

基于谐波因子的电子式电能表 可靠性预计方法研究及应用

马宇明¹, 李 林¹, 高 佳¹, 郭青龙², 窦爱玉², 赵 阳²

(1. 江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210007)
(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 介绍了可靠性预计的理论方法. 通过试验验证了谐波对电能表寿命的影响, 并首次提出了电子式电能表的谐波因子. 最后以 DDZY71 型单相费控智能电能表为例, 依据 GJB/Z 299C—2006 可靠性预计手册, 结合谐波因子进一步提高了电能表可靠性预计的准确性.
[关键词] 电能表, 可靠性预计, MTTF, 截尾序贯试验, 谐波因子
[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)03-0019-04

Research and Application on Reliability Prediction Methods for Electronic Electric-energy Meter Based on Harmonic Factor

Ma Yuming¹, Li Lin¹, Gao Jia¹, Guo Qinglong², Dou Aiyu², Zhao Yang²

(1. Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210007, China)
(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Firstly, this thesis introduces theoretical methods of the estimate of reliability. Secondly, it is proved that harmonic factor has a great impact on the reliability of the electric-energy meter by experiments, and the electronic electric-energy meter's harmonic factor is proposed for the first time. Finally, this thesis improves the reliability prediction accuracy of the DDZY71 type single-phase intelligent electronic electric-energy meter according to the GJB/Z 299C—2006, combined with the harmonic factor.
Key words: electric-energy meter, reliability prediction, MTTF, truncated sequential trial method for reliability test, harmonic factor

目前,电子式电能表广泛应用于电力系统,其可靠性水平越来越受到社会各界的关注. 电子式电能表的可靠性预计已有了一定的发展,目前主要是根据其设计中所选用的元器件、零部件的失效率作为依据,结合技术设计、制造工艺、器件所受的电应力以及电能表的使用环境等因子来预计电子式电能表的可靠性. 所以环境因子是很重要的参数,在可靠性工程中的应用非常广泛^[1].

随着各种非线性用电设备的广泛应用,使得电网中存在严重的谐波污染问题,造成了电压畸变,进而对各种用电设备产生不良影响,已成为当前电力系统中影响电能质量的公害. 然而目前电能表可靠性预计中并未考虑到电网谐波对电能表可靠性寿命的影响,因此目前电能表可靠性预计方法存在一定的不足.

本文针对电网谐波对电能表可靠性的影响,应用对环境因子区间估计的理论计算方法及一定的工程技术手段,首次提出了谐波影响因子,由此可以进一步提高电能表可靠性预计的准确度,对我国电能表轮换及检定周期设置有一定的指导意义.

1 可靠性预计原理及电能表可靠性数学模型

1.1 可靠性预计原理

衡量产品可靠性的指标主要有失效率 λ 、平均寿命 MTTF、可靠度 R 等. 对电子式电能表进行可靠性评

价,主要是通过预测电子式电能表的失效率、平均寿命和可靠度来综合评价电能表的可靠性.

失效率又称故障率,是产品可靠性的一个重要指标,其定义为:在规定条件下,产品在某时刻后的单位时间内发生失效的概率,一般记为 λ 或 $\lambda(t)$:

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\rightarrow 0}P(t\leqslant T\leqslant t+\Delta t,T>t).$$

(1)

故障率 FIT(Failures In Time),1 FIT=10⁻⁹/h,即定义是在 10⁹ h 出现一次故障,即为 1 FIT.成熟的电子产品的失效分布一般服从指数分布,同样,电子式电能表在经过严格的筛选、老练和调试之后,寿命也基本服从指数分布^[2],因此对于电能表及其元器件而言,随着时间的增长,失效率都趋近于一个稳定值,即电子元器件的失效率可以认为是恒定不变的,即 $\lambda=\lambda(t)$.

依据我国唯一权威的对电子设备进行可靠性预计的国家军用标准 GJB/Z 299C—2006,元器件失效率预计的一般应力模型的表达式为^[3]:

$$\lambda_p=\lambda_b\prod_{i=1}^n\pi_i,$$

(2)

式中: λ_p 为工作失效率的预计值; λ_b 为基本失效率; $\pi_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 是影响失效率的质量系数、环境系数、温度系数、电应力系数、产品额定值系数、结构系数等一系列修正因子.电子元器件在不同应力条件下的失效率是不同的,元器件应力法通过分析电子式电能表各元器件工作时所承受的电、热、环境以及机械应力,元器件的质量等级、电、热应力的额定值、工艺结构参数、应力参数以及应用环境类别等应力信息,来计算各元器件的工作失效率.

电子式电能表的可靠性特征量指标规定为平均寿命,对可修理的产品,其寿命用 MTBF(Mean Time Between Failure)表示;对不可修理的产品用 MTTF(Mean Time To Failure),电子式电能表的可靠性特征量规定为 MTTF.其数学表达式为:

$$MTTF=E(t)=\int_0^{+\infty}tf(t)dt=\int_0^{+\infty}t\lambda e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}.$$

(3)

可靠度 R 是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,是描述可靠性的定量指标,可靠度和失效率的关系为:

$$R(t)=e^{-\int_0^t\lambda(t)dt}=e^{-\lambda t}.$$

(4)

1.2 电子式电能表可靠性数学模型

为了便于分析电子式电能表的可靠性,根据常用的单相电子式电能表的功能及结构特点,绘制了其结构框图^[4],如图 1 所示.

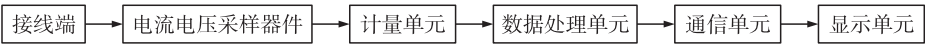


图 1 单相电子式电能表结构框图

Fig.1 Structure diagram of single-phase electronic energy meter

各个模块之间是串联关系,假设每个模块的可靠度为 R_i ,则系统的可靠度 R_s 为:

$$R_s=R_1R_2\cdots R_n=\prod_{i=1}^nR_i=e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n)t}.$$

(5)

由此可知,电子式电能表的失效率 λ_s 为:

$$\lambda_s=\lambda_1+\lambda_2+\cdots+\lambda_n=\sum_{i=1}^n\lambda_i.$$

(6)

则电子式电能表的可靠性寿命 MTTF 的预计值为:

$$MTTF=1/\lambda_s(h).$$

(7)

2 谐波试验及谐波因子的提出

随着电力电子技术的迅猛发展以及各种非线性用电设备的广泛应用,使得电网中普遍存在谐波,使用电设备所处的环境恶化,对电子式电能表的可靠性寿命有一定的影响.

2.1 电子式电能表谐波试验设置及试验结果

本文试验选择了某公司生产的设计寿命为 10 年的成熟产品 DDZY71 型单相费控智能电能表 150 台,

经检验全部合格. 试验仪器包括:精度为 0.05 级的三相电力谐波标准源、电源柜、老化箱. 其中便携式三相电力谐波标准源、电源柜、老化箱都经过了江苏省计量科学研究院的校准,以确保试验的正确性.

试验将 150 台电能表平均分成 A、B、C 三组做对比试验. A、B、C 三组的电压由三相电力谐波标准供给,A 组电压谐波含量为 0.0%,B 组电压谐波含量为 2.0%,C 组电压谐波含量为 GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》中规定的公用电网谐波电压上限值 5.0%. 其中各次谐波含量比例按照多次测量试验所在地的电网对应次谐波含量的百分比设定. 三组电能表的电流均为电源柜提供,电流谐波含量为 0.

试验条件参考了电能表系列行业标准 JB/T 50070—2002《电能表可靠性要求及考核方法》中的要求. 本次试验是针对额定电流为 5 A、额定电压为 220 V 的 DDZY71 型智能电表,选用无替换定时截尾试验. 试验电流采取 4 倍的基准电流 20 A,单台电能表所施加的电压,以及所对应的条件和时间见表 1.

表 1 截尾序贯试验条件

Table 1 Conditions of the truncated sequential trial method		
温度/℃	1.2 U_n 对应的时间/h	U_n 对应的时间/h
55	48	0
30	200	600
10	0	60

经过上述条件的加速老化试验后,用 SJJ-1 型的电能表检定装置对该批电能表进行基本误差、启动、潜动以及交流电压等一系列的样本性能试验^[5],实验结果为:A、B、C 三组电能表截尾失效数分别为 25、27、30.

2.2 试验结果分析及电子式电能表谐波因子的提取

在可靠性工程中,环境因子是一个非常重要的参数,表征相同产品在不同严酷度等级的环境中失效快慢的程度. 电子设备的环境因子 K 可定义为:电子设备在某种环境(称环境 I)下的失效率与实验室条件(称环境 II)下失效率之比:

$$K=\lambda_1/\lambda_2. \tag{8}$$

通常环境 I 较为严酷,即环境因子一般大于 1.

环境因子的研究是建立在 3 个基本假设基础之上的^[6,7],其概念也逐渐从最初的元器件推广到设备系统等高层次的产品. 电子产品的失效率一般服从指数分布,即上述试验中产品的失效机理都相同,可靠度也相同. DDZY71 型电能表是一款成熟的产品,其可靠性处于一个比较稳定的状态. 在相同的试验时间内,该型号成熟的电能表出现故障的机会是均等的,在此基础上本文通过试验,依据统计推断的环境因子研究方法,首次提出电子式电能表的谐波影响因子 π_h .

假设试验环境 I 和环境 II,环境 I 中的试验数据为 (z_1, τ_1) ,其失效数为 z_1 ,总试验时间为 τ_1 ,同样 B 组的实验数据为 (z_2, τ_2) . 则在给定的置信水平 γ 下,环境因子 K 的置信区间 $[K_L, K_U]$ 为:

$$K_L=\frac{\tau_2(2z_1+1)}{\tau_1(2z_2+1)}F_{2z_1+1,2z_2+1;1-\gamma}, \tag{9}$$

$$K_U=\frac{\tau_2(2z_1+1)}{\tau_1(2z_2+1)}F_{2z_1+1,2z_2+1;\gamma}, \tag{10}$$

式中, $F_{a,b;r}$ 是自由度为 a, b 的 F 分布的 r 分位数. 在工程计算中,环境因子取值区间的置信度水平 γ 一般取 0.6~0.8,可确定谐波因子的取值范围.

3 组试验时间相同,以 A 组试验作为对比试验组,将试验结果带入式(9)、(10)中,当置信水平 γ 取 0.6 时,可得 B 组的谐波因子取值区间为 $[1.006\ 44, 1.158\ 49]$;C 组的谐波因子取值区间为 $[1.118\ 99, 1.284\ 397]$.

环境因子在理论上有精确的阐述,本文所使用的基于统计推断的环境因子研究法,充分考虑到了数据的随机性,明确地给出了环境因子的区间估计,但是在可靠性评估中,较难精确获得环境因子的值,工程上常约定一个估计值作为环境因子. 一般带有一定的人为主观意识,以获得较切合实际的环境因子. 本文在谐波因子的取值区间范围内取一个固定值作为谐波因子,在此处取置信度 $\gamma=0.5$ 时的环境因子值,带入数据有: $K_B=1.08, K_C=1.20$.

当电网电压谐波含量为 1% 以下,含量比较低,可不考虑谐波因子,即认为 $\pi_h=1$;当电网电压谐波含量为 1%~3% 时,可取谐波因子 $\pi_h=K_{UB}=1.08$;当电网电压谐波含量较大,在 3%~5% 时,可取谐波因子 $\pi_h=K_{UB}=1.20$.

根据环境因子的定义,电子式电能表可靠性预计考虑谐波因子的失效率模型为:

$$\lambda' = \lambda_s \pi_h, \quad (11)$$

式中 λ' 为考虑了谐波因子后的电子式电能表的失效率; λ_s 为未考虑环境因子的电子式电能表的失效率; π_h 为谐波因子.

3 DDZY71 型电子式电能表的可靠性预计

电子设备可靠性预计的国际和国内标准较多,其中, GJB/Z 299C—2006 作为我国唯一权威的对电子设备进行可靠性预计的国家军用标准,其中的元器件应力法是可靠性预计过程中应用最广泛,预测最精确的方法之一. 本文对某公司提供的平均寿命为 10 年的 DDZY71 型单相费控智能电能表,采用 GJB/Z 299C—2006 中规定的元器件应力分析可靠性预计法,并结合谐波因子,来预计其可靠性寿命.

元器件失效率预计的一般应力模型的表达式如式(2). 根据该型号电能表的元器件、技术设计以及制造工艺,结合该电能表的使用环境,所承受的电应力,进行其可靠性寿命的分析,便可得到可靠性寿命的结果. 对该型号电能表在平均工作温度为 25 ℃ 情况下对进行可靠性预计. 依据上式(6)可得到该款电子式电能表总的失效率 $\lambda_s = 6952.21 \text{ FIT}$, 即预计所得的可靠性寿命 MTTF 约为 16.4 年.

考虑电子式电能表的谐波因子,当该款电能表应用的环境中平均电压谐波畸变率在 1% 以内,可以认为该款电能表的失效率仍为 $\lambda_s = 6952.21 \text{ FIT}$, 预计使用寿命是 16.4 年;当平均电压谐波畸变率在 1% ~ 3% 之间时,根据式(11)可得该款电能表的失效率为 $\lambda' = \lambda_s \times 1.08 = 7508.39$, 即预计使用寿命为 15.2 年;同理当电网环境平均电压谐波畸变率在 3% ~ 5% 之内,根据式(11)可得便可认为其预计使用寿命为 13.7 年.

4 结语

本文通过试验验证了谐波对电子式电能表寿命有着较大的影响,并首次提出了谐波影响因子,给出了考虑谐波因子的电能表失效率模型. 面对日益严重的电网谐波污染问题,考虑电能表所处的电网环境的谐波含量,可进一步提高电子式电能表可靠性预计的准确度,可用于指导我国电能表轮换及检定周期的设置. 电子式电能表谐波因子的提出,具有重要的理论价值和广泛的工程实用价值.

[参考文献] (References)

- [1] International Electrotechnical Commission. IEC/TR 62059-11—2002, Electricity metering equipment-dependability—part 11: general concepts[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2002.
- [2] 张增照, 潘勇. 电子产品可靠性预计[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Zhang Zengzhao, Pan Yong. Reliability Prediction for Electronic Products[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 中国人民解放军总装备部. GJB/Z 299C—2006, 电子设备可靠性预计手册[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Chinese PLA General Armament Department. GJB/Z 299C—2006, Reliability prediction handbook for electronic equipment [S]. Beijing: Standards Press of Chin, 2006. (in Chinese)
- [4] International Electrotechnical Commission. IEC/TR 62059-41—2006, Electricity metering equipment-dependability—part 41: reliability prediction[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [5] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. JB/T 50070—2002, 电能表可靠性要求及考核方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. JB/T 50070—2002, Reliability requirements and reliability compliance test for electrical energy meters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002. (in Chinese)
- [6] 周源泉. 质量可靠性增长与评定方法[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
Zhou Yuanquan. Quality Reliability Growth and Evaluation Methods[M]. Beijing: Beihang University Press, 1997. (in Chinese)
- [7] 甄昕. 环境因子在电子产品可靠性评定中的应用研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 9(7): 20-22.
Zhen Xin. Study on the application of the environmental factor in the reliability evaluation of electronic products [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 9(7): 20-22. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]