

继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用

吴宏斌, 盛继光

(金华电业局调度所, 浙江 金华 321000)

摘要: 状态检修作为一种检修模式正在电力生产中逐步开展。针对实际应用中继电保护设备状态评估的需求和不足, 通过对相关二次设备组成和运行特点的分析, 提出一套有效的评价策略和典型的数学模型, 在实践中按照具体情况灵活配置运用, 具有严谨、准确、操作性强的特点, 能够适应当前继电保护设备状态检修的需要。

关键词: 继电保护; 可靠性评估; 数学模型

Mathematical model and its application of relaying protection device reliability assessment

WU Hong-bin, SHENG Ji-guang

(Jinhua Electric Power Bureau Dispatching Station, Jinhua 321000, China)

Abstract: As a maintenance model, state maintenance is developing gradually in the electric power production. Aiming at the need and lack in application of relaying protection device state assessment, this paper analyses the relevant secondary side device and its operation characteristics, in order to supply a set of effective assessment policy and typical mathematical model. The mathematical model is of compactness, accuracy, strong, and serviceability, when applied to all kinds of devices, and fits in the current needs of relaying protection device state assessment.

Key words: relaying protection; reliability assessment; mathematical model

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)09-0065-04

0 引言

随着国民经济持续不断的高速增长, 社会对电力能源的需求越来越高, 我国电力系统不论是容量还是设备数量都在急剧增加。如果依旧按照原有的定期检修模式, 不仅需要大量的人力、物力, 增加安全事故发生的几率, 而且在电力设备质量较好, 工艺要求不断提高的情况下, 很难满足“应修必修、修必修好”的要求。因此以设备可靠性评估为基础的状态检修已逐步开展并将得到广泛的应用, 在此针对继电保护设备的状态检修, 对建立一套适合的评估数学模型及其实际应用进行一定的阐述。

1 继电保护设备的状态检修及关键点

状态检修, 也称预知检修或主动检修, 其基本思想是在普遍掌握设备健康状况的基础上确定极少数状况不好的设备实施检修, 最好是在该设备的安全性能有怀疑时才实施检修, 从某种意义上说状态检修是以可靠性为中心的响应型检修。

近年来得到广泛应用的微机型继电保护装置虽然具有实时的自检性, 但电气二次设备的检测对象

不仅仅是单一的元件, 而是包括交流测量、直流二次回路、设备输出接点的综合系统, 目前在技术手段上对其还无法做到正确的实时检测, 因此对设备状态的评估关键是要对设备运行的可靠性或故障率有正确预测, 从而能够在设备发生故障之前进行针对性的防范措施, 以达到状态检修的目的。而正确状态评估的前提是编制一套准确、严谨、操作性强, 能具体量化的数学模型, 找出故障发生和发展的统计规律, 提前消除隐患, 从而达到对设备宏观控制的目的。

2 可靠性评估的数学模型

建立继电保护可靠性数学模型是在掌握典型分析方法的基础上, 全面分析组成继电保护系统各元件的运行特征, 从而达到较准确判断出系统的故障率和运行可靠度。

2.1 继电保护系统典型的故障率曲线

从时间上对继电保护系统的故障率进行分析, 可以对其运行的可靠率和故障率有一个定性的了解(具体曲线见图1)。

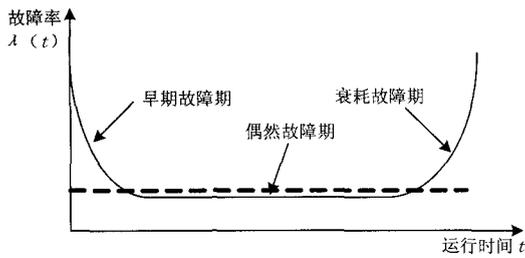


图1 继电保护系统故障率曲线

Fig.1 Fault probability curve of relaying protection system

第一阶段是早期故障期，设备运行开始阶段表现出故障率较高，原因是设计缺陷、工艺质量及现场安装、调试不良。

第二阶段是偶然失效期，此阶段故障率曲线为恒定性，设备的故障率基本保持不变，因而故障率随时间变化接近于常数且很低，故障的原因主要为外界影响、人为操作、不可预期的过载等。

第三阶段是损耗故障期，此阶段的故障是递增的，由于电器绝缘下降和损坏，电子元件老化，机械磨损严重，因而故障上升。此阶段应加强监视，预测衰耗开始的时间，提前进行维修更换已损的元部件，降低故障率的上升，延长设备的使用寿命。

2.2 继电保护各种元件的故障率曲线和分布函数

不同的设备其故障率 λ(t) 随时间的变化关系不一样，根据组成继电保护系统元件故障特性的不同，大致可以将其分成以下三种类型：

2.2.1 递减型 DFR

1) 故障率曲线见图 2，此类型故障率曲线特点是开始时故障率较高，此后故障率随时间的增加而逐渐减少，一定时间后所剩的设备或元件则不易发生故障，因而具有较高的可靠性，此种情况多见于保护装置内电子元器件。对此类故障采用预防维修的意义不大，主要应严格进行元器件的筛选和老化，加强设备安装调试的质量检验把关，在设备投运初期加强监视，发现隐患或异常尽早排除。

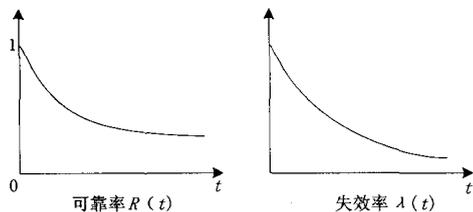


图2 递减型 DFR 曲线

Fig.2 DFR curve of decay type

2) 故障分布函数：

递减型 DFR 一般用威布尔分布函数：

$$f(t) = \frac{m}{t_0} (t - v)^{m-1} e^{-\frac{(t-v)^m}{t_0}}$$

m 为形状参数，决定了威布尔分布曲线的形状，当 m < 1 时，λ(t) 为时间的负指数函数，故障率呈递减型，表征早期失效；v 为位置参数，决定了威布尔分布曲线的位置，t₀ 为尺度参数，决定了威布尔分布曲线的高度和宽度，其值可根据厂家提供的元件数据，将其换算为伽玛函数后在数学手册中查得。

2.2.2 恒定性 CFR

1) 故障率曲线见图 3，此类型故障率的特点是任何时候 λ(t) 始终是一个恒定值，故障的发生纯属偶然的（随机）出现，无法预见。类似的设备主要有空气断路器、隔离变压器、放电间隙等，电子元件经过老练筛选和稳定运行后的故障率也是常数。

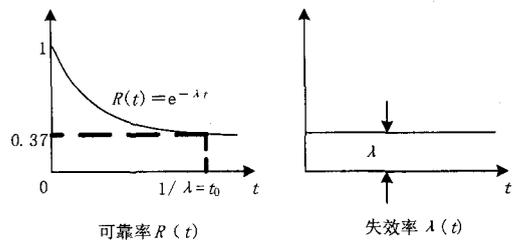


图3 恒定型 CFR 曲线

Fig.3 CFR curve of constance type

2) 故障分布函数

恒定性 CFR 一般用单参数指数分布函数：

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

λ 表示故障率，知道故障效率 λ 的大小就可以画出恒定性 CFR 的曲线和具体数值，元件的故障率可以根据厂家试验数据或可靠性预计软件工具获得。

2.2.3 递减型 IFR

1) 故障率曲线见图 4，设备的故障率随时间的增加而逐步上升，这种现象发生的主要原因是设备元件磨损、疲劳、电器绝缘老化等性能劣化的产生，多发生在设备的寿命期之后。因此可以针对故障模式及原因，预测老化、损耗等特性开始变坏的时间，提前安排检修，更换老化的元器件，以延长设备的有效寿命，类似的设备主要有二次电缆绝缘、继电器、端子排等。

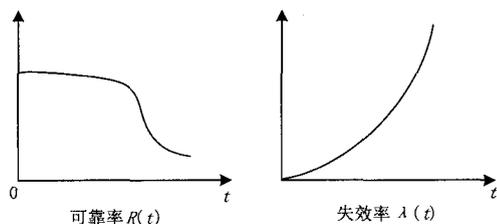


图 4 递增型 IFR 曲线

Fig. 4 IFR curve of incremental type

2) 故障分布函数

递减型 IFR 曲线用正态分布函数

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

进行描述。

μ 为 MTTF (平均寿命), σ 表示分布的标准偏差(方差), 知道分布的 μ 和 σ , 正态分布的各函数就可以用时间予以确定, 其值可以从标准正态分布的概率表中查得。

2.3 继电保护系统的系统可靠性

要确定和计算系统可靠性, 还必须知道系统的功能结构。系统的功能由逻辑图来确定内部各单元或部件的结构关系, 在确定各元件可靠率(故障率)的基础上, 可通过故障树和可靠性框图来得出系统的可靠性。

2.3.1 继电保护设备故障树分析

故障树分析法是对设备故障的起因由总体、分体、元件按树状逐级细化的演绎推理的分析方法。继电保护的典型设备故障分析树可用图 5 表示。



图 5 典型设备故障分析树

Fig.5 Fault analytical tree of typical devices

2.3.2 继电保护设备可靠性框图

可靠性框图是根据系统所要完成的功能目的而建立的, 根据目前继电保护系统的配置情况, 可以将其分为串联和并联两个系统。

1) 串联系统的可靠性

串联系统是指系统中只要有一个元件失效, 就会导致整个功能失效的系统, 或者说当系统中所有单元都正常工作时, 才能正常而不失效的系统。110 kV 及以下继电保护系统就是典型的串联系统, 其由单一的传感器、二次回路、保护装置、通讯设备、执行机构组成, 其中任何一个元件发生异常都会导

致整个系统故障(见图 6)。在知道每个系统(设备)的可靠度或故障率的前提下, 系统的可靠度等于组成该系统各个单元的可靠度 R_i 的乘积。

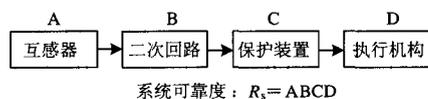


图 6 110 kV 及以下保护系统可靠关系图

Fig.6 Relationships model of 110 kV and sub-110 kV protection system

2) 并联系统的可靠性

并联系统是指系统中只要有一个单元正常工作, 系统就能正常工作, 反之只有当系统的几个单元全部失效, 系统才失效。设系统第 i 个单元的可靠度为 $R_i(t)$, 故障率为 $\lambda_i(t)$, $\prod_{i=1}^n \lambda_i(t)$; 系统的可靠度为 $R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \lambda_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$ 。

因此在电力系统中, 220 kV 及以上电压等级的设备要求配置两套完全独立的继电保护系统, 其目的就是为了保证其中任何一个元件发生异常都不会造成一次设备的被迫停运, 是典型的并联系统(见图 7)。

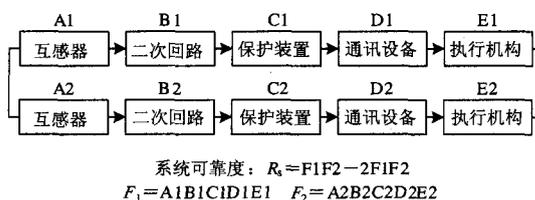


图 7 220 kV 及以上保护系统可靠关系图

Fig.7 Relationships model of 220 kV and sub-110 kV protection system

3 在继电保护状态检修中的应用

1) 利用系统可靠性的数学模型对保护装置运行情况的分析过程如下:

(1) 将每一套保护装置系统分解为二次回路、保护装置、收发讯机、电器设备、操作箱继电器等几个部分;

(2) 根据每个部分的特性要求相关厂家提供相应的分布函数(需考虑外界环境因素)和原始数据;

(3) 依据保护的组成和逻辑关系列出继电保护系统故障树;

(4) 根据保护配置方式和调度要求列出可靠性框图并进行可靠性计算;

(5) 根据计算结果与可靠性要求进行比较, 判断是否应进行检修。

2) 利用系统可靠性数学模型对保护装置运行情况的应用:

(1) 根据现场设备运行情况, 计算设备故障率 λ

一批低压保护设备有 1 000 台, 工作到 30 000 h 时, 累计故障有 10 块, 工作到 40 000 h 时, 累计故障 15 块, 工作到 50 000 h 时, 累计故障 30 块, 则 $t=30\ 000\text{ h}$ 和 $t=40\ 000\text{ h}$ 时的故障率分别为

$$\lambda(30000) = \frac{15-10}{(40000-30000)(1000-10)} = 5.05 \times 10^{-7}$$

$$\lambda(40000) = \frac{30-15}{(50000-40000)(1000-15)} = 1.523 \times 10^{-6}$$

由历史运行数据可以得出设备在今后的运行时间内出现故障的概率, 当其不满足要求时应进行必要的检修和更换。

(2) 根据现场设备故障分布, 计算设备维修间隔时间

一批继电保护设备的元件故障时间分布函数服从正态分布, 其特征值 $\mu=10\ 000\text{ h}$, $\sigma=100\text{ h}$, 若要求该设备的故障率不超过 0.01% (即可靠度 ≥ 0.99), 则应安排何时检修? 由设备的故障分布函数为 $F(T) = \Phi(\mu) = 0.01$, 查正态分布表 $\Phi(\mu) = 0.01$ 时, $\mu = -3.29$, 由条件 $\mu=10\ 000\text{ h}$, $\sigma=100\text{ h}$, 得出 $T = \mu + \mu\sigma = (10000 - 3.29 \times 100) = 9\ 671\text{ h}$ 。

(3) 根据设备初始故障率, 计算运行中发生故障的概率

一批保护装置的常数故障率为 $\lambda = 0.2 \times 10^{-5}$, 求 1, 最初的 1 000 h 与运行中会发生故障的概率; 2, 正常运行 10 000 h 后, 在 1 000 h 内发生故障的概率是多少?

(a) 由故障率 $\lambda = 0.2 \times 10^{-5}$ 得出在 $t=1\ 000$ 内发生的故障概率即为该时间 t 的故障累积分布函数, $P\{t \leq 10000\} = F(10000) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0.2 \times 10^{-5} \times 10^3} = 0.0199$

(b) 由正常运行 10 000 h 后, 在 1 000 h 内发生故障的概率是个条件概率 $P\{\tau \leq t + \Delta t \mid \tau > t\} = P\{\tau \leq 11000 \mid \tau > 10000\} = 1 - e^{-0.2 \times 10^{-5} \times 10^3} = 0.0199$

(4) 根据现场设备配置情况, 计算设备可靠运行时间

一个 220 kV 线路保护装置是由可靠度相同的两套装置并联组成的工作系统, 单元故障服从指数分布, 每个单元的平均寿命服从指数分布, 每个单元的平均寿命为 10 000 h, 要求确定系统可靠度达到 0.99 的持续工作时间。

根据题意 $R_S(t) = 0.99$, $R_1(t) = R_2(t)$ 则有 $F_S(t) = 1 - R_S(t) = 0.01$

由并联关系式可得 $F_S(t) = F_1(t) F_2(t) = F(t)^2 = 0.01$,

所以 $F_1(t) = F_2(t) = 0.01$

则每个单元的可靠度为 $R_1(t) = R_2(t) = 1 - F(t) = 0.9$

根据指数分布函数有 $\lambda = 1/\theta = 1/10^4 = 10^{-4}$ 则由 $R(t) = e^{-10^{-4}t}$ 得 $t = 1053\text{ h}$

即可得出系统可靠度满足要求的系统工作时间为 1053 h。

由上例可知, 在获得基础数据和元件特性的基础上, 利用故障曲线和分布函数, 能够详细的对设备的运行状态进行量化分析, 根据现场运行要求, 提前计算出设备需要检修的时间和内容, 这也是实施状态检修的目的和意义所在。

4 结束语

电力二次设备的状态检修的应用正方兴未艾, 建立正确的状态数学模型, 利用数理统计进行分析的方法对设备进行精确的状态预测, 是状态检修必不可少的步骤和关键, 需要在实践中不断的充实和完善, 以更好地满足电力快速发展及适应现场运行的要求。

参考文献

[1] 张增照. 电子产品可靠性预计[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHANG Zeng-zhao. Scheduled Reliability of Electronics Products[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[2] 彭苏娥. 质量与可靠性管理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
PENG Su-e. Management of Quality and Reliability[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

[3] 陆俭国, 王景芹. 低压保护电器可靠性理论及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
LU Jian-guo, WANG Jing-qin. A Theory and Application of Low-voltage Protection Electrical Appliances' Reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[4] 谭洪恩, 江志刚. 输变电设备的状态检修/陈三运[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
TAN Hong-en, JIANG Zhi-gang. State Maintenance of Power Transmission and Transformer Devices[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[5] 杨志伊, 郑文. 设备状态检测与故障诊断[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
YANG Zhi-yi, ZHENG Wen. State Maintenance of and Fault Diagnosis of Equipments[M]. Beijing: China Planning Press, 2006.

收稿日期: 2008-06-26; 修回日期: 2008-10-01

作者简介:

吴宏斌 (1976-), 男, 工程师, 长期从事继电保护技术监督、检修维护和整定计算工作; E-mail: jhepwhb@163.com

盛继光 (1960-), 男, 工程师, 长期从事继电保护专业管理、系统配合和设备优化工作。