

文章编号: 1001-4322(2006)03-0496-05

4 MV 同轴-三平板型水介质自击穿开关设计*

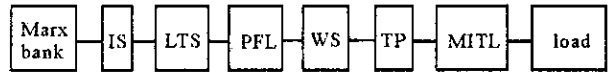
夏明鹤, 王 勳, 王玉娟, 计 策, 李洪涛, 关永超, 杨自祥, 谢卫平, 丰树平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在 1 MV 水介质自击穿开关降压实验的基础上, 设计了用于脉冲功率装置的水介质输出开关, 设计的最高运行电压为 4 MV, 放电电流 600 kA。4 MV 水介质自击穿开关为同轴-三平板结构, 由输入输出电极、预脉冲屏蔽板和连接部件组成。在结构设计中拟使用电流线圈测量每个通道的放电电流, 用开关前后传输线上靠近开关端的 D-dot 测量开关的输入输出电压。对开关间隙进行了 2 维和 3 维静电场分析, 结果发现二者差别较大, 3 维静电场分析应该更接近实际电场分布。

关键词: 脉冲输出开关; 去离子水; 预脉冲
中图分类号: TN782 文献标识码: A

脉冲输出开关指在脉冲功率装置中脉冲形成线输出端的开关, 它是脉冲形成线和传输线的连接部件, 对传输脉冲进行二次压缩。脉冲输出开关常常是自击穿开关, 由于其前面的主开关对 Marx 发生器输出电脉冲进行了初步压缩, 脉冲输出开关的输入脉冲前沿上升较快, 故脉冲输出开关常常是多通道开关。图 1 给出 ZR 装置的组成^[1], 其水介质脉冲输出开关也被称为水线开关(water line switch)。我们在 1 MV 水介质自击穿开关降压实验^[2-5]的基础上设计了作为脉冲输出开关的水介质自击穿开关, 设计最高运行电压为 4 MV, 输出电流 600 kA, 属于同轴-三平板型水介质多通道自击穿开关。



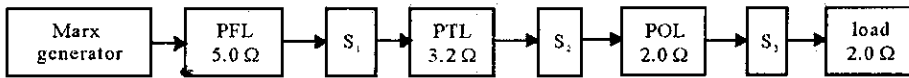
IS—intermediate store; LTS—laser triggered gas switch;
PFL—pulse forming line; WS—self-breaking water switch;
TP—water insulated triplate transmission line;
MITL—magnetically insulated transmission line

Fig. 1 Position of the pulse output switch in ZR machine

图 1 脉冲输出开关在 ZR 装置中的位置

1 1 MV 水介质自击穿开关降压实验简介

实验在“闪光-II”装置上进行^[2], 开关属于同轴性多通道水介质自击穿开关, 由 2 个或 4 个开关间隙、预脉冲屏蔽板(PPS)及其支撑结构组成。开关实验区域在装置中如图 2 的 S₃, 实验时, 去掉 PTL 前端的预脉冲抑制电感, 并短接气体预脉冲开关 S₂。



PFL—pulse forming line; S₁—water self-breakdown main switch; PTL—pulse transmission line; S₂—prepulse gas switch;
POL—pulse outputting line; S₃—multi-channel water self-breakdown switch; Load—CuSO₄ water resistance

Fig. 2 Experimental position of the multi-channel water self-breakdown switch on Flash II generator

图 2 多通道自击穿水开关在“闪光-II”装置上的实验区域

1 MV 开关结构如图 3 所示。开关间隙在约 60 ns 时间内被近似线性地充电至约 1 MV, 开关的放电电流、输入输出电压分别用罗果夫线圈和硫酸铜水电阻分压器测试。进行了 2 个和 4 个间隙结构开关实验, 开关的放电电流 200~550 kA, 电脉冲宽度约 150 ns, 平均击穿场强 600~900 kV/cm。开关间隙抖动小于 4 ns, 开关间隙的击穿迟滞时间约为 60 ns, 2 个间隙结构开关的间隙之间的击穿同步性能优于 3 ns, 4 个间隙结构开关的优于 5 ns。预脉冲被有效地压缩, 输出电压的预脉冲幅值约为输入幅值的 50%。

2 4 MV 开关结构及其集中参数等效电路模型

4 MV 水介质自击穿开关为三间隙同轴-三平板结构, 安装在加速器的脉冲形成线和三平板传输线之间,

* 收稿日期: 2005-06-21; 修订日期: 2005-10-20

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题(4210509)

作者简介: 夏明鹤(1974—), 男, 硕士, 助研, 1998 年毕业于重庆大学, 从事脉冲功率技术研究工作; xiamh@mail.china.com。

由 3 对放电电极、预脉冲屏蔽板和电流测试环、以及开关支撑结构组成,见图 4。3 对电极按照直线排列,安装在脉冲形成线末端的端面上,输出电极则安装在脉冲传输线的中间板线的端部,输出电极通过电极杆穿过预脉冲屏蔽板的圆形开孔与脉冲形成线上的相应电极形成放电间隙,预脉冲屏蔽板的开孔为圆环形圆管结构,内置电流线圈,用来测试开关的电流信号。预脉冲屏蔽板在此有两个作用,即抑制预脉冲和支撑电流测试线圈。开关输入端的脉冲形成线是封闭结构,开关输出端置于开放水池,为了泄载开关放电的冲击,开关段外筒设计有泄载孔,利用泄载孔还可以对开关进行光学诊断。

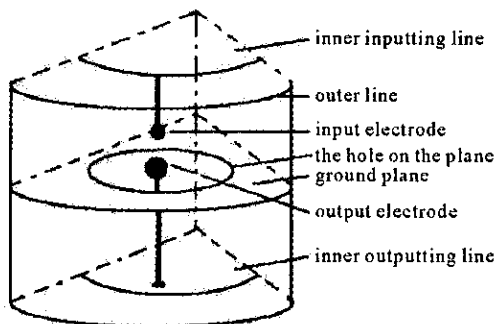
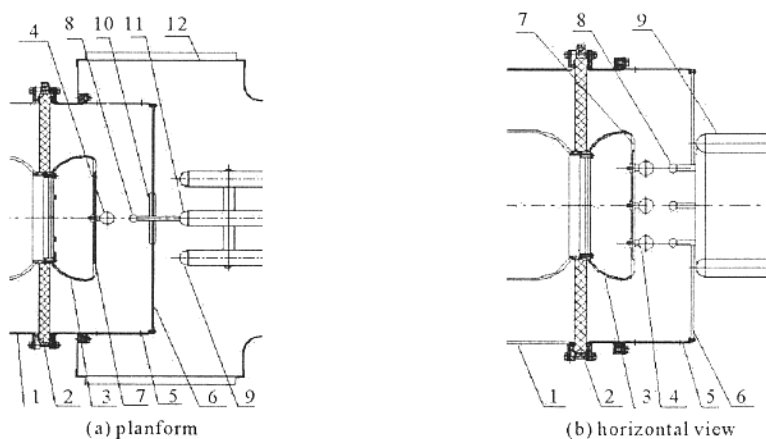


Fig. 3 One quarter of the switch configuration

图 3 开关的 3 维结构示意图



- 1. outer line of the PFL; 2. insulation clapboard; 3. output section of PFL; 4. input electrode;
- 5. outer line of switch; 6. prepulse shield; 7. output plane of inner PFL; 8. output electrode;
- 9. outer line of triplate PTL; 10. Rogowski coil; 11. inner line of triplate PTL; 12. water pool

Fig. 4 Scheme of the 4 MV water output switch

图 4 4 MV 水介质脉冲输出开关示意图

文献[3]对该类型开关等效电路模型进行了电路模拟,与实验对比,取得了较好结果。美国海军武器研究中心的 F. J. SAZAMA 等人^[5]给出了 Casino 装置水介质开关的流柱理论模型,与实验结果进行对比,取得较满意的结果,其集中等效电路模型如图 5 所示。 R_w, C_w 分别为开关水介质间隙的恒定泄漏电阻和泄漏电容, R_{ws} 和 C_{ws} 是水介质中流柱末梢与对面电极之间的不变电阻和电容, R_s 和 L_s 是流柱的等效时变电阻和电感。 R_w 和 C_w 有如下耦合关系

$$R_w C_w = \epsilon / \sigma \tag{1}$$

式中: ϵ 是水介质的介电常数; σ 为水的电导率 ($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$); ϵ / σ 对应于水的泄放时间常数。

在图 5 的等效电路中,忽略流柱发展和导通带来的时变电容器 C_{ws} 、时变电阻 R_s 和 R_{ws} ,用恒定电感 L_p 替代时变电感 L_s ,其简化集中参数电路如图 6(a)。该水介质自击穿开关由于屏蔽板的插入,引入了屏蔽板对地电

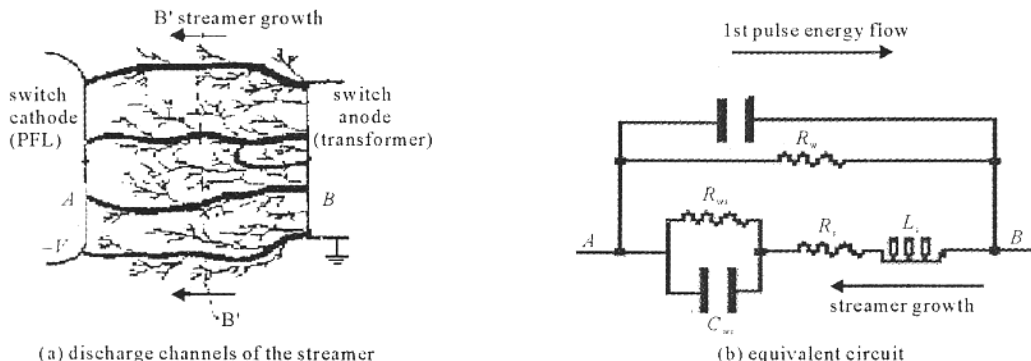


Fig. 5 Streamer model of water switch

图 5 水开关的流柱模型

容,即输入、输出线与地之间引入对地电容(输入、输出端面与预脉冲屏蔽板之间的电容) C_{pi} 和 C_{po} ,由此得到的等效电路模型如图 6(b)。 L_p 、 R_p 和 C_p 分别指开关等效电感、开关泄漏电阻和开关间隙等效电容,开关等效电感包括通道电感和结构电感。需要指出的是,该等效模型需要引入开关间隙击穿过程中流柱发展引起的时变电感、时变电感和通道时变电阻等变化的参数,才能与实际状况更接近。

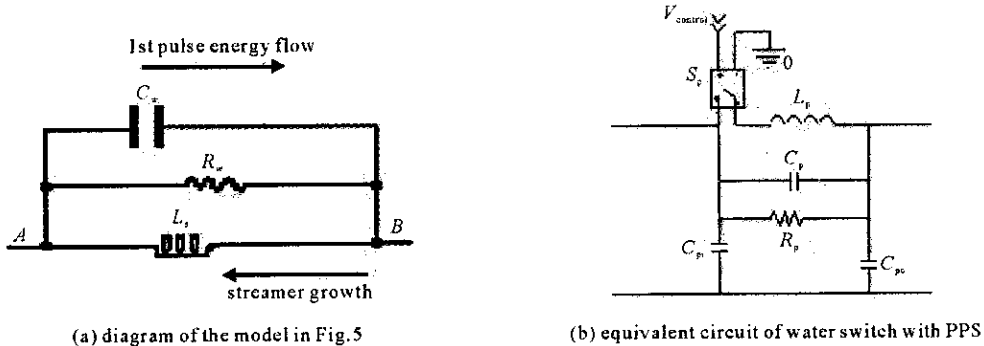


Fig. 6 Equivalent circuit model of water switch with prepulse shield

图 6 具有预脉冲屏蔽板结构水开关的等效电路模型

3 开关参数设计

按照正流柱模式,开关的充电时间为 100 ns 进行设计,其有效作用时间取为 40 ns(大于 63% 击穿电压的充电时间),由 ZR 装置的设计经验公式^[6]计算开关间隙的平均场强 E_{av} (单位 kV/cm)

$$f = E_{av} t_{eff}^{1/2} / 100 \quad (2)$$

式中: f 为常数因子(击穿概率因子); t_{eff} 为有效作用时间(μs)。电极间隙间距 $d = U / E_{av}$ 。对于 ZR 装置, $f = 1$, $t_{eff} = 90$ ns, $U = 5.4$ MV, $d = 18$ cm,与实际的间隙距离相近。

由 Martin 公式^[7]推导开关放电通道数目与开关上升时间的关系并结合开关使用条件可以得到开关导通产生的有效放电通道数目,即开关最多可以安装的电极间隙数目。

由于开关预脉冲屏蔽板的引入,需要设计电极穿过屏蔽板开孔的直径,使在开关导通期间开关电极杆不会与屏蔽板形成放电间隙,在开关导通完成,即传输的主脉冲之后形成放电导通,使反射回来的脉冲电压不能抵达前面脉冲形成线,起到对主开关的保护作用。因此该开孔不能太小,也不能过大。如果对开关负极性充电,若流柱从开孔的边缘产生并发展,则

$$d = 4.02 \times 10^{-4} U_{BD}^{1.1} t_{eff}^{2/3} \quad (3)$$

式(3)采用国际单位制,有效作用时间 t_{eff} 取决于输出脉冲波形^[7]。

4 开关结构的电场分析

用 ANSYS 分别进行了 2 维和 3 维静电场分析,开关充电电压为 4 MV,开关区域的材料都是非磁性不锈钢。按照水平视图和俯视图两种状态进行了 2 维静电场分析,开关充电电压为 4 MV 时,导通后电压为 2 MV,间隙距离 11 cm。开关导通前,图 7 给出俯视图(图 4(a))的输入电极、输出电极和间隙轴向电场分布,输入电极的最高场强为 640 kV/cm,输出电极最高场强为 939 kV/cm。图 8 给出水平视图(图 4(b))中边缘电极间隙的输入电极、输出电极和间隙轴向电场分布,输入电极的最高场强为 523 kV/cm,输出电极最高场强为 567 kV/cm;图 9 给出水平视图(图 4(b))中的中间电极间隙的输入电极、输出电极和间隙轴向电场分布,输入电极的最高场强为 484 kV/cm,输出电极最高场强为 597 kV/cm。

在 3 维计算中,开关结构在电极间隙的平面上以中心轴线为轴,呈对称分布,边缘两个间隙的电场相同。图 10 给出开关间隙的中间间隙和一个边缘电极的电场分布,(a)为中间电极间隙轴线电场分布,(b)为边缘电极间隙轴线电场分布。中间间隙的输入电极最高场强为 653 kV/cm,输出电极最高场强为 921 kV/cm,边缘间隙的输入电极最高场强为 781 kV/cm,输出电极最高场强为 843 kV/cm,电极间隙的中央位置的电场强度基本相同,约 250 kV/cm。由上述结果可知,两种 2 维计算结果存在较大差别,2 维计算与 3 维计算的结果也存在显著差别,差别存在的原因可能是 2 维计算对于这种非轴对称结构静电场分析存在局限性,不能较完全地反映实际的静电场分布,而 3 维静电场分析则基本上表达了开关结构的实际状况,分析结果应该更接近实际。

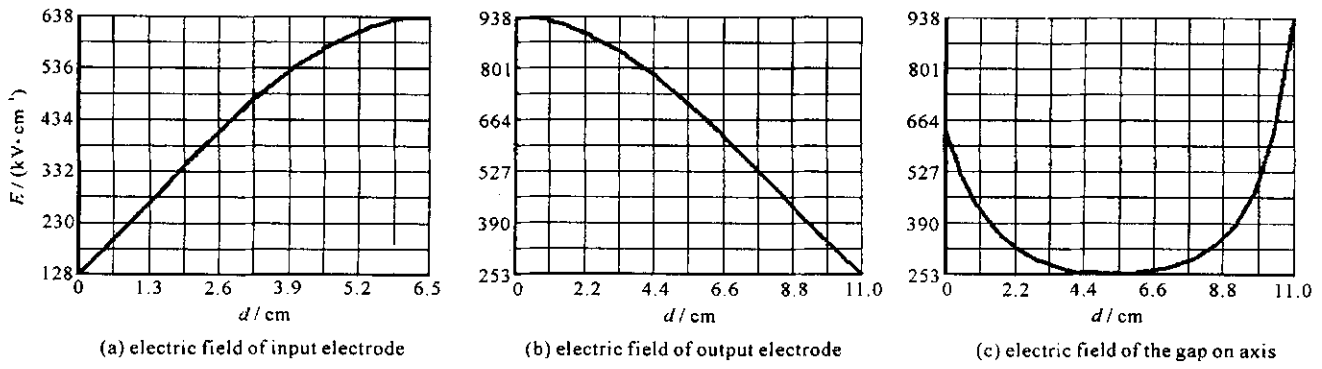


Fig. 7 Electric field distribution of switch gap and electrodes before discharge

图 7 导通前电极及间隙的电场

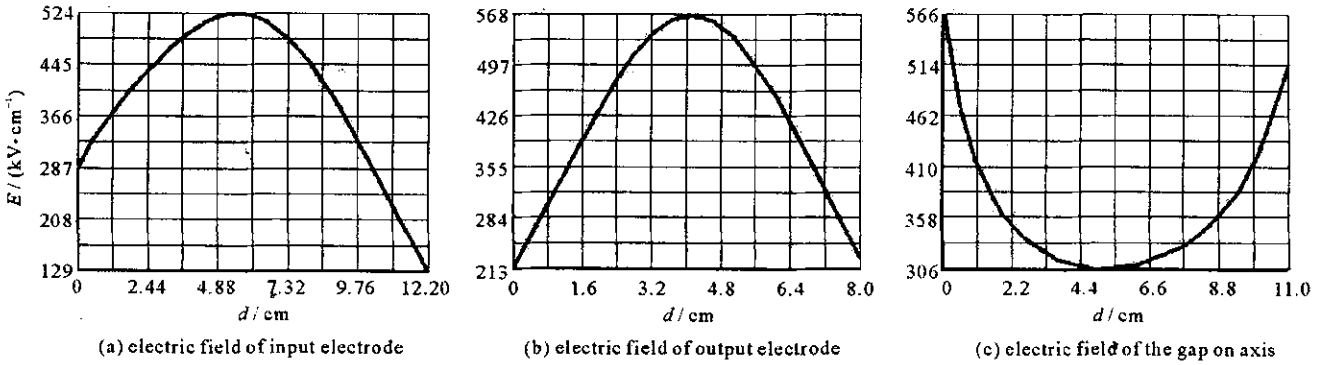


Fig. 8 Electric field distribution of switch gap and outer electrodes before discharge

图 8 导通前边缘电极及间隙的电场

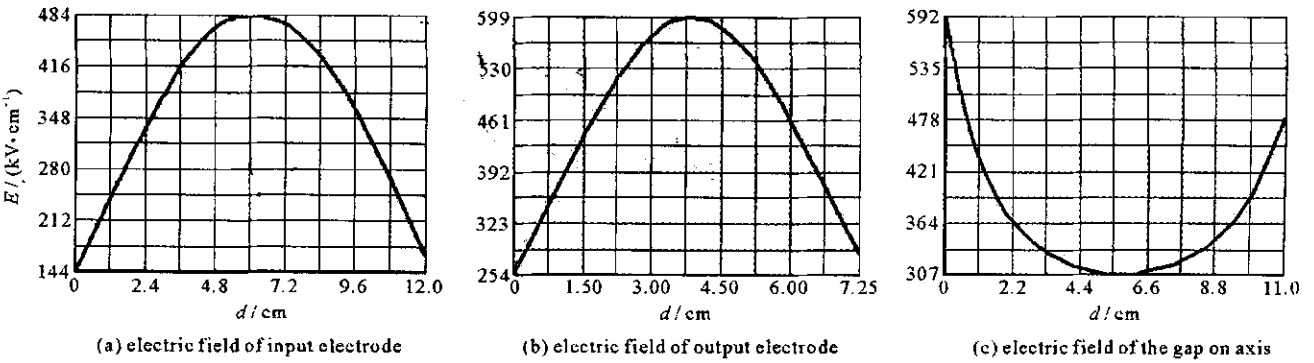


Fig. 9 Electric field distribution of switch gap and inner electrodes before discharge

图 9 导通前中间电极及间隙的电场

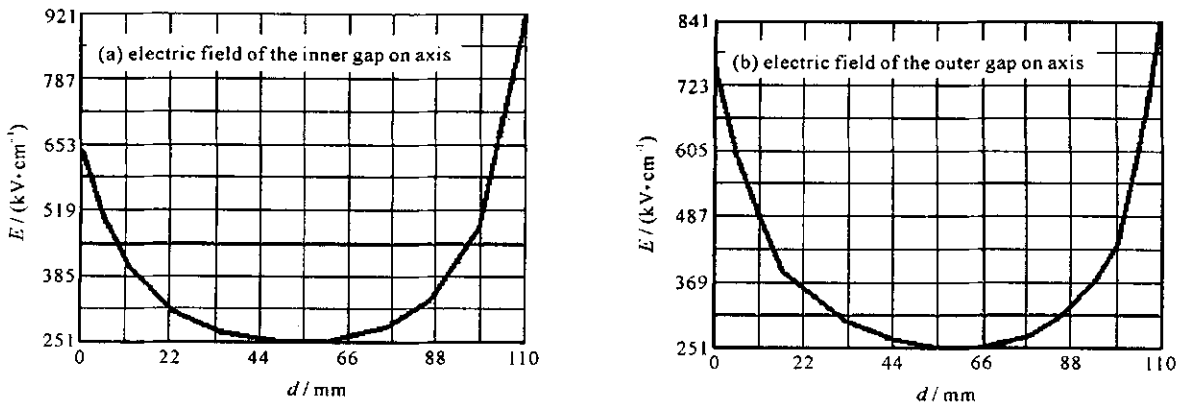


Fig. 10 Electric field distribution of switch gap on axis

图 10 开关间隙轴线场强分布

5 结 论

在 1 MV 水介质自击穿开关实验研究的基础上,设计了 4 MV 水介质自击穿开关,其导通电流 600 kA,开关电感估算约 90 nH。开关结构为同轴-三平板结构,开关区域较短,这种结构可以较有效地阻隔高次谐波向三平板传输线传播^[8]。给出了开关的简化等效模型,模型需要引入随时间变化的电参数加以完善。给出了开关结构主要参数的计算方法,作为指导开关结构设计的参考依据。这些技术和方法在 1 MV 水开关实验研究中得到部分验证,但是对于强流高压高功率水介质自击穿开关还需要实验的进一步验证。

致 谢 工作中,顾元朝副研究员和曹文彬研究员提出了许多有益的建议,韩文辉、戴英明技师和吴守东高级技师在结构设计和图纸绘制中做了重要工作,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Harjes C, Elizondo J, Struve K, et al. Circuit modeling for ZR[C]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, Texas, 2003;917.
- [2] 夏明鹤. 低电感低预脉冲水介质自击穿开关研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院研究生部,2004. (Xia M H. Investigation of a lower pre-pulse and lower inductance water dielectric self-break switch. Mianyang; Graduate School of CAEP, 2004)
- [3] 夏明鹤,谢卫平,李洪涛,等. 具有预脉冲屏蔽板的水介质自击穿开关的电路模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(12):1621-1625. (Xia M H, Xie W P, Li H T, et al. Simulation of water pulse forming line switch with prepulse suppression ground plane. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(2):1621-1625)
- [4] 夏明鹤,谢卫平,李洪涛,等. 多通道自击穿水开关测试方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11):1621-1625. (Xia M H, Xie W P, Li H T, et al. Test methods of multi-channel water self-breaking switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11):1621-1625)
- [5] Sazama S F, Kenyon V L. A streamer model for high-voltage water switches[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1980, **8**(3):198.
- [6] Struve K W, Corley J P, Johnson D L. Design options for a pulsed power upgrade of the Z accelerator[C]//13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas, Nevada, 2001:100.
- [7] Johnson D L, VanDevender J P, Martin T H. Low prepulse, high power density water dielectric switching [C]//2nd IEEE International Pulsed Power Conference. Lubbock, Texas, 1979:191.
- [8] Rosenthal S E, Pointon T D. Investigating the electromagnetic structure of the coax-to-triplate transition for the pulse-compression section of the Z-Accelerator[C]//14th IEEE International Pulsed Power Conference. Dallas, Texas, 2003;626.

Design of 4 MV coaxial-triplate water pulse forming line switch

XIA Ming-he, WANG Meng, WANG Yu-juan, JI Ce, LI Hong-tao, GUAN Yong-chao,
 YANG Zi-xiang, XIE Wei-ping, FENG Shu-ping
 (Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

Abstract: A 4 MV water pulse forming line switch that would be used in a water pulse forming line machine was designed based on the experiments of the 1 MV water self-breaking switch. The designed breakdown voltage is 4 MV with a current about 600 kA. The water self-breaking switch is made up of electrodes, a prepulse suppression plane and joint parts. The water switch is at the joint of pulse forming line and water insulated tri-plate transmission line. The gaps of the switch are arrayed at the input section of the tri-plate transmission line linearly. The discharge current of each gap will be tested by Rogowski coil while the input and output voltages of the switch by D-dot probes. Present 2 D and 3 D models of the electrostatic field analysis are useful tools for the design. There are many differences between the results of 2 D and 3 D electrostatic field analysis. The result of the 3 D analysis is perhaps more effective because the 3 D model is more close to the configuration of the water switch.

Key words: Pulse forming line switch; Deionized water; Prepulse