

高阻型单相接地故障信号的暂态分量影响因素研究

李瑞祥¹, 李舟², 李巍², 王雨², 王少鲁², 黄易之³, 李永峰⁴, 杨兰均¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网陕西省电力公司西安供电公司, 西安 710000;
3. 西安西交瑞力电气研究院有限公司, 西安 710000; 4. 中联西北工程设计研究院有限公司, 西安 710077)

摘要:高阻型单相接地故障信号的暂态分量,在故障过渡电阻这一主要影响因素之外,还受到以下影响因素的制约,进而影响暂态判据选线的准确度:配电网发生故障时所运用的系统接地方式、故障发生时的相角、故障发生点距母线的距离、故障发生出线的长度等。其中系统接地方式由于为配电网系统本身的设计所导致,不受故障本身随机性的影响,因而其影响对于研究高阻型单相接地故障特征的暂态分量具有基础意义。本文利用了 Matlab-Simulink 仿真平台,重点针对过渡电阻阻值、中性点接地方式对高阻型单相接地故障暂态分量的影响进行了仿真分析,着重探究了过渡电阻阻值以及几种中性点非有效接地方式,在接近真实情况的三相不平衡条件下对高阻型单相接地故障暂态分量的影响。结果表明高阻型单相接地故障的过渡电阻较小、系统消弧线圈补偿度较小或中性点不接地,将影响高阻型单相接地故障信号的暂态分量并使得其强度较大、信噪比较高。

关键词:高阻型单相接地故障;暂态分量;单相接地故障选线

Research on Influence Factors of Transient Component of High-impedance Single-phase Grounding Fault Signal

LI Ruixiang¹, LI Zhou², LI Wei², WANG Yu², WANG Shaolu², HUANG Yizhi³,
LI Yongfeng⁴, YANG Lanjun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Grid Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710000, China;
3. Xi'an Real Power Company, Xi'an 710000, China; 4. China United Northwest Institute for
Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The transient component of the high-resistance single-phase grounding fault signal is not only the main influencing factor of the fault transition resistance, but also restricted by the following influencing factors, which in turn affects the accuracy of the transient criterion line selection: In case of fault of distribution network the grounding mode of the used system phase angle, the distance from the fault point to the bus, the length of the outgoing line of the fault, etc. Among them, the grounding mode of the system is caused by the design of the distribution network system itself and is not affected by the randomness of the fault itself. Therefore, its influence is fundamental to the study of the transient components of the high-resistance single-phase grounding fault characteristics. In this paper the Matlab-Simulink simulation platform is used to focus on the simulation analysis of the transition resistance value and the neutral grounding mode on the transient component of the high-resistance single-phase grounding fault. The influence of high transition value and several non-effective grounding mode of several neutral point affects on the transient component of the high-resistance single-phase grounding fault under the three-phase unbalanced condition close to the real situation is particularly explored. The results show that the transition resistance of high-resistance single-phase grounding fault is smaller, the compensation of arc suppression coil of system is smaller or the neutral point is not grounded, which will affect the transient component of high resistance single phase grounding fault and keep its strength larger and signal to noise ratio higher.

Keywords: high-resistance single-phase grounding fault; transient component; fault line selection

0 引言

单相接地故障是配电网中的一类常见故障,对于低阻型单相接地故障,由于其故障信息不论暂态分量还是稳态分量均在配电网中强度较大、信噪比较高,选线系统不论利用暂态还是稳态信息工作,均能选准故障支路、快速切除故障^[1]。但对于高阻型单相接地故障,由于其故障信息的稳态分量在配电网中强度较弱、信噪比相对较低,因而对于利用稳态信号工作的选线系统而言,往往难以选准故障支路;而对于暂态分量而言,虽然强度也相对较弱,但因为其受线路中以三相不平衡为例的一类常见干扰的影响较小,高阻型单相接地故障信号的暂态分量的信噪比相对较高,因而选线系统可以利用暂态信号选准发生高阻型单相接地故障的支路^[2]。

而在故障过渡电阻这一影响因素之外,高阻型单相接地故障信号的暂态分量还受到以下影响因素的制约,进而影响暂态判据选线的准确度:配电网发生故障时所运用的系统接地方式、故障发生时的相角^[3]、故障发生点距母线的距离、故障发生出线的长度等^[4]。其中系统接地方式由于为配电网系统本身的设计所导致,不受故障本身随机性的影响,并且可以通过对系统接地方式的变更操作加以优化调试,因而研究其对高阻型单相接地故障暂态分量的影响,对于评判暂态选线方法、提高暂态选线准确度,具有基础意义。

因此,本文利用了 Matlab-Simulink 仿真平台,重点针对过渡电阻阻值、中性点接地方式对高阻型单相接地故障暂态分量的影响,对中线点不接地、经消弧线圈接地以及其它中性点非有效接地系统在发生高阻单相接地故障时的主要特征进行了仿真分析,着重探究了过渡电阻阻值以及几种中性点非有效接地方式,在接近真实情况的三相不平衡条件下对高阻型单相接地故障暂态分量的影响。

1 理论分析

1.1 暂态分量影响因素分析

发生单相接地故障后,配电网系统内首先会经历暂态过渡,该期间为故障后的暂态时期,一般持续半个周期到一个周期之间。相比稳态时期的故障特征而言,暂态零序电流的幅值较大,尤其在过补偿谐振系统中由于消弧线圈提供的感性补偿电流会在暂态阶段抵消容性故障电流至过补偿状态,

因而在这类系统中暂态方法选线的理论收益更高。

暂态阶段的零序电流中存在大量高频分量,为便于数学推导,并对不接地与谐振接地系统进行统一分析,以谐振系统发生高阻型单相接地故障为例,并将该系统发生高阻型接地故障时的状态等效为图1,在图1基础上进行公式推导与数学分析。

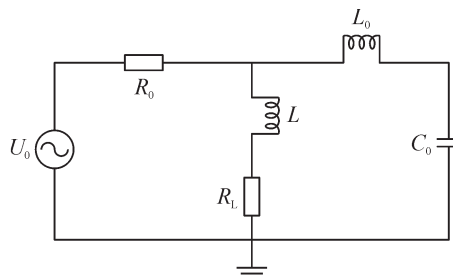


图1 中性点经消弧线圈接地系统高阻型单相接地故障等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of high-resistance single-phase grounding fault of the neutral point through the arc suppression coil grounding system

由于在理想情况下,未发生故障时消弧线圈在电路中不发挥作用,因而此时该系统暂态等效电路仅由零序电压 U_0 、系统等效电阻 R_0 、变压器和线路等效电感 L_0 、总对地电容 C_0 构成,而消弧线圈等效电阻 R_L 和等效电感 L 可被忽略,因而得公式

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C_0} \int_0^t i_c dt = U_0 = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

暂态线路电容电流 i_c 由振荡分量 i_{cbs} 与稳定分量 i_{cst} 组成,利用电容电流幅值关系,将 $t=0, i_c=0$ 作为初始状态时,可以推出暂态线路电容电流 i_c 的表达式为

$$i_c = i_{cbs} + i_{cst} = i_{cm} \left[\left(\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2)$$

当线路发生高阻型单相接地故障,消弧线圈接入电路,而消弧线圈的电感电流也由两部分构成:其一是暂态分量,另一个是稳态分量。由于理想情况下故障刚发生的瞬间线圈中无感性电流,假设其为微分方程的初始状态,则可求出电感电流 i_L 的表达式,其与暂态线路电容电流 i_c 共同构成了暂态接地电流公式为

$$i_L = I_m [\cos \varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (3)$$

通过上述对故障暂态特征和消弧线圈补偿作用的分析,故障角度、故障过渡电阻等因素也会影响到系统等效电阻 R_0 和电感电流 i_L 以及暂态线路

电容电流 i_c 的大小,进而影响暂态接地电流的大小:过渡电阻阻值高,故障相电压角度接近 90° ,暂态分量显著;过渡电阻阻值低,故障相电压角度接近 0° ,暂态分量微弱。其中,由于相电压角度接近 90° 时发生绝缘击穿进而产生单相接地的情况较为典型,其发生概率也远高于其它相角情况,因而过渡电阻的大小对故障暂态特征的影响更为常见。

同时,根据以上分析也可以直观的看出线路等效电感 L_0 、总对地电容 C_0 、消弧线圈等效电感 L 决定了线路电容电流和电感电流的大小,进而影响暂态接地电流的大小。这些参数由系统接地方式、线材参数、线路长度、线路出线数量等线路因素直接决定,而在实际变电站环境中线材参数、线路长度、线路出线数量等因素已经确定难以更改,因而其对高阻型单相接地故障信号暂态分量的影响往往已经确定难以在实际操作中加以更改。而系统接地方式则可以通过对系统接地方式的变更操作加以优化调试,因而其影响更容易在绝大部分配电网中得以体现。

1.2 中性点接地方式

1.2.1 中性点不接地

在中性点不接地运行方式下,如果电网三相电压是近似对称的,则中性点电压将接近于零。但在一般情况下,由于各相对地导纳不相等,中性点电压将受中性点位移所产生位移电压的影响而不接近于零。当中性点不接地配电网发生单相短路时,健全相电压将升高 $\sqrt{3}$ 倍,由于线电压仍保持不变,故对电力用户的继续工作影响不大。同时,单相接地时所产生的接地电流将在故障点形成电弧,这种电弧可能是稳定的或间歇的。因而,当接地电流不大时,则电流过零时电弧将自行熄灭,接地故障也随之消失。但当接地电流大于 10 A 而小于 30 A 时,有可能产生不稳定的间歇电弧,由此将引起幅值较高的弧光接地过电压,对绝缘较差的设备、线路上的薄弱环节和绝缘强度很低的旋转电机有较大的威胁,在一定程度上威胁线路的安全运行。因而在使用中性点不接地系统时,需要额外配置接地选线保护系统。

但在中性点不接地运行方式下,系统不受补偿电流的影响,其故障零序特征相比于谐振接地系统更加明显,更加方便选线。不接地系统不受消弧线圈的影响,其发生串联谐振的风险相比于谐振接地系统大大降低。系统容量也不受消弧线圈容量的限制,因而在发展电网容量时可以突破消弧线圈容量的瓶颈。因此配合高准确率选线装置的中性点不接地运行方式具有巨大的潜力,有极大可能成为

未来建设配电网系统的首要选择。

1.2.2 中性点经消弧线圈接地

中性点经消弧线圈接地的电网又称为补偿电网或谐振电网。消弧线圈是一个装设于此类电网中性点的具有铁芯、可调电感线圈。当发生单相接地故障时,可形成与接地电容电流大小接近但方向相反的感性电流以补偿单相接地故障时在系统内部所产生的容性电流,从而使故障点的电流变得很小或接近于零,使电弧熄灭。同时,消弧线圈还可以迟滞故障相电压的恢复从而减小电弧重燃的可能性,从而使高幅值过电压出现的几率变小。

消弧线圈接地电网根据消弧线圈补偿率的不同可分为过补偿、欠补偿和全补偿。由于采用全补偿时网络易出现串联谐振、采用欠补偿方式时网络也会因为线路切除而可能接近完全补偿方式,因此在谐振接地电网中多采用过补偿。

但对于过补偿的中性点经消弧线圈接地系统,其单相接地短路电流由于得到补偿而变小,因而这类系统的选线保护效果较差,低于不接地系统。并且随着线网的日益发展,消弧线圈容量却出现了限制,其规格在达到一个临界值后并不能保证随线网容量无限升高,若消弧线圈容量无法升高,为了谐振接地电网的安全运行,势必会限制电网的发展,并且在电缆线路中,由于电缆电容电流较大,需要很大的补偿容量,更加重了这个矛盾。但谐振接地系统现状被广泛应用于各种用途的配电网系统中,因而如何在经消弧线圈接地系统中改进使用选线装置成为了保证此类电网安全稳定运行的重要问题。

2 仿真分析

2.1 仿真模型

文献[5-6]重点讨论了中性点不接地配电网以及谐振接地配电网建模暂态仿真的基本原理并给出了具有一定借鉴意义的暂态仿真模型示例,文献[7-10]则分别探讨了三相不平衡的建模方法,以及在配电网暂态建模中对一次设备、过渡电阻等电气模型的搭建和仿真参数的确定方法。这些现有的工作主要集中于对理想配电网在发生理想故障时的主要特征进行建模仿真,较少考虑高阻型接地故障在诸如三相不平衡等复杂条件下发生的特点以及配电网发展方向等要素进行建模仿真。

因而在此基础之上,在 Matlab-Simulink 仿真平台中搭建了一个具有 15 条出线的 10 kV 中性点不接地系统。在仿真过程中,主变压器的额定电压为 $110/10.5\text{ kV}$,具体参数见表 1。

表1 SFZ11-40000/110/10.5型变压器参数表
Table 1 Parameters of type SFZ11-40000/110/10.5 transformer

额定容量/ kVA	阻抗电压/% 高~低	空载损 耗/kW	负载损 耗/kW	联接组别
40 000	10.5	30	156	YNd11

由于城市配电网中电力电缆的比重越来越大,全电缆网在配电网中的比重也随之增加。由于相较于架空线而言电缆线路的总电容量更大,因而若系统内电缆出线数量持续增加,同一单相接地故障所引发的故障特征也会随之增强。为使仿真模型紧凑方便,因而采用全电缆出线,以使模拟系统故障特征的强度最大化。

仿真用接线图见图2所示。图中 $L_1\sim L_{15}$ 为15条出线的序号。为使仿真过程紧凑方便并节省仿真运行的时间成本,并依据高阻型单相接地故障暂态分量的频率,使用500 m一节的PI模型对各条电缆建模,并将仿真步长设置为0.02 ms。同时,为使仿真模型适应配电网真实环境下配电网出线长度、参数变化多样,线路负载大小不一等特殊情况,并考虑到10 kV电压等级配电网的输送距离应小于20 km,因而使用如表2所示的线路参数进行仿真。

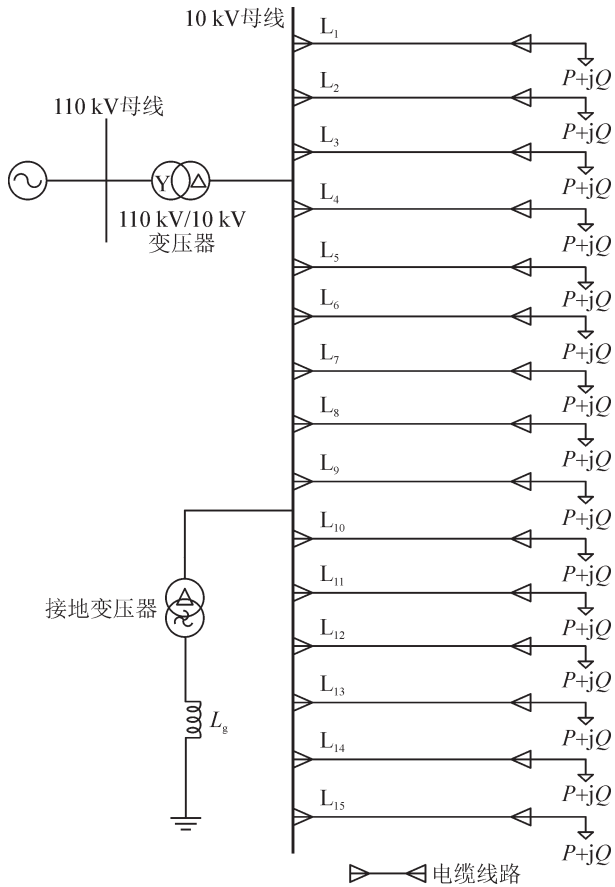


图2 仿真系统接线图
Fig. 2 Wiring diagram of simulation system

表2 出线情况表
Table 2 Outgoing line situation

参数	出线编号							
	L_1	L_3	L_5	L_7	L_9	L_{11}	L_{13}	L_{15}
长度/km	18.5	17.5	16.5	15.5	14.5	13.5	12	10.5
线型	YJV22-3 [*]							
	300	300	300	300	300	300	240	240
P/kW	300	400	500	300	400	500	500	500
Q/kvar	25	25	25	25	25	25	30	30

设 L_1 线的A相发生单相接地故障,并将故障发生时刻设定在相电压最高处,三相不平衡度设置为4%,仿真结束后可以获得关于该仿真在不接地、欠补偿谐振接地(以80%欠补偿接地为例)、过补偿(以105%过补偿接地为例)谐振接地等中性点接地方式下的系统零序电流典型特征。同时将接地故障阻抗由低阻抗(1 000 Ω)逐次更换到高阻抗(5 000 Ω),以模拟不同情况下的各类高阻接地故障,即可得到三种典型中性点接地方式下的高阻故障发生前后的时域波形数据。最后再将时域数据经短时傅里叶变换STFT(STFT滑窗时间长度20 ms)处理,得到了下述高阻型单相接地故障暂态分量的时频特征。

2.2 过渡电阻对暂态分量的影响

不同过渡电阻下的故障线路零序电流见图3-4。通过观察图3-4和表3-4所示的仿真结果可知,单相接地故障的高频零序特征基本不受到故障发生前系统三相电压不平衡所导致的稳态零序电流的影响,相比于稳态量暂态量在故障发生前后的区分显著,因而在面对三相不平衡条件下的高阻单相接地故障时利用暂态选线具有明显优势。

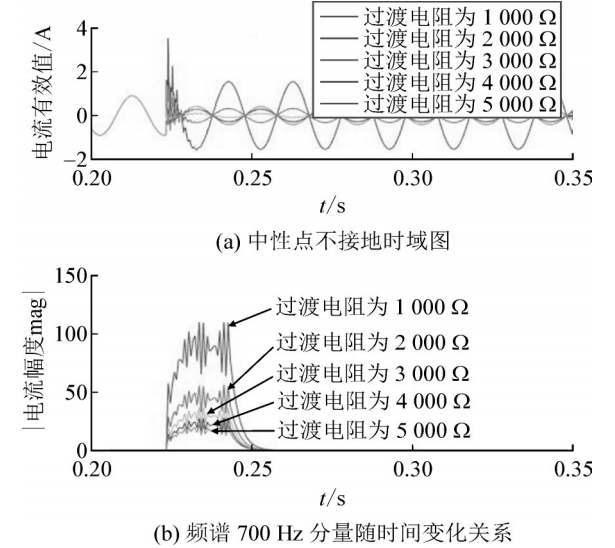


图3 不同过渡电阻下的故障线路零序电流
(以不接地系统为例)
Fig. 3 Zero-sequence current of fault line under different transition resistance (taking ungrounded system as an example)

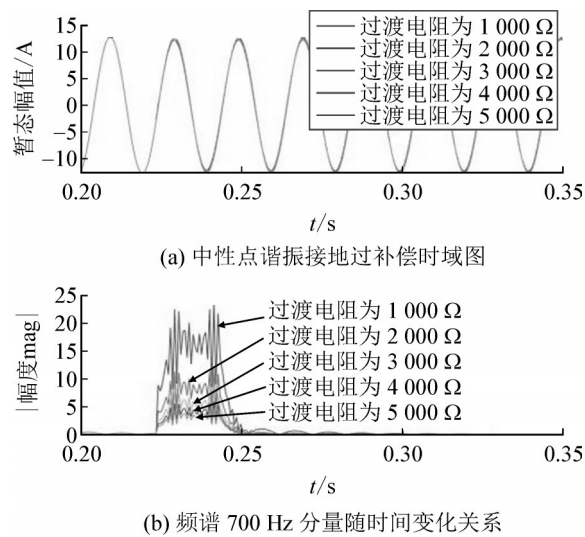


图4 不同过渡电阻下的故障线路零序电流
(以过补偿谐振接地系统为例)

Fig. 4 Zero-sequence current of fault line under different transition resistance (take over-compensated resonance grounding system as an example)

为便于量化描述图 3-4 波形特征,将图 3-4 所示不同过渡电阻下的故障线路零序电流稳态有效值指标和暂态幅值指标与同一系统内不同过渡电阻下的非故障线路零序电流稳态有效值指标和暂态幅值指标之比分别定义为各自的灵敏度特征,见表 3-4。其中,该值越接近 1 表明灵敏度越差。

表3 不同过渡电阻下的灵敏度特征表
(以不接地系统为例)

Table 3 Sensitivity characteristics table under different transition resistance (taking ungrounded system as an example)

选取分量	过渡电阻阻值/Ω				
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
稳态灵敏度特征	1.76	0.42	0.12	0.43	0.59
暂态灵敏度特征 (以 700 Hz 为例)	5.64	5.63	5.62	5.63	5.62

表4 不同过渡电阻下的灵敏度特征表(以过补偿谐振接地系统为例)

Table 4 Sensitivity characteristics table under different transition resistance (taking over-compensated resonance grounding system as an example)

选取分量	过渡电阻阻值/Ω				
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
稳态灵敏度特征	0.95	0.98	0.99	0.99	0.99
暂态灵敏度特征 (以 700 Hz 为例)	8.76	8.84	8.92	8.99	9.07

同时,还可以观察到,在 1 000 Ω 以上的高阻故障中,过渡电阻越大其所带来的故障特征越轻微,因

而可以认为过渡电阻的大小依然决定了三相不平衡条件下高阻型单相接地故障暂态分量的显著程度。

2.3 中性点接地方式对暂态分量的影响

为了更加清晰地反应高阻型单相接地故障信号暂态分量在不同接地方式系统中的时频差异,以探究中性点接地方式对暂态分量的影响,下文以过渡电阻为 1 000 Ω 时 3 种接地系统的故障线路零序电流时频三维分布图为例,对比分析不同中性点接地方式对高阻型单相接地故障暂态分量的影响。

为便于量化描述上述波形特征,将图 5-7 所示故障线路零序电流在 FFT 频谱特定频率上的幅值特征总结见表 5。其中,该值越小越表明该分量难以测量。

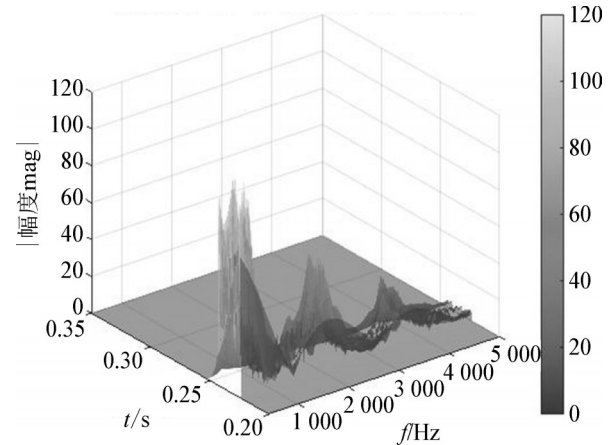


图5 过渡电阻为 1 000 Ω 时不接地系统的故障线路零序电流时频三维分布图

Fig. 5 Three-dimensional time-frequency distribution diagram of zero sequence current of the fault line of ungrounded system when transition resistance is 1 000 Ω

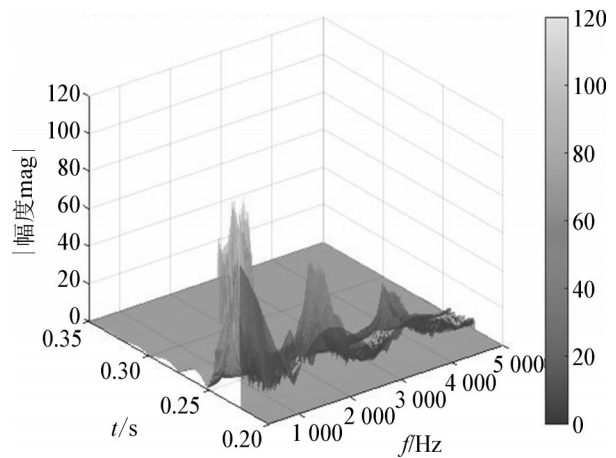


图6 过渡电阻为 1 000 Ω 时欠补偿谐振接地系统的故障线路零序电流时频三维分布图

Fig. 6 Three-dimensional time-frequency distribution diagram of zero sequence current of the fault line of under-compensated resonance grounding system when transition resistance is 1 000 Ω

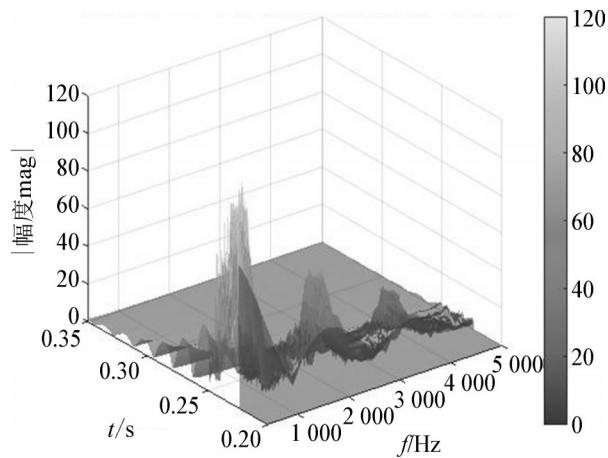


图7 过渡电阻为1 000 Ω 时过补偿谐振接地系统的故障线路零序电流时频三维分布图

Fig. 7 Three-dimensional time-frequency distribution diagram of zero sequence current of the fault line of over-compensated resonance grounding system when transition resistance is 1 000 Ω

表5 不同接地方式下的幅值特征表(以故障过渡电阻为1 000 Ω 时为例)
Table 5 Amplitude characteristics table under different grounding systems (taking the fault transition resistance of 1 000 Ω as an example)

中性点接地方式	频率/Hz				
	600	700	800	2 200	3 600
不接地	82.18	112.70	61.49	53.97	29.85
谐振接地欠补偿	80.21	110.56	60.40	52.01	30.80
谐振接地过补偿	79.19	113.20	63.11	54.10	27.91

通过观察图 5-7 以及表 5 所示的仿真结果可知,在 1 000 Ω 以上的高阻故障中,中性点接地方式对故障选线暂态判据不具有显著影响,故障信号暂态分量在多种中性点接地方式下均具有抗干扰性,因而认为在多种接地方式条件下选线系统使用暂态分量选线相比于稳态选线更具优势。

3 结语

本文对影响高阻型单相接地故障信号暂态分量的因素进行了讨论研究,发现对于高阻型单相接地故障,使用暂态信号选线具有特征明显、不易受干扰等特点,因而相比于稳态信号而言容易稳定提取,因而具有较大优势。

此外,通过分析仿真数据,可以发现高阻故障信号的暂态分量主要集中在 700 Hz 频率左右,若要采集该频段信号用于选线,为防止在采样时发生信号混叠,实际采样装置的采样频率应当高于奈奎斯特频率,因而需要使数据采集装置的采样率达到 35 kHz 以上;同时,针对仿真结果,暂态分量的频率特征也对传感器带宽提出了较高要求,为防止传感

器在采集信号过程中因传感器带宽不足发生的采集信号高频分量的过度衰减,一般需要使传感器带宽达到 2 kHz 以上。因而在实际使用暂态选线时对数据采集装置的性能具有较高要求。

参考文献

[1] 薛太林,冯骅,张鑫. 中性点不接地系统单相接地故障选线新方法[J]. 电子测量技术,2010,33(3):126-128.
XUE Tailin,FENG Hua,ZHANG Xin. New method of single-phase grounding fault line selection for neutral point ungrounded system[J]. Electronic Measurement Technology, 2010,33(3):126-128.

[2] 李涛. 杨家坪供电局小电流接地系统单相接地故障选线应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.

[3] 孙益辉,秦立明,张明达,等. 一种适用于谐振接地系统的动态电阻选线方式[J]. 电瓷避雷器,2021(1):117-123.
SUN Yihui,QIN Liming,ZHANG Mingda, et al. A dynamic resistance line selection method suitable for resonant grounding systems[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1):117-123.

[4] 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.

[5] 王宾,崔鑫. 中性点经消弧线圈接地配电网弧光高阻接地故障非线性建模及故障解析分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3864-3872.
WANG Bin,CUI Xin. Nonlinear modeling and analytical analysis of arc high resistance grounding fault in distribution network with neutral grounding via arc suppression coil [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(11):3864-3872.

[6] 高松川,张吉明,胡博,等. 大规模复杂中压配电网设备可靠性参数的精确建模及应用[J]. 南方电网技术,2020,14(9):63-72.
GAO Songchuan,ZHANG Jiming,HU Bo, et al. Accurate modeling and application of equipment reliability parameters for large-scale complex distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2020,14(9):63-72.

[7] 刘科研,叶华,裴玮,等. 基于特征值分析的配电网多速率暂态仿真性能评估方法研究[J]. 电网技术,2020,44(11):4088-4095.
LIU Keyan,YE Hua,PEI Wei, et al. Research on computational performance of multi-rate transient simulation in distribution network based on eigen-value analysis[J]. Power System Technology, 2020,44(11):4088-4095.

[8] 刘科研,盛万兴,董伟杰. 配电网弧光接地故障建模仿真与实验研究综述[J]. 高电压技术,2021,47(1):12-22.

- LIU Keyan, SHENG Wanxing, DONG Weijie. Overview of modeling simulation and experimental research on arc grounding fault in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 12-22.
- [9] 白雪飞. 配电网三相不平衡随机时序建模与评估[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2020.
- [10] 谭王景, 王倩, 郑航, 等. 中性点经 ZnO 非线性电阻接地系统的故障识别方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(3): 59-65.
- TAN Wangjing, WANG Qian, ZHENG Hang, et al. Method of fault identification by using ZnO nonlinear resistance grounding mode[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(3): 59-65.
- [11] 林志超, 刘鑫星, 王英民, 等. 适应多点接地故障的小电阻接地系统集中式保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 67-73.
- LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Centralized protection for low-resistance grounding system under multi-point grounding fault[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2019, 31(6): 67-73.
- [12] 吴凤翔, 顾兆雄. 小电流接地系统两点接地故障仿真分析[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(6): 524-528.
- WU Fengxiang, GU Zhaoxiong. Simulation analysis of two-point ground fault in small current grounding system[J]. Journal of Shanghai Electric Power University, 2020, 36(6): 524-528.
- [13] 张耀锋. 单相接地故障选线 Simulink 仿真分析[J]. 电子测试, 2020(17): 45-47.
- ZHANG Yaofeng. Simulation analysis of single phase to ground fault line selection based on Simulink[J]. Electronic Test, 2020(17): 45-47.
- [14] 张晋轩, 柳影. 基于注入法单相接地故障仿真分析[J]. 科技经济导刊, 2021(7): 62-63.
- ZHANG Jinxuan, LIU Ying. Simulation analysis of single-phase ground fault based on injection method[J]. Technology and Economic Guide, 2021(7): 62-63.
- [15] 程玉凯. 单相接地故障电流全补偿 PSIM 仿真[J]. 宜宾学院学报, 2020, 20(12): 20-23.
- CHENG Yukai. Simulation of single-phase earth fault current fully compensation in PSIM[J]. Journal of Yibin University, 2020, 20(12): 20-23.
- [16] 刘瑞. 基于 Matlab 建立仿真分析确认定子接地故障点[J]. 电力与能源, 2020, 41(4): 499-501.
- LIU Rui. Establish simulation analysis based on Matlab to confirm the stator ground fault point[J]. Power & Energy, 2020, 41(4): 499-501.
- [17] 吴海江, 陈锦荣, 廖峰, 等. 小电阻接地配电系统集中式接地保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 141-149.
- WU Haijiang, CHEN Jinrong, LIAO Feng, et al. Research on centralized grounding protection for low resistance grounding distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 141-149.
- [18] 严正国, 马慧, 任星, 等. 基于 Matlab 的小电流接地系统单相接地故障仿真分析[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(10): 153-154.
- YAN Zhengguo, MA Hui, REN Xing, et al. Simulation analysis of single-phase grounding fault based on Matlab small current grounding system[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(10): 153-154.
- [19] 荣飞, 刘成, 刘红文, 等. 基于混合补偿的配电网单相接地故障消弧方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 45-52.
- RONG Fei, LIU Cheng, LIU Hongwen, et al. Single-phase grounding fault arc suppression method of distribution network based on hybrid compensation[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 45-52.
- [20] 郭馨慧, 唐秀明, 周少武. 工业 10 kV 电网中性点经小电阻接地方法研究及应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3): 58-64.
- GUO Xinhui, TANG Xiuming, ZHOU Shaowu. Research and application of neutral point grounding method for industrial 10 kV power network[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3): 58-64.
- [21] 齐郑, 赵昕一, 陈艳波. 暂态与稳态相不对称信号相结合的配电网单相接地故障感知技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1264-1276.
- QI Zheng, ZHAO Xinyi, CHEN Yanbo. Single-phase grounding fault sensing technology in distribution network based on transient and steady state phase asymmetrical signals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1264-1276.
- [22] 涂春鸣, 黄泽钧, 郭祺, 等. 一种具备单相接地故障调控与无功补偿能力的多功能并网型变流器[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4286-4295.
- TU Chunming, HUANG Zejun, GUO Qi, et al. Multifunctional grid-connected converter with capabilities of single-phase grounding fault regulation and reactive power compensation[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4286-4295.
- [23] 王立婷, 王俊江, 徐策, 等. 基于改进 MEEMD 的单相接地故障选线频域仿真及效果验证[J]. 煤矿机械, 2021, 42(8): 206-209.
- WANG Liting, WANG Junjiang, XU Ce, et al. Frequency domain simulation and effect verification of single-phase earth fault line selection based on improved MEEMD[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(8): 206-209.
- [24] 曲振明, 王宾, 张慧芬. 中性点小电阻接地配网多分支电缆线路单相接地故障测距[J]. 电气应用, 2021, 40(5): 28-33.

(下转第 116 页)

- ment & Instrumentation, 2020, 57(11): 1-8.
- [18] YOU J, VILATHGAMUWA M, GHASEMI N. DC bus voltage stability improvement using disturbance observer feed-forward control[J]. Control Engineering Practice, 2018, 75: 118-125.
- [19] ZHANG L, CHEN K, LYU L, et al. Research on the operation control strategy of a low-voltage direct current microgrid based on a disturbance observer and neural network adaptive control algorithm[J]. Energies, 2019, 12(6): 1-17.
- [20] 李霞林, 郭力, 冯一彬, 等. 基于非线性干扰观测器的直流微电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 350-359.
- LI Xialing, GUO Li, FENG Yibin, et al. A nonlinear disturbance observer based DC bus voltage control for a DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 350-359.
- [21] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [22] GAO Z. Scaling and bandwidth - parameterization based controller tuning[C] // Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, USA: IEEE, 2003: 4989 - 4996.
- [23] 魏选. 三电平PWM整流器线性自抗扰控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- 作者简介:**
- 王正齐(1984—), 男, 副教授, 主要研究方向为新型智能配电设备及其应用。E-mail: wzqnjit@163.com。
- 徐浩(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性多状态开关及其控制策略。
- 王德全(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护、交直流专业工作。

(上接第106页)

- QU Zhenming, WANG Bin, ZHANG Huifen. Single phase grounding fault location of multi branch cable line in distribution network with neutral point via small resistance grounding[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(5): 28-33.
- [25] 陈维江, 孙昭英, 王献丽, 等. 35 kV 架空送电线路防雷用并联间隙研究[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 61-65.
- CHEN Weijiang, SUN Zhaoying, WANG Xianli, et al. Study on shunt gap lightning protection for 35 kV overhead transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 61-65.
- 作者简介:**
- 李瑞祥(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术。E-mail: lrx.wetenschap@foxmail.com。
- 李舟(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 李巍(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 王雨(1992—), 男, 工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 王少鲁(1982—), 男, 工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 黄易之(1989—), 男, 博士, 主要从事高电压技术工作。
- 李永峰(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化工作。
- 杨兰均(1969—), 男, 教授, 研究方向为高电压技术。