

# 复杂配电系统电压跌落状态估计可观性分析

牟旭涛<sup>1</sup>, 王宾<sup>2</sup>, 潘贞存<sup>3</sup>

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250061; 2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250014)

**摘要:** 电压跌落状态估计算法(SSE算法)是一种基于单电源辐射状网络结构的二阶曲线拟合算法。但是目前众多分布式发电接入及小电厂并网发电使得配电网络结构呈现复杂化、多电源化, 传统电压跌落状态估计算法无法直接使用。针对该问题, 提出了电压跌落状态估计可观性的概念, 并且从故障电流叠加的角度出发, 构造了电压跌落状态估计可观性的数学模型, 合理地解决了部分故障路段不可观的问题, 使得SSE算法可以应用到多电源复杂配电系统中。

**关键词:** 多电源; 配电系统; 状态估计; 可观性

## The voltage sags state estimation observability analysis in complicated distribution systems

MOU Xu-tao<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, PAN Zhen-cun<sup>3</sup>

(1. Shandong Electric Academe, Jinan 250002, China; 2. Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Electrical Engineering Shandong University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** The voltage Sag State Estimation (SSE) algorithm is a 2<sup>nd</sup> order curve fitting algorithm using the characteristics of single power source and radial feeders in distribution systems. The topologies of distribution systems are becoming complicated from traditional radial mode since more and more distributed generators merging into the grid. Hence the proposed voltage sags state estimation algorithm can not directly adopted. In response to this question, the SSE observability is defined and modeled in the paper, and correlative modification method is also proposed from the point of fault current superimposing.

**Key words:** multiple power sources; distribution systems; state estimation; observability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0032-04

## 0 引言

电压跌落是目前工业界最关心的电能质量问题之一。相关文献报道<sup>[1-3]</sup>, 电压跌落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。因此合理地评估衡量电压跌落的危害程度至关重要。针对该问题, 国内外开展了大量的研究, 特别是上个世纪90年代发展了一种基于单一用户的电压跌落扰动衡量方法, 提出了相应的电压跌落衡量指标—电压跌落发生率<sup>[4]</sup>, 得到了工业界充分的认同和广泛的应用。

基于单一用户的电压跌落扰动衡量方法由于仅仅能够满足对某一负荷点电能质量的统计分析, 而不能提供整个配电网络的电压跌落扰动信息, 已经不能满足现代电能质量评估的要求。因此越来越多的呼声要求发展相关的评估指标和方法, 来衡量整个配电网络或者评估不同馈线之间的电能质量优

劣, 而不是仅仅地针对某一个供电点的电能质量统计分析。

针对该问题, 基于传统配电网的单电源、辐射状运行结构, 在前期工作中提出了电压跌落状态估计的基本概念<sup>[5, 6]</sup>, 发展了电压跌落状态估计算法—SSE算法。但是随着越来越多的小电厂并网发电以及新型分布式发电技术的快速发展<sup>[7, 8]</sup>, 实际配电系统中也会遇到多电源网络结构状态。

SSE算法是基于单电源辐射状网络结构的一种二阶曲线拟合法; 对于单电源辐射状网络, 故障电流具有唯一性, 因此SSE算法可以应用到整个故障路径。但是对于多电源网络, 不同故障路径流经的故障电流并不相同, 因此该算法不能直接用到整个故障路径, 而只能分段进行。

SSE算法的二阶曲线拟合特性, 要求在每一段故障路径上至少存在3个量测点, 而对于多电源网络, 由于故障路径的分割, 某些故障段不满足二阶

曲线拟合的要求, 无法进行估计, 从而带来了电压跌落状态估计的可观性问题。

## 1 问题描述

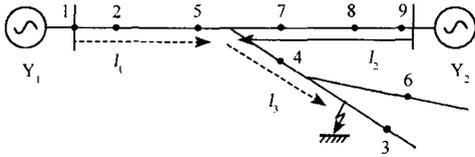


图1 双电源网络结构拓扑图

Fig. 1 A tree system with dual power sources.

双电源网络拓扑如图1所示, 故障路径分为三部分:  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ , 其流过的故障电流分别为  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$ 、 $I_{F3}$ , 则由基尔霍夫电流定律, 可得到:

$$I_{F3} = I_{F1} + I_{F2} \quad (1)$$

其中:  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$  分别是由电源  $Y_1$ 、电源  $Y_2$  单独作用时流经网络的故障电流。

电压跌落状态估计可观性问题可描述为:

针对某复杂配电网, 故障路径分为  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ , 流经的故障电流分别为  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$ 、 $I_{F3}$ , 且存在  $I_{F3} = I_{F1} + I_{F2}$  的函数关系。如果  $l_1$ 、 $l_2$  路径完全可观, 而路径  $l_3$  不完全可观, 仅存在量测点  $x$ , 如何求取故障路径  $l_3$  上其余两点  $y$ 、 $z$  的量测值, 来解决路径  $l_3$  的可观性问题?

## 2 多电源辐射状网络电压跌落状态估计可观性分析

考虑当仅有电源  $Y_1$  作用时,  $l_3$  段某量测点  $x$  位于故障点上游  $k$  公里处, 则  $x$  点的电压可表示为:

$$U_{x1} = U_{F1} + kZ_{\text{perkm}} I_{F1} = Z_f I_{F1} + kZ_{\text{perkm}} I_{F1} = I_{F1} (Z_f + kZ_{\text{perkm}}) \quad (2)$$

当仅有电源  $Y_2$  作用时,  $x$  点的电压可表示为:

$$U_{x2} = U_{F2} + kZ_{\text{perkm}} I_{F2} = Z_f I_{F2} + kZ_{\text{perkm}} I_{F2} = I_{F2} (Z_f + kZ_{\text{perkm}}) \quad (3)$$

其中:  $U_{x1}$ 、 $U_{x2}$  分别为电源  $Y_1$ 、 $Y_2$  单独作用时  $x$  母线处的电压向量;  $U_{F1}$ 、 $U_{F2}$  为电源  $Y_1$ 、 $Y_2$  单独作用时故障点处的电压向量;  $Z_f$  为过渡阻抗值。

叠加公式(2)、(3), 可得:

$$U_{x1} + U_{x2} = U_{F1} + U_{F2} + kZ_{\text{perkm}} I_{F1} + kZ_{\text{perkm}} I_{F2} = Z_f I_{F3} + kZ_{\text{perkm}} I_{F3} = U_{x3} \quad (4)$$

因此,  $l_3$  段  $x$  母线处的电压幅值存在如下关系:

$$|U_{x1} + U_{x2}| = |U_{x3}| \quad (5)$$

则  $|U_{x1}|$ 、 $|U_{x2}|$ 、 $|U_{x3}|$  满足如图2所示的三角函数关系。由余弦定理可以得到:

$$|U_{x3}|^2 = |U_{x1}|^2 + |U_{x2}|^2 - 2|U_{x1}||U_{x2}|\cos\theta \quad (6)$$

其中:  $\theta$  为电压向量  $U_{x1}$ 、 $U_{x2}$  的夹角。观察公式(2)、(3), 可见电压向量  $U_{x1}$ 、 $U_{x2}$  的夹角实际上是故障电流  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$  之间的夹角, 因此  $l_3$  故障路径段上任意一节点  $x$  处的电压向量  $U_{x1}$ 、 $U_{x2}$  的夹角均相等。

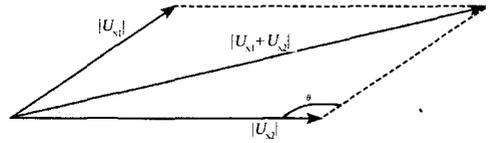


图2 电压向量叠加

Fig. 2 Superimposing of two voltage vectors

由公式(2)、(3)、(4), 我们可以得到:

$$|U_{x1}|^2 = (\Delta U_{R1}^2 + \Delta U_{l1}^2)k^2 + 2(\Delta U_{R1}U_{FR1} + \Delta U_{l1}U_{F1})k + U_{FR1}^2 + U_{F1}^2 \quad (7)$$

$$|U_{x2}|^2 = (\Delta U_{R2}^2 + \Delta U_{l2}^2)k^2 + 2(\Delta U_{R2}U_{FR2} + \Delta U_{l2}U_{F2})k + U_{FR2}^2 + U_{F2}^2 \quad (8)$$

$$|U_{x3}|^2 = (\Delta U_{R3}^2 + \Delta U_{l3}^2)k^2 + 2(\Delta U_{R3}U_{FR3} + \Delta U_{l3}U_{F3})k + U_{FR3}^2 + U_{F3}^2 \quad (9)$$

其中: 针对故障电流  $I_{Fi}$ , 有  $U_{Fi} = U_{FRi} + jU_{Fli}$ ,  $Z_{\text{perkm}} I_{Fi} = \Delta U_{Ri} + j\Delta U_{li}$  ( $i=1, 2, 3$ )。

因此使用 SSE 方法, 可以得到故障电流  $I_{Fi}$  在  $l_3$  故障路径段上任意一节点  $x$  母线处的电压幅值:

$$V(Z_{xi}) = U^2(Z_{xi}) = \begin{cases} aZ_{xi}^2 + bZ_{xi} + c & Z < Z_{gxi} \\ d & Z \geq Z_{gxi} \end{cases} \quad (i=1, 2, 3) \quad (10)$$

则公式(6)可以改写为:

$$\theta_x = f[V(Z_{x1}), V(Z_{x2}), V(Z_{x3})] \quad (11)$$

从而得到复杂配电网电压跌落状态估计不可观的解决方法, 求解以下方程组:

$$\begin{cases} \theta_x = \theta_y \\ \theta_x = f[V(Z_{x1}), V(Z_{x2}), V(Z_{x3})] \\ \theta_y = f[V(Z_{y1}), V(Z_{y2}), V(Z_{y3})] \end{cases} \quad (12)$$

即可求得故障路径  $l_3$  上量测点  $y$  的量测值  $V(Z_{y3})$ 。

求解(12)的线性方程组, 必须保证  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  三段故障路径中两段完全可观, 而实际应用中, 由于故障路径上量测节点的短缺, 可能只能保证一段可观。为了解决该问题, 提出了采用故障路径上馈出线平均残压来替代的方法:

假设故障路径上某一分界点  $i$  位于故障点上游, 该节点不可观, 则该节点电压值可以采用其下一层中除故障路径所在段之外的所有馈线段( $m$ 条)的, 馈线段平均残压值的均值来替代, 即:

$$U_{cy-i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_{cy-i-j} \quad (13)$$

前期工作提出的复杂配电网络故障路径搜索算法<sup>[9]</sup>可以有效地保证故障路径的方向性——从电源指向负荷, 因此对于任意单一作用电源而言, 故障路径上各量测电压成下降趋势, 而除故障支路之外的馈出线电压基本与馈出点保持一致。因此采用馈出线平均残压值来替代故障路径上未知节点的量测值是合理的。

### 3 算例仿真

目前的配电系统电能质量监测网构建很不完

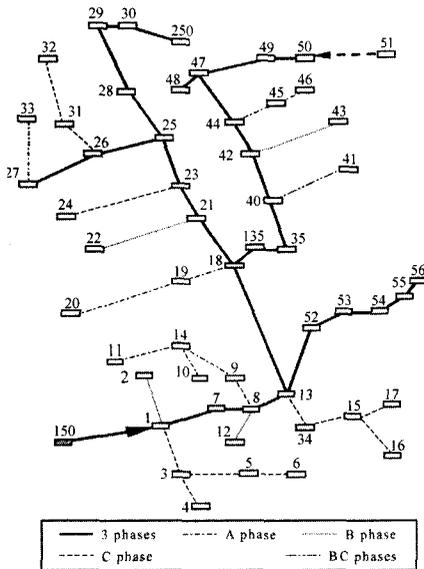


图 3 复杂配电网络拓扑图

Fig. 3 One line diagram of complicated distribution system

善, 很难获得配电网的电压跌落实测数据。因此本文采用 IEEE123 节点配电系统标准测试网络的一部分构建了仿真模型来验证本文提出的算法<sup>[10]</sup>。为了仿真双电源网络结构, 将 51 节点的电动机节点改为发电机节点, 其节点参数与 150 节点参数相同, 在图中以粗虚线标注出。模型中, 除 150 和 51 节点为电压源外, 其余节点均为量测点或待估计节点。为了简化仿真, 假定模型中所有线路的单位阻抗相等且均匀分布。该算例实际上为 25 节点处 A 相经过电阻接地故障, 量测点原始数据列于表 1, 表中所有监测数值均基于 120 V 基准电压。

表 1 双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 Radial Sestem with Dual Source

节点名称	节点编号	A 相电压幅值	B 相电压幅值	C 相电压幅值
Bus1	1	102.407	121.484	121.295
Bus2	2	—	121.456	—
Bus3	3	—	—	121.095
Bus5	5	—	—	120.940
Bus8	8	95.281	124.858	121.232
Bus10	10	94.932	—	—
Bus11	11	94.899	—	—
Bus12	12	—	124.821	—
Bus15	15	—	—	121.069
Bus16	16	—	—	120.946
Bus18	18	81.254	132.451	121.746
Bus20	20	81.063	—	—
Bus22	22	—	136.251	—
Bus24	24	—	—	122.605
Bus26	26	67.461	143.577	123.501
Bus27	27	67.438	143.585	123.510
Bus29	29	67.443	143.581	123.491
Bus32	32	—	—	123.374
Bus33	33	67.341	—	—
Bus35	35	85.551	130.011	121.526
Bus40	40	88.399	128.379	121.409
Bus43	43	—	126.588	—
Bus45	45	93.725	—	—
Bus46	46	93.685	—	—
Bus47	47	96.934	123.883	121.232
Bus48	48	96.912	123.849	121.208
Bus49	49	100.225	122.375	121.269
Bus50	50	103.614	120.943	121.333
Bus53	53	91.128	126.901	121.272
Bus54	54	91.118	126.896	121.278
Bus56	56	91.092	126.867	121.300
Bus250	250	67.468	143.565	123.440

根据故障路径搜索算法已知故障点上游故障路径实际上可以分为三段:

$$l_1: 150 \rightarrow \underline{1} \rightarrow 7 \rightarrow \underline{8} \rightarrow 13$$

$$l_2: 51 \rightarrow \underline{50} \rightarrow \underline{49} \rightarrow \underline{47} \rightarrow 44 \rightarrow 42 \rightarrow \underline{40} \rightarrow \underline{35} \rightarrow 135$$

$$l_3: 18 \rightarrow 21 \rightarrow 23 \rightarrow 25$$

其中: 带下划线的节点为量测节点。因此可以得出故障路径  $l_2$  段完全可观,  $l_1$  段缺少一个量测点,  $l_3$  段缺少两个量测点, 才能满足 SSE 算法的最低要求。

通过故障路径搜索, 可以得到故障路径上所有待测节点中只有 13 节点的馈线段平均残压可量测, 因此首先由公式(13)计算 13 节点的电压替代值:

$$U_{cy-13} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_{cy-i-j} = U_{cy-13-56} = 91.779$$

此时  $l_1$ 、 $l_2$  段均具有了可观性。采用 SSE 算法, 我们可以分别得到  $l_1$ 、 $l_2$  故障路段上电压幅值平方的拟合曲线如图 4 所示, 并且可以得到拟合方程为:

$$V_{l1}(Z_1) = 21963 Z_1^2 - 16916 Z_1 + 10487$$

$$V_{l2}(Z_2) = 9513.7 Z_2^2 - 15094 Z_2 + 10734$$

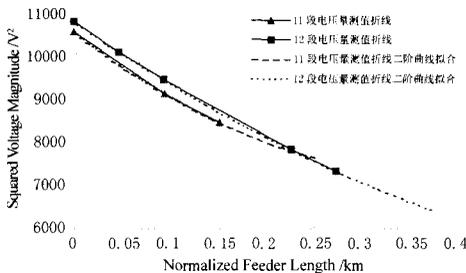


图 4  $l_1$ 、 $l_2$  故障路段  $U_i^2$  折线图及曲线拟合  
Fig. 4 Squared voltage profiles of section  $l_1$ ,  $l_2$  and corresponding polynomial fittings.

由网络结构参数表, 可以得到  $l_3$  段节点 18 分别对应于  $l_1$ 、 $l_2$  段拟合方程中  $Z_1=0.308$ 、 $Z_2=0.344$ , 从而可以求得故障电流  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$  分别在节点 18 处引起的残压值平方:

$$V_{l1}(Z_{1-18}) = 6667.5, V_{l2}(Z_{2-18}) = 7360.4$$

将节点 21 对应于  $l_1$ 、 $l_2$  段拟合方程中  $Z_1=0.365$ 、 $Z_2=0.401$  带入, 可得:

$$V_{l1}(Z_{1-21}) = 6211.1, V_{l2}(Z_{2-21}) = 7238.7$$

同时, 由表 1 提供的原始量测信息, 可以得到:  $V_{l3}(Z_{3-18}) = 6602.2$ , 将以上数据带入公式(12):

$$\begin{cases} \theta_{18} = \theta_{21} \\ \theta_{18} = f[V_{l1}(Z_{1-18}), V_{l2}(Z_{2-18}), V_{l3}(Z_{3-18})] \\ \theta_{21} = f[V_{l1}(Z_{1-21}), V_{l2}(Z_{2-21}), V_{l3}(Z_{3-21})] \end{cases}$$

即可求得:

$$V_{l3}(Z_{3-21}) = 6342.2 \rightarrow U_{l3}(Z_{3-21}) = 79.638$$

而由实际故障潮流计算, 可以得到  $U(Z_{3-21}) = 75.299$ ,

计算绝对误差值:

$$\left| \frac{U(Z_{3-21}) - U_{l3}(Z_{3-21})}{120} \right| = \frac{75.299 - 79.638}{120} = 3.62\% < 10\%$$

满足 SARFIx 系数统计的要求, 从而验证了电压跌落状态估计部分不可观问题算法的有效性。

## 4 结论

针对分布式发电及小电厂并网发电带来的复杂配电网结构, 传统的电压跌落状态估计技术无法直接使用的问题, 提出了电压跌落状态估计可观性的概念, 并且从故障电流叠加的角度出发, 构造了电压跌落状态估计可观性的数学模型, 合理地解决了部分故障路段不可观的问题, 使得 SSE 算法可以应用到多电源复杂配电系统。

限于实际配电系统暂态电能质量监测网的不足, 无法获取实测数据。本文工作只给出了仿真验证, 尚需进一步在实际系统中应用检验。

## 参考文献

- [1] Sarmiento H G, Estrada E. A Voltage Sag Study in An Industry with Adjustable-speed Drives. IEEE Industry Applications Magazine, 1996, 1 (1): 16-19.
- [2] Carter W W. Control of Power Quality in Modern Industry Proc. IEEE Annu. Textile Industry Tech. Conf., 1989, pp. 11/1-11/4.
- [3] Wagner V E, Andreshak A A, Staniak J P. Power Quality and Factory Automation. IEEE Trans. Ind. Applicat, 1990, Vol. 26, pp. 620-626.
- [4] IEEE Std. 1346-1998. Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. ISBN 0-7381-0184-2, IEEE Product No.: SH94614-TBR
- [5] WANG Bin, XU Wilsun and PAN Zhencun. Voltage Sag State Estimation for Power Distribution Systems, IEEE Trans. on Power Systems, 2005 20(2): 806-812.
- [6] 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 25(13): 29-34. WANG Bin, PAN Zhen-cun, XU Wen-yuan. Voltage Sags Profile Estimation for Power Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005 25(13): 29-34.

(下转第 40 页 continued on page 40)

### 6 结论

本文提出基于分区逐时气象信息的全网负荷预测新策略,即根据全网负荷与综合气象因素之间的关系进行负荷预测。指出按照行政区域和气候区域相结合来分区,定义了基于负荷的综合气象因素。河南电网实际应用结果证明基于逐时分区气象信息获得综合气象信息进行负荷预测的有效性。

### 参考文献

[1] Liu K.: Comparison of Very Short-term Load Forecasting Technique. IEEE Trans. on Power Systems, Vol.11(1996), No.2, 877-882

[2] 康重庆, 夏清, 张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向探讨. 电力系统自动化, 2004, 28(3):1-11.  
KANG Chong-qing, XIA Qing, ZHANG Bo-ming. Review of Power System Load Forecasting and Its Development. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3):1-11.

[3] 汪峰, 于尔铿, 阎承山, 等. 基于因素影响的电力系统短期负荷预报方法的研究. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 54-58.  
WANG Feng, YU Er-keng, YAN Cheng-shan, et al. Study of Short-term Loadforecast Model Involved Meteorological Elements [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 54-58.

[4] 康重庆, 周安石, 王鹏, 等. 短期负荷预测中实时气象因素的影响分析及其处理策略. 电网技术, 2006, 30(7):5-10  
KANG Chong-qing, ZHOU An-shi, WANG Peng, et al. Impact Analysis of Hourly Weather Factors in Short-Term Load Forecasting and Its Processing Strategy. Power System Technology, 2006, 30(7):5-10

[5] 康重庆, 程旭, 夏清, 等. 一种规范化的处理相关因素的短期负荷预测新策略. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 32-35.  
KANG Chong-qing, CHENG Xu, XIA Qing, et al. A

New Unified Approach to Short-term Load Forecasting Considering Correlated factors Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 32-35.

[6] 李晶, 王恕. 辽宁电网负荷与气象要素相关分析. 辽宁气象, 2005, 2:15-16.  
LI JING, WANG Shu, The Analysis of Relativity Between Meteorologic Factors and Power Load of LiaoNing. LiaoNing Meteorology, 2005, 2:15-16.

[7] 李明, 王智灵, 杨晓宇, 等. 突变期电力负荷预测方法及其研究. 电力系统自动化, 2006, 30(10):93-96.  
LI Ming, WANG Zhi-ling, YANG Xiao-yu, et al. Short-term Load Forecasting for Abnormal Changes and Its Application. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10):93-96.

[8] 程松, 李乃湖, 等. 一种新的基于相似日的短期负荷预计方法. 江苏电机工程, 1999, 18(12):14-17.  
CHENG Song, LI Nai-hu, et al. A New Short-term Load Forecast Method Based on the Similar Day. Jiangsu Electrical Engineering, 1999, 18(12):14-17.

[9] 周晖, 王玮, 秦海超, 王书春, 姜红. 基于多时段气象数据判断相似日的日负荷曲线预测研究. 继电器, 2005, 33(23):41-45.  
ZHOU Hui, WANG Wei, QIN Hai-chao, et al. Study of Next-day Load Curve Prediction Based on Similar Days Determined by Daily Multi-intervals Meteorological Data. Relay, 2005, 33(23):41-45.

[10] 鞠平, 姜巍, 赵夏阳等. 96 点短期负荷预测方法及其应用. 电力系统自动化 2001, 22:32-36.  
JU Ping, JIANG Wei, ZHAO Xia-yang, et al. Ninety-six Points Short-term Load forecasting—The theory & applications. Automation of Electric Power Systems, 2001, 22:32-36.

收稿日期: 2008-03-30; 修回日期: 2008-04-23

### 作者简介:

李新炜 (1973-), 男, 高级工程师, 长期从事电力市场运营方面的工作. E-mail: pju@hhu.edu.cn

(上接第 35 页 continued from page 35)

[7] Dugan R C, McDermott R E. Distributed Generation. IEEE Industry Applications Magazine, 2002 8(2): 19-25.

[8] El-Khattam W. Distribution System Planning using Distributed Generation. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, IEEE CCECE 2003. 2003, Vol. 1: 579-582.

[9] 王宾, 潘贞存, 董新洲. 基于电压跌落状态估计的复杂配电网络故障路径搜索算法[J]. 电网技术, 2007, 31, (10):55-60.  
WANG Bin, PAN Zhen-cun, DONG Xin-zhou. A Fault Path Searching Algorithm Based on Voltage Sag State Estimaion for Complicated Distribution Systems[J].

Power System Technology, 2007, 31, (10):55-60.

[10] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial Distribution Test Feeders. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 6( 3): 975-985.

收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-05-06

### 作者简介:

牟旭涛 (1976-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: mxt.761103@163.com

王 宾 (1978-), 男, 博士, 出站博士后, 助理研究员, 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, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统继电保护以及电能质量等领域的研究。