

## 场畸变火花间隙开关触发系统设计与仿真\*

林芳建, 陈忠华, 郭凤仪

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 应用串联谐振恒流充电技术及谐波叠加原理, 设计了用于场畸变火花间隙开关的触发系统, 并根据傅里叶级数原理选择装置参数, 用 PSPICE 对脉冲形成电路进行仿真。仿真结果表明, 该系统能产生快上升沿、高陡度、大幅值的脉冲, 这对进一步研制放电抖动低、放电迅速等高性能的场畸变开关具有一定实际意义。

**关键词:** 场畸变开关; 脉冲触发; 串联谐振; 恒流充电; 谐波叠加; 仿真

中图分类号: TM56

文献标识码: A

## Design and simulation of trigger system for field distortion spark gap switch

LIN Fang Jian, CHEN Zhong Hua, GUO Feng Yi

(College of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Applying series resonance constant current charging technology and harmonics superposition principle, a trigger system for field distortion spark gap switch is designed in this paper. Determine the device parameters according to the principle of Fourier series, and simulate the pulse formation circuit with PSPICE. The results show that the system can produce the pulse with fast rising edge, high slope and high amplitude, which is significant for the further development of field distortion switch with the high performance of low-jitter and rapid discharging.

**Key words:** field distortion switch; pulse trigger; series resonance; constant current charging; harmonics superposition; simulation

开关是脉冲功率装置中的关键元件, 场畸变开关以其工作范围广、易于使用、通流能力强等特点成为脉冲功率技术领域的研究热点<sup>[1]</sup>。快前沿、大功率脉冲的获得与场畸变开关的放电特性密不可分。要使开关放电抖动低、放电迅速, 除了要有良好的开关结构设计外, 场畸变开关触发脉冲的上升陡度、峰值电压都是重要因素。研究表明, 触发脉冲陡度增加, 开关延时性及分散性随之相应减小; 开关的稳定性也依赖于电压幅值高、上升时间短的高压触发脉冲<sup>[2]</sup>。为此, 本文设计了用于场畸变火花间隙开关的脉冲触发系统。

## 1 系统原理

场畸变开关触发系统原理框图如图 1 所示。来自电网的 AC 380 V 经整流滤波后得到 DC 520 V, 并加到谐振变换器上。谐振电流经变压器, 再经高频高压整流电

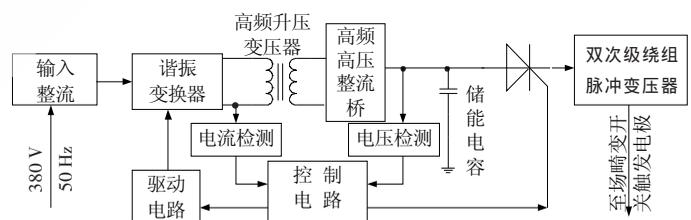


图 1 场畸变开关触发系统原理框图

路向储能电容充电。储能电容上电压充到预定值(10 kV)后, 控制电路发出信号, 将晶闸管触发导通, 电容电压快速向双次级绕组脉冲变压器放电, 在其次级经双波叠加形成高压陡脉冲, 以触发场畸变开关。

## 2 储能电路

全桥串联谐振充电电源与传统直流电源相比较, 具有恒流充电、体积小、效率高、功率密度大、适合宽范围变

\* 基金项目: 辽宁省教育厅科学基金资助项目(05L175)

化的负载等优点,是理想的电容充电电源。其主电路拓扑结构采用全桥串联谐振式逆变电路,如图2所示<sup>[3-5]</sup>。

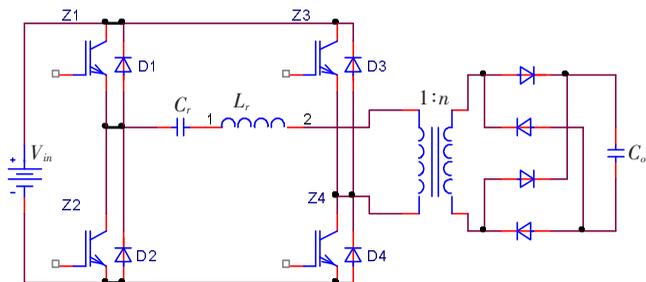


图2 全桥串联谐振充电电路

在任意时间,变换器开关均处于以下3种状态之一<sup>[4]</sup>:(1)Z2和Z3断开,Z1和Z4导通;(2)Z1和Z4断开,Z2和Z3导通;(3)所有开关均断开。而状态(3)依据当时的续流二极管的导通情况有2种模式(电流方向不同)。根据电路分析,每种状态都可得到它的等效电路和谐振电流 $i_r$ 。

例如在状态(1)下,等效电路如图3所示,储能电容等效到理想变压器的初级端为 $C_o'$ 。

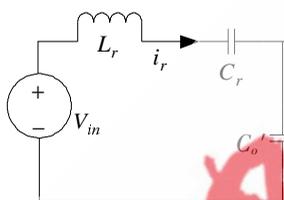


图3 变换器工作在状态(1)的等效电路

$$i_r(t) = \frac{V_{in} - V_2(t_0) - V_3(t_0)}{Z_r} \sin[\omega_r(t-t_0)] + i_r(t_0) \cos[\omega_r(t-t_0)] \quad (1)$$

$$t_0 \leq t \leq t_x$$

式中,特征阻抗 $Z_r$ 与谐振频率 $\omega_r$ 由式(2)给出, $V_2(t_0)$ 、 $V_3(t_0)$ 分别表示谐振电容与负载电容上的初始电压, $t_0$ 、 $t_x$ 分别为模式1的起始与结束时间。

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_{eq}}} \quad \omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{eq}}} \quad (2)$$

$C_{eq}$ 由 $C_r$ 与 $C_o'$ 组合而得, $C_o' = n^2 C_o \gg C_r$ ,故储能电容在较大范围变化时, $C_{eq}$ 都近似于 $C_r$ 。

当开关频率 $f_s$ 略小于谐振频率 $f_r$ 时,串联谐振变换器输出特性近似为恒流源,在固定 $f_s$ 下,平均充电电流在充电过程中基本不变,对电容等阶充电<sup>[5]</sup>。

但随着充电电压逐渐升高, $f_r$ 也逐渐变大,这导致谐振电流的峰值越来越小。因此,通过电流检测电路检测谐振电流的峰值变化并返回1个信号,根据该信号,通过AVR单片机运用定宽调频策略来控制 $f_s$ 的升高,以维持谐振电流平均值基本不变,从而达到恒流充电的目的。控制电路由TA、峰值采样电路和AVR单片机组成。

### 3 高压陡脉冲形成电路

傅里叶级数原理表明,1个周期性的方波信号,可由幅值和频率满足一定条件的一系列谐波叠加而成<sup>[6]</sup>:

$$\text{若 } \begin{cases} f(t) = E_m & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ f(t) = -E_m & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad \text{则}$$

$$f(t) = \frac{4E_m}{\pi} \left[ \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad (3)$$

逆向运用傅里叶级数原理,可用图4形成高压陡脉冲<sup>[7]</sup>。图中, $C_o$ 是高压储能电容, $R_4$ 表示脉冲负载, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 表示损耗电阻, $C_2$ 、 $C_3$ 表示次级绕组电容, $L_2$ 、 $L_3$ 表示绕组电感。控制系统根据电压检测电路反馈的信号控制晶闸管K的通断,形成初级脉冲,在双次级高压脉冲变压器的次级经2个衰减余弦振荡波叠加形成理想的高压陡脉冲。该电路的关键是双次级绕组脉冲变压器,它是利用Tesla发生器的基本原理,在同一变压器中设计了2个次级绕组W2、W3和1个共用初级绕组W1的高压脉冲变压器。共用初级绕组分别与2个次级绕组形成2个相对独立的变压器,按照傅里叶级数的要求调整变比及电容电感值,以产生2个不同频率和幅值的余弦衰减电压信号。这2个余弦衰减信号串联叠加合成为更理想的高压脉冲波形。

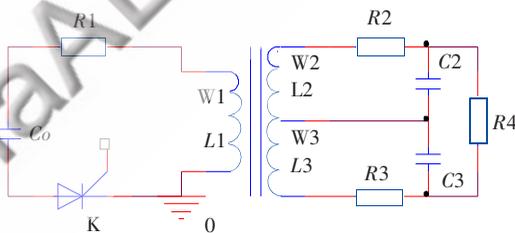


图4 脉冲形成电路

### 4 仿真

据傅里叶级数对谐波幅值与频率的要求,取 $W2/W1=$

$$9, W3/W1=3, \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{3} \omega_3 = \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}}$$

成电路进行PSPICE仿真,得到如图5所示仿真结果。图中,曲线1是按照上述关系取 $L_2=1 \mu\text{H}$ , $C_2=1 \text{nF}$ , $L_3=9 \mu\text{H}$ , $C_3=1 \text{nF}$ 所得结果,曲线2不按上述关系取得出的结果;图5(b)是为了分辨脉冲上升时间而对仿真时间与步长进行了重新设置,电路参数未变得到的结果。由图可见,只要按照傅里叶级数原理合理选择参数,该触发系统能在20 ns产生100 kV的高电压,效果是相当理想的。

本文设计的脉冲触发系统采用串联谐振恒流充电技术进行初级储能,采用双次级脉冲变压器取代传统的MARX发生器,使得系统体积减小,效率提高。该系统能

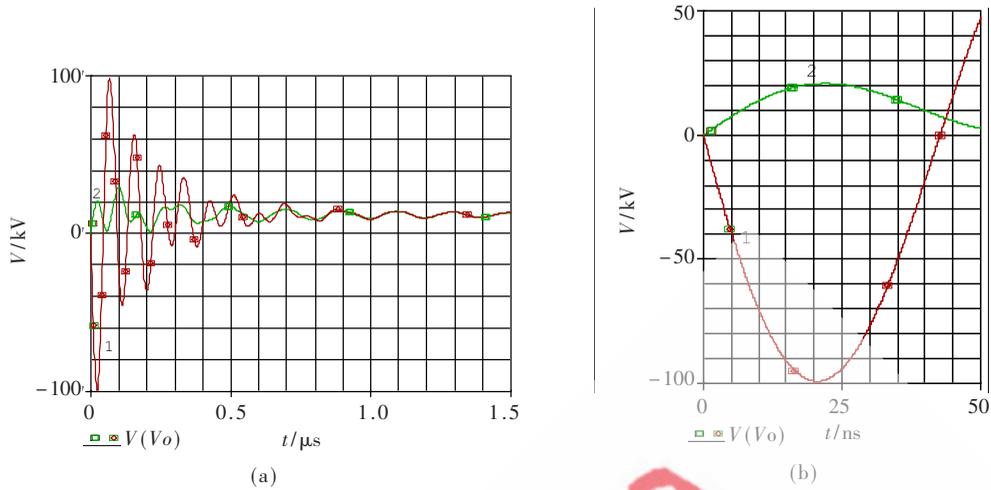


图5 仿真图

获得大幅值、快上升沿、高陡度的脉冲触发电压,因而能满足场畸变开关快速触发导通时对触发信号的要求,对场畸变火花间隙开关性能的提高具有一定实际意义。

#### 参考文献

- [1] 刘锡三.高功率脉冲技术[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 贺臣,何孟兵,李劲.高陡度场畸变开关触发系统的研制[J].高电压技术,2004,30(7).
- [3] 钟和清,徐至新,邹旭东,等.软开关高压开关电源研

究[J].高电压技术,2003,29(8).

- [4] 苏建仓,王利民,丁永忠,等.串联谐振充电电源分析及设计[J].强激光与粒子束,2004,16(12).
- [5] 杨小卫,严萍,孙鹤鸿,等.35kV/0.7A 高压变频恒流充电电源[J].高电压技术,2006,32(5).
- [6] 丘关源.电路[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [7] 姚永和.双次级绕组高压脉冲变压器的研制[J].高压电器,2000(2).

(收稿日期:2009-04-02)

www.chinaAET.com