

基于模糊状态量的二次设备状态检修模型研究

何小飞¹ 童晓阳² 王锐¹ 李江陵¹

(1. 国网乐山供电公司, 四川 乐山 614000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 简要介绍了二次设备状态检修基本理论, 并提出了基于模糊状态量的二次设备状态检修策略。它是通过将影响二次设备运行工况的各类分解为检测型模糊状态量、失效风险模糊状态量、可靠性模糊状态量和改进型模糊状态量 4 类, 并分别对以上 4 类模糊状态量进行定义并建模, 最后通过模型合成得到状态检修总体评价模型, 最后根据评价结果后制定出检修策略。通过实例证明了该方法是可行的, 并与传统计划检修相比, 在设备可靠性和检修经济性上具有明显优势。

关键词: 二次设备; 状态检修; 模糊状态量; 评估模型

Abstract: The basic theory of condition-based maintenance for secondary equipment is introduced in brief. The factors influencing the operating condition of secondary equipment is divided into four classes, that is, detecting fuzzy state variable, fuzzy state variable with failure risk, fuzzy state variable with reliability and improved fuzzy state variable. These four fuzzy state variables are defined and modeled respectively. The overall evaluation model of condition-based maintenance is obtained through the composite model and the maintenance strategy is given according to the evaluation results. The feasibility of the proposed method is verified by the examples, which has the obvious advantage over equipment reliability and maintenance economy compared with the traditional scheduled maintenance.

Key words: secondary equipment; condition-based maintenance; fuzzy state variable; evaluation model

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)02-0035-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.009

0 引言

随着电网发展, 设备数量不断增多, 传统的计划检修模式也逐渐无法满足设备安全性需求。而随着网络通讯技术、传感器技术发展使状态检修成为可能。状态检修通过状态监测手段, 诊断设备健康状况, 从而确定设备最佳检修时机。相比计划检修, 可以减少停运时间, 降低检修费用, 提高经济效益。而对于二次设备而言, 由于目前还缺少有效足够的在线监测手段, 因此二次设备状态检修较一次设备发展缓慢一些。

1 二次设备状态检修基本原理

1.1 二次设备状态检修的定义

二次设备状态检修可定义为: 在根据各类手段监测的基础上, 以间隔为单元, 根据分析诊断的结果科学安排检修时间和项目的检修方式。二次设备

状态监测是状态检修的基础, 二次状态检修策略有 3 个组成部分: 实际状态信息的采集、设备状态诊断方法和状态检修策略应用。

1.2 二次设备状态评价策略基本思路

设备状态监测无疑是状态检修的基础。站内二次设备的状态监测可通过日常巡视、红外测温、装置自检、缺陷消除、家族性缺陷分析等。与一次设备不同的是二次设备的状态监测不过分依靠传感器。因此, 电气二次设备的离线检测数据也是状态监测与诊断的重要依据。

2 二次设备状态评价模型建立

2.1 基于模糊状态量的二次设备状态检修评价模型基本理论

根据二次设备中各类可能影响到设备运行工况和使用寿命的因素分析, 可将评价模型分解为 4 类模糊状态量: 检测型状态量、失效风险状态量、可靠性状态量和改进型状态量。其中检测型状态量指直

表 1 乐山供电公司近 5 年来二次设备故障统计分析

时间 / 次数	电源 插件	模拟量 输入 插件	开关量 输入 插件	CPU 插件	光纤 (高频) 通道	打印 机	UPS 电源	二次 回路	故障 录波 器	行波 测距 装置	直流 充电 模块	交流屏	蓄电池
2009	5	1	0	4	9	1	1	13	12	6	1	1	7
2010	7	0	0	9	8	4	0	12	13	6	2	2	4
2011	6	3	1	9	5	4	1	15	12	9	3	1	8
2012	8	1	0	4	7	8	3	14	10	7	0	0	7
2013	9	1	0	6	8	6	2	13	12	8	0	0	5

接观测、装置自检或仪器检测到的设备运行环境和运行工况的状态量,包括设备的运行状态和环境状态等。可靠性状态量指制造厂家某类设备可靠性的状态量。失效风险状态量指设备长时间未检修后故障发生概率的状态量。改进型状态量指设备性能下降但在改进和完善后能恢复到正常水平的状态量。

2.2 检测型模糊状态量评价模型原理

二次设备故障主要包括保护装置故障、辅助装置故障、自动装置(总控后台)故障、交直流系统故障。对所在公司近 5 年二次设备在运维和检修中发现的缺陷进行统计,分别包含 220 kV、110 kV、35 kV 变电站 14 座、31 座、29 座。所有变电站的近 5 年来缺陷统计分析情况见表 1。通过对表 1 分析,可得出以下结论:①相比保护装置本身,辅助装置(包括故障录波、行波测距、交直流系统等)、其他二次回路及元件上缺陷较多;②二次设备中电源及 CPU 插件部分的缺陷较多;③二次设备的缺陷次数,主要取决于出厂设备质量及安装质量。

根据以上分析,可以将状态量划分为装置本体(保护、自动化装置)和二次回路两部分,具体明细见表 2。

表 2 检测型模糊状态量及分值

评价对象	状态量	标准分	评价对象	状态量	标准分
装置 本体	运行环境	8	二次 回路	运行环境	8
	红外测温	10		绝缘状况	8
	绝缘状况	8		红外温度	10
	数据采样	8		锈蚀状况	8
	通道运行情况	8		封堵状况	8
	差流检查情况	8		积尘状况	8

2.2.1 设备运行环境状态量评价

(1) 运行环境温度评分 K_1 按图 1 规定执行(以

斜率计算得分)。

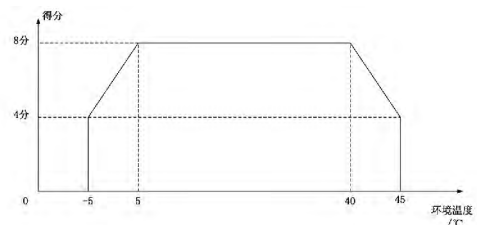


图 1 运行环境温度评价模型

根据温度采集数据,运行环境温度评分计算公式为

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (1)$$

式中 i 为采集的次数; K_i 为采集时对应的评价分数; n 为评价周期内总的采集次数,当评价得分为 0 的次数占总采集次数 10% 以上时,该项目不得分。

(2) 运行环境湿度评分。根据湿度采集数据,运行环境湿度评分计算公式同式(1),其中 i 为采集的次数; K_i 为采集时对应的评价分数; n 为评价周期内总的采集次数,当评价得分为 0 的次数占总采集次数 30% 以上时,该项目不得分。

2.2.2 红外测温状态量评价

根据要求同一个二次回路不同相别之间的相对温差应该在 5 °C 以内。而二次回路红外测温评价采用温度最高点所处同一回路不同相别之间的相对温差,温差在 5 °C 内为满分,温差在 5 至 10 分内按比例 K 下降,温差超过 10 °C 则 0 分计。

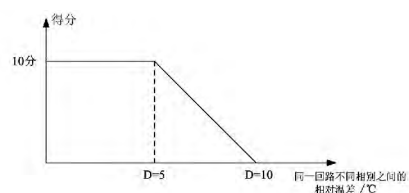


图 2 红外测温评价模型

评价周期内装置本体和二次回路红外测温计算

式同式(1),其中*i*为采集的次数; K_i 为单次巡视时二次回路红外测温评分;*n*为评价周期内总的采集次数。单次测温异常直接取0分。

2.2.3 装置绝缘状况状态量评价

根据要求回路绝缘应大于10 MΩ,根据实测的绝缘电阻数据以及绝缘数据变化率计算, K_1 评分标准按图3规定执行。

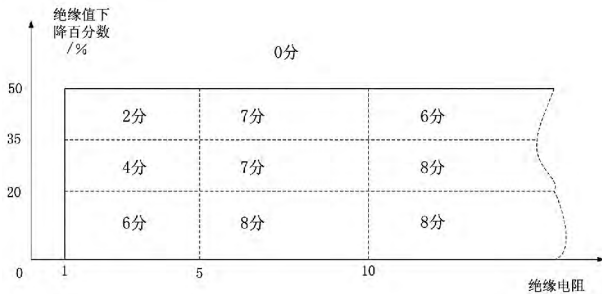


图3 交、直流回路绝缘评价模型

评价周期内装置绝缘状况计算式同式(1),其中*i*为采集的次数; K_i 为单次采集时对应的评价分数;*n*为评价周期内总的采集次数。

2.2.4 通道运行情况状态量评价

光纤通道运行情况评分标准以通道丢包率、误码率不超过标准值为限。丢包率、误码率标准值取装置设计告警门槛值。评价周期内光纤通道运行情况计算式同式(1),其中*i*为采集的次数; K_i 为单次巡视时装置通道运行情况评分;*n*为评价周期内总的采集次数;如果 K_1 无法计算,则取8分;评价周期内高频通道。其中 K_2 为评价周期内光纤通道故障告警次数或高频通道3 dB告警次数。光纤通道只考虑自身原因导致的丢包、误码,外部通信设备故障、装置死机重启等导致的丢包、误码不计入统计评价。

2.2.5 装置数据采集状态量评价

电流、电压通道各组测量值的平均值 CT_i 、 PT_i ,与其参考值的偏差值来判断装置采样的整体性能,采样精度计算方法如式(2)。

采样误差值 =

$$\left(1 - \max\left(\frac{|CT_i - CT_{i参考}|}{CT_{i参考}}, \frac{|PT_i - PT_{i参考}|}{PT_{i参考}}\right)\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中 CT_i 为保护各通道采样值; $CT_{i参考}$ 为参考测量值。测试时电流应大于0.1 I_n 。若检修巡视与例行试验数据同时存在,装置采样误差值取两者较大值。模拟量采集评分数 K_1 按图4规定执行(以斜率计算得分),当负荷电流小于0.1 I_n 时,电流模拟量采集不评分。

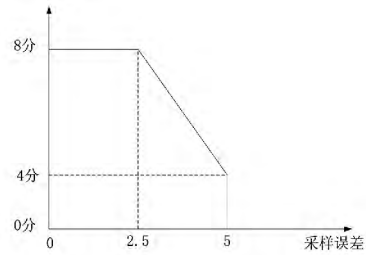


图4 装置采样数据评分模型

评价周期内装置模拟量采集得分同式(1),其中*i*为采集的次数; K_i 为单次巡视采样评分;*n*为评价周期内总的采集次数。开关量采集评分数 K_2 计算:评价周期内发生开入异常得0分,不发生开入异常得1分,装置数据采集评分为

$$K = K_1 \times K_2 \quad (3)$$

2.2.6 回路锈蚀、封堵、积尘状态量评价

对于二次回路中锈蚀、封堵、积尘状态量评价基本原理一致,对于锈蚀情况,要求端子箱无渗水,端子排锈蚀程度<15%,若端子箱无渗水现象,得4分,有渗水现象,得2分;若端子箱无凝露现象,得4分,有凝露现象,扣2分。对于封堵情况,要求电缆孔洞封堵良好,防火墙和防火涂料齐全,对于积尘情况,如有灰尘,但尚不影响屏内、箱体内、端子排上标识的辨认,扣2分。如灰尘使保护标识无法辨认,灰尘形成串状物或即将形成串状物,扣4分。

2.3 可靠性模糊状态量评价模型原理

可靠性模糊状态量分值低表明设备整体可靠度差于同型号整体可靠度,在评价周期内,某厂家同型号产品的故障率高,故障性质严重,其产品的同型号整体可靠度则差。计算评价周期内某厂家设备的加权平均缺陷评分为

$$\mu = [\text{同型号设备}(\text{一般缺陷次数} \times A_1 + \text{严重缺陷次数} \times A_2 + \text{危急缺陷次数} \times A_3) / \text{同型号设备台数}] \times 100 \quad (4)$$

根据影响程度装置缺陷类型一般、严重、危急缺陷赋予不同的权值统计。一般缺陷权值 $A_1 = 1$,严重缺陷权值 $A_2 = 2$,危急缺陷权值 $A_3 = 5$ 。

计算评价周期内某厂家设备的正确动作评分 K_1 , $K_1 = \text{同型号设备评价周期内正确动作次数} \times 100 / \text{同型号设备评价周期内动作总次数}$ 。

$$K_2 = 100 \times e^{-(100 - K_1) B_1} \quad (5)$$

$B_1 = 10$ 为加速系数。同型号可靠度评价得分为

$$K = K_1 \times 0.6 + K_2 \times 0.4 \quad (6)$$

2.4 失效风险模糊状态量评价模型原理

在没有得到有效验证的情况下,设备长时间运行后失效风险状态量(预计可靠度)会下降。当失效风险状态量随着时间的增长(预计可靠度)下降到一定程度,表明需要对二次设备的部分或者整体进行例行试验。失效风险状态量依据设备的最后一次检验时间和故障率进行评价。

t 时刻装置本体及其二次回路健康因子指数 = t 时刻的装置本体可靠度 $\times t$ 时刻的二次回路可靠度。

$$t \text{ 时刻的装置本体可靠度} = e^{-\lambda_1(t-t_1)} \quad (7)$$

式中 λ_1 为保护装置本体故障率; t_1 为最近一次装置得到完整检验的时间,取上一次检验时间。

$$t \text{ 时刻的二次回路可靠度} = e^{-\lambda_2(t-t_2)} \quad (8)$$

式中 λ_2 为二次回路故障率; t_2 为最近一次二次回路得到完整检验的时间,取上一次检验时间。

保护间隔在 t 时刻的装置本体及其二次回路预计可靠度用以下方式计算。

$$R_s(t) = e^{-[\lambda_1(t-t_1) + \lambda_2(t-t_2)]} \quad (9)$$

$$\lambda_n = \frac{1}{MTBF_n} \quad (10)$$

MTBF 为平均无故障时间计算值(该数据由厂家提供原始参考,设备运行中由统计数据予以校核,无法获取初始值时取设计寿命取值)。

设5年后设备的随机失效指数为65%且 $\lambda_1 = \lambda_2$, 则有 $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = 4.3\%$ (此参数可保证若开关3年内未检修,则进入注意状态)。

$$\text{预计可靠度得分} = R_s(t) \times 100 \quad (11)$$

2.5 改进型模糊状态量评价模型原理

改进型模糊状态量反映间隔设备状况,包括非家族性缺陷、家族性缺陷、反措。改进型状态量得分低表明需要版本升级、更换部件或进行技术改造。装置运行年限通过评价周期内间隔设备的累计运行时间与同类产品的平均运行年限的比值,得到该设备与同类产品相比较的相对品质优劣。对于本间隔装置的运行年限,同类产品平均运行年限无基准数据参考时可取12年。

对于家族性缺陷,存在疑似家族性缺陷得0.6分,存在严重家族性缺陷得0.8分。无家族性缺陷或家族性缺陷消除得1分。对于反事故措施,无反措项目得1分。在评价周期内应完成的反措未完成得0.6分。

2.6 二次设备状态评估模型合成

双重化配置二次装置本体和二次回路状态评价

结果以间隔总评分汇总输出。当间隔内包含多套保护系统时,可对每套装置本体及二次回路分别评价,间隔总评价得分取各套保护的最低分。因此第二节介绍,可将4个状态量进行合成,得到一个设备状态评估总模型,计算式见式(12)、式(13)。

$$\text{间隔评价分值} = \text{Min}\{\text{第1套装置本体及二次回路评分值} \cdots \text{第}n\text{套装置本体及二次回路评分值}\} \quad (12)$$

$$\text{第}n\text{套装置本体及二次回路评分值} = (\text{检测型状态量} \times A_1 + \text{可靠性状态量} \times A_2 + \text{失效风险状态量} \times A_3) \times \text{改进型状态量} \quad (13)$$

式中 A_1 、 A_2 、 A_3 为加权因子,分别取0.4、0.2、0.4。

3 检修策略确定原则

根据式(12)计算取得值可将设备分为以下4个状态。

(1) 健康状态: $Z \geq 86$, 表示设备处于正常状态。

(2) 亚健康状态: $86 > Z \geq 71$, 表示该状态比健康状态较差,但设备仍处于正常,建议此类设备纳入重点巡视范围。

(3) 异常状态: $70 > Z \geq 61$, 表示此类装置一般都是在评价周期内出现过问题,但并不严重。建议此类装置纳入第2年检修计划。

(4) 严重异常状态: $Z < 60$ 。表示此类设备已十分危急,应立即开展检修。

4 实例分析

乐山公司从2012年起对公司10座110 kV变电站和3座220 kV变电站二次设备进行基于模糊状态量的状态检修应用试点,通过近两年的试点应用,具体比较见表3。

从表3可知,对于试点变电站的主要二次设备,通过状态检修应用后,2012年和2013年检修次数与以往计划检修相比,分别减少了42次和43次,据初步估计,分别节约了检修费用共计56万元和59万元。而从近两年来设备运行情况看,以上试点的13座变电站在二次设备运行情况良好,危急严重缺陷次数较往年有显著减少,实例证明该方法达到预期效果。

表3 乐山公司2012—2013年二次设备状态检修试点应用情况

次数	110 kV 线路保护装置	110 kV 主变压器保护装置	35 kV 线路保护装置	10 kV 线路保护装置	220 kV 线路保护装置	220 kV 主变压器保护装置	220 kV 母差保护装置	110 kV 母差保护装置	110 kV 备自投装置
设备台数	41	18	17	95	13	6	6	5	7
2012年计划检修	13	6	8	28	4	2	2	1	2
状态检修	5	2	3	13	1	0	0	0	0
危急严重缺陷	3	4	7	28	3	1	0	0	0
2013年计划检修	14	7	7	25	3	3	2	2	2
状态检修	4	2	3	14	1	0	0	0	0
危急严重缺陷	3	4	5	24	2	0	0	0	0

5 评价模型应用中应注意的问题

在进行状态评价时应注意设备评价结果主要反映元器件等硬件部分的状态水平,软件原理和反事故措施执行情况、缺陷情况等也纳入到评价范畴。同时应注意通过更换备件、更换二次电缆等措施整改后消除缺陷的,其状态评价中涉及的相关原扣分可取消,但有关情况可作为评价结论调整的依据之一。在评价周期方面建议设备状态评价每年至少1次,宜在设备检修后增加1次评价,检修后评价用以检验检修的效果。

6 结 语

针对二次状态检修工作展开研究,在对二次设备缺陷进行分析基础上,提出了基于模糊状态量的状态评价模型,通过实际应用,证明了该方法同以往的计划检修模式相比,在很多方面有更多优越性。今后乐山公司将逐步推广该方法,同时在实际应用中不断对评价模型进行优化完善,一方面将更多可能影响到设备运行工况的因素(如电网运行方式等)考虑进去,另一方面探索将现有状态量模型用函数化表示,使得评价模型更为科学合理,更能全面真实地反映设备的运行工况,制定出更为科学经济的检修策略,使得状态检修达到更好效果。

参考文献

[1] 黄建华. 变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J]. 电力系统自动化, 2008(2): 12-14.

[2] 李明, 韩学山. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. 电机工程学报, 2013(9): 35-38.

[3] 潘乐真, 鲁国起. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2012(9): 35-38.

[4] 汲国强, 吴文传. 一种适用于状态检修的电力设备时变停运模型[J]. 电机工程学报, 2012(10): 55-58.

[5] 王佳明, 刘文颖. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012(12): 55-58.

[6] 秦建光, 刘恒. 电力系统二次设备状态检修策略[J]. 现代电力技术, 2013(12): 25-28.

[7] 叶远波, 孙月琴. 二次状态检修在现代电网中的应用研究[J]. 华东电力, 2011(8): 45-49.

[8] 李永丽, 李致中, 杨维. 二次装置可靠性及其最佳检修周期的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 21(6): 63-65.

[9] 陈维荣, 宋永华, 孙锦鑫. 电力系统设备状态监测的概念及现状[J]. 电网技术, 2010, 24(11): 12-17.

[10] Przytula K. W., Thompson D.. Construction of Bayesian Networks for Diagnostics [C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2012(5): 193-200.

[11] Heung Jae Lee, Bok Lhin Ahn, Young Moon Park. A Fault Diagnosis Expert System for Distribution Substations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2012, 15(1): 92-97.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士, 工程师, 主要从事二次设备检修工作;

董晓阳(1970), 博士, 副教授, 主要研究方向为智能变电站、信息技术及故障诊断在电力系统中的应用、变电站自动化;

王锐(1975), 本科, 高级工程师, 主要从事变电检修技术工作。

(收稿日期: 2014-11-20)