

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201372

谐振接地系统单相断线并坠地故障电压特征仿真分析

周斌¹, 陈梦琦², 郑海涯¹, 薛永端², 杨程¹, 何承涛¹

(1. 贵州电网有限责任公司凯里供电局, 贵州 凯里 556000; 2. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 配电网断线故障频发, 缺乏可靠实用的识别与定位方法。针对谐振接地系统的单相断线故障, 建立故障模型。同时考虑了可能影响故障特征的各种因素, 包括故障类型(断线不接地、电源侧或负荷侧单侧接地)、坠地点接地电阻、断口位置负载阻抗的分布以及系统的补偿度等。采用理论与仿真分析相结合的手段, 分析地电位与中性点偏移电压的规律, 并进一步得出断口前后各相电压、线电压的变化特征。结果表明, 与单纯接地故障不同, 其地电位分布范围较大, 断口前后的线电压与三相电压差异明显。所得结论可为利用电压信号的配电网断线故障检测及定位方法研究提供理论依据。

关键词: 配电网; 谐振接地系统; 单相断线; 接地电阻; 电压特征

Simulation analysis of voltage characteristics of a single-phase line-broken and grounding fault in a resonant grounded system

ZHOU Bin¹, CHEN Mengqi², ZHENG Haiya¹, XUE Yongduan², YANG Cheng¹, HE Chengtao¹

(1. Kaili Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guizhou 556000, China;

2. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: A reliable and practical identification and location method is needed for the frequent line-broken fault of a distribution network. In this paper, a fault model is established for the single-phase line-broken fault in a resonant grounded system. Factors that may affect the fault characteristics are considered, including an ungrounded fault, a disconnected fault or a power side or load side grounding fault, as well as disconnection position, load impedance, grounding resistance of the sinking point and the degree of compensation of the system. By combining theory with simulation analysis, a law of ground potential and neutral offset voltage is analyzed, and the variation characteristics of all phase voltage and line voltage before and after fracture are obtained. The results show that, different from the simple earth fault, the ground potential distribution range is larger, and the line voltage before and after the fracture is obviously different from the three-phase voltage. The conclusions can provide a theoretical basis for research on fault detection and location on a distribution network with voltage signal.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221) and the Research and Application on Key Technologies of Promoting Medium Voltage Distribution Network Single-phase Fault Treatment Efficiency of Kaili Power Supply Bureau in 2020 (No. 060800KK52190010).

Key words: distribution network; resonant grounding distribution system; single-phase line broken; grounding resistance; voltage characteristic

0 引言

近年来,随着微机和自动化技术的发展与提高,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077221);凯里供电局 2020 年提升中压配网单相故障处理效能的关键技术研究及应用(060800KK52190010)

配电网中性点经消弧线圈接地(又称谐振接地)的运行方式在我国应用占比逐渐提高^[1-2]。配网断线故障频发,尤以单相断线故障为主,已经引起相关部门的关注,传统配网的故障检测方法以测量故障电流为主,而断线故障的接地电流往往很微弱,且已有的小电流接地故障保护方法^[3-16]适用性有待于进一步提高。单相断线故障可分为断口处不接地、有一

侧接地和两侧均接地三种类型。谐振接地系统断线不接地的故障电压特征在文献[17]中有较为详细的分析,断口两侧均接地的故障特征与单纯接地的故障特征^[18]类似。此外,文献[19-21]主要利用故障时的负序电流信息,其受负荷影响较大,对于故障定位的实现难度较大;文献[22]提出利用零序电压的幅值和相位关系判断断线位置;文献[23]实时监测电源侧及负载侧电压、电流信号,提取断线故障特征信息,综合建立断线故障识别判据,实现单相断线故障实时监测;文献[24]对不同工况下的单相接地故障进行了仿真验证;文献[25]总结了部分断线情况下的三相电压变化规律;文献[26]提出了综合故障电压、电流等多种信息的故障选线定位智能算法,但其实用性未得到进一步验证,以上文献研究对象大多为不接地系统,针对谐振接地系统较少,且对可能影响故障特征的各种因素缺乏必要的分析。

单相断线故障发生在谐振接地系统与其发生在中性点不接地系统^[27]或小电阻接地系统时^[28-29]故障特征差异很大。本文针对谐振接地系统单相断线并坠地故障,建立详细的模型,综合考虑可能影响故障电压特征的各种因素,包括断线类型(含断线不接地、断线并电源侧单侧接地和断线并负荷侧单侧接地)、断线位置、故障线路对地电容占系统对地电容的比例和负载阻抗等;结合数字仿真结果,综合分析得出谐振接地系统发生单相断线故障时,中性点偏移电压(即母线处零序电压)分布规律,进一步给出断口前后的相电压、线电压等电气量变化特征。

1 谐振接地系统单相断线故障模型

谐振接地系统单相断线故障示意图(以 A 相断线为例)如图 1 所示,其中, L 、 R_L 为消弧线圈的并联等效电感和电阻; \dot{U}_{NO} 表示母线处零序电压即中性点偏移电压; \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为系统三相电动势, \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 为母线三相相对地电压,正常运行时可认为 $\dot{U}_A = \dot{E}_A$ 、 $\dot{U}_B = \dot{E}_B$ 、 $\dot{U}_C = \dot{E}_C$; L_1 表示所有非故障线路的等效电路, L_2 表示故障线路的等效电路; C_{A1} 、 C_{B1} 、 C_{C1} 分别为所有非故障线路各相对地电容, C_{A2} 、 C_{B2} 、 C_{C2} 分别为故障线路各相对地电容,由于线路阻抗与线路对地容抗相比小得多,故本文理论推导过程中予以忽略; x 表示断口后对地电容占故障线路总的对地电容的比例,可以反映断线位置;开关 k_1 、 k_2 控制故障类型,当 k_1 、 k_2 均打开时,即断线不接地故障,当仅 k_1 闭合时,即断线并电源侧接地,当仅 k_2 闭合时,即断线并负荷侧接

地; A、A' 为断口两侧节点; Z_{AC} 、 Z_{AB} 、 Z_{BC} 为故障线路三相负载阻抗; R_0 为断口坠地处的接地电阻。

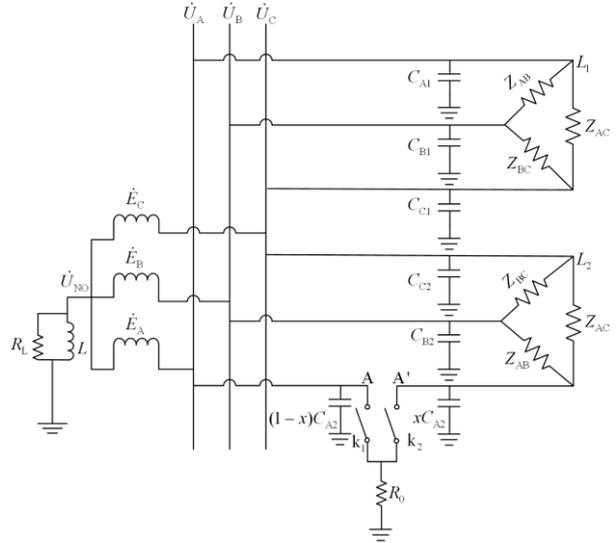


图 1 谐振接地系统单相断线故障示意图

Fig. 1 Diagram of single-phase open ungrounded faults of resonant grounded system

2 断口两侧电压特征分析

结合图 1,由基尔霍夫电流定律可知,无论哪种故障类型,均存在 A' 点对地电流为 0。设 $\dot{U}_{A'}$ 为断口后故障相电压,那么,当仅 k_1 闭合时,即发生单相断线并电源侧接地故障,有

$$\dot{U}_{A'} = \frac{Z_{AB}\dot{U}_C + Z_{CA}\dot{U}_B}{Z_{AB} + Z_{CA} + j\omega x Z_{AB} Z_{CA} C_{A2}} \quad (1)$$

当仅 k_2 闭合时,即发生断线并负荷侧接地,有

$$\dot{U}_{A'} = \frac{Z_{AB}\dot{U}_C + Z_{AC}\dot{U}_B}{Z_{AB} + Z_{AC} + \frac{Z_{AB}Z_{AC}}{R_0} + j\omega x Z_{AB} Z_{CA} C_{A2}} \quad (2)$$

由于中性点电流、故障线路对地电流与非故障线路对地电容电流之和为 0。当 k_1 闭合, k_2 断开,结合式(1),有

$$\dot{U}_{NO} = \frac{Z_{AC}(Z_{AB}j\omega x C_{A2} + \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}) + Z_{AB}(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}) - f}{f + Z_{AB}Z_{AC}j\omega x C_{A2}(y-1) + (Z_{AC} + Z_{AB}) \times (y-1)} \dot{E}_A \quad (3)$$

其中,令 $f = \left(Z_{AC}Z_{AB} + \frac{Z_{AC} + Z_{AB}}{j\omega x C_{A2}} \right) / R_0$, $y = \frac{3k}{x}(v - jd)$, v 表示系统的脱谐度, d 表示阻尼率,同时,设故

对应 $x=1/2$, 三相负载平衡, 负载阻抗均为 400Ω , 接地电阻值为 0 , 即发生金属性接地故障, 电源侧单侧接地、负荷侧单侧接地与断口两侧导线均不接地时电压波形与仿真数据如图 3—图 5 和表 1(其中相位以 \dot{U}_A 为基准, 下同)所示。

可以看出, 断口处发生电源侧接地故障与负荷侧接地故障且接地电阻较小时, 中性点偏移电压的特征有明显差异: 仅电源侧接地, 中性点位于 \dot{U}_A 的顶点附近, 对应的故障相电压幅值在断口前大幅降低, 断口后升高至接近 $3/2$ 正常相电压的程度, 而非故障相电压的幅值在断口前后均升高; 仅负荷侧接地, 中性点位于 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 顶点之间的连线上, 相应的故障相电压幅值在断口前升高, 断口后幅值接近于 0 , 而两非故障相电压幅值均降低。接地电阻阻值极高, 接近断线不接地状态时, 那么电源侧单侧接地与负荷侧单侧接地故障的电压特征趋于相同。

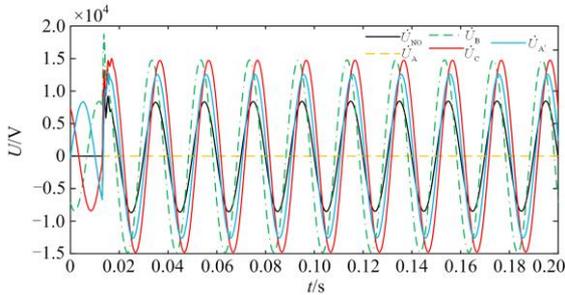


图 3 电源侧单侧接地时电压波形示意图
Fig. 3 Diagram of voltage waveform when the power side is grounded

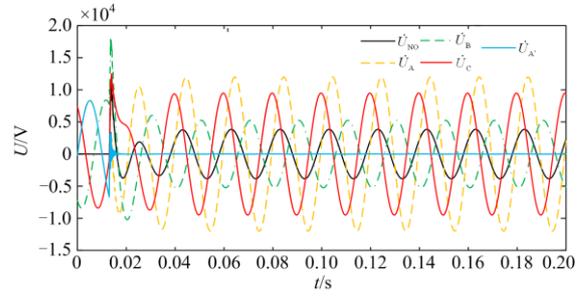


图 4 负荷侧单侧接地时电压波形示意图
Fig. 4 Diagram of voltage waveform when the load side is grounded

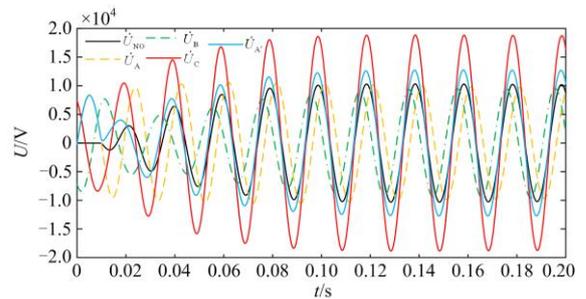


图 5 断口两侧均不接地时电压波形示意图
Fig. 5 Diagram of voltage waveform when both sides of fracture are suspended

3.3 负载阻抗的影响

令仿真系统阻尼率为 10% , 脱谐度为 -10% , 故障点位于距母线 10 km 处, 探究负载阻抗的分布与中性点偏移电压位置的关系。

表 1 不同断线类型的部分电压仿真数据
Table 1 Partial voltage simulation data of different disconnection types

接地侧	\dot{U}_{no} / V	断口前(电源侧)						断口后(负荷侧)		
		\dot{U}_A / V	\dot{U}_B / V	\dot{U}_C / V	\dot{U}_{AB} / V	\dot{U}_{BC} / V	\dot{U}_{CA} / V	\dot{U}'_A / V	\dot{U}'_{AB} / V	\dot{U}'_{CA} / V
电源侧	$5992 \angle$	$0.71 \angle$	$10470 \angle$	$10430 \angle$	10470	$10300 \angle$	$10430 \angle$	$8902 \angle$	$6633 \angle$	$3594 \angle$
接地	181.5°	35.7°	-208.7°	149.6°	$\angle 28.7^\circ$	269.0°	149.6°	168.8°	85.9°	93.9°
负荷侧	$2724 \angle$	$8485 \angle$	$3707 \angle$	$6715 \angle$	10490	$10300 \angle$	$10390 \angle$	$13.95 \angle$	$3672 \angle$	$6649 \angle$
接地	35.5°	10.0°	257.3°	95.4°	$\angle 29.0^\circ$	269.0°	149.9°	92.7°	77.1°	95.1°
断口两侧	$7233 \angle$	$7291 \angle$	$6300 \angle$	$13260 \angle$	10470	$10300 \angle$	$10400 \angle$	$8823 \angle$	$6030 \angle$	$4522 \angle$
均不接地	116.3°	65.1°	65.6°	116.5°	$\angle 28.9^\circ$	269.0°	149.7°	121.5°	76.0°	105.8°

表 2 为断线不接地故障不同负载情况时各电压分布情况选取的部分数据。

由表 2 并结合断线并电源侧、断线并负荷侧接地的仿真结果可知, 其他条件固定, 仅三相负载阻抗变化, 以 $|Z_{AB}| = |Z_{AC}|$ 时的中性点偏移电压相量为轴, 当负载阻抗 $|Z_{AB}| / |Z_{AC}|$ 的比值 (≥ 1) 越大即负载阻抗不平衡程度越高时, 中性点电压偏离轴线的角

度越大, 当 $|Z_{AB}| > |Z_{AC}|$ (也即 $|Z_{AB}|$) 缺失时, 有最大偏移角 30° ; 当 $|Z_{AB}| < |Z_{AC}|$ 时情况类似, 其总体分布范围与 $|Z_{AB}| < |Z_{AC}|$ 时呈轴对称; 当负载阻抗 $|Z_{AB}|$ 或者 $|Z_{AC}|$ 有一缺失时, 断口后故障相电压顶点与 \dot{U}'_C 或 \dot{U}'_B 的顶点重合, 也即断口后故障相电压等于其中一非故障相电压。

表 2 断线不接地的电压仿真数据

Table 2 Voltage simulation data of suspension on both sides of fracture

负载情况	\dot{U}_{NO}/V	断口前(电源侧)						断口后(负荷侧)		
		\dot{U}_A/V	\dot{U}_B/V	\dot{U}_C/V	\dot{U}_{AB}/V	\dot{U}_{BC}/V	\dot{U}_{CA}/V	\dot{U}'_A/V	\dot{U}'_{AB}/V	\dot{U}'_{CA}/V
$ Z_{AB} = Z_{AC} $	8451 \angle 129.3 $^\circ$	7738 \angle 83.3 $^\circ$	7714 \angle 156.8 $^\circ$	13680 \angle 136.8 $^\circ$	10290 \angle 25.1 $^\circ$	8954 \angle 266.9 $^\circ$	9974 \angle 152.6 $^\circ$	10180 \angle 130.7 $^\circ$	4254 \angle 83.8 $^\circ$	3945 \angle 87.4 $^\circ$
$ Z_{AB} \square Z_{AC} $	9591 \angle 100.1 $^\circ$	10240 \angle 62.1 $^\circ$	6332 \angle 135.2 $^\circ$	14410 \angle 106.3 $^\circ$	10350 \angle 26.3 $^\circ$	9373 \angle 267.3 $^\circ$	10050 \angle 151.6 $^\circ$	13850 \angle 105.7 $^\circ$	8465 \angle 85.1 $^\circ$	289.9 \angle 117.6 $^\circ$
$ Z_{AB} \square Z_{AC} $	9644 \angle 158.1 $^\circ$	5784 \angle 110.1 $^\circ$	11340 \angle 175.6 $^\circ$	14910 \angle 136.9 $^\circ$	10350 \angle 26.0 $^\circ$	9335 \angle 267.4 $^\circ$	10080 \angle 151.7 $^\circ$	366.3 \angle 170.9 $^\circ$	8762 \angle 266.4 $^\circ$	8406 \angle 85.8 $^\circ$

3.4 接地电阻与断口位置的影响

令负载阻抗相等, 阻值均设为 $400\ \Omega$, 阻尼率与脱谐度分别设为 10% 与 -10%, 断口处单侧接地时, 接地电阻从 0 开始增大, 依次为 $0\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$ 、 $2\ 000\ \Omega$ 、 $5\ 000\ \Omega$ 、 $10\ 000\ \Omega$ 、 $25\ 000\ \Omega$ 和无穷大(对应断线不坠地故障); 设置故障点分别位于电缆线路距母线 1 km、10 km 和 19 km 处, 对应 $x=19/20$ 、 $1/2$ 和 $1/20$ 。

地电位的位置与中性点偏移电压的变化趋势如图 6、图 7 所示, 其对应的断口前后故障相电压幅值的变化趋势示意图如图 8、图 9 所示。

结合图 6—图 9 可以明显看出: 当接地电阻增大到无穷大时, 那么故障状态接近于断线不接地故障, 也即地电位位于断线悬空时的状态点(为便于下文表述, 设此类状态点为 G 点); 当单纯电源侧接地时, 地电位由 A 点随着接地电阻增大沿圆弧运动到 G 点; 当单纯负荷侧接地时, 接地电阻为 0, 地电位位于 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 顶点之间的连线上, 随着接地电阻增大, 地电位沿圆弧运动到 G 点。

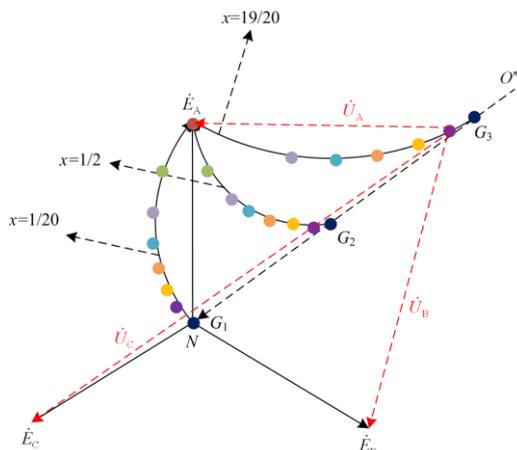


图 6 电源侧接地时地电位轨迹及三相电压偏移示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ground potential track and three-phase voltage offset when the power supply side is grounded

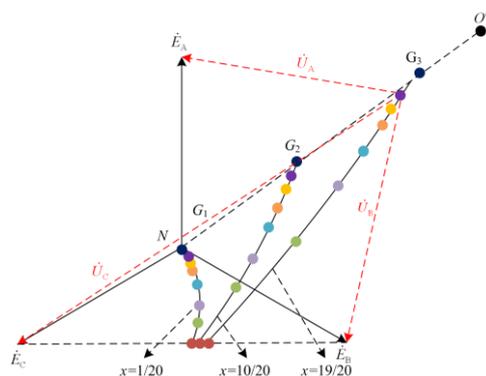


图 7 负荷侧接地时地电位轨迹及三相电压偏移示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ground potential track and three-phase voltage offset when the load side is grounded

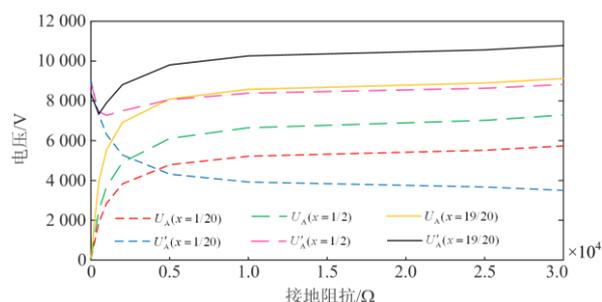


图 8 电源侧接地断口前后的故障相电压变化趋势图

Fig. 8 Voltage variation trend diagram of fault phase before and after grounding fault on the power side

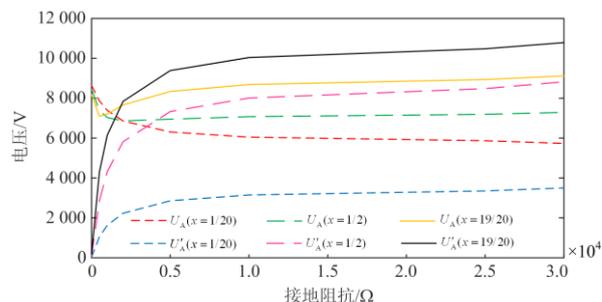


图 9 负荷侧接地断口前后的故障相电压变化趋势图

Fig. 9 Voltage variation trend diagram of fault phase before and after grounding fault on the load side

其他条件相同,断口位置越靠近母线,断口后对地电容占总对地电容的比 $\frac{x}{k}$ 越大,其对应的中性点偏移电压幅值越高。在本节仿真系统设置条件下,中性点偏移电压幅值最高可达 $2.93|\dot{E}_A|$,其对应的故障超前相电压幅值升高程度更大。

断口后对地电容占比较小,随着接地电阻的增大,故障相电压在电源侧单侧接地时,断口前逐渐增大,断口后逐渐减小;负荷侧接地时则有断口前逐渐减小,断口后的反而增大的现象出现;负荷侧接地与电源侧接地故障相电压的变化差异明显且趋势正好相反。当断口后对地电容占比较大且接地电阻增大到一定程度时,会出现电源侧接地的断口后故障相电压与负荷侧接地的断口前故障相电压不降反增的现象。

断口后故障相电压的顶点位置始终近似位于 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 顶点之间的连线上,因此断口后的两个故障相与非故障相之间线电压的幅值和总会近似等于非故障相之间的线电压。

3.5 脱谐度的影响

设系统阻尼率为10%,三相负荷平衡,系统发生断线不接地故障,故障位置位于系统母线出口处且只有系统等效后仅有一条线路,即 $\frac{x}{k} \approx 1$,设置脱谐度分别为-10%、-8%、-6%、-4%、-2%、0%,探讨脱谐度与系统地电位偏移的关系如图10所示。

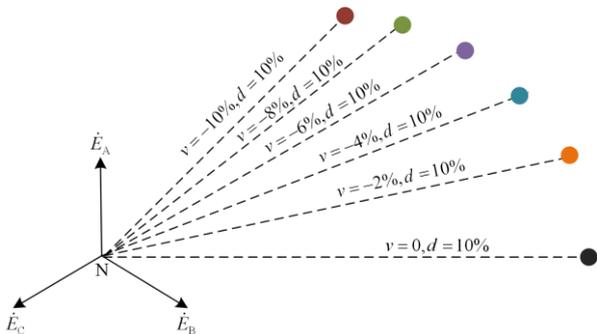


图10 不同脱谐度的下地电位位置示意图

Fig. 10 Diagram of ground potential position under different detuning degrees

如图10所示,故障发生后,地电位的位置在各个脱谐度条件的所在位置下用颜色各异的标记点表示。消弧线圈对零序电压的幅值有明显的放大作用,其他故障条件不变,仅系统补偿度即脱谐度 v 改变时,系统中性点电压的幅值随着过补偿度的增大而逐渐减小,相应的相位偏移角逐渐增大。在本例仿真条件下,中性点电压幅值最高可达 $5|\dot{E}_A|$,偏移角

最大可达 135° 。

此外,设置不同的故障条件,即改变故障线路对地电容占系统总对地电容的比,改变故障点所在相序,改变系统的初相角等,做了大量仿真工作,均能验证本文分析方法的正确性。

4 结论

本文针对谐振接地系统的单相断线故障(含负荷侧与电源侧单侧接地),综合考虑负载阻抗的分布和大小、断线位置、故障线路对地电容占系统总对地电容的比、接地电阻和系统的补偿度等影响因素,通过理论与仿真分析相结合的手段,可得出以下主要结论。

当断口处有一侧导线接地时,仅接地电阻变化,随着接地电阻的增大,地电位沿着圆弧运动,其移动方向和整体的分布范围与发生单纯接地故障^[27]时差异很大;故障类型的影响主要体现在:接地导线若为低阻接地,接地侧的不同会导致电压特征差异明显,对于高阻接地则影响不大;断线位置决定了断口故障线路的对地电容占系统总对地电容的占比,可以得出故障越靠近母线侧,中性点偏移电压越大,系统越靠近负载端,中性点偏移电压越小的结论;消弧线圈对零序电压的有放大作用且过补偿度越小,该作用越明显;在阻尼率为10%,补偿度为100%的条件下,零序电压最高可达 $5|\dot{E}_A|$ 。

相电压由电源电压和零序电压合成:断口前故障相电压在负荷侧单侧接地时会出现高于非故障相电压的现象;断口后故障相电压的顶点始终位于两非故障相电压的顶点之间,有一负载缺失时甚至会与其中一非故障相电压的顶点重合。

断口前三线电压对称,与正常运行时刻无区别,断口后故障相电压顶点的位置决定了两故障相与非故障相之间的线电压幅值之和近似等于第三个线电压。

利用断口前后相电压和线电压差异可以实现单相断线故障的识别与检测。

参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 张姗. 我国大型城市10 kV配电网中性点接地方式的适应性及对策[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHANG Shan. Adaptability and countermeasures of neutral grounding method for 10 kV distribution network of large cities in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [3] GUO M F, GAO H, SHAO X, et al. Location of single-

- line-to-ground fault using 1-D convolutional neural network and waveform concatenation in resonant grounding distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70.
- [4] 陈照, 王尧, 牛峰, 等. 基于神经网络和 D-S 证据理论的故障电弧检测[J]. *高压电器*, 2019, 55(3): 29-36.
CHEN Zhao, WANG Yao, NIU Feng, et al. Fault arc detection based on neural network and D-S evidence theory[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(3): 29-36.
- [5] YU Kun, ZOU Hao, ZENG Xiangjun, et al. Faulty feeder detection of single phase-earth fault based on fuzzy measure fusion criterion for distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125.
- [6] ZHAO Jianwen, HOU Hui, GAO Yu, et al. Single-phase ground fault location method for distribution network based on traveling wave time-frequency characteristics[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 186.
- [7] 王栋, 邱志斌, 魏巍, 等. 220 kV 某变电站 GIS 单相接地故障分析及处理措施[J]. *高压电器*, 2020, 56(11): 259-265, 274.
WANG Dong, QIU Zhibin, WEI Wei, et al. Single-phase grounding fault analysis of a GIS in a 220 kV substation and treatment measures[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(11): 259-265, 274.
- [8] 高俊青, 李题印, 胡晓琴, 等. 考虑频段筛选的配电网单相接地选线方法研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(2): 92-97, 118.
GAO Junqing, LI Tiying, HU Xiaoqin, et al. Line detection methods for single-phase grounding fault in distribution network considering frequency band selecting[J]. *Smart Power*, 2020, 48(2): 92-97, 118.
- [9] 陈宏山, 石勇, 史泽兵, 等. 小电流接地系统接地故障选线方法[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(5): 42-48, 57.
CHEN Hongshan, SHI Yong, SHI Zebing, et al. Fault line selection method for small current grounding system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(5): 42-48, 57.
- [10] 陈景文, 褚恩亮, 李英春, 等. 基于贝叶斯分类器的谐振接地故障选线系统设计[J]. *智慧电力*, 2019, 47(8): 99-104, 119.
CHEN Jingwen, CHU Enliang, LI Yingchun, et al. Design of resonant ground fault line selection system based on Bayesian classifier[J]. *Smart Power*, 2019, 47(8): 99-104, 119.
- [11] LI Jie, WANG Gang, ZENG Dehui, et al. High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 119.
- [12] ZHANG Tong, YU Haibin, ZENG Peng, et al. Single phase fault diagnosis and location in active distribution network using synchronized voltage measurement[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 117.
- [13] BARIK M A, GARGOOM A, MAHMUD M A, et al. A decentralized fault detection technique for detecting single phase to ground faults in power distribution systems with resonant grounding[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(5): 2462-2473.
- [14] CERRETTI A. Ground fault temporary overvoltages in MV networks: evaluation and experimental tests[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, 27(3): 1592-1600.
- [15] WANG X, ZHANG H, SHI F, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 774-785.
- [16] 管廷龙, 薛永端, 徐丙垠. 基于故障相电压极化量的谐振接地系统高阻故障方向检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(23): 73-81.
GUAN Tinglong, XUE Yongduan, XU Bingyin. Method for detecting high-impedance fault direction in a resonant grounding system based on voltage polarization of the fault phase[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(23): 73-81.
- [17] 张洪涛, 曹丽丽, 冯光, 等. 谐振接地系统单相断线故障分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(2): 58-65.
ZHANG Hongtao, CAO Lili, FENG Guang, et al. Analysis of single-phase open fault for resonant grounded system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(2): 58-65.
- [18] 韩凤玲, 王毅, 许承斌, 等. 树型分支电网友单相断线兼接地故障特征[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1998, 30(2): 16-20.
HAN Fengling, WANG Yi, XU Chengbin, et al. Fault features of line break with short-circuit for tree-type distribution line[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(2): 16-20.
- [19] 朱玲玲, 李长凯, 张华中. 配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(9): 35-38.
ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(9): 35-38.
- [20] 贾文超, 陈娟, 许承斌. 基于双频法的树形配电网单相断线兼接地故障诊断[J]. *电力系统自动化学报*,

- 1999, 11(2): 20-24.
JIA Wenchao, CHEN Juan, XU Chengbin. Fault diagnosis for line-open with line-to-ground with on radial distribution network by method of double frequency diagnosis[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 1999, 11(2): 20-24.
- [21] 王士新. 配电线路单相断线接地复故障检测技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2018.
WANG Shixin. Research on detection technology of single-phase grounding fault with line-broken in distribution line[D]. Jinan: University of Jinan, 2018.
- [22] 常仲学, 宋国兵, 王晓卫. 基于零序电压幅值差的配电网断线识别与隔离[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 135-139.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Xiaowei. Identification and isolation of line breakage fault in distribution network based on zero sequence voltage amplitude differential principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 135-139.
- [23] 曾祥君, 陈磊, 喻锴, 等. 基于配电网双端信息融合的单相断线故障实时监测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 12-18.
ZENG Xiangjun, CHEN Lei, YU Kun, et al. A real time monitoring method for the single-line break fault based on dual-terminal information in the distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 12-18.
- [24] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [25] 康奇豹, 丛伟, 盛亚如. 配电线路单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 127-136.
KANG Qibao, CONG Wei, SHENG Yaru. Protection methods of single-phase broken-line fault for distribution line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 127-136.
- [26] 郭乃网, 苏运, 田英杰. 基于改进的 AdaBoost 算法的中压配电网断线不接地故障检测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(16): 1-6, 18.
GUO Naiwang, SU Yun, TIAN Yingjie. Disconnected unground fault detection in medium voltage distribution network based on FC-Adaboost[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(16): 1-6, 18.
- [27] 薛永端, 陈梦琦, 曹丽丽, 等. 不接地系统单相断线故障电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1322-1333.
XUE Yongduan, CHEN Mengqi, CAO Lili, et al. Analysis of voltage characteristics of single-phase disconnection fault in ungrounded distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1322-1333.
- [28] 王开科, 熊小伏, 肖扬, 等. 基于负序电流的主动配电网单相断线故障保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 10-18.
WANG Kaike, XIONG Xiaofu, XIAO Yang, et al. Single-phase break fault protection method for an active distribution network based on negative sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 10-18.
- [29] 张灿军, 陈梦琦, 张宗熙. 小电阻接地系统单相断线故障电压特征分析[J]. 供用电, 2019, 36(11): 64-70.
ZHANG Canjun, CHEN Mengqi, ZHANG Zongxi. Analysis of voltage for single-phase break fault voltage in low-resistance grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(11): 64-70.
- [30] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

收稿日期: 2020-11-07; 修回日期: 2021-01-28

作者简介:

周 斌(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护专业相关工作;

陈梦琦(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化与故障定位。E-mail: 18660202507@163.com

(编辑 姜新丽)