基于精英蚁群Q算法的中压配电网双Q规划模型

王梓耀,陈俊斌,林 丹,曾广璇,余 涛
(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要:为了有效应用数字化技术提供的精细化地理与负荷信息,根据中压配电网的基本特点,将配电网中的元件抽象为图论中的节点和支路,以经济性和可靠性为目标,建立一种新型的大规模中压配电网双Q规划模型;将0-1变量编码方式转化为序列整数编码方式,降低模型求解的复杂度;提出精英蚁群Q算法,并利用该算法求解辐射状网架,根据最短路法和联络优先原则设置联络线,经过反复迭代得到闭环最优网架。广州某新建园区的算例结果验证了所提模型与算法的有效性。

关键词:大规模配电网规划;双Q规划模型;精英蚁群Q算法;序列编码;最短路法;闭环设计
中图分类号:TM 715 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202010004

0 引言

电网规划人员常常面临着一个复杂的问题,即如何优化配电网的网架结构,以便给区域内广泛分布的电力负荷供电。目前配电网网架规划主要分为2类:一类是在含有备选线路的区域中进行配电网扩展规划[1-3],另一类是在不含备选线路的新建园区中进行规划[4-6]。显然,前者需要规划人员较多地介入以确定备选线路,适用于小规模或局部需要改造规划的配电网区域。对于含有大量节点同时考虑地理信息系统GIS(Geographic Information System)的配电网规划,需要结合实际各系统所提供的数据进行建模分析。

随着数字化平台的发展,配电网网络建模需要进一步根据公共信息模型CIM(Common Information Model)的规范对各个系统平台信息进行整合与集成,如何有效利用数字化建模技术提供的丰富数据信息[7],对大规模配电网网架进行全局智能规划,是规划人员面临的一个棘手问题[8]。

近年来,国内外学者从不同角度对配电网网架规划进行建模分析。文献[9]考虑GIS的路网约束,建立城市配电网规划模型,并用混合整数规划进行求解;文献[10]建立交直流混合微电网双层规划模型,并运用智能优化算法进行求解。然而目前多数规划模型未考虑可靠性。基于此,文献[11]采用简化可靠性算法,建立考虑可靠性约束的配电网规划模型;文献[12-13]运用风险评估理论对配电网网架可靠性进行评估,综合考虑经济性和可靠性,更符合实际需求。为了满足用户对高供电可靠性的要求,现代配电网规划需要兼顾经济性和可靠性,也即考虑数量(Quantity)和质量(Quality)的配电网双Q规划[14]。

此外,目前大多数县级以上配电网的馈线数量已达到百条以上,因此配电网规划本质上是一个大规模离散非凸的复杂优化问题,常用的求解算法包括经典数学方法和智能算法。在面对高维度非凸问题时,经典数学方法往往难以收敛甚至无法求解,智能算法对模型的依赖程度较低,在配电网规划中得到广泛应用,但也存在搜索时间长且搜索较为盲目等缺点[15]。

因此,在智能配电网快速发展的新形势下,迫切需要建立一种考虑路网约束的高可靠性配电网规划模型,并运用合适的数学优化方法在有限时间内对大规模的复杂模型进行全局优化求解。

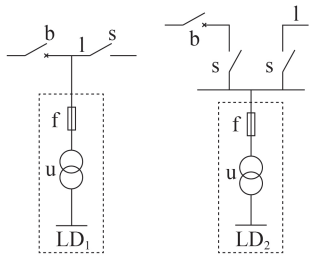
本文基于实际工程需求,建立一种考虑路网约束和接线模式的配电网双Q规划模型。首先,基于城市配电网的基本特征对元件进行抽象简化,得到一系列电气节点,以可靠性和经济性为目标函数建立配电网规划模型;然后,在旅行商问题TSP(Traveling Salesman Problem)[16]的启发下,提出运用序列编码方式降低模型求解的复杂度,并结合精英蚁群Q EAQ(Elite Ant-Q)算法对模型进行求解;最后将本文提出的模型和算法应用于广州某新建的商务园区,验证其有效性。

收稿日期:2019-11-22;**修回日期:**2020-08-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777078);广东省普通高校基础研究与应用基础研究重点项目(2018KZDXM001);国家电网有限公司总部科技项目(能源互联网环境下的多源互联配电网及多样化用电方式的需求策略系统研究);中国南方电网公司科技项目(GDKJXM20172942)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777078),the Key Project of Basic Research and Applied Basic Research of General Colleges and Universities in Guangdong Province(2018KZDXM001),the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research on Demand Strategies of Multi-source Interconnected Distribution Network and Diversified Power Consumption in Energy Internet) and the Science and Technology Program of China Southern Power Grid(GDKJXM20172942)

1　配电网规划拓扑抽象

1.1　节点支路抽象

在我国城市中压配电网中，电缆网中配变下的负荷经过环网柜接入馈线，架空线中配变下的负荷经过熔断器接到架空干线。基于此，本文假设架空线和电缆的基本单元如图1所示。图中列出了本文所考虑的基本元件，包括线路l、断路器b、分段开关s、熔断器f、配电变压器u以及负荷LD。



（a）架空线路　　（b）电缆线路

图1　馈线中节点-支路示意图

Fig.1　Schematic diagram of node-branch in feeder

本文将虚线框中的元件抽象为节点，2个开关之间的架空线段以及2个环网柜之间的电缆线路均抽象为支路。

1.2　路网拓扑数据处理

在进行配电网规划前，首先需要导入相关数据并对网络进行建模分析，从GIS中导出XML文件并解析出规划所需的路网拓扑信息。

以一个简单的功能区网络为例进行说明，如图2所示对其按照路网进行网络划分。图中，节点1—25的网格交点为路网节点，矩形节点和圆形节点分别表示变电站节点和负荷节点，本文将这两者称为电气节点；实线表示可开通的道路，虚线表示不可开通的道路。

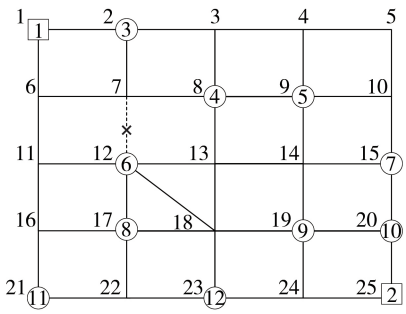


图2　网络片区示意图

Fig.2　Schematic diagram of network area

为了对大规模、多节点的复杂拓扑结构进行存储和运算，定义支路信息矩阵$\boldsymbol{B}_{\text{road}}$对数据进行储存：

$$\boldsymbol{B}_{\text{road}}=(i,j,L_{i,j})_{m\times 3} \tag{1}$$

其中，i、j分别为对应路网支路的首节点和末节点；$L_{i,j}$为节点i和节点j之间的路网支路长度；m为路网支路数量。

特别地，对于网络片区中存在的如下个别情况需要进行特殊处理：

（1）若实际道路中2个路网节点间不相通，则两点间支路长度$L_{i,j}$设置为无穷大，如图2中的支路7–12可以表示为（7，12，∞）。

（2）若实际道路中2个路网节点间存在斜向道路，则直接在矩阵中补充，如图2中的支路12–18可以表示为（12，18，$L_{12,18}$）。

1.3　最短路邻接矩阵

得到路网信息矩阵后计算任意2个电气节点之间的最短路径，便可将路网支路信息矩阵转化为电气节点间的最短路邻接矩阵$\boldsymbol{A}$，即：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，d_{ij}为电气节点i和j之间的最短路距离，其值由运用Dijkstra最短路法[17]计算得到。

2　配电网双Q规划模型

我国城市中压配电网具有“闭环设计，开环运行”的特征。正常运行时联络开关断开，故障时闭合联络开关进行转供电，在规划设计中线路不存在分支，最终规划网架以环网的形式存在。

在对节点进行抽象后，城市中压配电网双Q规划模型可以转化为在满足电气及拓扑约束的情况下，从电源点出发引出若干馈线，以经济性和可靠性为目标设计网架为一系列负荷点供电的问题。

2.1　决策变量

配电网规划的本质是优化节点之间的连接关系，本文模型决策变量如下：

$$x_{ijk}=\begin{cases}1 & \text{馈线 } k \text{ 先给节点 } i \text{ 再给节点 } j \text{ 供电} \\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{3}$$

$$y_{ik}=\begin{cases}1 & \text{馈线 } k \text{ 给节点 } i \text{ 供电} \\ 0 & \text{馈线 } k \text{ 不给节点 } i \text{ 供电}\end{cases} \tag{4}$$

$$B_{sk}=\begin{cases}1 & \text{馈线 } k \text{ 是从变电站 } s \text{ 出线} \\ 0 & \text{馈线 } k \text{ 不是从变电站 } s \text{ 出线}\end{cases} \tag{5}$$

其中，$i,j\in N$，$k\in K$，$s\in S$，N为网络中所有节点集合，K为馈线集合，S为变电站节点集合；x_{ijk}表示馈线k是否先连接到节点i再连接到负荷节点j；y_{ik}表示馈线k是否给负荷节点i供电；B_{sk}表示馈线k是否从变电站s中引出。

2.2　目标函数

（1）投资成本。

根据1.1节中架空线或电缆的基本单元结构，同时考虑时间价值，则投资成本费用f_1主要由线路投资成本和开关设备投资成本的等年值组成，即：

$$\begin{cases} f_1 = C_{\text{inv}} \dfrac{r_{\text{d}}\left(1+r_{\text{d}}\right)^{\tau}}{\left(1+r_{\text{d}}\right)-1} \\ C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{l} c_{\text{inv}}^{\text{LINE}} x_{ijk} d_{ij} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{l} c_{\text{inv}}^{\text{EQU}} x_{ijk} \end{cases} \tag{6}$$

其中，n为网络中节点总数；l为馈线总数；C_{inv}为线路和设备投资建设成本；r_{d}为折现率；τ为规划年限；$c_{\text{inv}}^{\text{LINE}}$为单位长度线路的建设投资成本，$c_{\text{inv}}^{\text{EQU}}$为各设备的投资建设成本，两者的取值由线路、设备类型决定。

（2）运维成本。

网架建成后每年均需运行和维护，每年的运维成本f_{M}主要包括线路和元件设备的维护成本C_{rep}以及网架运行损耗成本C_{loss}：

$$\begin{cases} f_{\text{M}} = C_{\text{rep}} + C_{\text{loss}} \\ C_{\text{rep}} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{l} c_{\text{rep}}^{\text{LINE}} x_{ijk} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{l} c_{\text{rep}}^{\text{EQU}} x_{ijk} \\ C_{\text{loss}} = c_{\text{loss}} \Delta P_{\text{loss}} \tau_{\max} \\ \Delta P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^{l} G_{\text{p},k} \Delta P_{\text{L0},k} \\ \Delta P_{\text{L0},k} = \dfrac{S_k^2}{U_{\text{e},k}^2} r_0 L_k = \dfrac{\left(\sum_{i=1}^{n} P_i y_{ik}\right)^2}{\cos^2\varphi_k U_{\text{e},k}^2} r L_k \\ L_k = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ijk} d_{ij} \end{cases} \tag{7}$$

其中，$c_{\text{rep}}^{\text{LINE}}$为线路的维修成本系数，$c_{\text{rep}}^{\text{EQU}}$为设备的维修成本系数，两者的取值由线路、设备类型决定；c_{loss}为网架运行损耗费用的单位成本；ΔP_{loss}为规划网架的运行损耗；$\tau_{\max}$为最大负荷年运行时间；$G_{\text{p},k}$为根据馈线k上的负荷分布确定的损失系数[18]；$\Delta P_{\text{L0},k}$为所有负荷集中于馈线k末端时的功率损耗；S_k为馈线k所带总负荷的视在功率；$\cos\varphi_k$为馈线k的功率因数；$U_{\text{e},k}$为馈线k的额定电压；r_0为馈线上单位长度的电阻；L_k为馈线k总长度；P_i为负荷节点i的峰值负荷，其值可从数字平台的负荷预测模块中获取。

（3）可靠性成本。

配电网的拓扑连接关系和可靠性密切相关。为了准确评估规划配电网架中不同类型负荷停电引起的经济损失，根据文献[19]，采用停电损失函数S_{out}结合可靠性计算所得馈线负荷点停电时间来评估每年的停电损失f_{R}：

$$f_{\text{R}} = \sum_{i=1}^{n}\left(S_{\text{out},p}\left(U_i\right)P_i\right) \tag{8}$$

其中，下标p表示该节点的负荷类型（分为住宅类、政府类、商业类、小工业类及重要工业类）；U_i为负荷节点i的停电时间，假设断路器只装设在变电站出线端，其余开关设备均为分段开关，则U_i可根据文献[20]中适用于大规模配电网的可靠性评估算法得到。

2.3 约束条件

（1）拓扑约束。

为了满足配电网开环运行的拓扑约束，需要满足以下条件：

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{l} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \tag{9}$$

$$\sum_{k=1}^{l} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \tag{10}$$

$$\sum_{i=n_{\text{s}}+1}^{n} x_{ijk} = \sum_{u=n_{\text{s}}+1}^{n} x_{juk} \quad \forall k \in K \tag{11}$$

其中，n_{s}为电源点数量。式（9）表示1组馈线1次只能给1个负荷节点供电；式（10）表示每个负荷点只能被1组馈线供电，不能被多组馈线供电；式（11）表示保证规划接线的连续性，即给负荷节点j供电后必须从该负荷节点出发连接到下一个负荷节点。

（2）馈线容量约束。

任意一条馈线所带的负荷不超过线路的允许容量：

$$\sum_{i=1}^{n} P_i y_{ik} \leqslant \lambda \times \sqrt{3}\, U_{\text{e},k} I_{\text{e},k} \cos\varphi_k \quad \forall k \in K \tag{12}$$

其中，$I_{\text{e},k}$为馈线k的额定电流；λ为实用系数，在规划设计阶段，要求线路可转供率为100%，当接线模式为2-1单环网时，投运线路可带负荷为馈线容量的50%，λ取0.5，当接线模式为两供一备时，备用线路平时不带负荷，投运馈线可带负荷为馈线容量的100%，λ取1，其余接线模式根据实际供电能力确定λ的值。

（3）变电站出线数量约束。

每座变电站的出线间隔有限，因此，每座变电站出线数量不超过其允许的最大出线数量：

$$\sum_{k=1}^{l} B_{sk} \leqslant M_{\text{smax}} \quad \forall s \in S \tag{13}$$

其中，M_{smax}为变电站s允许的最大出线数量。

（4）接线模式约束。

为了进行闭环设计，需要根据接线模式生成闭环网架结构。在配电网网架规划中，接线模式的选择对配电网可靠性有重大影响。根据《配电网规划技术指导原则》，本文主要对城市10 kV配电网常用的3种接线模式（辐射状、2-1单环网、两供一备）单元进行建模分析，如附录A中图A1所示。

根据抽象所得接线模式特征，对每条馈线末端节点进行联络设置即可生成闭环网络，联络优先顺序为：

a. 基于最短路法将不同变电站出线的馈线组对应的末端负荷节点进行站间联络，联络接线直至只剩1座变电站可出线；

b. 基于最短路法将同一变电站出线的馈线末端负荷节点进行站内联络，联络接线直至只剩1个

馈线组或所有馈线组均已成环；

c. 基于最短路法将馈线末端负荷节点和剩余允许出线数量较多的电源节点进行备用联络，直至所有馈线组均有备用线路。

若为辐射状接线模式，则只需直接求解上述模型即可生成辐射状网架；若为2-1单环网接线模式，则先按**a**进行联络设置，再按**b**进行联络设置；若为两供一备接线模式，则先形成单环网接线模式，再按**c**进行联络设置。

2.4　模型构建

根据前文所述，目标函数和约束条件可以构成如下模型：

$$\begin{cases}\min\left(f_{\mathrm{I}}+f_{\mathrm{M}}+f_{\mathrm{R}}\right)\\ \text{s.t. 式(9)—(13)}\end{cases}\tag{14}$$

式(14)是一个带有多个复杂约束的离散优化问题，决策变量是电气节点之间的连接关系。若采用遍历算法，计算的时间复杂度为$O(s^s(n-s)!)$，这是一个典型的NP(Non-deterministic Polynomial)难问题。当面对大规模问题时，容易产生组合爆炸问题而无法求解。因此，寻找一种合适的编码方式及算法是求解模型的关键。

3　配电网双Q规划模型求解算法

3.1　适应度函数设计

进一步分析可知，可靠性评估计算涉及拓扑搜索和判断，难以直接用数学表达式建立可靠性指标和决策变量之间的显式函数表达式，所建模型是一个离散非凸的优化模型，用经典数学方法难以优化求解。

为了对模型进行求解，首先采用罚函数法[21]将问题转化为无约束优化问题，适应度函数F设计为：

$$F=f_{\mathrm{I}}+f_{\mathrm{M}}+f_{\mathrm{R}}+\eta N_{\mathrm{p}}\tag{15}$$

其中，N_{p}为不符合约束条件的越限数；η为惩罚系数。

3.2　EAQ算法

考虑到配电网规划对算法的要求是在有限的时间内尽可能寻找到最优解，本文提出一种适用于求解所建模型的EAQ算法。

3.2.1　EAQ算法与配电网规划的对应关系

蚁群算法对求解图的路径搜索问题具有明显优势，而强化学习算法在求解离散优化问题中得到广泛应用。受此启发，本文将强化学习算法中的Q-learning与蚁群算法结合，并引入精英策略，形成多智能体协同学习框架。表1给出了EAQ算法与配电网规划之间的对应关系。

表1　EAQ算法与配电网规划的对应关系

Table 1　Corresponding relation between EAQ algorithm and distribution network planning

EAQ算法元素	配电网规划中的元素
状态r	当前馈线连接的节点r
动作w	采取动作后馈线由上一个节点连接到节点w
环境	馈线长度以及网架可靠性
记忆矩阵$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$	各种规划方案的历史增益记录
奖励函数$\Delta\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$	根据配电网规划适应度函数制定（搜索到路径则奖励，否则不奖励）
精英智能体	每一代中适应度值最小对应的m个规划方案

3.2.2　算法编码

由2.1节可知，本文模型含有3种类型的0-1变量，直接采用0-1变量的编码方式求解多节点配电网规划模型容易产生“维数爆炸”问题，导致无法收敛求解。

受TSP的启发，同时对模型中式(9)—(11)所示拓扑约束条件进行深入研究后，采用序列整数编码表示馈线的连接方案，使迭代寻优过程中产生的解均为满足拓扑约束的“有效解”，大幅提升寻优效率。以图2为例，若其中一组馈线是从变电站2中引出，再接到负荷点10、7、5，则编码序列为2-10-7-5。同时，引入禁忌搜索表记录访问过的节点，保证每个负荷节点只由1组馈线供电。于是，每次寻优每个智能体的解便自动满足式(9)—(11)所示拓扑约束条件，使原先大规模复杂优化问题得以简化。

3.2.3　起点位置分配

为了合理分配各座变电站出线，首先需要运用轮盘赌算法[22]为所有智能体分配初始电源点位置。以变电站可出线的数量为比例分配智能体的初始位置，将智能体分配到电源起点，公式如下：

$$p_0^s=\frac{M_s}{\sum_{v\in S}M_v}\tag{16}$$

其中，p_0^s为智能体分配到变电站s的概率；M_s为变电站s可以引出线的馈线数。

当馈线所带负荷超过馈线容量，也即不满足式(12)时，同样基于式(16)选择起点，结合禁忌搜索表继续进行寻优搜索。

3.2.4　动作选择

强化学习算法将所有状态-动作的奖励累计到矩阵$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$中，通过$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$指导智能体进行寻优。智能体$h$采用以下状态转移公式生成第$g$次迭代策略集合：

$$u_w=\begin{cases}\underset{u\in J_g^h(r)}{\operatorname{argmax}}\left(Q_{\mathrm{A}}^{\delta}(r,u)E_{\mathrm{H}}^{\beta}(r,u)\right) & q\leqslant\varepsilon\\ \text{基于式(18)进行状态转移} & q>\varepsilon\end{cases}\tag{17}$$

$$p^h(r,u_a)=\begin{cases}\dfrac{Q_{\mathrm{A}}^{\delta}\left(r,u_a\right)E_{\mathrm{H}}^{\beta}\left(r,u_a\right)}{\sum_{u\in J_g^h(r)}Q_{\mathrm{A}}^{\delta}(r,u)E_{\mathrm{H}}^{\beta}(r,u)} & u_a\in J_g^h(r)\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{18}$$

其中，argmax表示当$Q_{\mathrm{A}}^{\delta}(r,u)E_{\mathrm{H}}^{\beta}(r,u)$取得最大值时

变量u的取值；q为[0,1]之间的随机数；ε为贪心策略的比例；$p^h(r,u_a)$为智能体h从电气节点r连接到下一电气节点u_a的概率；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{H}}$为启发式矩阵，其元素值为根据1.3节计算所得最短路距离的倒数$1/d_{ij}$；δ、β分别为矩阵$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$和$\boldsymbol{E}_{\mathrm{H}}$的相对重要性；$J_g^h(r)$为智能体$h$在第$g$次迭代当前连接负荷节点为$r$时下一次可连接负荷节点的集合。式(17)表示当生成的随机数不大于ε时连接的下一负荷节点按照贪婪策略进行，当生成的随机数大于ε时连接的下一负荷节点按式(18)的伪随机比例规则选择。

3.2.5 多智能体协同学习

当所有m个智能体都基于上述ε贪心策略完成馈线规划后，每个智能体根据环境反馈的适应度值F进行信息交流，更新矩阵$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$，实现协同进化，如下式所示：

$$Q_{\mathrm{A},h}(r,u_w)\leftarrow(1-\alpha)Q_{\mathrm{A},h}(r,u_w)+\alpha\left[\Delta Q_{\mathrm{A},h}(r,u_w)+\gamma\max_{z\in J_g^h(u_w)}Q_{\mathrm{A},h}(u_w,z)\right] \tag{19}$$

$$\Delta Q_{\mathrm{A},h}(r,u_w)=\begin{cases}\dfrac{W}{F_h} & (r,u_w)\in R\\ M\dfrac{W}{F_{\mathrm{gb}}} & (r,u_w)\in R_{\mathrm{gb}}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{20}$$

其中，α为学习因子；γ为折扣因子；$\Delta Q_{\mathrm{A},h}(r,u_w)$为延迟强化部分，表示智能体带来的增益；$R$为智能体寻优所得馈线连接方案；$R_{\mathrm{gb}}$为最优智能体对应的馈线连接方案；$F_h$为智能体$h$的适应度函数；$F_{\mathrm{gb}}$为最优智能体的适应度函数；$W$为奖励常数；$M$为最优智能体数量。式(20)表示适应度函数$F_h$越小，带来的增益越大。

3.3 求解步骤

综上所述，基于EAQ算法的配电网规划主要分为两部分：第一部分是基于矩阵$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{A}}$和$\boldsymbol{E}_{\mathrm{H}}$进行探索寻优形成辐射状配电网；第二部分是基于最短路法和联络优先顺序形成闭环网络，得到规划网架的适应度值，再进行循环迭代形成经济性和可靠性协同最优的网架。

运用本文提出的EAQ算法求解配电网双Q规划模型的具体步骤如图3所示。

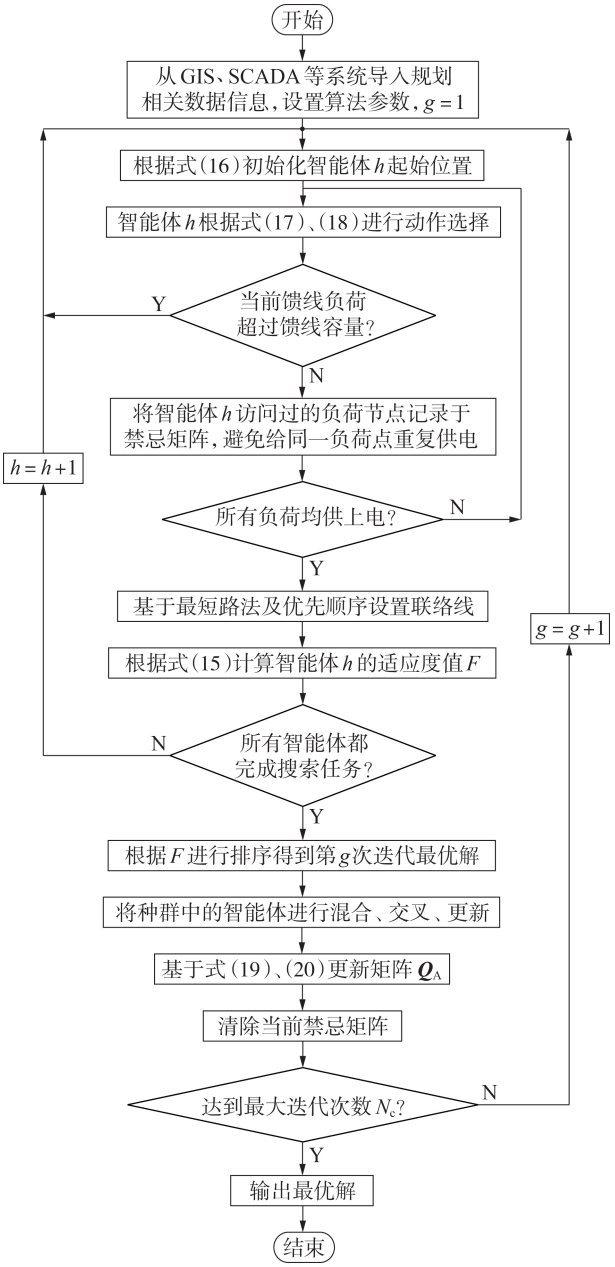


图3 基于EAQ算法的配电网双Q规划模型求解流程图

Fig.3 Flowchart of solving double Q distribution network planning model based on EAQ algorithm

4 算例分析

4.1 规划片区描述

本文以广州某地新建的商务区为例进行分析，该系统的电压等级为10 kV，该区面积为2.1 km^2，规划片区中横向和纵向道路分别为12条和16条。规划片区拟定采用YJV22-10/240型线路铺设，载流量为435 A，单位线路造价为15 000元/km，维修成本为1 000元/km，规划年限为20 a，贴现率为10%，馈线上单位长度的电阻取$r_0=0.17\ \Omega/\mathrm{km}$，停电损失函数根据文献[19]插值得到，元件的可靠性参数来自文献[20]，各类用户停电损失随停电时间变化的关系以及用于计算网损的损失系数分别见附录B中表B1、B2。从GIS和数据采集与监视控制(SCADA)系统中导出地理信息和负荷信息进行简化处理后，负荷总量为409.331 MW，共有92个负荷节点以及2个变电站节点S_1、S_2，如附录B中图B1所示。

4.2 算例实施

4.2.1 算法对比分析

为了说明本文算法编码方式的有效性，将文献[1]中0-1变量编码的遗传算法(GA)以及基于本文

序列编码的GA、粒子群优化（PSO）算法、EAQ算法这4种算法重复运行10次并取其结果均值进行对比分析。为保证算法之间具有可比性，种群数量均取500，最大迭代次数均取200次，并运用均衡设计法[23]设置参数，所有计算均在MATLAB R2018a环境下进行。计算机参数为：内核i7-7700、CPU 3.60 GHz、内存8 GB。最终计算结果如表2所示。表中，N_{con}为平均收敛代数；t_{con}为平均收敛时间。

表2　不同算法计算结果对比

Table 2　Results comparison among different algorithms

算法	F / 万元	N_{con}	t_{con} / s
0-1编码+GA	—	—	—
序列编码+GA	209.29	213.8	1638.9
序列编码+PSO	206.39	108.4	928.2
序列编码+EAQ	195.06	43.5	132.0

注："—"表示寻优空间大小为2^{167}，因"维数灾"而无法收敛。

从表2中数据可以看出，在对于多节点系统的大规模配电网规划问题，采用0-1变量编码会出现"维数灾"而导致算法无法收敛。对比基于本文序列编码的3种算法可以看出，在相同的编码方式下，本文提出的EAQ算法相比GA、PSO算法具有明显优势。其原因在于：GA采用全局搜索策略对空间进行探索，这种探索方式较为盲目，未能有效利用距离信息，因此算法效率较低；PSO算法相比GA原理较为简单，不需要进行交叉和变异，但容易陷入局部最优；而EAQ算法进行搜索时根据节点之间的距离信息进行启发式搜索，同时智能体通过矩阵$\boldsymbol{Q}_A$进行交换信息，并运用精英策略，在保证算法收敛性的基础上加速算法收敛。

4.2.2　单Q规划和双Q规划对比分析

为了验证本文模型的有效性，对以下3种方案进行对比分析。

方案1：单Q规划，忽略可靠性目标函数，仅考虑经济性f_I和f_M。

方案2：双Q规划，考虑f_I、f_M、f_R，不同类型负荷停电造成的经济损失相同，即所有负荷的停电损失均按电网标准取23元/（kW·h）。

方案3：双Q规划，考虑f_I、f_M、f_R，不同类型负荷停电造成的经济损失不同，基于停电损失函数S_{out}评估计算。

运用EAQ算法对模型进行求解，算法参数如附录B中表B3所示，计算每个负荷点的折算故障率λ_i和折算停运时间U_i后，根据文献[20]中的公式即可计算得到可靠性指标系统平均停电持续时间指标（SAIDI）、系统平均停电频率指标（SAIFI）、用户平均停电持续时间指标（CAIDI）、平均供电可用率指标（ASAI）。优化模型求解计算结果如表3所示。方案3对应的接线策略如附录C中表C1所示。

表3　3种方案计算结果对比

Table 3　Calculative results comparison among three schemes

方案	综合成本/万元	f_I/万元	f_M/万元	f_R/万元	SAIDI/（h·户$^{-1}$）	SAIFI/（次·户$^{-1}$）	CAIDI/（h·次$^{-1}$）	ASAI/%
1	205.83	73.58	28.42	103.83	1.0508	3.0188	2.8741	99.9655
2	195.30	74.19	28.66	92.45	0.9890	2.8578	2.8891	99.9674
3	189.97	74.94	28.65	86.49	0.9900	2.8606	2.8892	99.9673

从综合成本（包括投资成本f_I、运维成本f_M、可靠性成本f_R）的角度，3种方案的排序为：方案1>方案2>方案3。从表3可看出，3种方案的投资成本f_I和运维成本f_M之间相差较小，而可靠性成本f_R之间差异较大，最终导致方案3的综合成本低于方案1和方案2。从表中的各项可靠性指标也可以看出，方案1的SAIDI、SAIFI较高，CAIDI、ASAI较低，方案1的可靠性整体上低于方案2与方案3。这说明双Q规划能有效协调经济性和可靠性，提升电网公司的经济效益。

从附录C中表C1的双Q规划的最优规划策略可以看出，优化网架在满足各项电气约束和地理约束的条件下均形成闭环结构，没有出现分支线路，因此网架各项可靠性指标得到了较好的改善。

对比方案2和方案3可知，虽然方案2的可靠性指标略优于方案3（方案2的SAIDI、SAIFI、CAIDI低于方案3，ASAI高于方案3），但是其可靠性成本f_R明显高于方案3，这表明在进行配电网规划时，负荷停电造成的经济损失占比较大，特别是不同类型负荷停电造成的经济损失差异较大，盲目使用可靠性指标对规划网架进行评估与优化难以真正提升电网的综合效益。因此在进行配电网规划时，精确评估不同负荷的停电损失，不仅解决了可靠性与经济性量纲不同的问题，还能进一步精细化配电网规划，将用户的损失降至最低，提升配电网规划效益。

5　结论

本文建立大规模配电网双Q规划模型，并运用EAQ算法进行求解，为配电网规划设计提出了新的思路，本文的主要贡献可以总结如下。

（1）通过建立大规模配电网双Q规划模型，改变了配电网整体规划的粗糙方式，实现了经济性与可靠性的协调规划，达到了综合成本最低的目标。这是配电网规划辅助决策系统中的重要功能模块。

(2)精细化考虑配电网规划中的可靠性评估,模型中可靠性评估算法适用于多节点配电网,考虑联络开关可转供容量,并对不同类型负荷停电造成的经济损失运用停电损失函数S_{out}进行计算,有效地对规划网架的可靠性进行量化。

(3)将算法与图论较好地进行结合。一方面,基于最短路矩阵信息进行智能体的启发式搜索,提出适用于求解本文模型的EAQ算法,降低了搜索的盲目性,显著提升了算法性能;另一方面,对接线模式进行抽象,并基于最短路法进联络设置,克服了以往配电网规划模型中仅考虑辐射状约束而缺乏考虑接线模式约束的缺点。

笔者后续研究将进一步考虑以下内容:

(1)借助计算机的构图原理、自动布局、图数模型等理论,将本文的接线策略快速自动地进行展示;

(2)本文仅针对2-1单环网、两供一备进行拓扑抽象建模,下一步需要完善考虑N-1单环网、N供一备等接线模式;

(3)本文仅考虑了一次侧的网架规划,下一步模型中需要加入二次系统的规划,考虑设备选型、自动化终端配置以及通信网规划,实现一、二次协调规划。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 麻秀范,崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报,2011,26(3):175-181.
MA Xiufan,CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(3):175-181.

[2] JOOSHAKI M,ABBASPOUR A,FOTUHI-FIRUZABAD M,et al. A MILP model for incorporating reliability indices in distribution system expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(3):2453-2456.

[3] MUNOZ-DELGADO G,CONTRERAS J,ARROYO J M. Distribution network expansion planning with an explicit formulation for reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):2583-2596.

[4] GHOLIZADEH-ROSHANAGH R,NAJAFI-RAVADANEGH S,HOSSEINIAN S H. A framework for optimal coordinated primary-secondary planning of distribution systems considering MV distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(2):1408-1415.

[5] ZARKOVIC S D,STANKOVIC S,SHAYESTEH E,et al. Reliability improvement of distribution system through distribution system planning:MILP vs. GA[C]//2019 IEEE Milan PowerTech. Milan,Italy:IEEE,2019:1-6.

[6] 徐芮,刘俊勇,刘友波,等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主次网架规划方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):48-55.
XU Rui,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Primary and subordinate distribution network planning considering load clustering partition and DG integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):48-55.

[7] 蔡佳铭,谢宁,王承民,等. 配电网规划的数字化技术和建模方法——第24届国际供电会议研究成果综述[J]. 电网技术,2019,43(6):2171-2178.
CAI Jiaming,XIE Ning,WANG Chengmin,et al. Digitalized techniques and modeling methodologies for distribution network planning-review of CIRED 2017 on power distribution system planning[J]. Power System Technology,2019,43(6):2171-2178.

[8] 肖白,郭蓓. 配电网规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):200-211,217.
XIAO Bai,GUO Bei. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(12):200-211,217.

[9] FLETCHER J R E,FERNANDO T,IU HERBERTH C,et al. Spatial optimization for the planning of sparse power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(6):6686-6695.

[10] BOSISIO A,BERIZZI A,BOVO C,et al. GIS-based urban distribution networks planning with 2-step ladder topology considering electric power cable joints[C]//2018 AEIT International Annual Conference. Bari,Italy:IEEE,2018:1-6.

[11] 朱永强,张璐,王甜婧. 高比例可再生能源接入的交直流混合微电网网架规划[J/OL]. 电网技术. [2019-08-15]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2340.

[12] ESMAEELI M,KAZEMI A,SHAYANFAR H,et al. Risk-based planning of the distribution network structure considering uncertainties in demand and cost of energy[J]. Energy,2017,119:578-587.

[13] 叶斌,李万启,王绪利,等. 含分布式新能源的配电网风险规划[J]. 电力建设,2016,37(4):117-123.
YE bin,LI Wanqi,WANG Xuli,et al. Risk planning of distribution network with distributed new energy[J]. Electric Power Construction,2016,37(4):117-123.

[14] LEE WILLIS H. Power distribution planning reference book[M]. 2nd ed. Boca Raton,Florida,USA:CRC Press,2004.

[15] SEDGHI M,AHMADIAN A,ALIAKBAR-GOLKAR M. Assessment of optimization algorithms capability in distribution network planning:review,comparison and modification techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,66:415-434.

[16] JIANG C,WAN Z P,PENG Z H. A new efficient hybrid algorithm for large scale multiple traveling salesman problems[J]. Expert Systems with Applications,2020,139:112-867.

[17] XU M H,LIU Y Q,HUANG Q L,et al. An improved Dijkstra's shortest path algorithm for sparse network[J]. Applied Mathematics and Computation,2007,185(1):247-254.

[18] 向婷婷,王主丁,刘雪莲,等. 中低压馈线电气计算方法的误差分析和估算公式改进[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):105-109.
XIANG Tingting,WANG Zhuding,LIU Xuelian,et al. Error analysis and improvement of voltage/power loss estimation formula for middle and low voltage feeders[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(19):105-109.

[19] 李蕊. 配电网可靠性与重要电力用户停电损失研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2010.
LI Rui. The study on economics evaluation of distribution system reliability with consideration of important power users[D]. Beijing::China Electric Power Research Institute,2010.

[20] 管霖,冯垚,刘莎,等. 大规模配电网可靠性指标的近似估测算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):92-98.
GUAN Lin,FENG Yao,LIU Sha,et al. Approximate evaluation algorithm for reliability indices of cosmically distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(10):92-98.

[21] 陈艺璇,张孝顺,余涛. 基于纳什均衡迁移学习的碳-能复合流自律优化[J]. 控制理论与应用,2018,35(5):668-681.
CHEN Yixuan,ZHANG Xiaoshun,YU Tao. Nash equilibrium

inspired transfer learning for self-organizing optimal carbon-energy combined-flow[J]. Control Theory & Applications,2018,35(5):668-681.

[22] 孟祥萍,王圣镔,王欣欣. 基于蚁群算法和轮盘算法的多Agent Q学习[J]. 计算机工程与应用,2009,45(16):60-62.
MENG Xiangping,WANG Shengbin,WANG Xinxin. Multiagent Q-learning based on ant colony algorithm and roulette algorithm[J]. Computer Engineering and Applications,2009,45(16):60-62.

[23] FANG K T,LIN D K J,WINKER P,et al. Uniform design: theory and application[J]. Technometrics,2000,42(3):237-248.

作者简介:

王梓耀

王梓耀(1996—),男,广东汕头人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估(**E-mail**:ziyaowang100@sina.com);

余　涛(1974—),男,广东广州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论与仿真(**E-mail**:taoyu1@scut.edu.cn)。

(编辑　王锦秀)

Double Q planning model for medium voltage distribution network based on Elite Ant-Q algorithm

WANG Ziyao,CHEN Junbin,LIN Dan,ZENG Guangxuan,YU Tao

(School of Electric Power Engineering,South China University of Technology,Guangzhou 510641,China)

Abstract:In order to effectively apply the refined geographic and load information provided by digital technology,according to the basic characteristics of medium voltage distribution network,the components in distribution network are abstracted into nodes and branches of the graph theory,and a novel double Q planning model for large-scale medium voltage distribution network is built,which takes the economy and reliability as its objectives. The 0-1 variable encoding mode is transformed into sequence integer encoding mode, which reduces the solving complexity. The EAQ(Elite Ant-Q) algorithm is proposed and used to solve the radial network,the tie lines are set according to the shortest path method and connection priority principle, and the optimal closed-loop network is obtained by repeated iterations. The case results of a newly built park in Guangzhou verify the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Key words:large-scale distribution network planning;double Q planning model;EAQ algorithm;sequence coding;shortest path method;closed-loop design

(上接第23页 continued from page 23)

Fast recovery strategy of flexible DC distribution network based on energy storage built-in converter after fault

WANG Bingbing[1],LIU Zhong[2],MEI Jun[1],XUE Zhongbing[2],FAN Guangyao[1],GE Rui[1],CHEN Wu[1],XU Weifan[2]

(1. School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China;
2. State Grid Yangzhou Power Supply Company,Yangzhou 225000,China)

Abstract:A fast recovery strategy after fault suitable for flexible DC distribution network is proposed. Firstly, the topology of ESBC(Energy Storage Built-in Converter) is proposed,and the transient characteristics of the capacitor voltage and fault current of sub-module under the pole-to-pole short circuit fault condition before and after ESBC blocking are analyzed. Furthermore,the fast recovery strategy after fault based on energy storage is proposed to improve the recovery sequence,and the staged charging and discharging strategy is proposed to suppress the impulse current. Finally,the proposed coordinated control strategy is combined with the DC distribution network,which realizes that during the closing period of converter,the energy storage provides power for the important load to guarantee the uninterrupted power supply during fault clearance period,and meanwhile adjusts the capacitor voltage of sub-module during blocking period to reach the rated value before unlocking,so as to reduce the voltage fluctuation when the converter is unlocked,and shorten the restart time of converter. The effectiveness of the proposed strategy is verified by the simulation model in PSCAD / EMTDC.

Key words:flexible DC distribution network;fast recovery after fault;energy storage built-in converter;pole-to-pole short circuit fault;uninterrupted power supply

附录 A：

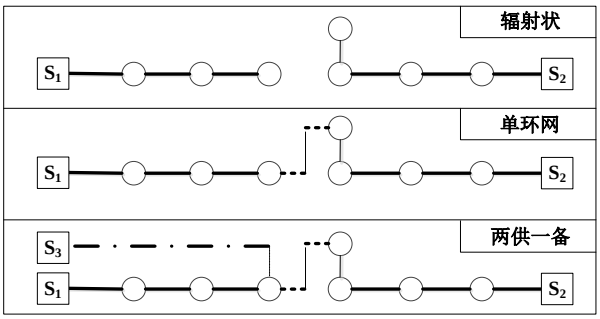


图 **A1**　常用 3 种接线模式示意图

• 常规线路，▪ ▬ ▪联络线路，· ▬备用线路

Fig.A1 Schematic diagram of three common connection modes

附录 B：

表 **B1**　各类用户停电损失随停电时间变化的关系

Table B1 Relationship between power failure loss and power failure time

停电时间/min	停电损失/（元•kW^{-1}）				
	住宅类	政府类	商业类	机构类	工业类
0	0	0	9.701	60.266	118.206
1	0.028	12.073	9.995	63.401	537.300
20	1.470	21.774	38.119	139.836	1 243.292
60	5.292	51.045	104.363	247.530	1 625.586
120	11.023	65.118	203.729	409.071	2 018.136
240	36.453	84.872	382.565	707.705	2 119.137
480	78.002	116.259	770.715	1 176.994	2 304.161
1440	244.199	241.808	979.734	1 473.619	3 044.257

表 B2 完善的损失系数表

Table B2 Expanded loss coefficient table

负荷分布情形	G_p
末端集中负荷	1.000
平均分布负荷	0.333
中间较重分布	0.533
逐渐增加负荷	0.200
逐渐减少负荷	0.380

图 B1　负荷节点示意图

Fig.B1 Schematic diagram of load nodes

表 B3 EAQ 算法参数设置

Table B3 Parameters setting of EAQ algorithm

参数	取值范围	参数设置
最大迭代次数 N_C	$[1,\infty)$	200
智能体数量 N_A	$[1,\infty)$	500
学习因子 α	[0,1]	0.1
折扣因子 γ	[0,1]	0.1
启发因子 δ	[0,1]	0.5
启发因子 β	[0,1]	0.8
探索权重 q_0	[0,1]	0.8
精英数量 M_e	$[1,N]$	20
奖励常数 W	$(0,\infty)$	10^6

附录 C：

表 C1 规划网架的接线策略

Table C1 Connection strategy of planning distribution network

馈线组编号	连接策略	备用联络节点对
1	2，94，83，82，72~39，38，1	39，1
2	2，61~51，40，28，1	61，2
3	2，93，92，91，81，80~77，1	80，2
4	2，70，58~57，63，1	57，1
5	2，71，52~47，1	52，2
6	2，62~16，6，5，1	62，2
7	2，41，29~11，9，1	11，1
8	2，42~18，12，1	42，2
9	2，60，59~37，1	59，2
10	2，27~19，10，8，1	27，2
11	2，79，76~49，1	76，2
12	2，36~22，21，17，1	36，2
13	2，90，89，86~87，69，66，46，1	86，2
14	2，88，67~56，44，1	67，2
15	2，54~32，7，1	32，1
16	2，50，45~34，1	34，1
17	2，68~55，43，1	55，1
18	2，20~26，1	26，1
19	2，30，35~25，15，1	35，2
20	2，31~24，23，1	24，1
21	2，78~84，85，65，75，74，64，1	78，2
22	1，3，13，33~14，4，1	14，1

注：根据前面的编号规则，电气节点总共 94 个，电源点的电气节点编号为 1、2，其余负荷节点在原先的负荷节点编号的基础上加 2 即为表中对应的电气节点编号。其中，“，”表示节点之间以普通线路进行连接，“~”表示 2 组馈线之间存在联络关系，备用联络线以单独一列的形式展示。