# 计及静态电压稳定性的风光电站选址定容协同规划方法

路 亮<sup>1</sup>,魏明奎<sup>1</sup>,张怀远<sup>2</sup>,江 栗<sup>1</sup>,沈 力<sup>1</sup>,廖 凯<sup>2</sup> (1. 国家电网公司西南分部,四川 成都 610095;2. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:为了降低风光电站并网给电力系统电压稳定性带来的负面影响,提出了计及静态电压稳定性的风光电 站选址定容协同规划方法。分析了风光电站的发电特性,并对其建立数学模型;考虑并网等值阻抗和静态电 压稳定性的内在制约关系,进一步综合风光电站及其汇集站选址定容、并网点位置等优化目标,建立了风光 电站选址定容协同规划模型;基于地图栅格化和分段线性化方法,将所提规划模型转换为混合整数线性规划 模型;在此基础上,利用K-means算法提取典型场景,并给出了所提模型的求解流程。基于西南某地区的实 际数据进行算例验证,结果表明所提规划方法能够充分发挥规划区域内自然资源的禀赋特性和风光发电互 补性,有效提高了风光电站并网后的静态电压稳定性。

关键词:风光电站;静态电压稳定性;选址定容;协同规划;混合整数线性规划

中图分类号:TM715;TM614;TM615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202302025

#### 0 引言

近年来,碳排放问题制约了社会的经济发展,为 了实现可持续发展目标,我国提出了"双碳"目标。 电力行业的碳排放水平直接影响着碳减排政策的落 实,因此在电力系统中大力发展风、光等新能源是实 现"双碳"目标的重要保证<sup>[1]</sup>。然而,大规模风、光等 新能源发电呈现日内及季节性波动性、间歇性,导致 风、光大规模并网给电力系统带来了严重的电压稳 定性问题。因此,如何在保障系统电压稳定性的基 础上,合理规划风光电站容量及其并网点成为风、光 等新能源大规模并网的主要难题。

目前,已有较多关于电力系统中新能源电站的 规划建设研究。文献[2]提出了一种依托山体的重 力储能形式,联合风电场、光伏电站,建立了以系统 成本最小为目标的发电系统容量优化规划模型,并 结合多项评价指标,衡量容量规划结果。文献[3]基 于多能互补复合电站的概念,提出了综合考虑系统 多能互补特性和外部规划需求的能源基地优化配置 方法,综合考虑了系统规划的经济性、可靠性、灵活 性、环保性及多能互补特性。文献[4]建立了以新能 源穿透功率极限、新能源反调峰、大波动风险为优化 目标的多目标风光火打捆外送电源规划模型,并采 用博弈论确定各目标的权重系数。文献[5]综合考 虑新能源消纳能力和经济成本,建立了电力系统的 多目标电源规划模型,并基于时序生产模拟法验证 了所提规划方案的有效性。文献[6]考虑可再生能

收稿日期:2022-08-26;修回日期:2022-12-08 在线出版日期:2023-03-06

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52999820000X) Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52999820000X) 源和负荷的波动性,提出了一种适用于可再生能源 与不同类型储能的协调规划方法。文献[7]在电源 规划中考虑碳排放及燃煤约束,验证了碳捕集电厂 能充分适应未来高比例可再生能源的发展场景。上 述文献主要针对电源的装机容量进行配置研究,但 均未考虑规划地区实际资源的禀赋特性,且未涉及 并网点的选取优化。

为了有效实现并网点位置的洗取,文献[8]提出 了一种基于复杂适应系统理论的电源规划模型,以 电源节点为主体,求解不同节点下各类电源容量的 最优配置方案,但其电源布局规划未能考虑地区资 源禀赋特性。文献[9]研究了含汇集站和多回直流 的新能源接入的电力系统建设规划问题中的新能源 电站最优接入容量和汇集站最优建设位置,但没有 同时考虑新能源装机容量的规划,无法有效指导新 能源电站的容量配置。文献[10]同时考虑经济性和 安全性,对风电场容量、并网点和电网结构进行了联 合规划研究,但未考虑多种能源之间的互补特性。 文献[11]采用多阶段模型将煤电机组退役协同于新 能源和储能规划,从而实现电力系统的低碳化转型, 但其电源和储能布局的规划侧重于电网结构,缺乏 对自然资源分布情况的考虑。文献[12]对风电场接 人系统进行了汇集站及集群中心站两级综合协调优 化研究,主要侧重于风电场接入系统的规划建设,未 考虑在规划过程中同时进行风电场装机容量的配 置。此外,文献[8-12]均未能在规划中考虑新能源 电站并网对电力系统静态电压稳定性的影响。

然而,随着风光新能源电站装机容量的不断增 大,其大规模接入给电力系统的静态电压稳定性带 来了巨大挑战。目前,已有相关研究针对风光新能 源电站对电网电压稳定性的影响进行了初步分 析<sup>[13]</sup>,但是均未能从规划角度出发,考虑在风光电站 规划阶段消除其大规模并网对系统静态电压稳定性的不利影响。

基于上述分析,本文提出了计及静态电压稳定 性的风光电站选址定容协同规划方法,在保障系统 静态电压稳定性的基础上,综合考虑风光电站选址 定容、汇集站选址定容及其并网点选择的有效协同 规划。首先,基于风电和光伏的发电特性,建立风光 电站的数学模型;其次,为了保障规划的风光电站并 网后系统的静态电压稳定性,引入汇集站输送能力 评估指标,提出计及静态电压稳定性的风光电站选 址定容协同规划模型;然后,为了解决非线性约束导 致模型难以求解的问题,提出基于地图栅格化和分 段线性化的方法,将所提规划模型转换为混合整数 线性规划(mixed integer linear programming, MILP) 模型进行优化求解;最后,以西南某地的实际数据为 例,仿真验证了所提规划模型的有效性和优越性。

#### 1 风光电站数学模型

#### 1.1 风电场的数学模型

风力发电机转轴处的风速与地面监测站处的风 速换算公式如下:

$$v(t) = v_{w}(t)(h/h_{w})^{\alpha}$$
(1)

式中:v(t)为t时刻风力发电机轮毂处的风速; $v_{w}(t)$ 为t时刻地面监测站处的风速;h为轮毂的高度; $h_{w}$ 为地面监测站的高度; $\alpha$ 为表面粗糙度系数。

风电场的输出功率可表示为:

$$P_{W,i}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) < v_{in}, v(t) \ge v_{out} \\ P_{WN,i} \frac{v(t) - v_{in}}{v_r - v_{in}} & v_{in} \le v(t) < v_r \\ P_{WN,i} & v_r \le v(t) < v_{out} \end{cases}$$
(2)

式中: $P_{W,i}(t)$ 为t时刻风电场i的输出功率; $P_{WN,i}$ 为风 电场i的额定功率; $v_{in}$ 、 $v_{out}$ 、 $v_r$ 分别为风力发电机的切 入风速、切出风速、额定风速。

t时刻风电场的总输出功率 $P_w(t)$ 可表示为:

$$P_{W}(t) = \sum_{i=1}^{N_{W}} (P_{W,i}(t) - P_{Wa,i}(t))$$
(3)

$$P_{\mathrm{Wa},i}(t) = \begin{cases} P_{\mathrm{W},i}(t) - P_i^{\mathrm{WLs}} & P_{\mathrm{W},i}(t) > P_i^{\mathrm{WLs}} \\ 0 & P_{\mathrm{W},i}(t) \leq P_i^{\mathrm{WLs}} \end{cases}$$
(4)

式中: $N_w$ 为风电场的数量; $P_{w_{a,i}}(t)$ 为t时刻风电场i的弃电功率; $P_i^{W_{Ls}}$ 为风电场i汇集线路的额定功率。

#### 1.2 光伏电站的数学模型

光伏电站的核心部件是光伏电池组,其输出功 率可表示为:

$$P_{\mathrm{S},j}(t) = I(t)\phi P_{\mathrm{SN},j} \frac{1 + \beta (T_{\mathrm{C}}(t) - T_{\mathrm{stc}}(t))}{I_{\mathrm{stc}}}$$
(5)

$$T_{\rm C}(t) = T_{\rm temp}(t) + (N_{\rm oct} - 20)I(t)/I_{\rm stc}$$
(6)

式中: $P_{s,j}(t)$ 为t时刻光伏电站 j 的输出功率;I(t)为

t时刻的光照强度;  $\phi$ 为光伏电池的降容系数;  $P_{\text{SN},j}$ 为 光伏电站 j 的额定功率;  $\beta$ 为功率温度系数;  $T_c(t)$ 、  $T_{\text{stc}}(t)$ 分别为t时刻光伏电池的实际工作温度、标准 工作温度;  $I_{\text{stc}}$ 为标准测试条件下的光照强度, 取值 为1 kW / m<sup>2</sup>;  $T_{\text{temp}}(t)$ 为t时刻的环境温度;  $N_{\text{oct}}$ 为光 伏电池的标称温度。

t时刻光伏电站的总输出功率 $P_{s}(t)$ 可表示为:

$$P_{\rm S}(t) = \sum_{j=1}^{N_{\rm S}} (P_{{\rm S},j}(t) - P_{{\rm S},j}(t))$$
(7)

$$P_{\text{Sa},j}(t) = \begin{cases} P_{\text{S},j}(t) - P_{j}^{\text{SLs}} & P_{\text{S},j}(t) > P_{j}^{\text{SLs}} \\ 0 & P_{\text{S},j}(t) \leq P_{j}^{\text{SLs}} \end{cases}$$
(8)

式中: $N_{s}$ 为光伏电站的数量; $P_{sa,j}(t)$ 为t时刻光伏电站j的弃电功率; $P_{j}^{SLs}$ 为光伏电站j汇集线路的额定功率。

#### 2 风光电站选址定容协同规划模型

本文所提风光电站选址定容协同规划模型包括 风光电站选址定容、风光汇集站选址定容和并网点 的选择<sup>[14]</sup>。新能源电站接入电网示意图如附录A图 A1所示。

#### 2.1 目标函数

本文以最小化建设成本和运维成本为目标函数,其中建设成本主要包括风光电站建设成本 C<sub>ps</sub>、变电站建设成本 C<sub>ts</sub>、汇集线路建设成本 C<sub>Lts</sub>、汇集站 建设成本 C<sub>es</sub>、汇集站并网线路建设成本 C<sub>Lts</sub>、运维成 本主要包括火电运行成本 C<sub>T</sub>、外送通道输电成本 C<sub>ia</sub>、弃电成本 C<sub>a</sub>、网损成本 C<sub>Lts</sub>,具体分析如下。

1)风光电站建设成本。

风光电站建设成本 C<sub>ps</sub>包括初始建设成本和运 维成本,计算式为:

$$C_{\rm ps} = (fe_{\rm W} + u_{\rm W}) \sum_{i=1}^{N_{\rm W}} P_{{\rm WN},i} + (fe_{\rm S} + u_{\rm S}) \sum_{j=1}^{N_{\rm S}} P_{{\rm SN},j} \qquad (9)$$

$$f = \frac{r(1+r)^{N_{\rm L}}}{(1+r)^{N_{\rm L}} - 1} \tag{10}$$

式中: $e_w$ 、 $e_s$ 分别为风电、光伏的单位装机容量建设 成本; $u_w$ 、 $u_s$ 分别为风电、光伏的单位装机容量年运 维成本;f为折旧系数;r为折旧率; $N_L$ 为工程年限。

2) 变电站建设成本。

变电站建设成本C。可表示为:

$$C_{\rm ts} = f c_{\rm ts} \left( \sum_{i=1}^{N_{\rm w}} P_i^{\rm Wts} + \sum_{j=1}^{N_{\rm s}} P_j^{\rm Sts} \right)$$
(11)

式中:c<sub>i</sub>为变电站单位容量建设成本;P<sup>wis</sup>、P<sup>sis</sup>分别为风电场*i*、光伏电站*j*出口变电站的额定功率。

风光电站出口汇集线路建设成本 $C_{\text{Ls}}$ 可表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{LIS}} = f \sum_{i=1}^{N_{\text{W}}} \sum_{m=1}^{M_{\text{W}}} F_{\text{W}} b_{i,m}^{\text{W}} L_{i,m} + f \sum_{j=1}^{N_{\text{S}}} \sum_{s=1}^{M_{\text{S}}} F_{\text{S}} b_{j,s}^{\text{S}} L_{j,s} \\ F_{\text{W}} = F(P_{i}^{\text{WLS}}), \quad F_{\text{S}} = F(P_{j}^{\text{SLS}}) \end{cases}$$
(12)

式中: $M_w$ 、 $M_s$ 分别为风电汇集站、光电汇集站的数量; $F_w$ 、 $F_s$ 分别为风电场、光伏电站出口汇集线路单位容量建设成本; $F(\cdot)$ 为风光电站出口汇集线路的分段建设成本函数,单位建设成本取值如附录A表A1所示; $b_{i,m}^w$ 、 $b_{j,s}^s$ 为汇集站划分二进制变量,分别表示风电场*i*是否划分至风电汇集站m、光伏电站j是否划分至光电汇集站s,若是则取值为1,否则取值为0; $L_{i,m}$ 为风电场i与风电汇集站m之间的距离; $L_{j,s}$ 为光伏电站j与光电汇集站s之间的距离。

4)汇集站建设成本。

汇集站建设成本*C*<sub>es</sub>可表示为:

$$C_{\rm cs} = f \sum_{m=1}^{M_{\rm w}} G(P_m^{\rm Wcs}) + f \sum_{s=1}^{M_s} G(P_s^{\rm Scs})$$
(13)

式中: $G(\cdot)$ 为汇集站分段建设成本函数,单位建设成本取值如附录A表A2所示; $P_m^{Wes}$ 、 $P_s^{Ses}$ 分别为风电汇集站m、光电汇集站s的额定功率。

5)汇集站并网线路建设成本。

汇集站并网线路建设成本C<sub>Les</sub>可表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{Lcs}} = f \sum_{m=1}^{M_{w}} \sum_{n=1}^{N_{n}} H_{w} b_{m,n}^{W} L_{m,n} + f \sum_{s=1}^{M_{s}} \sum_{n=1}^{N_{n}} H_{s} b_{s,n}^{s} L_{s,n} \\ H_{w} = H(P_{m}^{\text{WLcs}}), H_{s} = H(P_{s}^{\text{SLcs}}) \end{cases}$$
(14)

式中: $H_w$ 、 $H_s$ 分别为风电汇集站、光电汇集站并网线路单位容量建设成本; $H(\cdot)$ 为汇集站并网线路分段建设成本函数,单位建设成本取值如附录A表A1所示; $P_m^{\text{SLes}}$ 分别为风电汇集站m、光电汇集站s出口线路的额定功率; $N_n$ 为电网节点总数; $b_{m,n}^w$ 、 $b_{s,n}^s$ 为并网点选择的二进制变量,分别表示风电汇集站m、光电汇集站s是否选择节点n为并网点,若是则取值为1,否则取值为0; $L_{m,n}$ 、 $L_{s,n}$ 分别为风电汇集站m、光电汇集站s与节点n之间的距离。

6)火电运行成本。

火电机组运行过程中主要产生碳排放成本和燃料成本,火电运行成本 $C_{\tau}$ 可表示为:

$$C_{\mathrm{T}} = \eta c_{\mathrm{e}} E_{\mathrm{T}} + c_{\mathrm{f}} E_{\mathrm{T}} \tag{15}$$

式中: $\eta$ 为碳排放能力; $c_{e}$ 为碳处理成本单价; $E_{T}$ 为火 电机组的发电量; $c_{f}$ 为燃料成本单价。

7)外送通道输电成本。

区内和区外通过联网通道相连,基本原则为:枯期按需受入电力,产生受入电量成本;丰期在满足区内需求的前提下,尽可能外送富余电力,产生外送电量收益。则外送通道输电成本C。可表示为:

$$C_{\rm io} = c_{\rm m} \sum_{t=1}^{T} P_{\rm io}(t)$$
 (16)

式中:c<sub>m</sub>为外送通道输电电价;P<sub>io</sub>(t)为t时刻外送通

道输电功率,外送功率时为负值,受电时为正值;T 为时间周期。

8)弃电成本。

风光电站因其出口变电站和输电线路的容量限制,会产生弃电成本*C*<sub>a</sub>,可表示为:

$$C_{\rm a} = c_{\rm cur} \sum_{i=1}^{N_{\rm w}} \sum_{t=1}^{T} P_{{\rm Wa},i}(t) + c_{\rm cur} \sum_{j=1}^{N_{\rm s}} \sum_{t=1}^{T} P_{{\rm Sa},j}(t)$$
(17)

式中:ccur为弃电成本单价。

9)网损成本。

根据年负荷损耗率法计算电力系统的年电能损耗<sup>[15]</sup>,网损成本*C*<sub>loss</sub>可表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{loss}} = e_1 E_{\text{loss}} \\ E_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{line}}} T K_{AY} P_{\text{loss, max}, k} \\ K_{AY} = \kappa K_{LY} + (1 - \kappa) K_{LY}^2 \\ K_{LY} = \frac{\sum_{t=1}^{T} P_L(t) \Delta t}{T P_{L, \text{max}}} \end{cases}$$
(18)

式中: $e_1$ 为单位网损成本; $E_{loss}$ 为年电能损耗; $K_{AY}$ 为 年负荷损耗率; $N_{line}$ 为线路总数; $P_{loss, max, k}$ 为第k条线 路通过最大负荷时的功率损耗; $K_{LY}$ 为年负荷率; $\kappa$ 为经验系数; $P_{L, max}$ 为负荷最大值; $P_{L}(t)$ 为t时刻的负 荷功率; $\Delta t$ 为时间间隔。

综上,协同规划模型的目标函数可表示为:

$$\min C = C_{\rm con} + C_{\rm ope} \tag{19}$$

$$C_{\rm con} = C_{\rm ps} + C_{\rm ts} + C_{\rm Lts} + C_{\rm cs} + C_{\rm Lcs}$$
(20)

$$C_{\rm ope} = C_{\rm T} + C_{\rm io} + C_{\rm a} + C_{\rm loss}$$
 (21)

式中:C为规划总成本; $C_{con}$ 为总建设成本; $C_{ope}$ 为总 运维成本。

2.2 约束条件

在最小化规划总成本的同时,需要满足规划区 域的规划边界、供需平衡、电力系统运行稳定性等约 束条件,具体包括风光电站约束、火电机组约束、外 送通道约束、功率平衡约束、新能源消纳电量约束、 汇集站约束、并网点约束(见附录B式(B1)—(B16)) 以及静态电压稳定性约束(见式(22)—(24))。

为了提高风光电站并网后电力系统的电压稳定性,新能源电站汇集并网点需满足如下静态电压稳 定性约束<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\mathrm{d}E_{m}}{\mathrm{d}Q_{c}} = \frac{Z_{m}^{\mathrm{e}}E_{m}\sqrt{E_{n}^{2}E_{m}^{2} - P_{m}^{2}(Z_{m}^{\mathrm{e}})^{2}}}{E_{n}^{2}E_{m}^{2} - 2P_{m}^{2}(Z_{m}^{\mathrm{e}})^{2}}$$
(22)

$$\begin{cases} g(Z_{m}^{e}) = \sqrt{\frac{4\xi^{2}E_{n}^{2}E_{m}^{2} - Q_{c}Z_{m}^{e}E_{m}^{2}(Q_{c}Z_{m}^{e} + \Phi))}{8\xi(Z_{m}^{e})^{2}}} \\ \Phi = \sqrt{Q_{c}^{2}(Z_{m}^{e})^{2} + 8\xi^{2}E_{n}^{2}} \\ Z_{m}^{e} = Z_{m,n} + Z_{n} \end{cases}$$
(23)

$$P_m^{\rm cs} = P_m^{\rm Lcs} \leq g(Z_m^{\rm e}) \tag{24}$$

式中: $E_m$ 、 $E_n$ 分别为汇集站m的母线电压、并网点n 的母线电压; $Z_m^e$ 为汇集站m的并网等值阻抗; $Q_c$ 为 单组无功补偿装置的最大容量; $P_m$ 为汇集站m的输 送功率; $\xi$ 为并网点电压变化限值; $Z_{m,n}$ 为汇集站m 至并网点n的并网线路阻抗; $Z_n$ 为并网点n的自阻 抗; $g(Z_m^e)$ 为汇集站输送功率极限的非线性函数; $P_m^{es}$ 为汇集站m的输出功率; $P_m^{Les}$ 为汇集站m并网线路的 输送功率。

式(22)为新能源汇集站并网点的静态电压调节 灵敏度指标,该指标表示调节新能源汇集站静态无 功补偿单位容量所引起的新能源电站汇集并网点的 电压变化幅度。在无功补偿充足的条件下,维持  $E_{m}=E_{n}=1$  p.u.,新能源汇集站并网点的静态电压调节 灵敏度随新能源汇集站输送功率P\_\_的变化曲线(设 定Z<sup>e</sup><sub>m</sub>=0.5 p.u.,基准容量为1000 MV·A,基准电压为 220 kV)如附录C图C1所示。在大规模新能源电站 并网运行时,须使静态电压调节灵敏度维持在一定 的范围内(图C1中的0-A段),以实现并网点电压的 可控性。因此,由式(22)可以推导出考虑新能源汇 集站并网点电压变化处于可控范围内的新能源汇集 站输送功率极限,如式(23)和式(24)所示,该约束保 证了新能源发电接入后系统运行于静态电压稳定区 域。当维持 $E_m = E_n = 1$  p.u.时, $g(Z_m^e)$ 是关于 $Z_m^e$ 的单 调递减函数,如附录C图C2所示。

#### 3 模型求解方法

#### 3.1 模型线性化方法

从数学角度而言,本文建立的计及静态电压稳 定性的风光电站选址定容协同规划模型中存在线路 长度的非线性表达式和汇集站输送功率极限的非线 性函数g(Z<sup>e</sup><sub>m</sub>)这2个非线性环节,为混合整数非线性 规划问题。

对于线路长度的非线性表达式而言,在第2章 所提规划模型中:式(12)中的风电场群内部汇集线 路长度 $L_{i,m}$ 由风电场选址 $(x_i, y_i)$ 与风电汇集站选址  $(x_m, y_m)$ 之间的相对距离决定,光伏电站群内部汇集 线路长度 $L_{j,s}$ 由光伏电站选址 $(x_j, y_j)$ 与光电汇集站 选址 $(x_s, y_s)$ 之间的相对距离决定,分别如式(25)和 式(26)所示;式(14)中的汇集站并网线路长度 $L_{m,n}$ 、  $L_{s,n}$ 分别由风电汇集站选址 $(x_m, y_m)$ 、光电汇集站选 址 $(x_s, y_s)$ 与并网节点 $(x_n, y_n)$ 之间的相对距离决定, 分别如式(27)和式(28)所示。其中, $(x_i, y_i)$ 、 $(x_j, y_j)$ 、  $(x_m, y_m)$ 、 $(x_s, y_s)$ 均为待优化的未知变量,因此式 (25)—(28)为非线性函数。

$$L_{i,m} = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (y_m - y_i)^2}$$
(25)

$$L_{j,s} = \sqrt{(x_s - x_j)^2 + (y_s - y_j)^2}$$
(26)

$$L_{m,n} = \sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2}$$
(27)

$$L_{s,n} = \sqrt{(x_n - x_s)^2 + (y_n - y_s)^2}$$
(28)

对于汇集站输送功率极限的非线性函数 $g(Z_m^e)$ 而言,由式(23)可知 $g(Z_m^e)$ 是关于 $Z_m^e$ 的非线性函数。

为了解决非线性环节导致模型难以直接求解的问题,本节提出基于地图栅格化和分段线性化的方法对模型中的2个非线性环节进行线性化处理,具体方法如下。

3.1.1 基于地图栅格化方法线性化线路长度的非线性表达式

为了线性化式(25)一(28),本文基于地图栅格 化方法对规划区域(即新能源电站和汇集站的选址 范围)进行处理,生成N个离散栅格单元,将各栅格 单元的中心点坐标作为风光电站及其汇集站的候选 地址<sup>[17]</sup>,栅格化地图见附录C图C3,且有:

$$N_{\rm w} = N_{\rm s} = M_{\rm w} = M_{\rm s} = N \tag{29}$$

栅格化地图后,风光电站及其汇集站的选址定 容规划问题被转换为:在各位置坐标已知的栅格单 元内进行风光电站及其汇集站的容量规划。然后, 引入栅格距离矩阵 L<sub>1</sub>和栅格-电网节点距离矩阵 L<sub>2</sub> 将线路长度的非线性表达式转换为确定量,分别如 式(30)和式(31)所示。

$$\boldsymbol{L}_{1} = [\boldsymbol{l}_{i,m}]_{N \times N} \tag{30}$$

$$\boldsymbol{L}_{2} = [\boldsymbol{l}_{m,n}]_{N \times N_{n}} \tag{31}$$

式中:*l<sub>i,m</sub>为栅格i*与栅格*m*之间的距离;*l<sub>m,n</sub>为栅格m*与电网节点*n*之间的距离。

根据式(29)—(31),式(12)和式(14)的线性化 描述分别为:

$$C_{\text{Lts}} = f\left(\sum_{i=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} F(P_{i}^{\text{WLts}}) b_{i,m}^{\text{W}} l_{i,m} + \sum_{j=1}^{N} \sum_{s=1}^{N} F(P_{j}^{\text{SLts}}) b_{j,s}^{\text{S}} l_{j,s}\right) (32)$$

$$C_{\text{Lcs}} = f\left(\sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N_{n}} H(P_{m}^{\text{WLcs}}) b_{m,n}^{\text{W}} l_{m,n} + \sum_{s=1}^{N} \sum_{n=1}^{N_{n}} H(P_{s}^{\text{SLcs}}) b_{s,n}^{\text{S}} l_{s,n}\right)$$

$$(33)$$

3.1.2 汇集站输送功率极限的非线性函数的分段线 性化

采用分段线性化方法对式(23)和式(24)中存在的非线性函数 $g(Z_m^e)$ 进行线性化处理:在 $Z_m^e$ 的定义域内将非线性函数曲线分成K段线性函数,并对每段线性函数引入二进制变量 $b_k(k=1,2,...,K)$ ,表示变量是否在区间( $Z_{k-1}, Z_k$ )内,若在则 $b_k=1$ ,否则 $b_k=0$ 。则 $g(Z_m^e)$ 可表示为:

$$\begin{cases} g(Z_{m}^{e}) = \sum_{k=1}^{K} b_{k} (A_{k} Z_{m}^{e} + B_{k}) \\ Z_{k-1} - M (1 - b_{k}) \leq Z_{m}^{e} \leq Z_{k} + M (1 - b_{k}) \\ A_{k} = \frac{g(Z_{k}) - g(Z_{k-1})}{Z_{k} - Z_{k-1}} \end{cases}$$
(34)

式中: $A_k$ 、 $B_k$ 分别为第k段线性函数的斜率、在纵轴上的截距;M为足够大的常数;( $Z_k$ , $g(Z_k)$ )为第k个分段点的坐标。

综上,本文所提风光电站选址定容协同规划模型被转换为MILP模型。

#### 3.2 基于K-means聚类的场景缩减方法

*K*-means 聚类算法能够处理多维变量和大规模数据,具有计算简单、快捷、高效等优点。本文采用基于*K*-means聚类的场景缩减方法对已获得的大量风/光自然资源、负荷功率等数据进行聚类分析,用少数典型场景曲线反映大规模时序场景历史数据的变化特征。场景缩减的具体步骤见附录D<sup>[18]</sup>。

#### 3.3 模型求解流程

最终的选址定容协同规划模型可总结为式 (35),该模型为MILP模型,本文基于MATLAB软件 调用CPLEX求解器对其进行优化求解。模型求解 流程图如图1所示,具体步骤见附录E。

$$\begin{cases} \min C \\ \text{s.t. } \vec{\chi} (B1) - (B16) \vec{\chi} (24) \vec{\chi} (34) \end{cases}$$
(35)



图 1 模型求解流程图 Fig.1 Flowchart of solving model

#### 4 算例分析

#### 4.1 仿真场景设置

本文以西南某地的实际数据为例,进行风光电 站选址定容分析。规划模型的相关参数如附录F表 F1所示,该地区的电网拓扑结构如附录F图F1所 示,装机容量数据如附录F表F2所示。根据美国国 家航空航天局的气象数据反演分析数据库,可得到 该地区的风速、太阳辐射强度、温度等自然数据,风、 光资源的分布情况分别如附录F图F2和图F3所示。 对自然资源的原始数据进行处理,得到全年周期内 时间分辨率为1h且空间分辨率为1°(纬度)×1°(经 度)的地理栅格气象数据;并利用*K*-means聚类算法 将负荷数据和各栅格全年8760h的气象数据缩减 成96h的典型场景数据进行仿真分析,所得96h的 典型负荷功率曲线如附录F图F4所示。

#### 4.2 风光电站选址定容结果分析

风光电站选址结果如图2所示,风光电站容量 配置结果如附录F表F3所示。结合图F2和图F3的 资源分布情况分析可得:风电场的建设位置基本规 划于风资源丰富的该地区北部,光伏电站的建设位 置基本规划于光资源丰富的该地区中南部。



Fig.2 Siting results of wind and photovoltaic power stations

基于风光电站的规划方案可得到电力系统运行 过程中各电源的输出功率曲线,如附录F图F5所 示。在优化规划前,电力系统中的电源只有光伏、水 电、火电,结构较为单一,且光伏具有间歇性,水电具 有丰枯期特性,结合图F4的负荷功率曲线可知,电 力系统存在丰盈枯缺导致的电力平衡问题,此时,若 要满足负荷功率需求,则系统需要大量的火电输出 功率。在优化规划后,系统的风电容量大幅增加,通 过丰富电源结构能够有效地发挥风、光、水三者之间 的时空互补性,有效解决水电丰盈枯缺导致的电力 平衡问题。优化规划前、后的燃料成本、碳排放成 本、缺电量结果对比如附录F表F4所示。由表可 知,在优化规划后,火电出力减少,从而有效减少了 系统的碳排放,降低了系统的运行成本。系统运行 过程中外送通道的功率曲线如附录F图F6所示。 由图可知:在优化规划前,电力供需自平衡能力较 弱,需从区外大量受入电力来填补区内的电力缺额; 在优化规划后,区内电力供需平衡能力得到有效改 善,减少了系统对受入电力的依赖,并能在丰期满足

区内负荷需求的基础上增加外送电力。

#### 4.3 风光电站并网规划结果分析

100

风电汇集站、光电汇集站的并网规划结果分别 如图3和图4所示。由图可知,在未考虑静态电压稳 定性的情况下,规划目标为成本最小,从经济性角度 而言,输电线路的建设成本会随着线路长度的增大 而增大,而输电线路的长度主要取决于新能源电站 位置、汇集站位置、并网节点三者之间的相对距离。 在单位输电容量下,110 kV输电线路(新能源电站-汇集站线路)的建设成本通常高于220 kV输电线路 (汇集站并网线路),因此,为了实现成本最小的目标 要求,风电汇集站、光电汇集站都靠近新能源电站进 行选址,以减少新能源电站群内部110 kV汇集线路 的建设长度,并选择距离最近的节点接入电网。



(a)未考虑静态电压稳定性 (b)考虑静态电压稳定性 ▲风电场,□风电汇集站,•电网节点

图3 风电汇集站的并网规划结果

Fig.3 Grid-connected planning results of wind power collection stations



(a)未考虑静态电压稳定性(b)考虑静态电压稳定性▲光伏电站,□光电汇集站,•电网节点

图4 光电汇集站的并网规划结果

Fig.4 Grid-connected planning results of photovoltaic power collection stations

对风电汇集站、光电汇集站并网的静态电压稳 定性进行分析,结果分别如图5和图6所示。结合图 3和图4的规划结果,综合分析可得如下结论:①图3 (a)中的萨嘎节点位于电网的薄弱位置,其节点自阻 抗较大,导致风电汇集站1并网后的输送功率极限 无法满足静态电压稳定性要求(见图5(a)中风电汇 集站1的结果);②图3(a)中的风电汇集站2与多林 节点之间的距离较大,使得风电汇集站2的并网等 值阻抗较大,从而导致风电汇集站2的输送功率极 限无法满足静态电压稳定性要求(见图5(a)中风电 汇集站2的结果);③光伏电站的规划建设位置位于 电网中自阻抗较小的节点附近,在未考虑静态电压 稳定性约束的情况下,光电汇集站的规划结果已满 足静态电压稳定性要求,所以考虑静态电压稳定性 约束后,光电汇集站的规划结果未发生改变。因此, 在考虑静态电压稳定性约束的情况下,汇集站的选 址应在靠近新能源电站的基础上,减小与并网节点 之间的距离,并选择自阻抗较小的节点接入电网。



图 5 风电汇集站并网后的静态电压稳定性

Fig.5 Static voltage stability after grid-connection of wind power collection stations



图6 光电汇集站并网后的静态电压稳定性

Fig.6 Static voltage stability after grid-connection of photovoltaic power collection stations

为了进一步分析风电汇集站、光电汇集站并网 后的电压波动情况,图7和图8分别给出了风电汇集 站、光电汇集站投切12 Mvar无功补偿装置后并网点 电压变化百分比曲线。由图可知:①未考虑静态电 压稳定性约束时,风电汇集站3、4的电压变化能保 持在稳定区间,风电汇集站1、2的电压无法保持在 稳定区间,如图7(a)所示,这是因为汇集站的选址和 并网点的选择不合理,导致并网等值阻抗较高,从而 使得风电汇集站1、2的并网电压无法满足系统电压 稳定运行要求:②考虑静态电压稳定性约束后,规划 建设的3座风电汇集站的并网点电压变化百分比均 能维持在稳定区间,如图7(b)所示;③光电汇集站 的并网点电压变化百分比均能维持在稳定区间,如 图8所示。以上对比仿真结果表明本文所提风光电 站选址定容协同规划模型能够有效提升风电和光电 汇集站并网规划后的静态电压稳定性。

考虑静态电压稳定性约束前、后的规划总成本 分别为301830、327490万元。可见,在规划阶段考 虑静态电压稳定性约束会使规划总成本增加9%, 说明本文所提模型会以牺牲部分经济性为代价来保 证系统的安全稳定运行。



图 7 风电汇集站并网后并网点电压变化百分比曲线





#### 图 8 光电汇集站并网后并网点电压变化百分比曲线

Fig.8 Voltage change percentage curves of point of common coupling after grid-connection of photovoltaic collection stations

#### 5 结论

本文综合考虑自然资源的禀赋条件、系统运行 约束和静态电压稳定性的影响,以规划总成本为优 化目标,建立风光电站选址定容协同规划模型,对风 光电站的选址定容、风光汇集站的选址定容及其并 网点位置进行协同规划。此外,针对所建模型的非 线性问题,提出了基于地图栅格化和分段线性化的 求解方法。所得主要结论如下:

1)本文提出的风光电站选址定容协同规划模型 同时考虑了地区自然资源禀赋特性和实际地理位置 的影响,能够有效协调优化风光电站、风光汇集站及 其并网点的选址定容,充分发挥风光发电的互补特 性,降低系统的运行成本;

2)所提基于地图栅格化和分段线性化的求解方

法可将所建规划模型转化为MILP模型,能够有效实现规划模型的高效求解;

3)本文所提风光电站选址定容协同规划模型充 分考虑了风光电站并网对系统静态电压稳定性的影响,能够有效解决大规模风光电站并网对电力系统 造成的电压稳定性问题。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

 [1] 邱伟强,王茂春,林振智,等."双碳"目标下面向新能源消纳场 景的共享储能综合评价[J].电力自动化设备,2021,41(10): 244-255.

QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):244-255.

[2] 侯慧,徐焘,肖振锋,等. 基于重力储能的风光储联合发电系统 容量规划与评价[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(17): 74-84.

HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17):74-84.

[3] 刘树桦,王建学,李清涛,等. 多能互补复合电站的优化配置及 其在系统电源规划中的应用[J]. 电网技术,2021,45(8):3006-3015.

LIU Shuhua, WANG Jianxue, LI Qingtao, et al. Optimal configuration of multi-energy complementary composite power plant and its application in generation expansion planning [J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3006-3015.

[4]张恒,袁铁江,车勇,等.兼顾新能源穿透功率和风险的风光火 打捆外送电源规划[J].电力系统自动化,2018,42(19):71-76,132.

ZHANG Heng, YUAN Tiejiang, CHE Yong, et al. Power supply planning for wind-photovoltaic-thermal bundled transmission considering both power penetration and risk of new energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19):71-76,132.

[5]伏泽来.考虑新能源消纳能力的电源规划[D].北京:华北电力大学,2020.

FU Zelai. Generation expansion planning considering the utilization of new energy[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2020.

- [6] YANG P, NEHORAI A. Joint optimization of hybrid energy storage and generation capacity with renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4):1566-1574.
- [7]罗金山,路畅,孟繁骏.碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J].电力系统自动化,2016,40(11):47-52.
   LUO Jinshan,LU Chang, MENG Fanjun. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(11):47-52.
- [8] 赵书强,索璕,马燕峰.高比例可再生能源的多点容量规划方法[J].电力自动化设备,2020,40(5);8-18.
   ZHAO Shuqiang,SUO Xun,MA Yanfeng. Multi-point capacity planning method for high proportion of renewable energy[J].
   Electric Power Automation Equipment,2020,40(5);8-18.

[9] 李宗翰,李庚银,周明,等. 基于费马-韦伯问题的新能源接入 系统选址定容综合优化方法[J]. 电网技术,2020,44(6):2118-2126.

LI Zonghan, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Comprehensive optimization method for location and capacity of new energy access system based on Fermat-Weber problem[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2118-2126.

- [10] 张衡,程浩忠,曾平良,等.考虑经济性与安全性的发输电联合 优化规划[J].电力系统自动化,2017,41(21):62-69.
   ZHANG Heng,CHENG Haozhong,ZENG Pingliang, et al. Generation and transmission expansion planning considering economy and safety[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(21):62-69.
- [11] 原一方,尚策. 减碳中多阶段的煤电机组退役与新能源、储能规划协同[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):140-147.
   YUAN Yifang, SHANG Ce. Coordination of multi-stage renewable energy, energy storage planning and coal-fired unit retirement under carbon reduction goal[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(9):140-147.
- [12] 穆永铮,鲁宗相,申洪. 汇集站和集群中心站分级协调的风场 群接入系统优化规划[J]. 中国电机工程学报,2014,34(增刊 1):1-8.

MU Yongzheng, LU Zongxiang, SHEN Hong. Multiple wind farms integration grid optimal planning considering coordination of collecting stations and cluster stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(Supplement 1):1-8.

- [13] 吴林林,李蕴红,于思奇,等. 基于短路比指标的风电汇集系统 稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):72-78.
  WU Linlin,LI Yunhong,YU Siqi, et al. Stability analysis of dense wind power area based on short circuit ratio index[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(8):72-78.
- [14] 甘磊.考虑大型新能源发电基地接入的大电网规划方法研究 [D].北京:华北电力大学,2017.

GAN Lei. Research on planning method of bulk power network integrated with large-scale new energy power bases[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.

- [15] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 5版. 杭州:浙江大学出版社, 2013:103-104.
- [16] 许晓菲,牟涛,贾琳,等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):15-19,33.
  XU Xiaofei, MU Tao, JIA Lin, et al. Practical criteria of static voltage stability in power systems with high wind penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 15-19,33.
- [17] 韩杏宁.大区电力系统新能源电源规划及储能配置方法研究
  [D].武汉:华中科技大学,2017.
  HAN Xingning. Variable renewable generation expansion planning and energy storage allocation in large-scale power systems
  [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [18] 吴丽珍,蒋力波,郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电 网无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(15):152-159.
   WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm [J]. Power System Protection and Control,2017,45(15):152-159.

#### 作者简介:

- 路 亮(1984—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向 为新型电力系统规划(**E-mail**:skyluliang@126.com);
- 魏明奎(1970—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向
- 为新型电力系统规划(**E-mail**:weimingkui@sw.sgcc.com.cn); 张怀远(1999—),男,硕士研究生,通信作者,主要研究
- 方向为电力系统规划(E-mail:zhang\_huaiyuan@163.com)。 (编辑 陆丹)

# Coordinated siting and sizing planning method of wind and photovoltaic power stations considering static voltage stability

LU Liang<sup>1</sup>, WEI Mingkui<sup>1</sup>, ZHANG Huaiyuan<sup>2</sup>, JIANG Li<sup>1</sup>, SHEN Li<sup>1</sup>, LIAO Kai<sup>2</sup>

(1. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610095, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract**: In order to reduce the negative impact of grid-connection of wind and photovoltaic power stations (WPPSs) on the voltage stability of power system, a coordinated siting and sizing planning method of WPPSs considering static voltage stability is proposed. The power generation characteristics of WPPSs are analyzed and their mathematical models are established. Considering the internal restriction relationship between equivalent grid-connected impedance and static voltage stability, the coordinated siting and sizing planning model of WPPSs is established by synthesizing optimization objectives such as siting and sizing of WPPSs and their collection stations, grid-connected point, and so on. Based on the map rasterization and piecewise linearization mthods, the proposed planning model is transformed into a mixed integer linear programming model. On this basis, *K*-means algorithm is used to extract typical scenes and the solution process of the proposed model is given. Based on the actual data of a region in Southwest China, the simulative results show that the proposed planning method can give full play to the natural resource endowment characteristics in the planning region and the complementarity of wind and photovoltaic power, and effectively improve the static voltage stability of the system with grid-connected WPPSs.

Key words: wind and photovoltaic power stations; static voltage stability; siting and sizing; coordinated planning; mixed integer linear programming



Fig.A1 Schematic diagram of new energy power station connected to power grid

表 A1 输电线路造价 Table A1 Construction cost of transmission line			
电压等级/kV	额定功率/MW	单位建设成本/(万元·km <sup>-1</sup> )	
110	25	17.5	
	50	30	
	75	37.5	
	100	40	
220	230	65	
	330	75	
	460	105	
	600	125	

#### 表 A2 汇集站造价

Table A2 Constr	ruction cost of collection station
额定功率/MW	单位建设成本/万元
120	5000
180	6000
240	7000
360	8500
540	11000
660	13500

## 附录 B

1)风光电站约束。

.

风光电站、风光电站出口变电站及其输电线路的额定功率、汇集站及其并网输电线路的额定功率约 束如下:

$$0 \le P_{WN,i} \le P_{max}^{W} \tag{B1}$$

$$0 \le P_{\mathrm{SN},i} \le P_{\mathrm{max}}^{\mathrm{S}} \tag{B2}$$

$$0 \le P_i^{\text{Wts}} \le P_{\text{WN},i} \tag{B3}$$

$$0 \le P_i^{\text{Sts}} \le P_{\text{SN},i} \tag{B4}$$

$$P_i^{\text{Wts}} = P_i^{\text{WLts}} \tag{B5}$$

$$P_i^{\text{Sts}} = P_i^{\text{Sts}} \tag{B6}$$

$$P_m^{\text{Wcs}} = P_m^{\text{WLcs}} = \sum_{i=1}^{N_W} P_i^{\text{WLts}} b_{i\,m}^{W}, \forall m$$
(B7)

$$P_m^{\rm Scs} = P_m^{\rm SLcs} = \sum_{i=1}^{N_{\rm s}} P_i^{\rm SLts} b_{i,m}^{\rm S}, \forall m$$
(B8)

式中: P<sup>w</sup><sub>max</sub>、 P<sup>s</sup><sub>max</sub>分别为风电场和光伏电站的额定功率最大值。

2) 火电机组约束。

火电机组功率约束和爬坡约束如下:

$$P_{\text{Tmin}} \le P_{\text{T}}(t) \le P_{\text{Tmax}} \tag{B9}$$

$$\left|P_{\mathrm{T}}(t+1) - P_{\mathrm{T}}(t)\right| \le D \tag{B10}$$

式中:  $P_{\text{Tmin}} \approx P_{\text{Tmax}}$ 分别为火电机组的最小和最大输出功率;  $P_{\text{T}}(t)$ 为t时刻火电机组的输出功率; D为火电机组爬坡功率。

3) 外送通道功率约束。

外送通道功率不能超过外送通道的额定容量,即:

$$-P_{io,max} \le P_{io}(t) \le P_{io,max}$$
(B11)

式中: Piomax 为外送通道容量。

4) 功率平衡约束。

电力系统运行过程中的功率平衡约束如下:

$$P_{\rm L}(t) = P_{\rm W}(t) + P_{\rm S}(t) + P_{\rm c}(t) + P_{\rm H}(t) + P_{\rm T}(t) + P_{\rm io}(t)$$
(B12)

式中:  $P_{c}(t)$ 为t时刻规划地区已建设新能源的输出功率;  $P_{H}(t)$ 为t时刻水电机组的输出功率。

5) 新能源消纳电量约束。

为实现规划地区新能源的充分利用,提高新能源发电的消纳能力,新能源的消纳电量在区域电网总 负荷电量中的占比应满足如下约束:

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_{\rm W}} \left[ P_{{\rm W},i}(t) - P_{{\rm W}a,i}(t) \right] \ge \lambda_{\rm W} \sum_{t=1}^{T} P_{\rm L}(t)$$
(B13)

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N_{\rm S}} \left[ P_{{\rm S},i}(t) - P_{{\rm Sa},i}(t) \right] \ge \lambda_{\rm S} \sum_{t=1}^{T} P_{\rm L}(t)$$
(B14)

式中:  $\lambda_w$ 、  $\lambda_s$ 分别为风电和光伏消纳电量相对总负荷电量占比。

6) 汇集站约束。

$$\sum_{m=1}^{N} b_{i,m} = \begin{cases} 0 & P_{N,i} = 0\\ 1 & P_{N,i} > 0 \end{cases} \quad \forall i$$
(B15)

式中: *b<sub>i,m</sub>* 为风电场(或光伏电站)汇集站 *m* 划分的二进制变量; *P<sub>N,i</sub>* 为风电站(或光电站)*i* 的额定功率。 7) 并网点约束。

$$\sum_{n=1}^{N_n} b_{m,n} = \max\{b_{i,m} \mid i = 1, 2, ..., N\}, \forall m$$
(B16)

附录 C



Fig.C1 Static voltage sensitivity of point of common coupling of new energy collection station







## 附录 D

用 $\eta_s(s=1,2,...,N_k)$ 表示缩减前的 $N_k$ 个不同场景,假设目标场景数为 $M_k$ ,场景缩减步骤如下所述。 1)随机选取 $M_k$ 个场景作为簇心,簇心场景集合为 $A = \{\eta_k^A\}(s=1,2,...,M_k)$ 。

2) 根据簇心集合,可确定剩余场景集合为 $B = \{\eta_{s'}^{B}\}(s'=1,...,N_{k}-M_{k})$ 。分别计算剩余场景到簇心场景 距离 $D_{s,s'} = \|\eta_{s}^{A} - \eta_{s'}^{B}\|$ 。

3) 根据距离矩阵  $D_{s,s}$ ,将剩余场景归类到距离最近的簇心。此次聚类后的聚类集合为  $\Omega = \{A_i\}, (i = 1, ..., M_k),其中 A_i 表示同类场景集合。$ 

4) 簇心计算方法。假设某聚类  $A_i$  中有  $L_k$  个场景, 计算每个场景与其它场景距离之和:  $d_s = \sum_{s'=1,s'\neq s}^{L_k} ||\eta_s - \eta_{s'}||, s = 1,...,L_k$ 。选取  $d_k = \min(d_s)$  的场景  $\eta_k$  为新的聚类中心。按上述方法重新确定簇心集合。

5) 重复步骤 2) 一4), 直到簇心和聚类结果不再变化,场景缩减结束。每个场景的概率值即为该类中所有场景概率之和。

## 附录 E

模型求解步骤如下:

1) 输入原始数据,包括网架参数、自然资源数据、负荷数据等;

2) 对规划区域进行栅格化处理,生成 N个栅格,并提取每个栅格全年 8760 h 的自然资源数据;

3) 对每个栅格的自然资源数据,采用 *K*-means 聚类算法缩减为 96 h 的典型场景数据,最终输出典型场景数据和节点电压阻抗矩阵;

4) 在 MATLAB 中建立风光电站选址定容协同规划的 MILP 模型,并调用 CPLEX 进行模型的求解, 最后输出规划方案。

# 附录 F

## 表 F1 模型相关参数

	Table F1         Model related para	meters
对象	参数	数值
	风电机组额定功率 P <sub>N</sub>	1.5MW
风电场	风电机组切入风速 V <sub>in</sub>	3m/s
	风电机组切出风速 Vout	25m/s
	风电机组额定风速V <sub>r</sub>	11m/s
	风电机组轮毂高度 h	70m
	建设成本 ew	7.78×10 <sup>6</sup> 元/MW
	年运维成本 uw	3.6×10 <sup>5</sup> 元/MW
	降容系数 ø	0.7
光伏电站	功率温度系数 β	-0.0045%/°C
	光伏电池工作标准温度 T <sub>stc</sub>	25℃
	光伏电池组标称温度 N <sub>oct</sub>	46.5℃
	建设成本 es	6.9×10 <sup>6</sup> 元/MW
	年运维成本 us	6.9×10 <sup>4</sup> 元/MW
其他	规划年限 Ny	1 a
	并网点电压变化限值ξ	2.5%
	单组最大容量无功补偿装置 Qc	12Mvar



### 图 F1 西南某地区电网网架结构



表 F2 现有电源装机容量

Table F2	Installed power capacity
电源类型	装机容量/MW
光伏	1275
火电	500
水电	1604
外送通道	1050





Fig.F2 Distribution of wind resources in some area in Southwest China





Fig.F3 Distribution of light resources in some area in Southwest China





Table F3 Capacity configuration of wind power stations and photovoltaic stations

电站	序号	装机容量/MW	序号	装机容量/MW
风电场	1	28.5	7	90
	2	90	8	90
	3	90	9	90
	4	90	10	7.5
	5	90	11	90
	6	90		
光伏电站	1	100	4	3.09
	2	100	5	100
	3	100	6	100







表 F4 相关指标值

Table F4	Values of relevant indicators		
指标	规划前	规划后	
燃料成本(万元)	960	378.2	
碳排放成本(万元)	617.3	243.2	
缺电量(MW)	878	0	

