

协同多模接地控制的海洋核动力平台 电网接地故障选线方法

王义凯^{1,2}, 尹项根^{1,2}, 乔健^{1,2}, 谭力铭^{1,2}, 卢庆辉^{1,2}, 吴大立³

(1. 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;

2. 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;

3. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

摘要:海洋核动力平台电网包含核反应堆敏感负荷,不同接地故障条件下均需要快速准确选线并切除故障线路。为避免某些高频频带下不同线路间零序电流分布差异不明显造成选线误判,提出基于被选频带零序能量的选线方法,并通过零序能量阈值判别高过渡电阻接地故障。发生高过渡电阻接地故障时,为避免电流互感器极性测量误差导致选线误判,协同多模接地控制将中性点切换至小电阻接地方式。此时,系统零序电压、健全线路零序电流幅值降低,故障线路零序电流幅值升高,基于此可预判故障线路;为避免互感器一次侧电气量过小造成较大的测量误差,利用切换前系统零序电压与切换后预判故障线路首端零序电流间的相位差构建就地化选线判据。仿真与动模试验结果证明,所提方法在不同故障场景下均能够准确选线,满足现场应用要求。

关键词:海洋核动力平台;多模接地控制;被选频带;零序能量;相位差

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204069

0 引言

海洋核动力平台电力系统长期运行于潮湿、盐雾等恶劣环境中,接地故障频发且故障形式复杂。平台中压系统采用网源直连拓扑结构^[1],通过发电机中性点接地。为保证定子铁芯安全,抑制定子绕组接地故障电流,系统采用高阻接地方式^[2]。核岛相关负荷具有极端安全性要求,系统线路发生接地故障时需要快速准确选线并切除故障线路,以切换至备用供电路径^[3]。高过渡电阻接地故障条件下,发电机中性点短时切换至小电阻接地方式,从而增大一次侧接地故障电流,保证可靠选线。据此,需要研究协同多模接地控制的选线保护方法。

系统正常运行或发生低过渡电阻接地故障时,中性点保持高阻接地方式。针对小电流接地系统,常用的接地故障选线方法有外加注入式电源方法、故障暂态信息量方法等。外加注入信号^[4]会对平台内敏感负荷的安全运行产生影响,应用受限。接地故障暂态过程通常包含大量故障信息,常用的暂态量选线方法有行波法^[5]、小波变换法^[6-7]、功率方向法^[8]、能量法^[9-11]等。平台电力系统线路短,行波法

无法应用。小波变换法对突变信号敏感,通过对信号进行分解得到具有明显特征量的特征频带,在特征频带内基于各线路模值、极性、熵变量等信息确定故障线路。该方法灵敏度高但抗干扰能力差,可能造成误选。功率方向法与能量法原理相似,能量法通常利用高频暂态能量^[9]、工频能量^[10]、全频带能量^[11]等,单一利用特定频次的能量灵敏度较低,但对于全频带能量法,某些高频频带下系统等值感抗高于容抗,故障线路和健全线路零序电流分布差异不明显或交越频率不易确定^[12],故障选线难以实现。

发生高过渡电阻接地故障时,系统一次侧零序电流小,电流互感器角度测量误差大,易造成极性判别错误导致选线误判。此时,需通过一二次设备结合切换中性点至小电阻接地方式,扩大故障特征^[13-15],提高保护灵敏度。基于此,文献^[14]利用中性点切换至小电阻接地方式后的零序电压、电流相位差构成选线判据;文献^[15]基于接地方式切换前后零序电压与零序电流间相位差的变化量构成选线判据。虽然切换中性点至小电阻接地方式能够有效扩大接地故障电流,但同时会减小系统零序电压,上述方法能够解决故障线路电流互感器测量精度问题,却忽视了零序电压互感器及健全线路电流互感器测量精度问题,工程中仍存在较大误差。

接地故障特征量受系统接地方式、故障类型等多重因素影响,单一的选线方法无法兼具高灵敏性与防误动性,为此本文提出协同多模接地控制的故障选线方法。系统在发生金属性或低过渡电阻接地

收稿日期:2021-10-27;修回日期:2022-02-02

在线出版日期:2022-04-25

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

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877089) and the National Key R&D Program of China(2017YFC0307800)

故障时,保持高阻接地方式,采用基于被选频带 SFB (Selected Frequency Band) 零序能量的故障选线方法,利用故障线路与健全线路间 SFB 零序能量的幅值极性差异构成选线判据;当某一线路的 SFB 零序能量低于阈值时,判定为高过渡电阻接地故障,中性点切换至小电阻接地方式,基于故障线路零序电流突增特点进行选线预判,并利用切换前系统零序电压和切换后预判故障线路首端零序电流间的相位差构成就地化选线判据。MATLAB / Simulink 仿真分析及动模试验数据分析结果证实了本文所提故障选线方法的准确性。

1 基于多模接地控制的接地故障特征分析

海洋核动力平台中压系统采用网源直连拓扑结构,系统通过发电机中性点接地,并采用多模接地控制策略^[13],在正常运行及发生低过渡电阻接地故障时,中性点通过接地变压器经高阻接地;发生高过渡电阻接地故障时,受互感器精度影响,常规接地选线技术难以检测,此时将中性点短时切换至小电阻接地方式,扩大故障线路的故障特征量,提高选线保护灵敏度,保证核反应堆负荷安全。本节对海洋核动力平台系统接地故障特征进行分析,假定线路 4 发生单相接地故障,等效系统如图 1 所示。图中: S 为多模接地控制开关, S 断开时中性点由配电变压器经高电阻 R_N 接地, S 闭合时,由于 R'_N 阻值小,可看作经小电阻接地; $C_{k\varphi}$ ($k=1, 2, 3, 4; \varphi=A, B, C$) 为线路 k 的 φ 相对地电容; $C_{G\varphi}$ 为发电机 G 定子绕组 φ 相对地电容; E_φ 为发电机 φ 相相电势; I_{Ck} 、 I_{CG} 分别为线路 k 、发电机定子绕组的对地电容电流; I_{k0} 为线路 k 首端的零序电流; R_g 为接地过渡电阻; I_f 为接地故障电流; U_{fg} 为故障点对地电压; I_N 为流过中性点接地电流; U_0

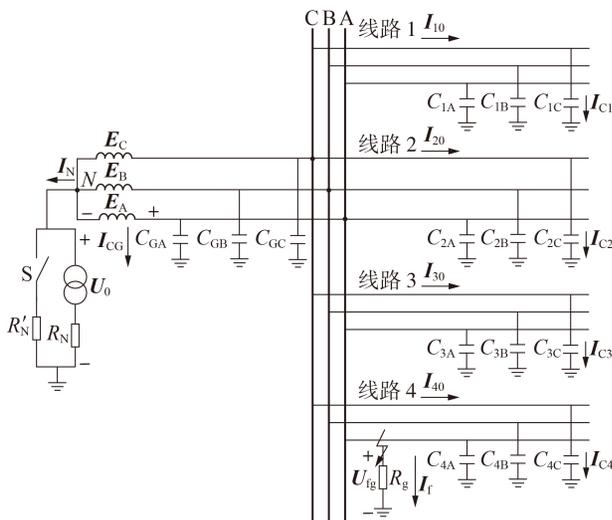


图 1 海洋核动力平台电网接地故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of grounding fault in power grid of marine nuclear platform

为系统零序电压。

接地故障电流 I_f 如式(1)所示。

$$I_f = \frac{U_{fg}}{R_g} = \frac{U_0 + E_A}{R_g} \quad (1)$$

接地故障电流由对地电容电流和流过中性点的电流构成,还可表示为:

$$I_f = -j\omega_0 C_\Sigma U_0 - \frac{U_0}{R_N + Z_T} \quad (2)$$

式中: C_Σ 为系统三相对地电容之和; Z_T 为配电变压器等值阻抗。联立式(1)、(2)可得:

$$U_0 = -\frac{E_A}{1 + \frac{R_g}{R_N + Z_T} + j\omega_0 C_\Sigma R_g} \quad (3)$$

规定线路首端零序电流正方向为母线指向线路,则健全线路 k 的首端零序电流 I_{k0} 为:

$$I_{k0} = -\frac{j\omega_0 C_{k0} E_A}{1 + \frac{R_g}{R_N + Z_T} + j\omega_0 C_\Sigma R_g} \quad k=1, 2, 3 \quad (4)$$

式中: C_{k0} 为线路 k 的三相对地电容之和。

故障线路 4 的首端零序电流 I_{40} 为:

$$I_{40} = \frac{j\omega_0 (C_\Sigma - C_{40}) E_A}{1 + \frac{R_g}{R_N + Z_T} + j\omega_0 C_\Sigma R_g} + \frac{E_A}{R_N + Z_T + R_g + j\omega_0 C_\Sigma R_g (R_N + Z_T)} \quad (5)$$

由式(3)可知, R_g 较小时,系统零序电压幅值高,各线路的首端零序电流均较大,保护受电流互感器测量误差影响小。发生高过渡电阻接地故障时,受电流互感器测量误差影响,故障选线正确性难以保证。基于多模接地控制将中性点切换至小电阻接地方式时,式(3)~(5)中 $Z_T=0$, R_N 变为 R'_N , 数值减小,此时系统零序电压降低,健全线路的首端零序电流幅值随之减小。小电阻阻值选取恰当时,流过故障点的阻性电流增加,故障线路的首端零序电流幅值增加。文献[16]指出,小电阻接地方式下,无论接地过渡电阻阻值多大,故障出线的零序电流始终比健全出线的零序电流大 10 倍以上。因此,高过渡电阻接地故障下,切换至小电阻接地方式使得健全线路与故障线路的故障特征差异增大,有利于准确选线。

2 协同多模接地控制的接地故障选线保护方法

2.1 基于 SFB 零序能量的选线保护方法

海洋核动力平台电网在低过渡电阻接地故障下保持高阻接地方式,系统中可能发生间歇性弧光接地等复杂接地故障,传统零序电流保护定值难以整定。零序能量选线方法基于故障线路的零序能量幅值最大且方向与健全线路的零序能量相反原则构成

故障选线判据^[10],抗干扰能力强。线路 k 的零序能量计算公式为:

$$W_{k0} = \int_0^t u_0(\tau) i_{k0}(\tau) d\tau \quad (6)$$

式中: W_{k0} 为线路 k 的零序能量; u_0 为系统零序电压瞬时值; i_{k0} 为线路 k 的零序电流瞬时值; t 为积分数据窗时间。网源直连系统发生接地故障时,零序电流中包含发电机提供的基波分量、3次谐波分量^[17]以及故障过程产生的高频暂态分量。相较于单一使用某一频段的暂态零序电流而言,全频段能量判据具有更高的灵敏度,但存在以下问题。

1)某条线路发生单相接地故障时,各线路及发电机定子绕组阻抗的相频特性如图2所示。

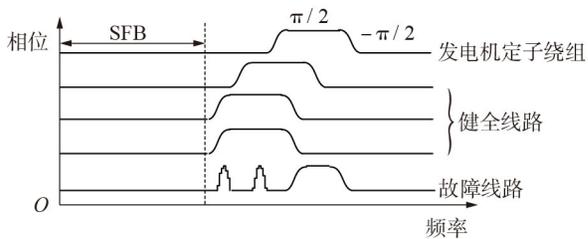


图2 发生单相接地故障时各线路及定子绕组阻抗的相频特性

Fig.2 Phase-frequency characteristics of impedance of each line and stator winding under single-phase grounding fault

图2中,在某些高频频段,线路阻抗呈感性,此时零序电流中的感性电流分量高于容性电流分量,故障线路和健全线路的零序电流分布差异不明显或交越频率不易确定,不再满足健全线路零序电流极性相同并与故障线路反极性的特点,故障选线较为困难^[18]。而在SFB内,各线路阻抗均呈容性,采用零序能量判据能够正确选线。因此,本文基于SFB零序电流计算零序能量,SFB范围为 $0 \sim f$, f 为所有线路自身串联谐振频率的最小值。对于网源直连系统,需要考虑发电机定子绕组阻抗相频特性的影响。通过计算可知,发电机定子绕组串联谐振频率高于各线路,因此在确定SFB范围时,以各线路谐振主频率中的最小值加上一段阈值作为 f 值。

2)电流互感器在一次系统零序电流较小时角度测量误差大。零序电流互感器角度测量误差超过 7° 时,对于健全线路而言,装置感受到的工频零序电流超前零序电压的角度超过 90° ,功率因数为负,导致工频能量函数值小于0^[19]。文献[19]中的电流互感器角度测量误差试验结果表明:当电流互感器一次侧零序电流高于1 A时,角度误差在 7° 以内,不会造成误判。据此,SFB零序能量法应用的极限情况为:非最短线路发生单相接地故障,最短线路的首端零序电流为1 A。基于第4节中的平台网源直连系统

参数,通过式(4)计算得到此时的接地过渡电阻为 868Ω 。设置该条件下最短线路的SFB零序能量值为零序能量阈值 W_{0set} ,其值为220 J。当某条线路的SFB零序能量低于该阈值时,说明此时零序电流幅值低,零序电流互感器角度测量误差严重,应下达指令将中性点切换至小电阻接地方式。

2.2 基于零序相位差的选线保护方法

系统发生接地故障后,若某线路的SFB零序能量低于 W_{0set} ,则为了避免零序电流互感器角度测量误差导致故障选线错误,将发电机中性点切换至小电阻接地方式。此时并非所有故障特征量均增大,需要根据各故障特征量的变化情况并结合零序电流互感器的测量精度构建故障选线判据。

通过第1节中的理论分析结果可知,切换中性点接地方式后,故障线路的首端零序电流幅值增大,健全线路的首端零序电流幅值减小,可基于零序电流突增判据实现故障线路预判。

中性点接地方式切换前,系统零序电压幅值较大;接地方式切换后,故障线路的零序电流较大,但健全线路的零序电流较小,不能采取各线路间故障特性对比方式构成故障选线判据。考虑到故障线路与健全线路间的零序电流相位差异,本文通过中性点接地方式切换前系统零序电压和切换后预判故障线路零序电流间的相位关系构成就地化选线判据。

基于第4节中的平台网源直连系统参数,若最长线路发生接地故障且首端零序电流为1 A,根据式(5)计算得到接地过渡电阻为 6057Ω ,因此该方法的耐过渡电阻能力范围为 $868 \sim 6057 \Omega$ 。切换中性点接地方式前,根据式(3)计算得到在耐过渡电阻能力范围内,系统零序电压 U_0 滞后 $-E_A$ 的角度范围为 $52.51^\circ \sim 74.66^\circ$;切换中性点接地方式后,零序电压 U'_0 滞后 $-E_A$ 的角度范围为 $0.58^\circ \sim 0.59^\circ$,近似与故障相电压反向,此时健全线路的首端零序电流 I'_{k0} 滞后 E_A 90° ,故障线路首端零序电流 I'_{40} 近似与 E_A 同相。各电气量间的相量关系如附录A图A1所示。由图可知,中性点接地方式切换后,故障线路与健全线路间零序电流存在相位差异。考虑零序电流互感器角度测量误差,对各相量相位保留 20° 裕度,得到中性点接地方式切换后故障线路零序电流与切换前零序电压之间满足的相位关系为:

$$65^\circ < \arg(I'_{k0}/U_0) < 165^\circ \quad (7)$$

对于高过渡电阻接地故障,中性点切换至小电阻接地方式后,故障线路零序电流将增大,对零序电流突增线路进行校核,若满足式(7)所示的判据,则该线路为故障线路。该方法采用就地化保护判据,无需进行线路间故障特征量的极性比较,能够有效实现与多模接地控制方式的配合,最大限度地降低电流互感器极性测量误差影响。

3 接地故障选线流程

协同一次系统中性点多模接地控制方式,海洋核动力平台中压系统接地故障检测与选线保护流程如附录 A 图 A2 所示,具体步骤如下。

1) 系统零序电压幅值越限时,发电机定子接地保护启动。发电机定子接地保护由零序电流方向判据和 3 次谐波电压比值判据构成^[13],其中零序电流方向判据用于反映发电机机端侧 95% 的接地故障,3 次谐波电压比值判据用于反映中性点侧 5% 的接地故障,共同构成 100% 定子绕组接地保护。对两判据采用或门形式,若两判据均未动作,则说明配电网系统发生接地故障,接地选线保护判据启动。

2) 当所有线路 SFB 零序能量均高于 W_{0set} 时,利用 SFB 零序能量方法进行接地故障选线。判定 SFB 零序能量幅值最大且极性与其他线路相反的线路为故障线路;若所有线路 SFB 零序能量极性均相同,则判定为主配电板侧发生接地故障。

3) 当存在某线路的 SFB 零序能量低于 W_{0set} 时,判定系统发生高过渡电阻接地故障,通过协同多模接地控制将中性点切换至小电阻接地方式。首先预判首端零序电流突增的线路为故障线路,然后利用傅里叶变换求解中性点接地方式切换前 1 个周期内的零序电压相位,以及中性点接地方式切换后 1 个周期内的预判故障线路零序电流相位,若二者相位差满足式(7),则该线路为故障线路;若所有线路均不满足零序电流突增判据,则判定为主配电板侧发生接地故障。

4 仿真分析

利用 MATLAB / Simulink 软件建立如图 1 所示的海洋核动力平台中压网源直连系统等值模型。发生金属性和低过渡电阻接地故障时,中性点采用通过接地变压器经高阻接地方式,综合考虑接地故障电流与系统暂态过电压影响,接地电阻器一次侧阻值选取为 2286Ω ^[13];发生高过渡电阻接地故障时,中性点切换至小电阻接地方式,综合选线保护的灵敏性与系统的安全性,接地电阻器一次侧阻值选取为 5Ω ^[20]。海洋核动力平台网源直连系统电压等级为 10.5 kV,采用全电缆线路,各线路的长度分别为 1.5、2、2、2.5 km,每相线路的正、负序阻抗均为 $0.079+j0.082 \Omega/km$,零序阻抗为 $0.119+j0.246 \Omega/km$,对地电容为 $0.767 \mu F/km$ 。发电机定子绕组单相电阻、电感分别为 1.528 m Ω 、2.84 mH,三相对地电容之和为 0.397 μF 。中性点接地变压器的容量为 30 kV·A,变比为 10.5 kV/0.22 kV,短路损耗为 2 250 W,阻抗电压百分比为 8.8%。

4.1 SFB 零序能量方法仿真验证

基于系统阻抗参数,确定 SFB 范围为 0~2500 Hz。

在线路 3 末端设置金属性接地故障,测量系统零序电压和各线路首端零序电流。利用小波包变换对零序电流进行分解重构可得 SFB 零序电流,进而得到故障后 1 个周期内各线路的 SFB 零序功率,见附录 A 图 A3。分析仿真结果可知,故障后 1 个周期内,故障线路 3 零序功率幅值最大且方向始终与其余健全线路相反。零序能量为零序功率的积分,故障后 1/4 周期内各线路的 SFB 零序能量分别为 229 615、306 316、-1 142 287、382 639 J,均高于 W_{0set} ,其中线路 3 的 SFB 零序能量最大且方向与其他线路相反,可确定线路 3 发生接地故障。

分别在各线路首端(H)10%处及末端(T)设置金属性、低过渡电阻($R_g=100 \Omega$)接地故障,并在主配电板侧设置金属性和低过渡电阻接地故障,SFB 零序能量仿真结果如表 1 所示。表中:HM 表示线路首端金属性接地故障;HR_g 表示线路首端低过渡电阻接地故障;TM 表示线路末端金属性接地故障;TR_g 表示线路末端低过渡电阻接地故障;M 表示主配电板侧金属性接地故障;R_g 表示主配电板侧低过渡电阻接地故障。

表 1 SFB 零序能量方法的仿真结果

Table 1 Simulative results of SFB zero-sequence energy method

故障类型	W_0 / J				选线结果	
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4		
线路 1	HM	-1 278 959	321 975	321 975	402 170	线路 1
	HR _g	-49 927	7 643	7 643	9 547	线路 1
	TM	-1 680 963	429 325	429 325	536 328	线路 1
	TR _g	-49 911	7 639	7 639	9 542	线路 1
线路 2	HM	342 832	-1 673 047	457 998	572 161	线路 2
	HR _g	5 724	-47 988	7 635	9 537	线路 2
	TM	229 615	-1 142 286	306 316	382 638	线路 2
	TR _g	5 715	-47 951	7 624	9 524	线路 2
线路 3	HM	342 841	458 000	-1 673 053	572 163	线路 3
	HR _g	5 724	7 635	-47 988	9 537	线路 3
	TM	229 615	306 316	-1 142 287	382 639	线路 3
	TR _g	5 715	7 624	-47 951	9 524	线路 3
线路 4	HM	321 435	429 209	429 209	-1 465 767	线路 4
	HR _g	5 725	7 636	7 636	-46 090	线路 4
	TM	303 233	405 015	405 015	-1 386 178	线路 4
	TR _g	5 718	7 627	7 627	-46 061	线路 4
主配电板	M	176 498	234 312	234 312	292 609	主配电板
	R _g	5 733	7 648	7 648	9 554	主配电板

分析表 1 可知,在金属性和低过渡电阻接地故障情况下,各线路的 SFB 零序能量均高于阈值,无需切换中性点接地方式。不同接地故障位置和接地过渡电阻情况下,故障线路的 SFB 零序能量均最大且方向与健全线路相反,因此 SFB 零序能量法能够准确选出故障线路。在主配电板侧发生接地故障时,

各线路的SFB零序能量方向均为正,可准确判断为主配电板侧故障。由于主配电板侧发电机定子绕组和相连线路对地电容同样为故障点提供零序容性电流,因此仿真结果中故障线路的SFB零序能量幅值高于各健全线路的SFB零序能量幅值之和。

4.2 零序相位差方法仿真验证

基于所建立的MATLAB/Simulink仿真模型,设置线路3末端发生高过渡电阻($R_g=2000\ \Omega$)接地故障,故障时刻为0.095 s。故障后1/4周期内各条线路的SFB零序能量分别为68、90、-536、113 J,其中多条线路的SFB零序能量低于阈值,说明发生高过渡电阻接地故障。在实际工程中,零序电流互感器测量结果存在较大的角度测量误差,无法使用SFB零序能量法等需要进行极性对比的方法进行故障选线。在0.2 s时刻,系统中性点切换至小电阻接地方式。在此过程中,各线路首端的零序电流波形如附录A图A4所示。仿真结果表明,中性点经多模接地控制切换至小电阻接地方式后,故障线路零序电流幅值增加,健全线路零序电流幅值减小,可预判线路3为故障线路。

基于切换后1个工频周期内各线路首端零序电流,以及切换前1个工频周期内系统零序电压,得到各线路的零序相位差,如附录A图A5所示。图中, $\Phi_{i0}(k=1,2,3,4)$ 为线路 k 的零序相位差。分析仿真结果可知,线路3的零序相位差为 98.4° ,线路1、2、4的零序相位差分别为 -169.1° 、 -171.8° 、 -171.0° ,仅预判故障线路3的零序相位差满足式(7)所示的判据,可确定线路3为故障线路。

为验证零序相位差方法在不同故障位置下均有效,在上述仿真模型中分别于各线路首端10%处、末端、主配电板侧设置高过渡电阻($R_g=2000\ \Omega$)接地故障,切换后各线路首端零序电流与切换前零序电压相位差的仿真结果如表2所示。仿真结果表明,不同线路接地故障情况下,故障线路的零序相位差满足式(7)所示的判据,能够可靠选出故障线路。

表2 零序相位差方法的仿真结果

Table 2 Simulative results of zero-sequence phase difference method

故障位置		零序相位差 / ($^\circ$)				选线结果
		线路1	线路2	线路3	线路4	
线路1	H	98.3	-169.8	-173.0	-171.6	线路1
	T	98.3	-170.7	-171.3	-170.1	线路1
线路2	H	-170.3	98.4	-170.3	-171.2	线路2
	T	-171.5	98.4	-169.8	-168.8	线路2
线路3	H	-169.4	-169.8	98.4	-170.2	线路3
	T	-169.1	-171.8	98.4	-171.0	线路3
线路4	H	-172.1	-169.9	-169.2	98.5	线路4
	T	-170.6	-171.8	-169.9	98.5	线路4
主配电板		-171.5	-170.5	-170.5	-171.2	主配电板

在主配电板侧发生接地故障时,所有线路的零序相位差均不满足式(7)所示的判据,不会引起选线误判。

5 动模试验验证

海洋核动力平台在运行中受海浪冲击,电气设备在频繁震动的环境下将产生间歇性接地故障^[21],并伴有电弧产生。目前常用于进行仿真分析的电弧模型包括Cassie、Mayr、Schwarz、控制论电弧模型等^[22],但接地电弧物理过程复杂、影响因素众多,上述模型均存在一定的局限性。为此,结合华中科技大学自主研发的“灵活组网式配电系统物理模型及弧光接地试验平台”进行间歇性弧光接地故障的动模试验分析,试验平台如附录A图A6所示。该试验平台采用10 kV电压等级,包含3条电缆线路、3条架空线路和1条线-缆混合线路;中性点可采用不接地、消弧线圈接地、电阻接地等方式;采用针尖放电形式,可模拟不同类型配电网在不同接地过渡电阻阻值下的间歇性弧光接地故障,并以10 kHz的采样频率生成故障录波。

选取3条电缆线路进行模拟实验分析。为模拟核动力平台电网多模接地控制方式,低过渡电阻接地故障情况下系统中性点不接地,高过渡电阻接地故障情况下切换至经电阻接地方式。在线路1首端设置低过渡电阻($R_g=120\ \Omega$)接地故障,各条线路的首端零序电流录波波形如图3所示,SFB零序功率如附录A图A7所示。由图A7可知,故障线路1的零序电流幅值最大且方向与健全线路相反。选取故障后前1/4周期的SFB零序功率计算零序能量,得到3条线路的零序能量分别为-357.53、77.01、207.75 J。由于线路1的零序能量幅值最大且极性与其他线路相反,可判定线路1为故障线路,选线结果正确。

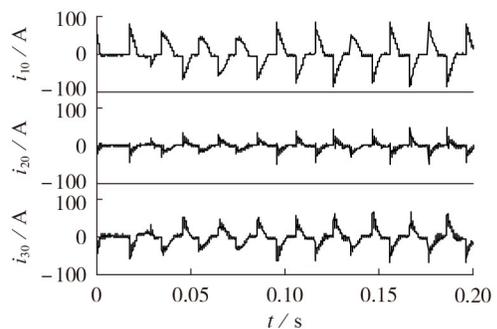


图3 低过渡电阻间歇性弧光接地故障零序电流波形

Fig.3 Zero-sequence current waveform under intermittent arc grounding fault with low transition resistance

在线路1首端设置高过渡电阻($R_g=1080\ \Omega$)接地故障,0.08 s时刻中性点切换至电阻接地方式,切换后4个周期内故障线路的首端零序电流与切换前4个周期内零序电压的零序相位差如图4所示。动模

试验结果表明,故障线路的零序相位差在 100° 左右,满足式(7)所示的判据,因此本文方法能够正确选线。

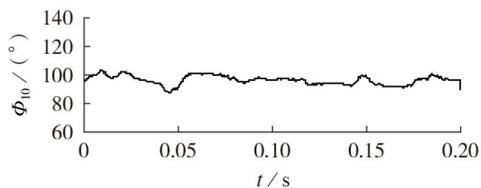


图 4 多模接地控制前后零序相位差动模试验结果

Fig.4 Dynamic model test results of zero-sequence phase difference before and after multi-mode grounding control

6 结论

为满足海洋核动力平台电网在不同接地故障条件下均需要快速准确选线的要求,本文提出协同多模接地控制的接地故障选线方法,并得出以下结论:

1)发生金属性或低过渡电阻接地故障时,采用基于SFB零序能量选线方法,剔除系统等值感抗高于容抗的高频频带零序能量,能够保证选线结果的可靠性和保护的灵敏度;

2)根据SFB零序能量阈值判定系统发生高过渡电阻接地故障,短时切换至小电阻接地方式后,采用零序相位差选线方法,其可与多模接地控制策略有效配合,且采用就地化保护判据模式,无需进行线路间的比较,有效解决了高过渡电阻接地故障下选线保护灵敏度低的问题,耐过渡电阻能力达 6057Ω ;

3)MATLAB / Simulink 仿真分析及动模试验数据分析结果表明,本文所提方法在不同故障场景下均能够准确选线,具有较强的工程实用性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, et al. Generator stator windings ground fault diagnosis for generator-grid directly connected system of floating nuclear power plant[J]. Energy Reports, 2021, 7: 460-469.

[2] 王义凯, 尹项根, 乔健, 等. 海洋核动力平台发电机定子绕组单相接地故障风险分析与实时定位[J]. 电力自动化设备, 2022, 22(4): 178-183.

WANG Yikai, YIN Xianggen, QIAO Jian, et al. Risk analysis and real-time locating of single-phase grounding fault of generator stator winding for offshore nuclear power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 22(4): 178-183.

[3] 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.

[4] 刘宝稳, 曾祥君, 张慧芬, 等. 注入电流馈线分布特征及其在接地故障检测中的应用[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2731-2740.

LIU Baowen, ZENG Xiangjun, ZHANG Huifen, et al. Distribution model of injection current in feeder and its application in single phase to ground fault detection[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2731-2740.

[5] QIAO Jian, YIN Xianggen, WANG Yikai, et al. A multi-terminal traveling wave fault location method for active distribution network based on residual clustering[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131: 1-13.

[6] 郭小定, 刘伟, 肖华根, 等. 基于经验小波分析的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 73-79.

GUO Xiaoding, LIU Wei, XIAO Huagen, et al. Single phase grounding fault line selection method based on EWT for small current grounding system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 73-79.

[7] 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(S2): 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.

[8] 马格士. 配电网中性点小电流接地方式与选线原理决策方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.

MA Getu. Decision method for small current neutral grounding mode and fault line selection in distribution network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.

[9] 方毅, 薛永端, 宋华茂, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.

FANG Yi, XUE Yongduan, SONG Huamao, et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5636-5645, 5921.

[10] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451-457.

HE Benteng, HU Weijin. A new principle to detect the grounded line in a neutral point indirectly grounded power system based on the energy function[J]. Journal of Zhejiang University(Natural Science), 1998, 32(4): 451-457.

[11] 朱丹, 贾雅君, 蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 75-78.

ZHU Dan, JIA Yajun, CAI Xu. Transient energy to detect single-phase earthing fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 75-78.

[12] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.

XUE Yongduan, FENG Zuren, XU Bingyin, et al. Earth fault protection in non-solidly earthed network based on transient zero sequence current comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.

[13] 尹项根, 王义凯, 李鹏, 等. 海洋核动力平台电网安全问题及保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 9-17.

YIN Xianggen, WANG Yikai, LI Peng, et al. Study on security problems and protection technologies of the floating nuclear power plant grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 9-17.

[14] WANG Yikai, YIN Xin, XU Wen, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power platform grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-10.

[15] 李建蕊, 李永丽, 王伟康, 等. 基于零序电流与电压相位差变化的灵活接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2021, 45(12):

- 4847-4855.
LI Jianrui, LI Yongli, WANG Weikang, et al. Fault line detection method for flexible grounding system based on changes of phase difference between zero sequence current and voltage [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4847-4855.
- [16] 任伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电阻接地系统高阻接地故障纵联差动保护[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3276-3282.
REN Wei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Longitudinal differential protection of high resistance grounding faults in low-resistance grounding system [J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3276-3282.
- [17] 王义凯, 谭力铭, 尹项根, 等. 基于电压相量差的发电机GCB失灵保护新原理[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 182-188.
WANG Yikai, TAN Liming, YIN Xianggen, et al. Novel principle of generator circuit breaker failure protection based on voltage phasor difference [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 182-188.
- [18] 王玉梅, 董洋洋, 刘兴艳. 基于SFB和相关分析法的小电流接地故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 48-51.
WANG Yumei, DONG Yangyang, LIU Xingyan. Selection of faulty line based on SFB and correlation analysis for small-current neutral grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 48-51.
- [19] 刘远龙, 刘伟生, 王鹏玮, 等. 基于频带有功功率系数的接地故障方向保护方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(1): 76-86.
LIU Yuanlong, LIU Weisheng, WANG Pengwei, et al. Earth fault protection method based on frequency band power factor [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(1): 76-86.
- [20] 薛永端, 任伟, 唐毅, 等. 基于热稳定原理的中性点小电阻接地系统间歇接地故障保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 122-130.
XUE Yongduan, REN Wei, TANG Yi, et al. Intermittent grounding fault protection based on principle of thermal stability for low resistance neutral grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 122-130.
- [21] 胡子谅. 船舶电气的接地故障及其对应处理方法[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(5): 148-149.
HU Ziliang. Discussion on grounding fault of ship electrical and its corresponding treatment method [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(5): 148-149.
- [22] 任伟, 薛永端, 杨帆, 等. 中性点不接地配电网电弧接地故障建模与分析[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 705-712.
REN Wei, XUE Yongduan, YANG Fan, et al. Modeling and analysis of arc grounding faults in isolated neutral distribution network [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 705-712.

作者简介:



王义凯

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

尹项根(1954—),男,教授,博士生导师,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: xgyin@hust.edu.cn);

乔健(1997—),男,博士研究生,通信作者,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: 906982507@qq.com)。

(编辑 任思思)

Grounding fault line selection method coordinated with multi-mode grounding control for power grid of marine nuclear power platform

WANG Yikai^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, QIAO Jian^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, LU Qinghui^{1,2}, WU Dali³

- (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. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

Abstract: Power system of marine nuclear power platform contains sensitive loads of nuclear reactor, fast and accurate fault line selection and cutting methods are required under different grounding fault conditions. To avoid misjudgment of fault lines due to the insignificant difference of the zero-sequence current distribution between different lines under certain high-frequency bands, a line selection method based on zero-sequence energy of SFB (Selected Frequency Band) is proposed. The zero-sequence energy threshold is used to identify grounding fault with high transition resistance. For grounding faults with high transition resistance, in order to avoid line selection misjudgment caused by current transformer polarity measurement errors, the neutral point is switched to low-resistance grounding mode coordinated with multi-mode grounding control. Then, the zero-sequence voltage of the system and the zero-sequence current of the healthy line decrease, while the zero-sequence current of the fault line increases, so the fault line can be predicted. To avoid the measurement error caused by the small amount of electricity in the primary side of transformers, the phase difference between the system's zero-sequence voltage before switching and the predicted fault line's zero-sequence current after switching is used to construct the local line selection criterion. Results of simulation and dynamic model test show that the proposed method can correctly select the fault line in different fault conditions and meet the practical requirements of the field.

Key words: marine nuclear power platform; multi-mode grounding control; SFB; zero-sequence energy; phase difference

附录 A

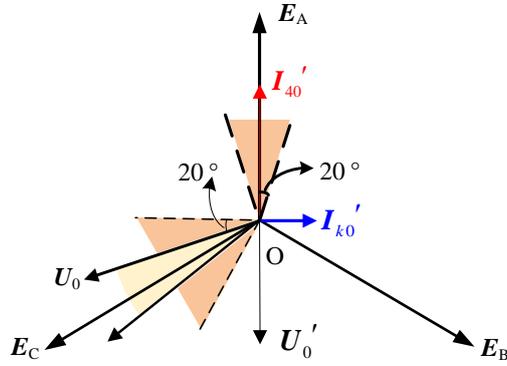


图 A1 零序电流与零序电压相量图

Fig.A1 Phase diagram of zero-sequence current and zero-sequence voltage

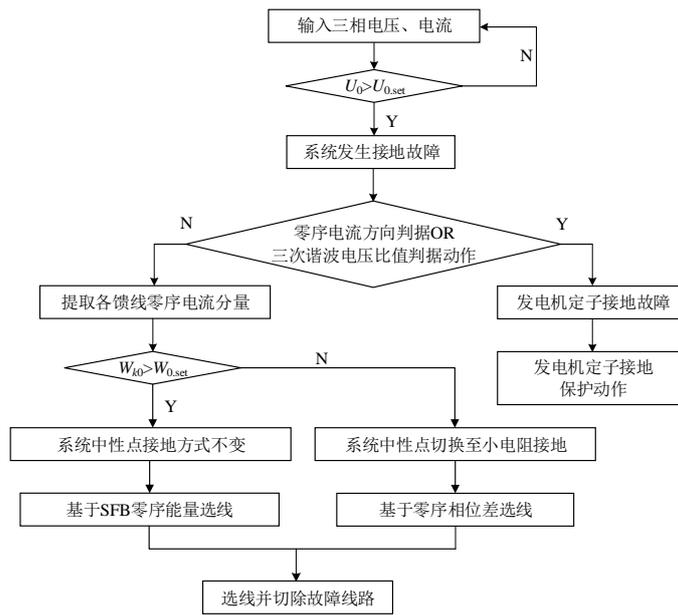


图 A2 接地故障检测与选线保护流程

Fig.A2 Flowchart of grounding fault detection and protection

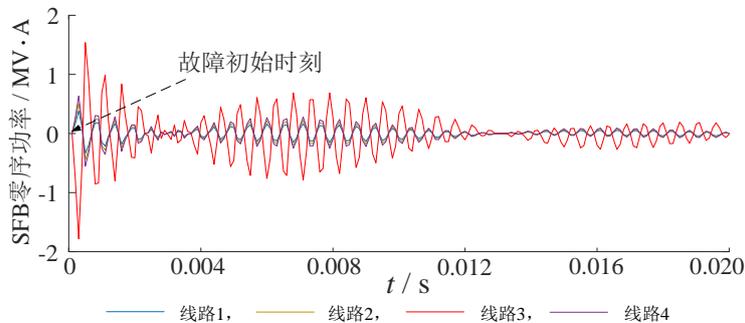


图 A3 各线路 SFB 零序功率

Fig.A3 Zero-sequence power in SFB for each line

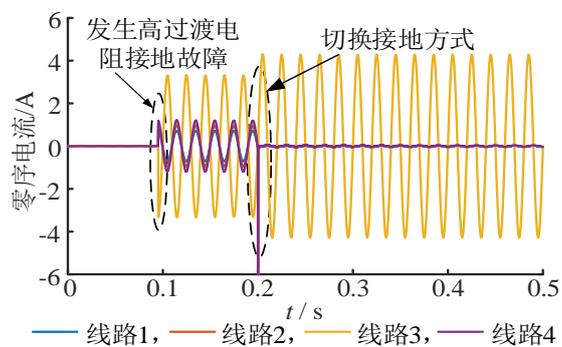


图 A4 多模接地控制前后各线路的首端零序电流

Fig.A4 Zero-sequence current at each line before and after the multi-mode grounding control

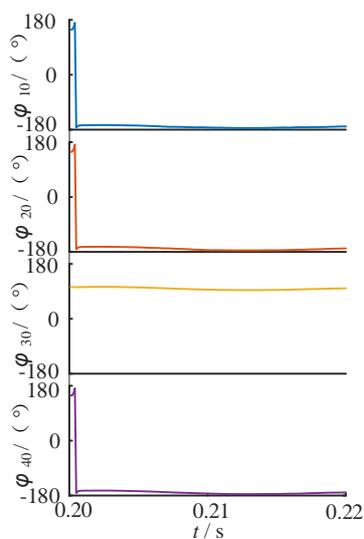


图 A5 多模接地控制前后各线路零序相位差

Fig.A5 Zero-sequence phase difference for each line before and after multi-mode grounding control

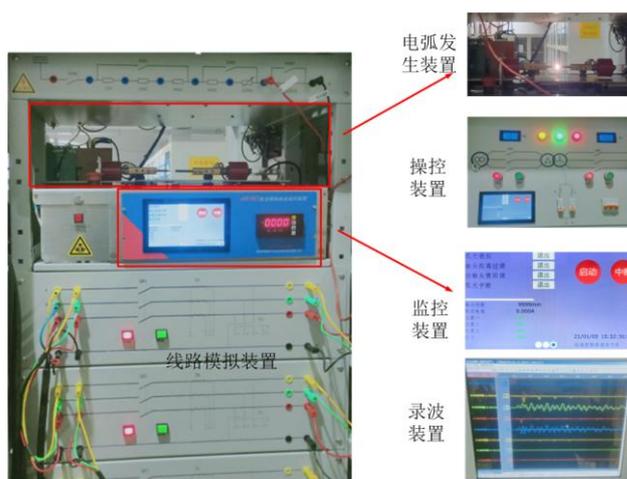


图 A6 灵活组网式配电系统物理模型及弧光接地试验平台

Fig.A6 Physical model of flexible network distribution system and arc light grounding test platform

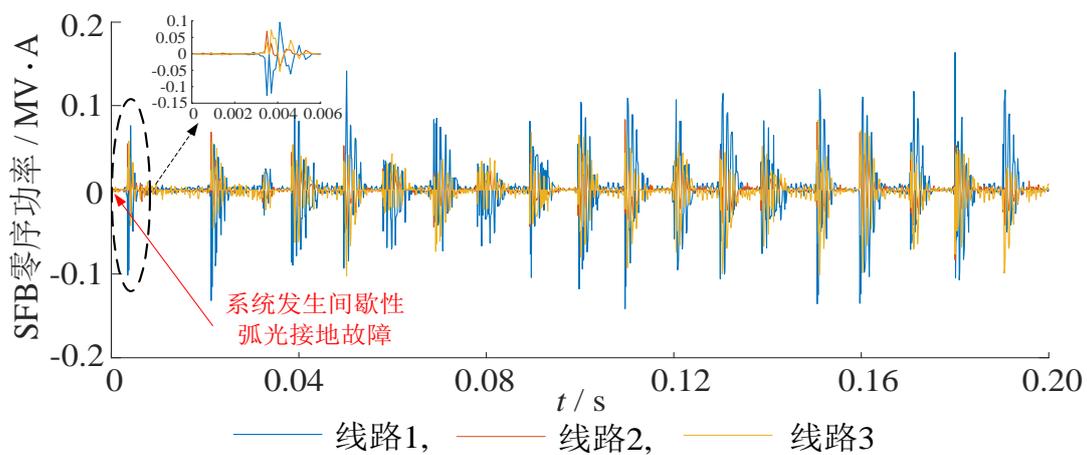


图 A7 线路 1 首端发生金属性接地故障时各线路 SFB 零序功率

Fig.A7 Zero-sequence power in SFB of each line when terminal of Line 1 is under metal ground fault