



研究与开发

配电系统弹性光网络频谱整理优化算法

赵必游¹, 张善辉², 王进帅²

(1. 广东省电力有限责任公司茂名供电局, 广东 茂名 525299; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 为切实提高现实中信息传输网络的资源利用率, 通过分析智能电网环境下弹性光网络中的频谱配置问题, 提出了一种结合遗传和蚁群算法优势特点的频谱配置方法, 通过衔接策略结合这两种算法的优势, 利用遗传算法生成初始解, 最后通过蚁群算法正反馈、收敛高效的特点来获得频谱配置问题最优解, 从而实现配电通信网的频谱最佳整理效果; 提到的优化算法的性能通过软件仿真的方法得到验证。所提算法可优化利用空闲频谱资源, 保障配电网海量数据传输的需要, 同时可提高配电通信系统的可靠性, 对智能电网的安全可靠运行具有重要意义。

关键词: 智能电网; 弹性光网络; 频谱分配; 网络效益

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019027

Spectrum allocation algorithm of elastic optical networks in power distribution system

ZHAO Biyou¹, ZHANG Shanhui², WANG Jinshuai²

1. Maoming Power Supply Bureau of Guangdong Power Co., Ltd., Maoming 525299, China

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract: In order to effectively improve the resource utilization of information transmission network in reality, the spectrum allocation problem in flexible optical network in smart grid environment was analyzed, and a spectrum allocation method was proposed. Combining the advantages of genetic algorithm and ant colony algorithm, the genetic algorithm was used to generate the initial solution. Finally, the optimal solution of the spectrum allocation problem was obtained by the characteristics of positive feedback of ant colony algorithm and efficient convergence. The performance of the optimization algorithm mentioned was verified by software simulation. The proposed algorithm can optimize the use of idle spectrum resources to meet the needs of mass data transmission in distribution network, and improve the reliability of distribution network communication system, which is of great significance to the safe and reliable operation of smart grid.

Key words: smart grid, elastic optical network, spectrum allocation, network benefit

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2019-01-20

通信作者: 王进帅, 1053349427@qq.com

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 (No.GDKJXM20162098)

Foundation Item: Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Limited Liability Company (No.GDKJXM20162098)



1 引言

配电网通信系统主要负责智能电网中的调度和运行业务数据传输,并且终端设备产生的实时数据也需要通过该网络传输到控制系统用于调度决策。随着配电网朝着自动智能化的趋势不断变化,它涉及的工作范畴不断扩展,不同业务之间需要更多的数据交互,现有的配电网通信系统带宽分配机制无法为不断增长的业务提供稳定的通信服务。配电网自动化、信息化的进程不断地加快,配电网的数据通信业务的需求高速增长,配电网通信系统需要适应配电网的自动化规模以及业务复杂程度,所以需要一种弹性配电网通信系统来支持高带宽、低时延、高安全性以及高可靠性的业务通信需求。

日本 NTT 公司于 2009 年对外公布了弹性光网络的架构,其特点是支持更细粒度的频谱切片分割,借助这一特点能实现更高的频谱资源利用率。参考文献[1-4]研究了具有弹性特质的光网络机制和原理,并对这种光网络的架构进行分析研究。参考文献[5]研究了电力弹性光网络中业务流量的调配问题,探讨了弹性光网络针对电力通信业务的适用性。

由于弹性光网络可以根据需求来合理均衡配置频谱资源,以实现不同业务需求的合理资源分配,从而有效地减少了频谱资源的浪费,提高了频谱分配的灵活性^[6],近年来被广泛应用于电力通信网。但弹性光网络对业务进行路由和频谱分配将导致频谱的复杂状态,分配之后剩下很多的频谱碎片,这些频谱碎片夹杂在频谱段之间增加了频谱资源分配的难度。

为适应智能电网中快速增长的灵活性和多样性业务,需要与之相适应的弹性光网络动态频谱分配算法,通过算法对频谱碎片进行整理和配置优化,进而让配电业务数据传输更快,并提高配电通信网的高效性,以适应未来智能电网日益复

杂的网络流量^[7]。因此,本文针对配电通信网的现状和业务发展的需求,研究了弹性光网络机理,实现了基于频谱碎片整理技术的弹性光网络频带充分利用;通过分析网络配置问题,结合遗传和蚁群算法的优势,提出一种适用于现代电力业务通信的频谱资源分配优化方法^[8],并找到最优解,从而优化弹性光传输网络的网络性能,为智能电网中的业务数据交互提供更稳定、更高效的通信网络。

2 弹性光网络频谱分配技术

随着电力系统中子系统节点数量的不断变大,对于系统中的数据调度能力要求也越来越高,电网中的数据规模越来越大,电力系统的控制、分析、计算需要不断智能化^[9],其需求侧管理将面临更大的挑战,在智能电网数据通信过程中频谱分配问题会对网络的资源利用率产生很大的影响。要想更有效地利用频率资源,优化频谱配置机制变得很有必要,从而改进通信频谱的配置机制。常用的频谱分配算法可以总结为下面几种。

(1) 随机命中(random hit, RH) 频谱分配算法

在选定路由上查找所有满足智能配电业务需求的可用频谱资源,再从这些可用频谱资源中选择一段满足要求的可用频谱资源进行分配。该算法的随机分配特性决定了总体最优的网络性能无法实现。

(2) 首次命中(first-hit, FH) 频谱分配算法

在选定路由上查找满足智能配电业务需求的可用频谱资源,找到频隙序列小的可用的频谱资源就给业务进行分配。这种算法与随机命中算法相比,不需要用到所有的频谱资源,计算量较小,但也存在一定缺陷。当一条路径有多处频隙可供分配时,频隙序列小的频隙块在被业务占用后还有空闲频隙剩余,假如剩余的空闲频隙无法满足之后的业务需求,那么这些空闲频谱就会成为频谱碎片,造成一定程度上的频谱资源浪费。

(3) 精确匹配 (exact matching, EM) 频谱分配算法

在该算法中, 根据到达业务的需求, 查找满足智能配电业务所需的可用频谱资源, 查看全部空闲可用的频谱块数量并查找其中是否存在和业务需要的数量一样的可用频谱块, 若存在就匹配该频隙块, 若不存在就依照首次命中分配算法来匹配频谱。该算法通过优化资源配置规则实现了频谱资源的有效利用, 空闲频谱块能够被更好地利用, 进而满足更多的业务需求。

3 配网通信光网络的频谱碎片整理技术

为了满足智能电网日益复杂的配电通信业务需求, 根据不同的用户需求提供不同的 QoS 服务和业务类型, 提高网络性能, 从而将灵活、高效的弹性光网络应用于智能配电网。弹性光网络凭借自身的网络性能优势被广泛应用, 但是频谱碎片的分布情况对于弹性光网络的整体性能影响很大。在灵活栅格的情况下, 频谱碎片愈加严重, 主要体现在: 当一部分频谱随着光路动态拆除而变得空闲时, 空闲的频谱分散在全部可用的频谱范围中, 使一些需要占据较长频谱的进程不能顺利运行, 阻碍网络运行; 尤其是匹配频谱时, 不仅要保证波长的连续性, 还要保证频谱的连续性, 因此加重了通信网中的频谱碎片现象。

由此可见, 配电网通信业务的频谱碎片整理等问题亟待解决。频谱碎片整理技术一般有 3 类^[10-12]。

(1) “make-before-break”

首先创建一条新的光链路, 建立好之后再将原来的光链路清除。这种方法的缺点是需要一对额外的收发器来建立新的光链路^[13]。

(2) “push-pull (推拉)”

相干接收机能够自主地完成频率的调控, 并且频谱调节工作在接收端和发送端同步进行, 这样就完成了光链路的重构。这种方法避免了“先

断后合”所需的额外收发器, 但需要更长的时间进行调节, 最终从频率 f_1 “push-pull” 到 f_0 处。

(3) “hitless defragmentation”

这种技术需要一个可实时调节的激光器和高速波长跟踪突发相干接收机以及节点缓存能力。与“push-pull”相比, 它不用提前在调节频率的附近故意把频段空出来, 因而应用层的链路带来的影响会变小。

然而, 这些频谱碎片整理技术都存在一定的缺陷, 尚不能解决由动态业务的预留与释放的随机性而导致的网络各链路资源杂乱化对智能配电通信业务带来的挑战。

4 面向配网业务的弹性光网络频谱优化

为弥补单一频谱碎片整理技术的缺陷, 提升频谱分配过程中的网络效益, 满足智能配用电业务的需求, 本文通过分析网络配置问题并结合遗传和蚁群算法的优势特点, 进而提出一种适用于现代电力业务通信的频谱资源分配优化方法。

4.1 基于遗传蚁群算法的频谱优化整理方案

本文提出了面向智能配用电业务需求的弹性光网络频谱优化整理算法, 达到对频谱碎片充分利用的目的, 以提高业务传输的效率。

遗传算法以“优胜劣汰, 适者生存”为原则, 在漫长的进化过程中, 生命力明显较强的新物种以及新种群被选择出来, 迭代时可以智能地调整其自组织和自适应能力, 借助具有的顽健性来完成复杂的非结构化过程, 对参数进行编码, 然后进行处理^[10]。目标函数具有连续、可导等性质, 但不会对寻优过程造成影响, 因此, 使用以目标函数为基础的评价因素, 符合并行运算需求, 为方式及流程提供参考依据, 便于扩展应用。

群体中每只蚂蚁的路线选择彼此不受影响, 仅通过各自遗留的信息素来实现与其他蚂蚁的信息交互。另外并行运算方式可避免不必要的时间浪费。蚁群算法还包含正反馈特性。蚂蚁会选择



信息素更多的地方走,随着更多的蚂蚁走过这个地点,该地点的信息素的量也会增加^[13]。这一特点加快了该方法的收敛,可与其他多种算法进行优势互补,种类各异的问题在求解过程中均适用。本文通过结合遗传和蚁群两种算法,将系统中的反馈信息更好地利用起来,有效地缩短了频谱资源优化配置时间,改善了原始状态的信息素问题。总体算法框架如图1所示。

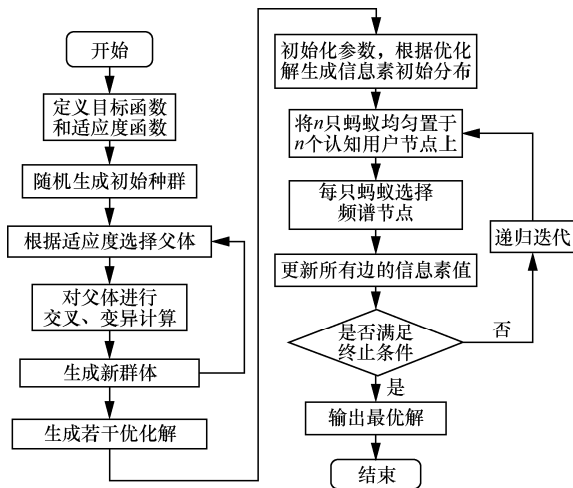


图1 智能配电网环境下优化算法总体框架

在算法搜索的初期,根据配电网通信频谱选择的需求,定义目标函数,采用遗传算法,选择合理的编码方案,对染色体进行解码,然后选择相应的适应度函数,进行选择、交叉、变异操作。直到满足设定的停止条件。该方法把遗传算法求得的优质解作为蚁群算法的信息素浓度初始值,从而将二者结合,实现配网通信的频谱优化整理。

4.2 基于遗传算法的智能配用电业务频谱选择

为适应配电网业务不断扩展的速度和范围,服务于电力系统的通信网络中的通信节点数量随着电力业务的增长而变化,与此同时,针对不同的业务需求需要匹配不同的数据服务,从而对通信频谱带宽的要求也不同。

基于遗传算法对智能配用电业务通信链路频谱进行选择,将用户依次编号为: 1, 2, 3, ..., n 。参照 L 矩阵选取各个用户的空闲频谱,再一一匹配。

若1号用户匹配频谱 B , 则记作 1^B , 2号用户匹配频谱 C , 则记作 2^C 。某一条染色体可表示为 $1^B, 2^C, \dots, N^A$ 。当对比进化率的时候,把频谱转换成二进制,如 $1^{0010}, 2^{0011}, \dots, N^{0001}$ 。

用户随意匹配频谱,构成染色体并且能够达到干扰标准水平^[14]。以效益为基准,把基因平均分成不同的组,并随机为基因排序,按效益的好坏排列基因组,从而得到原始种群中的不同染色体。种群规模取经验值 50。目的是在基因组中选择效益最优组,得出某一信道的利用效益是所有使用该信道的用户效益之和,设信道效益为 r_n , 则有:

$$r_n = \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (1)$$

其中, n 为第 n 个信道,最大数为 N ; m 为使用该信道的用户数,最大数为 M 。而所有信道效益总和为:

$$\text{SUM} = \sum_{n=1}^N r_n = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (2)$$

则适应度函数,即平均最大化网络效益总和为:

$$U_{\text{MSRM}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (3)$$

使用轮盘赌选择法来选择不同的染色体。

交叉是遗传算法的一个关键步骤。本文的交叉方法为: 在 $[1, n]$ 中任意选出染色体中的交叉点。对整数之后的染色体段实现交叉过程。把双方的剩余染色体片段分别保存到不同的数组 $x[]$ 和 $y[]$ 中。再把二者中交叉点后的片段与 $x[]$ 和 $y[]$ 比较,替换掉和数组中元素不同的部分。相同的片段,则先替换为相应元素再进行交换。设定概率小于设定值 P_c 时进行交叉。根据经验值 P_c 取 0.6。

染色体变异可以维持种族和群体的生物复杂性,预防早熟。本文实现染色体变异的方法为: 通过随机数来生成 $[1, 3]$ 区间内的整数 Rand Key, 依据该数值选择对应的变异过程。

(1) 当 Rand Key=1 时,进行插入操作。随机产生 $[1, n]$ 之间的两个整数当作变异点,把后边变

异点的基因插入前者。

(2) 当 Rand Key=2 时, 进行反转操作。随机产生 $[1, n]$ 之间的两个整数 x 与 y , 将变异区间 $[x, y]$ 内的基因以相反的顺序进行排列。

(3) 当 Rand Key=3 时, 进行交换操作。随机产生 $[1, n]$ 之间的两个整数当作变异点, 交换二者的基因。

设置最小和最大遗传迭代次数为 $\text{Gene}_{\min}$ 、 $\text{Gene}_{\max}$, 最小进化率为 $\text{Gene}_{\min\text{-improv-ratio}}$, 最小进化率连续代数为 Gene_{die} 。当遗传算法的迭代更替次数达到最大值或迭代中连续 Gene_{die} 代, 子代优化解改进率都小于 $\text{Gene}_{\min\text{-improv-ratio}}$ 时, 算法结束。

4.3 基于蚁群算法的智能配用电业务频谱优化分配

现有的通信频谱整理机制无法满足智能配电网的业务通信需求, 通信频谱资源无法合理有效地利用起来, 从而导致通信网络性能的降低, 影响电力通信网络的稳定性, 所以需要在遗传算法的基础上基于蚁群算法的频谱优化分配方法来改善通信频谱分配问题^[15], 将使用二部图 $G=(V, U, E)$ 来解释频谱分配问题, V 是 n 个节点的集合, 表示 n 个用户; U 是 m 个节点的集合, 表示 m 个授权用户; E 是连接用户和授权用户的边, $E=\{e_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$ 。边 e_{ij} 相连表示将 i 匹配给了授权者 j 。 T_{ij} 是边 e_{ij} 上的迹, 假设用户 i 与授权者 j 之间没有连接, 则 $T_{ij}=0$ 。

(1) 信息素设置与更新: $T_{ij}(t)$ 的更新方程为:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau'_{ij} \\ \tau_{ij}(t) = \tau_{ij}(t)_{\max}, \tau_{ij}(t) > \tau_{ij}(t)_{\max} \\ \tau_{ij}(t) = \tau_{ij}(t)_{\min}, \tau_{ij}(t) < \tau_{ij}(t)_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

其中, ρ 是信息素挥发率, $T_{ij}(t)_{\max}$ 和 $T_{ij}(t)_{\min}$ 分别是边 e_{ij} 上信息素的最大值和最小值 (本文将它们分别设置为无限大和 60), $\Delta \tau'_{ij}$ 为该次历经 e_{ij} 上的迹的增加量, 计算式如下:

$$\begin{cases} \Delta \tau'_{ij} = Q \cdot b_{ij}, \text{ 认知用户 } i \text{ 与授权用户 } j \text{ 之间有边} \\ \Delta \tau'_{ij} = 0, \text{ 认知用户 } i \text{ 与授权用户 } j \text{ 之间无边} \end{cases} \quad (5)$$

其中, Q 为调整系数, b_{ij} 为效益系数。

(2) 授权用户节点选择策略。蚂蚁依照式 (4) 来选取授权用户节点 j 。

$$\begin{cases} j = \text{RW}(P_j^x), q \leq q_0 \\ j = \arg \max(P_j^x), \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, q_0 是提前设置的阈值参数, 经验值取 0.9; q 是均匀分布在 (0, 1) 内的随机数; RW 表示轮盘赌选择法; P_j^x 为转移概率, 定义为:

$$P_j^x = \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (b_{ij})^\beta}{\sum_{i \in I} [(\tau_{ij}(t))^\alpha (b_{ij})^\beta]} \quad (7)$$

其中, i 为除禁忌表中的元素以外的蚂蚁可访问节点的集。 α 、 β 为蚁群算法控制参数。

(3) 设置蚁群算法控制参数 $\alpha=\beta=1$, 信息素挥发率 $\rho=0.2$, 调整系数 $Q=10$ 。

(4) 蚂蚁数设定为用户节点数 n 。

(5) 蚁群算法结束条件 (仅需符合 1 条): 蚂蚁算法迭代次数达到 $\text{Ant}_{\max}$; 迭代中连续 Ant_{die} 代, 子代优化解改进率均低于 $\text{Ant}_{\min\text{-improv-ratio}}$ 。

4.4 基于遗传蚁群算法的频谱整理算法流程

结合遗传算法和蚁群算法优势特点, 将二者结合, 应用于智能配用电业务频谱优化分配当中, 进而能够改善通信信道中的空闲频谱碎片的占比情况, 使得配电网中通信频谱更好地被利用, 具体方法如下。

(1) 设置遗传算法的终止条件。

(2) 设置蚁群算法所需迹的原始值: 将各边 e_{ij} 上的迹的原始值设置为:

$$T_{ij}(t_0) = T_0 + \Delta T_{ij} \quad (8)$$

其中, T_0 是边 e_{ij} 上的信息素常数, 取值为 60。 ΔT_{ij} 为由遗传算法得到的边 e_{ij} 上的信息素的增加数量。

(3) 将遗传算法的解转变成蚁群算法信息素的增量: 选择求解中适应度前 10% 的解记作 $S_{10\%}$ 。 ΔT_{ij} 初始值为 0, 当 e_{ij} 被 $S_{10\%}$ 中的某个解 s 历时, 则



ΔT_{ij} 自加 20。

5 仿真实验

为了验证本文提出的电力弹性光网络频谱优化方法的性能,采用 MATLAB 来开展算例仿真验证工作。其中,遗传算法用于提高智能配电网通信平均总收益,提升网络性能,其作用是寻找函数最值点,当函数图像存在很多极值点时,遗传算法比牛顿法更为有效,比如 $z = 23 + x \sin(4\pi \cdot x) + y \sin(20\pi \cdot y)$ 的图像,如图 2 所示。

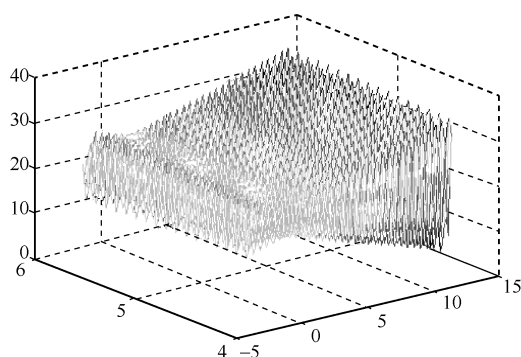


图 2 遗传算法目标函数

要求解的目标函数需使网络平均总效益达到最优。

$$U_{\text{MSRM}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{n,m} \cdot b_{n,m} \quad (9)$$

其中, U_{MSRM} 为网络总效益, a 矩阵是分配矩阵, a_{mn} 表示是否将 m 频段分配给 n 用户, b 矩阵为效益矩阵, b_{mn} 表示将 m 频段分配给 n 用户时的网络效益。本文选择用户数为 16, 频谱数为 64。同时对变量编码,将频谱分配方式设为 x , 每一种 x 对应一套 a 、 b 矩阵。

本文遗传算法模型采用如下参数:种群大小为 50, 最大迭代次数为 40, 交配概率为 0.70, 编译概率为 0.03。通过多次实验可以得到迭代次数和配

电网络系统平均总效益之间的关系如图 3 所示。

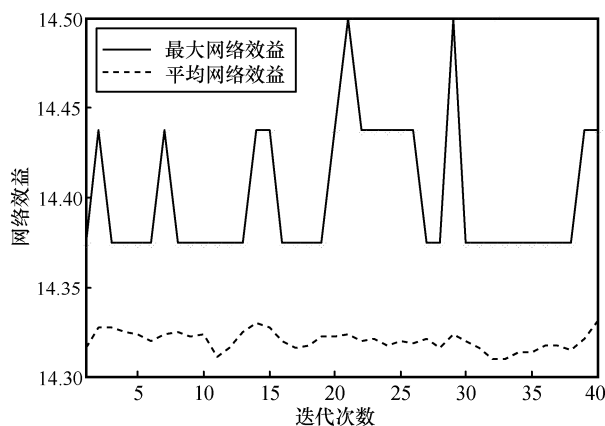


图 3 迭代次数与网络效益的影响关系

由图 3 可以看到,网络平均效益随着迭代次数的增加有明显的增长。此时的 a 矩阵是 m 个频谱碎片分配给 n 个用户的分配方式,然后使用当前 m 分布作为初始坐标信息,用蚁群算法解决如下问题:当有新碎片产生时的频谱整理问题; m 中剩余的不满足带宽的连续性频谱如何整理的问题。

先以 a 、 b 的连接关系为蚁群算法原始的信息素分布矩阵 $T(i, j)$ 。同时已知有 k 个新增频谱,扩充坐标矩阵到 $m+k$ 维。同时为了满足频谱连续性的要求,本文按带宽 B 将 $m+k$ 个带宽重新划分为若干大于或等于 B 的子集。假设新集合为 S ,对 S 中的 B/S 个子集分别使用蚁群算法,确定各自的频谱连接方式。按业务 2 Mbit/s 带宽可以计算出一个子集的频谱碎片数量为 28 个。用频谱宽度的倒数来定义距离,得到频谱间的代价矩阵 $D(i, j)$ 。参照认知无线电通信频谱配置领域的遗传蚁群优化算法模型,本文在仿真时蚁群算法选择参数见表 1。

经过仿真软件编码得到遗传蚁群算法仿真的结果如图 4 和图 5 所示。

表 1 遗传蚁群算法模型参数

蚂蚁数量	常数 Q	最大迭代次数	信息素重要程度因子 α	启发函数重要程度因子 β	信息素挥发因子 ρ
35	11	40	1	4	0.1

图4中数字为网络节点编号,在当前限制条件下通过遗传蚁群算法计算的仿真结果输出最短路径环,即最优环路线为:21-28-27-26-7-2-13-14-9-10-16-20-24-23-22-11-1-18-5-6-4-25-15-8-19-3-17-12-21。

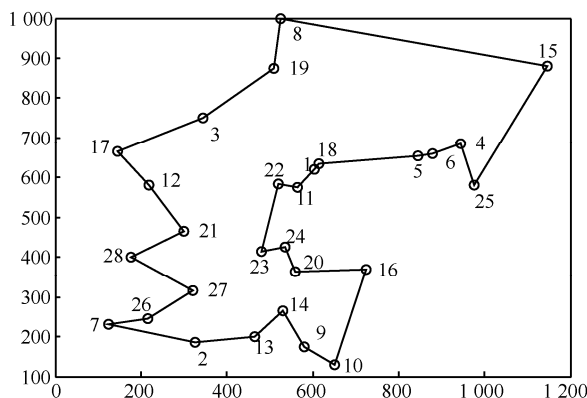


图4 配电网环境下遗传-蚁群算法最优环路

图5展示了遗传蚁群算法最优解收敛曲线,由图5可以看出,该算法能在较少的迭代次数下搜索到最优环的路线,从而减少了各代最短路径的运算量,加快了算法的收敛速度,可以看到在迭代21次后就收敛到了最小值。由此可见,该算法可以一定程度上优化频谱配置问题和提升网络的性能,保障了电力系统中的大容量数据传输的需要。

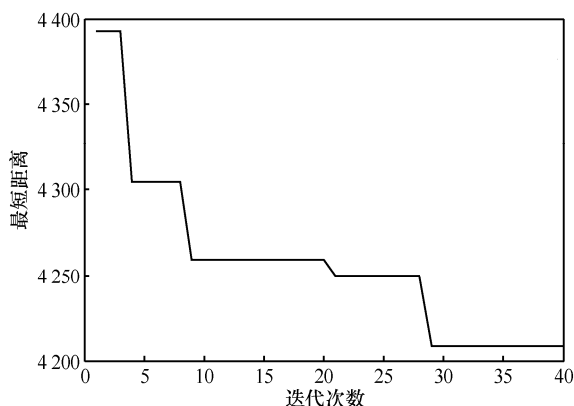


图5 配电网环境下遗传-蚁群算法最优解收敛曲线

6 结束语

由于智能电网的业务扩展迅速和设备数量增

加,为电力系统提供服务的通信网架构体系在数据传输速度和信息传递率方面有待提高,从而需要更稳定、更高效的网络资源配置机制。合理有效地分配用户所需的频谱是弹性光网络提供可靠通信服务以及提升智能电网通信系统性能的关键,弹性光网络频谱分配问题的实质是优化的问题。本文通过分析网络配置问题并结合遗传和蚁群算法的优势特点,进而提出一种适用于现代电力业务通信的频谱资源分配优化方法,以提升网络效益、增加频谱分配的公平性,为智能电网信息交互、网络流量分配提供一种解决方案,进而适应不断变化的智能电网业务的通信需求,构建更高效、更智能、更可靠的电力通信网络。

参考文献:

- [1] 李佳,董屹,肖何. 频谱分片弹性光网络关键技术的探讨[J]. 电脑知识与技术, 2016, 12(18): 35-36.
LI J, DONG Y, XIAO H. Discussion on key technologies of spectrum piecewise of elastic optical network[J]. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(18): 35-36.
- [2] 龙艳. 弹性光网络中路由与频谱资源分配算法的技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
LONG Y. Research on routing and spectrum resource allocation algorithms in elastic optical networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [3] 严毅,肖媚,谢锋,等. 弹性光网络路由频谱配置算法研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(3): 722-726.
YAN Y, XIAO M, XIE F, et al. Research on the routing spectrum allocation algorithm for elastic optical networks[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2015, 40(3): 722-726.
- [4] 宋茜. 弹性光网络资源分配机制的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
SONG Q. Resource allocation mechanism of elastic optical networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [5] 于鹏飞,张小建,陈操,等. 电力弹性光网络流量疏导的RSA算法研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(12).
YU P F, ZHANG X J, CHEN C, et al. Research on RSA algorithm for traffic grooming in power elastic optical networks [J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(12).
- [6] ZHOU H, MAO S, AGRAWAL P. Optical power allocation for adaptive transmissions in wavelength-division multiplexing free space optical networks [J]. Digital Communications & Net-



- works, 2015, 1(3): 171-180.
- [7] 刘焕淋, 徐一帆, 陈勇. 基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 892-898.
- LIU H L, XU Y F, CHEN Y. The resource allocation strategy of elastic optical network based on spectrum sensing service segmentation-merging [J]. Journal of Electronics and Information, 2016, 38(4): 892-898.
- [8] 李庆良. 智能电网信息系统体系结构分析[J]. 电子制作, 2014(17): 118.
- LI Q L. Smart grid information system architecture analysis [J]. Electronic Production, 2014(17): 118.
- [9] 刘焕淋, 李瑞艳, 孔德谦, 等. 基于多目标遗传算法优化弹性光网络的多路径保护机制[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2261-2267.
- LIU H L, LI R Y, KONG D Q, et al. Optimizing the multi-path protection mechanism of elastic optical network based on multi-objective genetic algorithm [J]. Journal of Electronics and Information, 2016, 38(9): 2261-2267.
- [10] 罗芥. 弹性光网络中频谱碎片整理问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- LUO J. Research on spectrum defragmentation in elastic optical networks [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [11] 蔡畅, 王亚芳, 苗兵梅, 等. 基于改进遗传算法的认知无线传感网动态频谱分配方案[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 85-93.
- CAI C, WANG Y F, MIAO B M, et al. Dynamic spectrum allocation scheme for cognitive wireless sensor networks based on improved genetic algorithm [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 85-93.
- [12] 周恒, 畅志贤, 杨武军, 等. 一种 5G 网络切片的编排算法[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 130-137.
- ZHOU H, CHANG Z X, YANG W J, et al. A 5G network slicing scheduling algorithm [J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 130-137.
- [13] SHEN G, WEI Y, BOSE S. Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2014, 6(7): 649-659.
- [14] 郭霖, 陈志刚, 曾锋. 染色体片段交叉重组的频谱分配遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(4): 1219-1223.
- GUO L, CHEN Z G, ZENG F. Spectrum allocation genetic algorithm for cross-recombination of chromosome fragments [J]. Computer Applied Research, 2016, 33(4): 1219-1223.
- [15] 吴轩, 孙文胜, 陆家明. 基于遗传蚁群优化算法的认知无线电频谱分配[J]. 通信技术, 2015, 48(11): 1265-1269.
- WU X, SUN W S, LU J M. Cognitive radio spectrum allocation based on genetic ant colony optimization algorithm [J]. Communication Technology, 2015, 48(11): 1265-1269.

[作者简介]



赵必游 (1983-), 男, 广东省电力有限责任公司茂名供电局高级工程师, 主要研究方向为电力系统通信及信息安全。



张善辉 (1994-), 女, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为信息与通信工程。



王进帅 (1992-), 男, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为信息与通信工程。