

考虑分布式光伏的配网谐振接地故障辨识与定位

刘晓庆¹, 王铁¹, 刘坤¹, 晋陈军¹, 齐郑², 王天硕²

(1.唐山冀东水泥股份有限公司, 河北 唐山 630000; 2.华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 中压配电网单相接地故障诊断技术对提高系统运行安全性和经济性具有重要意义。针对当前大量分布式电源接入配电网情况,分析了分布式电源对单相接地故障电流的影响,提出了辨识单相接地故障类型的方法,以及利用随调式消弧线圈谐波注入的单相接地故障区段定位技术。在配电网发生单相接地故障后,首先通过零序电压和相电压的特征分析单相接地故障类型;然后通过短时闭锁随调式消弧线圈的滤波装置,使随调式消弧线圈的谐波电流短时注入到电网中。系统中的FTU及DTU元件分析零序电流中三次谐波含量,以三次谐波含量作为判据准确辨识检测点是否位于故障路径上,最终实现故障区段定位。在EMTP/ATP软件中搭建不同接地情况下的10 kV配电网仿真模型并分析,仿真运行结果表明,使用上述方法可以有效减小接地电流,区段定位精度可达95%以上。该方法适用于金属性接地、经过渡电阻接地的故障诊断,满足实用化要求。

关键词: 配电网; 故障区段定位; 随调式消弧线圈; 谐波分析; 分布式电源

中图分类号: TK51; TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)04-0528-06

0 引言

随着我国10 kV中压配电网的规模日益扩大,分布式电源开始大量接入配电网,对单相接地故障电流产生了较大影响。同时,配电网接地方式普遍从中性点不接地方式发展为经消弧线圈接地方式,发生单相接地故障时,故障信号特征通常不明显,难以快速定位和排除故障,给供电单位和用户正常用电带来了隐患。因此,在新能源大量接入配电网的情况下,中性点经消弧线圈接地方式单相接地故障的快速定位对缩短停电范围和时间,提高配电网的安全性和可靠性具有重要意义^[1,2]。

当配电网发生单相接地故障时,中性点消弧线圈所产生的感性电流将有效抵消线路对地容性电流,从而减小接地电流,并降低电弧重燃的概率,有利于熄灭电弧^[3]。消弧线圈可以分为预调式和随调式两种,预调式消弧线圈正常情况下调节到接近谐振点状态,须要串联阻尼电阻,避免发生串联谐振,发生单相接地故障后短接阻尼电阻进行消弧。随调式消弧线圈正常情况下调节到远离谐振点状态,无须串联阻尼电阻,发生单相接地故障后快速调节到谐振点状态进行消弧^[4,5]。目前,随调式消弧线圈通常采用电力电子开关进

行调节^[6],在故障发生后通过改变晶闸管的导通角控制接地电流的基波有效值,从而达到有效消弧的目的。由于晶闸管会产生谐波,所以须要安装滤波装置滤除谐波。随调式消弧线圈具有无需阻尼电阻、机械开关及调节范围大的特点。文献[7]对随调式消弧线圈并联运行的控制方法进行了研究,在保证电容电流计算值精确的同时还能均衡负载。文献[8]在多个随调式消弧线圈并联的系统中对接地电流测量方法进行了研究。

在配电网故障定位的研究中,文献[9]提出了一种利用暂态零序电流的近似熵方法,利用相邻测量装置的相似熵之比进行区段定位。文献[10]提出了一种采用暂态特征模量的时频特征分析方法,但所提方法难以应用于配电网混合线路中。文献[11]提出一种采用鲸鱼优化算法优化,利用暂态零序电流作为特征的VMD方法进行故障测距。但目前在配电网发生单相接地故障时,大多采用外部注入更加便于检测的明显信号的故障定位方法,尚无采用注入随调式消弧线圈谐波的定位方法,且这些故障检测方法大多采用零序电压、电流信号,很少采用单相接地故障区段定位技术^[12-16]。因此,为了能够在减小接地电流的同时提升区段定位精度,本文提出了利用随调式消弧线圈谐波

收稿日期: 2024-12-13。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2601501);唐山冀东水泥股份有限公司唐山分公司科技项目(CTS-FWWT-2024-0028)。

作者简介: 刘晓庆(1979-),男,工程师,研究方向为电力拖动与运行。E-mail: liuxiaoqingkyp@126.com

注入的单相接地故障区段定位技术,通过深入分析分布式电源对单相接地故障电流的影响,提出辨识单相接地故障类型的方法。在配电网发生单相接地故障后,短时闭锁随调式消弧线圈的滤波装置,使随调式消弧线圈的谐波电流短时注入到电网中。系统 FTU 及 DTU 元件能够测量线路各处谐波电流数据,分析零序电流中各次谐波含量,以谐波含量作为判据准确辨识检测点是否位于故障路径上,最终实现故障区段定位。通过 EMTP/ATP 仿真分析,验证了所述方法适用于金属性接地、经过渡电阻接地的故障诊断,满足实用化要求。

1 分布式电源对单相接地故障电流及消弧线圈的影响

1.1 分布式电源对单相接地故障电流的影响

在中性点不接地情况下,忽略线路上的阻抗,发生单相接地故障后的接地电流表达式为

$$I_c = \frac{U_{ph}}{R + \frac{1}{j\omega C_\Sigma}} \quad (1)$$

式中: R 为接地点过渡电阻; C_Σ 为系统所有线路对地电容; U_{ph} 为接地点在故障前的相电压。

当线路末端接入大容量三相对称分布式光伏电源时,接入点的电压将会显著升高,当接近光伏注入点线路发生单相接地故障后,根据式(1)可知单相接地电流将会显著增加^[17]。

我国《配电网技术导则》(Q/GDW 10370-2016 版)明确规定“10 kV 配电网单相接地故障电流在 10 A 及以下宜采用中性点不接地方式,超过 10 A 且小于 150 A,宜采用中性点经消弧线圈接地方式”。大量分布式电源的接入有可能导致配电网的单相接地故障电流超过 10 A,此时须要更改中性点接地方式。

1.2 分布式电源对消弧线圈的影响

在中性点经消弧线圈接地情况下,忽略线路上的阻抗,发生单相接地故障后的接地电流表达式为

$$I_c = \frac{U_{ph}}{R + (j\omega L + \frac{1}{j\omega C_\Sigma})} \quad (2)$$

式中: L 为消弧线圈电感。

由式(2)可知,虽然分布式电源的接入导致

电容电流增加,但也使消弧线圈补偿的电感电流增加,从而基本不会影响补偿效果。但是须要注意的是,由于接地点正常运行电压升高,发生单相接地故障后零序电压也升高,须要在一定程度上提高消弧线圈的绝缘水平^[18]。

2 单相接地故障定位模型

2.1 单相接地定位原理

随调式消弧线圈通过控制晶闸管的导通角调节消弧线圈的电感电流。随调式消弧线圈的阻抗角 θ 的表达式为

$$\theta = \arctan \frac{\omega L_p}{R'} \quad (3)$$

式中: R' 为消弧线圈电阻; L_p 为消弧线圈电感。

假设当配电网发生单相接地故障时,中性点电压为 U_N ,在 $\omega t = \alpha$ 时发出导通信号,初始状态为 0,则此时流经消弧线圈的电流为^[19]

$$i_L(t) = \frac{U_{Nm}}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\tan \varphi}} \right] \quad (4)$$

式中: U_{Nm} 为中性点电压瞬时最大值, $U_{Nm} = \sqrt{2} U$; $\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \theta$; $Z = \sqrt{R'^2 + (\omega L_p)^2}$ 。

此时消弧线圈中的谐波电压为

$$\begin{cases} u_a(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \\ a_1 = \frac{U_{Nm}}{2\pi} [\cos(2\alpha) - 1] \\ b_1 = \frac{U_{Nm}}{2\pi} [\sin(2\alpha) + 2(\pi - \alpha)] \end{cases} \quad (5)$$

由于消弧线圈的电感电流都通过故障线路流入接地点,如果将消弧线圈滤波装置暂时退出,则消弧线圈晶闸管产生的电流谐波分量大部分仅流经故障线路,少部分流经非故障线路,通过非故障线路电容接地,如图 1 所示^[20]。

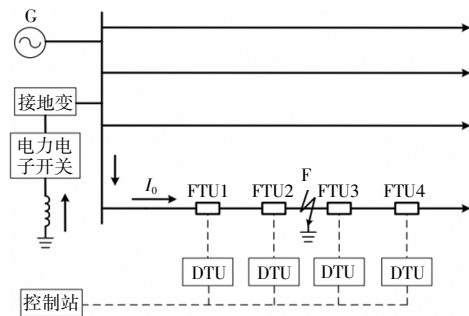


图1 消弧线圈接地配电网谐波回路示意图

Fig.1 Schematic diagram of the harmonic loop of the grounding distribution network of the arc suppression coil

当消弧线圈控制装置通过电力电子开关进行调节时,短时调节导通角产生较大谐波,并闭锁滤波装置 1~5 s,使零序电流谐波能够短时进入故障线路。须要注意的是,大容量分布式电源的接入有可能产生幅值较大的五次谐波分量,但不会产生三次谐波^[21]。因此在线路各区段安装 FTU 及 DTU 装置检测三次谐波分量,从而获得各区段零序电流三次谐波流经情况。

扫描各区段测量装置测量值,从而确定故障区段位置。其具体判据为

$$D_i = \frac{\sqrt{I_{i3}^2}}{\sqrt{I_{ref3}^2}} \times \frac{U_{ref}}{U_0} \quad (6)$$

式中: D_i 为测量装置 i 的高次谐波含量参数; I_{i3} 为测量装置 i 的三次谐波幅值; I_{ref3} 为消弧线圈在晶闸管控制下能够产生的三次谐波幅值; U_0 为实际接地故障时的零序电压; U_{ref} 为金属性接地情况下的零序电压,例如 10 kV 系统为 5 773 V^[22]。

设参数 C_{ons} 为判定依据,当 $D_i \geq C_{ons}$ 时,认为有大量的谐波流过无弧装置, C_{ons} 通常取 80%^[23]。如图 1 所示的线路在 FTU2~FTU3 区段发生单相接地故障时,从母线出口处向线路末端依次检测零序电流三次谐波含量。依据前文分析,控制站获得的谐波检测结果应为 FTU1, FTU2 能够检测出较大三次谐波, FTU3, FTU4 检测的三次谐波含量极小。故遍历整条线路检测结果,可获得故障区段为 FTU2 和 FTU3 之间的线路。区段定位结束后,消弧线圈快速调节到谐振状态,并重新投入滤波装置。

2.2 考虑信息交互延迟和多装置协同单相接地的辨识模型

假设多个 FTU 及 DTU 装置均具有测量计算功能,则可将参与单相接地故障判别的多个 FTU 及 DTU 装置作为多智能体系统。如果多个 FTU 及 DTU 间实时状态数据信息交互过程中出现较大的时间延迟或彼此间时间延迟差别过大,将会严重影响整个接地故障判别系统的故障辨识效率和准确性。

设发生接地故障时的三次谐波电压计算所需通信周期为 T_s ,有效通信延迟时间为 τ_{act} ,且 τ_{act} 为 T_s 的整数倍,可表示为 $\tau_{act} = \xi T_s$, ξ 为通信周期个

数。在考虑多个 FTU 及 DTU 间通信延迟时间影响的条件下,图 1 电力系统单相接地时的谐波电压判别方程可描述为

$$U_i[k+1] = \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[d_{ij} U_j(k-\xi) + \frac{U_{Nm}}{Z} d_{ij} U_j(k) \right] \quad (7)$$

式中: U_i 为第 i 个 FTU 及 DTU 数据终端智能体根据第 k 次信息交互数据计算出的三次谐波电压值; d_{ij} 为第 i 个 FTU 及 DTU 智能体和第 j 个 FTU 及 DTU 智能体间数据交互强度。

将式(7)写成相应的矩阵表达式:

$$\begin{cases} Y(k) = [U(k+\xi)^T, U(k+\xi-1)^T, \dots, U(k)^T]^T \\ Y(k+1) = \Phi Y(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $U[k]$ 为经过 k 次迭代后得到的各个 FTU 及 DTU 智能体的三次谐波电压状态向量; Φ 为接地故障辨识系统状态变量的转移矩阵。

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & 0 & \dots & 0 & F \\ I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I & 0 \end{bmatrix}_{(\xi+1)n \times (\xi+1)n} \quad (9)$$

式中: I 为单位矩阵; A 为以 $D=[d_{ij}]$ 为对角线的对角矩阵, $F=D-A$ 。

若各个 FTU 及 DTU 智能体的三次谐波电压 $U[k]$ 的动态收敛性等价于式(9)的收敛性,则式(9)的解为

$$Y[k] = a_1 \sigma_1^k q_1 + a_2 \sigma_2^k q_2 + \dots + a_N \sigma_N^k q_N \quad (10)$$

式中: a_i 为常数; σ_i 为矩阵 Φ 的特征值; q_i 为矩阵的特征值对应的特征向量,其中 $N=(\xi+1)n$ 。

系统发生单相接地故障后在多个 FTU 及 DTU 智能体间进行信息数据交互,且当矩阵 D 中的对角元素存在非零元素时,矩阵 Φ 的谱半径为 1,由于其余矩阵所对应的特征值的模相对较小,因此式(10)收敛。如果对 Φ 的相应特征值按照模降序的方法进行排列,则式(10)收敛后,式(7)的解为 $Y^* = a_1 [1^T, 1^T, \dots, 1^T]^T$,即对应的稳态过程值由 a_1 确定, a_1 的值由 f_ϕ^T 及 A, F 同时决定,其中 f_ϕ^T 为矩阵 Φ 的特征向量,且特征值为 1。

3 仿真分析

以某中压配电网作为研究对象验证本文所提算法的准确性,采用 EMTP/ATP 软件对系统网络

进行建模和仿真分析。仿真模型如图 2 所示,线路电压等级为 10 kV。线路 4 末端接入分布式光伏电源,其输出电流为 150 A。随调式消弧线圈晶闸管的导通角为 45°,金属性接地情况下消弧线圈的电流为 1.563 4 A。单位长度仿真线路的正负序参数为 $R_{1,2}=1.23\times 10^{-4} \Omega/\text{m}$, $L_{1,2}=2.292\times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$, $C_{1,2}=2.84\times 10^{-10} \text{ F}/\text{m}$; 零序参数为 $R_0=1.23\times 10^{-4} \Omega/\text{m}$, $L_0=9.167\times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$, $C_0=2.583\times 10^{-10} \text{ F}/\text{m}$ 。

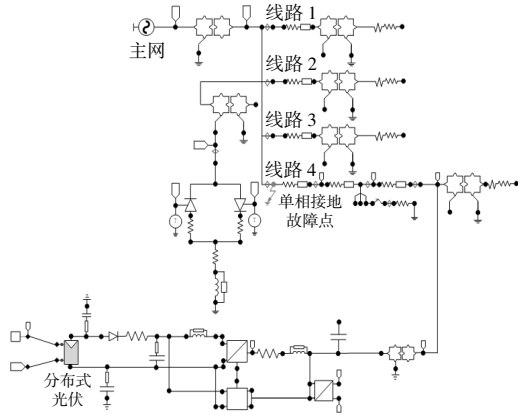


图 2 接入分布式光伏和随调式消弧线圈的单相接地故障仿真模型

Fig.2 Simulation model of single-phase ground fault connected with modulated arc suppression coil

3.1 分布式电源对接地电流的影响

3.1.1 中性点不接地且分布式光伏不接入

当中性点不接地且分布式光伏不接入时,发生金属性接地故障后,故障电流行波如图 3 所示,单相接地电流为 8.2 A。

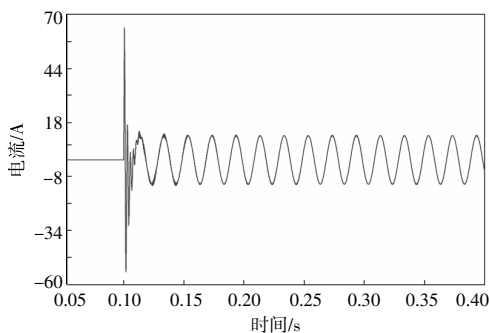


图 3 单相接地故障电流行波图

Fig.3 Single-phase ground fault current flow wave pattern

3.1.2 中性点不接地且分布式光伏接入

分布式光伏接入且发生金属性接地故障后,故障电流行波如图 4 所示,单相接地电流为 12.2 A。仿真结果表明,分布式电源接入能够增大单相接地故障电流,原中性点不接地方式应改为中性

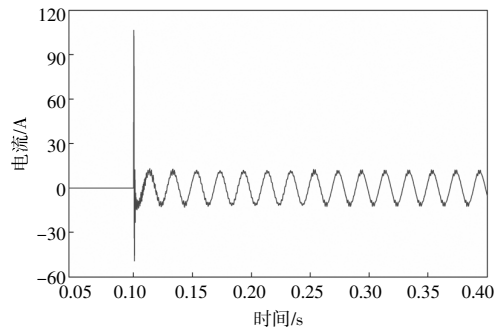


图 4 分布式电源接入的单相接地故障电流行波图

Fig.4 Single-phase ground fault current flow wave pattern with distributed power access

点经消弧线圈接地方式。

3.2 基于注入谐波方法的区段定位技术

3.2.1 低电阻接地故障

设接地电阻为 10 Ω ,故障相为 A 相。以区段 1~2 发生单相接地故障为例,通过 FFT 分析各个 FTU 检测的零序电流谐波分量,如图 5 所示。

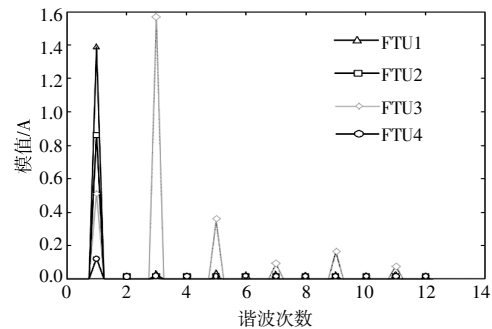


图 5 零序电流傅里叶变换模值结果 1

Fig.5 Zero-sequence current Fourier transform modulus results 1

由于接地电阻很小,故式(6)中的 $U_0 \approx U_{\text{ref}}$,通过式(6)计算得到结果如下:

$$\begin{cases} D_1=99.31\% \\ D_2=99.06\% \\ D_3=4.25\% \\ D_4=1.315 6\times 10^{-6} \end{cases}$$

3.2.2 高电阻接地故障

设接地电阻为 5 000 Ω ,故障相为 A 相。以区段 1~2 发生单相接地故障为例,通过 FFT 分析各个 FTU 检测的零序电流谐波分量,如图 6 所示。由于接地电阻较大,故式(6)中的 $U_0 \neq U_{\text{ref}}$ 。将 $U_0=524.9 \text{ V}$, $U_{\text{ref}}=5 773 \text{ V}$ 代入式(6),计算得到结果如下:

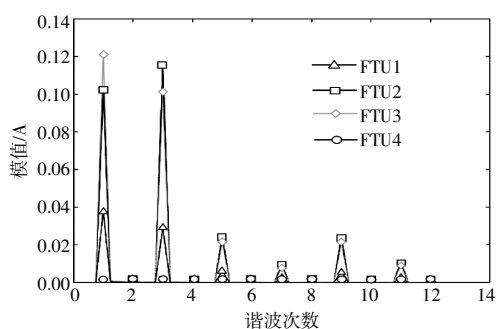


图6 零序电流傅里叶变换模值结果 2
Fig.6 Zero-sequence current Fourier transform modulus results 2

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= 93.05\% \\ D_2 &= 91.46\% \\ D_3 &= 3.61\% \\ D_4 &= 8.685 \times 10^{-6} \end{aligned} \right\}$$

由以上结果可以分析故障发生在区段 1~2 处,完成区段定位。

为了验证本文方法的有效性,将文献[24]的定位方法与本文方法进行对比分析,比较结果如表 1 所示。

表 1 不同方法中高次谐波含量值
Table 1 Higher harmonic content values in different methods

定位方法	测量装置	低电阻	高电阻
		接地故障	接地故障
同步挤压 S 变换	D_1	87.22%	50.45%
	D_2	50.04%	67.55%
	D_3	20.42%	52.19%
	D_4	15.66%	19.21%
本文方法	D_1	99.31%	93.05%
	D_2	99.06%	91.46%
	D_3	4.25%	3.61%
	D_4	1.315×10^{-6}	8.685×10^{-6}

由表 1 中的高次谐波含量可以看出,利用同步挤压 S 变换方法可以准确判断单相低电阻接地故障发生位置,但对高电阻接地故障发生位置判断不准确。利用本文方法进行故障定位时,无论是低电阻接地故障还是高电阻接地故障,均能够更加准确地判断故障发生位置。

4 结论

本文提出了一种利用谐波注入的单相接地故障区段定位技术,适用于随调式消弧线圈接地系统。利用配电线路上 FTU 和 DTU 装置分析谐波含量,实现故障区段定位。通过理论分析以及

EMTP/ATP 仿真验证,得出以下结论。

①分布式电源能够提高单相接地电流,影响系统的消弧能力,部分中性点不接地系统接入分布式电源后须要改为经消弧线圈接地。

②本文所提故障区段定位方法适用于使用电力电子装置控制的随调式消弧线圈接地系统。本文所提故障定位方法适用于金属性接地及高电阻接地情况。

③本文所提故障定位方法具有较高的区段定位准确率,采用的测距方法不须要安装大量高速采样设备,可大幅节约成本,具有很好的实用性。

本文提出的故障辨识方法能够避免分布式电源的影响,有效辨识故障类型。

参考文献:

- [1] 刘富州,萨仁娜,朱永利,等.基于 FDM 孪生网络的风电场集电线单相接地故障区段定位[J].可再生能源,2023,41(3):401-410.
- [2] 于枋彤,刘铖,张宇驰.输电线开断控制对交直流混联电力系统暂态稳定性影响研究 [J].东北电力大学学报,2023,43(1):85-91.
- [3] Brenna M, Berardinis E D, Carpinì L D, et al. Petersen coil regulator analysis using a real-time digital simulator [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1479-1488.
- [4] 孙永辉,赵树野,张秀路,等.考虑分布式光伏与储能联合的区域电网电压稳定性控制方法[J].可再生能源,2022,40(8):1115-1122.
- [5] Raisz D, Dan A M, Papp A. Operation experience with a new fault location system for MV networks[A]. 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)[C]. Jinan: IEEE, 2012.
- [6] 代姚,孙才新,袁涛,等.采用过电压波形识别的单相接地暂态过电压抑制方法[J].高电压技术,2010,36(5):1136-1142.
- [7] 王英男,韩芳,李砚,等.随调式消弧线圈并联运行控制技术研究[J].电气应用,2014,33(22):129-132.
- [8] 唐轶,厉洪滨,胡长冬,等.随调式消弧线圈控制的接地电流测量新方法 [J]. 煤炭科学技术,2010,38(4):79-81,85.
- [9] 罗嘉玮,张开迪.基于零序电流近似熵的配电网故障定位研究[J].电力勘测设计,2024(5):39-44.
- [10] 梁睿,彭楠,张政一,等.暂态特征模量时频分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J].中国电机工程学报,2023,43(23):9098-9114.
- [11] 江国乾,白佳荣,李文悦,等.基于卷积自编码器的风电机组变桨轴承故障预警与定位 [J]. 可再生能源,2023,41(11):1469-1475.

- [12] 基于正序阻抗的微电网线路故障定位策略的研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(12): 1819–1825.
- [13] 田君杨, 李海勇, 蒋连钊, 等. 含多分布式电源的小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 103–110.
- [14] 黄亚峰, 王浩天, 朱登宝, 等. 基于零序电流特性的中性点灵活接地系统的故障选线方法[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(3): 16–22, 71.
- [15] 赵冰杰, 贾宏杰, 李沐阳, 等. 基于分组差分粒子群算法的含分布式电源配电网故障定位[J]. 可再生能源, 2022, 40(10): 1380–1386.
- [16] 刘群杰, 樊艳芳, 李峰, 等. 基于多区域相位突变量信息的主动配电网故障定位方案研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1310–1316.
- [17] Jamali S, Bahmanyar A, Ranjbar S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 174–182.
- [18] Namdari F, Salehi M. Fault classification and location in transmission lines using traveling waves model components and continuous wavelet transform (CWT) [J]. Journal of Electrical Systems, 2016, 12(2): 373–386.
- [19] 邓祥力, 赵磊鑫, 熊小伏, 等. 基于多元暂态特征故障度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 69–80.
- [20] 沈茜, 金鹏, 胡国. 计及逆变型分布式电源的有源配电网单相接地故障分析 [J]. 可再生能源, 2020, 38(7): 940–947.
- [21] Wang X, Zhang H, Shi F, et al. Location of single phase to ground faults in distribution networks based on synchronous transients energy analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 774–785.
- [22] Wang X, Gao J, Wei X, et al. Single line to ground fault detection in a non-effectively grounded distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3173–3186.
- [23] 许名扬, 樊艳芳, 刘群杰, 等. 基于电流初始行波极性的主动配电网纵联保护方案[J]. 可再生能源, 2020, 38(4): 509–516.
- [24] 权立, 颜琬滢, 王毅钊, 等. 基于同步挤压 S 变换的谐振接地系统单相接地故障区段定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(10): 59–66.

Research on fault diagnosis technology of resonant grounding system considering distributed photovoltaic access

Liu Xiaoqing¹, Wang Tie¹, Liu Kun¹, Jin Chenjun¹, Qi Zheng², Wang Tianshuo²

(1. Tangshan Jidong Cement Co., Ltd., Tangshan 630000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The technology for diagnosing single-phase grounding faults in medium-voltage distribution networks is of significant importance for enhancing the operational safety and economic efficiency of the system. In light of the current scenario where a large number of distributed generation sources are connected to the distribution network, this study analyzes the impact of distributed generation on single-phase grounding fault currents. It proposes a method for identifying the types of single-phase grounding faults and introduces a fault section location technique utilizing harmonic injection from adjustable arc suppression coils. Upon the occurrence of a single-phase grounding fault in the distribution network, the type of fault is first analyzed based on the characteristics of the zero-sequence voltage and phase voltage. Subsequently, the filtering device of the adjustable arc suppression coil is temporarily blocked, allowing the harmonic current from the coil to be briefly injected into the grid. The system's FTU and DTU components analyze the third harmonic content in the zero-sequence current. The presence of the third harmonic is used as a criterion to accurately determine whether the detection point is on the fault path, thereby achieving fault section location. A 10 kV distribution network simulation model under various grounding conditions was constructed and analyzed using EMTP/ATP software. The simulation results demonstrate that the aforementioned method effectively reduces the grounding current and achieves a section location accuracy of over 95%. This validates that the proposed method is suitable for both metallic grounding and grounding through transition resistance, meeting practical application requirements.

Keywords: distribution network; fault segment location; adjustable arc suppression coil; harmonic analysis; distributed power generation