

行波电压叠加器的电路模型与输出特性

任淑一¹, 何旭¹, 孙凤举², 王志国^{1,2}, 邱爱慈^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 710024, 西安)

摘要: 为了研究行波电压叠加器(TVA)的输出特性以及影响输出特性的因素,将传输线和放电支路进行简化,给出了传输线、放电支路、屏蔽电极与外筒体间的分布电感与分布电容等参数的计算方法,建立了 8 级串联 TVA 电路模型。通过仿真得到了 8 级串联 TVA 驱动匹配负载时的输出特性,研究了开关闭合时序与分散性以及传输线阻抗等对输出特性的影响。仿真结果表明:当每级开关触发闭合时序为理想感应电压叠加器(IVA)时序时,传输线输出电压峰值随串联级数 n 的增长近似线性增长,电压脉冲前沿逐级陡化,在匹配负载上的输出电压为 899 kV,脉冲前沿与第一级相比缩短 10 ns;屏蔽电极上的电压峰值逐级减小,电压波形存在高频振荡;开关闭合时序对 TVA 传输叠加与输出特性有显著影响,TVA 按理想 IVA 时序触发时的匹配负载电压前沿比同时触发时要陡,相差约 50 ns,随着触发时序系数增大(>1),脉冲前沿逐渐陡化;当开关触发闭合分散性增大时,输出脉冲重复性变差;随着传输线阻抗从匹配阻尼增大至 3 倍阻尼,匹配负载电压峰值增大,前沿缩短约 30 ns,波尾时间增大约 200 ns。研究结果可为 TVA 型脉冲功率源装置的结构优化和研制提供一定的参考。

关键词: 脉冲功率源;行波电压叠加器;电路模型;开关闭合分散性;输出特性

中图分类号: TM83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202212008 **文章编号:** 0253-987X(2022)12-0078-08

Circuit Model and Output Characteristics of Traveling Voltage Adder

REN Shuyi¹, HE Xu¹, SUN Fengju², WANG Zhiguo^{1,2}, QIU Aici^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to study the output characteristics of the traveling voltage adder (TVA), and the factors that influenced the output characteristics, with the transmission line and the discharge bricks simplified equivalently, the methods are developed to calculate the parameters of the distributed inductances and the distributed capacitances between the transmission line, the discharge bricks, the shielding electrodes and the outer ground cylinder. And then the circuit model of an 8-stage series TVA is established. The output characteristics of the 8-stage series TVA and the effects of switch closure timing sequence and its dispersion, and transmission line impedance on the output characteristics are obtained, when the 8-stage series TVA is driven to a matched load. The results show that when the triggering sequence is an ideal induction voltage adder (IVA) sequence, the peak output voltages of the transmission line increases approximately

收稿日期: 2022-04-23。 作者简介: 任淑一(1998—),女,硕士生;孙凤举(通信作者),男,研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51790521);西安市科技计划资助项目(20KYPT0001-01)。

网络出版时间: 2022-09-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220905.1354.006.html>

linearly with the increase of series n , the leading edge of the voltage pulses are gradually steepened. The generator can deliver 899 kV fast pulse into a matched load. The leading edge is shortened by 10 ns compared with the first stage. The peak voltage on the shielding electrodes decreases with the increase of the series number of stages, and the voltage waveforms have a high frequency oscillation. Switch closure timing sequences have a significant impact on TVA transmission superposition and output characteristics. The load voltage leading edge when the TVA is triggered with an ideal IVA timing sequence is about 50 ns steeper than that with triggering simultaneously. As the trigger timing sequence coefficient increases (>1), the leading edge of the pulse gradually becomes steeper. With the augmentation of switch closure time dispersion, the repeatability of output pulse becomes worse. As the impedance of the transmission line of TVA increases from matching damping to 3 times damping, the peak voltage on the matched load increases, the pulse leading edge is shortened by about 30 ns, and the pulse tail time is increased by about 200 ns. This work can provide valuable reference for the structure optimization and development of TVA pulse power source device.

Keywords: pulsed power source; traveling voltage adder; circuit model; switch closing time dispersion; output characteristics

行波电压叠加器(traveling voltage adder, TVA)是近几年提出的一种利用行波电压在传输线中按时序注入、传输与叠加的新型驱动源概念,在 Z 箍缩电磁驱动聚变、X 射线闪光照相和高功率微波等领域具有广泛应用前景。

目前,国内外广泛应用的大型 Z 箍缩脉冲功率源主要采用 Marx 发生器与快脉冲直线型变压器驱动源(fast linear transformer driver, FLTD)技术^[1-3]。Marx 发生器回路电感大,输出脉冲前沿缓,一般需要脉冲压缩才能获得负载需要的数十至百纳秒的电脉冲,且脉冲形成过程中,开关器件要承受较高的瞬时功率,如目前国际上输出电流与功率最大的 ZR 装置,脉冲开关承受的功率高达太瓦级,采用电容储能脉冲压缩路线装置的输出功率难以进一步提高^[4]。FLTD 可以直接获得百纳秒前沿的电脉冲,近二十年来得到快速发展,国内外提出了多个输出功率数百太瓦的 Z 箍缩驱动源概念设计,但是 FLTD 需要数量庞大的磁芯,造价高、质量大,制约了其应用^[5-10]。Stygar 等提出了一种行波电压在传输线介质中传输、与每级按时序馈入传输线的电脉冲实现电压叠加的设想,将这种新型脉冲功率源命名为阻抗匹配的 Marx 发生器(impedance-matched Marx generators, IMG),提出了基于 IMG 的 960 TW 驱动源的初步概念设想^[11-12]。IMG 输出脉冲前沿由放电支路决定,无需脉冲压缩可直接获得快前沿电脉冲。IMG 去除磁芯省掉了磁芯复位系统和磁芯损耗,既有利于降低放电支路电感,又可以大

幅降低装置重量、造价和运维复杂性。Huiskamp 等基于 IMG 原理搭建出由金属氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)开关控制的 5 级固态 IMG,建立了 20 级固态 IMG 的 3D 瞬态电磁模型^[13]。国内,2017 年西北核技术研究所孙凤举根据 IMG 工作原理提出:将 IMG 称为 TVA(traveling voltage adder)更为合理,因为上述叠加原理,即使传输线阻抗与初级源阻抗不匹配也能工作,并设计出 8 级串联 TVA 的原型机,每级由 20 个放电支路并联。2018 年,西安交通大学何旭建立了 4 级串联 TVA 的电磁模型,初步仿真了 4 级 TVA 的输出特性。目前,国内外对 TVA 的研究尚处于理论分析阶段。FLTD 是利用磁芯的电磁感应原理将初级电压耦合至次级,其初级放电回路包含在接地的感应腔内,而 TVA 每级放电回路产生的电脉冲按时序直接馈入传输线,通过传输线传播,并与下游串联级按时序馈入的电脉冲实现电压与功率叠加,每级放电回路在电脉冲传输建立过程中的串联位置不同,则电位不同。然而目前每级 TVA 的电位分布及演化特性尚不清楚,开关闭合时序与分散性,以及传输线阻抗对负载输出特性的影响规律不明确。

本文基于标称电流为 1 MA 的 8 级串联 TVA 三维结构,每级由 20 个 5 GW 放电支路并联,其中传输线为水线,通过 Pspice 仿真软件建立了 8 级串联 TVA 的电路模型,得到了 TVA 每级传输线的电位分布,通过电路模型模拟计算了开关闭合时序与

分散性、传输线阻抗对匹配负载输出特性的影响。

1 TVA 脉冲源的工作原理与结构

1.1 TVA 脉冲源的工作原理

设计的单级 TVA 由 20 个放电支路并联,沿圆周均匀分布,内置 1 个触发支路,其余为主放电支路。每个主支路由 2 个 100 nF/100 kV 的双端引出电极的电容器和 1 个四间隙气体开关构成^[14]。触发支路由 2 个 30 nF/100 kV 电容器和 1 个光纤激光触发气体开关组成^[15],触发支路产生的电脉冲触发每级所有主支路同步放电,从而减少所需外部引入的激光触发脉冲数,其每级内置触发原理与共用

腔体内置同步触发的 FLTD 相同^[16]。8 级放电支路通过传输线串联构成一组 8 级 TVA。8 级串联 TVA 等效电路原理示意图如图 1 所示,图中 L_s 为每级 TVA 的等效电感, R_s 为每级 TVA 的等效电阻, C_s 为每级 TVA 等效电容, Z 为每级传输线的阻抗, S_n 为每级 TVA 等效开关。紧邻负载的一端接地(图 1 右端),工作时,触发脉冲从高压端(图 1 左端开关 S1)馈入,触发时序一般采用理想感应电压叠加器(induction voltage adder,IVA)时序,即电脉冲沿输出线到达下一级时,此级开关刚好触发闭合。从高压端开始,每级开关依次触发,各级依次放电,产生的电脉冲在水介质传输线中依次传输并实现电

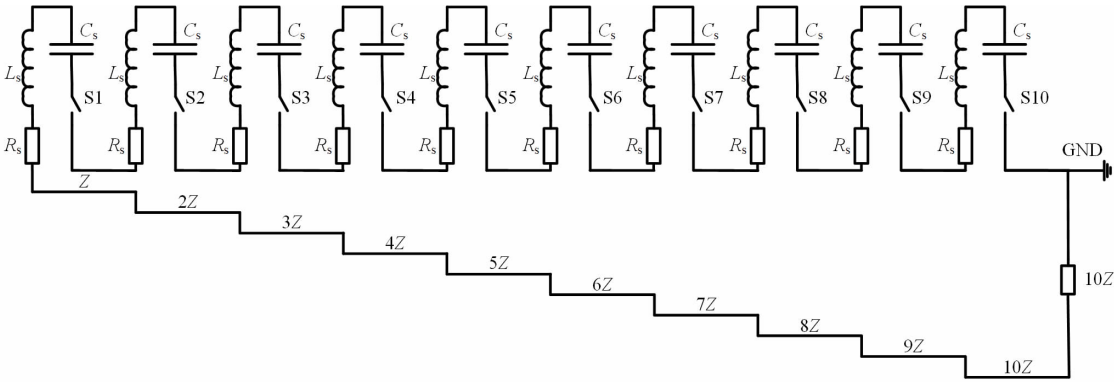


图 1 8 级串联 TVA 原理图
Fig. 1 Schematic of an eight-stage TVA

压与功率叠加,沿传输线传输至负载。

1.2 8 级串联 TVA 脉冲源的结构

8 级串联 TVA 的三维结构如图 2 所示,其圆柱

外筒与椭圆封头盖板、连接电极、屏蔽电极以及传输线内外筒的材质均为不锈钢,每一级绝缘子以及极板之间的支撑杆的材质为绝缘材料。每级 TVA 高

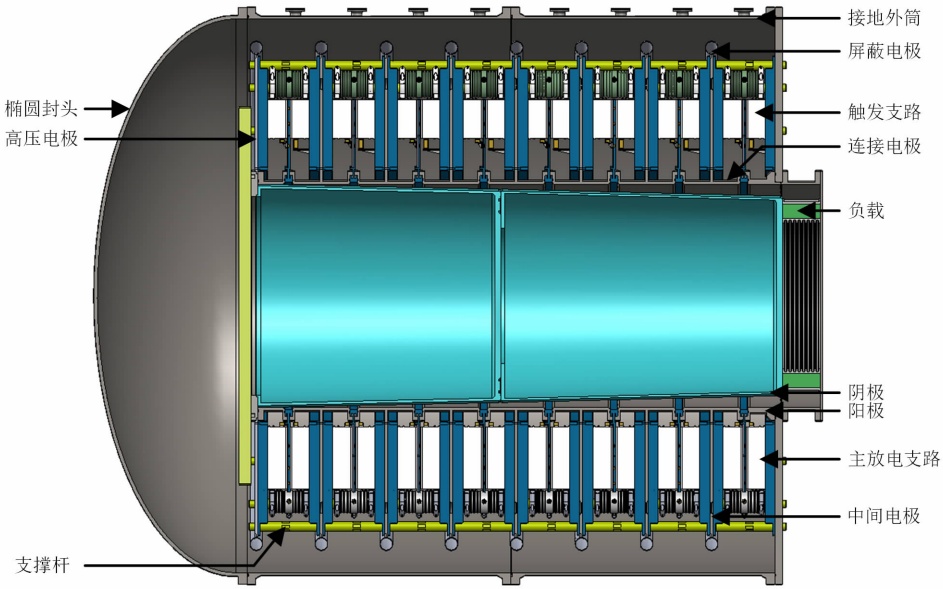


图 2 8 级串联 TVA 结构
Fig. 2 Structure of the eight-stage TVA

258 mm,整个脉冲源高约 2 700 mm,半径为 1 200 mm。采用 SF₆ 气体作为 TVA 筒体的绝缘介质,腔体内气体压强为 0.2 MPa。传输线选用锥形的水介质传输线,外筒直径为 900 mm,其阻抗与依次串联叠加的 TVA 放电支路逐级匹配。

设计的 8 级 TVA 输出负极性电脉冲,根据图 2 可知,第 1 级高压电极与传输线内筒相连接(图 2 左侧),第 8 级接地外筒与传输线阳极相连接(图 2 右侧)。为了提高每级 TVA 对外筒的绝缘水平,在相邻两级中间输出电极靠近接地外筒区域装配电场匀化屏蔽电极,以优化 TVA 建立过程中间电极对外筒的电场分布(下文用屏蔽电极的电位分布替代中间电极的电位分布)。

2 TVA 脉冲源的电路模型

利用 Pspice 通用电路仿真软件建立 8 级串联 TVA 电路模型,包含 8 级 RLC 串联放电支路、传输线、中间屏蔽电极与外筒的分布电容与电感。

2.1 RLC 串联放电支路

多支路并联简化为 RLC 放电回路的仿真结果与实验结果在放电电流脉冲的正半周一致性较好^[17],故本文采用 RLC 串联放电回路对多支路并联主放电支路进行建模。每级 TVA 包含 19 个放电支路并联,单个支路电阻为 R_b ,单个支路电感为 L_b ,单个支路电容为 C_b ,电容充电电压为 U_0 。用一个 RLC 放电支路等效单级 TVA 的 19 个并联放电支路,等效电气参数可由如下公式得到

$$R_s = R_b/n_b \tag{1}$$

$$L_s = L_b/n_b \tag{2}$$

$$C_s = n_b C_b \tag{3}$$

式中: R_s 为单级 TVA 等效电阻; L_s 为等效电感; C_s 为等效电容; n_b 为并联支路数。

单支路的等效阻抗 Z_b 计算式^[17]为

$$Z_b = 1.1 \sqrt{\frac{L_b}{C_b}} + 0.8R_b \tag{4}$$

则单级 TVA 等效阻抗 Z_s 为

$$Z_s = 1.1 \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} + 0.8R_s = \frac{Z_b}{n_b} \tag{5}$$

单级 TVA 的 RLC 串联开关放电支路的等效电路如图 3 所示,以此提高计算速度与收敛性,电路元件参数如表 1 所示。

2.2 传输线

传输线模型采用 8 段串联电感电容网络集中参数代替传输线,提高电路计算收敛速度,8 段串联电

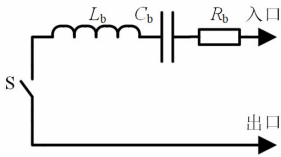


图 3 单级 RLC 放电支路等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit diagram of single-stage RLC discharge bricks

表 1 开关放电支路参数
Table 1 RLC discharge bricks parameters

参数	数值
L_b/nH	210
C_b/nF	50
R_b/Ω	0.3
U_0/kV	200
Z_s/Ω	0.13

感电容集中参数网络与传输线几乎完全等效^[17]。

第一段传输线的等效电感 L_{p1} 、等效电容 C_{p1} 计算式为

$$L_{p1} = T_d Z_0/8 \tag{6}$$

$$C_{p1} = 8T_d/Z_0 \tag{7}$$

式中: T_d 为电脉冲在每级 TVA 传输线轴线长度的传输时间; Z_0 为第一段传输线阻抗。

当传输线阻抗与串联叠加的 TVA 放电支路逐级阻抗匹配时,第 n 段传输线阻抗 Z_n 、等效电感 L_{pn} 与等效电容 C_{pn} 为

$$Z_n = nZ_0 \tag{8}$$

$$L_{pn} = nL_{p1} \tag{9}$$

$$C_{pn} = nC_{p1} \tag{10}$$

式中 $n=1,2,3,\cdots,8$ 。8 段串联电感电容网络构成的传输线等效电路如图 4 所示。

去离子水作为传输线绝缘介质,电脉冲在去离子水中传输速度 v 为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \tag{11}$$

式中: $c=3\times 10^8$ m/s 为光速; ϵ_r 为相对介电常数,取值 80; μ_r 为相对磁导率,取值 1。

每级 TVA 高度 Δh 为 258 mm,电脉冲传播所需的时间 T_d 为

$$T_d = \Delta h/v = 7.69 \tag{12}$$

2.3 TVA 屏蔽电极与外筒的分布电容与分布电感

TVA 每级屏蔽电极与接地外筒之间为气体间隙,在脉冲传输过程中,屏蔽电极与接地外筒存在电势差,采用分布电容等效。屏蔽电极与外筒构成电

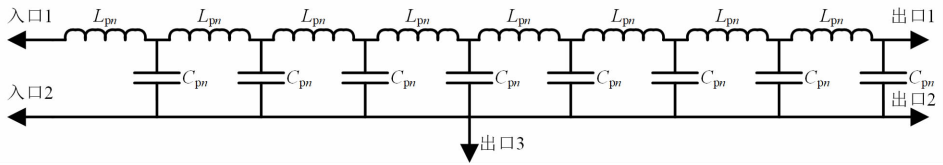


图 4 传输线等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of transmission line

感回路,采用分布电感等效。分布电容与分布电感在三维结构中的示意如图 5 所示。通过有限元仿真软件 CST 静电场求解器得到每级屏蔽电极与外筒之间的分布电容值。相邻两级 TVA 构成电感回路,通过 CST 的频域求解器得到回路电感。分布电容、电感的参数如表 2 所示。

表 2 TVA 每级屏蔽电极与外筒间的分布电容、电感

Table 2 Distributed capacitance and inductance parameters between each stage of TVA shielding electrode and the shell

参数	数值
第 1 级分布电容 C_1/nF	0.19
第 2 级分布电容 C_2/nF	0.07
第 3 级分布电容 C_3/nF	0.07
第 4 级分布电容 C_4/nF	0.07
第 5 级分布电容 C_5/nF	0.07
第 6 级分布电容 C_6/nF	0.07
第 7 级分布电容 C_7/nF	0.07
第 8 级分布电容 C_8/nF	0.378
每级分布电感 L/nH	37.6

对以上 3 部分子电路进行封装,建立了 8 级串联 TVA 的电路模型,如图 6 所示。图中 TVA- n 为第 n 级放电支路,T- n 为第 n 段传输线, R 为负载电阻。

3 TVA 电路模型的输出特性

传输线阻抗与每级并联放电支路阻抗逐级匹

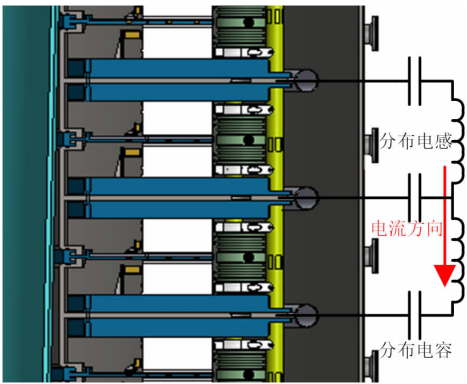


图 5 分布电容与分布电感示意图

Fig. 5 Distributed capacitance and distributed inductance diagram

配,负载与传输线末端阻抗匹配。当每级开关触发闭合时序为理想 IVA 时序时,每级传输线上的电压波形如图 7 所示,传输线输出电压峰值随串联级数 n 增加近似线性增加,电压脉冲前沿随串联级数增加逐级陡化,越接近负载脉冲前沿越陡。第 8 级传输线与匹配负载直接相连,故第 8 级传输线上的电压波形与匹配负载的波形基本相同,匹配负载上电压在 120 ns 达到峰值 899.1 kV。

屏蔽电极与接地外壳之间的电压波形如图 8 所示,随着串联级数增大,从高压电极起电压峰值逐级减小,即图 2 左侧第一级屏蔽电极承受电压最大。电压波形存在高频振荡,这是因为 TVA 每级屏蔽电极与外筒之间是气体间隙,分布电容小,放电回路等效串联电阻 $R < 2\sqrt{L/C}$,电压波形出现高频振荡。

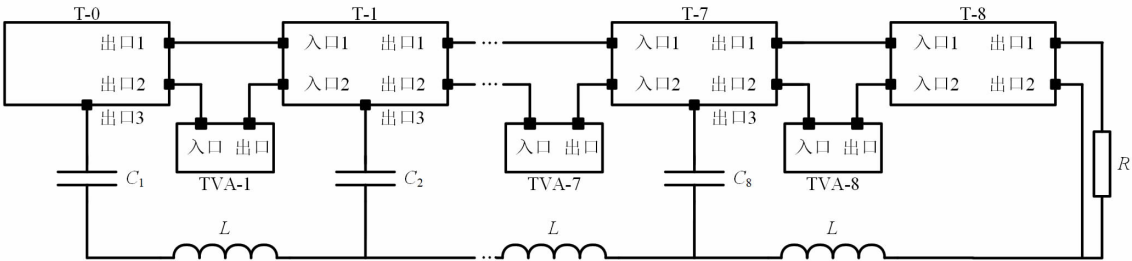


图 6 8 级串联 TVA 电路模型图

Fig. 6 Circuit model of the eight-stage TVA

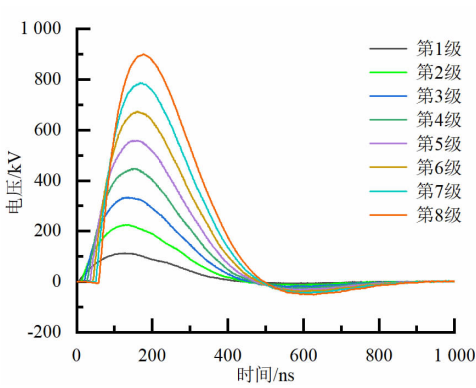


图 7 每级传输线上的电压波形图

Fig. 7 Voltage waveforms on each transmission line

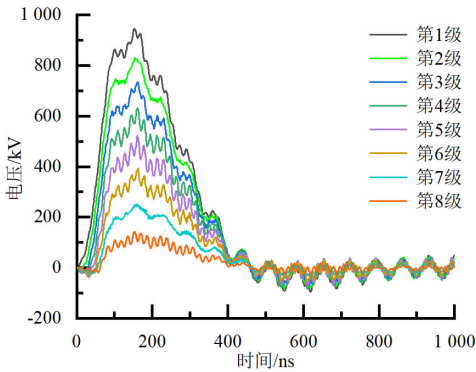


图 8 屏蔽电极与接地外壳之间的电压波形图

Fig. 8 Voltage waveform between shield electrode and grounded shell

4 TVA 输出特性的影响因素

4.1 开关闭合时间分散性对匹配负载电流的影响

放电支路采用文献[18-21]中的开关模型,利用恒流源对电容充电,通过电容的容差控制压控开关的导通时间。8 级串联 TVA 采用理想 IVA 时序触发,电容值设置为高斯分布,即开关闭合时间为高斯分布,设置电容器容差,即开关抖动 Δt 为 0、5、10、15、20 ns,采用 Pspice 蒙特卡罗分析方法,计算 100 次。开关抖动为 15 ns 时匹配负载上的电流波形如图 9 所示。开关抖动为 0 ns 时匹配负载电流峰值为 905 kA,前沿为 70 ns。以开关抖动为 0 ns 时输出电流为基准值,定义参数平均值与基准值的差值为波动值;分析 100 次仿真得到的电流波形,计算 100 个波形的电流峰值以及前沿参数的标准差 σ 。

不同开关抖动下匹配负载电流峰值与上升时间如表 3、表 4 所示。仿真结果表明:随着开关抖动增大,负载电流峰值波动值变化不大,上升时间波动值增大;同时,峰值与上升时间的标准差增大,负载电

流重复性越差。

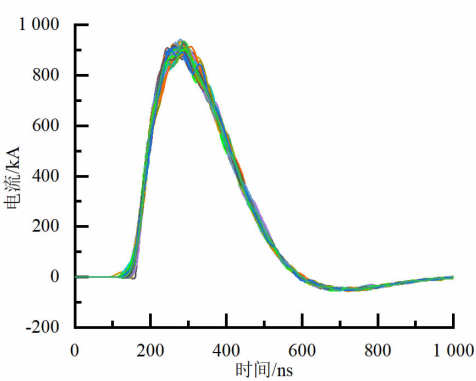


图 9 $\Delta t=15\text{ ns}$ 时 100 次仿真获得的负载电流波形

Fig. 9 Load currents obtained from 100 simulations when $\Delta t=15\text{ ns}$

表 3 开关闭合分散性对负载电流峰值的影响

Table 3 Influence of time jitters of closing sequence of TVA switch on load current peak

开关抖动 /ns	电流峰值/kA				
	最大值	最小值	平均值	波动值	标准差
5	920	899	907	2	3.92
10	930	894	909	4	7.83
15	943	889	908	3	11.10
20	953	880	906	1	13.90

表 4 开关闭合分散性对负载电流前沿的影响

Table 4 Influence of time jitters of closing sequence of TVA switch on load current rise time

开关抖动 /ns	上升时间/ns				
	最大值	最小值	平均值	波动值	标准差
5	75.7	65.5	70.8	0.8	2.07
10	86.2	63.9	75.5	5.5	4.49
15	102.0	65.0	82.0	12.0	7.50
20	112.0	69.4	89.2	19.2	9.85

4.2 触发时序对匹配负载电压的影响

定义触发时序系数 $\alpha = T_i / T_d$, 其中 T_i 为触发脉冲在相邻两级 TVA 的传输时间, T_d 为电脉冲在每级传输线的传输时间。当 $\alpha=1$ 时,触发时序为理想 IVA 时序; $\alpha=0$ 时,触发时序为每级 TVA 同时触发。图 10 为触发时序系数 α 从 0 变到 1.8、间隔 0.2 时匹配负载上的电压波形。随着 α 增大,脉冲前沿逐渐陡化。 $\alpha>1.4$ 时, α 增大,波形振荡增大。 $\alpha=1.4$ 时每级传输线上的电压如图 11 所示,随着级数增大,电压振荡逐渐减小。由图 11、图 7 可知,随着 α 增大,每级电压波形振荡增大。

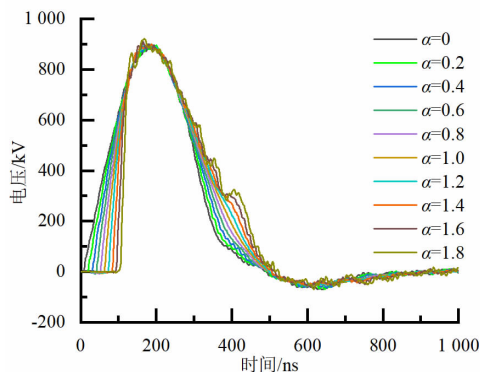


图 10 $\Delta\alpha$ 从 0 到 1.8、间隔 0.2 时负载电压波形

Fig. 10 Load voltages when triggering coefficient α from 0 to 1.8 interval 0.2

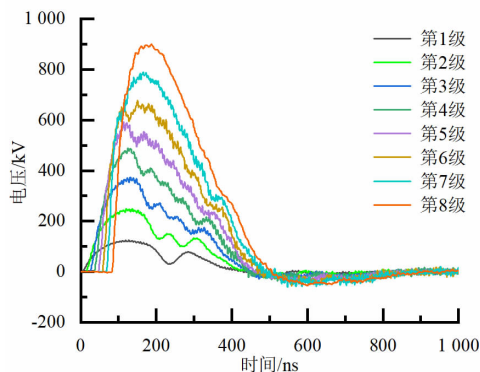


图 11 $\alpha=1.4$ 时每级传输线上的电压波形

Fig. 11 Voltage waveform on each transmission line when $\alpha=1.4$

4.3 传输线阻抗对输出电压的影响

定义阻抗系数 $m = Z_0/Z_s$, 其中 Z_0 为第一级传输线阻抗值, Z_s 为单级 TVA 放电支路等效阻抗值。负载与传输线末端阻抗匹配, 匹配负载电压随阻抗系数的变化如图 12 所示。可知随着阻抗系数增大, 负载电压的峰值增大, 前沿减小, 波尾时间变长。

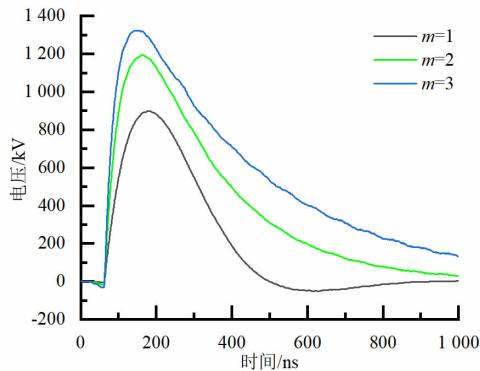


图 12 传输线阻抗对匹配负载输出电压的影响

Fig. 12 Influence of transmission line impedance on matched impedance load voltage

5 结 论

本文建立了 8 级串联 TVA 的电路模型, 得到了每级传输线与屏蔽电极的电位分布, 分析了开关闭合时序与分散性、传输线阻抗对匹配负载输出电流/电压的影响, 得到如下结论。

(1) 传输线电压峰值随串联级数 n 增大近似线性增大, 传输线输出脉冲前沿逐级陡化。第 1 级传输线内外筒之间的电压峰值为 113.2 kV, 第 8 级传输线内外筒之间电压峰值为 899.1 kV, 增大约 8 倍; 第 8 级传输线内外筒之间电压与第 1 级相比, 脉冲前沿缩短约 10 ns。输出波形前沿与单级连接匹配负载时基本相同。屏蔽电极与接地外壳之间的电压峰值逐级减小, 从第 1 级的 946 kV 减小至第 8 级的 143.6 kV。

(2) 理想 IVA 触发时序下, 随着开关分散性增大, 输出电流峰值与上升时间的标准差增大, 峰值波动值变化不大, 上升时间波动值增大。开关抖动从 0 增加到 20 ns, 电流峰值最大波动值为 4 kA, 标准差增大至 13.9 kA; 电流上升时间波动值增大至 19.2 ns, 标准差增大至 9.85 ns。

(3) 随着触发时序系数增大, 匹配负载的电压前沿逐渐陡化, 电流波形振荡增大。触发时序系数从 0 增加到 1.4, 前沿缩短约 100 ns。随着 α 增大, 每级电压波形振荡增大; 随着级数增大, 每级电压波形的振荡减小。

(4) 随着传输线阻抗增大, 输出电压峰值增大, 波尾时间变长, 脉冲前沿变短。峰值电压从匹配时的 850 kV 增大到 3 倍阻尼时的 1324 kV。3 倍阻尼时的输出波形与匹配时相比, 前沿缩短约 30 ns, 波尾时间增大约 200 ns。

参考文献:

- [1] 孙凤举, 邱爱慈, 魏浩, 等. 闪光照相快放电直线型变压器脉冲源新进展 [J]. 现代应用物理, 2015, 6(4): 233-243.
SUN Fengju, QIU Aici, WEI Hao, et al. Development of fast linear transformer drivers for radiography [J]. Modern Applied Physics, 2015, 6(4): 233-243.
- [2] 孙凤举, 邱爱慈, 魏浩, 等. 快 Z 箍缩百太瓦级脉冲驱动源概念设计的发展 [J]. 现代应用物理, 2017, 8(2): 13-24.
SUN Fengju, QIU Aici, WEI Hao, et al. Development of conceptual design on fast Z-pinch pulsed power driver with hundreds of terawatt [J]. Modern Applied

- Physics, 2017, 8(2): 13-24.
- [3] SPORER B J, SHAH A P, DOWHAN G V, et al. Multicavity linear transformer driver facility for Z-pinch and high-power microwave research [J]. Physical Review: Accelerators and Beams, 2021, 24(10): 100402.
- [4] SLUTZ S A, STYGAR W A, GOMEZ M R, et al. Scaling magnetized liner inertial fusion on Z and future pulsed-power accelerators [J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(2): 022702.
- [5] BASTRIKOV A N, VIZIR V A, VOLKOV S N, et al. Primary energy storages based on linear transformer stages [J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21(2): 295-299.
- [6] KIM A A, MAZARAKIS M G. The story of the LTD development [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(4): 749-756.
- [7] STYGAR W A, AWE T J, BAILEY J E, et al. Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments [J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2015, 18(11): 110401.
- [8] 邓建军, 王勐, 谢卫平, 等. 面向 Z 箍缩驱动聚变能源需求的超高功率重复频率驱动器技术 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 100201.
- DENG Jianjun, WANG Meng, XIE Weiping, et al. Super-power repetitive Z-pinch driver for fusion-fission reactor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 100201.
- [9] MAZARAKIS M G, FOWLER W E, LECHIEN K L, et al. High-current linear transformer driver development at Sandia national laboratories [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(4): 704-713.
- [10] HE Xu, SUN Fengju, QIU Aici, et al. Four-stage linear transformer driver with sharing shell: EM model, simulation, and performance [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(1): 358-364.
- [11] STYGAR W A, LECHIEN K R, MAZARAKIS M G, et al. Impedance-matched Marx generators [J]. Physical Review: Accelerators and Beams, 2017, 20(4): 040402.
- [12] STYGAR W, AUSTIN K, AWE T, et al. Conceptual design of a 960-TW accelerator powered by impedance-matched Marx generators [C]//2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-8.
- [13] HUISKAMP T, VAN OORSCHOT J J. Fast pulsed power generation with a solid-state impedance-matched Marx generator: concept, design, and first implementation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(9): 4350-4360.
- [14] JIANG Xiaofeng, SUN Fengju, WANG Zhiguo, et al. A gas-insulated mega-ampere-class linear transformer driver with pluggable bricks [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(12): 123303.
- [15] WANG Zhiguo, SUN Fengju, QIU Aici, et al. A 80 kV gas switch triggered by a 17 μ J fiber-optic laser [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(5): 056104.
- [16] 孙凤举, 姜晓峰, 王志国, 等. 四级串联共用腔体 MA 级 FLTD 的设计与仿真 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(3): 84-91.
- SUN Fengju, JIANG Xiaofeng, WANG Zhiguo, et al. Design and simulation of fast linear transformer driver with four stages in series sharing common cavity shell and mega-ampere current [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(3): 84-91.
- [17] 刘鹏. 开关闭合时序及分散性对多级感应腔串联 FLTD 性能影响的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- [18] LIU Peng, SUN Fengju, YIN Jiahui, et al. Effect of cavity-triggering sequences on output parameters of LTD-based drivers [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(5): 1247-1253.
- [19] LIU Peng, SUN Fengju, WEI Hao, et al. Influences of switching jitter on the operational performances of linear transformer drivers-based drivers [J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(4): 347-352.
- [20] 刘鹏, 孙凤举, 尹佳辉, 等. 触发时序对直线型脉冲变压器输出参数的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1397-1401.
- LIU Peng, SUN Fengju, YIN Jiahui, et al. Effect of triggering sequences on output parameters of linear transformer driver [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(5): 1397-1401.
- [21] DOUGLASS J D, HUTSEL B T, LECKBEE J J, et al. 100 GW linear transformer driver cavity: design, simulations, and performance [J]. Physical Review: Accelerators and Beams, 2018, 21(12): 120401.

(编辑 赵炜 亢列梅)