

考虑弹性运行的含微电网配网系统重构优化

汪雅静,张帅,江涵,宋弘亮

(宁波市电力设计院有限公司,浙江 宁波 315000)

摘要:为提高含微电网配网系统的承载能力和弹性裕度,建立了含微电网配网系统拓扑弹性优化模型,通过对配电网拓扑的动态重构来实现含微网配电网的弹性优化目标。同时针对传统粒子群易陷入局部最优并且收敛速度较慢的缺点,采用具有全局搜索能力和良好搜索效率的量子粒子群算法进行求解。并将十进制编码技术应用于优化量子粒子群算法来减少粒子长度和不可行解的产生。最后将设计的策略在改进的IEEE 33节点辐射状配电系统上进行了测试,并将算法与其他传统智能算法进行比较,验证了设计的策略对含微电网的配电网系统具有良好的优化性能和有效性。

关键词:配电网重构;微电网;弹性电网;量子粒子群算法

中图分类号:TM743 **文献标识码:**B **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24300

Optimization of Distribution Network System with Microgrid Considering Resilient Operation

WANG Yajing, ZHANG Shuai, JIANG Han, SONG Hongliang

(Ningbo Electric Power Design Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to improve the carrying capacity and resilience margin of the distribution network system containing microgrid, a topological resilience optimization model of the distribution network system containing microgrid was established to achieve the resilience optimization objective of the distribution network containing microgrid through dynamic reconfiguration of the distribution network topology. At the same time, in response to the shortcomings of traditional particle swarm optimization, which is prone to falling into local optima and has a slow convergence speed, a quantum particle swarm algorithm with global search capability and good search efficiency was adopted for solution. The decimal coding technique was also applied to optimise the quantum swarm algorithm to reduce the particle length and infeasible solution generation. Finally, the designed strategy was tested on a modified IEEE 33-node radial distribution system, and the algorithm was compared with other traditional intelligent algorithms to verify the good optimisation performance and effectiveness of the designed strategy for distribution systems containing microgrids.

Key words: distribution grid reconfiguration; microgrid; resilient grid; quantum particle swarm optimization (QPSO)

随着社会的快速发展,对能源的需求日益增加,然而环境与能源利用两者的矛盾不断增大。因此,大力发展清洁低碳的新能源是未来能源发展的趋势^[1]。在清洁能源革命背景下,分布式新能源大量接入配电网会造成电能质量下降等一系列问题^[2],而微电网能将接入的新能源分布式电源作为一个整体^[3],并通过公共耦合点(point of common coupling, PCC)接入配电网^[4],使得分布式电源(distributed generation, DG)在配电网中运行得更灵活、高效,并能对配电网提供有效的功

率支撑^[4-6]。

配电网一般是闭环设计和开环运行^[7],节点之间存在分段开关,网络中含有少数联络开关,需要通过改变开关的状态来实现配电网重构优化^[7]。一般的优化目标通常是降低功率损耗,保持节点电压稳定,并提高供电可靠性^[8]。随着主动配电网和智能配电网发展,微电网并入配网的重构优化运行需要进行进一步研究。目前国内外许多学者对配电网静态重构优化已经做了大量的研究,但较少有文献考虑微电网接入配网的

基金项目:国家自然科学基金(61873159)

作者简介:汪雅静(1991—),女,硕士,工程师,Email:66800596@qq.com

情况,并且实际负荷和电源是具有时序性的,将其考虑为恒功率模型具有局限性。

目前,针对含分布式电源或者微电网的配电网馈线重构常常采用智能算法进行相关研究。遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种离散编码算法,能够很好地处理多维优化问题,因此它较早地作为人工智能算法应用于配电网重构^[9],但传统的遗传算法存在编码复杂等缺点^[9-11]。粒子群算法(particle swarm algorithm, PSO)作为一种智能优化算法技术具有参数设计简单以及运算速度快等优势而受到了众多研究者的关注^[12]。传统的粒子群算法通常采用的是连续编码,但配电网馈线重构是一个离散问题,因此文献[13]采用了二进制粒子群编码。但随着网络的扩展和粒子维数的增加,粒子的收敛速度会减慢,甚至无法得到最优的收敛结果^[14]。文献[15]与文献[16]分别采用了量子粒子群算法(quantum particle swarm optimization, QPSO)与二进制量子粒子群算法(binary quantum particle swarm optimization, BQPSO)对含分布式能源的配电网重构模型求解。但二进制粒子群算法是对开关的开关状态进行“0-1”编码,即开关断开状态为0,闭合状态为1,因此在33节点配电系统中,算法的解空间较大,为 2^{32} 。文献[17]将十进制编码和遗传算法应用于配电网馈线重构,降低了粒子维数,避免了大量不可行解的产生。

上述研究通常将接入的分布式电源考虑为恒功率模型^[17],并且目前对含微电网配电网研究较少。为此,针对含微电网的配电网优化问题,在充分考虑微电网出力的时序性的基础上综合考虑网损、电网弹性值以及电压稳定等多目标,通过归一法转化为单目标函数,并将十进制编码技术与量子粒子群算法相结合,提出了一种十进制量子粒子群优化算法(decimal quantum particle swarm optimization, DQPSO)来优化含微网配电系统。该算法具有较强的收敛能力和搜索能力,且控制参数较少^[17],使QPSO适应馈线重构问题。

1 微电网以及负荷的模型

1.1 微电网的拓扑结构

微电网具有负荷与电源的双重特性,既能够作为负荷吸收配电网中多余的电能,也能够电能缺失的情况下作为电源向配电网提供电能,还能有效支撑配电网的电压,减少配电网系统的有

功网络损耗^[18-20]。本文研究的微电网包含多种类型的分布式电源、常规负荷以及电动汽车,通过PCC与配电网进行无功功率和有功功率的交换^[7]。微电网接入配电网的简化结构模型如图1所示。

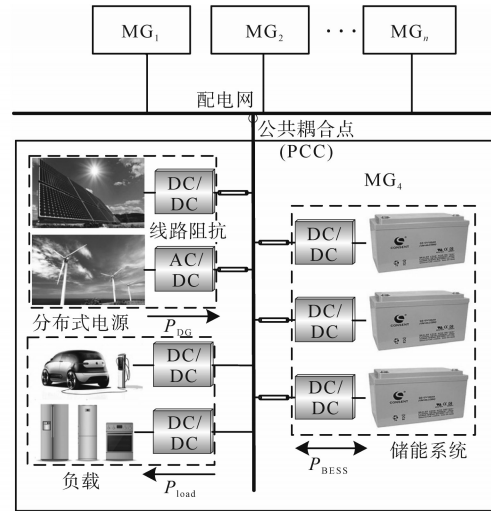


图1 微电网接入配电网拓扑结构示意图

Fig.1 Microgrid access distribution network topology diagram

在给定条件下,微电网可能作为“负荷”或“电源”接入配电网,本文假设微电网输出有功功率满足下式:

$$P_{m,t,n} = f(P_{w,t,n}, P_{v,t,n}, P_{l,t,n}) \quad (1)$$

式中: $P_{m,t,n}$ 为微电网的输出功率; $P_{w,t,n}$ 为风机输出功率; $P_{v,t,n}$ 为光伏输出功率; $P_{l,t,n}$ 为节点负荷输出功率;下标 t,n 为时段数与对应元件的并网节点号。

微电网的输出功率 $P_{m,t,n}$ 为 $P_{w,t,n}, P_{v,t,n}, P_{l,t,n}$ 的线性组合。本文根据式(1)对微电网出力进行预测,图2是某微电网一天的出力情况。

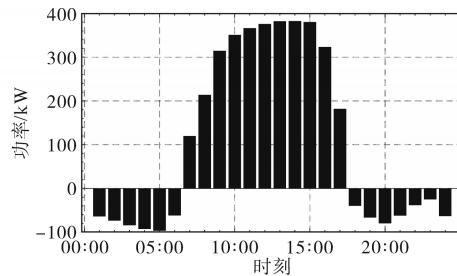


图2 某微电网24h出力

Fig.2 24 h force forecast of microgrid

可以看到在00:00—06:00, 18:00—24:00, 微电网输出功率为负,相当于“负荷”,吸收配电网的功率,在06:00—19:00,微电网输出功率为正,相当于“电源”。

1.2 风机出力的随机模型

风速变化服从Weibull分布^[12],其概率密度函

数为

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中: v 为实际风速; k, c 分别为形状参数和尺度参数。

风机的实际输出功率 P_w 与风速 v 之间的关系可表示为

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \text{ 或 } v_{co} \leq v \\ P_{wr} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{wr} & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{wr} 为风机额定功率; v_{ci} 为风机切入风速; v_{co} 为风机切出风速; v_r 为额定风速。

1.3 光伏发电的随机模型

光伏发电随太阳光辐照度波动变化^[11],文献[7]所采用的光伏发电的模型服从Beta分布,即 β 概率分布,并给出了相应的介绍,本文采用该模型,光伏出力 P_{PV} 的概率密度函数如下式:

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{PV}}{R_{PV}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{R_{PV}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: α, β 均为Beta分布形状参数,与太阳光辐照度有关,其取值随光伏安装位置不同有差异; R_{PV} 为光伏最大输出功率。

根据式(2)~式(4)对风机和光伏出力进行计算。图3为风机和光伏在一天中的出力值。

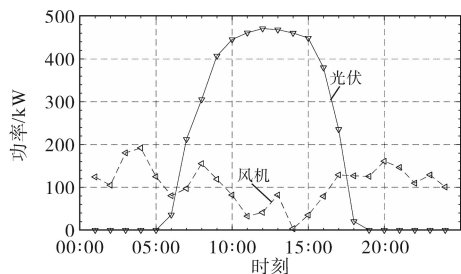


图3 风机和光伏出力

Fig.3 Fan and photovoltaic forecast force values

1.4 节点负荷随机模型

配电网节点负荷模型^[14]如下式:

$$P_L = a(t)P_{NL} + [1 - a(t)]P_{EV} \quad (5)$$

式中: P_{NL} 为常规负荷; P_{EV} 为电动车充电负荷; $a(t)$ 为常规负荷的比例。

假设常规的负荷 P_{NL} 为正态分布, μ_{NL}, σ_{NL} 分别为常规负荷的期望值和标准差,则 P_{NL} 的正态分布可表示为

$$f(P_{NL}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{NL}} \exp\left[-\frac{(P_{NL} - \mu_{NL})^2}{2\sigma_{NL}^2}\right] \quad (6)$$

由于电动汽车的出行状态与充电负荷密切

相关,因此其具有时序性,本文采用文献[14]的电动汽车充电负荷模型, P_{EV} 近似服从正态分布,如下式:

$$f(P_{EV}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda_{EV}\mu_{EV}} \exp\left[-\frac{(P_{EV} - \mu_{EV})^2}{2\lambda_{EV}^2\mu_{EV}^2}\right] \quad (7)$$

式中: μ_{EV} 为充电负荷的期望值; λ_{EV} 为变异系数^[14]。

根据式(6)、式(7)可以得到节点负荷的概率密度函数,如下式:

$$f_t(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{L,t}} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_{L,t})^2}{2\sigma_{L,t}^2}\right] \quad (8)$$

式中: $\sigma_{L,t}$ 为 t 时刻节点负荷的标准差。

根据式(8)对IEEE 33配电网的负荷进行模拟。图4为配电网的负荷时空分布图。

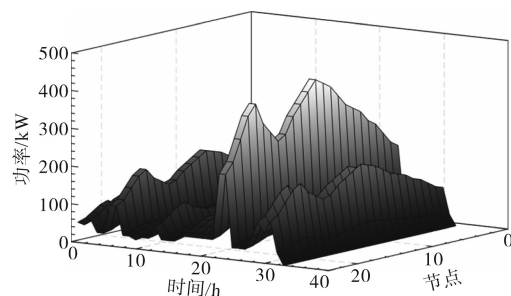


图4 负荷时空分布

Fig.4 Load space-time distribution

2 弹性重构优化模型

为了提高含微电网配电系统的弹性,这里需要综合考虑网损、支路弹性及电压偏差等,通过归一法将其作为目标函数,在满足运行约束的情况下,寻找目标最优的辐射状网络的最佳运行状态。

2.1 最小网损目标函数

考虑有 N 个母线的配电系统,最小化实际功率损耗的目标函数描述为

$$f_{\text{ploss}} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} k_{ij} R_{ij} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (9)$$

式中: R_{ij} 为配电网节点 i, j 之间的电阻; U_i 为各支路首节点 i 的电压幅值; P_i, Q_i 分别为注入节点 i 的有功和无功功率; k_{ij} 为二进制变量, $k_{ij}=0$ 或1的状态表示节点 i, j 之间开关断开或闭合。

2.2 最小电压稳定性目标函数

由于微电网的接入,配电网的电压稳定性会受到某些程度的影响,因此有必要对电压稳定性进行分析。本文采用文献[17]所采用的电压稳定性函数,并给出了相应的函数表达式如下:

$$f_{\text{stabil}} = \frac{4[(X_{ij}P_i - R_{ij}Q_i)^2 + (X_{ij}Q_i + R_{ij}P_i)U_i^2]}{U_i^4} \quad (10)$$

式中: f_{stabil} 为首节点为 i 、末节点为 j 的支路电压稳定指标; X_{ij} 为配电网节点 i, j 之间的电抗。

系统一般从所有支路中最薄弱的支路开始崩溃, 因此, 可以根据电压稳定性指标进行判断系统电压是否稳定。

2.3 弹性指标目标映射方法

支路和节点的状态是实时对应并且同步变化的。在物理上可以分析得到支路的功角特性, 与弹簧的拉力伸长特性是相似的^[5]。因此, 本文将配电网映射为弹性力学网络。

电网有功流动方向都遵循从发电机流向负荷的规律。为使有功功率相加与矢量力的叠加规律相同, 将所有支路看作垂直方向, 这时就能够将反映功角特性的配电网一一映射成力学中的弹性网络^[8]。

2.3.1 配电网功角弹性分析

支路传输有功功率可表述为

$$P_L = \frac{U_i U_j}{X_i} \sin \delta_{ij} \quad (11)$$

式中: U_i, U_j 分别为支路首、末节点 i, j 电压; δ_{ij} 为相角差。

若有功率发生变化, 一阶增量方程为

$$\Delta P_L = \left(\frac{U_i U_j}{X_i} \cos \delta_{ij} \right) \Delta \delta_{ij} + \left(\frac{U_j}{X_i} \sin \delta_{ij} \right) \Delta U_i + \left(\frac{U_i}{X_i} \sin \delta_{ij} \right) \Delta U_j \quad (12)$$

线路的弹性系数 K_L 可表示为

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta \delta_{ij}} \quad (13)$$

即

$$K_L = \frac{U_i U_j}{X_i} \cos \delta_{ij} + \frac{U_j \Delta U_i + U_i \Delta U_j}{\Delta \delta_{ij} X_i} \sin \delta_{ij} \quad (14)$$

所以只需知道线路两侧相位角即可。图5为将交流支路映射为弹性支路的示意图。

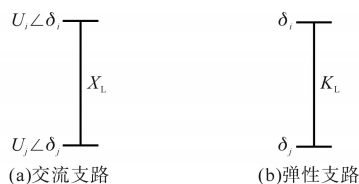


图5 交流支路弹性映射

Fig.5 AC branch elastic mapping

2.3.2 支路弹性目标函数

综上, 根据上述弹性指标映射方法推导, 配电网系统的综合弹性为各个支路的弹性之和, 因此, 最大化支路弹性的目标函数描述为

$$f_{\text{kl}} = - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{X_i} (U_i \cdot U_j \cos \delta_{ij} + \frac{U_j \Delta U_i + U_i \Delta U_j}{\Delta \delta_{ij}} \sin \delta_{ij}) \quad (15)$$

2.4 目标函数

将最小网损、最大支路弹性、最小电压稳定性三个目标进行归一化处理, 得到:

$$f = \lambda_1 f_{\text{ploss}} + \lambda_2 f_{\text{stabil}} + \lambda_3 f_{\text{kl}} \quad (16)$$

将权重系数设置为 $\lambda_1=0.4, \lambda_2=0.3, \lambda_3=0.3$ 。

2.5 约束条件

1) 功率约束如下:

$$\begin{cases} P_i + P_{\text{DG}i} - P_{\text{L}i} - U_i \sum_{j=1}^{N-1} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i + Q_{\text{DG}i} - Q_{\text{L}i} - U_i \sum_{j=1}^{N-1} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{DG}i}$ 为第 i 个节点对应的 DG 有功出力; G_{ij} 为节点 i, j 之间的电导; B_{ij} 为节点 i, j 之间的电纳; $Q_{\text{DG}i}$ 为第 i 个节点对应的 DG 无功出力。

2) 节点电压、容量约束如下:

$$\begin{cases} U_{\text{imin}} \leq U_i \leq U_{\text{imax}} \\ S_{ij} \leq S_{ij\text{max}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $U_{\text{imin}}, U_{\text{imax}}$ 分别为节点电压的最小值和最大值; $S_{ij\text{max}}$ 为线路 ij 上的最大容量。

3 量子粒子群算法与控制策略

为更好地解决配电网重构问题, 在量子粒子群的基础上采用十进制整数编码, 并利用多维初始化和边界变化处理策略来更新粒子位置处理重构问题。

3.1 粒子群算法

粒子群优化算法 (PSO) 是由 James Kennedy 和 Russell Eberhart 在 1995 年提出的, 是从弗兰克·赫普纳 (Frank Heppner) 的生物群模型发展而来的^[17]。与传统遗传算法相比, 粒子群算法采用生物群体共享信息的策略, 因此粒子群算法收敛速度快, 特别是在进化初期。但在进化后期, 粒子群算法易陷入局部最优状态。

3.2 量子粒子群算法

针对粒子群算法易陷入局部最优的缺点,

Sun 等人^[14]在2004年提出了量子粒子群算法(QP-SO),量子粒子群算法结合量子物理的思想,重点考虑了每个粒子当前的局部最优信息和全局最优位置信息,对经典粒子群算法进行了改进。

在量子空间中,粒子能够在整个可行解空间中进行随机优化搜索,因此QPSO的全局搜索能力比传统PSO有效提高。QPSO算法通过薛定谔方程得到粒子出现在某一点的概率密度函数,如下式所示:

$$X(t) = \frac{L(t)}{2} \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (19)$$

其中

$$L(t+1) = 2\beta |m_{\text{best}}(t) - X(t)|$$

式中: u 为在 $[0, 1]$ 区间上均匀分布的随机数; β 为收缩系数,用于控制粒子收敛的速度。

量子粒子群算法的进化如下:

$$m_{\text{best}(t)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_i(t)$$

$$= \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i1}(t), \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{i2}(t), \dots, \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{id}(t) \right] \quad (20)$$

$$P_{id}(t) = \varphi P_{id}(t) + (1 - \varphi) P_{gd}(t) \quad (21)$$

$$X_{id}(t+1) = P_{id}(t) \pm \beta \cdot |m_{\text{best}(t)} - X_{id}(t)| \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (22)$$

式中: M 为种群中的粒子数; φ 为在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数; d 为粒子维度; $P_i(t)$, $P_{gd}(t)$ 为第 i 个粒子在 t 次迭代中的当前最佳位置和全局最佳位置; $P_{id}(t)$ 是第 i 个粒子的第 d 维位置; $m_{\text{best}(t)}$ 为第 t 次迭代时种群中第 i 个粒子的平均最佳位置; X_{id} 为第 t 次迭代时第 i 个粒子的第 d 维位置。

若随机数 u 在迭代过程中大于0.5,则式(22)取“-”号,其余情况取“+”号。

为了获得更好的优化效果, β 随迭代次数动态变化如下:

$$\beta = m - (m - n) \times \frac{t}{t_{\text{max}}} \quad (23)$$

式中: t_{max} 为最大迭代次数。

随着迭代进行,线性的从 m 递减至 n , $m=1$, $n=0.5$ 。

3.3 算法编码与控制策略

受配电网辐射型拓扑结构约束,网络里的开关不能随意组合。分析网络结构可知,每闭合一个联络开关将形成一个环网,因此必须在此环网内再断开一个分段开关来保持配电网的辐射型

拓扑。本文采用十进制整数型编码能有效降低解空间的大小。IEEE 33节点配电网系统结构如图6所示。

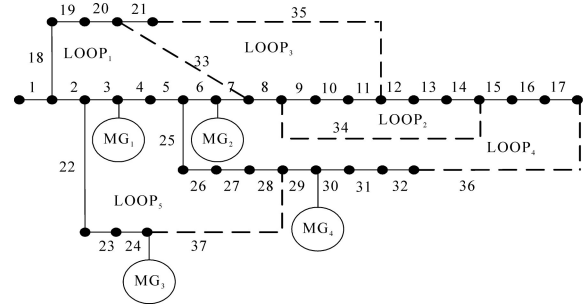


图6 IEEE 33节点配电网系统拓扑结构

Fig.6 IEEE 33-node power distribution system topology

IEEE 33节点配电网中有33,34,35,36,37共5个联络开关。LOOP₁~LOOP₅为5个由联络开关构成的环网,以环网LOOP₁为例说明此编码方式:由联络开关33确定的环网由7-6-5-4-3-2-20-19-18-33支路构成,环内的联络开关是最后编号的支路。对环内的支路进行从左至右以此编号为1-2-3-4-5-6-7-8-9-10。依据上述方式以此类推可以得到33节点系统的所有编码方式,如表1所示。

表1 IEEE 33节点配电网系统环形编码方案

Tab.1 Ring coding scheme for 33-node power distribution system

环网序号	环内开关号	环内开关编号
1	7,6,5,4,3,2,20,19,18,33	1-10
2	14,13,12,11,10,9,34	1-7
3	11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,21,20,19,18,35	1-15
4	17,16,15,14,13,12,11,10,9,8,7,6,25,26,27,28,29,30,31,32,36	1-21
5	24,23,22,28,27,26,25,5,4,3,37	1-11

由表1可知,粒子 $S=[10,7,15,21,11]$ 代表开关33,34,35,36,37处于原始断开状态。十进制整数型编码的粒子维数就是环网的个数,由二进制粒子解空间 2^{32} 降低为十进制的 $10 \times 7 \times 15 \times 21 \times 11$ 个解,大大提升了寻优的效率。由上述编码方式得到程序流程图如图7所示。

通过下述三个步骤对优化程序进行控制,并对所得结果进行相关指标的计算与分析:

- 1)对模型按照24h分别对含微电网的配电网进行弹性优化。
- 2)合并相邻时段相同的拓扑结构。
- 3)计算最优拓扑情况下的弹性值以及节点电压值。

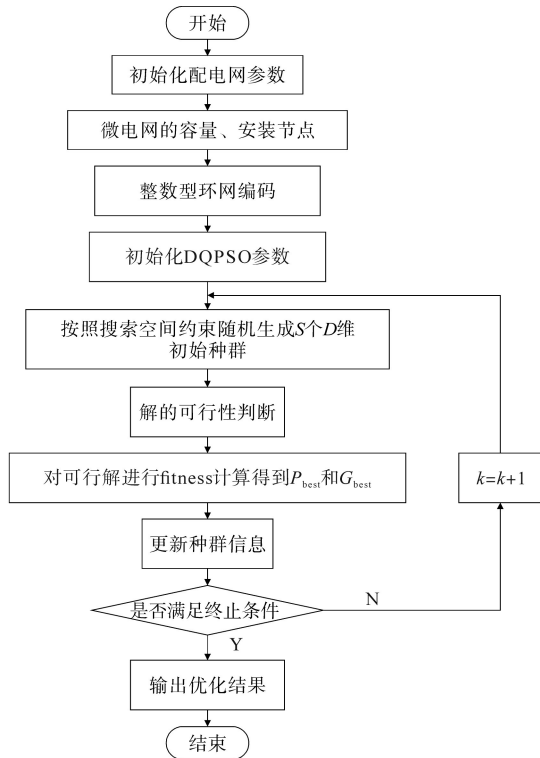


图7 程序流程图

Fig.7 Program flowchart

4 算例证明

为检验本文提出的量子粒子群算法在含微电网配电系统弹性优化方面的有效性,本文在 Matlab 平台进行仿真分析,采用的系统为 Inter(R) Core(TM) i5-8250U CPU 1.60GHz,8GB 内存。本文采用图6所示的 IEEE 33 节点系统的配电网作为研究对象,母线侧电压为 12.66 kV,包括 5 个联络开关。算例一采用标准的 IEEE 33 节点系统的配电网进行测试;算例二接入 4 个微电网。采用整数型量子粒子群算法对原拓扑进行优化重构,结果表明了该实验方法的有效性。

4.1 算例一

为了验证本文的十进制量子粒子群算法(DQPSO)的性能,将该算法与遗传算法(GA)、二进制粒子群算法(BPSO)和十进制粒子群算法

(DPSO)在馈线重构方面进行比较,本算例采用标准的 IEEE 33 节点系统的配电网进行测试,得到结果如表2所示。

由表2可知,对于无微电网的33节点配电网系统,四种算法在计算收敛速度与算法的搜索能力上,本文所采用的DQPSO算法明显占优。

表2 算例一结果对比

Tab.2 Comparison of results of different algorithms

方法	网络损耗/ kW	网损减少量/ kW	最大压降/ %	迭代收敛 次数
GA	148.265	22.316	8.24	24
PSO	153.327	17.254	9.16	35
DPSO	144.655	25.926	6.85	110
DQPSO	139.471	31.110	6.17	14

4.2 算例二

采用整数型量子粒子群算法对原拓扑进行优化重构。算法的总体规模为 50,最大迭代次数为 1 000;对于 DPSO,加权值的最大值和最小值分别为 0.9 和 0.4;学习因子 c_1 和 c_2 都是 2.0;BPSO 的惯性权重是 0.8。4 个微电网一天中的输出预测值如图 8 所示。

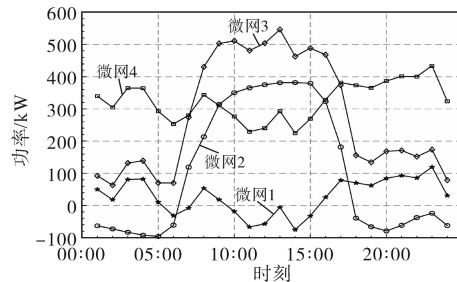


图8 微电网出力预测值

Fig.8 Predicted value of microgrid output

计算结果如表3所示,配电系统的拓扑分别在 00:00—05:00,05:00—16:00,16:00—24:00 三个时间段得到三种对应的最优拓扑,相较于静态重构更加贴近实际情况,能在不同负荷情况下求解出配电网最优拓扑,有效降低网损,增加电网弹性以及电压均衡性。相较于传统的只考虑经济性的配电网重构方案,此方法能够在保证一定经济性的同时,平抑电压波动,增加电网的弹性裕度。

表3 弹性动态优化结果

Tab.3 Elastic dynamic optimization results

时段	断开开关	原始网络网损/kW	重构后网损/kW	电压稳定性指数	综合弹性值	综合弹性值(优化后)
00:00—05:00	[7 14 9 31 37]	61.718 3	46.308 7	0.073 0	7.545	8.233
05:00—16:00	[6 34 4 31 4]	359.841 4	279.296 7	0.055 4	2.336	5.863
16:00—24:00	[33 14 9 32 28]	220.635 4	169.784 6	0.066 2	0.867	4.675

如图9~图11所示,经过本文的优化后,每一时段的网损值都得到了有效的减少,各个支路弹性不同程度的提升,线路的最低节点电压得到提升,优化效果良好。

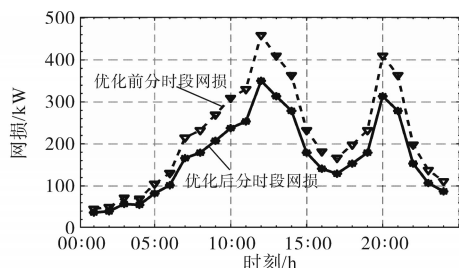


图9 优化前、后每一时段的网损值

Fig.9 The grid loss value for each time period before and after optimization

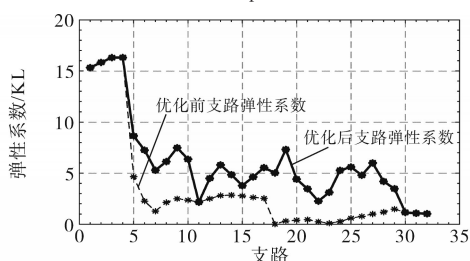


图10 优化前、后各支路弹性对比情况

Fig.10 The elastic comparison of each branch before and after optimization

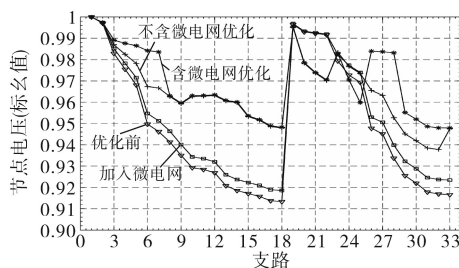


图11 各支路优化后节点电压

Fig.11 Node voltage after optimization of each branch

5 结论

针对微电网的接入,本文提出了考虑含微电网的配电网弹性重构优化方法,采用DQPSO算法对配电网进行重构。此方法在原量子粒子群算法的基础上,改进采用十进制编码。十进制编码的量子粒子群算法的编码尺寸比二进制编码的粒子群算法小得多。并且在重新配置期间不需要考虑不在环路中的开关,不可行解更少,大大节省了时间。本文所提出的方法和其他文献方法在IEEE 33节点系统上进行了测试对比,结果表明:与GA算法、DPSO算法和BPSO算法相比,量子粒子群算法的搜索能更快地收敛到平衡点。因此,所提出的量子粒子群算法在配电网重构研

究上具有高效、准确的特点。

参考文献

- [1] 刘迪,张强,吕干云. 量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J]. 电测与仪表,2022,59(3):58-65.
LIU Di,ZHANG Qiang,LÜ Ganyun. Improvement and application of quantum-behaved particle swarm optimization in distribution network reconfiguration[J]. Electrical Measurement and Instrument,2022,59(3):58-65.
- [2] 田书欣,刘浪,魏书荣,等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(16):1-11.
TIAN Shuxin,LIU Lang,WEI Shurong, et al. Dynamic reconfiguration of a distribution network based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control,2021,49(16):1-11.
- [3] 张照堃,何莉,吴霜. 基于改进非支配排序遗传算法的配电网动态重构[J]. 科学技术与工程,2021,21(1):8916-8922.
ZHANG Zhaolong,HE Li,WU Shuang. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved NSGA-II[J]. Science, Technology and Engineering,2021,21(1):8916-8922.
- [4] 王晓. 浙江:建设多元融合高弹性电网[J]. 国家电网,2021,15(5):64-65.
WANG Xiao. Zhejiang: Building a diversified, integrated and high elastic power grid[J]. State Grid,2021,15(5):64-65.
- [5] 竺炜,周孝信,唐如. 电网的弹性力学网络拓扑映射[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):109-117.
ZHU Wei,ZHOU Xiaoxin,TANG Ru. Elasticity network topology mapping for power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):109-117.
- [6] 徐泽,杨伟,张文强. 基于连锁环网与改进离散粒子群算法的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(6):114-123.
XU Ze,YANG Wei,ZHANG Wenqiang. Multi-objective distribution network reconfiguration based on chain loops and improved binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control,2021,49(6):114-123.
- [7] 刘畅,黄杨,杨昕然,等. 计及储能及负荷转供协同调度的城市电网弹性运行策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(6):56-66.
LIU Chang,HUANG Yang,YANG Xinran, et al. Flexible operation strategy of an urban transmission network considering energy storage systems and load transfer characteristics[J]. Power System Protection and Control,2021,49(6):56-66.
- [8] 竺炜,陶琼,周有庆. 基于弹性力学空间映射的发电机静态功角稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):44-50.
ZHU Wei,TAO Qiong,ZHOU Youqing. Generators static power angle stability analysis based on elasticity space mapping[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19):44-50.
- [9] 林清源,薛毓强,曾乙宸. 配电网重构研究综述[J]. 电气开关,2021,59(1):3-8.
LIN Qingyuan,XUE Yuqiang,ZENG Yichen. Overview of re-