

# 基于Petri网和多种群遗传算法的海洋核动力平台电力系统网络重构

吴大立<sup>1</sup>, 郑中祥<sup>1</sup>, 尹项根<sup>2,3</sup>, 王义凯<sup>2,3</sup>, 徐彪<sup>2,3</sup>, 庞帅<sup>2,3</sup>

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对现有海洋核动力平台电力系统网络重构方法中功率流分析复杂,且重构模型求解算法难以稳定收敛到全局最优解的问题,提出一种基于Petri网和多种群遗传算法的核动力平台电力系统网络重构方法。综合故障后负荷恢复量、开关操作代价和发电机运行效率指标建立系统网络重构目标函数;基于Petri网对系统进行拓扑建模,将储能装置等效为负值“负荷”,通过动态更新机制确定功率流分布;采用多种群遗传算法求解网络重构问题,获取满足系统约束的最佳开关状态组合方案。典型核动力平台电力系统算例表明,所提方法能有效防止算法局部收敛以及减少迭代次数,快速提供完备的系统重构方案。

**关键词:**核动力平台电力系统;网络重构;Petri网;功率流分析;多种群遗传算法

**中图分类号:** TM 73

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202007020

## 0 引言

海洋核动力平台是船舶工程与核能工程有机结合的新领域<sup>[1]</sup>,其船舶自身供电系统和外供电力系统在各种扰动状态下安全高效运行是关键技术问题。与普通船舶电力系统相比:核动力平台需为反应堆负荷持续供电,在紧急情况下通过卸载非重要负荷以保证重要负荷的供电可靠性;核动力平台配有储能装置,需在供电异常而不足时为系统提供安全可靠的备用能;核动力平台与外界海岛电力系统或油气开采系统相连,需对外系统稳定输出电能。

在实际运行中,由于外系统的扰动或自身操作不当等问题,核动力平台电力系统可能出现各种故障或非正常运行状态,使其安全运行受到威胁。核动力平台的安全运行与核岛等重要负荷的供电可靠性密切相关,在重构过程中需要考虑负荷优先级,最大限度保证重要负荷持续供电;系统供电不足时浮充状态的储能装置向系统输出电能,重构过程中需要考虑储能装置的运行状态;核动力平台空间紧凑,发电机与负荷均直接与配电板相连,重构过程需从全网角度考虑,统一计算电源出力和系统功率分布。

电力系统故障后的网络重构属于多目标、多约束、非线性的离散组合优化问题。文献[2]以负荷恢复量、开关改变次数和发电机效率作为重构目标函数,求解时需计算系统的功率分布。文献[3]采用分层前推回代法对不同分支并行计算,提高计算效率。

文献[4]采用支路电气剖分法在负荷支路中寻找对应的上级支路,确定节点出线功率,并对上级支路进行剖分得到父节点供给的功率,依次逐级剖分确定全网功率分布。但对核动力平台电力系统而言,平台内空间紧凑,系统分支和节点数多,网络雅可比矩阵条件数较大,通常会呈现出不同程度的病态特征,计算过程很难收敛,且线路 $R/X$ 较大,不满足PQ解耦条件,快速解耦法也不适用,因此常规功率分析方法难以在核动力平台系统中应用。

电力系统故障后的网络重构求解方法主要有数学优化法、启发式方法及智能优化法等<sup>[5]</sup>。智能优化法搜索效率高,能解决算法在高维度系统中不收敛等问题,在电力系统网络重构中应用广泛。智能优化法主要有遗传算法<sup>[6-7]</sup>、粒子群优化算法<sup>[2,8-9]</sup>、蚁群算法<sup>[10]</sup>等。文献[6]采用遗传算法,在进化过程中用精英算法保留“优秀个体”,提高收敛速度。文献[8]采用改进粒子群优化算法,操作简单,需调节的参数少,可快速寻找到最优解。但依据单一进化群体的搜索算法无法实现搜索种群间的协同优化,结果可能仅为局部最优。文献[11]应用交叉式多种群遗传算法MPGA(Multi-Population Genetic Algorithm),多种群协同进化,有效克服了算法易早熟问题。

文献[2]采用双粒子群优化算法对舰船电力系统进行网络重构,满足了单体复杂电力系统网络重构时重要负荷的供电需求,该算法兼顾全局搜索和局部搜索能力,防止重构结果陷入局部最优解。相较于舰船系统,核动力平台电力系统重构时需考虑储能装置投运状态及源网紧凑系统的功率分析问题。为此,本文提出基于Petri网和MPGA的海洋核

收稿日期:2019-11-20;修回日期:2020-05-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0307800)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFC0307800)

动力平台电力系统网络重构方法。MPGA 中设有多个不同控制参数的种群协同进化,兼顾算法的全局搜索和局部搜索,防止重构结果陷入局部最优解;核动力平台系统线路较短,潮流分析时无需考虑功率损耗和电压跌落, Petri 网模型依据托肯随变迁点火而迁移的动态过程进行功率分析,不受线路参数及系统拓扑结构的影响,适用于供配电系统联系紧密的核动力平台电力系统;为简化功率分析过程,将储能装置等效为恒定负值“负荷”,使其在存在发电机退出运行的故障条件下参与重构时,保证重要负荷的供电安全,为系统提供完备的网络重构方案。

## 1 核动力平台电力系统网络重构流程

核动力平台电力系统网络重构是系统故障或非正常运行时,在满足系统运行约束条件下,改变系统开关的投切状态对系统进行调节、调度和控制,保证核岛等重要负荷持续供电<sup>[8]</sup>。在网络重构过程中,通过故障后系统内发电机的投切状态判断储能装置是否参与重构;依据系统的初始状态和故障模式确定参与重构的开关组合,并对各开关投切状态进行编码;建立重要负荷恢复量最多、开关操作代价最小、发电机运行效率最高的综合目标函数;为得到重构后系统的最佳开关组合状态,利用 MPGA 生成多种开关组合形式,通过选择交叉、变异、移民等方式逐步遗传进化,得到适应度更高的种群个体;在计算目标函数时需确定系统功率分布及发电机出力,并检验重构方案是否满足功率约束条件,引入 Petri 网功率流分析方法,通过动态推理机制分析系统功率分布。最终当最优个体适应度维持不变的代数超过最大迭代次数时停止迭代,得到最优网络重构形式。

## 2 核动力平台电力系统网络重构模型

### 2.1 储能装置参与重构的方式

在核动力平台正常运行工况下储能装置处于浮充状态。系统功率不足时,储能功率变换系统 PCS (Power Conversion System) 能够灵活快速调整有功/无功功率的吞吐,控制储能装置从充电状态转换到放电状态,使其参与网络重构<sup>[12]</sup>。

PCS 在本质上是单级或多级电力电子变流器,会给核动力平台电力系统带来一定的谐波污染,且在网络重构过程中,储能装置容量有限,因此在无发电机退出运行的状态下,储能装置不参与重构。当存在发电机因故障或检修退出运行时,参与重构的发电机出力难以满足负荷需求,为保证核岛等重要负荷的供电连续性,此时储能装置参与重构,向系统输出电能。基于文献[3]中对储能装置的等效方法,在系统功率计算中将储能装置作为恒定负值“负荷”处理,以简化系统功率分析过程。

### 2.2 核动力平台电力系统拓扑模型

与陆地电力系统相比,核动力平台电力系统有如下特点:平台内空间紧凑,供配电系统连接较近,进行网络重构时需统一考虑;平台在遭受攻击后,电源很可能受到损伤,因此供电网络通常由各发电机的主配电板相连构成环网,保证供电可靠性;平台内配置储能装置,正常运行时处于浮充状态,若故障后发电机难以满足负荷恢复需求,则其切换至放电状态参与网络重构;平台电力系统需要为核反应堆负荷以及外界海岛电力系统或油气开采系统供电,对电力中断和电能质量非常敏感。典型的核动力平台电力系统接线图见附录中图 A1。

核动力平台电网重构优化问题不仅要考虑负荷的供电情况,还要考虑发电机和储能装置的投切以及电站间的连接情况。图 A1 中呈现了发电机、联络开关与负荷间的连接状态,图中系统包括 4 台发电机  $G_1—G_4$ 、4 条主配电板  $B_1—B_4$ 、8 个负荷配电板  $LCP_1—LCP_8$ 、23 个常规负荷  $L_1—L_{18}$  和  $L_{20}—L_{24}$ 、1 个核反应堆相关负荷 MH、1 个外系统等值负荷 MW、1 个储能装置等效负荷 LB、30 个普通切换开关  $S_1—S_{30}$  和 16 个可切换开关(分别为 8 个自动切换开关  $ABT_1—ABT_8$  和 8 个手动切换开关  $MBT_1—MBT_8$ )。其中储能装置 LB 等效为恒定负值“负荷”处理;自动切换开关和手动切换开关均有 2 条供电路径,所连接的实线表示常规供电路径,虚线表示备用供电路径。

为了描述核动力平台电力系统的开关状态,采用 0-1-2 编码方式表示负荷供电状况、联络开关状态(电站间连接情况)和发电机投切情况。对仅有 1 路供电的负荷,初始开关状态取值 0 或 1(其中 0 表示不供电,1 表示供电);对有备用供电路径的负荷,初始开关状态取值 0、1 或 2(其中 0 表示不供电,1 表示常规路径供电,2 表示备用路径供电)。

### 2.3 网络重构目标函数

核动力平台电力系统网络重构目标考虑故障后负荷恢复量、开关操作代价及发电机运行效率。

(1) 计及负荷优先级权重后使系统负荷恢复电量最大。核动力平台需要保证核岛敏感负荷的持续供电,在网络重构中,根据负荷优先级大小,将负荷分为 3 级。其中 1 级负荷为重要负荷,包括核反应堆负荷等;2 级负荷为相对重要负荷。以故障后系统负荷恢复量最大为目标建立的目标函数为:

$$\max f_1 = a_1 \sum_{i=1}^{k_1} x_{1i} L_{g1i} + a_2 \sum_{j=1}^{k_2} x_{2j} L_{g2j} + a_3 \sum_{s=1}^{k_3} x_{3s} L_{g3s} \quad (1)$$

其中,  $L_{g1i}$ 、 $L_{g2j}$ 、 $L_{g3s}$  分别为当前方式下系统中的 1—3 级负荷;  $x_{1i}$ 、 $x_{2j}$ 、 $x_{3s}$  分别为各负荷的投入状态,取值为 1 表示负荷投入运行,为 0 则表示负荷退出运行;  $k_1—k_3$  分别为各级负荷的总数;  $a_1—a_3$  分别为各级负

荷的权重。通过为重要负荷赋予较大权重的方式,能充分体现不同负荷在网络重构过程中的优先级。

(2)开关操作代价最小。开关操作代价是衡量网络重构效率的重要指标。核动力平台电力系统内包含普通切换开关、自动切换开关和手动切换开关,操作不同种类开关所需时间大不相同,因此需对不同的开关操作赋予不同的权值系数。其目标函数为:

$$\min f_2 = k_p X_p + k_M X_M + k_A X_A \quad (2)$$

其中,  $X_p$ 、 $X_M$ 、 $X_A$  分别为故障恢复过程中操作普通切换开关、手动切换开关和自动切换开关的次数;  $k_p$ 、 $k_M$ 、 $k_A$  为相应的权值系数。

(3)发电机运行效率最高。核动力平台电力系统运行在额定功率时能耗最低且对机组运行安全最有益,因此在网络重构时应优先选择投入发电机运行效率较高的方式。其目标函数为:

$$\max f_3 = \min_{i \in \tau} \{P_{gi}/P_{giN}\} \quad (3)$$

其中,  $\tau$  为当前方式下投入运行的发电机集合;  $P_{gi}$  和  $P_{giN}$  分别为投入运行的第  $i$  台发电机的实际输出功率和额定输出功率。

综合考虑上述3个目标,进行归一化处理,解决量纲不同的问题。在此基础上根据各指标的重要程度,采用加权求和方法建立最大化目标函数为:

$$\begin{cases} \max F = w_1 \mu_1 + w_2 \mu_2 + w_3 \mu_3 \\ \mu_1 = \frac{f_1}{a_1 \sum_{i=1}^{k_1} L_{g1i}^0 + a_2 \sum_{j=1}^{k_2} L_{g2j}^0 + a_3 \sum_{s=1}^{k_3} L_{g3s}^0} \\ \mu_2 = 1 - \frac{f_2}{k_p X_{ps} + k_M X_{ms} + k_A X_{as}} \\ \mu_3 = f_3 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $L_{g1i}^0$ 、 $L_{g2j}^0$ 、 $L_{g3s}^0$  分别为初始状态下系统中的1—3级负荷;  $X_{ps}$ 、 $X_{ms}$ 、 $X_{as}$  分别为核动力平台电力系统中普通切换开关、手动切换开关和自动切换开关的数目;  $w_1$ — $w_3$  分别为各目标的权重,可通过层次分析法进行确定<sup>[13]</sup>。

### 3 基于Petri网的功率流分析

核动力平台电力系统网络重构要保证负荷恢复量最大与发电机运行效率最高,因此需要计算系统功率分布及发电机出力。在进行核动力平台多分支短线路网络系统功率分布计算时,传统的牛顿拉夫逊法难以收敛,且系统不满足PQ解耦条件,快速解耦法也不适用。由于核动力平台电力系统网络重构通过开关投切变换实现负荷变迁转移,进而对系统内各节点负荷量及发电机出力进行重新分配,类似于Petri网模型中各库所中托肯随变迁点火而迁移的动态过程,因此Petri网模型可为核动力平台电力系统功率分析提供有效工具。

#### 3.1 Petri网定义及应用思路

Petri网模型通常用于描述系统的状态变迁,其以网络理论为基础描述事件间的逻辑关系,用代数矩阵运算方法演绎系统中的动态活动<sup>[14-15]</sup>。Petri网模型由库所、变迁、托肯及输入输出关联矩阵组成。库所表示系统的节点集合,用圆圈表示,  $m$  个节点系统对应库所表示为  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ , 其中  $P_i$  为节点  $i$  对应的库所;托肯位于库所中,用于描述库所状态,表示为  $K_p = [k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{pm}]$ , 其中  $k_{pi}$  为库所  $P_i$  中包含的托肯数;变迁点火后可使库所中的托肯进行转移,用竖线表示,  $n$  个变迁节点集合表示为  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ , 其中  $R_j$  为第  $j$  个变迁节点。输入关联矩阵  $I: P \rightarrow R$  反映库所到变迁的映射,若存在由库所  $P_i$  指向变迁节点  $R_j$  的输入弧,则关联矩阵  $I$  的元素  $I_{ij} = 1$ ; 否则,  $I_{ij} = 0$ 。输出关联矩阵  $O: R \rightarrow P$  反映变迁到库所的映射,若存在由变迁节点  $R_j$  指向库所  $P_i$  的输出弧,则关联矩阵  $O$  的元素  $O_{ij} = 1$ ; 否则,  $O_{ij} = 0$ 。

Petri网模型的动态变迁过程可用于计算核动力平台电力系统网络重构中系统拓扑方式改变后功率分布和发电机出力的变化。为此,需要对核动力平台电力系统内的相关元件建立等效的Petri网模型。

#### 3.2 核动力平台电力系统Petri网图形建模

基于Petri网模型,将核动力平台电力系统中的负荷、负荷配电板、主配电板及发电机等元件对应为库所;系统中除主配电板间的联络开关以外,其他切换开关对应为变迁;各元件所带的负荷功率对应为托肯数。当储能装置参与重构时,对应托肯数为其输出功率的负值。以此建立系统中各电气元件的Petri网拓扑连接关系等效模型,并将模型分为配电子网络和发电调度子网络两部分,见附录中图A2。

#### 3.3 核动力平台电力系统Petri网功率流分析

在核动力平台电力系统等效Petri网模型中,考虑到系统联络线功率约束,设置故障前系统运行状态为:发电机  $G_2$ — $G_4$  通过联络线并联运行,发电机  $G_1$  停机,核岛负荷  $MH$  和外系统等值负荷  $MW$  按额定功率投入运行。系统中主网络除开关  $S_1$ 、 $S_{29}$  断开外,其余开关全部闭合,配电网侧所有负荷按常规路径供电。根据此时Petri网中库所与变迁的连接关系,依据关联矩阵的定义可得配电子网络和发电调度子网络的输入输出关联矩阵  $I_{Net1}$ 、 $I_{Net2}$ 、 $O_{Net1}$ 、 $O_{Net2}$ 。

在Petri网配电子网络中,根据负荷功率实际情况,结合系统中各可切换开关的状态调整配电子网络的初始库所和输出关联矩阵的状态。对于负荷元件对应的库所,负荷功率即为托肯值,对于非直接与负荷相连的库所,托肯初值为0,如此可确定配电子网络的托肯初始向量  $K_{Net1}^0$ 。由于输出关联矩阵的初值仅考虑普通供电路径,根据当前运行方式进行

调整,若为备用供电路径,将虚线输出弧修改为实线输出弧,调整后可得到新的输出关联矩阵  $O_{Net1}$ 、 $O_{Net2}$ 。

利用 Petri 网的动态推理机制推导各配电板所带负荷量,其迭代公式为:

$$K_{pNet1}^{i+1} = K_{pNet1}^0 + K_{pNet1}^i I_{Net1} O_{Net1} \quad (5)$$

从  $i=0$  开始对式(5)进行逐次迭代,经过  $i$  次迭代后配电子网络的托肯向量为  $K_{pNet1}^i$ ,当  $K_{pNet1}^{i+1} = K_{pNet1}^i$  时停止迭代,此时向量中的托肯数为各主配电板所带总负荷量。

在 Petri 网发电调度子网络中,将上述各配电板负荷量作为库所的初始托肯数,得到发电调度子网络的托肯初始向量  $K_{pNet2}^0$ 。根据各主配电板间联络线的连接情况,采用深度顺序搜索方法,调整发电调度子网络的关联矩阵及输出弧的权重状态。当主配电板  $B_1$  和  $B_2$  并列运行时,对于输入关联矩阵  $I_{Net2}$ ,将主配电板  $B_1$  关联的列在原来的基础上叠加  $B_2$  所关联的列元素,同时将  $B_2$  所关联的列元素置零;对于输出关联矩阵  $O_{Net2}$ ,将主配电板  $B_1$  所关联的行在原来的基础上叠加  $B_2$  所关联的行元素,同时将  $B_2$  所关联的行元素置零。依此类推按顺序进行调整,得到新的输入输出关联矩阵  $I_{Net2}$ 、 $O_{Net2}$ 。利用 Petri 网的动态推理机制推导各发电机出力情况,其迭代公式为:

$$K_{pNet2}^{i+1} = K_{pNet2}^0 + K_{pNet2}^i I_{Net2} O_{Net2} \quad (6)$$

从  $i=0$  开始对式(6)进行逐次迭代,经过  $i$  次迭代后发电调度子网络的托肯向量为  $K_{pNet2}^i$ ,当  $K_{pNet2}^{i+1} = K_{pNet2}^i$  时停止迭代。根据动态更新的结果确定系统发电机出力及系统的功率流分布情况。对于存在发电机出力超标、联络线过负荷的情况,该方式不可行,将其对应的目标函数置一很小的值,在模型优化求解的过程中淘汰。Petri 网功率分析方法从配电子网络和发电调度子网络两部分进行分析,能够迅速判断负荷的供电情况、负荷恢复供电的重要程度、发电机出力的均衡性,并检验系统容量约束,克服传统方法在进行多分支电力系统功率分析时不收敛的问题,是一种准确快速的核动力平台电力系统网络重构过程的功率分析方法。

#### 4 MPGA

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应的全局优化概率搜索算法,被广泛应用于机器学习、模式识别、数学规划等领域<sup>[16-17]</sup>。但其存在未成熟收敛的现象,主要表现在群体中的所有个体都趋于同一状态而停止进化,因此不能给出令人满意的解。

为解决多目标优化和算法的高速高效全局收敛问题,有学者提出 MPGA<sup>[18]</sup>。该算法中多个种群使用同一目标函数,各种群交叉率和变异率取不同的固定值,每个种群采用单种群遗传算法 SGA (Single population Genetic Algorithm) 的进化方式,搜索不

同解空间中的最优解;种群间利用移民算子定期进行信息交换,实现多种群间的协同优化。算法的结构模型见附录中图 A3。

采用 MPGA 求解核动力平台电力系统网络重构问题的操作步骤如下。

(1)生成初始种群。针对故障前运行方式及故障模式确定参与重构的开关组合,并基于随机策略生成多种群个体。对于普通切换开关,随机生成 0-1 状态;对于手动切换开关和自动切换开关,采用背包策略<sup>[8]</sup>,根据系统故障后的运行状态先使所有负荷卸载,再依据负荷等级逐次恢复供电,直到不能再增加负荷为止,此时根据各负荷的投入情况随机生成 0-1-2 状态。

(2)更新种群个体。多个种群同时进行选择、交叉、变异的进化搜索过程,对不同的种群赋予不同的控制参数以实现不同的搜索目的;各种群间通过移民算子进行联系,移民算子将各种群在进化过程中出现的最优个体定期(每隔一定的进化代数)地引入其他种群中,具体做法是将目标种群中的最差个体用源种群的最优个体代替,实现种群之间的协同优化;在进化的每一代,通过人工选择算子保存最优个体放入精华种群中,精华种群不参与遗传进化过程。

(3)检验。利用 Petri 网模型分析各种群个体对应运行方式下的功率流分布,在此基础上计算个体的适应度,若 Petri 网分析结果表明该运行方式不可行,则为其赋予一个很小的适应度(本文方案中赋值为 0),再次对种群个体进行更新。

当精华种群中最优个体的适应度维持不变的代数超过最大迭代次数时停止迭代,此时对应系统最优的网络重构方案。MPGA 能有效防止算法收敛至局部最优解,避免早熟;引入移民算子,能够实现各种群之间的协同优化,从而减少迭代次数,快速实现核动力平台电力系统网络重构。

#### 5 算例分析

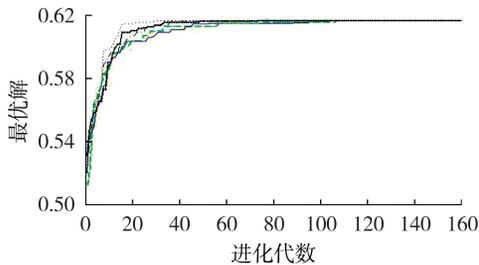
采用 Petri 网和 MPGA 对核动力平台电力系统进行网络重构。种群数目设置为 10,每个种群中个体数目为 20,群体最优保持代数为 100。各种群中遗传算法的代沟设置为 0.9,在 0.7~0.9 的范围内随机产生 10 个种群的交叉概率,在 0.01~0.03 的范围内随机产生 10 个种群的变异概率。为了加快算法的收敛速度,参考粒子群优化算法中的最优粒子导引更新方向原理,在种群中个体交叉和变异之后,增加一个种群个体与群体最优个体之间交叉的环节,最优交叉的发生概率在 0.01~0.1 的范围内随机产生。

##### 5.1 MPGA 算例结果

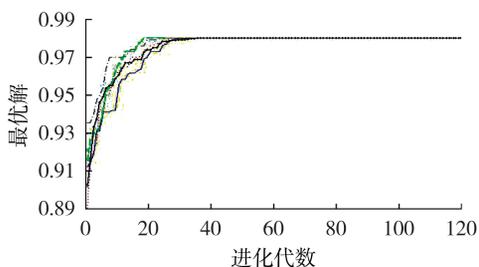
对系统的大量故障场景进行网络重构测试,结果均表明本文方法能够收敛到最优的重构方案。以下给出 2 种典型故障场景下的网络重构结果。

(1)故障场景1:核动力平台与外系统间的联络线发生故障,外系统等值负荷 MW 退出运行,开关 $S_7$ 断开。

根据故障场景可知,此时核动力平台系统内的发电机均可以参加重构,因此储能装置退出运行;外系统等值负荷 MW 因故障退出运行,因此连接开关 $ABT_7$ 、 $S_7$ 不参与重构,对剩余开关进行系统编码和网络重构。连续5次运行MPGA,其收敛进化过程如图1(a)所示。



(a) 故障场景1



(b) 故障场景2

— 第1次迭代, --- 第2次迭代  
—— 第3次迭代, - - - 第4次迭代, ——— 第5次迭代

图1 2种故障场景下MPGA收敛进化过程

Fig.1 Convergence evolution procedure of MPGA under two fault scenarios

可见,多次运行最优收敛结果相同,本文方法能够稳定收敛到全局最优的网络重构方案,最优适应度为0.61592。对优化结果中最优个体编码进行解析得到最优的网络重构方案为:外系统等值负荷 MW 因故障切除,发电机 $G_1$ 、 $G_2$ 退出运行,负荷 $L_4$ 、 $L_{12}$ 、 $L_{16}$ 退出,核反应堆负荷 MH 保持运行,其他负荷及发电机运行状态不变。此时联络线 $B_1-B_2$ 、 $B_2-B_3$ 、 $B_3-B_4$ 、 $B_4-B_1$ 对应功率分别为0.499、0、0.430 86、1.057 p.u.,发电机 $G_1-G_4$ 出力分别为0、0、0.998 86、5.993 1 p.u.,发电机运行效率为0.998 86,重构过程平均时间为5.77 s。

(2)故障场景2:主配电板 $B_3$ 发生短路故障,导致开关 $S_{12}$ 、 $S_{26}$ 、 $S_{27}$ 断开。另外,由于保护动作断开,发电机 $G_3$ 退出运行。

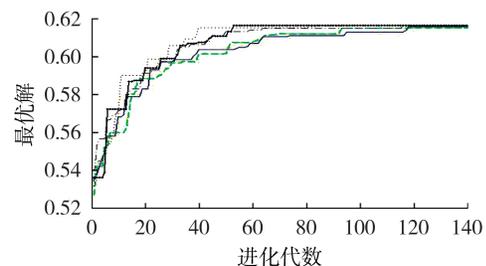
根据故障场景可知,发电机 $G_3$ 与系统相连开关 $S_{12}$ 、 $S_{26}$ 、 $S_{27}$ 不参与重构。由于发电机退出运行,为保证核动力平台重要负荷的安全运行,储能装置参与重构。对剩余开关进行编码和网络重构,连续5次

运行MPGA,其收敛进化过程见图1(b)。

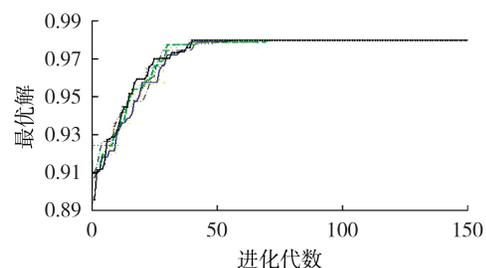
可见,多次运行最优收敛结果相同,本文方法能够稳定收敛到全局最优的网络重构方案,最优适应度为0.9799。对优化结果中最优个体的编码进行解析得到最优的网络重构方案为:发电机 $G_1$ 和 $G_3$ 退出运行,发电机 $G_2$ 和 $G_4$ 为系统负荷供电,储能装置向系统输出电能,通过备用路径向 $B_3$ 配电板负荷供电;负荷 $L_{13}-L_{15}$ 转为备用路径供电,核反应堆负荷和外系统负荷均能保证持续供电,系统内没有负荷失电。此时联络线 $B_1-B_2$ 、 $B_2-B_3$ 、 $B_3-B_4$ 、 $B_4-B_1$ 对应功率分别为-0.020 5、0、0、0.598 5 p.u.,发电机 $G_1-G_4$ 出力分别为0、5.965 5、0、5.965 5 p.u.,发电机运行效率为0.994 25,重构过程平均时间为3.55 s。

## 5.2 MPGA与SGA结果对比

对于上述2种故障场景,采用SGA计算,同样连续运行5次,算法的收敛结果如图2所示。



(a) 故障场景1



(b) 故障场景2

— 第1次迭代, --- 第2次迭代  
—— 第3次迭代, - - - 第4次迭代, ——— 第5次迭代

图2 2种故障场景下SGA收敛进化过程

Fig.2 Convergence evolution procedure of SGA under two fault scenarios

对于故障场景1,采用SGA时,5次运行收敛结果对应最优适应度分别为0.615 60、0.614 91、0.615 92、0.615 63、0.615 92,收敛结果并不完全相同,仅有2次收敛至全局最优解,重构过程平均时间为7.33 s。由于SGA在遗传过程中仅依靠单个种群个体进行遗传进化,难以保证收敛结果的全局性,因而在重构过程中经常仅收敛至局部最优解;对于故障场景2,采用SGA时,5次运行的收敛结果相同,对应的最优适应度为0.9799,能够收敛到全局最优解,重构过程平均时间为4.61 s。MPGA采用多种群协同进化方式,能够实现进化过程中最优个体的保存与迁移,因此

在运算过程中能够在较少的迭代次数下快速收敛至全局最优解,故障场景 2 的结果表明 SGA 需要较长时间才能得到全局收敛结果。

为保证 MPGA 能够收敛至全局最优,本文设置最优个体保持代数为 100 代,且在迭代过程中需要对生成的每种个体方案利用 Petri 网模型计算对应的系统功率分布,因此对重构时间有一定影响。但对比文献[9]中给出的网络重构计算总时间可知,本文所提方案能够应用于重构问题。

对比 MPGA 和 SGA 网络重构结果可知,MPGA 在核动力平台发生不同类型故障时均能够快速稳定地收敛到全局最优解,而 SGA 迭代次数多,且有时会陷入局部最优解,难以得到全局最优的网络重构方案,这也进一步表明本文采用的 MPGA 具有全局性和有效性优势。

### 5.3 MPGA 初始参数影响分析

遗传算法等数值算法会受到初始参数设置及主管参数选择的影响。为验证不同初始参数设置下网络重构结果的差异性,对故障场景 1 改变某个初始参数设置值,其他参数数值不变,仿真结果见表 1。

表 1 故障场景 1 下 MPGA 不同初始参数重构结果  
Table 1 Reconstruction results of MPGA with different initial parameters under Fault Scenario 1

初始参数	设置值	最优适应度
代沟	0.70	0.61120
	0.75	0.61592
	0.95	0.61592
	0.97	0.61221
交叉概率范围	0.5~0.7	0.61407
	0.7~0.9	0.61592
	0.9~0.95	0.61221
变异概率范围	0.001~0.01	0.61334
	0.01~0.03	0.61592
	0.03~0.05	0.61448

MPGA 代沟值表示在遗传迭代过程中适应度较低的种群个体被筛选掉的比例,代沟值较高会导致算法迭代次数较多,甚至无法找到最优解;但代沟降低到一定程度后,会导致收敛结果早熟。经多次仿真分析,代沟初始值在 0.75~0.95 范围内,可以保证 MPGA 既能稳定收敛至全局最优解,又能快速实现网络重构过程。当 MPGA 种群交叉概率过大、变异概率过小时,种群内个体过于集中,易陷入局部收敛;但当种群交叉概率过小、变异概率过大时,进化过程中难以找到最优个体。经多次仿真分析知,本文设置的交叉和变异概率范围能满足全局收敛要求。

## 6 结论

针对核动力平台电力系统拓扑结构特点及敏感负荷持续供电需求,本文提出一种基于 Petri 网和 MPGA 的网络重构方法。

(1) Petri 网模型在核动力平台电力系统功率流分析中能够迅速判断负荷供电情况、负荷恢复供电的重要程度、发电机出力均衡性,并检验系统容量约束,克服传统方法在进行多分支短线路核动力平台电力系统功率分析时不收敛的问题。

(2) MPGA 为不同的种群设置不同的交叉概率和变异概率,能防止算法局部收敛,相较于 SGA,其能使重构结果有效收敛至全局最优解。

(3) 移民算法能够实现各种群之间的协同优化,减少搜索过程迭代次数,相比 SGA 能够快速提供完备的系统重构方案。

(4) 本文对算法控制参数范围的设定具有一定的主观性,控制参数对样本的适应性有待提高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 张力,刘宙锋,丁伯才,等. 海洋核动力平台电力系统设计概要[J]. 船电技术,2017,37(11):36-37.  
ZHANG Li, LIU Zhoufeng, DING Bocai, et al. Design essentials of power system at offshore nuclear power platform[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2017, 37(11): 36-37.
- [2] 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): 90-96.  
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): 90-96.
- [3] 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 Lilu, 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.
- [4] 郝文波,于继来. 基于负荷受电路径电气剖分信息的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 42-48.  
HAO Wenbo, YU Jilai. Distribution network reconfiguration algorithm basing on electrical dissection information of load path[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 42-48.
- [5] 黎恒恒. 微电网故障重构方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.  
LI Hengxuan. Microgrid fault restoration method research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [6] 何芳,蔡兴国. 基于改进遗传算法的舰船电力系统网络重构[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 25-30.  
HE Fang, CAI Xingguo. Network reconfiguration of shipboard power system based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 25-30.
- [7] NARA K, SHIOSE A, KITAGAWA M, et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3): 1044-1051.
- [8] 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 Yan, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. Application of improved PSO algorithm in network reconfiguration of ship-

- board power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3):29-34, 39.
- [9] 李建军, 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.
- [10] 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.
- [11] 陈碧云, 韦杏秋, 陈绍南, 等. 基于多种群遗传算法的电力系统多目标优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(7):24-29.  
CHEN Biyun, WEI Xingqiu, CHEN Shaonan, et al. Power system multi-objective optimization based on multi-population genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(7):24-29.
- [12] 蒋玮, 周赣, 王晓东, 等. 一种适用于微电网混合储能系统的功率分配策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4):38-43, 52.  
JIANG Wei, ZHOU Gan, WANG Xiaodong, et al. Power allocation strategy of hybrid energy storage system for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):38-43, 52.
- [13] 翟晓娟. 基于机会约束规划的孤立微电网多目标动态经济调度[D]. 吉林:东北电力大学, 2018.  
ZHAI Xiaojuan. Multi-objective dynamic economic dispatch of isolated microgrid based on chance constrained programming[D]. Jilin:Northeast Electric Power University, 2018.
- [14] KIM I, XU S. Bus voltage control and optimization strategies for power flow analyses using Petri net approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 112:353-361.
- [15] XU B, YIN X, YIN X G, et al. Fault diagnosis of power systems based on temporal constrained fuzzy petri nets[J]. IEEE Access, 2019, 7:101895-101904.
- [16] HOMAEE O, NAJAFI A, DEHGHANIAN M, et al. A practical approach for distribution network load balancing by optimal re-phasing of single phase customers using discrete genetic algorithm[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(5):e2834.
- [17] 张剑, 何怡刚. 基于无向图所有生成树的网络重构遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5):136-141.  
ZHANG Jian, HE Yigang. Genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5):136-141.
- [18] GROSSO P B. Computer simulations of genetic adaptation: parallel subcomponent interaction in a multilocus model[D]. Michigan, USA:The University of Michigan, 1985.

#### 作者简介:



吴大立

吴大立(1977—),男,湖南常德人,高级工程师,博士,研究方向为船舶电力系统设计与继电保护(E-mail: dreamwdl@163.com);

尹项根(1954—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制(E-mail: xygin@hust.edu.cn);

王义凯(1996—),男,满族,辽宁岫岩人,博士研究生,通信作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 742657004@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

## Network reconstruction of offshore nuclear power platform power system based on Petri net and multi-population genetic algorithm

WU Dali<sup>1</sup>, ZHENG Zhongxiang<sup>1</sup>, YIN Xianggen<sup>2,3</sup>, WANG Yikai<sup>2,3</sup>, XU Biao<sup>2,3</sup>, PANG Shuai<sup>2,3</sup>

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the existing power flow analysis in network reconstruction method for offshore nuclear power platform power system is complex and the solving algorithm of the reconstruction model is hardly stably converged to the global optimal solution, a network reconstruction method based on Petri net and multi-population genetic algorithm is proposed for nuclear power platform power system. The indexes of load recovery amount after fault, switching operation cost, and generator operation efficiency are integrated to build the objective function of network reconstruction. The topological model of the system is built based on Petri net, in which, the energy storage device is equivalent to a negative load, and the power flow distribution is determined by dynamic update mechanism. Multi-population genetic algorithm is adopted to solve the network reconstruction problem, and the optimal switching state combination scheme satisfying system constraints is obtained. The example of a typical nuclear power platform power system shows that the proposed method can effectively prevent local convergence of the algorithm and reduce the iteration times, which provides complete reconstruction scheme quickly.

**Key words:** nuclear power platform power system; network reconstruction; Petri net; power flow analysis; multi-population genetic algorithm

附录：

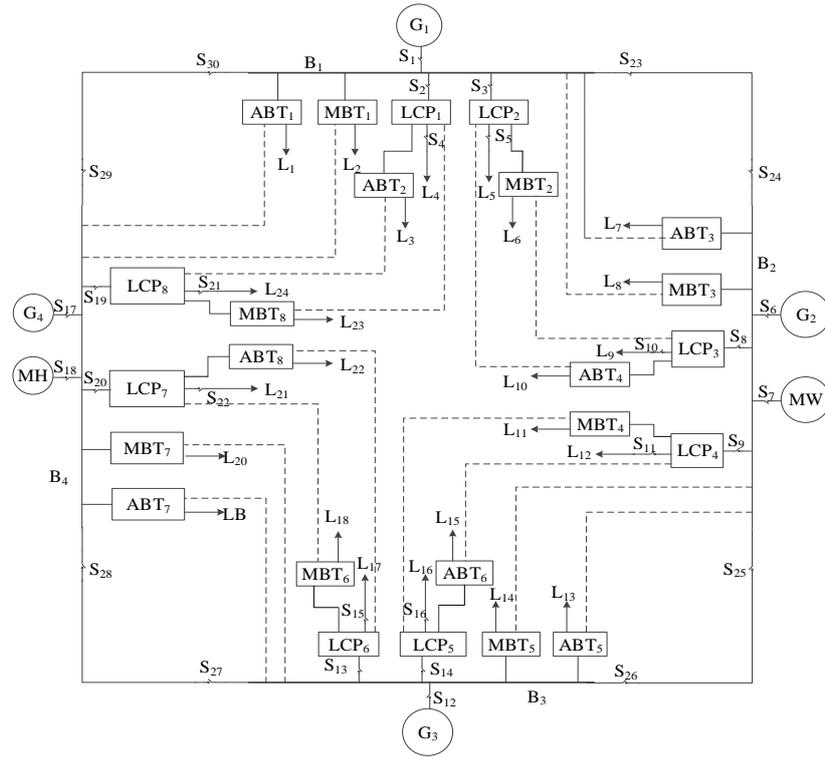


图 A1 核动力平台电力系统接线示意图  
Fig.A1 Wiring diagram of nuclear power platform power system

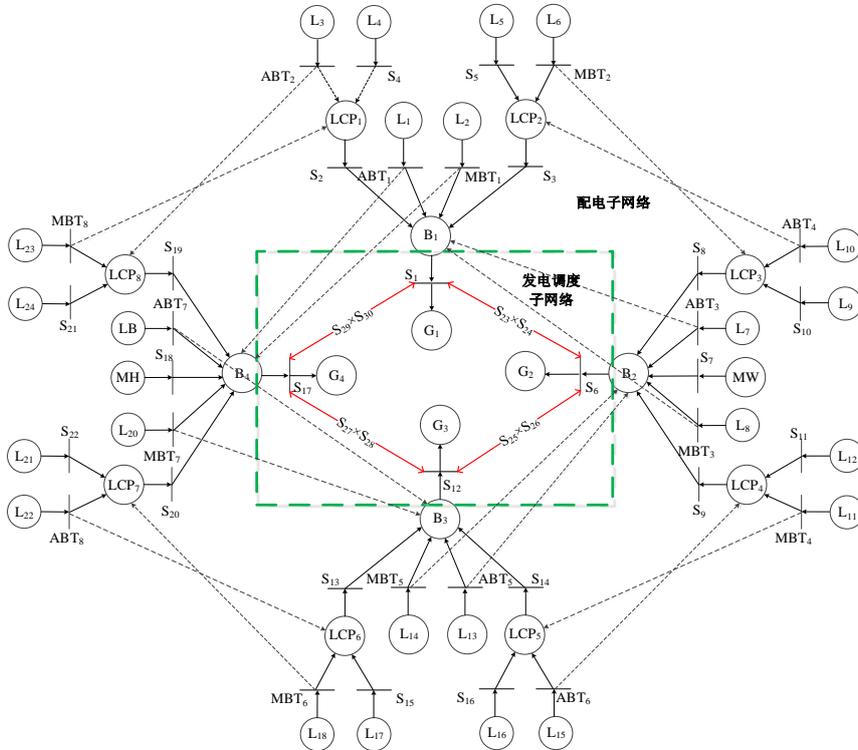


图 A2 核动力平台电力系统对应的 Petri 网模型  
Fig.A2 Petri net model of nuclear power platform power system

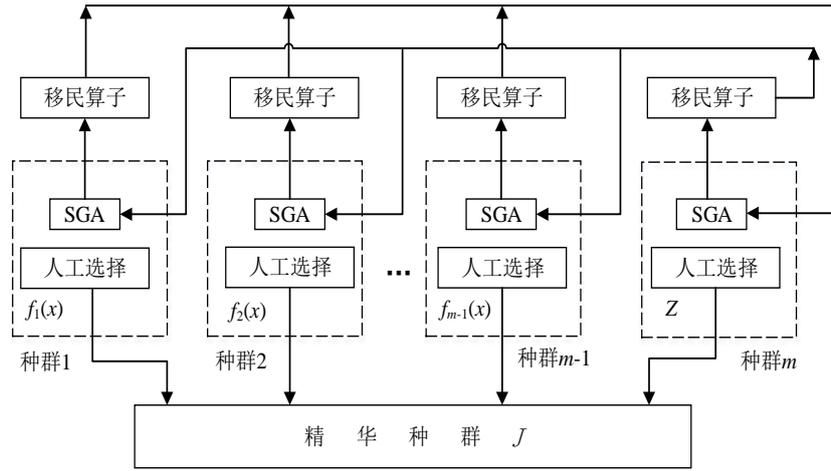


图 A3 多种群遗传算法结构示意图

Fig.A3 Structure diagram of multi-population genetic algorithm