



·第 4 届 HPLPB 前沿学术研讨会专栏·

单路直线变压器驱动源中组件自放电 连锁故障影响分析*

万臻博, 丁卫东

(西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘 要: 建立电路模型分析了 28 级单路直线变压器驱动源 (LTD) 中可能出现的组件自放电连锁故障过程。结果表明当任何一个 4 级组件被误触发时, 均会导致整个单路 LTD 连锁动作, 产生的故障电压无法被单路驱动源输出端的隔离开关限制。且当误动的组件位于单路 LTD 下游时, 电压沿着传输线向上游传播会在第 1 组件较低阻抗的传输线上产生远高于正常放电时的峰值场强, 有可能引发装置的绝缘故障。通过适当增加第 1 组件传输线内外导体的间隙可以在几乎不影响负载电流输出幅值和波形的前提下削弱反向传播的连锁故障导致的高峰值场强, 从而提高装置运行的可靠性。

关键词: 直线变压器驱动源; 自放电; 连锁故障; 可靠性

中图分类号: TM836

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240063

Influence analysis of cascading failure in linear transformer driver caused by group prefire

Wan Zhenbo, Ding Weidong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A circuit model is established to analyze the possible cascading failure process of group prefire in 28-stage linear transformer driver (LTD). The results show that when a 4-stage group is triggered by mistake, it will cause the entire 28-stage LTD chain action, and the generated fault voltage cannot be limited by the isolation switch at the output of the 28-stage LTD. In addition, when the faulty group is located downstream of the LTD, the voltage propagating upstream along the transmission line will produce a peak field strength on the transmission line of the lower impedance of the first group that is much higher than the normal operations, which may cause the insulation failure of the device. By appropriately increasing the gap between the inner and outer conductors of the transmission line of the first group, the peak field intensity caused by the cascading failure can be weakened without affecting the output amplitude and waveform of the load current, thus improving the reliability of the operation of the device.

Key words: linear transformer driver, prefire, cascading failure, reliability

近二十年来直线变压器驱动源 (LTD) 技术发展迅速, 被认为是 100 TW 级大型脉冲功率装置最有前景的技术路线, 作为 Z 箍缩装置的驱动源具有很广阔的应用前景^[1-3]。西安交通大学和西北核技术研究院提出了 15 MA 脉冲功率装置 CZ-15 的概念设计, 其主体架构采用 20 路 28 级串联 LTD 驱动源并联。在前期研究中, 已经建成 12 级串联 LTD 装置^[4]并开展了大量试验研究, 在调试试验过程中, 发现开关自放电可能导致装置整体连锁故障^[5]。西安交通大学刘鹏在对多级串联 LTD 的触发方式研究中, 曾探讨了通过次级耦合过电压触发 LTD 的技术路线^[6], 这一触发思路曾在小型固态开关的 LTD 脉冲源中得到了应用和验证^[7]。西北核技术研究院魏浩等又从气体开关直流叠加脉冲电压击穿特性的角度, 进一步研究了过压触发的可行性^[8]。这些结果都预示大型 LTD 装置中自放电故障可能引发连锁性故障, 为了确保 CZ-15 装置的正确设计和可靠运行, 28 级单路 LTD 装置的故障模式及故障危害

* 收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51790524, 51790521)

联系方式: 万臻博, claisen@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 丁卫东, wdding@xjtu.edu.cn。

仍有待深入研究。本文利用 LTD 电路模型^[9], 深入分析 28 级单路 LTD 中组件自放引发连锁故障的可能性以及对装置绝缘的影响, 并提出初步的解决方案, 为大型 LTD 装置的研制和安全运行提供参考。

1 装置的结构与电路模型

28 级单路 LTD 由 7 个 4 级串联共用腔体的 LTD 组件依次串联而成, 相邻组件之间由一定长度的传输线相连, 传输线上布置有用于监测电压的 D-dot 探头。每级 LTD 模块内部包含了 23 个主放电支路和 1 个内置触发支路^[10]。次级水介质传输线的内导体采用分段设计, 其中由于第一组件的次级传输线匹配阻抗的变化率较大, 因此内导体采取了直径渐变的圆台形状设计, 其余各组件由于次级传输线匹配阻抗的变化率较小, 因此为了便于加工内导体均设计为等直径圆柱, 使得各个位置处的次级传输线阻抗近似等于该组件内各级理想阻抗的平均值。LTD 运行时, 按照特定时序分别对 7 个 4 级 LTD 组件各施加 1 路外部触发脉冲, 在每一个 4 级组件内通过高压延时线将外部触发脉冲按固定时延输入到每一级模块的内置触发支路, 然后由触发支路同步触发每一级模块内的所有主支路^[11]。28 级单路 LTD 的整体结构如图 1 所示。

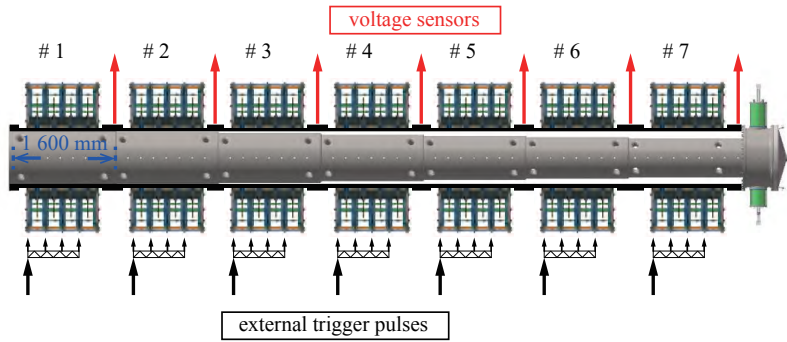


Fig. 1 Structure and triggering mode of the 28-stage LTD device

图 1 28 级 LTD 装置的结构与触发方式

为了预测 28 级单路 LTD 的输出特性, 构建了完整的电路模型, 其中单级的等效电路如图 2 所示^[9], 忽略 23 个主支路放电的分散性, 将其整体以一个 RLC 支路等效, 磁芯采用了磁滞模型等效电感和动态损耗电阻并联模拟, 次级传输线采用多个 LC 支路级联等效, 具体参数根据传输线几何结构计算得到。完整的 28 级单路 LTD 电路模型在 2.8Ω 匹配负载上产生的电流仿真结果如图 3 所示, 当模块充电电压为 $\pm 80 \text{ kV}$ 时, 负载电流可达 0.86 MA 。

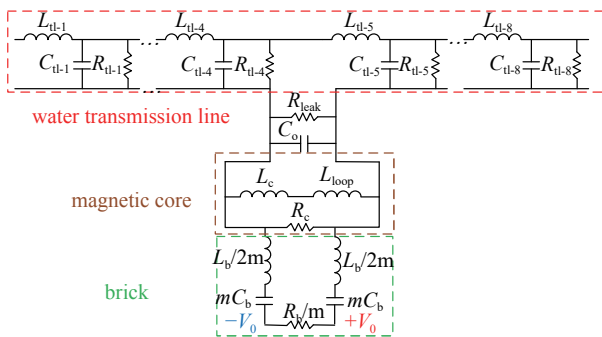


Fig. 2 Equivalent circuit for single-stage LTD

图 2 单级 LTD 的等效电路

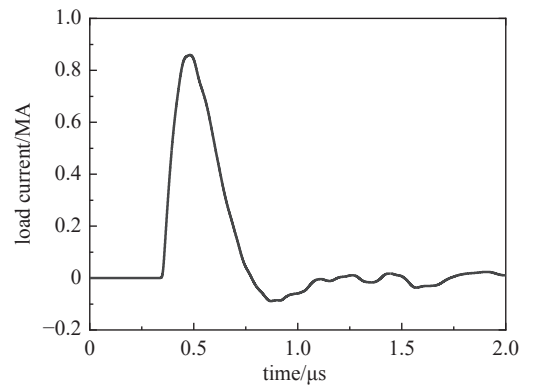


Fig. 3 Load current in the 28-stage LTD circuit model

图 3 28 级 LTD 电路模型的负载电流仿真结果

2 自放电连锁故障的发展过程

图 1 所示的 28 级单路 LTD 的触发方式大大降低了触发系统的规模, 对于构建多路并联的 CZ-15 装置具有很大的优势。但由于气体开关工作的不稳定性, 并且装置中开关数量十分庞大^[3, 12], 自放电的现象很难完全避免^[13-14], 给安全运行带来了一定风险。根据以往的研究, 在 LTD 模块内部发生单个支路自放电所产生的影响比较微弱^[14], 而单级的自放电可能存在一定的连锁故障风险。对于共用一路外部触发源的 4 级 LTD 组件, 一旦外部触发异动就会引起整个组件的放电, 4 级叠加的电压几乎必然导致整个单路 LTD 装置的过压触发从而发生更大的次生危害。本节通过电路模型, 分析了整个组件误动时的故障电压特性。

在多路并联的大型 LTD 装置中为了防止异常情况下, 例如单支路自放电, 产生的故障电压损坏中心汇流区的 Z 箍缩负载, 需要在每一路驱动源输出端串联一个水间隙隔离开关, 隔离开关的击穿电压应低于驱动源正常放电时产生的输出电压, 但高于轻微异常放电产生的输出电压。在仿真中将各级模块充电电压均设置为 ± 80 kV, 负载设置为开路以模拟隔离开关未动作的情况, 假设未触发的各级模块开关具有很高的绝缘强度, 不受过电压的影响。以第 1 组件放电为例, 其在第 5 级模块开关上产生的电压波形如图 4 所示。为了保证较低的触发时延和抖动, 主支路气体开关工作系数一般控制在 $0.55 \sim 0.65$ 之间^[4], 对于 ± 80 kV 充电的支路, 开关最高耐压约为 291 kV, 而在第 1 组件整体被误触发时, 第 5 级模块开关上的峰值电压达到了近 500 kV, 因此必然会被过电压击穿, 产生的电压脉冲沿水线向下游传播, 导致下游模块中的开关依次连锁放电, 形成连锁故障, 这事实上与文献 [6] 所设想的多级 LTD 过压触发方式的效果一致。进一步地在电路模型中给每一级主开关添加过压导通功能并设置阈值后进行仿真, 在每一个计算周期内检测开关两端电压, 当超过 0.5 工作系数所对应的电压阈值时, 延时 20 ns 后使开关导通, 可以得到每一个组件出口 D-dot 位置处的传输线电压波形如图 5 所示。当第 1 组件整体放电时后续组件在过电压下依次导通, 各级模块依然是正时序放电, 因此电压能够实现有效的叠加。假设负载端始终是开路状态, 因此形成全反射的电压波反向传播, 与前行波叠加在距离负载很近的第 7 组件出口处形成高达 5.56 MV 的峰值电压。来自负载端的反射行波继续向上游传播时, 在第 6 到第 1 组件出口水线上叠加出了第二个电压峰, 但由于向上游传播时传输线阻抗降低, 加上模块和水介质的损耗, 第二个电压峰的幅值不断降低。随着电压波传播到上游终端, 即水线的起始短路点, 又会形成负反射脉冲向下游传播, 在约 $1.75 \mu\text{s}$ 时该负脉冲电压又到达第 7 组件出口处。

当其余组件误动时, 上下游相邻模块的开关上电压峰值如图 6 所示, 可以看出自放电组件下游模块开关上电压普遍高于上游, 且最低的电压都超过了 300 kV, 因此在常规的 $0.55 \sim 0.65$ 工作系数下必然会引发连锁故障。

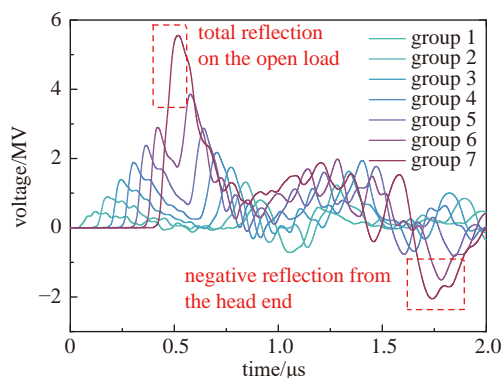


Fig. 5 Transmission line voltage caused by cascading failure

图 5 连锁故障导致的传输线电压

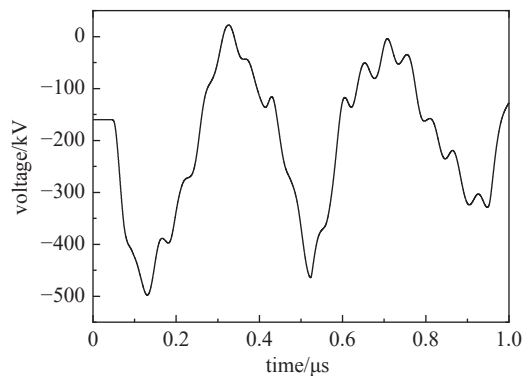


Fig. 4 Voltage on gas switches in the 5th stage module when the 1st group prefire

图 4 第 1 组件放电时第 5 级模块开关上的电压波形

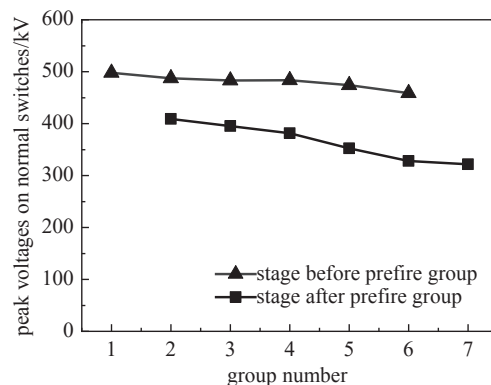


Fig. 6 Voltage on gas switches in the upstream and downstream stage module when different groups prefire

图 6 不同组件放电时上下游模块开关上的电压峰值

3 连锁故障对传输线的影响

由图 5 可知第 1 组件误动导致的连锁故障事实上将所有的模块都依次过压触发了, 因此在负载处的输出电压与正常放电时相近, 所以驱动源输出端的水介质隔离开关对于此类故障是无效的。此外, 在其他组件处产生的连锁故障, 则可能导致电压向单路 LTD 的上游传播, 使得上游阻抗较低的次级水传输线上承受很高的电压, 引发绝缘风险。

3.1 传输线上的场强分布

在 LTD 正常时序放电过程中, 电压幅值和传输线内外导体之间的间隙距离都是沿着向下游递增的, 因此传输线上的峰值电场强度分布较为均匀, 图 7 给出了正常时序放电时各级模块位置处水传输线上的峰值电场强度, 水

线场强在最后一级处达到最高的 177 kV/cm。由于水线电压和场强的方向取决于模块的充电极性,因此所涉及的所有电压、场强波形的正负极性均相对于 LTD 正常输出的情况而言,与同等充电条件下正常输出极性相同的视为正极性,反之为负极性。

图 7 给出了 7 个不同组件误动引起的连锁故障在每一级模块位置处传输线上场强波形的负极性和正极性峰值。由图 8(a)可以看出,不同位置的组件自放电连锁故障在水线上产生的负极性场强峰值的分布比较类似,基本呈现越靠近上游电场强度峰值越高的规律。当自放电首先发生的组件越接近下游,向上游的叠加负电压的模块数量越多、电压幅值越高,从而电场强度也越大。其中由于第 1 级接近水线的短路首端,受到负反射的影响电压幅值有较大的削弱,但内外导体间隙更小,因此在放电组件位于第 1、2 组件,向上游传播的负极性电压叠加效果较弱时第 1 级水线场强略高于第 2 级,其余情况下负反射电压的削弱作用更明显,导致第 1 级场强反而低于第 2 级。并且观察每个四级组件中水线场强的分布,发现每个组件首末两级处水线场强往往较低,这是由于连锁放电需要在每级模块前积累过电压,而位于每个组件首末两端的模块直接与恒定阻抗的组件间连接段相连,电压将很快向连锁故障的后续模块转移。

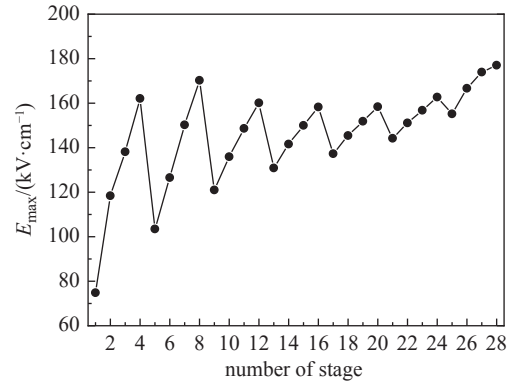
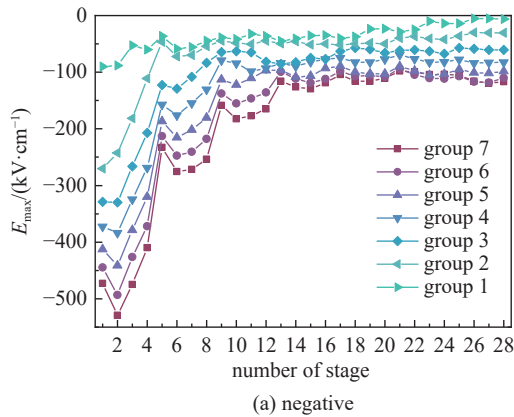
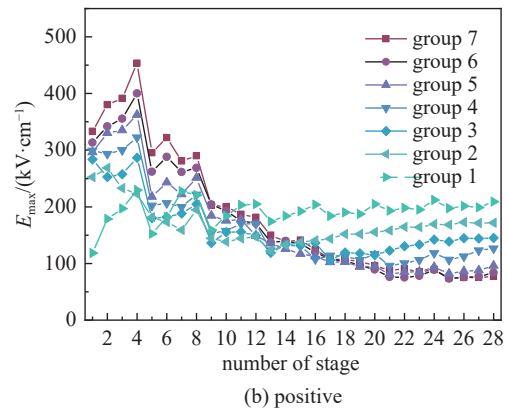


Fig. 7 Distribution of peak field intensity of transmission line during normal sequential discharge

图 7 正常时序放电时传输线峰值场强分布



(a) negative



(b) positive

Fig. 8 Electric field strength at the transmission line of each stage when different groups prefire

图 8 不同组件自放电连锁故障在每级模块水线处的电场强度

由图 8(b)可知,当自放电组件位于第 1 组件时,由于整个装置基本为正时序放电,因此水线正极性场强分布与图 7 所示的正常时序放电时的情况基本类似。当自放电出现在其他组件时,第 1 组件中各级模块处的水线场强显著提升。自放电组件下游的水线正极性场强峰值来源于向下游连锁放电依次叠加的正极性模块电压,而自放电组件上游的正极性场强峰值则来源于向上游连锁放电依次叠加的负极性模块电压遇到首端短路时的反射。

当第 7 组件自放电时水线上场强峰值达到最大,第 1、第 2 组件的水线峰值场强都将高于正常放电时水线上电场强度的最大值,如图 9 所示。第 2 组件水线正、负极性电场强度峰值出现都在第 6 级模块,其大小分别为 322、275 kV/cm。第 1 组件水线正极性电场强度峰值出现在第 4 级,负极性电场强度峰值出现在第 2 级,其大小分别为 453、529 kV/cm。去离子水介质具体的间隙击穿场强受到电场不均匀度、间隙距离、水压、脉冲宽度等多种因素的影响^[15-16],并不能单纯根据峰值场强直接确定组件自放电连锁故障是否会直接导致第 1 组件中水线的绝缘击穿,但是连锁故障中的水线峰值场强相较于正常时序放电时 177 kV/cm 的峰值场强有很大增强,意味着有可能因为自放电而在单路 LTD 中产生绝缘故障。

3.2 解决方案

在 28 级 LTD 中由于串联级数很多,个别模块的不理想阻抗匹配对最终负载上的输出电压影响较为有限,因此可以考虑放弃第 1 组件水传输线的完全匹配,适当增加内外导体之间的间隙距离,来降低组件故障导致的水线峰值场强,提高装置运行的安全性。在目前的设计中,除第 1 组件外的其余组件对应的水线内导体均为固定直径的圆柱,第 1 组件的水线内导体为底面直径 880 mm、顶面直径 848 mm、高 1 600 mm 的圆台,第 1 组件内的 4 级模块

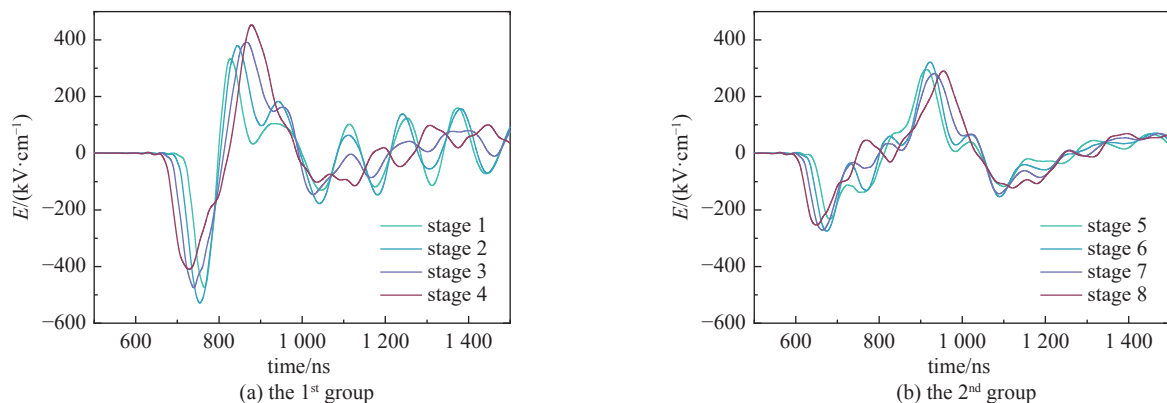
Fig. 9 Electric field strength at the transmission line when the 7th group prefire

图9 第7组件自放电时模块处水线电场强度波形

处对应的水线间隙距离分别为 14.3、16.8、19.3、21.5 mm。当内导体外直径为 848 mm 时, 对应的波阻抗为 0.4Ω , 因此保持第 1 组件内导体圆台顶面直径不变, 逐渐减小底面直径从而增加水线内外导体的间隙。图 10 给出了此过程中第 7 组件连锁故障在第 1 组件第 2 级水线处的负极性峰值电压和峰值场强, 图 11 给出了改变第 1 组件内导体直径后正常时序放电时匹配负载上输出电流的峰值变化。

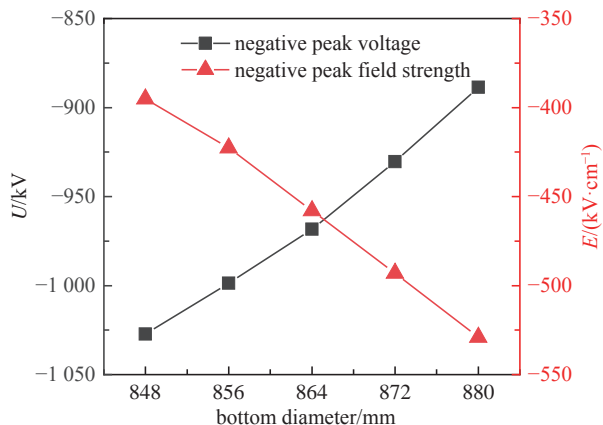
Fig. 10 Negative peak voltage and peak field intensity of cascading failure with different bottom diameters of the 1st group

图 10 第 1 组件不同底面直径时的负极性传输线峰值电压和场强

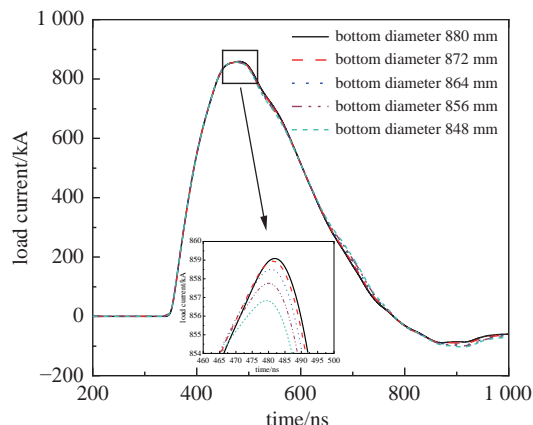
Fig. 11 Load current of normal discharging with different bottom diameters of the 1st group

图 11 第 1 组件不同底面直径时的正常放电负载电流

尽管将第 1 组件内导体底面直径从 880 mm 减小到 848 mm 时, 第 2 级处的水线间隙距离可从原有的 16.8 mm 增大约 0.55 倍达到 26 mm, 但是水线上峰值场强从 529 kV/cm 减小到 395 kV/cm, 降幅仅约为 25%, 主要原因在于增加水线间隙的同也时增大了水线的波阻抗, 使电压幅值大幅升高。而由图 11 可知改变第 1 组件的水线波阻抗对于正常时序放电在匹配负载上的输出电流影响很小, 当第 1 组件内导体变为直径 848 mm 的圆柱时, 相较于变直径的圆台内筒结构, 负载电流仅降低了 0.26%。因此通过适当增加第 1 组件水线内外导体间隙来削弱可能的组件自放电在水线首端产生的峰值场强的方式是有效可行的。

4 结 论

本文仿真研究了 CZ-15 装置概念设计中的 28 级单路 LTD 的工作特性, 分析了外部触发误动导致的 4 级组件放电引发的连锁故障过程, 结果表明在常规的主支路气体开关工作系数下, 任何一个 4 级组件的误动将直接引起整个 28 级串联装置的连锁故障。当充电电压 ± 80 kV、第 7 组件放电时, 向上游传播的脉冲电压在第 1 组件第 2 级处的传输线上产生的峰值电场强度可达 529 kV/cm, 约 3 倍于正常时序放电时次级传输线上的最高场强, 可能会导致水介质传输线的绝缘失效。在放弃第 1 组件传输线完全匹配, 将第 1 组件传输线阻抗设置为恒定的 0.4Ω 时, 能够使传输线峰值场强降低约 25%, 同时正常时序放电时匹配负载上获得的电流幅值仅降低约 0.26%。

致 谢 感谢西北核技术研究所孙凤举研究员给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Deng Jianjun, Xie Weiping, Feng Shuping, et al. From concept to reality—a review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2016, 1(1): 48-58.
- [2] Mao Chongyang, Sun Fengju, Xue Chuang, et al. Full-circuit simulation of next generation China Z-pinch driver CZ30[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(6): 2910-2915.
- [3] 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: 110401.
- [4] 孙凤举, 邱爱慈, 姜晓峰, 等. 基于共用腔体与内置触发的 12 级串联太瓦级 LTD 脉冲源[J]. 现代应用物理, 2022, 13(4): 040404. (Sun Fengju, Qiu Aici, Jiang Xiaofeng, et al. Twelve-stage linear transformer driver with one terra-watts power on a sharing common cavity shell and internal in-situ triggering method[J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13: 040404)
- [5] 万臻博, 丁卫东, 孙凤举. 级联触发 FLTD 自放电故障连锁过程分析[C]//第八届全国脉冲功率技术学术交流会. 2023. (Wan Zhenbo, Ding Weidong, Sun Fengju. Analysis of prefire fault chain in the built-in cascade triggered FLTD[C]//The 8th National Pulse Power Technology Academic Exchange Conference. 2023)
- [6] 刘鹏. 开关闭合特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: 80-90. (Liu Peng. Effect of closing characteristics of switches on the operating performance of multi-cavity-stacked fast linear transformer driver[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2012: 80-90)
- [7] Deng Zichen, Yuan Qi, Ding Weidong, et al. Self-triggering topology for high-power nanosecond pulse generators based on avalanche transistors Marx bank circuits and linear transformer driver[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93: 054702.
- [8] 魏浩, 孙凤举, 姜晓峰, 等. 直流叠加脉冲电压下 FLTD 气体开关击穿特性[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 045039. (Wei Hao, Sun Fengju, Jiang Xiaofeng, et al. Breakdown characteristics of gas spark switch for fast linear transformer driver under DC and pulse combined voltage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 045039)
- [9] Wan Zhenbo, Ding Weidong, Sun Fengju, et al. The numerical simulation of a four-stage linear transformer driver module based on the Preisach magnetic core model[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94: 113302.
- [10] 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: 035001 (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: 035001)
- [11] 王志国, 孙凤举, 姜晓峰, 等. FLTD 大规模气体开关同步触发技术研究[J]. 现代应用物理, 2022, 13: 040407. (Wang Zhiguo, Sun Fengju, Jiang Xiaofeng, et al. Synchronous trigger technology for large-scale gas switches of FLTD[J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13: 040407)
- [12] Chen Lin, Zou Wenkang, Zhou Liangji, et al. Development of a fusion-oriented pulsed power module[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2019, 22: 030401.
- [13] 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: 120401.
- [14] He Xu, Sun Fengju, Jiang Xiaofeng, et al. Characteristics of switch prefire generated fault voltages transmitted in a four-stage LTD module[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2022, 50(6): 1904-1911.
- [15] 贾伟, 邱爱慈, 孙凤举, 等. 百纳秒脉冲下水压对水开关击穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 50-51,122. (Jia Wei, Qiu Aici, Sun Fengju, et al. Effects of the pressure under the several hundred nanosecond pulse on the breakdown characteristics of the water switch[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(1): 50-51,122)
- [16] 张信军, 吴撼宇. 微秒脉冲作用下毫米级水介质间隙击穿特性研究[J]. 现代应用物理, 2015, 6(1): 46-49,65. (Zhang Xinjun, Wu Hanyu. Electrical breakdown of water in millimeter level gap under microsecond rise-time pulse[J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(1): 46-49,65)