

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.024

智能综合接地消弧系统的研究

李继刚¹, 徐肃¹, 董昭阳¹, 王飞¹, 马可¹, 孙嘉宁², 胡青山²

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电分公司, 内蒙古 包头 014030; 2. 广州市宁志电力科技有限公司, 广州 511400)

摘要: 针对消弧线圈存在灭弧不彻底, 选线准确率低等弊端, 研究了一种消弧线圈叠加接地故障相经小电抗主动接地灭弧的综合接地消弧系统和产品, 通过分析研究该系统单相接地零序回路的电量的变化特征, 创新了将接地故障相经小电抗主动接地灭弧技术和选线方法, 产品经过仿真及10 kV综合接地消弧系统真型接地试验等, 验证了其具有全频率可靠灭弧性能, 选线准确率可大于99%的技术优势。

关键词: 综合接地; 零序回路; 主动接地灭弧及选线; 转移残流

Research on Intelligent Integrated Grounding Arc Suppression System

LI Jigang¹, XU Su¹, DONG Zhaoyang¹, WANG Fei¹, MA Ke¹, SUN Jianing², HU Qingshan²

(1. Baotou Power Supply Bureau of Inner Mongolia Power Grid Co., Ltd., Inner Mongolia Baotou 014030, China;

2. Guangzhou Ningzhi Electric Power Science Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

Abstract: In view of such shortcomings as incomplete arc suppression and low accuracy of line selection of arc suppression coil, an integrated grounding arc suppression system and products, which combines an arc compression coil with active arc extinguishing of the faulted phase via a small reactor, are developed. The arc extinguishing technology and the line selection method of the active grounding through the small reactance are innovated by analyzing and studying the changing characteristics of the electric quantity of the zero-sequence loop of the single-phase grounding system. It is proved by simulation and full-scale grounding test of 10 kV integrated grounding arc suppression system that the product has such technical advantages as reliable arc suppression performance at full frequency, and the accuracy of line selection is more than 99%.

Key words: integrated grounding; zero sequence circuit; active grounding arc suppression and line selection; transfer residual current

0 引言

单相接地故障是电网发生概率最高的故障(约占80%)^[1], 保护必须对此正确识别和快速处理^[2], 其最基本要求是: 可靠熄灭接地电弧、正确选出接地线路。

中性点经消弧线圈接地的方式可以有效的减少单相接地时的接地故障电流, 还可以显著减小故障相电压的恢复速度, 减小重燃的可能性, 并限制了非故障相工频电压的升高^[3-4]。但消弧线圈的缺陷是: ①不能消除间歇性电弧过电压, 尤其是接地瞬

间电弧过电压^[5]; ②可使缩短接地故障燃弧时间, 减少重燃次数, 达到熄弧目的, 而不能根除接地电弧的产生^[5]; ③消弧线圈只能补偿接地电流中的无功电流(电容电流)的工频分量, 不能补偿其谐波分量, 并且不能补偿有功分量^[4]; ④补偿造成选线准确率^[6]; ⑤消弧线圈为躲过自身造成的中性点不平衡电压, 一般补偿启动值为零序电压大于相电压的15%^[7], 因此存在对高阻接地故障的判断及补偿盲区。

随着电力电子技术和计算机控制技术的发展, 针对上述存在的问题, 近年来国内外出现了两类柔性消弧技术, 一是从电流补偿入手, 通过逆变器从

收稿日期: 2025-10-19; 修回日期: 2025-12-22

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目资助(nmgdlkxj2022009)。

Project Supported by Science and Technology Project of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. (nmgdlkxj2022009).

消弧线圈二次侧注入不同频率的反相电流, 补偿接地故障的有功、无功和谐波电流, 如基于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的消弧接地补偿装置、柔性零残流消弧线圈等^[8]。还有一类用电力电子的方法从控制零序电压入手, 借鉴配电网无功电压柔性控制的技术思路^[9], 基于脉宽调制(PWM)有源逆变器向配电网注入零序电流, 控制零序电压, 使故障点恢复电压为零, 促使瞬时接地故障实现消弧^[10]; 经一定延时, 控制电流注入, 增大故障残流, 精确测量零序电压和各馈线零序电流变化量, 实现接地故障的动态感知和保护。这两种柔性消弧方法都需要精准测控接地故障全电流, 实现复杂, 尚未进入工业应用。

通过深入理论研究、仿真试验、样机试制、动态模拟试验^[11]、挂网试运行等技术路线, 创造形成一种智能综合接地消弧及选线技术产品: 在消弧线圈接地系统, 将接地故障相经小电抗主动接地, 钳制故障相电压, 转移消弧线圈补偿残流, 实现全频率熄灭接地电弧^[12], 同时利用故障相经小电抗接地前后馈线零序电流与零序电压变化关系进行选线, 提出了创新性的主动接地选线法, 使选线准确率可达99%以上。该系统还可以使消弧线圈测控简单, 无须追踪电容电流的变化, 只要将消弧线圈固定在最常用档位即可。并且其保护容量适应范围宽, 包容系统各种运行方式和变电站发展的需要, 解决了传统消弧线圈因容量范围狭窄、需要随系统变化而更换设备的局限性^[13-14]。相比采用复杂电力电子逆变技术和设备的柔性消弧线圈系统, 该系统结构简单, 操作方便, 消弧和选线性能更为优良, 易于推广应用。

1 智能综合接地消弧系统灭弧性能分析

1.1 综合接地消弧原理

交流消弧理论^[7]指出: 接地电弧电流特性为交流, 在接地电流过零时, 电弧熄灭。而熄隙恢复抗电强度理论又证明: 当接地电流过零, 电弧熄灭以后, 若弧隙抗电强度恢复速度和幅值大于故障相电压恢复速度和幅值时, 重燃就不再发生, 电弧熄灭^[15]。反之, 若弧隙抗电强度恢复速度或幅值小于故障相电压恢复速度或幅值, 弧隙会再次重燃, 形成间歇性弧光接地故障, 见图1。

上述原理可归类电压消弧法: 即控制故障相恢复电压, 使其小于弧隙介质抗电恢复强度, 达到灭弧的目的。针对消弧线圈只能补偿系统电容电流的工频电流, 不能补偿其谐波电流和阻性电流, 并且存在补偿残流, 而单相弧光接地含有大量谐波电

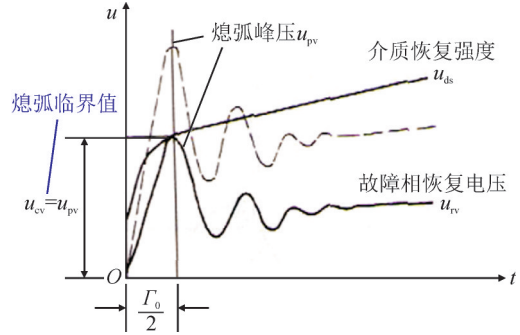


图1 接地电弧电流熄灭条件

Fig. 1 Grounding arc current extinguishing condition

流, 故消弧线圈不能完全熄弧的问题, 论文提出综合接地消弧系统的解决方案, 即在保留消弧线圈电流补偿方法的同时, 叠加了一种将接地故障相经小电抗主动接地的电压消弧技术产品, 形成综合接地消弧系统, 见图2。

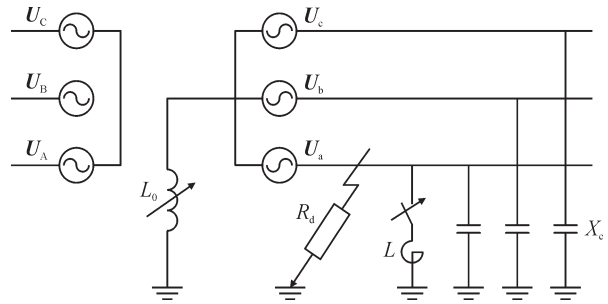


图2 智能综合接地消弧系统

Fig. 2 Intelligent integrated grounding arc suppression system

当单相接地发生, 智能接地装置选出故障相, 在消弧线圈补偿稳定后, 将接地故障相经小电抗可靠接地, 使故障相电压远小于弧隙重燃的边界, 并且转移流经接地线路的消弧线圈补偿残流, 以此达到全频率熄灭接地电弧的目的^[12]。

依据戴维南定理, 综合接地消弧线圈系统的零序回路分析见图3, 由图3可得出式(1)

$$I_{jd} = I_{rd} + I_1 = \frac{u'_x}{R_d} + \frac{u'_x}{x_1} = U'_x \left(\frac{x_1 + R_d}{R_d x_1} \right) \quad (1)$$

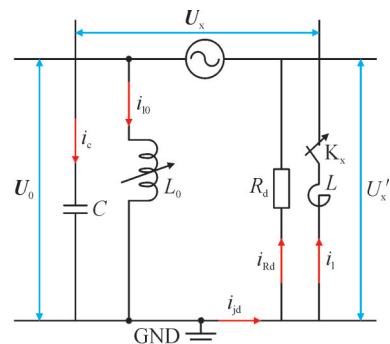


图3 综合接地零序回路分析

Fig. 3 Analysis of integrated ground zero-sequence circuit

由式(1)可得

$$U'_x = I_{jd} \left(\frac{R_d x_1}{x_1 + R_d} \right) \quad (2)$$

若 $x_1 \ll R_d$, 则

$$\frac{R_d x_1}{x_1 + R_d} \approx X_1 \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得

$$U'_x \approx I_{jd} X_1 \quad (4)$$

由式(4)可得

$$X_1 = \frac{u'_x}{I_{jd}} \approx \frac{I_{jd} X_1}{I_{jd}} = I_{jd} \quad (5)$$

由以上分析可知:当小电抗 L 的阻抗 X_1 远远小于接地点过渡电阻 R_d 时,将故障相经小电抗主动接地(保护动作逻辑见图4),消弧线圈的补偿残流 I_{jd} 即可基本换入小电抗 L 的支路,并且故障相电压 u'_x 被钳制,使不稳定的弧光接地变成稳定的保护性的金属性接地,如此,故障相恢复电压被限制远低于弧隙复燃边界,弧隙无法重燃,即切断了弧道,使接地故障残流、无论是工频电流、谐波电流或是阻性电流,均无法再流经原接地故障线路,而被转移到小电抗主动接地回路。此时,接地故障线路的电压和电流都近似为零,相当柔性消弧系统的全补偿,从而实现彻底的全频率消弧。

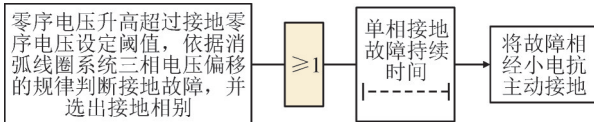


图4 接地故障相经小电抗主动接地灭弧保护逻辑

Fig. 4 Active grounding arc extinguishing protection logic for fault phase grounding via low reactance

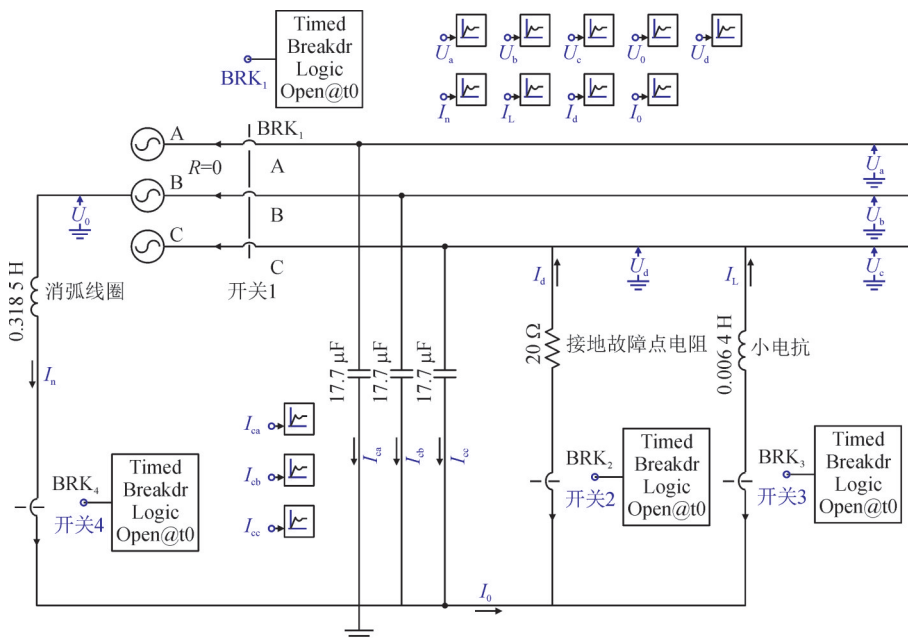


图6 智能综合接地消弧仿真电路

Fig. 6 Simulation circuit of intelligent integrated grounding arc suppression

1.2 综合接地消弧系统仿真分析

智能综合接地消弧系统主要由智能小电抗接地装置(以下简称智能接地装置)、接地变、消弧线圈等组成,见图5。

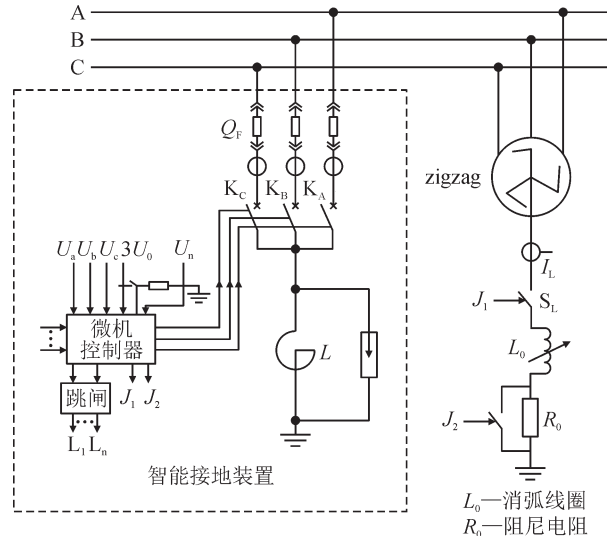


图5 智能综合接地消弧系统结构

Fig. 5 Structure of intelligent integrated grounding arc suppression system

仿真小电抗和消弧线圈并列电路模型^[11]见图6。仿真参数:接地电阻,20 Ω;小电抗阻抗,2 Ω(0.006 4 H);消弧线圈感抗,0.318 5 H;系统电容,17.7 μF。仿真发生C相弧光接地,消弧线圈和小电抗接地装置先后动作,其仿真波形见图7。

如图7所示:0.1 s时刻C相接地发生,系统接地电容电流约49 A(翠绿波形);0.2 s时刻消弧线圈投入补偿电流约33.4 A(深绿波形),接地故障的残流约15.6 A(翠绿波形);0.3 s时刻智能接地装置将故障相

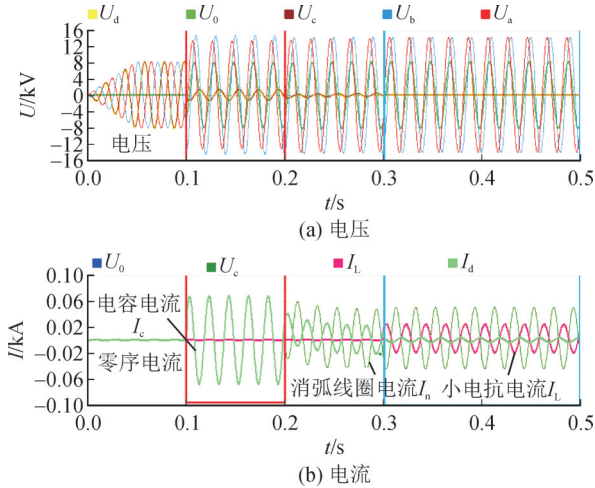


图7 综合接地消弧仿真波形

Fig. 7 Synthetic simulation waveform of grounding arc suppression

经小电抗接地, C相电压被钳制接近0 V, 残流基本换入小电抗回路(玫红波形), 故障线路只剩下一点偏阻性电流, 达到限制故障相电压, 转移残流, 可靠灭弧的目的。主要仿真参量见表1。

表1 仿真参量

Table 1 Simulation parameters

参数	数值			
时间/s	0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5
开关	BRK ₁ 合	BRK ₂ 合, C相接地	BRK ₄ 合, 消弧线圈投	BRK ₃ 合, 小电抗接地
电压	正常 $U_0=0$	$U_c \downarrow$ 其他 \uparrow ; $I_c=49.5 \text{ A}$	$U_c \downarrow$ 约200 V	$U_c \downarrow$ 约0 V
消弧线圈电流 I_n/A	0.0	0.0	34.7	34.7
接地电流 I_g/A	0.0	$49.5(I_n=I_c+I_n)$	I_n 被补偿 \downarrow 残流 14.2	I_n 的残流被转移至 I_i
电抗电流 I_i/A	0.0	0.0	0.0	残流转移, 14.1

1.3 综合接地消弧系统灭弧性能验证

2019年9月5号, 在国家电网漯河真型试验场做10 kV综合接地消弧系统电缆弧光接地试验。试验条件: 系统电容电流65 A、过补偿电流7.5 A。

试验结果见图8。由图8黄框内可见, 接地故障线路II真培发生A相电缆弧光接地, 消弧线圈补偿后仍有弧光谐波残流, 智能接地装置将接地故障相(A相)主动接地后(下箭头所指开关量变化处), 故障相电压 U_a 被钳制近似为零, 故障线路II真培的残流被转移, 也近似为零(见图中标注文字), 实现彻底灭弧。

2 综合接地消弧系统选线性能分析

由于消弧线圈电流的补偿作用, 减小了系统接

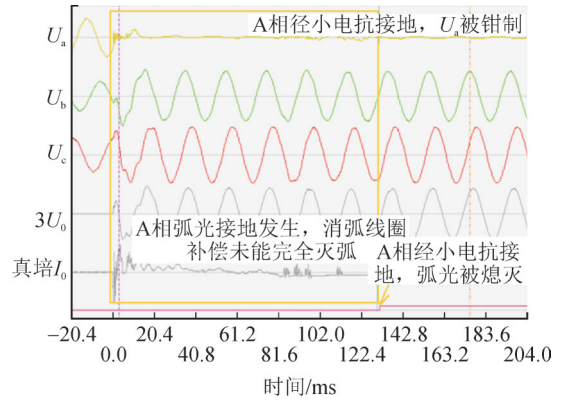


图8 国网漯河真型灭弧试验波形

Fig. 8 Waveform of actual arc extinguishing test at Luohe

地零序电流, 并且过补偿状态改变接地零序电流方向, 以致选线准确率较低。针对此问题, 综合接地消弧系统中创新了将故障相经小电抗主动接地的选线方法, 有效提高选线准确率, 该选线方法原理及性能分析如下。

2.1 综合接地系统单相接地电量特征

综合接地系统单相接地零序回路见图9。根据戴维南定理, 图9简化为图10。

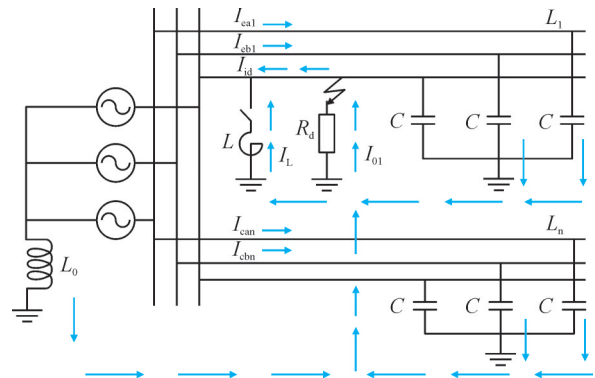


图9 综合接地单相接地零序回路

Fig. 9 Integrated single-phase-to-ground zero-sequence circuit

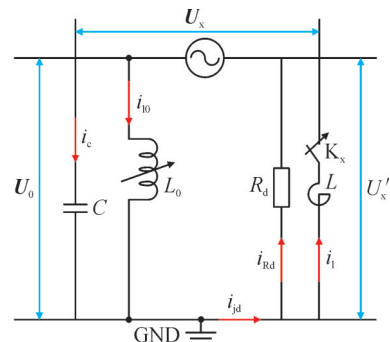


图10 综合接地等效零序回路分析

Fig. 10 Comprehensive analysis of equivalent zero-sequence circuit

由图10可得:

$$U_x = U'_x - U_0 \quad (6)$$

$$U'_x = I_{jd} \times R_d \quad (7)$$

$$U_0 = -I_{jd} \times Z_0 \quad (8)$$

$$Z_0 = \frac{j\omega L_0}{1 - \omega^2 L_0 C} \quad (9)$$

式(6)-(9)中: U_x 为原始相电压, V; U'_x 为接地故障相电压, V; U_0 为电源中性点零序电压, V; I_{jd} 为接地电流, A; R_d 为接地故障点过渡电阻, Ω ; C 为系统对地总电容, F; L_0 为消弧线圈电感, H。

由式(7)-(9)式可得, U'_x 与 U_0 的关系

$$U'_x = U_0 \times \frac{j \times R_d \times (1 - \omega^2 L_0 C)}{\omega L_0} \quad (10)$$

由式(6)可知, 接地后相电压 U'_x 和零序电压 U_0 的矢量差恒为接地前的相电压 U_x ; 由式(10)可知, 接地后的相电压 U'_x 与零序电压 U_0 相位相差 90° , 即 U'_x 与 U_0 方向成直角关系^[6]。

单相接地时, 接地容流 I_c 为

$$I_c = \frac{U_0}{1/(j\omega C)} = j\omega C U_0 \quad (11)$$

消弧线圈补偿电流 I_{l0} 为

$$I_{l0} = \frac{U_0}{j\omega L_0} \quad (12)$$

由于 I_{l0} 和 I_c 电流相位相反, 因此: 当 $|I_{l0}| > |I_c|$ 时, 可得 $1 > \omega^2 L_0 C$, 系统为过补偿; 当 $|I_{l0}| < |I_c|$ 时, 可得 $1 < \omega^2 L_0 C$, 系统为欠补偿^[7]。

当系统为过补偿时, $1 - \omega^2 LC > 0$, U'_x 超前 U_0 角度 90° ; 当系统为欠补偿时, $1 - \omega^2 LC < 0$, U'_x 滞后 U_0 角度 90° ^[7]。

由以上分析可知, 在系统过补偿时, U'_x 超前 U_0 角度 90° , 随着接地电阻 R_d 的变化, 电压偏移零点轨迹是以相电压 U_x 为直径的左半圆弧; 在系统欠补偿时, U'_x 滞后 U_0 角度 90° , 随着接地电阻 R_d 的变化, 电压偏移零点轨迹是以相电压 U_x 为直径的右半圆弧。

2.2 故障相主动接地前后馈线零序电流变化

设 L_1 线路接地, 智能接地装置的小电抗主动接地未动作前, 系统等效零序回路见图 11。

根据图 11 可得小电抗主动接地前、接地线路 L_1 的零序电流 I_{01}

$$I_{01} = I_1 + I_{jd} = U_0 \times j\omega C_1 + \frac{U_0 \times (\omega^2 L_0 C - 1)}{j\omega L_0} \quad (13)$$

非接地线路 n 的零序电流 I_{0n} 为

$$I_{0n} = \frac{U_0}{1/j\omega C_n} = j\omega C_n U_0 \quad (14)$$

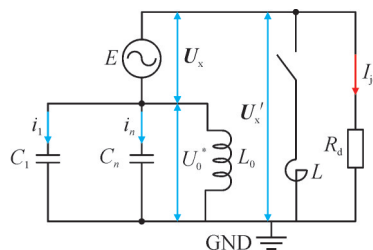


图 11 无小电抗主动接地等效零序回路

Fig. 11 Equivalent zero sequence circuit without low reactance actively grounding

小电抗主动接地后, 根据式(5) $I_1 \approx I_{jd}$, 可视 R_d 支路断开, 其等效零序回路见图 12。

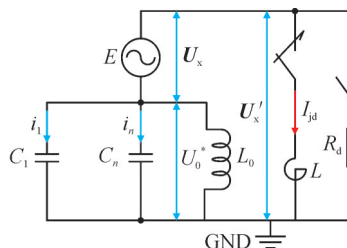


图 12 小电抗主动接地后等效零序回路

Fig. 12 Equivalent zero sequence circuit with low reactance actively grounding

由图 12 得小电抗主动接地后线路 L_1 零序电流 I_{01}^*

$$I_{01}^* = I_1 = \frac{U_0^*}{\frac{1}{j\omega C_1}} = j\omega C_1 U_0^* \quad (15)$$

非故障线路电流为

$$I_{0n}^* = I_n = \frac{U_0^*}{1/j\omega C_n} = j\omega C_n U_0^* \quad (16)$$

由式(13)、(15)可得小电抗主动接地前后, 故障线路的零序电流变比为

$$\frac{I_{01}^*}{I_{01}} = \frac{U_0^*}{U_0} \times \frac{\omega^2 L_0 C_1}{(1 - \omega^2 L_0 C + \omega^2 L_0 C_1)} \quad (17)$$

由式(14)、(16)可得非故障线路电流变比为

$$\frac{I_{0n}^*}{I_{0n}} = \frac{U_0^*}{U_0} \quad (18)$$

当系统处于过补偿时, $0 < 1 - \omega^2 L_0 C < 1$, 则有

$$\frac{\omega^2 L_0 C_1}{(1 - \omega^2 L_0 C + \omega^2 L_0 C_1)} < 1 \quad (19)$$

即对于故障线路 L_1 , 始终有

$$\frac{I_{01}^*}{I_{01}} = \frac{U_0^*}{U_0} \quad (20)$$

当系统处于欠补偿状态时, $0 < (1 - \omega^2 L_0 C) < 0$, 有

$$\frac{I_{01}^*}{I_{01}} = \frac{U_0^*}{U_0} \quad (21)$$

根据式(17), 若 $\frac{\omega^2 L_0 C_1}{(1 - \omega^2 L_0 C + \omega^2 L_0 C_1)} = 1$, 则

$$1 - \omega_2 L_0 C = 0 \quad (22)$$

可见, 只有系统处于全补偿时, 接地线路在小电抗主动接地前后的电流变比与非接地线路的变比是相同的。而系统一般不可能处于全补偿运行^[18], 因此, 利用上述方法可以选出接地线路。

2.3 主动接地选线法性能验证

通过以上分析, 在消弧线圈系统中利用小电抗主动接地, 比较故障线路与非故障线路的不同电流电压变比的差值进行选线的方法, 称为主动接地选线法。主动接地选线流程大致见图 13。

接地故障相经小电抗主动接地选线法于 2019 年 9 月 5 日-6 日, 在国网漯河真型试验场 10 kV 综合接地消弧系统中进行了性能验证。在系统电压平衡状态下, 消弧线圈分别调节为欠补偿、过补偿; 以及系统电压不平衡状态, 消弧线圈分别调节为过补偿、欠补偿和补偿状态变化等多种工况下, 进行了弧光、金属、高阻、断线等单相接地故障试验 99 组 (除断线外, A、B、C 各相接地至少 1 次), 主动接地选线的准确率达 100%、试验汇总统计见表 2, 部分试验记录见表 3。

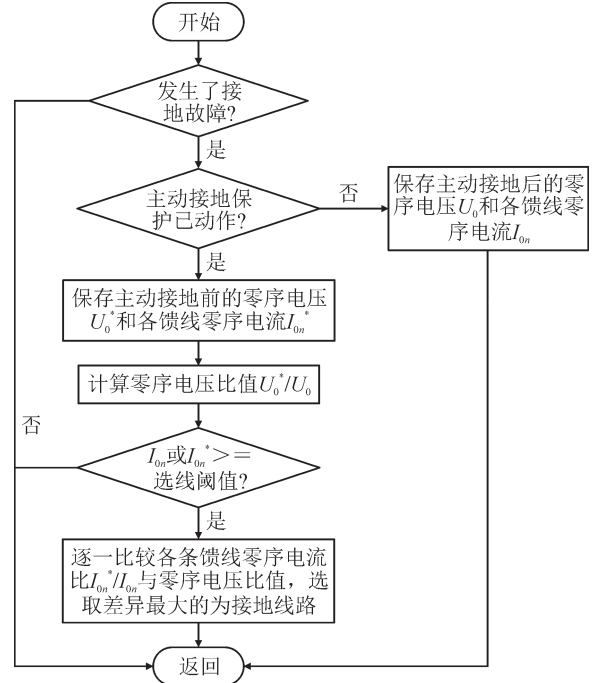


图 13 主动接地选线法流程图

Fig. 13 Line selection flow chart with low reactance actively grounding

表 2 综合接地消弧系统接地选线试验汇总统计

Table 2 Summary statistics of grounding line selection tests for integrated grounding arc suppression system

序号	试验条件	试验类型	组次	选线方法	选线准确率/%
1	电容电流 65 A; 过补偿 5~13 A	①电缆弧光接地;	53	主动接地法	100
2	电容电流 65 A; 过补偿 13 A 转欠补 5 A	②金属接地;	7	主动接地法、零序无功法	100
		③高阻接地;			
3	电容电流 65 A; 欠补偿 5~15 A	④断线接地	46	主动接地法、零序无功法	100

表 3 综合接地消弧系统灭弧及选线部分试验记录(2019-09-06)

Table 3 Test records of arc extinguishing and line selection of integrated grounding arc extinguishing system(2019-09-06)

试验类型	故障时间	事件描述	U_A/V	U_B/V	U_C/V	$3U_0/V$	I_0/A	选线 1	I_{0max}/mA	I_{0max}/mA	I_{0max}/mA	I_{0max}/mA
									馈线 电流	馈线 电流	馈线 电流	馈线 电流
		正常时刻	60.7	59.8	57.6	3.3						
首端断线	10:51:52	绝缘	63.4	59.4	55.3	8.0	0.00	II 真培	I 真培 18	II 真培 11	III 真培 9	IV 真培 1
C 相接水	10:52:58	接地保护(C)	100.8	100.3	9.1	95.2	0.06	II 真培	II 真培 3	无 0	III 真培 166	无 0
泥地 II 真培	10:52:07	高阻接地(C)	77.8	49.9	55.9	31.2	0.01	无	I 真培 76	III 真培 52	II 真培 26	IV 真培 8
	10:52:07	接地保护(C)	100.2	102.6	5.4	95.4	0.15	II 真培	II 真培 4	III 真培 165	III 真培 4	无 0

注: 系统参数为: 电容电流 65 A; 中性点经消弧线圈接地, 过补偿 13 A, 装置设置为过补偿(使能主动干预法选线), 系统不平衡。

以表 3 数据为例, 分析主动接地选线法正确性:

1)2019 年 9 月 6 号上午 10:51:52 在国网漯河真型试验场 II 真培线路 C 相发生首端断线接水泥地, 智能接地装置判绝缘故障, 并测得二次值 U_A 63.4 V、 U_B 59.4 V、 U_C 55.3 V、 $3U_0$ 8.0 V, II 真培线路零序电流 11 mA;

2)10:51:58 智能接地装置保护动作将故障相 C 接地, 此时, 故障相电压 U_C 被钳制降低至 9.1 V, $3U_0$

升高至 95.2 V, $\frac{U_0^*}{U_0} = \frac{95.2}{8}$; 接地线路(II 真培)电流却

降低至 3 mA: $\frac{I_{01}}{I_{01}^*} = \frac{U_0}{U_0^*}$, 非故障线路电流却随着零

序电压的上升而增加。证明了判据式(19) $\frac{I_{01}}{I_{01}^*} < \frac{U_0}{U_0^*}$

符合消弧线圈过补偿状态下, 主动接地前后电量变化的特征, 是接地选线的正确判据! 依此, 准确选

出II真培线路为接地线路下,主动接地前后电量变化的特征,是接地选线的正确判据,依此,准确选出II真培线路为接地线路。

3)10:52:07 智能接地装置退出接地保护动作,测得高阻接地C相仍存在; $3U_0$ 降低至31.2 V,II真培线路零序电流增加为26 mA;装置判断为C相高阻接地。

4)10:52:07智能接地装置再次将故障相C保护接地,测得数据展现了与2)类似的特征, $3U_0$ 升高到95.4 V,II真培线路零序电流减少到4 mA;装置选线II真培线路。

根据以上试验过程数据可绘出图14。主动接地投/退电量变化,该图及试验数据均清楚证明:主动接地前后,故障线路与非故障线路具有不同电流电压变比的特征,依此为判据选线正确率可达100%。其他判据的正确性也可证明,在此不一一叙述。

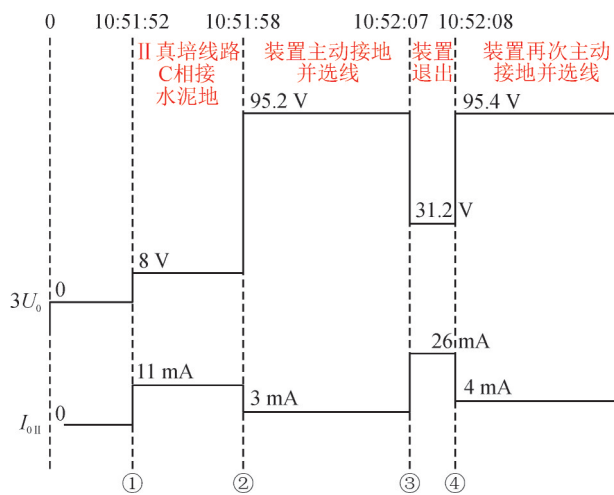


图14 主动接地投/退电量变化

Fig. 14 Change of electric quantities when switching on/off active grounding reactance

3 结论

通过对智能综合接地消弧系统的理论分析、仿真试验、10 kV综合接地消弧系统真型接地试验等研究可得如下结论:

1)在消弧线圈系统叠加主动将故障相经小电抗接地的电压灭弧技术产品,形成综合接地消弧系统具有优良技术性能,能够可靠钳制故障相电压,转移消弧线圈补偿残流,全频率熄灭接地电弧,提高系统的灭弧可靠性达100%。

2)综合接地消弧系统由于其具有钳制故障相电压、转移消弧线圈补偿残流等特征,使得接地故障线路的电流/电压变化比不同于非故障线路的电流/

电压变化比,以此创造出主动接地选线法,可提高消弧线圈系统选线准确率达99%以上。

相比采用复杂电力电子逆变技术和设备的柔性消弧线圈系统,智能综合接地消弧技术产品的结构简洁,操作方便,消弧和选线性能更为优良,易于推广应用。

参考文献:

- [1] 程斌.基于10 kV配电线路单相接地故障的研究[J]. 中国电机(技术版),2012(10):27-29.
CHEN Bin.Research of single-phase grounding fault based on 10 kV distribution line[J]. China Electrical Industry(Technical Edition),2012(10):27-29.
- [2] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
WANG Weijian.Basic principles of power system relay protection [M]. Beijing:Tsinghua University Press,1992.
- [3] 于永源,杨绮雯. 电力系统分析[M]. 第3版.北京:中国电力出版社,2007.
YU Yongyuan, YANG Qiwen.Electric power system analysis[M]. 3rd ed.Beijing:China Electric Power Press,2007.
- [4] 梁改革,袁光伟. 配电网中性点接地方式对比分析[J]. 电工技术,2018(11):34-36.
LIANG Gaige, YUAN Guangwei.Comparison and analysis of neutral grounding modes in distribution network[J]. Electric Engineering,2018(11):34-36.
- [5] 平绍勋,周玉芳. 电力系统中性点接地方式及运行分析[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
PING Shaoxun, ZHOU Yufang.Neutral ground mode and operation analysis of power system[M]. Beijing:China Electric Power Press,2010.
- [6] 杨以涵,齐郑. 中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
YANG Yihan, QI Zheng.Line selection and location technology of single phase earth fault in medium voltage distribution network[M]. Beijing:China Electric Power Press,2014.
- [7] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
LI Runxian.Practical grounding technology of medium voltage power grid system[M]. Beijing:China Electric Power Press,2002.
- [8] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):29-32.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, YU Yongyuan, et al.New methods for control and protection relay in a compensated medium voltage distribution network based on injecting various frequency current [J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(1):29-32.
- [9] 陈海东,蒙飞,赵磊,等. 利用分布式电源注入信号的配电线路故障性质识别技术[J]. 高压电器,2022,58(12):123-129.
CHEN Haidong, MENG Fei, ZHAO Lei, et al.Fault identification technology for distribution line based on distributed generation injection signal[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(12):123-129.

- [10] 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.
- [11] 李传健, 孙嘉宁, 胡青山, 等. 配网单相接地故障模拟试验平台的研究与实现[J]. 机电工程技术, 2015(9): 122-126.
LI Chuanjian, SUN Jianing, HU Qingshan, et al. Research and implementation of a distribution network single-phase-to-ground fault simulated experiment platform[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2015(9): 122-126.
- [12] 孙嘉宁. 中压电网系统消弧、消谐、单相接地故障综合保护新方法及智能综合保护装置[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
SUN Jianing. A new comprehensive protection method and intelligent comprehensive protection device for arc suppression, harmonic suppression and single-phase earth fault in medium voltage power system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [13] 杨子亮. 20 kV 配电网中性点接地方式选择以及继电保护整定的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
YANG Ziliang. Study on the selection of neutral ground mode and relay protection setting of 20 kV distribution network[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011.
- [14] 侯义明. 《配电网技术导则》修订背景和编制原则[J]. 供用电, 2017, 34(1): 28-31.
HOU Yiming. The background and principles of revision to technical guidelines for distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(1): 28-31.
- [15] 苗毅, 冀超, 李林, 等. 配电网故障的阶段式恢复辅助决策技术分析[J]. 中国设备工程, 2022(11): 238-240.
MIAO Yi, JI Chao, LI Lin, et al. Staged recovery auxiliary decision-making technology analysis for distribution network failures[J]. China Plant Engineering, 2022(11): 238-240.
- [16] 董燕飞. 新型的基于自动选线原理的自动消弧装置在 10 kV 电网中的应用[J]. 煤矿机械, 2010, 31(3): 190-191.
DONG Yanfei. Automatic arc-suppressing device based on theory of auto line-selection applying in 10 kV network[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(3): 190-191.
- [17] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
YAO Huannian, CAO Meiyue. Power system resonant grounding [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [18] 张乃刚, 张加胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 120-125.
ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 120-125.
- 李继刚(1967—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为高电压技术、电力自动化等技术。
- 徐肃(1984—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化等技术。
- 董昭阳(1991—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为变电运行技术。
- 王飞(1971—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力工程技术。
- 马可(1988—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为电力工程技术。
- 孙嘉宁(1954—), 女, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为电力自动化技术、高电压技术等(通信作者)(E-mail: 3922314141@126.com)。
- 胡青山(1983—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统自动化技术。