

# 基于改进阻抗符号法的暂降源定位方法及应用

文/刘含彬  
万华化学集团股份有限公司

阻抗符号法是一种原理上较为成熟的暂降源定位方法，基于有功功率变化量 $\Delta P$ 符号变化情况，有效辨识线性系统和非线性系统中的暂降源位置，但部分故障场景下存在缺陷。因此提出一种基于 $\Delta P$ 变化趋势的改进的阻抗符号法，能够有效应对非线性系统不同类型短路故障的定位问题，并通过仿真模拟和现场波形验证了正确性。

随着现代电力系统的不断发展，电力用户对电能质量的关注度逐渐提高。其中，电压暂降是最常见的一种电能质量问题，会对电力用户负荷的持续稳定运行造成直接影响。因此，实现电压暂降源的快速、准确定位有助于电能质量事件的快速处理，以及事故双方责任的明确界定，能够有效降低经济损失并解决相关纠纷。

电压暂降扰动源定位，即判定引起电压暂降的扰动源位于监测装置的哪一侧，从而作为供用电双方协调纠纷的依据。目前，国内外对电压暂降扰动源定位的研究，已经有了一些较成熟的方法。

文献[1]把扰动源视为一个从系统中吸取能量的“能量池”。当扰动发生时，部分能量从系统流向故障点。因此，可以根据能量的流向判断故障点相对于测量装置的位置。即基于扰动功率（DP）和扰动能量（DE）的变化，确定扰动源位置。但该方法仅适用于向外释放能量的扰动进行定位，当扰动向系统注入能量时，该方法的定位结果会出现错误。例如电动机支路发生故障后，电动机转变为发电机状态运行，致使支路潮流反向；以及雷击、含有储能元件等向系统注入能量的故障。

文献[2-3]通过分析从保护用的继电器处采集数据来获得电能质量情况，提出利用电压暂降发生

前后该母线上阻抗和相角的变化来判定电压暂降扰动源位置的方法，即基于距离阻抗继电器的方法。但是该方法存在一定局限性，例如在辐射型网络中，若故障点位于电源和距离阻抗继电器之间，则阻抗并不会发生变化，且该方法不适用于非永久性故障。

文献[4]采用系统参量斜率法，利用不同位置故障时，监测装置获得的基频电压幅值 $U$ 与功率因数 $\cos\phi$ 的乘积和基频电流幅值 $I$ 之间的比值不同的特征，利用最小二乘法将 $|U\cos\phi|$ 和 $I$ 用一条直线连起来后，用直线的斜率来反映电压暂降扰动源的位置。由于该方法采集并分析了大量的数据，所以具有较高的可信度。但此方法也存在一定缺陷，即当非对称扰动时，三相的判断结果可能出现不一致，该方法失效。

由于系统大部分的电压暂降是由故障引起，文献[5]从电力系统保护与故障定位的相关知识出发，根据方向继电器中增量阻抗的概念，提出了基于系统等效阻抗实部符号的暂降源定位方法。该方法利用监测到的电压与电流基频正序分量的变化量估算非扰动源侧的等效阻抗，阻抗的实部符号表征了扰动源的上游或是下游方向。但该方法对故障前与故障期间采样周期数非常敏感，选择的周期数不同，

估算的结果不同。虽然文献[5]基于有功功率的变化量 $\Delta P$ 的变化量对采样周期数的选择进行了优化，但工程实践中仍存在问题。

本文将在文献[5]基础上，对阻抗符号法进行进一步优化，使其更适用于工程实际情况。

## 阻抗符号法

电力系统可以用图1所示的简化等效电路来表示。这是一个基频正序电路，其中 $Z_1$ 和 $E_1$ 为电源侧的等效阻抗和内部电压源， $Z_2$ 和 $E_2$ 为用户侧的等效阻抗和内部电压源，并假设该系统由线性元件组成。M点为电压、电流监测设备的安装点。

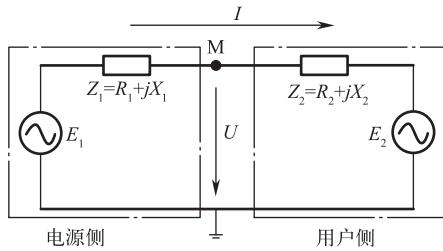


图1 电力系统等效电路

正常情况下，监测点M处有

$$U = E_1 - IZ_1 \quad (1)$$

假设用户侧发生接地短路故障，使得M点处检测到电压扰动，则电压和电流将分别变为 $V + \Delta V$ 和 $I + \Delta I$ ，其中 $\Delta U$ 、 $\Delta I$ 是扰动源在用户侧时的电压、电流变化量。假设扰动持续期间，电源侧的参数（ $Z_1$ 和 $E_1$ ）保持不变，那么可得

$$V + \Delta U = E_1 - (I + \Delta I)Z_1 \quad (2)$$

因为在电源侧和用户侧两端同时发生暂态扰动的概率较低，因此上述假设未发生扰动侧的参数不变是合理的。

由式（1）和式（2）相减可得

$$Z_1 = -\frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (3)$$

同理可得，当扰动源位于电源侧时，用户侧等效阻抗可以表示为

$$Z_2 = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (4)$$

给出如下定义

$$Z_e = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{\text{during}} - U_{\text{pre}}}{I_{\text{during}} - I_{\text{pre}}} \quad (5)$$

式中， $U_{\text{pre}}$ 、 $I_{\text{pre}}$ 和 $U_{\text{during}}$ 、 $I_{\text{during}}$ 分别表示电压暂降前

和暂降期间的基波正序电压、电流。可以看出 $Z_e$ 根据暂降源位置的不同，具有不同的符号。

$Z_e$ 具有明确的物理意义，即为未发生扰动侧的等效阻抗。当扰动源在电源侧时， $Z_e$ 表示用户侧等效阻抗；当扰动源在用户侧时， $Z_e$ 表示电源侧等效阻抗乘以一个负号。

因为阻抗（ $Z_1$ 、 $Z_2$ ）必定为正，因此可以通过判断 $Z_e$ 实部的正负号，来确定暂降源方向：

- 1) 若 $Z_e$ 实部大于0，则暂降源位于电源侧，即监测点上游。
- 2) 若 $Z_e$ 实部小于0，则暂降源位于用户侧，即监测点下游。

需要说明的是，上述结论中上游、下游指向均以图1所示电流为参考方向，也即为有功功率潮流的方向。

基于阻抗符号的方法在理论上是合理的，但上述分析的前提条件为线性系统。实际用户侧常存在非线性负荷，例如感应电动机、变频器等，这两类负荷可视为恒功率负载，它们在电压暂降期间的响应可能与线性负荷不同。

文献[5]在实验室环境下搭建了以感应电动机或变频器为负载的实验电路。测试发现，当暂降源位于监测点下游时，线性、非线性负荷支路监测点有功功率和电流均稳定增大，阻抗符号法能够正确识别暂降源位置。但当暂降源位于监测点上游时，线性负荷有功功率和电流稳定减小；非线性负荷则先减小后恢复，基于阻抗符号法的定位结果出错，如图2所示。分析原因在于，恒功率非线性负荷为了维持功率恒定，在暂降期间等效阻抗会改变，此时若使用单个周期的数据进行定位，不同周期计算的阻抗符号可能不同，结果不可靠，导致定位错误。

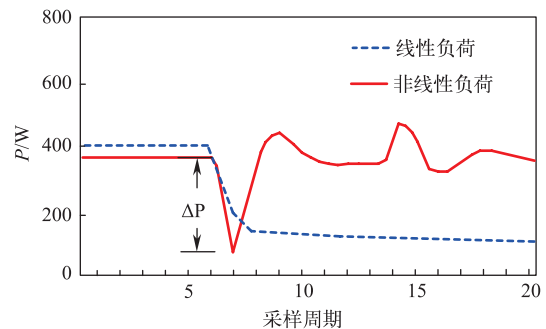


图2 线性、非线性负荷故障功率示意图

为了提高可靠性,文献[5]对方案进行改进,采用暂降期间 $N$ 个周期数据的统计值进行判断,此时 $N$ 的取值十分关键,将直接影响定位结果。文献方案中 $N$ 值的选取与有功功率变化量 $\Delta P$ 相关联。当暂降期间 $\Delta P$ 只有一种符号(正值或负值)时, $N$ 值取值与暂降持续周期数相同,通常发生在线性负荷支路上;当暂降期间 $\Delta P$ 符号改变, $N$ 值应在 $\Delta P$ 符号改变时的周期数基础上减1,通常发生在非线性负荷支路上。

### 改进的阻抗符号法

基于有功功率变化量 $\Delta P$ 符号变化确定统计周期 $N$ 的方法,从理论上解决了非线性系统的阻抗符号法的适用性问题。

但在实际工程应用中,非线性负荷支路监测点上游故障时, $\Delta P$ 变化情况与短路故障类型、短路阻抗大小以及负荷特性等均密切相关,部分故障场景下基于 $\Delta P$ 符号变化的优化方案存在缺陷。

以图3所示感应电动机负荷为例。当监测点M上游(电源侧)发生短路故障时,电源向M点传输的有功功率和电流呈下降趋势,但同时感应电动机由于转子转动惯性,不会立刻停机,由电动机状态转变为发电状态运行,向M点反向提供有功功率和电流。此时M点有功功率变化量 $\Delta P$ 由电源侧有功和感应电动机反向有功共同决定。

1) 单相、两相短路故障时,由于感应电动机提供的反向有功功率,M点有功功率 $P$ 先下降到零并反向增大,感应电动机为了维持功率恒定,由非故障相持续从电源侧吸收能量, $P$ 反向减小并恢复到原值附近, $\Delta P$ 符号先负后正,符合文献[5]分析的非线性负荷有功功率变化特征。

2) 三相短路故障时,M点有功功率 $P$ 先下降到零并反向增大,由于三相短路,电源侧功率无法继续向负荷侧传输,且电动机惯性逐渐减小, $P$ 逐渐减小至零, $\Delta P$ 符号不变,始终为负,不符合非线性负荷有功功率变化特征。

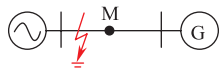


图3 感应电动机负荷支路

由此可以看出,基于 $\Delta P$ 符号变化确定等效阻抗计算的周期数 $N$ 的方案在非线性负荷支路中存在应

用缺陷,因此,本文提出以 $\Delta P$ 变化趋势确定周期数 $N$ 的改进方案。

1) 当有功功率 $\Delta P$ 绝对值增长到最大之后,若保持不变,说明为线性负荷支路, $N$ 可取暂降持续周期数。

2) 当有功功率 $\Delta P$ 绝对值存在先增后减趋势,说明为恒功率非线性负荷支路, $N$ 应取 $\Delta P$ 绝对值最大时的周期数。

### 仿真验证及应用

#### 1. 仿真验证

基于MATLAB/Simulink仿真软件,搭建包含线性负荷和非线性负荷(感应电机)支路的系统,对比单相、两相和三相短路情况下,有功功率 $P$ 的变化情况,以及等效阻抗计算结果。

由图4a可以看出,线性负荷支路监测点上游故障时,监测点监测到的有功功率稳定下降, $\Delta P$ 符号始终不变, $Z_e$ 实部分量 $R_e$ 恒大于零,符合阻抗符号法的定位结果。

由图4b可以看出,单相、两相短路时, $\Delta P$ 符号在第4周期变化,同时 $R_e$ 变为负,结果不可信,因此只能取第2、3周期结果( $N=2$ ),此时 $R_e > 0$ ,定位结果正确。三相短路时,有功功率 $P$ 先降为负数,并从第4周期开始维持在零值附近,由于 $\Delta P$ 符号不变,则 $N$ 取暂态持续周期数,本例中 $N \geq 5$ ,此时 $R_e$ 取值有正有负,基于 $\Delta P$ 符号变化的阻抗实部法失效;根据改进方案, $\Delta P$ 绝对值在第2、3周期单调递增,第4周期开始减小, $\Delta P$ 绝对值存在先增后减趋势,此时 $N$ 应取 $\Delta P$ 绝对值最大时的周期数,即 $N=2$ ,此时 $R_e > 0$ ,定位结果正确。

由此可以得出结论,根据改进的基于 $\Delta P$ 变化趋势的阻抗符号法,能够准确判断非线性负荷支路的暂降源位置。

#### 2. 现场波形

图5所示为某现场三相短路故障波形, $t=0.08$  s时发生故障,三相电压降低,三相电流增大,有功功率 $P$ 先减小后增大, $\Delta P$ 绝对值存在先增后减趋势,说明为恒功率非线性负荷支路; $t=0.2$  s时继电保护动作切除故障支路,三相电流降至零,有功功率 $P$ 也降至零; $t=0.21$  s时故障恢复,三相电压恢复正常。

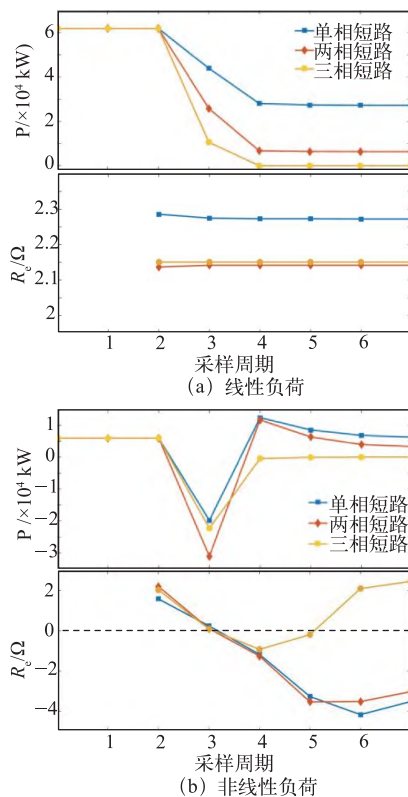


图4 故障有功功率及等效阻抗变化情况

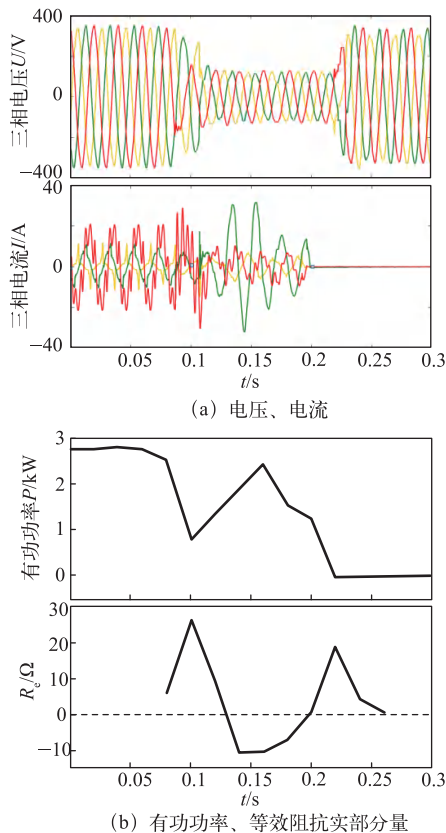


图5 某现场非线性负荷支路三相短路故障波形

根据改进的基于 $\Delta P$ 变化趋势的阻抗符号法,故障后两周波时 $\Delta P$ 幅值最大,因此 $N=2$ ,此时 $R_e > 0$ ,说明暂降源位于监测点上游,定位结果正确。

如果基于 $\Delta P$ 符号变化来判断,有功功率 $P$ 降至零后, $\Delta P$ 始终为负数,在此期间 $R_e$ 取值有正有负,基于 $\Delta P$ 符号变化的阻抗实部法失效。

## 结束语

阻抗符号法是一种原理上较为成熟的暂降源定位方法,基于有功功率变化量 $\Delta P$ 符号能够有效辨识线性系统和非线性系统中的暂降源位置。但该方法未考虑不同短路类型、短路阻抗以及负荷特性情况下的适用性,尤其是三相短路故障时,恒功率非线性负荷与电源之间完全断开,无法支撑有功功率恒定的特殊情况。本文针对上述情况,对阻抗符号法进行了改进,提出基于 $\Delta P$ 变化趋势的改进阻抗符号法。经过仿真验证和现场波形分析,改进方法能够有效提高非线性系统中暂降源定位的正确率。EA

(收稿日期: 2023-09-11)

## 参考文献

- [1] A.C. Parsons, W.M. Grady, et al. A Direction Finder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 1081-1086.
- [2] D. G Hart, W Peterson, D. Uy, et al. Tapping protective relays for power quality information, IEEE Comput. Appl. Power, 2000, 13(1), 45-49.
- [3] A. K. Pradhan, A. Routray, Applying distance relay for voltage sag source detection, IEEE Trans. Power Delivery, 2005, 20(1), 529-531.
- [4] Li C, Tayjasanant T, Xu W. Method for voltage sag source detection by investigating slope of the system trajectory[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(3): 367-372.
- [5] T. Tayjasanant, Chun Li, Wilsun Xu. A Resistance Sign-Based Method for Voltage Sag Source Detection. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(4): 2544-2551.