

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.020

振荡波电压作用下的电缆介质损耗测量方法

徐小龙¹, 李波², 卢雨欣¹, 张航伟¹, 曾祥峰³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 210036; 3. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南 长沙 410015)

摘要: 介质损耗是评价电力电缆绝缘状态的重要指标之一。振荡波电压作为目前新兴的检测电压, 因具有与工频交流电压较好的等效性, 在局部放电检测领域有广泛的应用, 但振荡波电压下的介质损耗测量工作暂未深入开展, 对绝缘状态一体化检测具有局限性。为了解决目前的局限性, 文中提出了一种基于振荡波测试技术的电缆介质损耗测量方法。在振荡波测试系统每次工作期间, 采集电缆试品的电压或电压、电流数据, 然后通过数据后处理提取波形参数, 从而获得准确的介质损耗。文中同时对2种基于振荡波电压的介质损耗测量方法进行对比与现场误差分析, 得到基于振荡波电压、电流波形的介质损耗角测量方法, 具有较高的准确性以及实用性, 并提出了解决零点漂移的方法。最后, 仿真以及实验结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 介质损耗; 振荡波测试系统; 电力电缆; 波形参数提取; 误差分析

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)04-0142-07

0 引言

随着电网的发展, 电力电缆凭借其良好的电气性能在电力系统中得到了大规模的应用。随着运行年限的增加, 电缆本身会出现不同程度的绝缘老化现象, 对电网造成威胁。因此, 保障电力电缆的安全、稳定运行具有重要意义。介质损耗可以表征电缆整体的绝缘水平, 通过对电缆进行介质损耗检测, 对其变化趋势进行分析, 能够有效评估电力电缆绝缘的性能、寿命等^[1-4]。

早期的介质损耗测量实验一般采用西林电桥, 但其输出功率不能满足大容量试品的测试要求, 具有使用局限性^[5-7]。在现场测试中, 一般通过测量设备上的电压与流过自身电流相位差实现介质损耗角的测量, 但是该类方法的后处理算法均存在较大误差^[8-9]。例如, 频谱分析法由于频谱泄露和栅栏效应, 导致求解得到的电压与电流相位有较大误差^[10-12]; 相关系数法由于环境噪声干扰, 得到的相位差的准确度具有随机性; 正弦波参数法无法准确得到基波频率, 导致所拟合函数与实际波形有较大偏差, 从而产生较大误差^[13-15]。

目前介质损耗能采用单一频率或扫频方式进行测量, 通过检测、记录固定频率下容性试品的介质损耗, 可得到容性试品的绝缘状态变化趋势, 从而及时发现绝缘状态异常情况并采取相应的补救措施。单一频率一般采用 50 Hz, 扫频方式的频率一般为 0.1~1 000 Hz^[16]。

振荡波测试系统 (oscillating wave test system, OWTS) 由于其便携性、经济性、等效性好, 目前在电气设备状态检测领域得到了较好的应用, 但是振荡波系统开展的工作主要针对局部放电领域, 暂未集成介质损耗测量功能^[17-19]。

为了解决上述方法、系统的局限性, 文中提出了基于 OWTS 的介质损耗测量方法, 即结合振荡波测试过程中采集到的电压波形或电压、电流波形的数据计算得到介质损耗, 并对这 2 种计算方式和应用场景进行分析对比。

1 OWTS 原理

OWTS 主要分为 2 种, 分别为直流 OWTS 和交流 OWTS, 文中以直流振荡波为例, 介绍振荡波结构以及产生过程。

传统直流 OWTS 的步骤和结构如图 1、图 2 所示, 主要由市电输入、整流滤波电路、变频系统、升压变压器、倍压电路、振荡波转换开关、控制和采集单元、电感以及容性试品构成。直流 OWTS 主要步骤为: (1) 系统通过市电供电, 将市电整流、滤波后变成直流电; (2) 直流电经变频系统逆变成倍压电路所需的电源频率; (3) 逆变后的电源经升压变压器、倍压电路升至理想电压后, 通过控制单元关闭充电开关 S_2 、打开振荡波转换开关 S_1 , 形成振荡衰减的电压波形, 具体波形如图 3 所示。

2 振荡波技术在介质损耗测量中的应用

2.1 介质损耗测量原理

介质损耗是高压容性设备状态评估的一项重

收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51877169)

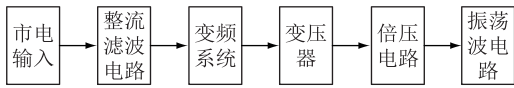


图 1 OWTS 步骤

Fig.1 Steps of OWTS

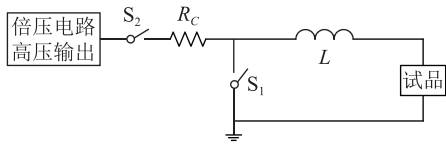


图 2 OWTS 结构

Fig.2 Structure diagram of OWTS

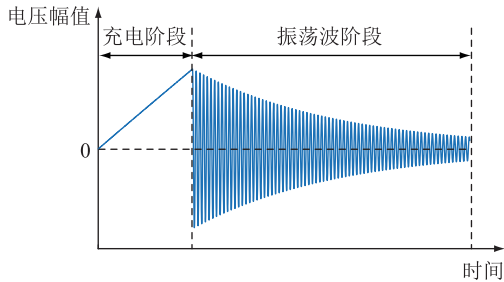


图 3 OWTS 工作波形

Fig.3 Working waveform of OWTS

要指标。由于电缆导体与屏蔽层形成两极,导致电缆整体呈容性,因此测量介质损耗可以对电缆绝缘状态进行评估。理想的电力电缆的电压相角超前流过自身的电流相角 90° ,但实际情况难免有泄漏损耗、极化损耗导致相位差小于 90° 。

介质损耗一般采用电容与电阻并联或串联的等效电路来表示,文中以并联形式举例说明,如图 4 (a)所示。其中, C_{eq} , R_{eq} 分别为容性设备的等效电容与等效电阻。为了更好地理解介质损耗角的物理意义,将流过等效电容、电阻的电流用矢量图形式表示,如图 4(b)所示。其中, φ 为电压 U 与电流 I 的相位差; δ 为介质损耗角。

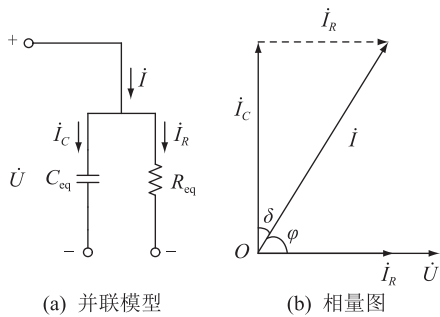


图 4 介质损耗并联模型与相量图

Fig.4 Dielectric loss parallel model and phasor diagram

结合图 4,可得并联等效电路下的介质损耗角正切值数学表达式如下:

$$\tan \delta = \frac{i_R}{i_C} = \frac{\dot{U}/R}{\dot{U}\omega C} = \frac{1}{\omega RC} \quad (1)$$

2.2 基于振荡波电压波形的介质损耗角测量

振荡波产生时的电路如图 5、图 6 所示。其中, L 为电感; R_1 为系统等效电阻; C 为电容试品的等效电容; R_2 为电容试品的等效电阻。振荡波转换开关闭合后,原本充到预设电压的电容试品与电感组成振荡回路,由于系统电阻、泄露电阻的存在形成逐渐衰减的振荡波。由直流振荡波的工作方式可得,待电容两端电压升至预设电压后,将会断开电源侧,同时电路结构为 RLC 电路,因此振荡波过程属于二阶零输入响应。

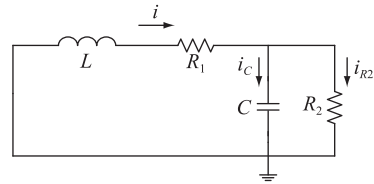


图 5 振荡波过程电流走向

Fig.5 Oscillating wave current trend graph

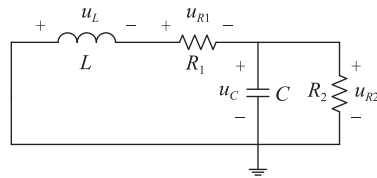


图 6 振荡波过程电压分布

Fig.6 Oscillating wave voltage profile

由基尔霍夫电压、电流定律可得:

$$i = i_C + i_{R2} \quad (2)$$

$$u_L + u_{R1} + u_C = 0 \quad (3)$$

其中:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (4)$$

$$i_{R2} = \frac{u_C}{R_2} \quad (5)$$

$$u_{R1} = iR_1 \quad (6)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

联立方程可得:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \left(\frac{L}{R_2} + R_1 C \right) \frac{du_C}{dt} + u_C \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 0 \quad (8)$$

解得:

$$u_C(t) = U_0 e^{-\lambda t} (\cos \omega t + \alpha \sin \omega t) \quad (9)$$

式中: U_0 为容性试品振荡波的起始电压。

$$\omega = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_2 LC} - \left(\frac{L + R_1 R_2 C}{2R_2 LC}\right)^2} \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{L + R_1 R_2 C}{2R_2 LC} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{CR_2 \lambda - 1}{\omega CR_2} \quad (12)$$

结合式(1)和式(11),可得:

$$\tan \delta = \frac{2\lambda}{\omega} - \frac{R_1}{\omega L} \quad (13)$$

结合上述公式推导,得到了基于振荡波电压波形的介质损耗角正切值计算公式,在实际 $\tan \delta$ 测量过程中,通过分压器测得电容试品的振荡波电压波形,然后通过波形分析,得到波形角频率 ω 以及波形的衰减系数 λ ,同时电感 L ,系统等效电阻 R_1 为已知参数,代入式(13)即可得到 $\tan \delta$ 。

2.3 基于振荡波电压和电流波形的介质损耗角测量

由 2.2 节的结果可得,电容两侧电压为:

$$u_c(t) = U_0 e^{-\lambda t} (\cos \omega t + \alpha \sin \omega t) = \sqrt{1 + \alpha^2} U_0 e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (14)$$

其中:

$$\tan \varphi = -\alpha \quad (15)$$

回路总电流可表示为:

$$i = i_c + i_{R2} = C \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{R_2} = \sqrt{1 + \alpha^2} U_0 e^{-\lambda t} \times \left[\left(\frac{1}{R_2} - \lambda C \right) \cos(\omega t + \varphi) - \omega C \sin(\omega t + \varphi) \right] = \sqrt{1 + \alpha^2} U_0 e^{-\lambda t} \beta \cos(\omega t + \varphi + \theta) \quad (16)$$

其中:

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{1}{R_2} - \lambda C \right)^2 + \omega^2 C^2} \quad (17)$$

$$\tan \theta = \frac{\omega}{1/(R_2 C) - \lambda} \quad (18)$$

结合式(1)与式(18)可得:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_2 C} = \frac{1}{\tan \theta} + \frac{\lambda}{\omega} \quad (19)$$

结合上述公式推导,得到了基于振荡波电压、电流波形的介质损耗角正切值计算公式,在实际 $\tan \delta$ 测量过程中,通过分压器测得电容试品的振荡波电压波形,通过电流互感器或引入测量电阻测得回路总电流波形,对采集到的电压、电流波形进行波形分析,得到电压与电流的相位差 θ ,波形角频率 ω 以及波形的衰减系数 λ ,代入式(19),即可得到 $\tan \delta$ 值。

2.4 振荡波电压下的介质损耗判断标准

振荡波频率一般为 20~500 Hz,由文献[20]可得不同频率下实际的介质损耗不同,因此不可按照工频下的介质损耗检测标准判断试品的绝缘状态。介质损耗实际表征试品的绝缘状态,频率只是影响介质损耗的绝缘状态判断标准,因此振荡波下的介质损耗测量可以针对同一试品建立介质损耗档案,通过介质损耗变化趋势评判试品的绝缘状态,或者参考超低频正弦波电压测量标准,对频率进行分段,并设置相应频段的介质损耗判断标准^[21]。

3 介质损耗测量仿真分析

基于 Matlab 中 Simulink 模块搭建仿真平台,对上述 2 种测量方法进行验证。以直流振荡波为例进行说明,Simulink 电路如图 7 所示。

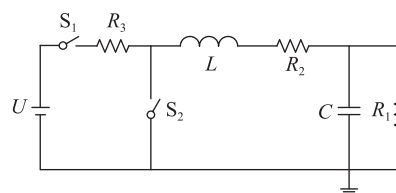


图 7 仿真模型

Fig.7 Simulation model

图 7 中, U 为高压直流源; S_1 为充电开关; R_3 为充电电阻; S_2 为振荡波开关; L 为电抗器; R_2 为系统等效电阻; C 为试品等效电容; R_1 为试品等效电阻。参数设置如下:高压直流电源 U 充电电流为 20 mA; R_3 为 10 k Ω ; L 为 4 H; R_2 为 25 Ω ; C 为 200 nF; R_1 为 20 M Ω 。仿真控制方式为:首先,断开 S_2 开关、闭合 S_1 开关,高压直流电源 U 以 20 mA 电流恒流充电,待试品电容两侧电压升到预设电压 U_0 时,断开 S_1 开关、闭合 S_2 开关,试品电容、电抗器组成振荡回路,产生振荡衰减的电压波形,同时,采集振荡波期间试品电容两侧的电压以及回路总电流。

3.1 试品介质损耗角正切真实值

对于系统振荡频率,由于电容两侧并联阻抗较大,对振荡频率影响较小,故忽略不计。振荡时,电路图可简化为图 8。

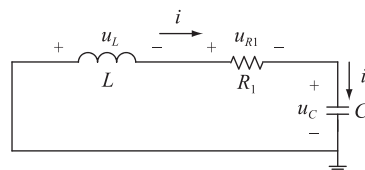


图 8 简化电路

Fig.8 Simplified circuit

列写微分方程求解振荡频率:

$$u_L + u_{R1} + u_C = 0 \quad (20)$$

$$i = C \frac{du_C}{dt} \quad (21)$$

联立方程可得:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + R_1 C \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (22)$$

由于振荡波过程属于欠阻尼状态,可得:

$$\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC} < 0 \quad (23)$$

则 u_C 可表示为:

$$u_C = e^{\alpha x} (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t) \quad (24)$$

其中:

$$\alpha = -\frac{R_1}{2L} \quad (25)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_1^2}{4L^2}} \quad (26)$$

结合参数设置,可得振荡频率与试品介质损耗角正切真实值为:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_1^2}{4L^2}}}{2\pi} = 178.03 \text{ Hz} \quad (27)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_1 C} = \frac{1}{2\pi f R_1 C} = 2.2349 \times 10^{-4} \quad (28)$$

3.2 基于振荡波电压波形仿真处理

从 Simulink 模块中提取振荡波过程中电压波形,如图 9 和图 10 所示。

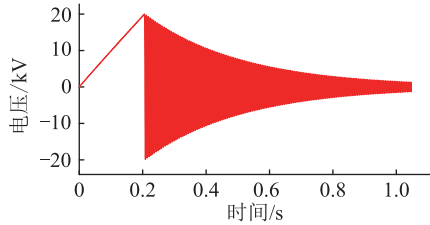


图 9 振荡波电压波形

Fig.9 Waveform of oscillation wave voltage

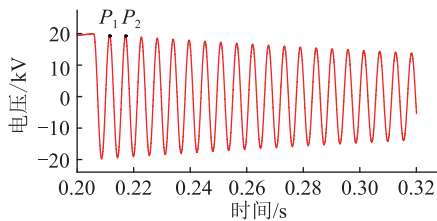


图 10 振荡波局部电压波形

Fig.10 Waveform of oscillation wave local voltage

选取 P_1 与 P_2 点计算衰减系数以及角频率,可得:

$$\tan \delta_1 = \frac{2\lambda}{\omega} - \frac{R_1}{\omega L} = 2.2358 \times 10^{-4} \quad (29)$$

误差为:

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{\tan \delta_1 - \tan \delta}{\tan \delta} \right| \times 100\% = 0.04\% \quad (30)$$

式中: ω 为 1 118.03 rad/s; λ 为 3.250。

3.3 基于振荡波电压、电流波形仿真结果分析

从 Simulink 模块中提取振荡波过程中试品电压以及回路总电流波形,如图 11 所示,衰减系数以及角频率可以从电压或电流波形直接得到,电压、电流相位差可通过极值点相位比较法或过零点比较法得到,图 11 为极值点相位比较法。

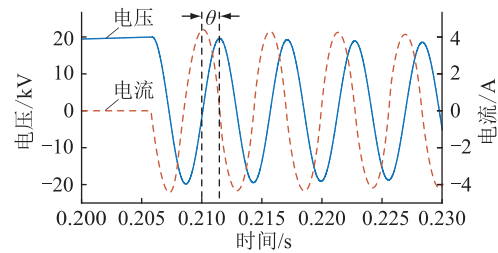


图 11 振荡波电压和电流波形

Fig.11 Waveforms of oscillation wave voltage and current

$$\tan \delta_2 = \frac{1}{\omega R_2 C} = \frac{1}{\tan \theta} + \frac{\lambda}{\omega} = 2.3386 \times 10^{-4} \quad (31)$$

误差为:

$$\varepsilon_2 = \left| \frac{\tan \delta_2 - \tan \delta}{\tan \delta} \right| \times 100\% = 4.58\% \quad (32)$$

式中: θ 为 90.1532° 。

改变试品电容两端并联电阻的阻值,重复多组试验,试品电容均为 200 nF,结果见表 1。

表 1 不同并联电阻处理结果

Table 1 Data error comparison between two methods

并联电阻/ Ω	$\tan \delta$ 实际值	方法 1 $\tan \delta$ 计算值	误差 /%	方法 2 $\tan \delta$ 计算值	误差 /%
5	8.9396×10^{-4}	8.9450×10^{-4}	0.06	8.8043×10^{-4}	1.51
10	4.4698×10^{-4}	4.4719×10^{-4}	0.05	4.6249×10^{-4}	3.47
50	8.9396×10^{-5}	8.9436×10^{-5}	0.05	9.1239×10^{-5}	2.06
100	4.4698×10^{-5}	4.4735×10^{-5}	0.08	4.6409×10^{-5}	3.83
1 000	4.4698×10^{-6}	4.4719×10^{-6}	0.05	4.6393×10^{-6}	3.79

其中方法 1 为基于振荡波电压波形方法;方法 2 为基于振荡波电压、电流波形方法。误差均在允

许范围内,同时对比不同并联电阻下的介质损耗正切值,介质损耗正切值随并联电阻的减小而增大,与实际情况相符,验证了2种方法可以对不同绝缘状态下的试品进行评估。

3.4 测试方法对比与现场误差分析

3.4.1 参数变化

基于振荡波电压波形的介质损耗角测量方法在求解过程中,默认电感 L ,系统等效电阻 R_1 是一组已知量。振荡波设备出厂时,铭牌上有较为准确的 L, R_1 ,实际计算中可代入公式求解。

查阅文献资料可得,在不同电流、频率下,电感 L ,电阻 R_1 会有变化,会偏离铭牌上所标的值^[22-23]。同时,电阻 R_1 也会随现场温度改变,因此基于振荡波电压波形的介质损耗角测量方法在现场有较大的局限性。

基于振荡波电压、电流波形的介质损耗角测量方法在求解过程中,所需要的参数均为波形后处理得到,因此不会受到现场条件影响,具有较高的准确性以及实用性。

3.4.2 测量误差

试验过程中,噪声是影响 $\tan \delta$ 测量准确度的一项重要因素,一般通过数字滤波方法对采集到的原始波形进行初步处理。噪声一般为高频信号干扰或工频信号耦合到信号采集卡中。因此,在数据处理过程中,可以通过设置带通滤波的方式将噪声滤除。

振荡波系统的分压器根据不同情况选取不同的分压比,一般选用10 000:1或100 000:1的变比,因此分压后的值很小,微小的零点漂移对衰减系数 λ 影响较大,需要对其进行分析。

以 $y = Ae^{-\lambda t} \cos \omega t + B$ 函数为例,其中, A 为峰值高度; B 为零点漂移量; λ 为衰减系数; ω 为信号角频率。选取该函数一段波形进行分析,如图12所示。

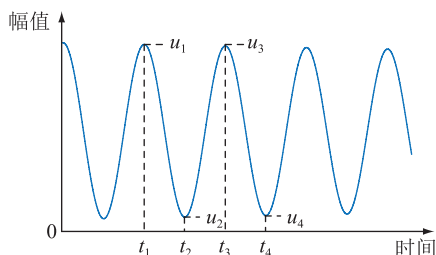


图12 零点漂移分析
Fig.12 Zero drift analysis

选取临近的正、负峰值 u_1, u_2, u_3, u_4 ,相应的时间为 t_1, t_2, t_3, t_4 ,时间间隔为 Δt ,设 u'_1, u'_2, u'_3, u'_4 为消除零点漂移后的值,可得:

$$\begin{cases} u_1 = u'_1 + B = Ce^{-\lambda t_1} + B \\ u_2 = u'_2 + B = -Ce^{-\lambda t_2} + B \\ u_3 = u'_3 + B = Ce^{-\lambda t_3} + B \\ u_4 = u'_4 + B = -Ce^{-\lambda t_4} + B \end{cases} \quad (33)$$

由于 $y = Ae^{-\lambda t} \cos \omega t + B$ 为正弦项与指数项相乘所得,正负峰值时的相位并不为0或 $\pi/2$,但是两相邻的正峰值或负峰值的时间差均为整周期时间 T ,即峰值偏移相同的相位 φ ,故峰值处的幅值的基本项 $A \cos \varphi, A \cos(\varphi + \pi/2)$ 用 $\pm C$ 来表示,文中不再进行证明。

$$\frac{u_1 - u_2}{u_3 - u_4} = \frac{Ce^{-\lambda t_1} + Ce^{-\lambda t_2}}{Ce^{-\lambda t_3} + Ce^{-\lambda t_4}} = \frac{1 + e^{-\lambda \Delta t}}{e^{-2\lambda \Delta t} + e^{-3\lambda \Delta t}} \quad (34)$$

式中: $u_1, u_2, u_3, u_4, \Delta t$ 均为已知量,可以将 $e^{-\lambda \Delta t}$ 替换为 x ,则式(34)可转换为式(35),便可精确求出 λ ,如式(36)所示。通过此算法可以弥补零点漂移带来的误差。

$$\frac{u_1 - u_2}{u_3 - u_4} = \frac{1 + x}{x^2 + x^3} \quad (35)$$

$$\lambda = -\frac{\ln x}{\Delta t} \quad (36)$$

4 介质损耗测量实验验证

为了验证基于振荡波电压的介质损耗测量方法的有效性,在实验室搭建了实验平台,其原理如图13所示。

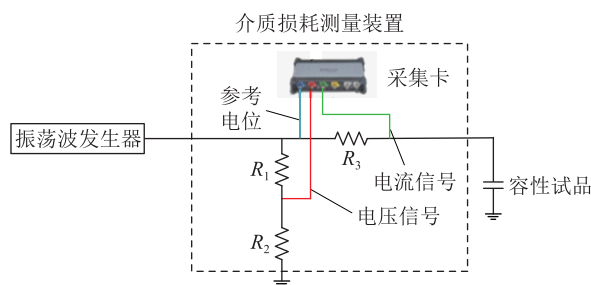


图13 实验平台原理

Fig.13 Experimental platform schematic

其中,电压与电流采集部分集成在介质损耗测量装置里,电压采用电阻分压器提取,电流通过测量串入 0.1Ω 无感电阻上的电压间接测量回路电流;容性试品为4组 $0.5 \mu\text{F}$ 的电容,选取单组和2组、3组、4组并联组成容值分别为 $0.5 \mu\text{F}, 1 \mu\text{F}, 1.5 \mu\text{F}, 2 \mu\text{F}$ 的试品作为研究对象;并联电阻选取无穷大电阻(即不并联电阻), $500 \text{ M}\Omega, 50 \text{ M}\Omega$ 模拟不同绝缘状态。依据上述参数进行实验,设置峰值电压为18 kV,使用基于振荡波电压、电流波形的介质损耗测量方法进行计算,结果如表2所示。

表2 介质损耗测量实验结果
Table 2 Dielectric loss experimental results

试品电容/ μF	介质损耗角正切值		
	无穷大 并联电阻	并联 500 M Ω 电阻	并联 50 M Ω 电阻
0.5	0.004 5	0.011 1	0.017 5
1.0	0.003 5	0.006 2	0.012 2
1.5	0.002 3	0.005 3	0.009 2
2.0	0.001 6	0.004 2	0.006 0

由表2可得,相同电容容值下,并联电阻越大,计算得到的介质损耗角正切值越小,与实际情况相符合,可验证文中介质损耗测量方法的有效性。

5 结语

目前振荡波测试系统开展的工作主要针对局部放电领域,暂未集成介质损耗功能,针对目前系统的不足,提出了基于OWTS的介质损耗测量方法,采集振荡波期间的电压或电压、电流波形数据,对数据进行后处理得到介质损耗角正切值,实验仿真验证了文中方法的准确性。同时,结合现场测试条件,对2种振荡波下介损测量方法进行对比,得到基于振荡波电压、电流波形的介质损耗角测量方法更适合现场测试,并提出了解决零漂的计算方法,可以提高现场测试结果的精确度。最后,通过实验验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] ORTON H. Power cable technology review[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1057-1067.
ORTON H. Power cable technology review[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1057-1067.
- [2] 谭笑, 陈杰, 李陈莹, 等. 高压电力电缆增加段长关键技术研究展望及应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 91-96.
TAN Xiao, CHEN Jie, LI Chenying, et al. Research prospect and application of technology to increase the length of high voltage power line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 91-96.
- [3] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [4] DO M T, AUGÉ J L, LESAINTE O. Dielectric losses and breakdown in silicone gel[C]//2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas City, MO, USA. IEEE, 2006: 541-544.
- [5] 彭金松, 龙艳姣, 韦向宁, 等. 电桥法测量电阻的实验研究[J]. 创新创业理论研究与实践, 2018, 1(22): 109-111.
PENG Jinsong, LONG Yanjiao, WEI Xiangning, et al. Experimental study on resistance measurement by bridge method[J]. The Theory and Practice of Innovation and Entrepreneurship, 2018, 1(22): 109-111.
- [6] QISHEN L, XIANG D D, HUANG R H, et al. Research on the digital dielectric loss measuring technology based on IEEE1588[C]//2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). Jabalpur, India. IEEE, 2015: 574-578.
- [7] WANG S H, CHEN P X, LI J Y. Difference of dielectric properties between AC and DC XLPE cable used insulation materials[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Xi'an, China. IEEE, 2016: 148-151.
- [8] 袁炜, 刘淮霞. 煤矿 XLPE 电缆介质损耗在线监测研究[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2020, 20(1): 40-42, 47.
YUAN Wei, LIU Huaixia. A method for monitoring of XLPE cable dielectric loss online[J]. Journal of Langfang Normal University (Natural Science Edition), 2020, 20(1): 40-42, 47.
- [9] FAN W L, MA X M. Dielectric loss angle data processing based on adaptive weighted data fusion algorithm of the aging mine cable[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing, China. IEEE, 2017: 5739-5742.
- [10] SI C J, CHEN Q G, LI G J, et al. Measurement of dielectric loss factor of high voltage capacitive apparatus based on DSP[C]//2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China. IEEE, 2009: 1047-1050.
- [11] GUO L Y, YIN X G. Research on anti-interference digital dielectric loss measurement[C]//2007 42nd International Universities Power Engineering Conference. Brighton, UK. IEEE, 2007: 475-479.
- [12] RAYDOVSKA V, NAKOV P, RAICHEV V. Implementation of a methodology for on-line monitoring of the tangent of the angle of dielectric losses in bushings in laboratory conditions[C]//2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA). Bourgas, Bulgaria. IEEE, 2014: 1-4.
- [13] SU C Q, LI C R. Using very-low-frequency and oscillating-wave tests to improve the reliability of distribution cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(1): 38-45.
- [14] 左自强, 徐阳, 曹晓珑, 等. 计算电容型设备介质损耗因数的相关函数法的改进[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 53-57.
ZUO Ziqiang, XU Yang, CAO Xiaolong, et al. Improvement to correlation algorithm for dielectric dissipation factor calculation of capacitance equipments[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 53-57.
- [15] SHEN X Q, WANG C Y. The dielectric loss measurement method of Wiener filtering and STFT interpolation harmonic analysis based on wavelet transform[C]//2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science. Wuhan, China. IEEE, 2009: 499-502.
- [16] 杨梦迪. 基于扫频方式的电缆介质损耗因数检测系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

- YANG Mengdi. Research on cable dielectric loss factor detection system based on sweep method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [17] 卢雨欣, 李波, 支亚薇, 等. 一种可用于电缆局部放电检测的串联谐振系统 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 44-48, 74.
- LU Yuxin, LI Bo, ZHI Yawei, et al. A frequency-tuned resonant system for PD measurement and withstand test [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 44-48, 74.
- [18] PETZOLD F, BEIGERT M. Experiences of PD diagnosis on MV cables using oscillating voltages (OWTS) [C]//2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. Dalian, China. IEEE, 2005: 1-7.
- [19] CHEN Z J, LIU G, CHEN C W, et al. Test and study of 10 kV XLPE power cables' typical defects based on oscillating wave test system [C]//2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Diego, CA, USA. IEEE, 2010: 1-4.
- [20] 杜伟平. 数字化电缆介损扫频测试系统设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- DU Weiping. Design of cable dielectric loss factor detection system based on sweep method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [21] 配电网电缆线路试验规程: Q/GDW 11838—2018 [S]. 国家电网有限公司, 2019.
- Test code for distribution power cables: Q/GDW 11838—2018 [S]. State Grid Corporation of China, 2019.
- [22] 鲁百佐, 刘志存. 趋肤效应的实验研究 [J]. 物理测试, 2004, 22(4): 16-17, 43.
- LU Baizuo, LIU Zhicun. Experimental study of skin effect [J]. Physics Examination and Testing, 2004, 22(4): 16-17, 43.
- [23] 赵宇红, 王松江, 王凤仁. 非线性电抗器的数学模型与等效电路 [J]. 哈尔滨电工学院学报, 1996(3): 307-313.
- ZHAO Yuhong, WANG Songjiang, WANG Fengren. Mathematic model and equivalent circuit of nonlinear reactors [J]. HIET Journal, 1996(3): 307-313.

作者简介:



徐小龙

徐小龙 (1996), 男, 硕士在读, 研究方向为电力设备绝缘状态检测 (E-mail: xuxiaolong@stu.xjtu.edu.cn);

李波 (1988), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力需求侧管理技术、新能源发电控制技术研究工作;

卢雨欣 (1994), 男, 博士在读, 研究方向为电力设备绝缘状态检测。

Cable dielectric loss measurement based on oscillating wave voltage

XU Xiaolong¹, LI Bo², LU Yuxin¹, ZHANG Hangwei¹, ZENG Xiangfeng³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Marketing Service Center, Nanjing 210036, China;

3. State Grid Changsha Power Supply Company of Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: Dielectric loss is one of the important indexes to evaluate the insulation state of power cables. As the current emerging detection voltage, the oscillating wave voltage has a good equivalence with the power frequency AC voltage, and has a wide range of applications in the field of partial discharge detection. However, the dielectric loss measurement has not been carried out in depth, which has limitations for the integrated detection of insulation status. In order to solve the problem of current limitations, a cable dielectric loss measurement method based on the oscillating wave test technology is proposed. During each operation of the oscillating wave test system, the voltage or voltage-current data of the cable sample are collected, and then the waveform parameters are extracted through data post-processing to obtain accurate dielectric loss. At the same time, the two measurement methods are compared and the field error is analyzed, and the dielectric loss angle measurement method based on the oscillating wave voltage and current waveform has high accuracy and practicability, and a method to solve the problem of zero drift is proposed. Finally, simulation and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the method.

Keywords: dielectric loss; oscillating wave test system; power cable; waveform parameter extraction; error analysis

(编辑 方晶)