

# 配电网抗灾变性分析与评价

程红丽, 刘健, 徐精求

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了评价配电网的抗灾变能力, 定义了配电网的抗灾变系数反映配电网在各种故障后对受影响的健全区域恢复供电的能力, 它由配电网抗灾变率和配电网静态安全率两部分相乘构成, 前者反映从网架结构的角度对受影响的健全区域恢复供电的能力, 后者反映从电气设备的容量的角度对受影响的健全区域恢复供电的能力。论述了配电网的抗灾变性分析和评价方法, 采用配电网抗灾变性分析表反映各种故障的影响范围, 采用故障后用负荷表反映各种故障的影响程度, 采用馈线故障关联表列出会造成某条健全线路停电的各种故障。并给出一个实例说明了提出的指标和方法。

**关键词:** 配电网; 配电网规划; 抗灾变能力; 评价

**中图分类号:** TM72, TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0026-05

## 0 引言

对于配电网规划和设计方案在发生故障或检修时的应变能力的评估一般采用供电可靠性指标<sup>[1]</sup>, 但是在计算供电可靠性时, 仅仅考虑了网架结构, 而没有考虑网络重构后对侧电源能否带得动全部负荷; 并且供电可靠性指标一般是针对配电网发生局部故障这类小扰动的, 而对于高压进线故障导致多座变电站停电、或变电站故障、或者主变电站的 10 kV 母线故障这类灾害性事故, 则由于发生的概率很小而对于供电可靠性指标的影响不大。

近年来欧美发生的多次电网大停电事故, 给电力工作者敲响了警钟。尽管灾害性事故发生概率较小, 但是造成大面积停电的危害极大, 因此有必要对配电网在灾害性事故后的应变能力进行更加突出的评价, 以便发现配电网的薄弱环节, 并及时采取有效的措施。

文献 [2] 研究了输电网的静态安全分析, 通过对输电网设置预想事故, 对会引起电气设备过载等对输电网安全运行构成威胁的事故进行警示, 从而对输电网的安全水平进行评估, 找出系统运行的薄弱环节。文献 [3] 研究了配电网的静态安全分析问题, 考察配电网在各种预想事故下, 通过网络重构最大限度地安全转代受事故影响的负荷的能力。但是文献 [2] 和 [3] 的工作都仅仅考虑了负荷的安全转代问题, 而没有考虑网架结构本身的抗灾变性能力。

本文在文献 [3] 的基础上, 发展了一种配电网抗灾变性评价方法, 综合考虑了取决于电气设备容量的配电网的静态安全指标和网架结构的抗灾变性能力。

## 1 配电网抗灾变性指标

文献 [3] 定义了配电网的静态安全率指标  $R$ , 即:

$$R = \frac{L}{L} \quad (1)$$

其中:  $L$  为紧急状态下, 从网架结构上所能保证转供的负荷,  $L$  表示  $L$  中考虑电气设备的极限容量而能维持供电的全部负荷。

文献 [3] 还定义了配电网静态安全减负荷值  $L_R$ , 它是事故后因电气设备的极限容量的原因被甩去的负荷, 即:

$$L_R = L - L \quad (2)$$

$R$  和  $L_R$  较好地描述了紧急状态下从配电网中电气设备的极限容量的角度, 所能维持的供电的负荷所占的比例以及必须甩去的负荷量。但是若要对配电网的抗灾变性能力进行总体评价, 除了要考虑各个电气设备的容量限制外, 还要考虑配电网网架结构本身对于受故障影响的健全区域负荷的转移能力。

本文定义配电网抗灾变率  $H$  为:

$$H = \frac{L}{L_T} \quad (3)$$

其中:  $L_T$  为受事故影响的总负荷,  $L$  为  $L_T$  中从网架结构上所能转供的负荷。

定义事故后因网架结构的原因而被甩去的负荷为  $L_H$ , 即:

$$L_H = L_T - L \quad (4)$$

$H$  和  $L_H$  反映了紧急状态下由于配电网架结构的限制所能维持的供电的负荷所占的比例以及被甩去的负荷量。

接下来我们定义综合反映配电网的各个电气设备的容量限制以及配电网网架结构本身限制的配电网的抗灾变系数  $K$  为:

$$K = HR \quad (5)$$

定义紧急状态下甩负荷值  $L_K$  为

$$L_K = L_H + L_R \quad (6)$$

$K$  和  $L_K$  反映了紧急状态下综合考虑了网架结构的限制和电气极限容量限制后所能维持的供电的负荷所占的比例以及被甩去的负荷量。

定义电气设备  $i$  的静态安全程度  $S_i$  为

$$S_i = \frac{I_i}{I_{\max, i}} \quad (7)$$

其中:  $I_i$  表示流过电气设备  $i$  的负荷,  $I_{\max, i}$  表示电气设备  $i$  的额定负荷。仿照文献 [3], 我们作如下规定:

$$S_i = \begin{cases} 1.2 \sim & \text{很不安全} \\ 1.0 \sim 1.2 & \text{不安全} \\ 0.9 \sim 1.0 & \text{有风险} \\ 0.7 \sim 0.9 & \text{安全} \\ 0.0 \sim 0.7 & \text{很安全} \end{cases} \quad (8)$$

综上所述,  $K$  越大反映配电网的抗灾变能力越强,  $H$  越大反映配电网架结构的抗灾变能力越强,  $R$  越大反映配电网的电气设备容量越充足。反之,  $K$  太小则反映配电网的抗灾变能力不够, 若  $H$  太小反映配电网架结构不够合理而需要改造,  $R$  太小反映配电网的电气设备容量不够合理而需要扩容, 其中甩负荷前静态安全程度  $S$  不安全的设备就是需要扩容的设备,  $S$  最大的设备就是最薄弱环节。

## 2 配电网抗灾变性分析方法

图 1 描述了配电网抗灾变性分析的流程, 它由对任意馈线段故障后的分析、对任意母线故障后的分析、对任意变电站故障后的分析以及对任意高压进线故障后的分析等模块组成。其中馈线段故障分析流程如图 2 所示, 在设置一条馈线段故障后, 先隔离故障区域, 将从网架结构角度能够转移的负荷转移到其它健全电源点上, 并计算配电网架抗灾变率  $H$  和因网架结构的原因被甩去的负荷  $L_H$ , 然后采用文献 [4] 描述的方法进行负荷均衡化, 获得负荷分布最均匀的运行方式以最大限度地避免过负荷, 计算此时各个电气设备的静态安全程度  $S_i$ , 并判断是否安全, 若不安全 (即存在  $S > 1.0$  的电气设备) 则甩去一部分负荷直到所有电气设备的静态安全程度  $S$  都小于 1.0 为止, 并计算配电网静态安全率  $R$  和因电气设备的极限容量的原因被甩去的负荷  $L_R$

以及抗灾变系数  $K$  和紧急状态下甩负荷值  $L_K$  等抗灾变性评价指标, 并列运行方式调整策略和被甩去的健全馈线段 ..., 如此反复直到全部馈线段故障的影响都分析完为止。

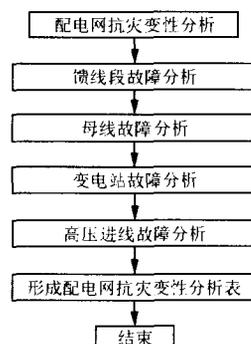


图 1 配电网抗灾变性分析流程

Fig 1 Flow chart of anti-accident analysis

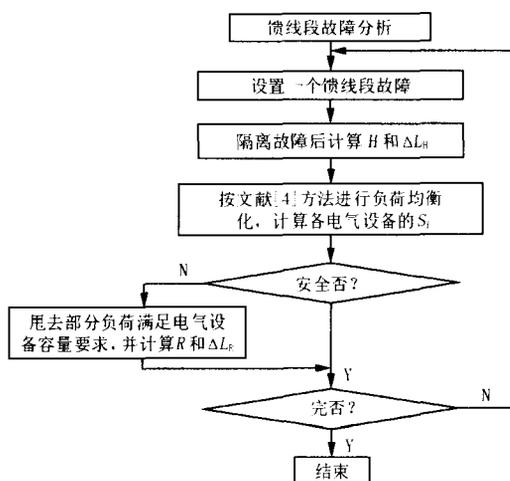


图 2 馈线段故障分析流程

Fig 2 Flow chart of fault analysis for feeder section

母线故障分析、变电站故障分析和高压进线故障分析流程与图 2 所示流程类似, 本文不再赘述。

若要考虑多处同时发生故障的情形, 需要对各种单处故障进行全排列组合设置, 然后再分别进行分析, 考虑到多处同时发生故障的概率很小, 本文没有分析这类情况。

## 3 配电网抗灾变性分析实例

本文在文献 [3] 给出的实例上增添了两条高压进线作为本文的算例, 如图 3 所示。各台主变压器的电气极限均为 2 000 A, 各 10 kV 母线的电气极限均为 2 000 A, 其它开关和导线的额定负荷均为 400 A, 各区域和馈线段的负荷如图中括号内所示。图中的

圆圈表示开关,实心表示闭合,空心表示断开,开关旁边的数字表示其编号。

图 3 所示配电网进行了分析,得出配电网抗灾变性分析表如表 1 所示。

采用第 3 节描述的配电网抗灾变性分析方法对

表 1 配电网抗灾变性分析表

Tab 1 Anti-accident of distribution network

| 假想事故               | H     | L <sub>H</sub> | 用负荷前不安全设备  | S <sub>i</sub> /(%) | R     | L <sub>R</sub> | L <sub>K</sub> | K/(%) | 运行方式调整方案  | 用去的健全馈线段        |        |                          |
|--------------------|-------|----------------|------------|---------------------|-------|----------------|----------------|-------|---|-----------------|--------|--------------------------|
| #1 高压进线故障          | 1.0   | 0.0            | 开关 7       | 124                 | 0.446 | 734            | 734            | 44.6  | 分开关:<br>1, 10, 20, 34,<br>42, 33, 44,<br>64, 11, 16,<br>21, 49, 32,<br>62<br>合开关:<br>13, 8, 61, 19,<br>27, 51 | 线路 1 - 2        |        |                          |
|                    |       |                | 开关 18      | 151                 |       |                |                |       |   | 线路 2 - 3        |        |                          |
|                    |       |                | 开关 29      | 145                 |       |                |                |       |   | 线路 3 - 4        |        |                          |
|                    |       |                | 开关 52      | 150                 |       |                |                |       |   | 线路 10 - 11      |        |                          |
|                    |       |                | 开关 6       | 114                 |       |                |                |       |   | 线路 20 - 21      |        |                          |
|                    |       |                | 开关 19      | 114                 |       |                |                |       |   | 线路 34 - 35 - 36 |        |                          |
|                    |       |                | 开关 27      | 105                 |       |                |                |       |   | 线路 36 - 37      |        |                          |
|                    |       |                | 开关 53      | 144                 |       |                |                |       |   | 线路 37 - 38      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 7 - 6   | 124                 |       |                |                |       |   | 线路 39 - 43 - 41 |        |                          |
|                    |       |                | 线路 9 - 6   | 114                 |       |                |                |       |   | 线路 41 - 42      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 17 - 18 | 151                 |       |                |                |       |   | 线路 38 - 39      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 19 - 23 | 114                 |       |                |                |       |   | 线路 44 - 45      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 27 - 29 | 145                 |       |                |                |       |   | 线路 45 - 46      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 27 - 30 | 105                 |       |                |                |       |   | 线路 46 - 47      |        |                          |
| 线路 52 - 53         | 150   | 线路 62 - 63     |            |                     |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 线路 53 - 51         | 144   | 线路 63 - 64     |            |                     |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| #2 高压进线故障          | 0.906 | 98             | 开关 10      | 102                 | 0.843 | 149            | 247            | 76.3  | 分开关:<br>7, 18, 29, 52,<br>54, 49, 16<br>合开关:<br>4, 13, 47, 61   | 线路 16 - 18 - 19 |        |                          |
|                    |       |                | 线路 10 - 11 | 102                 |       |                |                |       |   | 线路 54 - 56 - 58 |        |                          |
| 变电站 C 故障           | 1.0   | 0.0            | 开关 29      | 125                 | 0.624 | 256            | 256            | 62.4  | 分开关:<br>23, 16, 14, 5,<br>33, 42, 44, 64, 30<br>合开关:<br>25, 38, 61, 19,<br>8, 13, 4                           | 线路 44 - 45      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 29 - 28 | 125                 |       |                |                |       |   | 线路 45 - 46      |        |                          |
|                    |       |                | 开关 18      | 101                 |       |                |                |       |   | 线路 46 - 47      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 18 - 19 | 101                 |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 变电站 A 故障           | 1.0   | 0.0            | 开关 18      | 102                 | 0.736 | 170            | 170            | 73.6  | 分开关:<br>1, 10, 20, 34,<br>49, 48, 60, 11, 23<br>合开关:<br>4, 13, 25, 38, 51,<br>47, 61                          | 线路 10 - 11      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 18 - 16 | 102                 |       |                |                |       |   | 线路 20 - 21      |        |                          |
|                    |       |                | 开关 33      | 120                 |       |                |                |       |   | 线路 21 - 22 - 23 |        |                          |
|                    |       |                | 线路 33 - 32 | 120                 |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 线路 32 - 31         | 114   |                |            |                     |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 母线 115 故障          | 1.0   | 0.0            | 开关 29      | 125                 | 0.521 | 126            | 126            | 52.1  | 分开关:<br>44, 64, 14, 5, 16<br>合开关:<br>61, 13, 4, 8   | 线路 44 - 45      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 29 - 28 | 125                 |       |                |                |       |   | 线路 45 - 46      |        |                          |
| 线路 29 - 28         | 125   | 线路 46 - 47     |            |                     |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 母线 111 故障          | 1.0   | 0.0            | 开关 18      | 102                 | 0.848 | 29             | 29             | 84.8  | 分开关:<br>1, 10, 49,<br>48, 60, 11<br>合开关:<br>4, 13, 51, 47, 61   | 线路 10 - 11      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 18 - 16 | 102                 |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
|                    |       |                |            |                     |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
|                    |       |                |            |                     |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 母线 112 故障          | 1.0   | 0.0            | 开关 18      | 101                 | 0.943 | 26             | 26             | 94.3  | 分开关: 20, 34,<br>49, 16, 48, 14,<br>5, 60, 21<br>合开关: 19, 38, 51,<br>8, 47, 13, 4, 61                          | 线路 20 - 21      |        |                          |
|                    |       |                | 线路 18 - 16 | 101                 |       |                |                |       |   |                 |        |                          |
| 母线 114 故障          | 1.0   | 0.0            | 无          | ...                 | 1.0   | 0.0            | 0.0            | 100   | 分开关: 33, 42,<br>9, 48, 14, 60, 5, 16<br>合开关: 38, 27,<br>51, 47, 13, 61, 4, 8                                  | 无               |        |                          |
| 馈线 56 - 57 故障      | 1.0   | 0.0            |            |                     |       |                |                | 0.0   | 100   | 分开关 56          |        |                          |
| 馈线 58 - 59 故障      | 1.0   | 0.0            |            |                     |       |                |                |       | 0.0   | 100             | 分开关 58 |                          |
| 馈线 54 - 56 - 58 故障 | 0.0   | 38             |            |                     |       |                |                |       | 38  | 0.0             | 分开关 54 | 馈线 56 - 57<br>馈线 58 - 59 |
| 馈线段 36 - 37 故障     | 1.0   | 0.0            | 无          | ...                 | 1.0   | 0.0            | 0.0            | 100   | 分开关: 36, 37<br>合开关: 38  |                 | 无      |                          |
| ...                | ...   | ...            | ...        | ...                 | ...   | ...            | ...            | ...   | ...   | ...             | ...    |                          |

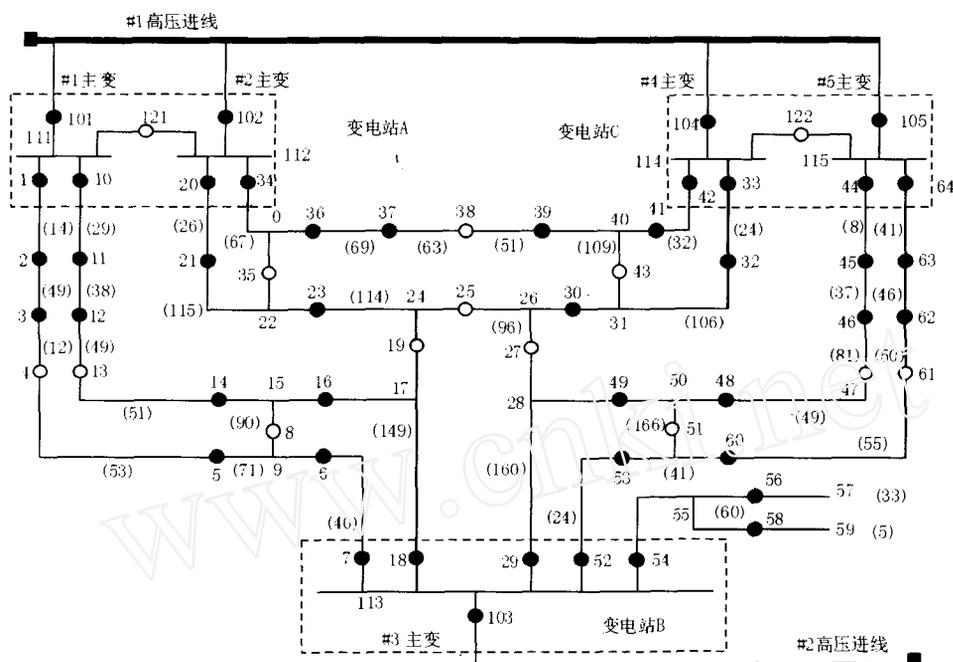


图 3 配电网抗灾变性分析的实例

Fig 3 An example of distribution network anti-accident analysis

由表 1 可以看出:当 #2 高压进线故障(或变电站 B 故障或母线 113 故障)和馈线 54 - 56 - 58 故障时,从网架结构的角度都不能确保受影响的健全区域全部恢复供电,并且前者从电气设备的容量的角度还必须甩去一部分负荷。当 #1 高压进线故障、变电站 A 和 C 故障、母线 111、112、114 和 115 故障时,尽管从网架结构的角度能确保受影响的健全区域全部恢复供电,但考虑到电气设备的容量限制,也必须甩去一部分负荷。而对于其它的故障情况,则无论从网架结构的角度还是从电气设备的容量的角度都能确保受影响的健全区域全部恢复供电。

将表 1 按照故障后不能恢复的健全区域的总负荷的顺序排列,得到配电网故障后甩负荷表,如表 2 所示。

表 2 配电网故障后甩负荷表

Tab 2 Load shielding in the case of faults

| 假想故障                                   | $L_T$ |
|--|-------|
| #1 高压进线故障                              | 734   |
| 变电站 C 故障                               | 256   |
| #2 高压进线故障<br>(或变电站 B 故障<br>或母线 113 故障) | 247   |
| 变电站 A 故障                               | 170   |
| 母线 115 故障                              | 126   |
| 馈线 54 - 56 - 58 故障                     | 38    |
| 母线 111 故障                              | 29    |
| 母线 112 故障                              | 26    |

由表 1 和表 2 可以看出, #1 高压进线故障会对系统造成大范围停电,变电站 C 故障、#2 高压进线故障(或变电站 B 故障或母线 113 故障)、变电站 A 故障以及母线 115 故障会对系统造成较大的影响,馈线 54 - 56 - 58 故障、母线 111 故障和母线 112 故障对系统也有影响,但影响不严重。

表 3 馈线故障关联表(本段故障除外)

Tab 3 Feeder-fault related table (except for this fault)

| 馈线段        | 影响故障   |
|------------|--|
| 线路 44 - 45 | #1 高压进线故障<br>变电站 C 故障<br>母线 115 故障                           |
| 线路 45 - 46 | #1 高压进线故障<br>变电站 C 故障<br>母线 115 故障                           |
| 线路 46 - 47 | #1 高压进线故障<br>变电站 C 故障<br>母线 115 故障                           |
| 线路 10 - 11 | #1 高压进线故障<br>变电站 A 故障<br>母线 111 故障                           |
| 线路 20 - 21 | #1 高压进线故障<br>变电站 A 故障<br>母线 112 故障                           |
| 线路 56 - 57 | #2 高压进线故障<br>(或变电站 B 故障<br>或母线 113 故障)<br>馈线 54 - 56 - 58 故障 |
| 线路 58 - 59 | #2 高压进线故障<br>(或变电站 B 故障<br>或母线 113 故障)<br>馈线 54 - 56 - 58 故障 |
| ...        | ...  |

根据表 1 将造成各个健全区域不能恢复供电的故障排列成馈线故障关联表,如表 3 所示。由表 3 可以清楚地看出会造成某条健全线路停电的各种故障,比如即使线路 44 - 45、45 - 46 和 46 - 47 本身没有故障,在 #1 高压进线故障或变电站 C 故障或母线 115 故障的情况下,都会造成它们停电。

#### 4 结论

配电网抗灾变系数  $K$  反映了配电网在各种故障后对受影响的健全区域恢复供电的能力,它由配电网架抗灾变率  $H$  和配电网静态安全率  $R$  两部分相乘构成, $H$  反映从网架结构的角度对受影响的健全区域恢复供电的能力, $R$  反映从电气设备的容量的角度对受影响的健全区域恢复供电的能力。

配电网抗灾变性分析表反映了各种故障的影响范围,故障后用负荷表反映了各种故障的影响程度,馈线故障关联表反映了会造成某条健全线路停电的各种故障。

本文的假想事故中,仅考虑了一处事故的情形,当然还可以假设同时发生多处事故的情形,文中提出的配电网抗灾变指标和分析方法同样适用。

#### 参考文献:

- [1] Broadwater R P, Shaalan H E, Ashok O, et al Distribution System Reliability and Restoration Analysis[J]. E-

lectric Power Systems Research, 1994, 29: 203-211.

- [2] Zhang B M, Wang S Y, Xiang N D, et al A Security Analysis and Optimal Power Flow Package with Real-time Implementation in Northeast China Power System [A]. Proceedings International Conference on Advanced Power System Control Operation and Management Hong Kong: 1993.
- [3] 刘健,徐精求,董海鹏.配电网静态安全分析[J].电力系统自动化,2003,27(17):26-30.  
L U Jian, XU Jing-qiu, DONG Hai-peng Security Analysis of Distribution Networks [J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27 (17): 26-30
- [4] 刘健,董海鹏,蔡建新.配电网故障判断与负荷均衡化[J].电力系统自动化,2002,26(22):34-38.  
L U Jian, DONG Hai-peng, CA I Jian-xin Fault Section Identification and Load Balancing of Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (22): 34-38

收稿日期: 2004-05-18; 修回日期: 2004-06-07

#### 作者简介:

程红丽(1966-),女,副教授,研究领域为电力系统分析和配电自动化;E-mail: edliu@bylink.com.cn

刘健(1967-),男,博士,教授,博士生导师,研究领域为电力系统自动化;

徐精求(1966-),女,博士研究生,研究领域为安全技术及安全工程和配电系统自动化。

### Evaluation of anti-accident ability of distribution networks

CHENG Hong-li, L U Jian, XU Jing-qiu

(Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to evaluate the anti-accident ability of distribution networks, a parameter of anti-accident ability is defined to identify the ability of healthy feeder restoration in various fault conditions, and the parameter is composed of structural anti-accident ability and distribution network security level. The former identifies the ability of restoration with the network frame. The latter identifies the ability of restoration considering the electrical limitation of equipments. The method of anti-accident ability evaluation is discussed. A table of distribution network anti-accident ability is used to show the range of fault effects. A load shielding table is used to show the intensity of fault effects, and a feeder-fault related table is described to list the faults which may cause a certain feeder fault. An example is described to explain the proposed parameters and methods.

**Key words:** distribution network; distribution network planning; anti-accident ability; evaluation