

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202082

## 海洋核动力平台电网安全问题及保护技术研究

尹项根<sup>1,2</sup>, 王义凯<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>3</sup>, 徐雯<sup>1,2</sup>, 吴大立<sup>4</sup>, 乔健<sup>1,2</sup>, 刘翔宇<sup>1,2</sup>

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

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

3. 南方电网数字电网研究院, 广东 广州 510663; 4. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 海洋核动力平台电力系统是发电、站内供电和系统外送电能高度集成的独立电力系统, 具有工作环境恶劣、故障形式复杂、设备维修困难、电能中断敏感等特点。结合理论分析与仿真实验对海洋核动力平台电网安全问题及相关保护技术进行分析研究。提出协同多模接地控制的中性点接地方式、平台网源直连系统接地保护方法、串接小容量变压器预充磁方案以及基于 Petri 网和 MPGA(多种群遗传算法)的网络重构方法。研究结果拟为海洋核动力平台电力系统的工程设计和保护方案提供技术支撑。

**关键词:** 海洋核动力平台; 协同多模接地控制; 网源直连系统接地保护; 变压器预充磁; 网络重构

### Study on security problems and protection technologies of the floating nuclear power plant grid

YIN Xianggen<sup>1,2</sup>, WANG Yikai<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>3</sup>, XU Wen<sup>1,2</sup>, WU Dali<sup>4</sup>, QIAO Jian<sup>1,2</sup>, LIU Xiangyu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 4. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** The floating nuclear power plant grid is an independent power system composed of power generation, in-station power supply and external power delivery. It has the characteristics of bad operating environment, complex fault forms, difficult equipment maintenance and sensitive power interruption. Combined with theoretical analysis and simulation experiments, this paper analyzes and studies the security problems and protection technologies of the floating nuclear power plant grid. The technologies of neutral-point grounding mode in cooperation with multi-mode grounding control, grounding protection of source and grid directly connected system, the series connected small-capacity transformer-based pre-magnetization technology are proposed. A network reconstruction method based on Petri net and MPGA is proposed. The research results can provide technical support for an engineering design and protection scheme for the floating nuclear power plant power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877089) and National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0307800).

**Key words:** floating nuclear power plant; in cooperation with multi-mode grounding control; grounding protection of source and grid directly connected system; transformer pre-magnetization; network reconstruction

## 0 引言

海洋核动力平台是海上移动式小型核电站, 是小型核反应堆、船舶工程与电力工程技术的有机结

合, 可为海洋石油开采和偏远岛屿提供绿色安全的能源供给, 也可用于大功率船舶和海水淡化领域, 具有装机容量大、移动灵活、持续供电、经济运行、节能环保等优点, 在海洋资源开发、岛礁建设等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。2016年1月, 国家发改委同意设立海洋核动力平台示范工程项目, 并将其列为国家能源重大科技创新工程。海洋核动力平

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51877089); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0307800)

台在船舶核动力技术基础上,结合当前工业化水平和核电技术,按照国家核电相关政策要求和用户需求完善工程技术方案,推进军转民示范工程项目建设,实现我国海洋核动力平台“零”突破。

海洋核动力平台首次采用海上双堆核能发电形式,其电力系统采用高压大容量发电机组,并利用高压海底电缆与外系统构成海上供电电网。平台电网分为两个相对独立的区域电网,单座核反应堆采用一主一辅两台汽轮发电机配置,正常情况下由主汽轮发电机组对外系统电网供电,辅汽轮发电机组为站内系统电网供电,保障核动力装置的平稳运行<sup>[5]</sup>。为满足核反应堆相关负荷的安全供电,站内电网设置了应急柴油机和直流逆变电源作为备用电源,各相关电源之间一般不采用并列运行方式,但电源切换操作应满足安全运行要求。

海洋核动力平台具有供电容量大、系统拓扑结构紧凑、核反应堆安全要求高及运行环境温差大、湿度高、腐蚀性强等特点。由于平台时常受海浪冲击而晃动,接地故障频发且故障形式复杂。在接地故障电流或弧光接地过电压较大时,将对站内人身设备安全构成威胁。此外海洋核动力平台电网利用船身作为接地点,易发生高过渡电阻接地故障。由于零序 CT 精度有限,现有配网接地选线保护方法灵敏度较低,因此迫切需求一种安全可靠的系统接地方式,并提供能够灵敏反映各种复杂接地故障的接地保护方法。

海洋核动力平台电网采用网源直连形式,发电机与配电网直接相连,中间无隔离变压器。在保护选择性方面,现有配网接地选线方法多利用极性相位比较<sup>[6-8]</sup>、幅值能量比较<sup>[9-11]</sup>等方式区分母线与出线故障,在网源直连系统发生发电机定子接地故障时,上述选线方法将误断为母线故障,无法实现接地保护的选择性配合;在保护安全性方面,常规发电机定子接地保护方法不依据接地电流大小进行保护判断,无法反映接地故障程度,在某些故障轻微且可控情况下,保护快速跳闸切机,将对系统的供电可靠性和核堆运行安全性造成不利影响<sup>[12]</sup>。

海洋核动力平台站内电网具有独立性,对变压器空载合闸时产生的励磁涌流较为敏感,较大幅值的励磁涌流会对设备的运行安全和使用寿命构成威胁,远洋供电时变压器一旦损坏,难以及时更换,影响核动力平台的安全运行。除此之外,励磁涌流还将造成发电机机端电压降低,影响系统的供电安全性,需要采用可靠的方法进行抑制。改变变压器绕组结构方法<sup>[13-14]</sup>通过改变变压器一次侧绕组参数降低磁通幅值,该方法造价高且变压器体积变大,

在海洋核动力平台中应用受限;选相合闸技术<sup>[15-17]</sup>控制各相断路器在最优合闸角度下合闸,可有效消除励磁涌流,该方法依赖于对铁心剩磁的准确测量,且需要断路器具备分相合闸功能;变压器软启动方法<sup>[18]</sup>通过电力电子设备控制变压器一次电压平滑启动,实现对励磁涌流的主动抑制。该类方法需要引入控制设备,且目前仍处于研究阶段,暂无实际应用案例;串接小容量变压器预充磁方法<sup>[19-21]</sup>在船舶系统中应用广泛,但现有文献中缺乏完整的预充磁变压器选取方法和应用技术看方案。

海洋核动力平台电力系统在实际运行中,当受到外系统的扰动或自身操作不当时,系统进入故障或非正常运行的紧急状态。目前船舶电力系统在紧急情况下常用的应急方案为系统解列,将系统以配电板为单位分为多个部分,并由应急柴油机对配电板负荷进行一对一供电。由于柴油机需要一定的启动时间,因此该方法在核动力平台系统应用中难以保证重要负荷的持续供电。为此,需要从核动力平台电力系统全网角度考虑故障情况下的负荷恢复问题,采用网络重构方法进行故障后的系统供电恢复。但海洋核动力平台电力系统空间紧凑,系统分支和节点数多,常规功率分析方法<sup>[22-23]</sup>难以应用。海洋核动力平台包含储能装置,在进行重构时需要考虑储能装置的参与方式,结合核动力平台电网特点进行网络重构。

本文根据海洋核动力平台电力系统特点,提出协同多模接地控制的系统接地方式,并提出能够与系统运行方式及接地故障特征有效结合的网源直连系统接地保护方法,有效实现系统接地保护的选择性配合。基于串接小容量变压器预充磁技术,从预充磁方式、预充磁变压器容量选取方法、预充磁合闸时间间隔等多个方面为海洋核动力平台提供一套完整的变压器预充磁技术方案,有效抑制空投变压器励磁涌流。采用基于 Petri 网和 MPGA 的网络重构方法<sup>[24]</sup>,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,并通过各种群间的协同优化,快速提供完备的系统重构方案。

## 1 协同多模接地控制的中性点接地方式

海洋核动力平台电力系统具有内供电和外供电系统。内供电系统以两台辅汽轮发电机为电源,电源和配电网直接相连,包含核反应堆敏感负荷,紧急情况下由逆变电源、柴油机作为应急备用电源;外供电系统以两台主汽轮发电机为电源,经主变压器连接高压海底电缆,为外部岛屿或石油开采系统供电。正常情况下两系统独立运行,紧急情况下主

汽轮发电机可作为内供电系统的备用电源。选取海洋核动力平台电网中性点接地方式时, 需要针对各系统的运行特点, 结合设备绝缘等级要求、系统安全运行要求、接地保护灵敏性、中性点接地设备体积及费用等指标综合选取。

传统的陆地配电网和船舶电网中性点接地方式主要包括中性点不接地、经消弧线圈接地、经电阻接地以及直接接地方式<sup>[25-26]</sup>。由于核动力平台电网以船身作为接地点, 对较大的接地故障电流十分敏感, 因此仅考虑小电流接地形式。近年来, 国内外专家学者提出了一些配电网新型接地方式, 主要包括柔性接地<sup>[27]</sup>、智能柔性接地<sup>[28]</sup>、转移接地<sup>[29]</sup>、智能多模接地<sup>[29-30]</sup>等。新型接地方式通过多种传统接地方式间的有效配合以及电力电子控制设备的应用, 在实现接地故障点可靠熄弧及提高选线保护灵敏度等方面有着较好的改善效果, 但由于利用电力电子装置进行动态控制, 需要采集多种电气量, 存在成本高、控制过程复杂、可靠性差、占地空间大等问题, 难以在海洋核动力平台电力系统中进行应用, 因此在传统接地方式基础上选择适应海洋核动力平台运行特点的接地方式。

建立海洋核动力平台网源直连系统仿真模型, 在中性点不接地、经消弧线圈接地、经高阻接地以及经小电阻接地方式下分别进行金属性、间歇性弧光接地故障仿真实验。以平台中压 10 kV 系统为例建立仿真模型, 其中消弧线圈接地方式过补偿度为 10%, 高阻接地方式接地电阻为 2 286  $\Omega$ , 小电阻接地方式接地电阻为 571  $\Omega$ 。仿真结果如表 1 所示。

表 1 各接地方式故障仿真结果

Table 1 Ground fault simulation results of different grounding modes

参考指标	不接地	消弧线圈接地	高阻接地	小电阻接地
$I_f/A$	2.62	0.23	3.71	10.82
金属性 $I_n/A$	0	2.91	2.62	10.47
接地故障 $I_m/A$	446.2	469.39	470.36	478.68
$t/s$	0.075	0.085	0.025	0.025
弧光接地 $n_{um}$	2.88	2.10	2.14	2.08
故障 $n_{u0}$	1.90	1.39	1.41	1.38

表 1 中  $I_f$  为接地故障稳态电流有效值,  $I_n$  为中性点电流有效值,  $I_m$  为故障暂态电流峰值,  $t$  为故障暂态电流衰减时间,  $n_{um}$  为非故障相最大过电压倍数,  $n_{u0}$  为中性点最大过电压倍数。分析仿真结果可知, 不接地方式在发生间歇性弧光接地故障时过电压倍数较高, 对设备的绝缘要求较高; 经小电阻接地方式故障电流较大, 对站内人身设备安全不利;

经消弧线圈接地方式故障稳态电流较小, 不利于保护配置及整定。综上, 选取中性点经高阻接地方式。

针对海洋核动力平台高压 35 kV 系统, 基于故障电流和弧光接地过电压等故障参数的分析基础之上, 考虑对侧石油开采平台系统采用中电阻接地方式, 为保证两侧系统的接地方式一致性, 选取中性点经中电阻接地方式。针对海洋核动力平台站内低压 400 V 系统, 由于站内系统空间狭小、运行电压低、不受雷电影响, 选取中性点不接地方式。考虑到中压、低压系统在发生高过渡电阻接地故障时, 故障电流小, 配网选线保护灵敏度低, 难以准确排除故障, 为提高保护灵敏度, 采用协同多模接地控制的中性点接地控制方式。

海洋核动力平台协同多模接地控制的中性点接地方式如图 1 所示。在系统正常运行或发生金属性、低过渡电阻、间歇性弧光接地故障时, 开关 K1 闭合, K2 断开, 中性点经高阻 R1 接地, 抑制接地故障电流和暂态弧光过电压, 保障电网的运行安全; 在发生高过渡电阻接地故障时, 协同多模接地控制方式闭合开关 K2, 中性点切换至小电阻接地方式, 放大接地故障特征量, 提高接地保护灵敏度。

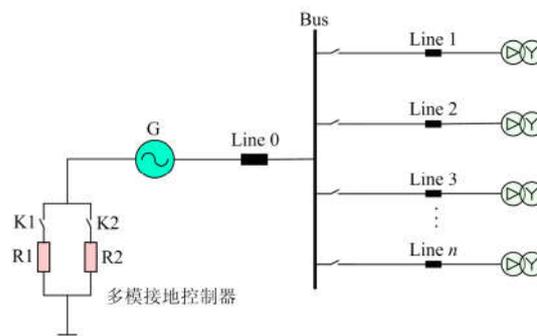


图 1 协同多模接地控制的核动力平台中性点接地控制方式

Fig. 1 Floating nuclear power plant system neutral point grounding and controlling mode in cooperation with multi-mode grounding control

## 2 网源直连系统接地保护

海洋核动力平台站内系统采用发电机-配电网直接相连形式, 系统中任意位置发生接地故障时, 将在全网产生零序电压, 发电机和配电网的接地保护均会启动。在发电机定子绕组发生接地故障时, 配网接地选线保护将判断为母线接地故障, 若将母线切除, 则故障范围扩大影响系统安全; 在配网发生高过渡电阻接地故障时, 应协同多模接地控制切换中性点接地方式, 但在发电机定子绕组接地故障时, 切换中性点接地方式将增大接地故障电流, 使发电机故障程度加深, 威胁系统的运行安全。因此

需要针对网源直连系统特点构建接地保护方案, 实现发电机、配电网接地保护的选择性配合。

海洋核动力平台网源直连系统接地保护方法如图 2 所示。利用母线零序电压  $U_0$  作为保护启动判据, 当母线零序电压超过定值  $U_{0m}$  时, 发电机、配电网接地保护均启动。为实现保护的选择性配合, 首先基于机端与中性点三次谐波电压比值判据和机端零序电流方向判据判别接地故障是否在发电机内部, 若是, 基于反映接地故障程度的发电机定子绕组接地保护方法<sup>[31]</sup>, 根据接地故障程度采取相应的保护动作策略; 若否, 则判断为故障发生在配网侧, 此时根据各出线零序电流幅值判断是否发生高过渡电阻接地故障, 若是, 协同多模接地控制将系统中性点切换至小电阻接地方式, 以放大接地故障特征, 提高保护灵敏度。

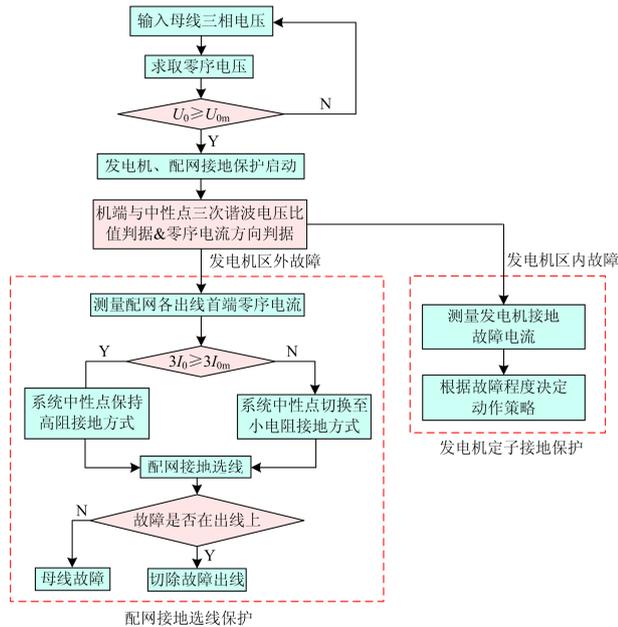


图 2 海洋核动力平台网源直连系统接地保护

Fig. 2 Grounding protection for the floating nuclear power plant source and grid directly connected system

海洋核动力平台对冲击性供电中断十分敏感, 因此采用反映接地故障程度的发电机定子绕组接地保护方法, 利用接地故障电流作为保护动作判据。发生轻微接地故障时, 考虑核岛安全和电网安全, 与站内备用电源配合, 转移负荷, 平稳停机, 防止对系统造成冲击性损伤。

海洋核动力平台配电网发生接地故障时, 若故障零序电流超过阈值, 中性点保持高阻接地方式, 采用基于小波变换模极大值的选线保护方法, 利用最大能量联合熵比<sup>[32]</sup>选取最佳小波基和分解尺度,

使小波变换结果能够准确反映接地故障特征; 若故障零序电流小于阈值, 判定系统发生高过渡电阻接地故障, 协同多模接地控制将中性点开关切换至小电阻接地方式, 采用基于高过渡电阻接地故障特征的比相选线方法, 提高选线保护的准确性和灵敏性。

基于海洋核动力平台空间紧凑、对保护性能有机端安全性要求的特点, 网源直连系统采用芯片化保护装置, 将发电机、配电网的所有功能集中于单个芯片上, 并通过和 MU、智能操作箱之间的通信实现保护功能<sup>[33]</sup>。芯片化保护能够有效减小保护装置体积, 提高核动力平台电网的保护性能。

### 3 串接小容量变压器预充磁方案

海洋核动力平台低压站内系统辅汽轮发电机故障或供电不足时, 需要由主汽轮发电机经厂用变压器为站内系统供电, 此时需要对厂用变压器进行空载合闸。为抑制变压器空载合闸过程中的励磁涌流幅值, 目前船舶电力系统多采用串接小容量变压器预充磁方式。

串接小容量变压器预充磁方法分为如图 3 所示的原边串接小容量变压器和副边串接小容量变压器两种预充磁方式, 即在变压器空载合闸回路中串入一个小容量的预充磁变压器, 预充磁变压器合闸后为工作变压器预充磁, 待工作变压器建立稳态磁通后合闸主断路器, 同时将预充磁支路断开, 该方法具有较好的励磁涌流抑制效果, 在船舶电力系统中应用广泛。但现有文献<sup>[19-21]</sup>未给出具体的预充磁方式、预充磁变压器容量以及预充磁合闸时间间隔选取方法, 在工程应用中存在一定的盲区。

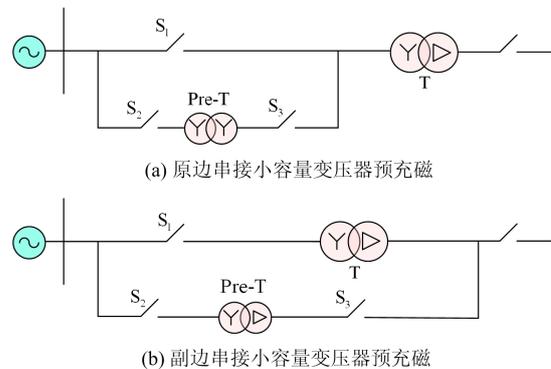


图 3 串接小容量变压器预充磁技术

Fig. 3 Series connected small-capacity transformer based pre-magnetization technology

海洋核动力平台主汽轮发电机输出电压为 10.5 kV, 频率为 50 Hz, 厂用工作变压器容量为 3.5 MVA, 变比为 10.5 kV/400 V, 采用 Y/Δ-11 接线

方式。当选用副边预充磁方式时, 预充磁变压器既能够抑制空投过程产生的励磁涌流, 又能够在在工作变压器发生故障时作为核反应堆敏感负荷的备用电源, 因此采用副边预充磁方式。

目前在实际工程中尚无预充磁变压器容量的准确选取方法, 文献[34]中建议预充磁变压器容量选取为工作变压器容量的 1%, 但通过仿真实验可知, 该方法无法将空载合闸时的励磁涌流幅值降至最低。若预充磁变压器容量选取不当, 在预充磁变压器和工作变压器投入时均会产生较大励磁涌流, 因此需要根据整个空载合闸过程中流过母线的总励磁涌流大小来衡量预充磁变压器的涌流抑制效果。通过仿真分析可知, 工作变压器容量与最佳预充磁变压器容量近似呈线性关系, 利用最小二乘法对工作变压器容量与最佳预充磁变压器容量的关系曲线进行线性拟合, 得到的拟合曲线如图 4 所示。

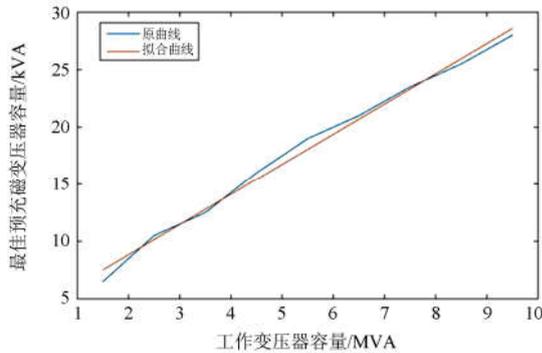


图 4 工作变压器容量与最佳预充磁变压器容量拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve between the working transformer capacity and the optimal pre-magnetized transformer capacity

基于线性拟合方法得到的拟合曲线与原曲线有较高的重合度, 由此可得最佳预充磁变压器容量计算式为

$$S_{\text{pre-T}} = 2.63S_{\text{T}} + 3.57 \quad (1)$$

式中:  $S_{\text{T}}$  为工作变压器容量, 单位为 MVA;  $S_{\text{pre-T}}$  为预充磁变压器容量, 单位为 kVA。求得最佳预充磁变压器容量后, 需根据核动力平台备用电源容量需求及实际工程可用变压器容量对预充磁变压器容量进行调整, 但需要保证合闸期间励磁涌流不应超过工作变压器额定电流。

海洋核动力平台厂用工作变压器空载合闸时, 希望在较短时间内完成合闸操作, 以保证核反应堆负荷的供电连续性。但工作变压器与预充磁变压器合闸操作时间间隔较短时, 工作变压器无法建立稳态磁通, 若此时进行合闸操作, 仍会产生较大的励磁涌流, 预充磁效果不佳。建立海洋核动力平台厂

用工作变压器空载合闸仿真模型, 选取副边串接小容量变压器预充磁方式, 并根据式(1)求取最佳预充磁变压器容量。通过仿真分析可知, 预充磁合闸时间间隔小于 2 s 时, 工作变压器尚未建立稳态磁通, 与合闸后预期磁通存在一定差值, 合闸操作仍会产生励磁涌流, 预充磁效果不佳; 当预充磁合闸时间间隔在 2 s 以上时, 工作变压器励磁绕组已建立稳态磁通, 此时实际磁通幅值与预期磁通幅值接近, 合闸过程不会产生励磁涌流, 因此选取预充磁合闸时间间隔为 2 s。

根据上述原则, 选取海洋核动力平台厂用工作变压器预充磁方案为: 采用副边预充磁方式, 变比为 10.5 kV/400 V, 采用 Y/Δ-11 接线, 预充磁合闸时间间隔为 2 s, 最佳预充磁变压器容量为 10 kVA, 励磁涌流为变压器额定电流时对应预充磁变压器容量为 110 kVA, 可根据实际工程中备用电源容量需求在此区间内进行选取。利用 Matlab/Simulink 建立仿真模型, 得到不同预充磁条件下的励磁涌流幅值如表 2 所示。

表 2 各预充磁方案励磁涌流抑制结果  
Table 2 Results of inrush current suppression of each pre-magnetization scheme

预充磁方法	三相涌流峰值		
	$I_{\text{amax}}/\text{A}$	$I_{\text{bmax}}/\text{A}$	$I_{\text{cmax}}/\text{A}$
最佳预充磁方案	10.77	4.92	5.85
串电阻预充磁	19.46	13.14	18.22
$S_{\text{pre-T}}$ 为 5 kVA	21.00	10.03	10.97
$S_{\text{pre-T}}$ 为 15 kVA	17.53	8.31	9.22
时间间隔为 1 s	14.63	6.84	7.79
时间间隔为 1.5 s	11.62	5.34	6.28
时间间隔为 2.5 s	10.77	4.92	5.85

表 2 对串电阻预充磁和串接小容量变压器预充磁进行了仿真对比, 其中串电阻预充磁仿真中三相电阻阻值取多次仿真实验所得最佳阻值为 380 Ω。此外, 将最佳预充磁方案(对应最佳预充磁变压器容量)与其他预充磁变压器容量及合闸时间间隔情况进行对比, 分析仿真结果可知, 所提方法相较于其他方法而言能够将工作变压器空载合闸励磁涌流抑制至最低, 涌流峰值仅为变压器额定电流的 5.6%。

#### 4 基于 Petri 网和 MPGA 的网络重构方法

海洋核动力平台在实际运行中, 受到外界攻击、外电网扰动或自身设备故障时, 可能引起发电机切机导致负荷供电不足。基于平台网源直连系统特点, 需要从全网角度考虑负荷恢复问题, 采用网络重构方

法进行系统供电恢复,通过控制系统内各开关的投切状态改变负荷的供电路径,保证系统的供电可靠性。

海洋核动力平台带有核反应堆敏感负荷,对系统的供电可靠性和安全性要求高,在网络重构中应优先恢复供电;系统中的开关分为自动可切换开关、手动可切换开关和普通开关,在失电状态下均能够自动跳闸,但恢复供电时自动开关能够自动恢复,手动开关和普通开关需人工操作,各开关在网络重构时操作代价不同;系统发电机运行在额定功率时对机组运行安全最有益,重构时应考虑发电机运行效率最高。综上,以计及负荷优先级权重的负荷恢复供电量最大、计及不同种类开关操作代价的开关操作次数最少、发电机运行效率最高为目标,利用层次分析法<sup>[35]</sup>计算各目标权重,并通过归一化方法确定目标函数。

海洋核动力平台电力系统空间紧凑,系统分支和节点数多,常规功率计算方法难以应用。Petri 网模型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>[36-37]</sup>。Petri 网模型的动态变迁过程可用于分析海洋动力平台电力系统网络重构时的功率分布情况,基于核动力平台电力系统拓扑结构建立的 Petri 网模型等效模型如图 5 所示。

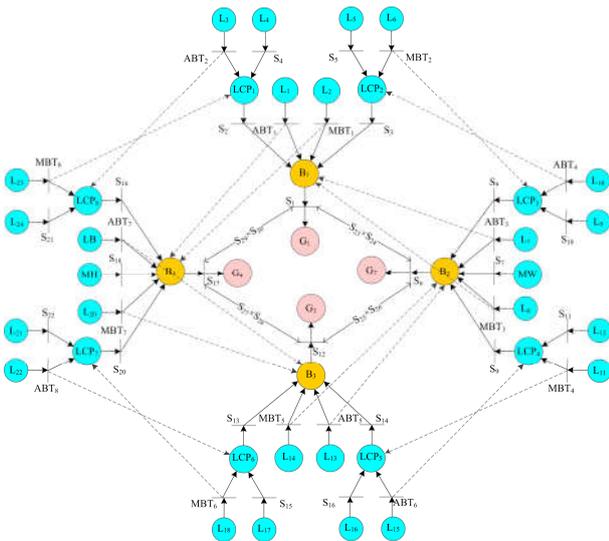


图 5 海洋核动力平台电力系统等效 Petri 网模型

Fig. 5 Petri net model of the floating nuclear power plant grid

图中圆圈表示由负荷、配电板、发电机、储能装置等效所得库所,其中 MW 为外系统等效负荷, MH 为核反应堆相关负荷, LB 为储能装置等效“负值”负荷<sup>[38]</sup>;竖线表示由开关等效所得变迁;库所与变迁间的连线表示供电路径,实线为常规路径,虚线为备用路径;库所中初始托肯数由负荷功率决

定;初始输入、输出关联矩阵由系统运行状态及故障状态确定。

在选取最佳开关组合方式时,为解决单种群遗传算法(SGA)收敛速度慢,且常陷入局部最优解的问题,采用多种群遗传算法。MPGA 中多个种群使用同一目标函数,各种群采用不同的交叉率和变异率同时进行优化搜索,并通过移民算子进行联系,实现多个搜索种群的协同进化。

基于 Petri 网和 MPGA 方法进行海洋核动力平台电力系统网络重构时,通过故障后发电机状态判断储能装置是否参与网络重构;对系统内各节点间的连接情况进行编码,依据系统的初始运行状态和故障影响程度确定参与重构的开关组合,根据背包策略<sup>[39]</sup>生成初始开关状态;利用 MPGA 生成多种开关组合方式,基于 Petri 网模型进行功率计算,并判断重构方案是否满足系统约束条件;当最优个体适应度维持不变代数超过最大迭代次数时停止迭代,得到最优网络重构方案。

核动力平台电力系统在网络重构过程中区别于陆地配电网系统的最大特点在于其发电机易发生故障而退出运行,仿真分析辅汽轮发电机 G<sub>3</sub>对应主配电板 B<sub>3</sub>发生故障情况。此时开关 S<sub>12</sub>、S<sub>26</sub>、S<sub>27</sub> 断开,发电机 G<sub>3</sub> 退出运行。为保证核反应堆负荷安全供电,储能装置 LB 参与重构。基于 MPGA 的网络重构结果为:负荷 L<sub>13</sub>、L<sub>14</sub>、L<sub>15</sub> 转为备用路径供电,系统内没有负荷失电。与 SGA 进行多次仿真对比,结果表明两种算法均能收敛至全局最优解,但 SGA 迭代次数较多,所需重构时间较长。

为验证所提方法的有效性,对核动力平台系统多种典型故障场景进行测试,采用的仿真参数均利用多次仿真实验合理选取获得,满足全局收敛性及重构快速性需求。Petri 网模型在核动力平台电力系统功率分析中克服了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,且能够迅速判断发电机的出力均衡性并检验系统容量约束;通过与 SGA 方法进行对比可知,MPGA 方法在平台电网可能发生的多种故障形式下均收敛至全局最优解,能够为海洋核动力平台电网快速提供完备的系统重构方案。

### 5 结语

针对海洋核动力平台电网的拓扑结构形式和系统运行特点,本文从系统中性点接地方式、网源直连系统接地保护、变压器预充磁方案以及网络重构方法四个方面对平台电网的安全问题及相关保护技术进行研究,得出以下结论:

1) 采用协同多模接地控制的中性点接地方式, 保障系统发生接地故障时的人身设备安全, 并提高接地选线保护灵敏度。

2) 网源直连系统接地保护中发电机采用反映故障程度的接地保护, 依据故障程度选取出口策略; 配网接地选线保护与协同多模接地控制的中性点接地方式相配合, 针对不同接地故障形式采取不同的保护控制策略。

3) 从预充磁方式、预充磁变压器容量等方面完善预充磁变压器的选取方法, 从预充磁合闸时间间隔角度规范变压器空载合闸过程, 有效抑制空投变压器励磁涌流。

4) 基于 Petri 网和 MPGA 方法进行系统故障后的网络重构, 最大程度恢复平台负荷供电, 保证平台的运行安全。

本文研究结果能够为海洋核动力平台电力系统的工程设计提供技术支撑, 同时也可为其他船舶电网及陆地直连配电网系统的相关工程问题提供技术参考。

#### 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] 马以文, 崔睿, 叶艳平, 等. 浅析海洋核动力平台电力系统保护配置[J]. 船电技术, 2017, 37(12): 25-26.  
MA Yiwen, CUI Rui, YE Yanping, et al. Configuration of power system protection at offshore nuclear power platform[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2017, 37(12): 25-26.
- [3] 张琪, 张力, 胡双进, 等. 海洋核动力平台电力负荷统计方法研究[J]. 船电技术, 2017, 37(12): 49-50, 55.  
ZHANG Qi, ZHANG Li, HU Shuangjin, et al. Research on power load statistic method at offshore nuclear power station[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2017, 37(12): 49-50, 55.
- [4] 董海防. 海洋核动力平台发展研究综述[J]. 船舶工程, 2019, 41(11): 5-10.  
DONG Haifang. A review on the development of floating nuclear power platforms[J]. Ship Engineering, 2019, 41(11): 5-10.
- [5] 张力, 李幸群, 胡双进, 等. 海洋核动力平台正常电源故障工况的供电策略[J]. 船电技术, 2019, 39(4): 42-43.  
ZHANG Li, LI Xingqun, HU Shuangjin, et al. Power supply strategy for condition of normal power failure on marine nuclear power platform[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019, 39(4): 42-43.
- [6] LIU Penghui, HUANG Chun. Detecting single-phase-to-ground fault event and identifying faulty feeder in neutral ineffectively grounded distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2265-2273.
- [7] 齐郑, 陈炯聪, 杨奇逊. 基于小波变换和 LMS 自适应滤波器的单相接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 58-61.  
QI Zheng, CHEN Jiongcong, YANG Qixun. Selection of single-phase to ground fault line based on wavelet transform and LMS adaptive filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 58-61.
- [8] 张大波, 刘志刚, 张亚军, 等. 基于相差统计的小电流单相接地选线新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 77-80, 102.  
ZHANG Dabo, LIU Zhigang, ZHANG Yajun, et al. A new criterion for earth fault line selection based on phase comparison statistical method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 77-80, 102.
- [9] 张灵杰, 缪勇, 奚玲玲. 基于小波理论的频带自适应故障选线法及其在船舶电网中的应用[J]. 船舶工程, 2019, 41(增刊 2): 91-96.  
ZHANG Lingjie, MIAO Yong, XI Lingling. Frequency band adaptive fault line selection method based on wavelet theory and application in ship power grid[J]. Ship Engineering, 2019, 41(S2): 91-96.
- [10] 刘渝根, 王建南, 马晋佩, 等. 结合小波包变换和 5 次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.  
LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [11] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.  
WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [12] WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. The fault-current-based protection scheme and location algorithm for stator ground fault of a large generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 871-879.

- [13] CHENG C K, CHEN S D, CHEN F J, et al. Transformer design for reducing the inrush current by asymmetrical winding[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2005, 28(5): 811-818.
- [14] CHENG C K, CHEN J F, LIANG T J, et al. Transformer design with consideration of restrained inrush current[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(2): 102-108.
- [15] ABDULSALAM S G, XU W. A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction—transient performance and practical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 208-216.
- [16] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching-part I: theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 276-280.
- [17] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching-part II: application and performance considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 281-285.
- [18] 李春艳, 周念成, 王强钢, 等. 基于软启动的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3640-3651.  
LI Chunyan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. A method to eliminate transformer inrush currents using soft-starter-based controlled energization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3640-3651.
- [19] 顾雪晨. 变压器预充磁仿真技术研究[J]. 船电技术, 2015, 35(1): 5-8.  
GU Xuechen. Research on the simulation of pre-magnetization of transformer[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2015, 35(1): 5-8.
- [20] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.  
HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong, et al. Study on inrush current restraining technology when energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84.
- [21] 张琦兵, 邵能灵, 王鹏, 等. 船舶变压器预充磁分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 145-149.  
ZHANG Qibing, TAI Nengling, WANG Peng, et al. Analysis of transformer pre-magnetizing in marine power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 145-149.
- [22] 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, 2008, 46(5): 68-72.
- [23] 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.
- [24] 吴大立, 郑中祥, 尹项根, 等. 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[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 160-168.  
WU Dali, ZHENG Zhongxiang, YIN Xianggen, et al. Network reconstruction of offshore nuclear power platform power system based on Petri net and multi-population genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 160-168.
- [25] XIAO Yang, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [26] 袁超, 薛永端, 梅睿, 等. 不同接地方式下配电网绝缘监察的灵敏性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 130-137.  
YUAN Chao, XUE Yongduan, MEI Rui, et al. Sensitivity analysis of insulation monitoring of distribution network under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 130-137.
- [27] 刘张磊. 配电网预随调消弧线圈自动控制系统研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.  
LIU Zhanglei. Research on automatic control system of presetting and following-setting Petersen-coil in distribution network[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008.
- [28] 曾祥君, 王媛媛, 李健, 等. 基于配电网柔性接地控制的故障消弧与馈线保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 137-143.  
ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, LI Jian, et al. Novel principle of faults arc extinguishing & feeder protection based on flexible grounding control for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 137-143.
- [29] 余斌, 尹项根, 朱维钧, 等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力, 2018, 51(12): 72-79.

- YU Bin, YIN Xianggen, ZHU Weijun, et al. Grounding fault analysis and protection scheme study for composite grounding arc-suppression mode[J]. Electric Power, 2018, 51(12): 72-79.
- [30] 熊卫红, 毛兴华, 李景禄, 等. 小电阻接地方式对人身安全的影响及智能电阻接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 166-172.
- XIONG Weihong, MAO Xinghua, LI Jinglu, et al. Influence of small resistance grounding mode on personal safety and research of intelligent resistance grounding mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 166-172.
- [31] 王育学, 尹项根, 张哲, 等. 基于接地电流的大型发电机定子接地保护及精确定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 147-154, 18.
- WANG Yuxue, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A novel protection and precise location method based on grounding currents for stator ground faults of large generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 147-154, 18.
- [32] WANG Yikai, YIN Xin, XU Wen, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 164-173. DOI: 10.1186/s41601-020-00160-0.
- [33] 习伟, 姚浩, 蔡田田, 等. 芯片化保护测控装置方案研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 91-97.
- XI Wei, YAO Hao, CAI Tiantian, et al. Research on chip-based protection and measuring and control devices[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 91-97.
- [34] 杨东升. 船舶电力系统预充磁技术研究[J]. 机电设备, 2017(4): 38-41, 59.
- YANG Dongsheng. Pre-magnetizing technology in shipboard power system[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2017(4): 38-41, 59.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] XU Biao, YIN Xin, YIN Xianggen, et al. Fault diagnosis of power systems based on temporal constrained fuzzy Petri nets[J]. IEEE Access, 2019, 7: 101895-101904.
- [38] 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.
- [39] 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 particle swarm optimization in network reconstruction of ship power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 29-34, 39.

收稿日期: 2020-10-10

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

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

李鹏(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: lipeng@csg.cn

(编辑 魏小丽)