

[电网]

基于暂态零模功率的小电流接地故障定位方法研究

文/大庆油田有限责任公司第一采油厂电力维修大队 盖 峰

针对小电流接地系统（NUGS）发生单相接地时，故障区段两侧的暂态零模功率初始极性相反、波形差异大，非故障区段两侧的暂态零模功率初始极性相同、波形差异小这一特征，对现有基于暂态零模功率相似性的定位方法进行了实用化改进，提出了相关系数阈值的自适应确定方法。大量的ATP-EMTP仿真表明，该故障定位方法准确可靠，具有不受电压初相角、接地电阻和中性点接地方式的影响等优点。

我国的中压配电网线路大部分是架空线，其故障80%以上来源于单相对地短路故障。发生故障时电网线电压不变且对称，不影响用户用电；非故障相的对地电压将升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍。特殊情况下，接地电容电流可能引起故障点飞越，产生瞬时过电压，导致绝缘击穿，可进一步扩大为2相甚至3相短路，大大降低配电网的安全性。

国内外专家经多年研究，已提出的小电流接地故障定位方法按照所利用信号的不同，主要分为两大类，分别为主动式法和被动式法，其中被动式法为主要研究方法，它包含阻抗法、行波法和稳态零序无功功率方向法等。几年来也有学者尝试将数学分析工具用于小电流接地故障定位，如小波变换、数学形态学等。但由于发生接地故障时的故障电流微弱、电弧不稳定和采用方法的局限性、缺乏理论性依据，小电流接地故障定位一直未能得到有效解决。

利用暂态零模功率特征信号，基于暂态零模功率，利用相关分析理论对相关系数及阈值进行改进，消除了由于馈线终端装置（FTU）数据采

集不同步所引起的计算误差，解决了现场应用的关键技术问题。仿真试验，证明了该方法是小电流接地故障定位的一种可行方法。

暂态零模功率特征分析

对于三相系统，由于各相线路之间存在电磁耦合及互感和分布电容的影响，需要采用卡伦鲍厄（Karrenbaur）变换将三相系统变化为没有耦合的模域，再计算零模功率。小电流系统发生接地故障时，系统将会产生暂态零模电压与电流，在故障点将产生一个虚拟的电压源，如图1所示。在此电压源的作用下，故障点至母线端的暂态零模功率流向由N至M，大小为其他健全线路暂态零模功率之和，信号幅值大，谐振频率低；故障点至负荷端的暂态零模功率流向由P至Q，信号幅值小，谐振频率高。另外故障点同侧相邻2检测点的功率幅值大小差异不大、初始极性相同，即相似程度高；而故障点两侧的2检测点的幅值大小差异较大、初始极性相反，即相似程度低。故障线路相邻2检测点暂态零模功率波形，如图2所示，故障发生在区段内。

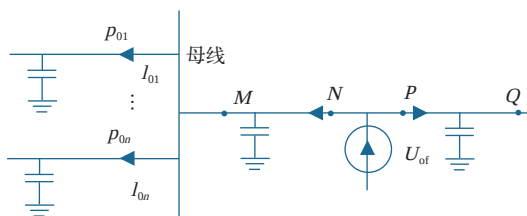


图1 小电流接地故障零模等效网络

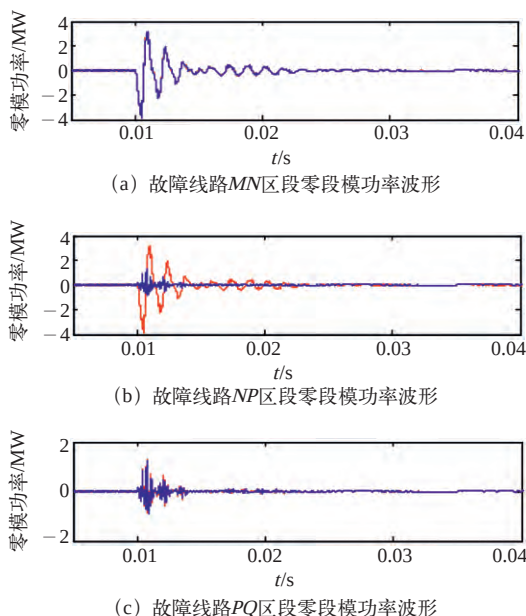


图2 非故障区段和故障区段两侧零模功率对比

相关分析理论

相关函数反映信号中每一频率分量的综合幅值以及相位关系，是描述随机信号之间相关关系密切程度的重要指标。设 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是2个能量有限信号，互相关函数定义为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau) dt \quad (1)$$

式(1)表示信号 $x(t)$ 与经时间 τ 位移后的另一信号 $y(t-\tau)$ 的相关程度。对于电力线路可以把暂态信号看做平稳随机信号，用单个观测到的时间历程记录信号的总体特征，并将相关函数离散化，则式(1)可改写为

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (2)$$

式(2)中， N 为时间序列的个数，又因 $|R_{xy}(\tau)| \leq \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=1}^{N-1} y^2(n)}$ ，则相关系数可归一化为

$$\rho = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)}} \quad (3)$$

式(3)中， ρ 为相关系数，且 $|\rho| \leq 1$ 。 ρ 可以准确反映2个信号的相似程度， ρ 越大表明2个信号的相似程度越高，对应的两个波形越相似。当 $\rho = 1$ 表明2个信号完全相似，即2个信号成正比关系且极性相同；当 $\rho = -1$ 时，表明2个信号成正比关系且极性相反。

暂态零模功率相关系数定位算法

1. 故障定位原始方案

由以上分析可知，发生小电流接地故障时，故障点同侧的两个相邻检测点暂态零模功率信号波形差异很小，相关系数 ρ 趋于1；故障点两侧的两个相邻检测点暂态零模功率信号波形差异较大，相关系数 ρ 较小。可将故障线路每两个相邻检测点的暂态零模功率信号作为样本信号，进行相关分析，得到的相关系数计算公式为

$$\rho = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} p_{01}(n)p_{02}(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} p_{01}^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} p_{02}^2(n)}} \quad (4)$$

式(4)中， $p_{01}(n)$ 、 $p_{02}(n)$ 为相邻两个检测点的零模功率； n 为采样序列，采样起始点 $n=0$ ，即故障发生时刻； $N-1$ 为功率的数据长度。相关系数的阈值 σ 一般取0.7或0.8，当 $|\rho| \leq \sigma$ 则判断该相邻两个检测点为故障区段，反之亦然。

根据式(4)暂态零模功率相关系数定位方案存在以下不足。

- 1) 提取的功率信号必须是同步的，然而各测量装置之间存在时间误差。
- 2) 相关系数判据不完善，未考虑相关系数为负值的情况，即当 ρ 为负且 $|\rho| \leq \sigma$ 时，区段发生接地故障，容易产生误判。
- 3) 忽略某些配电系统，故障点下游线路较长，故障点两侧暂态零模功率幅值和谐振频率差异较小的情况。

因此需要对暂态零模功率相关系数公式进行改进，其改进措施如下。

2. 信号的同步处理

采用波形平移法求取的最大相关系数法，可以有效避免因两个检测点故障起始时刻不同步引起的误差。其最大相关系数计算公式可改写为

$$\rho_{\max} = \max \frac{\sum_{n=0}^{N-1} p_{01}(n)p_{02}(n+n_0)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} p_{01}^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} p_{02}^2(n+n_0)}} \quad (5)$$

式(5)中, n_0 为信号平移时使相关系数最大的平移点数; f 为信号采样频率; Δt 为主站对时误差, 一般为1~3 ms; $n_0 \in [-f\Delta t, -f\Delta t+1, -f\Delta t+2, \dots, 0, 1, 2, \dots, f\Delta t]$ 。通过信号的双向移动计算相关系数最大值可以有效地解决由于采集暂态零模功率信号初始时刻不一致所引起的信号不同步问题。对于两个波形相似、起始时刻不同即接地点同侧的信号, 将其中一个检测点测得的暂态零模功率信号作为基准信号, 对另一个检测点所得的信号进行逐点平移, 同时求取不同平移点数的相关系数, 重叠性最好的波形对应的相关系数幅值最大, 起始时刻相差最小, 可以看做同步。对于两个波形相似性很低即故障点两端的信号, 通过波形的左右平移, 所得最大相关系数也依然很小, 仍然满足相关定位原理。

3. 对相关系数及阈值进行自适应改进

一个可靠有效的相关系数故障判据应当拉大故障区段与非故障区段判断量差距, 有效地降低相关系数。为了更准确地表达零模功率波形的相似性, 应当考虑两个故障检测点的零模功率幅值, 利用信号幅值对相关系数计算结果进行改进, 改进后表达式为

$$\sigma = \rho_{\max} - (1 - |\rho_{\max}|) \left\{ \min \left(\sum_{n=0}^{N-1} p_{01}^2, \sum_{n=0}^{N-1} p_{02}^2 \right) / \max \left(\sum_{n=0}^{N-1} p_{01}^2, \sum_{n=0}^{N-1} p_{02}^2 \right) \right\} \quad (6)$$

式(6)中, 对于故障点同侧的两个相邻检测点(一般 $\rho_{\max} > 0.9$), 其测量的零模功率的幅值差异很小, 因此在采样的时间序列内的幅值和差异不大; 对于故障点不同侧的两个相邻检测点(一般 $-1 \leq \rho_{\max} \leq 0.2$), 其测量的零模功率的幅值差异很大, 因此在采样的时间序列内的幅值和差异较大。经验证即使在故障点下游线路较长的配电系统中, 故障点两侧暂态零模功率幅值和谐振频

率差异较小的特殊情况下, 零模功率幅值的引入仍可以有效地降低相邻2检测点的相关系数。

对于阈值, 可根据故障线路各区段相关系数自适应进行设定, 为

$$\sigma_{th} = \sum \sigma_{on} / N \quad (7)$$

式(7)中, σ_{on} 为故障线路各区段的相关系数; N 为故障线路区段总数。若 $\sigma_{on} \geq \sigma_T$ 时判定该区段为健全区段, 反之为故障区段。相关系数阈值 σ_T 的取值依据 σ_{th} 设定, 规则如下。

- 1) 若 $\sigma_{th} < 0.2$ 时, 则 $\sigma_T = 0.2$ 。
- 2) 若 $0.2 \leq \sigma_{th} \leq 0.6$ 时, 则 $\sigma_T = \sigma_{th}$ 。
- 3) 若 $\sigma_{th} > 0.6$ 时, 则 $\sigma_T = 0.6$ 。

ATP仿真验证

为了验证以上方法的有效性, 利用ATP电磁暂态软件搭建小电流接地系统模型。仿真电路如图3所示, 线路总长113 km, 其中六条出线 $L_1 \sim L_6$ 长度分别为20 km、15 km、24 km、8 km、16 km、30 km。故障发生在线路3的10 km处, M 、 N 、 P 、 Q 四检测点装置分别安装于线路的8.5 km、9.5 km、10.5 km、11.5 km处。架空线路采用分布参数模型, 正序阻抗为 $Z_1 = 0.17 + j0.38 \Omega/\text{km}$, 正序对地导纳为 $b_1 = 3.04 \mu\text{s}/\text{km}$; 零序阻抗为 $Z_0 = 0.23 + j1.72 \Omega/\text{km}$, 零序对地导纳为 $b_0 = 1.884 \mu\text{s}/\text{km}$ 。 L_1 、 L_3 线路等效负荷阻抗为 $Z_L = 400 + j20 \Omega$ 。变压器为Y/Y₀形接线, 其额定容量为40 MV·A, 变压比为220/35 kV, 空载损耗为35.63 kW, 电感为0.183 Ω , 励磁电流为0.672 A, 励磁磁通为202.2 Wb, 磁路电阻为400 k Ω , 高压侧单相对中性点线圈电阻为0.4 Ω , 低压侧单相线圈电阻为0.006 Ω 。根据仿真模型计算系统电容电流得 $I_C \geq 20 \text{ A}$, 因此该系统应增设消弧线圈。

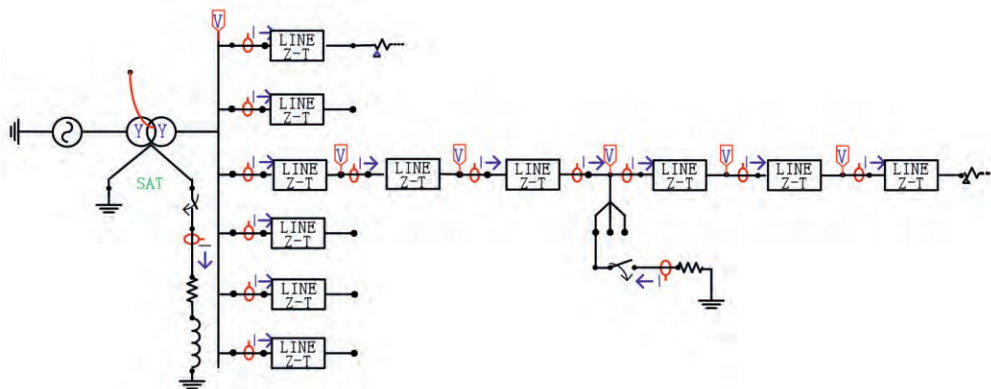


图3 小电流接地系统模型

仿真基本条件为: 故障初始相角0°, 故障接地点发生在NP区段内, 接地电阻为5 Ω , 失谐度8%,

同时设定仿真步长1 μs , 采样频率为1 000 kHz; 单相短路时间设为0.01 s, 仿真终止时间0.1 s。

消弧线圈系统单相接地后,可得到的各检测点数据,其中故障区段NP在30 ms内的暂态零模功率波形如图4所示。

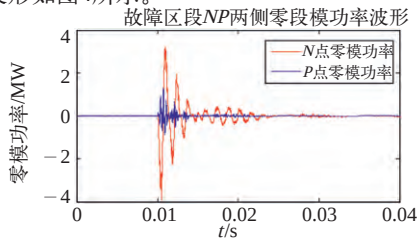


图4 故障区段暂态零模功率波形

各检测点数据经MATLAB数据处理,可计算出原始相关系数为 $\rho_{mn}=0.999\ 0$ 、 $\rho_{np}=-0.108\ 3$ 、 $\rho_{pq}=0.942\ 5$,经修正后的相关系数为 $\sigma_{mn}=0.998\ 0$ 、 $\sigma_{np}=-0.137\ 9$ 、 $\sigma_{pq}=0.895\ 1$,阈值为 $\sigma_T=0.585\ 1$,因此判定故障区段为NP区段,定位结果正确。

现给出电压初相角在 0° 、 30° 、 60° 、 90° 时,不同过渡电阻值时,计算修正前后的相关系数,结果见表1~表4。

表1 初相角 0° 时暂态零模功率相关系数

接地电阻/ Ω	ρ_{mn}	ρ_{np}	ρ_{pq}	σ_{mn}	σ_{np}	σ_{pq}	σ_T	修正前后定位结果
5	0.999 0	-0.108 3	0.942 5	0.998 0	-0.137 9	0.895 1	0.585 1	NP/NP
20	0.998 5	-0.059 6	0.930 1	0.997 6	-0.109 3	0.825 4	0.571 2	NP/NP
100	0.997 2	0.096 5	0.928 6	0.995 8	-0.009 2	0.825 0	0.600 0	NP/NP
500	0.996 9	0.183 4	0.942 7	0.992 4	0.013 5	0.898 6	0.600 0	NP/NP
2 000	0.998 4	0.445 8	0.946 6	0.986 8	0.229 1	0.898 4	0.600 0	NP/NP
5 000	0.998 7	0.525 9	0.946 5	0.986 3	0.376 4	0.899 5	0.600 0	NP/NP

表2 初相角 30° 时暂态零模功率相关系数

接地电阻/ Ω	ρ_{mn}	ρ_{np}	ρ_{pq}	σ_{mn}	σ_{np}	σ_{pq}	σ_T	修正前后定位结果
5	0.998 4	-0.308 5	0.977 1	0.997 6	-0.653 2	0.908 5	0.417 6	NP/NP
20	0.997 6	-0.168 8	0.972 4	0.996 4	-0.494 5	0.900 1	0.467 3	NP/NP
100	0.966 3	0.251 5	0.957 3	0.990 3	-0.196 4	0.890 3	0.561 3	NP/NP
500	0.890 5	0.304 0	0.949 7	0.993 7	0.013 2	0.905 4	0.600 0	NP/NP
2 000	0.922 8	0.694 8	0.984 6	0.892 3	0.455 6	0.978 9	0.600 0	NP/NP
5 000	0.926 1	0.725 0	0.986 2	0.898 2	0.506 9	0.974 5	0.600 0	误判/NP

表3 初相角 60° 时暂态零模功率相关系数

接地电阻/ Ω	ρ_{mn}	ρ_{np}	ρ_{pq}	σ_{mn}	σ_{np}	σ_{pq}	σ_T	修正前后定位结果
5	0.996 4	-0.748 2	0.965 0	0.995 2	-0.893 1	0.932 7	0.344 9	误判/NP
20	0.994 2	-0.551 4	0.960 2	0.995 8	-0.757 5	0.945 9	0.394 7	NP/NP
100	0.990 5	-0.093 5	0.959 8	0.953 2	-0.347 9	0.940 2	0.515 7	NP/NP
500	0.988 6	0.255 7	0.945 4	0.984 6	-0.202 6	0.933 1	0.571 7	NP/NP
2 000	0.990 9	0.792 4	0.978 5	0.984 5	0.462 7	0.966 0	0.600 0	误判/NP
5 000	0.992 7	0.808 5	0.978 2	0.985 4	0.505 6	0.966 7	0.600 0	误判/NP

表4 初相角 90° 时暂态零模功率相关系数

接地电阻/ Ω	ρ_{mn}	ρ_{np}	ρ_{pq}	σ_{mn}	σ_{np}	σ_{pq}	σ_T	修正前后定位结果
5	0.996 5	-0.809 8	0.960 6	0.987 4	-0.928 7	0.950 9	0.339 6	误判/NP
20	0.992 4	-0.759 6	0.958 8	0.995 8	-0.894 5	0.952 2	0.351 2	误判/NP
100	0.990 2	-0.586 5	0.956 5	0.980 3	-0.789 6	0.944 5	0.378 4	NP
500	0.975 1	-0.445 4	0.962 4	0.954 2	-0.638 5	0.980 6	0.452 8	NP
2 000	0.990 3	-0.395 7	0.995 7	0.925 5	-0.548 2	0.981 0	0.452 8	NP
5 000	0.991 7	-0.208 5	0.988 3	0.903 7	-0.395 4	0.980 1	0.496 1	NP

若将原始判据的阈值 σ 设为0.7,由表1~表4中的数据可以看出,在不同的中性点接地系统中,采用原始判据进行定位可能会发生误判,然而经过信号的同步化处理、相关系数及阈值的改进,对于不同电压初相角和过渡电阻的接地故障均可正确定位。

结束语

提出了一种基于自适应暂态零模功率相关分析的小电流接地故障定位新方法,该方法针对不

同系统对区段两检测点暂态零模功率的原始相关系数及阈值进行改进,用以故障区段。大量的仿真试验表明,该方法适用范围广,受系统结构和中性点接地方式的影响较小,借助DA系统定位判据能够根据不同的小电流接地系统进行快速有效的调整,在很大程度上提高了定位的正确率,为小电流接地故障定位研究及实际应用奠定了良好的基础。EA

(收稿日期:2015.11.15)

(编辑:刘群点)