

DOI:10.12158/j.2096-3203.2025.01.011

# 基于波形相似性的柔性互联配电网短路故障区段定位方法

陈继明, 陈文淙, 仇志华, 于馨玮, 徐乾

(中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 由于柔性多状态开关 (soft normal open point, SNOP) 复杂的控制策略及其弱馈特性, 传统配电网故障定位方法难以适用于柔性互联配电网 (flexible distribution network, FDN)。因此, 文中提出一种利用电流正序分量波形相似性进行 FDN 故障区段定位的方法。首先, 针对 SNOP 的典型控制策略, 分析 FDN 的短路故障特征。其次, 计算配电网中不同故障位置电流正序分量的 Tanimoto 系数, 通过对比不同位置的电流正序分量波形相似性, 构建 FDN 短路故障定位判据, 并通过 Teager 能量算子 (Teager energy operation, TEO) 实现故障时刻的精确定位, 利用智能配电终端 (smart terminal unit, STU) 传递信息。最后, 通过建模仿真对所提方法进行分析验证, 结果表明该方法能够对故障区段进行准确定位, 不受故障位置、故障类型、过渡电阻、采样频率及通信延时等因素的影响, 验证了该方法的可行性与有效性。

**关键词:** 柔性互联配电网 (FDN); 柔性多状态开关 (SNOP); 故障分析; 波形相似性; 故障定位; 电流正序分量

**中图分类号:** TM771

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2025)01-0104-11

## 0 引言

配电网是输电网与用户之间的连接纽带, 因此对其电能质量、供电能力、安全性、稳定性等方面具有较高的要求<sup>[1-3]</sup>。传统配电网采用“闭环设计、开环运行”的供电方式实现非故障区域的供电恢复<sup>[4-6]</sup>, 但存在暂时停电、开关次数有限、开合闸操作冲击等问题, 难以满足配电网越来越高的供电要求。柔性互联配电网 (flexible distribution network, FDN) 利用柔性多状态开关 (soft normal open point, SNOP) 代替传统联络开关, 实现馈线间功率的连续调节, 起到平衡负荷分配、改善潮流分布以及调节电压水平等作用<sup>[7-9]</sup>。但由于 FDN 中故障点两侧输出特性不同, 且 SNOP 的控制策略会进一步影响输出特性<sup>[10]</sup>, 导致传统差动保护的灵敏度不足, 现有故障定位方法不能对其进行可靠保护<sup>[11-14]</sup>。为此, 须根据 FDN 的故障特征设计相应的故障定位方法。

针对 FDN 的故障判断与处理, 现有研究均以 SNOP 及其控制策略为主要研究对象<sup>[15-18]</sup>, 尚无方法通过 FDN 交流馈线上的故障特征进行故障定位。FDN 包含环网结构以及电力电子装置, 其故障定位研究可类比柔性直流配电网、交直流混合配电网、逆变型电源接入交流电网以及配电环网等相似结构的故障定位方法。配电环网中短路电流双向流动, 常采用分布式智能 (distributed intelligent, DI) 控制技术进行信息交互与故障判断<sup>[19-20]</sup>。文献[21-

23] 结合新能源逆变电源的控制策略, 分析发生故障后新能源逆变电源的暂态以及稳态输出特征, 为 FDN 的继电保护研究提供参考。文献[24]利用动态向量理论描述故障电流的动态过程, 提出基于电流暂降检测的自适应判据对故障分量电流差动保护进行改进的方法, 提高了交直流互联系统中差动保护的灵敏度。文献[25]通过分析交直流混联电网故障后的输出电流和电压特征, 提出基于电压波形相似性比较的纵联保护方法, 通过 Pearson 相关系数描述两端保护单元的相似性, 从而判断区内外故障。文献[26]将直流线路两端正负极电流故障分量的极性不同作为故障特征, 利用余弦相似度衡量正负极电流的相似度, 提出基于电流故障分量相似度的柔性直流线路纵联保护方案。但在 FDN 故障时, SNOP 的弱馈特性及控制策略、故障严重程度、过渡电阻等因素都将影响故障点两侧电气量的幅值以及相位之间的关系, 均可能导致现有方法的灵敏度不足。余弦相似度及 Pearson 相关系数能反映电流波形变化趋势的差异, 可以用其描述故障点两侧电流的波形相似性并作为故障定位依据, 且相比于电流差动保护原理具有更高的灵敏度, 满足文献[25-26]中波形相反特性对灵敏度的要求, 但不满足 FDN 复杂的故障情况对灵敏度的要求, Tanimoto 系数作为上述两系数的扩展, 可反映 FDN 更多的全电流波形信息。

文中分析了 FDN 短路时, SNOP 在典型控制策略下的故障特征; 计算各区段两侧电流正序分量的 Tanimoto 系数, 描述电流正序分量的波形相似性; 通过对比配电网中不同故障位置的电流波形相似性,

收稿日期: 2024-05-26; 修回日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51977220)

构建 FDN 短路故障定位判据;采用 Teager 能量算子 (Teager energy operation, TEO) 以实现故障时刻的精确标定,智能配电终端 (smart terminal unit, STU) 用于传递故障信息。建模仿真验证了所提方法的可行性,并分析了故障位置、故障类型、过渡电阻以及采样频率对于故障定位的影响。

## 1 FDN 故障暂态特征分析

### 1.1 FDN 结构与 SNOP 典型控制策略

将 SNOP 安装于不同电源的馈线末端,FDN 可以实现不同电源间的能量调控。利用 DI 控制技术,在各配电支路的环网柜 (ring main unit, RMU) 中装设 STU,实现故障信息的快速通信。SNOP 选用背靠背 (back to back, B2B) 电压源型变流器 (voltage source converter, VSC) [27-28],通过两电平 VSC 构成 B2B-VSC 结构, $C$  为直流电容, $L$ 、 $R$  分别为换流器的滤波电感和串联等效电阻。FDN 结构如图 1 所示,其中  $S$  为各条出线的负载;QF 为各断路器。

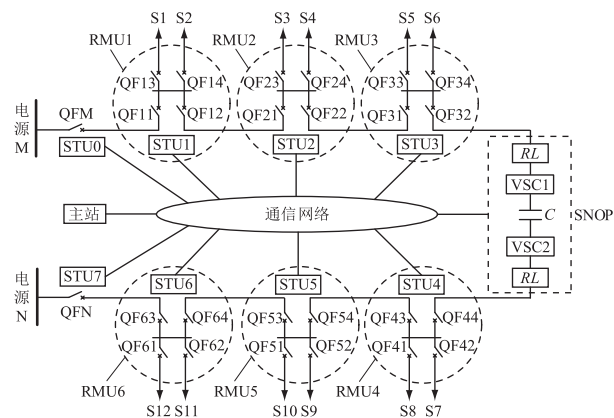


图 1 FDN 典型结构

Fig.1 Typical structure of FDN

SNOP 中 VSC 采用内外双闭环控制,正常运行时通常采用直流电压 ( $U_{dc}Q$ )-功率 ( $PQ$ ) 控制策略;故障后,非故障侧 VSC 采用  $U_{dc}Q$  控制,故障侧 VSC 为提高控制系统响应速度和闭锁外环,因此直接对电流内环进行控制[29]。为避免短路后故障侧端口电压骤降,故障侧 VSC 的  $dq$  轴电流给定值随控制策略的切换发生突变,使故障侧端口电压维持在正常范围[30]。B2B-VSC 双闭环控制系统结构框图如图 2 所示。

图 2 中, $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流的实际值; $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流的给定值; $U_{aref}$ 、 $U_{bref}$ 、 $U_{cref}$  分别为故障侧端口 a、b、c 三相电压的给定值;PI 为比例-积分参数。

故障后依据低电压穿越要求设置  $dq$  轴电流给定值[23],如式(1)所示。

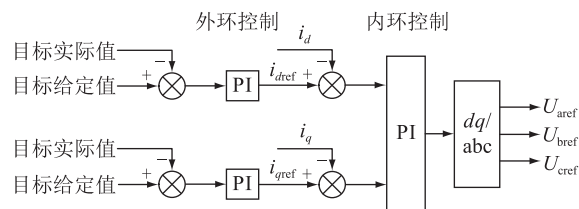


图 2 B2B VSC 双闭环控制系统

Fig.2 B2B VSC double closed loop control system

$$\begin{cases} i_{qref} = \begin{cases} 0 & U > 0.9 \text{ p.u.} \\ K_1(0.9 - U)I_N & 0.2 \text{ p.u.} \leq U \leq 0.9 \text{ p.u.} \\ K_2I_N & U < 0.2 \text{ p.u.} \end{cases} \\ i_{dref} = \min(i_{d0ref}, \sqrt{i_{max}^2 - i_{qref}^2}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U$  为并网点电压标么值; $I_N$  为额定输出电流; $K_1$ 、 $K_2$  为电压支撑系数,其中  $K_1$  反映无功动态支撑能力, $K_2$  反映最大允许输出无功电流的能力; $i_{d0ref}$  为故障前电流内环的有功电流给定值; $i_{max}$  为允许输出的最大电流限值。

### 1.2 FDN 短路故障特征分析

1.1 节所述 SNOP 控制策略采用单一  $dq$  坐标系实现对电流正序分量的有效控制,因此不论发生三相短路或两相短路,系统的电流正序分量特征相同,而采用瞬时对称分量法能够快速获得电流正序分量并进行暂态分析。当故障发生于 VSC1 侧馈线时,故障侧 SNOP 等效为交流电流源,非故障侧 SNOP 等效为负载,系统的电流正序分量等效网络如图 3 所示,图 3 中电压、电流及阻抗均为正序分量。 $i_M$ 、 $i_N$  为两侧电源的输出电流; $i_{SNOP}$  为 SNOP 在故障侧的等效输出电流; $Z_{SNOP}$  为 SNOP 在非故障侧的等效阻抗; $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_4$ — $Z_8$  为各区段线路的等效阻抗; $Z_{3(1)}$ 、 $Z_{3(2)}$  为故障区段故障点两侧线路的等效阻抗; $Z_{L1}$ — $Z_{L6}$  为各出线负载的等效阻抗; $u_f$  为故障点正序电压。

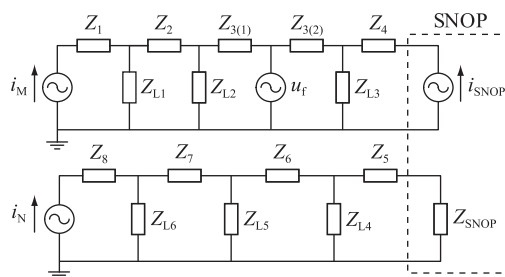


图 3 系统的正序等效网络

Fig.3 Positive sequence equivalent network of the system

根据故障发生后输出电流不突变和输出电流在给定值可突变的条件,在过阻尼控制系统以及图

1 中  $R/L$  的作用下<sup>[21]</sup>, 可知 VSC1 输出电流包含指数衰减的暂态分量<sup>[31]</sup>, 并最终稳定在给定值。三相短路时  $dq$  坐标系下 VSC1 的输出电流如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{d1}(t') = I_1 e^{r_1 t'} + I_2 e^{r_2 t'} + I_3 \\ i_{q1}(t') = I_4 e^{r_1 t'} + I_5 e^{r_2 t'} + I_6 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $i_{d1}(t')$ 、 $i_{q1}(t')$  分别为 VSC1 输出的  $d$ 、 $q$  轴电流分量;  $I_1$ 、 $I_2$  为  $d$  轴电流 2 个暂态分量的初始值;  $I_4$ 、 $I_5$  为  $q$  轴电流 2 个暂态分量的初始值;  $I_3$ 、 $I_6$  分别为故障后  $d$ 、 $q$  轴电流给定值;  $r_1$ 、 $r_2$  为衰减常数;  $t'$  为故障发生时刻。

根据式(2)可得 abc 坐标系下的三相短路电流, 以 a 相电流为例给出其表达式, 如式(3)所示。b 相和 c 相短路电流分别滞后、超前 a 相 120°。

$$\begin{aligned} i_{a1}(t') = & I_7 \cos(\omega_1 t' + \varphi_1 + \theta_1) + \\ & I_1 e^{-r_1 t'} \cos(\omega_1 t' + \varphi_1) + I_2 e^{-r_2 t'} \cos(\omega_1 t' + \varphi_1) - \\ & I_4 e^{-r_1 t'} \sin(\omega_1 t' + \varphi_1) - I_5 e^{-r_2 t'} \sin(\omega_1 t' + \varphi_1) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\omega_1$  为 VSC1 输出电流角频率;  $\varphi_1$  为故障前 a 相电流初相位;  $\theta_1$  为 a 相电流稳态分量相位偏移,  $\theta_1 = \arctan(I_6/I_3)$ ;  $I_7$  为 a 相电流稳态分量幅值,  $I_7 = \sqrt{I_3^2 + I_6^2}$ 。

由式(3)可知, FDN 交流馈线短路后, 故障侧 VSC 输出电流包含稳态基频分量和指数衰减的暂态基频分量。网侧无限大功率电源提供的三相短路电流同样包含稳态基频分量与暂态分量, 其中, 暂态分量为按照指数规律衰减至 0 的非周期分量<sup>[32]</sup>。

由上述分析可知, 故障点两侧电流的暂态分量存在波形差异, 同时 SNOP 的弱馈特性以及电流给定值的可变性导致故障点两侧的电流稳态分量存在幅值差及相位差。因此, 利用故障点两侧电流正序分量的波形差异即可判断故障位置。

VSC2 采用  $U_{dc}Q$  控制, 故障侧功率波动造成直流电压  $U_{dc}$  的波动, 使得 VSC2 的  $d$  轴电流给定值变化, 产生与 VSC1 相似的暂态过程; 而无功功率  $Q$  的给定值不变,  $q$  轴输出电流无波动。非故障侧馈线各区段两端电流具有相同的波形变化趋势。

## 2 基于电流波形相似性的 FDN 短路故障区段定位方法

6~35 kV 中压配电网采用中性点非有效接地方式, 单相接地短路时电网可以带电运行一段时间, 因此文中主要针对发生两相和三相短路时的故障定位。

### 2.1 电流波形相似度计算方法

采用 Tanimoto 系数对电流正序分量的波形相似度进行计算, 如式(4)所示。

$$T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i} \quad (4)$$

式中:  $x_i$ 、 $y_i$  分别为向量  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$  的第  $i$  个采样点; 向量  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、 $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  为两组波形数据;  $n$  为采样点数;  $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  为两向量的 Tanimoto 系数。

Tanimoto 系数的取值范围为  $[-0.333\ 3, 1]$ , 趋近于 1 时为正相关; 趋近于  $-0.333\ 3$  时为负相关; 趋近于 0 时二者无相关性。Tanimoto 系数能够反映 2 个波形变化趋势和幅值大小的相关性, 满足正序电流波形相似性计算的要求, 文中均用系数  $T$  表示。

### 2.2 故障定位启动判据

交流馈线故障后, 线路电流发生突变, 文中方法是利用故障后三相电流 TEO 的突变以及单调递增过程作为启动判据, 同时对故障发生时刻进行标定。设  $i_j(t)$  为  $t$  时刻的  $j$  相电流采样值, 采用 TEO 对  $i_j(t)$  进行差分运算能够增强故障时刻电流信号的瞬时突变特征, 实现故障发生时刻的精确标定。首先判断  $t$  时刻 TEO 值是否超过启动门槛值  $\varphi_{\text{set}}$ , TEO 值用  $\varphi$  表示, 具体判别式如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \varphi(i_j(t)) = & \\ i_j^2(t) - i_j(t-1)i_j(t+1) > \varphi_{\text{set}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\varphi(i_j(t))$  为  $t$  时刻  $j$  相电流的 TEO 值。

满足式(5)后, 进一步判断 TEO 值是否存在连续递增规律, 以避免噪音的干扰引起误启动。具体判别式如式(6)所示。

$$\varphi(i_j(t+10)) > \varphi(i_j(t+9)) > \dots > \varphi(i_j(t)) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知, 对 3 个连续采样点进行计算获得 TEO 值, 当计算结果大于  $\varphi_{\text{set}}$ , 且其后连续 10 个 TEO 值呈递增规律, 则表示该时刻发生故障, 启动故障定位, 并标定故障时刻。

同时, 满足故障定位启动判据的馈线侧识别为故障侧, 通过终端向 SNOP 发出控制信号, 使得 SNOP 根据故障侧进行相应的控制策略切换。

### 2.3 故障信息交换

故障定位启动后, 根据所标定的故障时刻, 选取故障发生后一定数据窗内的电流正序分量, STU 将自身故障信息传递到相邻两侧或一侧的 STU 进行相似性分析。位于同一 RMU 内的测量装置之间

可直接在内部进行信息交换。

考虑到 SNOP 两侧故障电流的差异性,为防止故障发生后 SNOP 两侧的故障定位装置误判,SNOP 两侧馈线分别采用独立的终端,故障信息仅在同侧馈线的相邻 STU 之间进行交换,缩短通信环节并减少主站系统需要处理的信息量,减小传输延迟。

## 2.4 故障位置识别判据

### 2.4.1 馈线故障

判断故障是否发生在相邻 2 个 STU 之间的交流馈线上,须将同一区段线路两端最接近的测量装置所测得的故障数据进行相似性分析,如图 1 中 STU1 与 STU2 进行信息交换时,须传递 QF12 与 QF21 处所测量的电流正序分量,从而根据其相似度判断故障是否发生在 QF12 与 QF21 之间。具体的故障判别式如式(7)所示。

$$\begin{cases} T(i_{L1}, i_{L2}) \in [-0.333, T_{\text{set}}) & \text{区内故障} \\ T(i_{L1}, i_{L2}) \in [T_{\text{set}}, 1] & \text{区外故障} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i_{L1}$ 、 $i_{L2}$  为交流馈线两端的电流正序分量; $T(i_{L1}, i_{L2})$  为描述  $i_{L1}$  和  $i_{L2}$  相似度的  $T$  系数; $T_{\text{set}}$  为  $T$  系数整定值,当相似度小于  $T_{\text{set}}$  时为馈线故障,大于  $T_{\text{set}}$  时为馈线无故障。

### 2.4.2 母线或支路故障

判断故障是否发生在母线或支路上,首先,需要分析母线所连馈线间的电流正序分量相似性,其次,需要分析母线所连各支路与网侧馈线之间的电流正序分量的相似度。当故障位于母线或支路上时,电网和 SNOP 提供的故障电流分别从两侧流向母线,母线两侧馈线的电流正序分量特征不一致,具体的故障判别式如式(8)所示。

$$T(i_{BL1}, i_{BL2}) = \begin{cases} 1 & T(i_{BL1}, i_{BL2}) \in [-0.333, T_{\text{set}}) \\ 0 & T(i_{BL1}, i_{BL2}) \in [T_{\text{set}}, 1] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i_{BL1}$ 、 $i_{BL2}$  分别为母线所连网侧和 SNOP 侧馈线的电流正序分量; $T(i_{BL1}, i_{BL2})$  为描述  $i_{BL1}$  和  $i_{BL2}$  相似度的  $T$  系数。当  $T(i_{BL1}, i_{BL2}) = 1$  时,须进一步判断故障位于母线或某一支路;当  $T(i_{BL1}, i_{BL2}) = 0$  时,则说明故障不在该母线或所连支路上。

(1) 母线故障。当故障位于母线上时,各支路负载出线无电流,因此支路与网侧馈线的电流正序分量相似度很低。具体的故障判别式如式(9)和式(11)所示。

$$T(i_{BL1}, i_{BSm}) = \begin{cases} 1 & T(i_{BL1}, i_{BSm}) \in [-0.333, T_{\text{set}}) \\ 0 & T(i_{BL1}, i_{BSm}) \in [T_{\text{set}}, 1] \end{cases} \quad (9)$$

$m = 1, 2, \dots, k$

$$T_B =$$

$$T(i_{BL1}, i_{BL2}) \cap T(i_{BL1}, i_{BS1}) \cap \dots \cap T(i_{BL1}, i_{BSk}) \quad (10)$$

$$T_B = \begin{cases} 1 & \text{区内故障} \\ 0 & \text{区外故障} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i_{BSm}$  为母线第  $m$  条支路的电流正序分量; $k$  为支路总数; $T(i_{BL1}, i_{BSm})$  为描述  $i_{BL1}$ 、 $i_{BL2}$  和  $i_{BSm}$  相似度的  $T$  系数; $T_B$  为判别故障是否位于母线上的依据,由  $T(i_{BL1}, i_{BL2})$  和  $T(i_{BL1}, i_{BSm})$  决定。当  $T_B = 1$  时表示母线连接的各支路与网侧交流馈线之间的电流正序分量相似度均低于整定值,即可判定故障位于母线上,其他情况则为支路故障。

(2) 支路故障。支路故障时,网侧短路电流剧增,而 SNOP 为弱馈侧,且控制系统限制 SNOP 提供短路电流,因此故障支路电流与网侧馈线的电流特征相似;而非故障支路无电流流过,与网侧馈线的电流相似度低,以此可判断故障支路。结合式(8)和式(9)可得具体的故障判别式如式(12)所示。

$$\begin{cases} (T(i_{BL1}, i_{BL2}), T(i_{BL1}, i_{BSm})) = (1, 0) & \text{区内故障} \\ (T(i_{BL1}, i_{BL2}), T(i_{BL1}, i_{BSm})) = (1, 1) & \text{区外故障} \end{cases} \quad (12)$$

式中:当  $T(i_{BL1}, i_{BL2}) = 1$ 、 $T(i_{BL1}, i_{BSm}) = 0$  为支路  $m$  故障;当  $T(i_{BL1}, i_{BL2}) = 1$ 、 $T(i_{BL1}, i_{BSm}) = 1$  为支路  $m$  无故障。

## 2.5 故障定位判据整定

测量装置规定电流正方向均为从电网流向 SNOP,理想情况下,非故障区段两侧的电流正序分量  $T=1$ 。文中方法确定了故障发生的精确时刻并利用 STU 对同一时间段内数据窗数据进行处理,因此不考虑同步误差,仅考虑 CT 的角度误差和幅值误差,整定值须在区外故障  $T=1$  的基础上乘以可靠系数,该可靠系数如式(13)所示。

$$K = K_1 K_2 K_3 \quad (13)$$

式中: $K$  为可靠系数; $K_1$  为角度误差系数; $K_2$  为幅值误差系数; $K_3$  为裕度系数。

CT 的角度误差一般不超过  $7^\circ$ <sup>[33]</sup>,工频相角  $7^\circ$  相对于一个  $360^\circ$  周期的误差为 1.9%,因此考虑 CT 角度误差时,区外故障  $T$  系数为 0.98。CT 的幅值误差一般不超过 10%,考虑幅值  $\pm 10\%$  的误差,获得不同故障情况下区外故障的多次仿真结果,得到  $T$  系数的平均值为 0.99。同时考虑角度误差和幅值误差,系统正常运行时区外故障的  $T$  系数最小值为 0.97。

进一步考虑故障位置、故障类型、过渡电阻、采样频率、系统参数、控制策略等因素的影响,通过大

量仿真得到区外故障  $T$  系数的经验值范围为  $0.97 \sim 1$ , 区内故障时区段两侧  $T$  系数的经验值范围为  $-0.01 \sim 0.3$ 。最终选取  $0.97$  作为角度误差系数,  $0.98$  作为幅值误差系数,  $0.9$  作为裕度系数, 由式 (13) 得可靠系数为  $0.86$ , 最终确定整定值  $T_{\text{set}} = 0.86$ 。在实际应用中该值可根据具体设备的实际运行误差情况进行适当调整。

2.6 故障定位流程

文中提出了基于电流波形相似性的 FDN 短路故障区段定位方法, 流程如图 4 所示。

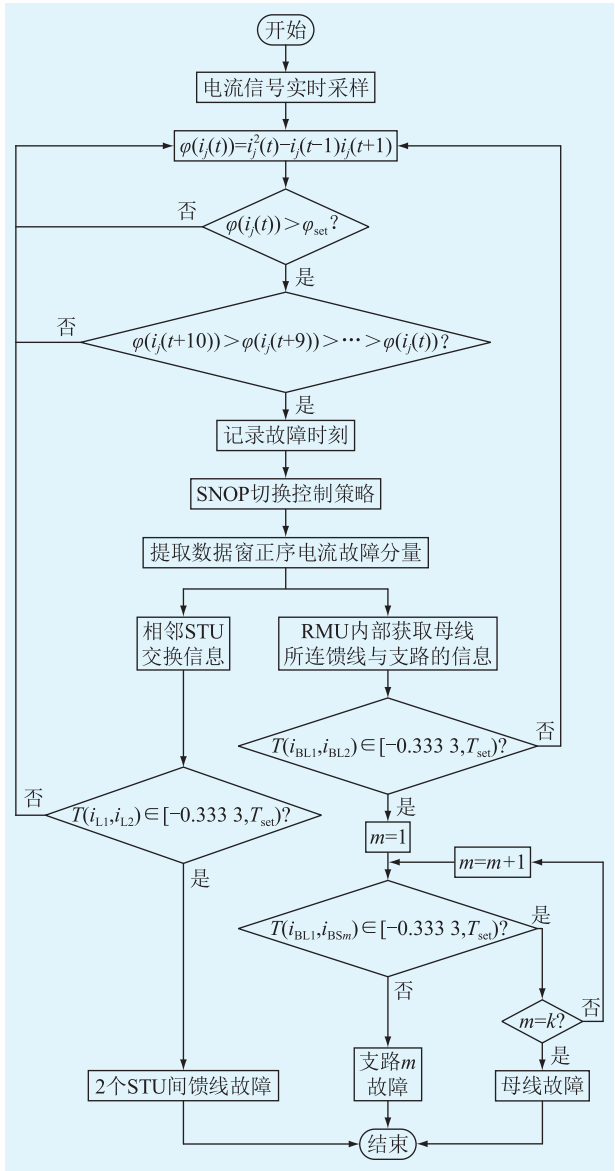


图 4 故障区段定位流程

Fig.4 Fault section location flow chart

具体的流程为：

(1) 当任意处的某相电流满足故障定位启动判据时, 标记故障发生时刻, 同时终端向 SNOP 发出切换控制策略的信号；

(2) 提取电流正序分量, 送至相邻 STU；

(3) 计算馈线两侧数据的  $T$  系数, 根据式 (7) 判断故障是否位于馈线上, 若为区内故障, 则完成故障定位, 若为区外故障, 则进一步判断故障是否位于母线或支路上；

(4) 计算母线两侧馈线数据的  $T$  系数, 并根据式 (8) 判断故障是否位于母线或支路上, 若  $T(i_{\text{BL1}}, i_{\text{BL2}}) = 1$ , 则故障位于母线或支路上, 进行下一步判断；

(5) 计算各支路与母线网侧馈线数据的  $T$  系数, 根据式 (11) 和式 (12) 判断故障所在母线或支路。

3 仿真分析

文中通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建图 1 所示 10 kV 的 FDN 模型。

3.1 参数设置

正常运行时 SNOP 从 VSC2 向 VSC1 输入有功功率 120 kW, 输出无功功率为 0。各支路负荷功率如表 1 所示。

表 1 负荷功率设置  
Table 1 Load power settings

| 支路 | 有功功率/<br>kW | 无功功率/<br>kvar | 支路  | 有功功率/<br>kW | 无功功率/<br>kvar |
|----|-------------|---------------|-----|-------------|---------------|
| S1 | 100         | 20            | S7  | 100         | 100           |
| S2 | 100         | 50            | S8  | 100         | 30            |
| S3 | 120         | 40            | S9  | 120         | 90            |
| S4 | 100         | 80            | S10 | 100         | 50            |
| S5 | 150         | 40            | S11 | 80          | 20            |
| S6 | 100         | 40            | S12 | 100         | 100           |

配电线路具体的参数如表 2 所示。

表 2 配电线路参数  
Table 2 Distribution line parameters

| 序分量  | 单位长度电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 单位长度电感/<br>( $\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 单位长度电容/<br>( $\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$ ) |
|------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 正/负序 | 0.17                                         | 1.21                                            | 0.009 7                                           |
| 零序   | 0.23                                         | 5.48                                            | 0.006 0                                           |

SNOP 系统的各项参数如表 3 所示。

3.2 仿真结果分析

仿真设置采样频率为 4 kHz, 0.2 s 时发生三相短路, 考虑故障后 SNOP 的响应时间及通信延迟等因素, 对故障时刻后 0.02~0.06 s 的 2 个周期电流正序分量进行分析计算, 仿真结果如下。

3.2.1 故障启动电流

故障发生后, 网侧电流突变量大, 一般由网侧电

表 3 SNOP 参数  
Table 3 SNOP parameters

| 参数                | 数值                          |
|-------------------|-----------------------------|
| 换流器滤波电感/mH        | 0.5                         |
| 换流器等效电阻/ $\Omega$ | 0.05                        |
| 直流电容/mF           | 10                          |
| 直流电容电压/kV         | 20                          |
| 电流内环 PI 参数        | $K_p = 100, K_i = 0.000\ 2$ |
| 直流电压外环 PI 参数      | $K_p = 2, K_i = 500$        |
| 无功功率外环 PI 参数      | $K_p = 0.04, K_i = 500$     |

注:  $K_p$  为比例参数;  $K_i$  为积分参数。

流引发故障定位启动,发生三相短路时网侧 a 相电流的 TEO 波形如图 5 所示。

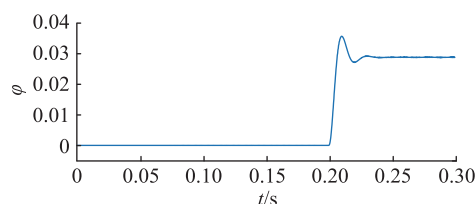


图 5 三相短路时网侧 a 相电流的 TEO 波形

Fig.5 TEO waveform of a-phase current at the network side during three-phase short circuit

由图 5 可知,故障发生时刻网侧相电流的 TEO 值发生突变,且存在突变后递增过程,满足故障定位启动判据,故障定位启动后 SNOP 进行相应的控制策略切换。

### 3.2.2 馈线故障

当馈线发生故障时,不同位置的电流正序分量波形如图 6 所示。

由图 6(a)可知,馈线故障区段两侧电流正序分量具有幅值差及相位差,但 2 个周期的正弦波形幅值变化不明显,所以暂态分量相比稳态分量幅值小,对波形影响较小,计算得  $T = 0.008\ 7 < T_{set}$ ,满足交流馈线区内故障判据;由图 6(b)、(c)可知,非故障区段两侧电流重合,  $T = 1.000\ 0 > T_{set}$ ,满足区外故障判据,与 2.4 节分析一致。

### 3.2.3 母线或支路故障

当母线或所连支路发生故障时,母线两侧馈线的电流正序分量波形如图 7 所示。

由图 7 可知,母线或支路故障时,母线两侧电流正序分量具有幅值差及相位差,计算得两电流的  $T = 0.005\ 8 < T_{set}$ ,说明故障位于母线或其所连支路,应作进一步判断。

(1) 母线故障。故障母线所连支路与网侧馈线的电流正序分量波形如图 8 所示。

由图 8(a)、(b)可知,各支路电流正序分量均为 0,与故障母线所连网侧交流馈线的电流正序分

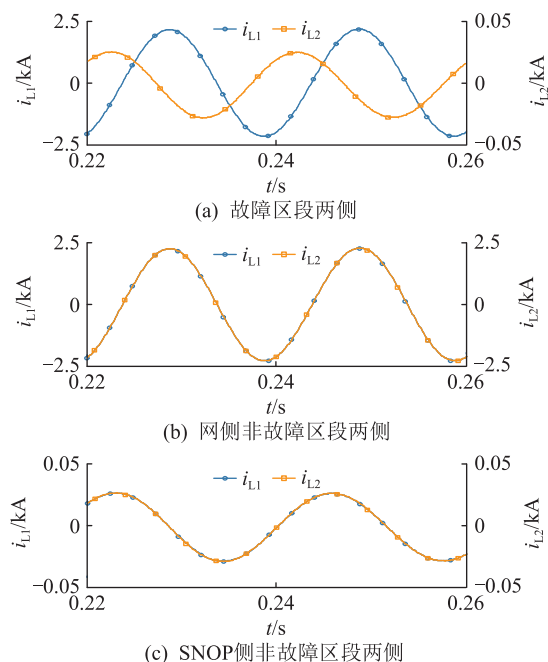


图 6 馈线故障时不同位置电流正序分量波形

Fig.6 Positive sequence current component waveforms at different positions when feeder fault

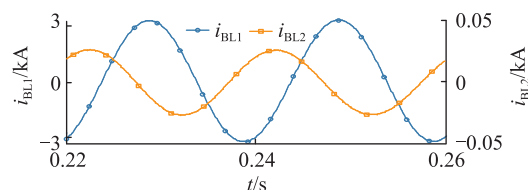


图 7 母线两侧馈线电流正序分量波形

Fig.7 Positive sequence current component waveforms of feeders on both sides of the bus

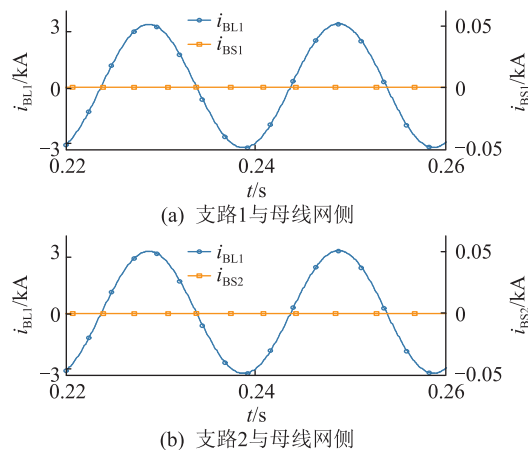


图 8 母线故障时母线所连支路与网侧馈线电流正序分量波形

Fig.8 Positive sequence current component waveforms of the branches connected to the bus and network side feeder when the bus is faulty

量形成明显波形差异。两支路与网侧馈线的电流正序分量  $T = 0 < T_{set}$ ,说明故障位于该母线,与 2.4 节分析一致。

(2) 支路故障。假设故障发生于支路 1,各支路及其所连母线网侧馈线的电流正序分量波形如图 9 所示。

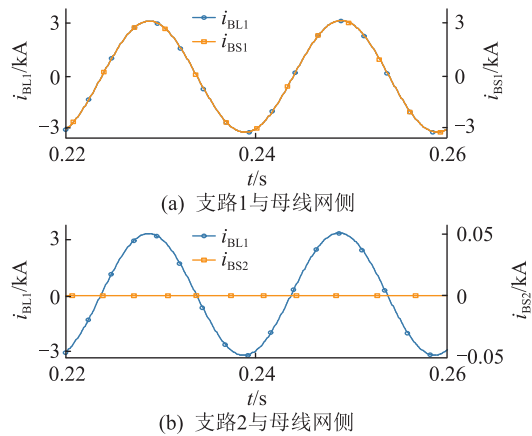


图 9 支路故障时母线所连支路与网侧  
馈线电流正序分量波形

Fig.9 Positive sequence current component waveforms  
of the branches connected to the bus and network  
side feeder when the branch is faulty

由图 9 可知,故障支路 1 与母线网侧馈线电流正序分量特征一致, $T=0.999\ 9>T_{\text{set}}$ ;非故障支路 2 电流正序分量基本为 0,与母线网侧电流正序分量的  $T=0<T_{\text{set}}$ ,说明故障位于支路 1,与 2.4 节分析一致。

3.2.4 非故障侧馈线仿真结果

当故障侧馈线三相短路时,非故障侧取某一段线路两端的电流正序分量波形如图 10 所示。

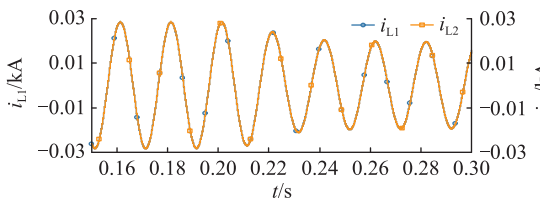


图 10 非故障侧馈线线路两侧电流正序分量波形

Fig.10 Positive sequence current component waveforms  
on both sides of the non-fault feeder

由图 10 可知,SNOP 非故障侧电流存在指数衰减的工频暂态分量,线路各区段两端电流正序分量特征一致, $T=1.000\ 0>T_{\text{set}}$ ,未发生误判。

3.3 影响因素分析

在仿真中分别设置不同采样频率和过渡电阻,验证不同位置发生不同类型的故障时的故障定位情况,结果如表 4 和表 5 所示。文中使用光纤复合架空地线(optical power grounded wire,OPGW)通信网络传输数据,延时为 204 km/ms,所以配电线路在 20 km 以内时,通信延迟约为 0.1 ms<sup>[34]</sup>,存在通信延迟时故障定位结果见表 6。表 6 中,故障位置在馈线上时,每个故障情况下的  $T$  系数代表故障点两侧

的电流相似性;故障位置在母线和支路 1 时,每个故障情况下的  $T$  系数分别代表故障区段两侧馈线、支路 1 和网侧馈线、支路 2 和网侧馈线的电流相似性。

表 4 不同采样频率的仿真结果  
Table 4 Simulation results of different  
sampling frequencies

| 故障位置 | 短路类型 | 采样频率/kHz | $T$ 系数                   | 故障区间 |
|------|------|----------|--------------------------|------|
| 馈线   | 三相   | 1.0      | 0.004 6                  | 区内   |
|      |      | 2.4      | 0.004 7                  | 区内   |
|      |      | 4.0      | 0.008 7                  | 区内   |
|      | 两相   | 1.0      | -0.002 3                 | 区内   |
|      |      | 2.4      | -0.002 2                 | 区内   |
|      |      | 4.0      | -0.002 7                 | 区内   |
| 母线   | 三相   | 1.0      | 0.003 1、0、0              | 区内   |
|      |      | 2.4      | 0.003 2、0、0              | 区内   |
|      |      | 4.0      | 0.005 8、0、0              | 区内   |
|      | 两相   | 1.0      | -0.001 5、0.002 1、0.002 8 | 区内   |
|      |      | 2.4      | -0.001 5、0.002 1、0.002 8 | 区内   |
|      |      | 4.0      | -0.001 8、0.002 1、0.002 8 | 区内   |
| 支路 1 | 三相   | 1.0      | 0.002 3、0.999 9、0        | 区内   |
|      |      | 2.4      | 0.002 4、0.999 9、0        | 区内   |
|      |      | 4.0      | 0.004 8、0.999 9、0        | 区内   |
|      | 两相   | 1.0      | -0.001 5、1.000 0、0.002 8 | 区内   |
|      |      | 2.4      | -0.001 5、1.000 0、0.002 8 | 区内   |
|      |      | 4.0      | -0.001 8、1.000 0、0.002 8 | 区内   |

表 5 不同过渡电阻的仿真结果  
Table 5 Simulation results of different  
transition resistors

| 故障位置 | 短路类型 | 过渡电阻/ $\Omega$ | $T$ 系数                   | 故障区间 |
|------|------|----------------|--------------------------|------|
| 馈线   | 三相   | 0              | 0.008 7                  | 区内   |
|      |      | 10             | 0.004 8                  | 区内   |
|      |      | 30             | 0.017 7                  | 区内   |
|      | 两相   | 0              | -0.002 7                 | 区内   |
|      |      | 10             | 0.020 4                  | 区内   |
|      |      | 30             | 0.060 1                  | 区内   |
| 母线   | 三相   | 0              | 0.005 8、0、0              | 区内   |
|      |      | 10             | 0.005 3、0.004 0、0.003 3  | 区内   |
|      |      | 30             | 0.017 7、0.011 7、0.009 8  | 区内   |
|      | 两相   | 0              | -0.001 8、0.002 1、0.002 8 | 区内   |
|      |      | 10             | 0.019 5、0.013 7、0.012 5  | 区内   |
|      |      | 30             | 0.055 3、0.035 2、0.030 8  | 区内   |
| 支路 1 | 三相   | 0              | 0.004 8、0.999 9、0        | 区内   |
|      |      | 10             | 0.005 4、0.999 9、0.003 3  | 区内   |
|      |      | 30             | 0.017 8、0.999 2、0.009 9  | 区内   |
|      | 两相   | 0              | -0.001 8、1.000 0、0.002 8 | 区内   |
|      |      | 10             | 0.019 6、0.999 0、0.012 5  | 区内   |
|      |      | 30             | 0.055 3、0.991 8、0.030 8  | 区内   |

表 6 存在通信延迟时的仿真结果

Table 6 Simulation results with communication delay

| 故障位置 | 短路类型 | $T$ 系数                   | 故障区间 |
|------|------|--------------------------|------|
| 馈线   | 三相   | 0.008 7                  | 区内   |
|      | 两相   | -0.002 7                 | 区内   |
| 母线   | 三相   | 0.005 9、0、0              | 区内   |
|      | 两相   | -0.001 7、0.002 2、0.002 9 | 区内   |
| 支路 1 | 三相   | 0.004 8、0.999 9、0        | 区内   |
|      | 两相   | -0.001 7、0.998 7、0.002 9 | 区内   |

由表 4 可知,在不同位置发生不同类型的短路故障下,降低采样频率不会影响故障定位结果,因此 1 kHz 的采样频率足以满足  $T$  系数计算精度,但由于启动判据需要数十个数据,取采样频率 4 kHz 以满足故障定位启动的快速性。

由表 5 可知,在不同位置发生不同类型的短路故障下,过渡电阻的升高不会对  $T$  系数造成明显影响,这是由于过渡电阻未对幅值差造成明显影响。当过渡电阻高达 1 000  $\Omega$  时,故障区段两侧电流正序分量波形如图 11 所示。

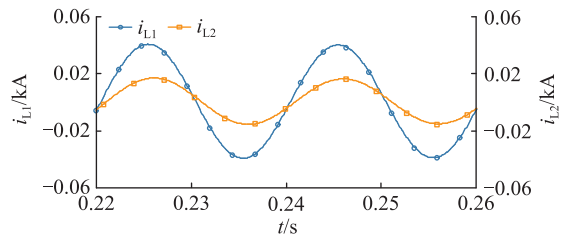


图 11 1 000  $\Omega$  过渡电阻下线路两侧电流正序分量波形  
Fig.11 Positive sequence current component waveforms on both sides of the line at 1 000  $\Omega$  transition resistance

由图 11 可知,1 000  $\Omega$  过渡电阻下,网侧电流正序分量的幅值相比于图 6(a)明显降低,两侧幅值差和相位差均减小,此时  $T$  系数为 0.521 9,仍满足区内故障判据,可知该方法具有良好的抗过渡电阻的能力。

由表 6 可知,0.1 ms 通信延迟对  $T$  系数无明显影响,该方法仍能够正确进行故障定位。

3.4 与其他方法的对比

柔性直流线路<sup>[26,35]</sup>、交直流混联电网<sup>[25]</sup>以及含有逆变型电源的电网<sup>[36]</sup>的保护常利用电流波形相似性原理,将以上含有换流装置的拓扑模型所用方法与文中方法进行对比。

3.4.1 原理分析

除  $T$  系数外,常用余弦相似度<sup>[26,36]</sup>和 Pearson 相关系数<sup>[25,35]</sup>衡量波形相似度。余弦相似度和 Pearson 相关系数均能够反映 2 个波形之间变化趋势的差异,且前者无需均值算子,能够更灵敏地反

映故障初期 2 个数据向量的相对角度变化<sup>[36]</sup>。 $T$  系数在反映 2 个向量变化趋势的同时,还能够反映幅值差异,SNOP 的弱馈特性是区分故障点两侧波形的重要特性,利用  $T$  系数能够更加全面地反映 2 个向量的差异。

3.4.2 性能分析

过渡电阻为 0 时,故障点两侧的电流正序分量呈反相特性,过渡电阻的增大使得电流相位发生偏移。利用余弦相似度和 Pearson 相关系数反映波形变化趋势的相似性,容易受到过渡电阻的影响而发生误动; $T$  系数由于包含波形幅值大小的相似性,故障点两侧幅值差异使得  $T$  系数仍处于较低值,不影响  $T$  系数进行故障定位,大大增加了抗过渡电阻的能力。以交流馈线发生三相短路为例,对不同过渡电阻的 3 种相关系数进行仿真分析,结果如表 7 所示。

表 7 不同过渡电阻的相关系数仿真结果

Table 7 Simulation results of correlation coefficients of different transition resistors

| 过渡电阻/ $\Omega$ | 余弦相似度   | Pearson 相关系数 | $T$ 系数  |
|----------------|---------|--------------|---------|
| 0              | 0.682 3 | 0.686 1      | 0.008 7 |
| 10             | 0.819 3 | 0.819 3      | 0.004 8 |
| 30             | 0.999 7 | 0.999 8      | 0.017 7 |

由表 7 可知,当过渡电阻为 0 时,3 种系数均能够反映故障点两侧的故障特征,随着过渡电阻的增大,余弦相似度和 Pearson 相关系数明显增大,而  $T$  系数的变化不影响故障的判别。

3.4.3 定位功能

文献[25-26,36]均利用故障点两侧波形变化趋势相反作为故障判据,由此进行区内外故障判断,仅对保护范围的整体进行故障判断,文中方法能够对馈线故障、母线故障、支路故障进行区段定位,切除故障区域,从而缩小停电范围,更适用于结构复杂、分支较多的配电网。

4 结论

文中提出了一种基于电流波形相似性的 FDN 短路故障区段定位方法,得到结论如下:

(1) FDN 的短路故障暂态过程中,故障点两侧电流分别由电网和 SNOP 提供指数衰减的直流暂态分量和指数衰减的工频正弦暂态分量,且两侧电流稳态分量具有幅值差及相位差。

(2) 该方法以故障点两侧电流正序分量特征不一致为 FDN 短路故障区段定位判据,在 FDN 不同位置发生不同类型的短路故障时能够实现快速准

确的定位,同时具有良好的采样频率、抗过渡电阻及通信延迟影响的能力。

文中方法针对典型 FDN 的交流线路短路故障进行区段定位,不包括 SNOP 内部故障及单相接地故障的定位,对结构与场景更加复杂的 FDN 故障定位方法还须进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 宋毅,孙充勃,李鹏,等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4390-4398.  
SONG Yi,SUN Chongbo,LI Peng,et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(15):4390-4398.

[2] 王一清,沙倩,刘秋林. 区域综合能源系统接入的配电网扩展规划研究[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(6):198-205.  
WANG Yiqing,SHA Qian,LIU Qiulin. Research on distribution network expansion planning for regional integrated energy system access[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(6):198-205.

[3] 季玉琦,王涛,史少彧,等. 含分布式电源的配电网功率优化模式影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(1):97-107.  
JI Yuqi,WANG Tao,SHI Shaoyu,et al. Analysis of influencing factors of power optimization modes in distribution network containing distributed generations. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(1):97-107.

[4] 刘洪,李其哲,徐晶,等. 网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(16):181-191.  
LIU Hong,LI Qizhe,XU Jing,et al. Networking morphology, key feature and research prospect of mesh-type medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(16):181-191.

[5] 马继洋,蔡永翔,唐巍,等. 考虑电动汽车参与韧性提升的配电网状态平滑切换控制策略[J]. 电力建设,2024,45(5):29-36.  
MA Jiyang,CAI Yongxiang,TANG Wei,et al. Enhancing distribution network resilience:electric vehicle integration in seamless state switching strategy[J]. Electric Power Construction,2024,45(5):29-36.

[6] 侯祖锋,王超,徐春华,等. 考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(3):78-85.  
HOU Zufeng,WANG Chao,XU Chunhua,et al. Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(3):78-85.

[7] 李岩,陈夏,李巍巍,等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(13):4749-4759.  
LI Yan,CHEN Xia,LI Weiwei,et al. Research on intercon-

nection structure and control technology of flexible distribution network based on soft open point in parallel with interconnection switch[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(13):4749-4759.

[8] 张振强,王宏波,赵阳,等. 考虑灵活性的交直流混联配电网分布鲁棒优化运行[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(2):64-73.  
ZHANG Zhenqiang,WANG Hongbo,ZHAO Yang,et al. Distributionally robust optimal operation of AC/DC hybrid distribution network considering flexibility evaluation index[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(2):64-73.

[9] 齐韵英,许潇,殷科,等. 基于深度强化学习的含储能有源配电网电压联合调控技术[J]. 电力建设,2023,44(11):64-74.  
QI Yunying,XU Xiao,YIN Ke,et al. Voltage co-regulation technology of active distribution network with energy storage based on deep reinforcement learning[J]. Electric Power Construction,2023,44(11):64-74.

[10] 唐溢,李保宏,曾蕊,等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析[J]. 电力工程技术,2022,41(1):40-47.  
TANG Yi,LI Baohong,ZENG Rui,et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(1):40-47.

[11] 赖逸洋,王增平,王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):145-154.  
LAI Yiyang,WANG Zengping,WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control,2023,51(3):145-154.

[12] NDREKO M,POPOV M,VAN DER MEER A A,et al. The effect of the offshore VSC-HVDC connected wind power plants on the unbalanced faulted behavior of AC transmission systems [C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Leuven,Belgium. IEEE,2016:1-6.

[13] GE B C,WU X,HUANG L C,et al. Characteristic research of commutation failure for hybrid AC/DC system[C]//2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Chengdu. IEEE,2017:56-60.

[14] DONG C Y,KOH L H,JIA H J,et al. Arc analysis for the interlinking AC/DC buses in hybrid AC/DC building microgrids [C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES). Hamilton, New Zealand. IEEE,2018:333-338.

[15] AITHAL A,LI G,WU J Z. Grid side unbalanced fault detection using soft open point in an electrical distribution network[J]. Energy Procedia,2017,105:2859-2864.

[16] XU F,HUANG X M,LU Y,et al. AC fault ride-through strategy of a transformer less soft normally open point[J]. Applied Sciences,2022,12(13):6773.

[17] 祝旭焕. 计及柔性多状态开关接入的主动配电网经济规划及负荷转供策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.  
ZHU Xuhuan. Study on economic scheduling and load transfer

- strategy of active distribution network with flexible multi-state switch [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [18] 解智刚, 韩蓓, 李国杰. 含 SOP 的配电网多阶段供电恢复优化策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 113-119.
- XIE Zhigang, HAN Bei, LI Guojie. Multi-stage power supply restoration optimization strategy for distribution network with SOP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 113-119.
- [19] 孙东, 仇志华, 赵倩鹏, 等. 基于配网自动化的电缆配电环网短路故障定位与隔离方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 21-27.
- SUN Dong, ZHANG Zhihua, ZHAO Qianpeng, et al. Distribution automation based short-circuit fault location and isolation method for closed-loop distribution network with underground cable[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(10): 21-27.
- [20] 黄昱翰, 蔡泽祥, 潘天亮, 等. 面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 47-52.
- HUANG Yuhang, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 47-52.
- [21] 匡晓云, 方煜, 关红兵, 等. 适用于含新能源逆变电源网络的全时域短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 113-120.
- KUANG Xiaoyun, FANG Yu, GUAN Hongbing, et al. Full-time domain short circuit current calculation method suitable for power network with inverter-interfaced renewable energy source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 113-120.
- [22] 贾科, 杨彬, 刘浅, 等. 基于逆变型电源暂态电流回代的系统级故障暂态解析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 113-120.
- JIA Ke, YANG Bin, LIU Qian, et al. Transient analysis of system-level fault based on transient current back-substitution of inverter interfaced generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 113-120.
- [23] 徐可寒, 张哲, 刘慧媛, 等. 光伏电源故障特性研究及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 359-371.
- XU Kehan, ZHANG Zhe, LIU Huiyuan, et al. Study on fault characteristics and its related impact factors of photovoltaic generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 359-371.
- [24] 杨子荷, 李永丽, 宋金钊, 等. 直流馈入下交流系统故障特性分析及故障分量电流差动保护改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 3-10.
- YANG Zihang, LI Yongli, SONG Jinzhao, et al. Fault characteristics analysis and fault component current differential protection improvement of AC system with infeed DC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 3-10.
- [25] 张弘喆. 基于电压波形相似性比较的交直流混联电网纵联保护方法[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- ZHANG Hongzhe. Longitudinal protection method for AC/DC hybrid system based on voltage wave similarity comparison [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [26] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于电流故障分量的柔直配电网线路纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1684-1695.
- DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1695.
- [27] 杨欢, 蔡云旖, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165.
- YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [28] 孙勇, 张健文, 周剑桥, 等. 适用于交直流混联配电网的多端口柔性互联开关[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5151-5162.
- SUN Yong, ZHANG Jianwen, ZHOU Jianqiao, et al. A novel multiport flexible interconnection switch for AC/DC hybrid distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5151-5162.
- [29] 王晨晨, 陈谦, 邓晓璐, 等. 逆变器电源短路输出电流的等效机理模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3): 20-27, 36.
- WANG Chensheng, CHEN Qian, DENG Xiaolu, et al. Equivalent mechanism model for short-circuit output current of inverter power supply[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 34(3): 20-27, 36.
- [30] 方煜. 含逆变电源的新能源电力系统故障特性分析与计算研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- FANG Yu. Analysis and calculation of fault characteristics of power system with inverter-interfaced renewable power sources [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [31] 贾科, 杨彬, 毕天姝, 等. 适用背靠背 VSC 故障暂态计算的两端口等效建模方法: CN112994072B[P]. 2022.08.19.
- JIA Ke, YANG Bin, BI Tianshu, et al. A two-port equivalent modeling method for the fault transient calculation of back-to-back VSC: CN112994072B[P]. 2022.08.19.
- [32] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析-上册[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- HE Yangzan, WEN Zengyin. Power system analysis: volume 1 [M]. 3rd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [33] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system protective relaying [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [34] PETINO C, HEIDEMANN M, EICHHOFF D, et al. Application

of multilevel full bridge converters in HVDC multiterminal systems[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2):297-304.

- [35] 王晨清,陈实,齐贝贝,等. 基于波形相关性的直流配电网主动式接地故障选线[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 1-10.

WANG Chenqing, CHEN Shi, QI Beibei, et al. An active grounding fault line selection method for DC distribution network based on waveform correlation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3):1-10.

- [36] 贾科,郑黎明,毕天姝,等. 基于余弦相似度的风电场送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6263-6274.

JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection

based on cosine similarity for transmission line connected to wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6263-6274.

作者简介:



陈继明

陈继明(1970),男,博士,副教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: jimingchen@126.com);

陈文淙(1998),女,硕士在读,研究方向为新型电力系统故障定位与保护;

仇志华(1977),男,博士,教授,研究方向为有源配电网保护与控制技术。

## Short-circuit fault location method of flexible interconnected distribution network based on waveform similarity

CHEN Jiming, CHEN Wencong, ZHANG Zhihua, YU Xinwei, XU Qian

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

**Abstract:** Because of the complex control strategy and weak feed characteristics of soft normal open points (SNOP), traditional fault location methods of distribution networks are no longer applicable to flexible distribution network (FDN). A method for fault location in FDN using waveform similarity of positive-sequence current component is proposed. Firstly, considering the typical control strategy of SNOP, the short-circuit fault characteristics of FDN are analyzed. Secondly, Tanimoto coefficients of positive sequence current component at different locations are calculated. By comparing the waveform similarity at different locations of positive sequence current component, a short circuit fault location criterion for FDN is constructed. The Teager energy operator (TEO) is used to accurately calibrate the fault time, and smart terminal units (STU) are used to transmit information. Finally, the proposed method is analyzed and verified through modeling and simulation. The results show that the proposed method can accurately locate the fault section, and has the ability to resist the influence factors such as fault location, fault type, transition resistance, sampling frequency and communication delay, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** flexible distribution network (FDN); soft normal open point (SNOP); fault analysis; waveform similarity; fault location; positive sequence current component

(编辑 吴昊)