

基于单端口网络内电阻极性的电压暂降追源方法

时 昀, 倪 冰

(国网盱眙县供电公司, 江苏 盱眙 211700)

摘 要: 电压暂降追源即确定电压暂降扰动源相对于监测装置的位置。本文以对电网故障的分析为切入点, 应用端口网络理论, 将任何复杂电网在电压暂降源监测装置安装处等效为 2 个“有源单端口网络”, 视电网故障为“有源单端口网络”的外部扰动, 测量并计算出“有源单端口网络”的内电阻, 依据“有源单端口网络”的内部电阻的极性, 对电压暂降源相对于电压暂降源监测装置的位置进行判断。内电阻为正, 电压暂降源与参考方向相反, 即上游; 内电阻为负, 电压暂降源与参考方向相同, 即下游。给出了内部电阻的计算方法。本文所提出的电压暂降源定位方法具有坚实的理论基础。仿真结果表明, 该方法对辐射式、非辐射式, 以及中性点有效接地和非有效接地的混合电网的电压暂降源定位准确率达到 100%。是一种非常实用的电压暂降源定位法。

关键词: 电能质量; 电压暂降; 源定位; 序分量; 空间矢量

0 引言

电压暂降, 是指供电电压均方根值在短时间下降至额定电压幅值的 90%~10%, 典型持续时间为 10ms~1min 的一种现象^[1]。在现有的电能质量投诉中, 电压暂降问题最为严重, 占投诉比 80%^[2]。频频出现的电压暂降问题会对工业生产, 特别是一些自动化程度很高的设备产生严重影响, 以至于经济利益上蒙受巨大损失^[3-4]。电能是一种由供、用电双方共同保证质量的特殊产品。对电压暂降源定位进行研究的意义在于, 当电压暂降产生时, 对引起暂降的源头进行追溯, 可以为解决相应问题给予指导, 并为界定供、用电双方责任给出依据。

暂降源定位, 就是确定引起电压暂降的扰动源位于监测装置的哪一侧^[5]。现有的暂降源定位法依其原理可归为两类。第一类, 基于扰动功率流的方法。文献[6]最早提出了利用扰动能量和扰动功率初始峰值对电压暂降源进行定位的方法, 文献[7]用小波分析对该方法进行了改进, 文献[8,9]在该方法基础上引入扰动无功功率和无功能量, 使之得到拓展。第二类, 基于阻抗的方法。系统轨迹斜率法^[5]与电流实部极性法^[10-12], 较适用于对称故障的定位。文献[13]提出零序分量的判别法, 对非对称扰动源定位准确度有所提高, 但受算法限制定位准确

率仍难满足要求。等效阻抗实部极性法^[14]易受故障周期选择的影响。距离阻抗继电器法^[15-16]适用于非辐射网络。文献[17]提出基于 Hilbert 变换的复阻抗判定法仅限于三相对称故障的判定。在此之外, 文献[18]提出综合的判断方法为暂降源定位提供了新的思路。文献[19,20,21]表明现有暂降源定位方法能准确定位对称故障引起的电压暂降事件, 对非对称故障引起的暂降定位准确率不高, 而且不适用于非辐射式电网。因此对暂降源进行定位的方法需要进一步的研究。

1 确定电压暂降位置的思路

1.1 电压暂降源位置的定义

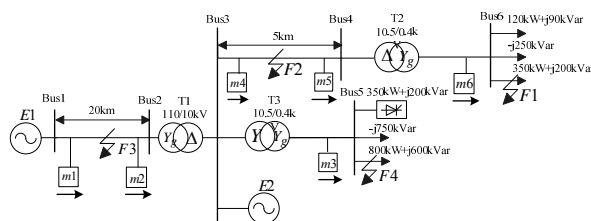


图 1 单回路放射式电网

电压暂降源定位就是确定电压暂降源在监测装置的哪一侧^[5]。为确定电压暂降源相对监测装置的位置, 要选定一个“参考方向”。上文中介绍了现有电压暂降源定位方法都“规定”电网正常运行时基波有功电流的实际流动方向为参考方向。在该

参考方向选定后,从监测装置安装处观察,电压暂降扰动源位置与参考方向的相同时,暂降源位于“下游”;反之则认定为“上游”。对于单电源辐射式配电网(如图 1),或是用户侧有自发电的双侧电源辐射式电网(如图 1 中用户侧电源 E_2 仅供用电户自给用电,不会向供电侧反送电),有功电流方向由电源指向负荷,参考方向是易于选定,且方向不变的。在这种确定参考方向的条件下,扰动在监测装置的上游即扰动位于监测装置的供电侧;反之,则位于监测装置的用户侧。但对于环网(如图 2)或是双侧电源电网,实际有功电流方向与负荷大小、分布与电源的出力有关。即实际情况是随时间变化,各个监测点的参考方向不是“确定”的。因此,即使已做出了上下游的定位判断,仍不能确定暂降源相对监测装置的位置。所以,由此看来,现有的电压暂降源定位方法都不适用于包括环网在内的混合电网。为使该问题得到解决,本文提出的电压暂降源定位法使用监测装置的电流和电压互感器的极性(同名端)“确定”有功电流参考方向。正常情况下我们“规定”负荷消耗有功功率为有功电流的正参考方向,与 mi 监测点的实际有功电流的流向无关,如图 2 中 mi 下方的“ \rightarrow ”。在参考方向明确的条件下,暂降源的相对位置很容易确定,将 mi 监测点合理分布,即可准确定位电压暂降源。因此,本文所提方法能适用于包括环网在内的混合电网。

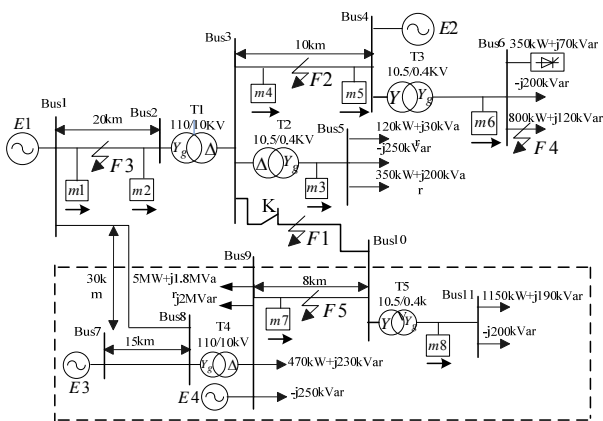


图 2 手拉手供电网络

1.2 确定电压暂降位置的思路

电力系统中,电压暂降的起因是电网中存在扰动(如:短路故障、大电机启动、电容的投切等)。

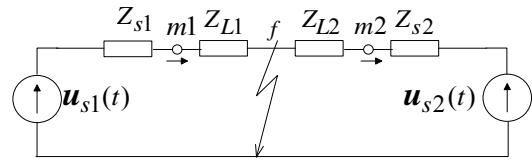


图 3 有源单端口网络等值电路

以电力系统中典型的短路故障来说,在电力系统中几乎不可能同时出现两个及以上的短路故障。因此,我们在分析时认为电力系统中只存在一个短路故障的情况,并将电力系统中的元件认定为线性的。依据线性电路端口网络理论,对任何电网从电压暂降源(短路点 f)向两侧电能质量监测装置 $m1$ 和 $m2$ 观察,不管电网的拓扑结构多么复杂,对外部电路而言,都可以分别在监测装置 $m1$ 和 $m2$ 处等效为 2 个有源单端口网络。因配电网短路容量不是很大,可近似认为端口网络中的电源为理想电源。因此,对于外部电路,不管有源端口网络的内有多复杂,总可以用一个理想电压源和一个线性阻抗串联的有源支路来代替,如图 3。图 3 中:

$u_{s1}(t)=[u_{as1}(t), u_{bs1}(t), u_{cs1}(t)]^T$ 为供电侧等效电源矢量, Z_{s1} 则定义为系统供电侧等效的内阻抗,

$u_{s2}(t)=[u_{as2}(t), u_{bs2}(t), u_{cs2}(t)]^T$, Z_{s2} 分别为用电侧等效电源矢量和内阻抗, Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为扰动源到 2 个监测点的线路阻抗, $m1$ 和 $m2$ 是 2 个监测点, 下方“ \rightarrow ”表示 mi 监测点有功电流的参考方向, f 为短路故障(即电压暂降扰动源)点。在 mi 点监测到的电压和电流矢量为:

$$\begin{cases} u_{mi}(t)=[u_{ami}(t), u_{bmi}(t), u_{cmi}(t)]^T \\ i_{mi}(t)=[i_{ami}(t), i_{bmi}(t), i_{cmi}(t)]^T \end{cases} \quad (1)$$

其中: $u_{ami}(t)$ 、 $u_{bmi}(t)$ 、 $u_{cmi}(t)$ 和 $i_{ami}(t)$ 、

$i_{bmi}(t)$ 、 $i_{cmi}(t)$ 分别为 mi 监测点测得三相系统的电压和电流。那么,在本文确定的正参考方向条件下,我们从 mi 监测点通过外部短路故障(电压暂降源)点的扰动,可测得有源单端口网络等值电路的等效内阻抗为:

$$Z_{emi}(t)=\Delta u_{mi}(t)/\Delta i_{mi}(t)=R_{emi}(t)+jX_{emi}(t) \quad (2)$$

式(2)中, $\Delta \mathbf{u}_{mi}(t) = \mathbf{u}_{dmi}(t) - \mathbf{u}_{pmi}(t)$ 为 mi 监测点的扰动电压和 $\Delta \mathbf{i}_{mi}(t) = \mathbf{i}_{dmi}(t) - \mathbf{i}_{pmi}(t)$ 为 mi 监测点的扰动电流矢量, $\mathbf{u}_{pmi}(t) = [u_{apmi}(t), u_{bpmi}(t), u_{cpmi}(t)]^T$ 和 $\mathbf{i}_{pmi}(t) = [i_{apmi}(t), i_{bpmi}(t), i_{cpmi}(t)]^T$ 分别为扰动前(即故障前)在 mi 监测点测得的电压矢量和电流矢量。 $\mathbf{u}_{dmi}(t) = [u_{admi}(t), u_{bdmi}(t), u_{cdmi}(t)]^T$ 为扰动发生期间(即故障期间)在 mi 监测点测得的电压矢量 $\mathbf{i}_{dmi}(t) = [i_{admi}(t), i_{bdmi}(t), i_{cdmi}(t)]^T$ 为扰动发生期间(即故障期间)在 mi 监测点测得的电流矢量。

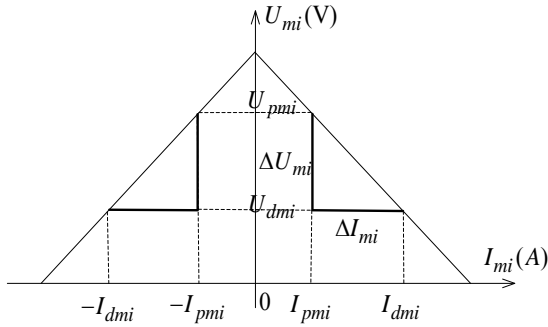


图4 有源单端口网络在 mi 监测点的内部阻抗特性

依据有源单端口网络的特性,若电流由有源单端口网络向外部电路流出,即发出有功功率,等值阻抗的实部 R_{emi} 为负,阻抗特性如图4中第一象限;若电流由外部流入有源单端口网络,即消耗有功功率,等值阻抗的实部 R_{emi} 为正,阻抗特性如图4中第二象限。按照本文对有功电流参考方向的规定:电阻消耗有功功率为有功电流的正参考方向。因此,在 mi 监测点监测到的 R_{exmi} 计算值等于从电压暂降扰动源点向监测点 mi 观察, mi 点等效端口网络的内部电阻值,符号决定于 mi 点的参考方向,当参考方向是从端口网络向外时,符号为“负”,如图3左侧 $m1$ 点端口网络,故障扰动源在与监测点有功电流参考方向的相同方向,即下游;相反,参考方向是从外部指向端口网络内部时,符号为“正”,如图3右侧 $m2$ 点端口网络,故障扰动源在与监测点有功电流参考方向的反方向,

向,即上游。即:

$$\begin{cases} R_{emi} > 0, & \text{在监测点参考方向的反方向,即上游} \\ R_{emi} < 0, & \text{在监测点参考方向的相同方向,即下游} \end{cases} \quad (3)$$

根据有源端口网络理论,任何网架结构都可以视为图3所示等效网络模型,模型参数仅与电压暂降源扰动点在网架结构中的位置、电压暂降源监测装置的安装位置、网架结构和电网中各个元件的参数有关。因此,该方法适用于任何网架结构电网(辐射式、环式、单回路、单电源、多电源)的暂降源定位判断。

2 阻抗实部的计算方法

有源单端口网络等效电路内阻抗的实部可由式(4)计算得到:

$$R_{emi}(t) = \Delta \mathbf{u}_{mi}(t) / \Delta \mathbf{i}_{mi}(t) \cos \varphi_{\Delta}(t) \quad (4)$$

其中: $\varphi_{\Delta}(t)$ 为扰动电压矢量 $\Delta \mathbf{u}_{mi}(t)$ 与扰动电

流矢量 $\Delta \mathbf{i}_{mi}(t)$ 之间的夹角。

为求得电压和电流扰动矢量 $\Delta \mathbf{u}_{mi}(t)$ 和 $\Delta \mathbf{i}_{mi}(t)$,

我们需要对故障期间与故障前电压和电流波形进行同步采样,如图5。这样,计算得:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{xmi}(n) = \mathbf{u}_{xdmi}(n) - \mathbf{u}_{xpmi}(n - KN) \\ \Delta \mathbf{i}_{xmi}(n) = \mathbf{i}_{xdmi}(n) - \mathbf{i}_{xpmi}(n - KN) \end{cases} \quad (5)$$

这里, N 为一个基波周期 T 的采样点数, $n=0,1,2,\dots$, K 取正整数,是故障期间与故障前电压和电流波形的采样间隔基波周期数, $K=1$ 或 2, 或 3, (如图5中, $K=3$) $x \in [a, b, c]$, a, b, c 分别表示三相。由此得:

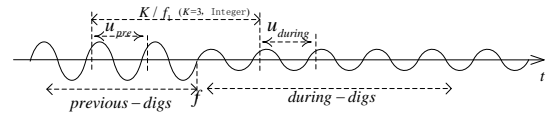


图5 故障前后同步采样示意图

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{mi}(n) = [\Delta u_{ami}(n), \Delta u_{bmi}(n), \Delta u_{cmi}(n)]^T \\ \Delta \mathbf{i}_{mi}(n) = [\Delta i_{ami}(n), \Delta i_{bmi}(n), \Delta i_{cmi}(n)]^T \end{cases} \quad (6)$$

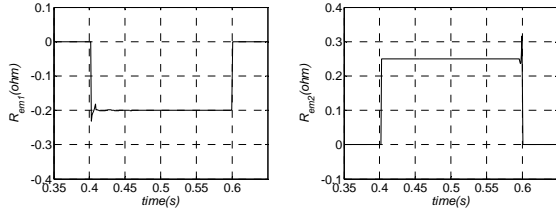
若暂降源是由对称扰动引起的,则 $\Delta \mathbf{u}_{mi}(n)$ 和

$\Delta \mathbf{i}_{mi}(n)$ 是正序三相对称的,可由式(4)计算得到:

$$R_{emi}(n) = \Delta \mathbf{u}_{mi}(n)^2 / \Delta p_{mi}(n) \quad (7)$$

其中：瞬时扰动有功功率 $\Delta p_{mi}(n)$ 等于扰动电压和电流矢量的点积， $\Delta p_{mi}(n) = \Delta \mathbf{u}_{mi}(n)^T \cdot \Delta \mathbf{i}_{mi}(n)$ ；扰动电压矢量的模长为 $\Delta \mathbf{u}_{mi}(n) = \sqrt{\Delta \mathbf{u}_{mi}(n)^T \cdot \Delta \mathbf{u}_{mi}(n)}$ 。

图 3 中 mi 点测得的有源单端口网络等效电路内电阻值如图 6 曲线，



(a)单相短路 m1 点 (b)单相短路 m2 点

图 6 三相短路故障 mi 测得的内电阻 Remi

若电压暂降源是不对称扰动(如两相短路)， $\Delta \mathbf{u}_{mi}(n)$ 和 $\Delta \mathbf{i}_{mi}(n)$ 是不对称的，含有正序和负序分量，若是两相接地短路和单相接地短路，除正序和负序外还有零序分量。不对称电压暂降源的共同特点是 $\Delta \mathbf{u}_{mi}(n)$ 和 $\Delta \mathbf{i}_{mi}(n)$ 中有负序分量，而电网正常运行时没有负序分量，因此，由式(5)得：

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{mi}^-(t) = \mathbf{u}_{dmi}^-(t) = [\mathbf{u}_{admi}^-(t), \mathbf{u}_{bdmi}^-(t), \mathbf{u}_{cdmi}^-(t)]^T \\ \Delta \mathbf{i}_{mi}^-(t) = \mathbf{i}_{dmi}^-(t) = [\mathbf{i}_{admi}^-(t), \mathbf{i}_{bdmi}^-(t), \mathbf{i}_{cdmi}^-(t)]^T \end{cases} \quad (8)$$

即不对称电压暂降负序扰动电压和电流矢量就是电压暂降期间的负序电压和电流矢量。这里，上标“-”表示“负序”。显然，按式(8)计算负序扰动电压和电流要比按式(6)计算正序扰动电压和电流更为简单。按照对称分量理论，式(9)和式(10)可提取得到监测点的电压和电流信号的负序对称分量如式(9)、式(10)所示：

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{admi}^-(t) = \mathbf{u}_{admi}(t) + \alpha^2 \mathbf{u}_{bdmi}(t) + \alpha \mathbf{u}_{cdmi}(t) \\ \mathbf{u}_{bdmi}^-(t) = \mathbf{u}_{bdmi}(t) + \alpha^2 \mathbf{u}_{cdmi}(t) + \alpha \mathbf{u}_{admi}(t) \\ \mathbf{u}_{cdmi}^-(t) = \mathbf{u}_{cdmi}(t) + \alpha^2 \mathbf{u}_{admi}(t) + \alpha \mathbf{u}_{bdmi}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{admi}^-(t) = \mathbf{i}_{admi}(t) + \alpha^2 \mathbf{i}_{bdmi}(t) + \alpha \mathbf{i}_{cdmi}(t) \\ \mathbf{i}_{bdmi}^-(t) = \mathbf{i}_{bdmi}(t) + \alpha^2 \mathbf{i}_{cdmi}(t) + \alpha \mathbf{i}_{admi}(t) \\ \mathbf{i}_{cdmi}^-(t) = \mathbf{i}_{cdmi}(t) + \alpha^2 \mathbf{i}_{admi}(t) + \alpha \mathbf{i}_{bdmi}(t) \end{cases} \quad (10)$$

对监测点的电压和电流信号每基波周期采样 N 点，并且取 N 为 3 的整数倍，由 $\alpha = e^{j2\pi/3}$ 得负到序电压、电流采样值的离散表达式如式(11)、式(12)所示：

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{admi}^-(n) = \mathbf{u}_{admi}(n) + \mathbf{u}_{bdmi}(n - N/3) + \mathbf{u}_{cdmi}(n + N/3) \\ \mathbf{u}_{bdmi}^-(n) = \mathbf{u}_{bdmi}(n) + \mathbf{u}_{cdmi}(n - N/3) + \mathbf{u}_{admi}(n + N/3) \\ \mathbf{u}_{cdmi}^-(n) = \mathbf{u}_{cdmi}(n) + \mathbf{u}_{admi}(n - N/3) + \mathbf{u}_{bdmi}(n + N/3) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{admi}^-(n) = \mathbf{i}_{admi}(n) + \mathbf{i}_{bdmi}(n - N/3) + \mathbf{i}_{cdmi}(n + N/3) \\ \mathbf{i}_{bdmi}^-(n) = \mathbf{i}_{bdmi}(n) + \mathbf{i}_{cdmi}(n - N/3) + \mathbf{i}_{admi}(n + N/3) \\ \mathbf{i}_{cdmi}^-(n) = \mathbf{i}_{cdmi}(n) + \mathbf{i}_{admi}(n - N/3) + \mathbf{i}_{bdmi}(n + N/3) \end{cases} \quad (12)$$

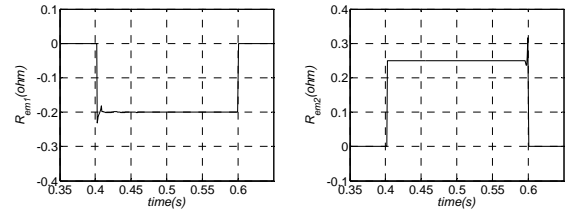
由式(8)可计算得负序有源单端口网络的等值内电阻：

$$R_{emi}(n) = \|\Delta \mathbf{u}_{mi}^-(n)\|^2 / \Delta p_{mi}^-(n) \quad (13)$$

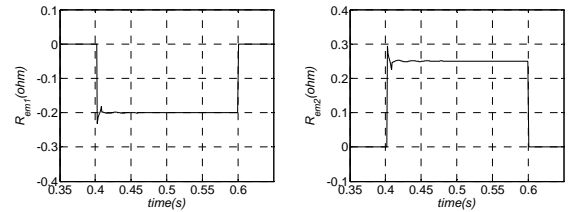
其中：瞬时负序扰动有功功率 $\Delta p_{mi}^-(n)$ 等于负序扰动电压和电流矢量的点积， $\Delta p_{mi}^-(n) = \mathbf{u}_{dmi}^-(n)^T \cdot \mathbf{i}_{dmi}^-(n)$ ；负序扰动电压矢量的模长为 $\mathbf{u}_{dmi}^-(n) = \sqrt{\mathbf{u}_{dmi}^-(n)^T \cdot \mathbf{u}_{dmi}^-(n)}$ 。

用图 3 作为仿真模型， $Z_1 = 0.2 + j1.8\Omega$ 、 $Z_2 = 0.25 + j2\Omega$ 、 $Z_{L1} = 0.3 + j2.6\Omega$ 、 $Z_{L2} = 0.2 + j2\Omega$ ，故障时刻 0.4~0.6s。

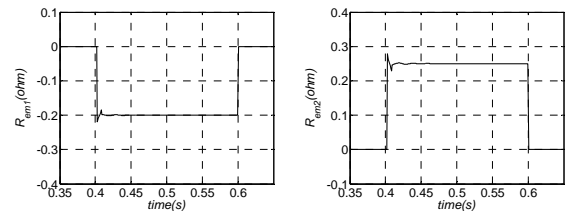
图 4 中 mi 点的等值阻抗监测值如图 7 中曲线所示：



(a)单相短路 m1 点 (b)单相短路 m2 点



(c)两相接地 m1 点 (d)两相接地 m2 点



(e)两相短路 m1 点 (f)两相短路 m2 点

图 7 不对称故障时测得的内电阻值 Remi

从图 6 和图 7 曲线可看出，内部阻抗实部 R_{emi} 的正负能准确判断电压暂降源的位置。图 6a、图 7a、c、e 是 m1 监测点在 4 种故障时监测到的内部

阻抗实部 R_{emi} 曲线，都为负值，扰动源与 $m1$ 点参考方向的同向，即下游；图 6b、图 7b、d、f 是 $m2$ 监测点在 4 种故障时监测到的内部阻抗实部 R_{emi} 曲线，都为正值，扰动源与 $m2$ 点参考方向方向，即上游。图中我们得到四种故障状态下稳态 R_{emi} 的大小是相等的，如 $m1$ 监测点处 R_{em1} 计算值(图 6a、图 7a、c、e)都等于 -0.2Ω ，即 $R_{em1} = -R_1$ ；而在 $m2$ 监测点处 R_{em2} 计算值(图 6b、图 7b、d、f)都等于 0.25Ω ，即 $R_{em2} = -R_2$ 。以上验证了本文定位理论的正确性，即在 mi 监测点监测到的 R_{emi} 计算值等于从电压暂降扰动源点向监测点 mi 观察， mi 点等效端口网络的内部电阻值，符号决定于 mi 点的参考方向，当参考方向是从端口网络向外时，符号为“负”，相反，参考方向是从外部指向端口网络内部时，符号为“正”。

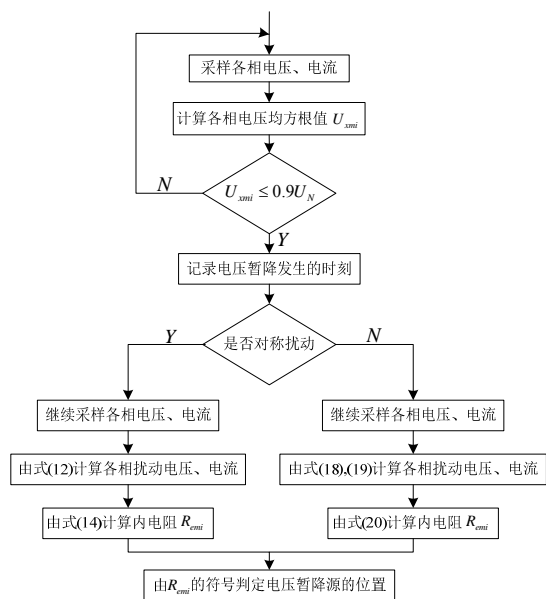


图 8 所提方法的执行框图

虽然以上结论是假设图 3 是线性电路推得的，但“有源端口网络”等值阻抗的计算值与负荷无关，只要准确测量出监测点基波电压、电流的扰动矢量，就能准确计算出等值阻抗，因此，本文所提方法也同样适用于电路中有非线性负载(元件)的情况。综上所述，电压暂降源定位可遵循图 8 框图步骤。

3 仿真实验

3.1 辐射式电网

用本文所提方法(SIR)对图 1 辐射式电网进行

仿真，仿真判断结果见表 1，定位准确率为 100%。

表 1: SIR 暂降源定位方法的仿真判断结果

故障类型	F(1)/F(1,1)/F(2)/F(3)			
	F1	F2	F3	F4
m1	*/*/*/*	*/*/*/*	*/*/*/*	*/*/*/*
m2	*/*/*/*	*/*/*/*	*/*/*/*	*/*/*/*
m3	↑/↑/↑/↑	*/*/*/*	*/*/*/*	↓/↓/↓/↓
m4	↓/↓/↓/↓	*/*/*/*	*/*/*/*	↑/↑/↑/↑
m5	↓/↓/↓/↓	*/*/*/*	*/*/*/*	↑/↑/↑/↑
m6	↓/↓/↓/↓	*/*/*/*	*/*/*/*	↑/↑/↑/↑

图 1 中 E1 是无限大电源，短路容量 1000MVA，E2 的容量为 100KVA，实际发出有功功率 33KW。3 个变压器的容量选取为 6.3MVA、1MVA 和 1.25MVA，其连接方式如图 1 所示。在所接负荷中，T3 的负载侧连接一可控整流源作为非线性负荷。系统接地情况为：110kV、380V 侧中性点接地，10kV 侧中性点不接地。仿真设置有 4 个故障点和 6 个监测点。F1、F2、F3 和 F4 表示 4 个故障点，m1、m2、m3、m4、m5 和 m6 表示 6 个监测点。每个故障点都以 4 种故障类型进行仿真，依次为单相接地短路、两相接地短路、两相短路和三相短路。相应的故障类型在表 1 的“()”内表示，如 F1(1)、F2(1,1)、F3(2)和 F4(4)分别表示 F1 单相接地、F2 两相接地短路、F3 两相短路和 F4 点三相短路。该仿真实验给定的参考方向如图 1 监测装置 mi 下方“→”所示。表 1 中“↓”表示下游，“↑”表示上游，“*”表示 mi 观测点三相电压均未达到电压暂降标准，不作暂降源定位判断。

3.2 非辐射式电网

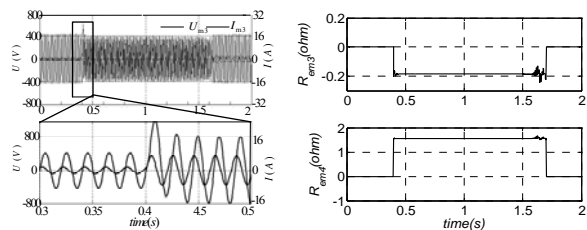
本文所选手拉手供电网如图 2 所示，仿真参数如下：E1、E3 为无穷大电源，短路容量分别为 1000MVA、1200MVA。E2、E4 选型分别为 QR-60-2、QR-30-2，实际出力为 52KW、25KW， x'_d 依次为 21、21.7。变压器容量分别为 6.3MW、1MW、1.25MW、6.3MW、1.25MW，其连接方式及所接负荷见图 2。用本文所提方法对图 2 所示手拉手供电网进行仿真，8 个观测点参考方向如图 2 中“→”所示，仿真判断结果见表 2，定位准确率为 100%。证明本文所提方法适用于任何网架结构。

表 2: SIR 暂降源定位方法的仿真判断结果

故障 类型	F(1)/F(1,1)/F(2)/F(3)			
	m1	m2	m3	m4
F1	*/*/*/*	*/*/*/*	*/↑/↑/↑	↑/↑/↑/↑
F2	*/*/*/*	*/*/*/*	*/↑/↑/↑	↓/↓/↓/↓
F3	↓/↓/↓/↓	↑/↑/↑/↑	↑/↑/↑/↑	↑/↑/↑/↑
F4	*/*/*/*	*/*/*/*	↑/↑/↑/↑	↓/↓/↓/↓
F5	*/*/*/*	*/*/*/*	*/↑/↑/↑	↑/↑/↑/↑
	m5	m6	m7	m8
F1	↑/↑/↑/↑	*/↑/↑/↑	↓/↓/↓/↓	*/↑/↑/↑
F2	↑/↑/↑/↑	*/↑/↑/↑	↓/↓/↓/↓	*/↑/↑/↑
F3	↑/↑/↑/↑	↑/↑/↑/↑	*/↓/↓/↓	↑/↑/↑/↑
F4	↓/↓/↓/↓	↓/↓/↓/↓	*/*/*/*	*/↑/↑/↑
F5	↑/↑/↑/↑	*/↑/↑/↑	↓/↓/↓/↓	*/↑/↑/↑

3.3 大电机启动

大电机启动的仿真模型，由图 1 所示放射电网中 T2 变压器的 350+j200KVA 负荷替换为等容量的异步电机构成。图 9(a)为异步电机在 0.4s 启动时观测点 m3 测量到的电压、电流波形。图 9(b)为异步电机启动时 m3 和 m4 测量点得到的端口网络内部电阻值。 $R_{em3}=-0.19\Omega<0$ ，该扰动源位于 m3 下游； $R_{em4}=1.68\Omega>0$ ，扰动源位于 m4 上游，与实际情况相符。其余观测点电压降低未达到电压暂降源定义范围(小于 90%额定相电压)，不作定位判断。



(a) m3 电压电流波形图 (b) m3\m4 观测点的等值电阻
图 9 感应电机启动

4 结论

从电压暂降源点向电网两侧观察，任何电网都可以在电压暂降源监测装置安装处分别等效为 2 个有源单端口网络，并都可以用有源单端口网络等效代替。按照有源单端口网络内电阻的符号，可准确地定位暂降源的方向。内电阻的符号为正时，扰动在监测点参考方向的相反方向，即上游；内电阻的符号为负时，扰动在监测点参考方向的相同方向，即下游。所提电压暂降源定位方法依据线性电路端口网络理论，有坚实的理论基础，因此，可确定性地定位暂降源。由于本文所提定位方法仅通过基波电压和电流计算、判断，与电路中的负载性质(线

性与非线性)无关，因此，适用于有非线性负荷电网的电压暂降源定位。所提方法是基于有源端口网络理论，从扰动源点向监测点观察，任何复杂网架结构的电网在电压暂降源监测装置的安装位置都可以等效为一个有源单端口网络，因此，该方法适用于任何网架结构电网(辐射式、环式、单回路、单电源、多电源)的暂降源定位判断。虽然本文所提方法是按照电网故障扰动推导分析而得的结论，但该方法同样适用于其它扰动(如：电容投切、变压器投切、大电机启动等)的暂降源定位。

参考文献：

[1] Recommended practice for monitoring electric power quality[S]. IEEE Std. 1159-1995.draft 5, may, 1995.

[2] Mark F. Granagham, David R. Mueller, Marek J. Samotyj. Voltage Sags in Industrial Systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications,1993, 29(2): 397-403.

[3] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63-69.

[4] Samotyj M J, Mielezarski W, Wasiluk-Hassa M M. Electric Power for the digital age[C]. 10 th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Brazil, 2002,1: 276-282.

[5] C. Li, T. Tayjasanant, W. Xu, et al. Method for voltage-sag detection by investigating slope of the system trajectory[J]. IEE. Proc. Gen. Transm. Distrib. 2003, 150(3), 367-372.

[6] A.C.Parsons, W.M.Grady, E.J.Powers, et al. A direction finder for power quality disturbances based upon disturbance power and energy[J]. IEEE Trans. Power Delivery. 2000, 15(3): 1081-1086.

[7] 杨杰, 王金浩, 章雪萌, 等. 基于小波多分辨率分析的电压暂降源定位研究[J], 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 90-95.

[8] Roberto Chouhy Leborgne, Readlay Makaliki. Voltage sag source location at grid interconnections: a case study in the zambian system[C]. IEEE Lausanne PowerTech. 2007, 1852-1857.

[9] Wei Kong, Xinzhou Dong, Zhe Chen. Voltage sag source location based on instantaneous energy detection[C]. Electric Power System Research. 2008, 78: 1889-1898.

[10] Noraliza Hamzah, Azah Mohamed, Aini Hussain. A new

- approach to locate the voltage sag source using real current component[J]. Electric Power System Research. 2004, 72(2): 113-123.
- [11] Noraliza Hamzah, Azah Mohamed, Aini Hussain. Locating voltage sag source at the point of common coupling in industrial distribution systems[C]. IEEE PEDS 2005, 532-537.
- [12] Gao Jie, Li Qun-zhan, Wang Jia. Method for voltage sag disturbance source location by the real current component[J]. Power and Energy Engineering Conference, 2011, 1-4.
- [13] Polajzer B, Stumberger G, Seme S, et al. Detection of voltage sag sources based on instantaneous voltage and current vectors and orthogonal Clarke's transformation [J]. IET Gener. Transm. Distrib, 2008, 2(2), 219—226.
- [14] Thavatchai Tayjasanant, Chun Li, Wilsun Xu. A resistance sign-based method for voltage sag source detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005, 20(4): 2544-2551.
- [15] Ashok Kumar, Aurobinda Routray. Applying distance relay for voltage sag source detection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005, 20(1): 529-531.
- [16] Yu Yilin, Xu Yonghai, Research of method for voltage sag source detection in power distribution network[C]. 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011, 485-488.
- [17] 程志友, 王雪菲, 徐佳. 一种基于复阻抗的电压暂降定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 149-154.
- [18] 吕干云, 吴育聪. 电压暂降源定位的优化综合判据法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 66-71.
- [19] 何维国, 董瑞安, 张孝银, 等. 配电网中电压暂降源定位方法比较[J]. 电测与仪表, 2011, 48(8): 53-58.
- [20] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别特征的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 105-110.
- [21] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.

作者简介:

时 昀 (1974-), 女, 江苏淮安人, 高级工程师, 长期从事电力生产技术及管理工作;

倪 冰 (1980-), 男, 江西乐平人, 高级工程师, 长期从事电力生产技术及管理工作。