

# 基于谐振特性的高压电缆介损测试方法研究

汪 锐<sup>1</sup>, 牟志远<sup>1</sup>, 任长永<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司眉山供电公司, 四川 眉山 620010;

2. 保定腾远电力科技有限公司, 河北 保定 071051)

**摘 要:**根据串联谐振电路特性,建立一种新的高压电力电缆介质损耗因数计算模型,并提出一种新的基于串联谐振电路功率微分的介质损耗因数计算公式。基于谐振特性的交联聚乙烯高压电缆介质损耗因数测试模型,利用串联谐振的升(降)压阶段测试电缆的介质损耗因数,解决高电压大电容电缆介质损耗测试的难题。结果表明:电路参数仿真计算值、现场试验值与真实值均基本一致,与现有常规电桥法相比,基于谐振特性的介质损耗因数测试方法在一定程度上更加准确,为高电压大容量电力电缆的介质损耗因数测试提供参考。

**关键词:**谐振特性;介质损耗因数测试方法;功率微分;高压电力电缆

中图分类号:TM247;TM835 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)10-0107-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.10.017

## Study on Test Method for Dielectric Loss Factor of High Voltage Power Cable Based on Resonance Characteristic

WANG Rui<sup>1</sup>, MOU Zhiyuan<sup>1</sup>, REN Changyong<sup>2</sup>

(1. Meishan Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Meishan 620010, China; 2. Baoding Tengyuan Electric Technology Co., Ltd., Baoding 071051, China)

**Abstract:** According to the characteristics of series resonance circuit, a new model for calculating the dielectric dissipation factor of high-voltage power cable was established, and a new dielectric loss factor calculating formula derived from the differential power of the series resonance circuit was proposed. On the basis of test model, the dielectric dissipation factor of XLPE power cable was calculated by the step-up or step-down process of the series resonance to solve the problem of dielectric dissipation measuring of high voltage and large capacity cable. The results show that the simulation calculating values of circuit parameters and field test results match with the actual values. Compared with conventional electric bridge method, the test method for calculating dielectric dissipation factor based on the resonance characteristic is more accurate to a certain extent. This provides a reference for testing the dielectric dissipation factor of high voltage and high capacity power cable.

**Key words:** resonance characteristic; dielectric dissipation factor test method; differential power; high voltage power cable

## 0 引言

随着交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电力电缆大规模应用于电力系统中,对电缆绝缘性能的检测就显得尤为重要。介质损耗因数(介损)测试作为一种常用的非破坏性绝缘性能诊

断方法<sup>[1]</sup>,主要分为超低频(very low frequency, VLF)介损、工频介损、振荡波介损和异频介损等<sup>[1-4]</sup>。

超低频介损测试广泛应用于中压交联聚乙烯电力电缆的绝缘老化诊断试验<sup>[1,3-12]</sup>,具有试验装置便于携带、灵敏度高、可测试较长电缆等优点,其缺点是测试频率与实际运行工频频率差异较大,当测试频率低于0.01 Hz时可能引起电缆中空间电荷的积累<sup>[3]</sup>。D KIM等<sup>[5]</sup>研究发现随着电缆长度的增加,超低频介损测试值趋于减小,该方法能测试的中压

收稿日期:2021-10-10 修回日期:2021-12-04

作者简介:汪锐(1984-),男(汉族),四川眉山人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。

电缆最大长度为1 500 m。

工频介损测试的优点是测试频率与运行工况相同<sup>[13]</sup>,对于老化电缆的测试精度高<sup>[7,14-15]</sup>,缺点是电源容量需求高<sup>[4]</sup>,随电缆长度增加而显著增大。

振荡波电压因具有与工频交流电压较好的等效性,有学者提出采用振荡波电压进行电缆介损测量<sup>[2]</sup>,通过采集振荡波电压、电流的波形,求取波形衰减系数及电压电流相位差得到电缆介损,该方法经验证具有一定实用性,但未充分考虑线路分布参数和行波反射对于检测波形衰减系数和电压电流相位差的影响<sup>[16-17]</sup>。

除此之外,还有异频介损测试的方法<sup>[18]</sup>,利用串联谐振原理对被试品进行升压,结合介损电桥测量桥体,采用电桥法测量被试品介损。该方法主要应用于40 kV及以下的大容量电气设备,且需要配置标准电容器、介损电桥等测量设备。

综上所述,超低频介损法、工频介损法、振荡波介损法和异频介损法受测试仪器输出电压、电源容量、行波反射等因素限制,在针对高电压(110 kV及以上)、长距离交联聚乙烯电力电缆介损测试时存在一定局限性。本文将从电路角度出发,建立电力电缆介损测试的谐振电路模型,利用串联谐振回路产生介损测试需要的试验电压,并推导出基于谐振特性的电力电缆介损测试功率微分算法,对高电压、长距离交联聚乙烯电力电缆介损测试开展细致深入的研究。

## 1 建立 XPLE 电力电缆介损测试谐振电路模型

### 1.1 绝缘介质的并联电路模型

将 XPLE 电力电缆的绝缘介质以并联电路模型等值<sup>[2-4,19-20]</sup>,以计算实际中产生的介质损耗,如图1所示。其介质损耗因数计算公式为式(1)<sup>[2-4,19-20]</sup>。

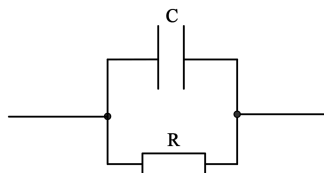


图1 绝缘介质的并联等效电路图

Fig.1 Parallel equivalent circuit diagram of dielectric

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega RC} \quad (1)$$

式(1)中: $\omega=2\pi f$ 为角频率; $R$ 为电力电缆的等值绝缘电阻; $C$ 为电力电缆的等值电容量。

### 1.2 介损测试的谐振电路模型

由 XPLE 电力电缆绝缘介质的并联电路模型,

串联电抗器构成变频串联谐振电路,利用电抗器的感抗补偿电力电缆的容抗,可大幅减小变频电源  $V_{AC}$  的容量,测试电路如图2所示。图2中, $L$ 为电抗器的电感, $r$ 为除电力电缆之外的其他电阻之和,包括电抗器线圈电阻、引线电阻、接头接触电阻等。

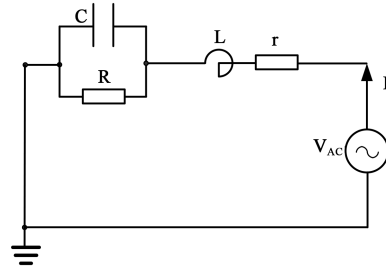


图2 XPLE 电力电缆介损测试的谐振电路图

Fig.2 The resonance circuit diagram of dielectric dissipation factor test for XPLE power cable

### 1.3 谐振电路的介损计算公式

将图1中绝缘介质的并联等效电路模型按阻抗相等原则转换为串联电路,则有式(2)~(3)。

$$C' = \frac{1 + (\omega CR)^2}{\omega^2 CR^2} \quad (2)$$

$$R' = \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $C'$ 为串联电路中电力电缆的等值电容量; $R'$ 为串联电路中电力电缆的等值绝缘电阻。

根据图2的谐振电路,电路电流为 $I$ ,可以计算电路中的有功功率 $P$ 和无功功率 $Q$ ,分别如式(4)和式(5)所示。

$$P = I^2(r + R') = I^2 \left[ r + \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} \right] \quad (4)$$

$$Q = \frac{I^2}{\omega C'} = I^2 \left[ \frac{\omega CR^2}{1 + (\omega CR)^2} \right] \quad (5)$$

利用式(4)和式(5)分别对角频率 $\omega$ 求导,可得式(6)和式(7),从而得出式(8)。

$$\frac{dP}{d\omega} = -\frac{2I^2\omega R^3 C^2}{[1 + (\omega CR)^2]^2} \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{d\omega} = \frac{I^2 R^2 C [1 - (\omega CR)^2]}{[1 + (\omega CR)^2]^2} \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dQ} = \frac{\frac{dP}{d\omega}}{\frac{dQ}{d\omega}} = -\frac{2\omega CR}{1 - (\omega CR)^2} = \frac{2}{\omega CR} \frac{1}{1 - \frac{1}{(\omega CR)^2}} \quad (8)$$

$$= \frac{2 \tan \delta}{1 - (\tan \delta)^2} = \tan 2\delta$$

由式(8)可知,保持串联谐振电路的电流*I*不变的情况下,变换角频率 $\omega$ ,有功功率*P*对无功功率*Q*的微分等于 $\tan 2\delta$ 。

根据式(1)可得,异频下绝缘介质的介质损耗因数与工频下的关系为式(9)。

$$\tan \delta_{50} = \frac{f}{50} \tan \delta \quad (9)$$

式(9)中, $\tan \delta_{50}$ 和 $\tan \delta$ 分别为频率为50 Hz和*f*时的介质损耗因数。

### 1.4 谐振电路的介损计算流程

谐振电路的介损计算流程如图3所示。图3中,在XPLE电力电缆介损测试前,需要计算串联电抗器的电感量*L*。初始化后,变频电源 $V_{AC}$ 输出一较低电压 $U_0$ ,在20~300 Hz内变换频率*f*寻找电路谐振点。发生谐振时,整个谐振电路的功率因数 $\cos \phi = 1$ ,电路中电流*I*最大,可得式(10)~(12)。

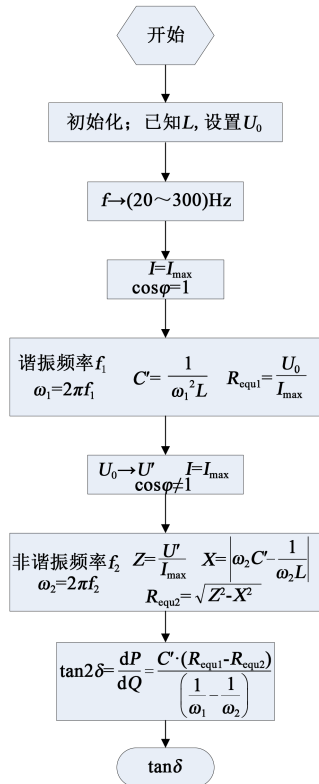


图3 XPLE电力电缆介损测试流程图

Fig.3 The flowchart of dielectric dissipation factor test for XPLE power cable

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (10)$$

$$C' = \frac{1}{\omega_1^2 L} \quad (11)$$

$$R_{equ1} = \frac{U_0}{I_{max}} = R'_1 + r \quad (12)$$

式(10)~(12)中: $\omega_1$ 和*f*<sub>1</sub>分别为谐振角频率和谐振

频率;*C'*为发生谐振时的电路等效电容量; $R_{equ1}$ 为谐振时电路的等效总电阻,包括谐振时电力电缆的等效绝缘电阻*R'*<sub>1</sub>及电抗器线圈电阻、引线电阻、接头接触电阻等电阻之和*r*。

将电路频率*f*略微变化( $\Delta f \leq 0.5\text{Hz}$ ),使电路处于非谐振状态,同时升高变频电源输出电压至*U'*,以保持电路中总电流 $I = I_{max}$ ,此时整个电路的功率因数 $\cos \phi \neq 1$ 。化简式(2)可得式(13)。

$$C' = C + \frac{1}{\omega^2 CR^2} \quad (13)$$

分析式(13)可知,对绝大多数XPLE高压电力电缆(长度 $\geq 100\text{m}$ ,对应等值电容量 $\geq 10\text{nF}$ ),其等值绝缘电阻*R*在10 M $\Omega$ 以上,存在关系式 $(\omega CR)^2 > 1$ ,即 $C \gg \frac{1}{\omega^2 CR^2}$ 。综上所述,变换频率后的非谐振状态下的等值电容量可采用谐振状态下的等值电容量*C'*代替,进行电路参数的计算,如式(14)~(17)所示。

$$\omega_2 = 2\pi f_2 \quad (14)$$

$$Z = \frac{U'}{I_{max}} \quad (15)$$

$$X = \left| \omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C'} \right| \quad (16)$$

$$R_{equ2} = \sqrt{Z^2 - X^2} \quad (17)$$

式(14)~(17)中: $\omega_2$ 和*f*<sub>2</sub>分别为非谐振角频率和非谐振频率;*Z*为非谐振状态下的电路总阻抗;*X*为非谐振状态下的电路总电抗; $R_{equ2}$ 为非谐振状态下的电路等效总电阻。

综上,根据式(8)的介损计算公式,因介质损耗因数 $\tan \delta$ 是只与材料特性有关的物理量<sup>[21]</sup>,故有式(18)。

$$\tan 2\delta = \frac{dP}{dQ} = \frac{\Delta P}{\Delta Q} = \frac{I_{max}^2 \cdot (R_{equ1} - R_{equ2})}{\frac{I_{max}^2}{C'} \cdot \left( \frac{1}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2} \right)} = \frac{C' \cdot (R_{equ1} - R_{equ2})}{\left( \frac{1}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_2} \right)} \quad (18)$$

式(18)即是XPLE电力电缆绝缘介质的介损计算公式。

由式(18)可算出谐振频率*f*<sub>1</sub>下的介损值 $\tan \delta$ ,结合式(9)转换得出工频下的介损值 $\tan \delta_{50}$ 。

## 2 基于谐振特性的XPLE电力电缆介损测试电路仿真验证

### 2.1 建立仿真电路

针对建立的基于谐振特性的XPLE电力电缆介

损测试模型,本研究以电路仿真软件 Multisim 12 为平台进行仿真试验。

以中山长能公司生产的 YJLW02 64/110 1×800 型 110 kV 高压电力电缆为例,电容量为 0.214  $\mu\text{F}/\text{km}$ ,该电缆长度约为 467 m,总电容量约为 0.1  $\mu\text{F}$ 、绝缘电阻约为 100  $\text{M}\Omega$ 。对应选取串联谐振电抗器,测得实际电感量为 82.22 H、电阻为 110  $\Omega$ ,建立仿真电路如图 4 所示。图 4 中,V1 为变频电源、XWM1 为功率因素表、XMM2 为电流表、XMM3 为电压表。

## 2.2 仿真结果及分析

根据图 3 的 XPLE 电力电缆介损测试流程,设置变频电源 V1 输出一较低电压 100 V,在 20~300 Hz 内变换频率寻找电路谐振点,测得谐振频率为 55.505 Hz。发生谐振时,整个电路的功率因数  $\cos\phi=1$ ,电路总电流  $I$  为 845.864 mA,电缆上电压为 24.254 kV。

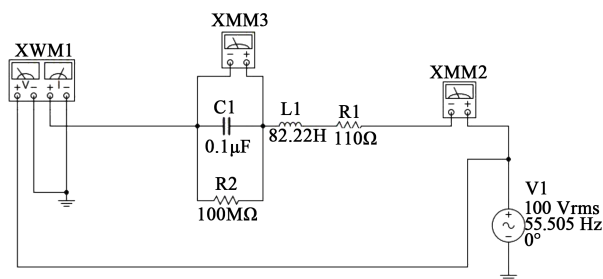


图4 XPLE 电力电缆介损测试仿真电路

Fig.4 The simulation circuit of dielectric dissipation factor test for XPLE power cable

在谐振频率附近微调频率,将变频电源 V1 输出频率分别微调至 55.50 Hz 和 55.51 Hz,同时提高变频电源输出电压,保持电路总电流  $I$  为 845.864 mA 不变,由式(10)~(18)可计算出电力电缆介损值,相关电路参数值如表 1 所示。

表1 电路参数值及误差

Tab.1 The values of circuit parameters and errors

参数	电容 $C'$ / $\mu\text{F}$	等效电阻 $R_{\text{equ1}}$ / $\Omega$	等效电阻 $R_{\text{equ2}}$ (55.50 Hz)/ $\Omega$	等效电阻 $R_{\text{equ2}}$ (55.51 Hz)/ $\Omega$	等效电阻差值 $R_{\text{equ1}}$ - $R_{\text{equ2}}$ (55.50 Hz)/ $\Omega$	等效电阻差值 $R_{\text{equ1}}$ - $R_{\text{equ2}}$ (55.51 Hz)/ $\Omega$	对应 50 Hz 介 损(55.50 Hz)	对应 50 Hz 介 损(55.51 Hz)
实际值	0.1	118.221 97	118.22345	118.220 49	-0.001 48	0.001 48	0.031 9%	0.031 9%
仿真值	0.099 99	118.222 31	118.22369	118.220 75	-0.001 38	0.001 56	0.029 6%	0.0336 %
误差/%	0.01	—	—	—	-6.76	5.41	-7.21	5.33

从表 1 可以看出,电容、等效电阻的仿真值与实际值基本一致,等效电阻差值、介损值的误差均在 10% 以内,将谐振频率两侧介损值做算术平均后误差更小(-0.94%),验证了该电路模型的有效性。

## 3 基于谐振特性的 XPLE 电力电缆介损试验验证

为了验证基于谐振特性的 XPLE 电力电缆介损测试方法的有效性,本文对前述 YJLW02 64/110 1×800 型 110 kV 高压电力电缆进行现场介损试验,如图 5 所示。

试验中,采用的高精度变频电源在交流电压为 0~450 V 内连续可调,频率为 20~300 Hz 连续可调,同时测量输出电流。选取串联谐振电抗器,测得实际电感量为 82.22 H、电阻为 110  $\Omega$ 。采用电容分压器测量被试电缆上施加的试验电压。

试验时,首先设定变频电源输出电压为 100 V,调节电源频率寻找电路谐振点  $f=55.17$  Hz,此时电



图5 XPLE 电力电缆介损试验

Fig.5 Dielectric dissipation factor test for XPLE power cable

路总电流  $I$  为 832.46 mA,电缆上电压约为 23.7 kV。随后微调电源输出频率,分别微调至 55.16 Hz 和 55.18 Hz,同时提高变频电源输出电压,保持电路总电流大小不变,依据式(10)~(18)计算电力电缆介损值。

另外,采用外接工频高压试验变压器和高压标准电容器,搭配济南泛华 AI-6000M 型介损测试仪,

外施高电压(23.7 kV)进行介损对比测试,相关试验结果如表2所示。从表2可以看出,谐振特性法与常规工频介损测试的正接法、反接法相比,测得被试XPLE电力电缆的电容量和介损值均接近,容量偏差在1%左右,介损值偏差在10%内。谐振特性法能消除试验引线、接头接触电阻的影响,在一定程度上提升介损测试的精度。

表2 不同介损测试方法试验结果

Tab.2 The results of diverse dielectric dissipation factor test methods

介损测试法	电容/nF	介质损耗因数/%
谐振特性法(23.7 kV)	101.218	0.031 3
工频介损测试法(反接法)(23.7 kV)	102.56	0.034 3
工频介损测试法(正接法)(23.7 kV)	101.78	0.032 8
与反接法对比偏差	-1.30%	-8.75
与正接法对比偏差	-0.55%	-4.57

结合高压电力电缆串联谐振交流耐压试验,采集升压及降压阶段的电压、电流和频率,可同步获得电缆交流耐压试验前后绝缘介质的状态,测试结果如表3所示。由表3可见,介损随测试电压升高呈逐步增大的趋势,相同电压下升压、降压阶段对应的介损值基本一致。

表3 不同测试电压下介损试验结果

Tab.3 The test results of dielectric dissipation factor under different test voltages

测试电压/kV	介损值/%	
	升压阶段	降压阶段
10.0	0.031 1	0.031 0
23.7	0.031 3	0.031 3
40.5	0.031 5	0.031 6
52.0	0.031 8	0.031 7
63.5	0.032 3	0.032 2
72.7	0.032 8	0.032 7

## 4 结论

本文根据XPLE高压电缆串联谐振耐压试验电路,结合绝缘介质的并联等效电路模型,建立基于谐振特性的XPLE高压电缆介损测试电路,并推衍

出基于谐振特性的功率微分介损算法,解决目前110 kV及以上高电压、长距离XPLE电力电缆的介损测试难题。利用高压电力电缆串联谐振耐压试验时,在升降压阶段采集电压、电流、频率等电路参数即可完成介损测试。

针对110 kV高压电力电缆,仿真结果表明:通过测量变频电源输出的电压、电流和频率,仿真计算值能较准确地反映电容、电阻等电气参数,介质损耗因数换算至50 Hz下时与实际值相一致。现场试验结果表明:基于谐振特性的介损测试法,测试结果与正接法、反接法试验结果相吻合,谐振特性法能消除引线电阻、接触电阻等电路固有电阻的影响,在一定程度上提升介损测试的精度。结合高压电力电缆串联谐振交流耐压试验,可同步获得电缆交流耐压试验前后绝缘介质的状态,为准确评估交流耐压前后绝缘介质的性能提供参考。

## 参考文献:

- [1] JAROSLAV L, VLADIMIR D, JURAJ P, et al. Diagnostics of medium voltage PVC cables by dissipation factor measurement at very low frequency[C]//Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, USA: IEEE,2002:79-82.
- [2] 徐小龙,李波,卢雨欣,等.振荡波电压作用下的电缆介质损耗测量方法[J]. 电力工程技术,2021,40(4):142-148.
- [3] PERKEL J, DEL VALLE Y, HAMPTON R, et al. Interpretation of dielectric loss data on service aged polyethylene based power cable systems using VLF test methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(5):1699-1711.
- [4] MORSALIN S, PHUNG B. A comparative study of dielectric dissipation factor measurement under very low and power frequencies[C]//2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, Rupnagar, India: IEEE, 2017:10-14.
- [5] KIM D, CHO Y, KIM S. A study on three dimensional assessment of the aging condition of polymeric medium voltage cables applying very low frequency (VLF)  $\tan\delta$  diagnostic[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(3): 940-947.
- [6] CHRISTIAN F, IVANA M, CHRISTIAN W. An interpretation approach for in field measured dissipation factor values of MV cable lines[C]//2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy:IEEE,2013:96-99.
- [7] HERNANDEZ J, HARLEY R, HAMPTON N, et al. Characterization of ageing for MV power cables using low frequency  $\tan\delta$  diagnostic measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009,16(3):862-870.
- [8] YE Gang, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on the dielectric re-

- sponse characteristic of XLPE cables[C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen, China:IEEE,2013:81-84.
- [9] HERNANDEZ J, PERKEL J, HARLEY R, et al. Correlation between  $\tan\delta$  diagnostic measurements and breakdown performance at VLF for MV XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009,16(1):162-170.
- [10] YANG Fan, FENG Xiang, RUAN Ling, et al. Research on the diagnosis of MV power cable insulation based on PD and VLF- $\tan\delta$ [C]//2014 2nd International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2014:123-127.
- [11] 罗阳帆,周凯,李康乐,等. 基于电缆绝缘寿命扩展技术的现场退运电缆修复效果研究[J]. 绝缘材料,2021,54(5):54-60.
- [12] 黄科荣,周凯,黄明,等. 水树老化电缆的超低频介损不对称现象研究[J]. 绝缘材料,2018,51(9):36-40.
- [13] 钟立华,马赛,马壮. XLPE 电缆绝缘介质损耗角正切测试方法的探讨[J]. 电线电缆,2006(5):7.
- [14] 罗俊华,马翠姣,邱毓昌,等. 35kV 及以下 XLPE 电力电缆试验方法的研究[J]. 电网技术,2000,24(12):58-61.
- [15] 袁野,陈剑,贾志东,等. 10kV XLPE 电缆受潮绝缘特性研究[J]. 电网技术,2014,38(10):2875-2880.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘曦,濮峻嵩,冯运,等. 大电容高压电气设备介质损耗测量装置的研制与应用[J]. 高压电器,2012,48(10):17-21.
- [19] NOURUDDEEN B, HUSSEIN A, MOHD S. Ageing studies on transmission line glass insulators using dielectric dissipation factor test[C]//2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore, Singapore:IEEE,2010:1062-1066.
- [20] 温和,滕召胜,曾博,等. 基于三角自卷积窗的介损角测量算法及应用[J]. 电工技术学报,2010,25(7):192-198.
- [21] 陈化钢,程林,吴旭涛. 电力设备预防性试验方法及诊断技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2017:66.