

引用格式: 吴其桓, 朱志宇, 郝伟汉, 等. 考虑负荷时变特性的船舶电力系统动态重构优化策略[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 241-248.

WU Q H, ZHU Z Y, HAO W H, et al. Shipboard power system dynamic reconfiguration optimization strategy considering time-varying load characteristics[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(3): 241-248 (in Chinese).

考虑负荷时变特性的船舶电力系统 动态重构优化策略



扫码阅读全文

吴其桓, 朱志宇*, 郝伟汉, 杨登昊, 徐程

江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212100

摘要: [目的] 为保证故障工况下船舶电力系统的安全稳定运行, 提出一种考虑负荷时变特性的电力系统动态重构优化方法。[方法] 首先, 计及船舶电力系统拓扑结构、发电容量限制、线路电流、节点电压等约束条件, 提出以加权切负荷和电压偏差最小为优化目标的船舶电力系统动态重构优化策略; 然后, 采用改进惯性粒子群算法求解优化模型; 最后, 通过典型船舶电力系统算例来验证所提方法的有效性。[结果] 仿真结果表明, 相较于静态重构方法, 动态重构方法可以降低 9.94% 的系统电压偏差, 从而显著提升了网络供电质量。[结论] 研究成果可为船舶电力系统的可靠性设计提供参考。

关键词: 船舶电力系统; 负荷时变特性; 动态重构; 故障恢复; 电力负荷管理; 电力系统; 粒子群算法

中图分类号: U665.12

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03725

0 引言

随着电力电子技术的高速发展, 船舶电力系统容量不断增加、网络拓扑日益复杂、控制手段日趋健全^[1], 为其在多场景中的应用奠定了牢固基础^[2]。为了保证船舶综合电力系统的安全、稳定、可靠、经济运行, 电力系统重构技术尤为重要。作为船舶故障处理的关键技术之一, 电力系统重构即在发生系统故障之后, 通过改变船舶电网的拓扑结构, 从而实现故障隔离和负荷恢复等一系列操作。然而, 随着船舶负荷的日益增加, 船舶综合电力系统的规模也在不断增加, 各设备之间的电气联系愈加紧密, 所以船舶电力系统的重构难度也随之提升。

近年来, 该领域的专家学者针对这一问题开展一系列研究, 提出了相应的优化改进方法。张馨悦等^[3]建立舰船电力系统的故障重构模型, 并采用改进灰狼优化算法进行求解, 解决了传统灰狼算法收敛速度慢、初始化种群多样性较差等问题。苏丽等^[4]提出一种基于两阶段差分进化算法

的约束多目标优化方法, 有效改善了现有约束多目标优化算法在求解船舶微电网重构时收敛性和分布性欠佳的问题。为适应最新的分布式控制结构, Zhu 等^[5]设计新型分布式重构策略, 通过划分区域重构与全局重构 2 个层次, 提出了区域和全局可重构性的概念, 并在船舶电力系统 (shipboard power system, SPS) 可重构的前提下, 提出了可执行的算法以确定区域重构和全局重构的最佳操作事件序列, 算例结果显示, 该重构策略在考察系统的可重构性和确定最优重构方案方面具有明显的优势。Wang 等^[6]提出一种基于动态邻域小种群粒子群优化的新型群智能算法, 其利用动态邻域策略, 可以有效处理多目标问题。除此之外, 还可以采用差分进化算法^[7-8]、遗传算法^[9-10]、粒子群算法^[11-12]、克隆算法^[13]等进行电力系统故障的恢复求解。

然而, 一方面, 船舶电力系统具有电缆线路短、负荷电气联系紧密、运行工况复杂、负荷变化频繁等特点^[14]; 另一方面, 上述研究成果的对象主要为船舶电力系统在某一时间断面的故障恢复, 其

收稿日期: 2024-01-08 修回日期: 2024-03-04 网络首发时间: 2024-04-22 20:24

基金项目: 镇江市重点研发计划资助项目 (ZD2022005)

作者简介: 吴其桓, 男, 1996 年生, 硕士生。研究方向: 船舶电力系统故障重构。E-mail: wuqihuanedu@qq.com

朱志宇, 男, 1971 年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶系统控制, 雷达信号处理及智能控制。E-mail: zzydzz@163.com

郝伟汉, 男, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 电力系统故障诊断。E-mail: 2138254409@qq.com

*通信作者: 朱志宇

重点在于优化算法的改进,没有充分考虑故障恢复过程中不断变化的动力负荷和其他船舶负荷,因此,传统的静态重构无法满足实船电力系统的运行要求。随着船舶负荷预测技术的日益成熟,超短期负荷预测已成为一种可能^[15-16]。

有鉴于此,应综合考虑故障恢复过程中船舶负荷的全周期波动特征,并以船舶电力系统动态重构为控制手段,最大限度地保障船舶重要负荷的安全稳定运行,所以本文拟提出一种考虑负荷时变特性的船舶电力系统动态重构优化策略。首先,通过综合考虑船舶电力系统拓扑结构、发电容量限制、线路电流、节点电压等因素,提出以加权切负荷和电压偏差最小作为优化目标的船舶电力系统动态重构优化模型;然后,基于节点电势法开展船舶电力系统潮流计算,从而为故障恢复阶段的系统仿真分析奠定基础;其次,提出改进惯性粒子群算法以求解动态重构优化模型,进而确定重构期间的开关操作结果;最后,基于某典型的船舶电力系统算例,开展不重构、静态重构、动态重构等不同场景下系统切负荷和电压偏差等工况的仿真计算,以验证本文所提方法的有效性。

1 船舶电力系统的动态重构建模

1.1 船舶电力系统的特点

相较于陆地电网而言,船舶电力系统是一种

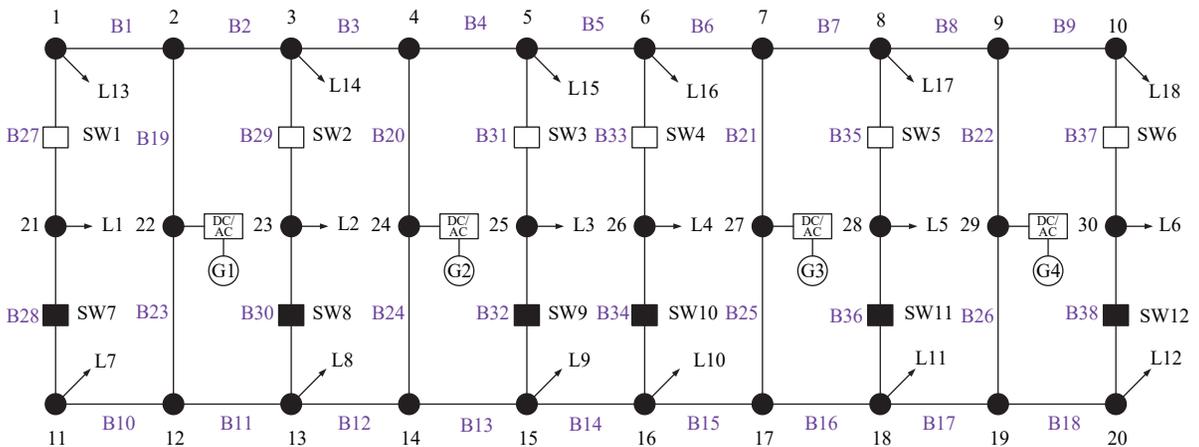


图1 船舶综合电力系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ship integrated power system structure

图1中: B_h ($h=1, 2, \dots, 38$)表示支路编号; SW_s ($s=1, 2, \dots, 12$)表示开关; L_j ($j=1, 2, \dots, 18$)表示负荷,可知该船电力系统包含6个一级负荷(L1~L6),6个二级负荷(L7, L9, L11, L13, L15, L17),6个三级负荷(L8, L10, L12, L14, L16, L18)。一级负荷是船舶的重要负荷,用于保障安全运行。为保障其可靠供电,图1设计了2条分

特殊的电力网络,没有大电网为其供电,在本质上是一个处于孤岛运行状态的微电网,其网络重构也与传统的配电网有所不同,主要体现为以下3点:

1) 优化目标不同。受限于船舶本体的空间约束,其电力系统的连接线路较短,导致船舶负荷之间的电气联系更为紧密,因此不宜过多关注线路网损等指标。

2) 故障类型不同。陆地电网很少出现失去上级电网支撑的问题,其大多数故障为线路故障。由于发电机是船舶电力系统唯一的能量来源,故在船舶电力系统的优化重构研究中,应特别考虑发电机损坏的工况。

3) 重构要求更高。船舶电力系统含有大量的电力电子型负荷,其对电能质量的波动尤其敏感,所以船舶电力系统的重构要求更高。

1.2 船舶电力系统的典型结构

图1所示为直流区域式船舶电力系统的典型结构,其主要由发电机、换流器、左舷母线、右舷母线及船舶用电负荷等组成,其中G1和G4为主发电机,G2和G3为辅助发电机。按照负荷类别的不同,船舶用电系统的负荷包含推进系统、通信系统、日用负荷等;同时,按照负荷的重要性(依次递减),船舶电力系统负荷可以划分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。

别连接左、右舷母线的供电路径,可以通过控制开关进行自动切换。开关 SW_s 在船舶电力系统的物理实体上表现为自动传输母线装置(automatic bus transfers, ABT),即一种快速响应的电力电子装置,可在极短时间内完成线路的投切。以负荷L2为例,其通过开关SW2, SW8分别与左、右舷的母线相连,即存在2条供电路径。

1.3 考虑时序特征的船舶电力系统动态重构方法

一旦电力系统出现故障,如果不及时进行故障重构,将进一步扩大系统的故障面积并影响供电连续性。所谓重构技术,即通过改变电网拓扑来隔离故障区域,从而确保系统的连续供电。鉴于不同负荷的优先级,应优先保证重要负载的供电以减少故障损失,并提高系统的寿命、可靠性和稳定性。同时,通过网络重构,还可以改善系统的潮流分布,从而兼顾故障恢复后系统的经济性指标。

从负荷时序性的角度出发,重构可分为静态重构和动态重构两类:静态重构由于忽略了负荷时序特征,仅根据某一时间断面的负荷状态对网络进行重构,一般无法满足实际工程的应用需求;而动态重构则可依据负荷状态的变化情况来自适应调整网络结构,因此具有更大的灵活性和实用性。需注意的是,由于用电方式的改变,以及事故原因等各种影响因素,船舶电力系统的负荷将随时间而动态变化。因此,为确保船舶电力系统在负荷动态变化过程中的安全、稳定、经济运行,需不断地对电力网络结构进行动态调整。

图2所示为船舶电力系统的动态重构整体思路,基于超短期负荷预测即可预估修复期内的负荷曲线。假设从故障发生到故障修复的总耗时为 T ,修复期内的负荷曲线可以划分为 N 个时间段,每个时间段步长均为 Δt 。所谓动态重构,即在不同的时间段 t 内(其中 $t=1, 2, \dots, N$),根据负荷分布及时间特性,通过自适应优化每个开关的状态以形成不同的拓扑结构,从而实现船舶供电系统安全、稳定、经济供电的目标。

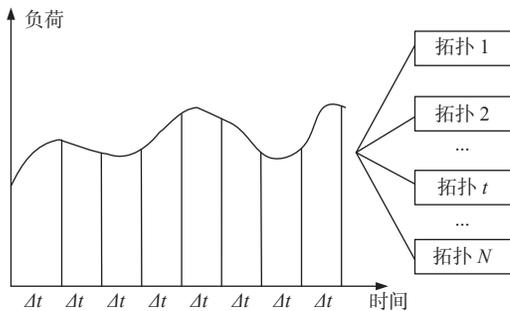


图2 船舶电力系统的动态重构

Fig. 2 Dynamic reconstruction of shipboard power system

船舶电力系统的动态重构是一个需同时考虑静态和动态两方面要求的优化问题,其优化模型既要满足单个时间断面下的静态约束,又要满足故障恢复期内各时段的动态约束。为充分考虑船舶负荷连续变化的特性,本文拟提出多时段

船舶电力系统的动态重构优化模型,该模型以整个时段内的加权切负荷与电压偏移最小作为优化目标,并以整个时段内的拓扑结构、发动机容量、支路功率、节点电压等作为约束条件。

1.4 目标函数

设置动态重构目标函数时,需将供电网络的故障修复视为一个多目标、非线性、复杂的优化问题,并主要考虑恢复过程中负荷供电的可靠性和电能质量的优劣。

1.4.1 加权切负荷最小

由上文可知,按重要程度递减的规则,船舶负荷可分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。为了保证持续供电的负荷总功率最大,并考虑负荷重要程度的不同权重,则加权切负荷最小的目标函数 $\min F_1$ 为

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^N \left(w_1 \sum_{j=1}^{n_1} a_{j,t} L_{j,t} + w_2 \sum_{j'=1}^{n_2} a_{j',t} L_{j',t} + w_3 \sum_{j''=1}^{n_3} a_{j'',t} L_{j'',t} \right) \Delta t \quad (1)$$

式中: $L_{j,t}$, $L_{j',t}$, $L_{j'',t}$ 分别为 t 时段的一级、二级、三级负荷功率; j' , j'' , j''' 分别为一级、二级、三级负荷的数量编号; n_1 , n_2 , n_3 分别为一级、二级、三级负荷的总数量; w_1 , w_2 , w_3 分别为一级、二级、三级负荷的权重系数; a 为负荷状态变量,其中 $a_{j,t}$, $a_{j',t}$, $a_{j'',t}=1$ 即表示 t 时刻一级、二级、三级负荷执行切除操作,而 $a_{j,t}$, $a_{j',t}$, $a_{j'',t}=0$ 则表示 t 时刻一级、二级、三级负荷维持供电。

1.4.2 电压偏差最小

电压偏差是供电可靠性的关键指标,如果船舶电力系统的节点电压有所降低,将对船舶负荷造成较大的冲击,其中对推进电机的影响尤为明显。在启动阶段,节点电压过低将可能使电机启动困难、启动时间延长甚至无法达到额定转速,进而导致电机发热并影响绝缘;电动机启动之后,当推进功率不变时,低电压将导致电机电流有所增加,严重时甚至可能烧毁电机。因此,电压偏差的优化目标应为所有节点的电压相对于额定电压偏差的绝对值之和最小,该优化目标可在确保电压质量良好的同时,保障船舶电力系统中的每个节点电压在时序上均无明显压降,以避免因电压偏差较大而对负荷产生不利的影响。节点电压偏差最小的目标函数 $\min F_2$ 为

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{n_{bus}} |V_i^e - V_{i,t}| \quad (2)$$

式中: 节点编号 $i = 1, 2, \dots, n_{\text{bus}}$, 其中 n_{bus} 为系统的节点总数量; V_i^e 为节点 i 的额定电压; $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压。

基于式(1)和式(2), 综合考虑不同目标函数的权重, 动态重构目标函数 $\min F$ 可以表达为

$$\min F = \beta_1 \sum_{t=1}^N \left(w_1 \sum_{j'=1}^{n_1} a_{j',t} L_{j',t} + w_2 \sum_{j''=1}^{n_2} a_{j'',t} L_{j'',t} + w_3 \sum_{j'''=1}^{n_3} a_{j''',t} L_{j''',t} \right) \Delta t + \beta_2 \sum_{t=1}^N \sum_{i=1}^{n_{\text{bus}}} |V_i^e - V_{i,t}| \quad (3)$$

式中, β_1, β_2 分别为加权切负荷最小 $\min F_1$ 和电压偏差最小 $\min F_2$ 这 2 个目标函数的权重。

1.5 约束条件

本节将分析优化模型在整个时段内的拓扑结构、发动机容量、支路功率、节点电压等约束条件, 而潮流约束问题则将在下一节单独论述。

1.5.1 拓扑结构约束

鉴于船舶电力系统的一级负荷有 2 条供电路径, 为防止网络环流导致的短路问题, 其网络拓扑需满足辐射状供电的结构要求。一级负荷最多只能有一条供电路径为其供电, 即连接一级负荷的 2 个开关不能同时闭合, 该约束的表达式为

$$b_{j',t}^l + b_{j',t}^r \leq 1 \quad (4)$$

式中: $b_{j',t}^l$ 为 t 时刻连接一级负荷与左舷母线的开关状态; $b_{j',t}^r$ 为 t 时刻连接一级负荷与右舷母线的开关状态。结合图 1, 式(4)可以具体展开为

$$\begin{cases} b_{\text{SW}1,t} + b_{\text{SW}7,t} \leq 1 \\ b_{\text{SW}2,t} + b_{\text{SW}8,t} \leq 1 \\ b_{\text{SW}3,t} + b_{\text{SW}9,t} \leq 1 \\ b_{\text{SW}4,t} + b_{\text{SW}10,t} \leq 1 \\ b_{\text{SW}5,t} + b_{\text{SW}11,t} \leq 1 \\ b_{\text{SW}6,t} + b_{\text{SW}12,t} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $b_{\text{SW}s,t}$ 为 t 时刻联络开关 s 的状态, 其中 $s = 1, 2, \dots, 12$, 如果 $b_{\text{SW}s,t} = 0$, 即表示联络开关 s 在 t 时刻处于断开状态; 如果 $b_{\text{SW}s,t} = 1$, 则表示为导通状态。

1.5.2 发动机容量约束

在电力系统运行过程中, 不能造成发电机过载, 该约束的表达式为

$$P_g \leq P_{g\text{max}} \quad (6)$$

式中: P_g 为发电机 g 的发电功率; $P_{g\text{max}}$ 为发电机 g 的最大功率。

1.5.3 支路功率约束

假设船舶电力系统的支路总数为 n_{branch} , 其在

运行过程中不能造成线路过载, 则该约束为

$$|P_{h,t}| \leq P_{h\text{max}} \quad (7)$$

式中, $P_{h,t}, P_{h\text{max}}$ 分别为支路 h 在 t 时刻的功率及最大容量, 其中 $h = 1, 2, \dots, n_{\text{branch}}$ 。

1.5.4 节点电压约束

在船舶电力系统运行时, t 时刻节点 i 的电压 $V_{i,t}$ 需保持在一个合理范围内, 该约束的表达式为

$$V_{\text{imin}} \leq V_{i,t} \leq V_{\text{imax}} \quad (8)$$

式中, $V_{\text{imin}}, V_{\text{imax}}$ 分别为节点 i 电压的上限和下限。

2 动态重构模型的求解方法

2.1 船舶电力系统的潮流计算方法

节点电势法是一种面向船舶电力系统的潮流计算方法。假设船舶发电机电势不变, 首先对各节点的电压赋予初值, 然后通过节点导纳矩阵反复迭代来求解系统的潮流分布, 直至满足计算精度要求才停止迭代。因此, 需首先建立系统的拓扑结构, 以生成节点导纳矩阵, 进而采用节点-支路的关联矩阵 \mathbf{M} 来描述系统拓扑结构。设定 \mathbf{M} 为 n_{bus} 行 n_{branch} 列的矩阵, 同时支路 h 起始于 i 节点, 终止于 i' 节点, 则

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{i,h} = 1 \\ \mathbf{M}_{i',h} = -1 \end{cases} \quad (9)$$

按编号给各节点电势赋初值, 即可生成节点电压向量 \mathbf{V} , 进而根据节点-支路关联矩阵 \mathbf{M} 即可计算各支路压降的列向量 \mathbf{V}_b :

$$\mathbf{V}_b = \mathbf{M}\mathbf{V} \quad (10)$$

根据欧姆定律, 即可确定各支路电流的列向量 \mathbf{I}_b :

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{Y}_b \mathbf{V}_b \quad (11)$$

式中, \mathbf{Y}_b 为支路导纳矩阵。

根据支路电流的列向量 \mathbf{I}_b , 即可计算注入每个节点的电流 \mathbf{I} :

$$\mathbf{I} = \mathbf{M}^T \mathbf{I}_b \quad (12)$$

根据节点负荷功率 \mathbf{L}_p , 即可更新节点的电压向量 $\mathbf{V}_{\text{新}}$:

$$\mathbf{V}_{\text{新}} = \mathbf{L}_p / \mathbf{I} \quad (13)$$

设置迭代精度为 δ , 当节点电压前、后 2 次的数值变化小于预设值时, 即可令潮流计算结束迭代, 其表达式为

$$\min(\mathbf{V}^{c+1} - \mathbf{V}^c) \leq \delta \quad (14)$$

式中, \mathbf{V}^{c+1} 和 \mathbf{V}^c 分别为第 $c+1$ 次、第 c 次迭代时的节点电压向量。

最后, 根据电压分布, 即可求解电力网络中的电流、功率、网损等参数。

2.2 重构模型的求解方法

粒子群算法 (particles swarm optimization, PSO) 是一种广泛应用于船舶电力系统优化的智能算法^[17-19], 虽然 PSO 的收敛速度很快, 但其在求解过程中易陷入局部最优解。此外, 船舶电力系统动态重构优化问题的求解规模较大, 故对重构求解速度的要求相对较高。因此, 本文拟采用改进的惯性粒子群算法来求解船舶电力系统的动态重构模型。

假设在 Z 维搜索空间中, 存在由 M 个粒子组成的种群 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$, 其中第 m 个粒子 ($m = 1, 2, \dots, M$) 的位置为 $x_m = \{x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mM}\}$, 速度为 $v_m = \{v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mM}\}$ 。因此, 从 t 时刻至 $t+1$ 时刻, 第 m 个粒子的速度和位置更新公式为

$$v_m^{t+1} = v_m^t + c_1 r_1 (p_m^t - x_m^t) + c_2 r_2 (p_q^t - x_m^t), \quad r_1, r_2 \in [0, 1] \quad (15)$$

$$x_m^{t+1} = x_m^t + v_m^{t+1} \quad (16)$$

式中: v_m^t, v_m^{t+1} 分别为 t 时刻、 $t+1$ 时刻第 m 个粒子的速度; c_1, c_2 均为加速因子; r_1, r_2 为相互独立的随机数; x_m^t, x_m^{t+1} 分别为 t 时刻、 $t+1$ 时刻第 m 个粒子的位置; p_m^t 为第 m 个粒子的个体最优位置; p_q^t 为所有粒子的全局最优位置。

加入惯性权重的速度更新方法是对粒子群算法的一种优化改进, 通过选取合适的惯性权重因子 w , 可以使算法在全局最优解与局部最优解之间实现平衡, 这将有助于改善算法性能并增强执行效率。作为惯性粒子算法的核心参数, 速度更新公式中的惯性权重 w 取值应确保全部粒子的运动均可实现稳定, 具体可参考文献^[19]。

引入惯性权重因子 w 之后, 式(15)的速度更新表达式可以改写为

$$v_m^{t+1} = wv_m^t + c_1 r_1 (p_m^t - x_m^t) + c_2 r_2 (p_q^t - x_m^t) \quad (17)$$

采用改进惯性粒子群算法求解船舶电力系统动态重构模型的流程如图3所示, 具体步骤如下。

Step 1: 读取船舶电力系统数据 (包括系统参数、拓扑结构、预测负荷等);

Step 2: 根据负荷波动情况, 将故障恢复期划分为 N 个时间段, 其中重构时段 $t = 1, 2, \dots, N$,

并赋初值 $t = 1$;

Step 3: 生成种群, 进而生成粒子的位置和速度;

Step 4: 根据粒子位置, 计算船舶电力系统的网络结构和切负荷节点, 进而判断船舶电力系统是否存在孤岛, 如果存在, 即返回 Step 3 重新生成粒子位置; 如果否, 则进入 Step 5;

Step 5: 按照 2.1 节的方法进行船舶电力系统潮流计算, 具体包括网络中的电压、电流、功率、网损等参数;

Step 6: 根据潮流计算结果, 按式(1)计算粒子的适应度, 对于不满足模型约束的结果, 应对粒子适应度增加惩罚函数;

Step 7: 根据适应度的计算结果, 按式(15)和式(16)对粒子的速度和位置进行更新;

Step 8: 判断惯性粒子群优化是否终止, 当迭代次数达到所设定的最大迭代次数时, 惯性粒子群优化终止, 同时输出 t 时段的开关组合并保存 t 时段的重构结果; 如果没有终止, 则返回 Step 4;

Step 9: 计算第 t 次重构时段的系统目标函数, 同时更新 $t_{\text{新}} = t+1$;

Step 10: 判断是否存在 $t_{\text{新}} \leq N$, 如果是, 即返回 Step 4, 如果否, 则结束优化计算。

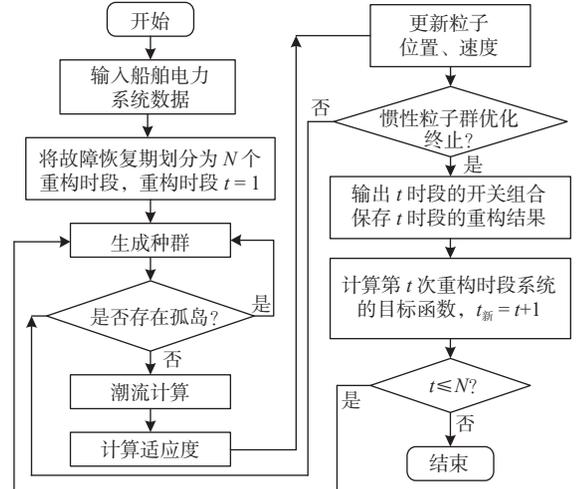


图3 基于改进惯性粒子群算法求解船舶电力系统动态重构模型的流程图

Fig. 3 Flow chart of solving dynamic reconstruction model of SPS based on improved inertial PSO algorithm

3 算例仿真

3.1 算例参数

为验证本文所提方法的有效性, 本节将以图1所示直流区域式船舶电力系统为例进行验证, 仿真环境为 Windows10, 32 GB RAM, I5-3.50 GHz CPU, Matlab2017 平台。设定该船舶电力系统的基准电压为 3.3 kV, 每个节点的额定电压均取值为基准电压; 假设在某一时刻 B8 支路发生故障, 故障修复期

$T=1.5$ h, 每个时段步长 $\Delta t=15$ min, 因此该故障修复时段的 $N=6$ 。通过超短期负荷预测, 即可计算故障修复期内的负荷动态变化情况, 如图 4 所示。

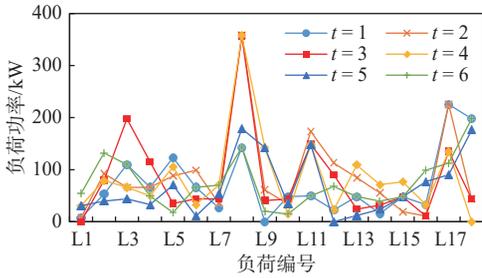


图 4 负荷动态变化情况
Fig. 4 Dynamic changes in load

3.2 结果分析

为验证本文所提方法的有效性, 拟设置以下 3 种方案进行对比: 1) 场景 I: 不重构, 即故障周期

内的开关状态保持不变; 2) 场景 II: 静态重构, 即故障周期内仅重构 1 次, 不进行动态优化; 3) 场景 III: 动态重构, 即采用本文所提方法在故障周期内进行重构。为避免智能算法单次求解的偶然性, 并保证求解算法的可靠性, 本节将针对以上 3 种场景分别采用改进惯性粒子群算法运行 100 次, 并取其中最好的 1 次运行数据作为最终结果, 具体如表 1 所示。

表 1 为不同时间段 t 内, 3 种场景下船舶电力系统网络的开关连通情况, 其中场景 I, II, III 的电压偏差标幺值分别为 1.82, 1.77, 1.61 p.u.。当进行切负荷操作时, 开关不导通。无论采用静态重构还是动态重构, 相较于场景 I 而言, 开关重构操作都将有利于降低节点电压偏差, 进而提升系统的供电质量。故障发生之后, 由于船舶电力系统网络的冗余度较高, 故未出现切负荷现象。

表 1 3 种场景下的优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results under three scenarios

时段	导通的开关		
	场景 I	场景 II	场景 III
$t=1$			SW2, SW7, SW9~SW12
$t=2$			SW2, SW7, SW9~SW12
$t=3$	SW7~SW12	SW1~SW4, SW11~SW12	SW1~SW4, SW11~SW12
$t=4$			SW1~SW4, SW11~SW12
$t=5$			SW1~SW3, SW10~SW12
$t=6$			SW1~SW4, SW11~SW12

根据表 1 可知, 场景 I 没有进行网络重构且未采取任何优化措施, 所以导致系统的整体电压偏差较高, 电压偏离度较大; 场景 II 则基于改进惯性粒子群算法进行了静态重构, 其电压偏差从 1.82 p.u. 下降为 1.77 p.u., 降幅为 2.82%, 电压质量得以明显改善。

相较于场景 III 的动态重构, 虽然场景 II 的静态重构方式减少了开关动作次数, 但其在故障周期内仅优化了 1 次, 并未在所允许的开关动作范围内最大化地利用船舶供电系统网拓扑结构的动态变化, 因而电压质量的提升相对有限。而场景 III 则根据网络中负荷的动态变化情况, 在各个划分时段内分别求取最优的重构方案, 相较于场景 II, 其电压偏差从 1.77 p.u. 下降为 1.61 p.u., 降幅为 9.94%, 电压质量得到了进一步提升。

为便于对比分析, 将故障周期内 3 种场景下各节点的电压平均值进行对比, 具体如图 5 所示。经过重构之后, 各个节点的电压均得到一定程度地提升, 进而优化了船舶电力系统网架结构。在

动态重构方法中, 由于联络开关状态的调整而优化了系统的潮流分布, 降低了各支路的电压, 进而缩小了各个节点电压与额定值之间的偏差, 提高了供电电压水平, 有效改善了电压分布的均匀程度。

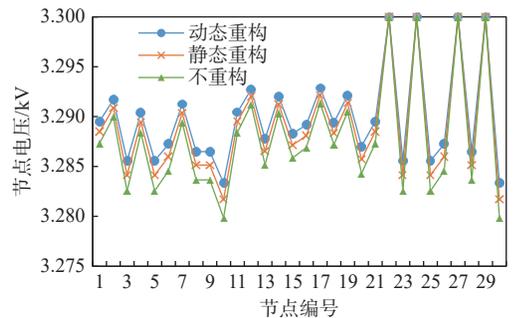


图 5 不同场景下的节点电压对比

Fig. 5 Comparison of node voltages in different scenarios

综上所述, 通过在不同时刻进行电力系统重构, 不仅可以有效提高系统运行的经济性, 还可以改善系统电压水平, 增强船舶电力系统运行的可靠性, 从而进一步提升供电质量。

4 结 论

本文提出的考虑负荷时序特征的船舶电力系统动态重构优化方法实际可操作性强,可以较好地反映网络各时段的切负荷及电压偏移的变化情况。通过算例分析,得到以下结论:

1) 开展船舶电力系统网络重构时,基于单时间断面的静态网络重构优化目标仅为该时间断面下的优化操作,且其考虑的约束条件(例如线路供电能力约束、节点电压约束等)也均为该时间断面下的静态约束,因此限制了网络重构的应用功能和范围。

2) 动态重构则综合考虑了整个时段内的负荷情况,比静态重构更为全面,可以有效提高系统运行的经济性和可靠性。

参考文献:

- [1] 梁正卓,朱琬璐,朱志宇,等.船舶综合电力系统重构技术现状及展望[J].*中国舰船研究*,2022,17(6):36-47.
LIANG Z Z, ZHU W L, ZHU Z Y, et al. Situation and prospects of shipboard integrated power system reconfiguration technology[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(6): 36-47 (in Chinese).
- [2] 马伟明.电力电子在舰船电力系统中的典型应用[J].*电工技术学报*,2011,26(5):1-7.
MA W M. Typical applications of power electronics in naval ship power systems[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(5): 1-7 (in Chinese).
- [3] 张馨悦,肖健梅,王锡淮.基于改进灰狼优化算法的舰船电力系统故障重构[J].*中国舰船研究*,2023,18(2):251-259.
ZHANG X Y, XIAO J M, WANG X H. Fault reconfiguration of ship power system based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(2): 251-259 (in Chinese).
- [4] 苏丽,王锡淮,肖健梅.基于多目标优化算法的船舶微电网重构[J].*中国舰船研究*,2020,15(3):169-176.
SU L, WANG X H, XIAO J M. Ship micro-grid reconfiguration based on multiobjective optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(3): 169-176 (in both Chinese and English).
- [5] ZHU W L, SHI J, ZHI P F, et al. Distributed reconfiguration of a hybrid shipboard power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 4-16.
- [6] WANG C, LIU Y C, ZHAO Y T. Application of dynamic neighborhood small population particle swarm optimization for reconfiguration of shipboard power system[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(4): 1255-1262.
- [7] 王丛俊,王锡淮,肖健梅.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*,2013,35(6):55-59,67.
WANG C J, WANG X H, XIAO J M. Improvement of application of differential evolution algorithm in network reconfiguration of shipboard power system[J]. *Ship Engineering*, 2013, 35(6): 55-59,67 (in Chinese).
- [8] 朱志宇,郑晨阳.基于混沌自适应差分进化算法的舰船电力系统网络重构[J].*江苏科技大学学报(自然科学版)*,2013,27(2):154-158.
ZHU Z Y, ZHENG C Y. Network reconfiguration of shipboard power system based on chaos adaptive differential evolution algorithm[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 27(2): 154-158 (in Chinese).
- [9] 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 X X, ZHANG X F, ZHANG Y, 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).
- [10] 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 X X, ZHANG X F, ZHANG Y. Study on immune genetic algorithm for shipboard power system service restoration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 80-85 (in Chinese).
- [11] 陈雁,孙海顺,文劲宇,等.改进粒子群算法在船舶电力系统网络重构中的应用[J].*电力自动化设备*,2011,31(3):29-34,39.
CHEN Y, SUN H S, WEN J Y, et al. Application of improved PSO algorithm in network reconfiguration of shipboard power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(3): 29-34, 39 (in Chinese).
- [12] 李彦,杨晨晖.基于量子粒子群算法的船舶电力系统网络重构[J].*船舶工程*,2013,35(4):55-58.
LI Y, YANG C H. Shipboard power system network reconfiguration based on quantum particle swarm optimization algorithm[J]. *Ship Engineering*, 2013, 35(4): 55-58 (in Chinese).
- [13] 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 Z Y, LIU W T, ZHUANG X B. Shipboard power system service restoration based on clonal algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(1): 164-170 (in Chinese).
- [14] 夏敬停,丁峰,胡昱宙.基于可靠性方框图与蒙特卡洛仿真的船舶配电网可靠性分析方法[J].*船舶工程*,2020,42(增刊1):328-333.
XIA J T, DING F, HU Y Z. Reliability analysis method of ship distribution network based on reliability block

- diagram and monte Carlo simulation[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(Supp 1): 328–333.
- [15] 王锡淮, 朱思锋. 基于支持向量机的船舶电力负荷预测[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(10): 36–39.
WANG X H, ZHU S F. Ship power load forecasting using support vector machine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(10): 36–39 (in Chinese).
- [16] 王海斌. 电力推进船舶电力负荷预测研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
WANG H B. Research on electric propulsion ship power load forecasting[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2013 (in Chinese).
- [17] ZHANG L J, SUN J B, GUO C. A novel multi-objective discrete particle swarm optimization with elitist perturbation for reconfiguration of ship power system[J]. *Polish Maritime Research*, 2017, 24(S3): 79–85.
- [18] ZHANG W, SHI W F, ZHUO J B. BDI-agent-based quantum-behaved PSO for shipboard power system reconfiguration[J]. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2017, 55(1): 4–11.
- [19] 王林泓. 惯性粒子算法在船舶电力网络重构中的应用[J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(6): 55–57.
WANG L H. The application of inertial particle swarm algorithm for the ship power network reconstruction[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(6): 55–57 (in Chinese).

Shipboard power system dynamic reconfiguration optimization strategy considering time-varying load characteristics

WU Qihuan, ZHU Zhiyu^{*}, HAO Weihao, YANG Denghao, XU Cheng

College of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China

Abstract: [**Objectives**] In order to ensure the safe and stable operation of a shipboard power system under fault conditions, a dynamic reconfiguration optimization method is proposed that considers time-varying load characteristics. [**Methods**] First, considering the topological structure, generation capacity limit, line current, node voltage and other constraints of the shipboard power system, a dynamic reconfiguration optimization strategy is proposed to minimize weight load cutting and voltage deviation. Next, an improved inertial particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimization model. Finally, a typical shipboard power system is used as an example to verify the effectiveness of the proposed method. [**Results**] The simulation results show that compared with the static reconfiguration method, the dynamic reconfiguration method can reduce the system's voltage deviation by 9.94%, thus significantly improving the quality of the network power supply. [**Conclusions**] The results of this study can provide references for the reliability design of shipboard power systems.

Key words: shipboard power system; time-varying load characteristics; dynamic reconstruction; fault recovery; electric load management; electric power systems; particle swarm optimization (PSO)