

# 基于频域反射法的受潮 10 kV 冷缩电缆 中间接头阻抗特性研究

李巍巍, 刘畅, 张华, 罗洋, 宁鑫, 吴驰

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**冷缩电缆中间接头受潮是造成其故障的重要原因之一。现有研究已表明,存在受潮缺陷的冷缩电缆中间接头阻抗特性会发生变化,通过频域反射法对整根电缆的阻抗不连续点进行检测,分析其阻抗特性可实现缺陷的定位与类型的判断。因此,开展受潮冷缩电缆中间接头阻抗特性的研究,可为电缆中间接头的受潮诊断提供理论依据与数据支撑。为此,对一根 10 kV 冷缩电缆中间接头样本开展加速受潮实验,采用反射系数谱测试仪定期检测其阻抗特性并进行研究。实验结果表明:随着受潮程度的增加,冷缩电缆中间接头阻抗不匹配峰幅值呈先减小后增大的趋势;对其时域反射波形进行恢复后发现,其时域波形的极性特征呈从“左正右负”到“左右持平”再到“左负右正”的变化情况。

**关键词:**冷缩电缆中间接头;受潮缺陷;阻抗特性;时域反射特征

**中图分类号:**TM 93 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)02-0039-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20240207

## Research on Impedance Characteristics of Moistened 10 kV Cold-shrinkable Cable Intermediate Joints Based on Frequency Domain Reflection

LI Weiwei, LIU Chang, ZHANG Hua, LUO Yang, NING Xin, WU Chi

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Damping of intermediate joints of cold-shrinkable cable is one of the important reasons for its failures. The existing researches have shown that the impedance characteristics of intermediate joints of cold-shrinkable cable with damp defects will change. The impedance of whole cable can be detected by frequency domain reflection method, and after the analysis of its impedance characteristics, the defect can be located and the defect type can be determined. Therefore, conducting the research on impedance characteristics of intermediate joints of moistened cold-shrinkable cable can provide theoretical and data support for the diagnosis of moisture in cable intermediate joint. The accelerated moisture experiments on intermediate joint sample of a 10 kV cold-shrinkable cable is carried out, and then a reflection coefficient spectrum detection device is used to regularly detect and research its impedance characteristics. The experiment results show that as the degree of moisture increases, the reflection coefficient of cable intermediate joint shows a trend of first decreasing and then increasing. After restoring its time-domain waveform, it is found that its characteristics develop and change from "left positive and right negative" to "left and right balance" and then to "left negative and right positive".

**Key words:** cold-shrinkable cable joints; moisture defect; impedance characteristic; time domain reflection characteristic

## 0 引言

电缆中间接头是电缆绝缘的薄弱环节,电缆附件绝缘失效是引发电力系统故障的主要原因<sup>[1]</sup>。

**基金项目:**国网四川省电力公司科技项目(52199722000G)

由于中国南方夏季阴雨天气频繁,电缆长期运行于潮湿的环境中,外加还受到温度、机械等其他应力的影响,复合界面(硅橡胶与交联聚乙烯)处空腔会因为界面压力的变化而增多,进而加速水分的入侵导致电缆中间接头受潮,严重时甚至导致界面处的闪络<sup>[2]</sup>。因此,了解电缆中间接头受潮特性,开展针

对受潮缺陷检测与识别方法的研究,将有利于运维人员及时采取相应的措施以确保电缆系统的稳定运行<sup>[3-4]</sup>。

传统的绝缘受潮诊断方法包括绝缘电阻评估法和介质损耗因数评估法,但这两种方法均只适用于对电力设备整体绝缘的评估,而对于电缆这种长分布的电力设备,受潮的发生往往只是出现在局部区域,通过这两种方法无法诊断出电缆局部的受潮缺陷<sup>[5-6]</sup>。所以,针对电缆受潮的定位与诊断的问题,目前主流的方法是采用基于传输线理论的时域反射法(time domain reflectometry, TDR)<sup>[7]</sup>与频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)<sup>[8-9]</sup>。传统的 TDR 方法注入信号的带宽相对较窄,且存在注入信号频率选取困难的问题。如果信号频率选取过高,信号容易在长距离传播中发生衰减以致无法被检测;但如果信号频率选取过低,信号在电缆中多次折反射可能导致信号波形的混叠,波形间的时间差无法被准确计算。因此 TDR 方法难以对轻微的受潮缺陷进行定位。FDR 方法则是向电缆中注入连续的扫频信号,对电缆中阻抗不连续的局部区域反应更加灵敏,因此如今被广泛地应用于电缆的缺陷定位与诊断领域<sup>[10-11]</sup>。文献[8]以 FDR 定位谱中阻抗不匹配峰的幅值作为热缩电缆中间接头受潮判别的依据,幅值越大受潮程度越严重;但阻抗不匹配峰并不一定都是由受潮缺陷所造成的,其他类型的缺陷也有可能出现较大的阻抗不匹配峰,因此不能直接以阻抗不匹配峰幅值的大小作为受潮缺陷诊断的依据。文献[12]提出了一种基于时频域转换法的电缆中间接头受潮诊断方法,根据时域波形的极性和受潮缺陷进行诊断;但并未开展受潮的连续发展对阻抗特征影响的研究,且所提出的正常接头与轻微受潮的时域波形判据区分度较小,在实际测试中难以作为电缆中间接头受潮判别的依据。

综上所述,为了给 10 kV 冷缩电缆中间接头的受潮诊断提供更完整的理论依据与数据支撑,开展了针对不同受潮阶段电缆中间接头阻抗特性的研究。首先,制作真实电缆样本;然后,开展冷缩电缆中间接头加速受潮实验,定期通过反射系数谱测试仪对电缆中间接头的阻抗状态进行检测,并采用时域恢复法对频域信号进行处理,观察阻抗不匹配峰值与时域波形的变化情况。

## 1 实验设置

### 1.1 加速受潮实验

在现场条件,正常制作的冷缩中间接头具有较强的防水能力,水分入侵是一个较为缓慢的过程。而实际敷设电缆的沟道中常常出现积水较多的情况,接头外侧面面临较高的水压,且电缆长期工作于高温环境下。因此对制作的中间接头样本采取了通流加热与增加外部水压的方式进行加速受潮实验,实验平台如图 1 所示。

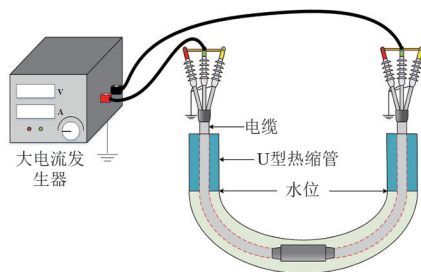


图 1 “U”型电缆加速受潮老化平台

图 1 中,电缆型号为 YJLV-8.7/10 kV-3×240 mm<sup>2</sup>,长 28 m,所用冷缩电缆中间接头采购于国内某主流电缆附件生产厂家,型号为 JLS-8.7/10 kV-3×240 mm<sup>2</sup>。平台搭建时,将样本两侧向中间弯曲,在保证接头部分水平的情况下将样本弯曲呈“U”型并固定;在接头外侧套入大口径热缩管,保证与电缆本体、冷缩接头留有足够空隙充水分;向热缩管内加入自来水至一定的水面高度(实验时水面高度为 1 m),保证底部接头处承受一定水压;使用热风枪将热缩管 U 型两端缩小至最小半径,并在外侧使用铁丝扎紧,防止水分挥发导致管内水面大幅度下降。

老化过程中,对各相缆芯施加 435 A 电流,并且为了模拟实际电缆线路负荷变化对附件的影响,参照 GB/T 18889—2002《额定电压 6 kV( $U_m = 7.2$  kV)到 35 kV( $U_m = 40.5$  kV)电力电缆附件试验方法》对整体回路施加热循环试验。具体方法为:在回路中通以额定电流加热导体,直到导体达到稳定温度 95 ℃(采用手持式红外远距离测温仪监测)。通流总时间为 4 h,让导体温度保持稳定 3 h,随后断开电流 4 h 自然冷却至与环境温度相差不超 10 ℃;一天进行 2 次热循环实验,持续 8 周时间。

### 1.2 基于反射系数谱的电缆阻抗不匹配点定位原理

根据传输线理论,在电缆长度较长或者测试频

率较高时,需要采用分布参数模型对电缆进行表示如图2所示,所用参数包含电缆单位长度电阻 $R_0$ 、电感 $L_0$ 、电导 $G_0$ 和电容 $C_0$ <sup>[13]</sup>。

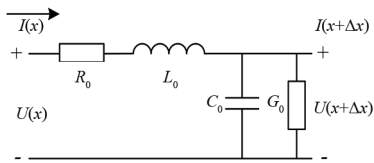


图2 电缆分布参数模型

假设电缆总长为 $l$ ,距离电缆首端 $x$ 处的电压 $U(x)$ 、电流 $I(x)$ 状态可由基尔霍夫电压定律与基尔霍夫电流定律列出。

$$\begin{cases} U(x) = U^+ e^{\gamma(l-x)} + U^- e^{-\gamma(l-x)} \\ I(x) = (U^+ e^{\gamma(l-x)} - U^- e^{-\gamma(l-x)})/Z_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U^+$ 、 $U^-$ 分别为电缆中正向电压与反向电压; $Z_0$ 、 $\gamma$ 分别为电缆的特性阻抗与传播系数。由式(1)可以看出,任意位置的电压可由测试首端至电缆末端方向传播的正向信号与电缆末端至测试首端方向传播的反向信号组成。 $Z_0$ 、 $\gamma$ 是电磁波在电缆中传播的固有特性与变化特性,其表达式可分别由式(2)和式(3)得出。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \\ \beta = \frac{\omega}{v} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为衰减常数,表征电缆单位长度的信号幅值衰减特性; $\beta$ 为相位常数,表征电缆单位长度的信号相位滞后特性; $v$ 为电磁波在电缆中的传播速度。

由式(2)可看出,在高频条件下, $\omega L_0 \gg R_0$ 、 $\omega C_0 \gg G_0$ , $Z_0$ 的值由 $L_0$ 、 $C_0$ 决定,且近似为常数,即可由式(2)推导得到式(4)。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (4)$$

根据式(1)推导距离电缆首端 $x$ 处的反射系数可表示为

$$\Gamma(x) = \frac{U^-}{U^+} e^{-2\gamma(l-x)} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma(l-x)} \quad (5)$$

式中, $Z_L$ 为负载阻抗。当电缆末端开路时( $Z_L = \infty$ ),电缆首端( $x=0$ )可测得的反射系数表示为

$$\Gamma_0 = e^{-2\gamma(l)} = e^{-2\alpha(l)} e^{-j2\beta(l)} \quad (6)$$

通过欧拉公式对式(6)进行展开。

$$\Gamma_0 = e^{-2\alpha(l)} \left[ \cos\left(2\frac{2\pi f}{v}l\right) - j\sin\left(2\frac{2\pi f}{v}l\right) \right] \quad (7)$$

对式(7)取实部得

$$\text{Re}(\Gamma_0) = e^{-2\alpha(l)} \cos\left(2\frac{2\pi f}{v}l\right) \quad (8)$$

式(8)中,将频率 $f$ 看做自变量,首端反射系数实部存在有 $2l/v$ 的等效频率分量 $f_l$ ,其值等效为入射信号从电缆首端至电缆末端往返的传播时间。同理,如果电缆中出现阻抗不连续段时,如图3所示,首端反射系数的实部中会出现类似如式(8)的频率分量 $f_d$ ,即 $f_d = 2d/v$ , $d$ 为阻抗不连续段距离首端的长度。

因此,对于电缆阻抗不连续段的定位问题就可转换为对频率 $f_d$ 的估计问题。对测试得到的反射系数谱的实部进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)可以获取其中的等效频率成分 $f_d$ ,进而得到缺陷点对应的位置。

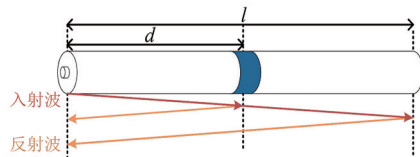


图3 含阻抗不连续点的电缆中波的传输

### 1.3 基于反射系数谱的电缆阻抗不匹配点检测方式

测试时,通过分叉线将反射系数谱测试仪与被测电缆进行连接,反射系数谱测试仪的输出端接于被测电缆缆芯,外壳与被测电缆的金属屏蔽层相接,根据所制样本的长度,测试信号频率范围设置为0.15~100 MHz,测试点数设置为3000点,测试接线如图4所示。

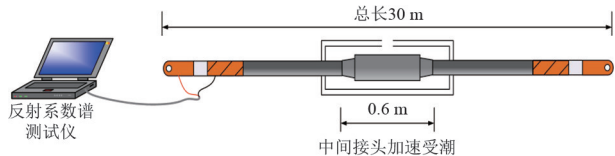


图4 含接头电缆中波的传输

测试所用分叉线的阻抗与电缆本体阻抗有明显的差异,因此在分叉线与电缆终端连接处会存在阻抗不匹配点,信号在此处会发生折反射从而影响信号的注入效率。然而,由于软质的分叉线在垂放时具有随机性导致分叉线的阻抗不为定值,因此该连接处的信号折返系数也有所不同,进而导致对同一根电缆的测试结果出现差异。

因此,为了避免分叉线的随机垂放对测试结果的影响,提高实验数据的可比性,每次测试时分叉线

的垂直姿态应尽可能保持一致。为此,采用了一种“圆规”式的夹具。圆规的两个支腿与分叉线的长度相等,通过胶带分别将两根分叉线固定于两支腿上,如图 5 所示。每次测试时通过控制圆规夹具的角度来控制分叉线的摆放位置,进而固定分叉线对测试结果影响。

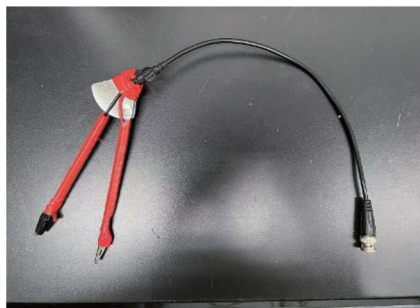


图 5 “圆规”式测试夹具

## 2 受潮冷缩电缆中间接头阻抗特性特性

### 2.1 冷缩中间接头受潮阻抗不匹配峰幅值变化特性

受潮各阶段接头样本 FDR 定位谱图如图 6 所示,由于中间接头本身与电缆本体阻抗并不匹配,因此在接头位置将产生明显的定位峰值,该峰值体现了接头阻抗与本体阻抗不匹配程度。

图 6 中,接头测得位置为 16 m 左右,且随着受潮时间的增加,接头处 FDR 峰值不断变化,为了便于观察,将该峰值变化情况进行统计,结果如图 7 所示。

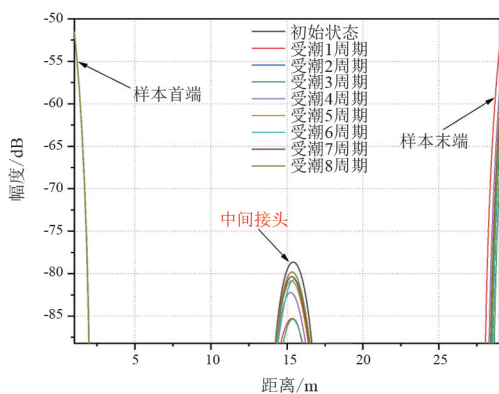


图 6 不同受潮时间接头 FDR 测试结果

从图 7 中可以看出,随着受潮周期数的增加,电缆中间接头处的阻抗不匹配峰的幅值呈现出先减小后增大的趋势。

这是由于 10 kV 冷缩电缆中间接头与电缆本体存在结构上的差异,其特性阻抗值在未受潮的状态

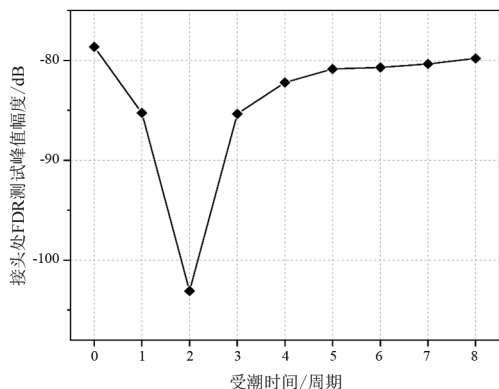


图 7 接头受潮过程 FDR 峰值

下便与电缆本体的特性阻抗有所不同,并且根据文献[12]中的电容测试结果,10 kV 冷缩电缆中间接头在未受潮时的电容要小于相同长度电缆的本体电容,所以在该初始状态下也会出现阻抗不匹配峰。

随着水分的入侵,电缆中间接头的电容值增大,根据式(4),受潮位置的阻抗减小。当受潮发展到第 1 个周期与第 2 个周期时,电缆中间接头的电容值与电缆本体的电容值差距缩小,阻抗不匹配程度减小,所以导致电缆中间接头处的阻抗不匹配峰的幅值也减小。

在受潮发展到第 3 个周期及以后,随着受潮程度进一步的加深,电缆中间接头的电容超过电缆本体的单位电容,相较于受潮发展到第 2 个周期的时候,中间接头处的阻抗不连续程度增加,进而导致电缆中间接头处的阻抗不匹配峰的幅值增大。但由于短期老化所导致的界面压力变化有限,界面处的空腔所能吸附的水分在该受潮老化实验中会趋于饱和,因此在受潮进行到第 6 周期后,电缆中间接头处的阻抗不匹配峰幅值的变化逐渐趋于平缓。

根据以上分析结果来看,冷缩电缆中间接头界面受潮导致的阻抗不匹配峰幅值变化并非单调,而是呈现出先减小后增大的趋势。但由于现场测试容易受到测试夹具与环境噪声的影响,每次测试的结果可能出现不同,进而导致阻抗不匹配峰幅值变化不能单一归结于缺陷点阻抗的变化,因此仅依靠接头不匹配峰的幅值大小变化很难做出对冷缩电缆中间接头受潮程度的准确判断。

### 2.2 基于恢复时域波形的冷缩电缆中间接头受潮阻抗特性

参考文献[12]中时域特征波形恢复技术,根据 FDR 测试结果,引入一个虚拟的时域入射波形  $s(t)$ ,然后计算得到虚拟的时域反射波形  $y(t)$ ,根据  $y(t)$

在电缆中间接头处的极性变化来对受潮的情况进行评估,计算方法为

$$y(t) = \text{IFFT}(\text{FFT}(s(t)) \Gamma) \quad (9)$$

式中:FFT 为快速傅里叶变换;IFFT 为逆快速傅里叶变换。

样本初始状态,受潮 1 个周期,受潮 2 个周期,受潮 3 个周期以及受潮 7 个周期冷缩电缆中间接头处的时域恢复波形如图 8 所示。

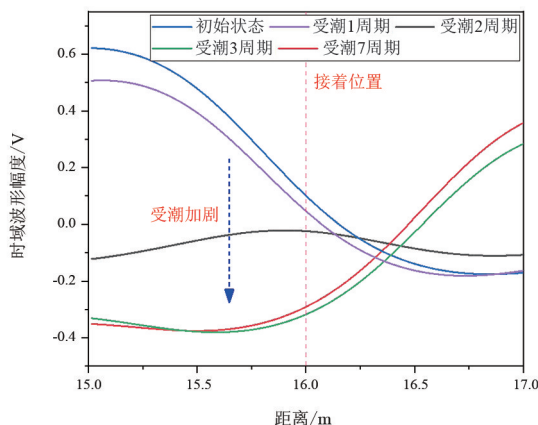


图 8 不同受潮时间接头处时域波形

由于实际接头具有一定长度,因此接头位置两侧呈现不同极性的时域波形。在初始状态与受潮一个周期时,冷缩中间接头电容小于本体电容,因此接头阻抗  $Z_j$  则大于本体阻抗  $Z_0$ ,根据接头处反射系数的计算式  $\rho_j = (Z_j - Z_0) / (Z_j + Z_0)$ ,  $\rho_j$  大于 0,注入信号在接头位置处发生正反射,左侧波形极性为正,右侧波形为负,即“左正右负”。

受潮 2 个周期后,接头电容逐渐增加,阻抗逐渐减小,并接近于本体阻抗,  $\rho_j$  趋近于 0,因此此时的时域波形在接头处的极性趋于一致,即“左右持平”。

到受潮第 3 个周期时,界面水分继续扩散导致接头电容继续增加并超过电缆本体电容,接头阻抗  $Z_j$  明显小于本体阻抗  $Z_0$ ,  $\rho_j$  小于 0,此时注入信号在接头位置处发生负反射,左侧时域波形极性变化为负,右侧变化为正,即“左负右正”,该现象与未受潮时存在本质上的不同。并且随着受潮的进一步发展,在发展到第 7 个受潮周期后,冷缩电缆中间接头处的时域波形仍保持为“左负右正”。

综上所述,在整个冷缩接头复合界面受潮过程中,由于接头处的阻抗与电缆的特性阻抗呈现先小于,再趋近,最后大于的变化关系,因此接头处时域波形呈现出由“左正右负”到“左右持平”再到“左负右正”的变化趋势。显然,若以“左负右正”作为受潮的判据,那么此时的受潮已处于较严重的状态,对

于长期处于浸水状态的中间接头应定期对其阻抗特性进行检测,关注接头处的阻抗不匹配峰的峰值与时域波形的极性变化,一旦发现峰值的下降与时域波形极性的减弱便可认为该处中间接头已处于受潮状态,进而应加强对其的监测或采取一些必要的措施。

### 3 结 论

为了给 10 kV 冷缩电缆中间接头的受潮诊断提供完善的理论与数据支撑,上面对真实电缆附件样本开展了加速受潮实验,并采用反射系数谱检测装置对其定期检测,研究了其各阶段的阻抗特性,结论如下:

1) 10 kV 冷缩电缆中间接头处阻抗不匹配峰的幅值随受潮程度的增加呈现出先减小后增大的趋势;

2) 10 kV 冷缩电缆中间接头阻抗不匹配峰处对应的时域波形随受潮程度的增加呈现出由“左正右负”到“左右持平”再到“左负右正”的变化趋势;

3) 对于长期处于浸水状态的 10 kV 冷缩中间接头应定期对其阻抗特性进行检测,一旦发现峰值的下降与时域波形极性的减弱便可认为该处中间接头已处于受潮状态,进而加强对该中间接头的观测或采取必要的措施。

#### 参考文献

- [1] 吴明祥, 欧阳本红, 李文杰. 交联电缆常见故障及原因分析[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 66-70.
- [2] 王子康, 周凯, 朱光亚, 等. 冷热循环单周期内电缆附件 XLPE-SiR 界面局部放电演变特性研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-10 [2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220525.1805.004.html>.
- [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与展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [4] International Electrotechnical Commission. High-voltage test techniques: partial discharge measurements; IEC 60270 [S]. Geneva, Switzerland; International Electrotechnical Commission, 2015.
- [5] 李伟, 吴麟琳, 张幸, 等. 交联聚乙烯电缆的老化及其诊断方法研究进展[J]. 绝缘材料, 2016, 49(11): 36-44.
- [6] 罗俊华, 马翠姣, 邱毓昌, 等. 35 kV 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.

- [7] 杨帆, 曾莼, 阮羚, 等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 1-5.
- [8] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于频域反射法的 10 kV 配电电缆中间接头受潮定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 825-832.
- [9] 徐兴全, 桂媛, 姚玉海, 等. 基于 Nuttall 自卷积窗的 10 kV 配电电缆中间接头定位改进方法[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 26-32.
- [10] OHKI Y T, YAMADA T, HIRAI N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy[C]. 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2011:24-27.
- [11] NOROUZI Y, BRAUN S, Frohne C, et al. Effect of cable joints on frequency domain analysis [C]. 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), IEEE, 2018:288-292.
- [12] 王子健, 周凯, 朱光亚, 等. 基于时频域转换法的配电网电缆冷缩中间接头受潮诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2178-2186.
- [13] CLAYTON R P. Analysis of Multiconductor Transmission Lines [M]. Hoboken: Wiley, 1994.

#### 作者简介:

李巍巍(1984),女,博士,高级工程师,研究方向为电气设备状态监测评估、电力电缆击穿、老化及故障诊断技术。

(收稿日期:2023-07-12)

(上接第 10 页)

所有非线性状态(包括触发角、换相重叠角、直流侧电流和相电压)线性化,以推导出 LCC 在  $dq$  坐标系下的阻抗模型,提高了建模的准确性。

#### 参考文献

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
- [2] 佚名.《能源发展“十三五”规划》介绍(二)[J]. 能源与节能, 2017(7): 1.
- [3] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 97-104.
- [4] HAMMAD A E. Analysis of second harmonic instability for the Chateaugay HVDC/SVC scheme [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 410-415.
- [5] 贺永杰, 向往, 赵静波, 等. 一种用于 LCC-HVDC 系统小干扰稳定性分析的改进动态相量模型[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1417-1428.
- [6] PERSSON E V. Calculation of transfer functions in grid-controlled converter systems. With special reference to h.v. d.c. transmissions [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1970, 117(5): 989-997.
- [7] OSAUSKAS C M, HUME D J, WOOD A R. Small signal frequency domain model of an HVDC converter[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(6): 573-578.
- [8] OSAUSKAS C M, WOOD A R. Small-signal dynamic modeling of HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 220-225.
- [9] DETOLEDO P F, ANGAUIST L, NEE H P. Frequency domain model of an HVDC link with a line-commutated current-source converter. Part 1: fixed overlap [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(8): 757-770.
- [10] QI Yi, ZHAO Huanfeng, FAN Shengtao, et al. Small signal frequency-domain model of a LCC-HVDC converter based on an infinite series-converter approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 95-106.
- [11] 李至峪. 考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号建模方法研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [12] 曾靖茹. 电流互感器在线校验系统的信号处理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [13] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [14] CHEN X, MA J P, WANG S L, et al. An accurate impedance model of line commutated converter with variable commutation overlap [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 562-572.
- [15] 徐龙. 锁相环动态影响交直流系统小干扰稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019
- [16] 宋鹏程. 高压柔性直流换流系统建模方法及传导电磁干扰特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [17] 鲁晓军. 柔性直流电网小信号建模及稳定性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [18] WANG X F, HARNEFORS L, BLAABJERG F. A unified impedance model of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(2): 1775-1787.

#### 作者简介:

张纯(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网控制与保护;

李小鹏(1987),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统保护与控制;

戚清儿(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力电子技术;

王顺亮(1987),男,博士,副教授,博士研究生导师,研究方向为直流输电与电力电子。

(收稿日期:2023-08-14)