

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210570

“双碳”目标下配电网多阶段扩展规划

彭静, 王军, 亓富军, 廖誉翔

(国网临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 随着“双碳”政策的提出, 如何通过配电网规划设计减少碳排放成为当前研究的热点。针对当前配电网规划模型中缺乏考虑碳排放影响的问题, 建立起考虑碳交易市场的配电网多阶段双层扩展规划。模型的规划层考虑了变电站、网架以及分布式电源的规划, 运行层考虑规划网架最优运行方式下的运行成本、发电成本以及碳排放成本, 然后采用现代 Benders 分解对构建的混合整数线性规划模型进行求解。最后, 将提出的算法模型应用于一个典型的 24 节点配电网规划算例进行分析。在满足低碳目标的前提下, 所提方法能够有效降低配电网规划的综合成本, 倾向于建设更高比例可再生能源的配电网。

关键词: 低碳配电网; “双碳”目标; 混合整数线性规划; 现代 Benders 分解; 多阶段扩展规划

Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy

PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, LIAO Yuxiang

(State Grid Linyi Power Supply Company, Linyi 276000, China)

Abstract: With the proposition of a “double-carbon” policy, how to reduce carbon emission through distribution network planning has become a research hotspot. Existing distribution network planning models do not consider the effect of carbon emission. To tackle this issue, a multi-stage bilevel expansion planning of a distribution network considering the carbon trading market is established. The planning layer of the model considers the planning of substations, network and DGs. The operation layer of the model considers the optimal operational strategies of the planning scheme and their operation, generation and carbon emission costs. Then, a proposed mixed integer linear programming model is analysed by modern Benders decomposition. The proposed method is applied to a typical 24-node distribution network planning case. This shows that it can effectively reduce the comprehensive cost of distribution network planning with a low-carbon objective, and is appropriate when building a higher proportion of renewable energy in the distribution network.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSDLY00GDJS2100788).

Key words: low-carbon distribution network; double-carbon policy; mixed-integer programming; modern Benders decomposition; multi-stage expansion planning

0 引言

当今世界碳排放量增长迅速, 减少温室气体的排放成为全球各国的共识^[1-6]。在此背景下, 我国在《巴黎协定》中承诺, 致力于 2030 年达到碳排放峰值, 并于 2060 年实现碳中和。为了有效控制和减少碳排放, 实现“净零排放”, 我国提出了碳税、碳交易市场等一系列政策^[7-8], 努力为减少碳排放做出贡献。

电力行业是我国最大的碳排放行业, 占比超过 40%, 如何通过规划设计, 优化运行以减少电力行业的碳排放是当前亟需解决的关键问题^[9]。

传统的配电网用于连接输电网和负荷, 功率从输电网流向负荷, 因此, 配电公司 (Distribution Companies, DISCOs) 只需考虑从输电网购电并分配给用户即可。已有大量研究针对不同场景建立了相应的配电网规划模型: 文献[10]提出考虑网架动态重构的配电网双层规划模型; 文献[11]在考虑了工程实用的接线模式约束下开展配电网规划; 文献[12]运用网络划分对考虑路网约束的配电网开展规划;

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (SGSDLY00GDJS 2100788)

文献[13]提出了一种计及多种分布式能源运行的配电网双层规划方法。然而多数模型仅考虑单阶段规划模型,缺乏从长期投资的角度进行优化设计^[4]。

随着可再生能源的接入和需求响应策略的推行,需要对新元素进行建模分析^[15]。电源侧,除了考虑主网注入功率,还需考虑风电 WT、光伏 PV、小水电等分布式资源^[16];电网侧,需要考虑开环运行和闭环设计的拓扑约束^[17];用户侧,需要考虑激励型需求响应以及价格型需求响应对配电网规划的影响^[18]。

为了更好地消纳可再生能源,提升可再生能源的消纳率,碳交易作为环境治理的创新手段,在未来将扮演重要的角色^[19]。文献[20-21]对考虑碳排放成本的微能源网的运行策略进行优化,并指出考虑碳排放成本能够同时达到多能互补、减少弃风弃光的效果;文献[22]考虑低碳效应开展基于粒子群算法的多目标配电网规划,为配电网规划提供了新的思路;文献[23]以降碳减排为目的,对配电网进行扩展目标查询,寻找适宜参数优化现状配电网运行与规划,提升主动配电网扩展规划的效益。然而,目前仍缺乏站在碳交易市场的角度对配电网扩展规划建立精确的数学模型,并采用合适的算法进行求解。然而,配电网规划本质是一个含有大量离散变量、非线性的混合整数优化问题,精细化考虑多阶段规划使配电网规划模型维度更高,复杂度更高^[24]。

为了解决上述问题,本文提出了考虑碳排放成本的配电网规划-运行的多阶段配电网双层规划模型。模型中的规划层以线路、变电站和 DG 的投资建设为决策变量,以投资建设成本和运行成本为目标函数,考虑安装和拓扑约束,其中,规划层的运行成本需要由下层的最优运行方案决定,运行层则以线路重构和电源出力为决策变量,考虑潮流约束,最小化运行、发电以及碳排放成本。所构建的配电网是一个混合整数线性规划模型,本文提出采用现代 Benders 分解对其进行求解,以 24 节点配电网为例对所提的方法进行验证分析,说明该方法的有效性。

1 计及碳排放成本的配电网规划基本框架

精细化配电网规划必须同时考虑规划方案和运行方案^[3]。对于规划层,主要决定变电站、DG 以及线路的投资建设,此外多阶段规划能够提供给规划人员更丰富的信息,有利于规划人员进一步提升配电网规划的综合效益。对于运行层,通常用于计算某一规划方案下的最优运行成本,运行成本中

包含运行损耗成本、发电成本以及碳排放成本^[25]。

本文所提出的配电网扩展规划的基本框架如图 1 所示。从图中可以看出,规划层和运行层之间需要多次进行迭代,最终得到最优规划方案及其对应的最优运行方式。

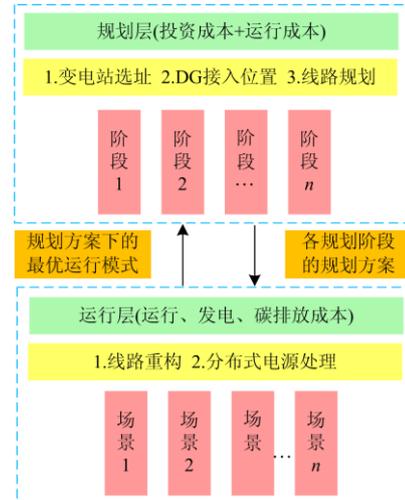


图 1 配电网规划模型求解框架

Fig. 1 Solution framework of distribution network planning model

2 配电网双层扩展规划模型

本文从配电商的角度(Distribution Companies, DISCOs)建立了配电网扩展规划模型,本质是在何时何地建设线路以及变电站,以满足负荷的增长以及分布式电源的消纳,使得投资成本和运行成本最低。传统的配电网规划中缺乏对配电网“开环运行,闭环设计”展开深入研究并建立相应的显式解析数学模型。为了开展精细化规划建模,考虑分布式电源接入的主动配电网最优重构策略,需要协同考虑规划-运行一体化来制定最优的规划方案。本文在规划层考虑变电站、线路以及分布式电源的投资建设,在运行层考虑线路最优重构及电源最优出力,构建配电网双层规划模型来解决这一难题。以下分别介绍规划主问题模型(Master Problem, MP)和运行子问题模型(Sub Problem, SP)。

2.1 规划层模型(主问题)

1) 目标函数

主问题是以投资变量和重构变量为决策变量,使建设成本 F_{con} 和运行成本 F_{opr} 最低,如式(1)所示。计及时间价值,考虑全生命周期的配电网建设总成本现值 F_{con} 如式(2)所示。

$$\min F = F_{\text{con}} + F_{\text{opr}} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{con}} = \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^{Y_d} \frac{1}{(1+r)^{(t-1)Y_d+y}} (IC_t^L + IC_t^S + IC_t^G) \\ IC_t^L = \sum_{ij \in \Omega_L} RR^L \cdot x_{ij,t}^L \cdot c_{ij}^L \\ IC_t^S = \sum_{i \in \Omega_S} RR^S \cdot x_{i,t}^S \cdot c_i^S \\ IC_t^G = \sum_{i \in \Omega_G} RR^G \cdot x_{i,t}^G \cdot c_i^G \\ RR^A = \frac{r(1+r)^{T_A}}{(1+r)^{T_A} - 1} \quad A \in \{L, S, G\} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: 建设成本 F_{con} 包括线路投资成本、变电站投资成本、DG 投资成本; 运行成本 F_{opr} 包括购电成本、负荷削减成本、DG 弃电成本、DG 发电成本, 这部分计算将在运行层中计算后反馈到主问题; T 为规划的阶段数; t 为第 t 阶段; y 为规划阶段 t 的第 y 年; Y_d 为每个规划阶段的年数; r 为折现率; IC_t^L 、 IC_t^S 、 IC_t^G 为线路、变电站、DG 在第 t 阶段的投资系数; $x_{ij,t}^L$ 、 $x_{i,t}^S$ 、 $x_{i,t}^G$ 为线路、变电站、DG 的在 t 阶段的投资变量; c_{ij}^L 、 c_i^S 、 c_i^G 表示线路、变电站、分布式电源投资建设成本; RR^L 、 RR^S 、 RR^G 为线路、变电站、DG 全生命周期投资平摊到每年的折旧系数; Ω_L 、 Ω_S 、 Ω_G 为线路、变电站、DG 的支路和节点集合。上式表示先将各设备投资平摊到每一年, 再折现到当前现值进行求和得到投资现值总成本 F_{con} 。

2) 约束条件

(1) 安装约束

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{ij,t} \leq x_{ij,t+1} \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall t \\ x_{i,t} \leq x_{i,t+1} \quad \forall i \in \Omega_S, \forall t \\ x_{i,t} \leq x_{i,t+1} \quad \forall i \in \Omega_G, \forall t \end{array} \right. \quad (3)$$

上述约束表示, 不允许后一年的建设变量小于前一年的投资建设变量, 以保证配电网规划年内建设的设备不允许重复拆除建设的原则。

(2) 重构约束

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ij,t} \leq 1 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{EL}}, \forall t \\ y_{ij,t} \leq x_{ij,t} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{NL}}, \forall t \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: $y_{ij,t}$ 表示第 t 阶段线路 ij 的重构变量; Ω_{EL} 、 Ω_{NL} 为已建设的线路集合和新建线路集合。上述约束表示, 已经建设的线路或者规划建设的线路才允许投入运行。

(3) 连通性约束

为了防止出现孤岛, 本文引入虚拟功率, 采用虚拟功率法描述防孤岛约束, 其初始约束如式(5)

所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} -(S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t} S_{ij}^{\text{NL}}) \leq f_{ij,t}^L \leq S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t} S_{ij}^{\text{NL}}, \\ \forall ij \in \Omega_L, \forall t \\ -y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \leq f_{ij,t}^L \leq y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t} S_{ij}^{\text{NL}}), \\ \forall ij \in \Omega_L, \forall t \\ -(S_{ij}^{\text{ES}} + x_{i,t} S_{ij}^{\text{NS}}) \leq f_{i,t}^S \leq S_{ij}^{\text{ES}} + x_{i,t} S_{ij}^{\text{NS}}, \\ \forall i \in \Omega_S, \forall t \\ -y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{ES}} + S_{ij}^{\text{NS}}) \leq f_{i,t}^S \leq y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{ES}} + S_{ij}^{\text{NS}}), \\ \forall i \in \Omega_S, \forall t \\ f_{i,t}^G = x_{i,t} S_i^G, \forall i \in \Omega_G, \forall t \\ f_{i,t}^{\text{LD}} = x_{i,t} S_i^{\text{LD}}, \forall i \in \Omega_N, \forall t \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: $f_{ij,t}^L$ 、 $f_{i,t}^S$ 、 $f_{i,t}^G$ 、 $f_{i,t}^{\text{LD}}$ 分别表示流过线路的虚拟功率、变电站节点发出的虚拟功率、DG 发出的虚拟功率以及负荷节点消耗的虚拟功率; Ω_N 表示系统节点集合; S_{ij}^{EL} 、 S_{ij}^{NL} 表示已有线路容量和新建线路容量; S_{ij}^{ES} 、 S_{ij}^{NS} 表示已有变电站容量和扩建变电站容量。在上述约束的作用下, 在某一重构方案下不允许出现仅包含电源点的部分或者只包含负荷点的孤岛部分。

在虚拟功率的基础上, 可以得出配电网的连通性约束为

$$-\sum_{ij \in \alpha(j)} f_{ij,t}^L + \sum_{j \in \beta(j)} f_{j,t}^L + f_{j,t}^S + f_{j,t}^{\text{DG}} - f_{j,t}^{\text{LD}} = 0, \forall j, \forall t \quad (6)$$

式中, $\alpha(j)$ 和 $\beta(j)$ 分别表示以 j 为首节点、末节点的支路集合。

(4) 辐射状约束

在保证拓扑连通性约束的基础上, 需要保证运行网架的开环结构约束。

$$y_{ij,t} = y_{ij,t}^{\text{pos}} + y_{ij,t}^{\text{neg}}, \forall ij \in \Omega_L, \forall t \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{ij \in \beta(j)} y_{ij,t}^{\text{pos}} + \sum_{ij \in \alpha(j)} y_{ij,t}^{\text{neg}} = 1 \quad \text{if } LD_{i,t} > 0, \forall j \in \Omega_N, \forall t \\ \sum_{ij \in \beta(j)} y_{ij,t}^{\text{pos}} + \sum_{ij \in \alpha(j)} y_{ij,t}^{\text{neg}} = 0 \quad \text{if } LD_{i,t} = 0, \forall j \in \Omega_N, \forall t \end{array} \right. \quad (8)$$

式中, $y_{ij,t}^{\text{pos}}$ 、 $y_{ij,t}^{\text{neg}}$ 表示有方向的重构变量。式(7)用于描述功率流向, 由 i 流向 j 的支路或者由 j 流向 i 的支路构成; 对于交流配电网, 负荷大于 0 的节点仅有一条注入功率的支路, 负荷等于 0 的节点(电源点或者未建设的负荷节点)没有注入功率的支路, 如式(8)所示。

(5) 投运顺序约束

当开展配网规划时, 需要分析可再生能源的分布情况, 预测可再生能源的投运阶段, 因此有如下

的投运约束:

$$\begin{cases} x_{i,t}^{\text{DG}} \leq 1 & \text{if } t \geq T_{\text{DG}}, \forall i \in \Omega_S \\ x_{i,t}^{\text{DG}} = 0 & \text{if } t < T_{\text{DG}}, \forall i \in \Omega_S \end{cases} \quad (9)$$

式中, T_{DG} 表示可再生能源的投运阶段。

2.2 运行层模型(子问题)

1) 目标函数

子问题是在主问题规划重构方案的基础上, 以运行功率为决策变量, 最小化运行成本 F_{opr} , 运行成本包括购电成本 OC_t^{B} 、DG 发电成本 OC_t^{DG} 、弃风弃光成本 OC_t^{CG} 、甩负荷成本 OC_t^{CL} 和碳排放成本 $OC_t^{\text{CO}_2}$, 即

$$\min F_{\text{opr}} = \sum_{t=1}^T \sum_{y=1}^{Y_d} \frac{1}{(1+r)^{(t-1)Y_d+y}} \left(OC_t^{\text{B}} + OC_t^{\text{DG}} + OC_t^{\text{CG}} + OC_t^{\text{CL}} + OC_t^{\text{CO}_2} \right) \quad (10)$$

$$\begin{cases} OC_t^{\text{B}} = \sum_{i \in \Omega_S} \sum_h v^{\text{B}} \cdot p_{i,h,t}^{\text{S}} \\ OC_t^{\text{DG}} = \sum_{i \in \Omega_S} \sum_h v^{\text{DG}} \cdot s_{i,h,t}^{\text{DG}} \\ OC_t^{\text{CG}} = \sum_{i \in \Omega_S} \sum_h v^{\text{CG}} \cdot s_{i,h,t}^{\text{CG}} \\ OC_t^{\text{CL}} = \sum_{i \in \Omega_S} \sum_h v^{\text{CL}} \cdot s_{i,h,t}^{\text{CL}} \\ OC_t^{\text{CO}_2} = \left(\sum_{i \in \Omega_S} \sum_h \lambda^{\text{B}} \cdot p_{i,h,t}^{\text{S}} - D_{\text{G}} \right) \cdot p_i^{\text{TCO}_2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: v^{B} 、 v^{DG} 、 v^{CG} 分别表示单位主网出力、分布式电源出力、分布式电源弃电甩负荷的成本; λ^{B} 表示单位火电出力的碳排放量; D_{G} 表示碳排放配额; $p_i^{\text{TCO}_2}$ 表示碳交易价格。上式表示将每个阶段的运行成本折算到当前现值进行求和得到运行现值总成本。

2) 约束条件

(1) 节点功率平衡

配电网网架中, 节点功率平衡方程如式(12)。

$$\begin{cases} - \sum_{ij \in \alpha(j)} p_{ij,h,t}^{\text{L}} + \sum_{ij \in \beta(j)} p_{ij,h,t}^{\text{L}} + p_{j,h,t}^{\text{S}} + s_{j,h,t}^{\text{CL}} \cos \varphi_{j,h,t}^{\text{CL}} + s_{j,h,t}^{\text{DG}} \cos \varphi_{j,h,t}^{\text{DG}} = s_{j,h,t}^{\text{LD}} \cos \varphi_{j,h,t}^{\text{LD}} \quad \forall j \in \Omega_N, \forall h, t - \\ \sum_{ij \in \alpha(j)} q_{ij,h,t}^{\text{L}} + \sum_{ij \in \beta(j)} q_{ij,h,t}^{\text{L}} + q_{j,h,t}^{\text{S}} + s_{j,h,t}^{\text{CL}} \sin \varphi_{j,h,t}^{\text{CL}} + s_{j,h,t}^{\text{DG}} \sin \varphi_{j,h,t}^{\text{DG}} = s_{j,t}^{\text{LD}} \sin \varphi_{j,h,t}^{\text{LD}} \quad \forall j \in \Omega_N, \forall h, t \end{cases} \quad (12)$$

式中: $p_{ij,h,t}^{\text{L}}$ 、 $p_{j,h,t}^{\text{S}}$ 为线路、变电站发出的有功功率; $q_{ij,h,t}^{\text{L}}$ 、 $q_{j,h,t}^{\text{S}}$ 为线路、变电站发出的无功功率;

$s_{j,h,t}^{\text{CL}}$ 、 $s_{j,h,t}^{\text{DG}}$ 、 $s_{j,h,t}^{\text{LD}}$ 表示节点 j 削减负荷、DG 实际出力、负荷消耗容量; $\varphi_{j,h,t}^{\text{CL}}$ 、 $\varphi_{j,h,t}^{\text{DG}}$ 、 $\varphi_{j,h,t}^{\text{LD}}$ 为节点 j 削减负荷、DG 发电功率、负荷对应的功率因数角, 需要注意的是, 当 DG 为光伏时, 则功率因数角取 90° 。

(2) 线路电压降平衡

根据配电网潮流方程, 可以得到如下的线路电压降约束:

$$\begin{aligned} -M(1-y_{ij}^t) &\leq V_{i,h,t} - V_{j,h,t} - 2(p_{ij,h,t} r_{ij} + q_{ij,h,t} x_{ij}) \\ -(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij} &\leq M(1-y_{ij}^t); \forall i, j \in \Omega_L, \forall h, t \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $V_{i,h,t}$ 表示节点 i 当前时间断面的节点幅值的平方; r_{ij} 和 x_{ij} 为线路电阻和线路电抗参数; I_{ij} 表示线路电流幅值的平方; M 为足够大的惩罚系数。上式表示, 当线路投运时, 压降方程需要严格成立; 当线路退运时, 压降约束失效。

(3) DG 弃电功率平衡

DG 的弃电功率用式(14)描述:

$$s_{j,h,t}^{\text{DG}} + s_{j,h,t}^{\text{CG}} = x_{j,h,t}^{\text{G}} S_{j,h,t}^{\text{G}} \quad \forall j \in \Omega_G, \forall h, t \quad (14)$$

式中: $s_{j,h,t}^{\text{CG}}$ 为 DG 在 t 规划阶段下第 h 个运行时段内的弃电功率; $S_{j,h,t}^{\text{G}}$ 表示 DG 在 t 规划阶段下第 h 个运行时段内的额定出力。

(4) 线路功率约束

为了防止子问题出现平方项从而增大模型复杂度^[26], 本文将线路圆约束进行线性化后, 得到如下线路功率约束:

$$\begin{cases} -\sqrt{2} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \leq p_{ij,h,t}^{\text{L}} + q_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq \sqrt{2} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -\sqrt{2} \cdot y_{ij,t} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \leq p_{ij,h,t}^{\text{L}} + q_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq \sqrt{2} \cdot y_{ij,t} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -\sqrt{2} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \leq p_{ij,h,t}^{\text{L}} - q_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq \sqrt{2} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -\sqrt{2} \cdot y_{ij,t} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \leq p_{ij,h,t}^{\text{L}} - q_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq \sqrt{2} \cdot y_{ij,t} \cdot (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \leq p_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -(S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \leq p_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \leq q_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq y_{ij,t} (S_{ij}^{\text{EL}} + S_{ij}^{\text{NL}}) \\ -(S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \leq q_{ij,h,t}^{\text{L}} \leq (S_{ij}^{\text{EL}} + x_{ij,t}^{\text{L}} S_{ij}^{\text{NL}}) \end{cases} \quad \forall ij \in \Omega_L, \forall h, t \quad (15)$$

上式为线路功率约束进行线性化处理后的表达式。

(5) 变电站出力约束

同理, 变电站出力约束同样进行线性化处理, 得到如下的变电站出力约束。

$$\begin{cases} 0 \leq p_{i,h,t}^S + q_{i,h,t}^S \leq \sqrt{2} \cdot (S_i^{ES} + x_i^S \cdot S_i^{NS}) \\ 0 \leq p_{i,h,t}^S - q_{i,h,t}^S \leq \sqrt{2} \cdot (S_i^{ES} + x_i^S \cdot S_i^{NS}) \\ 0 \leq p_{i,h,t}^S \leq S_i^{ES} + x_i^S \cdot S_i^{NS} \\ 0 \leq q_{i,h,t}^S \leq S_i^{ES} + x_i^S \cdot S_i^{NS} \end{cases} \quad (16)$$

$$\forall i \in \Omega_S, \forall h, t$$

上式同样表示变电站功率线性化后的表达式。

(6) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_{i,h,t} \leq V_{\max} \quad \forall i \in \Omega_N, \forall h, t \quad (17)$$

式中, V_{\min} 、 V_{\max} 为节点允许的最低、最高电压幅值的平方。

(7) 削负荷约束

$$0 \leq s_{i,h,t}^{CL} \leq S_{i,h,t}^L \quad \forall i \in \Omega_N, \forall h, t \quad (18)$$

式中, $S_{i,h,t}^L$ 表示负荷节点 i 在 t 规划阶段第 h 个运行阶段的额定容量。式(18)表示的是节点削减负荷不超过当前的节点负荷。

(8) DG 出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq s_{i,h,t}^{DG} \leq S_{i,h,t}^G \\ 0 \leq s_{i,h,t}^{CG} \leq S_{i,h,t}^G \end{cases} \quad \forall i \in \Omega_G, \forall h, t \quad (19)$$

式(19)表示, 对于任意的规划场景以及运行场景, DG 实际出力以及 DG 削减容量小于等于 DG 发电容量。

2.3 模型简化

对于线路功率平衡约束, 需要考虑其是否投运, 运用大 M 法可将等式约束转化为

$$\begin{aligned} -M(1-y_{ij,t}) &\leq V_{i,h,t} - V_{j,h,t} - 2(p_{ij,h,t}r_{ij} + q_{ij,h,t}x_{ij}) \\ -(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij} &\leq M(1-y_{ij,t}) \end{aligned} \quad (20)$$

考虑到配网中网损所占成本比重小于 3%, 本文忽略线路损耗, 可得:

$$\begin{aligned} -M(1-y_{ij,t}) &\leq V_{i,h,t} - V_{j,h,t} - 2(p_{ij,h,t}r_{ij} + q_{ij,h,t}x_{ij}) \leq \\ &M(1-y_{ij,t}) \end{aligned} \quad (21)$$

2.4 模型框架(图 2)

由此可见, 上述配电网规划模型是一个多阶段多变量的混合整数规划问题, 直接对模型进行整体求解难度较大。

为了解决上述问题, 按照 2.1 和 2.2 将模型划分为主子问题:

$$\min F(x) \quad (22)$$

$$\text{s.t. } G(x, y) \leq 0 \quad (23)$$

$$\min f(x^*, y) \quad (24)$$

$$\text{s.t. } g(x^*, y) \leq 0 \quad (25)$$

主问题(22)、(23)是一个含有大量离散变量的混合整数规划问题, 包含式(1)一式(9), 线性化处理后的子问题(24)、(25)是一个线性规划问题, 包含(10)一(21)。

求解的具体流程为:

步骤 1 导入配电网规划模型相关的数据和参数, 设置算法的收敛间隙 GAP。

步骤 2 基于递归求解策略的 BC 算法, 求解松弛后的主问题, 得到当前主问题最优解 x^* 。

步骤 3 分别求解主问题所得最优规划方案下的各个子问题最优解, 得到各个规划阶段的最优解 y^* 及其对偶变量 λ 。

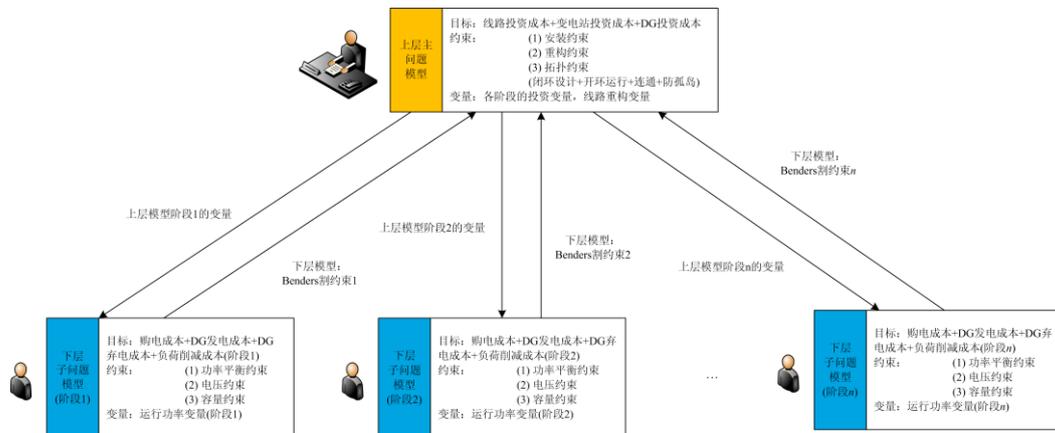


图 2 基于现代 Benders 分解的配电网规划模型求解框架

Fig. 2 Solution framework of distribution network planning model based on modern Benders decomposition

步骤4 动态地将 Benders Cut 添加到主问题中，检验主问题的解是否满足 Benders Cut。若满足，则作为最优解的一个上界；若不满足，则继续对主问题进行分支。

核心的区别是，传统 Benders 分解^[27-28]要重新求解添加约束后的主问题，不断迭代求解，而现代 Benders 分解则在添加约束后检验，如果满足约束，则该节点不再分支，若不满足约束，则继续对该节点进行分支，形成问题的搜索树。然而，该算法的缺点是，求解子问题的次数可能会增加，因此，该算法适用于子问题规模小，主问题规模大的模型中。

3 算例分析

3.1 算例说明

本文选取 24 节点配电系统为算例进行分析^[22]。为保证论文的可复现性，本文将模型中涉及的数据展示在附录中供读者参考。

节点、线路、变电站、新能源以及负荷数据可从文献^[29]中获取。

本文算例中，基准电压为 20 kV，考虑 3 个规划阶段，每个规划阶段的年数为 5 年。考虑 4 种典型运行场景，每个运行考虑 24 个时间点，折现率 7.1%，向主网购电成本为 70 美元/MW，切负荷成本 200 美元/MW，可再生能源发电成本 10 美元/MW，弃电成本 200 美元/MW。火力发电机组的碳排放系数为 0.9，发电机组单位有功出力的碳排放配额分配率为 0.798 t/MWh，碳交易价格 20 美元/t。

3.2 仿真结果

本文仿真的硬件平台为 Intel(R) Core(TM) i7-10700HQ CPU @ 2.90 GHz，16 GB 内存，开发环境为 Python 3.9，求解器采用 Gurobi 9.1，对规划优化模型进行求解，运行时间约为 630 s。

本文设置以下算例进行对比分析：

- (1) 规划目标函数中不考虑碳排放成本；
- (2) 规划目标函数中考虑碳排放成本。

初始阶段的网架结构图如图 3 所示，对模型进行优化规划，规划阶段一、规划阶段二、规划阶段三的规划方案如图 4—图 6 所示。图中，红色方框表示变电站，蓝色虚线表示待建设线路，红色实线表示规划建设的线路或者已建设的线路，绿色三角形表示该节点接入分布式电源。

从上述的规划方案图可以直观地看出，随着负荷的发展以及分布式电源的接入，各个规划阶段的网架拓扑变化。

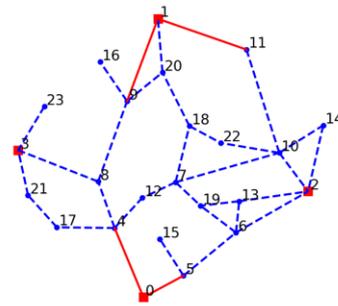


图 3 初始阶段网架结构图
Fig. 3 Architecture of initial stage

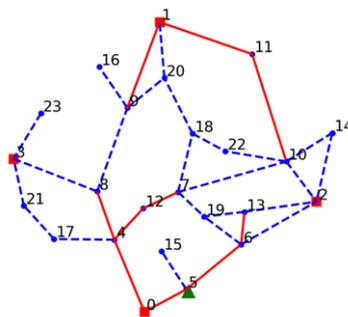


图 4 阶段一规划方案
Fig. 4 Planning scheme of stage 1

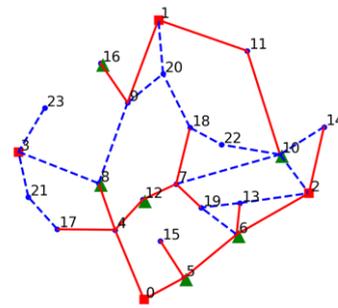


图 5 阶段二规划方案
Fig. 5 Planning scheme of stage 2

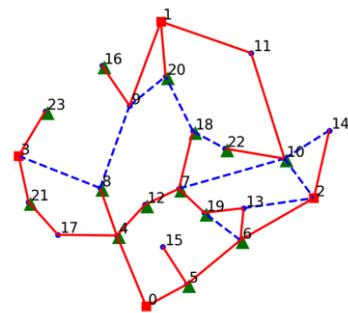


图 6 阶段三规划方案
Fig. 6 Planning scheme of stage 3

从表 1 可以得出以下结论:

1) 考虑碳排放成本后, 碳排放成本在第一个规划节点有了一定程度的提升, 这是因为在第一阶段, 本文所研究的规划片区分布式电源含量较低, 需要向主网购电, 从而产生较多的碳排放, 增大碳排放成本, 然而从整个规划流程来看, 第二阶段和第三阶段的碳排放成本为负数(碳排放量小于碳配额, 余下的碳排放配额可以在碳交易市场上进行交易进行盈利), 从全局规划建设角度, 引入碳交易市场后, 分布式电源更多地接入配电网, 使配电网逐渐转化为含有高比例可再生能源的新型配电网。

2) 考虑碳交易市场后, 各个阶段线路的建设成本有所下降, 而分布式电源的建设成本则有了一定程度的提升, 这是因为在碳交易市场的驱动下, 配电网倾向于建设含有高比例可再生能源的配电网, 减少从主网购电从而产生较高的碳排放成本。

3) 虽然方案一第一阶段的总成本(287 374 美元)要低于方案二第一阶段的总成本(287 406 美元), 但是从配电网规划的全生命周期角度, 方案一的综合成本(1 691 322 美元)高于方案二的综合成本(1 647 300 美元)。这表明, 引入碳交易市场后, 从长远的角度看能够提升配电网规划的综合效益。

表 1 规划方案对比

Table 1 Comparison of planning schemes

| 方案 | 规划阶段 | 线路投资成本/美元 | 变电站建设成本/美元 | DG 建设成本/美元 | 购电成本/美元 | 碳排放成本/美元 | DG 发电成本/美元 | DG 弃电成本/美元 | 切负荷成本/美元 | 各阶段成本/美元 | 总成本/美元 |
|-----|------|-----------|------------|------------|---------|----------|------------|------------|----------|----------|-----------|
| 方案一 | 1 | 124 694 | 0 | 2 259 | 159 731 | 0 | 690 | 0 | 0 | 287 374 | |
| | 2 | 136 583 | 114 895 | 14 108 | 238 010 | 0 | 4 830 | 0 | 4 502 | 512 928 | 1 691 322 |
| | 3 | 129 693 | 326 148 | 54 838 | 344 690 | 0 | 16 462 | 236 | 18 953 | 891 020 | |
| 方案二 | 1 | 123 474 | 0 | 2 530 | 156 897 | 3 609 | 896 | 0 | 0 | 287 406 | |
| | 2 | 131 870 | 114 895 | 19 416 | 233 196 | -2 131 | 5 328 | 0 | 3 978 | 506 552 | 1 647 300 |
| | 3 | 119 864 | 326 148 | 56 335 | 335 146 | -19 301 | 16 934 | 0 | 18 216 | 853 342 | |

3.3 灵敏度分析

为了研究低碳配电网建设要求下变电站碳排放系数对规划方案的影响, 分别设置碳排放系数为 0.9, 0.8, 0.5, 0.2, 对比不同碳排放系数对配电网多阶段规划的影响, 优化规划计算结果如表 2 所示。

表 2 计算结果表明, 当变电站的碳排放系数降低时, 以建设低碳配电网为目标的规划方案将更早、更多地建设变电站。因此, 若能改进火力发电技术, 提高燃烧效率, 降低碳排放系数, 则在建设低碳配电网的目标驱动下, 允许建设更多的火力发电厂。

表 2 碳排放系数与变电站多阶段规划结果

Table 2 Carbon emission coefficients and substation multi-stage planning results

| 碳排放系数 | 规划阶段 | 变电站 | | | |
|-------|------|-----|----|----|----|
| | | S0 | S1 | S2 | S3 |
| 0.9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0.8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0.5 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0.2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |

4 结论

本文建立起考虑碳交易成本的配电网多阶段扩展规划模型, 并采用现代 Benders 分解进行优化求解, 根据算例仿真结果得到以下结论:

1) 考虑碳排放成本后, 从长远的角度看能够提升配电网规划的综合效益。

2) 碳交易市场的引入, 能促进配电网更多地接入可再生能源, 形成更高比例的可再生能源。

3) 若能有效降低碳排放系数, 则在双碳政策的驱动下, 倾向于建设更多“低碳”变电站。

为了进一步完善配电网规划模型, 后续可以从绿色交易证书、碳能负荷流等角度进一步探索低碳政策对配电网规划的影响。

参考文献

[1] IEA CO2 emissions from fuel combustion: overview, IEA, Paris[EB/OL].[2020-07-25]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview>.

[2] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.

[3] 李晨, 耿亮, 熊焱, 等. 基于计量经济学的能源转型背景下全球碳排放预测分析方法[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 51-58.
LI Chen, GENG Liang, XIONG Yi, et al. Forecasting and Analyzing global carbon emissions based on econometrics against the background of energy transformation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 51-58.

[4] 文明, 胡资斌, 龙乙林, 等. 考虑碳排放惩罚因子的综合能源系统优化规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 11-18.
WEN Ming, HU Zibin, LONG Yilin, et al. Optimal planning of integrated energy system considering carbon emission penalty factor[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 11-18.

[5] 毛亚哲, 何柏娜, 王德顺, 等. 基于改进深度强化学习的智能微电网群控制优化方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 19-25, 58.
MAO Yazhe, HE Baina, WANG Deshun, et al. Optimization method for smart multi-microgrid control based on improved deep reinforcement learning[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 19-25, 58.

[6] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.

[7] 平新乔, 郑梦圆, 曹和平. 中国碳排放强度变化趋势与“十四五”时期碳减排政策优化[J]. 改革, 2020(11): 37-52.
PING Xinqiao, ZHENG Mengyuan, CAO Heping. The

change trend of carbon emission intensity in China and the policy optimization of carbon emission reduction during the 14th five-year plan period[J]. Reform, 2020(11): 37-52.

[8] 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 Xiaohui, LIANG Junxue, ZHAO Cuimei, et al. Research on low-carbon power planning with gas turbine units based on carbon transaction[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(7): 92-98.

[9] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 5-11.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 5-11.

[10] 葛少云, 张有为, 刘洪, 等. 考虑网架动态重构的主动配电网双层扩展规划[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 180-190.
GE Shaoyun, ZHANG Youwei, LIU Hong, et al. Bi-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 180-190.

[11] 唐俊熙, 王梓耀, 张俊潇, 等. 基于文化蚁群算法的高可靠多电源配电网规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 99-107.
TANG Junxi, WANG Ziyao, ZHANG Junxiao, et al. High reliability multi-power distribution network planning model based on memetic ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 99-107.

[12] WANG Z, LIN D, ZENG G, et al. A practical large-scale distribution network planning model based on elite ant-Q[J]. IEEE Access, 2020, 8: 58912-58922.

[13] 宋倩芸. 计及多种分布式能源运行的配电网双层优化规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 53-61.
SONG Qianyun. A bi-level optimization planning method for a distribution network considering different types of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 53-61.

[14] 赵磊, 杨莉. 计及复杂场景运行的主动配电网多阶段规划[J]. 能源工程, 2020(4): 74-81.
ZHAO Lei, YANG Li. Multi-stage active distribution network planning in complex operation scenarios[J]. Energy Engineering, 2020(4): 74-81.

[15] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35.

[16] 伍也凡, 刘浩田, 肖振锋, 等. 考虑源-网-荷不确定性

- 的增量配电网规划研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 177-187.
- WU Yefan, LIU Haotian, XIAO Zhenfeng, et al. Review of incremental distribution network planning considering the uncertainty of source-network-load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 177-187.
- [17] 王颖, 许寅, 和敬涵, 等. 基于断线解环思想的配电网辐射状拓扑约束建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2395-2404.
- WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Radiality constraint modelling method in distribution network based on cutting-line and opening-loop idea[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2395-2404.
- [18] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J/OL]. 高电压技术: 1-12[2021-08-01]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
- HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of low-carbon power system planning under double carbon goals[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12[2021-08-01]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
- [19] VL A, GW B, JK B, et al. Development of GB distribution networks with low carbon technologies and smart solutions: scenarios and results[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119.
- [20] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.
- FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 92-99.
- [21] 高明, 许叶林, 吕盼, 等. 基于免疫萤火虫算法的配电网低碳目标网架规划分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(1): 31-35.
- GAO Ming, XU Yelin, LÜ Pan, et al. Planning and analysis of low carbon target framework based on immune firefly algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 31-35.
- [22] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 127-133.
- ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 127-133.
- [23] 陈旷, 罗益珍, 胡志坚, 等. 面向低碳经济的配电网多目标分层规划[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(7): 619-626.
- CHEN Kuang, LUO Yizhen, HU Zhijian, et al. Multi-objective hierarchical planning of distribution network towards low-carbon economy[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(7): 619-626.
- [24] MUNOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Joint expansion planning of distributed generation and distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2579-2590.
- [25] 宁超, 张峰, 李卫华, 等. 基于空间负荷布局的低碳主动配电网扩展规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 37-42.
- NING Chao, ZHANG Feng, LI Weihua, et al. Research on expansion planning of low carbon active distribution network based on space load layout[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 37-42.
- [26] 吴文传, 张伯明, 巨云涛. 主动配电网网络分析与运行调控[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [27] BINATO, SILVIO, PEREIRA, et al. A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 235-240.
- [28] 王成山, 张义. 基于 Bender's 分解和内点法的无功优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 46-50, 62.
- WANG Chengshan, ZHANG Yi. Optimal reactive power planning using Bender's decomposition technique and interior point method[J]. Proceedings of CSU-EPSC, 2003, 15(4): 46-50, 62.
- [29] 彭静. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[EB/OL]. [2021-09-10]. https://pan.baidu.com/s/1BrVU1_omAqVGO3YxHh0CKw.
- PENG Jing. "double carbon" target under multi stage distribution network expansion planning[EB/OL]. [2021-09-10]. https://pan.baidu.com/s/1BrVU1_omAqVGO3YxHh0CKw.

收稿日期: 2021-05-16; 修回日期: 2021-10-13

作者简介:

彭静(1981—), 女, 工程师, 主要研究方向为供电服务指挥、配网运行控制等; E-mail: 18653902007@163.com

王军(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电网智能调度和运行控制等; E-mail: lydlwangjun@163.com

亓富军(1981—), 男, 教授级高工, 主要研究方向为配电网智能调度和运行控制等。E-mail: lyqifujun@163.com

(编辑 葛艳娜)