

智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法

刘永欣^{1,2}, 师峰¹, 姜帅¹, 席亚克¹, 宋宁希³, 张仑山¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009;
3. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 为了改变智能变电站继电保护定期检修的模式, 根据继电保护装置故障情况选取了监测信息, 提出了继电保护监测信息的采集方案和分析方法。引入模糊数学理论, 基于模糊综合评判思想建立继电保护状态评估模型; 将状态参量信息用隶属函数表示, 对继电保护装置的在线监测信息和历史记录信息开展量化评估, 并综合得出继电保护的运行状态。实例证明, 该评判方法是合理和有效的。状态评估的应用将以往变电站定期检修策略转换为状态检修策略, 可有效地减少继电保护检修费用, 提高变电站系统运行的可靠性。

关键词: 继电保护; 在线监测; 状态评估; 模糊综合评判; 隶属函数

A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection

LIU Yong-xin^{1,2}, SHI Feng¹, JIANG Shuai¹, XI Ya-ke¹, SONG Ning-xi³, ZHANG Lun-shan¹

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to change the mode of intelligent substation relay protection maintenance, the monitoring information is selected according to the relay protection device fault condition and a collection and analysis method of relay protection monitoring information is proposed. By introducing the theory of fuzzy mathematics, the relay protection state evaluation model is set up based on the fuzzy comprehensive evaluation thoughts and the state information is represented by the membership function. The quantitative assessment is carried out with online monitoring and record information of relay protection device and the running state of the relay protection is defined. An example shows that this evaluation method is reasonable and effective. The application of condition assessment has converted past regular maintenance into condition-based maintenance, which can reduce the maintenance costs of relay protection effectively and improve the reliability of substation system.

Key words: relay protection; online monitoring; condition assessment; fuzzy synthetic evaluation; membership function

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0037-05

0 引言

目前, 智能变电站继电保护的检修模式是根据《继电保护及电网安全自动装置检验条例》的要求对装置及二次回路接线进行定期检修。定检方式有很大的局限性, 主要体现在降低了系统的可靠性, 增加了系统的全寿命周期成本。这些缺点使得定期检修方式越来越不适应电网的发展要求, 因此, 开展继电保护状态检修^[1]工作具有重要的现实意义。

近年来, 业内人士对继电保护状态检修也做了大量的研究工作^[2-4], 状态检修必须建立在对设备状态进行有效监测的基础上。文献[3]提出对装置的二次回路、电磁环境进行监测, 文献[4]提出对开关电

源温度、保护量采集、液晶显示器进行监测。为了达到状态检修的要求, 应该监测哪些量, 对监测信息如何进行分析和处理, 目前还没有明确的解决方案。

实现设备监测后还需要对监测信息进行评估^[5-7]。在无人值班和减少调控中心运行监控人员的情况下, 现有的状态监测信息类型和数量非常多, 调控中心无法处理这些杂乱监测信息。因此, 必须在站内实现继电保护的状态评估, 并将直观、可视化的评估结果上送至调控中心。当前, 关于继电保护状态评估的研究多是基于概率进行分析^[8-9], 分析结果对单台设备的检修没有指导意义, 只能应用于区域内设备的整体评估。目前研究中继电保护状态评估^[10-11]未参考保护的监测信息, 无法真正反映装置的实时状态。

本文根据继电保护故障情况，提出了继电保护在线监测系统方案。采用模糊评判法建立继电保护状态评估模型，并结合实例对继电保护进行评估分析，分析结果能正确地反应装置的运行状况，把专业的监测数据转化为运维人员可读的诊断结果，指导检修人员安排检修计划，达到了状态检修的要求。

1 监测信息的选取

为确定继电保护增加哪些监测信息，需要对继电保护故障的情况进行分析。根据文献[12]统计，继电保护故障主要由元器件损坏、电源损坏和外回路故障（含纵联通道）引起。

(1) 元器件损坏分析

元器件损坏多数是由于运行损耗及老化造成的。老化的主要因素分为自然环境和电气环境^[13]。自然环境方面，高温会加快装置的老化甚至引发故障；电气环境方面，装置电源纹波含量变化较大，会造成元件和芯片损伤，加速老化程度。因此需要对装置重要器件CPU的温度和电源电压进行监视。

(2) 电源损坏分析

统计表明，电源插件故障大多是因其电解电容故障引起的。电解电容的寿命一般依据“十度法则”确定，即温度每降低10℃，寿命将增大一倍。因此需要对电源插件的工作温度进行监视。

(3) 外部回路故障分析

智能变电站实现了信息的数字化，外部回路常见的故障如绝缘问题、接触不良问题将不存在。对外部回路的监测将转变为对光纤回路的监测。因此，应对过程层光口及纵联通道光模块的光强进行监视。

因此，保护装置监测信息包括：电源输出电压、电源工作温度、CPU工作温度、光模块光强。

2 继电保护在线监测具体实现

继电保护在线监测系统由保护装置、监测分析单元和状态评估单元构成。系统结构如图1所示。

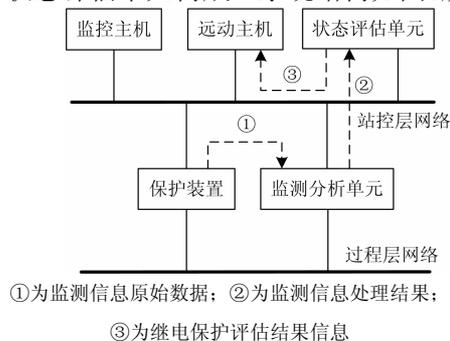


图1 在线监测系统框架

Fig. 1 System framework of online monitoring

2.1 监测分析单元

监测分析单元实现对保护装置监测信息的分析处理，包括越限报警和逻辑运算。不同的监测量由于特性不同，因此阈值设置和分析方法均不同。

(1) 工作温度超高或超低对装置的影响较大，会出现装置不可预知的故障；长期工作温度偏高会导致装置的老化。因此，应对温度越上下限进行报警，并计算温度的偏移量用以分析装置老化程度。同理，电源电压也采用此方法进行分析计算。

(2) 光模块光强反映了过程层网络的运行状况。光口光强在装置投运后会逐渐老化，随时间变得越来越弱。为此引入相对劣化率，反映实际状态与故障状态相比的相对劣化的程度，它是一个定量指标，取值范围为0~1。

监测分析单元对上述监测量的分析及报警处理见表1。

表1 监测信息的分析处理

Table 1 Analytical processing of monitor information		
监测量	逻辑处理	上下限报警
电源电压	偏移量 = $\frac{\text{当前值} - \text{额定值}}{\text{额定值}}$	上限: 5.1 V 下限: 4.9 V
电源温度	偏移量 = $\frac{\text{当前值} - \text{额定值}}{\text{额定值}}$	上限: 70 °C 下限: -20 °C
CPU 温度	偏移量 = $\frac{\text{当前值} - \text{额定值}}{\text{额定值}}$	根据不同 CPU 型号 具体设置
光模块光强	相对劣化率 = $\frac{\text{光强良好值} - \text{当前值}}{\text{光强良好值} - \text{允许最小值}}$	上限: -10 dBm 下限: -20 dBm

2.2 状态评估单元

状态评估单元通过站控层网络接收监测分析单元的数据，对监测的原始数据和处理结果进行分析和评估，并将评估结果通过远动机上送至主站系统。

3 基于模糊理论的继电保护状态评估

考虑继电保护各种评估因素对结果影响的模糊性，本文采用模糊综合评判法对继电保护状态进行评估。

3.1 状态评价体系的建立

为了尽量使评估指标全面、真实地反映继电保护的运行状态，并考虑继电保护状态评估的可操作性，除上述监测信息外，再增加装置历史信息，构建以光模块光强、电源温度、CPU温度、电源电压、正确动作率、定期检修和异常告警为状态参量的继电保护状态评价体系，如图2所示。

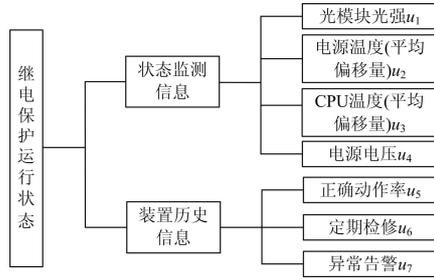


图2 继电保护状态评价体系

Fig. 2 Condition-based relay assessment system

图2中, 由于保护装置温度的实时值无法反应装置老化情况, 因此引入温度的历史平均偏移量作为评价的状态参量, 其他监测信息采用当前值作为状态参量。

3.2 因素集和评语集确定

根据继电保护装置状态参量模型所选取的特征量, 继电保护状态可分解成光模块光强等七个评判项目, 表示为因素集 $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7\}$ 。

考虑专家意见以及继电保护运维人员的经验, 将继电保护装置运行状态划分为良好、一般、注意、严重四种情况, 表示为评语集 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。

3.3 权重的确定

选取状态参量后, 需根据指标间的相对重要性赋予相应的权重, 定义因素集 U 上的模糊子集 $A=[a_i]$, 即权重矩阵, a_i 为单因素 u_i 在总评中所起的权重, 并且满足: $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。

确定权重的方法很多, 如Delphi法、加权平均法、专家评估法、信息熵法等。考虑到继电保护状态评估尚处在研究的起步阶段, 获得大量有明确评估结论的样本存在很大困难, 本文采用专家评估法, 邀请多位专家按要求给出指标的相对重要性, 最终结果为, 因素集 U 的权重分配集 $A=[0.3, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.1, 0.1]$ 。

3.4 模糊评判矩阵的构成

设用第 i 个指标 u_i 对继电保护进行评估, 对评语集中的状态 v_j 的隶属度^[14]为 $r_{ij}(j=1, 2, 3, 4)$, 则可用隶属度集 $R_i=\{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}\}$ 表示按指标 u_i 评估的结果。遍历各状态变量, 构成模糊评判矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} \\ r_{71} & r_{72} & r_{73} & r_{74} \end{bmatrix}$$

3.5 隶属函数的确定

如何确定模糊评判矩阵中各个元素(隶属度)是模糊综合评判方法的关键之一。隶属度的模糊集合是通过隶属函数来表达。确定隶属函数的具体方法包括模糊统计方法、专家评判法、待定系数法^[14], 本文针对不同的参量采用不同的隶属函数。

1) 光强的隶属函数

光模块光强的相对劣化率反映实际状态与故障状态相对程度。光强相对劣化率的隶属函数应属于典型的函数, 可以采用待定系数法确定。典型函数形式包括正态分布、柯西分布、梯形分布、三角形分布等。由于梯形及三角形隶属函数形状简单, 并且与其他隶属函数得出的结果差别较小, 因此, 本文利用三角形和梯形组合的分布函数, 建立光强对应于不同状态等级的隶属函数, 如图3所示。图中 $a_1 \sim a_4$ 分别为相对劣化率在四种状态等级下的边界。

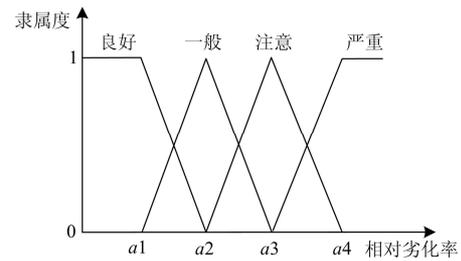


图3 三角形和半梯形隶属函数

Fig. 3 Half-ladder-shaped and triangular membership function

根据历史经验, a_1, a_2, a_3, a_4 分别取值0.2、0.4、0.6、0.8, 由此, 光模块光强对应于状态 $v_1 \sim v_4$ 的隶属函数 $U(x)$ 可分别确定为

$$U_{v1}(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.2 \\ 2-5x & 0.2 < x < 0.4 \\ 0 & x \geq 0.4 \end{cases}$$

$$U_{v2}(x) = \begin{cases} 5x-1 & 0.2 < x < 0.4 \\ 3-5x & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 0 & x \leq 0.2 \text{ 或 } x \geq 0.6 \end{cases}$$

$$U_{v3}(x) = \begin{cases} 5x-2 & 0.4 < x < 0.6 \\ 4-5x & 0.6 \leq x < 0.8 \\ 0 & x \leq 0.4 \text{ 或 } x \geq 0.8 \end{cases}$$

$$U_{v4}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.6 \\ 5x-3 & 0.6 < x < 0.8 \\ 1 & x \geq 0.8 \end{cases}$$

上式中, $U_{v1}(x) \sim U_{v4}(x)$ 分别表示光强劣化率为 x 时对应于状态 $v_1 \sim v_4$ 的隶属函数。

同理, 温度的历史平均偏移量和电源电压偏移

量的隶属函数也可以用典型的函数表示, 采用同样的方法, 可以得到温度、电压的隶属函数, 在此不一一叙述。

2) 其他历史记录

对保护正确动作率、定期检修、异常告警事件等定性描述的数据采用模糊统计法。通过专家调查的形式, 即给出评判对象和评价指标根据, 制作调查表, 分发给各位专家, 以此确定各个因素的隶属度, 表达式为

$$\text{隶属度} = \frac{\text{认为某因素属于某状态的人数}}{\text{参加评定的专家总人数}}$$

得到数据后人工输入到状态评估单元进行分析。

3.6 模糊运算

对矩阵A和R进行模糊运算得到模糊综合评判结果B=AoR, 其中o是广义模糊算子, 其选择方式很多, 本文选择加权平均型的综合评判, 即:

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_i \cdot r_{ij} (j=1,2,\dots,n)$$

使用这种算法既考虑了主要因素对继电保护状态的影响, 又保留了单个因素的全部信息, 较符合实际情况。

经过模糊综合评判得到评估值b_j(j=1,2,3,4)后, 可采用最大隶属度法, 取与最大评估值b_{max}=max{b_j | j=1,2,3,4} 相对应的评判集元素v_j作为评估结果; 也可采用模糊分布法, 直接把b_j看作评判结果, 以使运维人员对继电保护状态有一个全面的了解。

4 模糊综合评价实例

以某台运行中的线路保护装置为例进行模糊综合评价, 运行中状态监测数据如表2所示。

表2 某装置在线监测数据

Table 2 Online monitoring data of a device

监测量	监测当前值	运算结果
光模块光强	-16.5 dBm	相对劣化率为 0.65
电源温度	63 °C	历史平均偏移量为 0.12
CPU 温度	75 °C	历史平均偏移量为 0.07
电源电压	5.05 V	偏移量为 0.01

首先, 以实际参数代入隶属函数, 分别求得各因素相应的隶属度, 即可得到评判矩阵。例如, 对于光模块光强, 将相对劣化率0.65代入隶属函数公式计算得到光模块光强的模糊评判结果R₁=[0, 0, 0.75, 0.25], 其他监测类信息的评判结果的计算方法类似。其他历史记录因素, 根据统计调查表, 用模糊统计试验方法得到评判矩阵。综合上述信息可

得到本装置的状态评价矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

结合权重分配, 可得: B=AoR=[0.63, 0.07, 0.225, 0.075]。从评判结果可以看出, 状态“良好”的隶属度最大, 但状态“注意”的隶属度也比“一般”、“严重”明显大, 若用最大隶属度原则保护装置总体处于“良好”状态, 但是损失了一部分信息。这种情况下可用模糊分布法判断, 将整体结果展示给用户。从整体上看隶属度的“良好”和“注意”分别为0.63和0.225, 由此推断继电保护装置处于“良好”与“注意”中间。从实际的数据看装置的电源电压、温度及历史记录信息均处于良好情况, 光模块光强与正常数据相比偏低。装置整体可以继续运行, 但是光模块光强下降比较严重应重点检查过程层光回路及装置的光口模块, 以免由光模块故障造成装置停运。

5 结语

本文提出了继电保护的在线监测具体实现方案, 并应用模糊综合评判方法对继保装置的监测结果开展量化评估。实例分析表明, 该评判方法将保护状态信息和历史记录进行有效的关联, 可对继电保护状态作出准确、客观的量化评估, 并有较强的可操作性, 可为继电保护状态检修提供参考依据。当然, 作为模糊评估算法核心的权重矩阵和隶属函数, 其准确性还有待提高。权重矩阵的确定根据专家主观判断得到, 因此客观性较差, 还需要进一步研究客观确定权重的方法, 如最大熵技术法、变异系数法等。隶属函数参数的确定存在着很多人为因素, 应进一步研究隶属函数的优化方法, 如遗传算法、粒子群优化算法等, 通过给定规则训练得到最优隶属度函数, 进一步提高系统的准确性。

参考文献

[1] 高翔, 刘韶俊. 继电保护状态检修及实施探讨[J]. 继电器, 2005, 33(20): 23-27.
GAO Xiang, LIU Shao-jun. Condition maintenance and implementation of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33(20): 23-27.

[2] 周俊, 马永才, 徐蓁, 等. 微机型继电保护设备运行分

- 析及状态检修的探讨[J]. 浙江电力, 2005(5): 35-37.
ZHOU Jun, MA Yong-cai, XU Liu, et al. Discussion of condition-based maintenance to the microcomputer protective device[J]. Zhejiang Electric Power, 2005(5): 35-37.
- [3] 吴杰余, 张哲, 尹项根, 等. 电气二次设备状态检修研究[J]. 继电器, 2002, 30(2): 22-24.
WU Jie-yu, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Study on condition-based maintenance of electrical secondary equipment[J]. Relay, 2002, 30(2): 22-24.
- [4] 韩平, 赵勇, 李晓朋, 等. 继电保护状态检修的实用化尝试[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 92-95.
HAN Ping, ZHAO Yong, LI Xiao-peng, et al. Instantiation sample of relay protection state maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 92-95.
- [5] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [6] 毛颖科, 关志成, 王黎明, 等. 基于泄漏电流脉冲主成分分析的外绝缘污秽状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 39-45.
MAO Ying-ke, GUAN Zhi-cheng, WANG Li-ming, et al. Evaluation of contamination levels of outdoor insulators based on the principal components analysis of leakage current pulses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 39-45.
- [7] 李和明, 王胜辉, 律方成, 等. 基于放电紫外成像参量的绝缘子污秽状态评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 22-29.
LI He-ming, WANG Sheng-hui, Lü Fang-cheng, et al. Contamination condition evaluation of insulators based on discharge ultraviolet imaging parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 22-29.
- [8] 吴宏斌, 盛继光. 继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 65-68.
WU Hong-bin, SHENG Ji-guang. Mathematical model and its application of relaying protection device reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 65-68.
- [9] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
ZHANG Xue-song, WANG Chao, CHENG Xiao-dong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [10] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
WU Jiang, CAI Ze-xiang, HU Chun-chao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.
- [11] 侯艾君. 继电保护状态评价方法及其在检修决策中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
HOU Ai-jun. The state evaluation method of relay protection and its use in maintenance decision[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [12] 赵自刚, 朱辉. 2000年度河北南网220 kV及以上系统继电保护缺陷统计分析[J]. 继电器, 2002, 30(7): 17-22.
ZHAO Zi-gang, ZHU Hui. Statistical analysis on the relay defaults of 220 kV and higher voltage systems of Hebei south network in 2000[J]. Relay, 2002, 30(7): 17-22.
- [13] 洪洲. 微机保护老化问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
HONG Zhou. Research on microprocessor-based protection aging[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [14] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
HU Bao-qing. Fuzzy theory[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004.

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-09-11

作者简介:

刘永欣(1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为智能变电站及继电保护等; E-mail: lyx800112@163.com

师峰(1977-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护科研管理工作;

姜帅(1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为智能变电站及继电保护等。