

# 基于多级模糊综合评估的继电保护状态检修研究

随着新时期电网的发展,传统保护定期检修模式弊端日显,状态检修已成为检修体制改革的趋势。首先,结合继电保护运行特点及运行状态数据分析,以保护间隔为单位,分别考虑保护装置和二次回路的状态量,建立了继电保护状态指标集;其次,通过建立基于多级模糊综合评估法的继电保护系统状态评估模型,实现了从状态量数据分析到检修策略形成的功能,提高了检修效率和质量;最后通过算例分析,表明该方法能有效评估保护状态,并给出针对性的检修建议,对于促进保护系统的状态检修具有积极意义。

李芷筠 戴志辉 焦彦军/华北电力大学电气与电子工程学院



李芷筠/硕士研究生

继电保护作为电力系统的第一道防线,其自身的可靠性是电力系统正常运行的基本保证。在定期检修模式下,继电保护装置数量不断增加,有限的人力、物力资源之间的矛盾日益突出,同时过度检修和检修不足造成的设备有效利用时间损失进一步加剧了该矛盾,并将影响到检修质量和电网、设备的安全。状态检修(CBM)方式以设备当前的实际工作状态为依据,通过状态监测手段识别故障的早期征兆,对故障部位、故障严重程度及发展趋势作出判断,从而确定各机件的最佳维修时机<sup>[1]</sup>。它既包含了预知性维修(PDM),也包含了以可靠性为核心的检修(RCM)<sup>[2]</sup>。目前,RCM及辅助计算机自动化管理模式在国外已经积累了丰富的实践经验。文献[3]指出,基于状态评价及风险评估的状态检修技术,相比以可靠性为中心

的状态检修技术,在设备的状态检修上有明显的优势。从长远发展角度来看,开展保护系统状态检修工作具有重要意义。

我国在20世纪80年代后也开始在发电和供电领域进行状态检修探索和应用,其中对一次设备的状态检修的研究较为广泛<sup>[4-6]</sup>。但对于保护装置本体、二次回路及相关一次设备的运行水平分析及状态检修,由于相关状态数据难以获取等原因,尚无实质进展和突破,目前较多文献探讨了保护系统的最佳检修时间,如文献[7-10]通过对不同的可靠性与维修费用模型的求解来实现,但没有考虑其他检修策略的形成机制。

本文结合保护实际运行情况,通过确定保护系统的状态指标集,提出多级模糊综合评估法,并对保护系统进行评估,给出保护的状态评估结果、检修等级和检修建议等检修策略<sup>[11]</sup>。能够结合尽可能多的保护系统状态量进行较全面的评估,为保护系统的状态检修提供参考。

## 继电保护系统状态检修总体思路和步骤

由于继电保护设备运行数据量大、状态信息多,而目前对于继电保护状态信息的获取缺乏完整系统的收集和处理,不仅给继电保护系统状态检修的实施带来了难度,也大大增加了运行工作人员的工作量。因此,本文首先通过对实际现场运行特点和状态信息进行分析,以保护间隔为评价单位,分别考虑

### 关键词/Keywords

继电保护·  
状态检修·  
指标集·  
多级模糊综合评估·  
二次回路·

国家自然科学基金项目(51307059),河北省自然科学基金(E2014502065)。

保护装置和二次回路的状态量，建立继电保护系统状态指标集，并通过核心评价标准将实际保护运行状态信息转化为指标量，便于系统的评估；其次采用多级模糊综合评估模型，将复杂的指标因素划分为相互联系的有序层次，通过模糊语言给出不同程度的评估值，能够比较合理地对保护系统进行状态评价，给出相应的检修策略，以提高检修针对性和效率。对于间隔内的多套保护系统，按照评估模型分别进行评估，以其中最恶劣的保护系统状态作为该间隔系统的状态，其示意图如图1所示。

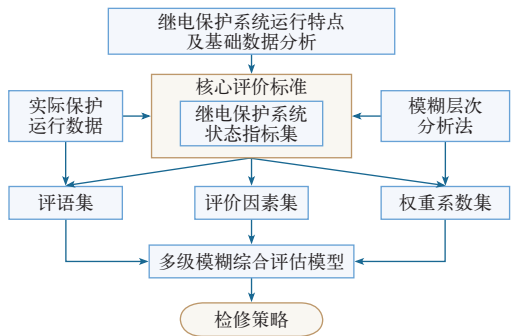


图1 继电保护系统状态检修步骤示意图

继电保护系统状态指标集分析

继电保护系统状态评估是在一系列相互联系并能反映保护运行状态和问题的指标基础上进行的。状态指标集的合理性、适用性对于评估模型给出综合评估结果的正确性有决定作用。通过分析保护系统的状态因素，考虑保护运行的实际状况，结合现场人员和专家的经验 and 意见，确定出继电保护系统状态指标集，共分为四层。其中，第一层为目标层，即继电保护系统的运行状态；第二层和第三层为中间层，即各部件的性能状况；第四层为底层，为各状态量的取值。继电保护系统状态指标集具体如表1所示。

基于多级模糊综合模型的继电保护系统状态评估

继电保护系统状态评估涉及许多指标因素，难以准确量化每个指标因素，但可以通过综合评估对诸多指标因素进行合理的评判，即模糊综合

表1 继电保护系统状态指标集

| 目标层      | 1级指标   | 2级指标 | 3级指标     |
|----------|--------|------|----------|
| 继电保护系统状态 | 检测型状态量 | 保护装置 | 运行环境     |
|          |        |      | 红外测温     |
|          |        |      | 绝缘性能状况   |
|          |        |      | 数据采样     |
|          |        |      | 通信状况     |
|          |        |      | 通道运行情况   |
|          | 二次回路   | 二次回路 | 差流检查情况   |
|          |        |      | 运行环境     |
|          |        |      | 绝缘性能状况   |
|          |        |      | 二次回路红外测温 |
|          |        |      | 锈蚀状况     |
|          |        |      | 封堵状况     |
|          | 指标型状态量 | 保护装置 | 接地网状况    |
|          |        |      | 平均故障率    |
|          |        |      | 平均无故障时间  |
|          |        |      | 预计可靠度    |
|          |        | 二次回路 | 平均故障率    |
|          |        |      | 平均无故障时间  |
| 记录型状态量   | 保护装置   | 保护装置 | 预计可靠度    |
|          |        |      | 随机性缺陷    |
|          |        |      | 运行年限     |
|          |        |      | 家族性缺陷    |
|          |        | 二次回路 | 持续无故障时间  |
|          |        |      | 随机性缺陷    |
|          | 二次回路   | 二次回路 | 运行年限     |
|          |        |      | 家族性缺陷    |
|          |        |      | 持续无故障时间  |

评估。模糊综合评估模型是基于模糊数学的综合评价方法，该方法根据模糊数学的隶属度理论将定性评价转化为定量评价。该方法具有结果清晰、系统性强的特点，能较好地解决模糊、难以量化的问题。模糊综合评估可分为单级和多级综合评估，由于影响评估对象的因素较多，如果将所有因素在一个层面上进行评估，即采用单级模糊评估模型，可能会因为权重系数的分配不合理，导致一些小权值因素被淹没。因此，采用多级模糊综合评估比较合理。多级模糊综合评估的主要步骤如图2所示。

1. 确定评价因素集

继电保护系统的状态评估是在评估指标体系的基础上进行的。设U为包含所有评估指标因素在

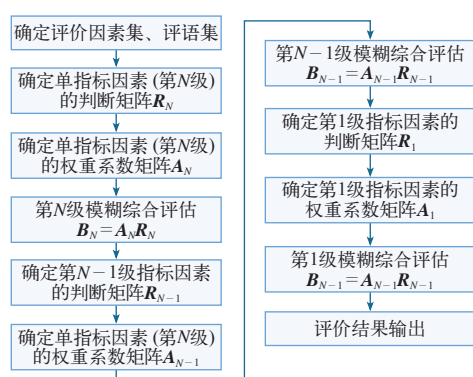


图2 多级模糊综合评估流程

内的因素集，根据指标体系，可将 $U$ 划分为不同层次。按照第1级指标因素进行分组，即

$$U = \{U_1, U_2, U_3\} \quad (1)$$

式中， $U_1 = \{U_{11}, U_{12}\}$ ； $U_2 = \{U_{21}, U_{22}\}$ ； $U_3 = \{U_{31}, U_{32}\}$ ； $U_{ij}$ 分别对应于第2级指标因素；同理， $U_{ijk}$ 分别对应第3级指标因素，即

$$\begin{aligned} U_{11} &= \{U_{111}, U_{112}, U_{113}, U_{114}, U_{115}, U_{116}, U_{117}\} \\ U_{12} &= \{U_{121}, U_{122}, U_{123}, U_{124}, U_{125}, U_{126}\} \\ U_{21} &= \{U_{211}, U_{212}, U_{213}\}, U_{22} = \{U_{221}, U_{222}, U_{223}\} \\ U_{31} &= \{U_{311}, U_{312}, U_{313}, U_{314}\}, U_{32} = \{U_{321}, U_{322}, U_{323}, U_{324}\} \end{aligned} \quad (2)$$

## 2. 建立评语集

根据继电保护系统的特点，给出设备状态的模糊评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ ，分别对应“良好”、“正常”、“注意”和“危险”四种状态。它对每一指标层、每个指标因素的评估都适用。

## 3. 建立权重系数集

在模糊综合评价模型中，各因素权重的分配对设备状态的评价结果起着至关重要的作用，确定合理的权重是模糊评估模型的关键步骤。本文采用模糊层次分析法（FAHP）给出设备状态量的权重。该方法建立在专家咨询的基础上，将复杂系统中的各种指标划分为相互联系的有序层次，并将多层次、多指标的权重赋值转化为各指标重要性的两两比较，建立各层次因素的判断矩阵，在满足一致性检验的条件下，其最大特征值所对应的特征矢量就是该层次因素相对于上一层元素的权重矢量，具有可信、灵活和实用的特点。两两因素间重要程度比较的判断值如表2所示。

表2 设备状态两两因素间重要程度比较的判断值

| 标度值        | 两两因素比较的重要程度等级 |
|------------|---------------|
| 1          | 同等重要          |
| 3          | 稍微重要          |
| 5          | 明显重要          |
| 7          | 强烈重要          |
| 9          | 绝对重要          |
| 2, 4, 6, 8 | 重要程度介于各等级之间   |

根据评价因素的重要程度建立各因素的权重系数集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，各子因素集的权重集 $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\}$ ， $A_{ij} = \{a_{ij1}, a_{ij2}, \dots, a_{ijm}\}$ 。其中， $\sum_{k=1}^m a_{ik} = 1$ ； $\sum_{k=1}^m a_{ijk} = 1$ ； $n$ 为第1级指标因素个数； $m$ 为各级指标因素个数。本文邀请某省局多位保护专家按FAHP要求给出指标间两两比较的相对重要性，并利用FAHP计算出各级指标的权重系数。

## 4. 建立各层模糊评判矩阵

设中间层第 $i$ 个因素中的第 $j$ 个状态参量的评价为 $v_{ik}(k=1, 2, 3, 4)$ ，其对应于评估矩阵中的 $r_{ij}$ ，对应关系如表3所示。

表3 状态参量取值

| 评语    | 数值描述                    |
|-------|-------------------------|
| $v_1$ | $r_{ij} = [1, 0, 0, 0]$ |
| $v_2$ | $r_{ij} = [0, 1, 0, 0]$ |
| $v_3$ | $r_{ij} = [0, 0, 1, 0]$ |
| $v_4$ | $r_{ij} = [0, 0, 0, 1]$ |

对各个因素进行分析评定，可得到评估矩阵

$$R_i = [r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}]^T \quad (3)$$

## 5. 综合判定模糊评估结果

根据单因素评估矩阵 $R_i$ ，利用复合运算即可求得子因素集 $U_i$ 的综合评估结果 $B_i$ ，其表达式为

$$B_i = A_i \circ R_i = [b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}] \quad (4)$$

式中，“ $\circ$ ”为模糊变换的合成算子，结合保护指标集的特点，本文采用加权平均型模糊算子，即

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \circ R_1 \\ A_2 \circ R_2 \\ \vdots \\ A_l \circ R_l \end{pmatrix}_{l \times 4} \quad (5)$$

然后逐次对高层因素进行评估，因素集 $U$ 的单因素评估矩阵 $R$ 可由较低层次的综合输出构成。

因此，对于因素集 $U$ 的最后综合评估结果可记为 $B=A\circ R=[b_1,b_2,b_3,b_4]$ 。 $B$ 中各元素含义与模糊评语集 $V$ 相同。

实例分析

采用基于多级模糊综合评估法的继电保护状态评估模型，对某站继电保护系统进行评估分析。结合某省电力公司多位保护专家意见，给出指标两两比较的相对重要性，确定状态指标的权重因素。保护系统状态参量的专家评估如表4所示。

采用多级模糊综合评估模型计算出继电保护系统、继电保护装置及二次回路的状态评估结果矢量，分别为 $B_1=[0.671\ 5,0.269\ 7,0.058\ 8,0]$ ，

$B_2=[0.556\ 1,0.326\ 28,0.117\ 6,0]$ ， $B_3=[0.786\ 88,0.213\ 12,0,0]$ ，按照最大隶属度原则进行分析如下：

1) 根据继电保护系统评估结果矢量 $B_1$ ，由最大隶属度原则可知， $B_1$ 中最大值0.671 5对应为“良好”状态，说明该继电保护系统总体上处于“良好”状态。各评判等级的模糊分布比重分别为67.15%、26.97%、5.88%和0，其中注意状态的比重为5.88%，说明需加强部分状态量的监测。

2) 比较继电保护装置和二次回路的状态评估结果矢量 $B_2$ 和 $B_3$ 可知，该间隔的二次回路运行状态比继电保护装置状态要好，且保护装置的状态量中出现了需要注意的情况，二次回路中则没有。因而继电保护装置在延迟检修的基础上需要加强

表4 模糊综合评估信息

| 第1级因素集 | 第1级权重    | 第2级因素集   | 第2级权重 | 第3级因素集    | 第3级权重   | 第3级模糊评估矩阵 |     |     |     |
|--------|----------|----------|-------|-----------|---------|-----------|-----|-----|-----|
|        |          |          |       |           |         | 第1列       | 第2列 | 第3列 | 第4列 |
| $U_1$  | 0.4      | $U_{11}$ | 0.5   | $U_{111}$ | 0.018 5 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{112}$ | 0.045 4 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{113}$ | 0.131 7 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{114}$ | 0.236 1 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{115}$ | 0.088 7 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{116}$ | 0.185 6 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{117}$ | 0.294 0 | 0         | 0   | 1   | 0   |
|        | $U_{12}$ | $U_{12}$ | 0.5   | $U_{121}$ | 0.027 9 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{122}$ | 0.272 8 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{123}$ | 0.403 1 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{124}$ | 0.081 5 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{125}$ | 0.049 4 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{126}$ | 0.165 3 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        | $U_2$    | $U_{21}$ | 0.5   | $U_{211}$ | 0.570 2 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{212}$ | 0.337 9 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{213}$ | 0.091 9 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          | $U_{22}$ | 0.5   | $U_{221}$ | 0.570 2 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{222}$ | 0.337 9 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{223}$ | 0.091 9 | 1         | 0   | 0   | 0   |
| $U_3$  | 0.4      | $U_{31}$ | 0.5   | $U_{311}$ | 0.453 0 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{312}$ | 0.080 3 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{313}$ | 0.308 9 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{314}$ | 0.157 8 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        | $U_{32}$ | $U_{32}$ | 0.5   | $U_{321}$ | 0.453 0 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{322}$ | 0.080 3 | 0         | 1   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{323}$ | 0.308 9 | 1         | 0   | 0   | 0   |
|        |          |          |       | $U_{324}$ | 0.157 8 | 1         | 0   | 0   | 0   |

状态量的监视。

## 结束语

通过对保护间隔的状态评估,可分别评定保护系统、保护装置和二次回路的状态,同时有针对性地评定其运行状况,给出检修等级、检修次序和检修建议等状态检修策略,为保护检修提供参考依据。

1) 建立的保护系统状态评估3级指标集能较全面地反映保护系统状态,可以通过评估模型进行有效评估,部分指标可单独作为检修的参考意见。

2) 对保护系统、装置及二次回路分别评估,能够同时从整体和局部两方面把握保护系统的状态,避免出现“注意”或“危险”状态时因其权值过小而误判保护的运行状况,从而造成不必要的损失。

3) 基于多级模糊综合评估法的继电保护系统状态评估模型,能完成从数据分析到给出状态检修策略的完整过程,有利于提高检修效率,并能有效地评估保护系统状态,对保护系统实现状态检修具有积极意义。

## 参考文献

- [1] 许婧,王晶,高峰,等.电力设备状态检修技术研究综述[J].电网技术,2000,24(8):48-52.
- [2] Douglas C Brauer, Greg D Brauer. Reliability-centered maintenance [J]. Reliability, 2009, 36(1): 17-24.
- [3] 喇元,王红斌,陈忠东.基于状态评价及风险评估的输变电设备状态检修策略的研究[J].广东电力,2010,23(10):36-40.
- [4] 刘长胜,葛嘉,沈勇环.基于马尔可夫链的发电机状态检修决策[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(2):82-85.
- [5] 崔奇明.基于ESTA的电力设备状态评估专家系统[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(5):124-128.
- [6] 姚建刚,肖辉耀,章建,等.电力设备运行安全状态评估系统的方案设计[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(1):52-58.
- [7] 丁茂生,王钢,贺文.基于可靠性经济分析的继电保护最优检修间隔时间[J].中国电机工程学报,2007,27(25):44-48.
- [8] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M, Sidhu T S. Determination of the optimum routine test and self-checking intervals in protective relaying using a reliability model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 663-669.
- [9] Wang Yi, Wang Huifang, He Benteng. Calculation of power equipment reliability for condition-based maintenance decision-making [C]. Proceedings of 2010 International Conference on Power System Technology, Hangzhou, 2010.
- [10] Andrew J Henry, Joel A Nachlas. An equivalent age model for condition-based maintenance, proceedings of reliability and maintainability symposium, January 23-26, 2012 [C]. Reno, NV: 2012.
- [11] 陈水耀.国家电网公司继电保护状态检修导则[S].2010.

(收稿日期:2014-06-24) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告