

基于 PSCAD / EMTDC 的液态金属限流器暂态过程研究

谢 桢¹, 叶志浩¹, 吴 翊²

(1. 海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;
2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了正确模拟液态金属限流器的限流过程, 以液态金属限流器短路试验系统为研究主体建立了基于电磁暂态分析仿真平台 PSCAD / EMTDC 的含液态金属限流器的非线性电路仿真模型, 并对液态金属限流器限流暂态过程进行了仿真分析。针对液态金属限流器燃弧过程复杂的特点, 基于电弧的外特性采用设定等效时变非线性电导的方法对燃弧过程进行了模拟。仿真分析得到的液态金属限流器限流暂态过程中电压电流特性符合实际试验结果, 证明了该方法对于模拟液态金属限流器暂态过程的正确性。

关键词: 液态金属限流器; PSCAD/EMTDC; 暂态过程; 非线性; 仿真

Transient analysis of liquid metal current limiter based on PSCAD/EMTDC

XIE Zhen¹, YE Zhi-hao¹, WU Yi²

(1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To calculate the current limiting process of the Liquid Metal Current Limiter (LMCL), this paper considers the short-circuit test system for LMCL as the main object and builds a simulation model of a nonlinear circuit including LMCL based on the electromagnetism transient analyze tool PSCAD / EMTDC, then simulates the transient current limiting process of the LMCL. Aiming at the characteristics of the complex change event of arc, an equal dynamic and nonlinear conductance is set to simulate the arc based on arc's external characteristic. The obtained simulated waveform of limited current and LMCL's voltage which characterize the LMCL transient are consistent with the real test results, so the correctness of using this method to simulate LMCL transient is verified.

Key words: LMCL; PSCAD/EMTDC; transient; nonlinear; simulation

中图分类号: TM56 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0006-04

0 引言

未来舰船将采用的综合电力系统相比于传统舰船电力系统, 其容量将大幅度增加, 与此对应的电网最大短路电流的幅值也急剧增大, 因而对电气设备承受短路电流的能力提出了更高的要求^[1-3]。考虑到现有开关的分断能力不能很好地满足要求, 因而采用限流器结合断路器的方法来提高短路电流分断能力是合适的选择。带收缩作用的液态金属限流器 (LMCL) 属于主动结构型式的限流装置^[4], 集触发和限流一体, 和低压断路器串联使用时可以明

显增大最大开断能力, 是可能用于综合电力系统的限流装置。

针对液态金属限流器的限流特点, 本文以液态金属限流器短路试验系统为研究主体, 基于电磁暂态分析仿真平台 PSCAD/EMTDC 建立试验电路仿真模型, 通过设定等效时变非线性电导的方法对液态限流器限流过程进行了仿真分析, 进而了解和掌握液态金属限流器的限流暂态过程。

1 液态金属限流器工作原理^[4]

液态金属限流器是一种利用液态金属作为限流主体的自恢复限流器, 利用液态金属流动性特点可使限流器没有机械可动部分, 且分断过程没有电弧等离子体喷出。液态金属在一个密封容器内, 通过

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新群体科学基金 (50721063)

耐高温的带有小孔的绝缘片把全部的液态金属分割成多个隔层, 在正常条件下电流流过铜极(正极), 再经过容器内液态金属, 最后流过铜极(负极), 而在故障条件下电流路径沿着液态金属通过这些孔被收缩, 从而达到限流的目的。

液态金属收缩原理如图1所示, 液态金属通过一系列收缩-扩展的隔板狭缝, 由于电磁力和液体的流动性, 可使绝缘片孔颈部分的液态金属收缩, 使截面的孔颈部分的电流密度和磁通密度加强而引起极不均匀电路密度分布。孔颈部分的沿径向 r 收缩力按洛伦兹力公式可得:

$$p(r) = \mu_0 \frac{I^2}{4\pi^2 R^2} \left[l - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

由式(1)可见, 径向收缩力 $p(r)$ 与电流 I 的平方成正比, 与孔径 R 的平方成反比, 因而减小孔径可增加电流密度、磁通密度和径向压力。由于被移动的液体数量较少, 孔颈部分的液态金属很快收缩, 同时焦耳热使这部分的液体金属快速气化。随着绝缘片孔颈部分液体金属的收缩和气化, 开始燃弧过程。

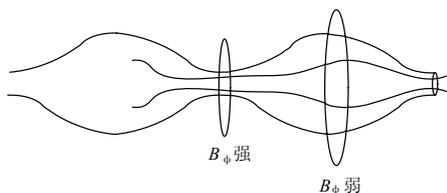


图1 液态金属收缩原理

Fig. 1 Constringency principle of liquid metal

2 液态金属限流器短路试验电路

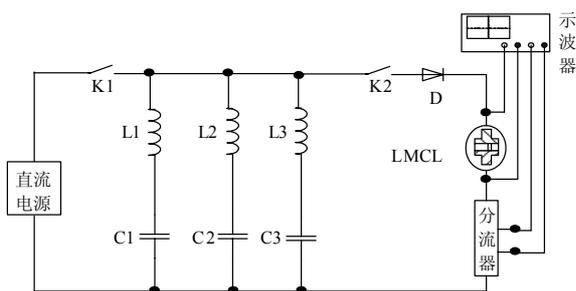


图2 液态金属限流器短路试验电路示意图

Fig. 2 Circuit diagram for short-circuit test of LMCL

图2所示为液态金属限流器短路试验系统结构图, 由充电电路和放电电路两部分组成, 其中充电电路使用三相交流电通过三相不控整流得到的直流电源给三组电容器充电, 放电电路由三组电容器并联同时串二极管以减少电弧对试验装置的烧蚀。与电路相对应试验也分为两个阶段: 充电阶段闭合开关 K1,

打开开关 K2, 对电容充电; 放电阶段闭合开关 K1, 打开开关 K2, 在二极管作用下获得一个 10 ms 左右的正半波短路电流。使用分流器测量液态金属限流器限流后回路中的电流, 并通过示波器显示。

3 基于 PSCAD/EMTDC 的试验电路仿真模型

3.1 基于Mayr电弧模型的液态金属限流器仿真模型

PSCAD/EMTDC是一个国际通用的电力系统电磁暂态分析工具, 具有图形化工作界面和通用元件库, 而且支持自定义模型^[5-6]。PSCAD/EMTDC的元件库中没有液态金属限流器模块, 所以针对试验中液态金属限流器表现为一个随时间变化的非线性电导的特点, 编制时变非线性电导元件 $g(t)$ 模块来模拟限流器。

液态金属限流器整个限流过程可以分为三个阶段, 首先电流之间通过磁场的相互作用, 产生相互吸引的洛伦兹力, 使得液态金属在小孔处的截面收缩, 到一部分液态金属变成蒸汽时产生电弧, 这个阶段液态金属限流器表现为低阻抗状态, 设定 $g(t)$ 为恒定值 g_0 。接着电弧缓慢燃烧, 燃弧的过程进入稳定状态, 这个阶段液态金属限流器表现为从低阻抗状态迅速上升至高阻抗状态, 这时选择 Mayr 电弧数学模型来设定变时变电导。Mayr 电弧模型是一种广泛应用于分析燃弧过程中电弧的外特性的数学模型, 其基本思路是通过一些特定的假设而不深入分析灭弧室内部复杂的物理过程, 将电弧的外特性视为由若干时间变量(电压、电流、电导)及时变电弧参数表示的时变电路元件, 并与其所在电网立求解暂态过程^[7]。在 Mayr 假定的条件下, 电弧电导表示为:

$$g = g_0 e^{\frac{Q}{Q_0}} \quad (2)$$

其中: g_0 是常数, Q_0 表示单位弧柱中参考含热量。这样 Mayr 电弧模型可表述为:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \left(\frac{u \cdot i}{P} - 1 \right) \quad (3)$$

其中: τ_M 是时间常数, P 是电弧能量耗散功率。 τ_M 的大小表述电弧电阻的热惯性。由于式(3)为非线性微分方程组, 采用具有2阶精度的隐式梯形算法求解, 其流程如图3所示, 其显式迭代式为式(4):

$$\begin{cases} g_p = g(t - \Delta t) + \Delta t \times [i(t - \Delta t) / (\tau_M \cdot P) - g(t - \Delta t) / \tau_M] \\ g_c = g(t - \Delta t) + \Delta t \times [i(t) / (\tau_M \cdot P) - g_p / \tau_M] \\ g = 0.5 \cdot (g_p + g_c) \end{cases} \quad (4)$$

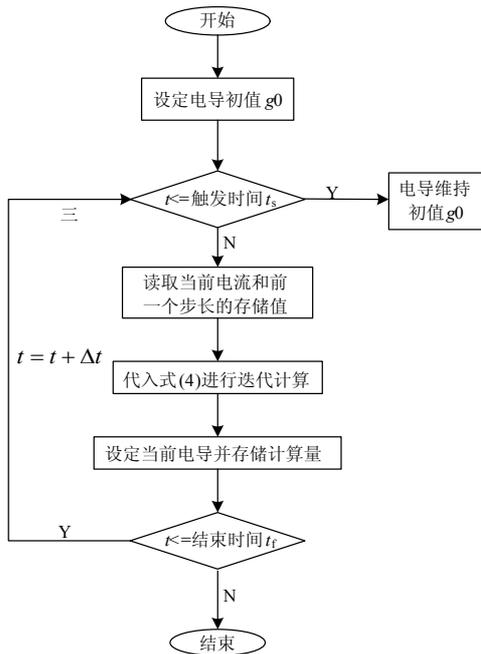


图3 迭代求解流程图

Fig. 3 Block diagram of iterative solution

随着电容放电过程的结束，当电弧功率小于耗散功率时，弧柱趋于温度降低和直径缩小，趋向熄灭，这个阶段液态金属限流器表现由高阻抗状态缓慢过渡到低阻抗状态，这时设定 $g(t)$ 为线性增加。整个过程可以用式 (5) 描述：

$$\begin{cases} g(t) = g_0 & (t \leq t_s) \\ \frac{1}{g(t)} \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_M} \left(\frac{u \cdot i}{P} - 1 \right) & (t_s < t \leq t_f) \\ g(t) = k \cdot (t - t_f) & (t_f < t) \end{cases} \quad (5)$$

通过液态金属限流器模块对话框可以设置液态金属限流器模块参数，其中 t_c 和 P 为Mayr电弧模型常数，而 g_0 为低阻抗状态时恒定阻抗值， t_s 为起弧时间， t_f 为熄弧时间，如图4所示。

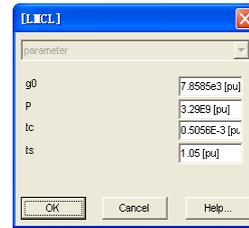


图4 LMCL模块参数设定

Fig. 4 Setting the parameters of LMCL

3.2 基于PSCAD/EMTDC的试验网络

根据图 2 所示液态金属限流器短路试验系统建立基于 PSCAD / EMTDC 的仿真电路如图 5 所示，也包含充电电路和放电限流电路两部分。其中开关器件采用元件库中理想模型，忽略实际开关合闸过程造成的影响，功率二极管采用元件库中理想元件，忽略实际功率二极管发热等损耗，设定合适的线路阻抗，模拟实际回路中线路阻抗。

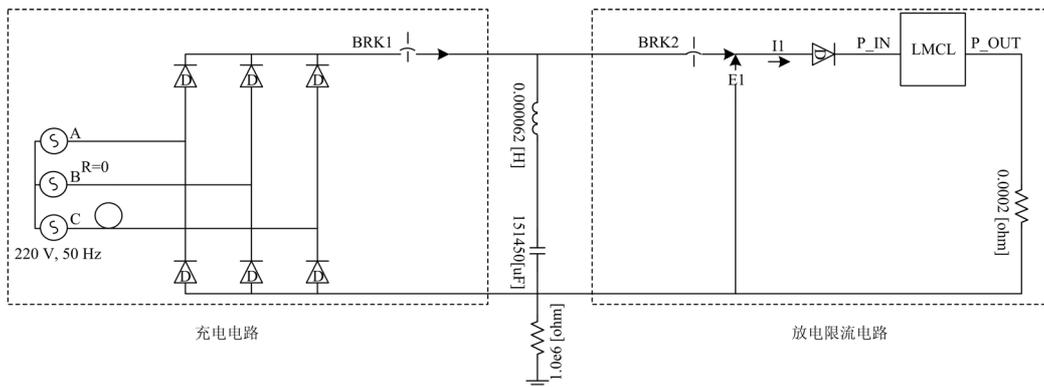


图5 液态金属限流器短路试验系统仿真电路图

Fig.5 Simulation circuit for short-circuit test of LMCL

4 仿真结果分析

设定合适的液态金属限流器模块参数后，用 PSCAD / EMTDC 建立的 LMCL 短路试验电路进行仿真，得到液态金属限流器作用后短路电流波形和液态金属限流器端电压波形如图6所示，得到的等效时变非线性电导的波形如图7所示，实际试验测得的

波形如图8所示。由图中可以看出PSCAD/EMTDC 仿真计算结果和试验结果基本吻合，说明了基于外特性设定等效时变非线性电导的方法对限流过程进行模拟的正确性，具体误差分析见表1，其中 I_{apmax} 为预期短路电流峰值， I_{clmax} 为限流后短路电流峰值， t_{lup} 为限流后上升至短路电流峰值时间（限流

器开始动作时刻计时), U_{LMmax} 为液态金属限流器端电压峰值, t_{Uup} 为达到液态金属限流器端电压峰值时间 (限流器开始动作时刻计时)。

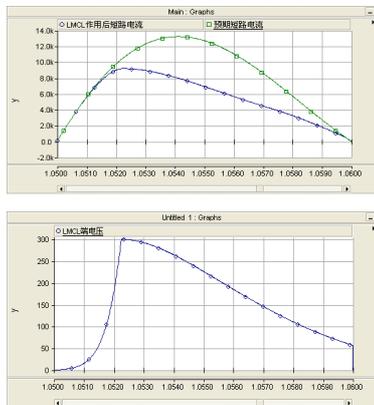


图6 仿真计算限流波形和液态金属限流器端电压波形
Fig.6 Simulated waveform of limited current and LMCL' voltage

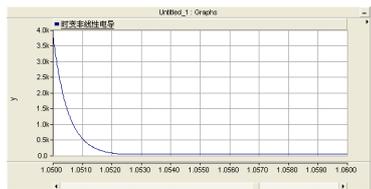


图7 仿真计算等效时变非线性电导幅值
Fig.7 Simulated magnitude of equal dynamic and nonlinear conductance

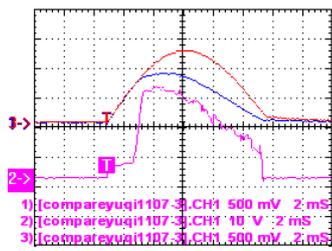


图8 实测限流波形和液态金属限流器端电压波形
Fig. 8 Test waveform of limited current and LMCL' voltage

表1 实测波形和仿真波形误差分析

Tab.1 Error analysis test waveform and simulated waveform

	I_{apmax}	I_{clmax}	t_{Iup}	U_{LMmax}	t_{Uup}
实测值	13 222.2 A	9 111.1 A	2.75 ms	306.0 V	2.39 ms
仿真计算值	13 209.7 A	9 184.6 A	2.51 ms	299.8 V	2.25 ms
误差	0.10%	0.81%	8.73%	2.06%	5.86%

5 结论

(1) 基于PSCAD/EMTDC搭建了液态金属限流器短路试验仿真电路, 并通过设定等效时变非线性电导的方法对液态金属限流器短路试验进行了模拟, 仿真波形与实际试验波形基本一致, 说明了使用该方法研究液态金属限流器暂态过程的正确性。

(2) 设定等效时变非线性电导的方法搭建的液态金属限流器模块, 通过参数调节, 可以推广到其他运用液态金属限流器的场合。

参考文献

- [1] 马伟明. 舰船动力发展的方向—综合电力系统[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14 (6): 1-5, 9. MA Wei-ming. Integrated Power Systems—trend of Ship Power Development[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14 (6): 1-5, 9.
- [2] 郑定泰. 水面舰艇综合电力系统的技术进展[J]. 舰船科学技术, 2005, 27 (5): 5-12. ZHENG Ding-tai. The Technical Development of the Integrated Power System for Surface Ships[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27 (5): 5-12.
- [3] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅. 舰船电力系统的发展趋势[J]. 中国修船, 2004, (3): 12-14. YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Yi. Developing Trend of Marine Power System[J]. China Lay-up, 2004, (3): 12-14.
- [4] 陈德桂. 两种新的限流技术[J]. 低压电器, 2005, (4): 3-4. CHEN Gui-de. Two Kinds of Limiting Technologies[J]. Low Voltage Electric Equipment, 2005, (4): 3-4.
- [5] Manitoba HVDC Research Center. PSCAD / EMTDC Power System Simulation Software User's Manual Version 3[M]. 1998.
- [6] Anaya O, Acha Lara E. Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD / EMTDC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (1): 266-272.
- [7] 尚振球. 麦也尔电弧数学模型的表达形式及其参数的确定方法[J]. 高压电器, 1985, (6): 40-45. SHANG Zhen-qiu. The Expressions of O.Mayr's Mathematic Model of Electric Arc and the Determination of Its Parameters[J]. High Voltage Electric Equipment, 1985, (6): 40-45.

收稿日期: 2009-01-20; 修回日期: 2009-02-22

作者简介:

谢桢 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合电力系统继电保护; E-mail: xiezhen171@163.com

叶志浩 (1975-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全运行;

吴翊 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为低压断路器中电弧等离子体的研究。