

低通道依赖的变电站动力电缆漏电流监测方法

陈昊¹,沙浩源¹,钱其隆²,任旭超¹,刘怀宇¹,徐伟伦²

(1. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司,江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司,江苏 南京 210019)

摘要:为缓解变电站动力电缆漏电状态判断算法对理想通信条件的高度依赖,提出了一种低通道依赖的变电站动力电缆漏电流监测方法。首先,在监测信号同步计算中对传统的参考相量法进行改进,以电源侧为相位差计算的参考基准,消除了负荷波动对信号同步计算的影响。然后,提出基于电流差动原理的复合漏电流判据,以解决系统在未采集到对比基准时的电缆漏电状态判断问题。同时,针对变电站实际运行中漏电流监测系统可能出现的非理想通信情况,建立了与之相匹配的不同漏电判断模式及相应的判断方法,实现了在信息不全的情况下动力电缆漏电状态的正常监测。最后,通过仿真及江苏某500 kV变电站实际数据对所提方法的有效性与优越性进行验证。结果表明,该方法能够在不同通信条件下灵活切换漏电判断模式,显著提高了对漏电状态判断的准确性与可靠性。

关键词:动力电缆;改进参考相量同步法;复合漏电流判据;判断模式;漏电流监测;智能运检

中图分类号:TM 247

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202206016

0 引言

“十四五”电力行业工作要求将电网安全稳定运行摆在了至关重要的位置,其中超高压变电站作为电网的枢纽节点,其变电运维水平是安全工作提质增效的关键。在变电站的日常运维过程中,站内设备的漏电状态监测是最重要的工作之一^[1-4]。跨接交流室和开关场的长段动力电缆是变电站站用负荷的主要电力传输媒介,其长度长、易发生绝缘损坏的环节多,是漏电安全保护的重点对象,因此,亟需对长段动力电缆进行漏电流监测,准确分析相关数据,及时有效地排查漏电故障隐患,以避免事故的发生。

在已有研究中,对于漏电故障的判断大多基于对漏电流的监测与分析^[5-6]。文献[7-8]阐述了漏电流监测技术在低压配电网实际监测中的应用,并对漏电流监测过程中的误差产生原因进行了分析。文献[9]分析了脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)电机系统因绝缘老化而出现的漏电故障点及故障电流特征,并通过模拟老化实验对故障点处的剩余电流特征进行了分析验证。文献[10]以交联聚乙烯电缆为分析对象,与文献[9]类似,该文献模拟了电缆线路绝缘老化、表面划伤损坏等局部缺陷,分析了电缆线路漏电故障下剩余电流的特征。上述研究较好地分析了配电网、电气设备在绝缘缺陷情况

下的漏电特性,但并未针对长段动力电缆的漏电状态监测与分析提供思路,缺少对漏电流计算误差影响因素及相应处理方法的研究。

另外,在漏电流监测信息通信的研究中,文献[11]提出了基于电力载波通信的方法向远端传输漏电流监测数据,该方法在装设中需要用到载波器、耦合电容等设备,安装工作量大,实施难度较高。为解决该问题,文献[12]采用物联网技术实现了低压配电网中的多个漏电流监测终端的互联互通。在此基础上,文献[13]基于Zig Bee无线传感器网络技术建立了矿井高压电网漏电定位系统,在提高数据传输精度的同时,有效降低了传统物联网技术造成的通信延迟。以上方法较好地实现了监测信息的远端通信,但并未讨论当系统出现信号丢失的极端通信情况时,漏电流监测系统应如何维持正常的漏电故障判断。事实上,在变电站实际运行中,现场环境复杂,电磁干扰严重^[14-15],监测系统易出现信道不稳定或信号丢失的情况,已有的变电站电缆漏电分析方法仅能够在理想通信情况下分析电缆的漏电状态,而对于两端信号存在不同延时,甚至一端信号或两端信号丢失的恶劣通信情况缺乏有效的应对机制,为变电站的安全运行埋下了严重的故障隐患。

基于此,本文提出了一种低通道依赖的变电站动力电缆漏电流监测方法。首先,在信号同步方法的研究中,对传统的参考相量法进行改进,解决负荷波动问题对双端信号同步对比基准计算造成误差的问题。然后,针对系统可能出现的未采集到对比基准的情况,本文提出基于电流差动原理的复合漏电流判据,以提高系统在监测信息完整情况下漏电判断的准确性。同时,考虑变电站实际运行中漏电流

收稿日期:2022-03-01;修回日期:2022-05-20

在线出版日期:2022-06-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1500800)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB1500800)

监测系统可能出现的非理想通信情况,对正常、首端信号丢失、末端信号丢失及双端信号均丢失这4种状态进行了讨论,建立了对应的漏电判断模式及相应的漏电判断方法,实现了在监测信息不全情况下的动力电缆漏电状态监测,有效提高了监测算法的准确性及可靠性。通过仿真及江苏某500 kV变电站实际案例验证了本文所提方法的有效性与优越性,该方法可为变电站中动力电缆漏电状态的准确监测与分析提供有益借鉴。

1 变电站动力电缆漏电流监测及布点

1.1 基于剩余电流的电缆漏电流监测原理

对设备运行过程中剩余电流大小进行监测是判断设备漏电状态的主要手段^[16-17],剩余电流的采集原理如图1所示。图中,A、B、C相电缆芯和三相四线制中心线(N)的电缆芯穿过漏电流互感器(residual current transformer, RCT),剩余电流的大小为4根电缆芯中的电流相量和的有效值^[18-19]。

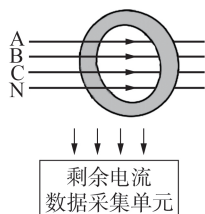


图1 剩余电流采集示意图

Fig.1 Schematic diagram of residual current collection

当该交流支路处于正常情况时,穿过剩余电流监测回路的电流相量和与磁芯中的磁通矢量和均为0,即:

$$I_A + I_B + I_C + I_N = 0 \quad (1)$$

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C + \phi_N = 0 \quad (2)$$

式中: I_A 、 I_B 、 I_C 为三相电流相量; I_N 为三相四线制中性线电流相量; ϕ_A 、 ϕ_B 、 ϕ_C 、 ϕ_N 分别为 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_N 产生的磁通矢量。由于穿过RCT中的电流与磁通均为0且不变,因此RCT线圈不产生感应电压。

若线路中出现漏电流,则穿过剩余电流监测回路的电流相量 I_{RCT} 通过对地等效电阻进入大地,此时穿过剩余电流监测回路的电流相量和与磁芯中的磁通矢量和均不为0,即:

$$I_A + I_B + I_C + I_N = I_{RCT} \quad (3)$$

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C + \phi_N = \phi_{RCT} \quad (4)$$

式中: ϕ_{RCT} 为穿过剩余电流监测回路的磁通矢量。由于穿过剩余电流监测回路的电流与磁通发生了变化,因此RCT线圈会产生感应电压,当其超过漏电告警阈值时,相应的监测装置会报警、动作。

1.2 变电站动力电缆漏电流监测布点

为不失一般性,考虑变电站内的典型长段动力

电缆(从交流室到开关场)的监测点位设置情况如图2所示。长段动力电缆M端和N端分别靠近交流室侧(电源侧)和开关场侧(负载侧)。监测所需的电气量采集单元包括电流互感器和电压互感器。在M端的A、B、C、N四线整体安装漏电流互感器RCT₁,在M端的A相首端加装电流互感器TA₁,通过RCT₁和TA₁分别采集长段动力电缆M端的剩余电流和A相负荷电流;在M端安装电压互感器TV₁,通过TV₁采集长段动力电缆的首端母线电压。在N端的A、B、C、N四线整体安装漏电流互感器RCT₂,在N端的A相末端加装电流互感器TA₂,通过RCT₂和TA₂分别采集长段动力电缆N端的剩余电流和A相负荷电流;在N端安装电压互感器TV₂,通过TV₂采集长段动力电缆的末端负荷侧电压。

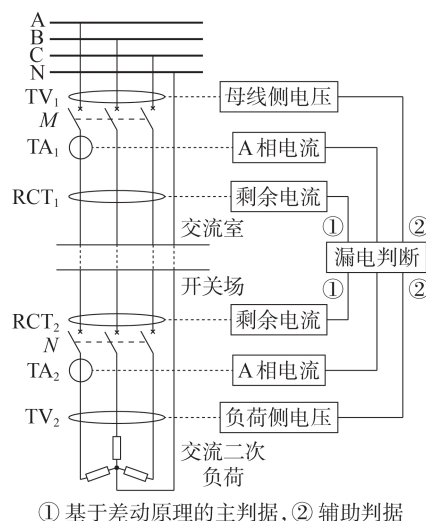


图2 电气量采集布点示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrical quantity collection point layout

最终将长段动力电缆两端的电气量信息同时输入漏电判断计算终端,基于漏电判据输出结果得到相应的运检策略。

2 变电站动力电缆漏电判断方法

2.1 基于改进参考相量的漏电流监测信号同步法

在实际漏电监测处理中,基于图2中两端RCT测量的剩余电流进行差流计算往往会因为两端信号间的相位不同步而产生较大的误差,轻则造成监测到的差流过大,重则造成误报警,从而影响变电站的正常运行。因此,为减少相位不同步对差流计算结果的影响,可考虑采用参考相量法对信号进行修正,其原理是将电源侧的电压折算到负荷侧,并与负荷侧的测量电压进行比较后得到相位差,该相位差对应于两端采样时刻的延时。根据该相位差建立动力电缆两端的对比基准,调整采样延时,从而实现两端电气量信号同步。

参考相量同步修正原理如图3所示。图中: U_s 为电源电压; Z_s 为电源内阻抗; I_{LM} 为流过节点 M 的线路电流; Z_1 为线路阻抗; C_1 为线路对地等效电容; I_{LN} 为流过 N 端(负荷侧)的线路电流; Z_L 为负载等效阻抗。电源侧(M 端)的电压采样序列为 $\{u_M(m_1), u_M(m_2), \dots, u_M(m_k)\}$,通过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)得到对应的电压相量序列为 $\{U_M(m_1), U_M(m_2), \dots, U_M(m_k)\}$ 。同理可得, N 端(负荷侧)电压相量序列为 $\{U_N(n_1), U_N(n_2), \dots, U_N(n_k)\}$,则 m_k 对应时刻的负荷侧电压相量 $U_N(m_k)$ 为:

$$U_N(m_k) = U_M(m_k) - \left(I_{LM}(m_k) - j\omega \frac{C_1}{2} U_M(m_k) \right) Z_1 \quad (5)$$

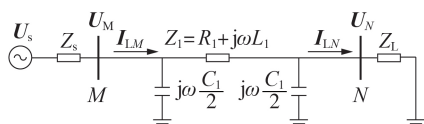


图3 参考相量同步修正原理

Fig.3 Principle of reference vector synchronization correction

利用 m_k, n_k 对应时刻的负荷侧电压相位差,可计算得到两端采样延时产生的相位差 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \arg \left(\frac{U_N(n_k)}{U_N(m_k)} \right) \quad (6)$$

利用 $\Delta\varphi$ 修正后的负荷侧剩余电流相量 I'_{LN} 为:

$$I'_{LN} = I_{LN} \angle \Delta\varphi \quad (7)$$

由此可知,上述传统的参考相量法所取的相位差为两端监测点的电压相位差,然而当负荷波动时,负荷侧电压的相位差不仅受到两端信号采样延时的影响,也会受到负荷波动的影响。基于此,本文对传统的参考相量法进行改进,利用 m_k, n_k 对应时刻的电源相位差代替两端监测点的相位差,电源相位 $U_s(m_k), U_s(n_k)$ 如式(8)所示。

$$\begin{cases} U_s(m_k) = U_M(m_k) + I_M(m_k) Z_s \\ U_s(n_k) = U_M(n_k) + I_M(n_k) Z_s \end{cases} \quad (8)$$

$$U_M(n_k) = U_N(n_k) + \left(I_N(n_k) + j\omega \frac{C_1}{2} U_N(n_k) \right) Z_1$$

$$I_M(n_k) = I_N(n_k) + j\omega \frac{C_1}{2} U_N(n_k) + j\omega \frac{C_1}{2} U_M(n_k)$$

由于理想电源的相位差仅与采样时刻差有关,与负荷波动无关,因此该方法可避免因负荷波动带来的同步对时误差。计算 m_k 和 n_k 对应时刻的电源相位差即可得到2次采样时间对应的相位差,如(9)所示。

$$\Delta\varphi = \arg \left(\frac{U_s(n_k)}{U_s(m_k)} \right) \quad (9)$$

利用比对基准,对 M, N 端的电气量信号进行修正,即可大幅降低电缆漏电状态分析中因监测信号

相位差导致的计算误差。

2.2 基于电流差动原理的复合漏电流判据

在实际的电气量采集过程中,可能出现监测系统无法采集到对比基准的情况。因此,本文对采集到对比基准和未采集到对比基准的2种情况分别进行讨论,并提出相应的漏电判断方法。

2.2.1 采集到对比基准情况下的漏电判断方法

当系统采集到对比基准时,两端信号可根据对比基准进行相位调整,以获得准确的计算结果。将图2中 M 端的剩余电流(固有剩余电流补偿后)记为 I_M , N 端的剩余电流记为 I_N ,根据对比基准调整后的 I_N 记为 I'_N ,则基于差动原理的电缆漏电状态判据如式(10)所示。

$$|I_M - I'_N| > I_T \quad (10)$$

式中: I_T 为漏电判断阈值,理想情况下取值为10 mA。当剩余电流差流超过阈值时,即可判断为动力电缆漏电。

2.2.2 未采集到对比基准情况下的漏电判断方法

当系统未采集到对比基准时,为保证变电站中漏电监测系统具有足够的鲁棒性和可靠性,需及时采取相应的补偿措施来辅助系统对漏电情况的判断。

本文采取对通道要求和相位差敏感度相对较低的电流幅值差动方法对两端剩余电流进行分析,则基于剩余电流幅值差动原理的电缆漏电状态判据如式(11)所示。

$$\begin{cases} ||I_M| - |I_N|| > I_{T'} & |I_N| \leq |I_N^{\text{set}}| \\ ||I_M| - |I_N|| > k(I_N) |I_N| + I_{\bar{T}} & |I_N| > |I_N^{\text{set}}| \end{cases} \quad (11)$$

$$k(I_N) = F(I_N; 2I_N^{\text{set}}, 100) \quad (12)$$

$$I_{\bar{T}} = I_{T'} - k(I_N^{\text{set}}(t)) |I_N^{\text{set}}(t)| \quad (13)$$

式中: I_N^{set} 为长段动力电缆 N 端的剩余电流临界值,一般取经验值200 mA; k 为机制转换系数,其计算方法为 $k = F(x; \Delta, \gamma) = \frac{1}{1 + \exp(-\gamma(x - \Delta))}$; $I_{T'}$ 为电流幅值差动阈值; $I_{\bar{T}}$ 为带制动量的电流幅值差动阈值。

由式(11)可知,当 $|I_N|$ 较小($|I_N| \leq |I_N^{\text{set}}|$)时,如果 $||I_M(t)| - |I_N(t)|| > I_{T'}$,则判断长段动力电缆漏电,否则判断为没有发生漏电。当 $|I_N|$ 较大($|I_N| > |I_N^{\text{set}}|$)时,则以 $k(I_N) |I_N| + I_{\bar{T}}$ 作为定值进行漏电判断,若 $||I_M| - |I_N|| > k(I_N) |I_N| + I_{\bar{T}}$,则判断长段动力电缆漏电,否则判断为没有发生漏电。

本文将上述2种情况下的漏电状态判据进行结合,构成复合差流漏电判据,以该判据的计算结果作为漏电监测信息完整的情况下,长段动力电缆漏电

告警的动作依据。

3 低通道依赖的动力电缆漏电判断机制

针对变电站内动力电缆漏电流监测系统可能出现的通信信号丢失问题,本文根据现场不同的实际情况划分为4种状态,如图4所示。图中,对于可正常获取的漏电流信号进行高亮表示(例如状态1中的“ I_M 正常”和“ I_N 正常”);对于丢失的信号,采用暗纹填充的方式对该信号位进行隐藏(例如状态2中的“ I_M 正常”)。下面分别对状态1—4进行具体说明。

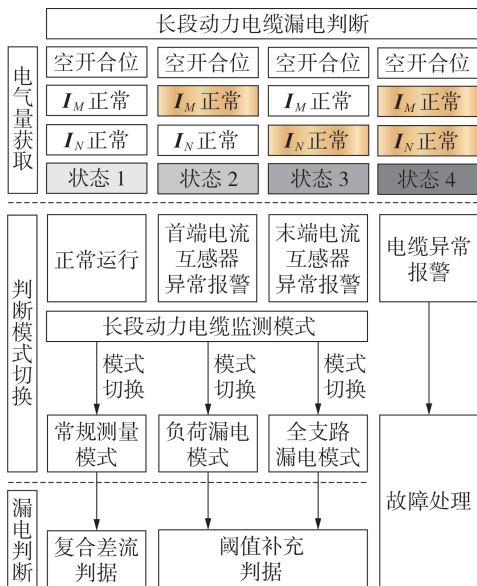


图4 长段动力电缆漏电判断机制框图

Fig.4 Block diagram of current leakage judgment mechanism for long power cable

1)状态1为首、末端监测点均正常运行, I_M 、 I_N 均可正常获取。在该状态下,长段动力电缆监测模式切换为测量模式,电缆漏电情况可依据2.2节提出的复合差动判据来进行判断。

2)状态2为长段动力电缆首端监测点出现异常,无法正常获取 I_M 。在该状态下,发出首端电流互感器异常报警信号后,长段动力电缆监测模式切换为负荷漏电模式,通过比较电缆末端剩余电流与预设的末端剩余电流阈值判断交流负荷是否发生漏电,若电缆末端剩余电流超过阈值,则长段动力电缆发生漏电。

3)状态3为长段动力电缆末端监测点出现异常,无法正常获取 I_N 。在该状态下,发出末端电流互感器异常报警信号后,长段动力电缆监测模式切换为全支路漏电模式,通过比较电缆首端剩余电流与预设的首端剩余电流阈值判断包含电缆和负荷的全支路是否发生漏电,若电缆首端漏电流超过阈值时,则该支路发生漏电。

状态2、3下的判断方法均为阈值比较法,其作为本文所提复合差动判据的补充方法,可应对监测电气量丢失的恶劣实际情况。

4)状态4为在漏电流判断过程中首、末端电气量均未能够有效获取,该状态下系统判断为动力电缆监测出现异常,需安排二次运检人员处理故障。

由图4可见,整体的动力电缆漏电判断机制共分为3个层次:第1层是对电气量采集状态的划分;第2层是监测系统根据第1层显示的不同状态,切换与之相对应的判断模式;第3层则根据判断模式进行判据计算,以得到最终的执行决策。上述整体漏电判断机制充分考虑了实际运行中可能出现的信息监测条件,解决了工程实际中长段动力电缆漏电判断对两端信道完整性高度依赖的问题,有效提高了长段动力电缆漏电流监测系统的可靠性。

4 仿真分析

针对500 kV变电站中对主变冷却系统供电的长段动力电缆搭建了仿真模型,如附录A图A1所示。所用变0.4 kV低压侧负载短路损耗 $P_d=18.1$ kW,短路电压百分比 $U_d\%=6\%$,所用变低压侧进线母线铜排(缆)参数为 $R_{10}=21.42$ m Ω , $X_{10}=19.62$ m Ω ,动力电缆型号为ZC-YJV22-0.6 kV/1 kV四芯铠装电缆,长度设为250 m。主变运行时,各冷却器的工作状态可分为工作、辅助、备用3种,以750 MV·A主变为例,其一般配置60 kW的强迫油循环风冷系统^[20-21],包括6组冷却器,每组冷却器包含1台潜油泵以及3台风扇,工作状态一般设置为:2组投入工作,2组投入辅助,2组投入备用(其他冷却器故障时投入)。冷却器的投入与切除根据主变油温和负荷电流的监测参数进行自动控制,具体控制模式可分为油温控制、负荷过流控制、绕组温度控制和故障控制,当温度超过某个定值时可分阶段进行冷却器投切控制,本文将投切控制分为3个阶段:阶段1为2组投入,阶段2为3组投入,阶段3为4组投入。每个阶段的功率因数均控制在0.9以上。参考文献[22],本文以A相高阻接地故障模拟电缆A相漏电,电源相位设置为29.40°。假设以M端信号为时间基准,N端信号接收延时设为5 ms,且监测系统采集到对比基准。为模拟现场剩余电流计算情况,本文在M、N端的剩余电流信号中均加入了35 dB的高斯白噪声。电源侧、M端、N端的A相电压相位差如附录A图A2—A4所示,具体的A相电压相位测量结果如表1所示。

由表1可见,当负荷发生波动时,M、N端的A相电压相位均发生了变化,而电源侧A相电压相位保持不变;由于M端与电源侧电气距离较近,其A相电压相位也更接近电源侧;由于N端信号接收延时的缘故,N端相位需在原相位的基础上增加90°(对应

表1 不同阶段下的A相电压相位
Table 1 Phase angle of phase-A voltage
at different stages

阶段	A相电压相位/(°)		
	电源侧	M端	N端
1	29.39	29.25	118.83
2	29.39	29.11	118.55
3	29.39	29.05	118.26

5 ms)的相位延迟。

在延时过程中发生负荷波动的条件下,分别基于无对时修正法(方法1)、传统参考相量法(方法2)和本文所提方法(方法3)对阶段1至阶段2、阶段2至阶段3这2种负荷波动情况下的M、N端剩余电流差值进行计算,结果如附录A图A5所示,剩余电流差值的最大值如图5所示,图5中的理论结果为漏电流的幅值。

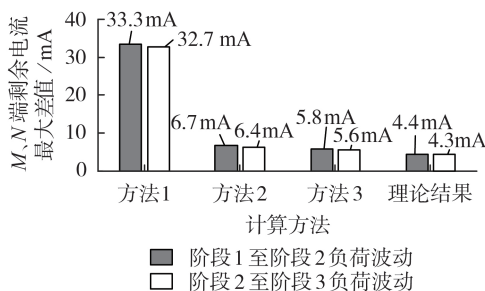


图5 M、N端剩余电流最大差值

Fig.5 Maximum difference between residual current on Terminal M and N

由计算结果可知:方法1未进行信号同步,其差流计算结果与理论结果相差最大;方法2中由于未考虑负荷波动的影响,其差流计算误差高于方法3;方法3的剩余电流差值计算结果与理论结果最为接近。由此可知,本文所提方法能够很好地解决采集延时及负荷波形影响下的双端信号同步问题,其所得结果与理论计算结果之间的误差主要来自于噪声影响。

5 应用实例

5.1 500 kV变电站的漏电流监测系统运行情况

自2019年起,为结合变电站智能运维建设,江苏省内多座500 kV变电站安装了漏电流监测系统。本文以2021年12月某500 kV变电站2条长段动力电缆的漏电流监测数据为例对本文所提方法进行有效性分析。变电站长段动力电缆的漏电监测拓扑如图附录A图A6所示。针对图中的测试支路1的漏电流监测系统误告警情况对比如表2所示。

由表2可见:由于方法1未考虑两端电气量存在的相位差,其剩余电流的计算结果误差较大,共发生误告警14次;方法2纠正了两端信号的相位差,实现

表2 漏电流监测系统的误告警情况结果对比
Table 2 Comparison of false alert of leakage
current monitoring system

误告警情况	误告警次数		
	方法1	方法2	方法3
三相漏电误告警	2	0	0
单相漏电误告警	11	2	0
其他误告警	1	0	0
总数	14	2	0

了对时修正,计算精度相对方法1有了大幅的提高,但该方法易受到负荷波动的影响,无法满足单相漏电判断对于差流计算精确度的要求,最终出现了2次单相漏电误告警;本文所提改进参考相量同步法建立了更为准确的对比基准,弥补了传统参考相量同步方法的缺陷,降低了交流负荷波动对同步相位差计算的影响,3种误告警的发生次数均为0,修正效果达到最佳。

需要指出的是,为保证漏电判断具有足够的灵敏性,本文将 I_r 设置得较小,这也使得在此阈值下,系统并未发生漏告警的情况。

5.2 具体案例分析

进一步地,对图A6中测试支路1的一段监测数据及差流计算结果进行分析,相关数据见附录A表A1,表中Questionable表示“两端电流信号存在,对比基准异常”。由表可见,通道状态为Questionable,因相位差导致两端差流增大,在该情况下,传统无对时修正方法将判断为两端剩余电流差值越界而误发告警,而采用本文方法进行修正后,判断端剩余电流差值数值正常,从而避免了误告警。

最后,对测试支路1、2在一个月内漏电监测系统执行的模式切换及漏电判断情况进行统计,结果如表3所示,表中给出了在图4所示的4种状态下的漏电判断模式切换情况。

表3 测试支路的模式切换及漏电判断情况

Table 3 Mode switching and leakage current judgment of two test branches

状态	次数	
	测试支路1	测试支路2
转幅值差动判据	16	18
潜在告警	11	12
进入负荷漏电模式 (状态2)	1	3
进入全支路漏电模式 (状态3)	2	2
监测异常(状态4)	0	1

对表3进行分析,可得到以下结论。

1) 2条测试支路由于通信延时、通信信号丢失等原因,在测试期内分别发生十余次模式切换。

2) 由方法1的潜在告警次数可知,本文所提方法在测试支路1、2上分别减少了漏电流越限的误报

警11、12次。

3)在测试期内分别发生了8次单端信号丢失,其中4次为负荷侧信号丢失,4次为电源侧信号丢失。针对以上8次信号丢失的情况,漏电判断系统均相应地进行了监测模式切换,并通过阈值补充判断完成了漏电情况的判断,有效缓解了由单端信号丢失导致的漏电监测系统失效的问题。

4)对于监测异常的情况,系统也及时发出了告警提示,为二次运检人员的检修工作提供了明确的指导方向。

6 结论

本文提出了一种低通道依赖的漏电流监测方法。该方法在信号同步计算中减轻了负荷波动对对比基准计算的影响,提高了剩余电流差值计算的准确性。同时,对于变电站内漏电监测系统可能出现的非理想监测状态,如单端信号丢失或双端信号均丢失的情况,该方法能够根据不同的信号接收状态,切换对应的漏电判断模式,即常规测量模式、负荷漏电模式、全支路漏电模式、故障处理模式,并给出准确的漏电状态判断结果。

通过仿真算例及江苏某500 kV变电站漏电监测数据的分析对本文所提方法的准确性进行了验证,结果表明,本文所提方法的判断准确度相比传统方法有了较大的提高,可有效避免三相、单相及其他漏电故障误报,解决了工程实际中电缆漏电判断对监测信息完整性高度依赖的问题,有效提高了长段动力电缆漏电监测系统的可靠性,提升了变电站长段动力电缆绝缘状况的监测水平。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 陈昊,刘怀宇,姚凯,等.采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):172-179.
CHEN Hao, LIU Huaiyu, YAO Kai, et al. Leakage current monitoring method of long power cable in substation based on combined current criterion with self-compensation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 172-179.
- [2] 张晓彤,陈青,孙梦璇,等.针对智能变电站二次回路故障的高压断路器故障追踪[J].电力自动化设备,2020,40(10):212-217,224.
ZHANG Xiaotong, CHEN Qing, SUN Mengxuan, et al. Fault tracking of high-voltage circuit breakers in case of secondary circuit faults in intelligent substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 212-217, 224.
- [3] 彭志强,张琦兵,苏大威,等.基于GSP的变电站监控系统远程运维技术[J].电力自动化设备,2019,39(4):210-216.
PENG Zhiqiang, ZHANG Qibing, SU Dawei, et al. Remote operation and maintenance technology of substation supervisory control system based on GPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 210-216.
- [4] 申光玉.漏电断路器在煤矿供电系统中的应用[J].机械工程与自动化,2021(5):212-213.
SHEN Guangyu. Application of leakage circuit breaker in coal mine power supply system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(5): 212-213.
- [5] 李奎,解晨雨,牛峰,等.考虑非线性特性的剩余电流互感器建模及其输出调理电路参数设计[J].中国电机工程学报,2022,42(10):3815-3826.
LI Kui, XIE Chenyu, NIU Feng, et al. Modeling of residual current transformer considering nonlinear characteristics and design of output conditioning circuit parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3815-3826.
- [6] 刘帼巾,李想,王泽,等.基于Wiener过程电子式漏电断路器的剩余寿命预测[J].电工技术学报,2022,37(2):528-536.
LIU Guojin, LI Xiang, WANG Ze, et al. Remaining life prediction of electronic residual current circuit breaker based on Wiener process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 528-536.
- [7] 吴兵.新型漏电检测技术在低压配电系统中的应用[J].工程技术研究,2019,4(15):223-224.
- [8] 陈航宇,李天友,杨智奇.低压配网剩余电流保护运行现状及相关措施分析[J].电气技术,2021,22(1):104-108.
CHEN Hangyu, LI Tianyou, YANG Zhiqi. Analysis of current operation status and relevant measures of low-voltage distribution network residual current protection[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(1): 104-108.
- [9] 牛峰,曹石然,王尧,等.PWM电机系统漏电流分析[J].电工技术学报,2019,34(8):1599-1606.
NIU Feng, CAO Shiran, WANG Yao, et al. Analysis of leakage current in PWM motor system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1599-1606.
- [10] 黄光磊,李喆,杨丰源,等.直流交联聚乙烯电缆泄漏电流试验特性研究[J].电工技术学报,2019,34(1):192-201.
HUANG Guanglei, LI Zhe, YANG Fengyuan, et al. Experimental research on leakage current of DC cross linked polyethylene cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 192-201.
- [11] 张信,康成功,韩雪,等.矿井供电系统漏电故障定位仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(2):330-334.
ZHANG Xin, KANG Chenggong, HAN Xue, et al. A simulation study on mine power system leakage fault location[J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 330-334.
- [12] 霍守敬.基于物联网的低压配电网漏电保护器监测与应用[J].产业科技创新,2020,2(32):40-42.
HUO Shoujing. Monitoring and application of leakage protector in low-voltage distribution network based on Internet of Things[J]. Industrial Technology Innovation, 2020, 2(32): 40-42.
- [13] 朱延凯,李振璧,姜媛媛,等.基于ZigBee无线传感器网络的井下电网漏电保护系统[J].工矿自动化,2014,40(5):15-17.
ZHU Yankai, LI Zhenbi, JIANG Yuanyuan, et al. Leakage protection system of underground power grid based on ZigBee wireless sensor network[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(5): 15-17.
- [14] 唐志国,蒋佟佟.变电站特高频局放监测的电磁干扰特征影响因素[J].电网技术,2018,42(4):1350-1358.
TANG Zhiguo, JIANG Tongtong. Research on influencing factors of electromagnetic interferences for UHF PD detection in substations[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1350-1358.
- [15] 陈晔,叶兆平,郑书生.GIS套管对平面电磁波耦合特性的仿真分析[J].高压电器,2020,56(2):15-20.
CHEN Ye, YE Zhaoping, ZHENG Shusheng. Simulation and analysis of coupling characteristics of GIS bushing to plane

- electromagnetic waves[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2):15-20.
- [16] 李奎,王天朔,王尧,等. 基于数字恒流技术的B型剩余电流动作特性测试方法的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1):147-152.
LI Kui, WANG Tianshuo, WANG Yao, et al. Research on test method of type B residual current operating characteristic based on digital constant current technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1):147-152.
- [17] 计长安,张浩,吕志鹏,等. B型剩余电流保护在新能源发电和电动汽车中的应用[J]. 供用电, 2019, 36(4):31-36.
JI Chang'an, ZHANG Hao, LÜ Zhipeng, et al. Applications of type B residual current protection in new energy power generation and electric vehicle[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4):31-36.
- [18] 茆大标,褚先菲. 智能剩余电流动作断路器在农村低压配网中的应用[J]. 电工技术, 2018(22):14-15.
MAO Dabiao, CHU Xianfei. Application of intelligent residual current operated breaker in rural low voltage distribution network[J]. Electric Engineering, 2018(22):14-15.
- [19] 许冠炜. 基于NB-IoT的低压电网漏电监测系统的设计[D]. 福州:福建工程学院, 2021.
XU Guanwei. Design of leakage current monitoring system for low voltage power grid based on NB-IoT[D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2021.
- [20] 陈斌,李海峰,刘苏琴. 500 kV标准配送式智能变电站站用电系统优化设计[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1):30-32, 35.
CHEN Bin, LI Haifeng, LIU Suqin. The optimization design of station power system in 500 kV standard distribution-mode smart substation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(1): 30-32, 35.
- [21] 张向荣. 石家庄某500 kV变电站主变智能冷却控制系统的设计与实现[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
ZHANG Xiangrong. Research and design of intelligent cooling control system for main transformer of a 500 kV substation in Shijiazhuang City[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [22] 李同同,满正行,赵少芳,等. VGGNet检测矿井供电漏电应用研究[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2022, 43(1):66-74.
LI Tongtong, MAN Zhengxing, ZHAO Shaofang, et al. Research and application of VGGNet in mine power supply leakage detection[J]. Journal of Northwest Minzu University (Natural Science), 2022, 43(1):66-74.

作者简介:



陈昊

陈昊(1980—),男,研究员级高级工程师,高级技师,博士,主要研究方向为继电保护及设备状态分析(E-mail: pingfengma@126.com);

沙浩源(1990—),男,助理工程师,博士,主要研究方向为继电保护及电力大数据分析(E-mail: 2113559206@qq.com);

钱其隆(1995—),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为继电保护(E-mail: qianqilong1995@163.com)。

(编辑 任思思)

Leakage current monitoring method of power cable in substation with low channel dependence

CHEN Hao¹, SHA Haoyuan¹, QIAN Qilong², REN Xuchao¹, LIU Huaiyu¹, XU Weilun²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. EHV Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing Power Supply Branch Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In order to alleviate the high dependence of the power cable leakage state judgment algorithm in substation on ideal communication conditions, a leakage current monitoring method of power cable in substation with low channel dependence is proposed. Firstly, the traditional reference vector method is improved in the monitoring signal synchronization calculation, and the power supply side is used as the reference for the phase difference calculation, which eliminates the influence of the volatility on the synchronization calculation. Then, a composite leakage current criterion based on the principle of current differential is proposed to solve the problem of judging the cable leakage state when the system does not collect the comparison reference. At the same time, according to the non-ideal communication situation that may occur in the leakage current monitoring system of the substation in operation, different leakage judgment modes and corresponding judgment methods are established to match them. The normal monitoring of the leakage state of the power cable is realized under the condition of incomplete information. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed method are verified by simulation and actual data of a 500 kV substation in Jiangsu grid. The results show that the algorithm can flexibly switch the leakage judgment modes under different communication conditions, which significantly improves the accuracy and reliability of the leakage state judgment.

Key words: power cable; refined synchronization method based on reference vector; composite leakage current criterion; judgment mode; leakage current monitoring; intelligent maintenance

附录 A

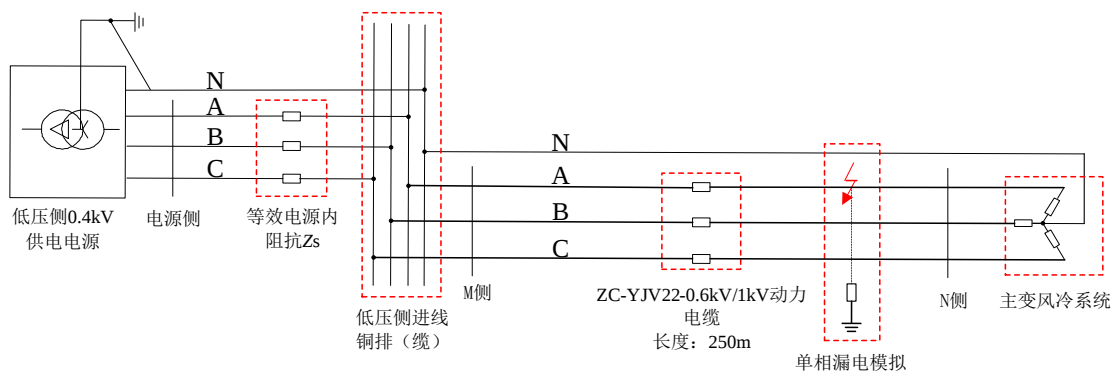


图 A1 500kV 变电站长段动力电缆仿真模型

Fig.A1 Simulation model of long power cable in 500kV substation

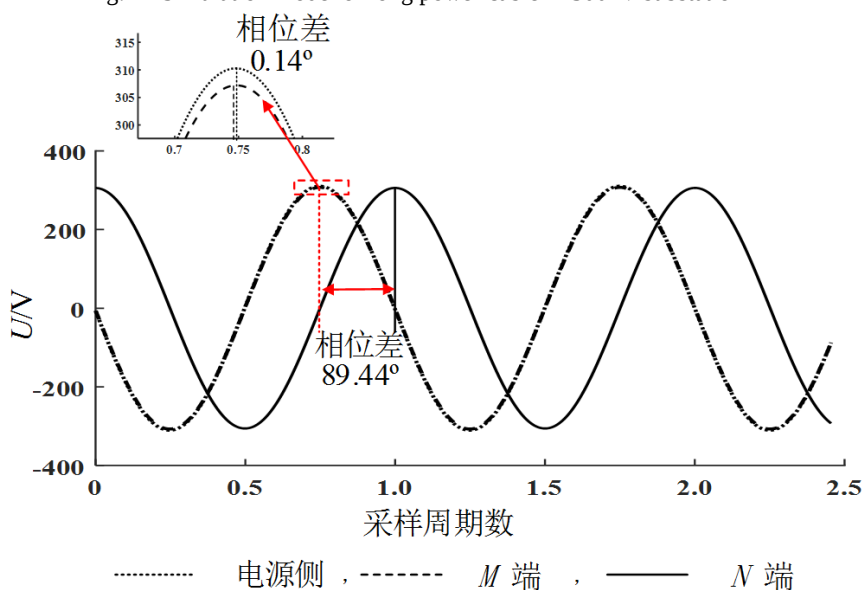


图 A2 阶段 1 的 A 相电压相位差

Fig.A2 Phase angle difference of phase-A voltage phase in Stage 1

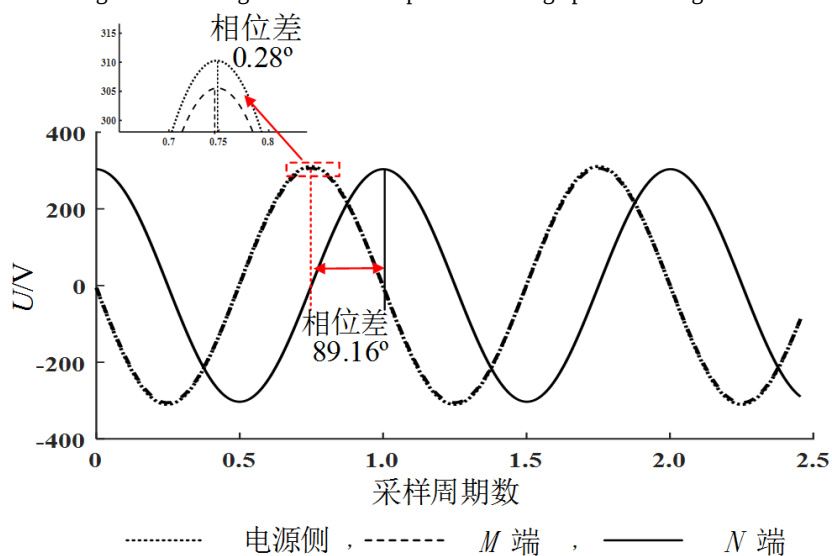


图 A3 阶段 2 的 A 相电压相位差

Fig.A3 Phase angle difference of phase-A voltage phase in Stage 2

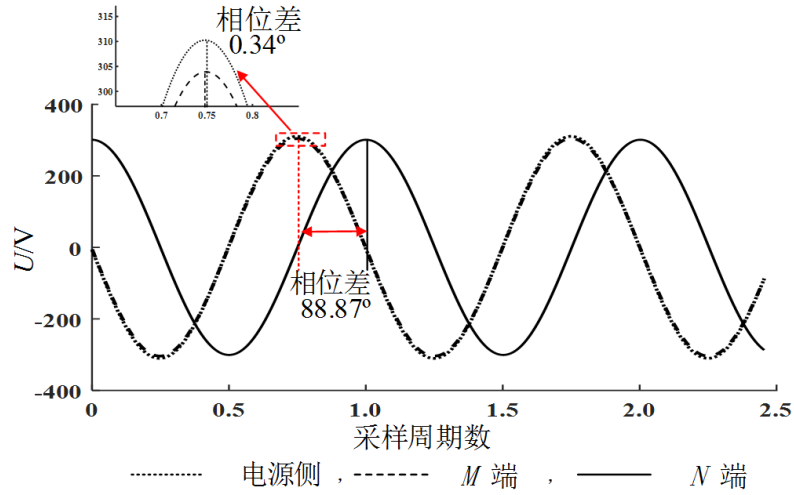


Fig.A4 Phase angle difference of phase-A voltage phase in Stage 3

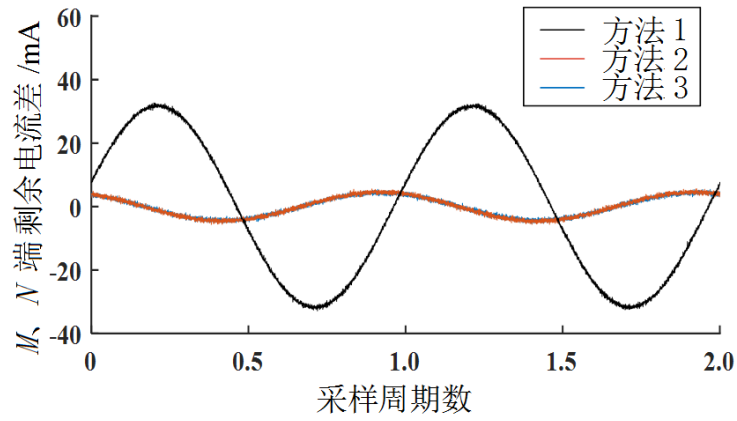


Fig.A5 Difference between residual current on Terminal M and N

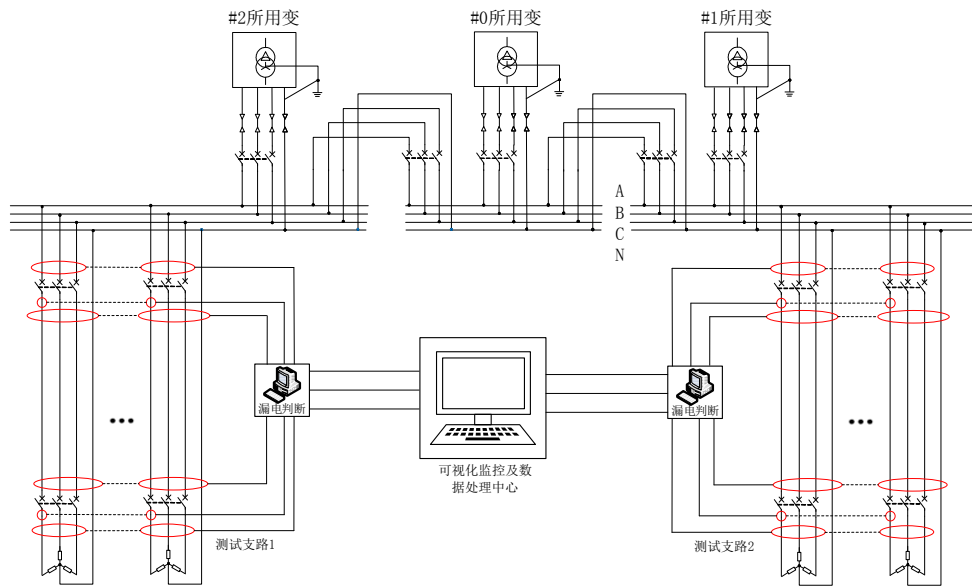


Fig.A6 Topology of leakage current monitoring system of power cable in 500kV substation

表 A1 测试支路 1 的相关数据
Table A1 Related data of Test Branch 1

参数	参数值
I_M 有效值/mA	22.5
I_N 有效值/mA	17.5
方法 1 计算得到的差流最大值（瞬时值）/mA	16.1
方法 11 个周期内的基波采样点连续越界点数占比/%	33.3
本文方法差流计算最大值（瞬时值）/mA	7.6
本文方法 1 个周期内的基波采样点连续越界点数占比/%	0
通道状态	Questionable