

# 一种变频串联谐振耐压试验装置\*

盛瀚民, 肖建

(西南交通大学电气工程学院 成都, 610031)

**摘要:** 针对XLPE 电力电缆耐压测成本高、操作复杂等问题, 设计了一种变频串联谐振耐压试验装置。利用串联谐振电路的升压原理, 构建了硬件电路, 通过仿真探讨了谐振点的选取问题。对于普通串联谐振耐压测试装置寻找谐振点慢、精度低的问题提出了一种解决方案。仿真结果表明, 该方法能精确地确定谐振点, 装置输出波形可靠性好, 谐波分量少, 具有良好的性能。

**关键词:** 耐压测试; 单相全桥; 快速傅里叶; 串联谐振

**Abstract:** Designed a kind of serial resonance voltage withstand test device for the problems of high cost and controlling complexity in XLPE power cable withstand tests. Took the advantage of the principle of network, built the hardware circuit, discussed some key problems through simulation. Created a method to improve the accuracy and the efficiency of general test device. Simulation results show that this method is accurate and efficient. The output waveform has a good performance.

**Key words:** Withstand test ; Single-phrase full-bridge ; FFT ; Series resonant

**中图分类号:** TM83

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-9227(2012)05-0149-03

## 0 引言

XLPE 电力电缆有着良好的物理性能与电气性能, 得到广泛应用。在实际存储、运输或应用过程中可能发生机械损伤、电腐蚀或化学腐蚀而造成绝缘破坏<sup>[1-2]</sup>, 给电力系统稳定运行带来了安全隐患。根据中华人民共和国国家标准<sup>[3]</sup>和 IEC 标准<sup>[4]</sup>, XLPE 电力电缆需要定期进行耐压测试<sup>[5]</sup>。目前广泛采用的是直流耐压测试方式<sup>[6]</sup>。由于 XLPE 电力电缆的绝缘材料特性, 传统的直流耐压测试方式不能真实模拟电力电缆实际工作情况, 同时积累的参与电荷还可能导致绝缘电缆击穿<sup>[7]</sup>。简单的实现交流耐压测试方式是直接升压进行工频耐压测试, 但该种方式其装置往往体积大、重量高, 造价昂贵<sup>[8]</sup>。串联谐振耐压试验方式是为了满足高压电力电缆耐压测试需要, 结合串联谐振电路升压原理产生的一种解决方案。文献<sup>[9]</sup>介绍了一种串联谐振耐压测试解决方案, 速度较快, 但对处理器的计算要求高, 并且受外界环境影响较大。文献<sup>[10]</sup>提出可变电抗器调节范围过大会使得电抗器工作范围非线性特性增大, 产生高次谐波引起输出电流波形畸变。考虑到高压电抗器铁心磁化曲线可选择范围较小, 设计采用固定电抗器的方式减少高次谐波成分, 降低波形畸变。

本文提出一种串联谐振耐压试验装置, 由电源、谐振电路与控制器三部分组成, 通过硬件与算法相结合的方式减少计算量, 缩短测试时间。变频串联谐振耐压试验方式工作在谐振点状态下试验电容上电压为输入电压的 Q 倍(式 1), 准确确定谐振点的位置对控制电压放大倍数, 对减少电源容量有着重要意义。通过 Simulink 搭建仿真模型对

主电路进行仿真分析, 优化了谐振点选择方式。FFT 算法是离散傅里叶变换的一种高效算法<sup>[11-12]</sup>, 利用 FFT 法分析了谐波测量, 以保证谐波分量在不另加滤波电路的情况下达到试验要求。

## 2 系统设计

### 2.1 设计思路

变频串联谐振耐压试验装置通过整流、逆变、升压、谐振这四个过程实现市电到耐压试验交流电的转换。通过控制逆变过程调节输出电流频率, 单相全桥逆变电路由控制电路输出的 SPWM<sup>[13]</sup> 信号控制。得到的 SPWM 信号经过滤波升压后输入串联谐振耐压试验系统。串联谐振系统发生谐振时, 电容上的电压值是谐振试验系统输入电压的 Q 倍, Q 通常大于 20, 大为减少了耐压测试设备对电源的需求, 从而减小了设备的体积与成本。

正弦脉宽调制电路产生频率可调的 SPWM 波作为单相全桥逆变电路的控制信号。SPWM 波产生的基本原理是将一个较高频率的等腰三角波与正弦波通过比较得到的。产生的信号输入到 IGBT 的栅极, 逆变电路输出电流的频率与控制信号频率保持一致。

串联谐振电路的品质因数计算公式如下,

$$Q = \frac{U_C}{U_S} = \frac{U_L}{U_S} = \frac{\omega_0 L}{R_s} = \frac{1}{\omega_0 C R_s} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

其中  $U_C$  与  $U_L$  分别为电容电感两端电压,  $U_S$  为谐振系统输入电压,  $R_s$  为串联电阻。

### 2.2 谐振元件参数设计

XLPE 电力电缆是在谐振电路中相当于一个电容。谐振系统的电阻来自于系统的电阻与根据需求所加电阻的和, 根据(1)选用电抗器时适当增大电感值可获得更大的品质因数。在一般现场试验中, 单个电抗器不能满足试验

收稿日期: 2012-07-19

作者简介: 盛瀚民(1989-), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统与计算机控制。

\*基金项目: 国家自然科学基金(51177137, 61134001); 中央高校基本科研业务专项资金(SWJTU11CX034)

电压等级, 需要把多个相同电抗器串联, 串联后电感值如公式(2)。

$$L_n = knL \quad (2)$$

其中,  $k$  为互感系数;  $n$  为电抗器个数;  $L$  为单个电抗器电感值。

电缆在谐振系统中相当于一个大电容, 具体参数可以根据电缆参数表查表求得。串联谐振系统的电阻主要分为两部分, 一部分为系统电阻, 是由变压器的励磁电阻、电缆电阻、电抗器电阻所组成的, 另一部分是所配电阻, 根据式(1)维持品质因数在20以上进行调整。为了验证设计的有效性, 选择一种单芯电缆为例, 表1为电缆厂提供的一种XLPE电力电缆参数。

表1 测试选用的单芯电缆的参数

导体标称截面 ( $mm^2$ )	额定电压 ( $kV$ )	每相电容 ( $\mu f/km$ )
300	21/35	0.3485

选用的电抗器规格为18kV, 额定电流2A, 单个电感为55.4H。35kV, XLPE电力电缆耐压测试电压为52.5V, 需要三个电抗器串联。电感如公式(3)。

$$L=3L' \times 1.15=3 \times 55.4 \times 1.15=191.13H \quad (3)$$

以1km电缆进行耐压测试。根据表1得到1km该种电容值为0.3485  $\mu f$ 。第3节将用以上算法得到的参数构建仿真模型进行验证。现场接线布置示意图如图1。

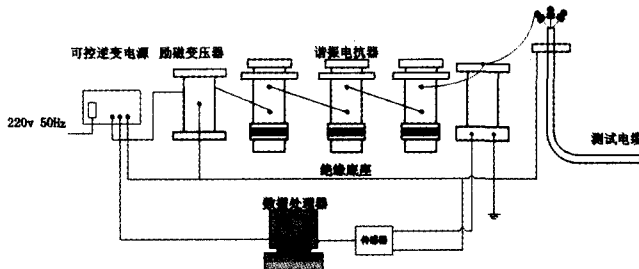


图1 串联谐振耐压试验接线图

### 2.3 工作流程

系统的工作流程如图2。

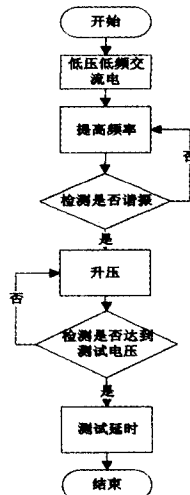


图2 系统工作流程图

测试过程如下, 逆变电源输出低电压、低频率交流电。低压输入以减少能耗并提高安全性。由低频逐渐升高, 通过电压有效值波形判定谐振电路工作状态。工作在谐振点状态下试验电容上的电压幅值最大。当检测到电路达到谐振状态时, 记录谐振点大小并保持谐振工作状态。提高直流源输入电压, 直到试验电容上电压达到所需试验电压, 保持输入状态即可达到所需的试验电压, 然后进行延时以完成耐压测试。

### 3 仿真及其结果

#### 3.1 系统有效性验证

选用Simulink作为开发工具, 并使用Embedded MATLAB模块在嵌入式系统中调用执行MATLAB算法。首先根据上文介绍的参数选择方案构建模型。输入频率随时间增加的交流电压, 得到不同频率下的电压有效值波形, 如图3所示。

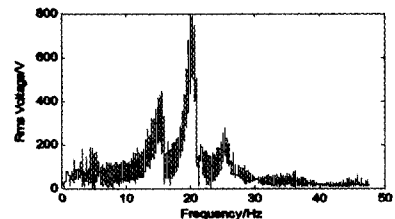


图3 不同频率下的电压有效值

该图表明, 随着频率逐步增加, 加载于试验电容上电压会逐步发生变化。当试验品上电压最高时谐振电路工作在谐振状态。在频率升高过程中出现了多个极点, 故通过极点选择谐振点的方式虽然节省时间, 但可能误判谐振点的位置。而根据有效电压最大值判定谐振点保证了所选择的工作位置在谐振点附近。

图3中取得的电压最大值对应的频率为20.30Hz。以该频率输入得到的有效值电压波形如图4, 通过反复测试, 发现该频率要略高于谐振频率。因为设定的频率改变时间小于0.5秒, 而从图4中可以看出谐振电路稳定时间要超过一秒。

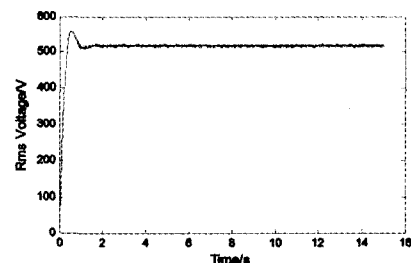


图4 改进前试验过程电压有效值

为了减小误差, 可以延长频率变化时间让电压达到稳定值。但增加频率周期会直接造成测试时间的增加。从图中找到最大电压对应的工作频率, 然后以该频率为基准, 从略小于基准频率的时间开始, 缓慢增加频率。以本试验为例, 以上粗略得到的谐振点为20.3Hz, 从19.1Hz始增加频率, 每2s变化一次频率, 得到图5。由图可以

出,电压变化后会出现波动,2s后趋于稳定,第20s时取得稳定后电压最大值,此时对应的频率为19.5Hz。

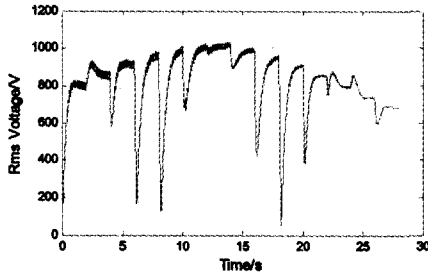


图5 延长频率变化时间后电压波有效值

固定该频率进行耐压试验得到图6。在同样电压输入情况下,用该方法得到的电压大幅提升,说明了改进后选择谐振点的方式更加精确。将该方法应用于实际工程时,频率改变速度越慢,谐振点选择的精度就越高,同时谐振点选择时间会更长。具体的频率增加速度要根据需求进行调整。

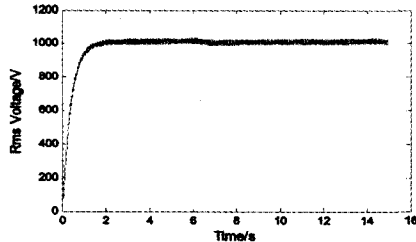


图6 改进后试验过程电压有效值

对比图5与图6不难看出所选取频率差值很小,但稳定后幅值相差将近2倍,实际应用中会对电源的要求大为增加,加大了设备成本。因此准确确定谐振点位置对降低输入电压、减少电源容量有重要意义。

### 3.2 谐波含量分析

要让输出电压谐波分量小,串联谐振电路本身具有滤波功能,通过快速傅里叶分析串联谐振电路是否能达到所需的滤波效果。

让载波恒以谐振频率输入,分别将谐振电路的输入电压与试验电容上的电压作FFT分析,结果如图7、图8所示。得到输入电路具有45.24%的波形畸变,通过谐振电路以后,波形畸变减少到0.21%,波形畸变率 $\leq 1\%$ ,说明谐振电路有很好的滤波效果,满足设计要求,不需要额外增加滤波装置。谐振后电压基波较输入电压基波放大了23.7倍,达到了设计预期。

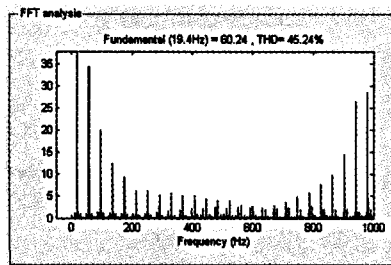


图7 谐振状态输入电压快速傅里叶分析

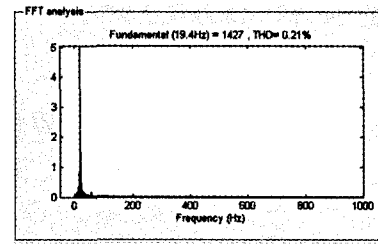


图8 谐振状态试验电压快速傅里叶分析

## 4 结论

通过仿真模拟所设计的耐压测试仪,成功地对直流电源输出电压进行了放大,减少了耐压测试装置对电源的要求。由于所选取谐振点的精度直接影响到电压的放大倍数,设计中增加了一个步骤以保证选谐振点的选择精度,面对更高精度要求时只需减少电压变换幅度,让保持时间高于电压稳定时间即可。通过仿真发现串联谐振电路的滤波效果达到测试要求,减少了滤波装置,减轻了设备体积的同时也降低了设备成本。

### 参考文献

- [1] 谢安生,郑晓泉,李盛涛等. XLPE 电缆绝缘中的电树枝结构及其生长特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 168-173.
- [2] Katsumi Uchida, Masahiko Nakade, Daisuke Inoue. Life Estimation of Water Tree Deteriorated XLPE Cables by VLF Voltage Withstand Test[C]. Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, IEEE 2002, 3: 1879-1884.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50150-91 电气设备交接试验标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1992.
- [4] 国际电工委员会. 60502:2005 国际标准[S]. 2005.
- [5] 何波,付旭平,施佩娟等. 串联谐振试验系统在电缆耐压试验中的应用[J]. 电线电缆, 2002(1): 37-39.
- [6] Yigang Liu, Chang Xue, Gang Liu. Analysis for AC Voltage Withstand Test of HV XLPE Power Cable[C]. International Conference on Solid Dielectrics, ICSD 2007, 10: 666-668.
- [7] 沈立刚. 调频串联谐振设备在XLPE电缆线路试验中的应用[J]. 电线电缆, 2007, (1): 35-37.
- [8] 周良才. 高压交联聚乙烯电缆现场交流耐压试验方法研究[J]. 中国电力, 2003, 33(3): 66-69.
- [9] Yonggang Li, Xia Ping, Chen Zhao. The Design of Withstand Test Simulation System on Resonant Principle[C]. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, AICI 2011, 237:92-99.
- [10] 赵一丁,马淑华,舒冬梅. 基于谐振的大功率正弦波信号发生器[J]. 仪器仪表学报, 2003(S1): 79-81.
- [11] 唐求,王耀南,郭斯羽. 电力系统谐波及其检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(5): 29-33.
- [12] 肖继学,陈光,谢永乐. FFT处理器的算术测试与可测性设计[J]. 仪器仪表学报, 2007(4): 657-662.
- [13] 谢亚丽,辛伊波,张华鹏等. 程控SPWM电路的设计方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2002(5): 58-60.