

磁脉冲压缩系统元件参数及电路仿真

张东东^{1,2}, 严萍¹, 王珏¹, 潘如政^{1,2}, 邵涛¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 应用 Pspice 电路分析软件,对单级磁脉冲压缩系统在纯电阻负载(400 Ω)情况下的压缩过程进行比较全面、准确的模拟,其中磁开关的模型基于微秒脉冲激励下的磁芯 B-H 曲线。当负载为 400 Ω 时,Pspice 模拟结果揭示了饱和变压器 PT 和磁开关 MS₁ 的磁芯所需的饱和时间分别为 4 μs 和 400 ns,输出的负极性脉冲峰值 -55 kV,半高宽为 100 ns,下降沿为 50 ns,实验结果很好地验证了这一结论。

关键词: 脉冲功率; 磁脉冲压缩器; 磁开关; Pspice

中图分类号: TM78

文献标志码: A

文章编号:1001-1609(2009)01-0018-03

Magnetic Component Design and Circuit Simulation for MPC System

ZHANG Dong-dong^{1,2}, YAN Ping¹, WANG Jue¹, PAN Ru-zheng^{1,2}, SHAO Tao¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand the operation of a magnetic switch and model its performance, a model of the magnetic pulse compressor system is presented based on the Pspice software. Circuit analysis of compressor and charging system accounting for nonlinear processes in a magnetic switch is described. Simulation results illustrate that in order to realize the desired pulse, 4 μs and 400 ns magnetization periods are required for PT₁ and MS₁, respectively. Two compression stages suffice for the forming of -55 kV, 100 ns pulses across a 400 Ω load; the fall time is 50 ns. The experimental results obtained with a resistive load are in good agreement with the circuit simulation.

Key words: pulsed power; magnetic pulse compressor(MPC); magnetic switch; Pspice

0 引言

近年来如图 1 中所示的磁脉冲压缩网络得到了广泛的应用 [1-8]。电路中每一级的储能电容是由两个串联的电容组成,并且这两个电容的中间结合点连接到前一级的输出,使得脉冲压缩的同时还能达到电压加倍的效果。同时由于电路中电容的充电和放电电流方向相反(图 1 中的虚线和实线分别表示充电和放电电流的方向),恰好省去了磁开关磁芯的复位电路[5],使得这种电路形式可以工作在很高的频率。目前这种磁脉冲压缩网络已用于许多高重复频率、高可靠性、长寿命、高平均功率的气体脉冲激光器、高压除尘设备及加速器系统中[2-7]。笔者根据图 1 所示电路设计了单级磁脉冲压缩系统,输出脉冲电压峰值-55 kV,半高宽为 100 ns,下降沿为 50 ns。

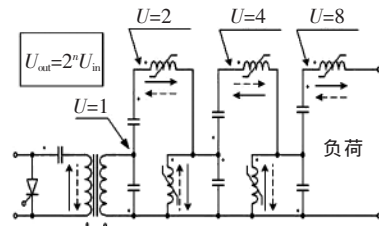


图 1 磁脉冲压缩网络拓扑电路

1 磁开关脉冲压缩系统原理

图 2 所示的单级磁脉冲压缩系统是根据图 1 的磁脉冲压缩网络设计的,它由两部分组成:低压部分和高压部分。低压部分由主储能电容 C₁、主开关 THY₁ 以及电感 L₁ 组成,最高充电电压为 1 kV 的串联谐振充电电源为主储能电容 C₁ 提供能量。高压部分采用油绝缘,包括:可饱和变压器 PT₁、磁开关 MS₁、储能电容器 C₃ 和 C₄ 以及电抗器 L₂。

系统工作原理见图 3,当 C₁ 被充电时,可饱和变压器 PT₁ 磁芯被复位到 -B_s 处(图 3 中的 A 点),

收稿日期:2008-03-05; 修回日期:2008-09-23

基金项目:自然科学基金(50437020);自然科学基金(50707032)。

作者简介:张东东(1980-),博士研究生,从事窄脉冲电源方面的研究。

充电结束后 PT_1 磁芯中的磁通密度回到 $-B_r$ 处;当晶闸管 THY_1 导通后,电容 C_1 通过 PT_1 给电容 C_3 和 C_4 并联充电,同时 PT_1 磁芯中的磁通密度开始从 $-B_r$ 处沿磁化曲线向 $+B_s$ 增长,当电容 C_3 和 C_4 被充电到最大值 40 kV 时可饱和变压器 PT_1 达到饱和;此时,可饱和变压器 PT_1 的电感急剧下降,与 PT_1 副边并联的电容 C_3 通过 PT_1 副边实现电压极性快速翻转,当电容 C_3 两端电压达到反向峰值时,使得 C_4 和磁开关 MS_1 交汇点处的电压就由原来的“0”电位跃变到 -70 kV,这时磁开关 MS_1 饱和,电容 C_3 和 C_4 串联起来对负载放电,在负载两端形成峰值 55 kV、半高宽为 100 ns、下降沿为 50 ns 的负极性脉冲^[7]。

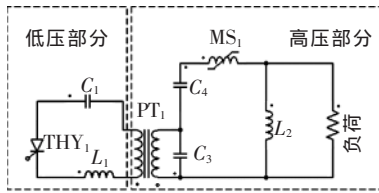


图2 磁脉冲压缩系统电路

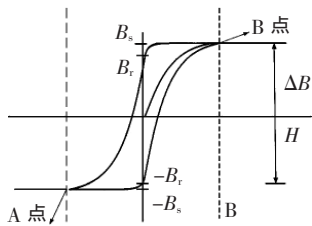


图3 磁开关磁芯的 B-H 曲线

2 PT_1 、 MS_1 设计及非线性磁芯模型

2.1 PT_1 设计

由环形磁开关的伏秒积平衡方程式^[1]知

$$\int U dt = NS \Delta B \quad (1)$$

式(1)中, U 为电感两端承受的电压, N 为绕组匝数, S 为磁开关磁芯截面积, ΔB 为磁芯磁通量密度变化。

图4为电容 C_1 通过 PT_1 给电容 C_3 和 C_4 并联充电时的等效电路, C_1'' 为 C_1 折算到 PT_1 副边时的等效值, L_1'' 为 L_1 折算到 PT_1 副边时的等效值、 PT_1 漏感及回路电感之和, 开关 K_1 和 L_{ms_1} 代表了磁开关 MS_1 , $L_1'' \gg L_2 + L_{ms_1}$; 由于续流电感 L_2 的存在, 在电容 C_1 通过 PT_1 给电容 C_3 和 C_4 并联充电时可以忽略电阻负载对电路的影响。其中 $C_1'' = C_1 / N^2 = C_3 + C_4$ 。

脉冲变压器 PT_1 原边两端电压

$$U_{PT_1}(t) = U_{C_m} (1 - \cos \omega t) \quad (2)$$

式(2)中, $\omega_1 = 1 / \sqrt{L_1 \cdot \frac{C_1}{2}}$ 。将式(2)代入式(1)得

$$\int U_{PT_1} dt = U_{C_m} \cdot \frac{\Delta t_1}{2} = N_{PT_1} S_{PT_1} \Delta B_{PT_1} \quad (3)$$

式(3)中, $\Delta t_1 = \pi / \omega_1 = 4 \mu s$, 原边匝数 $N_{PT_1} = 1$, $\Delta B_{PT_1} = 2.3 T$ 。

则 PT_1 截面积 $S_{PT_1} = 10 \text{ cm}^2$ 。

PT_1 副边饱和电感^[5]

$$L_{PT_s} = \frac{\mu_0 \mu_{rs} N^2 S}{lc} \quad (4)$$

磁芯平均磁路

$$lc = \frac{2\pi(r_o - r_i)}{\ln(r_o / r_i)} \quad (5)$$

式(5)中, r_o 为磁芯外径, r_i 为磁芯内径。 μ_{rs} 为 PT_1 磁芯饱和后的相对磁导率。

将式(5)代入式(4)可得

$$L_{PT_s} = \frac{\mu_0 \mu_{rs} N^2 h}{2\pi} \ln(r_o / r_i) \quad (6)$$

由式(6)可知, L_{PT_s} 与 $\ln(r_o / r_i)$ 、磁芯的高度 h 以及磁开关 MS_1 匝数的平方成正比, 由于所选的磁芯的高度 h 只有 2.5 cm 一种规格, 当单块磁芯截面积不能满足要求时, 通常把几块磁芯叠起来使用, 这就使得磁芯的高度 h 成倍增长, 也就意味着 L_{PT_s} 成倍地增长, 所以文中采用单块磁芯, 通过减小内外径之比来减小 L_{PT_s} , 即电容 C_3 极性翻转的时间 $\Delta t_2 = \pi / \omega_2$ 减小, 其中 $\omega_2 = 1 / \sqrt{L_{PT_s} \cdot C_3}$, 根据式(1)可知磁开关 MS_1 的体积也可以相应地减小, 这里选取磁芯的尺寸为 $\Phi 140 \times \Phi 60 \times 24 \text{ mm}$, 经过多次实验, 确定 PT_1 磁芯饱和后的相对磁导率 $\mu_{rs} \approx 1.2$, 则 $L_{PT_s} = 23.8 \mu H$, $\Delta t_2 = 342 \text{ ns}$ 。

2.2 MS_1 设计

当电容 C_3 和 C_4 充电结束后, C_4 和磁开关 MS_1 交汇点 A 的电势为 0, 图2所示的磁脉冲压缩电路可以等效为图5所示的电路。当 PT_1 饱和后, 开关 K_1 迅速导通, C_3 就与 PT_1 副边的饱和电感形成回路, C_3 与 L_{PT_s} 能量转换, 同时磁开关 MS_1 两端承受电压

$$U_{MS_1}(t) = \frac{U_{C_{3m}} + U_{C_{4m}}}{2} (1 - \cos \omega_2 t) \quad (7)$$

式(7)中, 角频率 $\omega_2 = 1 / \sqrt{L_{PT_s} \cdot C_3}$, L_{PT_s} 为 PT_1 饱和后副边电感。

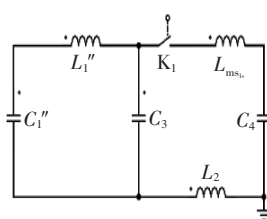


图4 C_3 和 C_4 并联充电时的等效电路

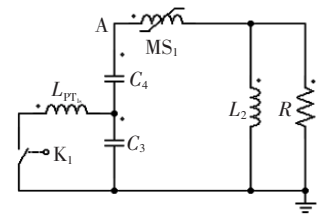


图5 C_3 极性翻转时磁脉冲压缩系统的等效电路

经过时间 $\Delta t_2 = 342 \text{ ns}$, 电容 C_3 完成电压极性翻转, 这时 A 点的电压达到极值, 此时磁开关 MS_1 饱和, 将式(7)代入式(1)可得

$$\int U_{MS_1} dt = \frac{U_{C_{3m}} + U_{C_{4m}}}{2} \cdot \frac{\Delta t_2}{2} = N_{MS_1} S_{MS_1} \Delta B_{MS_1} \quad (8)$$

根据式(8)可以确定匝数 N_{MS_1} 与磁芯截面积 S_{MS_1}

的乘积。为了满足磁开关 MS_1 在下一个脉冲到来时能够被复位至 $-B_r$ 处, 匝数 $N_{MS_1} \geq 5$, 当负载为 400Ω , 为了满足脉冲上升时间为 50 ns 的条件, 确定 $L_{ms_1} \approx 5 \mu\text{H}$, 代入式 (8), 联立式 (7) 可得磁开关 MS_1 的几何尺寸为 $\Phi 100 \times \Phi 40 \times 20 \text{ mm}$, 磁开关 MS_1 匝数 $N=13$ 。表 1 为脉冲变压器及磁开关数据。

表 1 脉冲变压器及磁开关数据

MS/PT	尺寸/mm	材料	数量	N	$\Delta B/T$
PT ₁	$\Phi 140 \times \Phi 60 \times 24$	1K101	1	1:50	2.30
MS ₁	$\Phi 100 \times \Phi 40 \times 20$	Ni-Zn	2	13	0.85

2.3 非线性磁芯模型

PT₁ 磁芯选用国产非晶软磁合金薄带 1K101 绕制而成, $\Delta B=2.3\text{T}$, $N_1:N_2=1:50$; MS₁ 磁芯选用国产

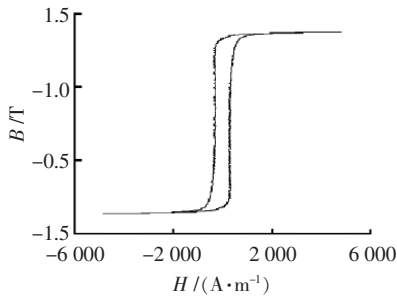


图 6 PT₁ 非晶磁芯 B-H 曲线

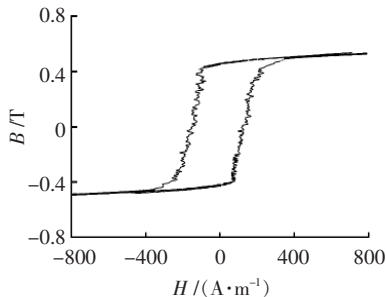


图 7 MS₁ 铁氧体磁芯 B-H 曲线

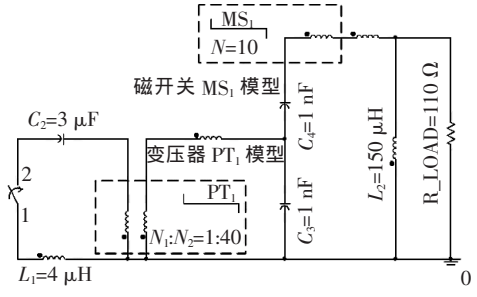


图 8 ns 脉冲发生器 Pspice 原理图

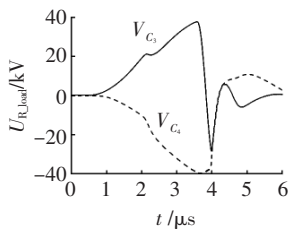


图 9 电容 C_3 、 C_4 两端电压波形

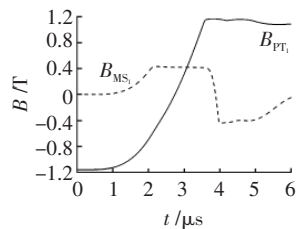


图 10 PT₁、MS₁ 各自磁芯的磁感应强度变化曲线

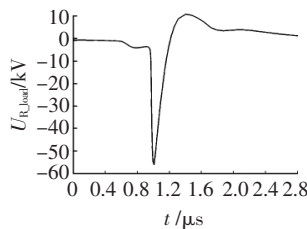


图 11 400 Ω 负载两端电压波形

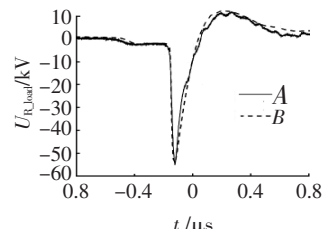


图 12 400 Ω 负载仿真与实验电压波形对比

饱和变压器 PT₁ 和磁开关 MS₁ 的磁芯所需的饱和时间分别为 $4 \mu\text{s}$ 和 400 ns , 400Ω 负载时输出的负极性脉冲峰值为 -55 kV , 半高宽为 100 ns , 下降沿为 50 ns 。

4 结语

笔者应用 Pspice 电路分析软件对磁脉冲压缩系统进行比较全面、准确的模拟。从图 12 可看出仿真和实验所得电压波形都具有较长时间的预脉冲, 这是由于磁开关并不是理想的开关元件, 在磁芯未饱和之前, 两端也有微小的电流流过, 使得负载上有 400 ns 的预脉冲; 另外, 由于在仿真中磁开关的模型是基于实际 B-H 曲线设定的, 所以在仿真中也反应出了预脉冲, 而且从图 12 可以看出仿真的波形与实际波形基本吻合, 也体现出基于 B-H 曲线的磁开关模型的实用性和准确性, 可以缩短设计工作的时间, 提高设计质量。

Ni-Zn 铁氧体, $\Delta B=0.85\text{T}$, $N=13$ 。经测试, 微秒脉冲激励下的非晶和铁氧体磁芯材料 B-H 回线分别见图 6、7, 将 B-H 回线参数输入到 Pspice 的模型编辑器组件中, 然后设定好磁芯的形状参数, 即磁芯的外径内径以及磁芯的截面积, 即可生成 PT₁ 和 MS₁ 的磁芯模型。图 8 为磁脉冲压缩电路 Pspice 模型原理图。

3 Pspice 模拟结果

通过 Pspice 模拟计算, 得出 C_3 、 C_4 两端电压波形见图 9, 图 10 表明了可饱和变压器 PT₁ 和磁开关 MS₁ 各自磁芯的磁感应强度 B_{PT_1} 、 B_{MS_1} 的变化情况, 图 11 为 400Ω 负载两端电压波形。图 12 为 400Ω 负载仿真(曲线 B)与实验(曲线 A)电压波形对比。

Pspice 仿真结果揭示了单级磁脉冲压缩系统中

参考文献:

- [1] ZHANG D D, YAN P, WANG J. Simulation on a Magnetic Pulse Compression System for DWA [C]// 1st Euro-Asian Pulsed Power Conference, Chengdu, 2006: 181-184.
- [2] 张东东, 严萍, 王珏. 磁脉冲压缩系统实验研究[C]// 07'中国电机工程学会高压专委会学术年会论文集, 深圳: 清华大学出版社, 2007: 1417-1419.
- [3] 张东东, 严萍, 王珏. 40 kV ns 脉冲发生器设计[C]// 07'中国电机工程学会高压专委会学术年会论文集, 深圳: 清华大学出版社, 2007: 1414-1416.
- [4] 张东东, 严萍, 王珏. 磁脉冲压缩系统的仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 497-500.
- [5] POKRYVAILO A, YANKELEVICH Y, WOLF M, et al. A High-power Pulsed Corona Source for Pollution Control Applications [J]. IEEE Trans. Plasma Science, 2006, 32(5): 2045-2054.

(下转第 24 页)

面切线相一致的部位。图 10 为伞裙侧面的电蚀现象。

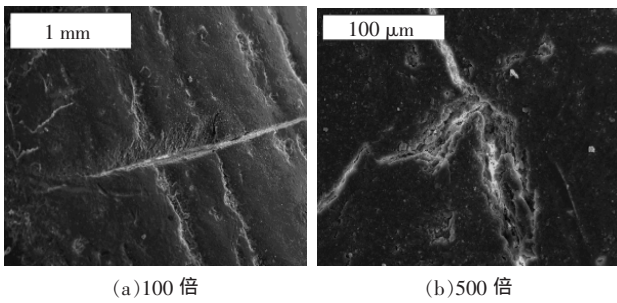


图 10 伞裙边沿表面的电蚀损

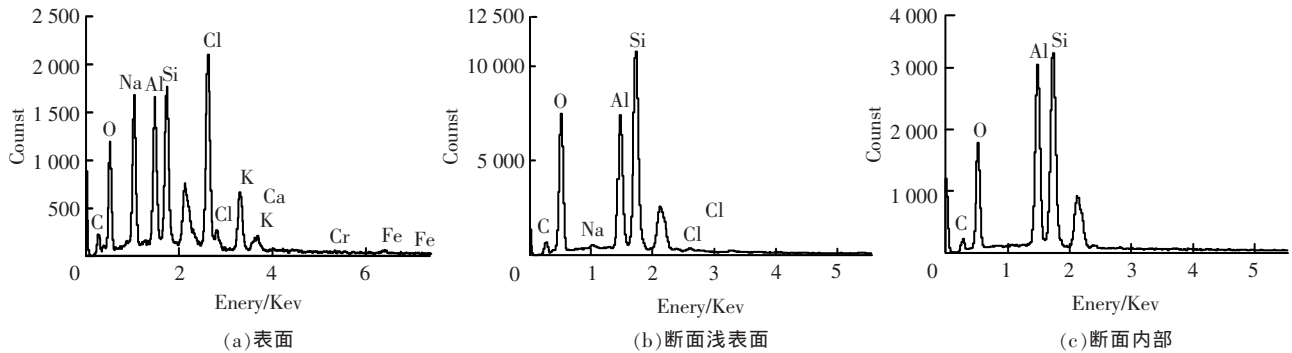


图 11 能谱分析结果

由于文中的分析对象来自现场运行 7 年的复合绝缘子,这说明盐分在复合绝缘子材质内部基本上不存在扩散和迁移,得到的浅表层的少量盐分含量极有可能是因为老化导致材质结构的疏松,对于致密的硅橡胶材质,不存在有机盐分的迁移。

3 结论

(1)对硅橡胶而言,位于高场强区材质的电老化程度要明显深于低场强区;对于承受场强相等的伞裙,由于紫外老化影响,上表面的老化程度要明显深于下表面。

(2)老化后硅橡胶的主要显微特征是材质疏松、填料外露、多孔洞。深度老化的材质甚至出现了完全疏松化,看不到明显有机物结构的情况。

(3)无论是电老化还是紫外老化,均对材质表面影响明显,对于材质内部,老化现象不明显。

(4)复合绝缘子伞裙侧面容易出现电蚀损,而上下表面容易出现材质老化。

(5)绝缘子表面的积污成分没有向材质内部迁移的趋势,无机盐分沿着硅橡胶材质老化后出现的疏松结构进入了材质,但是也只是在浅表层可见,在材质内部,无外来成分存在。

为了探索表面积灰、污物、盐分等在硅橡胶材质中的扩散和迁移过程,笔者还对绝缘子表面、断面近表层、断面中间层的元素组成进行了能谱分析,结果见图 11。图 11(a)为伞裙表面的元素组成,11(b)为断面靠近表面层的元素组成,距离表面 5 μm,11(c)为断面中间层的元素组成。由图 11(a)可知,表面层由于工业粉尘、飞灰的污染,元素组成非常复杂,但以 Na 盐污染为主,兼有其他的重金属污染。由图 11(b)、11(c)可知,各种污染成分只有极少数能进入材质浅表层,在材质的内部基本上不存在污染元素。

参考文献:

- [1] 崔江流, 宿志一, 易 辉. 我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 38-41.
- [2] 田可新. 硅橡胶材料表面老化及其对绝缘性能的影响 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 49-51.
- [3] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 党镇平, 彭宗仁. 运行断裂的 500 kV 棒形悬式复合绝缘子蚀损试验和电场计算分析[J]. 电瓷避雷器, 2005(4): 1-7.
- [5] 张福林, 王黎明. 复合绝缘子外绝缘材质老化内在原因分析 [J]. 中国电力, 2002, 35(7): 80-83.
- [6] 殷 禹, 梁曦东 李庆锋, 等. 复合绝缘子的人工加速老化试验 [J]. 电网技术, 2006, 30(12): 69-74.
- [7] 祁 黎, 颜景莲, 欧阳旭丹, 等. 复合绝缘子硅橡胶材料老化试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 91-94.
- [8] GUO Xiao-qing. Factors Which May Affect the INCLINED Plane Classification of Materials [C]// Proceedings of the ICPADM, 1988: 233-236.
- [9] RODER R. Cevosil Composite Hollow Insulator Factor History State of the Art and Design Basics [M]. Germany: Cellpack, 1998.
- [10] 李日隆, 郭小清. 合成绝缘子耐老化性能的研究 [J]. 绝缘材料, 2003(3): 28-30.
- [11] 孙建强, 李日隆. 硅橡胶合成绝缘子老化性能的试验研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(2): 13-14.

(上接第 20 页)

- [6] PENTRANTE C. Pollution Control Applications of Pulsed Power Technology [C]// Proc. of IEEE Int. Pulsed Power Conference, 1993: 1 248-1 257.
- [7] RUKIN S N. High Power Nanosecond Pulse Generators Based on Semiconductor Opening Switch (Review)[J]. Instruments

- and Experimental Techniques, 1999, 42(4): 439-467.
- [8] POKRYVAILO A, YANKELEVICH Y, WOLF M, et al. A 1 kW Pulsed Corona System for Pollution Control Applications [C]// Proc. 14' IEEE Int. Conference on Pulsed Power, 2003: 225-228.