

2.5 MV快沿电磁脉冲模拟器脉冲源 故障状态模拟分析

贾伟, 陈维青, 谢霖森, 张国伟, 李俊娜, 邱孟通
(西北核技术研究所, 710024, 西安)

摘要: 利用电路模拟软件与实测波形,建立了2.5 MV快沿电磁脉冲(EMP)模拟脉冲源等效电路模型. 通过在电路模型中模拟绝缘薄弱环节,如Marx输出端、中储电容、中储开关与峰化电容间支撑绝缘子、峰化电容等位置,设置等效滑闪电路的方法,对模拟器脉冲源可能出现的绝缘故障进行了模拟分析. 将模拟器调试阶段出现的故障波形与模拟结果进行比对,二者符合良好. 试验结果证明,根据模拟故障波形并结合试验中出现的巨大声响、电源跳闸等物理现象及后续输出电压降低等情况,可以实现模拟器滑闪故障的准确定位,从而保证故障的及时发现与快速排除,提高装置运行可靠性.

关键词: 电磁脉冲模拟器;故障分析;理论模型;故障定位

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0062-04

Simulation Analysis for Fault States of 2.5 MV Electro-Magnetic Pulse Driver with Fast Rise Time

JIA Wei, CHEN Weiqing, XIE Linsen, ZHANG Guowei, LI Junna, QIU Mengtong
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A circuit model of an electro-magnetic pulse (EMP) simulator driver with 2.5 MV rated voltage and fast rise time is established by the circuit simulation software and the measured output waveforms of the generator. An equivalent flash circuit is set up for the weaker insulation positions in the simulator, such as the output terminal of Marx, intermediate transfer switch, peaking capacitor, and intermediate capacitor. The modified model is used to analyze fault states of the driver, and the simulation results coincide well with the experimental data in debugging stage. The fault simulation and analysis combined with the physical phenomena — violent noise or breakdown of power supply appearing in the experiments and the subsequent output voltage reduction, can accurately locate the flash faults of the EMP simulator.

Keywords: electro-magnetic pulse simulator; fault analysis; theoretical model; fault location

自行研制的2.5 MV快沿电磁脉冲(EMP)模拟器由多系统组成,关键部件复杂、繁多. 为减轻装置重量便于运输与高空悬挂,内部高压绝缘介质多为气体. 装置内部绝缘结构存在大量固体绝缘介质、气体绝缘介质与金属部件的结合点,可能造成绝缘故障的薄弱环节众多. 当装置内部发生故障时,故障

的定位与排除十分困难.

大型EMP效应试验规模大、费用高、试验周期要求严格^[1-3]. EMP模拟器作为试验核心装置,其工作状态是否稳定可靠,如出现故障能否及时发现并快速排除等,均会对整个试验进程及试验结果产生巨大影响. 利用电路模拟软件建立EMP模拟器脉

冲源电路模型,并对模拟器脉冲源运行过程中可能出现的故障状态进行分析,通过与实际运行数据比对,及时发现模拟器脉冲源的异常状况,并对故障原因进行准确定位,提高模拟装置的运行可靠性。

1 模拟器脉冲源结构简介

为了使辐射场波形符合 IEC61000-2-9 定义的高空电磁脉冲 (HEMP) 标准的设计要求,2.5 MV 快沿电磁脉冲模拟器脉冲源采用气体绝缘二级脉冲压缩形式,整个系统由 Marx 发生器、中间储能电容器、中储开关、峰化电容器、输出开关和绝缘部件等 6 个关键部件组成^[4]。装置结构如图 1 所示。

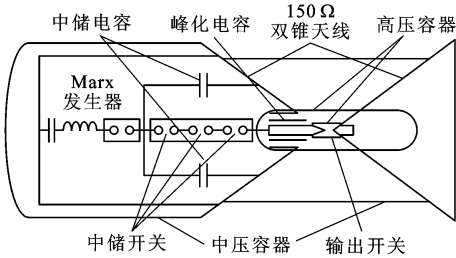


图 1 二级压缩模式脉冲功率源结构简图^[5]

脉冲源内部绝缘多采用 SF₆ 气体介质,常见故障多为绝缘介质结合点处的沿面滑闪。结合图 1 可以看出,存在滑闪可能的绝缘薄弱环节包括 Marx 输出端、中储电容、中储开关与峰化电容间支撑绝缘子、峰化电容等。

2 模拟器脉冲源模拟电路的建立与完善

利用数值模拟软件对脉冲功率源建立等效模拟电路,并通过与实测数据比对,对模拟电路元件电气参数进行修正。完善后的模拟电路如图 2 所示。

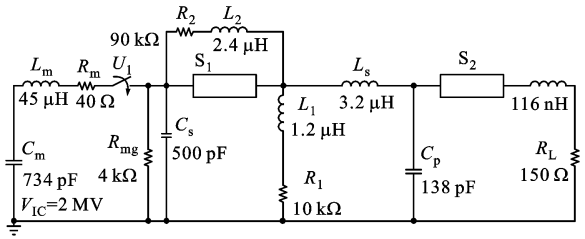
模拟器正常运行状态下输出电压波形如图 3 所示。图中所示波形分别为 Marx 发生器输出电压波形 V_{Marx} 、中储电容输出电压波形 V_{intern} 和峰化电容输出电压波形 V_{peaking} 。其中,图 3b 实测波形中 V_{peaking} 由模拟器双锥天线距放电点 2 m 左右的 B-Dot 探头测得,因测量位置与探头自积分时间常数限制,波形后沿衰减较快,与模拟结果有所区别。

3 模拟器脉冲源故障状态分析

3.1 Marx 输出端或中储电容发生滑闪

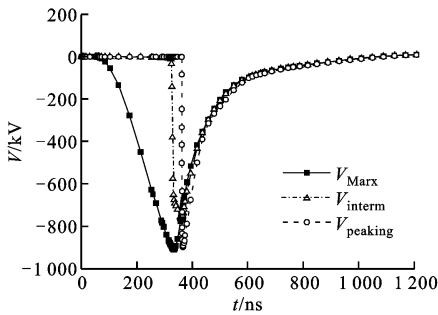
模拟电路如图 4 所示,其中 S_3 为滑闪发生等效

开关; T_{br} 为 S_3 闭合时间,即滑闪发生时刻; L_{br} 为滑闪通道电感。电路主要模拟 Marx 输出端在不同时

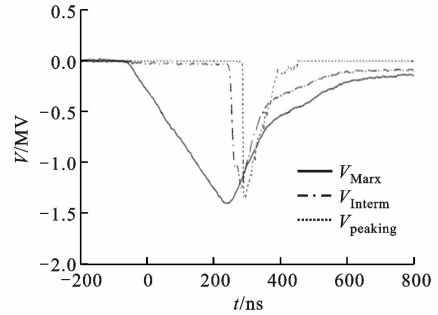


C_m 为 Marx 建立电容,电压设定为 2 MV; L_m 为 Marx 建立电感; R_m 为 Marx 放电回路电阻; R_{mg} 为 Marx 输出端等效并联电阻; S_1 和 S_2 分别为中储开关和输出开关; C_s 为中储电容器; L_s 为中储回路电感; R_2 为中储开关均压电阻, L_2 为均压回路等效电感; R_1 为中储后电压测量电阻; L_1 为中储后电压测量回路电感; C_p 为峰化电容器; L_p 为峰化回路电感; R_L 为负载

图 2 EMP 模拟器脉冲源模拟电路



(a)模拟结果



(b)实测结果

图 3 正常运行状态下模拟器脉冲源输出电压波形

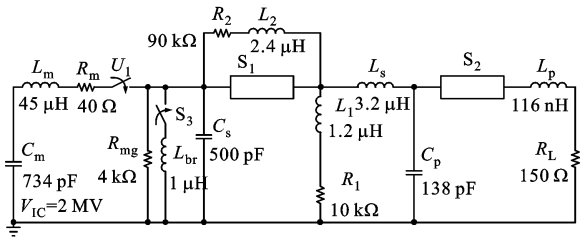


图 4 Marx 输出端或中储电容滑闪模拟电路

刻(相对 Marx 输出开关 U_1 的动作时刻)发生滑闪时,对输出电压波形特别是 Marx 发生器输出电压波形的影响,模拟结果如图 5 所示.从图中可以看出,滑闪导致 Marx 发生器输出脉冲波形后沿出现斜率转折,随后发生振荡,并且随着滑闪发生时刻的提前,波形后沿振荡加剧.

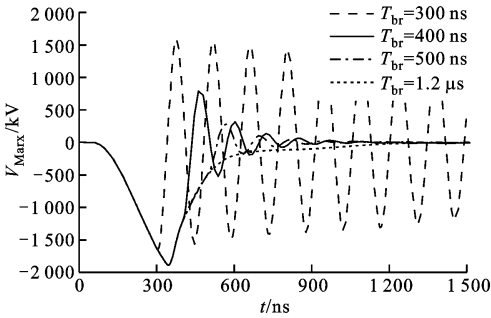


图 5 Marx 输出端或中储电容滑闪对 V_{Marx} 的影响

3.2 中储开关与峰化电容间支撑绝缘子滑闪

模拟电路如图 6 所示,其中 L_{br} 为滑闪回路等效电感,因绝缘子沿面滑闪路径在 1 m 左右,模拟时取 $1.2 \mu\text{H}$.电路主要模拟中储开关与峰化电容间绝缘子在不同时刻(相对 Marx 输出开关 U_1 的动作时刻)发生滑闪时,对输出电压波形特别是 V_{Marx} 的影响.模拟结果如图 7 所示.从图中可以看出,绝缘子发生滑闪使 V_{Marx} 后沿发生振荡,并且脉宽变窄,随着滑闪发生时刻的提前,后沿振荡加剧.

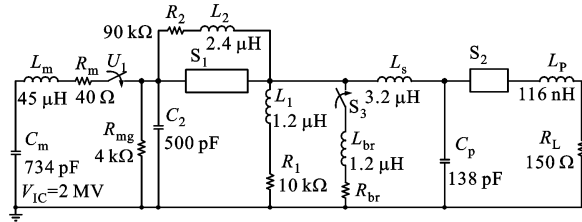
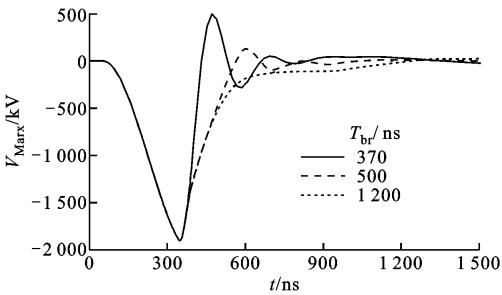


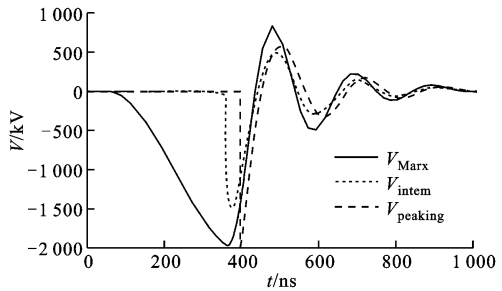
图 6 中储开关与峰化电容间绝缘子滑闪模拟电路

3.3 峰化电容滑闪

模拟电路如图 8 所示,其中 C_{pbr} 为因滑闪导致的电容值的变化.峰化电容发生滑闪需考虑两种情况:一种是滑闪发生时刻对输出波形的影响;另一种是峰化电容滑闪程度对输出波形的影响.第一种情况主要考虑峰化电容发生局部放电时因滑闪发生时刻不同对输出电压波形的影响,模拟结果如图 9 所示.从图中可以看出,峰化电容滑闪发生时刻对 V_{Marx} 影响较小,但会导致 V_{peaking} 滑闪发生时刻后波形发生剧烈振荡,且振荡幅度随滑闪发生时刻的不同而变化,滑闪发生时刻过早,波形振荡不显著,发生时



(a)不同击穿时刻电压 V_{Marx}



(b)脉冲源模拟输出电压

图 7 中储开关与峰化电容间绝缘子滑闪对输出波形的影响

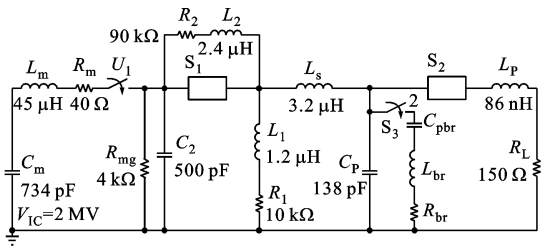
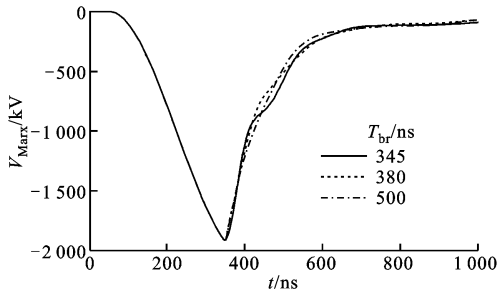
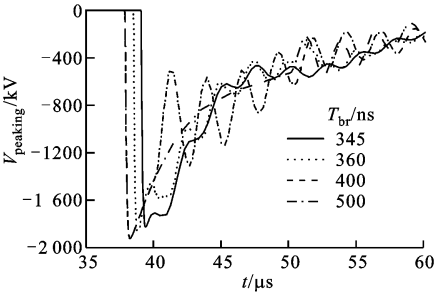


图 8 峰化电容滑闪模拟电路



(a) V_{Marx}



(b) V_{peaking}

图 9 峰化电容不同滑闪发生时刻对输出波形的影响

刻较晚,波形因自身损耗,振荡起始幅值逐渐变小.第二种情况主要考虑因滑闪导致峰化电容值的变化对输出电压波形的影响,模拟结果如图 10 所示.从图中可以看出,局部的放电会使 V_{Marx} 与 V_{peaking} 输出波形的后沿产生振荡,振荡幅度与滑闪发生程度成正比,对 V_{peaking} 影响尤其显著,随着滑闪发生程度的加深,峰化电容逐渐增大,输出电压波形的后沿振荡加剧,脉宽变窄.

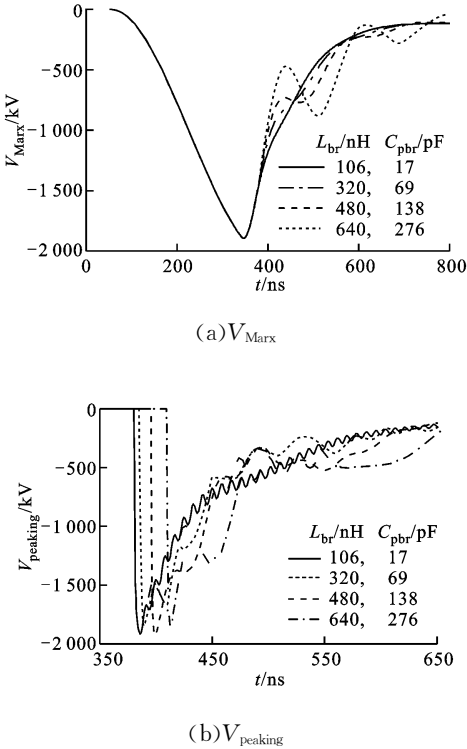


图 10 峰化电容因滑闪导致容值变化时对输出波形的影响

4 试验验证

模拟器脉冲源在试验调试阶段共发生两处测试波形异常情况.图 11 为模拟器调试阶段 Marx 发生器输出端实测故障波形与理论模拟结果的比较.通过比较可以看出,模拟结果与实际故障情况吻合良好.因回路电阻受开关工作状态影响较大,取值存在一定偏差,所以模拟波形后沿振荡周期与实际测量波形存在一定偏差.但是,根据该模拟故障波形,并结合调试试验中出现的巨大放电声响、后续中储开关击穿电压降低等现象,可以实现滑闪故障的准确定位.

图 12 为模拟器调试阶段 V_{Marx} 波形下降沿过零原因分析,图 12b 为实测电压除以自身峰值电压后

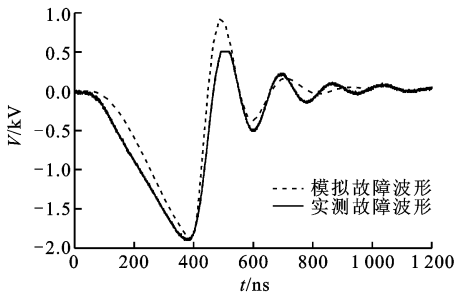
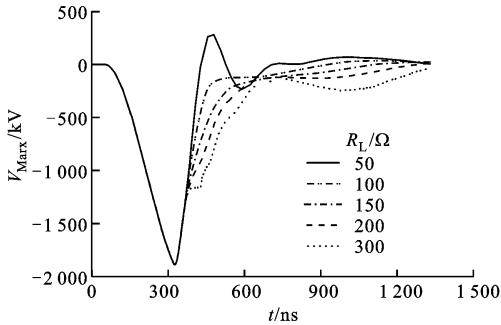
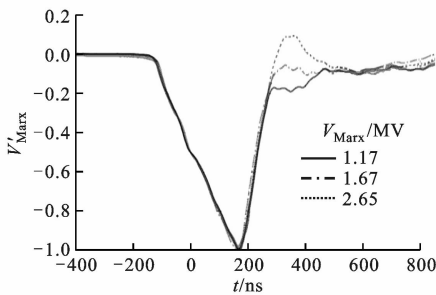


图 11 Marx 输出端实际故障波形与模拟结果比较

归一化的波形 V'_{Marx} .从调试试验结果可以看出,随着 Marx 输出电压的增加,输出电压波形后沿逐渐向零轴靠近,当输出电压大于 2 MV 时,波形后沿出现过零反峰.通过与模拟结果比较得知,出现该现象的原因可能与负载阻抗变小有关.实践证明,模拟器调试阶段以橡胶电阻作为假负载,在高压脉冲作用下橡胶电阻阻值存在逐渐变小的现象.



(a) 模拟结果



(b) 实测结果

图 12 负载阻值变化对 V_{Marx} 的影响

5 结 论

通过在 2.5 MV 快沿 EMP 模拟器脉冲源等效模拟电路不同位置增加等效滑闪回路的方法,对模拟器脉冲源可能存在的绝缘故障进行了分析,得到一些可供参考的数据.将这些数据与模拟器脉冲源

调试阶段实测故障波形进行比对,二者符合良好,证明利用该方法可以实现模拟装置运行故障的准确定位,从而保证快速排除模拟器故障,提高装置运行的稳定性.

参考文献:

- [1] IEC. IEC61000-4-32 Testing and measurement techniques high altitude electromagnetic pulse (HEMP) simulator compendium [S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2002.
- [2] BAUM C E. EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: an interim categorization [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1978,20(1): 35-53.
- [3] BAUM C E. From the electromagnetic pulses to high-power electromagnetics [J]. Proceedings of the IEEE, 1994,80(6):789-817.
- [4] 陈维青,何小平,贾伟,等. 2.5 MV 快沿电磁脉冲模拟器脉冲功率源的研制[C]//第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会. 北京:中国电子学会核电子学与核探测技术分会,2008: 689-693.
- [5] GILMAN C, LAM S K, NAFF J T, et al. Design and performance of the PEMP-2000: a fast risetime, 2 MV EMP pulser[C]//IEEE 12th International Pulse Power Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1999:1437-1440.

(编辑 杜秀杰)