

采用本质多目标进化算法的舰船电网 故障智能恢复决策

蒋燕君, 姜建国, 乔树通

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

Intelligent Service Restoration of Shipboard Power Network Using Nature Multiobjective Evolutionary Algorithm

JIANG Yanjun, JIANG Jianguo, QIAO Shutong

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation (Shanghai Jiao Tong University),
Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: In the classical multiobjective decision-making method, the multiple objectives are integrated by using their weighting factors given directly or through the analytic hierarchy process (AHP). There are some limitations in adjusting the scaling factors or fuzzy set parameters in real time and in obtaining the optimal solutions efficiently. In the present service restoration methods of shipboard power network, the load switching scheme is only given and the line losses are not being considered. Based on strict definition of 'domination', 'objective domination', and 'constraint domination', utilizing the nondominated relation between solutions, a switch-oriented and intelligent service restoration strategy of shipboard power network using the nature multiobjective evolutionary algorithm was proposed. The strategy did not need the weighting factors, scaling factors, and fuzzy set parameters. And the objective of the minimization of line losses after service restoration was considered. The optimal solution was selected by the preferential relation among objectives after obtaining a Pareto solution set. Also, the optimal switch operation sequence was given. The efficiency of obtaining the optimal solution was improved. The problem of the determination of the dominated relation between solutions under the multiconstraint condition was solved. The analysis results of cases verified that the proposed method was feasible and effective and better than the classical multiobjective approach.

KEY WORDS: service restoration; network reconfiguration; multiobjective evolutionary algorithm; Pareto front; shipboard power network

摘要: 经典多目标决策方法通过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。这种算法存在局限性, 如缩放因子或模糊集参数实时调整难、获取最优解效率低等。现有舰船电网故障恢复方法仅给出负荷投切方案, 且不考虑舰船线损。在严格定义“支配”、“目标支配”和“约束支配”3个概念的基础上, 利用解的非支配关系, 提出采用本质多目标进化算法并面向开关的故障智能恢复决策, 该方法毋需权因子、缩放因子和模糊集参数, 并实现了故障恢复后线损最小, 在获得 Pareto 解集后, 再作目标偏好选择, 给出最优开关动作序列, 提高了获取最优解的效率, 解决了多约束条件下解的支配关系判别难题。算例分析证实了该方法可行、有效, 且优于经典多目标方法。

关键词: 故障恢复; 网络重构; 多目标进化算法; Pareto 前沿; 舰船电力网络

0 引言

舰船电网故障恢复是一个多目标多约束的优化决策问题^[1-9]。不少研究者已提出了多种故障恢复方法, 如遗传算法^[3-5,10]、离散微粒群算法^[6]、克隆算法^[7]、蚁群算法^[8]、遗传模拟退火算法^[9]和多智能体系统^[11]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, 将这种本质单目标故障恢复方法统称为经典多目标优化方法(classical multiobjective optimization algorithm, CMOA)。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB219703)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB219703)

基于 CMOA 的故障恢复存在 2 个局限性：

1) 缩放因子或模糊集参数实时调整困难。

权因子大小依赖于决策者对各目标的偏好，对于不同舰船电网拓扑，尽管决策者对各目标的偏好通常不变，但各目标值可能出现大幅波动，须采用缩放因子或将各目标模糊化成同一区间^[9,12]，以保持其数量关系相对平衡。在搜索故障恢复全局最优解过程中，电网拓扑不断变化，将导致缩放因子或模糊集参数的不间断调整，以适应当前网络拓扑，但这种实时调整很难实现。倘若缩放因子或模糊集参数固定不变，将使搜索方向产生偏离，导致全局最优解劣化。

2) 获取最优解效率低下。

CMOA 每运行一次仅获得 1 个与已设定目标偏好相应的最优解，如果决策者根据实际需要目标偏好进行调整，那么必须重新运行以得到与调整后偏好相应的最优解，这使得 CMOA 获取最优解的效率低下。

当舰船战斗损伤或发电机故障时，供电不足，而文献[1-9]没有考虑舰船线损，缺乏经济性。同时文献[1-9]仅给出负荷投切的最终决策，并没有给出开关动作方案，为恢复负荷供电，仍需进行判断。

针对上述不足，本文提出基于本质多目标进化算法(nature multiobjective evolutionary algorithm, NMEA)并面向开关的舰船电网故障智能恢复决策，该方法毋需权因子、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(或称非支配解)，再由偏好信息可决策出相应(近似)全局最优解。最后对 2 个舰船电网的 4 个算例进行故障恢复测试。

1 舰船电网故障恢复模型

1.1 目标函数

舰船电网故障恢复主要考虑以下 3 个目标：1) 尽可能多地恢复无故障负荷供电；2) 参与恢复过程的开关尽可能少；3) 故障恢复后线路损耗尽可能小。

因此目标函数 $f(\bar{x})$ 可表达为

$$\min f(\bar{x}) = [f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x})] \quad (1)$$

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

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

$$f_3(\bar{x}) = P_{\text{Loss}} \quad (3)$$

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$$

式中： $f_1(\bar{x})$ 为失电负荷总量； L_i 为母线 i 处的负荷； B_1 为故障前所有供电母线集； B_2 为故障恢复后供电母线集； $f_2(\bar{x})$ 为开关操作次数； N 为开关总数； x_i^R 为故障恢复后第 i 个开关状态； x_i^P 为已故障且恢复前第 i 个开关状态； $f_3(\bar{x})$ 为故障恢复后线路总有功损耗，该值可由潮流计算求得； \bar{x} 为开关序列状态向量， \bar{x} 的第 i 个分量 x_i 表示第 i 个开关状态， $x_i=0$ 或 1 表示第 i 个开关处于断开或闭合状态，其中 $i=1,2,\dots,N$ 。

目标函数分量 $f_1(\bar{x})$ 、 $f_2(\bar{x})$ 和 $f_3(\bar{x})$ 均以达到最小为最优。与 CMOA 不同，由于采用 NMEA，目标之间不可共同度量，故不存在综合目标函数。

1.2 约束条件

1) 舰船电网应保持辐射状运行。

2) 母线电压应限制在正常运行范围内。

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (4)$$

式中： U_i 为母线 i 的电压； $U_{i\min}$ 和 $U_{i\max}$ 分别为母线 i 正常运行时电压最小和最大允许值。

3) 线路电流应限制在正常运行范围内。

$$I_{i\min} \leq I_i \leq I_{i\max} \quad (5)$$

式中： I_i 为线路 i 的电流； $I_{i\min}$ 和 $I_{i\max}$ 分别为线路 i 正常运行时电流最小和最大允许值，实际运行时 $I_{i\min}=0$ 。

1.3 偏好知识

本文假定根据经验确定目标函数分量 $f_1(\bar{x})$ 、 $f_2(\bar{x})$ 和 $f_3(\bar{x})$ 3 者间的偏好关系为

$$f_1(\bar{x}) \succ f_2(\bar{x}) \succ f_3(\bar{x}) \quad (6)$$

式中“ \succ ”表示“偏好大于”。

2 舰船电网本质多目标故障智能恢复实现

本文中 NMEA 是由非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)^[13-15] 在舰船电网故障恢复背景下进行充分融合并改进而得到。

面向开关操作的舰船电网本质多目标故障智能恢复实现流程如下：

1) 给定系统数据(包括线路参数、负荷数据和电源电压等)、故障前和故障后网络结构(包括所有线路号和对对应母线号)、种群规模 D 和染色体长度

H 、最大迭代次数 T 。

2) 产生初始种群 P_0 ，并对于 P_0 中每个个体(即 \bar{x})，判断故障区域是否被最小隔离和电源是否连通，若无则对该个体进行修正。

3) 检测 P_0 中所有个体对应电网结构是否呈辐射状，若无则对该个体进行修正；本文采用广度优先搜索(breadth first search, BFS)方法实现^[16]。

4) 评价 P_0 ，即对 P_0 中所有个体进行逐个评价。由式(1)、(2)可直接求出目标函数 $f_1(\bar{x})$ 和 $f_2(\bar{x})$ 的值。再根据给定的系统数据，进行潮流计算^[17]，由式(3)可求出目标函数 $f_3(\bar{x})$ 的值，同时得到该个体对应电网(注意该电网在步骤3)中已被 BFS 法修正为辐射状连通网络)中现有母线电压和线路电流，从而结合式(4)、(5)求得各母线电压和线路电流的约束违背值。然后把求得的目标函数值和约束违背值依次链接到相应个体中，此时个体长度增加到 $N+O+C$ (即 $N+5$)， O 为目标个数($O=3$)， C 为可计量约束个数($C=2$)。最后把评价后所有个体组成的种群记作 P_t (即 t 代父种群)，其中 t 表示迭代次数。

5) 对 P_t 作非支配排序和拥挤距离计算。这是以步骤4)求出的目标函数值和约束违背值为依据进行的。为完美地实现多目标多约束背景下的非支配排序，在文献[14]“约束支配”定义的基础上，本文提出了一组严格区分“支配”、“目标支配”和“约束支配”的全新定义，从而可清晰地判定多约束条件下解的支配关系。

定义1 设解 \bar{x}_i 支配解 \bar{x}_j ，则下列条件之一成立：

①解 \bar{x}_i 是可行解，而解 \bar{x}_j 是不可行解；②解 \bar{x}_i 和解 \bar{x}_j 均为可行解，且解 \bar{x}_i 目标支配解 \bar{x}_j ；③解 \bar{x}_i 和解 \bar{x}_j 均为不可行解，且解 \bar{x}_i 约束支配解 \bar{x}_j 。

定义2 若解 \bar{x}_i 所有目标值均不大于解 \bar{x}_j 相应目标值，且解 \bar{x}_i 中至少存在1个目标值比解 \bar{x}_j 的对应目标值小，则称解 \bar{x}_i 目标支配解 \bar{x}_j 。

定义3 若解 \bar{x}_i 所有约束违背值均不大于解 \bar{x}_j 相应约束违背值，且解 \bar{x}_i 中至少存在1个约束违背值比解 \bar{x}_j 的对应约束违背值小，则称解 \bar{x}_i 约束支配解 \bar{x}_j 。

当2个解均为不可行解时，因已违背约束，故再考察目标值大小已无实际意义。因此约束支配定义只考察约束违背程度，而不涉及目标最优。

文献[14]“约束支配”定义涉及到总约束违背计算，由于可计量约束(如文中母线电压和线路电流)

通常代表不同物理量且量纲相异，直接相加显然不妥，若采用加权和，则如引言中所述，同样存在缩放因子或模糊集参数调整问题。本文提出的上述定义彻底解决了总约束违背计算难题，是从理论上对进化算法 NSGA-II 的完善和发展，具有广泛的实用价值。

非支配排序和拥挤距离计算过程详见文献[14]。等排序和距离计算完成后，把非支配等级和拥挤距离依次链接到相应个体中，此时 P_t 中个体长度为 $N+O+C+2$ (即 $N+7$)。

6) 产生后代种群 Q_0 ，即对 P_t 进行选择、交叉和变异。本文采用二进制竞争选择(binary tournament selection, BTS)、单点交叉和基本位变异。

定义4 设解 \bar{x}_i 与解 \bar{x}_j 竞争并选择解 \bar{x}_i ，则下列条件之一成立：① $\bar{x}_i^{\text{rank}} < \bar{x}_j^{\text{rank}}$ ；② $\bar{x}_i^{\text{rank}} = \bar{x}_j^{\text{rank}}$ ，且 $\bar{x}_i^{\text{distance}} > \bar{x}_j^{\text{distance}}$ 。 \bar{x}_i^{rank} 、 \bar{x}_j^{rank} 为解 \bar{x}_i 与解 \bar{x}_j 的非支配等级； $\bar{x}_i^{\text{distance}}$ 、 $\bar{x}_j^{\text{distance}}$ 为解 \bar{x}_i 与解 \bar{x}_j 的拥挤距离。

单点交叉算子和基本位变异算子毋庸赘述。对于经选择、交叉和变异后获得的后代种群 Q_0 中所有个体，判断故障区域是否被最小隔离和电源是否连通，若无则对该个体进行修正。

7) 检测 Q_0 中所有个体对应电网结构是否呈辐射状，若无则对该个体进行修正。

8) 评价 Q_0 ，并把评价后的种群记作 Q_t (即 t 代子种群)，评价过程详见步骤4)。

9) 创建种群 $R_t = P_t \cup Q_t$ ， \cup 表示组合，故 R_t 大小为 $2D$ 。

10) 对 R_t 作非支配排序和拥挤距离计算，并把非支配等级和拥挤距离依次链接到相应个体中，详见步骤5)。

11) 建立种群 P_{t+1} (即 $t+1$ 代父种群)。 P_{t+1} 为基于非支配等级和拥挤距离从 R_t 中选取的 D 个最优个体组成，选择原则类似于 BTS 算子。

12) 产生后代种群 Q_{t+1} (即 $t+1$ 代子种群)，即对 P_{t+1} 进行选择、交叉和变异。对于经选择、交叉和变异后获得的后代种群 Q_{t+1} 中所有个体，判断故障区域是否被最小隔离和电源是否连通，若无则对该个体进行修正。

13) 检测 Q_{t+1} 中所有个体对应电网结构是否呈辐射状，若无则对该个体进行修正。

14) 评价 Q_{t+1} ，详见步骤4)。

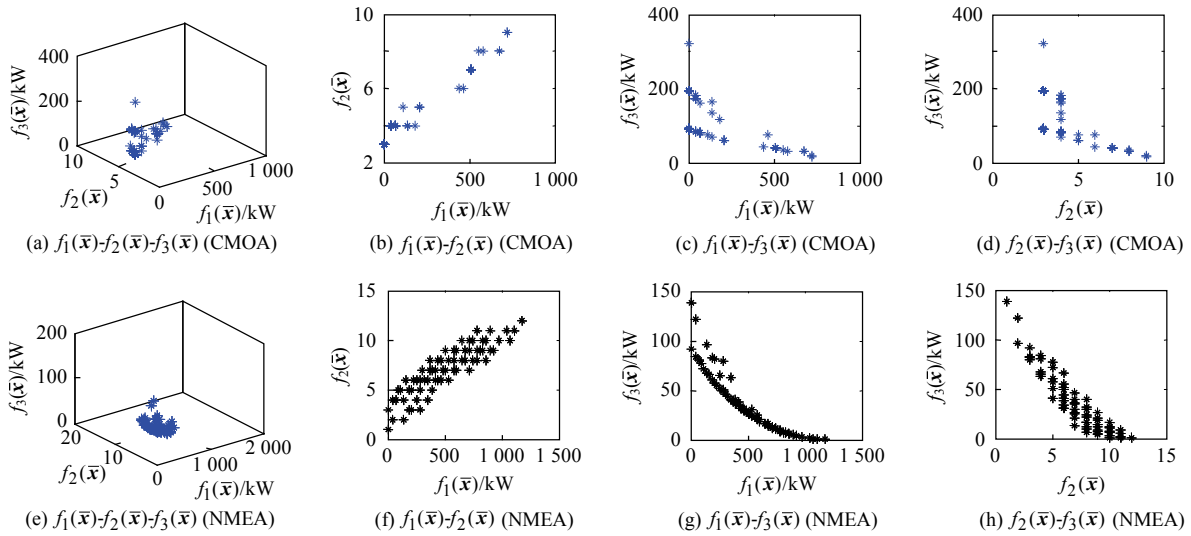


图1 算例1中 P_{100} 的表现

Fig. 1 Representation of P_{100} in case 1

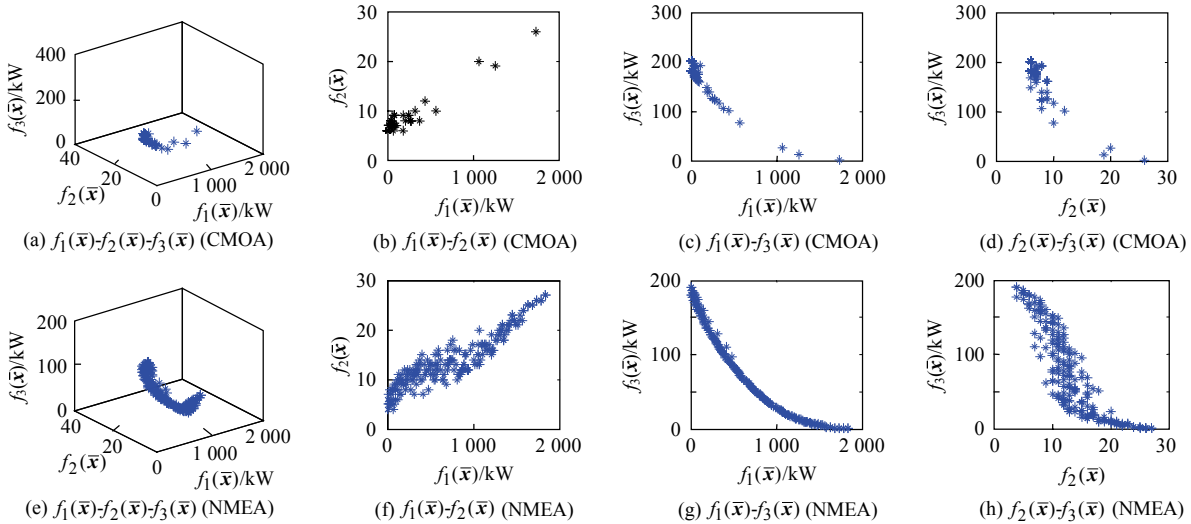


图2 算例3中 P_{100} 的表现

Fig. 2 Representation of P_{100} in case 3

电站容量限制则可作为一个约束来处理。

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]. IEE Proceedings: Generation Transmission 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]//The 39th North American Power Symposium. 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(in Chinese).
 [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(in Chinese).
 [6] 王锡淮, 李军军, 肖健梅. 求解舰船电力系统网络重构

的贪婪 DPSO 算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(2): 157-161.

Wang Xihuai, Li Junjun, Xiao Jianmei. Greed DPSO algorithm for network reconfiguration of shipboard power system[J]. Control and Decision, 2008, 23(2): 157-161(in Chinese).

[7] 朱志宇, 刘维亭, 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(in Chinese).

[8] 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(in Chinese).

[9] 黄靖, 张晓锋, 陈雁, 等. 船舶综合电力系统多目标故障恢复模型及应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 130-137. Huang Jing, Zhang Xiaofeng, Chen Yan, et al. Multiobjective optimal model of service restoration for integrated ship power system and its application [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 130-137(in Chinese).

[10] 刘强, 石立宝, 倪以信, 等. 电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15. Liu Qiang, Shi Libao, Ni Yixin, et al. Intelligent optimization strategy of the power grid reconfiguration during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15(in Chinese).

[11] 王增平, 张丽, 徐玉琴, 等. 含分布式电源的配电网大面积断电供电恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 8-14. Wang Zengping, Zhang Li, Xu Yuqin, et al. Service restoration strategy for blackout of distribution system with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 8-14(in Chinese).

[12] Das D. A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 202-209.

[13] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.

[14] 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.

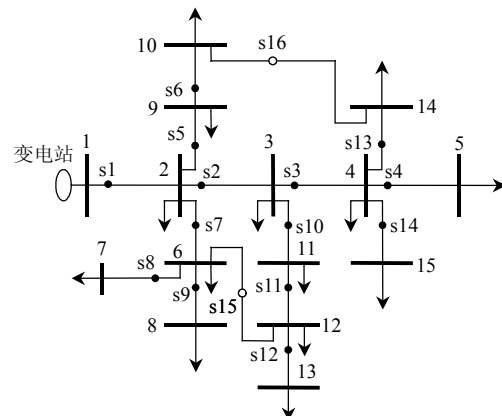
[15] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms[M]. London: John Wiley & Sons, 2001: 245-261.

[16] 陈树柏. 网络图论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 135-152. Chen Shubai. Network graph theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 1982: 135-152(in Chinese).

[17] Das D, Kothari D P, Kalam A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1995, 17(5): 335-346.

附录 A

舰船电网 A 的结构如图 A1 所示, 其线路数据如表 A1 所示, 负荷数据如表 A2 所示。



• 闭合的开关; ○ 断开的开关; | 母线。

图 A1 故障前舰船电网 A 的单线图
Fig. A1 Single line diagram of shipboard power distribution network A before fault

表 A1 舰船电网 A 的线路数据

Tab. A1 Line data of shipboard power network A

线路号	首母线号	末母线号	R/Ω	X/Ω
1	1	2	1.353 09	1.323 49
2	2	3	1.170 24	1.144 64
3	3	4	0.841 11	0.822 71
4	4	5	1.523 48	1.027 60
5	2	9	2.013 17	1.357 90
6	9	10	1.686 71	1.137 70
7	2	6	2.557 27	1.724 90
8	6	7	1.088 20	0.734 00
9	6	8	1.251 43	0.84410
10	3	11	1.795 53	1.211 10
11	11	12	2.448 45	1.651 50
12	12	13	2.013 17	1.357 90
13	4	14	2.230 81	1.504 70
14	4	15	1.197 02	0.807 40
15	6	12	1.197 02	0.807 40
16	10	14	1.197 02	0.807 40

表 A2 舰船电网 A 的负荷数据

Tab. A2 Load data of shipboard power network A

母线号	S/kVA	母线号	S/kVA
1	0	9	100
2	63	10	63
3	100	11	200
4	200	12	100
5	63	13	63
6	200	14	100
7	200	15	200
8	100		

注: 负荷功率因数 $\cos\phi=0.7$ 。

附录 B

舰船电网 B 的结构如图 B1 所示, 其负荷数据如表 B1 所示, 线路数据如表 B2 所示。

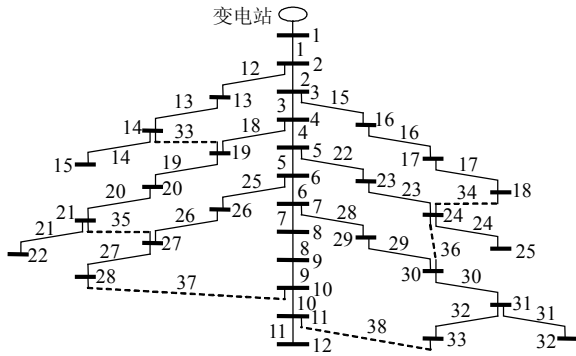


图 B1 故障前舰船电网 B 的单线图

Fig. B1 Single line diagram of shipboard power distribution network B before fault

表 B1 舰船电网 B 的负荷数据

Tab. B1 Load data of shipboard power network B

母线号	有功功率/kW	无功功率/kvar	母线号	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	0	0	18	60	30
2	100	90	19	40	25
3	60	40	20	15	9
4	150	130	21	13	7
5	75	50	22	30	20
6	15	9	23	90	50
7	18	14	24	50	30
8	13	10	25	60	40
9	16	11	26	100	80
10	20	10	27	80	65
11	16	9	28	100	60
12	50	40	29	100	55
13	105	90	30	120	70
14	25	15	31	105	70
15	40	25	32	80	50
16	100	60	33	60	40
17	40	30			

表 B2 舰船电网 B 的线路数据

Tab. B2 Line data of shipboard power network B

线路号	首母线号	末母线号	R/Ω	X/Ω
1	1	2	1.097	1.074
2	2	3	1.463	1.432
3	3	4	0.731	0.716
4	4	5	0.366	0.358
5	5	6	1.828	1.790
6	6	7	1.097	1.074
7	7	8	0.731	0.716
8	8	9	0.731	0.716
9	9	10	1.080	0.734
10	10	11	1.620	1.101
11	11	12	1.080	0.734
12	2	13	1.350	0.917
13	13	14	0.810	0.550
14	14	15	1.944	1.321
15	3	16	1.080	0.734
16	16	17	1.620	1.101
17	17	18	1.097	1.074
18	4	19	0.366	0.358
19	19	20	1.463	1.432
20	20	21	0.914	0.895
21	21	22	0.804	0.787
22	5	23	1.133	1.110
23	23	24	0.475	0.465
24	24	25	2.214	1.505
25	6	26	1.620	1.110
26	26	27	1.080	0.734
27	27	28	0.540	0.367
28	7	29	0.540	0.367
29	29	30	1.080	0.734
30	30	31	1.080	0.734
31	31	32	0.366	0.358
32	31	33	0.731	0.716
33	14	19	0.908	0.726
34	18	24	0.381	0.244
35	21	27	0.681	0.544
36	24	30	0.254	0.203
37	28	10	0.254	0.203
38	33	11	0.254	0.203



蒋燕君

收稿日期: 2011-05-23。

作者简介:

蒋燕君(1973), 男, 博士研究生, 浙江树人大学副教授, 研究方向为电力系统分析、优化与控制, jjy@sjtu.edu.cn;

姜建国(1956), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力传动、智能电网和新能源技术;

乔树通(1978), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统分析。

(责任编辑 谷子)