

基于改进递归有序聚类的有源配电网多时段动态重构

高纯,于艾清,丁雨

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:为应对分布式电源(DG)和负荷的时变性、不确定性给配电网重构带来的影响以及提高系统运行效益,综合考虑DG和负荷预测值的动态变化,引用欧氏距离描述段内数据的相似程度,通过递归求解的方式确定最优时段划分方案;为了减小不确定因素对配电网重构的影响,将DG出力以及负荷的预测值转换为区间数的形式,综合考虑环保收益与系统损耗费用,建立以净收益最高为目标的有源配电网重构模型;基于仿射算数的区间潮流方程通过构造噪声元的线性优化模型抑制区间扩张,并结合环路编码和基于Bloch球面的量子粒子群优化算法对模型进行求解。IEEE 33节点系统的测试分析结果验证了所提方法的有效性和优越性。

关键词:分布式电源;无功补偿;时段划分;区间潮流;粒子群优化算法

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101005

0 引言

近年来,光伏和风电等清洁能源快速发展,间歇性分布式电源DG(Distributed Generation)在配电网中渗透率的提高以及负荷的随机性给传统配电网重构方案下的电网运行带来挑战^[1]。因此,研究考虑DG和负荷时变性、不确定性的配电网动态重构对配电网安全经济运行具有重要意义。

配电网重构通过改变分段开关以及联络开关的通断状态调整网络拓扑,进而调整系统潮流分布^[2]。对重构周期内的单位时段依次进行静态重构,保证全时段拓扑最优,能够有效减小配电网有功损耗(简称网损),但是会导致开关动作次数过多。平衡网损与开关通断次数之间关系的方法主要为时段划分^[3-4]以及对开关动作损耗进行量化^[5]。文献[3]在Fisher-最优分割的基础上,考虑信息熵的融合对时段进行划分,避免了提前分段和给定阈值。文献[4]引用围绕中心点的划分方法,以距中心的距离最短为目标进行时段划分,并设定最短重构间隔时间减少重构次数。文献[5]提出开关单次动作成本系数和有功损耗成本系数,以网损与开关动作成本之和最低为目标搜索最优重构方案,在降低网损的同时减少了开关动作次数。

上述研究都能够根据DG以及负荷的时变性对时段进行划分,有效减少开关动作次数,但均未考虑DG以及负荷的不确定性对配电网重构的影响,如何描述该不确定潮流是实现配电网动态重构的关键。传统的牛顿-拉夫逊法和Krawczyk区间潮流算法^[6]

过于保守,会导致出现区间潮流扩张的问题^[7],而将区间运算和仿射运算相结合的潮流计算方法以及概率潮流得到了广泛应用。文献[8]通过建立Ybus高斯迭代区间潮流方程,交替采用仿射加减运算和区间潮流运算计算不确定潮流,有效解决了区间运算过于保守的问题。文献[9]采用机会约束的形式描述风光发电以及常规负荷的不确定性,并采用基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛法进行潮流计算,得出潮流的概率分布。文献[10]通过不同场景讨论风、光、负荷不确定性对重构结果的影响。但区间数和仿射数的相互转换、概率潮流以及多场景中的多次采样增加了计算量,且上述研究在构建模型时忽略了DG接入所产生的环保收益。

基于此,本文对递归有序聚类方法进行改进,根据多类型功率曲线确定最优分段方案,针对不确定变量,运用仿射-线性优化区间潮流算法计算不确定潮流,有效解决区间扩张的问题,并结合环路编码以及基于Bloch球面的量子粒子群优化BQPSO(Bloch sphere based Quantum Particle Swarm Optimization)算法实现动态重构模型的快速求解。

1 动态重构优化模型

针对负荷和DG的不确定性,本文采用区间数进行描述,并将其转换成仿射数代入潮流计算。为了适应负荷以及DG出力时变性的特征,实现配电网安全经济运行的目的,建立如下配电网动态重构模型,改变网络的线路拓扑结构和潮流分布,在安全运行的前提下提高系统效益。

1.1 目标函数

本文以一天为重构周期,在满足一定约束条件下以净收益最高为目标构建配电网动态重构模型。

收稿日期:2020-03-04;修回日期:2020-11-09

基金项目:上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

Project supported by Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology(13DZ2251900)

$$\begin{cases} \max \tilde{F}_{\text{earn}} = \tilde{F}_H - (\tilde{F}_P + F_S) \\ \tilde{F}_H = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^{N_D} \hat{P}_{r,t} \sum_{v=1}^{N_P} (C_{\text{FPv}} - C_{\text{DPv}}) \\ \tilde{F}_P = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in Y} C_{\text{loss}} \tilde{P}_{ij,t}^{\text{loss}} \Delta t \\ F_S = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in Y} C_{\text{act}} |\alpha_{ij,t} - \alpha_{ij,t-1}| \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\tilde{F}_{\text{earn}}$ 为净收益区间值(环保收益与损耗费用的差值); $\tilde{F}_H$ 为环保收益区间值; $\tilde{F}_P$ 为有功损耗成本区间值; F_S 为开关动作成本; T 为单位时段总数; N_D 为并网 DG 总数; $\hat{P}_{r,t}$ 为 t 时段第 r 个 DG 向电网输送的有功功率仿射值; N_P 为污染物种类数; C_{FPv} 和 C_{DPv} 分别为火电厂、DG 第 v 种污染物的环境价值成本; Y 为网络线路集合; C_{loss} 为有功损耗成本系数; $\tilde{P}_{ij,t}^{\text{loss}}$ 为 t 时段线路 ij 的有功损耗区间值; Δt 为单位时段的长度; C_{act} 为开关单次动作费用系数; $\alpha_{ij,t}$ 表示线路 ij 上开关在 t 时段的通断状态, 开关闭合时其值为 1, 断开时其值为 0。

1.2 约束条件

在求得目标函数的同时需要满足电网及 DG 运行的相关约束。

(1) 电网约束。

a. 电压约束。

$$U_{i,\min} \leq \underline{U}_{t,i} \leq \bar{U}_{t,i} \leq U_{i,\max} \quad \forall t; \forall i \in \psi \quad (2)$$

其中, $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 允许的电压最大值和最小值; $\bar{U}_{t,i}$ 和 $\underline{U}_{t,i}$ 分别为 t 时段节点 i 电压的最大值和最小值; ψ 为所有节点的集合。

b. 支路容量约束。

$$\hat{S}_{t,ij} \leq S_{ij,\max} \quad \forall t; \forall ij \in L \quad (3)$$

其中, $\hat{S}_{t,ij}$ 为 t 时段支路 ij 通过的复功率; $S_{ij,\max}$ 为支路 ij 允许通过的最大容量; L 为闭合状态支路集合。

c. 网络辐射状运行约束。

$$\begin{cases} n = N + 1 \\ \text{rank}(L(\zeta)) = n - 1 \\ L(\zeta) = \text{diag}(\text{sum}(\Lambda(\zeta))) - \Lambda(\zeta) \\ \Lambda(\zeta) = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \cdots & \alpha_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha_{n,1} & \cdots & \alpha_{n,n} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

其中, n 和 N 分别为节点数和闭合支路数; $\text{sum}(\cdot)$ 为求和函数; $\text{diag}(\cdot)$ 为构造对角阵函数; $L(\zeta)$ 为拉普拉斯矩阵, $\Lambda(\zeta)$ 为图 ζ 对应的邻接矩阵, ζ 为图论中配电网对应的简单图; 节点 i 与 j 相连时 $\alpha_{ij} = 1$ 。

d. 开关动作次数约束。

$$H_{\text{tot}} \leq H_{\max} \quad (5)$$

其中, H_{tot} 为重构周期内开关通断总次数; $H_{\max}$ 为重构

周期内开关通断次数上限。

e. 无功补偿约束。

$$Q_{i,\min}^C \leq \underline{Q}_{t,i}^C \leq \bar{Q}_{t,i}^C \leq Q_{i,\max}^C \quad \forall t; \forall i \in \psi^C \quad (6)$$

其中, $Q_{i,\min}^C$ 和 $Q_{i,\max}^C$ 分别为节点 i 无功补偿功率的下限和上限; $\bar{Q}_{t,i}^C$ 和 $\underline{Q}_{t,i}^C$ 分别为 t 时段节点 i 无功补偿装置出力的最大值和最小值; ψ^C 为配有无功补偿装置的节点集合。

(2) DG 运行约束。

a. 光伏组件运行约束。

$$\bar{P}_{t,i}^P \leq P_{i,\max}^P \quad (7)$$

其中, $\bar{P}_{t,i}^P$ 为 t 时段光伏组件在节点 i 注入有功功率区间值的上限; $P_{i,\max}^P$ 为光伏组件在节点 i 允许注入的有功功率最大值。

b. 异步风力发电机运行约束。

$$\bar{P}_{t,i}^W \leq P_{i,\max}^W \quad (8)$$

其中, $\bar{P}_{t,i}^W$ 为 t 时段风电机组在节点 i 注入有功功率区间值的上限; $P_{i,\max}^W$ 为风电机组在节点 i 允许注入的有功功率最大值。

由于异步风力发电机在运行时需要从电网吸收无功功率^[11], 因此为了减小网络损耗, 为风力发电机配套安装了可自动投切的电容组无功补偿设备, 其运行约束为:

$$\hat{P}_{t,i}^W / \sqrt{(\hat{P}_{t,i}^W)^2 + (\hat{Q}_{t,i}^C - \hat{Q}_{t,i}^{W_0})^2} \in [0.9, 1] \quad \forall t; \forall i \in \psi^C \quad (9)$$

其中, $\hat{P}_{t,i}^W$ 为 t 时段风电机组在节点 i 发出有功功率的仿射值; $\hat{Q}_{t,i}^C$ 和 $\hat{Q}_{t,i}^{W_0}$ 分别为电容组无功补偿功率和风力发电机从电网吸收的无功功率仿射值。

2 基于改进递归有序聚类的时段划分

传统时段划分方法通过单一数据的变化趋势进行时段划分, 而影响重构结果的因素众多, 通过单一数据划分时段难以满足要求, 因此本文对递归有序聚类进行改进, 以多组数据段内相似度最大为目标进行时段划分。

2.1 欧氏距离

时段划分的依据是使分段后各组段内数据相似度最大。在重构模型中, 假设第 a 个全时段功率矩阵 A_a 包含 T (一般 $T=24$) 个单位时段对应的功率值, 则 $A_a = [X_{a1}, X_{a2}, \dots, X_{aT}]^T$, 其中 $X_{am} = [x_{am,1}, x_{am,2}, \dots, x_{am,n}]$ 为 m ($m \in [1, T]$) 时段的功率, $x_{am,i}$ 为 A_a 中 m 时段节点 i 的功率值。

本文通过欧氏距离描述段内数据的相似程度。定义第 K 个分段包含的时段有 $\{\beta_K, \beta_K+1, \dots, \beta_{K+1}-1\}$, β_K 为第 K 个分段的第一个时段。则 A_a 中第 K 个分段的欧氏距离 D_a 为:

$$D_a(\beta_K, \beta_{K+1} - 1) = \sum_{m=\beta_K}^{\beta_{K+1}-1} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{am,i} - \bar{x}_{ai})^2} \quad (10)$$

$$\text{其中, } \bar{x}_{ai} = \frac{1}{\beta_{K+1} - \beta_K - 1} \sum_{m=\beta_K}^{\beta_{K+1}-1} x_{am,i}$$

2.2 目标函数

欧氏距离定义了各分段数据的相似程度,进一步将周期内各类功率的欧氏距离之和定义为损失函数,损失函数最小的划分方式为最优分段方案。

$$p(T, K) = \min E[b(T, K)] \quad (11)$$

$$E[b(T, K)] = \sum_{a=1}^M \sum_{j=1}^K D_a(\beta_j, \beta_{j+1} - 1) \quad (12)$$

其中, $b(T, K)$ 表示经 K 次划分的方案; $E[b(T, K)]$ 为该划分方式的损失函数; $p(T, K)$ 表示 $b(T, K)$ 中损失函数最小的一种划分方案; M 为数据矩阵总数。

2.3 递归求解

为了求解目标函数并降低计算量,采用递归的方法求得最优分段方案。对于任何一种最优划分方案 $p(T, K)$, K 次划分最优的前提是 $K-1$ 次划分也最优。损失函数的递推公式为:

$$\begin{cases} E[b(T, 2)] = \min_{2 \leq i \leq T} \sum_{a=1}^g [D_a(1, i-1) + D_a(i, T)] \\ E[b(T, K)] = \min_{K \leq i \leq T} \left\{ E[p(i-1, K-1)] + \sum_{a=1}^g D_a(i, T) \right\} \end{cases} \quad (13)$$

其中, g 为全时段功率矩阵的数量。

根据递推公式,递推有序聚类时段划分的具体步骤如下。

(1) 寻找划分方案 $b(T, K)$ 的最优方案首先搜索最后一个分段点 β_K 使得:

$$E[b(\beta_K - 1, K - 1)] + \sum_{a=1}^g D_a(\beta_K, T) = \min_{K \leq i_K \leq T} \left\{ E[b(i_K - 1, K - 1)] + \sum_{a=1}^g D_a(i_K, T) \right\} \quad (14)$$

(2) 进一步搜索倒数第二个分段点 β_{K-1} 使得:

$$E[b(\beta_{K-1} - 1, K - 2)] + \sum_{a=1}^g D_a(\beta_{K-1}, i_K) = \min_{K \leq i_K \leq T} \left\{ E[b(i_{K-1} - 1, K - 2)] + \sum_{a=1}^g D_a(i_{K-1}, i_K) \right\} \quad (15)$$

(3) 重复步骤(2)直到搜索出所有分段点,即可得到 $E[b(T, K)]$ 最小时对应的最优分段方案。

2.4 最佳分段数

通常情况下损失函数 E 和损失函数的变化率会随 K 的增大而减小,参考“拐点方法”定义损失函数趋势图拐点对应的分段数为最佳分段数。根据拐点处损失函数变化率最显著的特性,将寻找拐点的问题转化为求解斜率变化率的问题。相邻分割次数的离差斜率为:

$$E_D(K) = E[b(T, K + 1)] - E[b(T, K)] \quad (16)$$

相邻分段数的斜率变化率为:

$$E_R(K) = \left| \frac{E_D(K) - E_D(K-1)}{E_D(K) - E_D(K+1)} \right| \quad (17)$$

设最佳分段数为 K_{best} , 则有:

$$K_{\text{best}} = \underset{K \in \{1, 2, \dots, T\}}{\operatorname{argmax}} [E_R(K)] \quad (18)$$

其中, $\operatorname{argmax}(\cdot)$ 表示函数取最大值时自变量取值。

3 仿射-线性优化区间潮流算法

针对传统区间迭代和仿射迭代潮流计算效率低、区间潮流解扩张等缺点^[12-13], 本文使用仿射-线性优化区间潮流算法计算不确定潮流。

本文考虑在节点注入功率不确定情景下的潮流分布,有功和无功功率的区间表达形式分别为 $[P, \bar{P}]$ 和 $[Q, \bar{Q}]$, 系统电压相角和电压幅值的仿射表达形式分别为:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \theta_{i,0} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} \Big|_0 \Delta P_k \varepsilon_{k,P} + \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_k} \Big|_0 \Delta Q_k \varepsilon_{k,Q} \right) \\ \hat{U}_i = U_{i,0} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial U_i}{\partial P_k} \Big|_0 \Delta P_k \varepsilon_{k,P} + \frac{\partial U_i}{\partial Q_k} \Big|_0 \Delta Q_k \varepsilon_{k,Q} \right) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\hat{\theta}_i$ 和 $\hat{U}_i$ 分别为节点 i 电压的相角和幅值的仿射值; θ_i 和 U_i 分别为节点 i 电压的相角和幅值; 下标 0 表示有功、无功功率为预测值时的确定性潮流解,由牛顿-拉夫逊法求得; P_k 和 Q_k 分别为第 k 个注入有功、无功功率预测值; ΔP_k 和 ΔQ_k 分别为第 k 个有功、无功功率的波动区间半径; $\varepsilon_{k,P}, \varepsilon_{k,Q} \in [-1, 1]$ 分别为第 k 个有功、无功功率的噪声元。

通过式(19)可以计算出节点电压的区间范围,但区间扩张效应使得区间误差较大。为此,将该仿射形式代入利用泰勒级数逐级线性化的潮流方程^[14]中,并经过推导得出新的节点注入有功、无功功率方程(推导过程见附录A)为:

$$\begin{cases} \hat{P}_i = P_i + \sum_{k=1}^n (P_{ik,P} \varepsilon_{k,P} + P_{ik,Q} \varepsilon_{k,Q}) + P_{iw} \varepsilon_w \\ \hat{Q}_i = Q_i + \sum_{k=1}^n (Q_{ik,P} \varepsilon_{k,P} + Q_{ik,Q} \varepsilon_{k,Q}) + Q_{iw} \varepsilon_w \end{cases} \quad (20)$$

其中, $\hat{P}_i$ 和 $\hat{Q}_i$ 分别为节点 i 注入有功、无功功率的仿射值; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入有功、无功功率; $P_{ik,P}, P_{ik,Q}, Q_{ik,P}, Q_{ik,Q}$ 为仿射系数; P_{iw}, Q_{iw} 为新噪声元系数; ε_w 为所有仿射乘积得到的新噪声元。

通过含噪声元系数 $\varepsilon_{k,P}$ 和 $\varepsilon_{k,Q}$ 的节点功率注入方程建立节点注入功率与节点电压之间的联系,通过节点注入功率方程对噪声元进行约束,求解系统电压幅值和电压相角的区间上限和下限,进而得到

系统网络损耗区间值。

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_i = [\min(\hat{\theta}_i), \max(\hat{\theta}_i)] \\ \tilde{U}_i = [\min(\hat{U}_i), \max(\hat{U}_i)] \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\tilde{\theta}_i$ 和 $\tilde{U}_i$ 分别为节点 i 电压相角和幅值区间值。

4 BQPSO 算法

4.1 环路编码

由于网络结构受辐射状拓扑结构限制,因此可以通过基于环路的编码方式对开关编码以减少可行解的产生。网络中每闭合一个联络开关即可组合成一个环路,将环路中的开关依次编码(如附录B图B1所示,环路2由 s_{34} 和 s_9-s_{14} 所在支路构成)。联络开关数等于网络中的环路数,每个环路分别断开一个开关的方案包含了所有的可行解,因此本文基于环路对开关进行编码,并基于环路编码搜索最优解。

4.2 Bloch 球面基本原理

在 Bloch 球面坐标系下(如附录B图B2所示),球面任意一点的坐标可以通过2个角度 δ 和 φ ($\delta \in [0, \pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi]$) 确定,而任何量子位都与 Bloch 球面上的一点对应,并且表示为 $|\varphi\rangle = [\cos \varphi \sin \delta, \sin \varphi \sin \delta, \cos \delta]^T$ 。

在 BQPSO 算法中基于 Bloch 球面坐标的粒子为:

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{i1} \sin \delta_{i1} & \cos \varphi_{i2} \sin \delta_{i2} & \dots & \cos \varphi_{id} \sin \delta_{id} \\ \sin \varphi_{i1} \sin \delta_{i1} & \sin \varphi_{i2} \sin \delta_{i2} & \dots & \sin \varphi_{id} \sin \delta_{id} \\ \cos \delta_{i1} & \cos \delta_{i2} & \dots & \cos \delta_{id} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, $\mathbf{F}_i$ 为第 i 个粒子; φ_{ij} 和 δ_{ij} ($j=1, 2, \dots, d$) 为第 i 个粒子第 j 维坐标的量子比特参数, d 为粒子维数,本文中其值等于环路数。

4.3 解空间变换

在 BQPSO 算法中每个粒子同时占据空间的3个位置,且每维的遍历空间均为 $[-1, 1]$,为了计算粒子当前位置的适应度,需进行空间上的变换。记第 i 个粒子第 j 个量子位的 Bloch 球面坐标为 $[x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}]^T$,则相应的解空间为:

$$\begin{cases} X_{ij} = \text{round}\{[g_j(1+x_{ij})+e_j(1-x_{ij})]/2\} \\ Y_{ij} = \text{round}\{[g_j(1+y_{ij})+e_j(1-y_{ij})]/2\} \\ Z_{ij} = \text{round}\{[g_j(1+z_{ij})+e_j(1-z_{ij})]/2\} \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\text{round}\{\cdot\}$ 表示四舍五入取整数; $[e_j, g_j]$ 为第 j 维解空间的取值范围。由此可见,在 BQPSO 算法中,每个粒子对应解空间的3组解,每组解对应各个环路中断开开关的编码。

4.4 粒子位置的更新

本文沿用粒子群优化 PSO (Particle Swarm Opti-

mization) 算法的更新机制对量子比特参数 δ 和 φ 进行调整。具体如下。

(1) 量子位幅角增量更新为:

$$\begin{cases} \Delta \delta_{ij}(t+1) = \Delta \delta_{ij}(t) + c_1 r_1 (\Delta \delta_{i1}) + c_2 r_2 (\Delta \delta_{ig}) \\ \Delta \varphi_{ij}(t+1) = \Delta \varphi_{ij}(t) + c_1 r_1 (\Delta \varphi_{i1}) + c_2 r_2 (\Delta \varphi_{ig}) \end{cases} \quad (24)$$

其中, $\Delta \delta_{i1} = \delta_{ij} - \delta_{ij}$, $\Delta \delta_{ig} = \delta_{ij} - \delta_{ij}$, $\Delta \varphi_{i1} = \varphi_{ij} - \varphi_{ij}$, $\Delta \varphi_{ig} = \varphi_{ij} - \varphi_{ij}$, δ_{ij} 和 φ_{ij} 为第 j 个量子比特自身最优相位, δ_{ig} 和 φ_{ig} 为第 j 个量子比特全局最优相位; $\Delta \delta_{ij}(t)$ 和 $\Delta \varphi_{ij}(t)$ 分别为第 t 次迭代时 δ_{ij} 和 φ_{ij} 的增量; c_1 和 c_2 分别为自身和全局因子; r_1 和 r_2 为 $(0, 1)$ 之间的随机数。

(2) 第 i 个粒子的量子位更新为:

$$\begin{cases} \delta_{ij}(t+1) = \delta_{ij}(t) + \lambda \Delta \delta_{ij}(t+1) \\ \varphi_{ij}(t+1) = \varphi_{ij}(t) + \lambda \Delta \varphi_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (25)$$

其中, λ 为压缩系数。

4.5 粒子位置的变异

设定变异概率参数 η , 对每个粒子以 η 的概率利用自适应量子旋转门调整量子比特参数 δ 和 φ , 使其绕圆心沿球面较大幅度旋转。

量子旋转门为:

$$U = \begin{bmatrix} \cos \kappa_i & -\sin \kappa_i \\ \sin \kappa_i & \cos \kappa_i \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中, κ_i 为第 i 个粒子的自适应旋转角。

旋转后的量子比特参数为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{ij}(t+1) \\ \varphi_{ij}(t+1) \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \delta_{ij}(t) \\ \varphi_{ij}(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

量子旋转影响量子计算的寻优效率,较大的旋转角导致搜索太粗略,错过最优解;较小的旋转角容易带来不必要的计算,甚至使算法过早收敛。因此采用自适应量子旋转角,第 i 个粒子旋转后的相位为 $\kappa_i - \delta_{ij}$ 和 $\kappa_i - \varphi_{ij}$ 。

$$\kappa_i = \left[\kappa_{\min} + (\kappa_{\max} - \kappa_{\min}) \frac{f_i - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \right] e^{-G/G_{\max}} \quad (28)$$

其中, $\kappa_{\min}$ 和 $\kappa_{\max}$ 分别为最小旋转角和最大旋转角; f_i 为第 i 个粒子的适应度; $f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别为当代粒子最小适应度和最大适应度; G 和 $G_{\max}$ 分别为当前迭代数和最大迭代数。

通过量子旋转实现粒子的变异,增加种群的多样性,避免了 PSO 算法早熟的问题。BQPSO 算法将每一维的搜索拓展成 Bloch 球面上的三维空间搜索,每个粒子占据搜索空间的3个位置,每次迭代可以得到3个新的位置,提高了算法的遍历性,更容易获得全局最优解。

5 算例分析

本文利用附录B图B1所示的 IEEE 33 节点系统验证所提方法的有效性。测试系统包含 33 个节点、34 条支路,系统额定电压为 12.66 kV,基准功率为

10 MW。测试系统参数及各类负荷的时间、空间分布见文献[15],负荷预测误差为 $\pm 10\%$ 。为考察间歇性DG对重构结果的影响,在节点7、21各接入4台额定功率为100 kW的Pilkington SFM144Hx250wp型太阳能电池组件,详细参数见文献[9]。在节点16、25各接入1台额定功率为300 kW的异步风力发电机,并为异步风力发电机配备电容投切无功补偿设备,详细参数见文献[16]。风速和光照强度预测误差导致的波动区间均为 $[0.9, 1.1]$ p.u.。本文设定单个开关操作费用为7元,负荷电价为 $0.7 \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。各类污染物的环境价值成本见文献[17]。

5.1 分段方案

根据测试系统的特性,将数据类型分为3类,分别为负荷、风机注入功率和光伏注入功率。利用前文所述的含多类型功率的分段方法进行划分,最终划分为5段,具体划分结果和各类型功率曲线如图1所示,图中各类型功率的变化曲线均为确定的预测值。

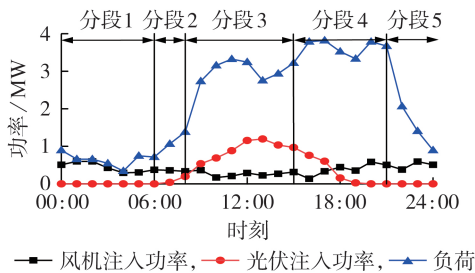


图1 分段结果

Fig.1 Period division result

5.2 重构方案及分析

5.2.1 重构前后净收益区间对比

采用BQPSO算法根据分段结果进行动态重构求解。各重构方案的重构结果如表1所示。

由表中可见:分段静态重构虽然在各个单位时段下保持最优拓扑,提高了环保收益,降低了网络损耗,但增加了开关动作次数,相比无重构反而减少了净收益;采用本文方案重构后的净收益区间上限由无重构的1810.84元提高到2033.96元,净收益区间

下限由1205.11元提高到1691.96元,净收益提高效果明显,说明通过重构改善了系统的潮流分布,提升了对DG的消纳,并且均衡了有功损耗费用以及开关损耗费用,从而提高了净收益;相较于文献[6]方案,本文方案的净收益区间上限和下限分别提高了189.10元和278.21元,且开关动作次数也减少了4次,说明本文方案更具有效性、合理性。

根据表1中各时段断开的开关,利用传统区间迭代潮流算法与本文提出的仿射-线性优化区间潮流计算方法得到的网损结果如表2所示。

表2 区间迭代潮流算法与本文方法得到的网损

Table 2 Network loss calculated by interval iterative power flow algorithm and proposed method

重构方案	网损 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	
	区间迭代法	本文方法
无重构	[573.546, 1621.716]	[777.541, 1501.344]
本文方案	[383.646, 1093.159]	[508.714, 997.286]

根据表2中2种潮流计算方法得到的网损区间值可知,本文方法计算的网损区间半径更小,而采用传统区间迭代潮流计算方法得到的网损区间半径较大。可见本文方法能够有效解决区间运算过于保守的问题。

5.2.2 重构前后节点电压分布对比

为了验证本文所提重构方法对节点电压的影响,选取16:00时配电网重构前后各个节点电压波动区间范围如附录B图B3所示。

由图B3可知,本文提出的动态重构方法使得各节点电压得到整体提升,最低电压由重构前的0.928 p.u.提高到0.949 p.u.,且重构后的电压水平趋于平稳。

5.3 算法性能比较

为了证明BQPSO算法在搜索配电网最优结构中具有快速性的优点,将其与PSO、二进制粒子群优化BPSO^[18](Binary Particle Swarm Optimization)算法、整数编码型量子粒子群优化ICQPSO^[16](Integer Coded Quantum Particle Swarm Optimization)算法

表1 IEEE 33节点系统各重构方案比较

Table 1 Comparison of each reconfiguration scheme for IEEE 33-bus system

重构方案	时段	断开的开关	净收益 / 元	开关动作次数
无重构	全天	$s_{33} - s_{37}$	[1291.02, 1810.84]	0
分段静态重构	单位时段	各单位时段最优的开关	[1205.11, 1534.44]	58
本文方案	0	$s_7, s_9, s_{14}, s_{36}, s_{37}$	[1691.96, 2033.96]	6
	8	$s_7, s_{10}, s_{14}, s_{32}, s_{37}$		
	13	$s_7, s_{10}, s_{14}, s_{32}, s_{37}$		
	17	$s_7, s_9, s_{14}, s_{32}, s_{37}$		
	21	$s_7, s_9, s_{14}, s_{32}, s_{37}$		
文献[6]方案	0	$s_9, s_{15}, s_{33}, s_{34}, s_{37}$	[1413.75, 1844.86]	10
	13	$s_7, s_{13}, s_{10}, s_{17}, s_{37}$		
	22	$s_6, s_{14}, s_9, s_{17}, s_{28}$		

进行比较,各算法运行15次,选取最优结果进行比较分析。各算法种群规模均为50, c_1 、 c_2 均为2.0; BQPSO算法的变异概率为0.05,最大和最小旋转角分别为 0.5π 和 π ; ICQPSO算法的变异概率为0.02。所得净收益中点最优值与迭代次数的关系曲线如附录B图B4所示。

由图B4可知, BQPSO算法收敛速度较快,在迭代的第二步即得到了相对较高的净收益,并且由表3的算法性能对比情况可以看出, BQPSO、BPSO、ICQPSO算法对原始PSO算法的改进提高了算法的寻优率(算法寻得本文最优值的次数与其运行次数的比值)。同时可以看出本文对PSO算法的改进相对于其他2种改进方式具有收敛时间短、寻优率高的特点,同时BQPSO算法的单次迭代时间长于其他算法,这是由于Bloch球面坐标通过空间变换扩大了解空间的搜索范围,相当于增加了粒子的种群数量和适应度的计算量,并通过量子旋转门的粒子变异机制使粒子快速跳出局部最优,从而加快了算法的寻优速度。

表3 算法性能对比

Table 3 Comparison of algorithm performance

算法	收敛时间/s	单次迭代时间/s	寻优率
BQPSO	92	19.06	0.93
PSO	396	10.62	0
BPSO	226	16.80	0.73
ICQPSO	421	11.98	0.47

6 结论

本文基于递归有序聚类,建立了以系统净收益最高为目标的配电网重构模型,并通过仿射-线性优化区间潮流算法结合BQPSO算法进行求解,得出以下结论:

(1)基于有序递归聚类的含多类型功率的时段划分方法,能够在不给定分段数和阈值的情况下根据各类型功率变化趋势给出合理的分段方案;

(2)将仿射数代入线性潮流方程,通过噪声元建立节点电压和注入功率的关系,从而计算区间潮流的方法,能够有效解决区间运算的保守问题,得到区间半径相对较小的区间潮流解;

(3)通过环路编码结合BQPSO算法,不仅提高了算法的遍历性,而且加快了收敛速度,将自适应量子旋转角与变异机制结合,避免了粒子的早熟问题,与其他启发式算法相比具有一定的优越性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 李春燕,杨强,魏蔚,等. 计及风速与负荷相关性的配电网重构方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 148-153, 160.
LI Chunyan, YANG Qiang, WEI Wei, et al. Distribution net-

work reconfiguration considering correlation between wind-speed and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 148-153, 160.

- [2] PENG C H, XU L, GONG X, et al. Molecular evolution based dynamic reconfiguration of distribution networks with DGs considering three-phase balance and switching times[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 1866-1876.
- [3] 童方格,谭阳红,罗春辉. 基于融合熵时段划分的三相配电网动态重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 78-84.
TONG Fangge, TAN Yanghong, LUO Chunhui. Dynamic reconstruction of three-phase distribution network based on time division of fusion entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 78-84.
- [4] 陈新岗,余兵,陈小青,等. 基于PAM时段划分的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 99-105.
CHEN Xingang, YU Bing, CHEN Xiaoqing, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on PAM time division[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 99-105.
- [5] ZHAI H F, YANG M, CHEN B, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 1-10.
- [6] 李扬,韦钢,马钰,等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 102-110.
- [7] 丁涛,崔翰韬,顾伟,等. 基于区间和仿射运算的不确定潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 51-55, 115.
DING Tao, CUI Hantao, GU Wei, et al. An uncertainty power flow algorithm based on interval and affine arithmetic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 51-55, 115.
- [8] 李扬,韦钢,李功新,等. 含DG的主动配电网供电路径优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1971-1979, 2212.
LI Yang, WEI Gang, LI Gongxin, et al. Research on optimization of power supply route of active distribution network considering DG[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1971-1979, 2212.
- [9] 黄红程,顾洁,方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96.
HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96.
- [10] 丁阳,汪泓,宾峰,等. 基于博弈论的多目标配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 28-35.
DING Yang, WANG Feng, BIN Feng, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 28-35.
- [11] GUAN W L, TAN Y H, ZHANG H X, et al. Distribution system feeder reconfiguration considering different model of DG sources[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68: 210-221.
- [12] DING T, LI X, LI F X, et al. Interval radial power flow using extended DistFlow formulation and Krawczyk iteration method with sparse approximate inverse preconditioner[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1998-2006.
- [13] XU C, GU W, GAO F, et al. Improved affine arithmetic based optimisation model for interval power flow analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(15): 3910-

- 3918.
- [14] 廖小兵,刘开培,李彧野,等. 基于混合潮流方程的区间潮流计算方法[J]. 高电压技术,2018,44(10):3417-3424.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LI Yuye, et al. Interval power flow calculation method based on mixed power flow equations [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3417-3424.
- [15] 易海川,张彼德,王海颖,等. 提高DG接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术,2016,40(5):1431-1436.
YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [16] 关万琳. 分布式电源优化配置与配电网重构[D]. 长沙:湖南大学,2014.
GUAN Wanlin. Distributed generation optimal allocation and distribution network reconfiguration[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [17] 马麟,刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(19):32-40.

MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.

- [18] YIN S A, LU C N. Distribution feeder scheduling considering variable load profile and outage costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 652-660.

作者简介:



高 纯

高 纯(1994—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为含分布式单元配电系统的运行与优化(E-mail: gaochun@mail.shiep.edu.cn);

于艾清(1981—),女,上海人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统调度优化、智能优化算法等(E-mail: yuaiqing@shiep.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Multi-period dynamic reconfiguration of active distribution network based on improved recursive ordered clustering

GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu

(College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to deal with the influence of distribution network reconfiguration brought by time-varying and uncertainty of DG (Distributed Generation) and load and improve system operation efficiency, the dynamic change of forecasting values of DG and load are comprehensively considered, Euclidean distance is introduced to describe the similarity of data in the segment, and the optimal time-period partition scheme is determined by recursive solution. In order to reduce the influence of uncertain factors on distribution network reconfiguration, the forecasting values of DG and load are converted into the form of interval numbers, and a reconfiguration model of active distribution network is built, which takes the highest net income as its objective, and comprehensively considers the environmental benefit and system loss cost. On the basis of the interval power flow equation based on affine arithmetic, a linear optimization model of noise element is constructed to suppress the interval extension, and the loop coding and Bloch sphere based quantum particle swarm optimization algorithm are combined to solve the model. The test and analysis results of IEEE 33-bus system verify the validity and superiority of the proposed method.

Key words: distributed generation; reactive power compensation; time division; interval power flow; PSO algorithm

附录 A:

将式 (19) 代入利用泰勒级数逐级线性化的潮流方程得到:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n [G_{ij,P} U_i U_j + B_{ij,P} (\theta_{ij} - \theta_{ij,0})] \\ Q_i = \sum_{j=1}^n [-B_{ij,Q} U_i U_j + G_{ij,Q} (\theta_{ij} - \theta_{ij,0})] \end{cases} \quad (A1)$$

其中, $G_{ij,P}$ 、 $G_{ij,Q}$ 、 $B_{ij,P}$ 、 $B_{ij,Q}$ 为常系数; $\theta_{ij,0} = \theta_{i,0} - \theta_{j,0}$ 。

由式 (19) 可得:

$$\hat{\theta}_{ij} - \theta_{ij,0} = \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} \Delta P_k - \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k} \Delta P_k \right) \varepsilon_{k,P} + \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial Q_k} \Delta Q_k - \frac{\partial \theta_j}{\partial Q_k} \Delta Q_k \right) \varepsilon_{k,Q} \right] \quad (A2)$$

$$\begin{aligned} \hat{U}_i \hat{U}_j = & U_{i,0} U_{j,0} + U_{i,0} \left(\frac{\partial U_j}{\partial P_k} \Big|_0 \Delta P_k \varepsilon_{k,P} + \frac{\partial U_j}{\partial Q_k} \Big|_0 \Delta Q_k \varepsilon_{k,Q} \right) + U_{j,0} \left(\frac{\partial U_i}{\partial P_k} \Big|_0 \Delta P_k \varepsilon_{k,P} + \frac{\partial U_i}{\partial Q_k} \Big|_0 \Delta Q_k \varepsilon_{k,Q} \right) + \\ & \sum_{k=1}^n \left(\left| \frac{\partial U_i}{\partial P_k} \Big|_0 \Delta P_k \right| + \left| \frac{\partial U_i}{\partial Q_k} \Big|_0 \Delta Q_k \right) \sum_{k=1}^n \left(\left| \frac{\partial U_j}{\partial P_k} \Big|_0 \Delta P_k \right| + \left| \frac{\partial U_j}{\partial Q_k} \Big|_0 \Delta Q_k \right) \varepsilon_w \end{aligned} \quad (A3)$$

将式 (A2)、(A3) 逐级代入到式 (A1) 即可得到新的节点注入有功、无功功率方程。

附录 B:

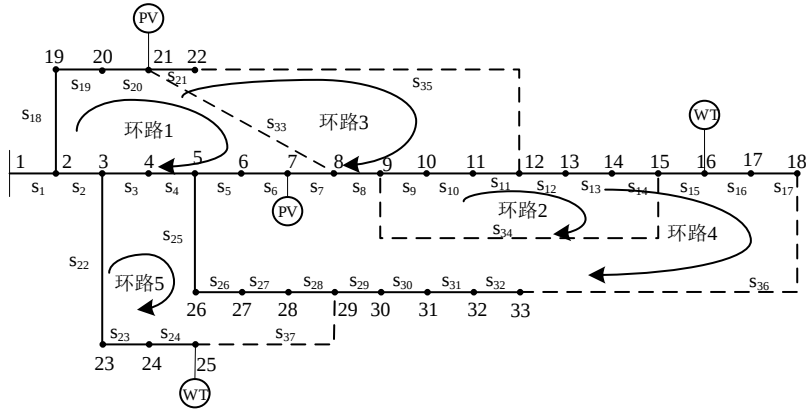


图 B1 IEEE 33 节点系统图

Fig.B1 Schematic diagram of IEEE 33-bus system

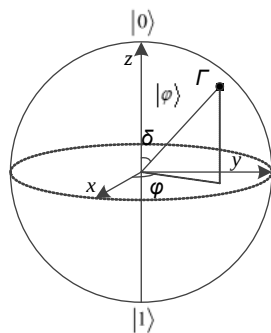


图 B2 量子比特的 Bloch 球面表示

Fig.B2 Bloch sphere description of Qubit

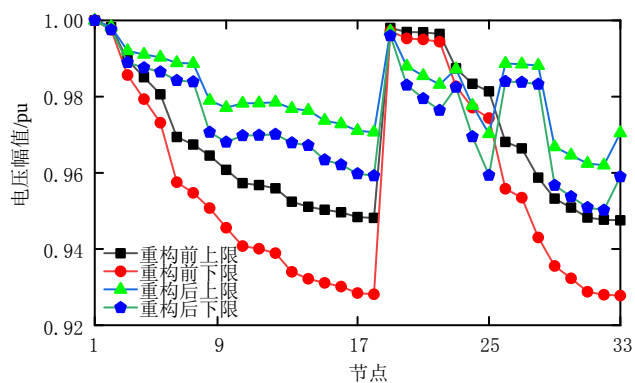


图 B3 重构前后各节点电压分布

Fig.B3 Voltage distribution of each node before and after reconfiguration

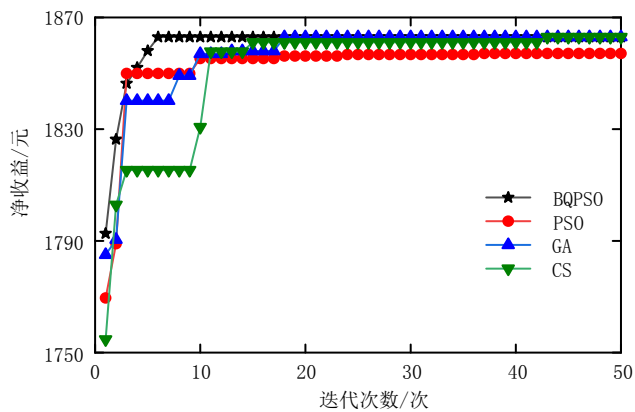


图 B4 各算法的收敛性能

Fig.B4 Convergence performance of each algorithm