

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221179

基于空间矢量复合判断指标的变电站动力电缆漏电检测算法

沙浩源¹, 郭涛¹, 赵兴华¹, 何茂慧¹, 邓凯¹, 朱超¹, 陈昊², 李轩³

(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; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 为提高变电站长段动力电缆漏电监测水平, 提出了一种基于空间矢量复合判据的变电站长段动力电缆漏电检测算法。首先对现有方法中无法检测三相漏电故障的问题进行了分析。然后, 引入空间矢量的概念, 将剩余电流数据转换为空间矢量圆, 提出了剩余电流差流、A相漏电流以及空间矢量圆半径变化率3个漏电状态判断指标。并建立了针对电缆不平衡漏电及三相漏电故障的类型判断机制, 实现了对长段动力电缆漏电状态及类型的准确检测。最后, 通过仿真及江苏电网某500 kV变电站实际数据对所提方法的有效性 with 优越性进行验证。结果表明, 该方法能够准确实现对不平衡漏电故障、故障演变过程以及三相漏电故障的判断, 丰富了电缆漏电故障的诊断信息, 有效提高了对变电站漏电问题的分析处理效率。

关键词: 高压变电站; 长段动力电缆; 剩余电流; 空间矢量; 漏电类型; 智能运维

Leakage detection algorithm for long-section power cables in substations based on a composite judgment index of space vector

SHA Haoyuan¹, GUO Tao¹, ZHAO Xuehua¹, HE Maohui¹, DENG Kai¹, ZHU Chao¹, CHEN Hao², LI Xuan³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. EHV Branch Company, Nanjing 211102, China; 2. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: To improve the monitoring level of long-section power cables in substations, this paper proposes a leakage detection algorithm for long-section power cables in substations based on a space vector composite criterion. First, the limitations of existing cable leakage monitoring methods that cannot detect three-phase leakage faults are analyzed. Then, the concept of space vector is introduced and the residual current data is converted to a space vector circle. Residual current differential current, A-phase leakage current and space vector circle radius change rate, are proposed. A type judgment mechanism is established for cable unbalanced leakage and three-phase leakage faults. This provides accurate detection of the leakage status and type of long-section power cables. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed method are verified by simulation and actual data of a 500 kV substation in the Jiangsu power grid. The results show that the method can accurately detect unbalanced leakage faults, fault evolution and three-phase leakage faults, enrich the information of cable leakage faults, and effectively improve the analysis and processing efficiency of leakage problems in substations.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1500800).

Key words: high voltage substation; long-section power cable; residual current; space vector; leakage type; intelligent maintenance

0 引言

漏电故障是引发高压变电站火灾事故的主要

原因之一^[1-3], 对于变电站内设备的漏电状态进行监测是变电站运维工作的重点。承载变电站内负荷主要用能需求的长段动力电缆因其长度长(跨越交流室与开关场)、铺设环境相对恶劣, 使得其相较于一般站内设备发生绝缘问题的概率更大, 也更易导致漏电故障的发生^[4-6]。因此, 亟需对长段动力电缆的漏电状态进行监测, 通过对监测数据的深入分析,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB1500800); 江苏省重点研发计划项目资助(BE2020027); 江苏省国际科技合作项目资助(BZ2021012)

实现对电缆漏电故障的准确判断, 以及及时有效地采取有针对性的运维措施。

目前, 对于漏电问题的研究主要集中于低压配电网领域。文献[7]考虑了配网结构、天气变化等原因对漏电保护的影响, 提出了基于自适应浮动阈值的漏电故障保护方法, 该方法虽提高了传统固定阈值的灵活性, 但整定过程较为复杂。因此, 为进一步丰富漏电故障的判断依据, 提高漏电判断的鲁棒性, 文献[8]分别对漏电故障发生后缓变剩余电流和突变剩余电流的幅值与相位进行了分析, 有效减少了保护动作死区。文献[9]提出了基于漏电负载阻抗特性识别的复合判据, 有效消除了因切除漏电负载而导致漏电保护误动作的问题。文献[10]将剩余电流与不平衡电流的比值作为配电网漏电故障的判据, 避免了负荷频繁投切对传统漏电判断的干扰, 提高了对漏电故障识别的准确率。文献[11]提出了基于单相 $d-q$ 变换的漏电信号滤波方法, 在避免漏电基波幅值衰减的条件下, 有效抑制了零序谐波对漏电流检测的干扰, 提高了漏电排查的准确度。文献[12]依托配电网边缘计算平台对配电网中多个关键节点的剩余电流值进行监测, 并通过与整定阈值的比较以确定各区段是否发生漏电故障, 在此基础上, 文献[13]提出了基于双端剩余电流突变量的漏电故障检测判据, 凭借物联网平台丰富的感知信息和强大算力, 进一步提高对配电网漏电故障的检测水平。

上述研究很好地分析了低压配电网漏电故障的检测方法, 但并未涉及对变电站内长段动力电缆漏电故障的检测与分析。在工程实际中, 借鉴配网漏电故障的监测经验, 对于变电站长段动力电缆漏电状态的监测采用首、尾两端剩余电流的监测布点方式, 在对两端信号进行同步后, 以两端剩余电流的差值来检测电缆的漏电故障。然而, 基于剩余电流的故障检测方式仅对不平衡(包括单相、两相)漏电故障有效, 而对于三相漏电故障则无能为力。以电缆沟积水浸泡引起的单相漏电发展为三相漏电的故障为例, 在单相漏电阶段, 系统可以准确地检测出故障并告警, 而当故障演变为三相时, 不平衡电流消失, 两端剩余电流的差值将大幅减小, 告警信号也随即消失, 该情况严重影响了运维人员对漏电故障的判断, 从而贻误对故障处理的时机。

基于此, 本文提出了一种基于空间矢量复合判据的变电站动力电缆漏电检测算法。首先对目前变电站长段动力电缆的漏电监测情况进行了阐述, 讨论了现有漏电检测方法中无法判断三相漏电故障的局限性。在此基础上, 提出了基于空间矢量转换的

剩余电流差值计算方法, 在保证计算精度的同时, 节省了双端信号同步的数据预处理步骤。然后建立了基于双端剩余电流及 A 相漏电流监测量的长段动力电缆漏电故障类型判断机制, 基于所提出的剩余电流差流、A 相漏电流、空间矢量圆半径变化率 3 个指标, 准确地诊断出了电缆的漏电状态及类型。仿真及实测数据的分析均对算法的有效性及优越性进行了验证, 此研究成果可为高压变电站相关设备的漏电故障分析提供有益借鉴。

1 变电站长段动力电缆漏电监测及局限性分析

1.1 长段动力电缆漏电监测

在现场实际中, 一般采用剩余电流互感器(residual current transformer, RCT)来对变电站内设备的漏电状态进行监测, 并通过监测数据来判断是否有漏电故障发生^[14-17]。目前, 对于长段动力电缆的漏电故障监测^[18-19]如图 1 所示, 椭圆红圈处为电缆剩余电流的采集位置, 也就是 RCT 的安装位置。当设备未出现漏电情况时, 穿过 RCT 的电流矢量关系如式(1)所示。

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

式中, I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_N 分别为三相及中性线电流矢量。当电缆或负荷存在不对称漏电情况时, 则穿过 RCT 的电流矢量和不为 0, 如式(2)所示。

$$I_A + I_B + I_C + I_N = I_{RCT} \quad (2)$$

式中, I_{RCT} 为泄漏电流。

如图 1 所示, 对于长段动力电缆漏电情况的监测需采用双端剩余电流监测方法, 在电缆的首(M 侧)端、末端(N 侧)均装设 RCT, 两端剩余电流的差值则可反映两监测点之间动力电缆的漏电状态。两监测点以远端通信的方式将剩余电流数据传递至变电站漏电监测系统平台, 相关漏电数据的计算分析集中在系统平台完成。

由于在数据传输过程中会出现一定程度的延时(一般为 1~5 ms), 因此, 系统对双端信号的接收是非同步的。一般在进行剩余电流差值计算前会以 M 侧(或 N 侧)信号相角为基准, 对应的调整 N 侧(或 M 侧)相角, 以消除因信号延时而带来的相角误差, 则基于剩余电流差动原理的长电缆漏电计算如式(3)所示。

$$|I_M - I'_N| > I_T \quad (3)$$

式中: I'_N 表示完成信号同步后的 N 侧剩余电流; I_T 为漏电判断阈值; I_M 、 I_N 均为时间序列, 当一周期内连续多个采样点超过阈值, 即可判断有漏电故障发生。

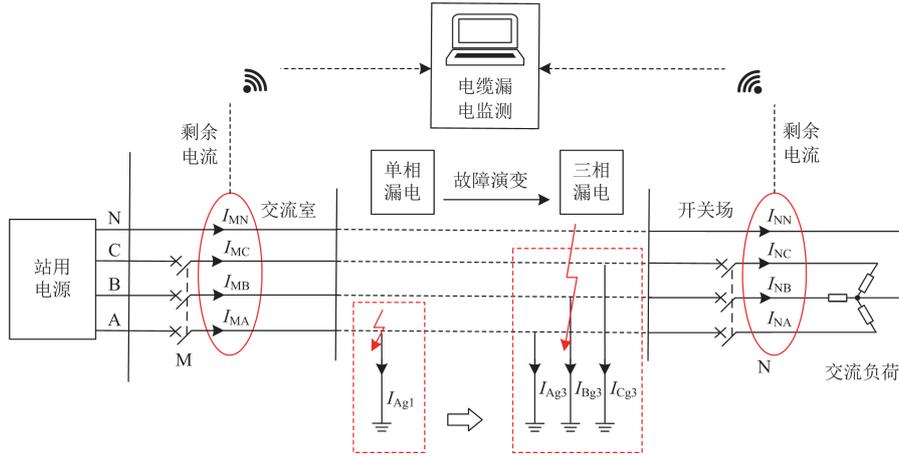


图 1 变电站长段动力电缆漏电监测示意图

Fig. 1 Leakage monitoring schematic diagram of substation long-section power cable

1.2 长段动力电缆漏电监测局限性分析

假设 A 相发生了单相漏电故障, 如图 1 红色虚线框所示, 则根据式(3), 可推导漏电计算公式如式(4)所示。

$$|I_M - I'_N| = |(I_{MA} + I_{MB} + I_{MC} + I_{MN}) - (I_{NA} + I_{NB} + I_{NC} + I_{NN})'| = |I_{MA} - I'_{NA}| = |I_{Ag1}| \quad (4)$$

式中: I_{MA} 、 I_{MB} 、 I_{MC} 分别表示 M 侧 A、B、C 三相电流; I_{NA} 、 I_{NB} 、 I_{NC} 分别表示 N 侧 A、B、C 三相电流; I_{Ag1} 为 A 相漏电流。经过信号同步后, 非漏电相的电流可等值消去, 则 M 侧、N 侧剩余电流的差值即为 A 相的漏电流。若漏电流大于漏电流判断门限值 I_T , 即可判断有漏电情况发生。

若此时, 单相漏电故障演变为三相漏电故障时, 同样, 基于式(3)可列写漏电计算公式如式(5)所示。

$$|I_M - I'_N| = |(I_{MA} + I_{MB} + I_{MC} + I_{MN}) - (I_{NA} + I_{NB} + I_{NC} + I_{NN})'| = |I_{Ag3} + I_{Bg3} + I_{Cg3}| \quad (5)$$

式中, I_{Ag3} 、 I_{Bg3} 、 I_{Cg3} 为三相漏电流。由公式可知, 两侧的剩余电流差值为三相漏电流的矢量和, 若三相漏电流近似平衡, 则结果接近 0。相应的矢量关系如图 2 所示, 单相漏电时, 若 A 相的漏电流 I_{Ag1} 大于 I_T , 则可以准确地触发漏电告警。而当演变为更严重的三相漏电时, M 侧、N 侧的剩余电流差值反而变得很小, 同时, 相应的告警信号也会消失, 从而埋下严重的安全隐患。

同理, 若其他不平衡漏电故障演变为三相漏电故障时, 也会发生相同的情况。由此可知, 基于剩余电流差值的漏电判据并不能很好地反映长电缆全部的漏电故障问题。

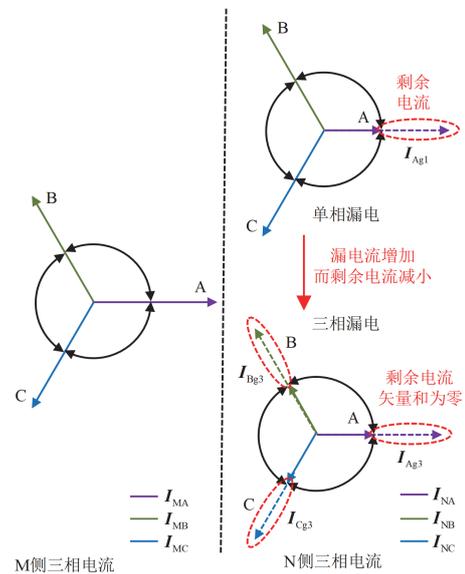


图 2 漏电故障演变矢量关系图

Fig. 2 Vector diagram of leakage fault evolution

2 基于空间矢量变换的长段动力电缆漏电计算

空间矢量^[20-23]变换是由克拉克变换演变而来, 主要应用于永磁同步电机控制领域中对旋转磁场的简化分析, 如式(6)所示。

$$\begin{pmatrix} X_\alpha(t) \\ X_\beta(t) \\ X_0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: x_a 、 x_b 、 x_c 表示 A、B、C 三相分量; X_α 和 X_β

分别为矢量空间坐标系中的实部和虚部; X_0 为零序分量, 在本文中不作考虑。则空间矢量 $\bar{X}(t)$ 可表示为

$$\bar{X}(t) = X_\alpha(t) + jX_\beta(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据磁动势守恒的原则, 三相坐标转换为两相静止坐标后, 磁动势保持不变, 相应的磁动势大小和周期与三相静止坐标相同。因此, 转换后的空间矢量可理解为随着角频率变化且半径大小保持不变的矢量圆。倘若三相电流的表达式为

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega t) \\ i_b = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c = I_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (8)$$

式中, ω 为角频率, 则相应的空间矢量可表示为电流幅值 $|I_m|$ 与空间单位矢量乘积的形式, 如式(9)所示。

$$\bar{X}(t) = |I_m| \cdot (\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)) \quad (9)$$

由此可知, 空间矢量在幅值上保留了原三相系统信号的大小, 在角度上, 忽略了三相系统中的 A、B、C 方向的相位角信息, 仅保留了能够体现信号周期变化的角频率。在空间矢量的变换中, 应用对象需满足在 A、B、C 三相静止坐标系内呈正弦分布。因此, 本文将 M 侧、N 侧剩余电流监测信号按照 0° 、 -120° 、 120° 做相位延迟, 人工处理为三相对称信号, 将其转换为空间矢量 $\bar{X}(t)$ 后, 再计算两侧信号的剩余电流差。对应于式(9)中, 剩余电流的幅值 $|I_{mM}|$ 、 $|I_{mN}|$ 可由采样数据得出。应用该方法可很好地避免相角差(由信号传输延时引起)对两端剩余电流差值计算的影响, 有效节省了数据处理步骤。

另外, 为应对由不平衡漏电故障演变为三相漏电故障而导致漏电告警消失的问题, 本文提出了基于空间矢量半径变化率的漏电状态检测方法。单相漏电故障和三相漏电故障的 M 侧剩余电流空间矢量可分别表达为半径为 R_{M1} 、 R_{M3} 的空间矢量圆, 如图 3 所示。

图中 Re 和 Im 分别表示矢量坐标的实轴和虚轴。故障类型演变前后 M 侧的空间矢量轨迹形成了一组同心圆, 单相漏电故障的剩余电流幅值 R_{M1} 较大(外圆), 三相漏电故障 R_{M3} 则较小(内圆)。当漏电状态未发生变化时, M 侧剩余电流空间矢量圆的半径 R_M 也不会发生变化。当由单相漏电故障向三相漏电故障演变时, R_M 会发生明显的减小, 如图中红色虚线箭头所示。因此, 本文将半径 R_M 的变化率作为故障状态演变检测的依据, 计算公式可表达为

$$R_M(t) = |I_{mM}(t)| \quad (10)$$

$$l_R = \frac{R_M(t+1) - R_M(t)}{\Delta t} \quad (11)$$

式中: R_M 表示 M 侧剩余电流空间矢量圆半径; l_R 表示 R_M 的变化率; t 为采样点时刻; Δt 为采样步长, 由于实际变电站内 RCT 采样频率为 0.6 kHz (也就是每 30° 采一个点), 因此, 本文取值为 0.001 67 s。

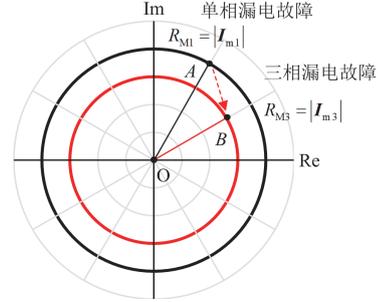


图 3 单相、三相漏电故障剩余电流空间矢量

Fig. 3 Residual current space vector of single-phase and three-phase leakage fault

3 基于空间矢量复合判据的变电站长段动力电缆漏电判断机制

为实现对长段动力电缆所有漏电故障类型的准确检测, 本文在图 1 所示传统长段动力电缆漏电监测的基础上增加了对 A 相漏电流的监测, 分别在 M 侧、N 侧加装了单相电流 CT, 将两端电流 $|I_{mMA}|$ 、 $|I_{mNA}|$ 作差得到 $|I_{Ag}|$ (同样可以采用基于空间矢量的方法)。长段动力电缆漏电状态及类型判断机制如图 4 所示。在进行漏电状态及类型判断前需要对 3 个漏电指标量进行计算: ① M、N 两端剩余电流差流指标; ② A 相漏电流指标; ③ R_M 变化率 l_R 指标。计算判据如式(12)一式(14)。

$$R_M - R_N > I_T \quad (12)$$

$$\begin{cases} |I_{Ag}| > I_{AgT1}, I_{MA} \leq I_e \\ |I_{Ag}| > I_{AgT2}, I_{MA} > I_e \end{cases} \quad (13)$$

$$|l_R| > l_{RT} \quad (14)$$

式中: R_N 表示 N 侧剩余电流空间矢量圆半径; I_T 与式(3)中取值一致, 一般取为 10 mA; I_{MA} 为 A 相 M 侧电流值; I_e 为该长段动力电缆的额定电流值; I_{AgT1} 表示相电流告警值; I_{AgT2} 表示重负荷下相电流告警值, 建议为 I_{AgT1} 的 k 倍, 即有 $I_{AgT2} = k \cdot I_{AgT1}$ 。其中 k 为电流系数, 经验值为 1.5~2.5, 可根据不同变电站的实际情况取值。 l_{RT} 为 R_M 变化率检测阈值, 经验取值为 0.5。

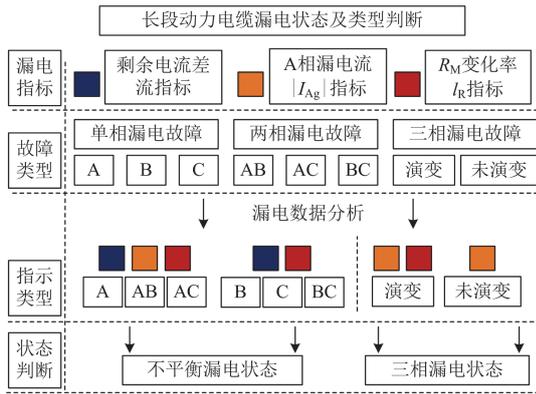


图 4 漏电状态判断机制

Fig. 4 Leakage state judgment mechanism

工程实际中，漏电监测系统会每间隔固定时段计算一次漏电指标，通过 3 个指标所发出的告警指示即可判断当前电缆的漏电状态，蓝色、黄色、红色分别代表指标①、②、③。当不平衡(单相及两相)漏电故障发生时，M、N 侧剩余电流差流能够清楚地反应不平衡电流的变化，相应的指标①和③也能够给出准确的判断。当三相漏电发生时，若该事件是由不平衡故障演变而来的，指标③则会出现明显

的变化；若不是，则指标②会对此做出反应。

4 算例分析

以下对本文所提出的基于空间矢量复合判据的长段动力电缆漏电判断算法的有效性进行验证。参考文献[24]的 500 kV 变电站仿真数据及文献[25]漏电仿真方法。变电站长段动力电缆的仿真拓扑如图 5 所示。所用变低压侧为 0.4 kV，低压侧负载短路损耗 $P_d = 18.1 \text{ kW}$ ，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 $R_{L0} = 21.42 \text{ m}\Omega$ ， $X_{L0} = 19.62 \text{ m}\Omega$ ，负荷为 60 kW 主变风冷系统(50%功率(2 组投入)，功率因数为 0.92)，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。由于 M 侧交流室与 N 侧开关场之间电缆沟内易出现绝缘问题，因此，本文取电缆的中点 125 m 处为漏电故障发生位置，设动力电缆通信延时为 5 ms (相位滞后 90°)。实际系统的漏电流采样率为 0.6 kHz。本文以发生概率最高的单相漏电故障为例，并讨论由单相漏电演变为三相漏电的全故障过程中漏电检测指标的变化特性。整体仿真时长为 1 s，在 0.2 s 时发生单相漏电故障，并于 0.4 s 时演变为三相漏电故障。

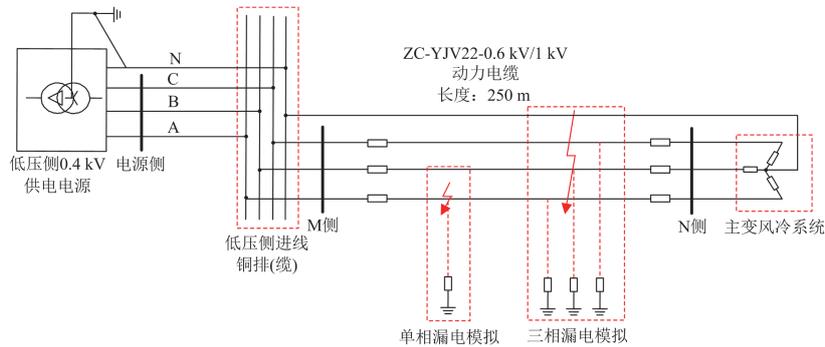


图 5 变电站长段动力电缆仿真拓扑

Fig. 5 Simulation topology of long-section power cables in substations

4.1 单相漏电故障分析案例

当单相漏电故障发生时，M 和 N 侧剩余电流波形如图 6 所示。在故障发生 0.2 s 后，M 侧剩余电流出现了明显的增大，其峰值达到了 57.4 mA，相应的 M 和 N 侧差流也会随之增大。

将 M 侧剩余电流进行空间矢量变换，如图 7 所示。图 7 中灰色圆点为稳态时采样点对应的空间矢量点， R_M 值较小的为正常状态(内圆)， R_M 值较大的为单相漏电状态(外圆)，红色圆圈连线则表达了从正常状态到单相漏电状态之间的暂态过渡过程，由箭头方向可以清楚地看到在单相漏电发生后，电缆从正常态向单相漏电变化的过程。同时，外圆

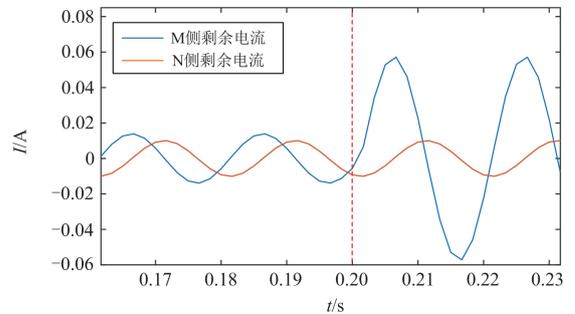


图 6 发生单相漏电故障时 M 和 N 侧剩余电流波形

Fig. 6 Residual current waveforms on M and N sides when single-phase leakage fault occurs

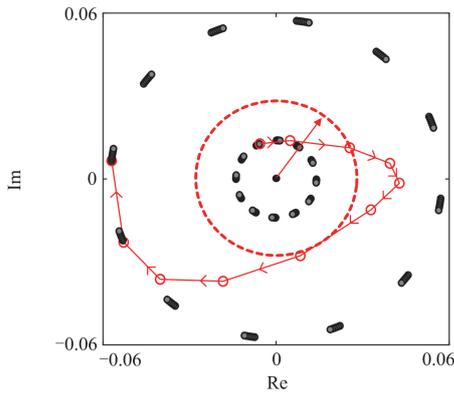


图 7 发生单相漏电故障时 M 侧剩余电流空间矢量图
Fig. 7 Spatial vector diagram of M side residual current when single-phase leakage fault occurs

空间矢量点的 R_M 值远大于指标①的漏电告警门限值 I_T 与 R_N 的和(红色虚线圆圈)。

相应的 R_M 变化率 I_R 计算结果如图 8 所示。在暂态过渡过程中, I_R 指标发生了剧烈的变化。而除过渡过程外, 漏电发生前、后的稳定状态 I_R 指标接近 0。本文将 I_R 指标的检测阈值设置为 0.5, 由图 8 可知, 由过渡过程而导致的 I_R 指标变化能够清晰地反映电缆单相漏电故障的发生情况。

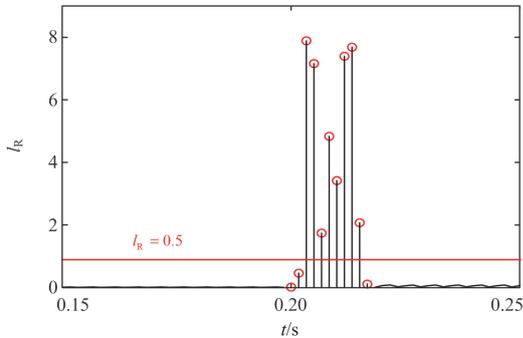


图 8 发生单相漏电故障时 I_R 的变化情况
Fig. 8 Changes of I_R when a single-phase leakage fault occurs

4.2 三相漏电故障分析案例

在相同的位置, 0.4 s 时故障发生了演变, 相应的 M 和 N 侧剩余电流波形如图 9 所示。与前述第 2 节分析一致, M 侧剩余电流突然减小, 与 0.2 s 前的正常状态相近。

与图 7 类似, 图 10 为故障演变后 M 侧剩余电流空间矢量图, 外圆为单相漏电状态, 内圆为三相漏电状态, 红色圆圈连线及箭头方向可以清楚地表达从单相漏电演变到三相漏电的暂态过渡过程。

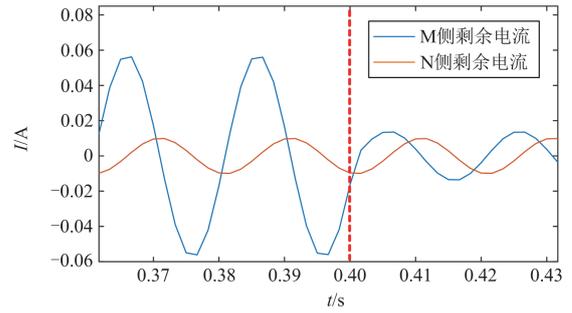


图 9 故障演变后 M 和 N 侧剩余电流波形
Fig. 9 Residual current waveforms of M and N sides after fault evolution

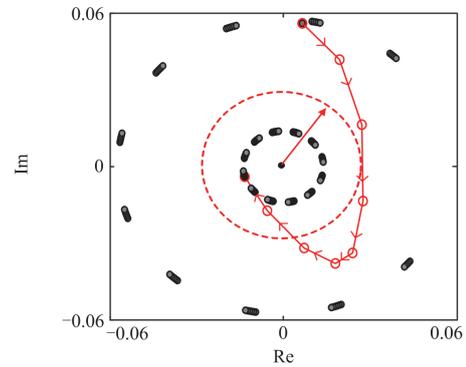


图 10 故障演变后 M 侧剩余电流空间矢量图
Fig. 10 Spatial vector diagram of residual current of M side after fault evolution

相应的 I_R 计算结果如图 11 所示, 与图 8 类似, I_R 指标值在故障演变前、后接近 0, 通过 0.5 的指标阈值检测, 漏电监测系统能够准确地捕捉电缆漏电故障的演变。

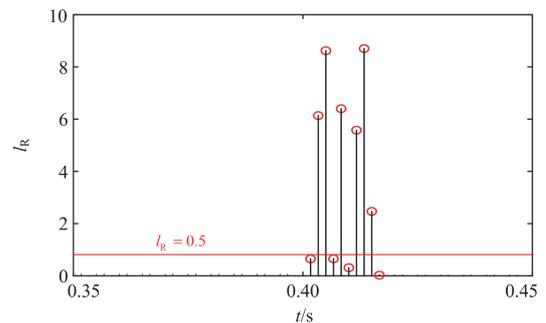


图 11 故障演变后 I_R 的变化情况
Fig. 11 Changes of I_R after fault evolution

进一步, 根据第 3 节所阐述的漏电判断机制, 本文对所有漏电故障类型的 3 个指标结果进行统计, 如表 1 所示。

表 1 所有漏电故障类型的 3 个指标计算结果
Table 1 Calculation results of three indicators for all leakage fault types

漏电故障类型		指标①/ mA	指标②/ mA	指标③	指示 类型
单相 漏电	A	47.1	43.6	7.9	①②③
	B	41	/	17.3	①③
	C	41.8	/	21.2	①③
两相 漏电	AB	44.8	43.6	15.1	①②③
	AC	45.6	43.6	10.5	①②③
	BC	39.5	/	8.6	①③
三相 漏电	演变	3.7	43.9	8.6	①②③
	未演变	3.7	43.9	/	②

注：“/”为接近 0，故在此不做统计。

表 1 中指标的计算结果均取故障过程中的最大值。由表中数据可知，本文所提出的漏电故障判断机制能够明确地指示出不同的漏电故障类型，指示类型结果与图 4 中漏电状态的判断机制一致。

5 应用实例

本文以 2021 年第二、三季度江苏省内某 500 kV 变电站两条长段动力电缆的漏电监测数据对本文所提方法进行有效性分析。同时，将未进行对时的剩余电流差动法(方法一)、经对时后的剩余电流差动法(方法二)以及本文所提算法(方法三)进行对比。方法一与方法二均已在实际系统中上线运行。则相应的数据统计结果如表 2 所示。

表 2 3 种方法漏电故障判断结果对比
Table 2 Comparison of leakage fault judgment results of three methods

故障类型	方法一	方法二	方法三	应告警 次数
A 相不平衡漏电	13	2	2	2
非 A 相不平衡漏电				0
三相 演变	0	0	1	1
三相 未演变	0	0	0	0
总计	13	2	3	3

根据漏电监测历史数据可知，相比于其他季节，夏季由于其高温潮湿的特点，是漏电事故最易发生的时间。在两个季度内实际共发生了 2 起长段动力电缆漏电事件，其中有 1 起由 A 相单相漏电故障演变为了三相漏电故障(与本文第 4 节算例仿真模拟情况类似)。因此，系统应发出的告警次数为 3 次。采用方法一对历史数据进行分析时，发生了 11 次漏电误告警，未发生漏告警。这是由于两点原因导致：

一是未对信号延时进行修正，电缆首尾两端剩余电流差值计算误差较大；二是由于漏电门槛值 I_T 较低，漏电告警反应较灵敏。相比于方法一，方法二增加了信号同步的处理步骤，大幅提高了对不平衡漏电故障的检测准确度。但是两种方法均不具备检测三相漏电故障的能力。最后，应用本文所提方法，在无需进行信号同步预处理的条件下，准确检测出了两起不平衡漏电故障。同时，准确反应了其中 1 起漏电故障所发生的故障演变，更加细致地分析了故障动力电缆的绝缘状态，能够有效提升变电运检人员的事故处置效率。

6 总结

本文提出了一种基于空间矢量复合判据的变电站动力电缆漏电检测算法。引入了空间矢量的概念，简化了两端剩余电流差值的计算步骤，并基于剩余电流差流、A 相漏电流、M 侧空间矢量圆半径变化率 3 个指标，构建了漏电故障类型判断机制，实现了对多漏电类型的准确判断。

本文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所提算法的准确性进行了验证，结果表明，相比于传统漏电检测算法，所提方法不仅能够准确地检测不平衡及三相漏电故障，还能实现对不平衡漏电向三相漏电故障演变过程的表达，并且在实际运行过程中准确地捕捉到单相到三相故障的演变过程，同时将告警信号发出。该方法的应用有效丰富了长段动力电缆漏电故障诊断的信息，为变电站长段动力电缆的安全运维提供了有效技术支撑。

参考文献

[1] 朱超, 谭风雷, 邓凯, 等. 苏通 GIL 综合管廊智慧消防监控系统设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(12): 171-175.
ZHU Chao, TAN Fenglei, DENG Kai, et al. Design of intelligent fire monitoring system in Sutong GIL utility tunnel[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(12): 171-175.

[2] 谢永涛, 袁浩, 李同晗, 等. 特高压换流站消防能力提升措施研究[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 241-245.
XIE Yongtao, YUAN Hao, LI Tonghan, et al. Research on improvement measures of fire protection capacity for UHVDC converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 241-245.

[3] 林凌云, 陈青, 金磊, 等. 基于知识图谱的变电站告警信息故障知识表示研究与应用[J]. 电力系统保护与控制

- 制, 2022, 50(12): 90-99.
- LIN Lingyun, CHEN Qing, JIN Lei, et al. Research and application of substation alarm signal fault knowledge representation based on knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 90-99.
- [4] 张佳庆, 过羿, 冯瑞, 等. 典型变电站阻燃低压电缆外护套材料火灾条件下热解固气产物特性及反应机理[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 33-42.
- ZHANG Jiaqing, GUO Yi, FENG Rui, et al. Solid-gas products and reaction mechanism of pyrolysis of the sheath material of a typical flame-retardant low-voltage cable in substations during fire[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2022, 62(1): 33-42.
- [5] 刘倩, 曹雯, 苗浩铭, 等. 接地铜排对变电站二次电缆防护效果研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(7): 58-64.
- LIU Qian, CAO Wen, MIAO Haoming, et al. Research on protective effect of ground copper bars on secondary cables in substations[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 58-64.
- [6] 陈昊, 崔运光, 马兆兴, 等. 变电站站用电系统混合型负荷支路的漏电监测方法[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(6): 739-743.
- CHEN Hao, CUI Yunguang, MA Zhaoxing, et al. Leakage monitoring method of hybrid load branch of the self-using power system in substation[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(6): 739-743.
- [7] 李奎, 陆俭国, 武一, 等. 自适应漏电保护技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 53-57.
- LI Kui, LU Jianguo, WU Yi, et al. Adaptive technology of leakage current operation protection and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(10): 53-57.
- [8] 张福良, 蔡志远. 鉴幅鉴相式剩余电流保护方法的研究[J]. 低压电器, 2014(8): 17-19.
- ZHANG Fuliang, CAI Zhiyuan. Research on amplitude and phase discrimination method of residual current protection[J]. Low Voltage Apparatus, 2014(8): 17-19.
- [9] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
- CAI Zhiyuan, PANG Jia, CHEN Tinghui. Research on method of leakage current protection based on residual current and leakage impedance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 61-64.
- [10] 梁栋, 王玮, 孙中玉, 等. TN-C-S 系统双突变量电流分离漏电保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 168-177.
- LIANG Dong, WANG Wei, SUN Zhongyu, et al. A current separation leakage protection method using double mutations for TN-C-S systems[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 168-177.
- [11] 杨帅, 张治国, 黄治国, 等. 漏电排查系统中漏电电流基波和谐波分量分离方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 180-186.
- YANG Shuai, ZHANG Zhiguo, HUANG Zhiguo, et al. Method for separation of base and harmonious wave component of leakage current in the leakage detection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 180-186.
- [12] 周超群, 陈先凯, 孙荣可, 等. 基于幅值差动原理的低压配电网剩余电流保护方法[J]. 供用电, 2022, 39(2): 58-64.
- ZHOU Chaoqun, CHEN Xiankai, SUN Rongke, et al. Residual current protection method of low voltage distribution network based on amplitude differential principle[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 58-64.
- [13] 周超群, 陈先凯, 盖午阳, 等. 基于双端剩余电流突变量的漏电保护方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 221-229.
- ZHOU Chaoqun, CHEN Xiankai, GE Wuyang, et al. Leakage protection method based on double-terminal residual current mutations[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 221-229.
- [14] 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 characteristics based on digital constant current technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 147-152.
- [15] 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. Application of type B residual current protection in new energy power generation and electric vehicles[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 31-36.
- [16] 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 circuit breaker in rural low voltage

- distribution network[J]. *Electric Engineering*, 2018(22): 14-15.
- [17] 门茂琛, 杜雨佳, 徐铭铭, 等. 基于剩余电流波形特征量的智能电气火灾监控研究[J]. *消防科学与技术*, 2023, 42(4): 549-554.
- MEN Maochen, DU Yujia, XU Mingming, et al. Research on intelligent electrical fire monitoring based on residual current waveform characteristics[J]. *Fire Science and Technology*, 2023, 42(4): 549-554.
- [18] 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.
- [19] 陈昊, 沙浩源, 钱其隆, 等. 低通道依赖的变电站动力电缆漏电流监测方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(1): 218-224.
- CHEN Hao, SHA Haoyuan, QIAN Qilong, et al. Leakage current monitoring method of power cable in substation with low channel dependence[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(1): 218-224.
- [20] IGNATOVA V, GRANJON P, BACHA S. Space vector method for voltage dips and swells analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(4): 2054-2061.
- [21] BAGHERI A, GU I Y H, BOLLEN M H J. A robust transform-domain deep convolutional network for voltage dip classification[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 2794-2802.
- [22] 沙浩源, 梅飞, 李丹奇, 等. 基于改进生成对抗网络的电压暂降事件类型辨识研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(22): 7648-7660.
- SHA Haoyuan, MEI Fei, LI Danqi, et al. Research on voltage sag event type identification based on improved generative adversarial networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(22): 7648-7660.
- [23] WANG Y, DENG F L, BOLLEN M, et al. Calculation of the point-on-wave for voltage dips in three-phase systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(4): 2068-2079.
- [24] 陈斌, 李海烽, 刘苏琴. 500 kV 标准配送式智能变电站用电系统优化设计[J]. *江苏电机工程*, 2015, 34(1): 30-32, 35.
- [25] 赵建文, 侯媛彬. 矿井电网漏电暂态特征分析及仿真[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(19): 55-60, 64.
- ZHAO Jianwen, HOU Yuanbin. Analysis and simulation of leakage transient in coal mine low voltage network[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(19): 55-60, 64.

收稿日期: 2022-07-24; 修回日期: 2022-10-23

作者简介:

沙浩源(1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统大数据分析及继电保护; E-mail: 2113559206@qq.com

郭涛(1977—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为特高压交直流运维技术; E-mail: 329232955@qq.com

赵兴华(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为继电保护与电能质量控制。E-mail: cumtzh2013@126.com

(编辑 魏小丽)