

电子式电能表可靠性预测方法的研究

张俊玮

(贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要:随着电子设备复杂程度越来越高,电子设备的可靠性要求也越来越突出。由于影响电子式电能表不运行的因素比感应式电能表更多更复杂,对电子式电能表的可靠性提出了更高的要求。通过分析电子电能表可靠性评估技术的发展现状及存在的问题,结合电能表自身的技术特点及可靠性评估技术要求,提出了加速寿命试验和元器件应力法两种预测方法,这两种方法是开展电子式电能表可靠性预测的最实用、最具理论价值和工程应用价值的技术方法,有利于电力企业选用更高可靠性、长寿命的电子式电能表,大大降低电力系统经营运行成本。

关键词:电子式电能表;加速寿命试验;元器件应力法;可靠性预测

文章编号:2096-4633(2018)01-0071-04 **中图分类号:**TM93 **文献标志码:**B

近年世界各主要经济体相继推动我国电网公司出台了智能电网分步实施规划。国家电网公司也结合我国当前现状和自身特点,按照“安全、经济、节能、科学调度和增值服务”的总体目标,大力推进“坚强智能电网”的建设。随着我国智能电网的建设及发展,包括智能电能表、负控终端、配变终端和低压集抄终端等电能计量设备的运行数量越来越大。由于电能计量设备关系到电力企业和用户的公平交易,也关系到电网的监测和控制,其可靠性在整个智能电网中显得尤为重要。然而目前我国在电子式电能表和计量自动化终端等电能计量设备的可靠性不高,可靠性评价方面的体系还不够完善。针对这一问题,对电子式电能表可靠性预测技术进行研究,通过加速寿命试验预测和元器件应力法的预测来评价电能表的可靠性^[1-3]。

1 加速寿命试验预测方法

1.1 加速寿命试验基本原理

加速寿命试验通常分为以下三种:步进加速寿命试验,它对被试品施加的应力以阶梯形状进行提高,一直到全部被试品失效;定量加速寿命试验,它是将一定数量的被试品分为几组,每组固定在一定应力水平下进行试验,要求选取的各应力水平都高于正常工作条件下的应力水平,试验到各组被试品均有一定数量的产品失效为止;序进加速寿命试验,它对被试品施加的应力是以等速直线上升,一直到全部被试品失效。如图1所示,其中 t 表示试验时

间, N 表示试验应力。

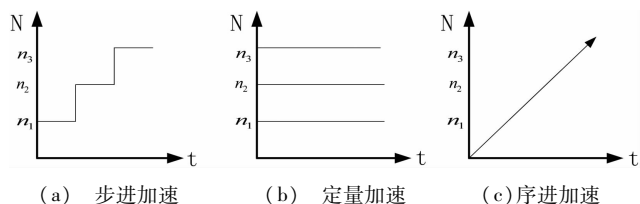


图1 三种加速寿命试验

Fig. 1 Three kinds of accelerated life tests

在上述三种加速寿命试验中,以定量加速寿命试验的理论和方法最为成熟。它的优点是统计分析精度高,在实际应用中,特别是在航空军工等行业应用中得到的验证最为充分;缺点是试验所需时间不是最短步进加速寿命试验实现较定量加速寿命试验复杂,统计分析方法比较复杂。序进加速寿命试验对设备要求较高,需要专门的控制设备产生符合要求的应力函数。目前 IEC62059-31 采用的试验方法为定量加速寿命试验^[4-6]。

1.2 加速寿命试验的模型

加速寿命试验的基本思路是利用高应力水平下的寿命特征去推算正常应力水平下的寿命特征。实现这个基本思想的关键在于建立寿命特征与应力水平之间的关系,称为加速模型。在选用模型时,关键是所选择的模型能够精确地把加速条件下的寿命模拟成正常使用条件下的寿命,常用模型有:

1.2.1 Arrhenius 温度加速模型

当采用温度作为加速应力时,其评估模型采用 Arrhenius 模型:

$$r = r_0 e^{\frac{E_0}{kT}} \quad (1)$$

式中 r 表示温度为 T 时的寿命特征; r_0 为由试验决定的常数; E 为活化能,用电子伏特标称; k 为波耳兹曼常数, $8.617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$, T 为温度应力,单位为开尔文。

1.2.2 Eyring 模型

当多种加速应力时,则采用 Eyring 模型:

$$n = K_1 K_2 \left(\frac{1}{S} \right) e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (2)$$

式中 n 为寿命特征; K_1 、 K_2 为待估常数; k 为波耳兹曼常数; T 为温度应力。

1.2.3 Peck 模型

当加速应力为温度和湿度时,则采用 Peck 模型:

$$t = K_1 (RH)^{-n} e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (3)$$

式中 t 为失效发生时间; Rh 为相对湿度; n 、 E_a 为待估常数; k 为波耳兹曼常数; T 为温度应力。对于电子表的加速寿命试验,一般采用 Peck 模型^[7]。

1.2.4 寿命模型选择与加速方程的线性化

为了简化统计分析,对 Arrhenius 模型作对数变化,则对应的加速方程就变为线性模型,从而易于对加速方程的待估常数 (x, y) 进行统计计算。其线性化形式为:

$$\ln r = x + yf(T) \quad (4)$$

式中 x, y 为待估常数; $f(T)$ 为应力为 T 的已知函数,当 T 为温度应力时, $f(T) = 1/T$ 。

2 元器件应力法的预测方法

基于元器件应力法的电子式电能表可靠性预测方法,是在电子式电能表可靠性结构模型的基础上,通过对电子式电能表元器件可靠性数据的综合,依次求出电能表各模块和整表的可靠性预测值。这是一个由局部到整体、由小到大、由下而上的综合过程。电子式电能表各元器件的失效率水平是进行电子式电能表可靠性预测的最基本数据,其精确度水平直接影响电能表可靠性预测值的精确度^[8-10]。需要指出的是,这里所指的元器件失效率水平是元器件在实际使用条件下的失效率,即考虑各种工作应力(温度、机械、电压、湿度等)影响下的情况。因此,在电子式电能表可靠性预测中,应充分考虑各种应力对元器件可靠性的影响。

所需信息有:每一类型元器件的数量;每一元器

件在参考条件下的失效率;每一元器件的应力因子及失效率转化模型;电子式电能表的结构信息。

2.1 电子式电能表失效模型

电子式电能表的失效率基本遵循图 2 所示的“浴盆曲线”,失效可以划分为 3 个阶段:早期失效期、有效寿命期、疲劳失效期。早期失效期可以在出厂前由制造商通过老化试验和其它质量控制手段来控制,让出厂后的产品可以直接进入有效寿命期。有效寿命期内的电子式电能表的失效率 γ 基本上是常数。

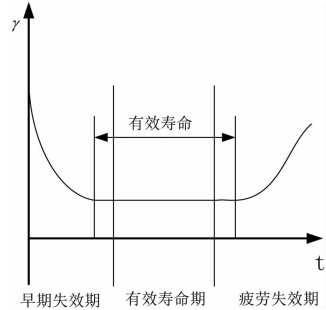


图 2 电子式电能表失效模型

Fig. 2 Electronic watt-hour meter failure model

2.2 电子式电能表可靠性结构模型

电子式电能表可靠性预测的基本假设,对构成电能表的所有元器件而言,跟电能表一样同等重要,即电能表是由其所有元器件构成的一个串联系统,任何一个元件的失效都会导致电能表的失效。其串联模型如图 3 所示, S_i 表示第 i 个元器件的可靠度, T 表示组成电子式电能表串联系统的元器件数量^[11]。

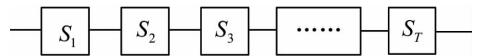


图 3 电子式电能表串联模型

Fig. 3 Electronic watt-hour meter series model

则电子式电能表的可靠度可表示为:

$$S(t) = \prod_{i=1}^T S_i \quad (5)$$

2.3 电子式电能表元器件可靠性模型

(1) 元器件失效率模型基础。在电能表可靠性预测中,认为所有元器件的失效率都是恒定不变的,即元件失效率 γ 是一个常数,不随时间而变化。即 $\gamma(t) = \gamma_i$, γ_i 为常数, i 表示第 i 个元器件。此时元器件可靠度函数

$$S_i(t) = e^{-\int_0^t \gamma_i c(t) dt} \quad (6)$$

可简化为:

$$S_i(t) = e^{-\gamma_i t} \quad (7)$$

则电子式电能表的可靠度函数为

$$S(t) = \prod_{i=1}^T S_i = e^{-(\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_T)t} \quad (8)$$

由此可知,电子式电能表的失效率为

$$\gamma_s = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_T \quad (9)$$

(2) 元器件失效率应力模型。元器件在不同应力条件下的失效率是不同的。元器件应力分析法全面考虑电、热以及其他气候、机械环境应力等因素对元器件失效率的影响,它通过分析电子式电能表各元器件工作时所承受的电、热应力、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。元器件应力模型的一般表达式为

$$\gamma_s = \sum_{i=1}^n N_i (\gamma_{Gi} A_{Qi} A_{Ei} A_{Wi}) \quad (10)$$

式中: γ_s 为系统的总失效率; γ_{Gi} 为第 i 种元器件参考条件下的通用失效率; A_{Qi} 为第 i 种元器件的通用质量系数; A_{Ei} 为第 i 种元器件的工作环境系

$$t_{MTTF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dS(t)}{dt} \right] dt = - \int_0^{\infty} t dS(t) \quad (11)$$

$$t_{MTTF} = - \int_0^{\infty} t dS(t) = - \int_0^{\infty} S(t) dt = \int_0^{\infty} S(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\gamma t} dt = \frac{1}{\gamma} \quad (12)$$

$$t_{MTTF} = \frac{1}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_T} \quad (13)$$

由式可知,预测电子式电能表平均寿命的核心是确定其构成元器件的工作失效率。

2.4.2 电子式电能表可靠性预测步骤

电子式电能表可靠性预测步骤分4步进行:

- (1) 计算电子式电能表各元器件的失效率。
- (2) 编制电子式电能表元器件工作失效率预测表。
- (3) 预测电子式电能表各模块的失效率。
- (4) 预测电子式电能表的失效率和平均寿命。

3 结束语

通过加速寿命试验预测和元器件应力法预测两种方法研究,为电力企业开展电子式电能表可靠性预测工作,提供了有效的途径。同时,有利于电力企业选用更高可靠性、长寿命的电子式电能表,大大降低电力系统经营运行成本。

参考文献:

[1] 杜贵平,方俊翔.基于费用最优的功率变换器可靠性分配方法

数; A_{Wi} 为第 i 种元器件的工作应力系数; N_i 为第 i 种元器件的数量; n 为电子式电能表所用元器件的种类^[12-15]。

2.4 基于应力法的电子式电能表可靠预测方法与步骤

2.4.1 电子式电能表平均寿命预测方法

电子式电能表的平均寿命是指电能表发生故障之前的平均工作时间,称为平均无故障工作时间 t_{MTTF} 。其度量方法为:在规定条件下和规定的时间内,观测范围内所有的电能表寿命之和与电能表总数的比值。在概率论中又称为寿命的数学期望。设 $f(t)$ 为寿命的概率分布,则:

$$t_{MTTF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (14)$$

$$S(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt \quad (15)$$

$$f(t) = -\frac{dS(t)}{dt} \quad (16)$$

$$t_{MTTF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left[-\frac{dS(t)}{dt} \right] dt = - \int_0^{\infty} t dS(t) \quad (17)$$

$$t_{MTTF} = - \int_0^{\infty} t dS(t) = - \int_0^{\infty} S(t) dt = \int_0^{\infty} S(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\gamma t} dt = \frac{1}{\gamma} \quad (18)$$

$$t_{MTTF} = \frac{1}{\gamma_s} = \frac{1}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_T} \quad (19)$$

[J].电测与仪表,2016,53(17):71-73.

DU Guiping, Fang junxian. Reliability allocation method of power converter based on optimal cost [J]. Electrical measurement & instrumentation, 2016, 53(17): 71-73.

[2] 危阜胜,肖勇,党三磊,等.电能计量表计及终端可靠性研究与探索[J].电测与仪表,2013,11.

WEI Pusheng, XiaoYong, Dang Sanlei, et al. Research and exploration of electric energy meter and terminal reliability [J]. Electrical measurement & instrumentation, 2013, 11.

[3] 黄寿海,鲁克俭.电能表[M].北京:中国电力出版社,1999.

[4] Mil-HDBK-217F: Reliability Prediction For Electronic Equipment [Z].

[5] 陈新亮.电子式电能表的应用[J].电力需求侧管理,2000(4):35-37.

CHEN Xinliang. The application of electronic electricity meters [J]. Power Demand Side Management, 2000(4): 35-37.

[6] 陈向群.电能计量技能考核培训教材[M].北京:中国电力出版社,2003.

[7] 彭杏芳.电能计量装置及其可靠性管理探究[J].技术与市场,2012(10):76-76.

PENG Xingfang. Research on the electric energy metering device and its reliability management [J]. Technology and Market, 2012

- (10):76-76.
- [8] 金少华,陆俭国,李志刚,等.一种关于电工产品平均寿命的评估方法[J].电器与能效管理技术,2005(11):3-5.
JIN Shaohua, LU Jianguo, LI Zhigang, et al. A method for evaluating the average life of electrical products [J]. Low voltage electrical appliances,2005(11):3-5.
- [9] 刘瑞元.定时截尾恒加速试验的优化设计[J].南昌大学学报(理科版),2001,25(3):258-263.
LIU Ruiyuan. The optimization design of the timing cut-off constant plus test [J]. Journal of nanchang university. 2001,25(3):258-263.
- [10] 张松,李亦非.关于电子式电能表加速寿命试验技术的研究[J].电测与仪表,2010,47(a07):89-91.
ZHANG Song, LI Yifei. Research on the accelerated life test technology of electronic electricity meters [J]. Electrical measurement & instrumentation,2010,47(a07):89-91.
- [11] SN29500;Failure Rate of Components[Z].2004.
- [12] RDF-2000;Reliability Data Handbook, A universal model for reliability prediction of electronic components, PCBs and equipments[Z]
- [13] 李勤.电磁干扰对电子式电能表的影响及其抑制策略[J].电测与仪表,2007,44(6):50-54.
LI Qin. Effect of electromagnetic interference on electronic energy meter and its suppression strategy [J]. Electrical measurement & instrumentation,2007,44(6):50-54.
- [14] 姚明哲,李鹏程,彭道刚,等.智能电表全生命周期质量评价研究及系统设计[J].贵州电力技术,2015,18(10):5-9.
YAO Minzhe, LI Pengcheng, PENG Daogang, et al. Design and research on quality assessment system of smart meters lifecycle based on defect points and AHP [J]. Guizhou Electric Power Technology,2015,18(10):5-9.
- [15] 甘茹.电能表表尾常见故障及防范措施分析[J].科技创新导报,2013(12):83.
GAN Ru. Analysis of common faults and preventive measures in the tail of electricity meters [J]. Science and technology innovation guide,2013(12):83.

收稿日期:2017-11-23

作者简介:



张俊玮(1987),女,硕士,工程师,主要从事电能计量技术研究和检测工作。

(本文责任编辑:龙海丽)

Research on reliability prediction method of electronic energy meter

ZHANG Junwei

(Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550002 Guizhou, China)

Abstract: With the increasing complexity of electronic equipment, the reliability of electronic equipment is becoming more and more prominent. Because the factors that affect the non-operation of electronic energy meter are more and more complex than the inductive power meter, the reliability of the electronic energy meter is higher. This paper analyzes the electronic watt-hour meter reliability evaluation technology development present situation and existing problems, combined with the technical characteristics of watt-hour meter and reliability assessment of technical requirements, proposed the accelerated life test and the component stress method two kinds of forecasting method, the two methods is the most practical reliability prediction of electronic watt-hour meter, most theoretical value and engineering application value of technical methods and is helpful for the electric power enterprise to choose higher reliability, long service life of electronic watt-hour meter, electric power system operation cost is greatly reduced.

Key words: electronic energy meter; accelerated life testing; component stress method; reliability forecast