

考虑碳交易和无功补偿的分布式电源优化配置

孙健浩, 初壮*

(东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Optimal Configuration of Distributed Generation Considering Carbon Trading and Reactive Power Compensation

SUN Jianhao, CHU Zhuang*

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

摘要:“双碳”背景下,在规划分布式电源时引入碳交易和无功补偿机制是实现电力系统低碳化、稳定化的重要手段。为此,提出一种考虑碳交易和无功补偿的分布式电源优化配置方法。首先,引入碳交易机制,建立碳交易成本计算模型。其次,建立考虑碳交易和无功补偿的分布式电源双层优化配置模型,上层以年综合成本为优化目标,决策变量为光伏和燃气轮机接入配电网中的位置及容量;下层以系统网损、电压偏移量、节点电压稳定裕度为优化目标,决策变量为无功补偿电容器在配电网中的位置和容量。最后,通过改进的自适应遗传算法对优化配置模型进行求解。结合IEEE33节点构造的算例进行仿真分析,结果表明,该模型可在保证系统经济性和环保性的基础上有效降低网损,并提高系统电压的稳定性。

关键词:碳交易机制;无功补偿;分布式电源;自适应遗传算法;优化配置

ABSTRACT: Under the background of “double carbon”, the introduction of carbon trading and reactive power compensation mechanism in the planning of distributed generation is an important means to realize the low-carbon and stability of power system. Therefore, a optimal configuration method of distributed generation considering carbon trading and reactive power compensation was proposed. Firstly, the carbon trading mechanism was introduced to establish the calculation model of carbon trading cost. Then, a two-tier optimal configuration model of distributed generation considering carbon trading and reactive power compensation was established. The upper layer took the annual comprehensive cost as the optimization objective, and the decision variables were the location and capacity of

photovoltaic and gas turbine connected to the distribution network. The lower layer took the system network loss, voltage offset and node voltage stability as the optimization objectives. The decision variables were the location and capacity of the reactive power compensation capacitor in the distribution network. Finally, the optimal configuration model was solved by the improved adaptive genetic algorithm. Combined with the example of IEEE33 node structure, the simulation analysis was carried out. The results show that the model can effectively reduce the loss of network and improve the stability of system voltage on the basis of ensuring the economy and environmental protection of the system.

KEY WORDS: carbon trading mechanism; reactive power compensation; distributed generation; adaptive genetic algorithm; optimal configuration

0 引言

近年来,分布式电源(distributed generation, DG)由于具有节能环保、能源利用率高、配置灵活等特点,得到了迅速发展,成为我国发展智能电网重要的组成部分^[1-4]。为了响应“碳达峰、碳中和”战略目标,同时减少DG并网给系统带来的不利影响,通过碳交易和无功补偿等机制引导电力行业进行DG的优化配置,被认为是促进可持续发展的重要举措。合理的DG优化配置是保障电力系统运行灵活性、可靠性、安全性的前提^[5]。因此,有必要在DG的优化配置中引入碳交易和无功补偿等机制。

目前,针对DG优化配置问题,国内外学者已经开展了多方面的研究。文献[6]以无功损耗和电压偏移最小化为目标,采用灰狼算法对配电网

基金项目:国家自然科学基金项目(51977030)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51977030).

中的DG进行选址定容。文献[7]基于两阶段优化模型,考虑供电可靠性,从而对区域的风储电站进行规划。文献[8-9]考虑网损和电压稳定性2个目标,提出了一种DG优化配置方法,从而增强系统的带载能力及可靠性。通过以上分析可知,目前多数研究仅考虑配电网中DG的优化配置,并未考虑无功补偿。然而无功补偿是电力系统中电能质量的重要保障手段之一,对系统中的无功源进行合理配置,有利于提高节点电压水平、降低系统网损,使系统安全稳定运行^[10]。文献[11]在DG选址定容的问题上考虑了无功优化,并分析对比了DG满出力与零出力时系统的稳定性与可靠性。文献[12]提出了通过负荷节点电压稳定裕度确定系统中无功补偿点,并以有功网损最小为目标对系统无功源进行合理配置。以上研究虽然考虑了无功补偿给系统带来的影响,却忽略了环境问题。

目前碳交易机制被认为是最有效的碳减排措施之一,即将CO₂排放成本计及电力生产成本中,从而达到节能减排的目的^[13]。文献[14-15]为提高电力系统对光伏发电的接纳能力,将阶梯型碳交易机制引入电力系统经济调度中,提出了一种基于碳交易的复合储能优化调度模型。文献[16]建立了基于碳交易的燃气机组规划模型,以系统综合成本最小为目标进行低碳电源的规划。文献[17]通过搭建碳-绿色证书联合交易市场框架,对综合能源系统进行了日前优化调度。文献[18]将碳交易机制应用于南方电网西电东送电量的优化模型中,为碳交易机制的实际应用提供了参考。

基于以上分析,本文提出了一种考虑碳交易和无功补偿的DG优化配置模型,以规划期内综合成本最小为目标函数,对系统中光伏、燃气轮机及无功补偿装置的位置及容量进行规划,采用改进的自适应遗传算法(genetic algorithm, GA)进行求解。最后,选取IEEE33节点配电系统构造算例,通过仿真分析验证模型的正确性。

1 碳交易机制

1.1 碳交易配额模型

目前,我国的碳交易市场仍处于初期阶段,

碳排放份额往往免费地分配给参与碳交易机制的发电企业^[19]。本文采用碳排放份额与发电量成正比的分配方式,同时认为配电网内的碳排放主要来源于从上级火力发电厂购买的电力。因此,无偿碳排放配额可表示为

$$E_q = \eta \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) + \lambda \sum_{t=1}^T P_{\text{MT}}(t) \quad (1)$$

式中: η 为单位电量无偿碳排放配额; λ 为燃气轮机单位电量无偿碳排放配额; T 为碳交易费用的结算时间,其值为1 a; $P_{\text{grid}}(t)$ 为配电网向上级发电厂购买的电力; $P_{\text{MT}}(t)$ 为燃气轮机年发电量。

1.2 碳排放量计算模型

本文所提到的配电网碳排放量包括2部分:一是由配电网中有功负荷所需电量引起的碳排放;二是由配电网中各支路损耗所引起的碳排放。系统碳排放量可表示为

$$E_p = \delta \left(\sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^{T_{\text{loss}}} P_{\text{loss},k,t} + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T_{\text{max}}} P_{\text{total},i,t} \right) + \mu \sum_{t=1}^{T_{\text{max}}} P_{\text{MT},t} \quad (2)$$

式中: δ 、 μ 分别为外购单位电量、微型燃气轮机的碳排放强度; T_{loss} 为年最大负荷损耗时间; T_{max} 为年最大负荷利用时间; N 为配电系统中支路条数; $P_{\text{loss},k,t}$ 为支路 k 在 t 时刻所损耗的功率; n 为系统中负荷节点数量; $P_{\text{total},i,t}$ 为 t 时刻第 i 个节点负荷功率; $P_{\text{MT},t}$ 为 t 时刻微型燃气轮机释放的电量。

1.3 碳交易成本模型

根据上述碳交易配额模型及碳排放计算模型,当发电企业的实际碳排放小于政府分配的碳排放配额时,可以售卖多余的碳排放权,从而获得收益;反之,发电企业必须购买碳排放权来补偿超出的碳排放量。碳交易成本模型表示如下:

$$f_{\text{CO}_2} = \begin{cases} C_{\text{CO}_2}(E_p - E_q), & E_p > E_q \\ -C_{\text{CO}_2}(E_q - E_p), & E_p \leq E_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_{CO_2} 为碳交易成本, $f_{\text{CO}_2} > 0$ 时,表示系统需要购买碳排放权成本, $f_{\text{CO}_2} < 0$ 时,表示系统出售碳排放权所获利成本; C_{CO_2} 为单位碳交易价格。

2 考虑碳交易和无功补偿的DG双层优化配置模型

本文构建的双层优化配置模型包含2个优化任务:上层为DG的优化配置,以配电网规划周

期内的年等值成本、年运行成本、碳交易成本最低为目标，决策变量为光伏及燃气轮机接入配电网的位置及容量；下层为无功补偿电容器的优化配置，以配电网的网损最低、电压稳定性最高为目标，决策变量为无功补偿电容器的安装位置及容量。上层将DG的优化配置结果传递给下层，下层根据已知DG的信息求解最优配置结果并反馈给上层，通过改进的自适应遗传算法的反复迭代，得到两者的最优配置结果。

2.1 上层优化模型

2.1.1 上层目标函数

上层目标函数的具体表达式如下：

$$F_{\text{total}} = \min(f_{\text{zs}} + f_{\text{yx}} + f_{\text{CO}_2}) \quad (4)$$

$$f_{\text{zs}} = f_{\text{PV}} + f_{\text{MT}} \quad (5)$$

$$f_{\text{PV}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} S_{\text{PV},i} (f_{\text{cr}} C_{\text{PV}} + C_{\text{PVM}}) \quad (6)$$

$$f_{\text{MT}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{MT}}} S_{\text{MT},i} (f_{\text{cr}} C_{\text{MT}} + C_{\text{MTM}}) \quad (7)$$

$$f_{\text{cr}} = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (8)$$

式中： f_{zs} 为DG的年等值投资成本； f_{PV} 和 f_{MT} 分别为光伏和燃气轮机的年等值投资成本； N_{PV} 、 N_{MT} 分别为光伏和燃气轮机的数量； $S_{\text{PV},i}$ 、 $S_{\text{MT},i}$ 分别为第*i*台光伏和燃气轮机的安装容量； f_{cr} 为折旧系数； C_{PV} 、 C_{MT} 分别为单位容量光伏和燃气轮机的投资成本； C_{PVM} 、 C_{MTM} 分别为单位容量光伏和燃气轮机的运行成本； r 为年等值回报率； Y 为规划年限； f_{yx} 为年运行成本，表达式为

$$f_{\text{yx}} = C_{\text{loss}} + C_{\text{pe}} \quad (9)$$

$$C_{\text{loss}} = \gamma T_{\text{loss}} \sum_{k=1}^N P_{\text{loss},k} \quad (10)$$

$$C_{\text{pe}} = \gamma T_{\text{max}} \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{total},i} - \sum_{i=1}^{N_{\text{G}}} P_{\text{DG},i} \right) \quad (11)$$

式中： C_{loss} 为配电网损耗费用； C_{pe} 为负荷电费； γ 为配电网购电的单位电价； N_{G} 为系统中DG的数量； $P_{\text{loss},k}$ 为第*k*条支路的有功损耗； $P_{\text{total},i}$ 为第*i*个节点负荷的有功功率； $P_{\text{DG},i}$ 为第*i*个DG的有功功率。

2.1.2 上层约束条件

1) 功率平衡约束

功率平衡约束条件如下：

$$P_{\text{G},i} + P_{\text{DG},i} - P_{\text{load},i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (12)$$

式中： $P_{\text{G},i}$ 为发电机向节点*i*输入的有功功率； $P_{\text{load},i}$ 为节点*i*的有功负荷； U_i 、 U_j 分别为节点*i*、*j*的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 为线路*ij*的导纳； δ_{ij} 为节点*i*、*j*间的电压相角差。

2) 节点电压约束

节点*i*的电压约束条件如下：

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (13)$$

式中 $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 分别为 U_i 的最小值和最大值。

3) DG总容量约束

本文设定接入DG的总容量不大于总负荷有功功率的20%，即

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_{\text{G}}} P_{\text{DG},i} \leq 20\% \sum_{i=1}^n P_{\text{load},i} \quad (14)$$

4) 碳交易量约束

根据碳交易机制的本质，系统中碳排放量、碳交易配额、碳排放权之间应满足以下约束条件：

$$\begin{cases} E_b \geq 0 \\ E_s \geq 0 \\ E_p = E_q + E_b - E_s \end{cases} \quad (15)$$

式中 E_b 、 E_s 分别为发电企业从电力市场购买、出售的碳排放权。

2.2 下层优化模型

2.2.1 无功补偿点的确定

本文通过计算系统中的节点电压稳定指标，并与设定的电压稳定裕度门槛值进行对比，选取系统中电压稳定性较差的节点作为无功补偿点，节点电压稳定指标如下：

$$U_{\text{SL},j} = |U_i|^4 - 4(P_j R_{ij} + Q_j X_{ij})|U_i|^2 - 4(P_j X_{ij} - Q_j R_{ij})^2 \quad (16)$$

式中： P_j 、 Q_j 分别为节点*j*送出的有功功率和无功功率； R_{ij} 、 X_{ij} 分别为支路*ij*的电阻和电抗。

2.2.2 下层目标函数

下层优化规划主要以无功补偿装置等年值投资费用、系统网损以及电压偏移量最小为目标，从而确定无功补偿点所需的无功容量。由于综合目标函数中各子目标所代表的物理含义不同，存在量纲上的差异，为了解决这个问题，本文基于标么值的概念，以各子目标对应最优解作为基准

值,对综合目标函数进行无量纲化处理。具体表达式如下:

$$F_{\text{total}} = \min(\omega_{\text{py}} \frac{f_{\text{py}}}{f_{\text{py}}^*} + \omega_{\text{loss}} \frac{f_{\text{loss}}}{f_{\text{loss}}^*} + \omega_{\text{wf}} \frac{f_{\text{wf}}}{f_{\text{wf}}^*}) \quad (17)$$

$$\omega_{\text{py}} + \omega_{\text{loss}} + \omega_{\text{wf}} = 1 \quad (18)$$

$$f_{\text{py}} = \sum_{i=1}^n f_{\text{py},i} \quad (19)$$

$$f_{\text{py},i} = \begin{cases} 0, & 0.95 < U_i < 1.05 \\ |U_i - 1.05|, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$f_{\text{loss}} = \sum_{i,j=1}^N G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (21)$$

$$f_{\text{wf}} = \sum_{i=1}^{N_c} Q_{c,i} (C_c f_{\text{cr}} + C_{\text{ch}} - C_{\text{cs}} f_{\text{hs}}) \quad (22)$$

$$f_{\text{hs}} = 1 / [(1+r)^T - 1] \quad (23)$$

式中: f_{py} 为系统电压总偏移量; $f_{\text{py},i}$ 为节点 i 的电压偏移量; f_{loss} 为系统总网损; f_{wf} 为无功补偿装置的等年值投资费用; ω_{py} 、 ω_{loss} 、 ω_{wf} 分别为各子目标的权重; f_{py}^* 、 f_{loss}^* 、 f_{wf}^* 分别为各子目标对应的基准值; N_c 为无功补偿装置的数量; $Q_{c,i}$ 为第 i 个无功补偿装置的补偿量; C_c 、 C_{ch} 、 C_{cs} 分别为单位容量无功补偿装置投资成本、运行维护成本及回收成本; f_{hs} 为回收系数。

2.2.3 下层约束条件

1) 无功平衡约束

无功平衡约束条件如下:

$$Q_{G,i} + Q_{W,i} - Q_{\text{load},i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (24)$$

式中: $Q_{G,i}$ 为发电机向节点 i 输入的无功功率; $Q_{W,i}$ 为节点 i 的无功补偿量; $Q_{\text{load},i}$ 为节点 i 负荷的无功功率。

2) 不等式约束

不等式约束条件如下:

$$\begin{cases} U_{L,i,\min} \leq U_{L,i} \leq U_{L,i,\max}, & i = 1, 2, \dots, N_L \\ Q_{C,i,\min} \leq Q_{C,i} \leq Q_{C,i,\max}, & i = 1, 2, \dots, N_C \end{cases} \quad (25)$$

式中: $U_{L,i}$ 为负荷节点 i 的电压; $U_{L,i,\min}$ 、 $U_{L,i,\max}$ 分别为 $U_{L,i}$ 的最小、最大值; $Q_{C,i}$ 为节点 i 的无功补偿器补偿容量; $Q_{C,i,\min}$ 、 $Q_{C,i,\max}$ 分别为 $Q_{C,i}$ 的最小、最大值; N_L 、 N_C 分别为负荷节点数、无功补偿点数。

3 模型求解

遗传算法是根据生物进化论原理来搜索全局

最优解集,该算法目前广泛应用于规划等复杂问题求解^[20-21]。

3.1 改进的自适应遗传算法

传统遗传算法中的交叉、变异概率为确定值,不能体现生物进化过程中的自适应特征,容易出现早熟收敛、局部最优等问题^[22]。因此,本文针对 DG 的规划问题对算法的交叉、变异概率进行适当改进,改进后的公式如下:

$$P_c = \begin{cases} k_1 P_{c1}, & f' \leq f_{\text{avg}} \\ \frac{P_{c1}}{P_{c1} - P_{c2} + \exp(\frac{f' - f_{\text{avg}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}})}, & f' > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (26)$$

$$P_m = \begin{cases} k_1 P_{m1}, & f' \leq f_{\text{avg}} \\ \frac{P_{m1}}{P_{m1} - P_{m2} + \exp(\frac{f' - f_{\text{avg}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}})}, & f' > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (27)$$

式中: P_c 、 P_m 分别为自适应交叉、变异概率; P_{c1} 、 P_{c2} 和 P_{m1} 、 P_{m2} 分别为 2 个父代个体的自适应交叉、变异概率; k_1 为自适应调控参数; f' 为 2 个父代个体中适应度较大的值; f_{avg} 、 f_{max} 分别为当前种群的平均适应度与最大适应度。

3.2 求解流程

模型具体求解步骤如下:

1) 设置算法的环境变量参数,如变异、交叉概率,以及种群规模、迭代次数等。

2) 根据步骤 1) 的参数初始化种群,并在 MATLAB 中通过前推回代潮流计算的方法,判断种群中的个体是否满足约束条件,清除无效个体,得到有效种群。

3) 将有效种群进行上层优化,计算目标函数值、每个个体的适应度及种群适应度平均值等参数,将当代最优个体传递给下层优化。

4) 通过上层优化的最优个体,计算下层目标函数值和个体适应度,记录当代的最优个体,保存当代最优配置结果。

5) 对种群进行赌轮选择和自适应交叉、变异等操作,将产生的新种群传递到步骤 2) 进行循环迭代计算,当达到最大迭代次数时,停止循环,输出最后一代种群最优配置结果。具体流程如图 1 所示。

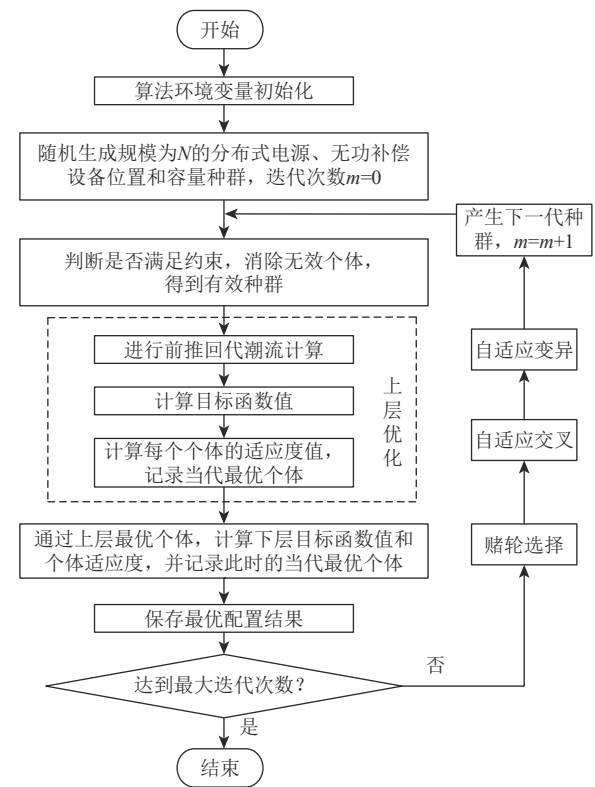


图1 求解流程图

Fig. 1 Solution flow chart

4 算例分析

4.1 基本参数

为验证本文模型的正确性, 选取IEEE33节点配电系统(见图2)构造算例, 系统数据参考Matpower7.1中case_ieee33文件, 基准电压为12.66 kV, 基准容量为10 MV·A, 将DG等效为功率因数为0.9的PQ节点, 总接入DG容量不大于总负荷的20%, 各节点无功补偿上限为300 kV·A。其他仿真数据如表1所示。

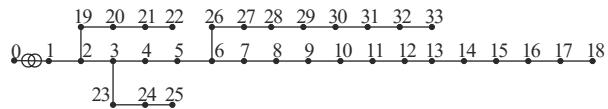


图2 节点系统图

Fig. 2 Node system diagram

自适应遗传算法参数设置如下: 种群数 N 为100; 最大迭代次数 M 为200; P_{c1} 取值为0.9; $P_{c2} \in [0.5, 1]$; P_{m1} 取值为0.1; $P_{m2} \in [0.5, 1]$ 。

4.2 结果分析

表2为系统节点电压稳定裕度次序表, 稳定

表1 仿真数据

Tab. 1 Simulation data

参数	数值
运行年限 Y/a	20
年等值回报率 $r/(元/a)$	0.1
外购单位电价 $\gamma/(元/(kW \cdot h))$	0.5
年最大负荷损耗时间 T_{loss}/h	3 200
年最大负荷利用时间 T_{max}/h	5 000
单位电量无偿碳排放配额 $\eta/[kg/(kW \cdot h)]$	0.613
外购单位电量碳排放强度 $\delta/[kg/(kW \cdot h)]$	0.841
微型燃气轮机碳排放强度 $\mu/[kg/(kW \cdot h)]$	0.184
燃气轮机单位电量无偿碳排放配额 $\lambda/[kg/(kW \cdot h)]$	0.342
无功补偿装置投资(运行)成本 $C_c(C_{ch})/[元/(kW \cdot h)]$	60(10)
光伏投资(运行)成本 $C_{PV}(C_{PVM})/[元/(kW \cdot h)]$	6 500(70)
燃气轮机投资(运行)成本 $C_{MT}(C_{MTM})/[元/(kW \cdot h)]$	1 500(11.8)

表2 节点电压稳定裕度次序表

Tab. 2 Node voltage stability margin sequence table

次序	节点	电压稳定裕度/pu	次序	节点	电压稳定裕度/pu
1	19	0.642 93	18	8	0.766 07
2	18	0.646 98	19	27	0.778 78
3	17	0.649 96	20	7	0.785 60
4	16	0.656 40	21	6	0.799 30
5	33	0.659 43	22	26	0.883 91
6	15	0.661 40	23	5	0.885 98
7	32	0.662 16	24	25	0.908 94
8	31	0.668 82	25	4	0.923 78
9	14	0.669 20	26	24	0.925 45
10	13	0.678 40	27	23	0.939 54
11	30	0.686 73	28	22	0.959 25
12	29	0.698 04	29	3	0.960 76
13	12	0.700 59	30	21	0.961 07
14	11	0.706 35	31	20	0.969 05
15	10	0.711 72	32	2	0.984 63
16	28	0.730 40	33	1	1.000 00
17	9	0.736 24			

裕度越小, 对应节点的电压稳定性就越差, 越需要无功补偿, 本文设定电压稳定裕度门槛值为0.7, 因此选择表2中排序前12位的节点作为无功补偿点, 则补偿点的集合为 $A=\{19, 18, 17, 16, 33, 15, 32, 31, 14, 13, 30, 29\}$ 。

为了说明系统在DG优化配置时考虑碳交易与无功补偿的优越性, 设置以下4种方案对比碳交易和无功补偿对DG优化配置的影响, 表3为不同方案下优化配置结果。

方案1: 系统考虑碳交易机制而不接入DG。

方案2: 系统不考虑碳交易机制而接入DG。

表3 不同方案下优化配置结果

Tab. 3 Optimized configuration results under different schemes

方案	外购电容量/kW	光伏		燃气轮机		网损/kW	碳排放量/t	成本/万元						总成本/万元
		节点	容量/kW	节点	容量/kW			光伏	燃气轮机	无功补偿	网损	负荷电费	碳交易	
1	3 927	—	—	—	—	211.92	16 191.89	0	0	0	33.91	928.75	362.21	1 324.87
2	2 988	14	30	16	350	93.48	13 133.46	2.5	14.85	0	14.95	723.75	0	756.05
		30	20	31	420									
3	2 985	14	310	16	70	90.76	12 592.54	52.52	3.6	0	14.52	723.75	78.22	872.61
		30	320	31	120									
4	2 972	12	290	17	80	77.19	12 436.01	52.52	3.6	10.81	12.35	723.75	65.87	868.82
		28	340	31	110									

方案3：系统既考虑碳交易机制又接入DG。

方案4：在方案3的基础上考虑无功补偿。

通过对比表3中方案1、3可知，在考虑碳交易机制的基础上，虽然DG并网增加了运行投资费用，但系统从上级购买电量下降了约24%，负荷电费降低了22%，网损也降低了约57%，年碳排放量降低了3 774.16 t，年碳交易成本降低了283.99万元，系统总成本降低了34%，说明DG的接入有利于提高系统的经济性及环保性。

通过对比表3中方案2、3可知，系统DG的容量配置由光伏50 kW、燃气轮机770 kW变为光伏630 kW、燃气轮机190 kW，碳排放量降低了4.1%，这是由于当系统考虑碳交易机制时，燃气轮机产生的碳排放量转换成碳排放成本，间接增大了燃气轮机的运行成本，而光伏是清洁能源，不产生碳排放，所以系统会权衡光伏、燃气轮机的投资运行成本及碳排放成本，对其容量进行配置，因此在进行DG的优化配置时应考虑碳交易机制的影响。

通过对比表3中方案3、4可知，虽然系统增加了无功补偿装置费用，但是总成本却降低了0.4%，这是由于计及无功补偿之后，系统潮流发生变化，DG的配置发生了改变，受其影响所减少的网损费、碳交易成本等弥补了无功补偿装置的费用，因此系统总效益更优。

表4为方案4下最终双层优化配置结果，可以看出：DG接入总容量为820 kW，小于系统总负荷有功功率的20%，满足模型约束。同时结合图2可知，系统中由于线路末端传输功率比较长，DG安装于末端有利于就地提供功率，从而降低了系

表4 最终双层优化配置结果

Tab. 4 Final double-layer optimal configuration results

类型	节点	容量
光伏	12	290 kW
	28	340 kW
燃气轮机	17	80 kW
	31	110 kW
无功补偿装置	13	170 kV·A
	14	70 kV·A
	15	70 kV·A
	16	110 kV·A
	17	130 kV·A
	18	20 kV·A
	19	210 kV·A
	29	190 kV·A
	30	210 kV·A
	31	290 kV·A
	32	280 kV·A
	33	70 kV·A

统线路损耗，验证了本文所提模型和方法的合理性和有效性。

为进一步说明在规划配电网DG的同时配置无功补偿装置的优越性，设置以下4种方案对系统节点电压水平、电压偏移量以及节点电压稳定裕度进行对比：1) 优化前原始网络；2) 系统仅DG接入；3) 系统仅装设无功补偿设备；4) 系统中装设DG和无功补偿设备。图3、4为对比结果。

通过对比图3、4中方案1、2可知，DG的接入对系统的影响表现如下：随着DG的接入，系统的节点电压水平、电压稳定裕度都有所提高，系统电压偏移量也降低了31%，说明DG的接入有利于提高系统运行的稳定性。

通过对比图3、4中方案2、3、4可知：方案

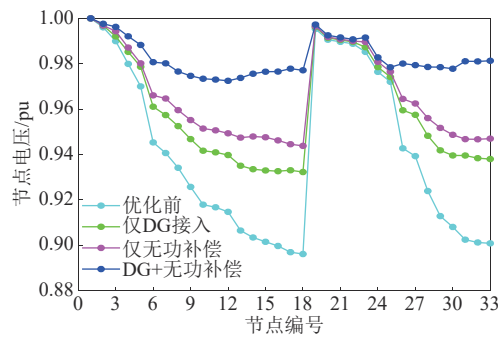


图3 节点电压对比图

Fig. 3 Node voltage comparison diagram

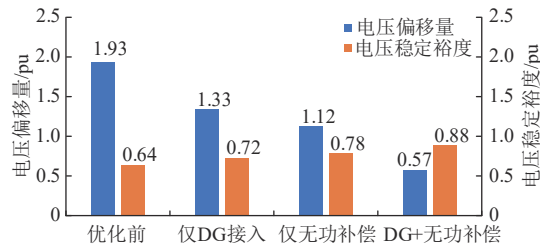


图4 电压偏移量与稳定裕度对比

Fig. 4 Comparison of voltage offset and stability margin

4较方案2、3电压偏移量明显降低，电压稳定裕度有所提高；方案4的节点电压效果最好，方案3次之，方案2较差。方案4的节点电压最低维持在0.972 pu，比方案2最低电压高出0.039 pu，这不仅体现了电压降落与无功功率的关系较有功功率更为紧密，而且说明了无功补偿装置的接入避免了系统在DG启停或出力变化时出现电压失衡、稳定性较差等问题，保证了系统运行的稳定性和可靠性，验证了DG优化配置时考虑无功补偿的合理性及优越性。

4.3 算法改进结果分析

图5为采用改进自适应遗传算法与传统遗传算法求解本文所提双层优化配置模型时的收敛对

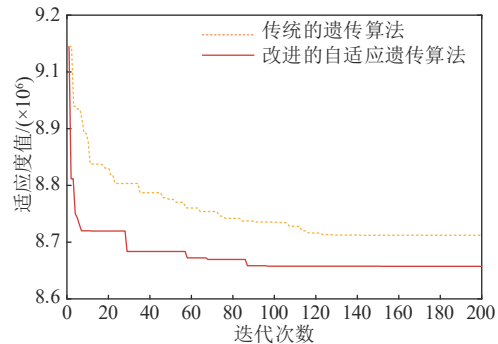


图5 算法收敛对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of algorithm convergence

比曲线。可以看出，改进的自适应遗传算法较传统的遗传算法求解效果更精确，收敛速度更快，这是由于改进的自适应遗传算法在寻优过程中进行了赌轮选择、自适应交叉及变异操作，同时配合精英保留策略有效改善了算法的全局最优搜索能力，避免过早地陷入局部最优，极大地提高了算法的收敛性及求解结果的准确性。

表5为2种算法的寻优对比结果，可以看出，改进的自适应遗传算法在求解时间、迭代收敛次数及总成本方面均明显优于传统的遗传算法。

表5 算法寻优对比结果

Tab. 5 Comparison results of algorithm optimization

参数	改进的自适应遗传算法	传统的遗传算法
求解时间/s	128.3	245.7
迭代收敛次数	98	124
总成本/万元	868.82	874.94

5 结论

构建了考虑碳交易和无功补偿的配电网优化系统，建立了双层优化模型来优化DG的布点位置及容量，通过算例分析可得出如下结论：

- 1) 考虑碳交易机制会影响不同种类电源配置容量的大小，系统的碳排放量、碳交易成本及总成本明显降低。
- 2) 考虑无功补偿后，配电网的网损、电压水平及节点电压稳定裕度都得到不同程度的提升，同时保证在DG不出力时配电网电压能维持在合理的范围内，降低了DG出力不确定性对配电网的影响。
- 3) 在对配电网中的DG进行优化配置时，碳交易与无功补偿机制的同时引入会使系统更具有环保性、经济性和稳定性。
- 4) 改进的自适应遗传算法在求解效率及准确性上均优于传统的遗传算法，表明在算法中引入赌轮选择、自适应交叉及变异、精英保留策略，能提高算法的全局最优搜索能力，避免过早地陷入局部最优。

参考文献

[1] 杨晓辉，杨爽，徐正宏，等. 计及灵活配电单元的分

- 布式电源优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 19-25.
- YANG X H, YANG S, XU Z H, et al. Optimal configuration method of distributed generation considering flexible distribution unit[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 19-25.
- [2] 初壮, 孙健浩, 赵蕾, 等. 考虑风光与负荷时序特性的主动配电网分布式电源优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 53-62.
- CHU Z, SUN J H, ZHAO L, et al. Optimal configuration of distributed power generation in active distribution network considering the characteristics of wind power and load time series[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 53-62.
- [3] 蔡浩, 施凯, 唐静, 等. 基于改进蚁狮优化算法的可再生能源分布式电源优化配置[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 88-95.
- CAI H, SHI K, TANG J, et al. Optimal configuration of renewable energy distributed power generation based on improved ant-lion optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 88-95.
- [4] 刘建伟, 李学斌, 刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 476-484.
- LIU J W, LI X B, LIU X O. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [5] 肖永江, 于永进, 张桂林. 基于改进乌燕鸥算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 148-155.
- XIAO Y J, YU Y J, ZHANG G L. Optimal configuration of distributed power generation based on an improved sooty tern optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 148-155.
- [6] 刘强, 刘佩, 马少飞, 等. 基于灰狼优化算法的分布式电源定容选址研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 40-46.
- LIU Q, LIU P, MA S F, et al. Sitting and sizing of distributed generation based on grey wolf optimization algorithm[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 40-46.
- [7] 马天祥, 段昕, 卢志刚, 等. 计及供电可靠性评估的地区电网风储电站选址定容方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 36-43.
- MA T X, DUAN X, LU Z G, et al. Optimal siting and sizing method of wind storage power station in regional power grid considering power supply reliability assessment[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 36-43.
- [8] 李洪志, 杨俊友, 崔嘉. 考虑网损和电压的多分布式电源最优选址和定容研究[J]. 电气工程学报, 2015, 10(9): 79-86.
- LI H Z, YANG J Y, CUI J. Optimal location and sizing of multi-distributed generators considering power loss and voltage[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(9): 79-86.
- [9] 姚慧芳, 李勇, 谭益, 等. 考虑电量外送的多电压等级电网分布式电源优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 54-62.
- YAO H F, LI Y, TAN Y, et al. Optimal allocation of distributed generations considering power export in multi-voltage level grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 54-62.
- [10] 刘杨华, 杨悦荣, 林舜江. 含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 22-33.
- LIU Y H, YANG Y R, LIN S J. A multi-object convex optimization method for the coordinated allocation of energy storage and reactive power compensation devices in distribution network integrated with photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 22-33.
- [11] 周春泉, 史静, 姜相明, 等. 计及无功优化的分布式电源选址与定容[J]. 现代电力, 2014, 31(2): 42-45.
- ZHOU C Q, SHI J, JIANG X M, et al. Sitting and sizing of distribution generation by considering of reactive power optimization[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(2): 42-45.
- [12] 胡臻, 崔挺, 吕虎, 等. 考虑电网动态特性的无功补偿配置方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 45-51.
- HU Z, CUI T, GUO H, et al. Reactive power compensation scheme considering dynamic characteristics of power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 45-51.
- [13] 徐慧慧, 田云飞, 缪猛, 等. 计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 1-7.
- XU H H, TIAN Y F, MIAO M, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 1-7.
- [14] 娄素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97.

- LOU S H, HU B, WU Y W, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97.
- [15] 车泉辉, 吴耀武, 祝志刚, 等. 基于碳交易的含大规模光伏发电系统复合储能优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 76-82.
- CHE Q H, WU Y W, ZHU Z G, et al. Carbon trading based optimal scheduling of hybrid energy storage system in power systems with large-scale photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 76-82.
- [16] 张晓辉, 梁军雪, 赵翠妹, 等. 基于碳交易的含燃气机组的低碳电源规划[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 92-98.
- ZHANG X H, LIANG J X, ZHAO C M, et al. Research on low-carbon power planning with gas turbine units based on carbon transactions[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2020, 41(7): 92-98.
- [17] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 248-255.
- LUO Z, QIN J H, LIANG J Y, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 248-255.
- [18] 吴鸿亮, 刘羽霄, 张宁, 等. 南方电网西电东送中的碳交易模型及其效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 745-751.
- WU H L, LIU Y X, ZHANG N, et al. Carbon trading models and benefit analysis in CSG west-to-east power transmission[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 745-751.
- [19] 孙子茹, 艾芊, 居来提·阿不力孜, 等. 考虑季节性氢储及期货式碳交易的综合能源系统年度规划研究[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 2-13.
- SUN Z R, AI Q, JULAITI A, et al. Annual planning study of integrated energy system considering seasonal hydrogen storage and futures carbon trading[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 2-13.
- [20] 柯清派, 史训涛, 袁智勇, 等. 基于改进遗传算法的变电站巡检机器人路径规划[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 144-149.
- KE Q P, SHI X T, YUAN Z Y, et al. Route planning for substation patrol robot based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 144-149.
- [21] 赵国钦, 蓝茂蔚, 李杨, 等. 基于最小二乘支持向量机的火电厂烟气含氧量预测模型优化研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 534-542.
- ZHAO G Q, LAN M W, LI Y, et al. Study on optimization of prediction model of flue gas oxygen content in thermal power plant based on least squares support vector machine[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 534-542.
- [22] 王新宇, 王相杰, 张明月, 等. 基于改进自适应免疫遗传算法的智能电网虚假数据攻击检测方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(10): 84-89.
- WANG X Y, WANG X J, ZHANG M Y, et al. A false data attack detection method for power grid based on an improved AIGA[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(10): 84-89.

收稿日期: 2023-05-31。

作者简介:



孙健浩

孙健浩(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网规划, 2295269596@qq.com;



初壮

初壮(1973), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化运行、配电网计算分析, 本文通信作者, chuzhuang@hotmail.com。

(责任编辑 尚彩娟)