DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)09-0175-05

能源配网碳排放最优规划方法研究

郭云鹏[1]，谭 琛[2]，钱 啸[1]，曹 宇[2]，唐 述[3]

（1.国网浙江省电力有限公司，浙江 杭州 311500；2.北京科东电力控制系统有限责任公司，北京 100192；
3.重庆邮电大学，重庆 400065）

摘 要：常规综合能源配网碳排放最优规划多采用改进蚁群算法，但此方法未考虑到能源资源总量约束，导致最终碳排放路径规划结果的减排率较低。为此，提出能源配网碳排放最优规划方法。依据综合能源配电网节能减排系统结构，计算配电网的碳排放强度，并根据碳排放规划目标，以碳排放的减排效益为优化函数，结合能源资源总量约束、节能减排投入成本约束构建配电网碳排放最优规划模型，并采用遗传算法求解模型，从而获得最佳碳排放路径。以某实际综合能源配电网为研究背景，应用所提方法对配电网碳排放路径进行规划，结果显示，规划后的减排率较高，所提方法的碳排放路径规划效果较好。

关键词：综合能源配网；碳排放；最优规划；遗传算法

中图分类号：TP391 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-7241(2025)09-0175-05

Research on the Optimal Planning Method for Carbon Emissions in Energy Distribution Networks

GUO Yunpeng[1], TAN Chen[2], QIAN Xiao[1], CAO Yu[2], TANG Shu[3]

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311500, China;
2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China;
3. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The optimal planning of carbon emissions in conventional integrated energy distribution networks often uses improved ant colony algorithm, but this method does not consider the constraint of total energy resources, resulting in a lower emission reduction rate in the final carbon emission path planning result. To this end, an optimal planning method for carbon emissions in energy distribution networks is proposed. Based on the structure of the comprehensive energy distribution network energy-saving and emission reduction system, the carbon emission intensity of the distribution network is calculated. According to the carbon emission planning goals, the carbon emission reduction benefits are used as the optimization function, combined with the constraints of total energy resources and energy-saving and emission reduction investment costs, to construct the optimal carbon emission planning model for the distribution network. Genetic algorithm is used to solve the model, and the optimal carbon emission path is obtained. Taking a practical integrated energy distribution network as the research background, the proposed method is applied to plan the carbon emission path of the distribution network. The results show that the planned emission reduction rate is high, and the carbon emission path planning effect of the proposed method is good.

Keywords: integrated energy distribution network; carbon emissions; optimal planning; genetic algorithm

0 引言

全球气候变化问题已成为各国面临的共同挑战，碳排放是气候变化的主要原因之一。作为全球最大的能源消费国，中国的碳排放量居高不下，减碳任务极具挑战性。作为能源部门的重要组成部分，能源分配网络在减少碳排放和提高能源利用效率方面发挥着至关重要的作用。然而，目前能源分配网络的规划过程中存在一些问题，如缺乏最佳的碳排放规划方法，无法有效控制碳排放。因此，研究能源配送网络碳排放的优化规划方法具有重要意义。

文献[1]分析了双碳背景下节能减排路径。在实施过程中，研究首先界定了问题，明确了研究的目的和意义。随后，通过建立节能减排监测系统取得预期效果。该研究提出的节能减排路径具有针对性和可操作性，可以帮助企业有效减少碳排放，提高能源利用效率。但该方法主要关注企业的内部生产过程和能源消耗，没有充分考虑整个供应链的碳排放。此外，该研究没有充分考

*基金项目：国家电网总部科技项目(1400-202219426A-2-0-ZN)；国家自然科学基金(61601070)；重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0680)

收稿日期：2024-01-28

虑政府、社会等其他利益相关者的参与和作用。文献[2]通过测算碳排放、分配碳排放权、建立碳排放权交易机制等多个方面，对后续的减排路径进行优化设计，从而实现碳排放最优规划。该方法提出的碳排放核算方法具有一定的创新性，能够准确计量绿色建筑的碳排放量。同时，研究人员提出的减排路径也具有一定的现实指导意义，可以帮助绿色建筑实现更环保节能的目标。但由于不同类型和地区的绿色建筑的碳排放量可能存在显著差异，因此需要在核算方法上进一步细化，以获取更优的碳排放路径。

鉴于以上分析，本文研究并设计了一种综合能源配网碳排放最优规划方法，以期为政府制定减碳政策提供科学依据和支持。

1 能源配网碳排放最优规划方法设计

1.1 碳排放强度计算

为降低能源配网碳排放量，将能源配电网与经济、能源和环境之间构成了一个相互关联的复杂系统。其之间的关系如图1所示。

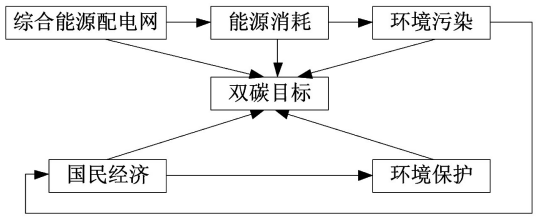


图1 综合能源配电网节能减排系统结构示意图

系统与能源分配网络有着相辅相成的关系[3]。因此，综合能源分配网络的碳排放规划路径问题是一个相互约束、相互作用的大型系统，存在许多无法单独考虑的影响因素[4]。因此，为了规划最优的碳排放路径，应首先计算综合能源分配网络的碳排放总量，为后续的碳排放路线规划提供数据基础。

结合系统各变量之间的影响关系和作用机制，采用数学推导方式对碳排放强度进行核算。假设综合能源配电网的耗电系数为10%[5]，则系统整个运行过程中能源节省的单位消耗量可表示为

$$M_n = \alpha_0 \sum F_i \times E_0 \tag{1}$$

式中，α_0表示配电网的耗电系数；F_i表示第i种燃料的用量；E_0表示光滑系数。

假设配电网系统中包含n个发电机组，则系统的投入产出之间的平衡关系为

$$X_t = \sum_{j=1}^{n} n \times M_n \times \boldsymbol{y_k} \tag{2}$$

式中，j表示发电机组序号；$\boldsymbol{y_k}$表示转换矩阵；X_t表示平衡系数。

根据系统的投入产出关系，将上式与系数矩阵叠加计算可得到配电网碳排放总量矩阵[6]，表达式如下：

$$\boldsymbol{A}_j = X_t \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{\gamma 1} & r_{\gamma 2} & \cdots & r_{\gamma m} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，$r_{\gamma m}$表示当γ个发电机组的总产出系数为m时的碳排放影响因子。

结合配电网碳排放测算方法，将碳排放影响因子分解为排放结构、产业结构、经济发展水平和劳动力规模[7-8]。具体表达式如下：

$$\begin{cases} \gamma_1 = \dfrac{c_1}{c_2} / h_0 \\ \gamma_2 = \sqrt{\dfrac{a_1}{t_2}} / h_1 \\ \gamma_3 = \sum\sum h_s / g_0 \end{cases} \tag{4}$$

式中，γ_1、γ_2、γ_3分别表示排放源的排放结构、配电网的经济发展水平、劳动力规模；c_1表示系统的产业产值；c_2表示从业人数；h_0表示调整参数；a_1表示减排数量；t_2表示系统运行时段；h_1表示平衡超参数；h_s表示混合系数；g_0表示属性约束。

基于能源配电网的减排成本，计算整个网络系统的碳排放强度，即：

$$\boldsymbol{\mu}_q = \boldsymbol{A}_j \sum \left(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3\right) \times f\left(x\right) \times k_0 \tag{5}$$

式中，$f(x)$表示标准正态累积概率函数；k_0表示配电网减排成本。

依据综合配电网节能减排系统结构，求取系统的碳排放总量，结合碳排放影响因子计算综合能源配电网的碳排放强度，为接下来建立配电网碳排放路径规划模型创造了有利条件。

1.2 配电网碳排放规划模型构建

综合能源配电网在节能减排过程中的减排效益主要由经济效益、能源效益和环境效益构成。配电网作为供电企业，其经济效益与供电质量是追求的根本[9-11]。因此经济效益目标是配电网减排过程中的一个重要目标函数。配电网碳排放规划目标函数为

$$\boldsymbol{w}_1 = \sum_{n=1}^{N} Y_s \times \boldsymbol{\mu}_q \times d_c \tag{6}$$

式中，N表示配电网引进的减排新技术种类数量；Y_s表示配电网进行减排投资的计划年数；$\boldsymbol{\mu}_q$表示碳排放强度；d_c表示关键工序的碳排放量。

能源效益对综合能源配电网的发展具有关键性的作用。配电网系统通常通过提高分布式能源的利用率来减少能源的消耗[12]。因此配电网减排的能源效益采用能源消耗量来衡量。计算公式为

$$\boldsymbol{w}_2=\sum_{m=1}^{M}\left(\boldsymbol{\mu}_q+\boldsymbol{l}_e+g_1\right)\times\frac{\left\|z_s\right\|^2}{\sqrt{b_q}} \tag{7}$$

式中，M表示节能改造设备数量；$\boldsymbol{\mu}_q$表示碳排放强度；$\boldsymbol{l}_e$表示雅可比矩阵；g_1表示渐进稳定系数；z_s表示碳排放利益的主体收益参数；b_q表示单位耗电排放系数。

环境效益目标是衡量是否实现双碳目标的重要指标。本文综合考虑电力产业与能源、环境协调发展的总目标，计算在经过节能减排治理后，配电网系统带来的环境效益。计算公式为

$$\boldsymbol{w}_3=\boldsymbol{\mu}_q\sum\left\{p_t\times f_p\times\left[1-\sum\frac{e_s}{|\beta_1|}\times\left(s_w+j_p\right)\right]\right\} \tag{8}$$

式中，p_t表示配电网运行过程中碳排放物的种类数；f_p表示对配电网运行过程中产生的排放物进行治理或综合利用的项目种类总数；e_s表示污染物的减少率；β_1表示残差项；s_w表示碳排放治理标准系数；j_p表示标准煤转换系数；$\boldsymbol{\mu}_q$表示碳排放强度。

对上述设计的3个目标函数进行条件约束，以保证配电网碳排放路径规划模型能够在约束范围内得到最优结果。本研究中设立的约束条件主要包括能源资源总量约束、节能减排投入成本约束。具体计算过程如下。

（1）能源资源总量约束。由于技术和成本的原因，配电网在运行过程中会受到能源损耗以及能源量限制。因此，则有：

$$\frac{\sum\left(\chi_1+\chi_2\right)}{\delta_0}\leqslant R_s \tag{9}$$

式中，χ_1、χ_2分别表示能源实际使用量与预测量；δ_0表示能源损耗；R_s表示能源资源总量。

（2）节能减排投入成本。在对配电网碳排放路径进行规划时，在考虑能源效益和环境效益的同时，还应考虑投入成本。计算公式为

$$B_o\times S_v\times\vartheta_0\leqslant\theta_0 \tag{10}$$

式中，B_O表示能源利用率；S_v表示对发电机组节能改造的投资费用；ϑ_0表示综合利用排放物项目的投资费用；θ_0表示投入的最大资金额。

将上述设立的约束条件与构建的配电网碳排放路径规划模型进行拟合计算，得到配电网碳排放规划模型的最终模型，表达式为

$$\boldsymbol{F}\left(\lambda_s\right)=\rho_1\boldsymbol{w}_1+\rho_2\boldsymbol{w}_2+\rho_3\boldsymbol{w}_3 \tag{11}$$

式中，ρ_1、ρ_2、ρ_3分别表示单一目标函数对应的权重；$\boldsymbol{F}(\lambda_s)$表示在约束条件$\lambda_s$下综合能源配电网碳排放路径规划模型。

结合综合能源碳排放的测算原理，考虑诸多约束条件，以减排效益为目标构建碳排放路径规划模型。接下来本文采用遗传算法对构建的模型进行求解。

1.3 配电网碳排放规划模型求解

在配电网实际碳排放最优规划中，基于实践经验在进行路径选择时，一般基于减排成本最低和减排效应最大为优先原则，该问题属于典型的多项式回路问题。因此为快速且精准地计算出模型结果，研究采用遗传算法对其求解，求解流程如图2所示。

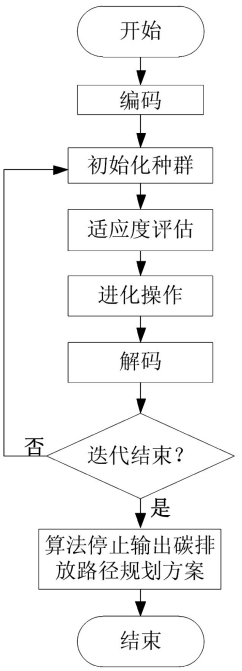


图2 综合能源配电网碳排放规划流程

根据图2，可得配电网碳排放路径规划模型求解的具体实现步骤如下：

（1）依据构建的模型，将模型中的每一个可行性路径看作一个染色体，每个染色体由若干个基因组成，其中每个基因代表一种能源消耗或碳排放量。根据碳排放成本最低和减排效益最大为原则，对个体进行实数制编码；

（2）对初始种群随机生成一组原始解，作为种群的初始状态，并设置迭代次数Ω_u；

（3）根据数学模型，计算个体的适应度值ς。本文将碳排放量作为个体的适应度值，即$\varsigma=A_i$；

（4）选择具有最高适应度值的个体进入下一代种群，利用锦标赛选择法对个体进行操作，并通过调整不同能源消耗量与碳排放量的比例来产生新的解；

（5）将最后一代种群中的最优解解码为实际可行的碳排放路径，并判断当前迭代次数是否满足预设条件Ω_u，若是，则输出最佳碳排放路径规划策略。至此，完成能源配网碳排放最优规划方法的设计。

2 实例论证分析

2.1 实验准备

以某大型综合能源配电网系统为研究背景，对该系

统的碳排放路径进行规划分析。该配电网包括供电系统、供热系统、天然气供应系统、污水处理系统和垃圾处理系统。供电系统包括火电、水电、风电、光伏等发电厂，通过输电线路将电力输送到配电网。供热系统包括火力发电厂、集中供热站等，为用户供热。天然气供应系统包括天然气管道和天然气储备设施，为用户提供天然气。污水处理系统包括污水处理厂和污水泵站，用于处理和回收污水。垃圾处理系统包括垃圾处理厂和垃圾转运站，用于处理垃圾和回收资源。

以配电网2017年-2022年六年间的历史运行数据为基础数据，统计该系统的能源消耗情况，具体如表1所示。

表1 配电网能源消耗情况统计

时间段/年份	能源类型	消耗量/吨标准煤	时间段/年份	能源类型	消耗量/吨标准煤
2017	电力	100 000 000	2020	电力	98 652
	热力	20 000 000		热力	154 178
	天然气	500 000		天然气	40 125
2018	电力	2 000 123	2021	电力	178 563
	热力	1 635 214		热力	142 567
	天然气	412 457		天然气	40 124
2019	电力	2 000 021	2022	电力	142 036
	热力	162 136		热力	115 473
	天然气	411547		天然气	30 122

从表1中的数据可以看出，电力是综合能源配电网的主要能源消耗类型，其次是热力和天然气。这表明配电网主要由电力供电，同时也需要热能和天然气的支持。随着时间的推移，用电量有所波动，但总体上呈下降趋势。热力和天然气的消耗量也存在相应波动。说明配电网的能源需求在不同的时间段有所不同，但总体上呈下降趋势。

以表1中的数据为基础，根据碳排放核算方法对该配电网碳排放强度进行计算，为后续构建碳排放路径规划模型提供有利的数据条件。

2.2 实验说明

在综合考虑上述因素的基础上，构建了碳排放路径规划模型。该模型采用分层方法，分为目标层、条件层和测量层。目标层旨在最大限度地提高综合能源分配网络的碳减排效益；条件层考虑了综合能源分配网络的运行条件和约束；措施层包括各种减排措施。并使用遗传算法对模型进行求解，以得到最优的碳排放路径规划方案。

遗传算法计算参数的设计原则需要考虑初始种群的分配和个体在种群中的分布范围，以避免初始种群远离全局最优解，从而限制搜索范围。因此，实验中遗传算法的相关参数设置如下：种群大小为80，终止进化次数为260，进化概率为0.42。

2.3 配电网碳排放路径规划结果与分析

采用改进灰狼算法（方法1）、系统动力学方法（方法2）作为本文方法的对比方法。分别采用3种方法对该综合能源配电网系统进行碳排放路径规划，比较基于不同方法下的系统二氧化碳污染量。对比结果如图3所示。

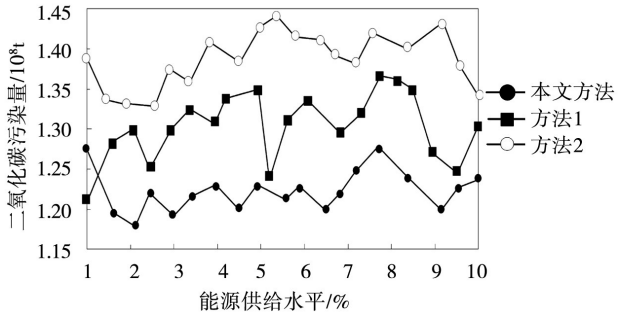


图3 基于不同方法的二氧化碳污染量对比

根据图3可以看出，在相同能源供给水平条件下，分别采用对照组方法和本文方法对综合能源配电网系统进行碳排放路径进行最优规划，通过本文方法规划后的二氧化碳污染量显著低于方法1和方法2。由此可以说明本文方法的可靠性，可以有效降低综合能源配电网的二氧化碳排放量。

2.4 对比实验分析

为进一步验证本文方法在配电网碳排放路径最优规划中的有效性，对基于方法1、方法2和本文方法规划下的配电网系统减排率进行比较分析，从而对比不同方法的碳排放规划性能。对比结果如图4所示。

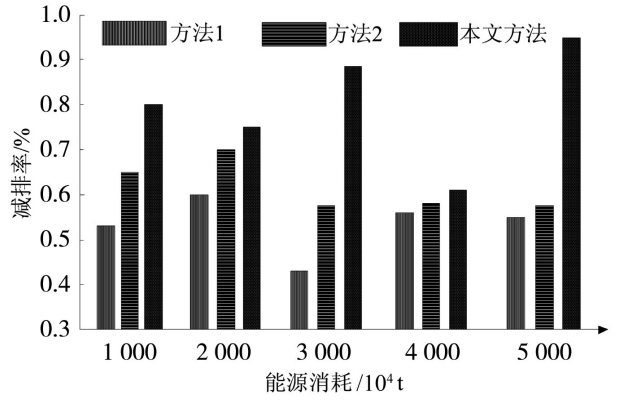


图4 减排率对比结果

由图4可以明显看出，当综合能源配电网的能源消耗量相同时，本文方法规划后的减排率相对较低，而方法1与方法2的减排率效果不佳。通过对比结果可以表明，本文提出的方法能够有效治理二氧化碳污染，通过规划碳排放量口径可以提高减排率，进而说明本文方法对于综合能源配电网碳排放路径规划的效果更好。

（下转第183页）