

# 配电系统电压跌落幅值估算分析

王 宾, 潘贞存, 徐文远

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

## VOLTAGE SAGS PROFILE ESTIMATION FOR POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

WANG Bin, PAN Zhen-cun, XU Wen-yuan

(Dept. of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** In recent years, the need to characterize the feeder-level power quality performance has emerged. This is driven by the interest to compare the PQ performance among utility companies or among various feeders. Since it is impossible to measure the sag level at every node of a distribution feeder, estimation of sag characteristics at un-metered nodes becomes necessary. For meeting the need, The concept of voltage sags profile estimation and the practical method based on a least-square algorithm are proposed to deal with this problem. The proposed method achieves the sags profile estimation with fault phase judging and fault path searching. One of the potential applications of the proposed method is to calculate the feeder power quality performance indices such as System Average RMS Frequency Index (SARFI<sub>x</sub>).

**KEY WORDS:** Power quality; Voltage sags; Sags profile estimation; Distribution system

**摘要:** 电力市场的快速发展及敏感负荷的逐年增多, 要求发展相关的评估指标和方法, 来衡量整个配电网或者评估不同馈线之间的暂态电能质量优劣。然而实际系统中不能保证对每一个点都进行实时监测, 因此必须根据已知的不完整监测数据来准确地估计其余各未知点的电压跌落幅值。为了解决该问题, 提出了“电压跌落幅值估算”的概念, 并且基于最小二乘原理发展了实用的幅值估算算法, 该算法通过判断故障相位, 搜索故障路径, 估计出未知点的电压跌落幅值。理论分析和仿真表明, 该算法的提出为配电系统电压跌落的状态评估和数据统计提供了有力的保障。

**关键词:** 电能质量; 电压跌落; 幅值估算; 配电系统

## 1 引言

电压跌落与短时断电是目前工业界最关心的电能质量问题之一<sup>[1-2]</sup>。相关文献[3-4]报道, 电压跌落(包含短时断电)是引起工业用户设备不正常工作主要的甚至是唯一的原因。因此合理地评估电网

的暂态电能质量水平, 特别是衡量电压跌落的危害程度至关重要。

衡量整个配电网的电压跌落特性与传统的供电可靠性概念非常相似。参考供电可靠性的指标定义, IEEE PES Task Force on Voltage Sag Indices工作组提出了一系列电压跌落衡量指标, 来评价某一区域的电压跌落严重程度<sup>[5]</sup>。比较有代表性的主要是 SARFI<sub>x</sub> 系数

$$SARFI_x = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (1)$$

式中  $x$  为以电压有效值表示的门槛值, 分别为额定电压值的 140、120、110、90、80、70、50 以及 10%;  $N_i$  为第  $i$  次测量中, 当  $x < 100\%$  时, 统计区域内电压有效值低于门槛电压  $x$  的用户数; 当  $x > 100\%$  时, 统计区域内电压有效值高于门槛电压  $x$  的用户数;  $N_T$  为统计区域内的用户总数。

由于同一故障引起的电压跌落, 不同用户感受到的跌落幅值各不相同<sup>[6]</sup>。若完成上述电压跌落统计指标的计算, 必须准确地获得每一个用户的跌落幅值。然而配电网结构复杂, 用户众多, 监测设备很不完善, 实际系统中仅仅能够保证在重要变电站和关键用户处的配电变压器低压母线处进行实时监测, 得到的电压跌落监测数据非常有限。因此要完成 SARFI<sub>x</sub> 系数的计算, 必须根据已知的不完整监测数据, 准确地估计其余各未知点的电压跌落幅值。

然而目前检索国内外相关文献, 均未见对该问题的分析和关注。为此, 本文首次提出了“电压跌落幅值估算”的概念, 并且基于最小二乘原理发展了一套实用化的幅值估算算法。使用该算法, 当仅获得有限个监测点的数据, 仍然可以快速准确地计

算出监测区域的电压跌落统计指标,从而合理地指导用户设备的选取以及系统人员的正常维护。

## 2 基本原理分析

### 2.1 概述

电压跌落幅值估算技术的提出必须基于先进的配网自动化系统及暂态电能质量扰动录波系统。如, Turtle AMR 系统、Sentry outage mapping 系统等<sup>[7]</sup>。这些监测系统包含共同的特性:

(1) 电压跌落的发生时间及持续时间均可以准确测量到 1~0.01 s。

(2) 监测系统仅仅可以提供电压跌落的相关幅值信息。虽然某些系统也可以提供电压跌落的相角、电流等信息,但是并不具有通用性。

因此电压跌落幅值估算问题可以描述为:针对某一配电网,利用有限个监测点的电压跌落幅值和时间信息,估计出其他未知点的电压跌落幅值,从而为电压跌落统计指标的计算提供充分的原始数据。

### 2.2 电压跌落幅值曲线特性分析

首先考虑简化的单机辐射状网络结构,如图 1 所示,该网络为 IEEE 配电网 123 节点标准测量系统的一部分,其参数遵循 IEEE123 节点网络的定义<sup>[8]</sup>。仿真软件采用 Power Softech International Inc. 开发的 Visual PSA-D 程序包。假定在节点 52 处发生三相金属性接地故障,可以得到如图 2 所示的电压幅值示意图。如果采用线路阻抗归一化后的等值馈线长度作为横坐标,纵坐标保持不变,重新改画图 2,即可以得到图 3。

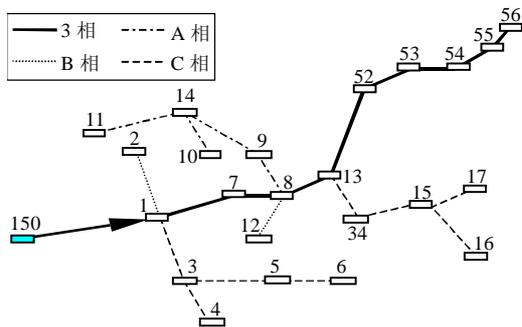


图 1 简单算例仿真系统模型图  
Fig. 1 A simple radial feeder for simulation

观察图 3,此时电压跌落幅值曲线可以清楚地表示为两条直线,这一现象可以由系统的故障潮流来解释:当 52 节点发生三相金属性接地故障时,故障点上游的直线斜率值等于一常数,该值与短路电流值成正比;故障点下游的各点电压均降为 0,

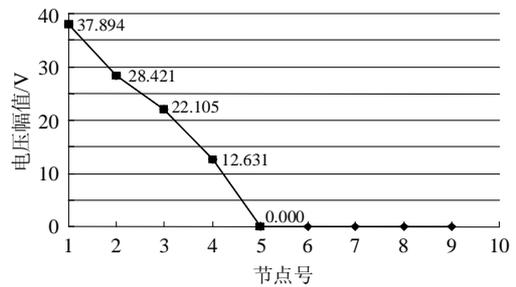


图 2 52 节点故障时三相线路电压幅值曲线  
Fig. 2 Voltage profile of the sample system with three-phase fault at point 52

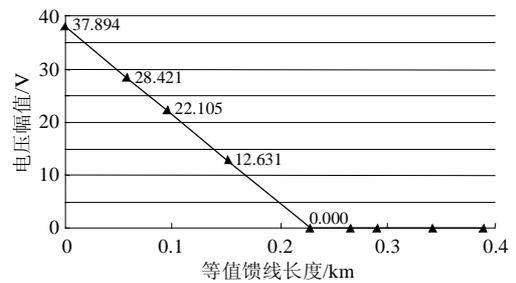


图 3 以线路阻抗归一化后的等值馈线长度为横坐标的电压跌落幅值曲线图  
Fig. 3 Voltage profile of three-phase feeder with respect to equivalent feeder length

因此直线斜率值等于 0。

### 2.3 电压跌落幅值估算数学模型

2.2 节的分析基于金属性接地故障,没有考虑过渡电阻的影响。过渡电阻的存在将大大地影响图 3 所示的电压跌落幅值曲线的直线特性。

从故障潮流的角度来分析过渡电阻对电压跌落幅值曲线特性的影响。考虑监测点  $x$  位于故障点上游  $k$  公里处,则  $x$  点的电压可以表示为

$$U_x = U_F + kZ_{\text{perkm}} I_F \quad (2)$$

式中  $U_x$  为  $x$  母线处的电压向量;  $U_F$  为故障点处的电压向量;  $Z_{\text{perkm}}$  为线路的单位阻抗值;  $I_F$  为短路电流向量。

因此,  $x$  母线处的电压幅值可以表示为

$$|U_x| = \sqrt{(U_{FR} + k\Delta U_R)^2 + (U_{FI} + k\Delta U_I)^2} \quad (3)$$

其中,  $U_F = U_{FR} + jU_{FI}$ ,  $Z_{\text{perkm}} I_F = \Delta U_R + j\Delta U_I$ 。

从式(3)中可知,  $|U_x|$  实际上是  $k$  值的非线性函数。因此考虑过渡电阻后,电压跌落幅值曲线特性将不再具有线性关系。在图 4 中,针对图 1 所示模型作出了不同过渡电阻下,节点 52 三相接地故障时的电压跌落幅值曲线示意图。

观察图 4,可以看到,实际上电压跌落幅值曲线特性是过渡电阻的非线性函数,当过渡电阻为零

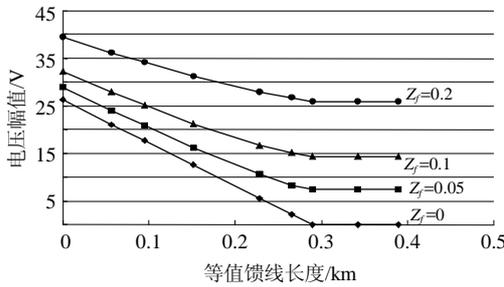


图 4 不同过渡电阻下的电压跌落幅值曲线特性

Fig. 4 Voltage profiles with different fault impedances

时，电压跌落幅值曲线特性取极值状态，为双直线特性；当过渡电阻不为零时，电压跌落幅值曲线特性也将不再为线性关系。

为了解决过渡电阻对电压跌落幅值估算的影响，提出了一种改进算法，该算法不以电压跌落幅值为分析目标，而是考虑电压跌落幅值平方 $|U_x|^2$ 的变化特性。观察式(3)， $|U_x|^2$ 实际上是  $k$  值的二次函数。在图 5 中作出了图 4 所示  $Z_f=0.2$  状态下的 $|U_x|^2$  曲线，同时也给出了 $|U_x|^2$  曲线的二次拟合曲线。可以看到，这两条曲线拟合的非常理想。因此经过渡电阻故障状态下的电压跌落幅值估算算法可以描述为：

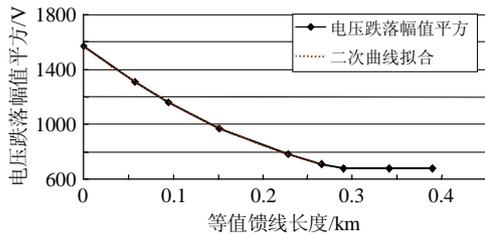


图 5  $Z_f=0.2$  状态下的 $|U_x|^2$  及二次曲线拟合

Fig. 5 Voltage profile and 2<sup>nd</sup> order polynomial fitting for case of  $Z_f=0.2$

给定有限个监测点的电压幅值，如何确定系数  $a, b, c, Z_g$ ，保证故障后线路电压幅值曲线满足如下的规律

$$V(Z) = U(Z)^2 = \begin{cases} aZ^2 + bZ + c & Z < Z_g \\ d & Z \geq Z_g \end{cases} \quad (4)$$

并且实现幅值估算误差最小

$$e = \sum_{i=1, N} [V(Z_i) - U_i^2]^2 = \min \quad (5)$$

其中： $U(Z)$ 为节点电压幅值； $V(Z)$ 为节点电压幅值的平方。 $Z_g$ 是两条曲线交点对应的横坐标，其值等于线路阻抗归一化后，故障点到初始节点的等值线路长度值。系数  $a, b, c$  为故障点上游各节点电压幅值平方二次拟合曲线的待定系数。系数  $d$  为故障点下游的各节点电压平方的平均值，它也等于故障

点残压的平方值。

## 2.4 不对称性故障与单相监测表问题

实际系统中三相对称性故障仅占故障总数的 5% 左右，系统故障主要为不对称性故障。电压跌落监测分为三相监测和单相监测两种，由于监测点负荷性质的限制，实际得到的监测数据可能仅仅是单相数据，因此实用的电压跌落幅值估算模型必须适用于任何一种故障的任何一相线路<sup>[9-10]</sup>。为了合理地分析这个问题，针对图 1 所描述的系统模型，仿真了不对称故障状态下的电压跌落幅值曲线，分别如图 6~8 所示。

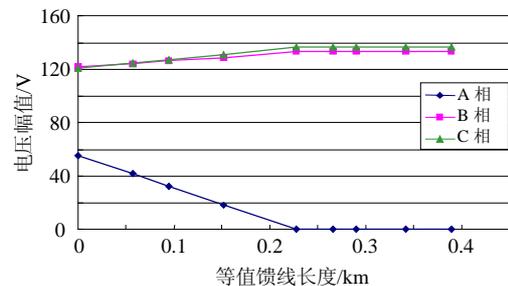


图 6  $Z_f=0$  单相接地故障状态下的电压跌落幅值曲线图

Fig. 6 Voltage profile for a SLG fault with  $Z_f=0$

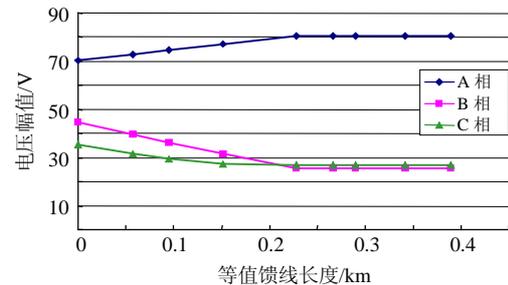


图 7  $Z_f=0.2$  两相接地故障状态下的电压跌落幅值曲线图

Fig. 7 Voltage profile for a LLG fault with  $Z_f=0.2$

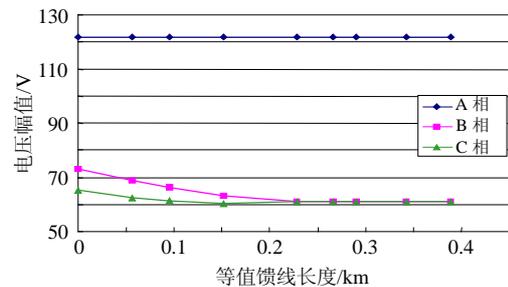


图 8  $Z_f=0$  两相短路故障状态下的电压跌落幅值曲线图

Fig. 8 Voltage profile for a LL fault with  $Z_f=0$

可以看到，在金属性接地故障状态下，任意一相的电压跌落幅值曲线均为线性特性；当经过渡电阻接地故障或两相短路故障状态下，故障相电压跌落幅值曲线满足二阶多项式特性，而非故障相电压跌落幅值曲线仍然保持线性特性。因此可以得出如下的结论：对于金属性接地故障状态，任意一相均

可以采用线性幅值估算算法来估计(即 $a=0$ );对于非金属性接地故障状态和两相短路故障状态,非故障相仍然可以采用线性幅值估算算法来计算,而故障相线路应采用改进的二阶多项式算法估计。

对于 $\Delta/Y_0$ 接线方式的中压降压变压器,由于缺少相应的实时相角信息,该点数据不能直接利用。但是可以采用以下两种方法来解决:①由于电压跌落幅值估算算法是一种曲线拟合算法,某些点的存在仅仅能够提高拟合的精度,因此在保证一定拟合精度的前提下,对于某些仅仅知道变压器低压侧幅值信息的点可以忽略;②对于一些重要的监测点,比如变电站、工厂开闭所等场所,可以利用故障录波装置得到相角信息,从而来完成高低压侧电压向量的归算。

以上分析均是基于电压跌落来考虑的,但是由于电压跌落和电压骤升的基本原理类似,因此该数学模型同样适用于电压骤升的幅值估算。

### 3 实用算法分析

#### 3.1 故障路径搜索算法

电压跌落幅值估算必须按照故障路径进行曲线拟合。因此如何快速搜索故障路径是首要解决的问题。

图9所示为典型的辐射状网络结构,节点4、7构成了节点5的两个分支,定义节点4、7构成节点5的一个‘搜索截面’。如何快速地确定故障路径,本文提出了“树型搜索方法”,其搜索原则为:

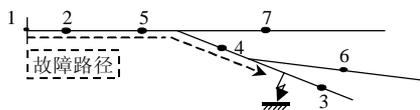


图9 树型网络拓扑图

Fig. 9 Fault path of a radial distribution network

(1) 观察监测数据,选择监测节点较多的故障相作为搜索目标。

(2) 从树的顶端(电源端)开始搜索,以电压下降为导向,迅速搜索同一截面的各节点,原则上选电压最小值为故障路径上的节点。

(3) 同时,为了防止随机误差引起的单点数值畸变,“电压最小值”存在伪值的情况。必须验证其余分支线上各节点电压幅值无下降趋势,否则以电压下降为导向,重新确认故障路径。

(4) 搜索过程中,以故障路径上最新确认的节点电压值为基准,向下搜索。如果遇到未知节点,则采用最新确认的节点电压值来代替。

(5) 在搜索过程中,如果确认节点电压值不再下降,则认为故障路径搜索完毕。

按照以上原则,可以得到图9所示网络模型的故障路径,搜索过程如图10所示。然后运用电压跌落幅值估算算法,即可以精确地估计出故障路径上未知点的电压跌落幅值。对于其他非故障路径(分支线)上的未知点,其值近似等于该点从故障路径上馈出点的电压幅值。

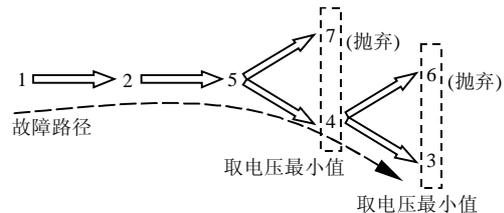


图10 图9所示模型的故障路径搜索示意图

Fig. 10 Fault path search process for system in Figure 9

#### 3.2 曲线拟合算法分析

曲线拟合采用最小二乘拟合算法<sup>[11]</sup>,为了满足式(5),必须保证

$$\begin{bmatrix} 1 & Z_1 & Z_1^2 \\ 1 & Z_2 & Z_2^2 \\ 1 & Z_3 & Z_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以故障路径搜索后确定的故障区域为分界线,将故障区域上游的原始监测数据带入式(6),即可以确定系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 。系数 $d$ 为故障区域下游的各节点电压平均值的平方,从而准确地确定拟合曲线。

#### 4 算例仿真分析

仿真模型如图11所示,为IEEE123节点配电系统标准测试网络的一部分。监测点原始数据为故障潮流仿真数据叠加一定的随机误差后的合成数据,信噪比为36.4db,如表1所示。表中所有数值均基于120V基准电压。

观察表1所列A相监测数据,可以看到电压幅值只是发生了轻微的波动,而B、C两相电压幅值从初始节点1到监测点8,发生了明显的跌落,因此可以任选B相或者C相作为故障路径搜索目标。快速地确定故障路径为

150 → 1 → 7 → 8 → 13 → 18 → 135 → 35 → 40 → 42 → 44 → 47 → 48 (or 49)

其中用下划线标注的节点为监测节点。

B、C相的 $|U_x|^2$ 折线图,以及拟合曲线分别如图12、图13所示,可以看到,二阶拟合曲线基

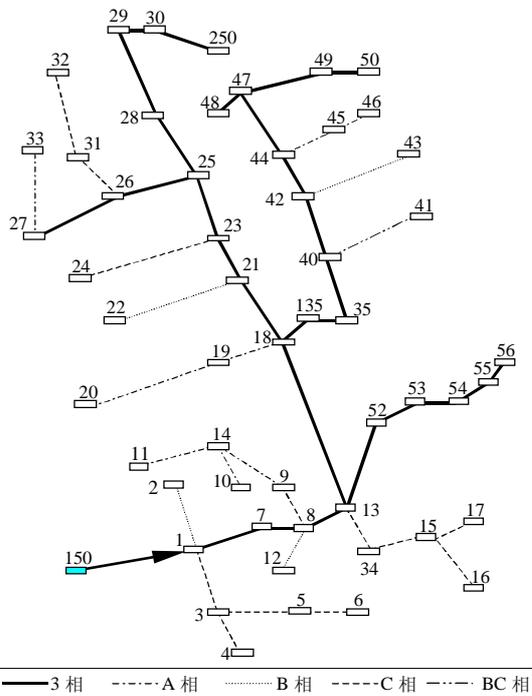


图 11 算例仿真网络拓扑图

Fig. 11 One line diagram of the system example

表 1 单机辐射状网络电压幅值监测数据表

Tab.1 Voltage magnitudes of metered nodes with benchmark of 120V for simple radial network

节点编号	A 相电压幅值	B 相电压幅值	C 相电压幅值
1	133.247	104.923	84.263
2	—	87.952	—
3	—	—	79.621
5	—	—	82.498
8	130.922	85.356	86.181
10	139.671	—	—
11	123.089	—	—
12	—	95.858	—
15	—	—	81.973
16	—	—	85.919
18	125.761	82.730	76.451
20	124.495	—	—
22	—	71.206	—
24	—	—	75.569
26	134.121	81.201	80.709
27	120.621	73.885	78.764
29	126.586	86.175	76.760
32	—	—	63.346
33	124.733	—	—
35	134.497	74.814	70.893
40	121.893	65.773	67.901
43	—	76.336	—
45	133.043	—	—
46	139.181	—	—
47	122.610	76.782	72.704
48	123.476	62.981	70.792
49	134.784	73.572	71.620
50	133.611	78.209	65.982
53	129.248	80.216	70.361
54	122.482	92.967	76.453
56	130.182	94.231	74.221
250	137.681	80.773	81.010

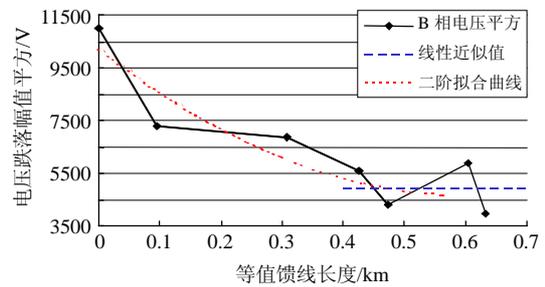


图 12 B 相  $U_x^2$  折线图及曲线拟合

Fig. 12 Squared voltage profile of phase B and corresponding polynomial fitting

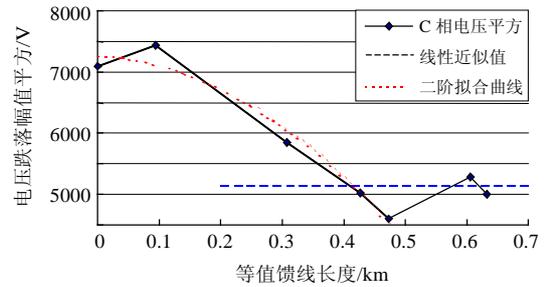


图 13 C 相  $U_x^2$  折线图及曲线拟合

Fig. 13 Squared voltage profile of phase C and corresponding polynomial fitting

本上描述了电压跌落幅值曲线的变化趋势。通过最小二乘拟合，可以得到二阶拟合方程为

$$V_B(Z) = \begin{cases} 14726Z^2 - 18152Z + 10240 & Z < 0.477 \\ 4931.03 & Z \geq 0.477 \end{cases} \quad (7)$$

$$V_C(Z) = \begin{cases} -11278Z^2 - 454.19Z + 7268.3 & Z < 0.414 \\ 5147.78 & Z \geq 0.414 \end{cases} \quad (8)$$

A 相未知点的电压跌落幅值可以采用线性最小二乘拟合算法，实际上拟合结果等于已知监测点的算术平均值。从而可以得到所有未知点的电压跌落幅值如表 2 所示。为了检验电压跌落幅值估算的精度，在表 2 中同时给出了未知点的故障潮流仿真值。由于表中所有数据均是以 120V 为基准，计算得到幅值估算平均误差为 7.94%，可以满足 SARFIx 系数统计区间划分的要求，从而验证了估计算法的有效性。

## 5 结论

(1) 电压跌落幅值估算算法是基于最小二乘拟合原理的基础上发展起来的，不仅利用了最小二乘拟合算法的数学特性，同时充分考虑了电压跌落幅值曲线的电路特性，具有拟合精度高、速度快等特点。

(2) 该算法充分考虑了不对称性故障状态、过渡电阻等实际因素的影响。仿真结果表明，该算

表2 未知点电压跌落幅值估算值与实际测量值对比表  
Tab.2 Contrasts of estimation values and measurement data

节点编号	数据类型	A相电压幅值	B相电压幅值	C相电压幅值
4	估计值	—	—	79.621
	测量值	—	—	78.317
6	估计值	—	—	82.498
	测量值	—	—	78.206
7	估计值	127.487	96.194	84.887
	测量值	121.088	82.035	74.939
9	估计值	127.487	—	—
	测量值	120.766	—	—
12	估计值	—	85.356	—
	测量值	—	79.523	—
13	估计值	127.487	88.437	83.299
	测量值	120.859	75.956	69.649
14	估计值	127.487	—	—
	测量值	120.553	—	—
17	估计值	—	—	81.973
	测量值	—	—	69.517
19	估计值	127.487	—	—
	测量值	120.325	—	—
21	估计值	127.487	77.757	77.837
	测量值	120.484	67.632	63.224
23	估计值	127.487	77.757	77.837
	测量值	120.468	67.630	63.196
25	估计值	127.487	77.757	77.837
	测量值	120.440	67.641	63.186
28	估计值	127.487	77.757	77.837
	测量值	120.440	67.641	63.186
30	估计值	127.487	77.757	77.837
	测量值	120.440	67.641	63.186
31	估计值	—	—	80.709
	测量值	—	—	63.133
34	估计值	—	—	83.299
	测量值	—	—	69.578
41	估计值	—	65.773	67.901
	测量值	—	61.918	60.291
42	估计值	127.487	70.221	71.748
	测量值	120.377	60.998	60.285
44	估计值	127.487	70.221	71.748
	测量值	120.348	60.539	60.539
52	估计值	127.487	88.437	83.299
	测量值	120.859	75.956	69.649
55	估计值	129.248	80.216	70.361
	测量值	120.859	75.956	69.649
135	估计值	127.487	75.179	75.404
	测量值	120.471	65.642	61.982

法对于不同的故障状态均保证了较高的拟合精度。

电压跌落幅值估算算法的提出,为配电系统电压跌落的状态评估和数据统计提供了有力的保障。但是必须指出,本文提出的算法仅仅是对“电压跌落幅值估算”这一研究方向的初步尝试,大量问题尚须进一步的研究,如负荷电流以及电动机负荷特性、分布式发电带来的配电网结构复杂性、配变

接线方式对电压跌落的传播影响以及监测表的数量、定位等问题对估计精度的影响等。

## 参考文献

- [1] Bollen M H J. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions[M]. New York, IEEE Press, 1999.
- [2] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69. Xiao Xiangning, Xu Yonghai, Liu Lianguang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase angle jump[J]. Proceeding of The CSEE, 2002, 22(1): 64-69.
- [3] Sarmiento H G, Estrada E. A voltage sag study in an industry with adjustable-speed drives[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1996, 1(1): 16-19.
- [4] Wagner V E, Andreshak A A, Staniak J P. Power quality and factory automation[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1990, 26(4): 620-626.
- [5] Brooks D L, Dugan R C, Waclawiak M *et al.* Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(1): 254 - 259.
- [6] 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.
- [7] Lakshmikanth A, Morcos M M. A power quality monitoring system: a case study in DSP-based solutions for power electronics[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 50(3): 724 - 731.
- [8] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial distribution test feeders[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.
- [9] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 84-89. Zeng Xiangjun, Yin Xianggen, Zhang Zhe *et al.* Study for negative sequence current distributing and ground fault protection in middle voltage power systems[J]. Proceeding of The CSEE, 2004, 24(3): 84-89.
- [10] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 77-84. Zhang Peng, Wang Shouxiang. A novel interval method for reliability evaluation of large scale distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 77-84.
- [11] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

收稿日期: 2005-01-10。

作者简介:

王 宾 (1978-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、电能质量监测分析等;

潘贞存 (1962-), 男, 山东郓城人, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统继电保护等;

徐文元 (1962-), 男, 四川乐山人, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 研究方向为分布式发电、电能质量等。