

采用多目标网格进化算法并面向对象的舰船电网重构

蒋燕君^{1,2}, 姜建国¹, 张宇华¹

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 浙江树人大学 信息科技学院, 浙江 杭州 310015)

摘要: 考虑系统失电负荷量、电网有功损耗、线路负荷分配失衡度和开关操作次数, 构造出舰船电网重构模型。以网格为载体, 在邻域范围内进行选择、交叉和变异, 采用精英策略, 提出基于多目标进化并面向对象的舰船电网智能重构方法。该方法在不影响解的全局最优性的基础上, 极大缩短了算法执行时间, 并将各种 Pareto 重构算法的共同属性和操作抽象出来形成公共基础平台, 改进超体积指标计算方法, 实现不同算法性能间的公平比较。算例分析结果表明, 在算法运行时间及所获解集的趋近度和分布度方面, 所提方法均优于 NSGA-II 和 SPEA2。

关键词: 网络重构; 多目标网格进化算法; Pareto 最优; 超体积; 舰船电网; 进化算法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.005

0 引言

由于舰载高能武器发射、大功率探测和快速推进等供电需要, 舰船电力系统呈现出高度集成化趋势, 且供电连续性和可靠性要求更苛刻, 使舰船电网规模与复杂性大为增加。为保障舰船多样化电力需求, 舰船电网智能重构 NR(Network Reconfiguration) 十分必要。

舰船电网重构是一个多目标多约束的优化决策问题^[1-10]。通常重构目标与约束条件保持不变, 重构目标间偏好关系由实时电力调度决定而经常发生变化, 因此为提高获取全局最优解的效率, 以获得一组 Pareto 最优解集为目标的本质多目标方法逐渐替代以获得一个全局最优解为目标的传统多目标方法。但当重构目标个数超过 3 时, 多数 Pareto 方法^[11-14]在判别解的非支配关系上需耗费大量时间, 难以满足舰船电网重构快速性需求。面向过程的 Pareto 重构策略不但可扩展性较差, 且相互间难以客观公正地进行性能比较。同时由于重构问题的真正 Pareto 前沿往往未知, 这给算法性能指标的计算带来很大困难。

针对以上不足, 本文提出基于多目标网格进化并面向对象的舰船电网智能重构策略, 该方法采用局部搜索技术, 能有效缩短搜索时间, 且基于 Java 的面向对象设计使算法具有良好的移植性和可扩展性, 同时其公共平台的建立让不同 Pareto 方法间性能比较成为可能。最后对舰船电网的 3 个算例进行重构测试。

收稿日期: 2012-04-24; 修回日期: 2013-01-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA050403)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China(2011AA05-0403)

1 舰船电网重构模型

1.1 目标函数

舰船电网重构建模主要考虑以下几个目标: 系统失电负荷量尽可能小; 电网有功损耗尽可能小; 线路负荷分配失衡度尽可能小; 开关操作次数尽可能少。因此舰船电网重构目标描述如下:

$$\min f_1(\mathbf{X}) = \sum_{i \in B_1} L_i - \sum_{i \in B_2} L_i \quad (1)$$

$$\min f_2(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^E R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (2)$$

$$\min f_3(\mathbf{X}) = \sum_{i \in B_2} L_i^2 / \left(\sum_{i \in B_2} L_i \right)^2 \quad (3)$$

$$\min f_4(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N |x_i^1 - x_i^2| \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$$

其中, $f_1(\mathbf{X})$ 为系统失电负荷量, L_i 为母线 i 处负荷, B_1 为重构前电网供电母线集, B_2 为重构后电网供电母线集; $f_2(\mathbf{X})$ 为重构后电网有功损耗, 可由潮流计算求得, R_i 为线路 i 的电阻, U_i 、 P_i 和 Q_i 分别为线路 i 末端母线的电压、有功和无功, E 为电网中线路总数; $f_3(\mathbf{X})$ 为重构后线路负荷分配失衡度; $f_4(\mathbf{X})$ 为参与重构的开关操作次数, x_i^1 、 x_i^2 分别为重构前、后开关 i 的状态, N 为开关总数; $\mathbf{X}$ 为开关序列状态向量, 也即决策变量, x_i 为开关 i 的状态, $x_i(i=1, 2, \dots, N)$ 取值 1 或 0 分别表示开关 i 处于闭合或断开状态。

重构操作将使电网拓扑发生改变, 引起电网供电母线集 B_2 产生变动, 导致线路负荷分配情况发生变化, 因而负荷分配失衡度 $f_3(\mathbf{X})$ 能客观地反映出重构后负荷分配实际均衡状况。

1.2 约束条件

a. 重构后舰船电网仍需保持辐射状结构。

b. 母线电压需维持在允许范围内:

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \tag{5}$$

其中, U_i 为母线 i 的电压, $U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为母线 i 运行时电压的最小和最大允许值。

c. 线路电流需维持在允许范围内:

$$I_i \leq I_{\max} \tag{6}$$

其中, I_i 为线路 i 的电流, $I_{\max}$ 为线路 i 运行时电流的最大允许值。

1.3 偏好知识

本文假设重构时根据实际需要确定 4 个目标函数间的偏好关系有以下 2 种可能。

a. 舰船电网正常运行时的重构:

$$f_1(\mathbf{X}) > f_2(\mathbf{X}) > f_3(\mathbf{X}) > f_4(\mathbf{X}) \tag{7}$$

b. 舰船电网故障恢复时的重构:

$$f_1(\mathbf{X}) > f_4(\mathbf{X}) > f_2(\mathbf{X}) > f_3(\mathbf{X}) \tag{8}$$

其中,“>”表示“偏好大于”。

2 多目标网格进化算法

多目标网格进化算法 MGEA (Multiobjective Grid Evolutionary Algorithm)保留了问题的多目标本质,采用外部存档策略来存储非支配解^[11-12],利用反馈机理将从档案中选取的非支配解随机地替代子代种群中的部分个体,是一种获取 Pareto 前沿的精英算法^[15-17]。MGEA 如表 1 所示。

表 1 多目标网格进化算法
Tab.1 Multiobjective grid evolutionary algorithm

序号	MGEA
1	procedure MGEA
2	Initialization()
3	pop=CreateGrid()
4	Pareto_front=CreateFront()
5	while (! termination_condition) do
6	for 1 to popSize do
7	neighbors=GetNeighborhood(position(individual),pop)
8	parents=Selection(neighbors)
9	offspring=Crossover(parents, P_c)
10	Mutation(offspring, P_m)
11	Evaluate(offspring)
12	Insert(position(individual),offspring,aux_pop)
13	InsertParetoFront(offspring,Pareto_front)
14	end for
15	Feedback(Pareto_front,aux_pop)
16	pop=aux_pop
17	end while
18	end procedure

算法第 2 行中,对算法需要的变量、参数和算子进行初始化。第 3 行先产生初始种群,再建立二维环形网格,并将初始种群中所有个体逐个放置在网格中。第 4 行建立一个空的 Pareto 前沿。对于种群 pop 的每个个体,根据个体所在位置可知其邻域范围,从而获取相应邻居 neighbors(第 7 行)。从 neighbors

中选取 2 个个体作为双亲 parents,以概率 P_c 进行交叉,得到子代 offspring,再以概率 P_m 对 offspring 进行变异,并对经选择、交叉和变异得到的个体进行评价(第 8—11 行)。第 12 行中辅助种群 aux_pop 初值为第 3 行产生的初始种群;若按定义 1 判断,个体 offspring 优于 individual,则 aux_pop 位于原网格上的 individual 被 offspring 替换。这里定义 1 中的指定种群是由 neighbors、individual 和 offspring 共同组成的。如果个体 offspring 不被 individual 支配,则把 offspring 增加到 Pareto_front 中,若此时 Pareto_front 个数刚越界,那么舍去在 Pareto_front 中具有最小拥挤距离^[12]的个体(第 13 行)。待种群 pop 中所有个体都完成第 7—13 行操作后,从 Pareto_front 中选取一定量个体随机地替换 aux_pop 中相同数量的个体(第 15 行),再把旧种群 pop 替换成辅助种群 aux_pop(第 16 行)。上述迭代过程一直进行到满足终止条件 termination_condition 为止。MGEA 中一代种群的进化过程如图 1 所示。

定义 1 设解 $\mathbf{X}$ 优于解 $\mathbf{Y}$,则下列条件之一成立:解 $\mathbf{X}$ 支配解 $\mathbf{Y}$;解 $\mathbf{X}$ 与解 $\mathbf{Y}$ 互不支配,且在指定种群中解 $\mathbf{X}$ 比解 $\mathbf{Y}$ 具有更大的拥挤距离。

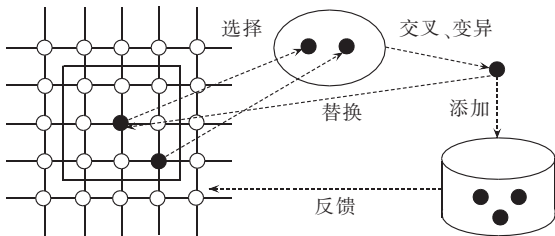


图 1 一代种群的进化过程
Fig.1 Evolutionary process of one generation population

MGEA 中,个体的邻域(Neighborhood)是指该个体邻近网格位置的集合。不同形状的邻域对 MGEA 的性能有较大的影响。按模式不同,邻域可分为线性和紧凑 2 种。常见的邻域形状有 L5(Linear 5)和 C9(Compact 9)2 种,如图 2 所示。

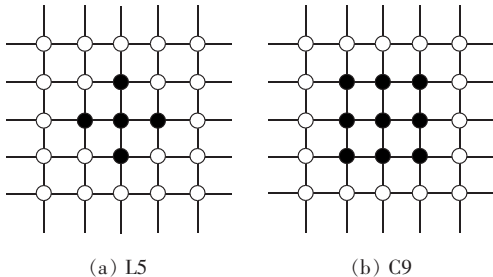


图 2 邻域形状
Fig.2 Neighborhood shape

从表 1 可知,选择、交叉和变异算子仅作用在个体邻域范围内,减缓了基因扩散速度,因而 MGEA 本质上是一种局部搜索算法。需要说明的是,种群

pop 需完成一次迭代后,才借助辅助种群 aux_pop 实现一次性更新,即同步更新。根据实际需要,也可采用异步更新。

3 面向对象的舰船电网重构框架

采用面向对象技术实现舰船电网重构,主要基于以下考虑:将各种重构算法的公共属性和操作抽象出来形成共同的基础类平台,使不同算法能在同一平台上客观公正地进行性能比较;为算法选择适合实际重构问题的参数和算子提供便利和灵活性;基于 Java 语言的面向对象设计具有良好的可移植性和可扩展性。

图 3 为舰船电网重构基础类图。图中,“*”指 0 个或多个,“1..*”指 1 个或多个,电网重构基本框架由算法 (Algorithm)、算子 (Operator)、问题 (Problem)、解的类型 (SolutionType)、变量 (Variable)、解 (Solution)、解集 (SolutionSet) 共 7 个类组成。每个类均由类名、属性(域)和操作(方法)3 个部分构成^[18]。

所有启发式算法(如 MGEA、NSGA-II^[12]、SPEA2^[14]等)均为抽象类 Algorithm 的子类,该基类中的抽象方法 execute() 须在子类中实现,其功能是启动算法执行,并返回一个种群。基类 Operator 主要有选择、交叉和变异等子类。启发式算法正是通过应用不同算子实现旧解生成新解。所有问题均继承于基类 Problem,其核心方法 evaluate() 实现对解的评价。据问题实际,即可确定解的类型。基类 SolutionType 的子类有 BinarySolutionType、RealSolutionType 等,其抽象方法 createVariables() 建立构成解的变量数组。基类 Variable 有 Binary、Real 等子类,这些不同子类

实例可联合构成同一个解。从进化角度来看,SolutionSet、Solution、决策变量 (Variable[]) 以及变量 (Variable) 分别等价于种群、个体、染色体和基因。

4 基于 MGEA 的舰船电网重构实现

4.1 重构问题子类设计

重构问题是基类 Problem 的子类。子类 NR 由域、构造器 NR(String solutionType) 和方法 evaluate (Solution solution) 组成。域包括重构前网络结构(含线路号及对应母线号)、线路参数、负荷数据和电源电压等。类 NR 核心方法 evaluate() 实现对解的评价,其过程如表 2 所示。

表 2 解的评价过程
Tab.2 Procedure of solution evaluation

序号	解的评价过程
1	procedure evaluate(Solution solution)
2	Initialization()
3	variables = GetVariables(solution)
4	modified_variables = ModifyVariablesIfNecessary(variables)
5	SaveModifiedVariablesToSolution(modified_variables, solution)
6	TopologyIdentification()
7	PowerFlowCalculation()
8	ComputeObjectives()
9	ComputeConstraints()
10	SaveObjectivesAndConstraintsToSolution()
11	end procedure

算法第 2 行中,对计算目标值和约束违背值所需的所有原始数据进行初始化。从方法参数 solution 中提取决策变量值 variables(第 3 行)。结合实际,按以下 3 点对 variables 进行检测:若有故障,则故障区域是否被隔离;电源是否连通;电网是否呈辐射状。

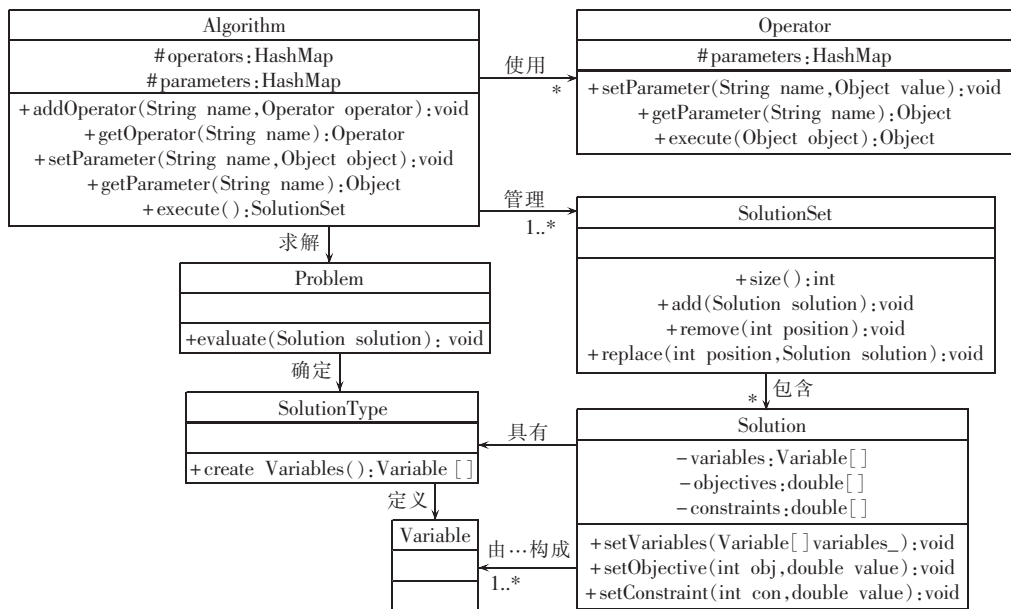


图 3 舰船电网重构基础类图
Fig.3 Base class diagram of shipboard power network reconfiguration

如有必要,则进行修正(第 4 行)。将修正后的决策变量保存到方法参数 solution 中(第 5 行)。对照原始电网结构,获得与修正后的决策变量相对应的电网拓扑,按潮流计算要求对其进行拓扑识别(第 6 行)。结合原始数据进行潮流计算(第 7 行)。根据潮流计算结果和式(1)—(6),进一步计算目标值和约束违背值,并把最终结果保存到方法参数 solution 中(第 8—10 行)。

4.2 重构项目主类设计

重构项目主类名为 MgeaNR,由 2 个域 logger、fileHandler 和 1 个 main(String[] args)方法组成。设置这 2 个域的作用是以文件形式将重构程序运行过程中产生的重要信息记录在日志中。类 MgeaNR 方法 main()实现对舰船电网的重构,其过程见表 3。

表 3 舰船电网重构过程
Tab.3 Procedure of shipboard power network reconfiguration

序号	舰船电网重构过程
1	procedure MgeaNR
2	Initialization()
3	population=ExecuteAlgorithm()
4	LogExecuteTime()
5	PrintObjectivesAndVariablesToFile(population,path)
6	LogPathAndFileName(path)
7	front=GetParetoFront(population)
8	hypervolume=CalculateHypervolume(front)
9	LogPerformanceMetric(hypervolume)
10	end procedure

算法第 2 行中,给定问题、算法和算子,将算法参数和算子初始化,再把算子添加到算法中。执行算法,并返回一个种群(第 3 行)。将算法执行时间记录在日志中(第 4 行)。把目标值和对应的决策变量值保存到指定路径的文件中(第 5 行),同时路径和文件名记录在日志中(第 6 行)。从返回的种群中获取 Pareto 前沿 front(第 7 行)。由 front 计算出超体积(第 8 行),并记录在日志中(第 9 行)。

可借助 NetBeans 或 Eclipse 开发环境运行主类 MgeaNR,实现基于MGEA 的舰船电网重构。

5 重构算法的性能指标

为定量分析多目标重构算法性能,选择能同时兼顾收敛性和多样性的超体积作为评价指标。文献[17,19-21]根据算法获得的非支配解来选择超体积计算所需的参考点,这给不同算法间的性能比较造成很大困难。为此,本文始终以目标空间原点作为参考点,来计算 Pareto 前沿的超体积。以二维目标空间为例,超体积计算示意图如图 4 所示。

假设 Pareto 前沿由 3 个非支配解 a、b、c 组成,则分别从点 a、b、c 向 2 个目标轴作垂线围成多边梯

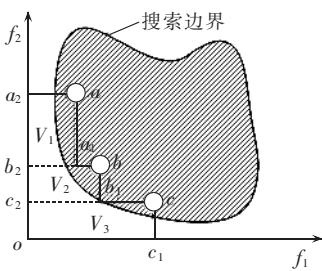


图 4 二维目标空间中的超体积计算
Fig.4 Hypervolume calculation in 2-dimensional objective space

形 $a_2a_1bb_1cc_1o a_2$,该多边形面积即为此 Pareto 前沿对应的超体积 H_V 。通过虚线 b_2a_1 、 c_2b_1 将多边形分割成 3 个小矩形 $a_2a_1b_2$ 、 $b_2bb_1c_2$ 、 c_2cc_1o ,依次记这些小矩形面积为 V_1 、 V_2 、 V_3 ,则:

$$H_V=\sum_{i=1}^3V_i \tag{9}$$

同理,三维目标空间中的超体积计算示意图如图 5 所示,图中的 V_1 、 V_2 、 V_3 分别表示最下面、中间、最上面的多面立方体的体积,由非支配解 a、b、c 构成的 Pareto 前沿的超体积计算公式同式(9)。不难发现,从下到上的 3 个多面立方体底面积正是 3 组非支配解(abc)、(ab)、a 分别在 f_1f_2 平面上的投影构成的 Pareto 前沿在二维目标空间中的超体积。依此类推,通过递归调用,可计算出四维及以上目标空间中的超体积。

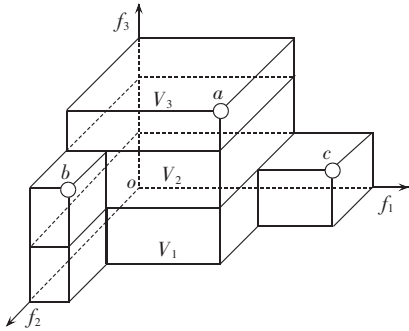


图 5 三维目标空间中的超体积计算
Fig.5 Hypervolume calculation in 3-dimensional objective space

由于上述超体积的计算视原点为参考点,且重构为目标最小化问题,故算法获得的 Pareto 前沿越接近真正 Pareto 前沿,其超体积越小。同时 Pareto 前沿中解的多样性越佳,其超体积也越小。实际问题中,因真正 Pareto 前沿未知,造成无法获知求得的 Pareto 前沿与真正 Pareto 前沿间的接近程度,故只能通过比较超体积大小来判断重构算法性能优劣。

6 算例分析

本文在 NetBeans 7.0 和 Java jdk1.6.0_26 平台

上实现电网重构,并用 3 个算例进行验证。测试所用电脑配置为:AMD Athlon64 X2 4 000 +,主频 2.11 GHz,1 GB 内存。以文献[22]附录 A 舰船电网结构、线路和负荷数据为例,电源电压 $U_1=11$ kV。3 种算法的算子和参数设置如表 4 所示。假定由于某种原因(如线路维护或故障等)要求在电网重构过程中始终保持断开的线路如表 5 所示。

表 4 3 种算法的算子和参数设置
Tab.4 Operator and parameter settings of three algorithms

算法设置	NSGA-II	SPEA2	MGEA
选择算子	二进制竞争	二进制竞争	二进制竞争
交叉算子	单点交叉	单点交叉	单点交叉
交叉概率 P_c	0.85	0.85	0.85
变异算子	基本位变异	基本位变异	基本位变异
变异概率 P_m	0.15	0.15	0.15
最大代数 G_m	250	250	250
种群规模 S_p	100	100	100
档案大小 S_a	—	100	100
网格大小	—	—	10×10
邻域形状	—	—	C9
反馈个数 S_f	—	—	20

表 5 算例 1—3 的断开线路
Tab.5 Disconnected lines in case 1-3

重构约束	算例 1	算例 2	算例 3
断开线路	2	2、4	6、11

NSGA-II^[12]是由 Deb K 在 2002 年提出的一种基于非支配排序和精英策略的快速多目标进化算法。SPEA2^[14]是由 Zitzler E 在 2001 年提出的一种基于细颗粒适应度分配、密度估计和外部存档策略的多目标进化算法。NSGA-II 和 SPEA2 是在多目标进化界最具代表性的 2 种算法。

为反映统计数据中各变量的集中趋势和分散情形,并避免极端变量值影响,本文采用中位数和四分位距进行统计分析。表 6 和表 7 分别为 3 种算法独立运行 30 次得到的运行时间和超体积指标的统计分析,其中 M_v 是中位数, I_{qr} 是四分位距。由表 6 可知,

表 8 不同偏好关系下算例 1—3 的计算结果

Tab.8 Computational results of case 1-3 under different preference relations

算例	X		$f_1(X)/\text{kW}$		$f_2(X)/\text{kW}$		$f_3(X)$		$f_4(X)$	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
1	100111111111111111	10111111111111101	0	0	91.7928	138.2787	0.0866	0.0866	3	1
2	100011111111111111	10101111111111101	44.1	44.1	83.5731	123.9006	0.0918	0.0918	3	1
3	111110111101111111	11111011111011111	0	0	62.9513	62.9513	0.0866	0.0866	2	2

7 结论

本文提出的基于 MGEA 并面向对象的舰船电网智能重构策略,与 NSGA-II 和 SPEA2 相比,在算法运行速度方面具有明显的优势,在算法收敛性能与解的多样性分布方面具有一定的优势,而面向对

表 6 3 种算法运行时间的统计分析
Tab.6 Statistical analysis of calculation time for three methods

算例	NSGA-II		SPEA2		MGEA	
	M_v/s	I_{qr}/s	M_v/s	I_{qr}/s	M_v/s	I_{qr}/s
1	5.6720	0.1950	28.5545	0.4220	3.3045	0.0550
2	5.5390	0.2890	30.7730	0.2735	3.3125	0.0940
3	5.4840	0.1100	19.0075	0.1795	3.4375	0.0705

表 7 3 种算法超体积指标的统计分析
Tab.7 Statistical analysis of hypervolume metric for three methods

算例	NSGA-II		SPEA2		MGEA	
	M_v/s	I_{qr}/s	M_v/s	I_{qr}/s	M_v/s	I_{qr}/s
1	65 330.822	400.275	65 572.899	0	64 239.643	761.326
2	57 755.565	105.485	58 290.215	0	58 307.075	230.452
3	35 460.179	103.702	35 479.766	0	35 081.350	57.330

MGEA 所需运行时间最少,运行速度的稳定性最好;NSGA-II 所需运行时间比 MGEA 略长,运行速度的稳定性最差;SPEA2 所需运行时间最长,是 NSGA-II 的 3.5~5.6 倍,是 MGEA 的 5.5~9.3 倍,运行速度的稳定性尚可。由表 7 可知,MGEA 在算例 1、3 中超体积指标优于其他 2 种算法,但指标大小的稳定性最差;NSGA-II 在算例 2 中超体积指标优于其他 2 种算法,其指标大小的稳定性稍差;SPEA2 在算例 2 中超体积指标优于 MGEA,劣于 NSGA-II,其指标大小稳定性极好。综上所述,MGEA 在舰船电网重构中的表现优于 NSGA-II 和 SPEA2。

表 8 为上述 3 种算法在不同偏好关系下获得的计算结果,其中 P_1 和 P_2 分别表示式(7)和(8)中所描述的目标偏好关系。此结果是在运行算法所获得的 Pareto 最优解集中选取与不同偏好关系相应的最优解而得到。由于 3 种算法所获得的计算结果一致,因而表明这些算法均具有获取全局最优解的能力。从表 8 可知,同一算例在不同偏好关系下所获得的最优解可能不同(如算例 1 和 2),也可能相同(如算例 3)。除可行解集的限制外,这主要依赖于算法所获得的 Pareto 最优解集的多样性。

象的设计不但使其具有良好的移植性和可扩展性,而且实现了基于同平台的不同算法性能的客观比较。对供电连续性要求苛刻的舰船电网而言,重构快速性甚至比全局最优性更为重要,而对于二者均能兼顾地采用 MGEA 的重构决策方法,无疑具有广阔的应用前景。在评价重构算法性能时,本文没有

考察不同参数设置对算法产生的影响,因而在基于MGEA 重构技术的后续研究中,可着重考察算法对网格大小、邻域形状、反馈个数和档案大小等参数不同设置时的灵敏度,以便进一步完善。

参考文献:

- [1] BUTLER-PURRY K L, SARMA N D R. Self-healing reconfiguration for restoration of naval shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 754-762.
- [2] BUTLER-PURRY K L, SARMA N D R, HICKS I V. Service restoration in naval shipboard power systems[J]. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(1): 95-102.
- [3] PADAMATI K R, SCHULZ N N, SRIVASTAVA A K. Application of genetic algorithm for reconfiguration of shipboard power system[C]//39th North American Power Symposium, 2007. NAPS'07. New Mexico, USA: IEEE, 2007: 159-163.
- [4] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅, 等. 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 42-46.
YANG Xiuxia, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Yi, et al. The study of network reconfiguration of the shipboard power system based on heuristic genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 42-46.
- [5] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅. 免疫遗传算法在舰船电力系统供电恢复中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 80-85.
YANG Xiuxia, ZHANG Xiaofeng, ZHANG Yi. Study on immune genetic algorithm for shipboard power system service restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 80-85.
- [6] 朱志宇, 刘维亨, 庄肖波. 基于克隆算法的舰船电力系统故障恢复[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 164-170.
ZHU Zhiyu, LIU Weiting, ZHUANG Xiaobo. Shipboard power system service restoration based on clonal algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 164-170.
- [7] 李哲, 夏立. 改进蚁群算法求解船舶电力系统故障重构问题[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(2): 47-52.
LI Zhe, XIA Li. Service reconfiguration of shipboard power system using improved ant colony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(2): 47-52.
- [8] 李军军, 许波桅, 甘世红, 等. 基于贪婪度表的DPSO求解舰船电力系统网络重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 146-151.
LI Junjun, XU Bowei, GAN Shihong, et al. Discrete particle swarm optimization algorithm based on greed table for network reconfiguration of the shipboard power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 146-151.
- [9] 黎恒烜, 孙海顺, 文劲宇, 等. 用于舰船电力系统重构的多代理系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 81-87.
LI Hengxuan, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. Design of a multiagent system for shipboard power system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 81-87.
- [10] 黄靖, 张晓锋, 叶志浩. 基于多智能体的船舶综合电力系统故障恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 71-78.
HUANG Jing, ZHANG Xiaofeng, YE Zhihao. Method of service restoration for integrated ship power system based on multiagent systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 71-78.
- [11] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 6(4): 257-271.
- [14] ZITZLER E, LAUMANN S M, THIELE L. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm[R]. Zurich, Swiss: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [15] ALBA E, DORRONSORO B. The exploration/exploitation tradeoff in dynamic cellular genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2005, 9(2): 126-142.
- [16] ALBA E, DORRONSORO B, LUNA F, et al. A cellular multiobjective genetic algorithm for optimal broadcasting strategy in metropolitan MANETs[J]. Computer Communications, 2007, 30(4): 685-697.
- [17] NEBRO J A, DURILLO J J, LUNA F, et al. MOCell: a cellular genetic algorithm for multiobjective optimization[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2009, 24(7): 726-746.
- [18] RUMBAUGH J, JACOBSON I, BOOCH G. The unified modeling language reference manual[M]. [S.l.]: Addison Wesley Longman, 1998: 41-62.
- [19] DEB K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[M]. London, UK: John Wiley & Sons, 2001: 332-333.
- [20] ZITZLER E, THIELE L, LAUMANN S M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 117-132.
- [21] BEUME N, NAUJOKS B, EMMERICH M. SMS-EMOA: multiobjective selection based on dominated hypervolume[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(3): 1653-1669.
- [22] 蒋燕君, 姜建国, 乔树通. 采用本质多目标进化算法的舰船电网故障智能恢复决策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 118-124.
JIANG Yanjun, JIANG Jianguo, QIAO Shutong. Intelligent service restoration of shipboard power network using nature multiobjective evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 118-124.

作者简介:

蒋燕君(1973-), 男, 浙江诸暨人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、优化与控制(E-mail: jyj@situ.edu.cn);

姜建国(1956-), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力传动、智能电网和新能源技术;

张宇华(1975-), 男, 河南焦作人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统控制。

Object-oriented reconfiguration of shipboard power network using multi-objective grid evolutionary algorithm

JIANG Yanjun^{1,2}, JIANG Jianguo¹, ZHANG Yuhua¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: With the consideration of out-of-service loads, network active power loss, line load distribution imbalance and switch operation times, a reconfiguration model of shipboard power network is built. An object-oriented intelligent reconfiguration approach based on the multi-objective grid evolutionary algorithm is proposed for shipboard power network, which takes the grid as a carrier, carries out the selection, crossover and mutation in the neighborhood range and adopts the elitist strategy. Without affecting the global optimality of solution, its execution time is greatly reduced. A public base platform is formed by extracting the common attributes and operations from different Pareto-based reconfiguration algorithms. The calculation method of hypervolume metric is improved to realize the fair comparison among different algorithms. Case analysis shows that, the proposed approach is better than NSGA-II and SPEA2 in the tendency and distribution degree of obtained solution set, as well as the calculation time.

Key words: network reconfiguration; multi-objective grid evolutionary algorithm; Pareto optimality; hypervolume; shipboard power network; evolutionary algorithms

(上接第 19 页 continued from page 19)

Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(2): modeling, design and implementation

LI Peng¹, WANG Chengshan¹, HUANG Bibin², GAO Fei³, DING Chengdi¹, YU Hao¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 100052, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The components of DG and microgrid are analyzed in detail and the requirements of modeling for transient simulation in general applications are introduced. The modeling method for various DG units is emphasized, based on which, the object-oriented concept is adopted in the design and implementation of the transient simulation program for DG and microgrid. The hierarchical design is applied to clarify the relationship among computation resource, simulation calculation and advanced application. The detailed design of objects and interfaces reduces the program coupling and enhances as well the cohesiveness of objects and the reusability of algorithms. The program supports the capabilities of modeling and computation at the circuit and element level, which can be easily extended to different simulation scenarios.

Key words: distributed power generation; microgrid; transient simulation; time domain; model buildings; object-oriented design; interface