

文章编号:1672-3961(2009)05-0115-05

配电系统电压跌落源定位新方法

高洪霞,徐明铭,李可军,谭震宇

(山东大学电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:定义阻抗可由干扰引起的电压电流增量计算得到,其实部符号可表明干扰源在测试点上游还是下游;定义阻抗的实部符号为正时说明干扰源在监测点上游;为负时说明干扰源在监测点下游.基于定义阻抗提出了一种定位电压跌落源的新方法.为解决使用同一周期的数据可能得到相反结论的问题,利用多个周期的数据,并通过最小二乘法进行数据处理,以提高该定位方法的精确度.仿真实验的结果均验证了该方法的有效性.

关键词:电能质量;电压跌落;电压跌落源定位;最小二乘法;定义阻抗

中图分类号:TM713 **文献标志码:**A

A new detecting method for the voltage sag source in a distribution system

GAO Hong-xia, XU Ming-ming, LI Ke-jun, TAN Zhen-yu

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Calculating the increments of the voltage and current caused by disturbance can get the defined impedance. The sign of the real part of the defined impedance can reveal if the disturbance is from upstream or downstream. A positive sign showed that the source of sag was upstream, and the negative sign showed that the source of sag was downstream. A new and effective detecting method for the voltage sag source was proposed based on the defined impedance. In order to solve the problem that using a single during an event cycle could yield unreliable results, the data of multiple cycles were processed by using the least-squares method. Simulation results showed that this method was effective.

Key words: power quality; voltage sag; voltage sag source detection; least-squares method; defined impedance

0 引言

电压跌落是指工频电压降低至0.1~0.9 p. u.之间,持续时间在0.5个周波到1 min的暂态电能质量问题^[1-2].系统内造成电压跌落的主要原因是线路故障或大型感性负荷启动引起短时线路电流突然增大几倍甚至几十倍的额定电流,导致临近变压器电压和公共连接点电压,甚至发电机端电压短时下降^[3].电压跌落虽然持续时间短,但严重干扰了许多现代化设备的正常工作.

电压跌落扰动源定位问题是一个日益凸现并引起了工业界和学术界强烈兴趣的问题.多年来,国内外对于电压跌落问题的研究,主要集中在补偿技

术^[4]、测量技术和装置的开发^[5]上以及跌落类型的自动分类^[6]、数据压缩与去噪等,而对于电压跌落源的定位研究比较少^[7-8].随着电力市场在国内的推广,电力企业越来越关心电能质量问题的责任量化,其中对用户危害最大的电压跌落的责任归属必将成为研究的热点^[9-10].

本文提出了一种新的电压跌落源定位方法.此方法由定义阻抗得出,采用电压跌落时的正序基频阻抗对电压跌落源进行定位.正序基频阻抗中的电阻部分的符号可以用于确定干扰源的位置.理论分析和仿真实验验证了该方法的有效性.

1 理论分析

如图1所示,电能质量监测器可以获得M点电

收稿日期:2008-11-21

基金项目:山东省中青年科学家科研奖励基金资助项目(2006BS05002);山东省自然科学基金资助项目(Y2007F31)

作者简介:高洪霞(1962-),女,山东临沂人,硕士,高级工程师,研究方向为电工理论与新技术. E-mail: gaohongxia@sdu.edu.cn

压跌落的电压和电流波形图. 在实际中, M 点是公共客户端与系统的连接点. 在理想状态下, 电压跌落源定位的算法可在数字仪表中执行, 数字仪表接在 M 点处. 这样, 供电单位和用户都可以得到一份关于干扰的详细报告, 包括干扰的激烈程度和发展趋势. 这些信息对于解决双方由于干扰而引起的经济纠纷有很大的帮助.

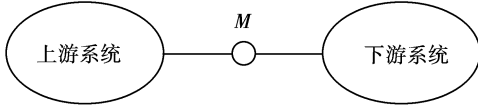


图1 电压跌落源定位
Fig.1 Voltage sag source detection

1.1 原理依据

图1所示系统的等效回路如图2所示. 这是一个基频正序回路. Z_1 和 E_1 是等效电阻和左侧电压源(即供电系统), Z_2 和 E_2 是右侧客户端的等效电阻和电压源. 该等效电路在线性条件下成立. 在点 M 处测量电压和电流波形.

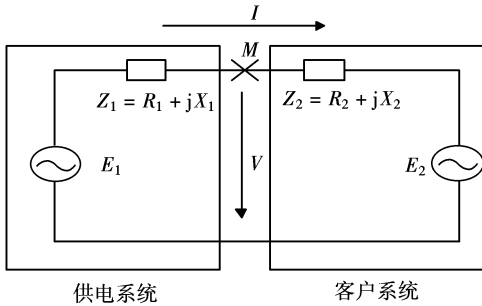


图2 电压跌落分析的等效回路
Fig.2 Equivalent circuit for voltage sag analysis

假定干扰发生在客户端并导致 M 点处的电压跌落, 检测从干扰前开始, 并满足公式:

$$V = E_1 - I \cdot Z_1 \tag{1}$$

电压和电流分别变为 $V + \Delta V$ 和 $I + \Delta I$, ΔV 和 ΔI 是由干扰引起的电压电流增量. 假定, 供电端的参数 Z_1 和 E_1 在干扰下保持不变, 可列出等式:

$$V + \Delta V = E_1 - (I + \Delta I) Z_1 \tag{2}$$

由于干扰同时发生于供电端和客户端两端的可能性几乎为0, 上述关于无干扰端的参数恒定的假设是成立的. 用公式(2)减去公式(1)可得到无干扰端(供电端)增益阻抗为

$$Z_1 = -\frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{3}$$

同理, 当干扰发生于供电端, 客户端增益阻抗可表示为

$$Z_2 = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{4}$$

由于电阻始终是正的, 因此可以通过确定无干扰端增益阻抗实部的符号来判断电压跌落源的方向, 这形成了本文方法的基础:

(1) 当观测点发生电压跌落时, 用下列公式计算出增益阻抗 Z_e :

$$Z_e = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{\text{during}} - V_{\text{pre}}}{I_{\text{during}} - I_{\text{pre}}} = R_e + jX_e \tag{5}$$

其中 $(V_{\text{pre}}, I_{\text{pre}})$ 和 $(V_{\text{during}}, I_{\text{during}})$ 分别为电压跌落前和电压跌落时的基频正序电压、电流;

(2) 如果 $R_e > 0$, 则跌落源在供电端;

(3) 如果 $R_e < 0$, 则跌落源在客户端.

注意, 上述结论在电流方向如图2所示时有效. 在实践中, 可将电流方向定位与有功方向同向. 例如, 当 $R_e > 0$ 时, 干扰源在监测点上游方向.

该方法可在阻抗平面中表示, 如图3所示. 如果 Z_e 落入第一或者第四象限 ($R_e > 0$), 跌落源在供电端; 如果阻抗落入第二或者第三象限 ($R_e < 0$), 跌落源在客户端. 由于增益阻抗在基频阻抗的影响下一般呈电抗性, 所以 Z_e 一般落于第一或者第三象限.

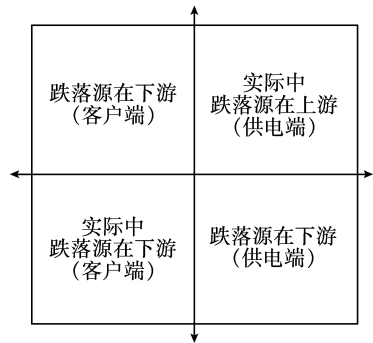


图3 计算结果落在阻抗平面分布
Fig.3 Impedance plane illustration for result interpretation

1.2 提高定位方法精度

上述方法在实践运用中存在的主要问题是: 选择不同的电压跌落时的周期, 可能会得到相反的结论. 当所选择的电压跌落时周期过于接近或者过于远离所选择电压跌落前的周期, 有20%的电压跌落源不能正确定位. 这是因为阻抗在电压跌落期间发生改变. 因此, 在分析电压跌落时用同一周期的数据将产生不可靠的结果. 为了提高阻抗的精确度, 利用多个周期的数据, 并通过最小二乘法(LS)进行数据处理. 计算公式如下:

$$V_{re} + jV_{im} = (E_{1,re} + jE_{1,im}) - (I_{re} + jI_{im})(R_1 + jX_1) \tag{6}$$

如果干扰来自客户端, 监测 n 个周期的数据, 公式(6)变为

$$\begin{bmatrix} V_{re}(1) \\ \vdots \\ V_{re}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{re}(1) & I_{im}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{re}(n) & I_{im}(n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -R_1 \\ X_1 \\ E_{1,re} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_{im}(1) \\ \vdots \\ V_{im}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{im}(1) & I_{re}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{im}(n) & I_{re}(n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -R_1 \\ -X_1 \\ E_{1,im} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

大多数电力质量检测器提供3个周期,或者更多的干扰前后的数据. 干扰中记录的数据长度与干扰的持续时间相同, n 要远大于3,利用最小二乘法可得到等效电阻:

$$\begin{bmatrix} -R_1 \\ X_1 \\ E_{1,re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{re}(1) & I_{im}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{re}(n) & I_{im}(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_{re}(1) \\ \vdots \\ V_{re}(n) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} -R_1 \\ -X_1 \\ E_{1,im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{im}(1) & I_{re}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{im}(n) & I_{re}(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_{im}(1) \\ \vdots \\ V_{im}(n) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中符号“+”表示取伪逆. 从公式(9)和(10)可以得出,由公式右侧计算出的阻抗都有一个负实部,这意味着干扰来自客户端. 则利用公式(9)或(10)的右端计算出的阻抗会落入第二或第三象限 ($R_e < 0$).

同理,如果干扰发生在供电端,等效阻抗由下列公式得出:

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ -X_2 \\ E_{2X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_X(1) & I_Y(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_X(n) & I_Y(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_X(1) \\ \vdots \\ V_X(n) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ X_2 \\ E_{2Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_Y(1) & I_X(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_Y(n) & I_X(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_Y(1) \\ \vdots \\ V_Y(n) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

由公式(11)和(12)得出的阻抗均有一个正实部,会落入第一或者第四象限 ($R_e > 0$). 注意,公式(11)和(12)的右侧分别与公式(9)和(10)的右侧是相同的.

因此,利用最小二乘法的方法求得的阻抗,可根据其实部符号确定电压跌落源的方向. 基频阻抗的正实部表示电压跌落源在供电端,负实部表示跌落源在客户端.

具体实现步骤如下:

Step 1 用傅立叶分解得到电压跌落发生时每个周期的基频正序电压和电流^[11];

Step 2 分离电压和电流的实部和虚部,并通过下列公式求出阻抗 R_e :

$$\begin{bmatrix} R_e \\ X_e \\ E_{re} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{re}(1) & I_{im}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{re}(n) & I_{im}(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_{re}(1) \\ \vdots \\ V_{re}(n) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} R_e \\ X_e \\ E_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{im}(1) & I_{re}(1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{im}(n) & I_{re}(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V_{im}(1) \\ \vdots \\ V_{im}(n) \end{bmatrix}; \quad (14)$$

Step 3 检查由公式(13)和(14)得到的阻抗符号的一致性. 如果两符号不一致,则结论错误;

Step 4 如果符号一致,则“+”表示跌落源在供电端,“-”表示跌落源在客户端.

1.3 非线性分析

存在的另一问题:本方法成立的条件是在线性系统条件下,但在实际中,在客户端常常存在非线性负载,例如变频装置(VFDs)和感应电动机(IMs). 这两种负载都可被视为恒功率负载. 它们在电压跌落中的响应与线性负载远远不同. 非线性负载回路如图4所示.

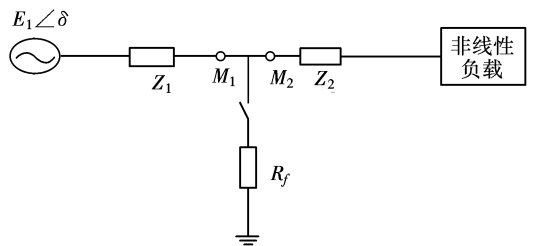


图4 非线性负载回路
Fig.4 Circuit for nonlinear loads

如果供电端为线性系统,所提供的方法可以准确识别下游跌落源. 当跌落由上游引起时跌落源定位就比较困难. 当跌落源在监测点上游时,跌落点电流和有功起初下降,然后上升以弥补电压的跌落,以保持功率的恒定. 上述情况在电压稳定性领域已得到很好的研究. 响应可以用动态负载模型暂态特性曲线和稳态特性曲线来描述.

负载暂态特性曲线可由公式 $P_t(V) = P_0 V^\alpha$ 和 $Q_t(V) = Q_0 V^\beta$ 得到. 变频装置的 α 的预估范围是4.2~6.5,感应电动机的 α 的预估范围是11.0~16.1. 负载的暂态响应不是恒功率类型 ($\alpha = \beta = 0$). 事实上,当 $\alpha = \beta = 2$ 时,非线性负载比线性负载对电压变化更为敏感. 因此,预估的是暂态的 Z_e . 负载的数学模型为

$$P + jQ = P_0 V^\alpha + jP_0 V^\beta. \quad (15)$$

相应的负载电流为

$$I = \frac{P - jQ}{V} = P_0 V^{\alpha-1} - jQ_0 V^{\beta-1}. \quad (16)$$

将电压的相角作为参考角, 设定为 0. 如果有电压干扰, 则电流的变量为

$$\Delta I = P_0 V^{\alpha-2}(\alpha-1)\Delta V - jQ_0 V^{\beta-2}(\beta-1)\Delta V. \quad (17)$$

因此, 负载增益阻抗为

$$\Delta Z = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{P_0 V^{\alpha-2}(\alpha-1) - jQ_0 V^{\beta-2}(\beta-1)} = \frac{kP_0 V^{\alpha-2}(\alpha-1) + jkQ_0 V^{\beta-2}(\beta-1)}{R_{\text{eq}} + jX_{\text{eq}}}. \quad (18)$$

其中, $k = [P_0 V^{\alpha-2}(\alpha-1)]^2 + [Q_0 V^{\beta-2}(\beta-1)]^2$. R_{eq} 为由跌落源定位法确定的阻抗. 可以看出: 如果 $\alpha > 1$, R_{eq} 为正值, 方法正确; 如果 α 远大于 1, R_{eq} 会很大, 这可使符号判断简单化.

1.4 方法简化

如果只是用上述方法计算阻抗符号, 则没有必要计算电抗值. 阻抗可以通过旋转变换进行去耦. 如果在公式(6)两端同乘以 $e^{-j\alpha}$, 其中 $\alpha = \arctan\left(\frac{I_{\text{im}}}{I_{\text{re}}}\right)$ 是测量电流的相角, 这样公式(7)、(8)可简化为

$$\begin{bmatrix} V \cos \theta(1) \\ \vdots \\ V \cos \theta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I(n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -R \\ E_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} V \sin \theta(1) \\ \vdots \\ V \sin \theta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I(n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -X \\ E_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

其中, θ 和 θ_1 分别是 V 和 E_1 相对于 I 的相角. 假设 θ_1 在电压跌落过程中没有变化. 当干扰来自客户端, 等效电阻 R 可以用 LS 方法获得:

$$\begin{bmatrix} -R \\ E_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V \cos \theta(1) \\ \vdots \\ V \cos \theta(n) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

同理, 当干扰来自供电端, 客户端的参数可用供电端变化获得:

$$\begin{bmatrix} R \\ E_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ I(n) & 1 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} V \cos \theta(1) \\ \vdots \\ V \cos \theta(n) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

其中, θ_2 是 E_2 相对于 I 的相角.

2 仿真试验

2.1 实验设置

实验回路如图 5 所示. 电压跌落通过 R_f 的接

入和退出产生, 其范围在 5% 到 20% 之间. 跌落从零周期开始, 大约持续 10 个周期. 上游系统和下游系统的电压和电流信号分别通过 M_1 和 M_2 两监测点来获得. 对非线性负载仿真时, 将图 5 中的 E_2 换成非线性负载如图 4 所示. 该实验中的非线性负载包括变频装置(VFDs)和感应电动机(IMs).

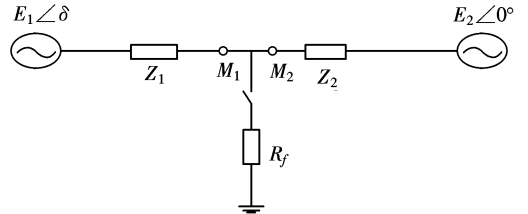


图 5 仿真回路
Fig. 5 Circuit for simulation

2.2 改进的电压跌落源定位方法

由公式 $\Delta P = P - P_{\text{pre}}$ 计算出有功增量, 其中 P 表示每个周期的有功功率. 这个指标可以用来监测恒功率负载的功率补偿. 当监测周期刚刚超过 3 个周期时, 两个 R_e 计算值接近, 它们的符号可以准确地定位跌落源. 有功功率从第 3 个周期以后开始改变符号, 这意味着负载功率在第 3 个周期后开始恢复, 负载不再像线性负载一样工作. 根据这些观测结果和负载的固有暂态特性, 跌落源定位技术可进一步完善. 基本原理是恰当的选择电压跌落的周期, 并计算增益阻抗 Z_e . 以干扰前有功功率的增量为标准, 如果 ΔP 符号不发生改变, 用以估算 Z_e 的 n 值可以选为跌落的持续时间. 如果 ΔP 地符号改变, 则 n 的值应选为 $k-1$, 其中 k 为 ΔP 改变符号的周期. 上述方法假设复合客户负载有暂态功率恢复的特性. 大量的以动态负载作为标准的电压稳定研究和其监测技术, 为上述假设提供了理论依据. 在理论上, 一些电力电子负载的响应在 3 个周期以内. 但对此进行研究的大量文献并没有发现如此快的响应特性.

2.3 仿真结果

用实验研究评估上述方法. 如图 5 所示的实验设备用以提供一组电压跌落, 包括上游电压跌落和不对称电压跌落. 表 1 为电压跌落源负载为变频装置、感应电动机和线性负载的结果.

3 结论

(1) 本方法的基本原理是, 利用由于干扰引起的电压电流变化计算出无干扰端的定义阻抗, 阻抗的符号可以作为电压跌落源定位的指示器;

表1 实验结果
Table 1 Experimental results

负载	序号	跌落源位置	跌落类型	跌落程度/%	持续周期	R_e/Ω
变频装置	1	下游	3-P	4.1	12	-0.1
	2	下游	3-P	21.7	10	-0.1
	3	上游	3-P	4.1	12	+12.3
	4	上游	3-P	21.7	10	+18.3
	5	上游	3-P	3.4	120	+22.0
	6	上游	3-P	8.6	120	+22.2
	7	上游	3-P	13.8	120	+20.3
	8	上游	3-P	20.2	120	+24.9
	9	上游	1-P	2.9	120	+14.5
	10	上游	1-P	8.3	120	+16.8
	11	上游	1-P	17.2	120	+24.5
	12	上游	1-P	18.5	120	+20.7
感应电机	1	下游	3-P	19.8	13	-0.1
	2	上游	3-P	19.8	13	+14.2
	3	上游	3-P	2.9	120	+18.8
	4	上游	3-P	8.1	120	+21.9
	5	上游	3-P	13.9	120	+14.8
	6	上游	3-P	20.1	120	+18.2
	7	上游	1-P	2.1	120	+23.7
	8	上游	1-P	6.0	120	+19.1
	9	上游	1-P	10.1	120	+11.2
	10	上游	1-P	14.4	120	+18.0
线性负载	1	下游	3-P	4.2	12	-0.2
	2	上游	3-P	4.2	12	+31.1
	3	上游	3-P	4.4	7	+31.4
	4	上游	3-P	3.9	18	+31.0

(2)本方法在非线性负载情况下同样适用;

(3)本方法需要测量电压和电流波形. 波形中的基频正序成分被用于计算定义阻抗. 因此,该方法易于被现代数字测量仪执行;

(4)本方法对于线性系统有可靠的理论基础,并不依靠经验假设.

从长远来看,这一方法还可以应用到电能数字计费装置中,即计费装置除了完成其常规的记录功能外,还要能够记录电压跌落扰动的发生、严重程度及其扰动源. 用户可按月下载计费装置上记录的信息. 这些信息将为供用电双方基于赏罚机制的电能质量管理提供重要决策依据.

参考文献:

[1] 王克星,宋政湘,陈德桂,等.基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):29-54.
WANG Kexing, SONG Zhengxiang, CHEN Degui, et al. In-

terference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 29-54.

[2] IEEE Standards Coordinating Committee 22 On Power Quality. IEEE Std 1159-1995 IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S]. New York: IEEE, 1995.

[3] 卢本初,陈红坤,梁有伟.电力系统中电压骤降的综合分析[J]. 电力设备,2003,4(12):29-32.
LU Benchu, CHEN Hongkun, LIANG Youwei. Integrated analysis of voltage sags in power system [J]. Electrical Equipment, 2003, 4(12):29-32.

[4] 张秀娟,李晓萌,姜齐荣,等.动态电压调节器(DVR)的设计与性能测试[J]. 电力电子技术,2004,38(2):21-23.
ZHANG Xiujuan, LI Xiaomeng, JIANG Qirong, et al. Main circuit design and performance tests of dynamic voltage regulator [J]. Power Electronics, 2004, 38(2):21-23.

[5] 王宾,潘贞存,徐文远.配电系统电压跌落幅值估算分析[J]. 中国电机工程学报,2005,22(13):29-34.
WANG Bin, PAN Zhencun, XU Wenyuan. Voltage sags profile estimation for power distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 22(13):29-34.

[6] 王成山,王继东.基于小波包分解的电能质量扰动分类方法[J]. 电网技术,2004,28(15):78-82.
WANG Chengshan, WANG Jidong. Classification method of power quality disturbance based on wavelet packet decomposition[J]. Power System Technology, 2004, 28(15):78-82.

[7] 金钊,刘炳.电压跌落分析与对策[J]. 电力设备,2006,7(4):63-66.
JIN Zhao, LIU Bing. Voltage sag analysis & solution [J]. Electrical Equipment, 2006, 7(4):63-66.

[8] 吕广强,赵剑锋,程明,等.配电网动态电能质量问题及其解决方案[J]. 高电压技术,2007,33(1):53-56.
LÜ Guangqiang, ZHAO Jianfeng, CHENG Ming, et al. Dynamic quality of power supply and its solution for distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 53-56.

[9] 王宾,潘贞存,徐丙垠.配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术,2004,28(2):56-59.
WANG Bin, PAN Zhencun, XU Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system [J]. Power System Technology, 2004, 28(2):56-59.

[10] Power System Relaying Committee (PSRC) of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Std C37 113-1999 IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines[S]. New York: IEEE, 1999.

[11] 赵凤展,杨仁刚.基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):28-34.
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10):28-34.

