

文章编号: 1001-4322(2010)01-0221-04

# 水介质形成线泄漏电阻对充电效率的影响\*

张北镇, 谭 杰, 曹绍云, 向 飞, 李春霞

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 研制了一种基于直线变压器技术的脉冲功率系统,采用水介质脉冲形成线并联充电作为脉冲形成装置。分析了给形成线充电时泄漏电阻对充电电压效率和能量效率的影响,给出了泄露电阻的能量损耗率计算公式;结合实验参数计算了本实验中水介质形成线的泄漏电阻,介于 8.2 kΩ 与 3 kΩ 之间。根据泄露电阻取值范围,分析了双模块和四模块实验中水介质形成线充电过程中的电压效率与能量效率,结果表明水介质形成线的能量损失占其获得能量的 5%~12%;计算结果同时表明:随着实验模块数增加,能量损失逐渐增大。

**关键词:** 脉冲功率; 形成线; 泄漏电阻; 充电效率

**中图分类号:** TM832

**文献标志码:** A

**doi:**10.3788/HPLPB20102201.0221

在低阻抗脉冲功率装置中,通常采用水介质形成线作为波形形成装置。作为其介质的去离子水,其电阻率远远小于变压器油,因此泄漏电阻较小,在充电过程中泄漏电阻的能量损失不可忽略。在涉及多根形成线并联充电的情况下,总的泄漏电阻会减小。当前研制的一种脉冲功率系统,基于直线变压器(LTD)技术<sup>[1-4]</sup>,多个直线变压器模块按照感应电压叠加原理累加,输出高压脉冲,实现模块化。采用水介质形成线作为初级脉冲形成装置,模块数增加,并联充电的形成线数量增加,泄漏电阻对充电效率的影响会逐渐变化。为了明确给水介质形成线充电的过程中水线泄漏电阻对充电效率的影响,本文推导了水介质形成线泄漏电阻上的能量损耗率的公式,计算了实验中水介质形成线的泄漏电阻,并分析了随着模块数增加,能量损失的变化情况。

## 1 理论分析

实验采用一套电容经变压器系统对形成线充电。将这一过程进行等效,初级折算到次级,得到的等效电路见图 1。其中: $C_m$  和  $V_m$  为折算后的充电电容<sup>[5]</sup>和初始充电电压, $R_s$  和  $L_m$  为折算后的充电回路电阻和漏感, $C_B$  为两根水形成线的电容, $R_w$  为水线泄漏电阻, $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_m$  分别为通过  $R_w$ ,  $C_B$ ,  $C_m$  的电流。根据电路可以列出电路方程

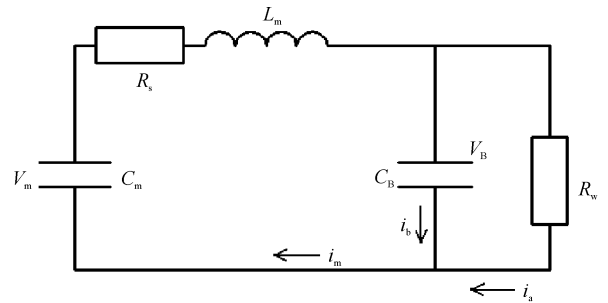


Fig. 1 Equivalent circuit diagram of charging water-dielectric pulse forming line(PFL)

图 1 水介质形成线充电等效电路

$$\begin{cases} V_m = \frac{1}{C_m} \int i_m(t) dt + i_m(t) R_s + L_m \frac{di_m(t)}{dt} + i_a(t) R_w \\ i_a(t) R_w = \frac{1}{C_B} \int i_b(t) dt \\ i_m(t) = i_a(t) + i_b(t) \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以求解出水线负载电压最大值为<sup>[6]</sup>

$$V_{Bmax} = V_m \frac{\omega_B^2}{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + \omega_2^2} [\exp(-\alpha_1 \pi / \omega_2) + \exp(-\alpha_2 \pi / \omega_2)] \quad (2)$$

式中:  $\omega_B = \frac{1}{\sqrt{L_m C_B}}$ ,  $\omega_2 = \sqrt{\omega_0^2 - \left(\frac{R_s}{2L_m}\right)^2}$ , 其中  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_m C}}$ ,  $C = \frac{C_m C_B}{C_m + C_B}$ ;  $\alpha_1 \approx \frac{1}{R_w (C_m + C_B)}$ ;  $\alpha_2 \approx \frac{R_s + R_e}{2L_m}$ ,

$R_e = \frac{R_w}{1+k}$ ,  $k = \omega_0^2 R_w^2 C_B^2$ 。若  $\omega_2 \approx \omega_0$ ,  $\alpha_2 - \alpha_1 \ll \omega_2$ , 式(2)可近似为

$$V_{Bmax} = V_m \frac{C_m}{C_m + C_B} [\exp(-\alpha_1 \pi / \omega_0) + \exp(-\alpha_2 \pi / \omega_0)] \quad (3)$$

\* 收稿日期:2008-12-28; 修订日期:2009-07-10

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:张北镇(1982—),男,学士,从事脉冲功率技术研究;zbz2008@gmail.com。

定义充电电压效率  $\eta_v = \frac{V_{B \max}}{V_m}$ , 充电能量效率  $\eta_e = \frac{C_B V_{B \max}^2}{C_m V_m^2}$ 。则充电电压和能量效率为

$$\eta_v = \frac{V_{B \max}}{V_m} = \frac{C_m}{C_m + C_B} [\exp(-\alpha_1 \pi / \omega_0) + \exp(-\alpha_2 \pi / \omega_0)] \quad (4)$$

$$\eta_e = \frac{C_B V_{B \max}^2}{C_m V_m^2} = \frac{C_B}{C_m} \eta_v^2 \quad (5)$$

水的泄漏电阻引起的能量损耗率为

$$D_r = \left[ 1 - \frac{\exp(-\alpha_1 \pi / \omega_0) + \exp(-\alpha_2 \pi / \omega_0)}{4} \right]^2 \times 100\% \quad (6)$$

式(6)表示水线泄漏电阻损耗的能量与水线充电获得能量的百分比。

## 2 实验研究

当前进行的基于 LTD 技术的脉冲功率系统双模块实验其结构示意图如图 2 所示。图中, 储能电容器  $4 \mu\text{F}$ , 脉冲变压器变比为  $1:20$ , 水介质形成线阻抗  $10 \Omega$ , 输出脉冲宽度  $150 \text{ ns}$ , 开关为三电极气体火花开关, 水负载阻值  $20 \Omega$ 。当储能电容经变压器对形成线充电至约最大电压的  $90\%$  时, 触发源输出触发脉冲, 两路开关同步击穿, 形成线输出的方波馈入直线变压器模块初级, 在直线变压器的次级感应叠加。若两只开关的同步性良好, 并且忽略影响脉冲前沿的各种因素, 在水负载上获得的电压幅值是单路形成线输出的脉冲的 2 倍, 脉宽不变。

### 2.1 水介质形成线泄漏电阻的计算

实验将水介质形成线设计为螺旋型以减小体积, 为了计算其泄漏电阻, 可以近似按照同等长度的同轴线来计算。无限长的同轴线, 其单位长度上的分布电导为<sup>[7]</sup>

$$G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

式中:  $\sigma$  为水介质电导率;  $r_1$  为水介质形成线内筒半径,  $8 \text{ cm}$ ;  $r_2$  为外筒半径,  $15 \text{ cm}$ 。水介质形成线单位长度电阻为

$$R_0 = \frac{1}{G_0} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi} \rho \quad (8)$$

式中:  $\rho$  为去离子水电阻率。实验进行中,  $\rho$  约为  $10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ , 形成线长度  $L = 1.2 \text{ m}$ , 根据式(8)计算的水线电阻为  $R_w = R_0/L = 8.2 \text{ k}\Omega$ 。

实际实验时, 泄漏电阻的大小跟充电频率有关, 本实验充电频率约为  $60 \text{ kHz}$ 。随着实验进行, 水的电阻率会发生变化。有关研究表明, 根据式(8)计算的电阻偏大<sup>[8]</sup>。因此, 实际工作时  $R_w < 8.2 \text{ k}\Omega$ 。

按照同轴线结构计算泄漏电阻, 得到的是电阻值的最大值。实际工作时, 由于去离子水状态的恶化等因素, 因此水的阻值不是固定的。通过下面的手段, 得以得到水泄漏电阻的最小值: 给水介质形成线充以较低的电压, 使得主开关不击穿, 此时能量在储能电容与形成线间震荡, 最终消耗在泄漏电阻和初级充电回路的电阻中。如果认为初级充电回路中的电阻很小, 可以忽略, 那么能量全部消耗在水里, 根据能量的衰减趋势, 可以估算出水的泄漏电阻。用这种方法获得的充电波形如图 3 所示。可以看出, 充电电压在大约 3 个周期内在水线中泄漏完毕。理想状态下, 图 3 中充电波形的 3 个波峰应该大致平等, 但实际上存在各种损耗。按照公式  $u_c = U_0 \exp(-t/\tau)$  来粗略估算出水线的泄漏电阻, 其中:  $u_c$  是第 2 个波峰电压值;  $U_0$  是第 1 个波峰电压值;  $\tau = R_w C_B$ 。

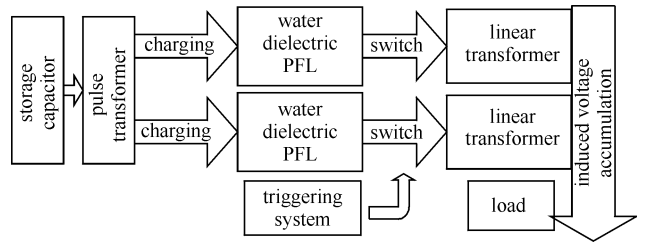


Fig. 2 Construction of long-pulsed power system

图 2 脉冲功率系统结构示意图

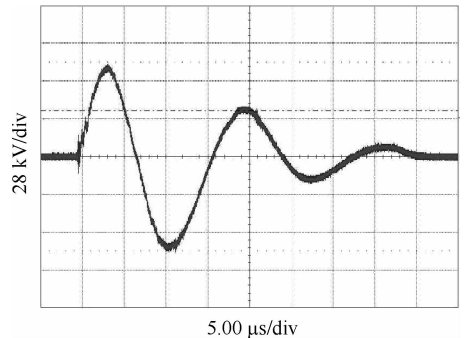


Fig. 3 Charging voltage of water-dielectric PFL

图 3 充电波形

根据图 3 波形分析知,第 1 个波峰高度平均 66 kV,第 2 个波峰高度平均 33 kV,两峰间隔时间 16.4  $\mu\text{s}$ 。根据此计算,得出电阻约 1.5 k $\Omega$ ,这是 2 根水线并联的结果,因此单根水线电阻  $R_w = 3 \text{ k}\Omega$ 。正是根据这一衰减趋势,研究认为<sup>[9]</sup>,水线的充电时间不能大于  $\tau/7$ 。本实验是充分满足这一条件的。因此,水线的泄漏电阻范围为  $3 \text{ k}\Omega < R_w < 8.2 \text{ k}\Omega$ ,因为最小电阻的估算忽略了电流反峰时较大的初级电阻,故更接近 8.2 k $\Omega$ 。

## 2.2 充电效率情况分析

根据水介质形成线泄漏电阻可能的范围,分析可能的充电电压及能量效率。在如图 2 所示的双模块实验中,将各部分的参数按照图 1 的等效电路进行折算,结果如下: $C_m = 10 \text{ nF}$ , $R_s$  在充电过程中很小,约 1  $\Omega$ , $L_m$  折算后 400  $\mu\text{H}$  左右<sup>[10]</sup>, $C_B$  约 18.5 nF。 $R_w$  此处两根水线并联后的泄漏电阻,为原来的一半,因此  $1.5 \text{ k}\Omega < R_w < 4.1 \text{ k}\Omega$ 。

按照当前的参数,假若进行 4 模块实验,根据式(4)~(5)同样也可以对 4 模块实验时的充电效率进行计算。4 模块实验时,参数  $C_m, R_s, L_m$  维持不变此时  $C_B$  增大为 37 nF, $R_w$  减小,  $0.7 \text{ k}\Omega < R_w < 2.1 \text{ k}\Omega$ 。

双模块和四模块状态下根据式(4)~(5)的计算结果见表 1。表 1 对比了各状态下水泄漏电阻的最小、最大取值和假设无穷大时的电压效率和能量效率。其中,在进行的双模块实验中,充电电压效率约 65%,大致在理论计算的范围内。

从表 1 可以看出,在泄漏电阻可能的取值范围内,在泄漏电阻上可以消耗约 5%~12%的能量,这一数据和式(6)计算一致;泄漏电阻的最小值大致相当于去离子水电阻率  $\rho = 3.6 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  时,根据式(8)算出的电阻。而实际上,实验进行中,去离子水会逐渐恶化,电阻率可以降低到  $\rho = 3.6 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。因此,随着实验进行中,水线的能量损失可能比初始时大 7%。

根据式(6)计算在阻值固定时随着模块数增加,能量损耗的情况。假设水线的泄漏电阻取值为按照式(8)计算出的最大值,那么在当前的系统参数下计算得出:单模块下能量损失 4.7%,双模块下能量损失为 5.9%,4 模块下能量损失为 7%,可以看出:随着模块数的增加能量损失加剧。

## 3 结 论

本文导出了在水形成线泄漏电阻不可忽略的情况下其充电电压效率、能量效率及能量损耗率的表达式。结合具体实验情况,计算了实验中单根水介质形成线的泄露电阻的可能取值范围在 3 k $\Omega$  到 8.2 k $\Omega$  之间,根据等效电路分析计算了在此电阻范围内,不同状态下的充电电压,能量效率。在当前实验参数下,因泄漏电阻损失的能量可以达到 5%~12%,双模块能量效率在 55%~62%,并联的模块越多,水线上的能量损失越大。在实验中,去离子水的处理耗时长,电阻率下降快,因此提高去离子水电阻率对减小能量在水中的损失有一定帮助。由于当前充电系统并不是针对本实验设计,因此本文的方法可以给进一步的实验提供设计依据。

## 参考文献:

- [1] 孙凤举. 模块化高功率亚微秒脉冲直线型变压器驱动源[D]. 西安:西安交通大学, 2001:1-10. (Sun Fengju. Modular high power sub-microsecond pulsed linear transformer driver. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2001:1-10)
- [2] 孙凤举, 邱爱慈, 曾江涛, 等. 直线型变压器储能能量与磁芯和电路参数的关系[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2):191-194. (Sun Fengju, Qiu Aici, Zeng Jiangtao, et al. Relationship of stored energy to core and circuit parameters for pulsed linear transformer driver. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2):191-194)
- [3] Kovalchuk B M, Kim A A, Kumpjak E V, et al. 10 stage LTD for E-beam diode[J]. *Pulsed Power Plasma Science*, 2001, 2(8):1488-1490.
- [4] Batrikov A N, Vizir V A, Volkov S N, et al. Primary energy storages based on linear transformer stages[J]. *Laser and Particle Beams*, 2003, 21(2):295-299.
- [5] 王瑞华. 脉冲变压器设计[M]. 北京:科学出版社, 1996:1-4. (Wang Ruihua. Design of the pulse transformer. Beijing: Science Press, 1996: 1-4)
- [6] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:134. (Liu Xisan. High pulsed power technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:134)
- [7] 应嘉年, 顾茂章, 张克潜. 微波与光导波技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1994:65. (Ying Jianian, Gu Maozhang, Zhang Keqian. Technolo-

表 1 不同模块数下的充电效率

Table 1 Charging efficiency for different module numbers

	$R_w/\text{k}\Omega$	$\eta_v/\%$	$\eta_e/\%$
	1.5	64.9	78.0
dual modules	4.1	68.0	85.7
	$\infty$	70.0	90.7
	0.7	38.5	55.2
four modules	2.1	41.1	62.4
	$\infty$	42.6	67.1

gy of microwave and optical wave. Beijing: National Defense Industry Press, 1994;65)

- [8] 张自成. 水介质耐高电压击穿技术的进一步研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2004;20-29. (Zhang Zicheng. Further investigation of high electrical breakdown for water dielectric. Changsha: National University of Defense Technology, 2004, 20-29)
- [9] 潘亚峰. 水介质传输线的耐高电压击穿技术的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002;15-16. (Pan Yafeng. Investigation of electric breakdown in water dielectric transmission line. Changsha: National University of Defense Technology, 2002;15-16)
- [10] 曹绍云. 螺旋脉冲形成线实验研究[D]. 北京:中国工程物理研究院,2006;1-36. (Cao Shaoyun. Test and research on helix pulse forming line. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2006;1-36)

## Influence of leakage resistance on charging efficiency of water dielectric pulse forming line

Zhang Beizhen, Tan Jie, Cao Shaoyun, Xiang Fei, Li Chunxia

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A pulsed power system is now under development. The water dielectric pulse forming line(PFL) was adopted as the wave forming part and charged by a storage capacitor via pulse transformer. The influence of leakage resistance on charging efficiency of the water dielectric PFL was analyzed. Leakage resistance of the PFL was calculated to be between 8.2 k $\Omega$  and 3 k $\Omega$ . Energy efficiency and voltage efficiency during the charging process were estimated for different module numbers, and the result shows that the energy loss rate is about 5%~12% and increases when the module number grows.

**Key words:** pulse power; pulse forming line; leakage resistance; charging efficiency