

时域反射电缆测长中的波速特性

宋建辉, 袁 峰, 丁振良

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨, hitsong@126.com)

摘 要: 行波波速是决定时域反射电缆测长系统测量精度的关键. 为了减小波速的影响, 研究了时域反射电缆测长中的波速特性, 分析了行波传播速度和介电常数的频率特性, 研究了电缆的材料特性和环境温度对电缆中行波传播速度的影响, 总结了确定波速的依据. 实验测量了行波信号在不同温度下的波速, 给出了行波在 PVC 绝缘电缆中传播速度的温度补偿系数. 实验结果表明, 经过波速温度补偿后, 时域反射电缆测长系统的测量精度得到显著提高.

关键词: 时域反射; 电缆; 波速; 频率特性; 温度补偿

中图分类号: TP216

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)04-0058-05

Velocity characteristics of time domain reflectometry cable length measurement system

SONG Jian-hui, YUAN Feng, DING Zhen-liang

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, hitsong@126.com)

Abstract: Traveling wave velocity is the key to the measuring accuracy of the time-domain reflectometry cable length measurement system. To reduce the impact of velocity, the velocity characteristics of time domain reflectometry cable length measurement system are studied, the frequency characteristics of traveling wave propagation velocity and dielectric constant are analyzed, and the influence of cable material parameters and ambient temperature on traveling wave propagation velocity on cable is investigated. The basis for determining the wave velocity is summed up. The signal propagation velocity at different temperature is measured, and the temperature compensation coefficient of traveling wave propagation velocity in the PVC insulated cable is presented. Experimental results show that the measuring accuracy of the time-domain reflectometry cable length measurement system is improved significantly by velocity temperature compensation.

Key words: time-domain reflectometry; propagation velocity; frequency characteristic; temperature compensation

时域反射技术可以实现对电缆长度的无损、便携、高精度检测, 是电缆长度测量的理想方式. 行波波速是决定时域反射电缆测长系统测量精度的关键, 现有的时域反射电缆测长方法都假设波速为一常数, 计算中采用某一估计波速. 实际上, 波速是一个受多种因素影响的复杂过程, 影响波速的因素包括电导线芯的材料、绝缘层的材料、电

导线芯直径、绝缘层直径、环境温度、频率、电导系数等. 根据各影响因素确定波速非常复杂^[1], 参考波速不具有通用性. 目前国内外多采用比例法消除波速对测量结果的影响^[2-3], 尚未见文献对时域反射电缆测长中的波速特性进行专门研究.

本文对影响波速的因素进行分析. 研究了 TDR (time-domain reflectometry) 波速的频率特性, 分析了电缆结构参数、绝缘材料、电导材料及环境温度对 TDR 波速的影响, 研究了电缆在不同温度下的波速变化规律, 给出了 PVC 绝缘电缆波速度的温度误差补偿系数, 总结了确定波速的依据.

收稿日期: 2009-11-26.

作者简介: 宋建辉(1981—), 女, 博士研究生;

袁 峰(1963—), 男, 教授, 博士生导师;

丁振良(1942—), 男, 教授, 博士生导师.

1 波速的特性

1.1 波速的频率特性

为便于计算,现有的 TDR 测量方法认为在高频状态下,电缆中的波速度可近似认为只与电缆的绝缘介质性质有关,而与电缆芯线的材料与截面积无关;对于不同材料的电缆,只要绝缘介质相同,其波速度是基本不变的. 事实上,波速与电缆的实际参数、结构及环境温度有关,参考波速不具有通用性. 而且,因电缆本身绝缘材料的差异,电缆所处的周围环境等都可能对电缆中的波速度造成一定的影响. 考虑输电线路参数的频率相关性,波速的通用公式为

$$v = \frac{f}{\beta} = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{2}[f^2LC - RG + \sqrt{(R^2 + f^2L^2)(G^2 + f^2C^2)}]}} \tag{1}$$

式中: R 、 L 、 G 、 C 分别为电缆单位长度的电阻、电感、电导和电容; f 为频率. 可见输电线路的行波波速与线路的实际参数和中心频率有关,利用线路参数精确计算行波波速时,既要求线路参数准确,又要求确定行波的中心频率,否则将导致行波波速误差的出现^[4-5].

图 1 为将同轴电缆电气参数代入式(1),进行简化变形得到的频率 - 波速图,此时认为电缆的分布参数为常数,介电常数和电导率均为恒定值. 可以看出,高频时,波速接近一恒定的常数,可近似用式(2)表示.

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{L_0C_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}} \tag{2}$$

式中: $c = 3 \times 10^8$ m/s,是光在真空中的传播速度; μ 为电缆芯线周围介质的高频相对导磁系数; ϵ 为电缆芯线周围介质的高频相对介电系数. 可见,高频时电缆中波速度可近似认为只与电缆的绝缘介质性质有关,而与导体芯线的材料与截面积无关. 对于不同导体材料制成的电缆,只要绝缘介质相同,其波速度是基本不变的. 但是在低频时,波速受频率影响较大.

实际上,绝缘介质的介电常数并不是恒定值,具有频率依赖特性,其表达式为

$$\epsilon_r(f) = \epsilon_r'(f) - j\epsilon_r''(f) \tag{3}$$

由于电缆绝缘层的介电常数的频率依赖特性非常复杂,目前,没有数学公式或者电缆已知程序可以计算适用于所有电缆的全部频率依赖特性的

介电常数的值. 式(4)为低压纸油型电缆绝缘材料的介电常数的经验公式^[6],在 20 ℃ 时,该介电常数为

$$\epsilon_r = 2.5 + \frac{0.94}{1 + (jf \cdot 6 \times 10^{-9})^{0.315}} \tag{4}$$

根据该经验公式可以得到低压纸油型电缆绝缘材料在不同频率下的介电常数. 可见,绝缘介质的介电常数是受频率影响的. 纸油型绝缘材料的介电常数的实部随着频率的增加而减小,导致电缆电容的下降和波传播速度的上升. 这一现象与前面分析到的,当介电常数下降,波速上升的现象一致.

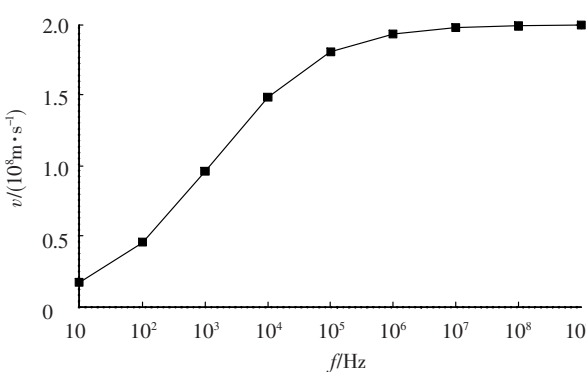


图 1 波速随频率变化的曲线

1.2 波速的材料特性

电缆的材料特性又分为结构特性和介质特性,考虑波速的通用公式(1),当确定电缆的 RLCG 模型参数后,可以得到电缆的传播波速. 以同轴电缆为例,定义 k 为外导体半径与内导体半径之比

$$k = \frac{b}{a} \tag{5}$$

保持内导体半径值不变,增大外导体半径值. 从图 2 可以看出,对于同一结构类型的电缆,波速随 k 值的增大而增大. 不同结构的电缆,或者同一结构、不同尺寸的电缆,波速不同.

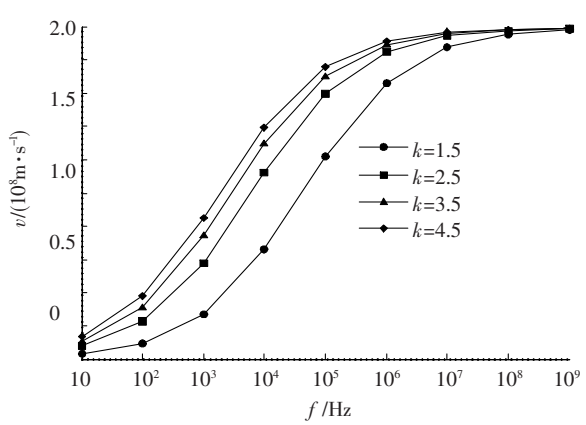


图 2 波速随电缆尺寸变化的曲线

绝缘材料层将电导线芯与线芯,线芯与外面金属层(假若有的话)分开.以电缆常用绝缘材料聚四氟乙烯(PTFE),聚乙烯(PE),聚氯乙烯(PVC)为例,其波速与介电常数的关系如图3所示,可以看出,波速依赖于绝缘层的介电常数,即使是同一结构类型、同一尺寸的电缆,如果其绝缘材料不同,其波速也不同.

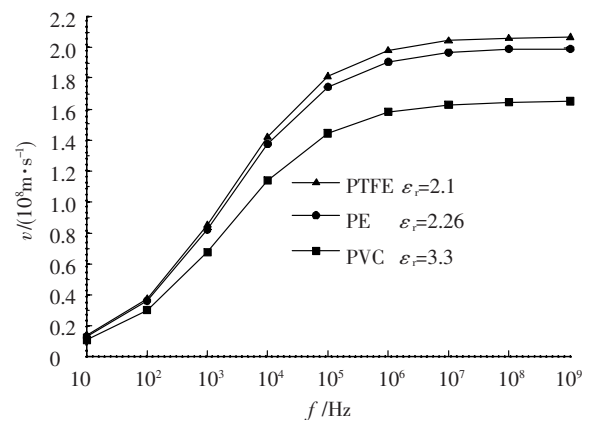


图3 波速随介电常数变化的曲线

电缆线芯的作用主要是传送电流,线芯的损耗主要由导体截面积和电导系数来决定.为了减少电力电缆线芯中的损耗和电压降,电缆线芯一般由具有高电导系数的金属材料制成.图4所示为电缆采用不同电导材料时的波速图.

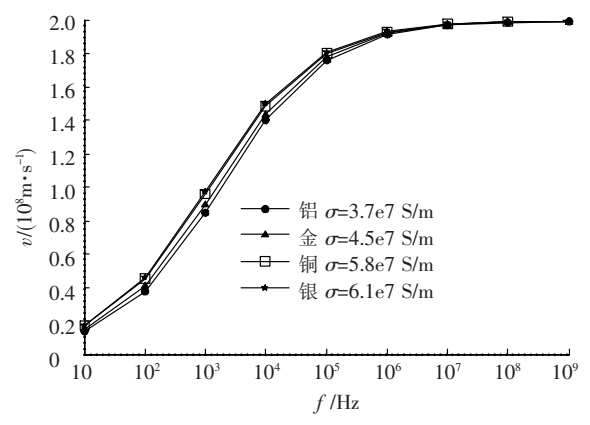


图4 波速随电导率变化的曲线

1.3 波速的温度特性

1.3.1 波速随温度变化规律

波速的温度特性主要体现在温度对电缆材料特性参数的影响^[7-9].电缆单位长度电容与绝缘材料介电常数成比例,因此通过测量被测电缆单位长度电容的变化,可得到介电常数的相应变化.

为得到环境温度对电缆波速的影响,Dubickas等^[10]做了为期4 d的实验.结果显示,电缆温度的增加会导致被测电缆单位长度电容值下降,从而得出结论,XLPE绝缘层的介电常数随着温

度的升高而降低.而介电常数的下降,会导致脉冲信号传播速度的增加.因此,信号在XLPE绝缘电缆中的传播速度随温度增大而增大.

Lin等^[11]在麻省理工大学电磁和电气实验室研究了PVC、FEP和ECTFE 3种电缆绝缘材料在不同温度和不同频率下的介电常数.实验结果显示,PVC绝缘材料的介电常数随着温度的升高而增大,FEP和ECTFE绝缘材料受温度和频率的影响不大.因此,信号在PVC绝缘电缆中的传播速度随着温度的增大而减小,以FEP和ECTFE为绝缘材料的电缆的波速不受温度变化的影响.

对于波速受温度变化影响的现象,不能给出统一、简单的规律,而应根据绝缘材料的不同,具体情况具体分析.

1.3.2 波速温度误差补偿系数

为了更好地对电缆的波速度作进一步深入的研究,以RVV型300/300 V聚氯乙烯护套软电缆为例,研究波速随温度变化的规律.电缆长度66.70 m,是由精度等级为I级的钢卷尺测出的.将电缆置于恒温箱内,通过改变恒温箱内的温度来测试波速在不同温度环境下的变化情况.具体实验数据如表1所示.

表1 不同温度下的电缆波速					
温度/℃	30.0	35.5	40.1	45.7	50.0
波速/ (10 ⁸ m · s ⁻¹)	1.861 4	1.844 2	1.817 0	1.794 6	1.768 8

观察电缆在不同温度下的脉冲波速度,得到信号在PVC绝缘电缆中的传播速度在不同温度下的变化规律,即当温度升高时,波速度随着温度的升高而减小,这一现象与国外测量的实验结果相吻合.

定义参考点波速为 v_0 ,参考点温度为 T_0 ,波速温度误差补偿系数为 λ ,则当温度为 T 时,波速 v 可表示为

$$v = v_0 + \lambda v_0 (T - T_0).$$
 (6)

根据式(6)可得到温度误差补偿系数 λ 为

$$\lambda = \frac{v - v_0}{v_0 (T - T_0)}.$$
 (7)

根据式(7),通过分析表1中的数据可以得出PVC绝缘电缆脉冲传播速度的温度补偿系数为-0.25%.

可见,在对电缆进行长度检测和分析的过程中,不能忽视温度对波速的影响.电缆波速度的温度补偿系数因电缆类别不同而不同,可以通过针

对性的实验得到被测电缆波速度的温度补偿系数,总结对比实验结果,通过软件补偿的方法来补偿温度对测量结果的影响。

2 波速的确定

由前面分析可以看出,波速是一个受多种因素影响的复杂过程,电缆中波速的确定应该根据下列电缆特征加以区别:(1)绝缘层的材料;(2)电导线芯的材料;(3)电缆的形状和结构;(4)制造结构上的特征;(5)保护层的类型(如果有保护层的话);(6)环境温度。

明确以上所列出的电缆特征后,选择合适的波速,得出被测电缆长度。

3 实验结果与分析

波速温度误差补偿前电缆长度测量值为

$$l = \frac{v_0 \times t}{2} = \frac{l_0 \times t}{t_0}.$$

(8)

式中: l 为被测电缆长度; v_0 为波速参考值; l_0 为参考电缆长度; t_0 为参考电缆发射脉冲与反射脉冲的时间间隔; t 为被测电缆发射脉冲与反射脉冲的时间间隔. 波速误差补偿后,被测电缆长度测量值为

$$l = \frac{v \times t}{2}.$$

(9)

式中 v 为根据式(6)得到的补偿后波速。

以 RVV 型 300/300 V 聚氯乙烯护套软电缆为例,当电缆处于卷曲状态时,采用时域反射电缆测长系统分别测量 30.00、56.37 和 86.75 m 电缆发射脉冲与反射脉冲时间间隔,记录现场环境温度,表 2 为不同电缆在不同温度下的时间间隔测量值。

表 2 不同电缆长度在不同温度下的时间间隔测量值

电缆长度/m	环境温度/℃	测量时间/ns
30.00	22.199	317.69
	21.960	596.56
56.37	23.025	598.25
	22.030	918.40
86.75	21.390	916.64

以 30.00 m 电缆为参考,得到该环境温度下的波速. 以该波速为参考值,根据温度误差补偿系数,对其他温度下的波速进行补偿修正. 表 3 为根据式(8)、(9)计算得到的修正前电缆长度测量值和修正后电缆长度测量值及相对误差。

表 3 波速误差补偿前后电缆长度测量值及相对误差

电缆长度/m	补偿前		补偿后	
	L 测量值/	相对误差/	L 测量值/	相对误差/
	m	%	m	%
56.37	56.334	-0.064	56.367	-0.005
	56.493	0.220	56.377	0.012
86.75	86.726	-0.028	86.763	0.015
	86.560	-0.220	86.735	-0.017

从表 3 可看出,经过波速温度误差补偿后,电缆长度测量值的相对误差明显减小,验证了本文波速温度误差补偿系数的正确性。

4 结 语

分析了影响波速的因素,给出了确定波速的依据,即在选择被测电缆中的波速时,必须明确被测电缆绝缘层的材料、电导线芯的材料、电缆的形状和结构、制造结构上的特征、保护层的类型(如果有保护层的话)以及环境温度等. 本文实验测量了行波信号在 PVC 绝缘电缆中不同温度下的波速,给出了电缆波速度的温度误差补偿系数. 实验结果证明,经过波速温度误差补偿后,电缆长度的测量精度得到了显著提高。

参考文献:

[1] SKIERUCHA W. Temperature dependence of time domain reflectometry-measured soil dielectric permittivity [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2009, 172(2):186-193.

[2] 束洪春,李义,宣映霞,等. 对不受波速影响的输电线路单端行波法故障测距的探讨[J]. 继电器, 2006,34(8):1-6.

[3] 黄雄,王志华,尹项根,等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19):34-37.

[4] DIN E S T E, GILANY M, AZIZ M M A, et al. A wavelet-based fault location technique for aged power cables [C]//2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005: 2485-2491.

[5] SHUTT-AINE J E. High-frequency characterization of twisted-pair cables[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(4):598-601.

[6] GUSTAVSEN B, MARTINEZ J A, DURBAK D. Parameter determination for modeling system transients - Part II: insulated cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3):2045-2050.

- [7] ENOKIZONO M, TANABE H. Numerical analysis of high-frequency induction heating including temperature dependence of material characteristics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31 (4): 2438 – 2444.
- [8] DISSADO L A, ZADEH S, FOTHERGILL J C, *et al.* Temperature dependence of charge packet velocity in XLPE cable peelings[C]//2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007: 425 – 428.
- [9] DIN E S T E, GILANY M, AZIZ M M A, *et al.* An PMU double ended fault location scheme for aged power cables[C]//2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2005: 80 – 86.
- [10] DUBICKAS V, EDIN H. On-line time domain reflectometry measurements of temperature variations of an XLPE power cable[C]//2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas City: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006: 47 – 50.
- [11] LIN C Y O, CURILLA J P. Temperature-related changes in dielectric constant and dissipation factor of insulations increase attenuation in data cables used in building plenums [C]//1991 Local Computer Networks Proceedings. Minneapolis: IEEE Computer Society Press, 1991: 74 – 79.

(编辑 赵丽莹)

(上接第 51 页)

- [5] 倪龙, 余延顺, 姜益强, 等. 循环单井地下水多流态流动特性[J]. 南京理工大学学报, 2010, 34 (3): 367 – 371.
- [6] 倪龙, 姜益强, 姚杨, 等. 循环单井井管 – 井孔 – 含水层传热模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30 (11): 1228 – 1233.
- [7] MIKLER V. A theoretical and experimental study of the "energy well" performance [D]. Penn State: Pennsylvania State University, 1993.
- [8] ORIO C D, JOHNSON C N, REES S J, *et al.* A survey of standing column well installations in North America [J]. ASHRAE Transactions, 2005, 111 (2): 109 – 121.
- [9] 倪龙, 姜益强, 姚杨, 等. 循环单井与含水层的原水交换[J]. 太阳能学报, 2010, 31 (6): 743 – 748.
- [10] XUE Y, XIE C, LI Q. Aquifer Thermal energy storage: a numerical simulation of field experiments in China [J]. Water Resources Research, 1990, 26 (10): 2365 – 2375.
- [11] ALAZMI B, VAFAI K. Analysis of variable porosity, thermal dispersion, and local thermal nonequilibrium on free surface flows through porous media [J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126 (6): 389 – 399.
- [12] CHEVALIER S, BANTON O. Modeling of heat transfer with the random walk method. part 1. application to thermal energy storage in porous aquifers [J]. Journal of Hydrology, 1999, 222 (1/2/3/4): 129 – 139.

(编辑 赵丽莹)