

引用格式:周秀,白金,李宁,等.高次谐波下干式空心平波电抗器绕组的电位分布规律研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):269-276.

Citation: ZHOU Xiu, BAI Jin, LI Ning, et al. Potential distribution law of dry-type air-core smoothing reactor winding under high-order harmonics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 269-276.

# 高次谐波下干式空心平波电抗器绕组的 电位分布规律研究

周 秀<sup>1</sup>, 白 金<sup>1</sup>, 李 宁<sup>2</sup>, 田 天<sup>1</sup>, 陈 磊<sup>1</sup>, 雷佳成<sup>3</sup>, 杨 泰<sup>3</sup>, 杨 鑫<sup>3</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011; 2. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 宁夏 银川 750011;

3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:**在高次谐波作用下,干式空心平波电抗器的多层并联绕组的电位分布会形成异常畸变,导致局部场强集中与电老化加剧,影响电抗器使用寿命。为解决此问题,基于傅里叶分析,得到平波电抗器运行工况中承载的高次谐波特征;建立以线匝为基本单元的电抗器物理模型,通过场-路耦合的有限元分析方法研究干式空心平波电抗器绕组在高次谐波以及与直流叠加作用下的电位分布规律。研究表明:相较于在直流情况下,高次谐波的载入会使得电抗器绕组电场分布不均,电抗器整体电场最强点的场强增加 15%;在高次谐波的影响下,电抗器单层绕组上、下两端的匝间场强差增大,包封内两侧绕组的层间场强增大;最外层绕组电场最大值比最内层绕组电场最大值增大了约 20%;干式空心平波电抗器的最外层包封最易发生电老化。

**关 键 词:**高次谐波;干式空心平波电抗器;场-路耦合;电位分布

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.028 中图分类号: TM47 文章编号: 1673-9140(2024)06-0269-08

## Potential distribution law of dry-type air-core smoothing reactor winding under high-order harmonics

ZHOU Xiu<sup>1</sup>, BAI Jin<sup>1</sup>, LI Ning<sup>2</sup>, TIAN Tian<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, LEI Jiacheng<sup>3</sup>, YANG Tai<sup>3</sup>, YANG Xin<sup>3</sup>

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China; 2. Ultra High Voltage Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Under the action of high-order harmonics, the potential distribution of the multi-layer parallel winding of the dry-type air-core smoothing reactor will form abnormal distortion, resulting in local field strength concentration and accelerated electrical aging, which will affect the service life of the reactor. To solve this problem, firstly, based on Fourier analysis, the high-order harmonic characteristics of a smoothing reactor under operating conditions are obtained. Then, the physical model of the reactor with the line turn as the basic unit is established, and the potential distribution law of the dry-type air-core smoothing reactor winding under high-order harmonics and direct current (DC) superposition is studied by the finite element analysis method of field-circuit coupling. The results show that compared with the DC case, the loading of high-order harmonics will make the electric field distribution of the reactor winding uneven, and the field strength of the strongest point in the overall electric field of the reactor increases by 15%. Under the influence of high-order harmonics, the inter-turn field strength difference between the upper and lower ends of the single-layer winding of the reactor increases, and the inter-layer field strength of the windings on both sides of the encapsulation increases. The maximum electric field of the outermost winding is about 20% higher than that of the

收稿日期: 2023-11-05; 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK220008)

通信作者: 周 秀(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力设备状态检测及高压试验等研究; E-mail: 1462330176@qq.com

innermost winding. As a result, the outermost encapsulation of the dry-type air-core smoothing reactor is the most prone to electrical aging.

**Key words:** high-order harmonics; dry-type air-core smoothing reactor; field-circuit coupling; potential distribution

平波电抗器是高压直流输电工程中的主设备之一,它不仅能够限制逆变侧电压崩溃的过电流,平抑传输直流电流中的纹波,而且还能够有效防止沿直流线路入侵到换流站的过电压影响换流阀的绝缘性能。目前,由于干式空心电抗器具有结构简单、重量轻、噪声小、不渗油、维护简单等优点,其被作为平波电抗器大面积应用于特高压直流工程<sup>[1-3]</sup>。

干式空心平波电抗器在实际运行时,加载在电抗器两端的电压主要为直流电压,但直流电压中掺杂了大量高次谐波电压<sup>[4]</sup>,由于其频率高、幅度大,易造成电抗器匝间和层间的电位分布不均,对电抗器的匝间绝缘危害极大。电抗器电场分布不均,被认为是其发生放电现象的主要原因之一。如宁夏某户内直流场±660 kV干式空心平波电抗器在投运中电抗器本体外表面中间位置发生树枝状放电现象,给直流场安全运行造成了威胁。研究电抗器各绕组的电位分布是改良电抗器匝间绝缘的基础,能够有效解决电抗器在运行过程中发生的事故<sup>[5]</sup>。

目前,已有较多文献对干式空心电抗器电场分布及电抗器故障展开研究<sup>[6-8]</sup>。文献[9]对干式空心电抗器早期故障进行了研究;文献[1]利用有限元仿真对电抗器附近线路的感应电压进行计算;文献[10]对电抗器内部故障特点进行了分析;文献[11-17]通过建立换流站平波电抗器整体三维有限元模型,分别研究了直流和冲击电压下平波电抗器的整体电场分布情况,以及均压环对平波电抗器整体电场分布的影响;文献[18]采用有限元法分析了造成空心电抗器端部表面树枝状发电的原因;文献[19]通过有限元方法分析了电抗器表面局部放电的主要原因是绝缘开裂;文献[20]根据同一包封内绕组横截面积相等的原则将包封内多股导线换算为一根粗导线,建立了电抗器三维有限元模型,分析了电抗器的全局电场分布和电抗器包封绕组层间与匝间电场分布。在电抗器绕组电位分布计算方面,文献[21]通过建立干式空心电抗器的等效电路模型,分析了干式空心并联电抗器在工频电压和雷电下绕组的电压与电场分布特性。

综上所述,现有相关研究多与电抗器的整体电位分布、表面电场分布及雷电冲击下电抗器绕组的波过程相关,而关于室内干式空心平波电抗器的直流和高次谐波作用下内部各层及各匝线圈之间的

电场分布的研究尚不充分。由于运行中大量高次谐波的存在,电抗器不同包封内绕组层间互感的作用以及谐波作用下电抗器绕组的交流电阻现象这些因素对层间和匝间电位梯度产生的影响是目前需要研究的内容。干式空心平波电抗器采用多个包封、多层绕组并联的方式,在高次谐波作用下,电抗器绕组的电位分布不仅受绕组中交流电阻的影响,还会受并联绕组间自感与互感的影响。场-路耦合有限元分析方法能准确地模拟电抗器实际工作情况,使分析结果更准确。

综上,本文建立以线匝为基本单元的干式空心平波电抗器模型,通过场-路耦合有限元分析方法,首先给模型加载高次谐波电压,对比分析在直流电压和高次谐波电压情况下电抗器绕组的电位分布规律,然后将直流电压和高次谐波电压联合加载,得到联合作用下电抗器绕组的电位分布情况。

## 1 干式空心平波电抗器高次谐波分析

干式空心平波电抗器主要用于整流以后的直流回路,可通过抑制整直电压中的纹波,使输出的直流接近理想直流。其通过同一包封内多匝线圈和多个包封,实现干式空心平波电抗器在串联工况下满足大电流通流的目标。

### 1.1 干式空心平波电抗器的结构

干式空心平波电抗器主要由多个包封构成,包封之间有撑条起隔离支撑作用,其间为散热气道;包封由多层绕组构成,每层绕组由线圈绕制成层,不同位置的绕组、匝数不相同。其结构模型如图1所示。

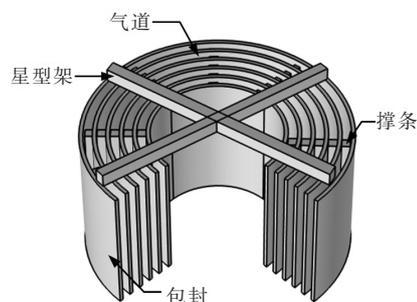


图1 电抗器基本结构

Figure 1 Basic structure of reactor

该电抗器绕组采用多层圆筒式线包并联结构,绕组中的匝间绝缘采用聚酯薄膜材料,包封主要填

充环氧树脂和玻璃纤维作为绝缘材料。包封实物图如图 2 所示。

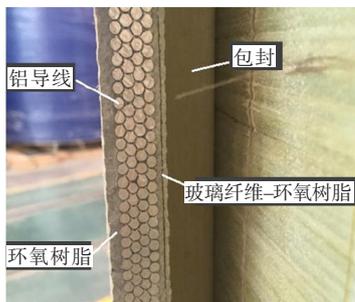


图 2 包封实物图

Figure 2 Physical diagram of encapsulation

### 1.2 干式空心平波电抗器的谐波分析

本文以±660 kV 直流输电工程 12 脉冲整流电路为例分析换流阀产生的谐波电流特征,即流经干式空心平波电抗器内部的谐波电流特征。整流电路仿真模型如图 3 所示,所得波形的傅里叶分析结果如图 4 所示。

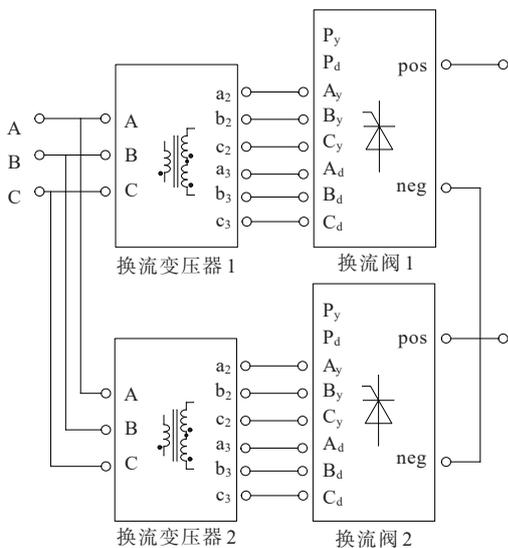


图 3 12 脉冲整流仿真模型

Figure 3 12-pulse rectification simulation model

由图 4 可知,换流阀后的电流主要是直流电流,其中还包含少量的谐波成分,这些谐波成分中偶次谐波含量较多,且谐波中 12、24、36、48 次谐波的含量较多。较于直流电压,这些高次谐波的幅值都很小,但高频率和陡坡度会对电抗器的电场分布产生影响。

由文献[22]可知,双桥 12 脉动换流器在直流侧产生的谐波特征分别为 12、24、36 次,与本文的模型计算结果一致,由此可以验证本文试验结果的准确性。

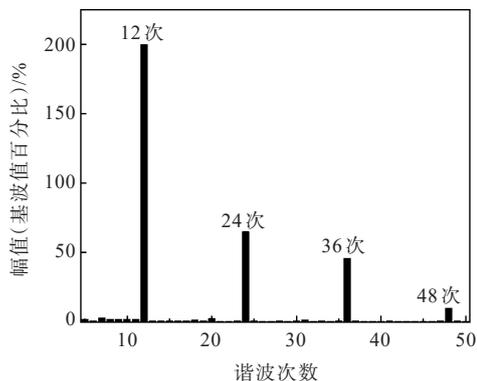


图 4 傅里叶分析结果

Figure 4 Fourier analysis results

## 2 考虑高次谐波的电抗器电场分布数值计算方法

采用场-路耦合数值计算方法计算干式空心平波电抗器绕组的电场分布,需要加载电磁场和电路控制条件,通过电路方程给电抗器模型加载激励电压,实现平波电抗器在不同电压类型下绕组电位分布的计算。

### 2.1 物理场的控制方程

电磁场控制方程为

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

$$J = \sigma E + \sigma v \times B + J_e \quad (3)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (4)$$

式(1)~(4)中, $H$ 为磁场强度; $J$ 为电流密度矢量; $B$ 为磁感应强度; $\sigma$ 为电导率; $E$ 为电场强度矢量; $v$ 为电势; $J_e$ 为外部注入电流密度; $A$ 为矢量磁势; $\nabla$ 为梯度算子。

在高次谐波情况下,通过电磁场中添加“线圈组”边界条件,设置电抗器绕组匝数、电阻率以及导线截面积来表征电抗器绕组。其电抗器绕组直流电阻  $R_{DC}$ 、交流电阻  $R_{AC}$ 、自感  $L$  及互感  $M$  的计算公式为

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (5)$$

$$R_{AC} = R_{DC} \left( 1 + \frac{4\pi^2 f^2 u_0^2}{192\rho^2} r^4 \right) \quad (6)$$

$$L = \frac{u_0 \pi r^2 N^2}{l} \quad (7)$$

$$M = Nu_0 \frac{\pi R_2^2}{2R_1} \quad (8)$$

式(5)~(8)中, $\rho$ 为导线电阻率; $u_0$ 为导体磁导率; $r$ 为导线半径; $l$ 为线圈长度; $f$ 为谐波频率; $N$ 为匝数;

$R_1, R_2$ 分别为两层线圈的质心半径。

电抗器采用多个包封、多层绕组并联的结构,将每层绕组等效为一条支路,该支路包含该层绕组的交流电阻与直流电阻,该层绕组的自感以及每两层绕组之间存在的互感。等效电路模型如图5所示。

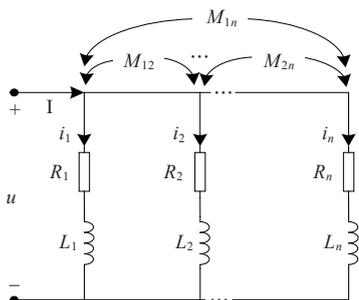


图5 电抗器等效电路模型

Figure 5 Equivalent circuit model of reactor

其电路控制方程为

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + j\omega L_1 i_1 + j\omega M_{12} i_2 + j\omega M_{13} i_3 + \dots + j\omega M_{1n} i_n \\ u_2 = R_2 i_2 + j\omega M_{21} i_1 + j\omega L_2 i_2 + j\omega M_{23} i_3 + j\omega M_{24} i_4 + \dots + j\omega M_{2n} i_n \\ \vdots \\ u_n = R_n i_n + j\omega M_{n1} i_1 + j\omega M_{n2} i_2 + \dots + j\omega M_{n(n-1)} i_{(n-1)} + j\omega L_n i_n \end{cases} \quad (9)$$

$$I = i_1 + i_2 + \dots + i_n \quad (10)$$

式中(9)、(10),  $u$ 为额定电压;  $i_i$ 为第  $i$ 层绕组的电流;  $I$ 为总电流;  $R_i$ 为第  $i$ 层绕组的电阻(直流电阻和交流电阻);  $L_i$ 为第  $i$ 层绕组的自感;  $M$ 为不同层绕组之间的互感。

## 2.2 场-路耦合原理及解法

场-路耦合方法是将电磁场方程和电路方程耦合起来,其电磁场-电路相互间的耦合形式如图6所示。

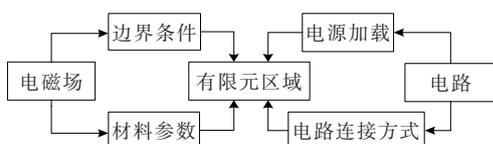


图6 场-路耦合关系

Figure 6 Field-circuit coupling relationship

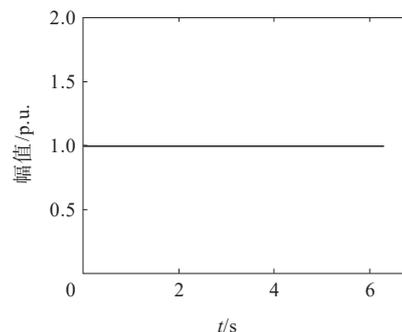
将电磁场中的线圈组接口与电路中对应接口相耦合,通过电路连接将所有线圈并联,并加载电压源。为了实现在不同电压类型下电抗器电场分布的计算,分别设置以下解析式函数,如图7所示。

根据有限元控制方程和场-路耦合作用机制,通过加载不同类型的电压源,实现对干式空心平波

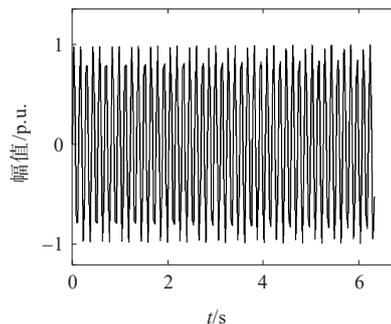
电抗器绕组在直流、高次谐波以及联合作用下的电场分布计算。加载电压如下:

$$u(\omega t) = U_{(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{(n)} \sin(n\omega t + \varphi_{(n)}) \quad (11)$$

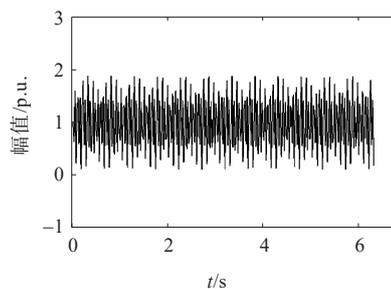
式中,  $U_{(0)}$ 为电流的直流分量;  $U_{(n)}$ 为电流的基波分量和各次谐波分量;  $\varphi_{(n)}$ 为电流各次谐波相位角;  $\omega$ 为角频率;  $n$ 为谐波的次数。



(a) 直流函数



(b) 高次谐波函数



(c) 复合函数

图7 解析式函数形式

Figure 7 Analytic function form

## 2.3 建立平波电抗器模型

本文以一台额定电压为  $\pm 660$  kV、额定电流为 3 030 A 的干式空心平波电抗器为例进行研究。该电抗器的主要参数如表1所示,该电抗器绕组采用铝线材料,包封材料为环氧树脂,相关材料参数如表2所示。

表1 电抗器主要参数

Table 1 Main parameters of reactor

| 额定电压/kV   | 额定电流/A | 额定电感/mH | 额定损耗/kW    |
|-----------|--------|---------|------------|
| $\pm 660$ | 3 030  | 75      | $\leq 206$ |

表 2 相关材料参数

Table 2 Related material parameters

| 材料   | 电导率/(S·m <sup>-1</sup> ) | 相对介电常数 | 相对磁导率 |
|------|--------------------------|--------|-------|
| 铝导线  | 3.77 × 10 <sup>7</sup>   | 1.0    | 1     |
| 环氧树脂 | 1 × 10 <sup>-14</sup>    | 4.5    | 1     |

电抗器整体结构复杂,为了探究干式空心平波电抗器绕组电场的分布情况,在模型建立时,忽略星型支架和撑条对电抗器绕组电场的影响,以线圈匝为基本单元建立干式空心电抗器模型,由于干式空心电抗器的包封高度相差无几,在建立干式空心电抗器的有限元模型时,将每个包封的高度统一,具体的简化模型结构尺寸如表 3 所示,建立的电抗器简化模型如图 8 所示。

表 3 结构尺寸

Table 3 Structure size

| 包封厚度/<br>mm | 气道厚度/<br>mm | 导线直径/<br>mm | 导线绝缘<br>厚度/mm | 最小线圈<br>匝数 |
|-------------|-------------|-------------|---------------|------------|
| 40          | 35          | 3.75        | 0.3           | 176        |

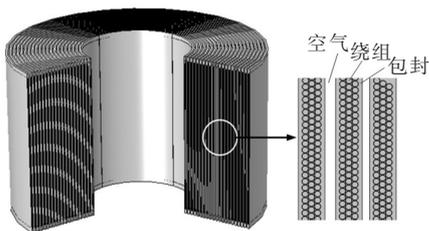


图 8 干式空心平波电抗器模型示意图

Figure 8 Dry-type air-core smoothing reactor model

依据干式空心平波电抗器的实际运行情况,基于场-路耦合方法通过电路模型给电抗器绕组加载不同类型的电压源。在直流情况下,加载 10 000 V 的线圈电压;在高次谐波情况下,加载频率为 600 Hz,幅值为 7 800 V 的线圈电压;在联合作用下,加载解析式通过式(9)加载线圈电压。根据给出的模型参数、材料参数和约束条件进行干式空心平波电抗器电场分布的仿真。

### 3 高次谐波对电抗器绕组电场分布的影响特性

通过查阅相关资料和行业经验可知,电抗器绝缘问题多出现在外层包封,因此本文选取最外 4 层包封进行分析。电抗器二维轴对称模型将最外 4 层包封由内向外分别命名为第 1~第 4 层包封,第 1 层包封的第 1 层绕组为最内层绕组,分析结果如下。

### 3.1 直流电压下干式空心平波电抗器绕组的电场分布

由电抗器二维轴对称模型可得干式空心平波电抗器在直流电压下绕组的电场分布如图 9 所示。

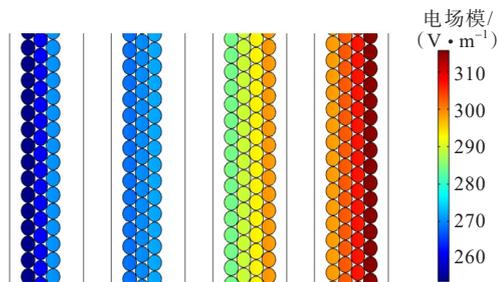


图 9 直流电压下电场分布情况

Figure 9 Electric field distribution under DC voltage

由图 9 可知,干式空心平波电抗器包封内同一层绕组的电场分布为同一颜色,即同一层绕组的匝间压差很小。干式空心平波电抗器在直流电压下包封内部的压差大小主要表现为不同绕组的层间压差。由于干式空心平波电抗器的绕组结构可知,电抗器的绕组越到外层其绕组的匝数也越小,所以外层绕组的整体场强比内层绕组的整体场强要大,最外层绕组的整体场强最大。

### 3.2 高次谐波电压下干式空心平波电抗器绕组的电场分布

由电抗器二维对称模型可得干式空心平波电抗器在高次谐波电压下绕组电场分布如图 10 所示。

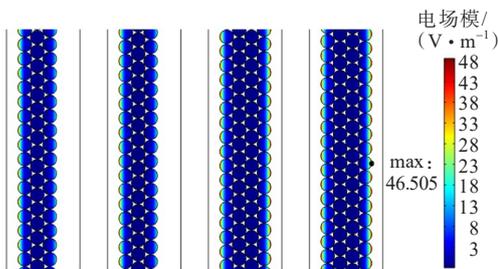


图 10 高次谐波电压下电场分布情况

Figure 10 Electric field distribution under high-order harmonic voltage

由图 10 可知,在高次谐波电压下,由于电抗器绕组间自感与互感的影响,使得电抗器绕组整体电位分布不均。电抗器包封绕组的电场分布主要集中在包封内外两侧的绕组,电场最强点出现在最外层包封的最外层绕组的中部。

为了探究各绕组的层间压差,对各包封内绕组间各层电场的分布进行分析,以模型任一处的纵向二维截线为例,其绕组层间的电场变化规律如图 11 所示。

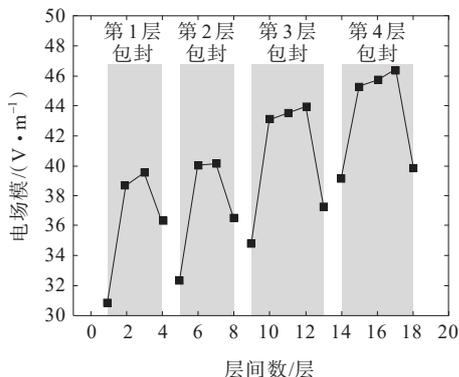
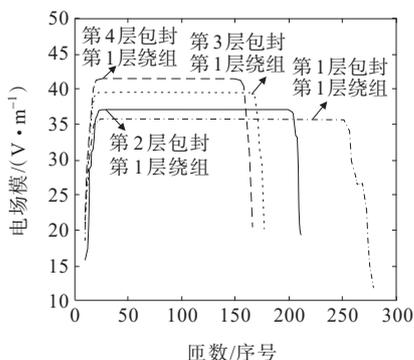


图 11 绕组层间电场分布规律

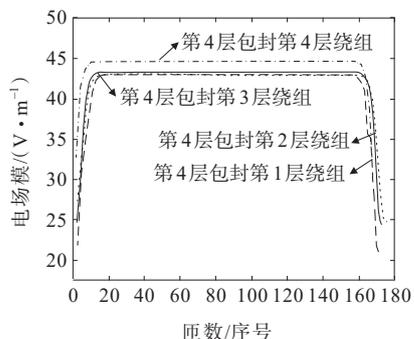
Figure 11 Distribution law of electric field between winding layers

由图 11 可知,单个包封内两侧绕组的层间压差较大,中间层绕组的层间压差较小。

高次谐波电压下干式空心平波电抗器绕组的压差不仅表现在绕组层间,还表现在同一层绕组的匝间。为了探究在高次谐波电压下不同包封之间和不同绕组之间的电场分布规律、匝数与电场分布规律,本文分别选取每层包封的第 1 层绕组和同一包封的不同层绕组进行电场分布对比,匝数为横坐标,电场模为纵坐标,其电场分布规律如图 12 所示。



(a) 不同层包封的第 1 层绕组电场分布规律



(b) 第 1 层包封不同层绕组电场分布规律

图 12 绕组匝数与电场分布规律

Figure 12 Winding turns and electric field distribution law

在高次谐波作用下,受干式空心平波电抗器绕组交流电阻以及绕组自感与互感的影响,由图 12 可知:1)最外层包封内绕组的整体场强较内层包封内绕组的整体场强大;2)单个包封内最外层绕组的整体场强较内层绕组的整体场强大;3)单层绕组两端的电场较小,中间的电场几乎相等,这使得单层绕组两端的匝间压差大,中间压差小。

### 3.3 联合作用下干式空心电抗器绕组的电场分布

由电抗器二维对称模型可得干式空心平波电抗器在联合作用下绕组电场分布如图 13 所示。

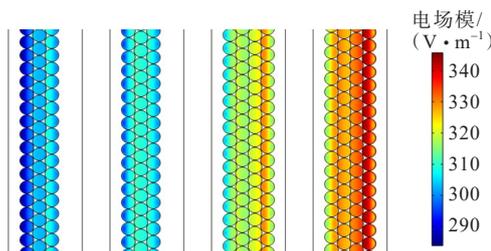


图 13 联合作用下电场分布情况

Figure 13 Electric field distribution under combined action

由图 13 可知,在直流电压和高次谐波电压联合作用下,电抗器包封内各层绕组的电位受高次谐波的影响,绕组的电位会出现分布不均,且高次谐波的存在会影响电抗器绕组电场最强点的位置与强度;电抗器电场最强点在电抗器最外层包封的最外层绕组中部,场强最强点的电场强度较直流电压下增强。由此可见,高次谐波的存在会对电抗器绕组电场分布产生影响。

## 4 结语

本文建立了干式空心平波电抗器电位计算模型,分析了±660 kV 干式空心平波电抗器分别在直流电压、高次谐波电压以及联合作用下绕组的电场分布情况,通过计算,主要得出如下结论。

1) 由于干式空心平波电抗器绕组结构的影响,在直流电压下,电抗器绕组越到外层整体场强越大,最外层绕组电场强度比最内层绕组电场强度增大了约 24%。

2) 在高次谐波电压下,包封内绕组的场强分布主要集中在绕组的最外侧,最外层绕组电场最大值比最内层绕组电场最大值增大了约 20%,整体电场最强点出现在最外层包封内的最外层绕组中部;且由于电抗器绕组间自感与互感的影响,单个绕组上、下两端的匝间场强差最大,对绕组的匝间绝缘

危害较大;包封内两侧绕组的层间压差较大,对绕组层间的绝缘也产生一定的影响。

3) 本文结合仿真结果、干式空心平波电抗器实例及相关理论,认为高次谐波会对电抗器绕组的匝间绝缘和层间绝缘产生影响。高次谐波会使电抗器电场最强点位置和场强发生变化,且最强点集中在最外层包封。相较于纯直流电压,高次谐波会增加15%电场最强点的场强。因此,最外层包封易受电老化影响。本文结论对理解故障原因和改进绝缘具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 汪先进,周凯,赵世林,等.不同材料对变电站内三相空心电抗器磁场干扰的屏蔽效果研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):150-156.  
WANG Xianjin,ZHOU Kai,ZHAO Shilin, et al. Research for magnetic shielding effect of 3-phase air core reactor in substation by using different materials[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):150-156.
- [2] 张学友,董翔宇,葛健,等.基于模拟退火算法的特高压直流VDCOL控制环节优化方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):53-60.  
ZHANG Xueyou, DONG Xiangyu, GE Jian, et al. Optimization for VDCOL of high-voltage DC transmission system based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(4):53-60.
- [3] 廉玉欣,杨世彦,杨威.基于非常规平衡电抗器的直流侧谐波抑制方法[J].电工技术学报,2021,36(18):3957-3968.  
LIAN Yuxin, YANG Shiyan, YANG Wei. The harmonic reduction method at DC link based on unconventional interphase reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(18):3957-3968.
- [4] 李星汉,李永建,张长庚,等.考虑谐波损耗特性的干式平波电抗器热效应模拟与验证[J].高压电器,2021,57(9):58-65.  
LI Xinghan, LI Yongjian, ZHANG Changgeng, et al. Simulation and verification on thermal effects of dry-type smoothing reactor considering harmonics loss characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 58-65.
- [5] 毛颖科,张天枫,朱正一,等.±500 kV直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J].高压电器,2024,60(1):128-135.  
MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ± 500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(1):128-135.
- [6] 游帅,陈仁刚,王潇洋.35 kV干式空心电抗器烧毁故障原因分析及保护配置探讨[J].山东电力技术,2022,49(9):55-60.  
YOU Shuai, CHEN Rengang, WANG Xiaoyang. Burnout fault analysis and discussion on protection configuration for a 35 kV dry-type reactor[J]. Shandong Electric Power, 2022,49(9):55-60.
- [7] 孟文杰,张荣秋,蔡婧,等.浅谈一起750 kV单相并联电抗器局放超标分析[J].变压器,2022,59(1):73-75+21.  
MENG Wenjie, ZHANG Rongqiu, CAI Jing, et al. Analysis of a partial discharge exceeding standard of a 750 kV single-phase shunt reactor[J]. Transformer,2022, 59(1):73-75+21.
- [8] 王南,李东,周志强,等.一起500 kV高压电抗器内部过热故障案例分析[J].变压器,2022,59(2):72-75.  
WANG Nan, LI Dong, ZHOU Zhiqiang, et al. Case analysis of a 500 kV HV reactor internal overheating fault[J]. Transformer,2022,59(2):72-75.
- [9] 陈政,周鹏杰,周盛玮,等.特高压换流站交流滤波器电抗器故障分析及预防措施[J].江西电力,2024,48(3):40-43.  
CHEN Zheng, ZHOU Pengjie, ZHOU Shengwei, et al. Fault analysis and preventive measures of AC filter reactor in UHV converter station[J]. Jiangxi Electric Power,2024,48(3):40-43.
- [10] 董建新,舒乃秋,闫强强,等.干式空心并联电抗器过热性故障温度场耦合计算与分析[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(5):437-442.  
DONG Jianxin, SHU Naiqiu, YAN Qiangqiang, et al. Coupling calculation and analysis of temperature field of dry-type air-core shunt reactor during overheat fault[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(5): 437-442.
- [11] 周光远,曹继丰,蓝磊,等.±800 kV干式平波电抗器周围电场三维仿真[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(6):833-837.  
ZHOU Guangyuan, CAO Jifeng, LAN Lei, et al. Three-dimensional simulation of electric field around ±800 kV dry-type smoothing reactor[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2014,47(6):833-837.
- [12] 丁玉剑,张月华,周松松,等.±110 kV干式平波电抗器电场分布和操作冲击放电特性[J].电网技术,2017,41(11):3414-3419.  
DING Yujian, ZHANG Yuehua, ZHOU Songsong, et al. Study on electric field distribution and switching impulse discharge characteristics of ±110 kV dry-type smoothing reactor[J]. Power System Technology,2017,41(11):3414-3419.
- [13] 杨国华,王文豪,陈蕾,等.平波电抗器绝缘校核仿真的高效降阶算法研究[J].高压电器,2023,59(5):68-74+83.

- YANG Guohua, WANG Wenhao, CHEN Lei, et al. Efficient algorithm study of reduced order modeling for smoothing reactor insulation verification[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 68-74+83.
- [14] 彭庆军,姜雄伟,马仪,等.基于有限元方法的35 kV干式空心并联电抗器匝间电场分布研究[J].高压电器,2018, 54(2):147-152.
- PENG Qingjun, JIANG Xiongwei, MA Yi, et al. Analysis of 35 kV dry-type air-core reactors turn-to-turn field distribution based on the finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 147-152.
- [15] 奚晶亮,刘成柱,王国金,等.±1 100 kV户内平波电抗器均压装置表面电场分析与验证[J].电力勘测设计,2018 (3):43-47+63.
- XI Jingliang, LIU Chengzhu, WANG Guojin, et al. Surface electric field analysis and test verification of shielding fittings of ±1 100 kV smoothing reactors for indoor[J]. Electric Power Survey & Design, 2018(3): 43-47+63.
- [16] 毛艳,丁玉剑,郭贤珊,等.±1 100 kV PLC电抗器均压屏蔽装置的结构优化[J].高电压技术,2021,47(4):1436-1442.
- MAO Yan, DING Yujian, GUO Xianshan, et al. Structure optimization of grading and shielding devices for ±1 100 kV PLC reactor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1436-1442.
- [17] 吴彦霖,谭向宇,马仪,等.电场分布以及匝数偏差暂态电动力对干式空心并联电抗器影响的研究[J].高压电器,2016,52(10):99-107.
- WU Yanlin, TAN Xiangyu, MA Yi, et al. Study of the influence of electric field distribution and turns deviation transient electrodynamic force on dry-type air-core shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 99-107.
- [18] 敖明.户外干式空芯电抗器绝缘结构电场数值计算与分析[J].中国电力,1998,31(7):45-47.
- AO Ming. Test of tree discharge on surface of dry-type air-core reactors[J]. Electric Power, 1998, 31(7): 45-47.
- [19] 汪洋.空心电抗器的电场分布与绝缘性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- WANG Yang. Study on electric field distribution and insulation performance of air-core reactor[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [20] 陈莉娟.空心电抗器波过程计算及结果分析[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
- CHEN Lijuan. Wave process calculation and result analysis of air-core reactor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [21] 刘虹.干式空心并联电抗器电压及电场分布特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- LIU Hong. Study on voltage and electric field distribution characteristics of dry-type air-core shunt reactor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [22] 汤浩,贾鹏飞,李金忠,等.特高压直流干式平波电抗器多谐波特征参量测试技术及应用[J].高电压技术,2017, 43(3):859-865.
- TANG Hao, JIA Pengfei, LI Jinzhong, et al. Testing technology of multi-harmonic characteristic parameters and its application for UHVDC dry-type smoothing reactors[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 859-865.