

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190971

考虑可靠性约束的舰船电力系统故障重构策略

韩思宁¹, 杨军¹, 詹祥澎¹, 吴大立²

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430072)

摘要: 网架重构是舰船电力系统发生故障时恢复供电的有效措施。考虑到舰船电力系统的特殊工况, 故障重构时有必要考虑重要负荷的供电可靠性和电能质量, 为此提出了一种考虑可靠性约束的舰船电力系统故障重构策略。利用图论建立了供电可靠性与电网拓扑之间的关联模型, 并通过深度搜索算法遍历重要负荷节点的所有供电路径。基于二阶锥规划建立了故障重构凸优化模型, 并进一步通过多面体逼近算法将模型转化为混合整数线性规划问题以加速求解。通过系统仿真并对比分析, 结果表明所提出的算法能快速获取全局最优解, 所得到的故障重构策略能保证重要负荷的电能质量与供电可靠性。

关键词: 舰船电力系统; 故障重构; 二阶锥规划; 供电可靠性; 电能质量; 多面体逼近算法

Fault reconfiguration strategy of a shipboard power system considering reliability constraints

HAN Sining¹, YANG Jun¹, ZHAN Xiangpeng¹, WU Dali²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430072, China)

Abstract: Fault reconfiguration is an effective measure for restoring power supply when a fault occurs in a shipboard power system. Considering the special working conditions, it is necessary to consider the reliability and power quality of important loads in fault reconfiguration. Therefore, a fault reconfiguration strategy for shipboard power system considering reliability constraints is proposed. Graph theory is used to establish a correlation model between power supply reliability and power network topology, and a depth search algorithm is used to traverse all power supply paths of important load nodes. Based on second-order conic programming, a convex optimization model for fault reconstruction is established, and the model is further transformed into a mixed integer linear programming model by a polyhedral approximation algorithm to accelerate the solution. Based on system simulation and comparative analysis, the results show that the proposed algorithm can quickly obtain the global optimal solution, and the fault reconfiguration strategy can ensure the power quality and power supply reliability of important loads.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0307800).

Key words: shipboard power system; fault reconfiguration; second order conic programming; power supply reliability; power quality; polyhedron approximation algorithms

0 引言

舰船电力系统具有高度独立、容量有限、部分负荷重要程度极高、重要负荷对电能质量和供电可靠性要求高、维修困难等特点^[1]。当舰船电力系统中的部分供电线路发生损坏时, 难以在短期内得到修复, 因此故障重构是舰船电力系统恢复供电的常见措施^[2]。由于舰船电力系统的特殊工况, 发生故

障时, 系统往往要以重构状态运行较长时间^[3]。在此过程中, 舰船上的重要负荷必须得到保障^[4], 因而有必要在故障重构决策过程中考虑重要负荷的电能质量以及供电可靠性。

舰船电力系统故障重构问题是一个多目标混合整数非线性规划问题^[5-6]。不少学者针对故障重构问题的建模和求解提出了多种方法。文献[7]考虑了故障恢复过程中负荷的优先级, 并通过图迹分析搜索合理的故障恢复策略, 本质上是一种基于贪心策略的寻优算法。文献[8]进一步考虑了静态电压稳定问

题, 并通过网格进化算法获得 Pareto 前沿。文献[9-10]基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)优化供电路径, 并减少重构过程中的开关动作次数。文献[11-12]基于粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)求解模型, 并进一步改进了粒子群算法以提高算法的收敛性。文献[13]改进了差分进化算法, 提高了算法在重构中的成功率且避免算法陷入局部最优。上述的研究均通过基于种群进化的智能算法求解模型, 然而智能算法普遍存在着随机性高和收敛性差的问题。同时现有的研究没有考虑到故障恢复后系统的可靠性, 这不利于重要负荷的安全性。

针对上述不足, 本文建立了一种考虑可靠性约束的舰船电力系统故障重构模型, 以保证重要负荷的安全性。同时, 本文通过图论建立了供电可靠性与电网拓扑之间的关联模型, 从而得到可靠性指标的解析表达式。最后, 本文基于二阶锥松弛将故障重构模型转化为凸优化问题, 并进一步通过多面体逼近算法加速模型求解, 能够快速得到全局最优解。

1 舰船电力系统建模

1.1 舰船电力系统结构

舰船电网结构如图 1 所示。舰船电网中有一些重要的负荷是由多个配电板提供的。当发生故障时, 配电路径将通过自动切换开关(ABT)进行切换, 以确保重要负荷的供电。

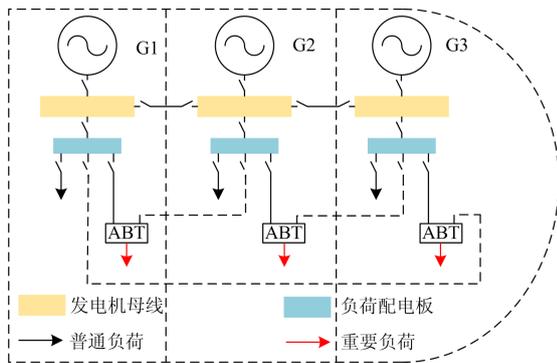


图 1 舰船电力系统结构图

Fig. 1 Structure of shipboard grid

根据电力需求的重要性, 舰船电力系统的负荷可分为一类负荷、二类负荷和三类负荷^[14]。

一类负荷: 这种负荷类型决定了整艘舰船的生命力和船员的生命安全, 在所有情况下都必须保证一类负荷的供电。船舶系统一类负荷包括锅炉、发电机、武器系统、电子对抗系统、医疗手术室等。

二类负荷: 二类负荷对船舶的正常运行来说是比较重要的, 但也可以在必要时卸载或转移到其他

平台供电, 以防止较大的负荷损失。这些负荷包括: 货梯、海泵、雷达等。

三类负荷: 必要时可以立即卸载, 不会对船舶的使用寿命和安全产生不利影响。这种负荷主要包括: 供暖系统、厨房用电负荷等。

1.2 可靠性分析模型

考虑到舰船电力系统的特殊运行工况, 应当在故障重构过程中考虑重要负荷的供电可靠性。否则, 重要负荷可能在较长的时间内以低可靠性运行, 一旦发生二次故障后, 重要负荷可能难以恢复供电, 这对舰船电力系统将是致命打击。因此本文通过重要负荷的平均停电次数来描述系统的可靠性。

$$\lambda_j \leq \text{SAIFI}^*, \forall j \in N_1 \quad (1)$$

式中: λ_j 为配电板 j 的平均停电次数; SAIFI^* 为给定的可靠性指标; N_1 表示舰船电力系统重要负荷集合。

一般来说, 负荷供电失效的概率需要采用蒙特卡罗模拟等基于抽样的方法进行计算。在基于采样的方法中, 准确估计系统的可靠性需要大量样本。对于舰船电力系统故障重构这样的紧急决策问题, 基于抽样的可靠性指标评价缺乏快速性。因此本文假设:

1) 线路故障事件是独立的。

2) 每条线路的故障率呈指数分布, 故可以采用泊松分布近似。

在此假设上, 负荷的平均停电次数与其供电路径有关, 可通过式(2)计算^[15]。

$$\lambda_j = \sum_{ij \in N_i(j)} \lambda_{ij}, \forall j \in N_1 \quad (2)$$

式中: λ_{ij} 表示线路 ij 的平均故障次数; N_i 表示供电线路集合。

因此, 供电可靠性计算的重点是确定负荷的供电路径。本文基于图论建立了配电网的拓扑模型, 基于路径支路关联矩阵的辐射状配电系统可以表示为图 $G=(N,L)$, 其中 N 为系统节点集, L 为支路集。节点 i 指向节点 j 的支路表示为 ij 。进一步定义线路-母线关联矩阵, 如式(3)所示。

$$M_{ij,j}^m = \begin{cases} 0, & \text{线路 } ij \text{ 不在母线 } j \text{ 第 } m \text{ 条供电路径上} \\ 1, & \text{线路 } ij \text{ 在母线 } j \text{ 第 } m \text{ 条供电路径上} \end{cases} \quad (3)$$

进而引入布尔变量 X, Y 和 Z 分别表示负荷的投入、线路的投入和路径的选择, 得到式(4)一式(7)的可靠性-供电路径关联模型。

$$\lambda_j^m = \sum_{ij \in L} M_{ij,j}^m \lambda_{ij}, \forall j \in N_1, \forall m \in N_m(j) \quad (4)$$

式中: λ_j^m 表示母线 j 第 m 条供电路径的故障率;

$N_m(j)$ 表示母线 j 的供电路径集合。

$$\lambda_j = \sum_{m \in N_m(j)} Z_j^m \lambda_j^m, \forall j \in N_1 \quad (5)$$

式中, Z_j^m 为二进制变量, 表示母线 j 是否选择第 m 条供电路径。

$$\sum_{m \in N_m(j)} Z_j^m = X_j, \forall j \in N_1 \quad (6)$$

式中, X_j 为二进制变量, 表示母线 j 是否投入使用。

$$Z_j^m \sum_{ij \in L} M_{ij,j}^m \leq \sum_{ij \in L} M_{ij,j}^m Y_{ij}, \forall j \in N_1, \forall m \in N_m(j) \quad (7)$$

式中, Y_{ij} 为二进制变量, 表示线路 ij 的投入情况。

式(7)的目的是保证所选路径中的所有线路均投入使用。至此, 供电可靠性的计算还需要负荷的供电路径集合, 即得到线路-母线关联矩阵。本文通过深度搜索算法遍历负荷的所有供电路径。

深度搜索算法的实现流程如下:

- 1) 输入电源节点 i , 目标负荷节点 j 和图 G , 初始化参数 $a=1, b=1$ 。
- 2) 从节点 i 出发, 搜索与节点 i 连接的节点集合 K , 并令 $i=K(a)$, 并将经过的节点记录在表中。
- 3) 重复 2), 直到 $i=j$, 记录为第 b 条路径, $b=b+1$ 。
- 4) 重复 3), 直到 a 等于集合 K 中的元素数量 $a=a+1$ 。
- 5) 重置 $a=1$, 重复 4), 直到遍历所有路径。

1.3 故障重构模型

船舶电网故障重构的目标是尽可能恢复重要的负荷, 同时由于船舶电网需要以重构状态运行较长时间, 因此船舶电网故障重构的目标还包括降低电网的运行损耗。

最大化恢复的负荷

$$\max f_1 = \sum_{s \in S} \omega_s \sum_{j \in N_L(s)} X_j P_{Lj} \quad (8)$$

式中: S 为负荷级别的集合, 包括一类负荷, 二类负荷和三类负荷; ω_s 为每个类型负荷的权重; P_{Lj} 为配电板 j 的有功负荷。

最小化网损

$$\min f_2 = \sum_{ij \in L} i_{ij}^2 r_{ij} \quad (9)$$

式中: i_{ij} 表示线路 ij 的电流; r_{ij} 表示线路 ij 的电阻。

总目标

$$\min f = f_2 - f_1 = \sum_{ij \in L} i_{ij}^2 r_{ij} + \sum_{s \in S} \omega_s \sum_{j \in N_L(s)} (1 - X_j) P_{Lj} \quad (10)$$

船舶电网故障重构的约束条件包括有功功率平衡约束、无功功率平衡约束、电压降等式约束、视在功率等式约束、电压安全运行约束、线路传输容量约束及辐射网拓扑约束、可靠性约束。

有功功率平衡约束为

$$\sum_{i \in w(j)} Y_{ij} (P_{ij} - r_{ij} i_{ij}^2) = \sum_{k \in v(j)} Y_{jk} P_{jk} + X_j P_{Lj}, \forall j \in N_L \quad (11)$$

式中: $w(j)$ 为母线 j 的父母线集合; P_{ij} 为线路 ij 的有功功率; $v(j)$ 为母线 j 的子母线集合。

无功功率平衡约束为

$$\sum_{i \in w(j)} Y_{ij} (Q_{ij} - x_{ij} i_{ij}^2) = \sum_{k \in v(j)} Y_{jk} Q_{jk} + X_j Q_{Lj}, \forall j \in N_L \quad (12)$$

式中: Q_{ij} 为线路 ij 的有功功率; x_{ij} 为线路 ij 的电抗; Q_{Lj} 为配电板 j 的无功负荷。

电压降等式约束

$$u_j^2 = u_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) i_{ij}^2, \forall ij \in L \quad (13)$$

式中, u_j 是配电板 j 的电压。

视在功率等式约束

$$i_{ij}^2 u_i^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2, \forall ij \in L \quad (14)$$

电压安全运行约束

$$u_{\min} \leq u_j \leq u_{\max}, \forall j \in N_L \quad (15)$$

式中, u_{\min} 和 u_{\max} 是船舶电力系统安全电压边界。

线路传输容量约束

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq \tilde{S}_{ij}^2, \forall ij \in L \quad (16)$$

式中, \tilde{S}_{ij} 为线路 ij 的最大传输容量。

辐射网拓扑约束

$$\sum_{ij \in L} Y_{ij} = \sum_{j \in N_L} X_j - 1 \quad (17)$$

2 模型求解策略

船舶电力系统故障重构模型是一个混合整数非线性规划(Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP), 潮流方程的非凸性导致了重构问题难以求解。二阶锥松弛是一种常用的松弛方法^[16], 能够将配电网潮流模型转化为凸优化模型^[17], 首先通过式(15)与式(16)替换原有变量。

$$I_{ij} = i_{ij}^2, \forall ij \in L \quad (18)$$

$$U_j = u_j^2, \forall j \in N \quad (19)$$

式中, N 为船舶电网的母线集合。

同时, 为了考虑配电线路的开断状态, 节点电压与它所连接的支路通过式(17)相关联。

$$-(1 - Y_{ij}) u_{\max}^2 \leq U_j - U_j^i \leq (1 - Y_{ij}) u_{\max}^2, \forall ij \in L \quad (20)$$

$$-(1 - Y_{ij}) u_{\max}^2 \leq U_i - U_i^j \leq (1 - Y_{ij}) u_{\max}^2, \forall ij \in L$$

式中, U_j^i 为配电板 j 与线路 ij 的联系电压; U_i^j 为配电板 i 与线路 ij 的联系电压。

目标函数转化为

$$\min f = \sum_{ij \in L} I_{ij} r_{ij} + \sum_{s \in S} \omega_s \sum_{j \in N_L(s)} (1 - X_j) P_{Lj} \quad (21)$$

将约束式(11)~(16)转化为式(22)~(26):

$$\sum_{i \in w(j)} (P_{ij} - r_{ij} I_{ij}) = \sum_{k \in v(j)} P_{jk} + P_{lj}, \forall j \in N_L \quad (22)$$

$$\sum_{i \in w(j)} Q_{ij} - x_{ij} I_{ij} = \sum_{k \in v(j)} Q_{jk} + Q_{lj}, \forall j \in N_L \quad (23)$$

$$U_j^{ij} = U_i^{ij} - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}, \forall ij \in L \quad (24)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq Y_{ij} \tilde{i}_{ij}^2, \forall ij \in L \quad (25)$$

式中, \tilde{i}_{ij} 为线路 ij 允许的最大电流。

$$X_j u_{\min}^2 \leq U_j \leq X_j u_{\max}^2, \forall j \in N_L \quad (26)$$

为了避免出现孤岛, 增加式(27)作为约束。

$$\sum_{i \in u(j)} Y_{ij} P_{ij}^n = \sum_{k \in v(j)} Y_{jk} P_{jk}^n + \tau X_j, \forall j \in N_L \quad (27)$$

式中: P_{ij}^n 为线路 ij 的虚拟有功功率; τ 为配电板 j 的虚拟有功负载。

最终通过式(28)将解空间投影至锥体上, 从而将船舶电力系统故障重构模型转化为一个混合整数二阶锥规划(Mixed Integer Second Order Conic Programming, MISOCP)。作为一个凸优化模型, 能够通过现有的求解器(例如 CPLEX^[18], GUROBI^[19], MOSEK^[20])快速获得全局最优解。

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq I_{ij} U_j \quad (28)$$

然而本文所提的船舶电力系统故障重构模型中考虑了可靠性约束, 引入了大量的整数变量, MISOCP 模型的求解效率较低, 因此本文提出了一种多面体逼近方法, 进一步将 MISOCP 模型转化为混合整数线性规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP), 以加快模型的求解速度。

首先, 式(28)可以等效为式(29)的形式, 进一步将式(29)松弛为式(30)的形式。

$$\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} + \left(\frac{I_{ij} - U_i}{2}\right)^2 \leq \left(\frac{I_{ij} + U_i}{2}\right), \forall ij \in L \quad (29)$$

$$\sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} + \left(\frac{I_{ij} - U_i}{2}\right)^2 \leq (1 + \varepsilon) \left(\frac{I_{ij} + U_i}{2}\right), \forall ij \in L \quad (30)$$

式中, ε 为松弛标量且 $\varepsilon \in (0, 0.5]$ 。

进一步, 观察式(29)是一个旋转锥的表达式^[21], 可以分解为式(31)和式(32)。

$$E_{ij} \geq \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}, \forall ij \in L \quad (31)$$

式中, E_{ij} 为引入的中间变量。

$$\frac{I_{ij} + U_i}{2} \geq \sqrt{\left(\frac{I_{ij} - U_i}{2}\right)^2 + E_{ij}^2}, \forall ij \in L \quad (32)$$

最后, 通过式(33)定义近似精度, 通过式(34)~(36)将光滑的锥面用多边形近似。

$$\varepsilon(\nu) = \frac{1}{\cos(\frac{\pi}{2^{\nu+1}})} - 1 \quad (33)$$

式中, ν 表示多面体的维度。

$$\begin{aligned} \zeta_{ij}^0 &\geq P_{ij}, \forall ij \in L \\ \eta_{ij}^0 &\geq Q_{ij}, \forall ij \in L \\ \xi_{ij}^0 &\geq I_{ij} - U_i, \forall ij \in L \\ \sigma_{ij}^0 &\geq E_{ij}, \forall ij \in L \end{aligned} \quad (34)$$

式中, ζ, η, ξ 和 σ 为引入的中间变量。

$$\begin{aligned} \zeta_{ij}^k &= \cos\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \zeta_{ij}^{k-1} + \sin\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \eta_{ij}^{k-1} \\ \eta_{ij}^k &\geq \left| -\sin\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \zeta_{ij}^{k-1} + \cos\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \eta_{ij}^{k-1} \right| \\ \xi_{ij}^k &= \cos\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \xi_{ij}^{k-1} + \sin\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \sigma_{ij}^{k-1} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\sigma_{ij}^k \geq \left| -\sin\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \xi_{ij}^{k-1} + \cos\left(\frac{\pi}{2^{k+1}}\right) \sigma_{ij}^{k-1} \right|$$

$$k \in 1, \dots, \nu, \forall ij \in L$$

$$\zeta_{ij}^\nu \leq E_{ij}, \forall ij \in L$$

$$\eta_{ij}^\nu \leq \tan\left(\frac{\pi}{2^{\nu+1}}\right) \zeta_{ij}^\nu, \forall ij \in L$$

$$\xi_{ij}^\nu \leq I_{ij} + U_j, \forall ij \in L$$

$$\sigma_{ij}^\nu \leq \tan\left(\frac{\pi}{2^{\nu+1}}\right) \xi_{ij}^\nu, \forall ij \in L$$

为了更好地展示松弛过程, 图2展示了求解域在超平面中的变换过程。

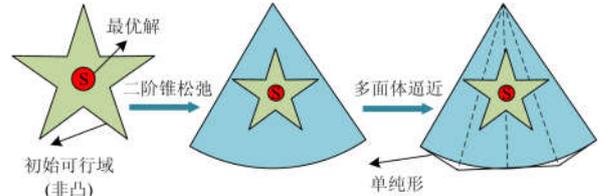


图2 模型松弛过程

Fig. 2 Process of model relaxation

如图2所示, 原始的潮流方程造成了非凸可行域, 二阶锥松弛将可行域松弛为锥体, 多面体逼近进一步将光滑的锥体松弛为一系列单纯形。该松弛的本质是一种“高维求解, 返回映射”的过程^[22], 即通过引入中间变量, 将模型松弛为凸优化形式, 代价是模型的维度上升, 最终需要通过返回映射还原原始的决策变量。

3 仿真结果分析

本文通过一个舰船交流电网系统验证所提故障

重构策略的可行性,该系统包含 32 条主供电线路和 6 条备用线路以及 32 个配电板。为简化问题,多台发电机组被等效为一个电源,且不考虑电源的故障。负荷被分为了三类,其权重比为 20:7:1。系统的拓扑图和负荷类型如图 3 所示,电网的线路和负荷参数见文献[23]。在仿真中, ν 的取值为 16, 模型精度为 $2.8724e^{-10}$, 重要负荷的平均停电次数要求小于 0.01, 主供电线路的平均故障次数为 0.001, 备用线路的平均故障次数为 0.002。

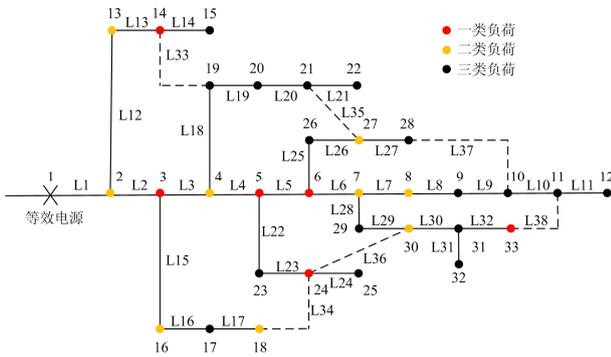


图 3 舰船电力系统拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of shipboard grid

本文设置了 4 个场景对比分析,以验证本文所提故障重构策略的可行性。

场景 1: 故障发生在 L8, L13, L16, L26。

场景 2: 故障发生在 L9, L12, L16, L19, L23, L31。

场景 3: 在场景 2 的基础上限制舰船电网的最小电压为 0.9 p.u.。

场景 4: 在场景 3 的基础上进一步考虑可靠性约束。

场景 1 的故障重构结果如图 4 所示,在场景 1 中,所有配电板均通过备用线路恢复供电,即失负荷数为 0。

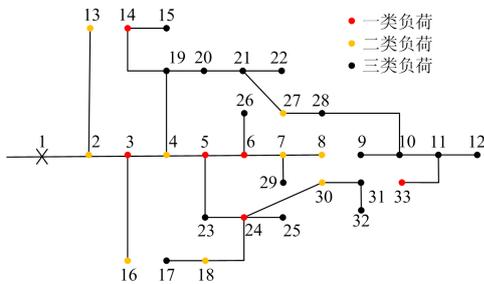


图 4 场景 1 重构策略

Fig. 4 Fault reconfiguration strategy in Case1

通过式(37)定义松弛误差,误差如图 5 所示。

$$gap_{ij} = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 - I_{ij}U_i, \forall ij \in L \quad (37)$$

如图 6 所示,二阶锥松弛后的 MISOCP 模型和多面体逼近后的 MILP 模型,松弛误差均在 10^{-9} 以内,相比于决策变量本身的数值可以忽略不计。可见本文所采用的松弛策略是有效的。

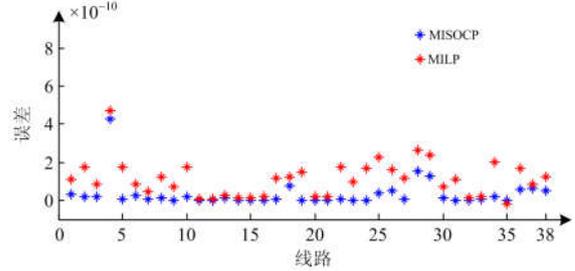


图 5 松弛误差

Fig. 5 Relaxation error

场景 2 的重构策略如图 6 所示。

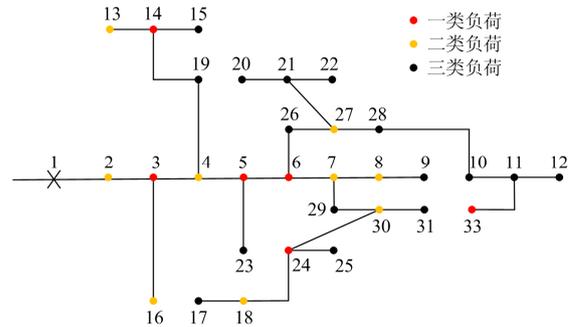


图 6 场景 2 重构策略

Fig. 6 Fault reconfiguration strategy in Case2

场景 3 的重构策略如图 7 所示。

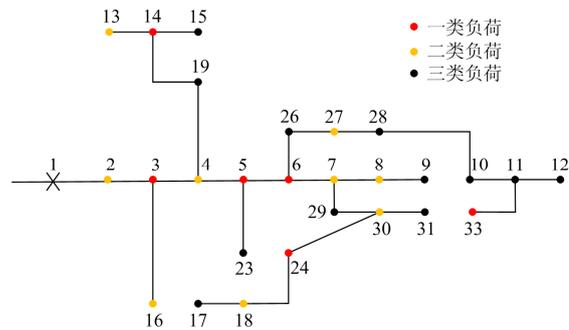


图 7 场景 3 重构策略

Fig. 7 Fault reconfiguration strategy in Case3

对比图 6 和图 7 可知,当考虑电压约束时,配电板 20、21 和 22 被进一步切除。原因是在场景 2 中,舰船电网的最低电压为 0.886 4 p.u., 低于最低电压标准 0.9 p.u.。因此,当考虑电压约束时,部分三类负荷被切除以降低配电网的负载,提高配电网的电压水平以保证重要负荷的供电质量。

场景 4 的重构策略如图 8 所示。

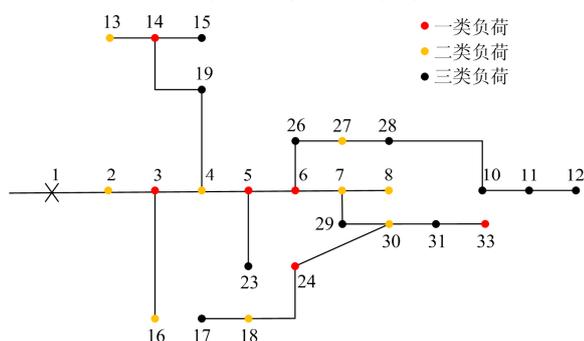


图 8 场景 4 重构策略

Fig. 8 Fault reconfiguration strategy in Case4

对比图 7 和图 8 可知, 当考虑重要负荷的供电可靠性时, 配电板 33 的供电方式发生了改变, 且部分三类负荷被进一步切除以提高电压质量。分析其原因, 场景 3 中配电板 33 的平均停电次数为 0.13, 低于可靠性指标标准, 因而在场景 4 中, 配电板 33 通过主供电线路进行供电, 以提高供电可靠性。

场景 4 的电压分布如图 9 所示。

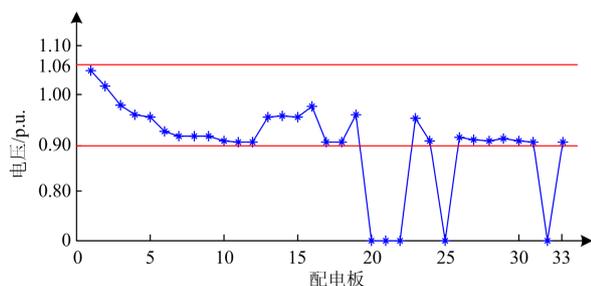


图 9 场景 4 电压分布

Fig. 9 Voltage distribution in Case4

故障重构结果见表 1 所示。

表 1 故障重构结果

Table 1 Results of fault reconfiguration

场景	失负荷数/ kW	网损/ kW	最低电压/ p.u.	开关动作次数
场景 1	0	179.93	0.926 3	8
场景 2	80	230.32	0.886 4	8
场景 3	198	189.94	0.901 7	10
场景 4	214	185.63	0.901 0	9

由表 1 可知, 本文所提的故障重构模型能得到不同场景下的故障重构策略, 且均能保证重要负荷的安全可靠运行。

不同算法之间的对比结果见表 2 所示。

从表 2 可以看出, 由于本文所提的重构策略涉及大量的路径选择布尔变量, 因此 GA 和 PSO 在处

表 2 算法比较

Table 2 Algorithmic comparison

算法	失负荷数/kW	开关动作次数	计算时间/s
GA ^[9]	244	10	1 757.33
PSO ^[11]	304	11	80.41
MISOCP	214	9	2.57
MILP	214	9	0.17

理该问题的效果较差, 均难以得到全局最优解, 而通过二阶锥松弛后的 MISOCP 模型作为一个凸优化模型, 由数学规划的理论得知其能够通过有限次的迭代得到全局最优解^[24]。利用分支定界法^[25]求解多面体逼近后的 MILP 模型, 能根据数学规划定理证明所求解是最优解。同时 MILP 模型的求解效率远高于 MISOCP 模型^[26-28], 因此本文所提的多面体逼近算法能够在保证全局最优的前提下进一步缩短计算时间。

4 结论

本文针对舰船电力系统的故障恢复问题, 建立了考虑可靠性约束的舰船电力系统故障重构模型, 提出了可解析的供电可靠性计算方法, 并通过二阶锥松弛与多面体逼近方法将原问题转化为混合整数线性规划问题。与现有的智能算法进行了比较, 仿真结果表明, 本文所提算法能够快速获取全局最优解。同时, 考虑可靠性约束的重构策略提高了系统的供电可靠性, 能够进一步保障舰船重要负荷的供电安全。

参考文献

- [1] 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 multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 71-78.
- [2] 穆杉. 基于智能重构算法的舰船电力系统研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(11A): 55-57.
MU Shan. Research on ship power system based on intelligent reconfiguration algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(11A): 55-57.
- [3] SHARIATZADEH F, KUMAR N, SRIVASTAVA A. Optimal control algorithms for reconfiguration of shipboard microgrid distribution system using intelligent techniques[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1):

- 474-482.
- [4] 尚安利, 夏立, 王征. 舰船电力系统一体化系统模型和故障恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 163-170.
SHANG Anli, XIA Li, WANG Zheng. Research on integrated system model and service restoration method for warship power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 163-170.
- [5] 王丛佼, 王锡淮, 肖建梅. 改进差分进化算法在舰船电力系统网络重构中的应用[J]. 船舶工程, 2013(6): 55-59.
WANG Congjiao, WANG Xihuai, XIAO Jianmei. Improvement of application of differential evolution algorithm in network reconfiguration of shipboard power system[J]. Ship Engineering, 2013(6): 55-59.
- [6] 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.
- [7] 尚安利, 夏立. 舰船电力系统图迹分析重构算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7): 30-34.
SHANG Anli, XIA Li. Warship power system reconfiguration method of graph trace analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(7): 30-34.
- [8] 蒋燕君, 张彦魁, 许森, 等. 考虑静态电压稳定的舰船电网多目标故障恢复决策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 117-123.
JIANG Yanjun, ZHANG Yankui, XU Sen, et al. Multiobjective service restoration decision of shipboard power networks considering static voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 117-123.
- [9] 张冬梅, 孙士尉, 刘昕彤, 等. 遗传算法的舰船电力系统供电恢复研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(3A): 1-3.
ZHANG Dongmei, SUN Shiwei, LIU Xintong, et al. Research on power supply recovery of ship power system based on genetic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(3A): 1-3.
- [10] 张炜, 李艳. 基于多智能体遗传算法的电力网络重构方法分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(7A): 1-3.
ZHANG Wei, LI Yan. Analysis of power network reconfiguration based on multi-agent genetic algorithms[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(7A): 1-3.
- [11] 李博, 郑伟丽. 船舶电力系统配电网故障恢复重构算法研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(3A): 1-3.
LI Bo, ZHENG Weili. Research on reconstruction algorithm of fault recovery in power distribution network of ship power system[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(3A): 1-3.
- [12] 张兰勇, 孟坤, 刘胜, 等. 基于改进双粒子群算法的舰船电力系统网络故障重构[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 96-102.
ZHANG Lanyong, MENG Kun, LIU Sheng, et al. Reconstruction of ship power system network fault based on improved two particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 96-102.
- [13] 马理胜, 张均东, 任光. 基于环境 Pareto 支配选择差分进化算法的舰船电网重构[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(2): 36-41.
MA Lisheng, ZHANG Jundong, REN Guang. Shipboard power grid reconstruction based on environment Pareto dominated selection differential evolution algorithm[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018, 44(2): 36-41.
- [14] 房慧丽. 梯形舰船电力系统网络重构模型及算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
FANG Huili. Research on network reconfiguration model and algorithm of ladder-shaped shipboard power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [15] JOSE J, KOWLI A. Reliability constrained distribution feeder reconfiguration for power loss minimization[C] // 2016 National Power Systems Conference (NPSC), December 19-21, 2016, Bhubaneswar, India: 1-6.
- [16] 葛鹏江, 张树永, 董晓晶, 等. 基于鲁棒优化的配网重构二阶锥规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 50-57.
GE Pengjiang, ZHANG Shuyong, DONG Xiaojing, et al. Distribution network reconfiguration model based on robust optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 50-57.
- [17] 江钧, 成乐祥, 孙国强, 等. 考虑安全域的配电网重构二阶锥双层规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 9-16.
JIANG Jun, CHENG Lexiang, SUN Guoqiang, et al. Distribution network reconfiguration based on second order cone bi-level programming considering security distance[J]. Power System Protection and Control, 2019,

- 47(4): 9-16.
- [18] 罗煜, 邓莉荣, 张鑫, 等. 计及可行解恢复的高载能负荷-新能源有功-无功协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 43-50.
LUO Yi, DENG Lirong, ZHANG Xin, et al. Feasible solution recovery of the coordination problem of energy intensive enterprise and renewable[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 43-50.
- [19] IBM. The IBM ILOG CPLEX[EB/OL]. [2019-08-11]. New York: IBM, 2019. <https://www.ibm.com/analytics/data-science/prescriptive-analytics/cplex-optimizer>.
- [20] Gurobi Optimizer[EB/OL]. [2019-08-11]. New York: GUROBI, 2019. <https://www.gurobi.com/>.
- [21] Mosek ApS[EB/OL]. [2019-08-11]. Denmark: Mosek ApS, 2019. <https://www.mosek.com/>.
- [22] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [23] 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.
- [24] LI Chenghao, WANG Chun, YIN Fagen, et al. Optimal power flow calculation including power flow router in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 1-8.
- [25] LAWLER E L, WOOD D E. Branch-and-bound methods: a survey[J]. Operations Research, 1966, 14(4): 699-719.
- [26] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C] // 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, September 2-4, 2004, New Orleans, LA, USA.
- [27] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [28] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-02-10

作者简介:

韩思宁(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性运行; E-mail: 2018202070019@whu.edu.cn

杨军(1977—), 男, 通信作者, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: Jyang@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)