

新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力 评估方法研究

郝文斌, 孟志高, 张勇, 谢波, 彭攀, 卫佳奇

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610000)

摘要: 随着光伏和风电等多种分布式电源的接入, 使得传统配电网的结构及其运行状态发生了较大改变。因此, 通过建立直观的分布式电源接入评价体系, 对新型电力系统背景下的配电网接入分布式电源的承载力进行合理评估成为重要的研究内容。以可再生能源及无功补偿装置接入的新型配电网中风电和光伏发电的最大容量为目标函数, 建立分布式电源接入配电网的承载能力模型, 通过二阶锥松弛将该模型转化为二阶锥规划模型进行求解。然后考虑到配电网运行的优质性、经济性以及灵活性, 建立多层次承载能力评估体系, 根据模型求解结果计算承载能力评价指标, 再通过组合赋权法将评价指标计算结果转化为综合评分。最后通过对 IEEE33 节点系统配电网模型进行算例分析, 结果表明所提评估方法更为全面、有效。

关键词: 新型配电网; 分布式能源; 承载能力; 评估; 组合赋权

Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system

HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, XIE Bo, PENG Pan, WEI Jiaqi

(Chengdu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: Access to various distributed generation such as photovoltaics and wind turbines has changed the structure and operation of the traditional distribution network. Therefore it has become an important research topic to establish an intuitive distributed power access evaluation system and to reasonably evaluate the carrying capacity of the distribution network connected to distributed power in the new power system. The maximum capacity of wind power and photovoltaic connected to the new distribution network with renewable energy and reactive power compensation devices is used as the objective function to establish the carrying capacity model of the distribution network. It is converted into a second-order cone programming model for the solution. Then, a multi-level carrying capacity evaluation system is established by taking into account the high quality, economy, and flexibility of the distribution network operation, and a carrying capacity evaluation index is calculated according to the model solution results. The calculation results of the evaluation indicators are transformed into the calculation model of the comprehensive score. Finally, through an example analysis of the IEEE33 node computing power model, the results show that the proposed evaluation method is more comprehensive and effective.

This work is supported by the General Program of Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0269).

Key words: new distribution network; distributed generation; carrying capacity; assessment; empowerment methodology

0 引言

近年来, 随着全球气候变暖, 空气污染等一系

列环境问题日渐加重, 电力系统对降低化石能源的使用和降低碳排放的要求越来越高, 可再生能源和清洁能源的使用比例不断增加。因此, 在配电网系统中分布式电源(distributed generator, DG)的渗透率也在不断上升。分布式电源及其他装置的大量接入使得配电网结构、形态逐渐转变, 发展成为了新型电力系统下的配电网系统。由于分布式电源接入电

基金项目: 四川省自然科学基金面上项目资助(2022NSFSC 0269); 国网四川省电力公司成都供电公司科研项目资助(521904220001)

网的规模越发庞大,其间歇性和随机性的特点也会对配电网带来许多负面影响,如引起潮流方向和大小变化、继电保护失灵、电压电流畸变及网损增加等问题^[1-2]。高比例分布式电源的接入位置与容量显著地影响了配电网的运行情况^[3],由于分布式电源在配电网中的接入点相对固定,因此需要根据多种配电网指标开展分布式电源接入配网的影响分析^[4],进而开展电力系统运行可靠性及经济性的优化工作^[5-6]。综上,对在配电网中 DG 的接入位置和最大承载力进行研究和评估具有一定的现实意义。

DG 最大接入容量问题通常为非线性优化问题,因此采用智能算法或随机场景模拟法等方法求解可能会加大求解难度和时间^[7-11]。文献[7]和文献[8]分别采用了模拟退火算法和遗传算法来求解包含约束的分布式电源接入容量的模型;文献[9]提出一种简单随机场景模拟法,来评估不同位置接入不同容量的 DG 对配电网带来的影响;文献[10]利用随机场景方法对带有储能系统配电网的光伏消纳能力进行分析求解;文献[11]提出一种基于多运行场景模拟的方法对风电并网容量进行评估。上述智能算法和随机场景模拟的方法能够满足多种 DG 接入容量评估方式的模拟,但是存在计算量大或者计算稳定性不够的缺陷。

就 DG 接入配电网的承载能力而言,文献[12]以配电网的灵活性为主要目标,从电源侧、配网侧以及负荷侧 3 个方面建立配电网灵活性评价体系;文献[13]从区域类指标和局域类指标两个方面建立配电网的新能源接纳容量评估体系;文献[14]从配电网系统网损、可靠性、优质性、对环境的影响程度以及延缓网络更新等 5 个方面建立分布式电源接入的系统评价指标体系,并以加权求和的方式计算指标权重得到评估结果;文献[15]基于蒙特卡洛法,从单渗透率影响和整体电压影响两方面对配电网光伏消纳能力进行评估;文献[16]提出一种改进的层次分析法,从设备运行状态、电能质量、经济性以及环保性等几个方面对 DG 接入配电网进行评估;文献[17]基于所提出的可靠性指标,对新能源接入的配电网进行了可靠性分析;文献[18]提出了一种配电网评估指标隶属度函数,并基于该函数对各项指标进行了归一化,以评估配网性能;文献[19]结合新能源并网发电的特点,提出了新能源正负效应指标以表征其对配电网性能的影响。

综上所述,在对配电网评估的研究中,大多将分布式发电对配网系统的影响作为研究配网的其中一个指标,因此所建立的分布式发电对配网的影响

模型不够全面;另外,在对分布式发电的影响评估中,研究对象多为传统配电网,并未考虑多种新型设备的接入,较多采用单一指标对其影响进行表征,或采用多指标简单归一化为同一指标,但从未从主观和客观两个层面上综合考虑对配网性能的影响,使得评估体系大都存在评价体系不够全面或赋权计算方法不够科学的问题,从而使得评价结果较为偏颇,缺乏可靠性,具有一定的局限性。

为了解决上述问题,本文首先搭建了含有光伏、风机及多种无功补偿装置的新型配电网系统,再以一个完整调度周期内分布式新能源承载能力最大为目标函数,采用二阶锥松弛进行新型配电网模型转化,进而加快模型求解速度。随后建立了承载力多层次评估体系,利用模型所得数据计算评价指标,再以组合赋权法将评价指标转化为便于观察的综合评分,最后在此基础上制定分布式能源接入新型配电网承载力的提升措施。最后以 IEEE33 节点配电网作为算例进行仿真分析,结果表明本文所提算法和评估指标体系的有效性和可行性。

1 新型配电网系统模型

目前的分布式电源以光伏和风机为主要代表。因此,本文研究模型中的分布式电源主要为光伏和风机,以下是光伏和风机的数学模型。

1.1 光伏及风机模型

1) 光伏发电系统模型

太阳能作为最丰富的可再生能源之一,能有效缓解能源短缺与环境污染问题,因此光伏发电(photovoltaic, PV)已成为重要的分布式电源之一,其输出功率的数学模型如式(1)^[20]所示。

$$P_{pv} = f_{pv} Y_{pv} \left(\frac{I_t}{I_s} \right) \left[1 + \alpha_p (T_{cell} - T_{cellSTC}) \right] \quad (1)$$

式中: P_{pv} 表示光伏的实际输出功率; f_{pv} 表示光伏系统的功率降额因数,一般取 0.9; Y_{pv} 表示光伏的阵列容量; I_t 表示 t 时刻下实际光照强度,单位为 kW/m^2 ; I_s 表示标准测试条件下的光照强度,一般取 $1\text{kW}/\text{m}^2$; α_p 为功率温度系数,单位为 $\%/^{\circ}\text{C}$; T_{cell} 表示当前光伏电池的表面温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; $T_{cellSTC}$ 为标准测试条件下的光伏电池表面温度,一般为 25°C 。

2) 风机系统模型

风机(wind turbine, WT)输出功率的数学模型如式(2)^[21]所示。

$$P_{wt} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ or } v_{co} < v \\ C_{wt} \frac{v - v_{ci}}{v_{rated} - v_{vi}}, & v_{ci} \leq v \leq v_{rated} \\ C_{wt}, & v_{rated} < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{wt} 表示风机的实际输出功率; v 表示实时风速, 单位 m/s; v_{ci} 表示风机的切入风速, 单位 m/s; v_{co} 表示风机的切出风速, 单位 m/s; v_{rated} 表示风机的额定风速, 单位 m/s; C_{wt} 表示风机的额定容量或额定功率。

1.2 新型配电网分布式电源承载能力模型

为了对配电网中接入分布式电源的承载能力进行准确的评估, 对接入的分布式电源进行充分的分配和使用, 本文以一个完整的调度周期内分布式新能源承载能力最大化为优化目标函数, 对配电网潮流、分布式电源和无功补偿装置等可控单元出力等方面建立模型约束。

1) 目标函数

$$f = \max(\sum_{t \in T} \sum_{i \in D} C_{i,t}) \quad (3)$$

式中: D 为分布式电源接入的节点总数; $C_{i,t}$ 为第 i 节点 t 时刻的分布式电源功率; T 表示一个完整的调度周期。

2) 约束条件

(1) 支路潮流约束

本文以辐射型配电网为研究对象, 选取其中一条支路在 t 时刻下的运行状态建立支路潮流模型, 如图 1 所示。

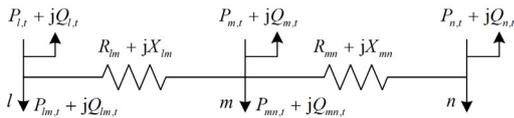


图 1 辐射型支路潮流

Fig. 1 Radial branch flow

该条支路潮流应满足的约束条件为

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)I_{ij,t}^2 \quad (4)$$

$$p_{j,t} = P_{ij,t} - R_{ij}I_{ij,t}^2 - \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} \quad (5)$$

$$q_{j,t} = Q_{ij,t} - X_{ij}I_{ij,t}^2 - \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (6)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2} \quad (7)$$

式中: $U_{j,t}$ 表示 t 时刻节点 j 的节点电压; $p_{j,t}$ 和 $q_{j,t}$ 分别表示 t 时刻注入节点 j 的有功和无功功率; $P_{ij,t}$

和 $Q_{ij,t}$ 分别表示 t 时刻流过支路 ij 的首端有功和无功功率; $I_{ij,t}$ 表示 t 时刻流过支路 ij 的电流; $R_{ij} + jX_{ij}$ 表示支路 ij 的阻抗; k 为 j 节点的子节点。

(2) 离散无功补偿约束

静止无功补偿器可以实现无级连续可调, 实现静止、快速、连续无级地向电网提供容性或感性无功, 达到全面提高电压的质量、满足供电要求的目。其应该满足的运行约束如式(8)所示。

$$Q_{i,\min}^{svc} \leq Q_{i,t}^{svc} \leq Q_{i,\max}^{svc} \quad (8)$$

式中: $Q_{i,\min}^{svc}$ 和 $Q_{i,\max}^{svc}$ 分别表示安装于节点 i 的静止无功补偿器无功补偿容量的最小值和最大值; $Q_{i,t}^{svc}$ 表示 t 时刻节点 i 处的静止无功补偿器的实际无功补偿量。

(3) 连续无功补偿约束

在电网中接入分组投切电容器组, 其满足的运行约束为

$$Q_{i,t}^{cb} = n_{i,t}^{cb} + Q_{one}^{cb} \quad (9)$$

$$0 \leq n_{i,t}^{cb} \leq n_{i,\max}^{cb} \quad (10)$$

式中: $Q_{i,t}^{cb}$ 表示 t 时刻节点 i 处的分组投切电容器组的实际投入容量; Q_{one}^{cb} 是一组电容器的无功补偿容量; $n_{i,t}^{cb}$ 表示 t 时刻节点 i 处的分组投切电容器组投入的组数, 该值为整数; $n_{i,\max}^{cb}$ 表示节点 i 处的分组投切电容器组能够投入的最大组数。

(4) 分布式新能源运行约束

在节点 i 接入分布式电源, 则其在 t 时刻的出力应该满足式(11)。

$$0 \leq P_{i,t}^{DG} \leq P_{i,t,\max}^{DG} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}^{DG}$ 表示 t 时刻节点 i 处分布式电源的实际出力; $P_{i,t,\max}^{DG}$ 表示 t 时刻节点 i 处分布式新能源允许出力的最大值。

(5) 节点电压约束

由于负荷具有时变性, 且加入的分布式能源与无功补偿装置也具有同样的特性, 使得系统的实时运行状况会更加复杂, 因此为了系统运行安全, 加入节点电压约束保证各节点电压能够运行在合理安全的范围内, 节点电压约束如式(12)。

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (12)$$

式中: $U_{i,t}$ 表示 t 时刻节点 i 的节点电压值; U_{\max} 和 U_{\min} 分别表示节点电压的上下限。

1.3 基于二阶锥松弛的模型转换

上述问题属于混合整数非线性规划问题(mixed integer non-linear programming, MINLP), 约束条件

中具有二次项和整数项,常规的求解方法求解效果不佳,因此利用二阶锥松弛将其转化为方便求解的规划问题^[22]。首先引入式(13)和式(14),将二次项转化为一次项。

$$\zeta_{i,t} = U_{j,t}^2 \quad (13)$$

$$\varsigma_{ij,t} = I_{ij,t}^2 \quad (14)$$

式中, $\zeta_{i,t}$ 和 $\varsigma_{ij,t}$ 分别表示 t 时段节点 i 节点电压的平方和支路 ij 电流的平方。

则式(4)一式(7)和式(12)约束条件式可以转化为

$$\xi_{j,t} = \xi_{i,t} - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)\varsigma_{ij,t} \quad (15)$$

$$p_{j,t} = P_{ij,t} - R_{ij}\varsigma_{ij,t} - \sum_{j \rightarrow k} P_{jk,t}\varsigma_{ij,t} \quad (16)$$

$$q_{j,t} = Q_{ij,t} - X_{ij}\varsigma_{ij,t} - \sum_{j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (17)$$

$$\varsigma_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\xi_{j,t}} \quad (18)$$

$$U_{\min}^2 \leq \zeta_{i,t} \leq U_{\max}^2 \quad (19)$$

经过转化后,式(19)仍旧为非线性等式约束,因此利用二阶锥松弛对其进行处理,可转化为式(20)。

$$\varsigma_{ij,t} \geq \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\xi_{j,t}} \quad (20)$$

经过等价变换,式(20)可以写成标准二阶锥形式,即

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \varsigma_{ij,t} - \xi_{j,t} \end{array} \right\|_2 \leq \varsigma_{ij,t} + \xi_{j,t} \quad (21)$$

式中, $\| \cdot \|_2$ 为二范数。

上述处理实际是通过放宽约束范围而提高求解效率,会产生一定误差,所以需定义松弛误差,即

$$e_{ij,t} = \varsigma_{ij,t}\xi_{j,t} - P_{ij,t}^2 - Q_{ij,t}^2 \quad (22)$$

式中, $e_{ij,t}$ 表示松弛误差指数。

2 承载能力评估体系模型建立及转化

2.1 多层次评估体系建立

承载能力评价指标体系需遵循构建评价指标的制定原则,即基于科学性、系统性、层次性、时效性等确定影响承载能力的关键指标^[23]。本文以配网新能源承载力评价为目标层,参照国内外评价指标构建情况,考虑到大量分布式能源接入的影响,建立如图2所示的配电网接入分布式电源承载能力评估体系。

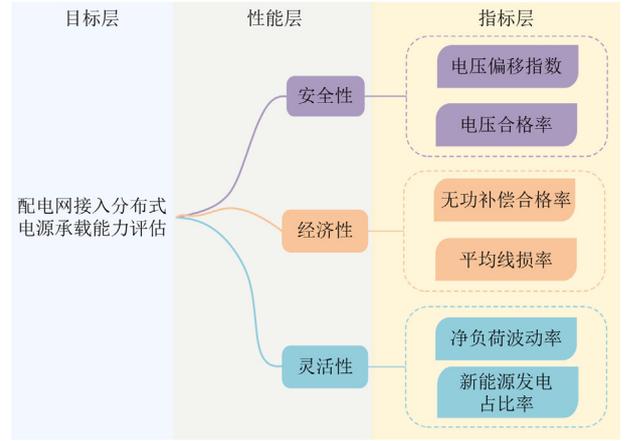


图2 评估体系

Fig. 2 Evaluation system

根据图2所示,评价指标体系共三层,第一层为目标层,第二层为性能层,第三层为指标层。目标层为评价体系的目的。性能层是能够评价配电网总体性能的指数,主要有安全性、经济性及灵活性。指标层是将性能层转化为具体的数值指标,方便观测。其中,安全性包括电压偏移指数和电压合格率两项指标,经济性包括无功补偿合格率和平均线损率两项指标,灵活性包括净负荷波动率和新能源发电占比两项指标。

2.2 指标计算模型

1) 安全性指标

(1) 电压偏移指数 (c_{VEI}): 反映在某个时间点,接入分布式电源后待评价的电力系统中的节点电压值与额定值的偏离程度,其值越小越好,计算公式如式(23)所示。

$$c_{VEI} = \sum_{i \in N} \frac{(U_{i,t} - U_{i,rated})^2}{U_{i,rated}^2} \times 100\% \quad (23)$$

式中: $U_{i,t}$ 表示 t 时刻节点 i 的节点电压实际值; $U_{i,rated}$ 表示节点电压的额定值; N 表示待评估电力系统的节点总数。

(2) 电压合格率 (c_{VQR}): 反映在某一时间点,接入分布式电源后待评价的电力系统中合格的电压节点数占总的节点数的比率,其值越大越好,计算公式如式(24)所示。

$$c_{VQR} = \frac{N_V}{N} \times 100\% \quad (24)$$

式中, N_V 表示待评价电力系统中电压合格的节点数。

2) 经济性指标

(1) 无功补偿合格率 (c_{RPQ}): 反映在某一时间节点,接入分布式电源后待评价的电力系统中,经过

无功补偿后功率因数满足无功配置要求的节点数与总节点数的比率, 其值越大越好, 计算公式如式(25)所示。

$$c_{\text{RPQ}} = \frac{N_Q}{N} \times 100\% \quad (25)$$

式中, N_Q 表示待评价电力系统中无功配置满足要求的节点数。

(2) 平均线损率(c_{ALR}): 反映在某一时间节点, 接入分布式电源后待评价的电力系统中, 整体电能损耗情况的指标, 其值越小越好, 计算公式如式(26)所示。

$$c_{\text{ALR}} = \frac{P_{\text{loss},t}}{L} \times 100\% \quad (26)$$

式中: $P_{\text{loss},t}$ 表示待评价电力系统中 t 时刻的总网损; L 为支路总数。

3) 灵活性指标

(1) 净负荷波动率(c_{FRL}): 反映在整个完整的调度周期内, 接入分布式电源后待评价的电力系统中净负荷单位时间波动的剧烈程度, 其值越小越好, 计算公式如式(27)所示。

$$c_{\text{FRL}} = \frac{|P_t - P_{t-1}|}{P_t} \times 100\% \quad (27)$$

式中: P_t 表示待评价电力系统 t 时刻的总负荷; P_{t-1} 表示待评价电力系统 $t-1$ 时刻的总负荷。

(2) 新能源发电占比(c_{RPG}): 反映在某个时间节点, 接入分布式电源后待评价的电力系统中分布式能源功率与所有节点总负荷的比值, 其值越大越好, 计算公式如式(28)所示。

$$c_{\text{RPG}} = \frac{\sum_{i \in D} P_{i,t}^{\text{DG}}}{P_t} \times 100\% \quad (28)$$

式中, $P_{i,t}^{\text{DG}}$ 表示待评价电力系统中 t 时刻节点 i 的分布式能源功率。

2.3 指标体系统一化

以上指标是从某一方面来评估分布式电源接入对配网的影响, 为了综合评估分布式能源接入的影响, 本文采用层次分析法和熵权法主客观相结合的组合赋权法对上述指标进一步进行量化, 形成全面的承载能力评价分数, 其流程图如图3所示, 并在此基础上针对配电网系统提出承载能力改善方案。其具体实现流程如下所述。

1) 指标正向化

指标分为正向指标和负向指标。正向指标是指指标越大, 则指标越优; 负向指标是指指标越小, 则指标越优。因此为了方便计算, 需要把所有指标

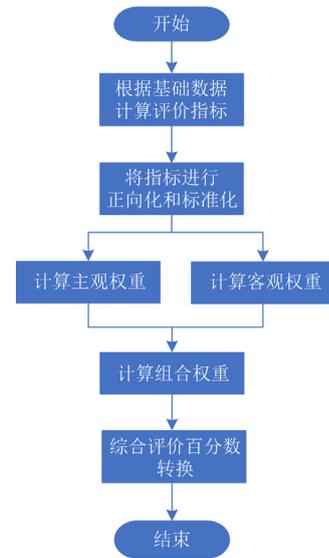


图3 指标百分制转化流程图

Fig. 3 Flow chart of indicator percentage conversion

转化为正向指标。

设有 m 个待评对象, n 个评价指标, 可以构成数据矩阵 X , 如式(29)所示。

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (29)$$

设数据矩阵内元素经过指标正向化处理过后的矩阵为 X' , 其中的元素为 x'_{ij} , 则指标正向化公式如式(30)和式(31)所示。

正向指标:

$$x'_{ij} = x_{ij} \quad (30)$$

负向指标:

$$x'_{ij} = \max(x_{ij}) - x_{ij} \quad (31)$$

2) min-max 标准化

由于每个指标的数量级和量纲可能有差别, 因此采用 min-max 标准化对正向化处理后的矩阵进行标准化处理, 设标准化后的数据矩阵元素为 r_{ij} , 由上可得指标正向化后数据矩阵元素为 x'_{ij} , 则标准化处理公式如式(32)。

$$r_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min(x'_j)}{\max(x'_j) - \min(x'_j)} \quad (32)$$

3) 层次分析法

层次分析法是一种主观赋权的方法, 将决策问题按照目标、准则及具体评价方案分解为不同的层次, 然后用求解判断矩阵特征向量的办法, 进行定性和定量结合的决策分析, 最后得到主观权重^[24]。其具体实现流程如下。

(1) 针对研究的问题建立分层级的指标体系。本文的评价指标体系即分层级指标体系, 便于后续进

行计算。

(2) 通过标度系统表建立判断矩阵，标度系统表如表 1 所示，判断矩阵表明指标两两相比较的重要程度。

表 1 标度系统表

Table 1 Scaling system

指标 a 相较指标 b 的重要程度	
指标 a 与指标 b 同样重要	1
指标 a 比指标 b 稍微重要	3
指标 a 比指标 b 明显重要	5
指标 a 比指标 b 强烈重要	7
指标 a 比指标 b 极端重要	9
2/4/6/8 是上述判断的中间值	

判断矩阵需满足式(33)的特征。

$$I_{ab} \times I_{ba} = 1 \quad (33)$$

式中： I_{ab} 表示指标 a 对指标 b 的重要程度； I_{ba} 表示指标 b 对指标 a 的重要程度。

(3) 求取判断矩阵的最大特征值 λ_{max} 及其对应的特征向量 W 。

(4) 结果可能会出现一致性偏差，需要对判断矩阵进行一致性校验。此时引入一致性指标 c_{CI} ，其计算公式如式(34)表示。然后再引入随机一致性指标 c_{RI} ，则一致性偏差公式如式(35)所示。 c_{RI} 的值由判断矩阵的阶数确定，如表 2 所示。若 $c_{CR} < 0.1$ ，则一致性通过校验。

$$c_{CI} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (34)$$

式中： λ_{max} 表示判断矩阵的最大特征值； n 表示判断矩阵的阶数。

$$c_{CR} = \frac{c_{CI}}{c_{RI}} \quad (35)$$

式中， c_{CR} 为一致性偏差。

表 2 c_{RI} 标准值

Table 2 c_{RI} standard values

矩阵阶数	c_{RI} 取值
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41
9	1.46
10	1.49

(5) 若判断矩阵通过校验，则将特征向量 W 归一化得到所求主观权重向量。若未通过校验，则修改判断矩阵中的元素值，再次进行计算。

4) 熵权法

熵权法是一种常用的客观赋权法，与层次分析法需要评判者写出判断矩阵进行权重计算不同，其赋值指标权重仅依靠指标数据本身的信息熵进行计算。当指标的信息熵值越大，其权重就越小；当指标的信息熵值越小，其权重就越大^[25]。利用熵权法计算客观权重的计算步骤如下。

(1) 对指标进行正向化和标准化，处理过后可以构成数据矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ，计算指标的信息熵 E_j ，如式(36)所示。

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (36)$$

其中：

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (37)$$

(2) 计算指标的客观权重 w_j ，如式(38)所示。

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (38)$$

5) 计算组合权重

最后计算组合权重 W_j ，得出可观测的分数，如式(39)所示。

$$W_j = \frac{\sqrt{\alpha_j \beta_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}} \quad (39)$$

式中， α_j 和 β_j 分别为主观权重和客观权重。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文基于 IEEE33 节点系统进行仿真分析，节点系统图如图 4 所示。考虑在节点处安装光伏和风机两种分布式电源。其中节点 11 处安装投切电容器组，容量为 500 Mvar；静止无功补偿器安装 21 节点处，其补偿范围为-0.2~1 Mvar。本文模型对配电网一天 24 h 运行工况进行优化，负荷、风机和光伏的时序预测标幺值如图 5 所示。各时段的负荷为 IEEE33 节点基础负荷乘对应时序值，各时段光伏、

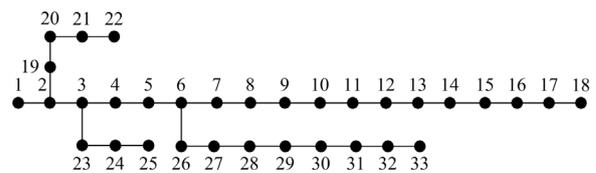


图 4 IEEE33 配电网系统图

Fig. 4 IEEE33 distribution network

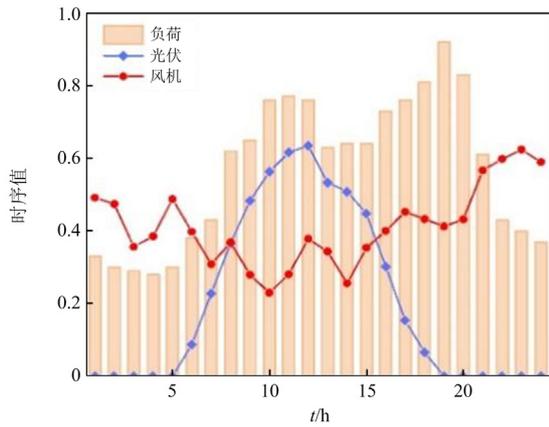


图5 负荷、风机及光伏功率预测时序标么值

Fig. 5 Time series standard values for load, wind turbine and photovoltaic power prediction

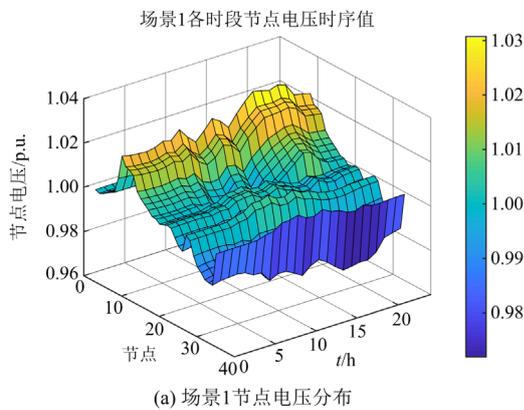
风机出力的最大值为各自装机容量乘对应时序值。

3.2 结果分析

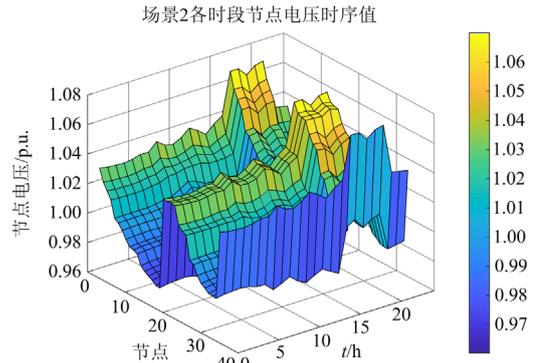
基于 3.1 节的参数信息, 本文通过将分布式电源接入不同节点进行场景划分, 对计算结果进行对比分析。

场景 1: 在节点 6 接入光伏, 在节点 9 接入风机; 场景 2: 在节点 6 接入光伏, 在节点 19 接入风机; 场景 3: 在节点 13 接入光伏, 在节点 19 接入风机; 场景 4: 在节点 13 接入光伏, 在节点 29 接入风机; 场景 5: 在节点 23 接入光伏, 在节点 29 接入风机。不同场景下各时刻的节点电压如图 6 所示。

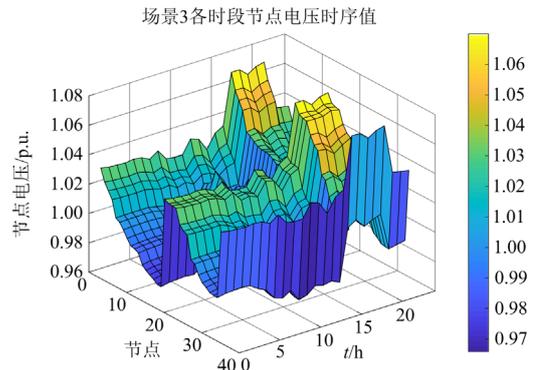
可以看出场景 1 的电压波动最小, 场景 4 和场景 5 相较于场景 1 的电压波动较大; 场景 2 和场景 3 的电压波动最大。且从图 6 中可以看出, 分布式电源的接入对节点电压有抬升作用, 并且当分布式电源接入配电网中后端时对电压的抬升作用更大, 当配电网有相关分布式电源接入需求时, 可以根据情况选择分布式电源的接入点。



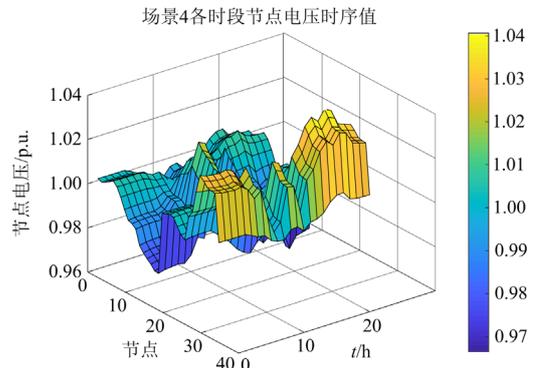
(a) 场景1节点电压分布



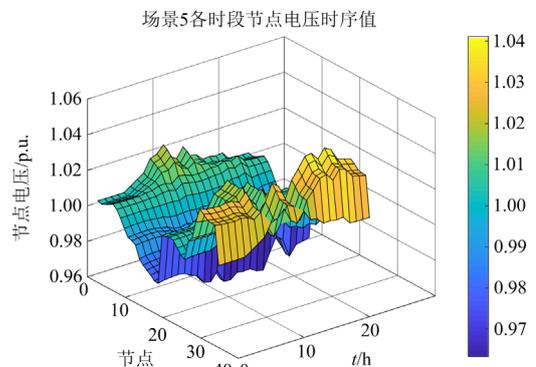
(b) 场景2各时段节点电压分布



(c) 场景3各时段节点电压分布



(d) 场景4各时段节点电压分布



(e) 场景5各时段节点电压分布

图6 不同场景下系统的电压时序值

Fig. 6 Time sequence of system voltage in different scenarios

基于上述计算结果和已建立的评估体系,对指标进行主观赋权和组合赋权后,得到的各场景各指标的组合赋权权重、最大接入容量以及场景承载力主观最终评分和组合最终评分如表3所示。图7和图8所示分别为各个场景各时段的电压偏移指数和综合评分,其他指标部分数据详见附录A。

表3 各场景指标及赋权结果

Table 3 Scenario indicators and empowerment results

指标	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5
VEI	0.2175	0.2014	0.1950	0.1912	0.1992
VQR	0.1501	0.2033	0.2087	0.1390	0.1745
RPQ	0.1082	0.1001	0.1006	0.1239	0.1074
ALR	0.2513	0.2459	0.2454	0.2615	0.2507
FRL	0.1571	0.1481	0.1483	0.1635	0.1556
RPG	0.1159	0.1012	0.1020	0.1208	0.1126
最大接入容量/MW	78.0344	77.6887	77.6898	77.888	77.6875
组合赋权最终评分	83.88	82.26	78.46	78.34	81.44
传统主观赋权最终评分	82.24	69.50	72.69	76.15	70.85

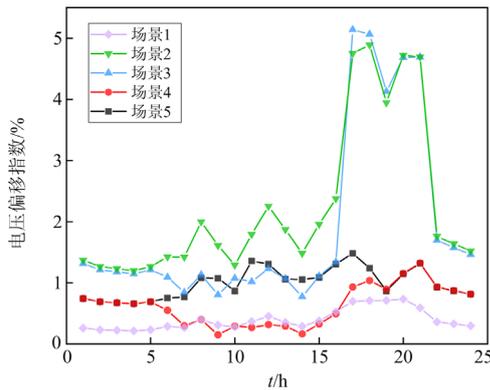


图7 各时段的电压偏移指数

Fig. 7 VEI in each period

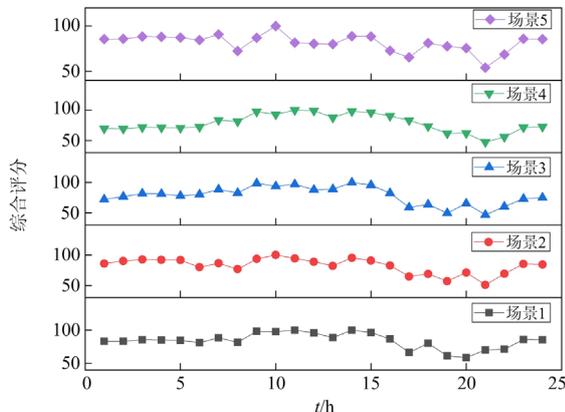


图8 各时段综合评分

Fig. 8 Comprehensive score of each time period

由图8所示的评分图可以看出,场景1所有时段评分相较于其他场景更加稳定,所以当分布式电源接入场景1相较于其他场景对于整个配电网系统安全性和稳定性更好。从图7的电压偏移指数可以看出,场景1的电压偏移指数最低,表现最好,而场景2的电压偏移指数最高,但是表3所示的场景权重表中的组合最终评分中场景1和场景2的评分较其他场景更高。对比主观赋权的最终评分,可以看出组合赋权的最终评分综合了主、客观评分情况,所得评价结果更加全面,而主观赋权评分当评分者个人倾向于某一指标进行评分时,就会导致评分的结果比较片面。通过表3所示的最大接入容量可以看出各个场景的值相差不大,场景1相较于其他场景略大,场景5最小。

通过附录A数据对比可以看出,场景2除电压数据外,其余数据相较于其他场景更好,因此在综合评分中场景2的最终评分也较好,由此可以说明评估体系综合评估效果的有效性和科学性。

同时,就该算例下分布式电源接入节点而言,分布式电源在配电网的干路中接入分布式电源相较于支路会更好,而在分支节点附近接入相较于叶子节点会更好,并且分布式电源的接入对于配电网的节点电压有抬升作用,且位于配电系统中后段时会更加明显,因此在接入时需要注意容量,以免出现电压过限的情况。

图9所示为场景1可再生能源接入时最大可发电量和实际输出以及无功补偿装置的运行情况。如左图所示,风机在夜间存在一定弃风,这是由于该时段需求较少导致的,而日间光照最充分时段存在一定量弃光,因为该时段可再生能源产能较高,但在该场景下,新能源总利用率高于80%。右图为无

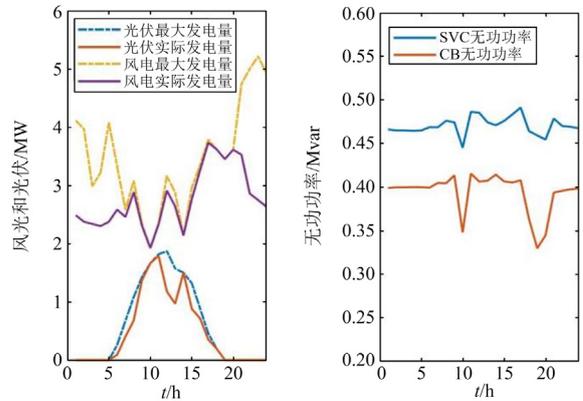


图9 新型配电网各装置运行情况

Fig. 9 Operation of each device in the new distribution network

功补偿器件的工作情况,通过该图可知,两种无功补偿元件共同工作,促进无功供需的平衡,为保证电压稳定提供了有利支撑。总的来说,在含有分布式电源、多种无功补偿装置的新型电力系统中,该模型能够有效地反映新型配电网的工作情况。

综上所述,由于分布式电源的随机性和间歇性,仅仅通过某一方面或单一时刻的指标对配电网的承载能力进行评估是较为片面的。针对配电网自身结构及各项运行指标,本文所建立的评估体系能够对配电网的承载能力进行综合评估,并且最终得到较为直观的评价分数。

4 结论

本文提出了一种采用二阶锥松弛模型转化求解分布式电源接入新型配电网的最大承载能力的方法,并且在此基础上建立了分布式电源接入配电网承载能力的评估体系。本文主要有以下结论:

1) 建立了新型配电网接入分布式电源最大承载力模型,考虑了光伏、风机及多种无功补偿装置的接入,并以可再生能源装机容量最大为目标,利用二阶锥松弛方法对模型进行转化并且求解,分析了新型电力系统各接入装置的运行情况及特征。

2) 建立了分布式电源接入配电网承载能力的评估体系,该体系能够从配电网的安全性、经济性以及灵活性3个方面的指标对新型配电网的分布式电源承载能力进行评估,然后基于层次分析法和熵权法相结合的组合赋权法计算评价指标的权重,并得到更加直观的百分制评估结果对配电网接入分布式电源的承载能力进行评估。

3) 通过算例表明,所提的二阶锥松弛模型能够得到快速稳定的最优解;通过将分布式电源接入配电网的不同节点,所得结果体现建立评估模型能够对配电网接入分布式电源的承载能力进行合理评估。

附录 A

表 A1 VQR 指标

Table A1 Results of VQR indicator

时刻	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
16:00	1.0000	0.6667	0.7576	1.0000	0.8182
17:00	0.9697	0.5455	0.5455	0.9394	0.7273
18:00	1.0000	0.5455	0.5455	0.8485	0.8485
19:00	1.0000	0.6364	0.6364	0.9394	0.9394
20:00	0.9697	0.6061	0.6061	0.8485	0.8182

表 A2 RPQ 指标

Table A2 Results of RPQ indicator

时刻	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
16:00	0.8788	0.8788	0.8788	0.8788	0.8788
17:00	0.8788	0.8788	0.8788	0.8788	0.8788
18:00	0.8485	0.8788	0.8788	0.8485	0.8485
19:00	0.7273	0.6667	0.6970	0.7273	0.6667
20:00	0.8485	0.8485	0.8485	0.7879	0.8182

表 A3 ALR 指标

Table A3 Results of ALR indicator

时刻	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
16:00	0.3175	0.3175	0.3175	0.3175	0.3175
17:00	0.3088	0.2780	0.2781	0.3088	0.3088
18:00	0.2572	0.1998	0.1998	0.2581	0.2477
19:00	0.2237	0.1745	0.1815	0.2236	0.2158
20:00	0.2424	0.1625	0.1653	0.2436	0.2327

表 A4 FRL 指标

Table A4 Results of FRL indicator

时刻	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
16:00	0.1233	0.1233	0.1233	0.1233	0.1233
17:00	0.0395	0.0395	0.0395	0.0395	0.0395
18:00	0.0617	0.0617	0.0617	0.0617	0.0617
19:00	0.1196	0.1196	0.1196	0.1196	0.1196
20:00	0.1084	0.1084	0.1084	0.1084	0.1084

表 A5 RPG 指标

Table A5 RPG indicator

时刻	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
16:00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
17:00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
18:00	0.9560	1.0000	1.0000	0.9552	0.9647
19:00	0.8239	0.8447	0.8398	0.8241	0.8293
20:00	0.9126	0.9685	0.9659	0.9116	0.9208

参考文献

- [1] 杜秀平, 游振华, 丁应平, 等. DG并网对配网继电保护影响与对策[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(7): 174-176, 180. DU Xiuping, YOU Zhenhua, DING Yingping, et al. Influence of DG grid connection on relay protection of distribution network and countermeasures[J]. Automation & Instrumentation, 2018(7): 174-176, 180.
- [2] 李颖峰, 史腾肖, 库城银, 等. 分布式电源接入对配电网网络损耗的影响研究[J]. 电工技术, 2022(14): 160-163. LI Yingfeng, SHI Tengxiao, KU Chengyin, et al. Research on the influence of DG access on distribution network

- loss[J]. *Electric Engineering*, 2022(14): 160-163.
- [3] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 116-123.
- [4] 彭生江, 陆军, 张中丹. 光伏接入对电网的影响研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 157-164.
PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 157-164.
- [5] 曲大鹏, 范晋衡, 刘琦颖, 等. 考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 131-139.
QU Dapeng, FAN Jinheng, LIU Qiying, et al. Assessment and optimization of charging pile acceptance capacity considering the comprehensive operational risk of a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 131-139.
- [6] ABAD M S S, MA Jin, ZHANG Diwei, et al. Probabilistic assessment of hosting capacity in radial distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1935-1947.
- [7] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(4): 56-61.
ZHOU Liangxue, ZHANG Di, LI Canbing, et al. Access capacity analysis considering correlation of distributed photovoltaic power and load[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 56-61.
- [8] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(8): 2273-2280.
ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [9] RYLANDER M, SMITH J, SUNDERMAN W. Streamlined method for determining distribution system hosting capacity[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(1): 105-111.
- [10] 赵波, 韦立坤, 徐志成, 等. 计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 34-40.
ZHAO Bo, WEI Likun, XU Zhicheng, et al. Photovoltaic accommodation capacity determination of actual feeder based on stochastic scenarios analysis with storage system considered[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 34-40.
- [11] XU Qian Yao, KANG Chongqing, ZHANG Ning, et al. A probabilistic method for determining grid-accommodable wind power capacity based on multiscenario system operation simulation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(1): 400-409.
- [12] 马杰, 李秋燕, 丁岩, 等. 含高渗透率可再生能源的配电网灵活性评价指标体系及计算方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(9): 99-104.
MA Jie, LI Qiuyan, DING Yan, et al. Flexibility evaluation index system and calculation method for distribution network with high-permeability renewable energy[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2020, 32(9): 99-104.
- [13] 张兴友, 陈涛, 赵帅, 等. 配电网分布式电源承载能力评估指标体系构建及测算[J]. *山东电力技术*, 2020, 47(11): 19-23.
ZHANG Xingyou, CHEN Tao, ZHAO Shuai, et al. Index system construction and calculation of distributed generation carrying capacity evaluation in distribution network[J]. *Shandong Electric Power*, 2020, 47(11): 19-23.
- [14] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(21): 132-135.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. The integrated evaluation of impact of distributed generation on distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(21): 132-135.
- [15] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 462-469.
YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 462-469.
- [16] 何璇, 高崇, 曹华珍, 等. 基于改进层次分析法的配电网指标评估[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(10): 93-99.
HE Xuan, GAO Chong, CAO Huazhen, et al. Index evaluation of distribution network based on improved analytic hierarchy process[J]. *Electrical Measurement &*

- Instrumentation, 2022, 59(10): 93-99.
- [17] 王璨, 侯强, 单莹. 基于新能源接入的配电网可靠性评估[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(11): 6-10.
WANG Can, HOU Qiang, SHAN Ying. Reliability evaluation of distribution network based on new energy access[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(11): 6-10.
- [18] 李妍, 王洁, 王少荣, 等. 计及新能源特性的配电网评估指标及其隶属度函数的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 43-49.
LI Yan, WANG Jie, WANG Shaorong, et al. Research on evaluation indices of new energy generation characteristics and membership functions[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 43-49.
- [19] 周念成, 周颖, 池源, 等. 新能源并网对配电网影响的正负效应综合评估[J]. 中国电力, 2012, 45(7): 62-67.
ZHOU Niancheng, ZHOU Ying, CHI Yuan, et al. Comprehensive evaluation of influence of renewable energy generation integration on distribution networks based on positive and negative effect indexes[J]. Electric Power, 2012, 45(7): 62-67.
- [20] DENG Dezheng, LI Gengyin. Research on economic operation of grid-connected DC microgrid[C] // International Conference on Renewable Power Generation, October 17-18, 2015, Beijing, China: 1-6.
- [21] CHEDID R, AKIKI H, RAHMAN S. A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13(1): 76-83.
- [22] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3717-3728.
- LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3717-3728.
- [23] 丁明, 李生虎, 吴红斌, 等. 基于充分性和安全性的电力系统运行状态分析和量化评价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 43-49.
DING Ming, LI Shenghu, WU Hongbin, et al. Analysis of power system operation state based on adequacy and security[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 43-49.
- [24] KANG Meisong, CHEN Chaoshun, LIN Chihun, et al. A systematic loss analysis of taipower distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1062-1068.
- [25] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-10-14

作者简介:

郝文斌(1976—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电网规划及调度运行等方面工作; E-mail: hwb760817@163.com

孟志高(1990—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要从事电网规划方面工作; E-mail: mengzhigao718@163.com

张勇(1986—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电网规划方面工作。E-mail: Enoch19861212@126.com

(编辑 魏小丽)