

轻型电缆故障检测用高频高压电源的研制

高压发生装置作为电缆检测仪中的重要组成部分，负责提供高压脉冲对故障电缆进行冲击放电试验，现有高压发生装置普遍存在体积大、效率低及携带运输不方便等缺点。采用高频变压器取代传统的工频变压器，结合开关电源的拓扑结构及原理，进行电源的仿真分析，各电器元件的选型以及硬件电路的制作与封装，最终研制出一台电缆故障检测用高频高压电源样机，实现了电源的小型化、轻量化设计。将该电源用于现场故障电缆的检测实验，基于脉冲电流法配合相应的电缆测距仪实现电缆故障的检测，运行良好。

龙文¹ 张德卿² 李春光¹ 郜建祥² 齐勇智¹ 王珂¹ 熊兰^{2/1} 1.国网重庆市电力公司市区供电分公司 2.重庆大学输变电设备与系统安全及新技术国家重点实验室

能量的高压脉冲对故障电缆进行冲击放电试验。传统的工频高压电源由于体积大、质量笨重、效率低、输出电压纹波大以及动态性能差等缺点在实际使用中受到了很大的局限。采用高频变压器代替传统的工频变压器进行升压，在达到相同的电压等级条件下，可减小磁芯体积，降低初次级绕组匝数，从而使整个高压电源的体积随之大幅度减小，质量变轻。并且，由于绕组匝数减小，变压器的铁损和铜损都大幅度减小，整个电源的效率也得到很大提高。由于高频直流电源克服了传统工频电源的缺点，所以近年来在 X 光机、电力电缆耐压试验、介质阻挡放电等多个领域得到了广泛研究^[1-10]。

0 引言

电力电缆性能的优劣直接关系到电网的运行状况，当电力电缆发生故障时，利用电缆检测仪快速定位故障点并恢复供电可以避免严重的经济损失，具有重要的实际意义。高压发生装置作为电缆检测设备中的重要组成部分，负责提供一定电压等级、一定

1 高频高压电源设计与研制

1.1 高频高压电源的设计

高频高压脉冲电源主电路主要分为整流电路、高频逆变电路、高频升压电路、高压倍压整流电路以及电容充放电电路四部分，其结构框图及电路拓扑分别如图 1、图 2 所示。



龙文/工程师

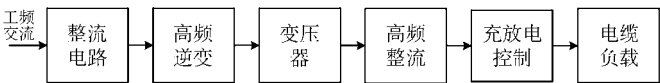


图 1 高频高压电源结构框图

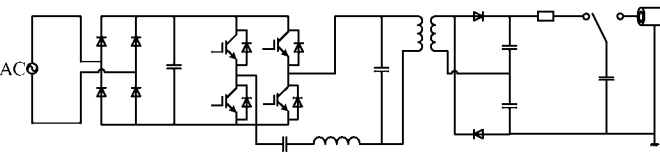


图 2 高频高压电源电路拓扑图

关键词/Keywords

· 电缆故障检测 ·
· 高频高压 ·
· 开关电源 ·
· 高阻故障 ·

可知, 220 V 交流市电经整流滤波, 首先变为脉动的直流; 接着, 通过 LCC 谐振变换器进行高频逆变, 将此直流电逆变为高频的交流信号; 此高频信号经过高频高压变压器升压, 再经过二倍压整流电路, 最终整流为 35 kV 负高压直流电; 此高压直流电源首先对脉冲电容进行充电。当电容电压达到需要值时, 电容通过球间隙对电缆进行放电, 被测电缆芯线、故障点和接地电缆屏蔽层构成的放电通路放电, 形成冲闪测试放电回路。

1.1.1.1 整流滤波电路的设计

整流滤波电路将市电整流成为直流电供给逆变电路, 工程上常用的整流方法是桥式整流, 滤波电路则用电容滤波电路, 整流滤波电路如图 3 所示。通过整流滤波后, 按照工程上对整流滤波电路的输出电压进行估算, 输出至下一级 IGBT 的直流电压约为 300 V。

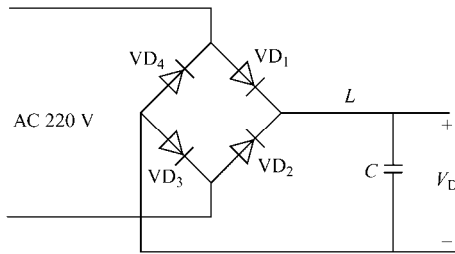


图 3 整流滤波电路

1.1.1.2 高频逆变部分的设计

采用 LCC 谐振全桥变换器实现逆变。图 4 为具有电容型滤波器的 LCC 谐振变换器的结构图, 其中 VT₁~VT₄ 为 4 个 IGBT 开关管, VD₁~VD₄ 为反并联二极管, C₁~C₄ 为并联电容, C_s 为串联谐振电容, L_s 为串联谐振电感, 包含了变压器的漏感, C_p 为并联谐振电容, 包含了变压器折算至一次的分布电容。

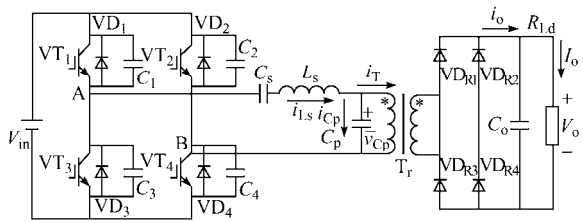


图 4 具有电容型滤波器的 LCC 谐振变换器

在全桥逆变电路中, 如果忽略损耗, 变换器输出电压大小为

$$V_{RM} = V_{AB} \frac{t_{on}}{T_s} \frac{N_s}{N_p} = V_{AB} \frac{N_s}{N_p} D$$

式中, V_{AB} 为谐振逆变器的直流电压, 其值大概为 300 V; N_s 为变压器一次侧匝数; N_p 为变压器二次侧匝数; D 为占空比。由上述公式可知, 改变占空比即可调节输出电压的大小。

1.1.1.3 倍压整流部分的设计

本文采用二级倍压方式得到所需电压, 其工作原理如图 5 所示。

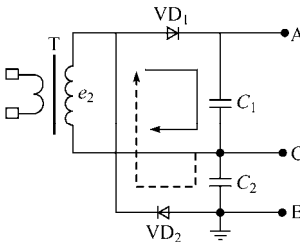


图 5 倍压整流电路

其主要工作原理如下: 前半周期, 变压器次级侧的上端参考电压为正, 变压器次级电流经二极管 VD₁ 和电容 C₁ 回到变压器次级侧下端, 电流流经方向如图 5 实线所示, 此时变压器对 C₁ 充电并使其上电压保持在 $\sqrt{2}E_2$; 后半周期, 变压器次级侧的下端参考电压为正, 变压器次级电流经电容 C₂ 和二极管 VD₂ 回到变压器次级侧的上端, 电流流经方向如图 5 虚线所示, 此时变压器对 C₂ 充电并使其上电压保持在 $\sqrt{2}E_2$, 因此 AB 间的电压为 C₁ 和 C₂ 上累计的电压之和, 为 $2\sqrt{2}E_2$ 的直流电压, 通过这种方式实现倍压。图 5 中, 整流二极管上承受 $2\sqrt{2}E_2$ 的最大反向电压, 为选择合适的二极管提供了理论依据; 电容器上承受 $2\sqrt{2}E_2$ 的最大反向电压, 为选择合适的电容提供了理论依据。

1.2 高频高压电源仿真

1.2.1 模型建立

根据上述分析的电路拓扑结构, 采用 Matlab 进行了主电路的仿真分析, 主电路的搭建如图 6 所示。

1) 交流电压设为 220 V。在库中选择四个 “IGBT/Diode” 模块, 组成全桥电路; 在库中选择串联 RLC 支路模块, 分别设置电感值为 120 nH, 设置电阻 R₁ 值为 10 kΩ, R₂ 为调压电阻。调节该电阻就可以改变输出电压。

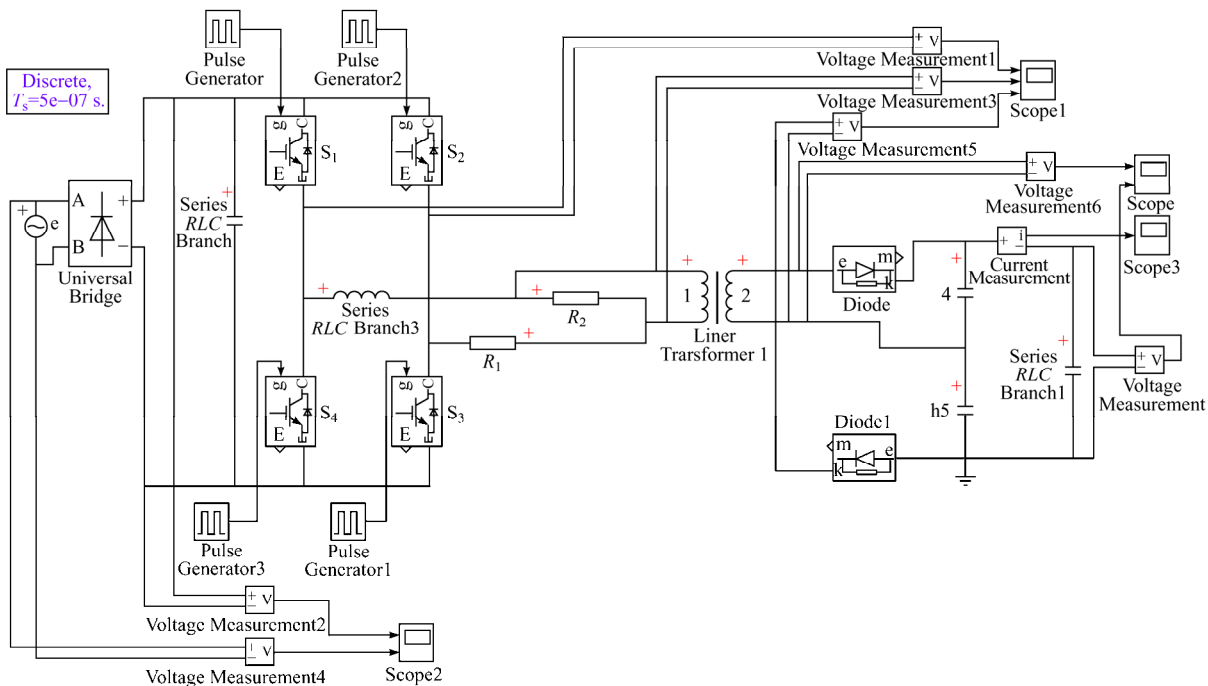


图 6 电源主电路仿真图

2) 控制部分在 Simulink 的“Source”库中选择四个“Pulse Generator”模块，幅值设为 1，周期设为 $5e-5$ s，即频率设为 20 kHz，占空比设为 50%。其中两个滞后 0 s，其输出加在开关 S_1 和 S_3 的门极，另外两个滞后 $25e-6$ s，其输出加在开关 S_2 和 S_4 的门极。

3) 变压器参数设置如图所示。一次和二次漏阻抗设为 0，激磁阻抗设为 500（默认）。一次侧电压设为 300 V，二次侧电压设为 20 kV。倍压整流电路的电容设为 $22\text{ }\mu\text{F}$ ，电阻设为 $157\text{ k}\Omega$ 。

1.2.2 仿真结果

将仿真时间设为 0.2，选择 ode45 的仿真算法，将绝对误差设为 $1e-3$ ，运行后的仿真结果如图 7、图 8 和图 9 所示。其中，如图 7 所示，上图为 220 V 交流电整流并滤波得到的直流带纹波电压；下图为输入交流市电。

图 8 为高频逆变后得到的波形，其中第一个为逆变后得到的高频脉冲波形；第二个为经过滤波处理后的高频电压波形；第三个为经过高频变压器 70 倍升压后的电压波形（约 12 kV）。

图 9 为经倍压整流后得到的 27 kV 高压直流。第一个为变压器升压后的高频交流电，第二个为经倍压整流后得到约 27 kV 的高压直流。

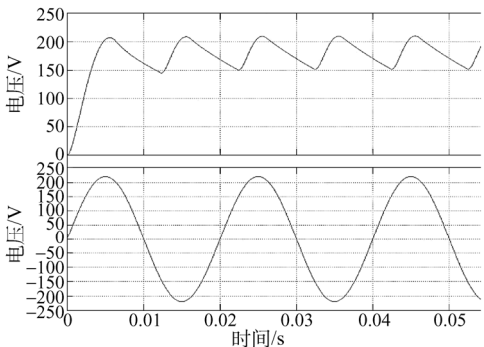


图 7 整流滤波仿真结果

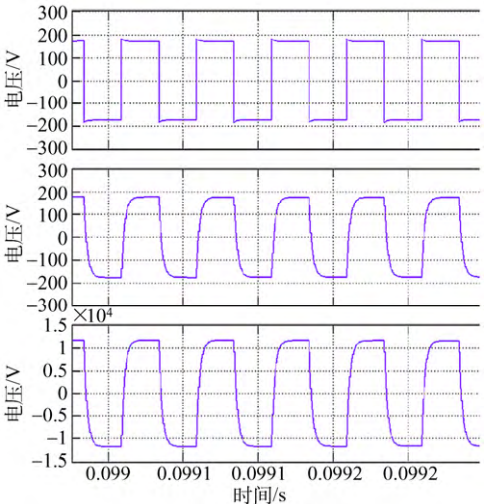


图 8 高频逆变仿真结果

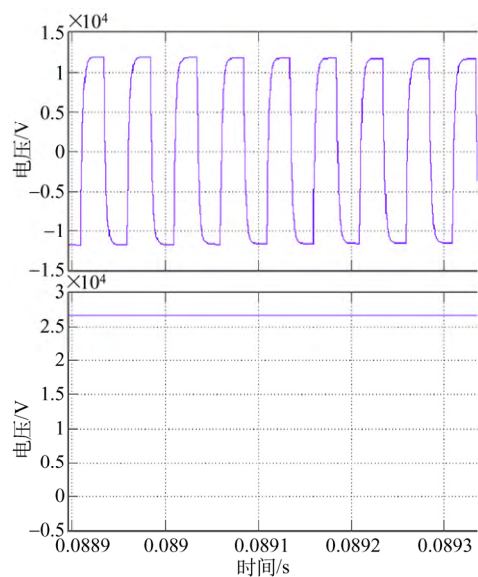


图9 级倍压整流后仿真结果

仿真结果表明,该电源满足设计要求,能稳定输出 30 kV 左右的直流高压。

1.3 电源样机封装及输出特性测试

通过仿真分析验证了所采用的拓扑结构的可行性后,经过器件选型、硬件电路制作等工作后完成了高频高压电源的研制。为了能够保护主电路不受外界因素的破坏与干扰,同时使电源的操作更为简洁,对主电路硬件进行了封装。样机外壳采用的是 35 cm×25 cm×32 cm 的定制铝合金提箱。

由图 10 可见,电源的操作界面清晰、直观,便于使用,板面上主要包括:高压输出端、接地端、高压开/合闸按钮、调压旋钮、电压指示表盘以及电源接口等组成部分。将电源线接通后,打开样机的开关,按下高压合闸按钮,顺时针转动电压调节旋钮,输出电压逐渐升高,直至达到所需电压等级即可。如图 10 所示,电压波形为该高频高压电源样机输出 35 kV 时的电压波形,由图中波形可知,该电源能够稳定输出最高 35 kV 的直流电压,达到了预期的设计目标。

2 实验测试

在市区供电公司工作人员的协助下,对市区供电局模拟现场电缆故障的实验用电缆进行了故障检测。

该电缆长度约为 500 m,用兆欧表测试其阻

值,初步判定为高阻故障,随后用研制的高频高压电源配合市区供电局所用的电缆故障测距仪进行了故障定位,采用的定位方法为脉冲电流法。该方法的工作原理是:当加到电缆上的电压增加到某值时,故障点突然被击穿放电,产生向测量点运动的放电脉冲,放电脉冲通过测量点后,被电容反射,运动回故障点,在故障点再次被反射,返回测量点。放电脉冲不断在电容和故障点间进行反射,多次通过测量点,通过分析判断电流行波信号在测量端与故障点往返一趟的时间即可计算故障距离。

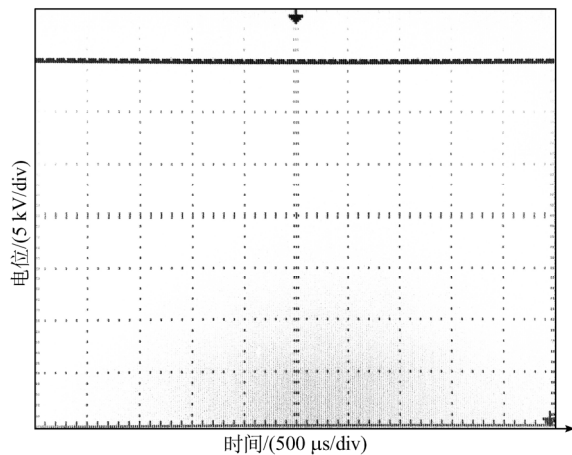


图10 高频高压电源 35 kV 输出电压波形

实验过程中,先用万用表测试电缆的三相线芯,找出电缆故障相,然后将高频高压电源的高压端以及接地端并联到充电电容两端,电容的高压端经球隙接到故障相电缆线芯上,电源的接地端以及电缆的铠装层均接到专用地线上,接线示意图如图 11 所示。

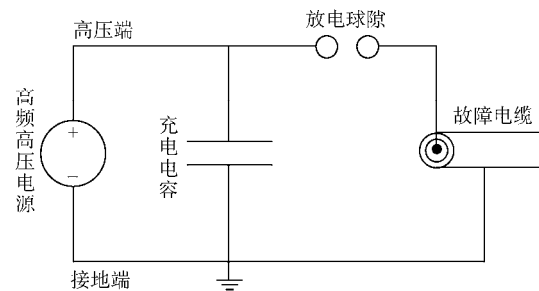


图11 测试实验接线示意图

检查接线无误后,打开高频高压电源的开关,并逐渐升压,直至球隙击穿放电产生冲击电压,该冲击电压沿故障相传到故障点处,使故障

点发生冲击闪络。此时，保持该高频高压电源对故障电缆的冲击放电状态，对测距仪进行调节，读取故障回波，最终测得故障点在 452.2 m 处，同时，沿电缆路径寻找，在 450 m 处附近听到了明显的放电声音，从而可以判断检测结果的正确性。该实验结果表明所研制的高频高压电源可以用于现场电缆故障的检测，验证了其实用性，故障点测试波形如图 12 所示。

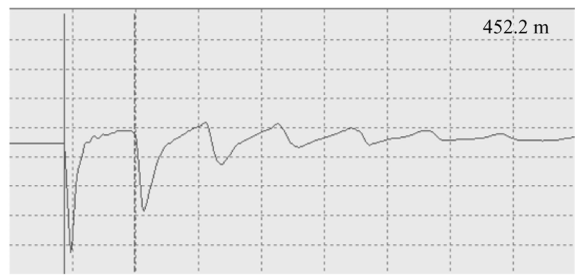


图 12 故障点测试波形

3 结束语

本文针对现有的高压发生装置普遍存在体积大、效率低、携带运输不方便等缺点，研制了一台轻型电缆故障检测用高频高压电源样机，具体结论如下。

- 1) 根据开关电源拓扑结构及工作原理，确定了本文拟研制的高频高压电源的主电路拓扑及设计方案。
- 2) 对所选拓扑结构进行了仿真分析，确定了其可行性，同时进行了器件选型、硬件制作和系统封装等工作，最终完成了高频高压电源样机的研制。
- 3) 对高频高压电源样机的输出性能进行了测试，测试结果表明该电源达到了预期的输出特性，并能够实现对故障电缆的冲击耐压试验。
- 4) 最后，将该电源用于现场故障电缆的检测，可以协助其他电缆故障检测装置完成电缆故障点的准确定位，实用性强。

参考文献

[1] Trerutpicharn S, Potivej Kul S, Kinnarees V. High

voltage and high frequency switching power supply for high frequency solid insulation testing[C]. Power System Technology, Perth, WA, 2000 (4): 1213-1216.

[2] 周好斌, 钟桂香, 王毅. 静电除尘器用智能高压直流电源的研制[J]. 高电压技术. 2005, 31 (5): 61-63.

[3] 孙平萍. 烟气脱硫脱硝大容量高频高压电源及控制系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[4] 宫传. 一种高频高压电源的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[5] 彭燕昌, 严萍, 舒立, 等. 介质阻挡放电用大功率高频高压电源的研究[J]. 高电压技术. 2002, 28 (12): 35-37.

[6] Barbi I, Gules R. Isolated DC-DC Converters With High-Output Voltage for TWTA Telecommunication Satellite Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2003, 18 (4): 975-984.

[7] 贾振宇. X 光机电源设计与研究[D]. 北京: 北京交通大, 2009.

[8] 官威. 静电除尘器谐振软开关高频高压屯源的设计与实现[D]. 浙江: 浙江大学电气工程学院, 2008.

[9] 肖屹. 机载行波管发射机高密度高压电源结构设计[J]. 现代雷达, 2008, 11 (27): 51-56.

[10] Lu H, Qin J, Chen X, et al. Overview of Power Cable Fault Location[J]. Power System Technology. 2004, 28 (20): 58-63.

作者简介

龙文 (1984-), 男, 工程师, 主要研究方向为从事配网设备运维检修、配电自动化管理工作。

张德卿 (1991-), 男, 硕士研究生, 通讯作者, 主要研究方向为电气设备在线智能化监测技术方面的研究。

(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 杨帆)