

# 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估

刘从法<sup>1</sup>, 罗日成<sup>1</sup>, 雷春燕<sup>2</sup>, 王菲菲<sup>1</sup>, 吴莹<sup>1</sup>, 蒋琼<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410014;

2. 中国华电四川广安发电有限责任公司, 四川 广安 638000)

**摘要:** 根据电力变压器运行状态信息的不完全性, 采用层次分析法(AHP)建立和量化变压器状态评估的层次指标, 优化状态信息不完全性。引入灰色定权聚类对变压器状态进行灰色分类, 建立灰色白化权函数。把 AHP 与灰色定权聚类相结合, 能更准确地对变压器进行定性和定量状态评估。实例分析表明, 基于 AHP 灰色定权聚类的电力变压器状态评估方法是合理和可行的。

**关键词:** 电力变压器; 层次分析法; 灰色定权聚类; 状态评估; 模型; 聚类算法

**中图分类号:** TM 41

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.019

## 0 引言

电力变压器是电力系统中最重要设备之一, 其运行可靠性对电力系统安全、稳定和经济运行有着重要影响。因此, 对变压器进行科学、正确的评估有着重要意义。

近年来, 随着对状态维修理论的深入研究, 设备综合评估亦得到发展, 国内外一些学者引入了证据理论、模糊理论等数学方法对电力变压器进行状态评估<sup>[1-7]</sup>。为了更好地实现对变压器状态定性定量综合评估, 采用“少样本, 贫信息”不确定系统的已知信息量, 来确定系统未知相关信息使系统“白化”的灰色定权聚类理论, 综合层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 的多级分层结构体系, 将影响变压器的多状态变量转换为单状态变量进行评估, 使电力变压器状态定位易于实现, 同时能定量给出状态评估结果。

## 1 建立 AHP 灰色聚类状态评估模型

### 1.1 构建评估对象的层次结构

影响变压器的因素很多, 而且各因素的影响程度各不相同, 因此, 指标的选取原则是能较好地反映变压器的状态。为了满足变压器状态评估的需要, 本文所建立的变压器状态评估体系为 2 层的层次结构体系, 如图 1 所示。

### 1.2 确定各判断因素的合成权重

建立指标的层次结构以后, 需要根据各层次间、指标间的相对重要性赋予相应的权重。由于直接得到各指标的权重很困难, 所以在上层的准则下, 按照

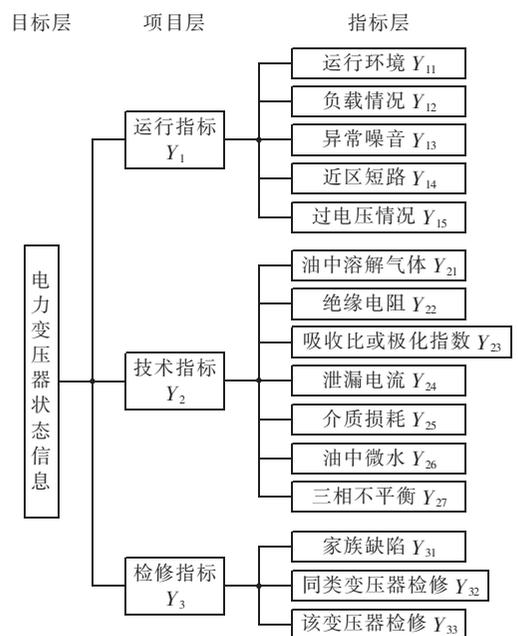


图 1 电力变压器运行状态评估层次结构

Fig.1 Hierarchical structure of operational condition assessment of power transformer

AHP 中的 1~9 标度原则, 对本层的指标以“相对重要性”的原则进行重要度赋值来建立判断矩阵<sup>[8-10]</sup>。判断矩阵确立后, 利用 MATLAB 软件编程对其进行权重计算, 然后再利用上层的权重, 得到底层指标对目标层总合成权重  $w$ 。

### 1.3 指标评估样本矩阵的建立

为了便于量化电力变压器的状态, 根据一些试验数据、运行经验以及其部件对变压器的相对重要性, 将电力变压器的整体状态划分为“正常状态”、“注意状态”、“异常状态”和“严重状态”4 类, 变压器整体状态得分越高, 说明其状态越好, 具体划分见表 1。

在电力变压器状态评估中, 为了能从各指标中反映其运行状态以及防止单一专家对指标判断的主观性, 聘请  $p$  个专家根据其状态对  $m$  个评估指标进

收稿日期: 2011-09-27; 修回日期: 2013-02-21

基金项目: 电力与交通安全监控及节能技术重点实验室开放基金资助项目

Project supported by Electricity and Traffic Safety Monitoring and Energy-Efficient Technologies Key Laboratory Open Foundation

表 1 变压器状态定义

Tab.1 Definition of transformer conditions

取值范围	变压器状态描述
8~10	变压器整体状态良好,可以继续运行
6~8	变压器整体状态一般,加强各项指标监测
4~6	变压器整体状态偏离正常值,有轻微故障
0~4	变压器整体状态由轻微故障转为严重故障

行评分,来评估电力变压器的总体运行状态。那么,第  $k(k=1,2,\dots,p)$  个评估者对于第  $i$  个评估指标给出的评分是  $d_i^k$ ,根据所有评分结果,可得到指标评估样本矩阵  $D$ :

$$D = \begin{bmatrix} d_1^1 & d_1^2 & \dots & d_1^p \\ d_2^1 & d_2^2 & \dots & d_2^p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_m^1 & d_m^2 & \dots & d_m^p \end{bmatrix} = (d_i^k)_{m \times p}$$

1.4 确定变压器灰色定权聚类评估模型

确定变压器灰色定权聚类评估模型,就要先确定等级数  $e$ 、灰数  $h$  以及白化权函数,根据变压器的状态定义(表 1),采用如下灰数和白化函数<sup>[11-15]</sup>。

a. 第 1 灰类,即“正常状态”(  $e=1$  ),灰数  $h \in [0, 8, +\infty)$ ,白化权函数为  $f_1$ :

$$f_1(d_i^k) = \begin{cases} d_i^k/8 & d_i^k \in [0, 8] \\ 1 & d_i^k \in [8, +\infty) \\ 0 & d_i^k \notin [0, +\infty) \end{cases}$$

b. 第 2 灰类,即“注意状态”(  $e=2$  ),灰数  $h \in [0, 8, 16]$ ,白化权函数为  $f_2$ :

$$f_2(d_i^k) = \begin{cases} d_i^k/8 & d_i^k \in [0, 8] \\ 2-d_i^k/8 & d_i^k \in [8, 16] \\ 0 & d_i^k \notin [0, 16] \end{cases}$$

c. 第 3 灰类,即“异常状态”(  $e=3$  ),灰数  $h \in [0, 4, 8]$ ,白化权函数为  $f_3$ :

$$f_3(d_i^k) = \begin{cases} d_i^k/4 & d_i^k \in [0, 4] \\ 2-d_i^k/4 & d_i^k \in [4, 8] \\ 0 & d_i^k \notin [0, 8] \end{cases}$$

d. 第 4 灰类,即“严重状态”(  $e=4$  ),灰数  $h \in [0, 2, 4]$ ,白化权函数为  $f_4$ :

$$f_4(d_i^k) = \begin{cases} 1 & d_i^k \in [0, 2] \\ 2-d_i^k/2 & d_i^k \in [2, 4] \\ 0 & d_i^k \notin [0, 4] \end{cases}$$

其中,灰数表示指标  $d_i^k$  对应的等级,灰数中的数值表示评分分布的区间,中间值表示该灰类的最佳值。

1.5 灰色评估系数、评估权

对于评估指标  $Y_{ij} (i=1,2,3; j=1,2,\dots,7)$ ,第  $N(N=1,2,\dots,n)$  个评估灰类的灰色评估系数记为  $X_{i,N}$ ,各个评估灰类的总灰色评估系数记为  $X_i$ ,属于第  $N$  个评估灰类的灰色评估权记为  $r_{i,N}$ ,则:

$$X_{i,N} = \sum_{k=1}^p f_N(d_i^k) \tag{1}$$

$$X_i = \sum_{N=1}^n X_{i,N} \tag{2}$$

$$r_{i,N} = X_{i,N}/X_i \tag{3}$$

1.6 计算综合聚类系数,得到状态评估结果

设评估对象关于第  $N$  灰类的综合聚类系数:

$$\xi_N = \sum_{i=1}^m (r_{i,N} w_i) \tag{4}$$

由于  $\max_{1 \leq N \leq n} \{\xi_N\} = \xi_N^*$ ,能判断出评估指标属于哪一灰类  $N^*$ 。

2 变压器指标权重的确立

应用 AHP 计算变压器指标的组合权重,步骤如下。

a. 建立层次结构体系,分析变压器中各部件之间的关系,建立变压器的层次结构如图 1 所示。

b. 构建判断矩阵,建立层次结构模型后,按照 AHP 中的 1~9 标度原则(如表 2 所示),建立相应的两两比较判断矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$ ,其中  $a_{ij}$  表示下层元素  $x_i$  与  $x_j$  相对上层  $X$  的重要性的量化值。

表 2 AHP 标度值及含义

$a_{ij}$	含义
1	两者同样重要
3	前者相比后者稍微重要
5	前者相比后者明显重要
7	前者相比后者非常重要
9	前者相比后者极端重要
2,4,6,8	表示相邻判断的中间值
倒数	反比较

为验证各指标权重的有效性,需要对判断矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  按照式(5)进行一致性检验:

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

其中,  $\lambda_{\max}$  为矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  的最大特征根;  $n$  为矩阵阶数;  $RI$  为平均随机一致性指标,其取值见表 3。当  $CR < 0.1$  时,所建立的判断矩阵  $A=(a_{ij})_{n \times n}$  有效,否则需要重新建立判断矩阵,直到  $CR < 0.1$ 。

判断矩阵成立后,采用和法原理求其权重:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} \right) \tag{6}$$

其中,  $a_{kj}$  为第  $j$  列中的元素。

表 3 RI 取值

Tab.3 RI values

$n$	RI	$n$	RI	$n$	RI
1	0	4	0.90	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24		

c. 求取组合权重, 根据 AHP 的层次结构, 建立  $Y_i(i=1,2,3)$  相对目标层  $Y$  的判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 \\ 2 & 1 & 2/3 \\ 3 & 3/2 & 1 \end{bmatrix}$$

求得  $\lambda_{\max}=3, CI=0, CR=0 < 0.1$ , 满足一致性要求; 应用式(6)求得项目层  $Y_i(i=1,2,3)$  的权重  $w_{i(i=1,2,3)} = [0.5000, 0.3333, 0.1667]^T$ ; 应用该方法建立  $Y_{1j}$  相对  $Y_1$  的判断矩阵, 求出  $Y_{1j}$  相对  $Y_1$  的权重  $w_{1j(j=1,2,\dots,5)} = [0.1234, 0.3459, 0.0438, 0.2678, 0.2191]^T$ ;  $Y_{2j}$  相对  $Y_2$  的权重  $w_{2j(j=1,2,\dots,7)} = [0.1276, 0.2124, 0.1521, 0.1239, 0.1217, 0.1483, 0.1130]^T$ ;  $Y_{3j}$  相对  $Y_3$  的权重  $w_{3j(j=1,2,3)} = [0.4211, 0.3684, 0.2105]^T$ ; 那么, 其组合权重根据  $w = w_i w_{ij}$  即可求取, 最后得到各指标层 ( $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{33}$ ) 的组合权重  $w = (0.0617, 0.1729, 0.0219, 0.1339, 0.1095, 0.0425, 0.0708, 0.0507, 0.0413, 0.0416, 0.0494, 0.0377, 0.0702, 0.0614, 0.0351)$ 。

### 3 实例应用

现有一台 220 kV 的电力变压器于 1996 年 3 月投运, 2008 年 5 月的预防性试验结果如表 4—7 所示, 表 5 中绝缘电阻间“/”为分隔符号。

表 4 油中溶解气体部分色谱数据

Tab.4 Partial data of dissolved gas concentration in oil

日期	$V(H_2)$	$V(CH_4)$	$V(C_2H_4)$	$V(C_2H_6)$	$V(CO)$	$V(\text{总烃})$
2008-01	29	36	115	22	52	44
2008-05	35	69	167	50	78	372

表 5 电力变压器预防性试验数据 (20 °C)

Tab.5 Preventive experimental data of power transformer(20 °C)

测量部位	绝缘电阻/MΩ	介质损耗/%	泄漏电流/μA	电容量/pF	铁芯绝缘电阻/MΩ
高压侧	6600/5000	0.29	15	15400	110
中压侧	5200/3800	0.28	19	20450	105
低压侧	4700/3200	0.27	9	27000	110

表 6 绝缘油试验数据

Tab.6 Experimental data of transformer oil

油中微水质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	击穿电压/kV	介质损耗(90°C 时)/%
22.1	48.3	0.029

表 7 变压器铁芯绝缘电阻数据对比

Tab.7 Comparison of transformer core insulation resistance

时间	铁芯绝缘电阻/MΩ
2008-01	1500
2008-05	100

计算步骤如下。

a. 根据试验数据, 聘请本行业 4 名专家对变压器

状态进行评分, 建立电力变压器的样本评估矩阵  $D$ :

$$D = \begin{bmatrix} 6 & 7.5 & 6 & 7 \\ 7 & 7.5 & 6 & 6.5 \\ 3.5 & 2.5 & 3 & 4 \\ 4 & 4.5 & 4 & 5 \\ 4 & 3 & 4 & 3 \\ 3 & 2 & 2.5 & 2 \\ 1 & 2 & 1.5 & 1 \\ 4 & 4.5 & 4 & 3 \\ 4.5 & 4 & 3.5 & 4 \\ 3 & 4 & 3.5 & 3 \\ 4 & 4.5 & 4 & 5 \\ 4.5 & 5 & 4 & 4 \\ 6.5 & 6.5 & 6 & 6.5 \\ 6 & 6.5 & 7 & 6 \\ 7 & 8.5 & 7 & 7 \end{bmatrix}$$

b. 灰色评估权重的计算, 根据表 1 的状态定义, 电力变压器状态优劣分别对应 4 个评估灰类, 即  $N=1, 2, 3, 4$ , 其相应的灰数及白化权函数如表 8 所示。

表 8 灰数及其白化权函数

Tab.8 Grey league and whitening function

评估灰类 $N$	灰数 $h$	白化权函数
1	$[0, 8, +\infty)$	$f_1$
2	$[0, 8, 16]$	$f_2$
3	$[0, 4, 8]$	$f_3$
4	$[0, 2, 4]$	$f_4$

由各状态的白化权函数可得其评估类指标层指标  $Y_{ij}(i=1,2,3; j=1,2,\dots,7)$  的 4 个灰色评估系数。当  $i=1, j=1$  时, 由式(1)求得 4 个评估灰类的灰色评估系数分别为:  $N=1$  时,  $X_{1,1} = \sum_{k=1}^4 f_N(d_i^k) = f_1^{(6)} + f_1^{(7.5)} + f_1^{(6)} + f_1^{(7)} = 3.1250$ ;  $N=2$  时,  $X_{1,2} = 3.1250$ ;  $N=3$  时,  $X_{1,3} = 1.7500$ ;  $N=4$  时,  $X_{1,4} = 0$ 。由式(2)求得总评估系数  $X_1 = \sum_{N=1}^4 X_{1,N} = X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + X_{1,4} = 8$ 。由式(3)求得指标  $Y_{11}$  的 4 个灰色评估权重为:  $r_{1,1} = 0.3906, r_{1,2} = 0.3906, r_{1,3} = 0.2188, r_{1,4} = 0$ ; 同理即可得  $Y_{12}, \dots, Y_{33}$  这 15 个指标的灰色评估权重, 其灰色评估权重指标矩阵为:

$$r = \begin{bmatrix} 0.3906 & 0.3906 & 0.2188 & 0 \\ 0.4141 & 0.4141 & 0.1719 & 0 \\ 0.2031 & 0.2031 & 0.4063 & 0.1875 \\ 0.2734 & 0.2734 & 0.4532 & 0 \\ 0.2344 & 0.2344 & 0.4063 & 0.1250 \\ 0.1484 & 0.1484 & 0.2969 & 0.4063 \\ 0.1019 & 0.1019 & 0.2037 & 0.5925 \\ 0.2891 & 0.2891 & 0.4219 & 0 \\ 0.2500 & 0.2500 & 0.4688 & 0.0313 \\ 0.2109 & 0.2109 & 0.4219 & 0.1563 \\ 0.3281 & 0.3281 & 0.3438 & 0 \\ 0.2734 & 0.2734 & 0.4531 & 0 \\ 0.3984 & 0.3984 & 0.2031 & 0 \\ 0.3984 & 0.3984 & 0.2032 & 0 \\ 0.4567 & 0.4488 & 0.0945 & 0 \end{bmatrix}$$

c. 灰色聚类系数计算,根据式(4),求得 4 个灰色聚类系数分别为: $\xi_1^*=0.3042$ , $\xi_2^*=0.3045$ , $\xi_3^*=0.3063$ , $\xi_4^*=0.0846$ ;由  $\max_{1 \leq N \leq n} \{\xi_N\} = \xi_3^* = 0.3063$ ,可知评估指标属于第 3 灰类,即为“异常状态”。

结果分析:由求得的灰色聚类系数可知,变压器整体处于“异常状态”,说明该变压器有某种故障存在;进一步对比分析表 7 及文献[16]中规定的数据,发现变压器油中溶解气体、总烃相对产气速率及铁芯绝缘电阻值(文献[16]中规定“220 kV 及以上电压等级变压器的铁芯绝缘电阻一般不低于 500 M $\Omega$ ”)变化异常,该变压器已处于故障状态,初步认为可能有“铁芯接地故障”;事后检修发现,该变压器潜油泵轴承磨损,产生金属粉末,形成桥路,造成箱底与铁轭多点接地。

## 4 结论

a. 电力变压器的状态评估是一个复杂的过程,本文根据变压器的实际情况,对变压器的主要指标建立层次结构,利用 AHP 求得各评估指标的总权重,进而对评估指标进行量化。

b. 根据电力变压器运行状态、试验数据、检修状况等状态指标,依据其状态优劣,将其划分为 4 种状态;建立灰色定权聚类模型,得到灰色聚类系数来评估变压器的状态。

c. 本文提出的 AHP 灰色定权聚类电力变压器评估模型能对变压器状态作出准确、量化评估。实例分析表明,该评估方法具有一定的可行性,能为状态维修提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [2] 吴立增. 变压器状态评估方法的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2005.  
WU Lizeng. Assessing approach of transformer condition[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [3] 王谦. 基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.  
WANG Qian. Study of the comprehensive assessment method for the power transformer condition in service with fuzzy theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [4] 张哲, 赵文清, 朱永利, 等. 基于支持向量回归的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 81-84.  
ZHANG Zhe, ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, et al. Power transformer condition evaluation based on support vector regression [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2010, 30(4): 81-84.
- [5] 何雷, 李丽平. 基于云模型的电力变压器状态综合评判[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(3): 98-103.  
HE Lei, LI Liping. Synthetic evaluation of power transformer condition based on cloud model[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(3): 98-103.
- [6] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君, 等. 多信息量融合的电力变压器状态评估模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1455-1460.  
LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Condition assessment of power transformer using information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1455-1460.
- [7] 廖瑞金, 郑含博, 杨丽君, 等. 基于集对分析法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 54-60.  
LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, YANG Lijun, et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 54-60.
- [8] 孙海涛, 熊鹰, 谢海燕, 等. 层次分析法在潜艇总体性能评估中的应用与改进[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(6): 38-47.  
SUN Haitao, XIONG Ying, XIE Haiyan, et al. Analytic hierarchy process in the assessment of submarine overall performance[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(6): 38-47.
- [9] 赵云飞, 陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(9): 85-89.  
ZHAO Yunfei, CHEN Jinfu. Analytic hierarchy process and its application in power system[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2004, 24(9): 85-89.
- [10] 马迪, 刘学毅, 王顺洪. 基于层次分析法的高速铁路轨道综合评价[J]. 路基工程, 2010, 151(6): 6-8.  
MA Di, LIU Xueyi, WANG Shunhong. Comprehensive evaluation of high-speed railway track based on analytic hierarchy process [J]. Subgrade Engineering, 2010, 151(6): 6-8.
- [11] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002: 134-158.
- [12] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 4 版. 北京:科学出版社, 2007: 78-92.
- [13] 李俭, 孙才新, 陈伟根, 等. 灰色聚类与模糊聚类集成诊断变压器内部故障的方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 112-116.  
LI Jian, SUN Caixin, CHEN Weigen, et al. A method of synthesis based on the grey cluster and fuzzy cluster about internal fault diagnosis of transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 112-116.
- [14] 傅建新, 黄联芬, 姚彦. 基于层次分析法-灰色聚类的无线网络安全风险评估方法[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2010, 49(5): 622-626.  
FU Jianxin, HUANG Lianfen, YAO Yan. Risk evaluation of wireless network security based on AHP grey clustering method [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2010, 49(5): 622-626.
- [15] 杨丽徙, 于发威, 包毅. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 55-59.  
YANG Lixi, YU Fawei, BAO Yi. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2010, 30(6): 55-59.
- [16] 电力工业部. DL/T595—1996 电力设备预防性试验规程[S]. 北京:中国电力出版社, 1997.

## 作者简介:

刘从法(1979-),男,湖南娄底人,硕士研究生,研究方向为电力设备在线监测与故障诊断(E-mail:lcongf@126.com)。

(下转第 133 页 continued on page 133)

- at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(6):38-45.
- [10] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京:中国电力工业出版社,2004:110-120.
- [11] 李兴源. 高压直流输电系统的运行与控制[M]. 北京:科学出版社,1998:193-194.
- [12] 陈文滨,严兵,张尧,等. 基于 EMTDC 的 UHVDC 交流侧故障的仿真[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(11):15-18.  
CHEN Wenbin,YAN Bing,ZHANG Yao,et al. Simulation of fault in UHVDC AC side based on EMTDC[J]. Power System Protection and Control,2009,37(11):15-18.
- [13] THIO C V,DAVIES J B,KENT K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):946-957.
- [14] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):5-8.  
OU Kaijian,REN Zhen,JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system,part 1:commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(5):5-8.
- [15] 任震,欧开健,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(二)——避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):6-9.  
REN Zhen,OU Kaijian,JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system,part 2:measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(6):6-9.
- [16] 郑传材,黄立滨,管霖,等.  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流换相失败的 RTDS 仿真及后续控制保护特性研究[J]. 电网技术,2011,35(4):14-20.  
ZHENG Chuancail,HUANG Libin,GUAN Lin,et al. RTDS-based simulation of commutation failure in  $\pm 800\text{kV}$  DC power transmission and research on characteristics of subsequent control and protection[J]. Power System Technology,2011,35(4):14-20.

#### 作者简介:

陈仕龙(1973-),男,四川汉源人,讲师,博士研究生,研究方向为高压直流输电(E-mail:chenshilong3@126.com);

束洪春(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力信号处理、电力系统新型继电保护与故障测距等。

## Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures

CHEN Shilong,SHU Hongchun,ZHEN Ying

(Faculty of Electric Power Engineering,Kunming University of Science and Technology,Kunming 650051,China)

**Abstract:** The causes of commutation failure in UHVDC transmission system are analysed,its criterion is summarized and the control measures against the consequential commutation failure are studied. The simulation model of Yun-Guang  $\pm 800\text{kV}$  UHVDC transmission system with its actual parameters is built on PSCAD/EMTDC. The simulative results show that,the decrease of transformer ratio will not induce the commutation failure of inverter while its increase up to 3.52 will do;the commutation failure is not sensitive to the fault close angle for symmetrical three-phase grounding fault while it is sensitive to the fault close angle for two-phase short circuit fault and single-phase grounding fault,and the commutation failure occurs easily when the fault close angle is  $90^\circ$  or  $270^\circ$ ;the grounding resistance and fault duration time have great influence on commutation failure.

**Key words:** UHV power transmission; HVDC power transmission; commutation failure; computer simulation; models; PSCAD/EMTDC; control systems

(上接第 107 页 continued from page 107)

## Power transformer condition assessment based on AHP grey fixed-weight clustering

LIU Congfa<sup>1</sup>,LUO Richeng<sup>1</sup>,LEI Chunyan<sup>2</sup>,WANG Feifei<sup>1</sup>,WU Ying<sup>1</sup>,JIANG Qiong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering,Changsha University of Science & Technology,Changsha 410014,China;2. China Huadian Sichuan Guang'an Power Generation Co.,Ltd.,Guang'an 638000,China)

**Abstract:** Aiming at the incompleteness of operational condition information of power transformer,AHP (Analytic Hierarchy Process) method is applied to establish and quantify the level index of transformer condition assessment for its optimization. A grey fixed-weight clustering algorithm is introduced to classify the power transformer conditions and establish the whitening weight function of grey. The combination of AHP and grey fixed-weight clustering algorithm can assess the transformer condition more accurately, qualitatively and quantitatively. Practical case study shows that,the proposed method is reasonable and feasible.

**Key words:** power transformers; AHP; grey fixed-weight clustering; condition assessment; models; clustering algorithms