

# 采用频域介电谱法的 高压干式套管屏间局部绝缘劣化诊断

陈铭<sup>1</sup>, 刘轩东<sup>1</sup>, 李原<sup>1</sup>, 吴治诚<sup>1</sup>, 汤浩<sup>2</sup>, 李金忠<sup>2</sup>

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

## Local Inter-Foil Insulation Deterioration Diagnosis of RIP Bushing Based on Frequency-Domain Dielectric Spectroscopy Method

CHEN Ming<sup>1</sup>, LIU Xuandong<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, WU Zhicheng<sup>1</sup>, TANG Hao<sup>2</sup>, LI Jinzhong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),  
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Resin impregnated paper (RIP) bushing is an important component of transformer, and its failure caused by local inter-foil insulation deterioration may result in phase-to-ground fault or high energy explosion, seriously threatening safe operation of substation. To carry out further study of the phenomena of local inter-foil insulation deterioration of RIP bushing, a multilayer model of epoxy impregnated paper samples is established with different parallel resistors for indicating severity of insulation deterioration. Then a diagnosis method based on frequency-domain dielectric spectroscopy (FDS) is proposed and investigated under room temperature. Results indicate that, with deterioration of local inter-foil insulation, its  $C-f$  and  $\tan\delta-f$  curves have obvious transition process. In early stage of local insulation deterioration, detection method of power frequency is less effective. However, validity of FDS method shows better result. In addition, CIGRE bushing model is modified for rapid descending section of high frequency band of  $\tan\delta-f$  curve. The calculated results with the modified model are in good agreement with experimental results.

**KEY WORDS:** frequency-domain dielectric spectroscopy; RIP bushing; local inter-foil insulation deterioration; insulation diagnosis; modified model

**摘要:** 干式套管作为变压器的重要组成部分,屏间局部绝缘劣化时有发生,严重威胁变电站的安全运行。为进一步研究干式套管屏间局部绝缘劣化的现象,构建了实验模型,通过并联电阻的方式模拟了屏间局部绝缘劣化的现象,并基于频域介电谱(frequency-domain dielectric spectroscopy, FDS)

对其在室温下进行了相应的诊断。结果表明,随着屏间局部绝缘劣化的发展,套管电容和介质损耗因素的频响曲线存在明显的过渡过程,在绝缘劣化发生的早期,工频检测方法有效性较低,而 FDS 的有效性则较高,且测量频率越低,对屏间局部绝缘劣化早期缺陷的检出效果越好。此外针对  $\tan\delta-f$  曲线中出现的快速下降段,修正了 CIGRE 套管模型,计算结果与实验结果一致性较好。

**关键词:** 频域介电谱;干式套管;屏间局部绝缘劣化;绝缘诊断;模型修正

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0029

## 0 引言

干式套管由于工艺缺陷或实际运行过程中电、热、机械耦合场的作用,电容屏间的环氧浸纸材料易发生局部放电,进而引起局部绝缘劣化<sup>[1-4]</sup>。随着局部放电的进一步发展,绝缘材料劣化的程度不断加深,绝缘材料中易出现高导电的通道<sup>[5]</sup>,进而引发干式套管芯体电容屏间击穿事故,严重影响变电站的安全稳定运行。因此,研究能应用于干式套管屏间绝缘劣化初期的检测方法,对于干式套管绝缘现场检测和状态评估都具有重要意义。

电力设备的寿命主要取决于绝缘纸等固体绝缘材料的寿命<sup>[6]</sup>,但对于现场而言,目前尚没有绝对理想的、能准确有效的评估干式套管固体绝缘状态的方法。目前,主要通过离线测量主绝缘和末屏的绝缘电阻、工频介损和电容量,通过油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)以及局放检测<sup>[7-8]</sup>等方式对干式套管进行绝缘诊断。实际应用中绝缘电阻、工频介损和电容量受离线测量的限制不

基金项目: 国家电网公司科技项目(GYB17201600207)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (GYB17201600207).

能很好地反映绝缘缓慢老化或轻微受潮等情况，DGA 方法为测量升高座处油中溶解的特征气体，测量方式灵敏，然而干式套管屏间局部绝缘劣化发生在芯体内部，缺陷被环氧包覆，难以对油中溶解气体产生影响，且故障气体的分析受设备运行条件、换油滤油等因素的影响，局放测量易受电晕放电、空间电场的干扰，因此亟需引入一种针对干式套管屏间绝缘劣化，具有抗干扰能力强的、适用于现场的绝缘诊断方法对传统测量方法予以有效补足。

近年来，频域介电谱(frequency-domain dielectric spectroscopy, FDS)法作为一种无损检测方法，具有抗干扰能力强、包含信息丰富等优势，被广泛应用于绝缘材料极化过程、电力设备受潮、老化等方面的检测<sup>[9-12]</sup>。也有少量针对套管屏间局部绝缘劣化的诊断研究，相关研究小组根据现有测量方式所存在的问题，提出了一种基于 FDS 法的油浸纸(oil-impregnated paper bushing, OIP)套管的屏间局部绝缘劣化诊断方法，获取了不同屏间劣化状态下 OIP 套管的频响曲线<sup>[13]</sup>，并基于 CIGRE 提出的套管模型<sup>[14]</sup>对曲线给予了初步解释。但该方法针对的是 OIP 套管，干式套管的材料与之存在明显不同，该方法是否能直接应用与干式套管屏间局部绝缘劣化的诊断还不明确，并且该方法采用 CIGRE 模型仿真得到的介损-频率( $\tan\delta-f$ )曲线与实验结果存在明显差异，尤其对其中的过渡过程缺乏研究。

因此，为进一步确定将 FDS 法运用于干式套管屏间局部绝缘劣化的诊断的可行性，提升对于干式套管屏间局部绝缘劣化初期现场试验的有效性。本文根据上述方法及相关文献对 FDS 法运用于干式套管屏间局部绝缘劣化诊断进行研究，获取了不同屏间劣化情况下的干式套管频响特性曲线，提取了相应的绝缘特征量，并修正了 CIGRE 套管模型。

## 1 FDS 分析试验原理

在电容器两端加上时变电压  $U(t)$ ，两极板间将产生电场  $E(t)$ 。可得到电极两端产生的电位移  $D(t)$  为无相位偏差和带相位延后响应之和<sup>[15-16]</sup>：

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_0 E(t)$  为真空的即时贡献； $\varepsilon_0$  为真空介电常数； $P(t)$  为带相位延后的极化响应。

在时域下由 Maxwell 方程可得到全电流密度：

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \partial D / \partial t \quad (2)$$

式中  $\sigma_0$  为直流电导率。

在频域下式(2)可变换为

$$J(\omega) = \sigma_0 E(\omega) + j\omega D(\omega) \quad (3)$$

$$J(\omega) = j\omega\varepsilon_0\{\varepsilon_\infty + \chi'(\omega) - j[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega} + \chi''(\omega)]\}E(\omega) = j\omega\varepsilon_0[\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)]E(\omega) \quad (4)$$

式中： $\chi'(\omega)$  和  $\chi''(\omega)$  分别为复极化系数  $\chi(\omega)$  的实部和虚部； $\varepsilon'(\omega)$  和  $\varepsilon''(\omega)$  分别为复介电常数的实部和虚部。

## 2 屏间绝缘劣化实验模型

本文根据干式套管芯体采用的多层电容屏均压结构<sup>[17-18]</sup>，采用多层环氧浸纸样片与铝箔交叉叠放的方式模拟干式套管电容芯体，如图 1 所示。



(a) 正视

(b) 俯视

图 1 环氧浸纸样片叠放方式

Fig. 1 Stacking form of RIP samples

设计了用于干式套管屏间绝缘劣化诊断平台，如图 2 所示。在环氧浸纸样片两侧并联不同阻值的电阻( $R_x$ )以模拟芯体中的劣化层，考虑到单层样片的电阻约为 64 TΩ，并联电阻值从 1 TΩ~510 Ω 进行取值，由于在并联电阻的条件下， $R_x$  阻值较正常状态下的屏间绝缘电阻值至少小 1 个数量级，因此屏间绝缘电阻可近似用  $R_x$  表示，另外正常层采用开路的方式模拟，完全击穿层采用短接的方式模拟。考虑到层间绝缘劣化的通道可能进一步发展，故选取外接电阻跨接的层数  $p$  为 1 和 2。

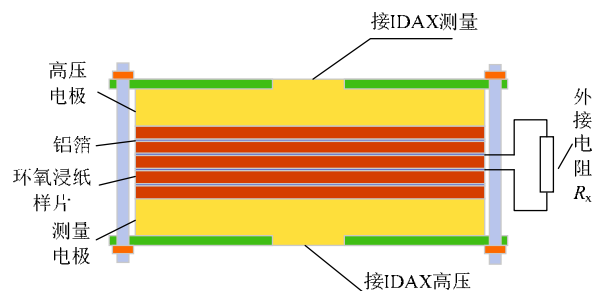


图 2 实验回路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

干式套管在运行时，芯体径向温度梯度较大，且差异性较大<sup>[3]</sup>，考虑到现场停电检修的实际应用场景，可待干式套管整体冷却至室温下进行试验。故本文保持 25℃ 室温条件下，采用瑞典 Megger 公司的 IDAX300 频域介电谱仪，并结合 VAX020，放大电压至 2 kV 进行测量。为了确定本文采用模型的合理性，针对和新套管公司生产的真型±400 kV

干式换流变阀侧套管, 对其在 25°C 室温下进行了 FDS 测试, 接线图如图 3 所示。

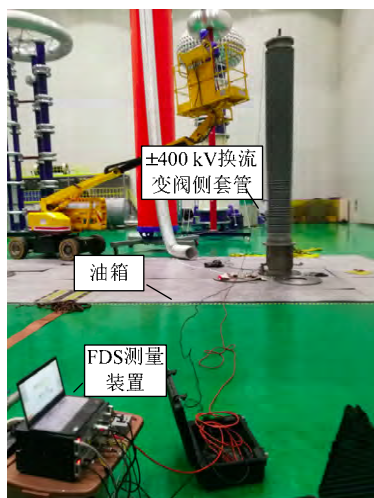


图3 真型套管的 FDS 测试图

Fig. 3 FDS test chart of real bushing

真型套管和实验模型(未并联电阻)的 FDS 测试结果如图 4、图 5 所示。可以看出, 实验模型与真型套管的 FDS 响应曲线具有比较相似的形态, 电容-频率( $C$ - $f$ )曲线几乎平行, 而实验模型的  $\tan\delta$ - $f$  曲线相当于真型套管的  $\tan\delta$ - $f$  曲线向右平移, 本文认为这是由样片的处理工艺与真型套管存在一定

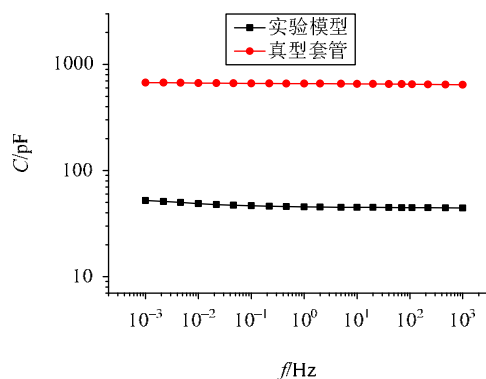


图4 真型套管与实验模型的  $C$ - $f$  曲线

Fig. 4  $C$ - $f$  curves for real bushing and experimental model

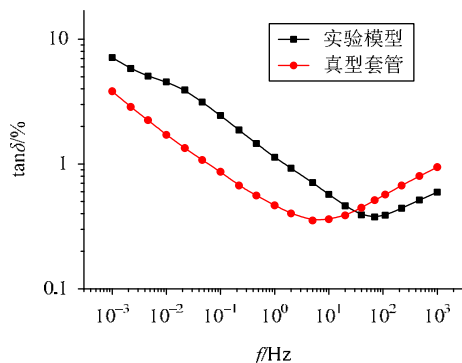


图5 真型套管与实验模型的  $\tan\delta$ - $f$  曲线

Fig. 5  $\tan\delta$ - $f$  curves for real bushing and experimental model

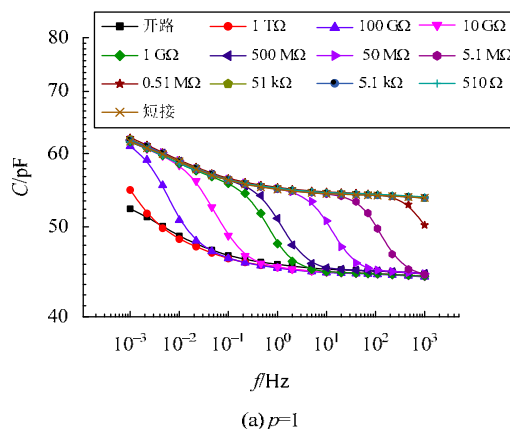
差异, 在皱纹纸紧度以及含水量控制方面较真实套管存在一定不足导致的。但从响应曲线的整体趋势来看, 实验模型的 FDS 响应曲线仍较好地反映了真型套管多层电容屏均压的结构。

### 3 FDS 实验结果分析

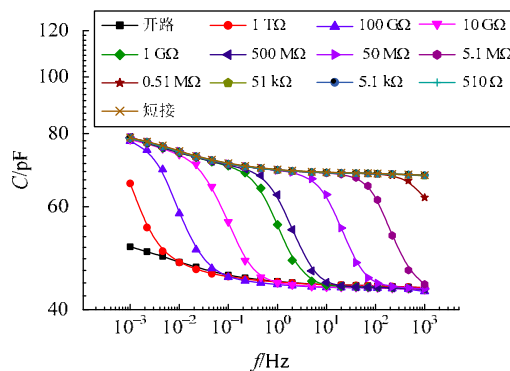
#### 3.1 不同屏间绝缘劣化状态下的 FDS 特性分析

$p=1$  和  $p=2$  时, 实验模型的  $C$ - $f$  特性如图 6 所示。随着  $R_x$  的减小,  $C$ - $f$  曲线上翘趋势明显, 且上翘点出现的频率值逐渐增大。 $C$ - $f$  曲线逐渐向屏间绝缘击穿的情况过渡。在  $R_x$  相同的条件下, 随着  $p$  的增大, 上翘点出现的频率值稍有增大, 上翘的幅度显著增大。当  $R_x$  跨接在 2 层环氧浸纸材料时, 由于各层材料参数一致, 可以认为每层并联有  $R_x/2$  的电阻, 这表明单层材料的劣化通道电阻更小, 且劣化层更多, 这相较于  $p=1$  时, 绝缘的破坏程度更甚。此外, 当  $R_x$  值为 50 MΩ 时, 工频附近的电容值才与正常值出现了一定的偏差, 而此时  $R_x$  的值相对于正常层的电阻值已经下降了近 6 个数量级; 而当  $R_x$  值为 1 TΩ 时, 劣化模型的  $C$ - $f$  曲线相较于正常模型在极低频下仍有一定的上翘趋势, 可见 FDS 法在诊断屏间局部绝缘劣化初期时比工频法更灵敏。

$p=1$  和  $p=2$  时, 实验模型的  $\tan\delta$ - $f$  特性如图 7



(a)  $p=1$



(b)  $p=2$

图6 不同  $R_x$  和  $p$  下  $C$ - $f$  曲线

Fig. 6  $C$ - $f$  curves under different  $R_x$  and  $p$

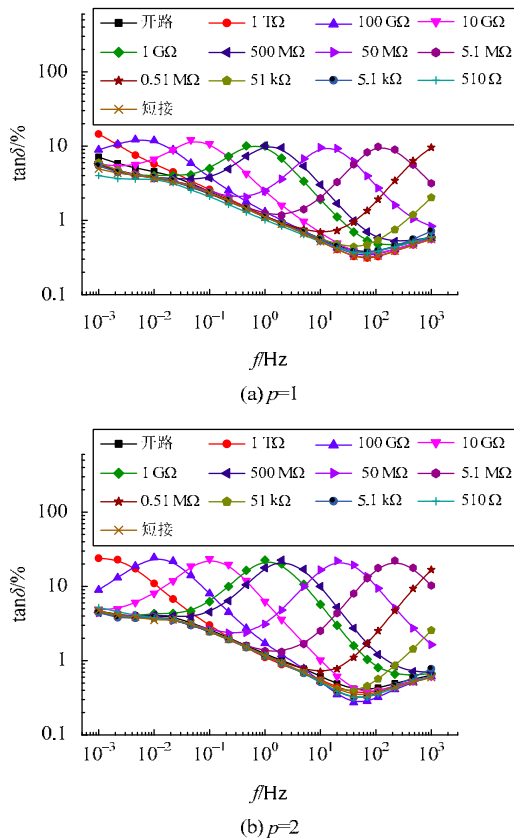


图7 不同  $R_x$  和  $p$  下  $\tan\delta$ - $f$  曲线  
Fig. 7  $\tan\delta$ - $f$  curves under different  $R_x$  and  $p$

所示。随着  $R_x$  的减小,  $\tan\delta$ - $f$  曲线出现一个局部峰值, 且峰值对应的频率逐渐右移, 并逐渐向屏间绝缘击穿的情况过渡。随着  $p$  的增大, 局部峰值显著升高, 且峰值对应的频率有轻微的右移趋势。在屏间局部绝缘劣化初期, 低频下的  $\tan\delta$ - $f$  曲线相较于正常模型仍有一定上升趋势; 在屏间局部绝缘劣化中期, 过渡过程及局部峰值非常明显; 在屏间局部绝缘劣化末期, 劣化模型和正常模型  $\tan\delta$ - $f$  曲线几乎完全重合, 仍可以看出 FDS 法在诊断屏间绝缘劣化的初、中期时比工频法更灵敏。

### 3.2 屏间绝缘劣化状态下 FDS 特征参数提取

套管的例行试验往往将工频下介损电容量的相对变化量  $\lambda_{c_1}$ 、 $\lambda_{t_1}$  作为特征量<sup>[17,19]</sup>, 进而对套管的绝缘状态进行判断:

$$\lambda_{c_1} = \frac{C_{P_50} - C_{s_50}}{C_{s_50}} \quad (5)$$

$$\lambda_{t_1} = \frac{\tan\delta_{P_50} - \tan\delta_{s_50}}{\tan\delta_{s_50}} \quad (6)$$

式中:  $C_{P_50}$ 、 $\tan\delta_{P_50}$  分别为考虑屏间绝缘劣化时测得的工频电容、介质损耗因数;  $C_{s_50}$ 、 $\tan\delta_{s_50}$  为正常条件下测得的工频电容、介质损耗因数。

与工频介损电容测量不同, 采用 FDS 方法可以基于宽频域响应曲线整体的变化情况<sup>[20-21]</sup>进一步

分析套管的绝缘状态。因此, 本文从  $C$ - $\ln(f)$  和  $\tan\delta$ - $\ln(f)$  曲线中选取  $C$  和  $\tan\delta$  在宽频域积分的相对变化量  $\lambda_{c_2}$ 、 $\lambda_{t_2}$  作为特征参数, 以表征频率响应曲线整体的相对变化情况:

$$\lambda_{c_2} = \frac{\int_{f_L}^{f_H} (C_P - C_s) d\ln(f)}{\int_{f_L}^{f_H} C_s d\ln(f)} \quad (7)$$

$$\lambda_{t_2} = \frac{\int_{f_L}^{f_H} (\tan\delta_P - \tan\delta_s) d\ln(f)}{\int_{f_L}^{f_H} \tan\delta_s d\ln(f)} \quad (8)$$

式中:  $C_P$ 、 $\tan\delta_P$  分别为考虑屏间局部绝缘劣化时的测得的电容、介质损耗因数;  $C_s$ 、 $\tan\delta_s$  为正常条件下测得的电容、介质损耗因数;  $f_H$ 、 $f_L$  分别表示 FDS 测量的上、下限频率。

绝缘特征量随  $R_x$  变化情况如图 8、图 9 所示。可以看出, 介损特征量在屏间局部绝缘劣化初、末期都接近 0, 即劣化初、末期的诊断效果较差。电容特征量随  $R_x$  的下降, 呈现上升的趋势, 且存在明显的拐点; 随着  $p$  的增大, 整体呈现明显的上升趋势, 工频法和 FDS 法的检出有效性都有明显提高。

如果以 5% 的相对变化量作为注意值, 当  $p=1$  时, 工频法给出判断的  $R_x$  注意值约为 35 MΩ, FDS 法给出的  $R_x$  注意值约为 15 GΩ; 当  $p=2$  时, 工频法给出判断的  $R_x$  注意值约为 120 MΩ, FDS 法给出的  $R_x$  注意值约为 240 GΩ。即 FDS 法对屏间局部绝缘劣化检出的有效性高于工频法近 3 个数量级。因此

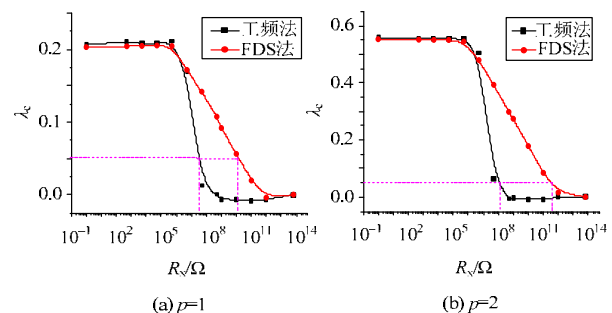


图8 不同检测方法的  $\lambda_c$ - $R_x$  曲线  
Fig. 8  $\lambda_c$ - $R_x$  curves for different detection methods

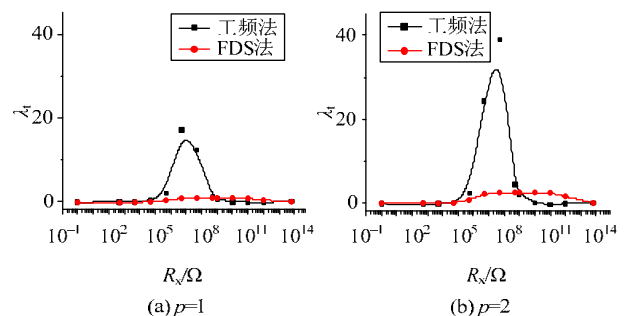


图9 不同检测方法的  $\lambda_t$ - $R_x$  曲线  
Fig. 9  $\lambda_t$ - $R_x$  curves for different detection methods



在考虑工程应用背景下,相较于传统工频法,可以采用 FDS 法的电容特征量对干式套管屏间局部绝缘劣化状态进行诊断。

## 4 屏间局部绝缘劣化的 FDS 理论模型分析

### 4.1 基于 CIGRE 套管模型的 FDS 仿真分析

CIGRE 提出的套管模型<sup>[14]</sup>如图 10 所示,其中  $R_i$  为屏间电容,  $C_i$  为屏间电阻,  $n$  为层数。

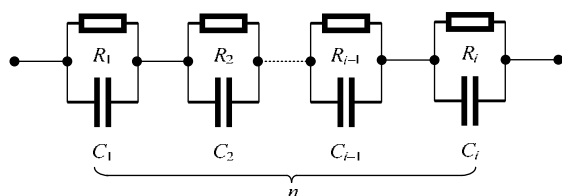


图 10 干式套管的 CIGRE 模型

Fig. 10 CIGRE model of RIP bushing

为了与实验模型相对照,设置每层电容( $C_0$ )、电阻值( $R_0$ )均相等,根据厂家提供的环氧浸纸样片的直流电导率和介电常数、样片层数,取  $R_0=64\text{ T}\Omega$ ,  $C_0=220\text{ pF}$ ,  $n=5$ 。得到的屏间绝缘劣化的套管模型如图 11 所示,其中  $R_x$  为表征劣化状态的并联电阻值,  $p$  为并联电阻跨接层数。

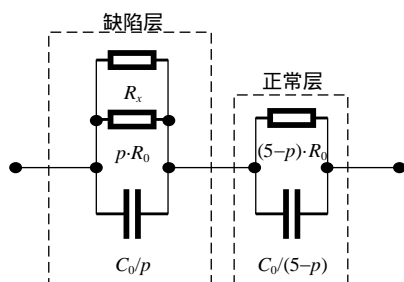


图 11 考虑屏间绝缘劣化的 CIGRE 模型

Fig. 11 CIGRE model with inter-foil insulation deterioration

可以得到此时模型的复阻抗:

$$Z(\omega) = \frac{R_x / (pR_0)}{1 + j\omega\tau_1} + \frac{(5-p)R_0}{1 + j\omega\tau_2} \quad (9)$$

式中:  $\tau_1 = [(R_x / (pR_0))C_0]$ ;  $\tau_2 = (5-p)R_0C_0$ 。

模型复电容的实部:

$$C'(\omega) = \text{Re}[1/(\omega Z(\omega))] \quad (10)$$

模型复电容的虚部:

$$C''(\omega) = \text{Im}[1/(\omega Z(\omega))] \quad (11)$$

模型的  $\tan\delta$ :

$$\tan\delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (12)$$

在不同  $R_x$  和  $p$  条件下,得到的  $C$ - $f$  曲线的结果如图 12 所示。可以看出, CIGRE 模型<sup>[14]</sup>计算得到的  $C$ - $f$  曲线与实验结果较为接近。

在不同  $R_x$  和  $p$  条件下,得到的  $\tan\delta$ - $f$  曲线的结

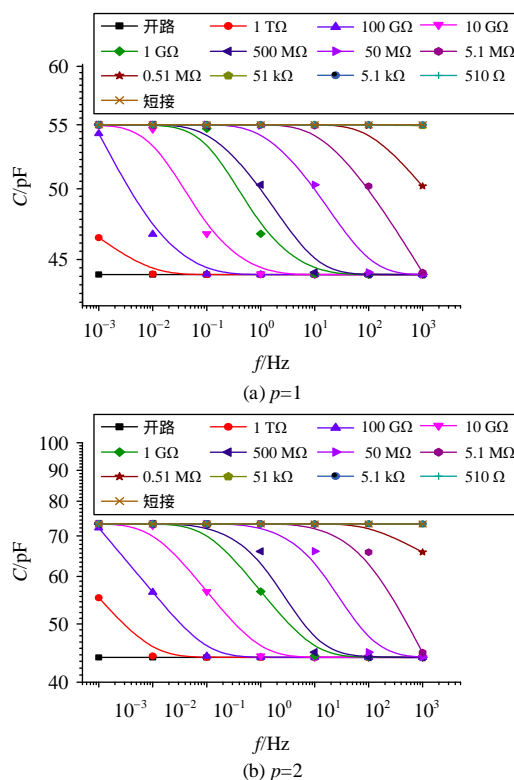


图 12 不同  $R_x$  和  $p$  下  $C$ - $f$  曲线计算结果(CIGRE 模型)

Fig. 12 Calculation result of  $C$ - $f$  curves under different  $R_x$  and  $p$  (CIGRE model)

果,如图 13 所示。CIGRE 模型<sup>[14]</sup>计算得到的  $\tan\delta$ - $f$  曲线与实验结果相差较远,虽然出现了一定的过渡过程,但在  $R_x$  较大或较小时高频段出现了明显的下降趋势,与实验结果中的上翘半支存在明显不同。

### 4.2 基于 CIGRE 修正套管模型的 FDS 仿真分析

结合 A. K. Jonscher 的相关研究成果<sup>[22]</sup>,本文认为 CIGRE 模型<sup>[14]</sup>忽略了每层环氧浸纸材料与铝箔接触界面的影响,导致与实测结果的偏差较大,因此在 CIGRE 模型的基础上,增加了与  $R$ - $C$  并联回路串联的一个小电阻( $R_s$ ),以表征界面电导层,如图 14 所示。通过参数拟合选取  $R_s=3.6\text{ k}\Omega$ ,其余参数与图 11 相同。

在不同  $R_x$  和  $p$  条件下,得到的  $C$ - $f$  曲线如图 15 所示。修正 CIGRE 模型计算结果与实测结果的变化趋势基本一致。

在不同  $R_x$  和  $p$  条件下,得到的  $\tan\delta$ - $f$  曲线如图 16 所示。可以看出,随着  $R_x$  的减小,修正模型避免了  $\tan\delta$ - $f$  曲线右半支快速下降的问题,较好地解释了干式套管屏间局部绝缘劣化时,  $\tan\delta$ - $f$  曲线的变化趋势。

## 5 结论

本文采用多层环氧浸纸样片与铝箔交叉叠放的方法模拟干式套管的结构,在 1、2 层样片两侧

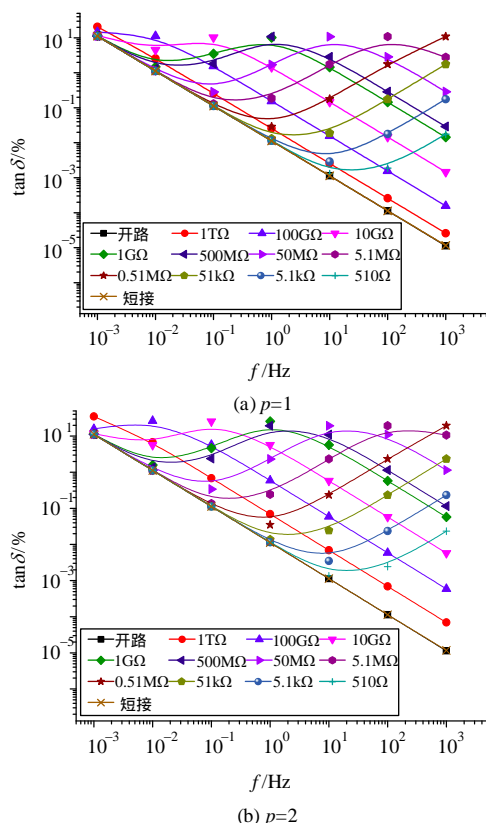
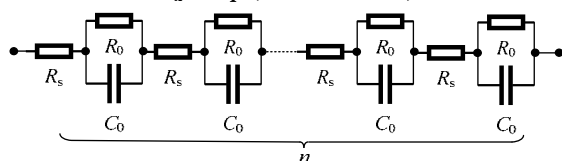
图 13 不同  $R_x$  和  $p$  下  $\tan\delta$ - $f$  曲线计算结果(CIGRE 模型)Fig. 13 Calculation result of  $\tan\delta$ - $f$  curves under different  $R_x$ and  $p$  (CIGRE model)

图 14 干式套管的 CIGRE 修正模型

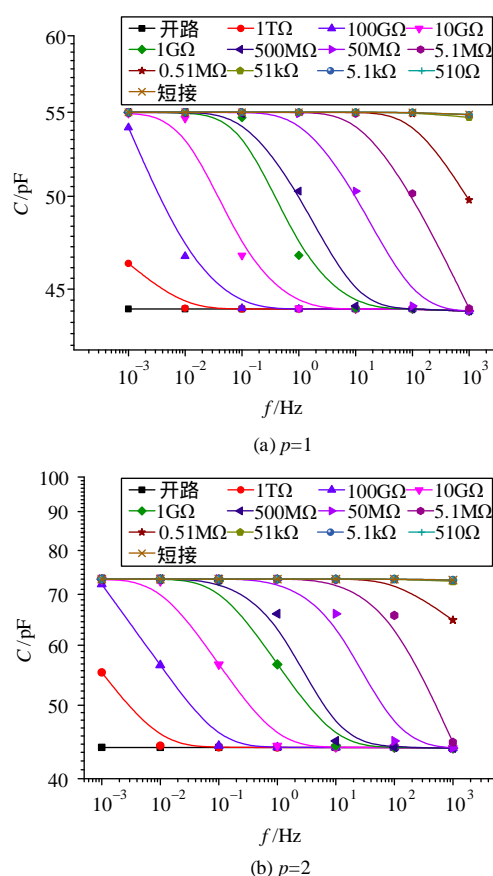
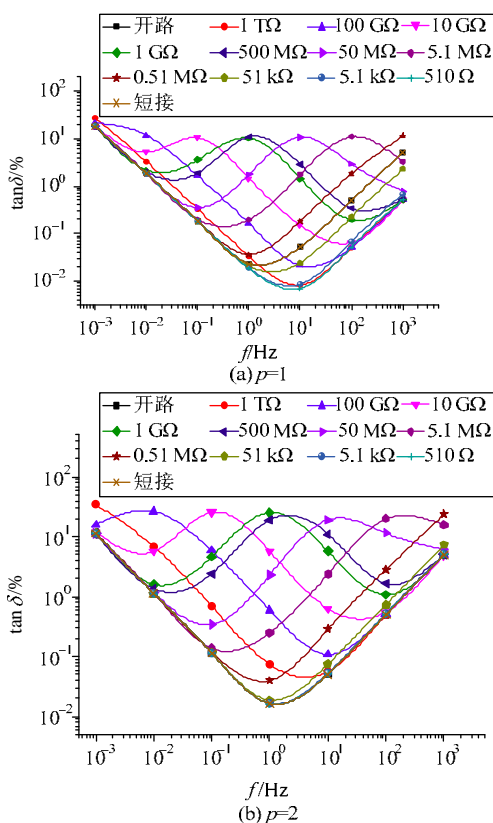
Fig. 14 Modified CIGRE model of RIP bushing

并联小电阻的方式模拟屏间局部绝缘劣化的现象。并在 25 室温下，对实验模型进行了 FDS 测试。并进一步通过对 CIGRE 套管模型的分析 and 修正，得到了以下结论：

1) 室温下，屏间局部绝缘劣化的干式套管的  $C$ - $f$ 、 $\tan\delta$ - $f$  曲线均存在明显的过渡过程： $C$ - $f$  曲线随着劣化的加重出现明显的上翘段，且上翘点出现的频率逐渐升高，最终与原曲线平行； $\tan\delta$ - $f$  曲线随着劣化的加重出现明显的局部峰值，且峰值随频率发生平移，最终与原曲线重合；随着劣化层数的增大，曲线的上升趋势更加明显，局部峰值更大。

2) 室温下，采用 FDS 电容特征参数的诊断方法较工频下介损电容测量方法在干式套管屏间局部绝缘劣化初期的有效性提升较多，可以在缺陷早期予以诊断，避免缺陷扩大引发事故。

3) 在传统 CIGRE 模型的基础上，增加一个表示环氧浸纸材料与铝箔接触面界面影响的电阻，可以较好地解释干式套管屏间局部绝缘劣化 FDS 响

图 15 不同  $R_x$  和  $p$  下  $C$ - $f$  曲线计算结果(修正模型)Fig. 15 Calculation result of  $C$ - $f$  curves under different  $R_x$  and  $p$  (modified model)图 16 不同  $R_x$  和  $p$  下  $\tan\delta$ - $f$  曲线计算结果(修正模型)Fig. 16 Calculation result of  $\tan\delta$ - $f$  curves under different  $R_x$  and  $p$  (modified model)

应曲线的变化趋势。此外本文实验在室温下开展,在干式套管存在温度梯度时是否适用,有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] Champion J V, Dodd S J. Inter-foil electrical breakdown in high voltage ERIP condenser bushings[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Eindhoven, Netherlands, 2001: 329-332.
- [2] 吴明清,田浩,侯国良,等.多场耦合对直流环氧绝缘材料机械性能和热性能的影响[J].电网技术,2015,39(10):2947-2951. Wu Mingqing, Tian Hao, Hou Guoliang, et al. Influence of multi-field coupling on mechanical and thermal properties of DC high-voltage epoxy insulating materials[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2947-2951(in Chinese).
- [3] 汤浩,李金忠,张贺军,等.特高压直流换流变压器阀侧套管高温强电流下轴径向的温度分布规律[J].中国电机工程学报,2017,37(18):5494-5503. Tang Hao, Li Jinzhong, Zhang Hejun, et al. Axial and radial temperature distribution of the valve side bushing in UHVDC converter transformer under high ambient temperature and large current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5494-5503(in Chinese).
- [4] Zhang S, Peng Z, Liu P, et al. Inner insulation structure optimization of UHV RIP oil-SF6 bushing using electro-thermal simulation and advanced equal margin design method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1768-1777.
- [5] Sokolov V, Vanin V. Evaluation and identification of typical defects and failure models in 110-750 kV bushings[C]//Proceedings of Sixty-Fourth Annual International Conference on Doble Clients, Bostan, America, 1997: 301-330.
- [6] Wei J L, Zhang G J, Xu H, et al. Novel characteristic parameters for oil-paper insulation assessment from differential time-domain spectroscopy based on polarization and depolarization current measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 18(6): 1918-1928.
- [7] Ren M, Dong M, Ren Z, et al. Transient earth voltage measurement in PD detection of artificial defect models[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(8): 2002-2008.
- [8] 申巍,柯春俊,王红斌,等.直流高压干式套管的多参量诊断[J].高电压技术,2012,38(3):616-622. Shen Wei, Ke Chunjun, Wang Hongbin, et al. Multi-parameter diagnosis of HVDC bushing[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 616-622(in Chinese).
- [9] 周利军,李先浪,王东阳,等.不均匀老化油纸绝缘稳态水分分布的频域介电谱[J].高电压技术,2015,41(6):1951-1958. Zhou Lijun, Li Xianlang, Wang Dongyang, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy of non-uniform aging oil-paper with equilibrium moisture distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1951-1958(in Chinese).
- [10] 张致,董明,彭华东,等.频域介电谱用于高压电流互感器绝缘诊断[J].高电压技术,2012,38(11):2949-2955. Zhang Zhi, Dong Ming, Peng Donghua, et al. Insulation diagnosis of high voltage current transformers by frequency dielectric spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2949-2955(in Chinese).
- [11] 陆云才,汤明杰,雷敏,等.基于普适弛豫定律的油纸绝缘设备频域介电谱特征量的提取与表征[J].绝缘材料,2013(6):77-81. Lu Yuncai, Tang Mingjie, Lei Min, et al. Extraction and characterization of frequency domain spectrum characteristic parameter of oil-paper insulation equipment based on universal relaxation law[J]. Insulation Materials, 2013(6): 77-81(in Chinese).
- [12] 段宗超,吴广宁,高波.油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究[J].电网技术,2014,38(10):2881-2887. Duan Zongchao, Wu Guangning, Gao Bo. Study of linkage effects between degree of polymerization and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2881-2887(in Chinese).
- [13] Buchacz J, Cichoń A, Skubis J. Detection of conductive layers short circuit in HV condenser bushings using frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(1): 552-558.
- [14] Gubanski S, Boss P, Cseples G, et al. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers[J]. CIRGE Technical Brochure, 2004 (254): 1-40.
- [15] Boss P, Cseples G, Der Houhanessian V. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(3): 12-18.
- [16] 张良莹.电介质物理[M].西安:西安交通大学出版社,1991.
- [17] 张施令,彭宗仁,刘鹏.特高压干式油气套管内绝缘结构的优化设计[J].西安交通大学学报,2014,48(8):116-121. Zhang Shiling, Peng Zongren, Liu Peng. Inner insulation structure optimization for ultra high voltage resin impregnated paper oil-SF6 bushing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(8): 116-121(in Chinese).
- [18] 严璋,朱德恒.高电压绝缘技术[M].3版.中国电力出版社,2015.
- [19] GB/T 4109—2008,交流电压高于1000V的绝缘套管[S].
- [20] 林春耀,杨贤,马志钦,等.老化和水分对电容性套管绝缘纸频域介电特性的影响[J].南方电网技术,2016,10(1):18-25. Lin Chunyao, Yang Xian, Ma Zhiqin, et al. Influence of moisture and aging on dielectric property of oil-paper in condenser bushing[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(1): 18-25(in Chinese).
- [21] 董明,刘媛,任明,等.油纸绝缘频域介电谱特征参数提取及绝缘状态相关性研究[J].中国电机工程学报,2015,35(23):6246-6253. Dong Ming, Liu Yuan, Ren Ming, et al. Study of characteristic parameter extraction and insulation condition correlation of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6246-6253(in Chinese).
- [22] Jonscher A K. 固体中的介电弛豫[M].西安:西安交通大学出版社,2008.



陈铭

收稿日期:2018-01-03.

作者简介:

陈铭(1994),男,博士研究生,研究方向为高压直流套管绝缘结构设计与绝缘诊断,E-mail:chenmingc@stu.xjtu.edu.cn;

刘轩东(1981),男,通信作者,副教授,博士生导师,研究方向为气体绝缘与放电等离子体、高功率脉冲源、气体开关及应用,E-mail:liuxuand@mail.xjtu.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)