

DOI: 10.7667/PSPC180320

考虑静态电压稳定的舰船电网多目标故障恢复决策

蒋燕君¹, 张彦魁², 许森¹, 张瑞¹

(1. 浙江树人大学信息科技学院, 浙江 杭州 310015; 2. 中国矿业大学电气工程系, 北京 100083)

摘要: 为了解决没有考虑重构过程诱发的电压稳定问题, 针对舰船电网快速故障恢复, 引入电网线路静态电压稳定指标 SVSI。将故障恢复后电网所有线路 SVSI 指标的最大值作为目标函数, 以表征此时系统静态电压稳定的整体水平, 建立一种考虑静态电压稳定的舰船电网多目标故障恢复重构模型。采用基于局部搜索技术的多目标网格进化算法 MGEA 对该模型进行求解, 算法保留了故障恢复问题的多目标本质, 以网格为载体, 在邻域范围内做选择、交叉和变异, 减缓了基因传播速度。对一舰船电网实际算例进行故障恢复重构测试, 结果表明, 该决策方法在实现舰船电网故障恢复的同时, 可有效提高整个系统的静态电压稳定性。

关键词: 舰船电网; 故障恢复; 网络重构; 电压稳定; 多目标决策

Multiobjective service restoration decision of shipboard power networks considering static voltage stability

JIANG Yanjun¹, ZHANG Yankui², XU Sen¹, ZHANG Rui¹

(1. School of Information Science and Technology, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China;

2. Department of Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of voltage stability induced by the reconstruction process for service restoration of shipboard power networks, the Static Voltage Stability Index (SVSI) of the power network line is introduced. The maximum value of the SVSI index of all lines after the service restoration is taken as the objective function to represent the overall level of static voltage stability at this time. A reconfiguration model considering static voltage stability is established for the multiobjective service restoration of shipboard power networks. The Multiobjective Grid Evolution Algorithm (MGEA) based on local search technology is used to solve the model. The algorithm preserves the multiobjective nature of the service restoration problem. The transmission speed of genes is slowed down by selecting, crossing and mutating in the neighborhood of the grid. The service restoration test is carried out on a practical example of the shipboard power network. The results show that the decision method can effectively improve the static voltage stability of the whole system while realizing the service restoration of the shipboard power network.

This work is supported by Nature Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY14E070001).

Key words: shipboard power network; service restoration; network reconfiguration; voltage stability; multiobjective decision

0 引言

舰船电力系统是一个空间分布紧凑、发电容量有限、缺乏冗余配置、含有大功率动态负荷并且高度耦合的独立电力系统。相比陆上系统, 稳定性及故障恢复能力对舰船的生存更加重要^[1]。继电保护装置通常只能实现故障检测与隔离, 无法考虑系统稳定性或功率平衡, 因此故障恢复重构功能对舰船

电力系统是必须的。动态仿真已证实快速恢复重构对预防毫秒到秒级系统崩溃的有效性^[2]。当系统处于重负荷状态或者稳定裕度较小时, 重构操作带来的拓扑变化及诱发的设备动态行为可能导致系统不稳定, 比如失去同步, 或者持续性电压下降或者电压振荡。在舰船电力系统中, 由于发电机之间的紧密耦合及并联运行, 功角稳定不是主要问题, 电压稳定则相对突出。重构过程中, 负荷转移、电动机堵转、负荷与控制器之间的交互作用等都可能造成电压失稳^[3]。因此, 在舰船电力系统恢复重构中考

考虑电压稳定指标具有实际意义。

舰船电力系统故障恢复是一个多目标多约束的优化决策问题^[4-5]。迄今,研究者已提出了多种故障恢复方法,如遗传算法^[6-7]、离散微粒群算法^[8-9]、克隆算法^[10]、基于云理论的遗传算法^[11]、蚁群算法^[12]和多智能体系统^[13-14]等。这些方法直接或利用层次分析法给定各目标权因子,再进行多目标综合,本质上是单目标故障恢复决策方法。这类方法有两个缺点,一是权因子、缩放因子或模糊集参数实时调整困难,二是获取最优解效率低下^[15]。通常故障恢复重构目标与约束条件保持不变,重构目标间偏好关系由舰船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。为此,文献[15]提出一种基于本质多目标进化算法并面向开关的舰船电网故障智能恢复策略。该策略毋需权因子、缩放因子和模糊集参数,在无目标偏好知识前提下,根据目标和约束值获取一组 Pareto 最优解,再由偏好信息可决策出相应全局最优解。该方法用于舰船电网快速故障恢复时没有考虑重构过程诱发的电压稳定问题。重构操作超出了功角稳定的时间框架,主要对中长期电压稳定产生影响。故障后系统由于网络被削弱使得无功损耗增大,而负荷侧继续增大无功需求,发电侧的动态同时在限制无功出力,随着系统动态的发展,很可能演变为一个典型的中长期电压崩溃。

针对上述不足,本文建立了一种考虑静态电压稳定约束的舰船电力系统多目标故障恢复模型。引入了基于局部搜索技术的多目标网格进化算法 MGEA。该算法保留了故障恢复问题的多目标本质,以网格为载体,在邻域范围内作选择、交叉和变异,减缓了基因传播速度。以一个舰船电网实际算例进行了故障恢复重构测试,结果表明该方法在实现多目标故障恢复的同时,可以提高系统的静态电压稳定性。

1 静态电压稳定指标

电力系统在给定稳态运行点遭受一定扰动后,如果负荷节点的电压能够达到扰动后平衡点的电压值,则称系统为电压稳定。如果故障后平衡点超出系统运行范围限制,将发生电压崩溃,可能是全局性的,也可能在局部范围。虽然电压稳定性问题涉及到电力系统的动态特性,但是,在对系统电压稳定性进行快速近似分析时,基于潮流的静态分析方法通常是有效的^[16-17]。迄今,几乎所有的静态电压

稳定指标都是以潮流方程雅可比矩阵的奇异性作为电压失稳的判据,如灵敏度指标、奇异值和特征值指标、临近指标、裕度指标、局部指标等^[18]。一个好的指标应该具备准确、线性以及计算快速等特征。文献[3]针对舰船电力系统基于潮流方程的可解性提出一种静态电压稳定指标 SVSI,该指标与 FVSI 指标^[19]、LQP 指标^[20]、VSI 指标^[21]相比,在各个性能指标上都更胜一筹。

图 1 给出了用于以短线路为特征的舰船电力系统各电压稳定指标的性能比较,其中横坐标为负荷有功功率水平,纵坐标为各指标的值。所有指标都随着负荷的有功功率水平增加而增加,发生电压不稳定时,指标 SVSI 与 VSI 达到 1,其他两个指标低于 1,其中 LQP 更接近于 1。

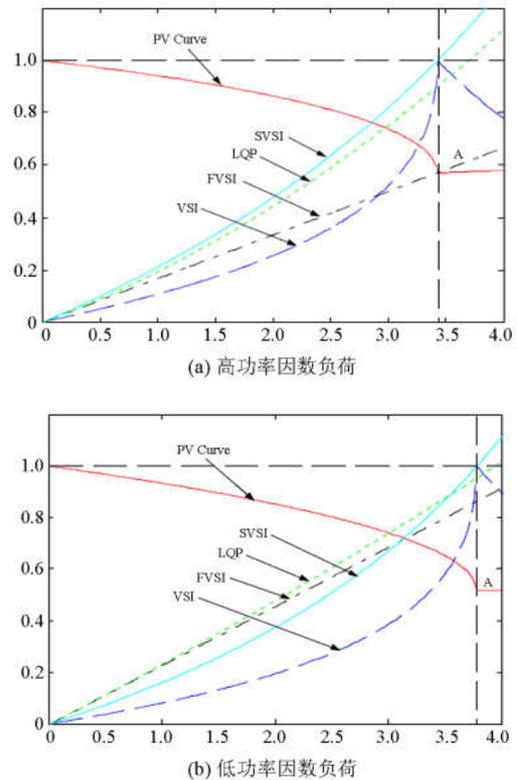


图 1 舰船电力系统电压稳定指标性能比较

Fig. 1 Performance comparison of voltage stability index of shipboard power system

从图 1 中可以看出,低功率因数负荷比高功率因数负荷更容易发生电压失稳,因为低功率因数负荷需要更多的无功功率,并从线路吸取更多的电流,因此电压下降更大。这些指标中,LQP 忽略了送受端母线的功角差;为了提高计算速度,LVSI 则忽略了线路电阻。VSI 指标随着功率水平增加逐渐接近 1,然而,当达到最大允许功率水平时,VSI 指标开

始下降。综合比较可知, 四个指标的性能如下: SVSI 最佳, VSI 次之, LQP 第三, LVSI 第四。所以, 本文采用 SVSI 指标作为舰船电网故障恢复的电压稳定约束条件。对于 SVSI 指标, 计算过程如下所示。对系统中的任一条线路, 如图 2 所示。

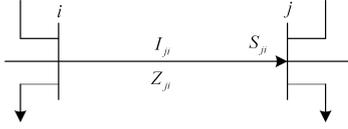


图 2 舰船系统电缆线路单线图

Fig. 2 Single line diagram of cable line in ship system

其中 i 为送端节点, j 为受端节点, Z_{ji} 为线路阻抗, I_{ji} 为线路电流, S_{ji} 为受端功率。由图 2 可知

$$S_{ji} = \frac{|\dot{V}_i| |\dot{V}_j| (\cos \delta_{ji} + j \sin \delta_{ji}) - |\dot{V}_j|^2}{R_{ji} - jX_{ji}} \quad (1)$$

$$P_{ji} + jQ_{ji} = \frac{|\dot{V}_i| |\dot{V}_j| (\cos \delta_{ji} + j \sin \delta_{ji}) - |\dot{V}_j|^2}{R_{ji} - jX_{ji}} \quad (2)$$

从式(2)可得

$$X_{ji} Q_{ji} + R_{ji} P_{ji} = |\dot{V}_i| |\dot{V}_j| \cos \delta_{ji} - |\dot{V}_j|^2 \quad (3)$$

$$-(X_{ji} P_{ji} - R_{ji} Q_{ji}) = |\dot{V}_i| |\dot{V}_j| \sin \delta_{ji} \quad (4)$$

由式(3)可得

$$X_{ji} Q_{ji} + R_{ji} P_{ji} + |\dot{V}_j|^2 = |\dot{V}_i| |\dot{V}_j| \cos \delta_{ji}, \text{ 联立式(4)得} \\ |\dot{V}_j|^4 + [2(X_{ji} Q_{ji} + R_{ji} P_{ji}) - |\dot{V}_i|^2] \cdot |\dot{V}_j|^2 + \\ (X_{ji}^2 + R_{ji}^2)(P_{ji}^2 + Q_{ji}^2) = 0 \quad (5)$$

设 $x = |\dot{V}_j|^2$, 则式(5)化为

$$x^2 + [2(X_{ji} Q_{ji} + R_{ji} P_{ji}) - |\dot{V}_i|^2] \cdot x + \\ (X_{ji}^2 + R_{ji}^2)(P_{ji}^2 + Q_{ji}^2) = 0 \quad (6)$$

如要保证 x 有实数解, 则有

$$\text{SVSI}_{ji} = \frac{2\sqrt{(X_{ji}^2 + R_{ji}^2)(P_{ji}^2 + Q_{ji}^2)}}{|\dot{V}_i| - 2X_{ji} Q_{ji} - 2R_{ji} P_{ji}} \leq 1 \quad (7)$$

其中, SVSI_{ji} 即为电压稳定指标。对实际舰船电力系统中的每条线路, SVSI_{ji} 为正实数。如果所有线路的 SVSI_{ji} 值小于 1, 则系统是静态稳定的; 如果至少一条线路的 SVSI_{ji} 值等于 1, 则整个系统处于稳定边界; 如果至少一条线路的 SVSI_{ji} 值大于 1, 则系统将会发生电压失稳。在舰船电力系统的辐射部分, 两个节点之间只有一条线路, 该线路的 SVSI_{ji} 可以指示该线路受端节点的稳定水平, 因此, SVSI_{ji} 的最大值不仅可以识别临近稳定边界的线

路, 而且可以识别临近电压崩溃的母线。

最大的 SVSI_{ji} 值可以识别系统中最弱的线路或母线, 然而静态分析没有考虑系统动态, 在系统演进到静态失稳点之前, 可能已经因为动态过程而处于失稳状态。从这个意义上说, SVSI_{ji} 指标用于故障排队更有意义, 或者用于识别最可能导致电压失稳的重构操作。

2 考虑电压稳定的故障恢复重构模型

2.1 故障恢复目标函数

舰船电网故障恢复重构主要考虑以下四个目标: 1) 系统失电负荷量尽可能小; 2) 开关操作次数尽可能少; 3) 电网有功损耗尽可能小; 4) 系统所有线路 SVSI_{ji} 指标的最大值尽可能小。因此, 目标函数可表达为

$$\text{Min } f(\bar{x}) = [f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x}), f_4(\bar{x})]^T \quad (8)$$

$$f_1(\bar{x}) = \sum_{i \in B_1} L_i - \sum_{i \in B_2} L_i \quad (9)$$

$$f_2(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N |x_i^1 - x_i^2| \quad (10)$$

$$f_3(\bar{x}) = \sum_{i=1}^E \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} R_i \quad (11)$$

$$f_4(\bar{x}) = \text{Max} \{ \text{SVSI}_{ji} \} \quad (12)$$

式中: $\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$; $f_1(\bar{x})$ 是系统失电负荷量; L_i 为母线 i 处的负荷; B_1 为故障恢复前电网供电母线集; B_2 为故障恢复后电网供电母线集; $f_2(\bar{x})$ 是参与故障重构的开关操作次数; x_i^1 、 x_i^2 分别为故障恢复前后开关 i 的状态; N 为开关总数; $f_3(\bar{x})$ 是故障恢复后电网有功损耗, 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; $f_4(\bar{x})$ 是故障恢复后电网中所有线路 SVSI_{ji} 指标的最大值, 用来表征该系统静态电压稳定的整体水平。 \bar{x} 是开关序列状态向量, 也即决策变量, x_i 为开关 i 的状态, $x_i=1$ 或 0 分别表示开关 i 处于闭合或断开状态, $i=1, 2, \dots, N$ 。

2.2 重构约束条件

网络结构约束: 故障恢复后舰船电网仍需保持辐射状结构。

母线电压约束:

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (13)$$

母线电压需维持在允许范围内, 式中的 U_i 为母线 i 的电压, $U_{i\min}$ 和 $U_{i\max}$ 分别为母线 i 运行时电压的最小和最大允许值。

线路电流约束:

$$I_i \leq I_{i\max} \quad (14)$$

线路电流应限制在正常运行范围内。式中的 I_i 为线路 i 的电流, $I_{i\max}$ 为线路 i 运行时电流的最大允许值, 实际运行时 $I_{i\min}=0$ 。

2.3 目标函数间的偏好关系

根据舰船电力运行的实际需要确定目标函数 $f_1(\bar{x})$ 、 $f_2(\bar{x})$ 、 $f_3(\bar{x})$ 和 $f_4(\bar{x})$ 之间的偏好关系为

$$f_1(\bar{x}) \succ f_2(\bar{x}) \succ f_3(\bar{x}) \succ f_4(\bar{x}) \quad (15)$$

式中, “ \succ ” 表示 “偏好大于”。

3 基于 MGEA 的故障恢复重构实现

3.1 多目标网格进化算法

多目标网格进化算法 MGEA 在保留问题多目标本质的基础上, 借助网格划分实现局部搜索机制, 采用外部存档策略来存储非支配解, 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, 是一种以获取 Pareto 前沿为目的的精英算法。MGEA 实现流程如下:

- 1) 对算法需要的变量、参数和算子初始化。
- 2) 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。
- 3) 建立一个空的 Pareto 前沿。
- 4) 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。
- 5) 从邻居中选取两个个体作为双亲, 以概率 P_c 进行交叉, 得到子代 offspring, 再以概率 P_m 对子代进行变异, 并对经选择、交叉和变异得到的个体进行评价。
- 6) 辅助种群 aux_pop 初值为步骤 2) 产生的初始种群。
- 7) 待种群中所有个体都完成第 4) — 6) 的操作后, 从 Pareto 前沿中选取一定量个体随机地替换 aux_pop 中相同数量的个体, 再把旧种群 pop 替换成辅助种群 aux_pop。
- 8) 上述迭代过程一直进行到终止条件满足为止。

3.2 个体评价子程序流程

- 1) 给定电网结构原始数据、线路数据、负荷数据、电源电压和故障支路等。
- 2) 检测待评价个体对应电网故障区域是否隔离、电源是否连通和结构是否呈辐射状, 若否则进行修正。
- 3) 结合原始数据, 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。
- 4) 对修正后的电网进行潮流计算。
- 5) 根据潮流计算结果, 计算待评价个体对应的

目标函数值和约束违背值。

6) 输出个体评价结果。

3.3 故障恢复主程序流程

- 1) 给定问题、算法和算子, 设置算法和算子相关参数, 初始化各算子, 并将算子添加到算法中。
- 2) 执行算法, 并返回一个 Pareto 解集。
- 3) 把目标值和对应的决策变量值保存到指定路径的文件中。
- 4) 从返回的种群中获取 Pareto 前沿。
- 5) 选择最终解, 并输出结果。

4 算例分析

本文的故障恢复重构方法在 Matlab 环境中予以实现, 以图 3 所示的舰船电网进行仿真测试, 其中线路参数见文献[15]附录 A 中的图 A1, 负荷数据为文献[15]附录 A 中表 A2 所示数据的 1、2、3 和 4 倍, 功率因数不变, 初始开关序列状态向量 $\bar{x}=[1111 1111 11100]$, 电源电压 $U_1=11 \text{ kV}$ 。MGEA 算法的算子和参数设置如表 1 所示。

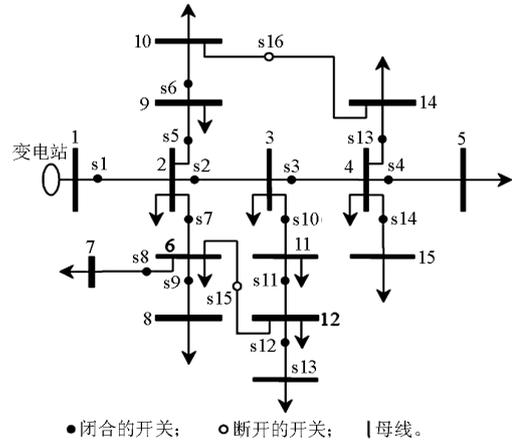


图 3 故障前舰船电网单线图

Fig. 3 Single line diagram of prefault shipboard power network

表 1 MGEA 的算子和参数设置

Table 1 Operator and parameter setting of MGEA

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

四种负荷状况简称为 1—4 四个算例, 故障线路均为线路 2 和 4(两条线路同时故障, 或者一条线路发生故障, 另一条线路也随之发生故障), 舰船电网

负荷数据如表 2 所示。

表 2 算例 1—4 的负荷数据

Table 2 Load data of example 1—4

算例	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
负荷数据	表 A1 ^[15]	2 倍于表 A1 ^[15]	3 倍于表 A1 ^[15]	4 倍于表 A1 ^[15]

由式(15)所描述的目标偏好关系, 运行 MGEA 算法获得的算例 1—4 的最优解如表 3 所示。

表 3 算例 1—4 在式(15)偏好关系下的计算结果

Table 3 Calculation results of example 1—4 under the formula (15) preference relationship

计算结果	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
\bar{x}	1010 1111 1111 1110	1010 1111 1000 1011	1000 1111 1000 0001	1000 1111 0000 0000
$f_1(\bar{x})/\text{kW}$	44.100 0	736.400 0	1 944.600 0	3 152.800 0
$f_2(\bar{x})$	1	6	7	7
$f_3(\bar{x})/\text{kW}$	133.488 2	175.814 5	159.300 0	164.000 0
$f_4(\bar{x})$	0.088 7	0.087 3	0.091 1	0.098 0

从表 3 可见, 对于算例 1—4, 运行 MGEA 算法获得的最优决策方案分别是 1) 闭合开关 s15; 2) 闭合开关 s15、s16, 断开开关 s10~s12、s14; 3) 闭合开关 s16, 断开开关 s3、s10~s14; 4) 断开开关 s3、s9~s14。此结果是在算法所获得的 Pareto 最优解集中选取与目标偏好关系相应的最优解而得。表 3 表明, 从算例 1→4, 随着电网负荷不断增加, 系统失电负荷量随之不断增加, 开关操作次数也有所增加, 虽然许多线路断电, 但网损仍居高不下。系统中各线路静态电压稳定指标的最大值也有所增加, 反映出系统切负荷后, 稳定性仍然不断变差。

表 3 给出的最优解对应的潮流结果如表 4 所示。

表 4 由表 3 给出的最优解对应的潮流结果

Table 4 Power flow corresponding to the optimal solution given in Table 3

母线	$U_i/\text{p.u.}$			
	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.971 0	0.958 1	0.958 0	0.957 5
3	0.884 0	0.889 2	0.000 0	0.000 0
4	0.878 5	0.891 4	0.000 0	0.000 0
5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
6	0.930 4	0.925 6	0.917 0	0.913 5
7	0.928 1	0.921 0	0.910 0	0.904 1
8	0.929 1	0.923 0	0.912 9	0.000 0
9	0.967 7	0.933 6	0.941 4	0.943 9
10	0.966 6	0.916 6	0.932 8	0.939 5
11	0.896 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
12	0.917 7	0.923 1	0.000 0	0.000 0
13	0.916 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0
14	0.876 0	0.906 1	0.929 0	0.000 0
15	0.875 8	0.000 0	0.000 0	0.000 0

表 3 给出的最优解对应的系统各线路的 SVSI_{ji} 指标如表 5 所示。

表 5 由表 3 给出的最优解对应的系统各线路的 SVSI_{ji} 指标
Table 5 SVSI_{ji} index of each line of the system corresponding to the optimal solution given in Table 3

线路	SVSI _{ji}			
	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
1	0.059 7	0.087 3	0.087 5	0.088 6
2	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
3	0.012 6	0.004 9	0.000 0	0.000 0
4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
5	0.007 0	0.053 5	0.036 0	0.029 4
6	0.002 3	0.037 8	0.018 9	0.009 6
7	0.088 7	0.071 5	0.091 1	0.098 0
8	0.005 0	0.010 2	0.015 7	0.021 2
9	0.002 9	0.005 9	0.009 0	0.000 0
10	0.027 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0
11	0.049 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0
12	0.003 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
13	0.005 8	0.033 6	0.000 0	0.000 0
14	0.006 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0
15	0.028 2	0.005 6	0.000 0	0.000 0
16	0.000 0	0.023 6	0.008 3	0.000 0

图 4—图 7 为 MGEA 算法求解算例 1—4 过程中进化 100 代时所获得的种群的表现。图 4—图 7 中的左上、右上、右下和左下这四个位置所在子图分别描述 $f_1(\bar{x})$ 与 $f_2(\bar{x})$ 、 $f_2(\bar{x})$ 与 $f_3(\bar{x})$ 、 $f_3(\bar{x})$ 与 $f_4(\bar{x})$ 和 $f_4(\bar{x})$ 与 $f_1(\bar{x})$ 之间的关系。 $f_1(\bar{x})$ 、 $f_2(\bar{x})$ 、 $f_3(\bar{x})$ 和 $f_4(\bar{x})$ 分别为系统失电负荷量、开关动作次数、网损和静态电压稳定指标。

由于是在线优化搜索, 求解过程中电网结构已发生很大变化, 有些负荷已被切除, 因此 SVSI 值很小, 表明最优开关序列对应的电压稳定性也是最优的。

从图 4—图 7 可见, Pareto 前沿中解的分布情况, 最优解集中解的分布情况。图 4—图 7 表明, 随着电网负荷的加重, 最优解集中解的个数呈下降态势。事实上, 经统计, 这 4 个算例所获得的代表性最优解集中解的个数如表 6 所示。

表 6 负荷水平 1—4 所获得的最优解集中解的个数

Table 6 Number of solutions in the optimal solution set obtained by the load level 1—4

算例	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
解的个数	72	86	47	22

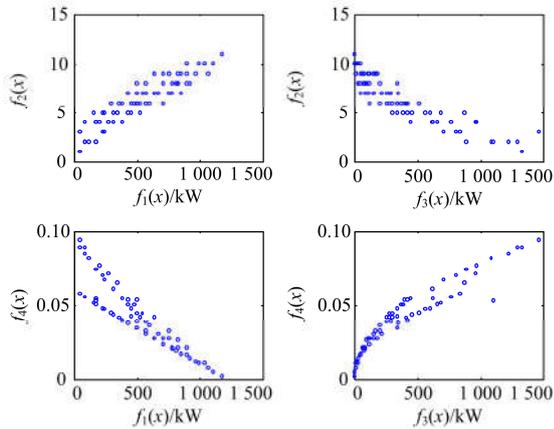


图 4 算例 1 中 MGEA 算法所获种群的表现
Fig. 4 Performance of the population obtained by the MGEA algorithm in the example 1

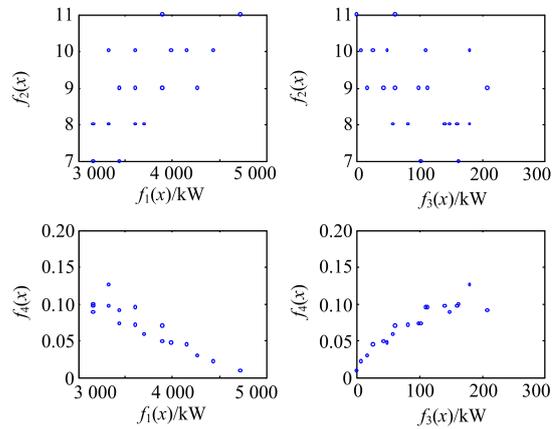


图 7 算例 4 中 MGEA 算法所获种群的表现
Fig. 7 Performance of the population obtained by the MGEA algorithm in the example 4

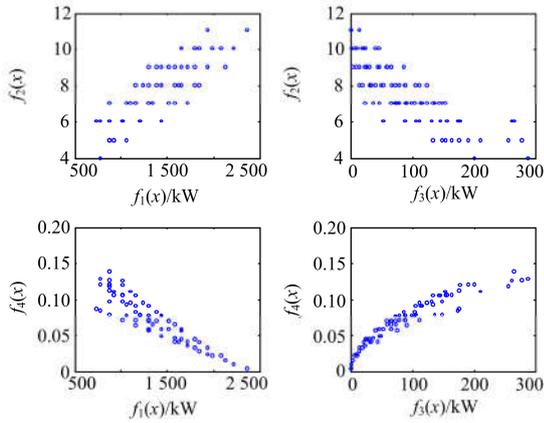


图 5 算例 2 中 MGEA 算法所获种群的表现
Fig. 5 Performance of the population obtained by the MGEA algorithm in the example 2

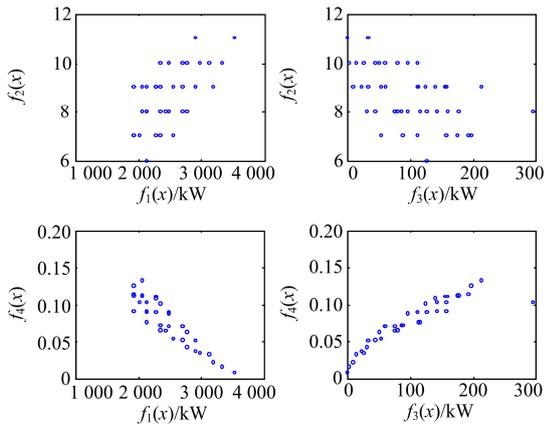


图 6 算例 3 中 MGEA 算法所获种群的表现
Fig. 6 Performance of the population obtained by the MGEA algorithm in the example 3

经该舰船电网算例的故障恢复重构测试，结果表明该方法在实现多目标故障恢复的同时，可以适当提高系统的静态电压稳定性。

5 结论

建立了一种考虑静态电压稳定约束的舰船电力系统多目标故障恢复模型，引入了基于局部搜索技术的多目标网格进化算法进行求解。以一个舰船电网实际算例进行了故障恢复重构测试，结果表明该方法在实现多目标故障恢复的同时，可以提高系统的静态电压稳定性。由于是在线优化搜索，期间电网结构已发生很大变化，有些负荷被切除，导致 SVSI 值很小，表明最优开关序列对应的电压稳定性也是最优的。

参考文献

- [1] NAGARAJ K C, CARROLL J, ROSENWINKEL T, et al. Perspectives on power system reconfiguration for shipboard applications[C] // 2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, May 21-23, 2007, Arlington, USA: 188-195.
- [2] GONG Yanfeng, HUANG Yan, SCHULZ N N. Integrated protection system design for shipboard power system[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(6): 1930-1936.
- [3] QI Li. AC system stability analysis and assessment for shipboard power systems[D]. Texas: Texas A&M University, 2004.
- [4] 张毅, 杨秀霞. 舰船电力系统网络重构研究综述[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8): 1-6.
ZHANG Yi, YANG Xiuxia. Review of shipboard power system network reconfiguration[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2005, 20(8): 1-6.
- [5] 毕大强, 张芳, 曾祥君, 等. 船舶直流区域配电网的故障恢复研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 60-65.
BI Daqiang, ZHANG Fang, ZENG Xiangjun, et al. Research on fault restoration of shipboard DC zone distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 60-65.
- [6] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 基于快速非支配排序遗传算法的船舶电力系统多目标故障重构[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 58-64.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Multiobjective optimal network reconfiguration of shipboard power system based on non-dominated sorting genetic algorithm-II[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 58-64.
- [7] 江卓翰, 何禹清, 曹丽璐, 等. 基于改进遗传算法的含分布式电源和储能装置配电系统网络重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 68-72.
JIANG Zhuohan, HE Yuqing, CAO Lili, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations and energy storing devices based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 68-72.
- [8] 王锡淮, 李军军, 肖健梅. 求解船舶电力系统网络重构的贪婪 DPSO 算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(2): 157-161.
WANG Xihuai, LI Junjun, XIAO Jianmei. Greedy DPSO algorithm for network reconfiguration of shipboard power system[J]. Control and Decision, 2008, 23(2): 157-161.
- [9] 苏适, 周立栋, 陆海, 等. 基于改进混沌粒子群算法的多源独立微网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 34-41.
SU Shi, ZHOU Lidong, LU Hai, et al. Multi-objective optimization method of multi-source independent microgrid based on modified CPSO[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 34-41.
- [10] 朱志宇, 刘维亭, 庄肖波. 于克隆算法的船舶电力系统故障恢复[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.
- [11] JIANG Yanjun, JIANG Jianguo, ZHANG Yankui. A novel fuzzy multiobjective model using adaptive genetic algorithm based on cloud theory for service restoration of shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 612-620.
- [12] 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-EPSS, 2009, 21(2): 47-52.
- [13] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.
XU Yuqin, ZHANG Li, YANG Zengping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [14] 张威, 施伟锋, 胡红钱. 船舶区域配电系统全智能体重构及其优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 9-15.
ZHANG Wei, SHI Weifeng, HU Hongqian. Research on agent based reconfiguration and its optimization for shipboard zonal power systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 9-15.
- [15] 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.
- [16] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York: McGraw-Hill, Companies, Inc., 1994.
- [17] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.
- [18] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
ZHOU Shuangxi, JIANG Yong, ZHU Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.
- [19] MOHAMED A, JASMON G B. Voltage contingency selection technique for security assessment[J]. IEE Proc Generation, Transmission, and Distribution, 1989, 136(1): 24-28.
- [20] MUSIRIN I, RAHMAN T K A. Estimating maximum load ability for weak bus identification using FVSI[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(11): 50-52.
- [21] HUANG G, ZHAO L. Measurement based voltage stability monitoring of power systems[R]. Wisconsin: University of Wisconsin, 2001.

收稿日期: 2018-03-23; 修回日期: 2018-05-08

作者简介:

蒋燕君(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为舰船电力系统故障恢复; E-mail: jiangyanjun2002@163.com

张彦魁(1973—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为舰船电力系统保护与控制。E-mail: lantingzhixi@126.com

(编辑 张爱琴)