

考虑源荷不确定性的配电网风光储综合规划

王丹¹,杨俊涛¹,曾燕¹,卢俊洋²,洪鑫³,李妍擘¹

(1. 国网湖北省电力有限公司 十堰供电公司,湖北 十堰 442000;2. 国网湖北省电力有限公司 竹山县供电公司,湖北 十堰 442200;3. 国网湖北省电力有限公司 郧县供电公司,湖北 十堰 442500)

Comprehensive planning of wind-PV-storage in distribution network

considering uncertainty of source and load

WANG Dan¹, YANG Juntao¹, ZENG Yan¹, LU Junyang², HONG Xin³, LI Yanbo¹

(1. Shiyan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Shiyan 442000, China;2. Zhushan County Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Shiyan 442200, China;3. Yunxian Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Shiyan 442500, China)

摘要:针对考虑分布式电源和负荷不确定性的配电网风光储综合规划问题,首先以概率模型表征分布式电源和负荷不确定性,并基于改进半不变量法求解概率潮流;然后考虑投资成本、碳成本、经济收益和电压改善等,以综合效益最大为目标,建立考虑无功补偿装置的风光储综合规划模型,并提出基于食肉植物算法(carnivorous plant algorithm, CPA)和协同进化算法(coevolutionary algorithm, CA)进行求解。该算法将待求解的多主体综合规划问题分解为分布式电源、储能和无功补偿装置3个子规划问题,并基于CPA对每个子问题进行求解,然后通过生态系统协调各种群进化,获取最优规划方案;最后在IEEE33节点和IEEE69节点算例中验证了模型的合理性和求解算法的高效性、普适性。

关键词:风光荷不确定性;概率潮流;综合规划;食肉植物算法;协同进化算法

Abstract: Aiming at the integrated WG-PV-ESS planning problem of distribution network considering the uncertainty of distributed power and load. Firstly, the uncertainty of distributed power and load is characterized by a probabilistic model, and the probabilistic power flow was solved based on the improved semi-invariant method. Then, considering the investment cost, carbon cost, economic benefits and voltage improvement, and aiming at maximize the comprehensive benefit, the comprehensive planning model of WG-PV-ESS comprehensive planning model considering reactive power compensation device is established. A carnivorous plant algorithm based coevolutionary algorithm is proposed to solve the model. In this algorithm, the multi-agent comprehensive planning problem to be solved is decomposed into three sub-planning problems: distributed generation, energy storage and reactive power compensation devices, and each sub-problem is solved based on CPA, and the optimal planning scheme is obtained by coordinating the evolution of various groups through the ecosystem. Finally, the rationality of the proposed model and the efficiency and universality of the solution algorithm are verified by IEEE33 and IEEE69.

Key words: wind-PV-load uncertainty; probabilistic power flow; comprehensive planning; carnivorous plant algorithm; coevolutionary algorithm

0 引言

“双碳”背景下,以风、光为代表的可再生能源近年来发展迅速,其“源”的特性有助于改善配电网潮流、减小网损和提高电压质量,但出力不确定性也给电压质量和功率消纳等带来了挑战^[1-2],而储能技术的发展为此提供了技术支撑,合理的利用已有技术对配电网风、光进行综合规划对提高配电网运行经济性和稳定性具有重要意义^[3-4]。

收稿日期:2023-04-10;修回日期:2023-06-01
基金项目:国网湖北省电力有限公司科技项目(5215C0220001)

目前已有学者在配电网风光储综合规划方面做了相关研究。在规划模型构建方面,文献[5]以改善消纳光伏导致的电压升高为目标,构建了配电网储能配置模型,并采用遗传算法和模拟进化算法求解;文献[6]考虑电压改善、网损改善,建立了考虑寿命周期成本的储能配置模型,并采用改进粒子群算法求解;文献[7]以配电网网损和停电损失为目标,建立多目标规划模型,并采用遗传算法求解;文献[8]考虑了风、光投资成本和电压改善效果,建立多目标规划模型,并采用改进萤火虫算法进行求解;文献[9]将电容器(capacitor bank, CB)纳入风、光规划模型,建立考虑投资成本、运维成本、网损成本的风、光和CB规划模型,并采用改进粒子群算法、

小偷警察算法等进行求解。文献[10]将储能纳入风、光规划模型以提高配电网运行可靠性,构建以提高配电网运行经济性、可靠性和可再生能源利用率为 目标的规划模型,并采用改进遗传算法求解。以上研究从多个角度设定目标函数,能够全面反映分布式电源和储能规划后对配电网的影响,但模型构建过程中未考虑分布式电源和负荷不确定性。

考虑分布式电源和负荷不确定性可使规划模型更为合理,一般采用概率模型进行表征。文献[11]采用蒙特卡罗算法模拟分布式电源出力的随机性,并以配电网可靠性收益最大为目标求解规划方案;文献[12]则以风险成本模型来表征分布式电源出力不确定性对配电网的影响,并以运行风险成本最小为目标求解规划方案;但基于蒙特卡洛法进行模拟时存在模拟精度与计算量之间的矛盾。而文献[13—14]提出的改进半不变量法求解概率潮流时,可保持较好的拟合精度,同时有效提升了计算速度,可为本文求解概率潮流提供参考。此外,配电网结构复杂,规划模型求解过程中数据量大,亟需寻找一种高效的求解算法提高求解效率。

基于已有研究,本文首先以概率模型表征分布式电源出力和负荷不确定性,保证规划方案的合理性,并采用改进半不变量法^[15]求解概率潮流;在此基础上,考虑投资成本、碳成本、经济收益和电压改善等,构建含CB的配电网风光储综合规划模型,并提出CPA-CA算法求得规划方案。该算法将综合模型分解为分布式电源、储能和CB 3个子规划模型,并采用CPA 对子模型进行求解,然后通过生态系统协调各种群进化,提高了算法的收敛速度和寻优精度。最后,基于 IEEE33 和 IEEE69 算例验证了规划模型的合理性和求解算法的高效性及普适性。

1 考虑分布式电源和负荷不确定性的概率潮流计算

分布式电源出力受风速、光照等自然因素影响,而负荷受预测精度,用户随机行为等影响,在时序上具有随机性和不确定性。本文以主要影响因素的分布特征表征不确定性,并采用改进半不变量法^[16]进行概率潮流计算。

1.1 风光概率出力模型

风速是影响风电出力的主要因素,采用Weibull分布进行表征,并近似风速与线性化功率的函数关系,表示如下

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

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} P_r & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 为风速; k 、 c 分别为 Weibull 分布的形状参数和尺度参数; P_r 为风机额定功率; v_r 、 v_{ci} 、 v_{co} 分别为风机额定风速、切入风速和切出风速。

光照强度是影响光伏出力的主要因素,采用 Beta 分布进行表征,其函数关系可表示如下

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$P_{pv} = r \sum_{i=1}^N A_i \lambda_i \quad (4)$$

式中: r 、 r_{max} 分别为光照强度和最大光照强度; α 、 β 为 Beta 分布的形状参数; Γ 为伽玛函数; A_i 、 A 分别为每个组件光照面积和等效光照面积; λ_i 、 λ 分别为每个组件光电转换效率和等效光电转换效率。

1.2 负荷概率模型

负荷随机波动和预测误差是造成不确定性的主要因素,近似满足正态分布。记 P_L 、 Q_L 为有功和无功负荷,其概率函数可表示如下

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left(-\frac{(P_L - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (5)$$

$$f(Q_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} \exp\left(-\frac{(Q_L - \mu_q)^2}{2\sigma_q^2}\right) \quad (6)$$

式中: μ_p 、 μ_q 分别为负荷有功功率和无功功率期望值; σ_p 、 σ_q 分别为负荷有功功率标准差和无功功率标准差。

1.3 配电网概率潮流计算

进行概率潮流计算,求出目标函数期望值及对各种机会约束进行概率检验时,本文提出基于改进半不变量法的概率潮流计算方法可以全面反映分布式电源对配电网的影响,同时能够减小了计算量^[17]。首先,列出节点功率方程和支路潮流方程,进行一阶泰勒展开得到期望和扰动形式;结合分布式电源和负荷功率概率模型求得两者各阶原点矩和半不变量;利用半不变量可加性,计算系统状态变量和支路潮流各阶半不变量,进行 C 型 Gram-Charlier 级数展开^[18]得到两者概率密度函数,求得系统状态变量和支路潮流概率分布。考虑到新能源功率分布与正态分布存在一定偏差^[19],级数展开过程中以有限截断项拟合概率密度函数存在一定误差,因此,引入修正因子 β 对 C 型 Gram-Charlier 级数展开的概率密度函数进行改进,如式(7)所示

$$p'(x) = \frac{\sum_r \beta_r^{-1} \lambda_r h_r(x)}{\int e^{\sum_r \beta_r^{-1} \lambda_r h_r(x)} dx} \quad (7)$$

式中: r 为阶数; λ_r 由随机变量 x 的各阶矩求得^[20]; $h_r(x)$ 为埃尔米特多项式。

修正因子 β_r 的值可利用最大熵原理和牛顿法求得。首先确定最大熵原理求解概率密度函数的数学模型,如式(8)所示

$$\begin{cases} \max s(x) = -\int p(x) \ln p(x) dx \\ \text{s.t. } \int \varphi_r(x) p(x) dx = C_r \end{cases} \quad (8)$$

式中: $s(x)$ 为随机变量的熵; C_r 为约束条件。

在式(8)中引入拉格朗日算子 a_r 进行求解,可得最大熵解的归一化形式如式(9)所示

$$p(x) = \frac{e^{\sum_r a_r \varphi_r(x)}}{\int e^{\sum_r a_r \varphi_r(x)} dx} \quad (9)$$

然后对式(9)取 $\varphi(x) = h(x)$ 代入式(8),并根据式(7)和式(9)得到修正因子 $\beta_r = r a_r / \lambda_r$,最终可得求解模型如式(10)所示

$$\begin{cases} \max s(x) = -\int p'(a_r, x) \ln p'(a_r, x) dx \\ \text{s.t. } \int h_r(x) p'(a_r, x) dx = C_r \end{cases} \quad (10)$$

式中: $C_r = \int h_r(x) p(x) dx$ 可由已知的各阶矩求得,拉格朗日算子 a_r 可用牛顿法迭代求得。从而可进一步求得式(7)中的修正因子,得到改进后的 C 型 Gram-Charlier 级数展开式。

2 配电网风光储综合规划模型

考虑投资成本、运维成本、减碳收益、售电收益、减少向上级购电收益、电压改善效果,以综合效益最大为目标,建立考虑无功补偿装置的风光储综合规划模型。

2.1 目标函数

以综合效益最大为目标,目标函数 f 可表示如下

$$f = C_{\text{sal}} + C_g + C_b + \omega C_v - C_{\text{tz}} - C_{\text{om}} \quad (11)$$

式中: ω 为电压质量转换因子,取决于配电系统对电压质量的要求,本文取 20; C_{tz} 、 C_{om} 分别为投资成本、运维成本; C_{sal} 、 C_g 、 C_b 、 C_v 分别为售电收益、减碳收益、减少向上级购电收益和电压改善收益,具体表示如下。

(1) 投资成本

$$\begin{aligned} C_{\text{tz}} = & A(r, l_1) \sum_{i=1}^{N_{\text{DWG}}} c_{\text{inv}}^{\text{DWG}} P_{i,\text{DWG}} + A(r, l_2) \sum_{j=1}^{N_{\text{PV}}} c_{\text{inv}}^{\text{PV}} P_{j,\text{PV}} + \\ & A(r, l_3) \sum_{k=1}^{N_{\text{ES}}} (c_{\text{inv}}^E E_k + c_{\text{inv}}^P P_{k,\text{ES}}) + A(r, l_4) \sum_{r=1}^{N_{\text{CB}}} c_{\text{inv}}^{\text{CB}} Q_{r,\text{CB}} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $A(r, l)$ 为等额支付现金折算系数; r 为折现率,

本文取 0.1; N_{DWG} 、 N_{PV} 、 N_{ES} 、 N_{CB} 分别为风机、光伏、储能和 CB 安装节点数; $P_{i,\text{DWG}}$ 、 $P_{j,\text{PV}}$ 、 $Q_{r,\text{CB}}$ 分别为节点处安装风机、光伏和 CB 容量; $E_{k,\text{ES}}$ 、 $P_{k,\text{ES}}$ 分别为节点处储能容量和功率配置; $c_{\text{inv}}^{\text{DWG}}$ 、 $c_{\text{inv}}^{\text{PV}}$ 、 $c_{\text{inv}}^{\text{CB}}$ 分别为风机、光伏和 CB 单位功率成本; c_{inv}^E 、 c_{inv}^P 分别为储能单位容量、功率成本。

(2) 运维成本

$$\begin{aligned} C_{\text{om}} = & A(r, T_1) c_{\text{om}}^{\text{DWG}} \sum_{i=1}^{N_{\text{DWG}}} E_i^{\text{DWG}} + A(r, T_2) c_{\text{om}}^{\text{PV}} \sum_{j=1}^{N_{\text{PV}}} E_j^{\text{PV}} + \\ & A(r, T_3) c_{\text{om}}^E \sum_{k=1}^{N_{\text{ES}}} E_k^{\text{ES}} + F(r, T_4) C_{\text{om}}^P \sum_{r=1}^{N_{\text{ES}}} P_{r,\text{b}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $F(r, T) = (1+r)^{-T}$ 为 1 次支付折现率; $c_{\text{om}}^{\text{DWG}}$ 、 $c_{\text{om}}^{\text{PV}}$ 分别为风机和光伏单位发电运维成本; c_{om}^E 、 c_{om}^P 分别为储能单位、发电成本和单位功率运维成本; E_i^{DWG} 、 E_i^{PV} 分别为 i 节点风机和光伏的发电量; E_k^{ES} 为 k 节点储能充放电量。

(3) 售电收益

$$C_{\text{sal}} = c_t \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{DWG}}} E_i^{\text{DWG}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{PV}}} E_j^{\text{PV}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{ES}}} E_k^{\text{ES}} \right) \quad (14)$$

式中: c_t 为 t 时段电价。

(4) 减碳收益

$$C_g = c_g c_s \sum_{t=1}^{24} \Delta E_{g,t} \quad (15)$$

式中: c_g 为碳排放单价; c_s 为碳排放转换因子; $\Delta E_{g,t}$ 为 t 时段减少火电厂发电量。

(5) 减少向上级购电收益

$$C_b = c_t \sum_{l=1}^{24} \left(P_{\text{L},t}^{\max} - \sum_{i=1}^{N_{\text{DWG}}} P_{i,t}^{\text{DWG}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} P_{i,t}^{\text{PV}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{ES}}} P_{i,t}^{\text{ES}} - \sum_{l=1}^{N_l} \Delta P_{l,t} \right) \quad (16)$$

式中: $P_{\text{L},t}^{\max}$ 为 t 时段最大负荷; $P_{i,t}^{\text{DWG}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ES}}$ 分别为 i 、 j 节点在 t 时段的出力; $\Delta P_{l,t}$ 为支路 l 的网损改善。

(6) 电压改善收益

$$C_v = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^N \left(\frac{V_i - V_{i,t}}{V_{i,\max} - V_{i,\min}} \right)^2 \quad (17)$$

式中: N 为节点数; V_i 、 $V_{i,t}$ 分别为 i 节点电压标幺值和基准值,取 $V_{i,t} = 1$; $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 分别为 i 节点电压允许范围上下界,本文取 1.05 和 0.95。

2.2 约束条件

(1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_{i,\text{DG}} + P_{i,\text{ES}} - P_{i,\text{L}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \varphi_{ij} + B_{ij} \sin \varphi_{ij}) \\ Q_{i,\text{DG}} + Q_{i,\text{ES}} - Q_{i,\text{L}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \varphi_{ij} - B_{ij} \cos \varphi_{ij}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{i,\text{DG}}$ 、 $Q_{i,\text{DG}}$ 分别为 i 节点分布式电源有功功率

和无功功率; $P_{i,ES}$ 、 $Q_{i,ES}$ 分别为 i 节点储能有功功率和无功功率,且发出功率为正方向; $P_{i,L}$ 、 $Q_{i,L}$ 分别为 i 节点负荷有功功率和无功功率; $Q_{i,C}$ 为 i 节点CB无功功率; G 、 B 分别为导纳矩阵的实部和虚部; φ_{ij} 为 i 节点和 j 节点间电压相角差。

(2) 分布式电源可安装容量约束、运行约束及消纳约束,如式(19)、式(20)、式(21)所示

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,DWG} \leq P_{i,DWG}^{\max} & i=1,2,\cdots,N_{DWG} \\ 0 \leq P_{j,PV} \leq P_{j,PV}^{\max} & j=1,2,\cdots,N_{PV} \end{cases} \quad (19)$$

$$P_{DG,min} \leq P_{DG}(t) \leq P_{DG,max} \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DWG}} P_{i,DWG} + \sum_{j=1}^{N_{PV}} P_{j,PV} \leq \rho P_L^{\max} \quad (21)$$

式中: $P_{i,DWG}^{\max}$ 为 i 节点最大可安装的DWG容量; $P_{j,PV}^{\max}$ 为 j 节点最大可安装的PV容量; ρ 为配电网可接纳分布式电源比例系数,本文取60%; P_L^{\max} 为系统总负荷。

(3) 储能安装容量约束及运行约束,如式(22)、式(23)所示

$$0 \leq E_{k,ES} \leq E_{k,ES}^{\max} \quad k=1,2,\cdots,N_{ES} \quad (22)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch}^{\max} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis}^{\max} \\ E_{ES}^{\min} \leq E(t) \leq E_{ES}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $E_{k,ES}^{\max}$ 为 k 节点储能最大可安装容量; P_{ch}^{\max} 、 P_{dis}^{\max} 分别为充放电功率约束; E_{ES}^{\max} 、 E_{ES}^{\min} 分别为储能运行过程中能量状态的上限和下限。

(4) 电容器安装容量约束及投切约束,如式(24)、式(25)所示

$$0 \leq Q_{r,CB} \leq E_{r,CB}^{\max} \quad r=1,2,\cdots,N_{CB} \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |Q_{CB,i}^t - Q_{CB,i}^{t-1}| \leq M_i \quad i \in N_{CB} \quad (25)$$

式中: $E_{r,CB}^{\max}$ 为最大可安装CB容量; $Q_{CB,i}^t$ 为 t 时段电容器组无功补偿容量(组数); M_i 为第 i 个电容器组日最大投切次数; N_{CB} 为电容器安装节点数。

(5) 节点电压和支路潮流置信度约束,如式(26)、式(27)所示

$$P\{V_{\min}^i \leq V^i \leq V_{\max}^i\} \geq \lambda_i \quad (26)$$

$$P\{|P_l| \leq P_l^{\max}\} \geq \omega_l \quad (27)$$

式中: λ_i 为 i 节点电压不越限概率,取0.99; P_l^{\max} 为 l 支路可传输功率极限; ω_l 为 l 支路功率不越限概率,取0.99。

3 基于CPA算法的CA算法求解流程

CPA 算法^[21]模拟食肉植物吸引、诱捕、消化和繁殖过程求解模型,具有分散搜索、集中决策特点,相较GA、粒子群优化算法(particle swarm optimization,

PSO)等算法,在收敛速度和全局寻优等方面具备优势。考虑到本文规划模型涉及分布式电源、储能和CB主体,且待安装节点较多,使得存在众多规划方案,为了提高求解速度和收敛精度,提出一种基于CPA算法的CA算法求解方法。该算法融合CA算法的求解思路,将多主体综合规划模型分为分布式电源、储能和CB子规划模型并采用CPA算法对每个子规划问题进行求解,提高了收敛速度和收敛精度。基于CPA算法的CA算法求解框架如图1所示。

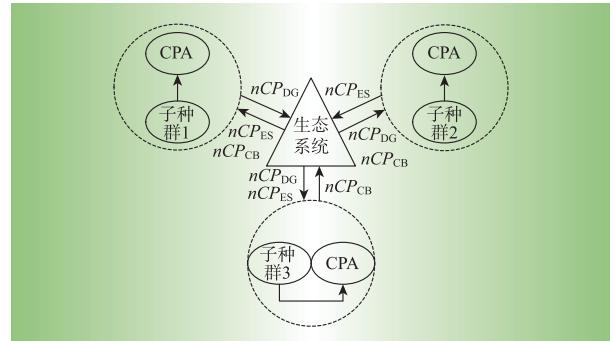


图1 基于CPA的CA算法求解框架

Fig. 1 CA algorithm solving framework based on CPA

分布式电源、储能和CB对应的CPA算法种群分别为子种群1、子种群2、子种群3,当某一子种群进化时,结合其他两个子种群中综合效益最大的前 N 个体获取该子种群的综合效益,并基于CPA算法进行优化,该子种群完成进化后,综合效益最大的前 N 个个体又可供其他子种群参考,使生态系统中各子种群均朝着最优解进化。

(1) 考虑地理位置和各节点风、光资源情况,初步筛选待安装分布式电源节点,然后确定个体长度 $n_{DG} = n_{DWG} + n_{PV}$, n_{DWG} 、 n_{PV} 为初步筛选的待安装DWG和PV节点个数。储能和CB类似,记为 n_{ES} 、 n_{CB} 。

(2) 随机初始化种群并求得种群综合效益,按从大到小降序排列,以子种群1为1例将前 nCP_{DG} 个个体作为食肉植物,其余作为猎物,记为 nP_{DG}^{rey} ,取 nP_{DG}^{rey} 为 nCP_{DG} 整数倍,根据综合效益大小将一级猎物分配给一级食肉植物,二级猎物分配给二级食肉植物,以此类推,直至所有猎物分配完毕。值得注意的是,在求解过程中,由于涉及到相关约束,以罚函数的形式将其纳入目标函数进行求解。

(3) 为使各子种群能够充分利用信息,以子种群1为例,将子种群2、子种群3食肉植物放入生态系统,子种群1结合 nCP_{ES} 和 nCP_{CB} 完成进化,然后将 nCP_{DG} 放入生态系统,实现最优信息共享。

(4) 为了使食肉植物算法优化集中于最优参数集合,减小计算成本,只对综合效益值最大的食肉植物进行繁衍。

(5) 繁衍后种群按综合效益降序排列,各子种群将前 nCP_{DG} 、 nCP_{ES} 和 nCP_{CB} 个综合效益值对应的个体作为新种群,然后返回步骤(1),重复以上过程直至收敛。

考虑到分布式电源、储能和CB安装容量为整数值,在优化过程中进行整数约束处理。基于CPA算法的CA算法求解流程如图2所示。

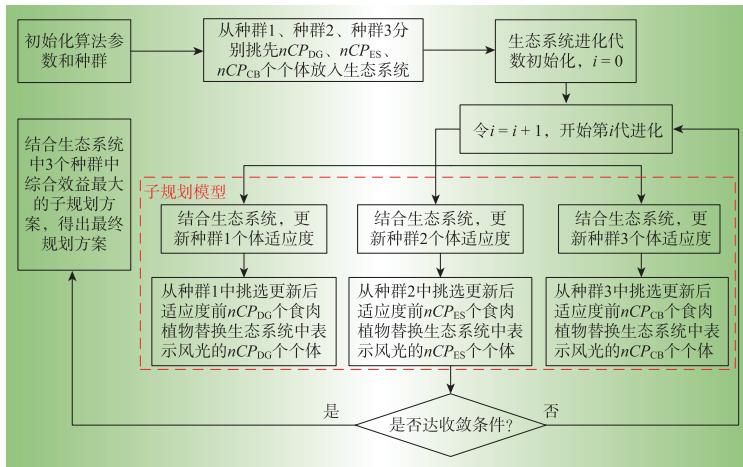


图2 基于CPA算法的CA算法求解流程

Fig. 2 CA algorithm solution flow based on CPA algorithm

4 仿真与分析

以IEEE33节点标准算例为例进行仿真验证,配电网接线如图3所示。0号节点为平衡节点,假设其70%功率由火电厂提供。

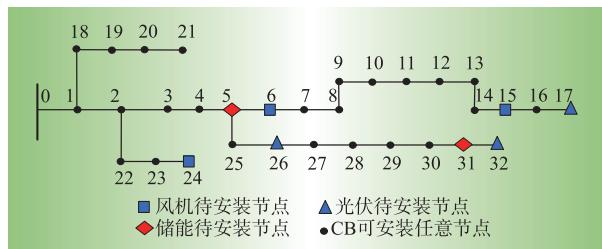


图3 IEEE 33 节点配电网接线

Fig. 3 Wiring of the distribution network of IEEE 33 nodes

4.1 算例系统参数

待选节点及风光储参数:各节点负荷和风光参数如附图1—附图3所示。根据地形、风、光资源和储能接入不同节点对配电网电压和网损影响等,初步筛选风机待安装节点为{6, 15, 24}、光伏待安装节点为{17, 26, 32}、储能待安装节点为{5, 31}、CB待安装节点为0-32。风机的相关参数为 $v_{ei} = 3.5 \text{ m/s}$ 、 $v_{ei} = 3.5 \text{ m/s}$ 、 $v_{eo} = 20 \text{ m/s}$,光伏的相关参数为 $A_i = 2.16$ 、 $\lambda_i = 13.44\%$ 。风机、光伏单位容量为 50 kW, 节点安装上限为 5; 储能单位容量为 5 kW, 节点安装上限为 100, 充放电效率为 85%;CB单位

容量为 10 kVAR, 节点安装上限为 20。

经济参数:风机、光伏和CB单位功率成本为 10 000 元/kW、13 000 元/kW、110 元/kW;风机、光伏单位发电运维成本为 0.04 元/kWh、0.1 元/kWh;储能单位容量、功率成本为 9 300 元/kW、9 300 元/kWh;储能单位发电和单位功率运维成本为 0.0141 元/kWh、62 元/kW;碳排放单价为 59 元/t;碳排放转换因子为 0.866 t/kWh。

4.2 CPA-CA 算法性能分析

为验证本文算法在收敛速度和全局寻优方面的优势,基于综合规划模型,将本文算法与GA和PSO进行对比,参数设置如表1所示。各种算法的求解结果统计如表2所示,收敛过程如图4所示。

表1 优化算法仿真参数

Table 1 Optimization algorithm simulation parameters

算法参数	GA	PSO	CPA
进化代数/代	100	100	100
种群大小/个	60	60	60
食肉植物/个			20
猎物/个			40

表2 各算法求解性能对比

Table 2 Comparison of the solution performance of the algorithms

对比项	GA	PSO	CPA	CPA-CA
综合效益/万元	108.866 4	106.833 2	113.728 1	113.728 1
收敛次数/次	74	65	54	29

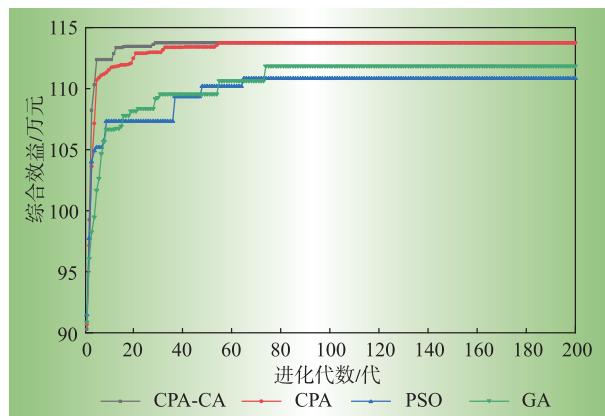


图4 不同算法寻优对比

Fig. 4 Optimization comparison of different algorithms

由图4可知,相比于GA和PSO,CPA能够以较少的迭代次数收敛于适应度较高的解,CPA-CA则在收敛速度上进一步提高。从数量的角度分析,GA、PSO、CPA迭代到74、65和54代才趋于稳定,且GA、PSO收敛最优解分别为111.866 4和110.833 2;而本文算法迭代至29代时基本趋于稳定,收敛最优解为113.728 1。分析其原因在于:本文算法在求解

过程中将综合规划问题分解为信息共享的3个子规划问题,降低了数据维数,提升了收敛速度;子问题求解过程中,进行种群分组时将规划方案按个体综合效益排名分为若干子组,每个子组在不同方向搜索新的区域,且共享信息,增强了全局搜索能力;子组以综合效益高的规划方案更新种群,使各子组中最优规划方案能有效利用搜索空间。验证了本文算法的有效性和高效性。

4.3 考虑无功补偿装置的风光储综合规划结果分析

本文设置3种方案进行验证。方案1不考虑分布式电源出力和负荷不确定性,不考虑CB;方案2考虑分布式电源和负荷不确定性,不考虑CB;方案3为本文模型,求解所得规划结果如表3所示。

表3 不同方案下优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results under different schemes

配置方案/等年值	方案1	方案2	方案3
投资成本/万元	372.224 3	379.478 4	248.285 4
运维成本/万元	59.058 4	56.629 4	34.749 8
售电收益/万元	309.336 2	297.395 6	229.381 1
减排收益/万元	45.622 8	51.373 2	40.075 1
减少向上级电网购电收益/万元	144.662 8	148.857 8	106.467 1
电压改善/p.u.	1.035 0	1.032 0	1.042 0

由表3可知,考虑了不确定影响后,尽管方案2规划的风光容量略小于方案1,但需配置的储能容量更大,以应对其出力不确定性,使投资成本增加,整体收益略低于方案1。而方案3进一步考虑了CB后,由于CB的低成本和具备局部无功平衡能力,减小了投资成本和网络损耗,其综合收益大于方案1和方案2,且整体电压改善效果最好。

由表4可知,方案1和方案2下的风光规划结果趋于安装在配电网末端,分析其原因有两方面,一是功率流传输过程中产生网损,降低了经济性;二是产生了压降,使靠近末端节点电压质量难以保障,且在重负荷节点附近下降较严重,而分布式电源的接入对此有改善作用。

相比于方案1,方案2考虑分布式电源和负荷不确定性影响,因此需要配置更大容量储能以满足节点电压要求。在此基础上,方案3也即本文方案进一步考虑CB无功补偿后,分布式电源安装数量和储能安装容量要小于方案1和方案2,分析其原因在于CB可提供无功,提高配电系统电压水平,无需在多个节点安装风光来满足节点电压约束。

方案2、方案3求解的规划方案下节点电压水平及越限概率如图5和图6所示。

表4 不同方案下规划结果

Table 4 Planning results under different schemes

方案	规划结果
方案1	分布式电源:6(3)、15(1)、24(4)、17(4)、26(2)、32(4) 储能:5(64)、31(36)
方案2	分布式电源:6(3)、24(5)、17(4)、26(1)、32(3) 储能:5(84)、31(47)
	分布式电源:6(2)、24(2)、17(3)、26(1)、32(3) 储能:5(46)、31(30)
方案3	CB:2(2)、3(1)、4(2)、5(4)、6(15)、7(13)、8(3)、9(3)、10(5)、11(6)、13(7)、14(5)、15(6)、16(10)、17(18)、21(13)、23(16)、25(19)、26(2)、27(18)、28(19)、29(20)、23(19)、31(20)、32(18)

注:24(5)为节点24安装5台分布式电源,以此类推。

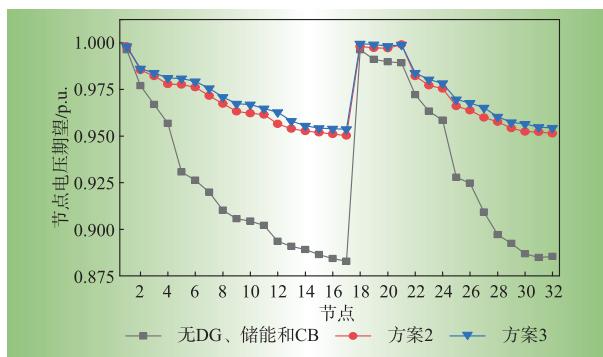


图5 不同规划方案下节点电压期望

Fig. 5 Node voltage expectation under different planning schemes

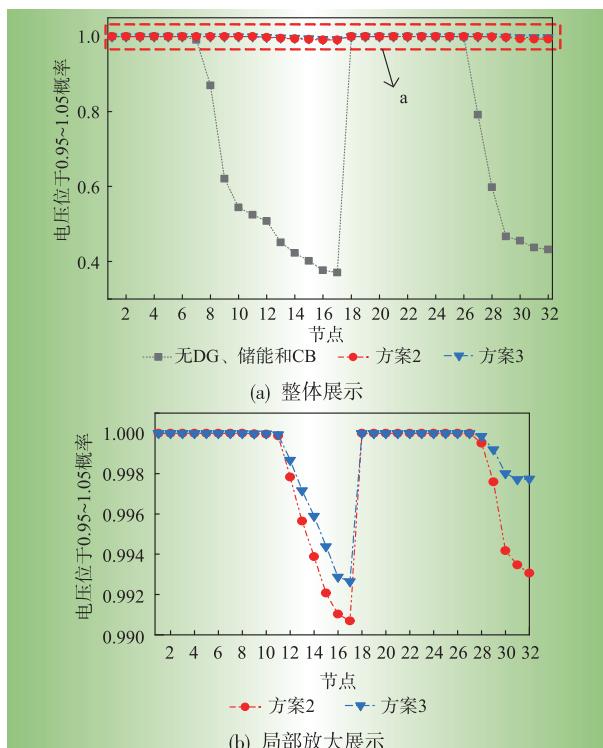


图6 不同规划方案下节点电压位于0.95~1.05概率

Fig. 6 Probability of node voltage between 0.95 to 1.05 under different planning schemes

由图5可知,方案2和方案3所得规划方案均能使配电网整体电压水平得到提升。但相比于方案2,由于CB能够提供无功支撑,提升局部电压水平,因此,方案3对分布式电源、储能和CB综合规划后的整体电压水平改善效果得到进一步提升。

由图6可知,方案3对分布式电源、储能和CB综合规划后各节点电压处于0.95~1.05范围内的概率均大于方案2。其节点电压处于0.95~1.05之间的概率最小值为0.992 6,而方案2节点电压处于0.95~1.05之间的概率最小值为0.990 6。典型日不同方案下最大电压偏移和网损如图7所示。

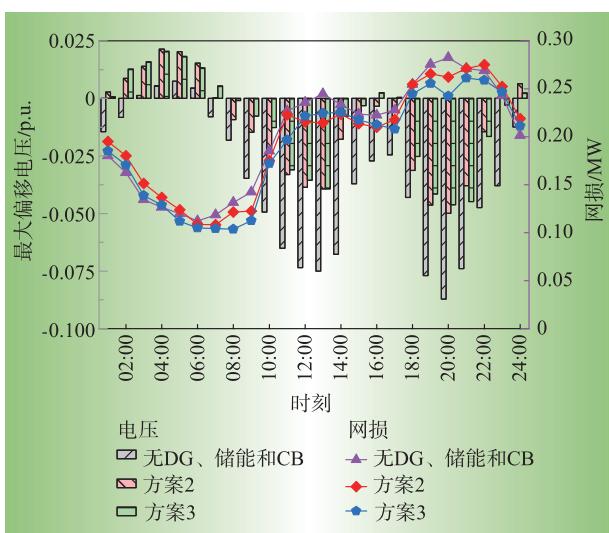


图7 典型日最大电压偏移和网损

Fig. 7 Typical daily maximal voltage offset and network loss

如图7所示为不同方案下最大电压偏移和网损,方案2对风光和储能进行规划后,改善了配电网整体电压水平和网络损耗,而方案3进一步考虑CB后,其局部无功支撑能力减小了配电网无功流动,进一步提升了整体电压水平和网损改善水平。

进一步的,在IEEE69节点算例验证了本文算法的适用性,分析如附录B。

附录见本刊网络版(<http://dsm.ijournals.cn/>)

5 结束语

本文在考虑分布式电源和负荷不确定性的基础上,构建了考虑无功补偿装置的配电网风光储综合规划模型,并提出CPA-CA算法进行求解。基于IEEE33节点仿真算例表明,本文综合规划模型可在满足配电网运行约束的前提下给出最优规划方案;所提算法提高了模型求解的收敛速度和寻优精度,相比与GA、PSO和CPA算法,本文算法的收敛速度分别从74、65、54次减小到了29次,且相比于GA、

PSO算法,寻优精度从108.866 4万元、106.833 2万元提升到了113.728 1万元。基于IEEE69节点仿真算例表明本文算法具有较好的普适性。D

参考文献:

- [1] 杨力俊,潘伟,田闻旭.计及需求响应和风光不确定性的微电网多目标优化模型[J].电力需求侧管理,2022,24(3):1-8.
YANG Lijun, PAN Wei, TIAN Wenxu. Multi-objective optimization model of microgrid considering demand response and uncertainty of wind power and photovoltaic[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(3):1-8.
- [2] 刁涵彬,李培强,王继飞,等.考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J].电工技术学报,2020,35(21):4 532-4 543.
DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21):4 532-4 543.
- [3] 张琦,陈谦,周聪,等.基于机会约束的含分布式电源配电网网损优化[J].供用电,2020,37(12):8-15,30.
ZHANG Qi, CHEN Qian, ZHOU Cong, et al. Loss optimization of distribution network with distributed power source based on chance constraint [J]. Power Supply and Electricity, 2020, 37(12):8-15, 30.
- [4] 杨晓雷,丁磊明,李逸鸿,等.计及风电不确定性的混合储能系统优化配置研究[J].电力需求侧管理,2021,23(6):69-74.
YANG Xiaolei, DING Leiming, LI Yihong, et al. Configuration optimization of wind-solar-storage system in microgrid based on GSA[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(6):69-74.
- [5] CROSSLAND A F, JONES D, WADE N S. Planning the location and rating of distributed energy storage in LV networks using a genetic algorithm with simulated annealing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 59:103-110.
- [6] 毛志宇,蒋叶,李培强,等.基于改进灰狼算法的配电网储能优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(6):1-8.
MAO Zhiyu, JIANG Ye, LI Peiqiang, et al. Optimal configuration of energy storage in distribution network based on improved gray wolf algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(6):1-8.
- [7] 李亮,唐巍,白牧可,等.考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2013,37(3):58-63,128.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics [J]. Automation of Elec-

- tric Power Systems, 2013, 37(3):58–63, 128.
- [8] 刘文霞,徐慧婷.考虑电压控制成本的分布式电源优化配置[J].电网技术,2016,40(10):2 998–3 005.
LIU Wenxia, XU Huiting. Optimal distributed generator allocation method considering voltage control cost [J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2 998–3 005.
- [9] 卢锦玲,赵大千,任惠,等.考虑储能和无功补偿的主动配电网分布式电源规划[J].现代电力,2017,34(4):59–64.
LU Jinling, ZHAO Daqian, REN Hui, et al. Distributed generation planning for active distribution network by considering energy storage and reactive power compensation[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4):59–64.
- [10] TOLABI H B, ARA A L, HOSSEINI R. A new thief and police algorithm and its application in simultaneous reconfiguration with optimal allocation of capacitor and distributed generation units [J]. Energy, 2020, 203:117 911.
- [11] 李振坤,李一骄,张代红,等.储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J].电网技术,2018,42(11):3 676–3 683.
LI Zhenkun, LI Yijiao, ZHANG Daihong, et al. Influence analysis of energy storage device on reliability of distribution network and its optimal allocation [J]. Power System Technology, 2018, 42(11):3 676–3 683.
- [12] 窦晓波,袁简,吴在军,等.并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J].电力自动化设备,2016,36(3):26–32.
DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):26–32.
- [13] 孙乾,许珊,朱姝豫,等.考虑DG时序特性及EV时空特性的配电网规划[J].电力自动化设备,2020,40(10):30–38.
SUN Qian, XU Shan, ZHU Shuyu, et al. Distribution network planning considering DG timing characteristics and EV spatiotemporal characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10):30–38.
- [14] 刘向实,王凌纤,吴炎彬,等.计及配电网运行风险的分布式电源选址定容规划[J].电工技术学报,2019,34(S1):264–271.
LIU Xiangshi, WANG Lingxian, WU Yanbin, et al. Locating and sizing planning of distributed generation power supply considering the operational risk cost of distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1):264–271.
- [15] 陈朝宽,张靖,何宇,等.基于Cornish-Fisher级数和半不变量法的含光伏配电系统风险评估[J].电力自动化设备,2021,41(2):91–96.
CHEN Chaokuan, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Risk assessment of distribution system with photovoltaic based on Cornish-Fisher series and cumulant method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2):91–96.
- [16] 曹瑞琳,邢洁,李征.基于改进级数展开的含风电电力系统概率潮流计算方法[J].电网技术,2022,46(9):3 447–3 455.
CAO Ruilin, XING Jie, LI Zheng. Improved series expansion based probabilistic load flow calculation for power system with wind power [J]. Power System Technology, 2022, 46(9):3 447–3 455.
- [17] 朱星阳,刘文霞,张建华.考虑大规模风电并网的电力系统随机潮流[J].中国电机工程学报,2013,33(7):77–85.
ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua. Probabilistic load flow method considering large-scale wind power integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7):77–85.
- [18] 廖剑波,陈波,陈垣玮,等.计及不确定性的主动配电网电压越限风险评估及预控[J].电器与能效管理技术,2022(2):74–82.
LIAO Jianbo, CHEN Bo, CHEN Yuanwei, et al. Voltage violation risk assessment and precontrol in active distribution network considering uncertainty [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2):74–82.
- [19] 曹振其,彭敏放,沈美娥.考虑源荷不确定性的分布式电源选址定容[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(2):59–65.
CAO Zhenqi, PENG Minfang, SHEN Meie. Siting and sizing of distributed generations considering uncertainties in source and load [J]. Proceedings of the CSU-EP-SCA, 2021, 33(2):59–65.
- [20] 邓威,李欣然,李培强,等.基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J].电工技术学报,2013,28(6):216–225.
DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6):216–225.
- [21] 刘佳玲,秦博宇,孙颖,等.面向清洁低碳转型的隧道智慧能源系统框架设计及储能容量优化配置[J].高电压技术,2022,48(7):2 563–2 572.
LIU Jialing, QIN Boyu, SUN Ying, et al. Framework design of tunnel intelligent power system and optimal planning method of energy storage capacity for low carbon transition [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7):2 563–2 572.

作者简介:

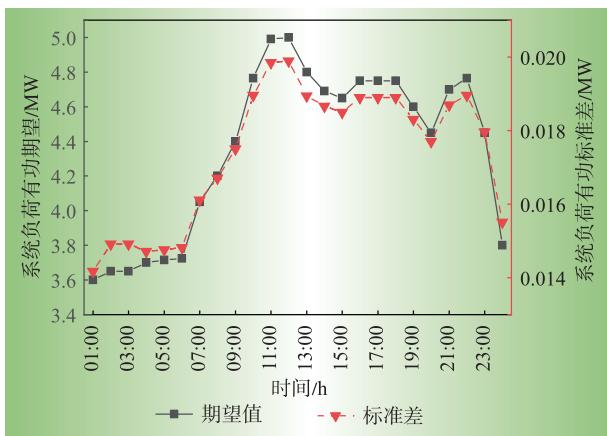
王丹(1980),女,湖北十堰人,学士,高级经济师,研究方向为综合计划、电网投资;

杨俊涛(1988),男,河南平顶山人,学士,高级工程师,研究方向为项目技术经济分析;

曾燕(1988),女,湖北十堰人,硕士,工程师,研究方向为含高比例可再生能源的配电网规划。

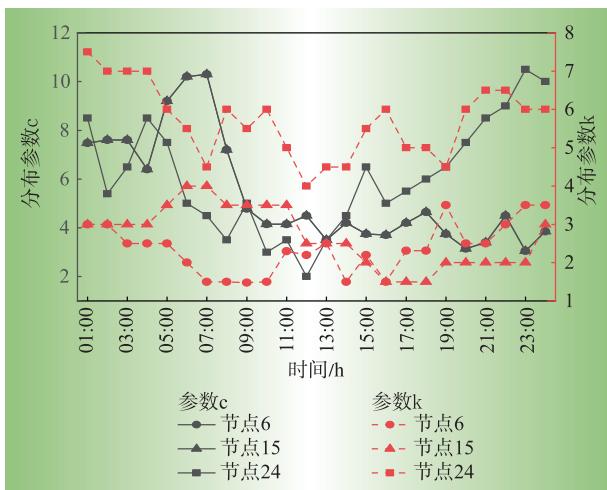
(责任编辑 于丽芳)

附录 A:



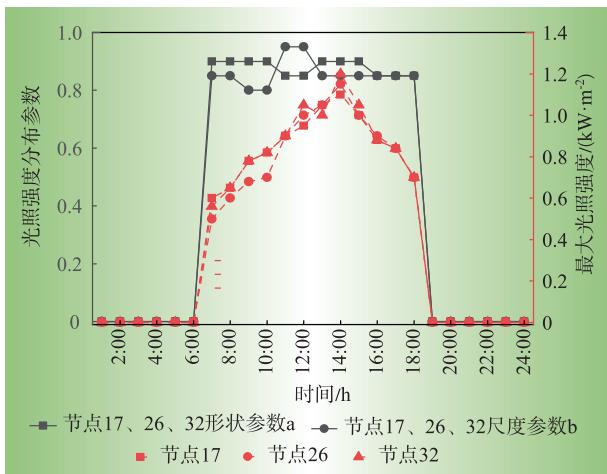
附图1 典型日各时段负荷有功参数

Appendix Fig. 1 Load active power parameters in each period of typical day



附图2 风机待安装节点风速参数

Appendix Fig. 2 Wind speed parameters of the fan node to be installed



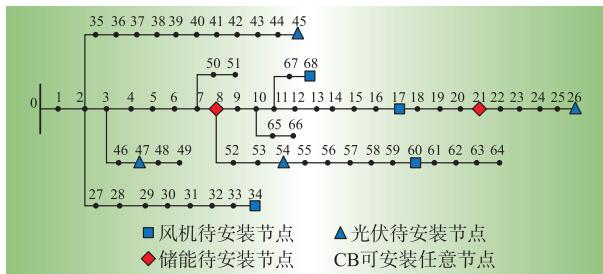
附图3 光伏待安装节点光照参数

Appendix Fig. 3 Illumination parameters of photovoltaic nodes to be installed

附录 B:

CPA-CA 算法普适性验证

以 IEEE69 节点模型为算例进一步验证本文算法的普适性,配电网结构如附图4所示。



附图4 IEEE 69 节点接线

Appendix Fig. 4 Wiring of IEEE 69 nodes

设根据地理位置和风速、光照强度等因素初步筛选后的风光、储能和CB待安装节点和可安装容量上限如附表1所示。

附表1 分布式电源、储能和CB待安装节点和容量

Appendix Table 1 Nodes and capacity of distributed power and compensation capacitor to be installed

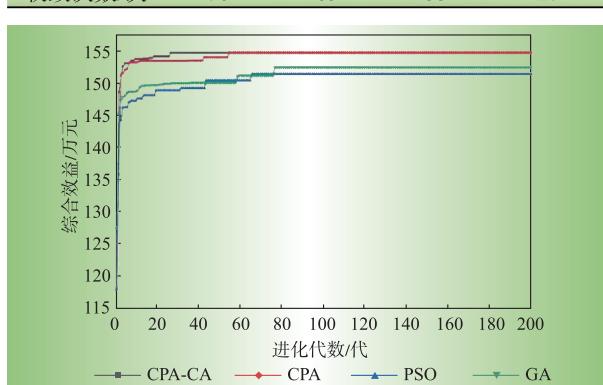
安装量	风机	光伏	储能	CB
待安装节点	17, 34、 60, 68	26, 45、 47, 54	8, 21	1-68
单台容量/最大安装台数	50 kW/5	50 kW/5	5 kW/100	10 kVAR/20

基于方案3综合规划模型,采用CPA-CA、CPA、PSO 和GA 分别进行求解,寻优过程和优化结果如附图5和附表2所示。所得规划方案如附表3所示。

附表2 各算法求解性能对比

Appendix Table 2 Optimization algorithm simulation parameters

对比项	GA	PSO	CPA	CPA-CA
综合效益/万元	150.603 8	148.526 4	154.345 3	154.345 3
收敛次数/次	76	65	55	27



附图5 不同算法寻优对比

Appendix Fig. 5 Optimization comparison of different algorithms

由附图5可知,尽管配电网规模增大,但应用本文算法求解综合规划模型时,由于将规划模型划分为三个信息共享的子规划模型,对每个子规划问题采用CPA算法分散搜索、集中寻优的思路求解,增强了全局搜索能力,使该算法仍具有较好的收敛速度和收敛精度,说明本文算法具有较好的普适性。

附表3 分布式电源、储能和CB规划方案

Appendix Table 3 Planning of distributed power, batteries, and CB

规划方案	
分布式电源	17(2)、34(3)、60(4)、68(2)、26(5)、45(3)、47(1)、54(2)
储能	8(46)、21(30)
CB	2(1)、3(3)、4(2)、5(4)、7(8)、8(3)、10(5)、11(6)、13(7)、14(5)、15(6)、16(10)、20(8)、21(4)、22(10)、23(8)、25(15)、26(18)、27(11)、28(9)、30(9)、31(10)、32(15)、33(20)、34(18)、36(3)、37(8)、38(8)、39(4)、40(12)、41(13)、42(10)、43(15)、44(18)、45(20)、46(13)、47(8)、48(16)、49(18)、50(10)、51(16)、52(6)、53(3)、54(6)、55(17)、56(18)、57(10)、58(18)、59(14)、60(15)、61(12)、62(14)、63(16)、64(18)、65(13)、66(18)、67(15)、68(18)