hierarchy process[J]. *Electric Power*, 2020, 53(5): 39-47+55.
- [17] 陈仲伟,黄来,王逸超,等. 基于全寿命周期理论的电网技术经济评价体系[J]. *电力科学与技术学报*, 2017, 32(4): 120-124.
- CHEN Zhongwei, HUANG Lai, WANG Yichao, et al. Technical economic evaluation system of power grid based on the whole-life-cycle theory[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2017, 32(4): 120-124.
- [18] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [19] 石蓉,李永毅,王开艳,等. 新电改背景下基于数据包络分析的电网投资有效性研究与应用[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(2): 9-14.
- SHI Rong, LI Yongyi, WANG Kaiyan, et al. Research on and application of power grid investment effectiveness based on data envelopment analysis in the context of new electricity reformation [J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(2): 9-14.
- [20] 王文宾,白文广,石磊磊,等. 电力变压器全寿命周期经济-物理综合寿命评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 91-98.
- WANG Wenbin, BAI Wenguang, SHI Leilei, et al. Evaluating method of power transformers full life cycle economic-physical comprehensive life[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 91-98.
- [21] 黄宇翔,李绍金,刘乐平,等. 基于优化组合赋权法的含分布式电源配电网规划设计[J]. *电力科学与技术学报*, 2012, 27(4): 40-45.
- HUANG Yuxiang, LI Shaojin, LIU Leping, et al. Designing of distribution networks with distribution generation based on optimum combination weighting method[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2012, 27(4): 40-45.
- [22] 王泉,周云海,姚俊伟,等. 基于组合赋权和理想区间法的真空断路器状态评估[J]. *高压电器*, 2019, 55(4): 39-45.
- WANG Quan, ZHOU Yunhai, YAO Junwei, et al. State evaluation of vacuum circuit breaker based on combination weighting and ideal interval method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(4): 39-45.
- [23] Opricovic Serafim, Tzeng Gwo-Hshiung. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 178(2): 514-529.