



风光可再生能源场站群分层分区并网规划方法

袁振华 刘晓明 曹永吉 张恒旭 杨金叶 田鑫

Planning Method for Layered and Partitioned Integration of Wind-Solar Renewable Energy Clusters

YUAN Zhenhua, LIU Xiaoming, CAO Yongji, ZHANG Hengxu, YANG Jinye, TIAN Xin

引用本文:

袁振华, 刘晓明, 曹永吉, 等. 风光可再生能源场站群分层分区并网规划方法[J]. 现代电力, 2023, 40(5): 660–668. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0046

YUAN Zhenhua, LIU Xiaoming, CAO Yongji, et al. Planning Method for Layered and Partitioned Integration of Wind-Solar Renewable Energy Clusters[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(5): 660–668. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0046

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可再生能源参与电力现货市场关键问题的研究

Discussion on Key Issues of Renewable Energy Participation in the Electricity Spot Market and Its Application on A Case Study
现代电力. 2022, 39(2): 203–211 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0388>

电力市场环境下考虑可再生能源保障性消纳的电价风险评估

Market Price Risk Analysis Under Background of Renewable Energy Assumption Guarantee
现代电力. 2022, 39(6): 631–639 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0111>

考虑需求侧参与的分布式电源并网优化

Optimization Method for Grid-connection of Distributed Generation Considering Demand Side Participation
现代电力. 2022, 39(6): 749–756 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0213>

大规模可再生能源电网多源实时互补有功控制的评述

Review of Real-time Complementary Active Power Control of Multi-type Power Resources for Large Scale Renewable Energy Grid
现代电力. 2019, 36(4): 1–10 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I4/1>

可再生能源消纳责任权重制下计及源荷储互动的电力市场均衡研究

Equilibrium Analysis of Microgrids in Renewable Portfolio Standard-Constrained Spot Market Considering Source-load-storage Interaction
现代电力. 2022, 39(3): 302–309 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0095>

计及灵活性供需的多场景分布式电源双层规划

A Bi-level Programming of Multi Scenario Distributed Generation Considering Flexible Supply and Demand
现代电力. 2023, 40(1): 8–17 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0231>

风-光可再生能源场站群分层分区并网规划方法

袁振华¹, 刘晓明¹, 曹永吉², 张恒旭², 杨金叶², 田鑫¹

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东省 济南市 250021;

2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省 济南市 250061)

Planning Method for Layered and Partitioned Integration of Wind-Solar Renewable Energy Clusters

YUAN Zhenhua¹, LIU Xiaoming¹, CAO Yongji², ZHANG Hengxu², YANG Jinye², TIAN Xin¹

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, Shandong

Province, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong

University), Jinan 250061, Shandong Province, China)

摘要: 在碳达峰、碳中和目标的驱动下, 风电、光伏等新能源发电快速发展, 大规模、集群化和分层分区并网是重要的发展方向。针对新能源大规模并网造成的电力系统潮流波动和电压偏移等问题, 提出一种风-光新能源场站群分层分区并网规划方法。考虑电网拓扑结构和输电线路阻抗, 基于图论对电网进行分区, 构建包含电压偏移、潮流波动和经济运行指标在内的新能源接入电网多指标评估体系, 以弃风弃光量最小为目标建立新能源分层分区并网规划模型。采用交流潮流二阶锥近似方法对模型进行简化, 求解各项评估指标, 结合 TOPSIS 综合评价法对所有可行方案进行评估, 确定最优接入方案。最后, 以 IEEE 39 节点系统为基础算例, 验证了所提规划方法的有效性和实用性。

关键词: 可再生能源; 分层分区; 电压偏移; 潮流波动; 并网规划

Abstract: Driven by achieving the target of carbon peak and carbon neutrality, such new energies as wind power and photovoltaic (abbr. PV) generation rapidly develop, and large-scale, clustered, partitioned and stratified grid connection become the key development direction. In allusion to power system power flow fluctuation and voltage excursion due to large-scale grid-connection of new energy, a layered and partitioned grid-connection planning method for wind and PV power station clusters was proposed. Considering the topology of power grid and the impedance of transmission lines, based on the graph

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52177096); 国网山东省电力公司科技资助项目 (5206002000QD)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177096); Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Corporation (5206002000QD)

theory the power grid was partitioned, and a multi-indices assessment system to connect new energy into power grid, in which the voltage excursion, power flow fluctuation and the indices of economic operation were included, was constructed. Taking the minimized curtailment of wind power and PV power as the objectives, a layered and partitioned grid-connection planning model for new energy was established. The established model was simplified by the second-order cone approximation method of AC power flow, thus each assessment index was solved, and combined with TOPSIS comprehensive evaluation method all feasible schemes were assessed to determine the optimal grid-connecting scheme. Finally, using IEEE 39-bus system as computing example, both effectiveness and practicability of the proposed planning method are verified.

Keywords: renewable energy; layered and partitioned; voltage excursion; power flow fluctuation; grid-connection planning

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0046

0 引言

2020 年 9 月, 习近平主席在联合国一般性辩论时提出中国 2030 年前实现碳排放达峰, 2060 年前实现碳中和的“双碳”目标^[1]。2021 年 3 月, 中央财经委员会第九次会议指出, 要深化电力体制改革, 构建以新能源为主体的新型电力系统, 以风力发电和光伏发电为主的新能源将是未来电力系统的主体^[2]。然而, 风电和光伏等新能源波动性大、可控性低和灵活性不足等问题, 给其合理并网带来了严峻的挑战^[3-5]。

传统的电力系统规划考虑的是“源随荷动”，而随着风光等新能源并网比例的不断提高，电网的“源端”和“荷端”皆表现出较强的不确定性。文献 [6] 分析了高比例可再生能源电力系统的基本特征，指出高比例可再生能源并网将会改变电力系统的基本形态。文献 [7] 重新定义了可再生能源渗透率，并分析了不同可再生能源渗透率对系统可靠性的影响，提出多能源系统的优化设计和运行方法。文献 [8] 提出了负荷水平模式的概念，并结合概率场景的方法来处理不同负荷水平下的可再生能源不确定性，建立了以最小化成本为目标的电力流规划模型，提高了规划的精度和可靠性。

在实际电网中，为避免由于新能源大规模并网引起潮流波动、电压偏移过大等问题，当新能源发电量达到一定规模以后，应进行合理的分层分区管理 [9-10]。文献 [11] 介绍了大机组分层分区接入电网的准则和依据，并对各类分区方法需要研究的核心问题进行了总结。文献 [12] 提出了一种电力系统分层分区、从局部到系统的逐步评估方法，为评估复杂电力系统可靠性提供理论基础。文献 [13] 详细阐述了网架约束、输送容量、负荷水平等对高渗透率新能源分层分区并网的影响，提出基于满足可靠性和经济性要求的高渗透率间歇性可再生能源分层分区并网规划方法。文献 [14] 和 [15] 从无功功率分层分区平衡的角度出发，提出无功功率优化方法，从而降低系统网损，提高系统运行的经济性。

电力系统分层分区运行可以减少联络线上不必要的功率传输，提高运行经济性。但现有研究成果大多聚焦于无功功率分层分区、就地平衡的原则，较少考虑有功功率传输的影响。此外，对分层分区的研究大多停留在运行层，较少涉及规划层。

因此，本文根据新能源分布特点，综合考虑长时间尺度的规划和短时间尺度的运行，提出一种风-光新能源场站群分层分区并网规划方法。考虑电网拓扑结构和输电线路阻抗，基于图论对电网进行分区，将电压偏移、潮流波动和经济运行考虑在内，构建多指标评估体系。根据风光出力不确定的特点建立其概率模型，以弃风弃光量最小为目标建立新能源分层分区并网规划模型，采用交流潮流二阶锥近似方法进行求解。计算不

同新能源并网方案下的各项评估指标，运用理想点排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 对不同新能源接入方案进行评估，进而选出最优并网方案。

1 电网分层分区方法及量化评估体系

1.1 基于图论的电网分层分区方法

在图论中，图可表示为 $G(V, E)$ ， V 表示顶点集合， E 表示边的集合，即连接线的集合。当图有 n 个顶点时，该图的邻接矩阵为 $n \times n$ 的方阵 $(a_{ij})_{n \times n}$ ，其中：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (1)$$

式中： v_i 、 v_j 分别表示顶点 i 和顶点 j 。

实际应用中，图的连接线往往会被赋予特殊含义，而不同的连接线表示的关系强弱也不尽相同，因此引入加权邻接矩阵 $(w_{ij})_{n \times n}$ 的概念：

$$w_{ij} = \begin{cases} 0, & (v_i, v_j) \in E \text{ 且 } i = j \\ 1, & (v_i, v_j) \in E \text{ 且 } i \neq j \\ \infty, & (v_i, v_j) \notin E \text{ 且 } i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

电力系统可以抽象为一个图，图的节点代表电力系统中的母线节点，图的连接线代表电力系统中的输电线路。电网分层一般基于电压等级直接划分，当前电力系统网架结构主要以 500 kV 和 220 kV 分层输电为主。随着 500 kV 电网的建设，需对 220 kV 电网进行分区处理。考虑电网拓扑结构和输电线路阻抗，利用图论理论对电网进行分区 [16]，步骤如下：

步骤 1) 获取网架数据、电源数据和负荷数据，对电网结构进行简化，消去单独的电源节点和对地支路，用节点间电气距离代替实际输电距离；

步骤 2) 将步骤 1) 简化后的电网结构转化成加权拓扑图，母线节点看作图的端点，节点间输电线路作为图的连接线，线路阻抗作为连接线的权值；

步骤 3) 假定分区个数等于主导节点个数，选取合适的主导节点，实际电力系统中一般选取 500 kV 母线节点为主导节点；

步骤 4) 分别计算除主导节点外其余节点到各主导节点的电气距离，到哪个主导节点电气距离最小即归为该主导节点所在分区；

步骤5)生成分区后的拓扑图,标明主导节点、负荷节点和分区结果。

1.2 多指标评估体系

1) 电压偏移指标。

电压偏移又叫做电压偏差,即电力系统中电压实际值与额定值之间数值之差的百分比。电力系统中某一节点的电压偏移的表达式为:

$$\Delta U_i\% = \frac{U_i - U_i^N}{U_i^N} \times 100\% \quad (3)$$

式中: U_i 为节点 i 的实际电压值; U_i^N 为节点 i 的额定电压值。

为了描述电力系统整体电压偏移水平,本文给出电压偏移平均值的表达式:

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{S} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N |\Delta U_{i,s}| = \frac{1}{S} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N |U_{i,s} - U_i^N| \quad (4)$$

式中: $U_{i,s}$ 为场景 s 下节点 i 的实际电压值; N 为电力系统中节点的总数; S 为典型场景总数。

2) 潮流波动指标。

风光波动导致新能源并网 PQ 节点注入功率变化,从而全网潮流分布发生变化。为准确描述电力系统整体潮流波动水平,用不同典型场景下各支路潮流波动量的平均值作为潮流波动指标:

$$\Delta \bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{S-1} \sum_{s=1}^{S-1} |F_{ij,s+1} - F_{ij,s}| \right) \quad (5)$$

式中: $F_{ij,s}$ 为场景 s 下节点 i 和节点 j 之间的实际潮流。

3) 经济运行指标。

电力系统实际运行中会产生有功功率损耗,降低系统网络损耗有助于提高电力系统运行的经济性。因此本文以不同典型场景下平均系统有功网损作为经济运行指标。

$$\bar{P}_{\text{loss}} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{i,j \in N} \left(\frac{P_{ij,s}^2 + Q_{ij,s}^2}{U_B^2} \right) R_{ij} \quad (6)$$

式中: $P_{ij,s}$ 、 $Q_{ij,s}$ 是场景 s 下节点 i 和节点 j 之间的有功功率和无功功率; U_B 为电压基准值,取平均额定电压; R_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的线路电阻。

2 新能源分层分区接入电网方案

2.1 风力发电模型

风电场发出的有功功率与风电场内空气密度、

风机扫掠面积、实时风速及风能利用率密切相关。此功率可表示为:

$$P_w = 0.5 \rho A_w v^3 C_p \quad (7)$$

式中: ρ 为空气密度; v 为风速; A_w 为风力机的扫掠面积; C_p 为风力机的风能利用系数,表征风机从风中获得的有用风能的比例。

利用概率模型来模拟风速的不确定性,选取 Weibull 分布模型^[17],可得风速概率密度函数:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (8)$$

式中: c 和 k 分别为威布尔分布的尺度参数和形状参数,其中尺度参数 c 反映该风电场的平均风速。

常用的双馈风机有定电压和定功率因数两种控制手段,本研究采用定功率因数控制^[18],且认为各风机保持相同的功率因数角,可以得到风电场输出的总功率:

$$P_{w,\Sigma} + jQ_{w,\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{w,n}(1 + j \tan \varphi) \quad (9)$$

式中: φ 为给定的功率因数角; $P_{w,n}$ 为第 n 台风机有功出力; $P_{w,\Sigma}$ 为风电场总有功出力; $Q_{w,\Sigma}$ 为风电场总无功出力。

当风速一定时,采用定功率因数控制的双馈风机,其有功出力和无功出力是恒定的,因此在潮流计算模型中,风电场节点可以当作 PQ 节点处理。

2.2 光伏发电模型

光伏发电系统是由光伏电池板、控制器和电能储存及变换环节构成的发电与电能变换系统,可以将太阳辐射能直接转换为电能。受辐照度随机性的影响,光伏系统输出的功率具有不确定性,也采用概率模型来表示。

一定时段内的辐照度服从 Beta 分布,其概率密度函数^[19]:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (10)$$

式中: r 为给定辐照度; r_{\max} 为辐照度的最大值; α 、 β 为 Beta 分布的形状参数。

光伏电源输出的有功功率和辐照度之间的函数关系如下:

$$P_v = r \cdot A_s \cdot \eta \quad (11)$$

式中： η 为光伏电池板的光电转换效率； A_s 为光伏电池板的面积。

因此，在辐照度一定的情况下，光伏电源有功出力一定。采用恒功率控制方法，分别控制光伏电源的有功出力和无功出力，光伏电源并网节点可以看作 PQ 节点^[20]。

2.3 新能源分层分区并网规划模型

大规模风光并网对电力系统的影响很大，其接入规模不同和并网节点不同都会对电力系统的可靠性和经济性产生不同的影响。风光新能源分层分区接入电网需要考虑风光出力特性、各区域新能源丰富度、电力系统运行指标、电网消纳能力以及电能质量约束等因素。

首先，根据各区域风光新能源丰富程度和电网网架承受能力，预先给出所有可行的新能源并网方案。考虑到风光出力的波动性，避免出现风电、光伏与负荷直接接在同一个节点的情况。

其次，电网应在满足安全稳定运行的前提下尽可能多地保障新能源发电，因此构建给定典型场景下以弃风弃光量最小为目标函数的新能源分层分区并网规划模型：

$$\min f = \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^N \rho_s P_{r,i,s}^{\text{cut}} \quad (12)$$

式中： ρ_s 为典型场景 s 发生的概率； S 为典型场景数； $P_{r,i,s}^{\text{cut}}$ 为典型场景 s 下接于节点 i 的新能源电站 r 的弃风、弃光量； R 为新能源电站数。

等式约束条件为交流潮流平衡约束：

$$\begin{cases} P_i^g - P_{r,i,s}^{\text{cut}} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = P_i^d \\ Q_i^g - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = Q_i^d \end{cases} \quad (13)$$

式中： P_i^g 和 Q_i^g 为节点 i 的有功出力和无功出力，包含传统电源和新能源出力； U_i 和 U_j 分别为节点 i 和节点 j 处的电压； G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的线路电导； θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差。

不等式约束包括弃风弃光量约束、节点电压上下限约束、节点相角约束、发电机有功出力和无功出力约束、线路潮流约束：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{r,i,s}^{\text{cut}} \leq P_{r,i,s}^{\text{max}} \\ U_i^{\text{min}} \leq U_i \leq U_i^{\text{max}} \\ \theta_i^{\text{min}} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\text{max}} \\ P_{G,i}^{\text{min}} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\text{max}} \\ Q_{G,i}^{\text{min}} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{\text{max}} \\ |F_{i,j,s}| \leq F_{ij}^{\text{max}} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $P_{r,i,s}^{\text{max}}$ 为典型场景 s 下接于节点 i 的新能源电站 r 的最大可用量； U_i^{max} 、 U_i^{min} 为节点 i 电压上下限； θ_i^{max} 、 θ_i^{min} 为节点 i 相角偏移上下限； $P_{G,i}$ 、 $P_{G,i}^{\text{max}}$ 、 $P_{G,i}^{\text{min}}$ 为发电机有功出力实际值和上下限； $Q_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}^{\text{max}}$ 、 $Q_{G,i}^{\text{min}}$ 为发电机无功出力实际值和上下限； F_{ij}^{max} 为节点 i 和节点 j 之间的最大传输容量。

2.4 交流潮流方程的二阶锥近似

上述优化模型式 (12)—(14) 是一个复杂的非线性规划模型，其中式 (13) 交流潮流平衡约束不仅含有强非线性，还具有强非凸性，大大增加了求解的难度。对于非线性模型的求解，一般采用近似线性化法和智能算法^[21]，考虑到有多个新能源接入方案且要计算多个典型场景，采用智能优化算法可能会增加求解时长。因此，为了兼顾求解效率和计算精度，本文将非线性且非凸的交流潮流表达式 (13) 转化为凸的二阶锥约束，从而得到基于交流潮流的混合整数二阶锥规划 (mixed integer second-order cone programming, MISOCP) 模型^[22]。二阶锥约束方程组如下：

$$\sum_{e:j \rightarrow e} P_{je} + P_j^d + g_j U_j^2 = P_i^g - P_{r,i,s}^{\text{cut}} + \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - r_{ij} h_{ij}) \quad (15)$$

$$\sum_{e:j \rightarrow e} Q_{je} + Q_j^d + b_j U_j^2 = Q_i^g + \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - x_{ij} h_{ij}) \quad (16)$$

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) h_{ij} \quad (17)$$

$$(\theta_i - \theta_j) - \frac{x_{ij} P_{ij} - r_{ij} Q_{ij}}{U_i^{(c)} U_j^{(c)}} = 0 \quad (18)$$

$$(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) h_{ij} U_i^2 \quad (19)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} & 2Q_{ij} & h_{ij} - U_i^2 \end{bmatrix} \right\|_2 \leq h_{ij} + U_i^2 \quad (20)$$

式中： P_{je} 、 Q_{je} 为节点 j 到节点 e 之间的输电线路流过的有功功率和无功功率； P_{ij} 、 Q_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间的输电线路流过的有功功率和无功功率； r_{ij} 、 x_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间输电线路的电阻和电抗； g_j 、 b_j 分别为节点 j 对地的电导和电纳； $U_i^{(c)}$ 、 $U_j^{(c)}$ 分别为考虑节点 i 和节点 j 的电压幅

值为常数的变量，而非优化变量； h_{ij} 为支路 ij 上流过电流的模平方。

交流潮流方程二阶锥近似后可将原非凸非线性模型转化为MISOCP模型，因此可以采用CPLEX、GUROBI等商业软件高效求解。

2.5 基于TOPSIS的并网规划方案评估

基于上述模型求解结果，进一步求得电压偏移指标、解潮流波动指标、经济运行指标，将弃风、弃光量也作为多指标评估体系中的一项指标，运用TOPSIS法对不同新能源接入方案进行评估^[23]。由于本文所提指标均为极小型指标，计算得到的TOPSIS评估值越小则说明并网方案越优。基于TOPSIS的并网规划方案评估方法的步骤如图1所示，具体为：

步骤1) 基于线路阻抗对电网进行分层分区，根据各分区新能源历史出力数据确定所有可行的新能源并网方案；

步骤2) 计算不同新能源并网方案下的各项

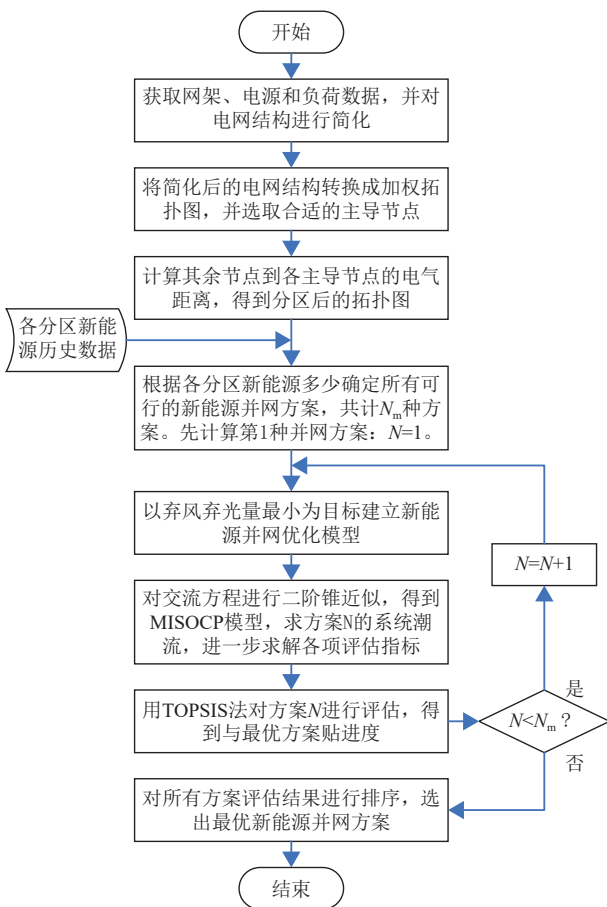


图1 新能源并网规划流程图

Fig. 1 Flowchart of new energy grid-connection planning

评估指标，形成数据矩阵并进行标准化处理，以消除各指标量纲的影响；

步骤3) 确定所有可行并网方案中的最优方案和最劣方案，然后分别计算各个并网方案与最优方案和最劣方案间的欧式距离，以此作为TOPSIS评价法的综合评估值，评价各方案优劣性。

3 算例分析

3.1 电网分区管理

以IEEE 39节点系统为基础算例模型，如图2所示。消去悬挂节点，选取5、13、16、29节点4个节点为主导节点，根据1.2小节提出的分层分区方法得到简化后的电网拓扑图和分层分区结果如图3所示。

可以看出，若按地理位置进行分区管理，节点11与节点7之间的实际距离小于与节点13之

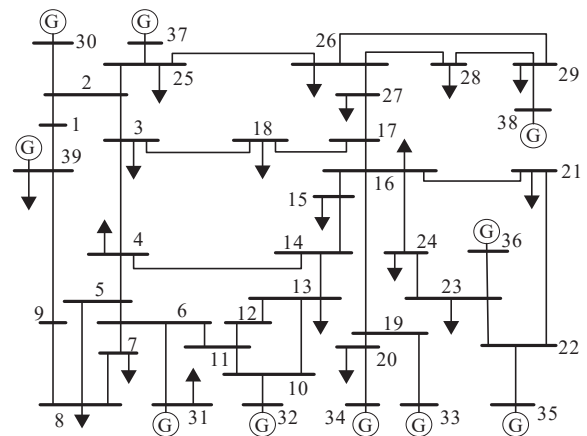
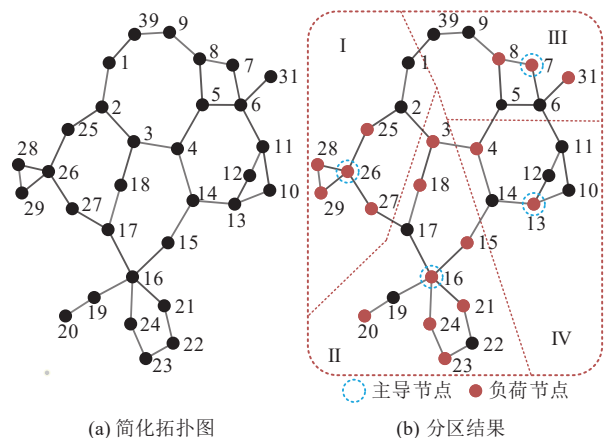


图2 IEEE 39节点系统结构图

Fig. 2 Structure of IEEE 39-bus system



(a) 简化拓扑图

(b) 分区结果

图3 简化拓扑图和分区结果

Fig. 3 Simplified topology diagram and partitioning results

间的距离，应与节点 7 划分到同一个分区。但是按基于线路阻抗的电网分区方法进行计算后发现，节点 11 距离节点 13 的电气距离更近一点，因此归入以节点 13 为主导节点的电网分区更为合理。

3.2 规划方案

待并网新能源电厂总共有 3 个，其中风电场 W_1 和 W_2 装机容量均为 500 MW，光伏电站 S_1 装机容量为 600 MW。风电场风速服从 Weibull 分布，光伏电站辐照度服从 Beta 分布，分布参数及 95% 置信区间如表 1 所示，概率分布图如图 4 所示。

表 1 新能源的分布参数

Table 1 Distribution parameters of new energy

新能源电站	分布参数		新能源出力95%置信区间/MW
	$k(\alpha)$	$c(\beta)$	
W_1	1.637	5.318	(0, 259.88)
W_2	2.106	5.089	(0, 214.22)
S_1	2.325	6.422	(0, 316.60)
合计	/	/	(0, 790.70)

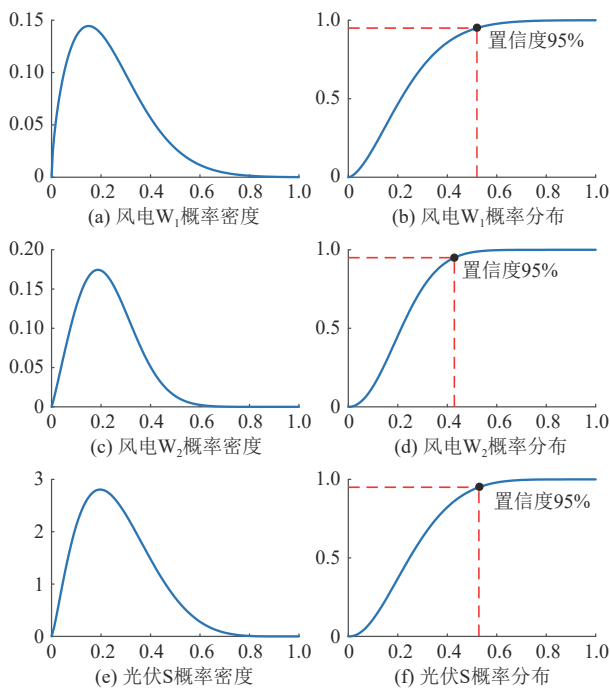


图 4 新能源电站出力概率分布图

Fig. 4 Probability distribution diagram of new energy power station output

假设分区后的 IEEE 39 节点系统 I、II 区域风力资源比较丰富，III、IV 区域光伏资源比较丰富，可选新能源接入电网方案有 12 个，如表 2 所示。

考虑到计算量，在算例验证中涉及了两个典

表 2 新能源接入电网方案

Table 2 Schemes for grid-connection of new energy

方案	新能源接入节点		
	风电场 W_1	风电场 W_2	光伏电站 S_1
case 1	$W_1 \rightarrow 2$	$W_2 \rightarrow 17$	$S_1 \rightarrow 5$
case 2	$W_1 \rightarrow 2$	$W_2 \rightarrow 17$	$S_1 \rightarrow 6$
case 3	$W_1 \rightarrow 2$	$W_2 \rightarrow 17$	$S_1 \rightarrow 14$
case 4	$W_1 \rightarrow 2$	$W_2 \rightarrow 19$	$S_1 \rightarrow 5$
case 5	$W_1 \rightarrow 2$	$W_2 \rightarrow 19$	$S_1 \rightarrow 6$
case 6	$W_1 \rightarrow 2$	$W_2 \rightarrow 19$	$S_1 \rightarrow 14$
case 7	$W_1 \rightarrow 17$	$W_2 \rightarrow 19$	$S_1 \rightarrow 5$
case 8	$W_1 \rightarrow 17$	$W_2 \rightarrow 19$	$S_1 \rightarrow 6$
case 9	$W_1 \rightarrow 17$	$W_2 \rightarrow 19$	$S_1 \rightarrow 14$
case 10	$W_1 \rightarrow 17$	$W_2 \rightarrow 22$	$S_1 \rightarrow 5$
case 11	$W_1 \rightarrow 17$	$W_2 \rightarrow 22$	$S_1 \rightarrow 6$
case 12	$W_1 \rightarrow 17$	$W_2 \rightarrow 22$	$S_1 \rightarrow 14$

型场景：分别为新能源出力 95% 置信区间的最小值和最大值。应用本文所提求解方法，考虑弃风弃光量，并对交流方程进行二阶锥近似，得到不同方案下各项指标计算结果如表 3 所示。

表 3 不同方案下所提方法的计算结果

Table 3 Computing results of the proposed methods under different schemes

方案	电压偏移/%	潮流波动/MW	有功网损/MW	弃风弃光/MW
case 1	2.74	54.11	55.98	62.49
case 2	2.65	93.56	47.86	62.06
case 3	2.70	53.99	48.01	137.14
case 4	2.71	50.70	47.87	87.32
case 5	2.71	39.46	47.12	87.48
case 6	2.82	58.21	50.24	164.03
case 7	2.68	52.15	48.46	84.28
case 8	2.71	42.50	48.57	84.03
case 9	2.79	47.40	49.13	166.71
case 10	2.82	49.14	50.10	88.21
case 11	2.74	45.65	48.22	87.99
case 12	2.78	47.96	48.80	166.71

依据电压偏移、潮流波动、有功网损、弃风弃光这 4 个指标，采用 TOPSIS 综合评估法对上述 12 个方案进行优选，计算得到其与理想最优解的贴近度分别为 0.2172、0.5134、0.4753、0.2224、0.1551、0.5948、0.2232、0.1462、0.5221、0.2202、0.1860、0.5251，如图 5 所示。因此，方案 8 为最优方案，即风电场 W_1 和 W_2 分别接在 17 号节点

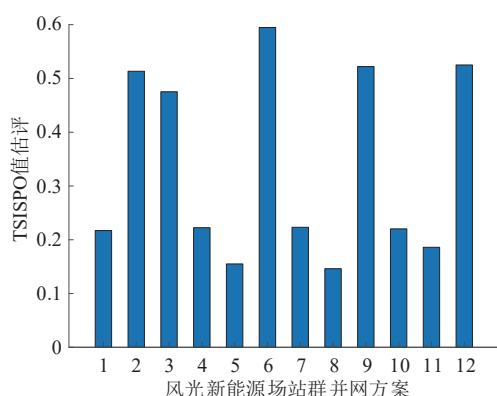


图5 TOPSIS 综合评估结果

Fig. 5 Results of TOPSIS integrated assessment

和 19 号节点, 光伏电站 S_1 接在 6 号节点。

3.3 对比分析

为凸显本文所提风光新能源场站群分层分区接入电网方法的优越性, 将本文所提方法求解结果和不考虑弃风弃光的规划方法求解结果进行对比, 其中不考虑弃风弃光的规划方法采用基于常规潮流的方法和基于最优潮流的方法 2 种, 计算结果如表 4 所示。

表 4 方案 2 不同求解方法计算结果对比

Table 4 Comparison of calculation results of different solving methods for case 2

方法	电压偏移/%	潮流波动/MW	有功网损/MW
本文所提方法	2.71	42.50	48.57
基于常规潮流的方法	2.85	66.16	48.36
基于最优潮流的方法	4.38	54.81	42.34

对比本文所提方法和基于常规潮流的方法的求解结果, 其中有功网损基本一致, 但本文所提方法结果中的潮流波动明显降低。结果表明: 只考虑新能源全部消纳可能会造成系统电压偏移量和潮流波动量变大等问题, 潮流波动和电压偏移过大, 会对系统安全性造成一定的影响。对比本文所提方法和基于最优潮流的方法也可以得到类似的结论, 因此, 可以通过增加少量的有功网损为代价, 来降低电压偏移量和潮流波动量, 即在允许的范围内, 避免只考虑经济性而造成安全性降低的情况。本文所提新能源优化方法在优先使用新能源发电的前提下也允许存在少量的弃风弃光, 可以兼顾系统运行的经济性和安全性。

4 结语

本文综合考虑长时间尺度的规划和短时间尺

度的运行, 提出一种新能源场站群分层分区并网规划方法。考虑电网拓扑结构和输电线路阻抗, 基于图论的分区方法可以反映电气距离的远近, 从而使电网分区结果更加合理; 考虑风光出力典型场景, 以弃风弃光量最小为目标求解系统潮流, 可避免一味地增加新能源消纳量而导致电压偏移和潮流波动增大的问题; 在求解方法上, 对交流潮流方程进行二阶锥近似处理, 将非凸非线性模型转化为 MISOCP 模型; 在多指标评估过程中采用 TOPSIS 综合评价法, 可综合评估各项指标, 选出最优新能源并网方案。

参考文献

- [1] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J]. 现代电力, 2021, 38(5): 535-545.
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, *et al.* An overview on hydrogen energy storage and transportation technology and its typical application in power system[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(5): 535-545(in Chinese).
- [2] 曹永吉, 张恒旭, 施啸寒, 等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, *et al.* Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 1-8(in Chinese).
- [3] SANJARI M J, GOOI H B, NAIR N C. Power generation forecast of hybrid PV-wind system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 703-712.
- [4] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4043.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, *et al.* Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043(in Chinese).
- [5] 鉴庆之, 刘晓明, 杨金叶, 等. 考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置[J]. 现代电力, 2021, 38(3): 286-296.
JIAN Qingzhi, LIU Xiaoming, YANG Jinye, *et al.* Optimal allocation of power system flexible resources considering demand response[J]. Modern Electric Power, 2021,

- 38(3): 286–296(in Chinese).
- [6] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 1–11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1–11(in Chinese).
- [7] MINGLI Z, NA Z, DUOJIAO G, *et al.* Optimal design and operation of regional multi-energy systems with high renewable penetration considering reliability constraints[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 205307–205315.
- [8] 孙珂, 赵鹏飞, 韩晓男, 等. 考虑高比例可再生能源出力不确定性的电力流规划方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 79–85.
SUN Ke, ZHAO Pengfei, HAN Xiaonan, *et al.* Electricity flow planning method for high penetration of renewable energy[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 79–85(in Chinese).
- [9] 李通, 薛峰. 基于Dijkstra算法的电网分区方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 159–165.
LI Tong, XUE Feng. Power network partitioning method based on Dijkstra algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 159–165(in Chinese).
- [10] RANNAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170–178.
- [11] 孙江山, 刘敏, 邓磊, 等. 电力系统分区和解耦状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 162–169.
SUN Jiangshan, LIU Min, DENG Lei, *et al.* Review of the research on the partition and decoupled state estimation of power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(10): 162–169(in Chinese).
- [12] SOUSA B, HUMAYUN M, PIHKALA A, *et al.* Block-layer reliability method for distribution systems under various operating scenarios[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 978–988.
- [13] 张群. 地区级电网高渗透率风电分层分区并网规划技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [14] 阳育德, 龚利武, 韦化. 大规模电网分层分区无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1617–1622.
YANG Yude, GONG Liwu, WEI Hua. Reactive power optimization of large power grid under voltage-grading and district-dividing[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1617–1622(in Chinese).
- [15] 颜伟, 高强, 余娟, 等. 输电网络的分层分区电压无功调节方法[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 71–77.
YAN Wei, GAO Qiang, YU Juan, *et al.* An algorithm for hierarchical and partitioned regulation of voltage and reactive power in transmission network[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 71–77(in Chinese).
- [16] 徐玉琴, 李文帅, 赵蓓蓓. 基于改进汽车接力模型的电网分区方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3546–3551.
XU Yuqin, LI Wenshuai, ZHAO Beibei. Power network partitioning method based on improved automotive relay[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3546–3551(in Chinese).
- [17] 黎静华, 桑川川, 甘一夫, 等. 风电功率预测技术研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(3): 1–11.
LI Jinghua, SANG Chuanchuan, GAN Yifu, *et al.* A review of researches on wind power forecasting technology[J]. *Modern Electric Power*, 2017, 34(3): 1–11(in Chinese).
- [18] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005(4): 38–41.
WU Yichun, DING Ming, ZHANG Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005(4): 38–41(in Chinese).
- [19] CAO Y, ZHANG Y, ZHANG H, *et al.* Probabilistic optimal PV capacity planning for wind farm expansion based on NASA data[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 1291–1300.
- [20] 黄伟, 刘斯亮, 羿应棋, 等. 基于光伏并网点电压优化的配电网多时间尺度趋优控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 92–100.
HUANG Wei, LIU Silinag, YI Yingqi, *et al.* Multi-time-scale slack optimal control in distribution network based on voltage optimization for point of common coupling of PV[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 92–100(in Chinese).
- [21] LEE J, LEYFFER S. Mixed integer nonlinear programming[M]. Springer, New York, NY: 2011.
- [22] 赖晓文, 马晓伟, 白杨, 等. 基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 37–42.
LAI Xiaowen, MA Xiaowei, BAI Yang, *et al.* Dynamic reactive power optimization method based on mixed integer second-order cone programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(17): 37–42(in Chinese).

[tric Power Systems](#), 2017, 41(17): 37-42(in Chinese).

- [23] 朱天瞳, 丁坚勇, 郑旭. 基于改进TOPSIS法和德尔菲——熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. [电力系统保护与控制](#), 2018, 46(12): 91-99.

ZHU Tiantong, DING Jianyong, ZHENG Xu. A comprehensive decision-making method for power network planning schemes based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight method[J]. [Power System Protection and Control](#), 2018, 46(12): 91-99(in Chinese).

收稿日期: 2022-02-16

作者简介:

袁振华 (1993), 男, 工程师, 研究方向为新能源发展, E-mail: 462004170@qq.com;

刘晓明 (1984), 男, 高级工程师, 研究方向为电网规划, E-mail: 416582710@qq.com;

张恒旭 (1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统监测和电力系统数值仿真, E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn;

杨金叶 (1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与优化运行, E-mail: 1945922495@qq.com;

曹永吉 (1992), 男, 博士后, 通信作者, 研究方向为电力系统频率稳定分析与控制、可再生能源并网及储能技术应用, E-mail: caoyong@dtu.dk;

田鑫 (1985), 男, 高级工程师, 研究方向为电网规划, E-mail: tianxin@jyy.sd.sgcc.cn。