

# 一种新型变频串联谐振耐压试验的建模仿真

时振堂<sup>1</sup>, 李红叶<sup>1</sup>, 李尧<sup>2</sup>, 王志强<sup>2</sup>, 刘征<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石化大连石油化工研究院, 辽宁 大连

<sup>2</sup>大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连

Email: zhengliu@dlut.edu.cn

收稿日期: 2020年11月18日; 录用日期: 2020年12月1日; 发布日期: 2020年12月8日

---

## 摘要

本文论述了传统的变频串联谐振耐压试验的基本原理, 针对其存在的缺点, 设计了一种新型的变频串联谐振耐压试验方法。本方案取消了励磁变压器的使用, 并加入了介质损耗测量功能, 解决了传统的变频串联谐振耐压试验成本高、体积大、试验结果不具有整体性的问题。通过MATLAB仿真验证了新型的变频串联谐振试验的正确性和可行性。

## 关键词

新型变频串联谐振耐压试验, 介质损耗检测, 仿真模型

---

# Modeling and Simulation of a New Frequency Conversion Series Resonance Withstand Voltage Test

Zhentang Shi<sup>1</sup>, Hongye Li<sup>1</sup>, Yao Li<sup>2</sup>, Zhiqiang Wang<sup>2</sup>, Zheng Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sinopec Dalian Petrochemical Research Institute, Dalian Liaoning

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Email: zhengliu@dlut.edu.cn

Received: Nov. 18<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 1<sup>st</sup>, 2020; published: Dec. 8<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This paper discusses the basic principles of the traditional variable frequency series resonance voltage test, and in view of its shortcomings, a new type of variable frequency series resonance

voltage test is designed. This solution eliminates the use of excitation transformers and adds a dielectric loss measurement function, which solves the problems of high cost, large volume, and inconsistency of the test results of the traditional variable-frequency series resonance withstand voltage test. The system was verified by MATLAB simulation of the new frequency conversion series resonance test is correct and feasible.

## Keywords

New Frequency Conversion Series Resonance Withstand Voltage Test, Dielectric Loss Detection, Simulation Model

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

交联聚乙烯电缆(Cross-Linked Polyethylene Insulated Cable, XLPE)由于具有良好的耐热性能和优异的电气性能,广泛地应用于工业检测、配电网和其他大容量用电领域。在实际应用中,由于电缆本身的特性以及所在的工作环境等因素,电缆的绝缘性能会因为机械损伤、电腐蚀或化学腐蚀而产生不同形态的老化[1]。研究表明,对电缆性能破坏最为严重的是水树枝老化[2]。水树枝老化是指电缆运行时,在电场的作用下,绝缘层中的微量水分产生树枝状的劣化[3]。因此为了保证电力系统的安全性,对电缆进行耐压试验是十分必要的[4]。众多的研究机构也提出了很多电缆绝缘性能的检测方法,其中直流耐压试验会在电缆的内部积累大量电荷,对电缆性能造成破坏;工频耐压试验所需电源容量大,设备笨重[5];交流变频串联谐振耐压试验也存在成本高,体积大,试验结果不具有整体性等缺点[6]。

本文提出一种新型的变频串联谐振耐压试验方法,对传统的变频串联谐振耐压试验装置进行了改进,减少了励磁变压器的体积,克服了设备笨重、成本高等缺点,并且可以通过数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)对被试品的介质损耗角进行测量,反映了电缆的整体绝缘情况。

## 2. 变频串联谐振耐压试验

### 2.1. 变频串联谐振耐压试验原理

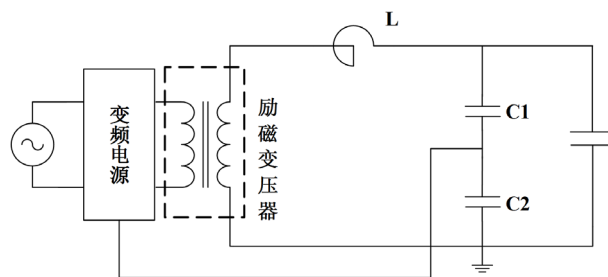


Figure 1. Series frequency conversion resonance test device

图 1. 变频串联谐振试验装置

如图 1 所示,传统的变频串联耐压试验装置主要由输入电源,变频电源,励磁变压器,电抗器,电容分压器和被试品组成。变频电源将输入的工频试验电源变为频率可调节,电压幅值可调节的连续交流

电[7]。励磁变压器的一次侧和变频电源相连接，二次侧和谐振回路连接，升高变频电源输出的电压至合适的数值。谐振电抗器是变频串联耐压装置的重要组成部分，根据被试品的大小选择串联或者并联电抗器，组成谐振电抗器组。

改变变频电源的输出电压和频率，使励磁变压器二次侧的谐振电抗器和被试品发生串联谐振。当系统发生串联谐振后，升高变频电源的输出电压，使输出电压达到耐压试验的要求值，并开始试验。

## 2.2. 变频串联谐振耐压试验缺点

虽然上述的变频串联耐压试验方法励磁变压器输出的电压仅为试验电压的  $1/Q$ ，降低了对试验装置的要求，但其存在以下缺点：

1) 需要使用励磁变压器来升高变频电源输出的电压。需要在系统中使用励磁变压器，且要求必须在 20 Hz 到 300 Hz 之间工作。增加部件成本的同时，降低了装置可靠性。

2) 当对被试品进行耐压试验时，需要对被试品进行长时间的耐压试验。试验要求变频电源长时间输出大电流，大幅缩减了变频电源的使用寿命。

3) 变频串联耐压试验的试验结果不具有整体性，并且属于破坏性试验，会对被试品性能造成一定程度的损坏，从而影响电缆的性能寿命。介质损耗的测量试验具有整体性，并且属于非破坏性试验，相比有可能影响实验品寿命的耐压试验来说，测量介质损耗对实验品的损坏更小[8]。

## 3. 新型的变频串联谐振耐压试验

### 3.1. 新型变频串联谐振耐压试验系统总体结构及工作原理分析

如图 2 所示，为本文研究的新型变频串联耐压试验系统，包括交流电源，高压直流单元，高压逆变单元，谐振电抗器，电容分压器，DSP 控制器和被试品。其中  $L$  为谐振电抗器， $C_1$  为分压器的高压臂， $C_2$  为分压器的低压臂，被试品由电容和大电阻并联表示。

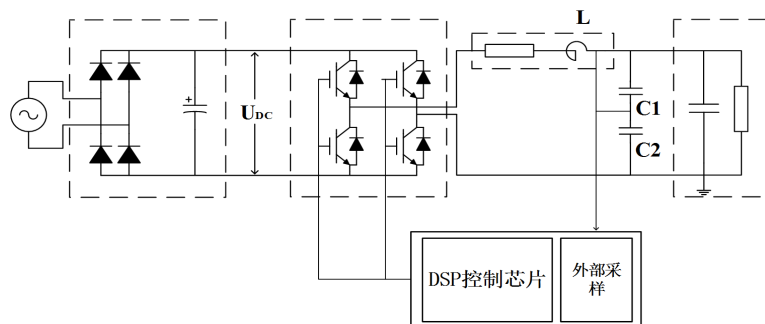
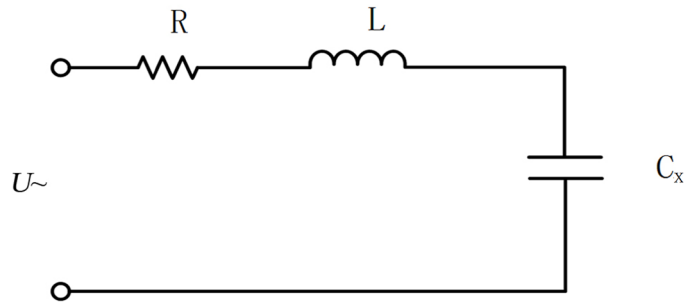


Figure 2. A new series frequency conversion resonance test device

图 2. 新型的串联变频谐振试验装置

工频交流电源接入高压直流单元，高压直流单元输出高压直流电。高压逆变单元将得到的高压直流电逆变为交流试验电压。先将这个交流电调到一个较小的值，作用于谐振电抗器和被试品，再调节输出电压的频率使谐振电抗器和被试品发生谐振，此时被试品上的电压为输出电压的  $Q$  倍。再升高输出交流电压的幅值，使被试品上的电压达到耐压试验要求的值。

本系统通过给高压逆变单元施加一个高压直流电取代了励磁变压器的使用，减小了设备的体积，降低了成本，减小了高压逆变单元的输出电流，使设备能进行更长时间的耐压试验。同时本装置利用 DSP 的快速计算能力可以实时进行电缆的介质损耗检测，提高对电缆整体绝缘性能的检测水平。



**Figure 3.** Novel frequency conversion series resonance equivalent circuit  
**图 3.** 新型变频串联谐振等效电路

如图 3 所示，为串联变频谐振法的等效电路图，其中  $U$  是高压逆变单元的输出电压； $L$  是高压谐振电抗器； $C_x$  是被试品电容； $R$  是试验回路的等效电阻，调节变频电源的电压和频率，使回路满足试验条件。

推得串联谐振角频率为：

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC_x}} \quad (1)$$

谐振频率为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_x}} \quad (2)$$

此时试品上的电压：

$$U_c = U_L = I \cdot X_L = \frac{U}{R} X_L = QU \quad (3)$$

其中  $Q$  为品质因数，输出功率为

$$S = UI = \frac{Q_c}{Q} \quad (4)$$

根据上式可知，当谐振时被试品两端的电压与谐振电抗器两端电压相等，为励磁变压器输出电压的  $Q$  倍。试验容量为新型的变频串联耐压试验所需的电源容量的  $Q$  倍，提升了系统工作效率。

### 3.2. 逆变单元的调制方式

高压逆变单元要输出频率幅值均可变的交流电压，需要采用一定的调制方式，本文采用的是正弦脉冲宽度调制技术(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)。此方法选用等腰三角形波作为载波，给定的标准正弦波作为信号波，当载波与信号波相交时，开通或者关断开关器件，得到一组幅值大小相等并且脉冲宽度成正弦值变化的矩形脉冲[9]。

根据载波的极性，SPWM 控制方式有双极性和单极性控制两类。本文采用的控制方式是双极性控制方式，利用一个正弦调制波与一个高频三角载波相比较以产生开通关断信号，输出电压在  $+U$  和  $-U$  之间变化。当信号波大于三角形载波时，输出电压为  $+U$ ，当信号波小于三角形载波时，输出电压为  $-U$ 。

如图 4 所示，为本文使用的双极性 SPWM 调制波形图。在调制信号  $u_r$  的一个周期内，SPWM 控制波是正负不断变化的。当  $u_r > u_c$  时，S1, S4 导通，S2, S3 关断，输出电压为  $+U_d$ ；当  $u_r < u_c$  时，S1, S4 关断，S2, S3 导通，输出电压为  $-U_d$ 。单相 H 桥每个桥臂的两个开关管的驱动信号相反，呈互补驱动模

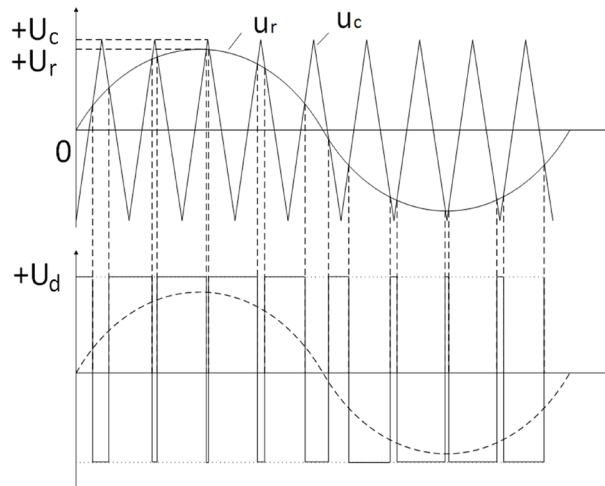


Figure 4. Bipolar SPWM modulation waveform  
图 4. 双极性 SPWM 调制波形图

式。对 SPWM 输出电压作如下分析, 设三角形载波的幅值为  $U_c$ , 角频率为  $\omega_c$ , 斜率为  $+\frac{2U_c\omega_c}{\pi}$  和  $-\frac{2U_c\omega_c}{\pi}$ , 信号波的幅值为  $U_r$ , 频率为  $\omega_r$ 。那么三角载波可以用式(5)如下表示:

$$u_c = \begin{cases} -(\omega_c t - 2\pi k - 2\pi)\frac{2U_c}{\pi} - U_c, & 2\pi k + \pi \leq \omega_c t \leq 2\pi k \\ (\omega_c t - 2\pi k)\frac{2U_c}{\pi} - U_c, & 2\pi k \leq \omega_c t \leq 2\pi k + \pi \end{cases} \quad (5)$$

其中  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

正弦调制波的数学方程式为:

$$u_r = U_r \sin(\omega_r t - f) \quad (6)$$

令载波比大于 1, 调制度  $\frac{U_r}{U_c} = M$ , 对输出电压  $u$  做傅里叶分解得到输出电压的基波值为:

$$u_1 = MU_d \sin(\omega_r t - \phi) \quad (7)$$

由式(7)可得, 输出电压的频率即为正弦调制波的频率, 输出电压的幅值  $M$  由载波和调制波的幅值共同决定。所以, 当载波幅值一定时, 输出电压的幅值和频率就由正弦调制波的幅值和频率来决定。本文采用上述方式来控制输出电压的幅值和频率。

### 3.3. 介质损耗检测

对于电力电缆的绝缘性能检测的试验项目来说, 耐压试验只能对电缆的局部进行绝缘性检测, 对试验的电缆具有破坏性, 而介质损耗测量能够对电缆的整体进行绝缘性检测, 所以有必要同时进行这两种试验[10]。

如图 5 所示为本系统进行介质损耗检测的程序流程图, 当对所述被试品只进行介质损耗的测量时, 在低压条件下通过采样电路对被试品上的电压和电流进行采样, 将采样得到的值发送至 DSP 处理器, 通过 DSP 程序计算得到电压和电流的相位, 设计触发函数, 当电流的相位为  $\pi$  时, 将电压和电流的相位值做差, 差值的余角的正切值即为介质损耗角的正切值。

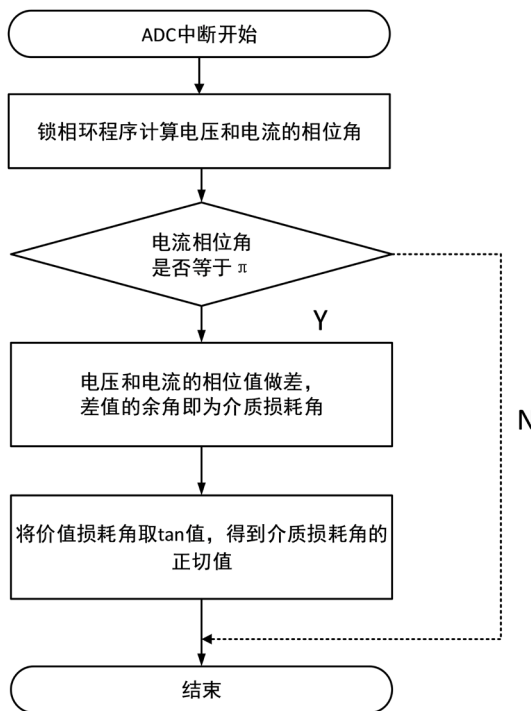


Figure 5. Flow chart of dielectric loss detection program  
图 5. 介质损耗检测程序流程图

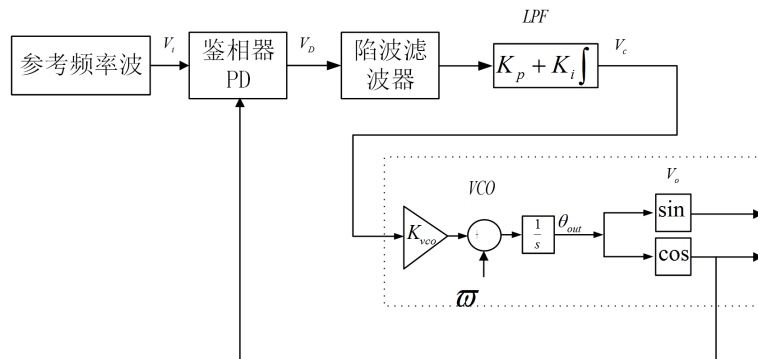


Figure 6. Structure of notching filter  
图 6. 陷波滤波器结构图

如图 6 所示，在相位的计算方面本文采用的方式是基于陷波滤波器的锁相环，最基本的锁相环通常由鉴相器(Phase Detector, PD)、环路滤波器(Loop Filter, LF)和压控振荡器(Voltage Control Oscillator, VCO)三部分组成。但是在鉴相器输出后由于存在二倍的信号波干扰频率，所以需要滤除这部分干扰。陷波滤波器可用于相位检测模块的输出，它可以很好地衰减二倍的信号波频率分量，得到准确的相位值[11]。

#### 4. 新型的变频串联谐振耐压试验参数选择与仿真

##### 4.1. 实验系统主电路参数选择

变频串联耐压试验装置主要用于 6 kV 至 35 kV 电压等级的 XLPE 电缆的绝缘性检测，系统的谐振频率由高压电抗器的电感量和电缆的电容量决定[12]。若要选择试验系统的参数，则必须对交联聚乙烯单芯电缆的电容量和他的试验电压标准进行分析。6~35 kV 电压等级的 XLPE 电缆的电容量如表 1 所示[13]。

**Table 1.** XLPE single core cable capacitance ( $\mu\text{f}/\text{km}$ )**表 1.** XLPE 单芯电缆电容量( $\mu\text{f}/\text{km}$ )

截面积/ $\text{mm}^2$	6/10 kV	8.7/10 kV	12/20 kV	21/35 kV	26/35 kV
35	0.212	0.173	0.152	—	—
50	0.237	0.192	0.166	0.118	0.114
70	0.270	0.217	0.187	0.131	0.125
95	0.301	0.240	0.206	0.143	0.135
120	0.327	0.261	0.223	0.153	0.143
150	0.358	0.284	0.241	0.164	0.153
185	0.388	0.307	0.267	0.180	0.163
240	0.430	0.339	0.291	0.194	0.176
300	0.472	0.370	0.319	0.211	0.190
400	0.531	0.418	0.352	0.231	0.209
500	0.603	0.438	0.386	0.243	0.239
630	0.667	0.470	0.415	0.271	0.262

由表 1 可知, 电缆的额定电压表示为  $U_0/U(U_m)$ , 其  $U_0$  为电缆设计用的导体对地或对金属屏蔽之间的额定工频电压;  $U$  为电缆设计用的导体间的额定工频电压;  $U_m$  为设备科承受的最高系统电压值。根据  $C = LC_m$ , 电缆的电容量为电缆长度和电缆每千米的电容量的乘积。如果知道电缆的长度, 那么根据表 1 即可得到电缆的电容量[14]。

由表 2 可知, 对于 6~35 kV 电压等级的 XLPE 电缆, 试验所需的试验耐压值为 10~52 kV。

**Table 2.** AC withstand voltage of XLPE cable**表 2.** XLPE 电缆的交流耐压试验电压

电缆额定电压/kV	交流试验电压/kV		预防性试验电压/kV		
	$U_0/U$	倍数	电压值	倍数	电压值
6/6		$2 U_0$	12	$1.6 U_0$	10
6/10		$2 U_0$	12	$1.6 U_0$	10
8.7/10		$2 U_0$	17.4	$1.6 U_0$	14
12/20		$2 U_0$	24	$1.6 U_0$	19
21/35		$2 U_0$	42	$1.6 U_0$	34
26/35		$2 U_0$	52	$1.6 U_0$	42

在实验中我们选用三台相同的高压电抗器组成电抗器组进行实验。电抗器的参数如下所示:

额定电感: 42 H

额定电压: 18 kV

直流电阻: 250  $\Omega$

额定电流: 2 A

当三台电抗器并联接入试验回路时, 电感量为 14 H, 谐振时可以满足 6 kV 电缆试验最大电容为

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_{\min}^2 \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 30^2 \times 14}} \quad (8)$$



当三台电抗器串联接入试验回路时，电感量为 126 H，谐振时可以满足 35 kV 电缆试验最大电容为

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_{\min}^2 \frac{1}{4 \times \pi^2 \times 30^2 \times 126}} \quad (9)$$

### 4.2. 实验系统主电路仿真及分析

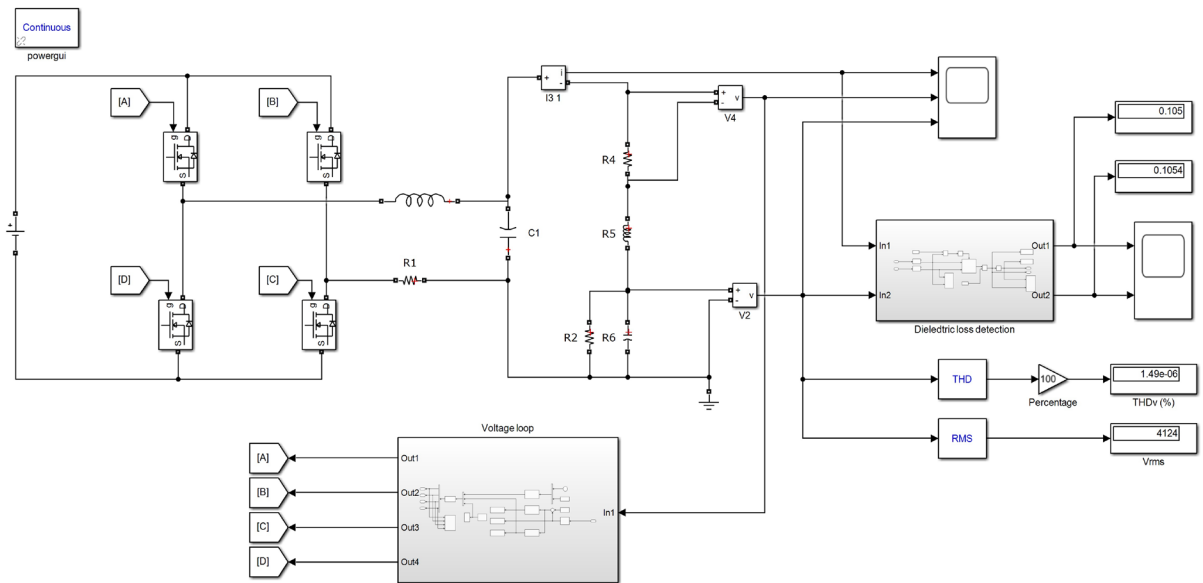


Figure 7. Main circuit structure of test system  
图 7. 试验系统主电路结构

如图 7 所示，为本文研究的新型变频串联谐振耐压试验系统的主电路结构图，包括高压直流输入电源，4 个 IGBT 模块组成的 H 桥，低通 LC 滤波电路，谐振电抗器和被测电缆。控制部分包括电压控制回路和介质损耗检测部分。

### 4.3. 实验系统电压控制仿真及分析

由 3.2 节可知，对于 SPWM 调制方式来说，可以通过调制正弦调制波的幅值和频率来控制输出电压的幅值和频率，但是这种方式属于开环控制，会出现较大的误差甚至有可能出现危险的情况。本文设计了电压闭环反馈控制系统精确的控制了输出电压的大小和幅值。

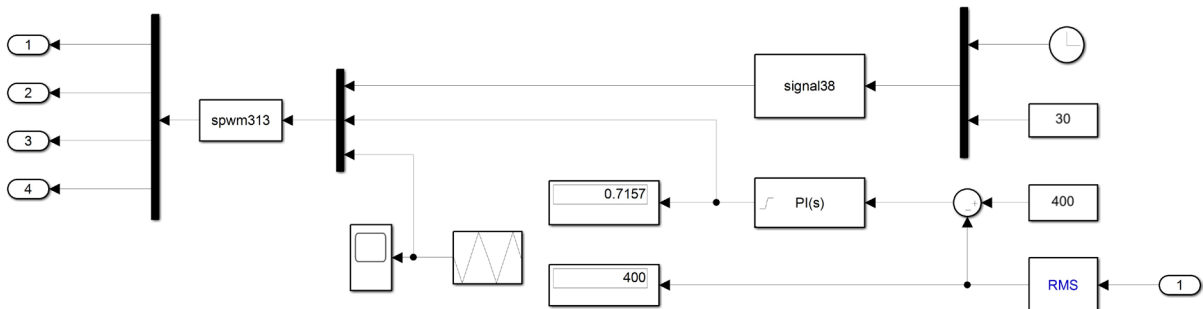


Figure 8. Test system voltage control loop structure  
图 8. 试验系统电压控制环结构



如图 8 所示为试验系统的电压控制结构图, 本控制方式主要利用了 Simulink 中的 S-function 的函数功能, 在 S-function 中通过计算得到了一个标准的正弦波作为调制波, 将调制波与频率为 20 k 的三角载波作比较, 得到 SPWM 波形, 驱动波形如下图 9 所示。

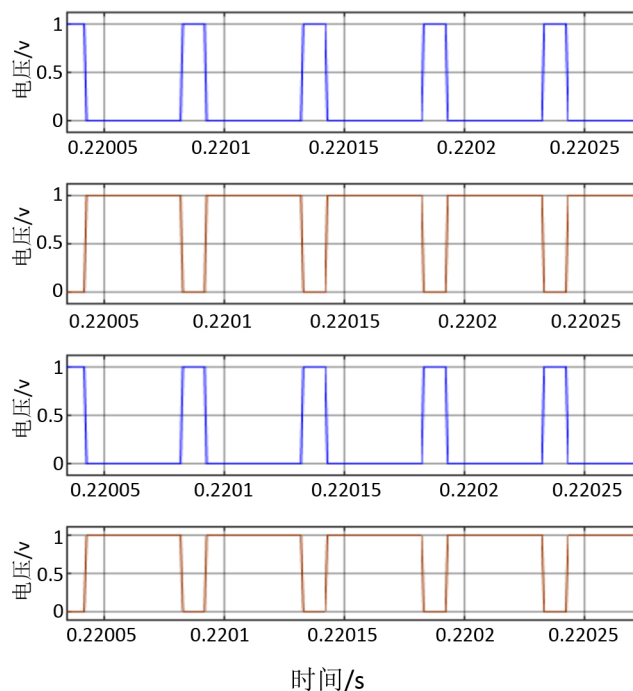


Figure 9. Drive waveform  
图 9. 驱动波形

将输出等效电阻上的电压值采样, 取有效值与给定值做差, 把差值通过 PI 调节得到的 0 到 1 的一个系数, 将这个系数与标准正弦调制波相乘从而控制输出电压的大小和频率。

任选额定电压为 6/6 kV, 截面积为  $1 \times 120 \text{ mm}^2$ , 长度为 0.713 km 的 XLPE 电缆接入试验电压为 12 kV 的试验电路, 此时电缆上的总电容为

$$C = LC_m = 0.713 \times 0.327 \times 10^{-6} = 0.233 \times 10^{-6} \text{ F} \quad (10)$$

为了保险起见, 使用三台高压电抗器串联的方式接入耐压试验电路, 电感量为 126 H, 电路上的等效电阻值为 750  $\Omega$ , 谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{126 \times 0.233 \times 10^{-6}}} \approx 30 \text{ Hz} \quad (11)$$

设置输出电压为 400 V, 即电阻两端电压为 400 V, 品质因数 Q 为

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{30 \times 2 \times \pi \times 126}{750} \approx 30 \quad (12)$$

则此时 XPLE 电缆两端电压为 12 kV, 如下图所示为试验电流和电压的波形图。

由上图 10 可得, 从上至下波形依次为回路电流波形, 电阻电压波形, 电缆电压波形。最终输出的电阻电压有效值为 400 V, 电缆电压有效值为 1200 V, 符合预想的结果, 至于电流略小的原因为谐振的并不完全, 回路依旧存在电抗。而且通过图 10 可以看出输出波形平滑稳定, 这是因为串联谐振回路相当于一个空载的 LC 滤波电路, 可以使输出波形更加平滑。

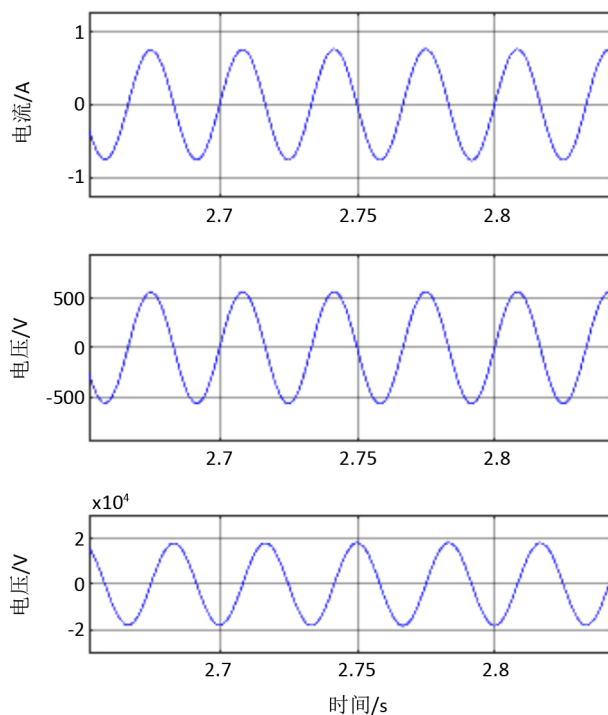


Figure 10. Waveform of test result  
图 10. 试验结果波形图

#### 4.4. 实验系统介质损耗检测仿真及分析

由 3.3 节可知，本装置还可以根据不同的试验要求，进行进一步的介质损耗检测来确定电缆绝缘性的整体情况。因此，仿真如下图 11 所示：

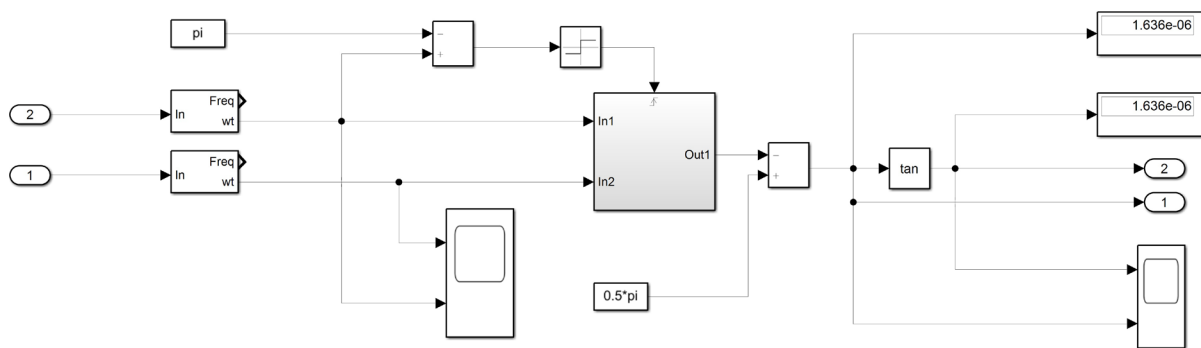
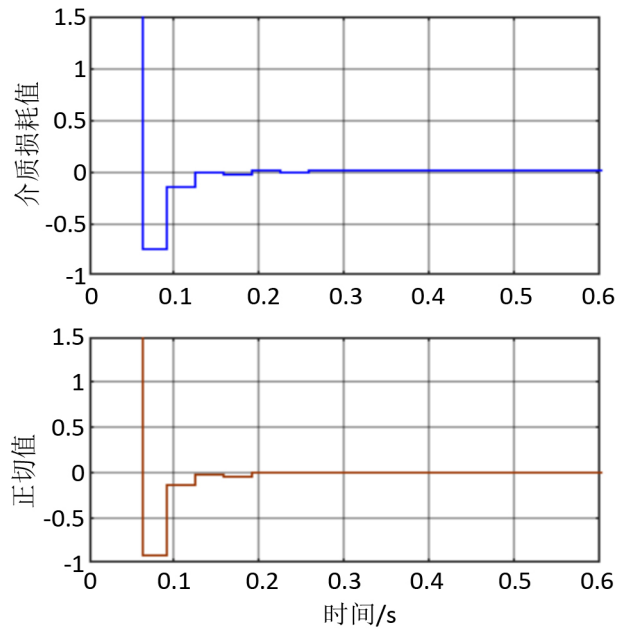


Figure 11. Dielectric loss detection structure  
图 11. 介质损耗检测结构

本装置通过检测电缆被试品两端的电压和电流相位来得到两者的相位差，设置一个触发函数对电流相位进行过零点检测。当电流相位为  $\pi$ ，触发函数工作时，在触发函数中计算电缆被试品的介质损耗角及其正切值。

当电缆被试品处于理想情况下即电缆并联电阻为无穷大时，仿真结果如图 12 所示。第一个波形反映的是介质损耗角，第二个波形反映的是介质损耗角的正切值。当电缆被试品处于理想情况下时，介质损耗角及其正切值均为零。

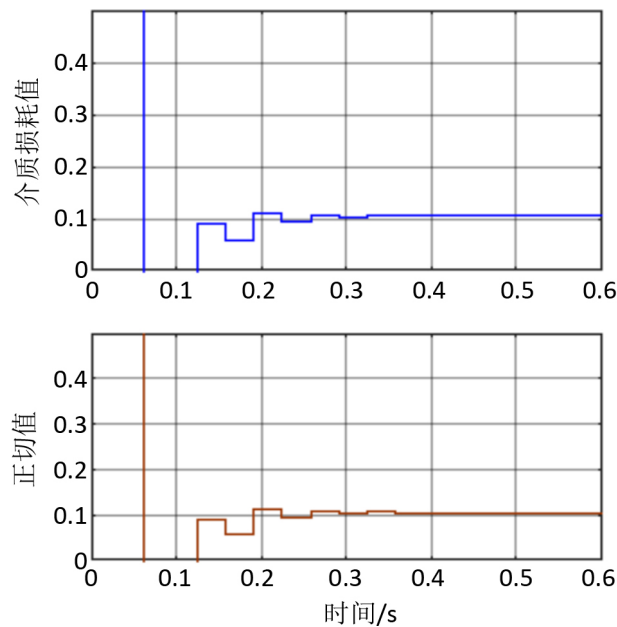


**Figure 12.** Dielectric loss test results under ideal conditions  
**图 12.** 理想情况下介质损耗检测结果

当电缆被试品的并联等效电阻为 226,000 Ω，等效电容为 0.000000233 F，谐振频率为 30 Hz 时，系统的仿真结果如图 13 所示。第一个图形为介质损耗角，第二个图形为介质损耗角的正切值，大小均为 0.1。根据公式计算：

$$\tan \theta = \frac{U/R}{U \omega C_p} = \frac{1}{\omega RC_p} = \frac{1}{2 \times \pi \times 30 \times 226000 \times 2.33 \times 10^{-7}} \approx 0.1 \quad (13)$$

$$\gamma = \arctan \theta \approx 0.1 \quad (14)$$



**Figure 13.** Dielectric loss test results under non-ideal conditions  
**图 13.** 非理想情况下介质损耗检测结果

由公式(13)可得计算得到的介质损耗角的正切值为 0.1, 由公式(14)可得介质损耗角的值为 0.1, 与仿真结果相同。

## 5. 结论

本文论述了传统的变频串联谐振耐压试验的基本原理, 针对其存在的缺点提出了一种新型的变频谐振串联耐压试验的测量方法, 该方法基于 SPWM 的逆变电路, 是对目前变频串联谐振电路的改进, 为交联聚乙烯电缆绝缘性的检测提供了一种新的方法。所设计的系统通过给高压逆变单元施加一个高压直流电取代了励磁变压器的使用, 减小了设备的体积, 降低了成本, 减小了高压逆变单元的输出电流, 使设备能进行更长时间的耐压试验。同时本装置利用 DSP 的快速计算能力可以实时进行电缆的介质损耗检测, 提高对电缆整体绝缘性能的检测水平; 并且通过理想与非理想状态下的介质损耗仿真结果对所提出方法进行了有效验证。另外可以通过 DSP 强大的处理能力分析测量变频谐振电压下的介质损耗是否合适, 对电缆的绝缘性检测有一个更全面的试验。

## 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] 徐德光. 交联聚乙烯电力电缆耐压试验及其电路模型研究[J]. 南阳理工学院学报, 2016, 8(6): 53-57.
- [3] Liu, F., Liu, P., Yang, L., et al. (2012) Study of Siloxane Injection Technology on XLPE Cables for Water Tree Aging. *Applied Mechanics & Materials*, **246-247**, 1149-1153. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.246-247.1149>
- [4] 刘铁松, 刘宸光, 马钧, 等. 基于 XLPE 电缆老化性能的研究[J]. 中国战略新兴产业, 2019(15): 1.
- [5] 范磊, 徐振磊. 串联谐振装置在电力高压试验中的运用研究[J]. 低碳世界, 2015(3): 47-48.
- [6] Ting, Y., Bingfu, X., Qiang, G., et al. (2016) The Practical Inquiry of the AC Withstand Voltage Test Technology of the Same Frequency and Phase Based on the GIS Equipment. *Proceedings of the 2015 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, Xi'an, December 2015, 696-699.
- [7] 李宁, 桑云. 电气试验在变压器故障分析中的应用分析[J]. 工程技术: 文摘版, 2016(11): 286.
- [8] Wang, H., Chen, Y., Peng, X., et al. (2019) A Novel On-line Monitoring System for High Voltage Cable Dielectric Loss Detection. *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Macao, 1-4 December 2019, 1-5. <https://doi.org/10.1109/APPEEC45492.2019.8994744>
- [9] 张礼亮, 王青华, 李冬冬, 等. 风机变频改造后故障原因分析[J]. 发电设备, 2017, 31(4): 230-233.
- [10] Chu, X. (2013) Measurement Analysis of Dielectric Loss  $\tan\delta$  on Cable Based on DETAL Testing Instrument. *International Journal of Digital Content Technology & Its Applications*, **7**, 531-537.
- [11] Xu, L., Han, Y., Zhou, L.D., et al. (2009) Novel Phase-Locked Loop Using Adaptive Notch Filter. *Elektronika ir Elektrotechnika*, **92**, 7-12.
- [12] Lei, M., Wang, S., Guo, Y., et al. (2018) An Automatic Implementation Scheme of In-Field Power Frequency Series Resonance System. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, 20-22 October 2018, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EI2.2018.8582377>
- [13] 袁凯. 变频串联谐振耐压试验系统的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [14] Hsu, Y. (2007) AC/DC Testing Systems for High Voltage Power Cables. Ph.D. Thesis, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung.