

射频电缆额定功率测试方法的研究

殷海成, 宣维刚, 余振飞, 何璐

(国家信息传输线质量监督检验中心, 上海 201900)

[摘要] 额定功率描述了射频电缆在特定频率和环境温度下, 电缆的平均承载功率能力。基于射频电缆额定功率的重要意义, 分析了相关的理论计算和测试方法, 介绍了具体的测试程序并对其作了比较。

[关键词] 额定功率; 射频电缆; 测试方法

[中图分类号] TM248 [文献标识码] B [文章编号] 1006-4908(2015)03-0004-03

Research on Rated Power Test Method for RF Cable

YIN Haicheng, XUAN Weigang, YU Zhenfei, HE Lu

(National Quality Supervision and Inspection Centre of Information Transmission Lines, Shanghai 201900, China)

Abstract: Rated power can be described as the average power handling capacity of RF cable at specified frequencies and ambient temperatures. Based on the significance of RF cable rated power, the related theoretical calculation and test method are analyzed. The test procedures are introduced and a comparison between them is made.

Key words: rated power; RF cable; test method

1 额定功率的研究意义

对射频电缆的功率考核主要包括峰值功率和额定功率。射频电缆工作在大功率下时, 存在高电压或大电流两种情况。对于高电压情况, 射频电缆内、外导体间的绝缘易被击穿, 从而导致内外导体发生短路。因击穿电压所限制的功率为峰值功率。对于大电流情况, 射频电缆导体易发热, 而绝缘本身也有热损耗, 两者共同引起电缆温度上升, 当电缆温度超过绝缘材料自身的工作温度时, 绝缘会被熔化, 从而导致内外导体发生短路。因大电流引起温升所限制的功率为额定(平均)功率。当电缆传输脉冲信号时, 由于脉冲峰值高, 容易击穿电缆, 峰值功率就显得尤为重要。当电缆传输连续波信号时, 长期连续工作对电缆的抗热损耗能力提出了很高的要求, 此时应首要关注额定功率。

射频电缆峰值功率的确定取决于电缆的工作电压, 工作电压可由电缆的灭晕电压试验来获得。相对于较为简单的峰值功率的理论计算和实际试验,

国内至今未有射频电缆额定功率的标准测试方法, 对该参数的评价只能从传输线原理出发, 利用经典的理论计算公式, 求出特定条件下的功率容量。目前随着整机功率的提升, 作为整机设备必不可少的传输元器件的射频电缆, 其额定功率已引起了越来越多的关注。因此, 本文对射频电缆额定功率的测试方法进行了研究, 以期提供射频电缆额定功率测试的解决方案。

2 额定功率的理论计算

现在国内对额定功率的评价是基于传输线和热力学原理的理论计算方法, 即在最大额定环境温度 T_R (一般规定为 $40\text{ }^\circ\text{C}$) 下, 当电缆(内导体)处于最高允许工作温度 T_i 时, 根据电缆在发热和散热平衡时所建立的关系, 获得电缆的额定功率。电缆额定功率 P_r 的计算公式为^[1]:

$$P_r = \frac{T_i - T_R}{(2\alpha_d + \alpha_G) S_d + 2\alpha(S_c + S_0)} \quad (1)$$

式中 α_d 、 α_G 分别为电缆在最高允许温度 T_i 时的内导体衰减和介质衰减; α 为内导体衰减 α_d 、外导体衰减 α_D 、介质衰减 α_G 之和, 即 $\alpha = \alpha_d + \alpha_D + \alpha_G$; S_d 、 S_c 和 S_0 分别为绝缘、护套和电缆(护套)表面向周围环境散热的热阻。当射频电缆为架空敷设时, S_0 与表面温度有关, 在表面温度未知的情况下, S_0 无法确定。

[收稿日期] 2014-10-19

[作者简介] 殷海成(1984—), 男, 国家信息传输线质量监督检验中心技术主管。

[作者地址] 上海市铁山路 230 号, 国家信息传输线质量监督检验中心 201900

因此不能由式(1)直接计算出电缆的额定功率,通常采用图解法来最终获得额定功率。图解法计算太繁复,工作量极大,虽然近年来开发出各种功率计算软件,使得计算工作量为减少,但计算中采用的一些系数均为经验数据(例如热阻系数、散热系数等),数据的准确性有待于试验的证实。

3 额定功率的测试方法

现行国家标准 GB/T 17737.1—2000《射频电缆 第一部分:总规范——总则、定义、要求和试验方法》中的 11.19 条款推荐了几个基于不同原理的额定功率的相关测试方法,但这些额定功率试验方法都未涉及具体的试验程序,从测试角度来说,均缺乏可操作性。国际电工委员会针对此参数,于 2012 年 9 月出版了标准 IEC 61196-4-119—2012《同轴通信电缆 电气试验方法 射频额定功率》。该标准中详细介绍了射频直接法和低频交流法两种试验方法,并给出了相关试验程序。

3.1 IEC 61196-4-119—2012 中的射频直接法

射频直接法是一种采用射频信号发生器对电缆馈电,直接获取其额定功率的方法。图 1 示出了射频直接法的测试装置示意图。射频直接法的具体试验程序为: a. 将被测电缆接入射频功率源,并在电缆终端连接与其阻抗相匹配的吸收负载。 b. 在电缆始端接入功率计监测功率源的输出功率,并在电缆上钻一个小孔,采用光纤光栅传感器监测内导体的温度变化。 c. 逐级提高射频大功率源的输出功率,直至内导体温度达到电缆允许的最高温度,此时的输出功率即为电缆的射频额定功率。

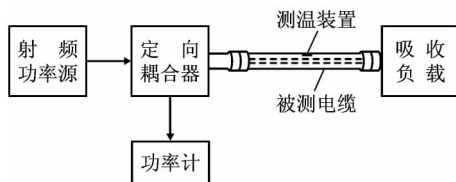


图 1 射频直接法的测试装置示意图

3.2 IEC 61196-4-119—2012 中的低频交流法

相较射频直接法,IEC 61196-4-119—2012《同轴通信电缆 电气试验方法 射频额定功率》标准以较大篇幅介绍了低频交流法。它是一种以低频下测得电缆绝缘、护套的电流、电压以及电缆导体的温升数据为基础,求解出导热系数后,再结合高频下实测的衰减数据,通过数学运算来获得射频电缆额定功率的测试方法。图 2 示出了低频(工频)交流法导热系数的测试装置示意图。

低频交流法的测试程序由低频部分和

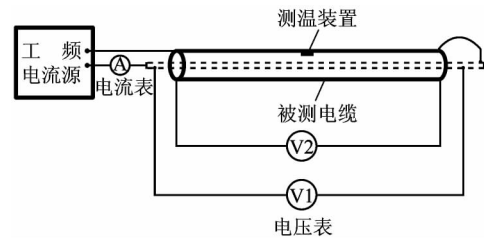


图 2 低频(工频)交流法导热系数的测试装置示意图

共同构成。低频测试时的具体试验程序为:

a. 被测电缆始端的内、外导体分别接入工频电流源的两个输出端,被测电缆的终端内、外导体短路。在电缆中部钻一小孔,直至内导体表面,以便插入温度传感器进行测温。

b. 调节电流源,对电缆进行馈电,直至温度达到电缆绝缘或护套材料允许的最高工作温度,此时记录下内、外导体上的电流和电压,则工频下电缆内、外导体上的功率损耗系数 P_i' 和 P_o' 为:

$$\begin{cases} P_i' = \frac{U_i I}{L} \\ P_o' = \frac{U_o I}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中 U_i 、 U_o 分别为内、外导体两端的电压,单位为 V; I 为电流,单位为 A; L 为电缆长度,单位为 m; 功率损耗系数的单位为 W/m。

c. 结合内、外导体上的温升数据,通过下式可求解出绝缘和护套的导热系数:

$$\begin{cases} P_i' = K_i (T_i' - T_o') \\ P_o' = K_o (T_o' - T) \end{cases} \quad (3)$$

式中 K_i 和 K_o 分别为绝缘和护套的导热系数,单位为 W/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$); T_i' 和 T_o' 分别为工频下内、外导体的温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T 为环境温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。由于 K_i 和 K_o 是材料自身的固有特性,与频率无关,因此它们可以应用于高频部分的计算。

高频测试时的具体试验程序为:

a. 采用网络分析仪测试不同射频 f_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 下电缆的衰减 α_i 。由传输线原理可知,电缆衰减 α_i 由导体衰减和介质衰减这两部分构成,即

$$\alpha_i = A \sqrt{f_i} + B f_i \quad (4)$$

式中 A 为导体衰减系数,单位为 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-\frac{1}{2}}$; B 为介质衰减系数,单位为 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$ 。

由实测数据 α_i 和 f_i 可得到下列方程组:

$$\begin{cases} \alpha_1 = A \sqrt{f_1} + B f_1 \\ \alpha_2 = A \sqrt{f_2} + B f_2 \\ \vdots \\ \alpha_i = A \sqrt{f_i} + B f_i \end{cases} \quad (5)$$

根据最小二乘法,可分别解出 A 和 B:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \frac{\sum_{i=1}^n f_i \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sqrt{f_i}} - \sum_{i=1}^n \sqrt{f_i} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{n \sum_{i=1}^n f_i - (\sum_{i=1}^n \sqrt{f_i})^2} \\ B &= \frac{n \sum_{i=1}^n \alpha_i - \sum_{i=1}^n \sqrt{f_i} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\sqrt{f_i}}}{n \sum_{i=1}^n f_i - (\sum_{i=1}^n \sqrt{f_i})^2} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

电缆的导体衰减由内导体衰减和外导体衰减这两部分构成,而且内、外导体的衰减系数也不相同。内、外导体的衰减系数可根据内、外导体的直径和电导率对实测的导体衰减系数 A 进行拆分获得:

$$\left\{ \begin{aligned} A_i &= A \frac{C_i}{a \sqrt{\sigma_i}} / \left(\frac{C_i}{a \sqrt{\sigma_i}} + \frac{C_o}{b \sqrt{\sigma_o}} \right) \\ A_o &= A \frac{C_o}{b \sqrt{\sigma_o}} / \left(\frac{C_i}{a \sqrt{\sigma_i}} + \frac{C_o}{b \sqrt{\sigma_o}} \right) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中 A_i 和 A_o 分别为内、外导体的衰减系数,单位为 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-\frac{1}{2}}$; C_i 、 C_o 分别为内、外导体的结构系数; a 、 b 分别为内、外导体的等效直径 (mm); σ_i 、 σ_o 分别为内、外导体相对于铜导体的相对电导率。

b. 电缆在高频下的额定功率 P_r 可通过解以下五元一次方程组来确定:

$$\left\{ \begin{aligned} P_i &= P_r A_i \sqrt{1 + \gamma_i (T_i - T_R)} \sqrt{f} / 4.343 \\ P_o &= P_r A_o \sqrt{1 + \gamma_o (T_o - T_R)} \sqrt{f} / 4.343 \\ P_d &= P_r B / 4.343 \\ P_i + P_d / 2 &= K_i (T_i - T_o) \\ P_i + P_o + P_d &= K_o (T_o - T_R) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中已知量共有 8 个,其中 K_i 、 K_o 由低频下的测试结果得到; A_i 、 A_o 由高频下的测试结果得到; γ_i 、 γ_o 分别为内、外导体材料的电阻率的温度系数,单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$,对于铜导体 $\gamma = 0.00393$,对于铝导体 $\gamma = 0.00407$; $T_R = 40^\circ\text{C}$; T_i 为内导体最高允许工作温度,单位为 $^\circ\text{C}$,它由绝缘材料的最高允许工作温度决定; f 为工作频率,单位为 MHz。未知量 5 个 P_r 为电缆的额定功率,单位为 W; P_i 为内导体功率损耗系数,单位为 (W/m); P_d 为介质功率损耗系数,单位为 (W/m); P_o 为外导体功率损耗系数,单位为 (W/m); T_o 为外导体温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

4 额定功率测试方法的比较

表 1 对比了上述两种射频电缆额定功率的测试方法。两种方法在测温上均采用了光纤光栅传感器,相比传统的金属热电偶传感器,具有体积小、精度高、不受电磁干扰等优点。该测温方法解决了小尺寸电缆的测温问题。

表 1 射频电缆额定功率测试方法比较

测试方法	电缆额定功率范围	温度采集方式	特点
IEC 61196-4-119—2012 的射频直接法	受射频信号源的动态范围限制	光纤光栅传感器	直接获得结果。测试装置中间环节多,仪器设备条件不易满足。
IEC 61196-4-119—2012 的低频交流法	受低频电流源和网络分析仪的动态范围限制	光纤光栅传感器	间接获得结果。测试装置构成简单,仪器设备易满足。

从获取结果的形式上看,IEC 61196-4-119—2012 中的射频直接法理论上可直接获得被测电缆的额定功率,是一种高效、准确的测试方法,但在实际应用中主要存在以下两个问题: a. 射频功率源造价非常高(一般为行波管),使用寿命有限。因此目前国内只有部分整机研究所具备离散频段的射频大功率源,而元器件研究所尚无此条件,国内各大检测机构也均不具备此能力; b. 射频直接法的中间环节较多,包括连接电缆与定向耦合器、吸收负载的连接器和转接器,以及阻抗匹配的大功率负载,这些元器件无论是整机研究所还是元器件研究所均难以满足。

IEC 61196-4-119—2012 中的低频交流法是一种间接获得被测电缆额定功率的测试方法。为了模

拟高频下电缆的内、外导体发热情况,在低频测试部分,采用了将电缆内、外导体短路的方式来予以实现,测试系统的搭建较易满足(工频电流源、电压表、电流表),成本较低,功率容量的扩展性较强,对高频下五元一次方程组的求解可借助 Matlab 软件快速实现,同时其低频、高频数据均是通过试验直接获得的,因此它兼具稳固的理论性和理想的测试重复性、再现性,不失为射频电缆额定功率测试的较佳的解决方案。

[参 考 文 献]

[1] 汪祥兴. 射频电缆设计手册 [R]. 上海: 中国电子科技集团公司第二十三研究所, 2012.