

谐振接地系统选线瓶颈及动态电阻选线方式

易洲楠, 朱文葛, 李必伟

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 研究发现谐振接地系统在发生永久性单相接地故障时, 受故障合闸角、过渡电阻以及各馈线零序电流无规律性影响, 基于故障稳态和暂态信号的选线方法在实际应用中效果不佳。为突破谐振接地系统选线瓶颈, 提出一种动态电阻选线方式, 运用理论分析和ATP-EMTP仿真, 确定了选线程序启动方式与动态电阻阻值选取办法。通过现场实验验证该方式在谐振接地系统发生永久性单相接地故障时, 能准确识别故障发生, 并通过阻性电流注入准确选出故障线路, 且过渡电阻识别能力达 $3\ 500\ \Omega$, 为谐振接地系统单相接地选线难题提供了一种有效可行的解决办法。

关键词: 谐振接地系统; 单相接地故障; 选线瓶颈; 动态电阻

Bottleneck of line selection in resonant grounding system and dynamic resistance line selection method

YI Zhounan, ZHU Wenge, LI Biwei

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: It is found that due to the fault closure angle, the transition resistance and the irregularity of the zero-sequence current of each feeder, the line selection method based on fault steady state signal and transient signal of resonant grounding system is not effective in practical applications. In order to break through the bottleneck of line selection in resonant grounding system, a dynamic resistance line selection method is proposed. Through theoretical analysis and ATP-EMTP simulation, the startup mode of line selection program and the selection method of dynamic resistance value are determined. Through field test, it is verified that the method can accurately identify the occurrence of permanent single-phase ground fault in the resonant grounding system, and select the fault line through resistive current injection. The transition resistance recognition capability reaches $3\ 500\ \Omega$. It provides an effective and feasible solution for the line selection problem of single-phase ground fault in resonant grounding system.

Key words: resonant grounding system; single-phase ground fault; bottleneck of line selection; dynamic resistance

0 引言

当前我国10 kV和35 kV变电站大量采用中性点经自动跟踪消弧线圈接地方式^[1]。此类

谐振接地系统可以在单相接地故障发生后对消弧线圈的补偿电流进行控制, 使故障点残流不超过熄弧临界值, 有利于快速消除瞬时性

接地故障，有效限制铁磁谐振过电压^[2]。

谐振接地系统在发生永久性单相接地故障，即故障无法通过消弧线圈补偿作用而消失时，需要继电保护装置或故障选线程序发挥作用，快速切除故障线路或选出故障线路后发送报警信号，等待人工处理^[3]。近年来，国内外研究学者提出了基于模糊神经网络、粗糙集理论和证据理论等人工智能选线法，此类方法涉及大量数据收集与处理，相关配套技术仍在科研探索阶段，短期内难以普及。当前各地电力科学研究院和供电局实验、应用较多的还是以故障稳态和暂态信号为依据的选线方法，如5次谐波法、突变量法、小波法和暂态能量法等，但应用效果常不及预期。南网电力科学研究院2016年曾对谐振接地系统进行单相接地故障选线仿真与实验研究，发现当谐振接地系统发生永久性单相接地故障时，运用基于暂态信号选线法的装置整体选线准确率仅为37%。

本文通过分析电路模型和现场实验数据，对谐振接地系统存在选线瓶颈的原因进行剖析，同时为突破此瓶颈提出一种动态电阻选线方式。

1 选线瓶颈分析

1.1 零序电流无规律性

谐振接地系统发生单相接地故障时的零序等效电路如图1所示。

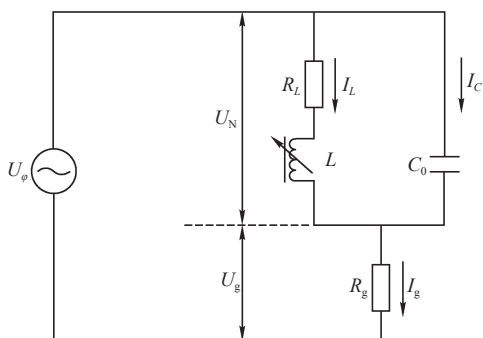


图1 零序等效电路

Fig. 1 Zero-sequence equivalent circuit

图1中， R_g 为故障点过渡电阻； $C_0 = \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}$

为非故障相对地零序电容； U_ϕ 为故障相电压； U_N 为中性点电压。消弧线圈支路与非故障相对地零序电容支路并联后的零序阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_L + j\omega L} + j\omega C_0} = \frac{\frac{1}{j\omega C_0}(R_L + j\omega L)}{R_L + j(\omega L - \frac{1}{\omega C_0})} \quad (1)$$

故障回路等效阻抗 Z_f 表达式为

$$Z_f = R_g + Z_0 = R_g + \frac{\frac{1}{j\omega C_0}(R_L + j\omega L)}{R_L + j(\omega L - \frac{1}{\omega C_0})} \quad (2)$$

故障回路零序电流 I_g 表达式为

$$I_g = \frac{U_N}{Z_f} = U_N / [R_g + \frac{\frac{1}{j\omega C_0}(R_L + j\omega L)}{R_L + j(\omega L - \frac{1}{\omega C_0})}] \quad (3)$$

非故障回路零序电流 I_i 表达式为

$$I_i = U_N / (j\omega C_i) \quad (4)$$

式中， C_i 为非故障相对地电容。

由式(3)和式(4)可知， I_g 与 I_i 的大小取决于 $R_g + [(R_L + j\omega L)/(j\omega C_0)]/[R_L + j(\omega L - 1/(\omega C_0))]$ 和 $j\omega C_i$ 。在实际配电网中，由于母线上各馈线长度不尽相同，各相与地面距离因环境而异，电力系统运行方式不时变化，因此各条馈线对地电容 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 存在无规律性差异，所以发生金属性接地故障（即 $R_g=0$ ）和低阻接地故障时， $[(R_L + j\omega L)/(j\omega C_0)]/[R_L + j(\omega L - 1/(\omega C_0))]$ 与 $j\omega C_i$ 的大小无法确定。同时在配电网实际运行中，消弧线圈装置本身经常存在调谐误差^[4]，因此在发生单相接地故障时，故障回路零序电流与非故障回路零序电流大小关系呈现无规律性，使系统配置的零序电流保护和零序电流群体比幅选线设备无法实现保护和选线目标。

1.2 过渡电阻与故障合闸角的影响

5次谐波法作为稳态信号选线法的代表，

利用5次谐波零序电流幅值与方向特征区分故障与非故障馈线。然而在10 kV真实实验场进行的现场模拟实验中发现,5次谐波法受过渡电阻影响较大,选线可靠性存在问题。表1为在不同故障点过渡电阻条件下,录波装置采集的5次谐波零序电流幅值与相位数据,其中馈线2为故障馈线。图2为过渡电阻分别设置为200 Ω 和1 500 Ω 时,以零序电压相位作基准的各馈线5次谐波零序电流相位关系。

表1 不同过渡电阻下各馈线5次谐波零序电流幅值与相位

Tab. 1 The amplitude and phase of the fifth-order harmonic zero-sequence current of each feeder under different transition resistance conditions

过渡电阻/ Ω	5次谐波零序电流幅值/A			
	馈线1	馈线2	馈线3	馈线4
200	2.4	4	1.4	0.3
1 000	0.6	0.8	0.4	0.03
1 500	0.3	0.3	0.14	0.01
3 000	0.1	0.1	0.1	0.001

零序电压相位/ $^\circ$	5次谐波零序电流相位/ $^\circ$			
	馈线1	馈线2	馈线3	馈线4
0	14	179	7	84
0	50	173	-135	-133
0	-139	5	-143	-36
0	-65	100	-35	-195

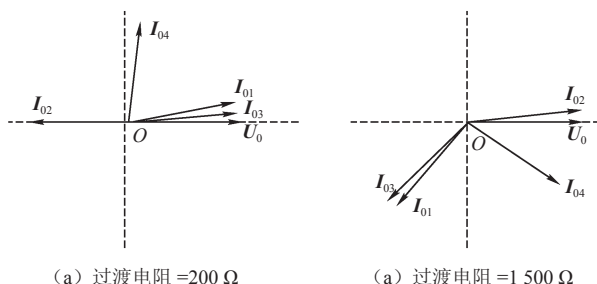


图2 各馈线零序电流相位

Fig. 2 Zero-sequence current phase of each feeder

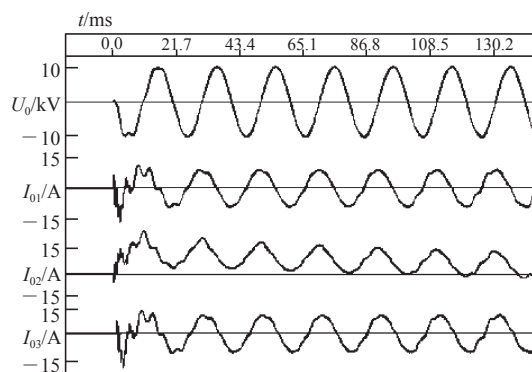
从表1可以看出,各馈线5次谐波零序电流幅值随过渡电阻值增大而减小,同时各馈线电流幅值差也在减小。当过渡电阻大于1 500 Ω 时,出现了故障馈线(馈线2)与非故障馈线5次谐波零序电流幅值相等的情况,此时无法通过5次谐波零序电流幅值大小来判断故障馈线。从图2可以看出,以零序电压相位为基准,当过渡电阻为200 Ω 时,故障馈线5次谐波零序电流 I_{02} 与非故障线路(I_{01} 、 I_{03} 和 I_{04})5次谐

波零序电流之间的夹角大于 90° ,即 I_{02} 与 I_{01} 、 I_{03} 和 I_{04} 方向相反;而当过渡电阻为1 500 Ω 时, I_{02} 与 I_{04} 之间的夹角小于 90° ,即存在故障馈线与非故障馈线5次谐波零序电流方向相同,此时无法通过5次谐波零序电流方向特征来选出故障馈线。

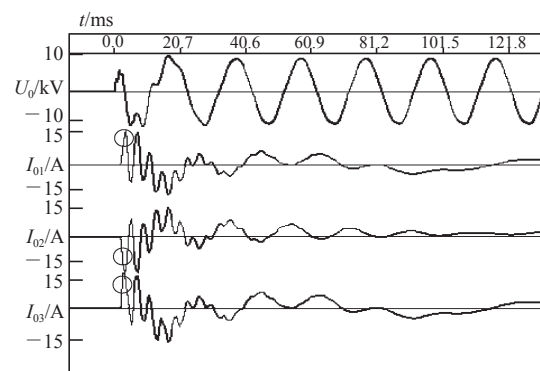
利用故障暂态信号的选线方法同样存在许多问题。暂态法一般基于母线零序电压与各馈线高频零序暂态电流两类信号,零序暂态电流表达式为^[5]

$$I_{0t} = i_{Lm} \cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau}} + i_{Cm} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

其中,故障合闸角 φ 大小随机,因此 I_{0t} 在不同的故障时刻信号强弱不同。在现场实验研究中,以故障相电压为基准,分别在故障合闸角 φ 为 0° 和 90° 、过渡电阻为200 Ω 和1 500 Ω 时设置系统发生单相接地故障,得到实验波形如图3所示。



(a) $\varphi=0^\circ$, 过渡电阻为 200 Ω



(b) $\varphi=90^\circ$, 过渡电阻为 200 Ω

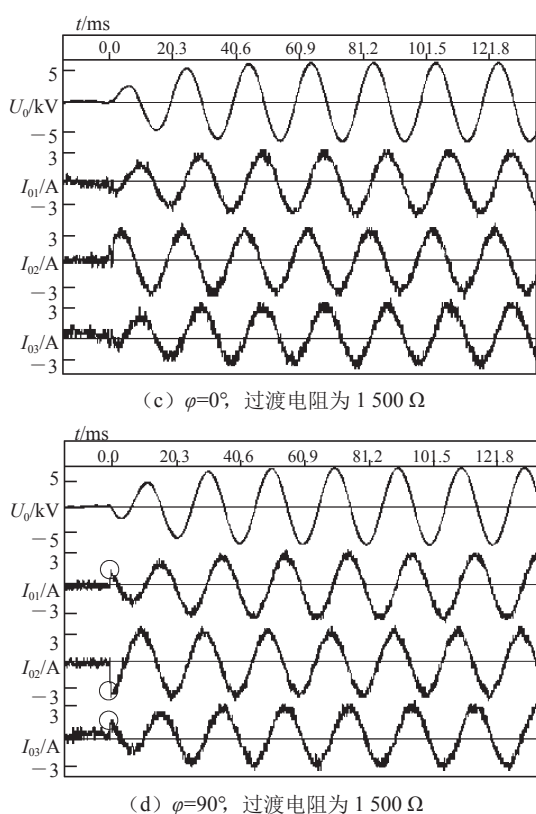


图3 不同故障合闸角与不同过渡电阻条件下馈线零序暂态电流
Fig. 3 Zero-sequence transient current of feeder under different initial phase angles and different transition resistance

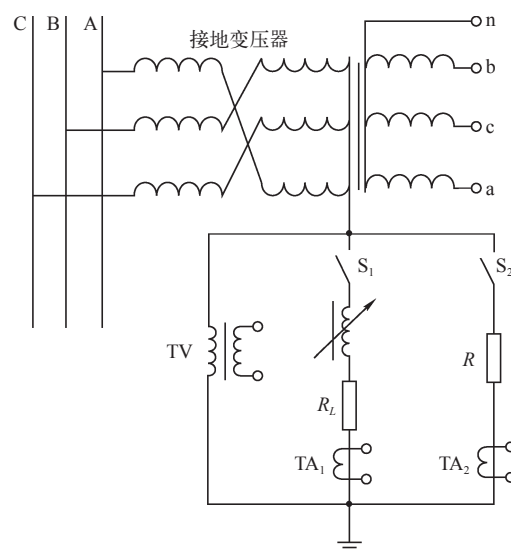
比较图3a、b可以看出,当过渡电阻为200 Ω 、 $\varphi=90^\circ$ 时,暂态电流幅值大于 $\varphi=0^\circ$ 时的暂态电流幅值;而当过渡电阻为1 500 Ω 、 $\varphi=90^\circ$ 时,暂态电流幅值小于 $\varphi=0^\circ$ 时的暂态电流幅值。同时过渡电阻值增大使得暂态电流首半波特征愈发不明显。对比图3c、d可以看出:当过渡电阻为1 500 Ω 时,暂态电流幅值明显减少,暂态过程几乎消失。所以故障合闸角和故障点过渡电阻对故障暂态信号影响很大,使暂态选线法准确性和可靠性大大下降。

2 动态电阻选线方式

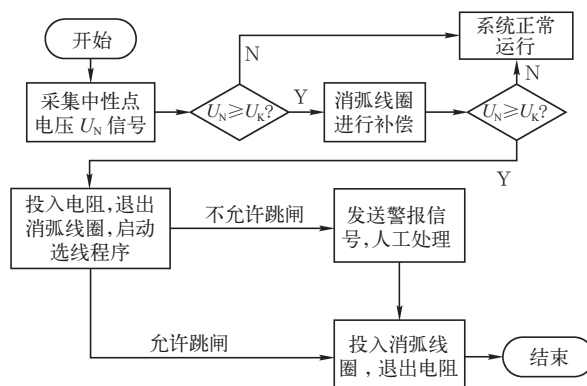
为提高谐振接地系统单相接地故障选线可靠性,本文采取的动态电阻选线方式在中性点消弧线圈支路旁并联一电阻,通过控制支路开关来实现消弧线圈与电阻的动态投切。动态电阻选线方式简化结构如图4a所示。图4a中, R 为动态切换电阻; R_L 为消弧线

圈阻尼电阻; S_1 、 S_2 为投切开关,配电网正常运行时, S_1 合闸, S_2 断开,配电网中性点工作在经消弧线圈接地方式下,此时系统通过TV保持对中性点电压 U_N 的实时测量。

动态电阻选线流程如图4b所示。其中, U_K 为程序启动电压阈值,根据DL/T 1057—2007《自动跟踪补偿消弧线圈成套装置技术条件》中的要求,判断系统发生单相接地,从而进入补偿状态的系统中性点电压一般宜设为20%~35% U_ϕ (U_ϕ 为系统的相电压)。同时系统正常运行时,中性点电压不应长时间超过15% U_ϕ ^[6],因此在不影响选线程序正常运行前提下,保证单相接地故障识别灵敏度,将启动电压阈值 U_g 整定为20% U_ϕ 。



(a) 简化结构



(b) 程序流程

图4 动态电阻选线方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dynamic resistance

2.1 电阻值的选取

德国学者彼得生提出的高频熄弧理论认为在中性点接入一特定阻值的电阻,当接地电弧第一次熄灭时,电阻回路为线路残余零序电流提供了释放通道,使第二次燃弧时电流得到较大衰减,其衰减过程遵循 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 的放电过程,其中 τ 为衰减时间常数 $\tau=R_n C=1/\omega=1/2\pi f$ 。令 $t=1/f$,即 $t/f=2\pi$ 时,代入衰减公式可得 $e^{-2\pi}=0.00187$,当按照 $I_c=I_\tau$ 的基准来选取中性点接地电阻时,电容电流在经过一个周期释放过程后,线路中电荷就已经基本释放完毕,即使电弧多次重燃,也能有效避免弧光接地过电压的发展^[7]。而根据俄罗斯配电网运行工程经验,只需满足 $I_\tau=(0.6\sim 0.8)I_c$ 便能够实现对线路电容存储电荷的释放和过电压的抑制。在不同电容电流条件下,分别利用彼得生理论和俄罗斯工程经验对动态切换电阻取值进行计算,结果如表2所示。

表2 不同电容电流下电阻取值

Tab. 2 Resistance values under different capacitance currents

电容电流 I_c/A	50	60	70	80	90
彼得生理论 R_n/Ω	346.44	288.69	247.47	216.54	183.48
苏联工程经验 R_n/Ω	693~867	567~723	495~618	432~540	384~480

为检验电阻取值对故障选线的影响,利用ATP-EMTP电磁暂态仿真软件建立10 kV配电网仿真模型,因使用集中参数代替分布参数的线路模型,采用延长线路长度、减少线路条数的方法模拟真实配电网。线路设置为3条架空线路(L1~L3)和3条电缆线路(L4~L6),其中L6为末端单相接地馈线,故障点过渡电阻设置为1 500 Ω 。系统总电容电流为70 A,对照表2,动态切换电阻分别取247.47 Ω 和556.5 Ω 。设0.1 s为单相接地故障发生时刻,0.24 s为动态切换电阻的开关合闸时刻,0.3 s为消弧线圈支路开关分闸时刻。

切换为中性点经电阻接地后,中性点电

压波形都趋于稳态。按照彼得生理论取值,中性点电压稳态幅值为896 V(见图5a);按照俄罗斯工程经验取值,中性点电压稳态幅值为1 221 V(见图5b)。由于启动电压阈值 U_K 整定为20% U_ϕ ,即1 155 V,因此若采用彼得生理论选取切换电阻值,系统将不能判断单相接地故障的发生,选线程序无法启动。

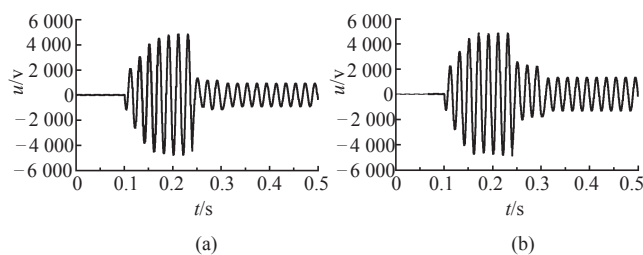


图5 两种电阻取值理论下的中性点电压波形

Fig. 5 Neutral point voltage waveform under two dynamic switching resistance values

此外,按照彼得生理论选取电阻,会使接地电流 $I_g=\sqrt{I_c^2+I_t^2}=1.44 I_c$,即在原基础上使故障点电流增大1.44倍。以俄罗斯工程经验选取电阻,能使选线程序正常启动,且不会显著增大故障点电流,对人身和设备安全有利,因此采取俄罗斯工程经验理论作为动态切换电阻值选取的依据。

2.2 阻性电流注入

当程序判定系统发生永久性接地故障时, S_2 闭合,投入电阻支路; S_1 断开,切除消弧线圈支路。此时系统零序等效电路如图6所示。

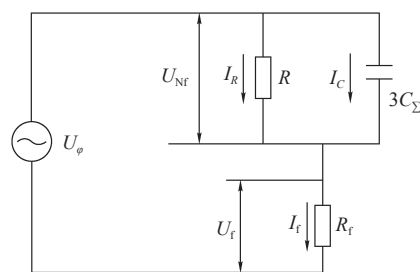


图6 电阻支路投入后系统零序等效回路

Fig. 6 Zero-sequence equivalent circuit after the input of the resistance branch

图6中, U_ϕ 为故障相电压; U_{Nf} 为中性点位

移电压； $3C_{\Sigma}$ 为各馈线对地总电容； R 为动态切换电阻； R_f 为故障点过渡电阻； C_{f0} 为故障馈线对地零序电容。由于配电线路对地泄漏电导很小，为简化计算将其忽略，则零序回路总阻抗 Z_C 表达式为

$$Z_C = R_f + \frac{1}{(1/R) + 3j\omega C_{\Sigma}} \quad (6)$$

故障点零序电流 I_d 表达式为

$$I_d = \frac{U_0}{R_f + \frac{1}{(1/R) + 3j\omega C_{\Sigma}}} = I_R + I_{C\Sigma} \quad (7)$$

故障馈线零序电流 I_{f0} 表达式为

$$I_{f0} = I_d = I_{Cf0} = I_R + I_{C\Sigma} - I_{Cf0} \quad (8)$$

设某条非故障馈线对地零序电容为 C_{n0} ，则非故障馈线零序电流 $3I_{n0}$ 为

$$3I_{n0} = 3j\omega C_{n0} U_{Nf} \quad (9)$$

从上述公式可知非故障馈线 $3I_{n0}$ 只包含容性电流，而故障馈线 I_{f0} 包含了阻性电流和容性电流。理想情况下，可以通过监测线路零序电流和零序电压的幅值与相位来确定故障线路，但实际配电网中非故障馈线也存在阻性电流。由于线路电阻的存在，所以需要每一条馈线的阻性电流分量进行提取。非故障馈线与故障馈线零序电流相量如图7所示。

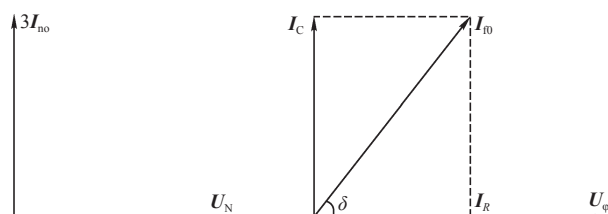


图7 非故障馈线与故障馈线零序电流相量

Fig. 7 Zero-sequence current phasor of non-faulty feeder and fault feeder

$$I_R = I_{f0} \cos \delta = I_{f0} \cos(\delta_{f0} - \delta_{U0}) \quad (10)$$

假设配电网处于对称状态，设中性点位移电压 $U_{Nf} = U_m \sin(\omega t + \theta)$ ，当A相发生单相接地故障时，故障馈线零序电流为

$$3I_{f0} = U_m \sin(\omega t + \theta)/R + 3(C_{\Sigma} - C_{f0})\omega U_m \cos(\omega t + \theta) \quad (11)$$

设在 $t=t_0$ 时， $U_m \sin(\omega t + \theta)/R = 0$ ，即 U_{Nf} 波

形过零点，则此时 $|3I_{f0(t_0)}| = 3(C_{\Sigma} - C_{f0})\omega U_m$ ，所以 $3I_{f0} = U_m \sin(\omega t + \theta)/R + |3I_{f0(t_0)}| \cos(\omega t + \theta)$ ， $U_m \sin(\omega t + \theta)/R$ 即为故障馈线阻性电流 I_R ，因此可得阻性电流表达式为

$$I_R = 3I_{f0} - |3I_{f0(t_0)}| \cos(\omega t + \theta) \quad (12)$$

3 现场实验

为验证动态电阻选线方式实际应用效果，检测其在永久性单相接地故障尤其是经高过渡电阻接地情况下的选线准确性，在河南漯河国家电网配电智能化应用及关键设备联合实验室进行了现场实验。其接线如图8所示，实验现场如图9所示。

实验场设置3条真实馈线与3条模拟馈线。通过调整线路首末端分散布置的对地电容器模拟电容电流范围在10~150 A的配电网。

实验时，将Ⅱ真培线作为故障模拟馈线，通过接地电阻柜模拟不同故障点过渡电阻。系统电容电流设置为65 A，根据上文分析，选取动态切换电阻阻值为600 Ω，调匝式消弧线圈档位为5档，消弧线圈补偿电流 $I_L = 68.8$ A，电网不平衡度 $\zeta = 0.15\%$ ，模拟故障点的过渡电阻值分别设为0 Ω、200 Ω、1 000 Ω、2 000 Ω、3 000 Ω和3 500 Ω。

经示波器采集，故障点过渡电阻为3 500 Ω时各馈线（Ⅰ~Ⅳ真培）零序电流波形如图10所示。可以看出在 $t=0$ 时刻发生过渡电阻为3 500 Ω的接地故障，装置首先工作在消弧线圈接地方式下，由于消弧线圈对故障线路零序电流的补偿作用，故障线路零序电流小于非故障线路，但差别不明显。 $t=150$ ms时刻动态切换到电阻接地状态时，由于阻性电流的注入，使故障馈线零序电流增大且远远大于非故障馈线，具体试验数据如表3所示。

从表3可以看出，当中性点工作在经消弧线圈接地方式时，各馈线零序电流没有明显规律。当系统判断故障发生并动态切换至电阻接地方式时，由于阻性电流的注入，故障馈线Ⅱ真培的零序电流明显增大且大于所有

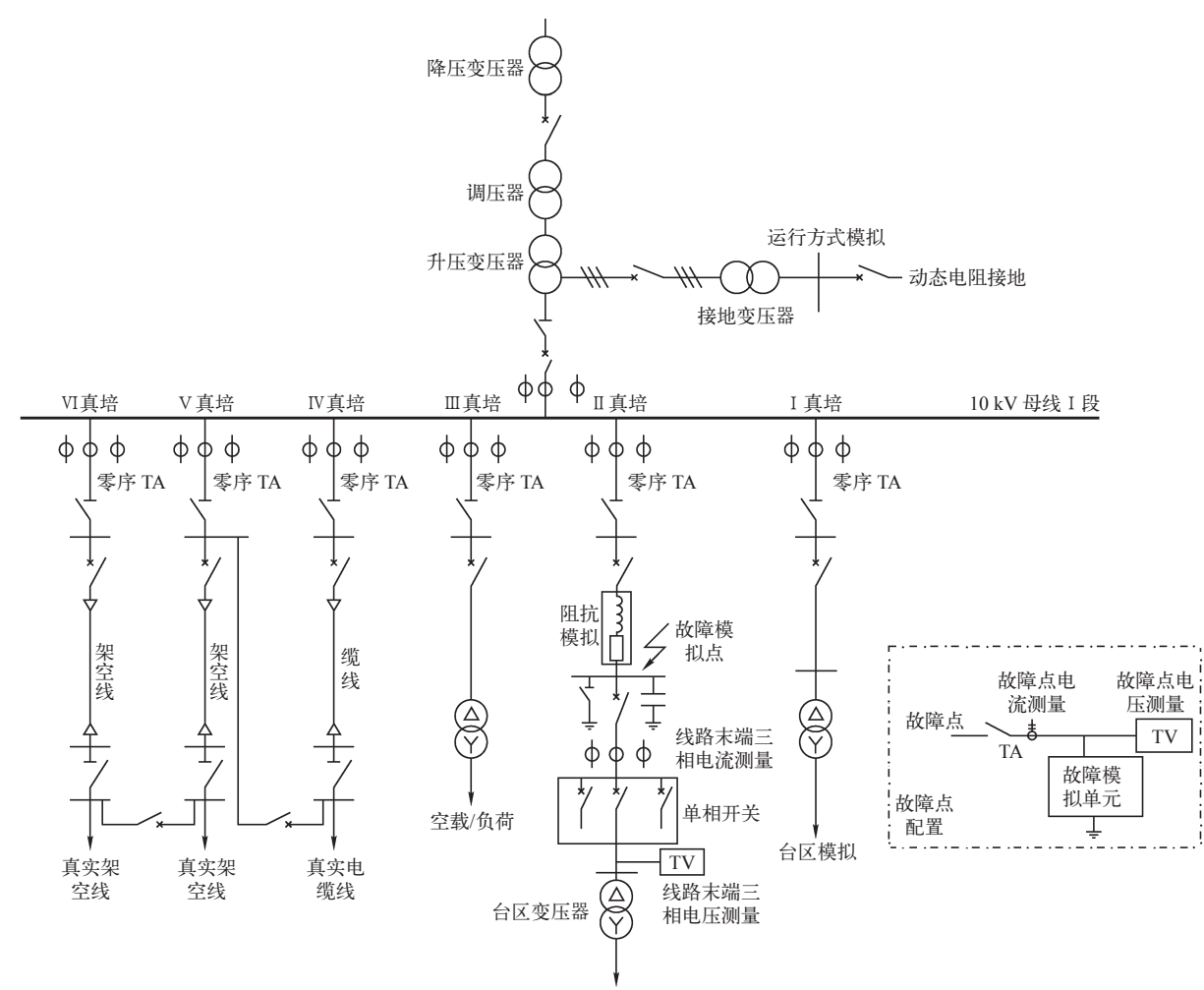


图8 试验场接线
Fig. 8 Test field wiring

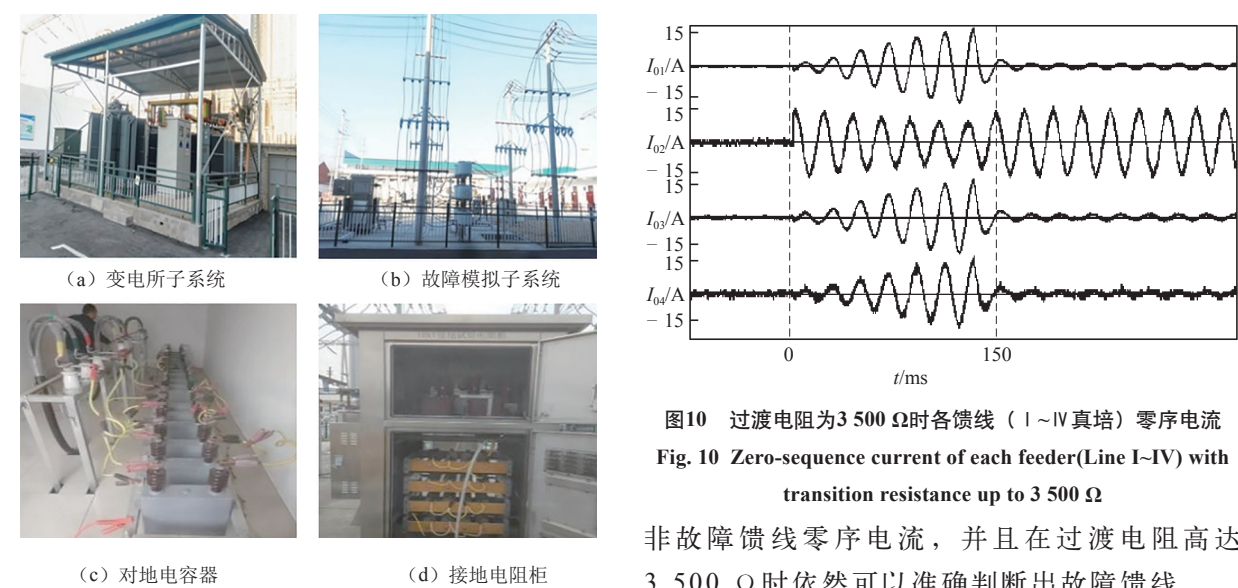


图9 实验现场
Fig. 9 Test site

图10 过渡电阻为3 500 Ω时各馈线（I~IV真培）零序电流
Fig. 10 Zero-sequence current of each feeder(Line I-IV) with transition resistance up to 3 500 Ω

非故障馈线零序电流，并且在过渡电阻高达3 500 Ω时依然可以准确判断出故障馈线。

表3 动态电阻选线方式在永久性单相接地故障下的试验数据

Tab. 3 Test data of dynamic resistance line selection method under permanent single-phase ground fault

过渡电阻/ Ω	中性点 接地方式	中性点电压/V	各馈线零序电流/A						选线 结果
			I 真培	II 真培	III真培	IV真培	V 真培	VI 真培	
0	消弧线圈	4 179	33.8	3.6	22.2	5.7	0.6	0.6	II 真培
	电阻	6 145	35.2	81	23.3	6	0.6	0.6	
200	消弧线圈	6 668	32.2	2.4	21.3	5.4	0.45	0.6	II 真培
	电阻	2 584	9.75	23.4	6.45	1.65	0.15	0.15	
1 000	消弧线圈	5 597	27	1.95	17.9	4.5	0.45	0.45	II 真培
	电阻	454	2.3	5.25	1.5	0.45	0	0	
2 000	消弧线圈	4 439	21.4	1.4	14.1	3.6	0.3	0.3	II 真培
	电阻	309	1.35	3.2	0.75	0.15	0	0	
3 000	消弧线圈	419	2.1	1.8	1.35	0.3	0	0	II 真培
	电阻	128.2	0.7	1.6	0.55	0.1	0	0	
3 500	消弧线圈	219.1	1.8	1.5	1.2	0.2	0	0	II 真培
	电阻	120.3	0.6	1.3	0.4	0.1	0	0	

4 结束语

1) 谐振接地系统发生单相接地故障时, 受各馈线对地电容差异性和故障点过渡电阻影响, 故障馈线与非故障馈线的零序电流呈现无规律性变化, 给故障选线带来较大困难。

2) 现场实验数据证明在运用故障稳态和暂态信号选线时, 信号量幅值与相位易受过渡电阻和故障合闸角影响, 在实际应用中选线效果不佳。

3) 动态电阻选线方式在配电网发生单相接地故障时, 由控制系统将中性点动态切换为电阻接地方式, 向故障馈线注入阻性电流, 从而实现故障选线功能; 动态电阻选线程序在中性点位移电压大于相电压20%时启动; 通过仿真确定了以俄罗斯工程经验理论作为切换电阻值的选取方法。

4) 通过现场实验证明动态电阻选线方式在谐振接地系统发生永久性单相接地故障时能迅速启动选线程序, 并准确地选出故障馈线, 其过渡电阻识别能力达3 500 Ω , 为谐振接地系统单相接地选线难题提供了一种有效可行的解决办法。

参考文献

- [1] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [2] 平邵勋. 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.
- [3] 张辉. 电网间歇性接地故障的分析及间歇性零序保护的探讨[J]. 电工技术, 2018(17): 78-79, 81.
- [4] 张辉. 关于配电网中性点经消弧线圈接地方式的探讨[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 87-91.
- [5] 要焕年. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 庞吉年. 配电网谐振过电压故障分析与抑制措施研究[D]. 福州: 东南大学, 2016.
- [7] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

作者简介



易洲楠

易洲楠(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网接地技术。

(收稿日期: 2019-07-16) **EA**