

基于零序特征量的配电网接地故障区段定位方法

朱革兰¹,李松奕¹,兰金晨¹,曾德辉¹,刘胤良²

(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641;2. 南方电网科学研究院,广东 广州 510063)

摘要:针对现有配电网故障区段定位方法存在对不同接地故障的适应性不强、灵敏度低等问题,分析了谐振接地配电网在发生经不同过渡电阻接地故障时,故障点上、下游的零序电流和零序电压暂态分量的特征,得出了故障点上、下游零序电流在1个工频周期内的积分与零序电压差值的比值(零序特征量)存在较大差别的结论。基于这一结论提出一种能够适用于谐振接地配电网接地故障区段定位的方法。仿真结果表明所提故障区段定位方法在高阻接地故障、低阻接地故障和非线性弧光接地故障下都具有较好的可行性。

关键词:配电网;故障区段定位;谐振接地;零序特征量;配电自动化

中图分类号:TM 773

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012022

0 引言

目前,我国中低压配电网中性点广泛采用谐振接地方式,其在发生单相接地故障时故障电流小,瞬时性故障电弧能够自动熄灭,永久接地故障情况下允许系统短时间内带接地点运行,可避免突然断电^[1-2]。但是在发生接地故障时,间歇性电弧和故障电阻导致故障特征不容易被检测^[3],给故障发生时的故障区段定位带来了极大的困难。长时间的带接地点运行,可能会引发相间故障,扩大故障范围,导致大面积停电^[4-5]。因此发生故障后的准确故障定位可以减轻巡线负担,缩短故障修复时间,对于提高电力系统供电可靠性具有重要意义。

随着国内外专家对接地故障检测和故障定位技术研究的逐渐深入,提出了不同的配电网故障定位方法,如注入法、阻抗法和行波法等^[6-8],并结合配电网自动化馈线终端对故障区域进行定位。文献[9]分析了配电网接地故障暂态频谱特征,利用故障后上下游区段零序电流暂态重心频率差异进行故障区段定位,但存在着故障点下游重心频率选取困难的问题。文献[10]提出了基于馈线终端单元FTU(Feeder Terminal Unit)故障定位方法,将分层分区思想引入故障定位中,提高了故障定位的容错率,但未考虑负荷无功功率影响故障方向判定的情况。文献[11]利用各线路暂态零序电流在暂态零序电压上投影系数的极性关系确定故障线路,针对高阻接地故障具有较高的准确性,但不适用于低阻接地故障。文献[12]根据健全线路与故障线路下,零序电流与母线零序电压导数之间比例系数的不同进行故障选线,该方法在金属性接地故障、高阻接地故障、

电弧放电等不同的故障条件下都可以准确选线,适应性较强。但该判据需要用到拟合算法,计算较为复杂,并且存在拟合失败的可能。

现有的谐振接地配电网的故障区段定位方法存在对采样频率要求高、计算数据量大和对不同过渡电阻接地故障的适用性等问题。本文分析欠阻尼状态和过阻尼状态下单相接地故障的并联谐振过程,利用1个工频周期内零序电流积分与零序电压差值之比消去工频周期分量,通过比较故障点上、下游零序衰减分量的不同判断故障点的上、下游。基于此,提出一种将该比值作为零序特征量来判别故障上、下游区段的故障区段定位方法。所提方法在不同故障情况下都能够准确定位故障区段,适应性较强,并且具有计算量小、故障上/下游零序特征量的量级差别较大、灵敏度高的优点。最后使用PSCAD和MATLAB对本文理论分析和所提故障区段定位方法进行验证。

1 单相接地故障暂态过程分析

图1为中性点经消弧线圈接地配电网在馈线某点发生单相接地故障时的零序等值电路。图中, L_c 为消弧线圈等值电感; i_{L_c} 为流经消弧线圈的对地电感电流; C_s 为母线和健全线路的等值对地电容之和, i_{C_s} 为流经 C_s 的对地电容电流; $C_1 \sim C_m$ 分别为第1~ m 段线路的等值对地电容, $i_{C_1} \sim i_{C_m}$ 为对应的对地电容电流; u_0 为故障点零序电压; R_f 为过渡电

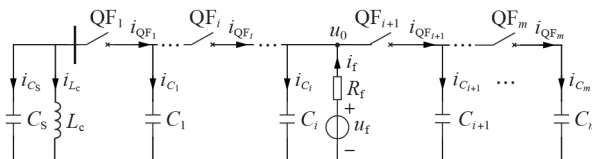


图1 谐振接地系统的故障等值电路

Fig.1 Fault equivalent circuit of resonance grounding system

收稿日期:2020-03-09;修回日期:2020-11-02

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2018A030310354)

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2018A030310354)

阻; u_f 为故障点等值电势; i_f 为流经故障点的零序电流; $QF_1 \sim QF_m$ 分别为第1— m 个故障区段定位终端, $i_{QF_1} \sim i_{QF_m}$ 为流经终端 $QF_1 \sim QF_m$ 的零序电流。

由于配电网的线路长度一般不超过十几千米,当发生接地故障时,与消弧线圈本身阻抗相比,线路串联阻抗可忽略不计,即认为线路中各点的零序电压均等于 u_0 , 此时有:

$$\begin{cases} I_{QF_i} = -I_{L_c} - I_{C_\Sigma} - \sum_{k=1}^{i-1} I_{C_k} \\ I_{QF_{i+1}} = \sum_{k=i+1}^m I_{C_k} \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_{QF_i} 和 $I_{QF_{i+1}}$ 分别为故障点上游和下游故障区段定位终端所测量到的零序电流相量。对于故障点下游而言,由于下游的零序电流为电容电流,若忽略线路串联阻抗,则故障点下游第 k ($k=i+1, i+2, \dots, m$) 个终端的零序电流 $i_{QF_k}^{\text{down}} = \sum_{n=k}^m C_n \frac{du_0}{dt}$, 对该式两边求时间 t 到 $t+T_0$ 的积分可得:

$$\frac{\int_t^{t+T_0} i_{QF_k}^{\text{down}} dt}{u_0 \Big|_t^{t+T_0}} = \sum_{n=k}^m C_n = C_k \quad (2)$$

其中, C_k 的数量级为 10^{-6} , 可认为近似等于0, 且式(2)不受过渡电阻的影响; T_0 为1个工频周期, 即20 ms; “ $\Big|_t^{t+T_0}$ ”表示对 $t+T_0$ 、 t 对应的值作差。以式(2)所示的比值作为零序特征量, 可知故障点下游的零序特征量近似等于0。对于故障点上游而言, 由于受消弧线圈和过渡电阻的影响, 零序特征量与下游相比有较大不同。若故障点上游的零序特征量与下游差别较大, 则可以此为判据判断故障点上、下游。

由图1, 接地故障的暂态过程为 L_c 与系统总对地电容 C_Σ 之间的谐振过程, 则建立微分方程^[13]为:

$$\begin{cases} u_f(t) = R_f \left(L_c C_\Sigma \frac{d^2 i_{L_c}}{dt^2} + i_{L_c} \right) + L_c \frac{di_{L_c}}{dt} \\ u_f(t) = U_f \sin(\omega_0 t + \phi) \end{cases} \quad (3)$$

其中, u_f 和 ϕ 分别为故障点虚拟电源的幅值和相位, 可采用故障前故障相电压的幅值和相角代替; ω_0 为工频电角速度。式(3)为二阶线性非齐次方程, 其特征根 p_1 和 p_2 分别为:

$$\begin{cases} p_1 = -\frac{1}{2R_f C_\Sigma} - \sqrt{\left(\frac{1}{2R_f C_\Sigma} \right)^2 - \frac{1}{L_c C_\Sigma}} \\ p_2 = -\frac{1}{2R_f C_\Sigma} + \sqrt{\left(\frac{1}{2R_f C_\Sigma} \right)^2 - \frac{1}{L_c C_\Sigma}} \end{cases} \quad (4)$$

若 $R_f > \sqrt{L_c/C_\Sigma}/2$, 则谐振过程为欠阻尼状态;

若 $R_f < \sqrt{L_c/C_\Sigma}/2$, 则谐振过程为过阻尼状态。本文将讨论2种情况下故障点上、下游零序特征量的差别。

2 高阻接地故障下暂态零序电流与零序电压的关系

当 R_f 较大时, 系统处于欠阻尼状态, 根据式(3)和式(4)求解非齐次方程, 可得欠阻尼状态下流经消弧线圈的零序电流表达式为:

$$i_{L_c} = e^{-\delta t} \left[A_1 \cos(\omega_f t) + A_2 \sin(\omega_f t) \right] + B \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (5)$$

其中, δ 为衰减因子; ω_f 为谐振频率。

当脱谐度 $v = 1 - 1/(\omega_0^2 L_c C_\Sigma)$ 时, 有:

$$\begin{cases} \delta = 1/(2R_f C_\Sigma) \\ \omega_f = \sqrt{\frac{1}{L_c C_\Sigma} - \left(\frac{1}{2R_f C_\Sigma} \right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 (1-v) - \delta^2} \end{cases} \quad (6)$$

进一步由式(5)和式(6)可得:

$$\begin{cases} A_1 = -B \sin \varphi \\ A_2 = (-\delta B \sin \varphi - \omega_0 B \cos \varphi) / \omega_f \\ B = \frac{u_f}{\sqrt{R_f^2 (1 - \omega_0^2 L_c C_\Sigma)^2 + \omega_0^2 L_c^2}} \\ \varphi = \phi - \arctan \frac{\omega_0 L_c}{R_f (1 - \omega_0^2 L_c C_\Sigma)} \end{cases} \quad (7)$$

由于 ϕ 为故障点等值电势的相角, 即为故障初相角, 可取任何值。因此为简化分析, 可令 $\varphi = 0^\circ$, 此时 $A_1 = 0$ 、 $A_2 = -\omega_0 B / \omega_f$, 可得故障点零序电压为:

$$u_0 = L_c A_2 \omega_f e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) - L_c \delta A_2 e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) + \omega_0 L_c B \cos(\omega_0 t) \quad (8)$$

由式(8)可得每个区段的对地电容电流 i_{C_i} 为:

$$i_{C_i} = -\omega_0^2 L_c C_i B \sin(\omega_0 t) - L_c C_i \times 2 \delta A_2 \omega_f e^{-\delta t} \cos(\omega_f t) + L_c C_i (\delta^2 A_2 - A_2 \omega_f^2) e^{-\delta t} \sin(\omega_f t) \quad (9)$$

联立式(7)~(9), 可以得到故障点上游第 k 个 ($k=1, 2, \dots, i$) 终端的零序电流 $i_{QF_k}^{\text{up}}$ 为:

$$i_{QF_k}^{\text{up}} = -i_f + \sum_{n=k}^m i_{C_n} = \left(\omega_0^2 L_c C_\Sigma - \omega_0^2 L_c \sum_{n=k}^m C_n - 1 \right) B \sin(\omega_0 t) + A_4 e^{-\delta t} \sin(\omega_f t + \varphi_2) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \varphi_2 = \arctan \frac{\omega_f - 2 \sum_{n=k}^m C_n R_f \delta \omega_f}{-\delta + \sum_{n=k}^m C_n R_f (\delta^2 - \omega_f^2)} \\ A_4 = L_c \left| A_2 \right| \sqrt{\left(\frac{\omega_f}{R_f} - 2 \sum_{n=k}^m C_n \delta \omega_f \right)^2 + \left[\sum_{n=k}^m C_n (\delta^2 - \omega_f^2) - \frac{\delta}{R_f} \right]^2} \end{cases} \quad (11)$$

继续分析故障点上游的零序特征量, 可得:

$$\begin{aligned}
\int_t^{t+T_0} i_{\text{QF}_k}^{\text{up}} dt &= -\omega_0 L_c \left(C_\Sigma - \sum_{n=k}^m C_n - \frac{1}{\omega_0^2 L_c} \right) B \cos(\omega_0 t) \Big|_t^{t+T_0} - \\
&\quad \frac{A_4 e^{-\delta t}}{\omega_f^2 + \delta^2} \left[\omega_f \cos(\omega_f t + \varphi_2) + \delta \sin(\omega_f t + \varphi_2) \right] \Big|_t^{t+T_0} = \\
&\quad - \frac{A_4 e^{-\delta t}}{\sqrt{\omega_f^2 + \delta^2}} \sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta) \Big|_t^{t+T_0} \quad (12) \\
u_0 \Big|_t^{t+T_0} &= L_c B \sin(\omega_0 t) \Big|_t^{t+T_0} + \\
&\quad L_c A_2 e^{-\delta t} \left[\omega_f \cos(\omega_f t) - \delta \sin(\omega_f t) \right] \Big|_t^{t+T_0} = \\
&\quad L_c A_2 e^{-\delta t} \sqrt{\omega_f^2 + \delta^2} \sin(\omega_f t - \theta) \Big|_t^{t+T_0} \quad (13)
\end{aligned}$$

其中, $\theta = \arctan(\omega_f/\delta)$ 。联立式(12)和式(13)可得式(14),推导过程见附录A。

$$\begin{cases} \frac{\int_t^{t+T_0} i_{\text{QF}_k}^{\text{up}} dt}{u_0 \Big|_t^{t+T_0}} = \frac{A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} \frac{\sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta + \beta)}{\sin(\omega_f t - \theta + \beta)} \\ \beta = \arctan \frac{e^{-\delta T_0} \sin(\omega_f T_0)}{e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) - 1} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)可分两部分进行讨论。首先利用欠阻尼的条件 $R_f > \frac{1}{2} \sqrt{L_c/C_\Sigma}$, 将式(14)中第1个公式等号右侧的常数项化简为式(15), 推导过程见附录B。

$$\frac{A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} = - \sqrt{\frac{L_c (C_\Sigma - C_k)}{R_f^2}} + C_k < -C_k \quad (15)$$

C_Σ 通常远大于 C_k , 则式(15)的绝对值大于 C_k , 因此式(15)的绝对值大于式(2)。

式(14)中第1个公式等号右侧第2项可化简为:

$$\frac{\sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta + \beta)}{\sin(\omega_f t - \theta + \beta)} = \cos(\varphi_2 + 2\theta) + \cot(\omega_f t - \theta + \beta) \sin(\varphi_2 + 2\theta) \quad (16)$$

由于式(16)中 $\cot(\omega_f t - \theta + \beta)$ 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$, 因此只要 $\sin(\varphi_2 + 2\theta) \neq 0$, 则式(16)的绝对值存在极大值。为此, 进一步化简 $\varphi_2 + 2\theta$ 可得:

$$\begin{aligned}
\varphi_2 + 2\theta &= \arctan \frac{\omega_f - 2C_k \delta \omega_f}{-\delta + C_k R_f (\delta^2 - \omega_f^2)} + 2 \arctan \frac{\omega_f}{\delta} \approx \\
&\quad \arctan \left(\omega_f \frac{-\frac{C_\Sigma}{L_c} + \frac{C_k}{2C_\Sigma R_f^2} - \frac{1}{L_c C_\Sigma}}{-\frac{1}{2L_c R_f} + \frac{C_k R_f}{L_c^2} - \frac{C_k}{L_c C_\Sigma R_f} + \frac{C_k}{4C_\Sigma^2 R_f^3}} \right) \quad (17)
\end{aligned}$$

由于 C_k 很小且 R_f 较大, 式(17)中分子包含 C_k 而分母包含 R_f 高次项的项均可忽略不计。因此式(17)可化简为:

$$\varphi_2 + 2\theta = \arctan \left(\omega_f \frac{2L_c C_\Sigma^2 R_f + 2L_c R_f}{L_c C_\Sigma + 2L_c C_k - 2C_k C_\Sigma R_f^2} \right) \quad (18)$$

显然式(18)括号中的分子大于0, 则式(18)不等于0, 因此满足 $\sin(\varphi_2 + 2\theta) \neq 0$ 。

根据以上分析可知, 对于故障点上游的零序特征量, 必存在时间区段使得 $\int_t^{t+T_0} i_{\text{QF}_k}^{\text{up}} dt / (u_0 \Big|_t^{t+T_0})$ 的绝对值远大于下游零序特征量, 而且零序特征量的极大值周期性出现, 周期为 π/ω_f , 这一特性可作为区分故障点上、下游的依据。

3 低阻接地故障暂态零序电流与零序电压的关系

当故障过渡电阻较小时, 系统处于过阻尼状态, 根据式(3)、式(4)求解过阻尼状态下非齐次方程, 可得流经消弧线圈的零序电流表达式为:

$$i_{L_c} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + B \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (19)$$

$$\begin{cases} B = \frac{u_f}{\sqrt{R_f^2 (1 - \omega_0^2 L_c C_\Sigma)^2 + \omega_0^2 L_c^2}} \\ A_1 = \frac{\omega_0 B}{p_2 - p_1}, A_2 = -\frac{\omega_0 B}{p_2 - p_1} \\ p_1 = -\frac{1}{2R_f C_\Sigma} - \sqrt{\left(\frac{1}{2R_f C_\Sigma} \right)^2 - \frac{1}{L_c C_\Sigma}} \\ p_2 = -\frac{1}{2R_f C_\Sigma} + \sqrt{\left(\frac{1}{2R_f C_\Sigma} \right)^2 - \frac{1}{L_c C_\Sigma}} \end{cases} \quad (20)$$

此时故障点零序电压为:

$$u_0 = \omega_0 L_c B \cos(\omega_0 t + \varphi) + L_c p_1 A_1 e^{p_1 t} + L_c p_2 A_2 e^{p_2 t} \quad (21)$$

联立式(20)和式(21), 可推导出流经故障点上游第 $k(k=1, 2, \dots, i)$ 个终端的零序电流为:

$$\begin{aligned}
i_{\text{QF}_k}^{\text{up}} &= \left(\omega_0^2 L_c C_\Sigma - \omega_0^2 L_c \sum_{n=k}^m C_n - 1 \right) B \sin(\omega_0 t + \varphi) + \\
&\quad \left(\frac{L_c p_1 A_1}{R_f} + L_c \sum_{n=k}^m C_n A_1 p_1^2 \right) e^{p_1 t} + \\
&\quad \left(\frac{L_c p_2 A_2}{R_f} + L_c \sum_{n=k}^m C_n A_2 p_2^2 \right) e^{p_2 t} \quad (22)
\end{aligned}$$

则可得上游零序特征量如式(23)所示, 推导过程见附录C。

$$\frac{\int_t^{t+T_0} i_{\text{QF}_k}^{\text{up}} dt}{u_0 \Big|_t^{t+T_0}} \approx \frac{1}{R_f} \left[\frac{1}{p_2} + \frac{\frac{p_2 - p_1}{p_2} (e^{p_1 T_0} - 1)}{p_1 (e^{p_1 T_0} - 1) - p_2 e^{(p_2 - p_1) T_0} (e^{p_2 T_0} - 1)} \right] \quad (23)$$

由式(23)可知,由于 $\frac{p_2-p_1}{p_2}(e^{p_1T_0}-1) \neq 0$,因此若存在时间 t_1 使得 $p_1(e^{p_1T_0}-1)-p_2e^{(p_2-p_1)t_1}(e^{p_2T_0}-1)=0$,则在 t_1 附近的时间区段内式(23)绝对值很大,且 t_1 可表示为:

$$t_1 = \frac{1}{p_2-p_1} \ln \frac{p_1(e^{p_1T_0}-1)}{p_2(e^{p_2T_0}-1)} \quad (24)$$

由于谐振接地系统的脱谐度较小,一般为-5%左右,因此可认为 $\omega_0^2 \approx \frac{1}{L_c C_\Sigma}$ 。另外由于欠阻尼时

$R_f < \frac{1}{2} \sqrt{L_c C_\Sigma}$,取过渡电阻系数 $M(0 < M < 1)$,使得 $R_f = \frac{M}{2} \sqrt{L_c C_\Sigma}$,则式(20)中的 p_1, p_2 可简化为:

$$\begin{cases} p_1 \approx \left(-\frac{1}{M} - \sqrt{\frac{1}{M^2} - 1} \right) \omega_0 \\ p_2 \approx \left(-\frac{1}{M} + \sqrt{\frac{1}{M^2} - 1} \right) \omega_0 \end{cases} \quad (25)$$

联立式(24)与式(25)可得到仅有过渡电阻系数 M 为变量的 t_1 的表达式见式(26),利用MATLAB作出 t_1 随 M 值变化的曲线如图2所示。

$$t_1 = \frac{M}{2\omega_0 \sqrt{1-M^2}} \ln \frac{\left(-1 - \sqrt{1-M^2} \right) \left[e^{\left(\frac{1}{M} - \sqrt{\frac{1}{M^2} - 1} \right) T_0} - 1 \right]}{\left(-1 + \sqrt{1-M^2} \right) \left[e^{\left(\frac{1}{M} + \sqrt{\frac{1}{M^2} - 1} \right) T_0} - 1 \right]} \quad (26)$$

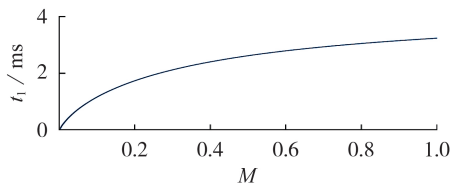


图2 时间 t_1 随过渡电阻系数 M 变化的曲线

Fig.2 Curve of time t_1 vs. transition resistance coefficient M

由图2可知,随着过渡电阻系数的增大,时间 t_1 也在不断增大,但其值一直较小,在数毫秒以内,能够满足暂态过程分析的需要。当 $t=t_1$ 时,上游零序特征量取得极大值,且仅出现一次。因此在过阻尼情况下依然可通过比较上、下游零序特征量进行暂态过程中的故障区段定位。当发生金属接地故障时,由于消弧线圈和线路阻抗不完全为0,仍会产生衰减分量,因此本文方法仍能适用。

4 故障区段定位方案

由以上分析可知,当谐振系统发生接地故障时,

对于零序特征量 $\int_t^{t+T_0} i_{QFk} dt / \left(u_0 \Big|_t^{t+T_0} \right)$,当终端 k 位于故障点下游时,其取值等于终端 k 下游线路的对地电容 C_k ,其数量级为 10^{-6} 。而对于故障点上游,通过前文的分析可知,零序特征量能在一定时间区段内取极大值。因此,可利用这一零序特征量为依据形成故障区段定位方案。对于故障区段定位终端,可采用梯形数值积分法对零序特征量进行离散化计算,且为了防止故障点下游计算值过小,在计算时将零序电流扩大1000倍,则故障区段定位零序特征量可表示为:

$$P(n) = \left| \frac{\frac{T_0}{2T_s} \left(i_0(n) + 2 \sum_{j=n+1}^{n+T_s-1} i_0(j) + i_0(n+T_s) \right)}{u_0(n+T_0) - u_0(n)} \right| \quad (27)$$

其中, $i_0(j)$ 为故障区段定位终端的零序电流采样值(扩大了1000倍); n 为计算起始点; T_s 为计算周期,等于每工频周期的采样点数。另外,由式(6)可得 $\omega_f \neq \omega_0$,因此由式(8)可知,在大部分时间内均有 $u_0(n+T_0) - u_0(n) \neq 0$ 。若出现 $u_0(n+T_0) - u_0(n) = 0$ 的情况,可微调积分周期后重新计算 $P(n)$,此时式(27)中, T_s 应等于每工频周期的采样点数减1, T_0 应等于20 ms减去采样间隔。

根据上文分析,欠阻尼状态下故障点上游 $P(n)$ 每隔 π/ω_f 会出现一次极大值,过阻尼状态下极大值的出现时间和过渡电阻大小有关。为了有效利用这一极值,应在故障发生并具备足够的计算数据窗后连续2个工频周期持续计算 $P(n)$ 。根据式(23)可知过阻尼状态下,当过渡电阻较小时,上、下游零序特征量与发生高阻接地故障时相比更大,为了使故障区段定位方法在高阻和低阻故障接地故障下都有较好的适应性,计算2个工频周期内两相邻终端的 $P(n)$ 最大值之比作为判定该终端位于故障点上游的依据,即:

$$K_{k,k+1} > K_{set} \quad (28)$$

$$K_{k,k+1} = \frac{\max(P(n)_{k,\max}, P(n)_{k+1,\max})}{\min(P(n)_{k,\max}, P(n)_{k+1,\max})} \quad (29)$$

其中, K_{set} 为整定值,可由仿真结果分析得到; $P(n)_{k,\max}$ 为第 k 个终端的 $P(n)$ 最大值; $P(n)_{k+1,\max}$ 为第 $k+1$ 个终端的 $P(n)$ 最大值。若 $K_{k,k+1} > K_{set}$,则可判定故障区段在这2个相邻终端内,且 $P(n)$ 较大者为上游侧,较小者为下游侧,若 $K_{k,k+1} < K_{set}$,则2个终端位于同一侧。

综上,可得到故障区段定位的流程如图3所示。图中,故障区段定位终端的故障启动判据为:

$$|U_0| > U_{0_set} \quad (30)$$

其中, U_0 为终端采集到的零序电压; U_{0_set} 为启动定值, 可按躲开最大三相不平衡电压整定。

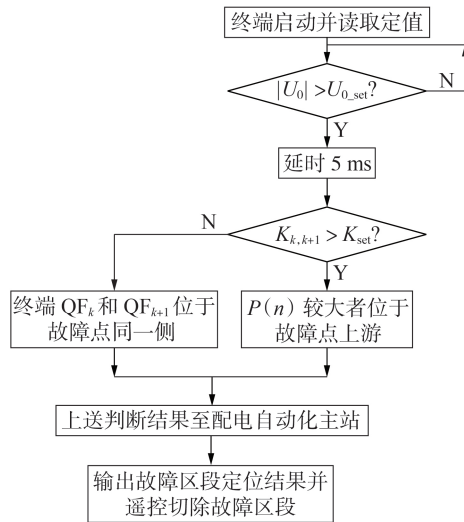


图3 故障区段定位流程图

Fig.3 Flowchart of fault section location

本文所提故障区段定位方法利用故障点上游和故障点下游的零序电流、电压关系的差异作为判别的依据, 在高阻接地故障和低阻接地故障情况下均适用。值得指出的是, 当第 k 个终端位于故障点上游的分支线路时, 所计算的 $K_{k,k+1}$ 同样会远小于定值, 因此配电自动化主站应考虑这一情况, 综合所有终端的判断结果, 才能给出最终的区段定位结果, 具体情况将在下节的仿真验证中予以讨论。另外, 在发生单相接地故障后的一段时间内, 零序电流和零序电压包含了大量高频分量^[14], 这些高频分量可能影响本文所提故障区段定位方法的有效性。因此, 需采用低通滤波器减小高频分量所带来的干扰。

5 仿真验证

为了验证所提故障区段定位方法, 按照国家标准, 对于包含电缆线路的 10 kV 配电网, 当系统电容电流大于 20 A 时必须安装消弧线圈。若电容电流 $I_0 = 20$ A, 则系统对地电容之和为 $C_{\Sigma 0} = 10.5 \mu\text{F}$ 。设消弧线圈处于全补偿状态, 则其等值电感 $L_c = 0.965$ H, 此时可得到临界过渡电阻 $R_0 = 0.5 \sqrt{L_{c0}/C_{\Sigma 0}} = 151.56 \Omega$, 若过补偿, 则临界电阻进一步减小。因此当发生过渡电阻大于 200Ω 的接地故障时, 可认为谐振过程为欠阻尼; 当发生过渡电阻小于 100Ω 的接地故障时, 可认为谐振过程为过阻尼。在 PSCAD 中搭建如图 4 所示的 10 kV 谐振接地系统模型。系统共有 3 条馈线 $L_1 \sim L_3$, 其均为 10 km 的电缆线路, 单位长度线路电容为 $0.33 \mu\text{F}/\text{km}$ 。 L_1 带

有 4 km 长的架空线分支线路, 单位长度线路电容为 $0.01 \mu\text{F}/\text{km}$ 。 $QF_1 \sim QF_4$ 两两之间的距离相等, 安装于馈线 L_1 , QF_5 安装于 L_1 分支线路的首端。负荷 L_{D1} 和 L_{D2} 均为 3 MW, 功率因数为 0.9。 $f_1 \sim f_5$ 为不同的故障点, 位置均在所在区段的中点。仿真步长为 $50 \mu\text{s}$, 对应的采样频率为 20 kHz。

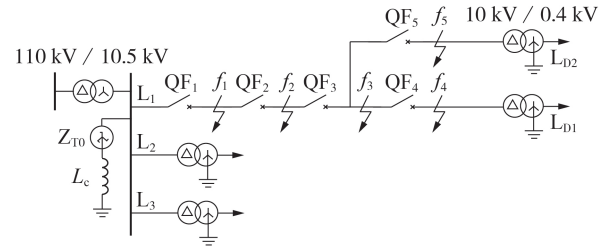


图4 谐振接地配电网

Fig.4 Resonance grounding distribution network

5.1 理论分析验证

为验证本文的理论分析, 设 f_2 发生单相接地故障, 通过仿真获取不同过渡电阻情况下零序电压和零序电流录波数据, 利用式 (27) 在 MATLAB 中对录波数据进行处理, 得到各终端的 $P(n)$ 的如图 5 所示 (原始仿真波形见附录 D 图 D1)。

由图 5 可见, 在不同过渡电阻和不同故障初相角下, 故障点上游终端所计算的零序特征量均远大于下游终端所计算的特征量, 据此可有效判断故障区段。值得指出的是, 虽然在第 2 节中为了便于分析, 公式推导均基于特定的故障初相角, 但由图 5 可见, 对于不同的故障初相角, 故障点上游终端所计算的 $P(n)$ 均存在极大值, 仅在极大值出现的时刻上有所不同, 并不影响故障区段定位。由图 5(a)、(b) 可见, 过阻尼状态下故障点上游 $P(n)$ 存在极大值且仅出现一次, 与第 3 节的理论推导相符, 由图 5(d)、(e) 可见, 欠阻尼状态下故障点上游 $P(n)$ 的极大值多次出现, 而且出现的间隔大约为 10.8 ms , 与理论值 $\pi/\omega_i = 10.3 \text{ ms}$ 差别不大, 进一步验证了第 2 节理论推导的正确性。

5.2 故障区段定位方法验证

利用第 4 节所提故障区段定位方案在不同的故障区段、不同过渡电阻以及弧光接地故障情况下的准确性进行仿真测试, 采样频率为 20 kHz, 根据 5.1 节的仿真结果可取 $K_{set} = 50$, 故障初相角随机。测试结果如附录 D 表 D1 所示。表中故障区段 0 表示母线故障; 金属接地故障取过渡电阻为 1Ω ; 电弧接地模型参考文献 [15-16], 电弧的电导可表示为:

$$g = \begin{cases} g_1 & |U_f| \leq U_1 \\ 2k_1 |U_f| + k_2 & U_1 < |U_f| \leq U_2 \\ g_2 & |U_f| > U_2 \end{cases} \quad (31)$$

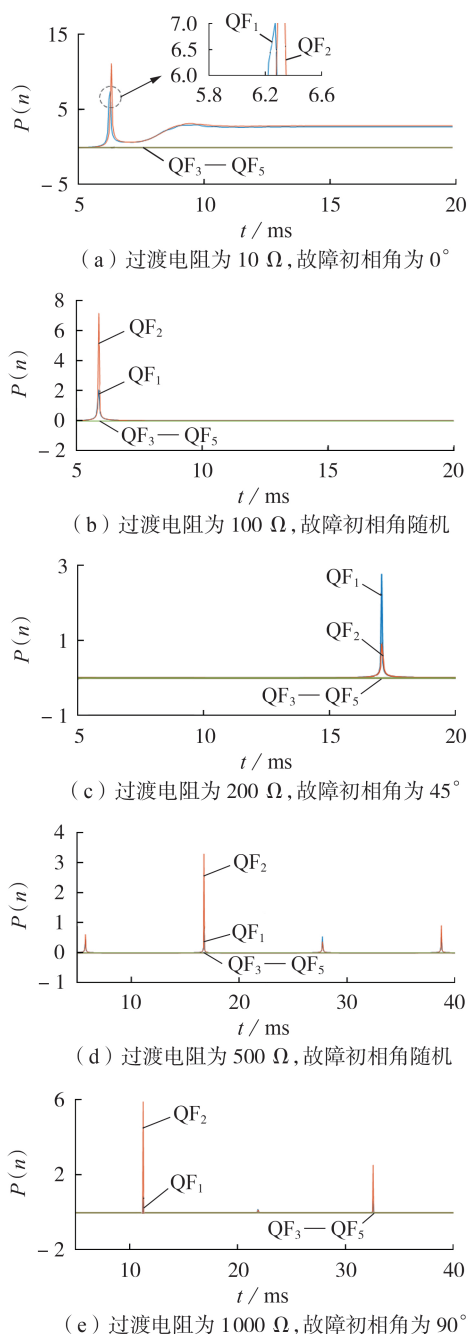


图5 不同过渡电阻下各终端特征量波形

Fig.5 Characteristic waveform of each terminal under different transition resistances

其中, $g_1=0.0005 \text{ S}$; $g_2=0.001667 \text{ S}$; $k_1=2.333 \times 10^{-7} \text{ S/kV}$; $k_2=-0.0002 \text{ S}$; $U_1=1.5 \text{ kV}$; $U_2=4 \text{ kV}$ 。由表 D1 可见, 本文所提方法在各种接地故障下都能正确选择故障所在区段。而且相邻终端在同一侧时特征量最大值之比 $K_{k,k+1}$ 与不同侧时的差距很大, 灵敏度非常高。当发生过渡电阻为 3000Ω 的高阻接地故障时依然能够正确定位故障区段。尤其在发生非线性弧光接地故障时, 本文所提方案同样有效, 这已经能够适应大多数配电网单相高阻接地故障。需要指出的是, 当故障发生于图 4 中的 f_4 处时, 终端 QF_5 判断为故

障点下游, 而终端 QF_3 、 QF_4 均判断为故障点上游, 此时配电网自动化主站可通过以下方法处理这种情况: 当配电网具有分支线路时, 若某分支线路上有终端被判断为故障点上游, 则故障发生在该分支线路上, 配电网主站只需进一步对该分支线路上的其他终端进行判断, 而其他分支线路如果没有终端被判断为故障点上游, 则这些分支线路上的终端数据都属于无效数据, 可以不再进行下一步判断, 就可以避免该情况下判据出现的问题, 且该方法比较容易通过编程实现。配电网主站判断流程如附录 D 图 D2 所示。

由于本文所提的方法在采样时需要获取到故障点上游零序特征量中超过定值的这部分时间段中的 $P(n)$ 值才能给出准确定段结论, 而根据式 (16) 和式 (23) 以及仿真结果可知上游零序特征量维持过定值的时间段较短, 在采样频率过低时可能因为无法捕捉该时间段的 $P(n)$ 值而出现误判的情况, 因此对表 D1 中部分测试项目在不同采样频率下重新进行了测试, 结果如表 1 所示。

表 1 不同采样频率故障区段定位正确率

Table 1 Accuracy of fault section location with different sampling frequencies

采样频率 / kHz	正确率 / %
15	100
10	100
5	80 ($R_f \geq 2000 \Omega$, 误判)
2	13.3

由表 1 可知, 10 kHz 的采样频率已经能够满足所提故障区段定位方法的要求, 在 5 kHz 的采样频率下也能适应过渡电阻在 2000Ω 以内的单相接地故障情况。由此可知本文所提方法对采样频率的要求较低, 而且计算量较小, 对于当前的 AD 转换芯片和 FTU 中数百 MHz 的处理器而言, $10 \sim 20 \text{ kHz}$ 采样频率的实现难度不大。

6 结论

本文分析了谐振接地配电网发生接地故障时, 故障点上、下游零序电流积分和零序电压差值比值的特征, 得出了该比值在故障点上、下游量级相差较大的结论。以此为基础提出了一种适用于谐振接地配电网的故障区段定位方案, 该方案利用故障区段定位终端采集 2 个工频采样周期内零序特征量的最大值, 并与相邻终端比较判断终端是否位于故障点上游, 配电网自动化终端通过分析各终端上送结果判断出正确的故障区段。

PSCAD 和 MATLAB 仿真结果表明, 所提方法适用于金属接地故障、低阻接地故障、高阻接地故障以

及非线性弧光接地故障,对大多数的单相接地故障尤其是高阻接地故障都具有较好的适应性,同时本文提出的零序特征量算法简单,计算速度快,对采样频率的要求不高,10 kHz的采样频率已经能够满足采样要求,零序特征量在故障点同一侧时与不同侧的比值差距很大,灵敏度非常高。综上,本文所提故障区段定位方法具有适用范围较广、灵敏度高以及实现成本不高的特点,在实际应用中可行性较高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:87-91.
- [2] 徐丙垠,薛永端,冯光,等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化,2019,43(20):1-7.
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20):1-7.
- [3] 杨磊,曾祥君,喻锐,等. 新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):57-62.
YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault of resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 57-62.
- [4] 宋伊宁,李天友,薛永端,等. 基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(4): 102-109.
SONG Yining, LI Tianyou, XUE Yongduan, et al. Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):102-109.
- [5] XUE Yongduan, CHEN Xiaoru, SONG Huamao, et al. Resonance analysis and faulty feeder identification of high-impedance faults in a resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1545-1555.
- [6] LIAO Yuan. Generalized fault-location methods for overhead electric distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):53-64.
- [7] SALIM R H, SALIM K C O, BRETAS A S. Further improvements on impedance-based fault location for power distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4):467.
- [8] 靳维,陆于平. 基于双端弱同步的配电网行波测距方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):102-109.
JIN Wei, LU Yuping. Fault location method based on traveling wave with dual-terminal weak synchronization for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):102-109.
- [9] 张殊,杨健维,何正友,等. 基于线路暂态重心频率的配电网故障区段定位[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2463-2470.
ZHANG Shu, YANG Jianwei, HE Zhengyou, et al. Fault section location of the distribution network based on transient center frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2463-2470.
- [10] 王秋杰,金涛,刘军. 计及FTU漏报和误报的配电网故障定位分层解析模型[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):141-147.
WANG Qiujie, JIN Tao, LIU Jun. Hierarchical analytic model for fault location of distribution network considering FTU missing and false positives[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):141-147.
- [11] 薛永端,李娟,陈筱菁,等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报,2017,37(17): 5037-5048.
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17):5037-5048.
- [12] 冯光,管廷龙,王磊,等. 利用电流-电压导数线性度关系的小电流接地系统接地故障选线[J/OL]. 电网技术. (2019-12-25)[2020-06-13]. [https://doi.org/10.13335-j.1000-3673.pst.2019.1272](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1272).
- [13] 刘志文,董旭柱,邹林,等. 基于零序电流衰减周期分量的高阻接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化,2020,44(7): 161-168.
LIU Zhiwen, DONG Xuzhu, ZOU Lin, et al. Section location method for high impedance grounding fault based on declining periodic component of zero sequence current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7):161-168.
- [14] 杨健翔,常仲学,豆敏娜,等. 一种配网单相接地选线的频带自适应获取方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(15):60-66.
YANG Jianxiang, CHANG Zhongxue, DOU Minna, et al. A novel frequency band self-adaptive selection method of fault line selection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15):60-66.
- [15] 王宾,耿建昭,董新洲. 基于介质击穿原理的配电线路高阻接地故障精确建模[J]. 电力系统自动化,2014,38(12):62-66,106.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. High-impedance fault modeling based on solid dielectric electrical breakdown theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 62-66, 106.
- [16] 王宾,耿建昭,董新洲. 配网高阻接地故障伏安特性分析及检测[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3815-3823.
WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3815-3823.

作者简介:



朱木兰

朱木兰(1968—),女,安徽淮北人,副研究员,博士,主要研究方向为高压直流输电、含新能源电网继电保护与运行控制、智能高压设备在线监测(E-mail: glzhu1@scut.edu.cn);

李松奕(1998—),男,江西余干人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 1679852718@qq.com);

曾德辉(1988—),男,河南焦作人,博士,通信作者,主要从事电力系统故障分析与继电保护理论研究和保护测控装置开发工作(E-mail: daneizdh@126.com)。

(编辑 任思思)

(下转第68页 continued on page 68)

- [20] GALBALLY J, GALBALLY D. A pattern recognition approach based on DTW for automatic transient identification in nuclear power plants[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 81: 287-300.
- [21] JEONG Y S, JEONG M K, OMITAOMU O A. Weighted dynamic time warping for time series classification[J]. *Pattern Recognition*, 2011, 44(9): 2231-2240.

作者简介:

周金辉(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,高级工程师,博



周金辉

士,主要研究方向为分布式电源并网、微电网和主动配电网等(E-mail: zhoujinhui_hz@163.com);

柳伟(1985—),男,江苏南京人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为配电网无功电压评估预测、分布式协同控制、复杂配电网实时仿真、人工智能在电力系统中的应用等(E-mail: wliu@njust.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Voltage operating state assessment of active distribution network based on fuzzy dynamic time warping algorithm

ZHOU Jinhui¹, YAN Jianfeng², WANG Ziling¹, LIU Wei²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The voltage operating state assessment of ADN(Active Distribution Network) can effectively integrate multi-source heterogeneous data generated by operation and characterize voltage operating state of ADN. In order to objectively reflect the voltage control ability of critical nodes, reactive power interaction supporting of interconnected partitions and reactive power balance level of the global distribution network, a multi-particle scale evaluation index system of “node-partition-network” is constructed. The FDTW(Fuzzy Dynamic Time Warping) evaluation algorithm based on fuzzy recognition and dynamic time warping is proposed to transform the voltage operating state assessment problem into the fuzzy sequence pattern recognition problem, and the minimum bending distance is used to compare the similarity between the unevaluated and reference samples. The effectiveness of the proposed index system and FDTW evaluation method is verified by an actual example of ADN.

Key words: active distribution network; node-partition-network; multi-particle scale; fuzzy dynamic time warping algorithm; voltage operating state assessment

(上接第40页 continued from page 40)

Fault section location method for grounding fault of distribution network based on zero-sequence characteristic

ZHU Gelan¹, LI Songyi¹, LAN Jinchen¹, ZENG Dehui¹, LIU Yinliang²

(1. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510063, China)

Abstract: The existing fault section location methods of distribution network have been found with poor adaptability to different grounding faults, low sensitivity and other problems, aiming at which, the characteristics of zero-sequence current and zero-sequence voltage transient components at upstream and downstream of the fault point under different transition resistances when a grounding fault occurs in the resonance grounding distribution network are analyzed. It is concluded that the ratio between the integral of the zero-sequence current within a power frequency period and the zero-sequence voltage, i.e. the zero-sequence characteristic, at the upstream of the fault point is significantly different from that at the downstream of the fault point. Based on this conclusion, a fault section location method that can be used in resonance grounding distribution network is proposed. The simulative results show that the proposed fault section location method is feasible for high-resistance grounding fault, low-resistance grounding fault and nonlinear arc grounding fault.

Key words: distribution network; fault section location; resonant grounding; zero-sequence characteristic; distribution automation

附录 A：式(14)、(16)推导过程

$$\begin{aligned}
 \frac{\int_t^{t+T_0} i_{Q_k}^{\text{up}} dt}{u_0 \Big|_t^{t+T_0}} &= \frac{-\frac{A_4 e^{-\delta t}}{\sqrt{\omega_f^2 + \delta^2}} \sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta) \Big|_t^{t+T_0}}{-L_c A_2 e^{-\delta t} \sqrt{\omega_f^2 + \delta^2} \sin(\omega_f t - \theta) \Big|_t^{t+T_0}} = \frac{-A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} \frac{e^{-\delta T_0} \sin[\omega_f (t + T_0) + \varphi_2 + \theta] - \sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta)}{e^{-\delta T_0} \sin[\omega_f (t + T_0) - \theta] - \sin(\omega_f t - \theta)} = \\
 &= \frac{-A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} \frac{e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) \sin[\omega_f t + \varphi_2 + \theta] + e^{-\delta T_0} \sin(\omega_f T_0) \cos[\omega_f t + \varphi_2 + \theta] - \sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta)}{e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) \sin[\omega_f t - \theta] + e^{-\delta T_0} \sin(\omega_f T_0) \cos[\omega_f t - \theta] - \sin(\omega_f t - \theta)} = \\
 &= \frac{-A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} \frac{(e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) - 1) \sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta) + e^{-\delta T_0} \sin(\omega_f T_0) \cos(\omega_f t + \varphi_2 + \theta)}{(e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) - 1) \sin(\omega_f t - \theta) + e^{-\delta T_0} \sin(\omega_f T_0) \cos(\omega_f t - \theta)} = \\
 &= \frac{-A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} \frac{\sqrt{(e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) - 1)^2 + (e^{-\delta T_0})^2} \sin(\omega_f t + \varphi_2 + \theta + \beta)}{\sqrt{(e^{-\delta T_0} \cos(\omega_f T_0) - 1)^2 + (e^{-\delta T_0})^2} \sin(\omega_f t - \theta + \beta)} = \\
 &= \frac{-A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} \frac{\sin \cos(\varphi_2 + 2\theta) + \cos(\omega_f t - \theta + \beta) \sin(\varphi_2 + 2\theta)}{\sin(\omega_f t - \theta + \beta)} = \\
 &= \frac{-A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} (\cos(\varphi_2 + 2\theta) + \cot(\omega_f t - \theta + \beta) \sin(\varphi_2 + 2\theta))
 \end{aligned}$$

附录 B：式(15)推导过程

$$\begin{aligned}
 \frac{A_4}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} &= \frac{-L_c A_2 \sqrt{\left(\frac{\omega_f}{R_f} - 2 \sum_{n=k}^m C_n \delta \omega_f\right)^2 + \left(\sum_{n=k}^m C_n (\delta^2 - \omega_f^2) - \frac{\delta}{R_f}\right)^2}}{L_c A_2 (\omega_f^2 + \delta^2)} = \\
 &= \frac{\sqrt{\frac{\omega_f^2}{R_f^2} + 2C_k^2 \delta^2 \omega_f^2 - \frac{4C_k \delta \omega_f^2}{R_f} + C_k^2 (\delta^4 + \omega_f^4) + \frac{\delta^2}{R_f^2} - \frac{2\delta C_k (\delta^2 - \omega_f^2)}{R_f}}}{(\omega_f^2 + \delta^2)} \\
 &= -\sqrt{\frac{\frac{\omega_f^2}{R_f^2} + C_k^2 (\delta^2 + \omega_f^2)^2 - \frac{2\delta C_k (\delta^2 + \omega_f^2)}{R_f}}{(\omega_f^2 + \delta^2)}} = -\sqrt{\frac{\frac{1}{R_f^2 L_c C_\Sigma} + \frac{C_k^2}{L_c^2 C_\Sigma^2} - \frac{C_k}{R_f L_c C_\Sigma^2}}{\frac{1}{L_c C_\Sigma}}} = -\sqrt{\frac{L_c C_\Sigma}{R_f^2} + C_k^2 - \frac{C_k L_c}{R_f^2}} = \\
 &= -\sqrt{\frac{L_c (C_\Sigma - C_k)}{R_f^2} + C_k^2} < -\sqrt{C_k^2} = -C_k
 \end{aligned}$$

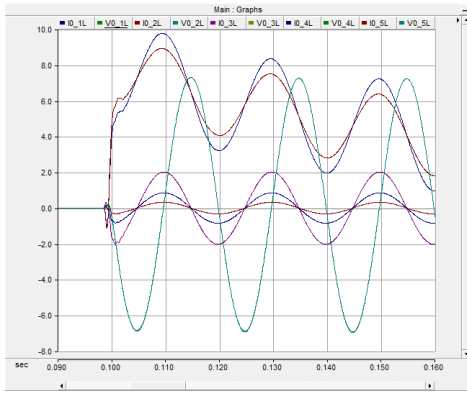
附录 C：式(23)推导过程

$$\begin{aligned}
 \frac{\int_t^{t+T_0} i_{Q_k}^{\text{up}} dt}{u_0 \Big|_t^{t+T_0}} &= \frac{(\frac{L_c}{R_f} + L_c \sum_{k=i}^m C_k p_1)(A_1 e^{p_1(t+T_0)} - A_1 e^{p_1 t}) + (\frac{L_c}{R_f} + L_c \sum_{k=i}^m C_k p_2)(A_2 e^{p_2(t+T_0)} - A_2 e^{p_2 t})}{L_c p_1 A_1 (e^{p_1(t+T_0)} - e^{p_1 t}) + L_c p_2 A_2 (e^{p_2(t+T_0)} - e^{p_2 t})} = \\
 &= \frac{A_1 e^{p_1 t} (e^{p_1 T_0} - 1) + A_2 e^{p_2 t} (e^{p_2 T_0} - 1)}{R_f p_1 A_1 e^{p_1 t} (e^{p_1 T_0} - 1) + R_f p_2 A_2 e^{p_2 t} (e^{p_2 T_0} - 1)} + \sum_{k=i}^m C_k
 \end{aligned}$$

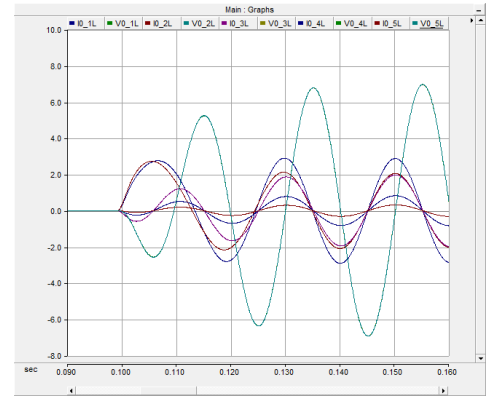
由于 $\sum_{k=i}^m C_k$ 的数量级为 10^{-6} ，可近似为 0，因此有：

$$\frac{\int_t^{t+T_0} i_{Q_k}^{\text{up}} dt}{u_0 \Big|_t^{t+T_0}} \approx \frac{1}{R_f} \frac{A_1 e^{p_1 t} (e^{p_1 T_0} - 1) + A_2 e^{p_2 t} (e^{p_2 T_0} - 1)}{p_1 A_1 e^{p_1 t} (e^{p_1 T_0} - 1) + p_2 A_2 e^{p_2 t} (e^{p_2 T_0} - 1)} = \frac{1}{R_f} \frac{A_1 (e^{p_1 T_0} - 1) + A_2 e^{(p_2 - p_1)t} (e^{p_2 T_0} - 1)}{p_1 A_1 (e^{p_1 T_0} - 1) + p_2 A_2 e^{(p_2 - p_1)t} (e^{p_2 T_0} - 1)} \stackrel{A_1 = -A_2}{=} \\ \frac{1}{R_f} \frac{(e^{p_1 T_0} - 1) - e^{(p_2 - p_1)t} (e^{p_2 T_0} - 1)}{p_1 (e^{p_1 T_0} - 1) - p_2 e^{(p_2 - p_1)t} (e^{p_2 T_0} - 1)} = \frac{1}{R_f} \left[\frac{1}{p_2} + \frac{\frac{p_2 - p_1}{p_2} (e^{p_1 T_0} - 1)}{p_1 (e^{p_1 T_0} - 1) - p_2 e^{(p_2 - p_1)t} (e^{p_2 T_0} - 1)} \right]$$

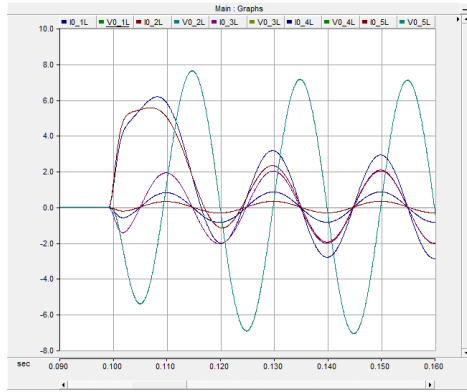
附录 D



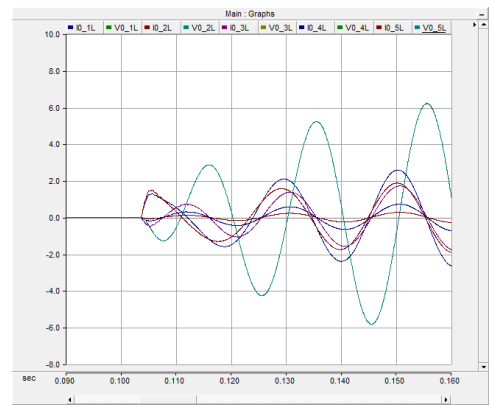
(a) 过渡电阻 10Ω, 故障初相角 0°



(d) 过渡电阻 500Ω, 故障初相角随机



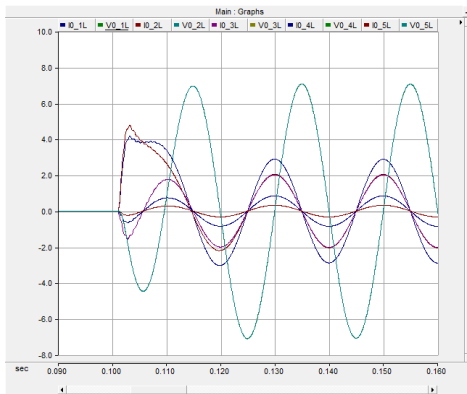
(b) 过渡电阻 100Ω, 故障初相角随机



(e) 过渡电阻 1000Ω, 故障初相角 90°

图 D1 原始仿真波形

Fig.D1 Original simulative waveform



(c) 过渡电阻 200Ω, 故障初相角 45°

表 D1 不同故障情况下的区段定位仿真分析结果
Table D1 Simulation analysis results of fault location scheme

故障 区段	过渡 电阻	$\max(P(n))$					$K_{1,2}$	$K_{2,3}$	$K_{3,4}$	$K_{3,5}$	结果
		QF_1	QF_2	QF_3	QF_4	QF_5					
0	100Ω	0.0021	0.0015	0.0010	0.0004	0.0001	1.4	1.5	2.5	10	0
1	1000Ω	0.6041	0.0015	0.0010	0.0004	0.0001	402.7	1.5	2.5	10	1
2	金属接地	10986	38663	0.0152	0.0082	0.0387	3.519	2543618	1.854	2.546	2
2	100Ω	2.0747	7.1515	0.0024	0.0005	0.0001	3.447	2980	4.8	24	2
2	1000Ω	0.8716	5.8738	0.0016	0.0007	0.0002	6.739	3671	2.286	8	2
2	3000Ω	1.3540	0.4961	0.0013	0.0005	0.0002	2.729	381.6	2.6	6.5	2
2	弧光接地	0.9519	1.6417	0.0162	0.0028	0.0011	1.725	101.3	5.786	14.73	2
3	金属接地	2082.5	1649.2	6959.6	0.0152	0.0099	1.263	4.220	457868	702989	3
3	50Ω	6.8446	3.4089	19.351	0.0011	0.0007	2.008	5.677	17592	27644	3
3	500Ω	4.1106	16.211	2.4590	0.0004	0.0001	3.944	6.592	6148	24590	3
3	3000Ω	0.2713	1.0831	0.7685	0.0034	0.0030	3.992	2.346	226.0	256.2	3
3	弧光接地	4.2646	3.0190	0.8149	0.0007	0.0003	1.413	3.705	1164	2716	3
4	10Ω	43.275	251.96	67.740	155.68	0.0016	5.822	3.720	2.298	97300	4
5	1000Ω	3.9351	1.0499	5.6125	0.0004	15.673	3.748	5.346	14031	2.792	5

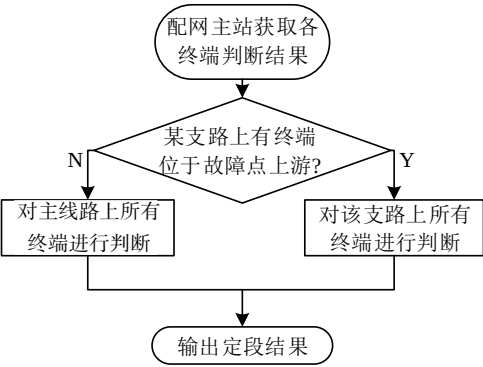


图 D2 配电网主站判断流程
Fig.D2 Main station judgment flowchart of distribution network