



·脉冲功率技术·

多级串联 LTD 中开关自放电故障耦合特性实验*

王 杰, 陈 林, 卫 兵, 田 青, 蒋吉昊, 赵 越, 李 逢, 周良骥

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 中物院脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于 50 级模块串联的 LTD 单路样机, 开展了开关自放电故障耦合影响实验, 获得了开路 and 短路负载下、不同位置 LTD 模块内单只开关自放电对其余 LTD 模块的电压耦合影响规律。结果表明, 两种负载条件下, LTD 模块内单只开关自放电时在其余模块内耦合的电压幅度均较低, 且 LTD 距离越远电压幅度越低。在 ± 83 kV 的单只开关自放电电压下其相邻模块内耦合的最大电压幅度约 2.43 kV (对应电压波动约 3%)。

关键词: 直线变压驱动器; Z 箍缩驱动器; 气体开关; 自放电故障

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220128

Coupling characteristics experiment of switch prefire in multi-stage linear transformer driver

Wang Jie, Chen Lin, Wei Bing, Tian Qing, Jiang Jihao, Zhao Yue, Li Feng, Zhou Liangji

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621999, China)

Abstract: The influences of switch prefire in different LTD cavities on the other cavities with shorted or open load have been researched based on the 50 stages linear transformer driver module. It is shown that the induced voltage in the other cavities is very low, and the amplitude of voltage signal will decrease with increase of distance. The maximal induced voltage is 2.43 kV when switch prefire occurred in neighbouring cavity at voltage of ± 83 kV. The results will contribute to reliability model constructing, analysis and assessment of large scale LTD generator.

Key words: linear transformer driver, Z-pinch driver, gas switch, prefire malfunction

快脉冲直线变压驱动器(LTD)采用了化整为零的电路拓扑结构将负荷分散到多个器件, 大大降低了开关和电容器等基本器件的功率要求^[1]。既有利于提高器件的寿命和稳定性, 同时又可以直接产生快脉冲。然而, 对于数十 MA 的强流脉冲功率驱动器来说, 这种技术带来的最大困难将是数量庞大的开关以及装置系统的稳定可靠运行^[2]。为此, 一方面需要采取措施对开关进行优化和选型, 降低其误动作概率, 提高开关可靠性; 另一方面, 还需要研究开关自放电故障的耦合特性, 为整机可靠性建模、分析和评估提供重要数据^[3]。

由于多级串联 LTD 的次级内筒是一根贯穿所有模块的金属导体, 一旦某个模块中的开关出现自放电故障, 其产生的故障脉冲信号将由故障模块的初级耦合至 LTD 次级, 再由贯穿始终的 LTD 次级耦合至其他模块。耦合信号的强弱将决定其对正常模块中开关工作状态的影响程度。只有在充分了解开关自放电故障在多级串联 LTD 中的耦合特性基础上, 才能有针对性地采取相应的预防措施, 将开关自放电故障对装置的运行以及整体输出性能的影响程度降至最低。

在开关自放电故障的影响研究方面, 2006 年, 美国桑迪亚实验室(SNL)的 Leckbee J 等人^[4]针对 6.5 MV-LTD 闪光照相驱动器概念设计, 利用传输线等效电路模型开展了驱动器失效模式分析。其中针对开关自放电故障仅计算和分析了对故障开关所在模块的影响。结果表明, 开关自放电会在当前支路上产生较高的反峰电压, 因而对电容器寿命影响较大, 而同一模块其他支路上的电压反峰不超过 10%。2012 年, 西安交通大学的刘鹏等人^[5]利用电路模型, 针对自放电故障模块开展了在不同的磁芯损耗等效电阻下开关自放电对自身模块的影响计算分析。结果表明, 开关自放电时会会在其他未放电开关的直流充电电压上叠加一个振荡脉冲, 并且振荡脉冲的幅度与自放电故障

* 收稿日期: 2022-04-26; 修订日期: 2022-08-08

联系方式: 王 杰, 309925853@qq.com。

通信作者: 陈 林, chenlin_mail@21cn.com。

模块磁芯的损耗等效电阻密切相关。

鉴于Z箍缩驱动器在惯性约束聚变、辐射输运、辐射效应以及极端条件下材料动力学特性等方面的重要应用价值^[6-10],在某项目的支持下,流体物理研究所从2014年开始正式启动了由50级1MA模块串联的LTD单路样机研制历程,2021年7月最终完成了整机的调试实验。基于已经完成调试的LTD单路样机,开展了开关自放电故障耦合实验,首次获得了开关自放电故障对其余LTD模块的电压耦合影响规律。

1 实验描述

LTD单路样机为输出电流约数十MA的Z箍缩驱动器其中一路的主体部份,主要包括50级1MA-LTD模块(每10级LTD模块组成一个串联组件)组成的初级功率源、次级真空磁绝缘线、负载系统(含锥形过渡区和调试负载)。每级LTD模块^[11]共有32个基本放电支路(包含64台100kV/100nF电容器和32只200kV气体开关),LTD单路样机总共需要3200台电容器和1600只气体开关,系统标称总储能为1.6MJ。图1为LTD单路样机主机三维示意图,主机总长度约23m,直径约3m。左端为用于支撑固定悬臂IVA内筒的延伸支撑段,右端为锥形过渡区和调试负载(二极管)。

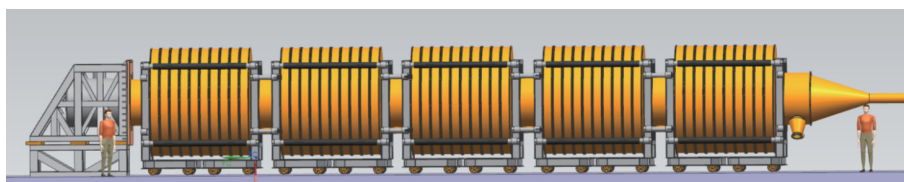


Fig. 1 Schematic of the linear transformer driver module

图1 LTD单路样机主机三维示意图

为了得到各LTD模块上的电压耦合信号,采用电阻分压器(其中高压臂阻值约3k Ω)测量了模块内电容器正极性输出电极上的电压,其中电压分压器高压端接线位置如图2所示,分压器接地端与模块外侧壳体连接。在装到LTD模块内部之前已对分压器进行了线下标定。

为了获得较高电压下(大于 ± 80 kV)开关自放电时的故障耦合情况,LTD开关需充入适当压力的零级空气,在高压充电时LTD模块腔体需充入约0.1 MPa的SF₆气体进行绝缘。同时,为了得到极端条件下的故障耦合参数,故障实验中LTD单路样机末端的调试负载分为开路和短路两种模式。次级磁绝缘传输线间隙的真空度约 5×10^{-3} Pa。分别考察了第1、5、10、15...50级LTD模块开关出现自放电故障时对其余LTD模块的电压耦合特性。实验中除了开关自放电所在的LTD模块全部电容器均充电外,其余LTD模块未充电。

2 实验结果及分析

实验中尽管进行了气压调节,但开关实际自放电电压在 $\pm 80 \sim \pm 85$ kV范围并不固定,为了便于分析,数据处理时对所有实验数据按 ± 83 kV进行了等效处理(假设充电电压与耦合信号幅度呈线性关系)。图3为末端短路情况下,第45级LTD模块内一只开关自放电时电容器正极性输出电极上测得的自身输出电压信号。由图3可知,其主

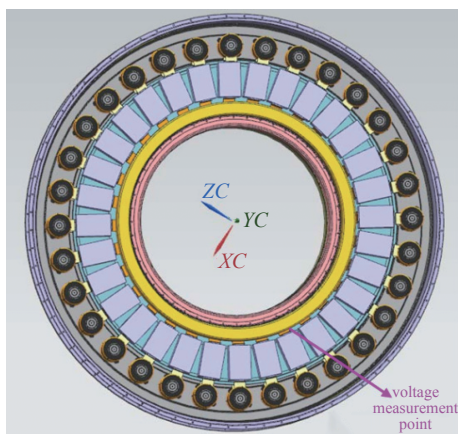


Fig. 2 Schematic of the LTD cavity and voltage measurement position

图2 LTD模块三维结构以及电压测试点位置示意图

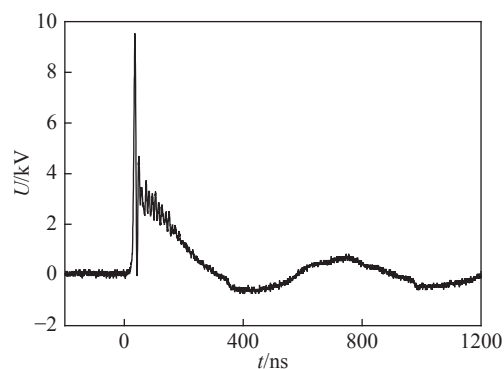


Fig. 3 Output voltage signal measured in the LTD cavity where a switch pre-fired

图3 末端短路情况下第45级LTD模块内一只开关自放电时测得的自身输出电压信号

要特征是在主振荡(周期约 710 ns)波形的基础上叠加了一个高频振荡(周期约 12.7 ns)。主振荡可能是自放电支路与初级腔体构成的放电回路产生的电压信号,而高频振荡可能为自放电支路产生的电压波在放电初期沿输出端环形金属电极(次级外筒)一周多次传播(放电初期沿环形电极存在电位差)并与主脉冲叠加所致。图 3 表明模块内一只开关自放电时电容器输出端的电压幅度约 9.5 kV(尖峰数据,实际包络线峰值约为 4 kV)。

图 4 为末端短路或开路情况下,在第 25 级 LTD 模块内出现一只开关自放电时在其余模块上测得的耦合电压信号。实验结果表明,耦合信号与自放电模块的输出信号极性相反。自放电模块两侧其他模块上的耦合信号基本呈对称分布,因此图中只列出了自放电模块单独一侧几个模块(第 26、28、30、33、37、41 级)上的典型耦合信号。总的来说,距离自放电模块越远耦合电压幅度衰减越明显。

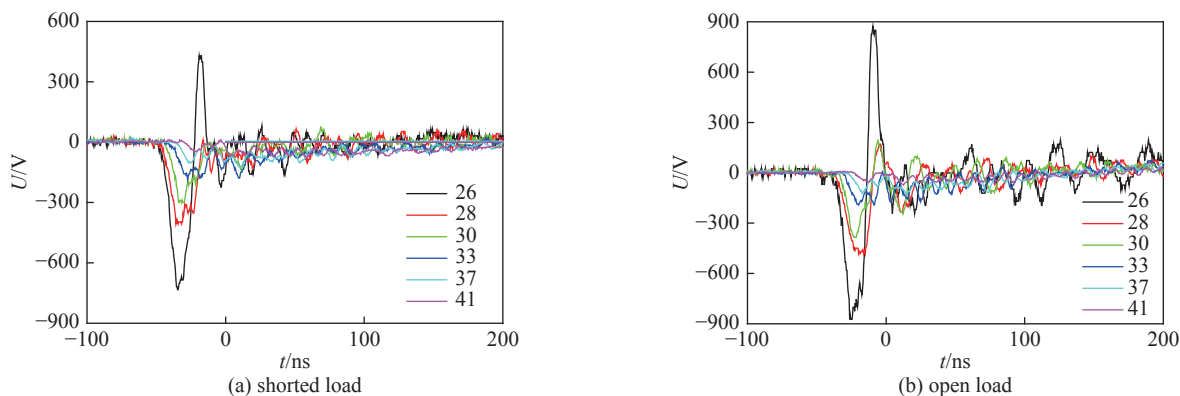


Fig. 4 Induced voltage signals measured in other cavities when a switch pre-fired in the 25th cavity with shorted or open load

图 4 末端短路或开路情况下在第 25 级 LTD 模块内出现一只开关自放电时在其余模块上测得的耦合电压信号

图 5 为末端短路或开路情况下,不同 LTD 模块(第 5、15、25、35、45 级)内出现一只开关自放电时在其余模块上测得的耦合电压幅度变化规律。由图 5 可知,末端短路情况下,最高耦合电压幅度总体上呈两端(第 5 和 45 级模块)高中间略低的对称分布。而对应每一个出现开关自放电的模块,其两侧模块上的耦合电压幅度也基本上为对称分布,其中与自放电模块紧邻的模块上耦合的电压最高,距离越远的模块,其耦合电压幅度呈非线性衰减趋势。末端开路情况下,从始端往负载区方向最高耦合电压幅度总体上逐渐降低,但靠近开路负载的模块出现开关自放电时其在附近模块上耦合的最高电压幅度有增加趋势。总体而言,当 LTD 模块内出现开关自放电时在其相邻模块上耦合的电压最高,以末端短路情况为例(如表 1 所示),当第 1 级 LTD 模块开关出现自放电时在其相邻的第 2 级模块上耦合的最高电压幅度约为 2.43 kV。

实验结果表明,在约±83 kV 的单只开关自放电电压下,对于开路或短路负载,所有模块上产生的最高耦合电压

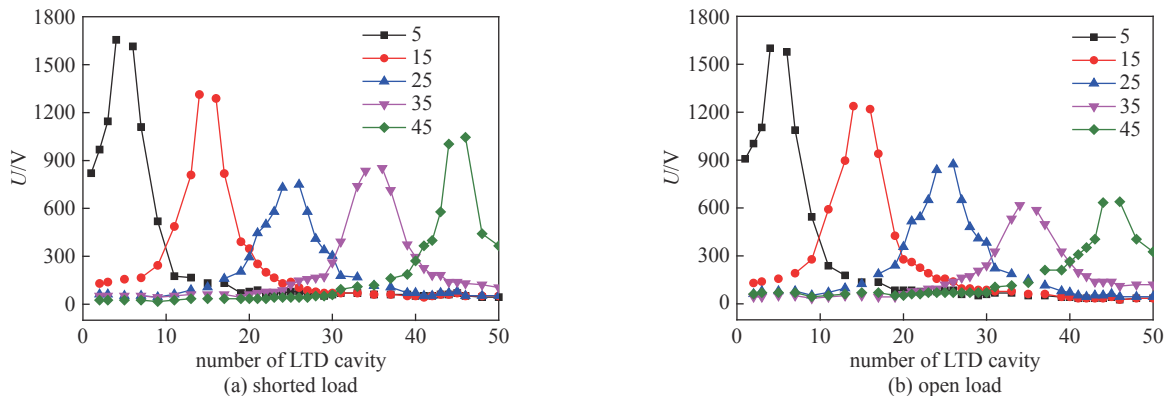


Fig. 5 Maximal induced voltage in other cavities when a switch pre-fired in one of the 50 cavities with shorted or open load

图 5 末端短路或开路情况下不同 LTD 模块内出现一只开关自放电时在其余模块上测得的耦合电压幅度

表 1 末端短路时不同 LTD 模块内出现一只开关自放电时在其相邻模块上测得的最高耦合电压幅度

Table 1 Maximal induced voltage when a switch prefire occurred in neighbouring cavity with shorted load

No. of the cavity in which a switch pre-fired	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
maximal induced voltage in neighbouring cavity /V	2430	1656	1620	1313	1092	748	642	852	905	1045	1488

不超过 2.43 kV, 也就是说, 其余模块上的开关将在直流电压基础上叠加一个小幅度的脉冲电压, 其中最高电压波动 ($2.43/83 \approx 3\%$) 仅出现在第 2 级模块上(当第 1 级模块有一只开关自放电时)。对于大规模开关同步运行的 LTD 功率源系统来说其开关工作系数往往不会太高(一般不超过 80%), 因此相对而言该耦合电压幅度对其余模块开关的自放电概率影响较小。需要说明的是, 本文实验中除了自放电模块充电之外其余模块并未充电。对于全部模块充电的情形, 根据之前作者在 10 级 LTD 模块串联组件^[12] 以及由 50 级模块串联的 LTD 单路样机上的实验结果^[13], 间接表明上述分析和结论仍然适用。

3 结 论

基于已经完成安装调试的 50 级模块串联 LTD 单路样机(每级 LTD 模块共有 32 个基本放电支路, 分别包含 64 台 100 kV/100 nF 电容器和 32 只 200 kV 气体开关), 在负载区分别为开路和短路两种情况下, 结合模块内电容器正极性输出电极上的电压测试, 分别开展了不同位置 LTD 模块内出现一只开关自放电故障时对其余模块的电压耦合影响规律实验研究。实验结果表明, 在负载区分别为开路和短路两种情况下, LTD 模块内一只开关自放电时在其余 LTD 模块内耦合的电压幅度均较低, 其中与自放电模块紧邻的 LTD 模块上耦合电压相对较高, 距离越远幅度越低(且呈非线性衰减趋势)。在 ± 83 kV 的单只开关自放电电压下其相邻 LTD 模块内耦合的最大电压幅度约 2.43 kV。对应设定的 83 kV 最高充电电压, 其电压波动约为 3%。因此, 当正常工作的 LTD 开关工作系数不太高时故障耦合信号对其自放电概率影响较小。

参考文献:

- [1] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (S)脉冲叠加的意义[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8): 1877-1882. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (V) the implication of pulse adding[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 1877-1882)
- [2] 陈林, 王勳, 邹文康, 等. 中物院快脉冲直线型变压器驱动源技术研究进展[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1798-1806. (Chen Lin, Wang Meng, Zou Wenkang, et al. Recent advances in fast linear transformer driver in CAEP[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1798-1806)
- [3] 计策, 周良骥, 焦健, 等. 大型LTD装置功率源可靠性初步分析[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 045003. (Ji Ce, Zhou Liangji, Jiao Jian, et al. Reliability of large LTD device analysis[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 045003)
- [4] Leckbee J J, Maenchen J E, Johnson D L, et al. Design, simulation, and fault analysis of a 6.5-MV LTD for flash X-ray radiography[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 1888-1899.
- [5] Liu Peng, Sun Fengju, Wei Hao, et al. Effect analysis of switch prefire in linear transformer drivers[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(1): 83-89.
- [6] 邓建军, 王勳, 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: 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: 100201)
- [7] 彭先觉, 王真. Z箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 090201. (Peng Xianjue, Wang Zhen. Conceptual research on Z-pinch driven fusion-fission hybrid reactor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 090201)
- [8] Bailey J E, Chandler G A, Cohen D, et al. Radiation science using Z-pinch X rays[J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(5): 2186-2194.
- [9] Davis J P, Deeney C, Knudson M D, et al. Magnetically driven isentropic compression to multimegabar pressures using shaped current pulses on the Z accelerator[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12: 056310.
- [10] Rothman S D, Parker K, Robinson C, et al. Measurement of a release adiabat from ~ 8 Mbar in lead using magnetically driven flyer impact[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(12): 5620-5625.
- [11] 陈林, 王勳, 谢卫平, 等. Z箍缩直线变压器驱动源原型模块设计[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 095007. (Chen Lin, Wang Meng, Xie Weiping, et al. Design of the linear transformer driver stage prototype for Z-pinch driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 095007)
- [12] 陈林, 蒋吉昊, 邹文康, 等. LTD模块串联装置中部分模块不工作时的输出性能[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 045004. (Chen Lin, Jiang Jihao, Zou Wenkang, et al. Performance of 10-stage LTD generator with some malfunctioning stages[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 045004)
- [13] 陈林, 田青, 周良骥, 等. 基于LTD的Z箍缩驱动器单路验证装置研制进展[C]//第七届全国脉冲功率会议文集. 2021. (Chen Lin, Tian Qing, Zhou Liangji, et al. The progress of linear transformer driver module for Z-pinch research[C]//Proceedings of 7th Chinese Pulsed Power Conference. 2021)