

文章编号:1000-582X(2009)12-1419-06

# 电力变压器状态维修策略的灰局势决策方法

王有元<sup>1</sup>,徐海霞<sup>2</sup>,陈伟根<sup>1</sup>,周 军<sup>3</sup>,袁 园<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030;

2. 重庆北碚供电局,重庆 400700;3. 四川省电力公司自贡电业局,四川自贡 643000)

**摘 要:**在分析国内外开展电力变压器状态维修工作现状的基础上,提出了一种确定变压器状态维修策略的灰局势决策方法。该方法以立即停电检修、优先安排检修、监视运行、定期检修和延期检修等 5 种典型维修方案作为变压器状态维修的对策集;在兼顾安全性和经济性的基础上,给出了安全性、可靠性、维修性、经济性以及可监测性等 5 个定性的决策评价指标及相应的指标量化方法;构造了变压器状态维修策略的灰决策局势效果向量,并以局势效果向量和最优局势效果向量的灰色绝对关联度为决策依据进行最优维修方案的决策。决策实例说明了该方法的具体实现过程,并验证了其有效性。

**关键词:**电力变压器;维修;灰局势;决策;评价指标

中图分类号:TM407

文献标志码:A

## Grey situation decision – making method of condition based maintenance strategy for power transformer

WANG You-yuan<sup>1</sup>, XU Hai-xia<sup>2</sup>, CHEN Wei-gen<sup>1</sup>, ZHOU Jun<sup>3</sup>, YUAN Yuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Chongqing Beibei Electric Power Bureau, Chongqing 400030, P. R. China;

3. Zigong Electric Power Bureau, Sichuan Electric Power Corporation, Zigong 643000, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** Based on the status of CBM (Condition Based Maintenance) in domestic and abroad, the authors propose a GSDM (Grey Situation Decision-Making) method of CBM strategy for power transformers. The countermeasure set of CBM for power transformers includes the five typical maintenance schemes, such as the off-line maintenance, priority plan overhaul, surveillant operation, periodic overhaul and postponed overhaul. Taking the safety and economy into account, the five qualitative evaluation indexes of decision making, such as security, reliability, maintainability, economy and monitoring feasibility, are proposed, and the quantitative method of the qualitative evaluation indexes is presented. Through constructing situation effect vectors of GSDM, the optimal maintenance strategy for power transformers can be obtained on the base of the grey relational grade between the situation effect vectors and the optimal situation effect vectors. The examples of the CBM scheme for two power transformers in service are provided to illustrate the specific process of the decision making method and to verify its effectiveness.

**Key words:** power transformers; maintenance; grey situation; decision making; assessment index

收稿日期:2009-09-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB72450);重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2008BA3026)

作者简介:王有元(1971-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事电气设备在线监测及状态检修方面的研究,(Tel)023-65102442;(E-mail)y. wang@cqu. edu. cn。

电力变压器作为电力系统的枢纽设备,其运行的安全可靠直接关系到电力系统的安全与稳定。长期以来,国内外主要采用停电预防性试验和定期维修来保证变压器的安全运行。定期维修制度往往存在“过度维修”或“维修不足”的缺陷,在给电力运行部门造成大量人力和物力浪费的同时降低了供电可靠性<sup>[1-2]</sup>。为了避免定期维修制度的不足,目前国内外许多电力企业正逐步开展状态维修的试点工作<sup>[3-6]</sup>。

状态维修是一种以设备状态为基础基于可靠性和预防性的维修技术,其关键是正确判断设备的当前运行状态、合理预测设备的发展趋势及确定最佳的维修策略,其最终目的是制定最优的维修策略<sup>[2]</sup>。目前,国内外关于变压器状态维修的研究成果主要集中在变压器运行状态的监测、故障诊断和状态评估等方面<sup>[7-10]</sup>,而有关状态维修策略制定方法的研究还处于起步探索阶段<sup>[11-12]</sup>。

笔者根据灰局势决策的基本原理,确定了变压器状态维修的事件集和对策集,提出了变压器状态维修策略的灰色决策局势和决策评价指标及其相应的量化方法,建立了变压器状态维修策略的灰局势决策模型,并结合实例详细说明了该决策方法的具体步骤。

## 1 灰局势决策的基本原理

对于被处置(决策)的事件,从不同的对策中挑选效果最好的对策来对付该事件,就是灰色局势决策。一般由局势及效果向量的确定、理想最优效果向量的确定、灰色绝对关联度的计算和决策等 4 个主要步骤组成<sup>[13-15]</sup>。

### 1.1 局势及效果向量的确定

令  $a_i$  为被处置(决策)事件,  $b_j$  为对付  $a_i$  的第  $j$  种对策,则称  $b_j$  对  $a_i$  的二元组合为局势,记为  $s_{ij}$ :

$$s_{ij} = (a_i, b_j). \quad (1)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为待决策事件的个数;  $j = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  为决策的个数。

设  $u_{ij}^{(k)}$  为局势  $s_{ij}$  在  $k$  目标下的效果值,则局势  $s_{ij}$  对应的效果向量为:

$$\mathbf{u}_{ij} = (u_{ij}^{(1)}, u_{ij}^{(2)}, \dots, u_{ij}^{(p)}), i = 1, 2, \dots, n; \\ j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

### 1.2 理想最优效果向量的确定

若局势  $s_{ij}$  在  $k$  目标下的最优效果值为  $u_{i_0 j_0}^{(k)}$ , 则局势  $S$  的理想最优效果向量可记为

$$\mathbf{u}_{i_0 j_0} = (u_{i_0 j_0}^{(1)}, u_{i_0 j_0}^{(2)}, \dots, u_{i_0 j_0}^{(p)}). \quad (3)$$

实际工作中,针对具有不同特点和要求的决策问题,一般可按以下方法确定理想最优效果向量。

1) 当  $k$  目标效果值越大越好时,取

$$u_{i_0 j_0}^{(k)} = \max_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \{u_{ij}^{(k)}\}. \quad (4)$$

2) 当  $k$  目标效果值接近某一适中值  $u_0$  为好时,取:

$$u_{i_0 j_0}^{(k)} = u_0. \quad (5)$$

3) 当  $k$  目标效果值越小越好时,取

$$u_{i_0 j_0}^{(k)} = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \{u_{ij}^{(k)}\}. \quad (6)$$

### 1.3 灰色绝对关联度的计算

设  $\epsilon_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ) 为效果向量  $\mathbf{u}_{ij}$  与理想最优效果向量  $\mathbf{u}_{i_0 j_0}$  之间的灰色绝对关联度,则

$$\epsilon_{ij} = \frac{1 + |s_0| + |s_{ij}|}{1 + |s_0| + |s_{ij}| + |s_{ij} - s_0|}. \quad (7)$$

其中

$$|s_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} u_{i_0 j_0}^0(k) + \frac{1}{2} u_{i_0 j_0}^0(n) \right|,$$

$$|s_{ij}| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} u_{ij}^0(k) + \frac{1}{2} u_{ij}^0(n) \right|,$$

$$|s_{ij} - s_0| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} (u_{ij}^0(k) - u_{i_0 j_0}^0(k)) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2} (u_{ij}^0(n) - u_{i_0 j_0}^0(n)) \right|.$$

### 1.4 决策

若  $\epsilon_{ij}$  满足对任意  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  且  $i \neq i_1$  和任意  $j \in \{1, 2, \dots, m\}$  且  $j \neq j_1$ , 恒有  $\epsilon_{i_1 j_1} \geq \epsilon_{ij}$ , 则  $\mathbf{u}_{i_1 j_1}$  为次优效果向量,  $s_{i_1 j_1}$  为次优局势。

因此,当  $\epsilon_{i_1 j_1} = \max_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} \{\epsilon_{ij}\}$  时,  $\mathbf{u}_{i_1 j_1}$  为次优效果

向量,  $s_{i_1 j_1}$  为次优局势,方案  $b_{j_1}$  为备选方案中的最优方案。

## 2 变压器状态维修策略的灰局势决策方法

### 2.1 状态维修对策集和局势集的确定

以目前国内外实施变压器状态维修工作种所普遍采用的立即停电检修、优先安排检修、监视运行、定期检修和延期检修等 5 种维修策略作为变压器状态维修对策,则变压器状态维修策略的对策集可记为

$$B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}. \quad (8)$$

其中:  $b_1$  为立即停电检修方案,  $b_2$  为优先安排检修

方案,  $b_3$  为监视运行检修方案,  $b_4$  为定期检修方案,  $b_5$  为延期检修方案。

相应的局势集为

$$S = \{s_{1j} = (a_1, b_j) \mid b_j \in B\} = \{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\}。 \quad (9)$$

其中:  $a_1$  为实施变压器状态维修事件。

### 2.2 决策评价指标及其量化方法

实施变压器状态维修的目的是为了提高其利用率和运行的可靠性,因此决策目标应在保证变压器安全运行的基础上兼顾经济性。通过对目前我

国电力运行部门的变压器运行情况、维修人员素质、管理水平等多方面进行综合分析,最终确定采用安全性、可靠性、维修性、经济性和可监测性等 5 项指标为变压器状态维修策略的决策评价指标。在实际工作中,各评价指标主要通过专家评估的方法予以确定,通常采用“好”、“一般”等表示程度的语言进行定性表述。因此,为了便于进行灰局势决策,需要首先将各定性评价指标转换为量化指标。各评价指标的具体评价内容和量化方法如表 1 所示。

表 1 维修策略评价指标及量化取值

指标 $k$	评价 指标	评价内容	量化取值				权重 $w_k$
			差(0.0~0.25)	一般(0.25~0.5)	较好(0.5~0.75)	好(0.75~1.0)	
1	安全性	故障对人身、其它设备以及环境产生不利后果的程度	故障对人身和环境有严重影响	故障对人身和环境有较严重影响	故障对人身和环境有一定影响	故障对人身和环境不产生影响	0.3
2	可靠性	在规定时间内和规定条件下完成规定功能的能力	设备操作可靠性低,设备质量稳定性差,故障没有规律性	设备操作可靠性和设备质量稳定性一般,故障具有一定的规律性	设备操作可靠性和设备质量稳定性较好,故障具有规律性	设备操作可靠性和设备质量稳定性好,故障具有较强的规律性	0.25
3	维修性	故障发生后,在规定时间内和规定的维修条件下恢复到规定功能的能力	维修需要特聘专家,备件难以购买,维修所需时间长、维修困难	需要返厂维修,备件需要专门购买,维修所需时间较长、维修较困难	维修需要技术人员,备件可以通过自制解决,维修所需时间较短、维修较容易	维修需要一般操作人员,备件为标准件,维修所需时间短、维修容易	0.15
4	经济性	维修措施所需的维修费用、停电影响和经济损失等	变压器的原值很高,检修停电损失费用大,故障维修费用高	变压器的原值较高,检修停电损失费用较大,故障维修费用较高	变压器的原值一般,检修停电损失费用和故障维修费用一般	变压器的原值低,检修停电损失费用和故障维修费用小	0.2
5	可监测性	监测变压器运行状态所需的设备、技术手段、监测的便利性以及由此产生的监测成本	监测的经济性差,监测技术可行性小	监测的经济性和监测技术可行性一般	监测的经济性和监测技术可行性较好	监测的经济性和监测技术可行性好	0.1

2.3 局势效果向量和理想最优效果向量的确定  
根据表 1,采用专家评分方法得到不同局势

$s_{1j} (j = 1, 2, \dots, 5)$  在评价指标  $k$  下的效果值  $u_{1j}^{(k)}$ , 则局势  $s_{1j}$  对应的效果向量为

$$u^{(k)} = (u_{11}^{(k)}, u_{12}^{(k)}, \dots, u_{15}^{(k)}); \quad k = 1, 2, \dots, 5.$$

按式(10)计算  $k$  目标下局势效果序列  $u^{(k)}$  的均项值  $\tilde{u}_{1j}^{(k)} (j=1, 2, \dots, 5; k=1, 2, \dots, 5)$ 。

$$\tilde{u}_{1j}^{(k)} = \frac{u_{1j}^{(k)} \times m \times \omega_k}{\sum_{j=1}^5 u_{1j}^{(k)}}. \quad (10)$$

其中:  $\tilde{u}_{1j}^{(k)}$  为  $k$  目标下局势效果序列  $u^{(k)}$  的均项值;  $m$  为决策个数, 本文中  $m = 5$ ;  $\omega_k$  为权重, 本文根据各评价指标的重要性采用固定权重, 如表 1 所示。

则相应的均项值向量为

$$\tilde{u}^{(k)} = (\tilde{u}_{11}^{(k)}, \tilde{u}_{12}^{(k)}, \dots, \tilde{u}_{15}^{(k)}); \quad k = 1, 2, \dots, 5. \quad (11)$$

局势  $s_{1j}$  的效果向量为:

$$u_{1j} = (u_{1j}^{(1)}, u_{1j}^{(2)}, \dots, u_{1j}^{(5)}); \quad j = 1, 2, \dots, 5.$$

由于 5 个评价指标均要求越大越好, 因此, 根据式(4)求出各评价指标对应的理想最优效果向量为:

$$u_{i_0j_0} = (u_{i_0j_0}^{(1)}, u_{i_0j_0}^{(2)}, \dots, u_{i_0j_0}^{(5)}).$$

### 2.4 灰局势决策的步骤

灰色局势决策主要包括决策目标的确定、局势效果序列、理想最优效果向量、灰色绝对关联度、确定最优维修方案等主要步骤。具体步骤如图 1 所示。

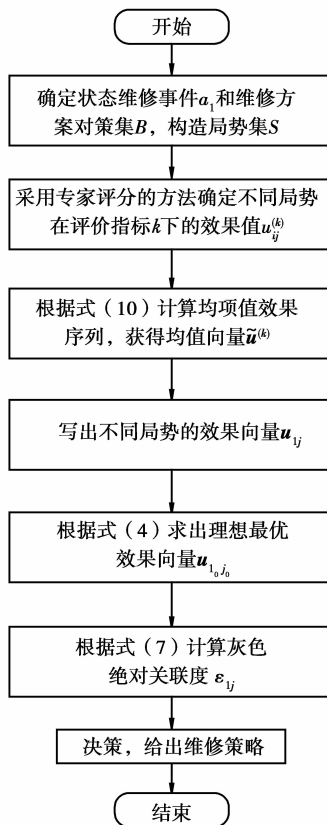


图 1 灰局势决策的步骤

## 3 实例分析

利用 2 中的维修策略模型对 110 kV 及以上电压等级的电力变压器和电抗器共进行了 19 次状态维修策略的决策验证, 其中涉及绝缘缺陷的变压器 5 台·次, 其余均为正常运行状态。试用情况表明: 笔者提出的决策方法能够提供合理的变压器维修策略, 对合理安排电力变压器维修方案具有积极的指导意义。限于篇幅, 以下仅列举两例说明决策的具体过程。

### 3.1 实例分析 1

某 110 kV 无人值守变电站 #1 主变压器通过状态监测数据发现内部存在局部过热性故障。经研究, 决定对其进行维修。按 2.4 中的灰局势决策步骤决策如下:

第 1 步: 根据 2.1 中式(8)和式(9), 灰局势决策的事件集为  $A = \{a_1\}$ , 对策集为  $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ , 局势集为

$$S = \{s_{ij} = (a_i, b_j) \mid a_i \in A, b_j \in B\} = \{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\}.$$

第 2 步: 根据 2.2, 确定安全性、可靠性、维修性、经济性和可监测性为 5 个决策目标。

第 3 步: 根据变压器的运行情况, 经多位专家综合分析后确定目标  $k$  的局势效果向量。

1) 安全性指标。该变电站地势较偏僻、附近居民较少, 变压器发生故障造成人员伤亡的可能性较小, 因此对应评价目标 1—安全性的局势效果序列为

$$u^{(1)} = (u_{11}^{(1)}, u_{12}^{(1)}, u_{13}^{(1)}, u_{14}^{(1)}, u_{15}^{(1)}) = (0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.70).$$

2) 可靠性指标。根据历史运行记录, 发现该变压器没有发生过重大事故, 且故障率较低; 同时由于该变电站无人值守, 变压器的所有操作均由运动系统控制, 可靠性较高。因此, 综合考虑两方面的因素, 对应评价目标 2—可靠性的局势效果序列为

$$u^{(2)} = (u_{11}^{(2)}, u_{12}^{(2)}, u_{13}^{(2)}, u_{14}^{(2)}, u_{15}^{(2)}) = (0.40, 0.60, 0.90, 0.60, 0.40).$$

3) 维修性指标。状态监测的结果表明变压器内部存在潜伏性故障, 维修需要将变压器进行吊罩处理, 维修过程复杂、维修时间长, 且可能需要专门的备件。因此, 对应评价目标 3—维修性的局势效果序列为

$$\mathbf{u}^{(3)} = (u_{11}^{(3)}, u_{12}^{(3)}, u_{13}^{(3)}, u_{14}^{(3)}, u_{15}^{(3)}) = (0.20, 0.50, 0.90, 0.80, 0.70)。$$

4)经济性指标。该变电站仅有 1 台主变,如果停电检修将带来较大的售电损失,同时若要单独处理该潜伏性故障,维修费用较高。因此,对应评价目标 4—经济性的局势效果序列为

$$\mathbf{u}^{(4)} = (u_{11}^{(4)}, u_{12}^{(4)}, u_{13}^{(4)}, u_{14}^{(4)}, u_{15}^{(4)}) = (0.20, 0.40, 0.90, 0.80, 0.80)。$$

5)可监测性指标。局部过热性故障可通过对变压器油温进行监视或通过红外测温仪进行监视,监测技术简便易行且费用低廉。因此,对应评价目标 5—可监测性的局势效果序列为

$$\mathbf{u}^{(5)} = (u_{11}^{(5)}, u_{12}^{(5)}, u_{13}^{(5)}, u_{14}^{(5)}, u_{15}^{(5)}) = (0.20, 0.40, 0.70, 0.90, 0.80)。$$

第 4 步:由式(10)和式(11),  $k$  目标下局势效果序列的均项值为:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}^{(1)} &= (0.339\ 3, 0.321\ 4, 0.285\ 7, 0.303\ 6, 0.250\ 0), \\ \tilde{\mathbf{u}}^{(2)} &= (0.172\ 4, 0.258\ 6, 0.387\ 9, 0.258\ 6, 0.172\ 4), \\ \tilde{\mathbf{u}}^{(3)} &= (0.048\ 4, 0.121\ 0, 0.217\ 7, 0.193\ 5, 0.169\ 4), \\ \tilde{\mathbf{u}}^{(4)} &= (0.064\ 5, 0.129\ 0, 0.290\ 3, 0.258\ 1, 0.258\ 1), \\ \tilde{\mathbf{u}}^{(5)} &= (0.033\ 3, 0.066\ 7, 0.116\ 7, 0.150\ 0, 0.133\ 3)。 \end{aligned}$$

第 5 步:由第 4 步结果,可得局势  $s_{ij}$  的效果向量  $\mathbf{u}_{ij}$ , ( $i = 1, j = 5$ ) 为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{11} &= (0.339\ 3, 0.172\ 4, 0.048\ 4, 0.064\ 5, 0.033\ 3), \\ \mathbf{u}_{12} &= (0.321\ 4, 0.258\ 6, 0.121\ 0, 0.129\ 0, 0.066\ 7), \\ \mathbf{u}_{13} &= (0.285\ 7, 0.387\ 9, 0.217\ 7, 0.290\ 3, 0.116\ 7), \\ \mathbf{u}_{14} &= (0.303\ 6, 0.258\ 6, 0.193\ 5, 0.258\ 1, 0.150\ 0), \\ \mathbf{u}_{15} &= (0.250\ 0, 0.172\ 4, 0.169\ 4, 0.258\ 1, 0.133\ 3)。 \end{aligned}$$

第 6 步:由于各评价目标均为越大越好,则由式(4)可求得理想最优效果向量为:

$$\mathbf{u}_{i_0j_0} = \{u_{i_0j_0}^{(1)}, u_{i_0j_0}^{(2)}, u_{i_0j_0}^{(3)}, u_{i_0j_0}^{(4)}, u_{i_0j_0}^{(5)}\} = (0.3393, 0.3879, 0.2177, 0.2903, 0.1500)。$$

第 7 步:由式(7)式可计算出  $\mathbf{u}_{ij}$  与  $\mathbf{u}_{i_0j_0}$  的灰色关联度  $\epsilon_{ij}$  ( $i = 1, j = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 分别为:  $\epsilon_{11} = 0.772\ 6, \epsilon_{12} = 0.854\ 2, \epsilon_{13} = 0.994\ 3, \epsilon_{14} = 0.936\ 9, \epsilon_{15} = 0.896\ 5;$

第 8 步:由  $\max_{\substack{i=1 \\ 1 \leq j \leq 5}} \{\epsilon_{ij}\} = \epsilon_{13} = 0.9943$  可知,  $\mathbf{u}_{13}$  为次优向量,  $s_{13}$  为次优局势。

因此,该变压器可以“监视运行”方案作为安排检修的依据。

### 3.2 实例分析 2

某 220 kV 变电站 #1 主变压器自投运 10 多年以来,一直运行良好,历年的预防性试验指标都符合

规程要求,未出现重大的缺陷和事故,按照预防性维修规程,2008 年 3 月运行单位对该变压器进行了停电预防性试验,结果表明该变压器各项参数正常,完全可以延期进行停电预防性试验。

为了验证本文提出的灰局势决策方法的可行性,在停电预防性试验前,对该变压器进行了维修方案决策。其决策过程如下:

为保证决策的有效性,在决策前先对该变压器进行了目测、红外测温、油色谱分析等带电检测,结果未发现异常。然后组织专家根据该变压器的实际情况评分,确定目标  $k$  的局势效果向量为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(1)} &= (0.75, 0.80, 0.90, 0.85, 0.90), \\ \mathbf{u}^{(2)} &= (0.20, 0.60, 0.95, 0.90, 0.90), \\ \mathbf{u}^{(3)} &= (0.90, 0.85, 0.75, 0.85, 0.70), \\ \mathbf{u}^{(4)} &= (0.10, 0.40, 0.70, 0.80, 0.95), \\ \mathbf{u}^{(5)} &= (0.10, 0.40, 0.90, 0.80, 0.95)。 \end{aligned}$$

由式(10)和式(11),计算  $k$  目标下局势效果序列的均项值,得出局势  $s_{ij}$  的效果向量  $\mathbf{u}_{ij}$ , ( $i = 1, j = 5$ ) 为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{11} &= (0.267\ 9, 0.070\ 4, 0.166\ 7, 0.033\ 9, 0.015\ 9), \\ \mathbf{u}_{12} &= (0.285\ 7, 0.211\ 3, 0.157\ 4, 0.135\ 6, 0.063\ 5), \\ \mathbf{u}_{13} &= (0.321\ 4, 0.334\ 5, 0.138\ 9, 0.237\ 3, 0.142\ 9), \\ \mathbf{u}_{14} &= (0.303\ 6, 0.316\ 9, 0.157\ 4, 0.271\ 2, 0.127\ 0), \\ \mathbf{u}_{15} &= (0.321\ 4, 0.316\ 9, 0.129\ 6, 0.322\ 0, 0.150\ 8)。 \end{aligned}$$

由式(4)求得理想最优效果向量为

$$\mathbf{u}_{i_0j_0} = \{u_{i_0j_0}^{(1)}, u_{i_0j_0}^{(2)}, u_{i_0j_0}^{(3)}, u_{i_0j_0}^{(4)}, u_{i_0j_0}^{(5)}\} = (0.321\ 4, 0.334\ 5, 0.166\ 7, 0.322\ 0, 0.150\ 8)。$$

由式(7)可计算出  $\mathbf{u}_{ij}$  与  $\mathbf{u}_{i_0j_0}$  的灰色关联度  $\epsilon_{ij}$  ( $i = 1, j = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 分别为:  $\epsilon_{11} = 0.778\ 5, \epsilon_{12} = 0.870\ 4, \epsilon_{13} = 0.958\ 4, \epsilon_{14} = 0.968\ 0, \epsilon_{15} = 0.980\ 5。$

由  $\max_{\substack{i=1 \\ 1 \leq j \leq 5}} \{\epsilon_{ij}\} = \epsilon_{15} = 0.990$  可知,  $\mathbf{u}_{15}$  为次优向量,  $s_{15}$  为次优局势。

因此,该变压器可以“延期检修”方案作为安排检修计划的依据,与停电预防性试验结果完全一致。

## 4 结 语

1)根据灰局势决策的基本原理,确定了变压器状态维修的事件集和对策集,提出了变压器状态维修策略的灰局势决策方法。

2)在兼顾安全性和经济性的基础上,给出了安全性、可靠性、维修性、经济性以及可监测性等

5 个定性的决策评价指标及相应的指标量化方法。

3) 结合两台现场运行变压器状态维修方案的决策实例详细说明了决策方法的具体步骤。

#### 参考文献:

- [1] WYND M. Changing places [J]. IET Power Engineer, 2007, 21(2): 26-31.
- [2] 李燕青, 律方成, 刘国平, 等. 我国电气设备状态维修的发展与实现[J]. 中国电力, 2003, 36(2): 16-19.  
LI YAN-QING, LV FANG-CHENG, LIU GUO-PING, et al. Development and implementation of condition based maintenance for electrical equipment in China [J]. Electric Power, 2003, 36(2): 16-19.
- [3] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18 (6): 12-25.
- [4] SCHNEIDER J, GAUL A J, NEUMANN C, et al. Asset management techniques[J]. International Journal of Power and Energy Systems, 2006, 28(9): 643-654.
- [5] ZHANG X, GOCKENBACH E. Component reliability modeling of distribution systems based on the evaluation of failure statistics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1183-1191.
- [6] MUTHANNA K T, SARKAR A, DAS K, et al. Transformer insulation life assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (1): 150-156.
- [7] JAHROMI A, PIERCY R, CRESS S, et al. An approach to power transformer asset management using health index[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(2): 20-34.
- [8] MORAIS D R, ROLIM J G. A hybrid tool for detection of incipient faults in transformers based on the dissolved gas analysis of insulating oil [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 673-680.
- [9] TANG W H, SURGEON K, WU Q H., et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (4): 1696-1703.
- [10] ZHANG X, GOCKENBACH E. Asset-management of transformers based on condition monitoring and standard diagnosis [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(4): 26-40.
- [11] 袁志坚, 孙才新, 李剑, 等. 基于模糊多属性决策的变压器状态维修策略研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (11): 66 - 70.  
YUAN ZHI-JIAN, SUN CAI-XIN, LI JIAN, et al. Study on condition based maintenance policy of transformer based on fuzzy multiple expert and multiple attribute group decision making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (11): 66 - 70.
- [12] DOMINELLI N, RAO A, KUNDUR P. Life extension and condition assessment: techniques for an aging utility infrastructure[J]. IEEE Transactions on Power and Energy Magazine, 2006, 4(3): 24 - 35.
- [13] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

(编辑 张小强)