

⑦ 31-36

## 用层次分析法研究自动故障选择和排序\*

AN APPLICATION OF ANALYTIC HIERARCHY PROCESS TO  
AUTOMATIC CONTINGENCY SELECTION AND RANKING

朱继忠  
Zhu Jizhong

徐国禹  
Xu Guoyu

(重庆大学电气工程系)

TM732

**摘要** 提出用层次分析法(AHP)研究电力系统中自动故障选择和排序问题;综合考虑了系统中线路的相对重要性,以及电网中输电线路事故停运后有功和无功参量违反约束的情况,能为电力系统安全分析或经济调度提供准确的信息。文中给出了算例及计算结果。

**关键词** 层次分析法;电力系统;安全调度;自动故障选择 / 安全分析

中国图书资料分类法分类号 TM732

**ABSTRACT** This paper presents an approach to study the problem of automatic contingency selection and ranking with the analytic hierarchy process, and takes into consideration the relative importance of transmission lines and the situation that the real and reactive power security constraints are violated as the line outage appears. Thus, the precise information in the real time security analysis and economic dispatch can be provided.

**KEY WORDS** analytic hierarchy process; power system; secure dispatch; automatic contingency selection / security analysis

### 0 引 言

在电力系统静态安全分析中,预想事故选择和排序的方法多数是基于潮流计算,并采用有功型指标进行评定事故的严重程度,而没有计及线路停运后无功参量(无功功率和节点电压)违限的情况;因此,所计算的故障选择和排序不够全面<sup>[1,2]</sup>。文献<sup>[3-6]</sup>从电力系统中有功和无功及其参量间存在弱耦合关系出发,定义了有功负荷削减量作为性能指标,并采用计算快速、收敛可靠的网流法进行计算。但这些文章都只计算了有功和无功指标单层次排序问题。而如何综合利用有功和无功两种性能指标,全面研究故障选择和排序问题,因难于用完全定量的方法来分析而使问题搁浅。

美国学者 T. L. Saaty 教授于70年代提出的层次分析法(AHP),是分析复杂问题的一种简便方法,它特别适合于那些难于完全用定量方法进行分析的复杂问题,目前已广泛应用于

\* 收文日期 1991-03-30

国家自然科学基金资助项目

社会、科学和经济领域<sup>[7]</sup>。由于 AHP 具有能将决策者对复杂系统的决策思维过程实行数量化,且所需的定量数据少,易于计算等优点,所以,适宜于解决有功和无功统一故障排序问题。但是,在电力系统故障排序中应用 AHP 时,若完全采用 9 标度法<sup>[7]</sup>来比较各条线路的大小,是不能真正地反映各条线路单一故障的实际情况及其相对重要程度,从而造成“误排”,给电力系统安全分析和运行提供错误的信息。因此,用 AHP 法研究线路故障排序时,应选取一些能反映电网实际情况的定量数据,使故障排序结果较为准确。

本文就 AHP 法用于电力系统故障排序问题作了有益的探索,建立了有功和无功故障排序的层次结构模型,综合考虑了系统中线路的相对重要性,以及电网中输电线路事故停运后有功和无功参量违反安全约束的情况。通过对 IEEE-14 节点系统用 AHP 进行线路故障排序计算,其结果表明本文方法是可行和有效的。

## 1 层次分析法

### 1.1 AHP 的基本原理

层次分析法(AHP)的基本原理是:通过对复杂问题进行分析并建立相应层次分析结构模型,把复杂问题转化为层次中排序计算的问题。在排序计算中,每一层次中的排序又可简化为一系列成对因素的判断比较,并根据一定的比率标度将判断定量化,形成比较判断矩阵;通过计算判断矩阵的最大特征值和它的特征向量,即可计算出某层次因素相对于上一层次中某一因素的相对重要性权值,这种排序计算称为层次单排序。为了得到某一层次相对上一层次组合权值,我们用上一层次各个因素分别作为下一层次各因素间相互比较判断的准则,得到下一层次因素相对上一层次各个因素的相对重要性权值;然后用上一层次因素的组合权值加权,即得到下一层次因素相对于上一层次整个层次组合权值,这种排序计算称为层次的总排序。依次沿递阶层次结构由上而下逐层计算,即可计算出最低层因素相对于最高层(总目标)的相对重要性权值。

### 1.2 AHP 的基本步骤

根据以上原理,可得 AHP 的计算步骤为:

1. 建立层次结构模型。
2. 构造判断矩阵。判断矩阵中元素的值反映了人们对各因素相对重要性的认识,一般采用 1—9 及其倒数的标度方法。
3. 计算判断矩阵最大特征根及其对应的特征向量。本文用方根法近似求解,其步骤为:
  - (1) 计算判断矩阵每一行元素的乘积  $M_i$ 。

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中,  $n$  为判断矩阵  $A$  的阶,  $a_{ij}$  为  $A$  中元素。 (2) 计算  $M_i$  的  $n$  次方根  $\bar{w}_i$ 。

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (2)$$

(3) 对向量  $\bar{w} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n]^T$  规格化,即

$$w_i = \bar{w}_i / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j \quad (3)$$

则  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  即为所求的特征向量。

(4) 计算判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{max}$

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \tag{4}$$

式中  $(AW)_i$  表示向量  $AW$  的第  $i$  个元素。

4. 层次单排序及其一致性检验。一致性指标为：

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{5}$$

当随机一致性比率  $CR = CI/RI < 0.10$  时,认为层次单排序的结果有满意的一致性。其中  $RI$  为给定的平均随机一致性指标。

5. 层次总排序。计算同一层次所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的排序权值。这一过程是从最高层到最低层逐层进行的。

设上一层次  $A$  包含  $m$  个因素  $A_1, A_2, \dots, A_m$ , 其层次总排序权值分别为  $W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{am}$ 。下一层次  $B$  包含  $n$  个因素  $B_1, B_2, \dots, B_n$ , 它们对于因素  $A_j$  的层次单排序权值分别为  $W_{bj}, W_{b2j}, \dots, W_{bnj}$ 。(当  $B_i$  与  $A_j$  无联系时,  $W_{bij} = 0$ )。则  $B$  层次总排序权值为

$$W_{bi} = \sum_{j=1}^m W_{aj} \cdot W_{bij} \tag{6}$$

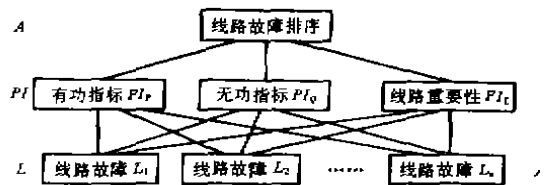
6. 层次总排序的一致性检验。设  $B$  层次某些因素对  $A_j$  单排序的一致性指标为  $CI_j$ , 相应的平均随机一致性指标为  $RI_j$ , 则  $B$  层次总排序随机一致性比率为

$$CR = \sum_{j=1}^m a_j CI_j / \sum_{j=1}^m a_j RI_j \tag{7}$$

当  $CR < 0.1$  时,层次总排序结果具有满意的一致性。

## 2 AHP 用于自动故障排序

根据前面所述的 AHP 的基本原理和计算步骤,我们建立如图所示的有功和无功指标统一故障排序的层次结构模型。整个层次分析结构分三层:第一层为总目的,即对故障线路进行排序;第二层为评价各线路相对重要性和故障严重程度的性能指标;第三层为电网运行中所有可能发生严重故障的线路。



故障排序层次结构模型图

对于有功指标  $PI_p$  和无功指标  $PI_q$ , 可以根据系统的运行条件而得到定量数据。即线路故障的严重程度可按其后果:(1) 对线路有功过载或(2) 对节点电压的影响为指标来排序。前者为有功型,后者为无功型。当系统中发生支路停运时,如果要满足线路安全约束,那么电源向系统提供负荷的能力就可能受限,从而导致有功负荷的削减 / 和 / 或无功负荷的削减(亦即需要增加无功补偿)。故障愈严重,削减量就愈多。因此,对于有功和无功自动故障选择和排序问题,我们分别选取有功负荷削减量和无功负荷削减量的大小,作为评定事故严重程度的性能指标  $PI$ 。即

$$PI_p = [(P_k^i - \sum_k P_{Dk}) / P_k^i] \times 100\% \tag{8}$$

$$PI_Q = [(Q^0 - \sum_k Q_{Dk}) / Q^0] \times 100\% \quad (9)$$

式中,  $PI_P, PI_Q$  分别为有功和无功性能指标;  $P^0, Q^0$  分别为事故前系统的有功总负荷和无功总负荷;  $P_{Dk}, Q_{Dk}$  分别为事故状态下负荷节点  $k$  的有功和无功功率。

我们采用网流法快速计算各线路单一故障时, 负荷节点  $k$  的有功  $P_{Dk}$  和无功  $Q_{Dk}$  (详见文献<sup>[3]</sup>), 进而从式(8)和(9)可计算出线路  $L$  故障后的有功性能指标  $PI_P(L_i)$  和无功性能指标  $PI_Q(L_i)$ 。通过选取  $PI$  的门坎值  $s\%$ , 可滤掉  $PI < s\%$  的轻微事故, 保留  $PI \geq s\%$  的事故。

由于  $PI_P$  和  $PI_Q$  为定量数据, 所以只需将  $PI_P$  和  $PI_Q$  规格化即可得到相应的特征向量, 即

$$W_{P_i} = PI_{P_i} / \sum PI_{P_i} \quad (10)$$

$$W_{Q_i} = PI_{Q_i} / \sum PI_{Q_i} \quad (11)$$

对于线路重要性性能指标  $PI_L$  是难于用定量数据来描述的。但是, 我们可根据线路在系统中所处的位置(如是否为联络线, 或在电源附近)以及线路中正常潮流分布等情况, 可主观地构造出相应的判断矩阵, 以计算其特征向量。

对于判断矩阵  $A - PI$  也是难于用定量数据来构造的。但是, 我们根据电力系统实际运行情况可知, 无功负荷的削减可以通过调节调相机或安

装电容器进行无功补偿; 而有功负荷削减只有中断用户供电。从经济性看, 停电损失费用比用无功补偿所增加的费用高, 所以, 用有功指标比用无功指标进行故障排序稍微重要。又由于  $PI_P, PI_Q$  都是反映线路故障后的严重后果, 而  $PI_L$  反映的是线路可能发生故障的原因, 所以, 性能指标  $PI_P, PI_Q$  比  $PI_L$  重要。根据 9 标度法可得判断矩阵  $A - PI$ , 如表 1 所示。

形成了各层次的判断矩阵后于是可按前面所述的 AHP 法逐层进行计算, 从而可得到故障排序的一览表。

表 1  $A - PI$  判断矩阵

$A$	$PI_P$	$PI_Q$	$PI_L$
$PI_P$	1	2	3
$PI_Q$	1/2	1	3
$PI_L$	1/3	1/3	1

### 3 实例计算

对本文提出的方法, 我们对 IEEE-14 节点系统进行了故障选择和排序计算, 获得了较为满意的计算结果(计算结果不包括变压器支路故障)。

表 2 为用文献<sup>[3]</sup>的方法计算的有功和无功故障选择和单排序结果; 表 3 为根据线路相对重要性主观构造的判断矩阵; 表 4 为用层次分析法计算的有功和无功统一故障排序结果。

表 2 14 节点系统故障选择和单排序

线路序	节点对	$\Delta Q_D$	$PI_Q(\%)$	排 序	$\Delta P_D$	$PI_P(\%)$	排 序
$L_1$	1—2	0.0670	8.2	4	0.473	18.26	2
$L_2$	1—5	0.1504	18.5	1	0.508	19.61	1
$L_4$	2—4	/	/	/	0.271	10.46	5
$L_6$	3—4	0.0617	7.6	7	/	/	/
$L_8$	6—11	0.0635	7.8	6	/	/	/
$L_{10}$	6—13	0.1152	14.2	2	0.281	10.81	4
$L_{11}$	9—10	0.0657	8.1	5	0.184	7.10	6
$L_{12}$	9—14	0.0690	8.5	3	0.468	18.07	3

表 3 线路相对重要性判断矩阵  $PI_L-L$ 

$PL_L-L$	$L_1$	$L_2$	$L_4$	$L_6$	$L_8$	$L_{10}$	$L_{11}$	$L_{12}$
$L_1$	1	2	2	2	4	3	5	5
$L_2$	1/2	1	2	1	4	3	5	5
$L_4$	1/2	1/2	1	1/2	3	2	4	3
$L_6$	1/2	1	2	1	3	2	4	3
$L_8$	1/4	1/4	1/3	1/3	1	1/2	1/2	1/2
$L_{10}$	1/3	1/3	1/2	1/2	2	1	1	1
$L_{11}$	1/5	1/5	1/4	1/4	2	1	1	1/2
$L_{12}$	1/5	1/5	1/3	1/3	2	1	2	1

表 4 有功和无功统一故障排序结果

	$PI_P$	$PI_Q$	$PI_L$	线路故障总排序
	0.5278	0.3325	0.1396	
$L_1$	0.2165	0.1131	0.2673	0.1892
$L_2$	0.2325	0.2539	0.2061	0.2359
$L_4$	0.1240	0.0000	0.1330	0.0840
$L_6$	0.0000	0.1041	0.1725	0.0587
$L_8$	0.0000	0.1072	0.0419	0.0415
$L_{10}$	0.1286	0.1945	0.0704	0.1424
$L_{11}$	0.0842	0.1109	0.0478	0.0880
$L_{12}$	0.2142	0.1164	0.0611	0.1603

## 4 结 论

1) AHP 法能有效地处理难于完全用定量方法来分析的复杂问题,非常适宜于电力系统有功和无功统一故障排序计算;

2) 本文采用有功和无功负荷削减量并计及线路的相对重要性,通过 AHP 法构造判断矩阵计算,能综合反映各条线路单一故障的相对严重程度。

3) 计算结果表明本文方法是可行和有效的,扩展了 AHP 法的应用领域。

### 参 考 文 献

- 1 徐国禹,朱继忠. 用网络规划法进行事故自动选择. 重庆大学学报,1988,11(3):60~66
- 2 Zhu Jizhong, Xu Guoyu. Application of Out-of-Kilter Algorithm to Automatic Contingency Selection and Ranking In: Proceeding of International Symposium on Engineering Mathematics & Applications, ISEMA-88. 1988,301~305
- 3 徐国禹,朱继忠. 按有功和无功指标自动故障选择和排序的统一模型和统一算法. 重庆大学学报,1990,13(2):42~48
- 4 Albuyeh F, Bose A, Heath B. Reactive Power Considerations in Automatic Contingency selection. IEEE Trans, 1982,PAS-101(2):107~112
- 5 Wasley R G, Daneshdoost M. Identification and Ranking of Critical Contingencies in Dependent Variable Space. IEEE Trans 1983,PAS-102(4):881~892
- 6 Zhu J Z, Xu G Y. Approach to Automatic Contingency Selection by Reactive Type Performance Index. IEE Proceedings-c, 1991, 138(1): 65~68
- 7 赵焕臣,许树柏,和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法. 北京:科学出版社,1986, 1~10