DOI:10.13882/j.cnki.ncdqh.2024.05.012

220 kV 线路空载合闸工频电压升高、母线侧隔离开关 A 相接地故障分析

孙德洲[1*]，张全元[2]，董占翔[1]，梁志磊[3]，亢歆童[4]

（1. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司，辽宁 大连 116400；2. 国网湖北省电力有限公司超高压公司，湖北 武汉 430070；3. 山东泰开高压开关有限公司，山东 泰安 271000；4. 武汉理工大学，湖北 武汉 430070）

摘要：工频电压升高到1.4倍运行在电网中属罕见，各等级电网电压由各级调度按所辖范围负责调整，电网在正常运行时不可能出现工频电压升高现象。本案例属于新设备投产，其220 kV母线电压不在电网调度监视点范围，工频电压升高运行9 min31 s，同时由于母线侧隔离开关合闸不到位，致使母线侧GIS隔离开关气室爆炸；由于线路并联电抗器匝间保护误整定，导致该保护动作。

关键词：工频过电压；高频电流；衰减；波形；电抗器　　**中图分类号：**TM727

Analysis of No-load Closing Frequency Voltage Rise and Bus-side Disconnect Switch Phase A Ground Faults on 220 kV Line

SUN Dezhou[1*], ZHANG Quanyuan[2], DONG Zhanxiang[1], LIANG Zhilei[3], KANG Xintong[4]

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Dalian Power Supply Company, Liaoning Dalian 116400, China; 2. Retired staff of State Grid Hubei Electric Power Co. Ltd. UHV Company, Hubei Wuhan 430070, China; 3. Shandong Taikai High Voltage Switchgear Co., Ltd. Shandong Tai'an 271000, China; 4. Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430070, China)

Abstract: Frequency voltage rise to 1.4 times operation in the power grid is rare, all levels of grid voltage by all levels of scheduling according to the jurisdiction of the scope of responsibility for the adjustment, the grid in normal operation is not likely to be the phenomenon of frequency voltage rise. This case belongs to the new equipment put into operation, its 220 kV bus voltage is not in the range of grid scheduling monitoring point, industrial frequency voltage rise operation 9 minutes 31 seconds, at the same time, due to the bus-side isolation switch closing is not in place, resulting in the bus-side GIS isolation switch gas chamber explosion; due to the line shunt reactor turn-to-turn protection error adjustment, resulting in the action of the protection.

Keywords: industrial frequency overvoltage; high frequency current; attenuation; waveform; reactor.

0 引言

2021 年 12 月 6 日 14:12:19，某海上风电场 220 kV 线路 H 线充电（1 年前充过电，停运 1 年），所有主保护退出运行。充电运行 9 min31 s 后，A 相 22111 隔离开关发生单相接地故障，2 条电源线路向故障点供短路电流分别为 12.5 kA、3.5 kA。单相接地后 34 ms，H 线路并联电抗器匝间保护动作（误动），跳开该线路 2211 断路器。由于故障点在 22111 处（22111 隔离开关气室爆炸），故障未切除，继续由 S 线和电网侧 G 线供短路电流。故障后 51.6 ms，G 线接地距离Ⅱ保护动作（整定 0.2 s）切除 G 线。S 线所接 2 座海上风电场与系统解列，风机保护检测到电网侧掉电，风机保护动作停机。

当 2211 断路器合闸后，现场有明显的放电异音，H 线海底电缆末端外皮对抱箍放电。故障线路 H 线为 220 kV 海底电缆，线路全长 23.637 km，空载运行；线路并联电抗器中性点直接接地，对侧（海上）

收稿日期：2023-08-13；**修回日期：**2023-12-14

断路器在分闸位置，S 线为临时接入 220 kV 母线运行线路。

1 系统运行方式

故障风电场系统接线方式及参数如图 1 所示。G 线长度 16.064 km，架空线路；S 线为混合线路 0.128 km，S 线路对侧母线接 2 条海底电缆与 2 座风电场连接，长度分别为 28.036 km、23.829 km，均并有三相线路电抗器。

2 保护及整定值

H 线所有主保护退出运行。

在 H 线 2211 断路器本身加装 2 套临时电流保护：电流速断保护，整定值为 3 600 A，0 s；过流保护，整定值为 800 A，0.3 s。临时电流速断保护可以保护 H 线路全线，临时过流保护可以保护海上风场 2 台主变压器本体。线路临时保护接 2211 断路器 TA5P30 二次绕组。

G 线电网侧变电站微机后备保护按第二套定值投入，接地距离Ⅱ段时限 0.2 s。

本变电站 220 kV 母线 2 套差动保护停用，H 线 TA 接入 220 kV2 套母线差动及失灵保护回路后不投。

H 线用 2211 断路器对线路进行 3 次冲击合闸试验。

3 H 线路充电 220 kV 母线电压及 H 线电流波形分析

3.1 压缩波形分析

如图 2 所示，2211 断路器合闸后 220 kV 母线电压 U_A、U_B、U_C、$3U_0$ 和 H 线路 I_A、I_B、I_C、$3I_0$ 电流压缩波形、2211 断路器三相合位开关量。合闸时出现了涌流，且三相涌流出现时间顺序为 A、C、B，三相不同期时间约为 2～3 ms。合闸后三相均采集到高频放电电流，H 线线路电流取自 2211 GIS 靠线路侧 TA：0.5S 二次绕组。

3.2 H 线路涌流波形分析

如图 3 所示，2211 断路器合闸后，220 kV 母线电压三相电压前一个周波出现了谐波分量，合闸后三相出现了过电压，其过电压倍数：

A 相 1.15 倍、B 相 1.26 倍；C 相 1.15 倍；$3U_0$ 分量为高频衰减分量，过电压倍数为 1.4 倍。

H 线三相出现高频涌流；A 相幅值小，时间长；B、C 相幅值大，产生的原因是断路器投电缆线路

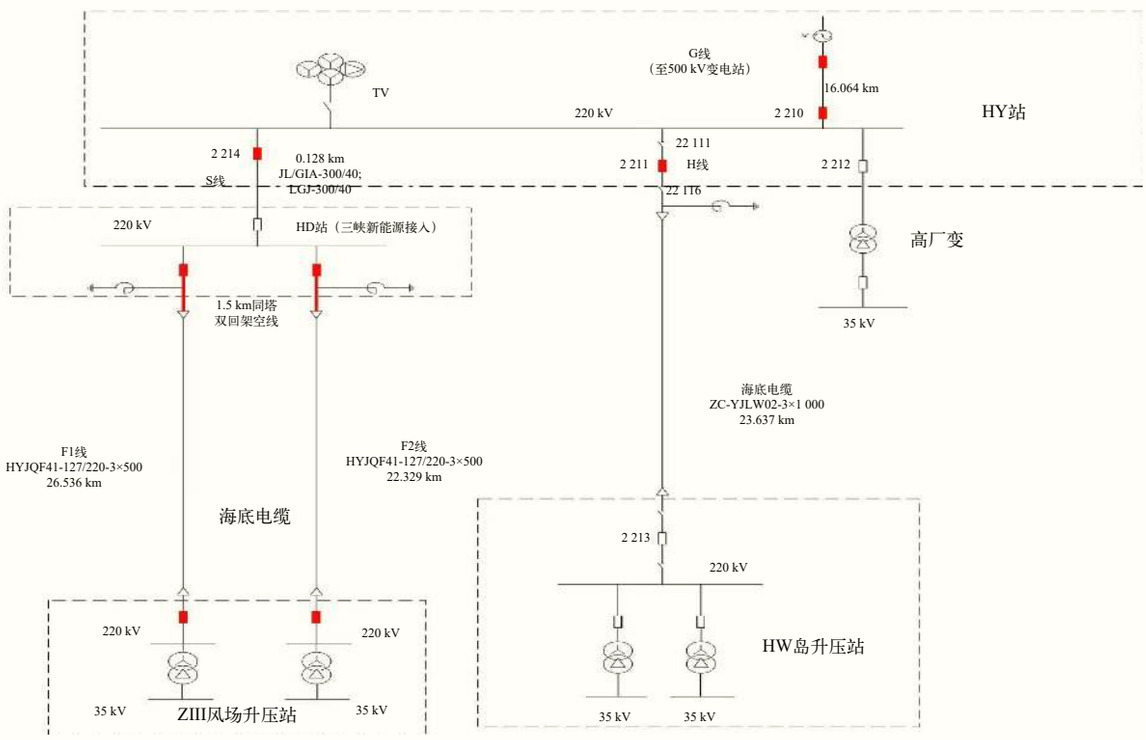

图1 故障风电场系统接线及线路参数

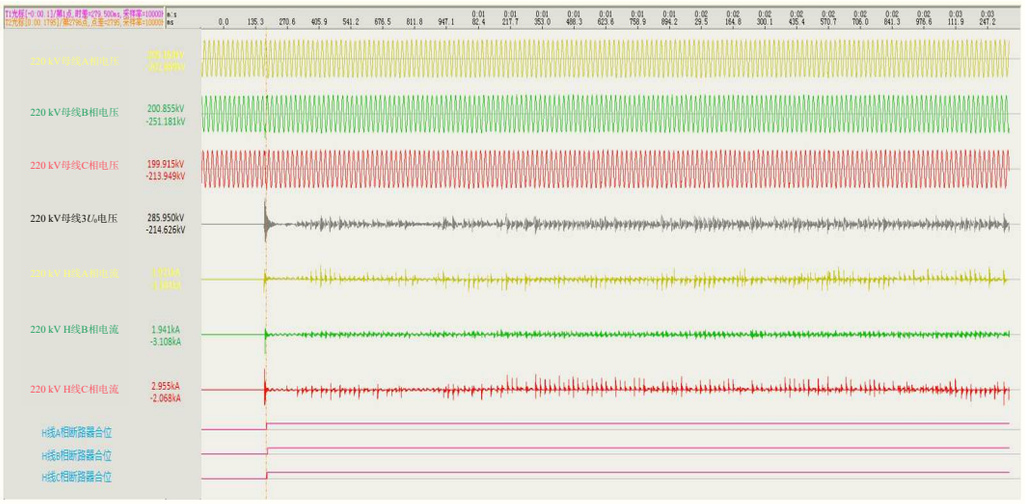

图2　H 线充电时 220 kV 母线电压及 H 线路电流压缩波形和 2211 断路器开关量

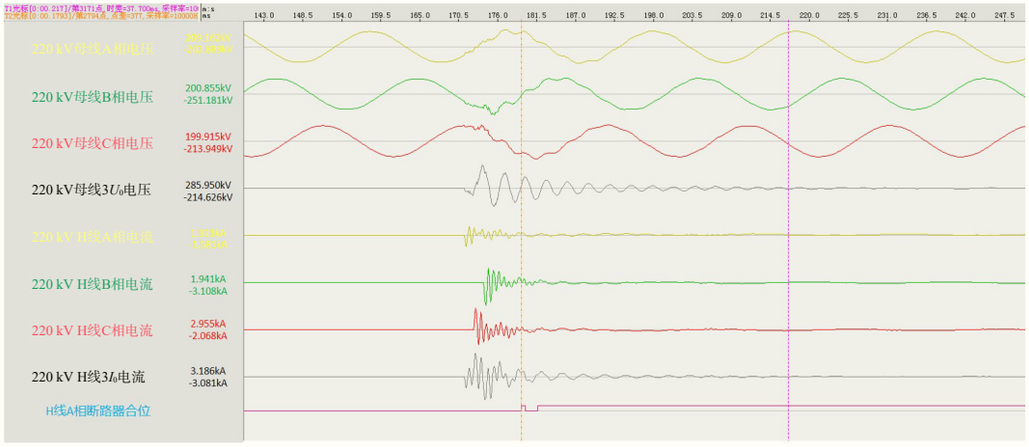

图3　H 线 2211 断路器合闸时 220 kV 母线电压和 H 线路涌流波形图

（容性设备，如同投背靠背并联电容器，由 G 线和 S 线提供，S 线虽然有线路并联电抗器，但采用的是欠补偿，在投 H 线路仍有容性电流注入 H 线路）产生。

$3I_0$ 涌流幅值最大，衰减时间最长。

3.3　H 线 2211 断路器合闸后运行期间 220 kV 母线电压及 H 线路电流压缩波形分析

如图 4 所示，220 kV 母线三相电压为 50 Hz 正弦电压，出现了过电压；$3U_0$ 为间断高频电压分量。

H 线三相和 $3I_0$ 都有高频电流，A 相幅值大。原因是由于 22111 隔离开关合闸不到位，造成有间断高频放电现象。

3.4　H 线 22111 隔离开关 A 相接地故障时 220 kV 母线电压和 H 线路高频电流波形分析

如图 5 所示，22111 隔离开关 A 相接地，A 相电压经低幅值高频振荡后衰减为 0。故障时 B、C 两相电压出现了谐波分量，$3U_0$ 出现高频振荡。故障后 34 ms，H 线路并联电抗器匝间保护动作（误动），跳开该线路 2211 断路器，跳闸前 A 相电压 1.24 倍、B 相电压 1.47 倍、C 相电压 1.46 倍、$3U_0$ 电压 2.11 倍。

22111 隔离开关 A 相接地，H 线 A 相电流突然增大，H 线 A 相电流（2211 断路器靠线路侧 TA）一次值 2.45 kA，A 相电流是高频电流，电抗器匝间保护动作后，2211 断路器三相跳闸，H 线故障切除后电流衰减为 0。B、C 两相电流同样为高频电流，本图对应 270.4 ms 后为 0，故障时 $3I_0$ 增大，故障切除后 $3I_0$ 衰减为 0，270.4 ms 2211 断路器由合位变分位。

H 线 22111 隔离开关 A 相接地故障时，220 kV

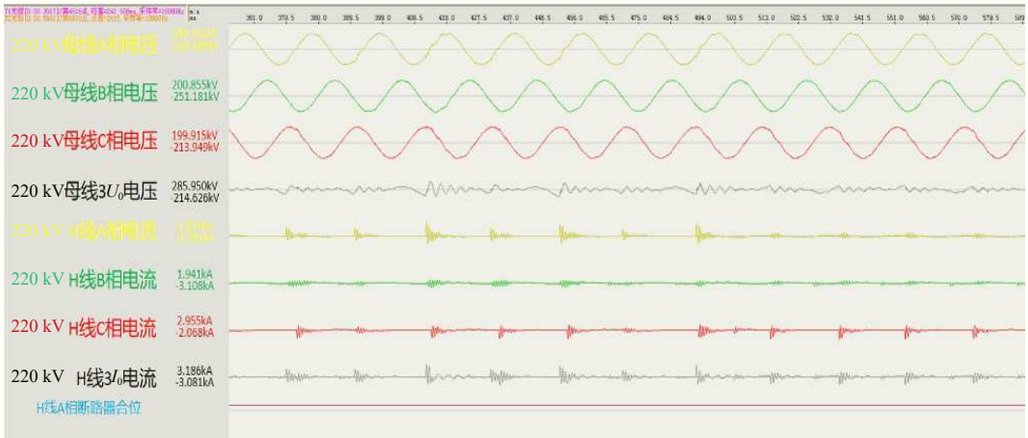

图4　H 线 2211 断路器合闸后运行期间 220 kV 母线电压和 H 线路流压缩波形图

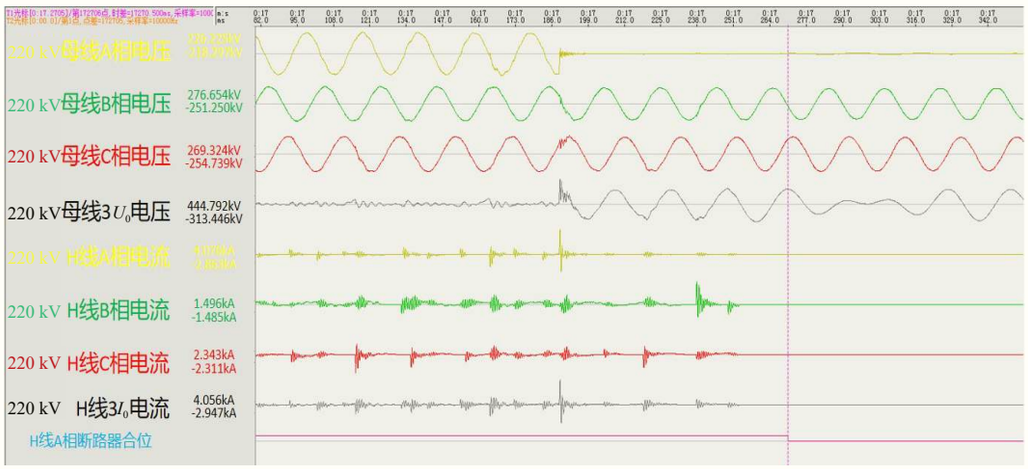

图5　H 线 22111 隔离开关 A 相接地故障时 220 kV 母线电压和 H 线路高频电流波形图

母线电压和 H 线路高频电流横坐标放大波形如图 6 所示。

4　H 线路充电 220 kV 母线电压及 H 线并联电抗器波形分析

4.1　压缩波形分析

如图 7 所示，22111A 相隔离开关接地，A 相电压为零，此时线路并联电抗器匝间保护动作，跳 2211 断路器。2211 断路器跳闸后故障没有切除，G 线接地距离Ⅱ段动作跳开 G 线电源侧断路器后 B、C 相母线电压为零。220 kV 母线电压取自母线 TV，$3U_0$ 取自 TV 开口三角。

线路并联电抗器三相电流值不相等，在 A 相接地电抗器保护动作后，A 相电流变小，原因是 22111 A 相隔离开关存在放电；B、C 相电流及 $3I_0$ 经振荡逐渐减小（电感电流不能突变）。线路并联电抗器电流和零序电流在整个过程中不是标准正弦电流。

4.2　展开波形分析

如图 8 所示，电流取自并联电抗器高压侧套管 TA，2211 断路器合闸后，220 kV 母线电压前一个周波出现了谐波分量，合闸后三相出现了过电压。$3U_0$ 分量在开始出现高幅值高频电压分量，并逐渐衰减，之后出现幅值较低且不等的高频分量。

合闸时，线路并联电抗器 A 相电流（正弦）偏向横坐标负半轴，B、C 相电流偏向横坐标正半轴。原因是工频电压升高造成电抗器励磁特性进入饱和区。

由于并联电抗器的电抗大，所以三相电流不大（电抗器电流不能突变），$3I_0$ 分量为非正弦量。

4.3　电抗器电流及母线电压衰减波形分析

如图 9 所示，2211 断路器跳闸后，继续由 G、

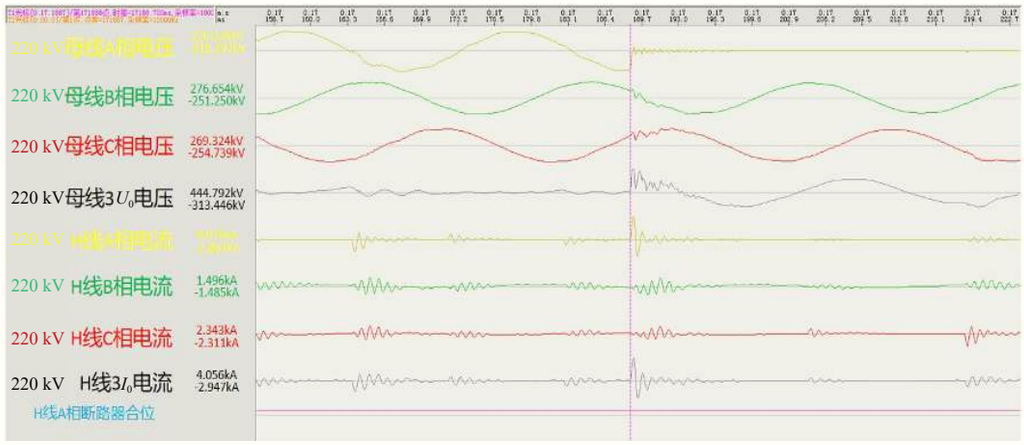

图6　H 线 22111 隔离开关 A 相接地故障时横坐标放大 220 kV 母线电压和 H 线路高频电流波形

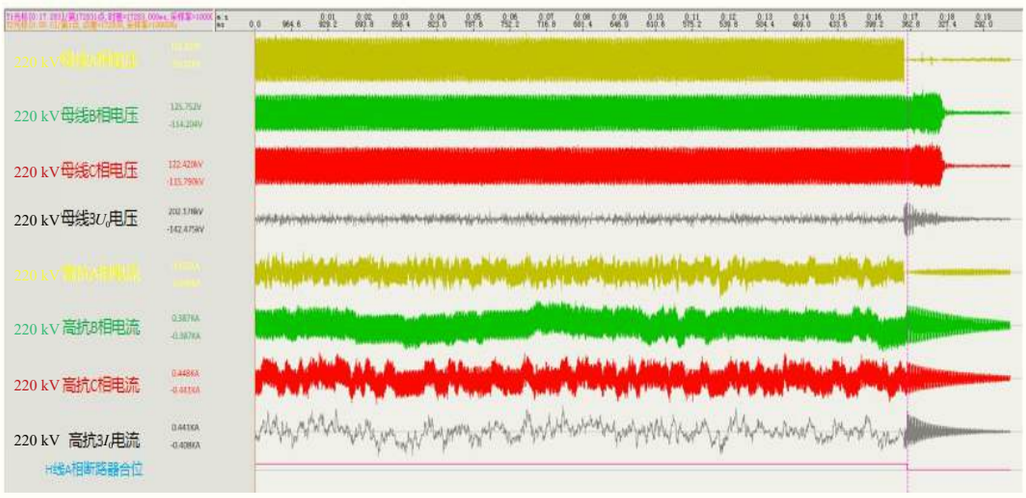

图7　H 线充电时 220 kV 母线电压及线路并联电抗器电流压缩波形图

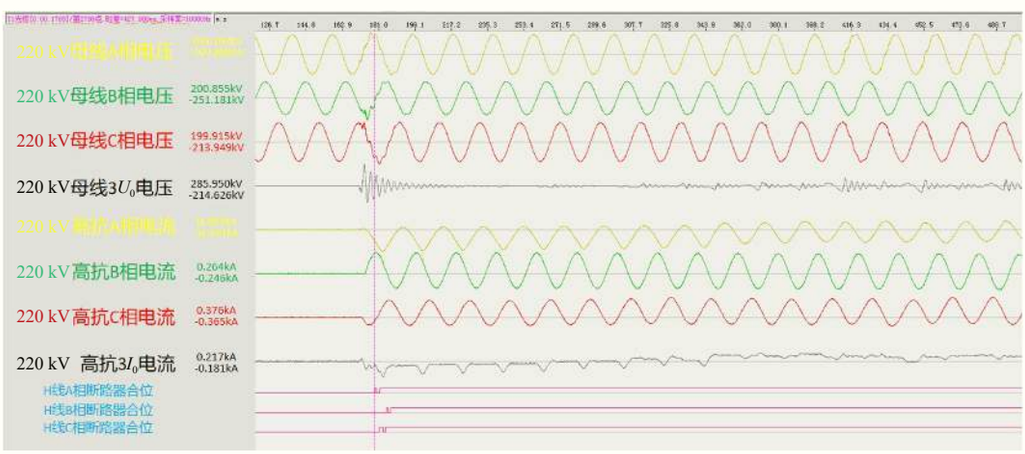

图8　H 线充电时 220 kV 母线电压及线路并联电抗器电流展开波形

S 线路向故障点提供短路电流，故障后 51.6 ms，G 侧接地距离Ⅱ段保护动作（整定 0.2 s）切除故障。B、C 相电压在 22111 隔离开关故障切除后出现的过电压比之前运行时更高，通过计算可知，达到

1.47 倍。G 线断路器跳闸后由于 S 线有电缆线路，出现 700 ms 衰减过程。由于电抗器中电流不能突变，2211 断路器跳闸后，线路并联电抗器 B、C 相电流经过了较长时间的衰减。

故障切除超过 1 s 后 220 kV 母线 B、C 相电压逐渐衰减为 0，这一过程是 S 线路风机仍在继续运行，最后由风机保护动作将机组从电网切除。

5　G 线、S 线路故障电流波形分析

5.1　H 线 2211 断路器跳闸后电网 G 线和临时线路 S 线向故障点提供的短路电流波形分析

如图 10 所示，G 线、S 线电流取各自断路器 TA 电流。因接地点在 G 线、S 线区外，在 22111 A 相隔离开关接地时，G 线 B、C 相流过的是由故障点 $3U_0$ 产生的零序电流分量（22111A 相接地，相当于母线 A 相故障，G 线、S 线一侧变压器中性点接地，S 是小电源）。由图 10 可知，G 线 B、C 两相电流基本同相，与故障相和 $3I_0$ 反向。

S 线在故障时三相电流相位基本相同，以零序分量为主，并与 $3I_0$ 同向，A 相在故障时有高频分量。

故障点的短路电流为 G 线、S 线路的故障电流相量和。

A 相电流计算值与波形图中标注的故障电流值有误差。图中标注的 G 线是 12.494 kA，S 线标注的是 3.54 kA。

G 线路接地距离Ⅱ段整定 0.2 s，故障波形 12 个周波、245 ms 为接地距离Ⅱ段整定时间 + 断路器固有分闸时间。G 线跳闸后，S 线（运行风场）与电网解列，但风机没有立即停运，因此继续向故障

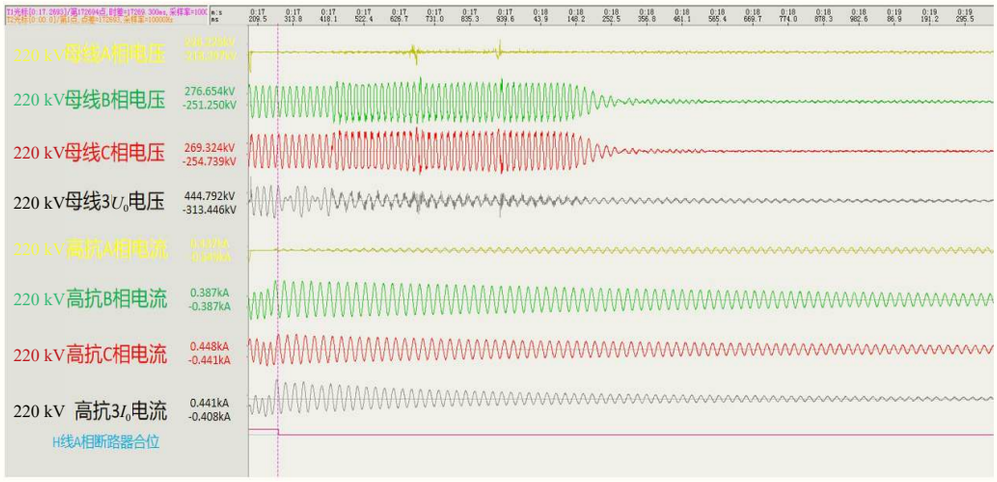

图9　H 线 2211 断路器跳闸后 220 kV 母线电压及并联电抗器流波形图

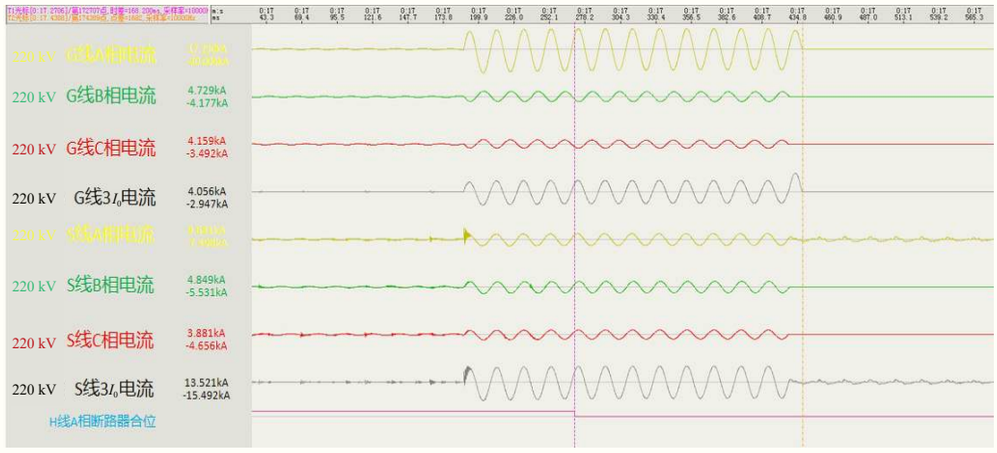

图10　H 线 2211 断路器跳闸后电网 G 线和临时线路 S 线向故障点提供的短路电流波形

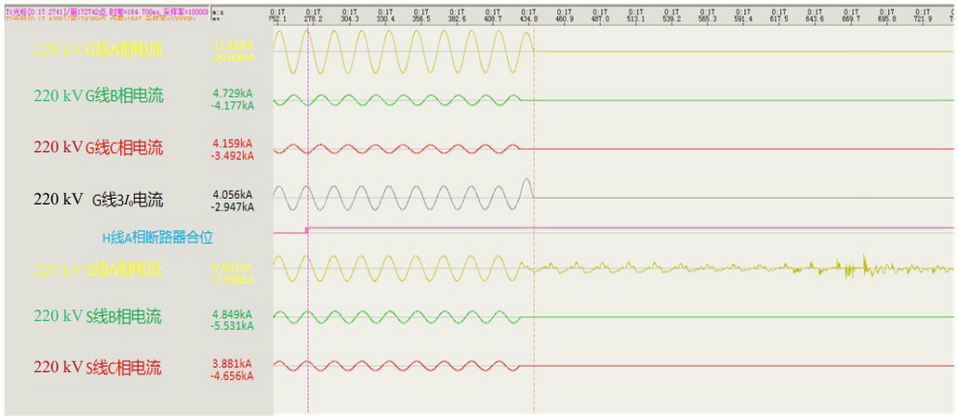

图11　G 线断路器三相跳闸后 S 线继续向 22111 隔离开关供短路电流波形图

点 22111 隔离开关 A 相送短路电流，此时故障的零序分量消失，电流很小，直到风机停运。

5.2　G 线断路器三相跳闸后 S 线继续向 22111 隔离开关供短路电流波形分析

如图 11 所示，在 G 线接地距离Ⅱ段动作跳开 G 线断路器，切断电源侧向故障点提供的短路电流，但由于 S 线路风机仍在运行，并且已与系统解列，S 线 A 相继续向故障点提供的短路电流不是 50 Hz 正弦量。而由于 22111 隔离开关 B、C 相没有与 GIS 接地，因此没有故障电流。S 线路 A 相电流最后由风机保护动作将 S 场内风电机组从电网切除后消失。

6　故障原因及动作过程分析

引起工频电压升高运行 9 min 31s 的直接原因是容性电流过大；造成设备故障的原因是 22111 隔离开关合闸不到位，22111A 相接地；导致线路并联电抗器匝间保护误动作的原因是该保护误整定。

14:12:19，220 kV H 线 2211 断路器合闸→由于 S 线及 H 线共同作用向 H 线提供很大的涌流→造成 H 线合闸时产生很大的高频涌流→电缆线路对地电容大→引起 H 变电站母线电压产生“容升效应”→工频电压升高 1.4 倍左右→2211 断路器合闸后同时三条线路都出现了局部放电现象→高频放电电流，以 H 线最严重→空载运行 9 min 31 ms→22111 隔离开关 A 相接地→22111A 相发生单相接地后 34 ms →H 线路并联电抗器匝间保护动作→跳开 H 线路 2211 断路器→由于故障点在 22111 在母线侧故障未切除→继续由 S 线和电网侧 G 线供短路电流→故障后 51.6 ms，G 侧接地距离Ⅱ段保护动作（远后备整定 0.2 s）切除 G 线→S 线所接 2 座海上风电场与电力系统解列→风电场通过 S 线→继续向 22111 隔离开关 A 相提供短路电流→风机自己的保护检测到电网侧掉电→最后风机保护动作。

7　保护动作分析

7.1　线路并联电抗器匝间保护动作分析

A 相发生单相接地后 34 ms，H 线路并联线路并联电抗器匝间保护动作，跳开该线路 2211 断路器。该线路上并联电抗器中性点直接接地，接地电抗值为 0 Ω，而继电保护定值单上中性点电抗阻值为 1 506 Ω，由于匝间保护动作值需要参考中性点电抗器阻抗，导致动作范围增大，满足匝间保护动作条件，线路并联电抗器匝间保护动作，跳 2211 断路器，属于保护误整定。

7.2　G 侧接地距离Ⅱ段保护动作分析

故障后 51.6 ms，G 侧接地距离Ⅱ段保护动作（远后备整定 0.2 s）切除故障，保护动作正确。

7.3　风机保护动作分析

G 线路接地距离Ⅱ段保护动作跳闸后，S 线 A 相电流及 H 变电站 220 kV 母线 B、C 相仍有电压，且出现电压进一步升高，由 S 场风机保护动作停运。

作者简介

孙德洲　（1976— ），男，大专，工程师，高级技师，主要工作方向：变电站设备现场运维，E-mail：763320112@qq.com。

张全元　（1959— ）　女，本科，高级工程师，主要工作方向：变电专业培训、事故分析、电力系统理论研究，E-mail：hbzqyf@163.com。

（责任编辑：张峰亮）