



·脉冲功率技术·

# 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置 环向场供电仿真研究\*

徐玉麟, 彭建飞, 卜明南, 李华俊, 王英翘, 李维斌, 李 波

(核工业西南物理研究院 聚变科学所, 成都 610041)

**摘 要:** 为实现对环向场电流的高效准确控制, 提高中国环流器二号 M 托卡马克装置的实验效率, 开展了针对 300 MV·A 六相脉冲发电机组向环向场脉冲放电的仿真研究。从 300 MV·A 六相脉冲发电机组向聚变装置环向场供电系统的拓扑出发, 以等效处理分析为基础建立了仿真模型并进行脉冲放电动态过程仿真。通过对比分析仿真波形与 300 MV·A 六相脉冲发电机组向 HL-2A 装置供电的实际波形, 验证了仿真模型的可靠性和合理性。在此基础上进行了 300 MV·A 六相脉冲发电机组向 HL-2M 环向场供电过程仿真研究, 根据不同的环向场电流平顶值, 得到了其对应的 300 MV·A 六相脉冲发电机组励磁电压控制波形, 可以作为下阶段装置高参数实验实际控制的重要参考和先进控制策略研究平台。

**关键词:** 环向场; 脉冲发电机组; 供电系统; 仿真研究; 励磁电压

中图分类号: TM921.5

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210477

## Simulation of 300 MV·A motor generator feeding the toroidal field power supply

Xu Yulin, Peng Jianfei, Bu Mingnan, Li Huajun, Wang Yingqiao, Li Weibin, Li Bo

(Center for Fusion Science, Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To control the toroidal field current efficiently and accurately, and to improve the experimental efficiency of the HL-2M tokamak, a simulation study on 300 MV·A six-phase motor generator (MG) feeding the toroidal field power supply (TFPS) is carried out. The topology of 300 MV·A six-phase MG feeding the TFPS is introduced, and its simulation model is established based on the equivalent processing analysis and the dynamic process of pulse discharge is simulated. The reliability and rationality of the simulation model are verified by comparing the simulation waveforms with the actual waveforms of the 300 MV·A six-phase MG feeding the TFPS of the HL-2A Tokamak. On this basis, the simulation of 300 MVA six-phase MG feeding the TFPS of HL-2M is carried out, and the corresponding excitation voltage control waveforms of the MG are obtained according to the different flat top values of the TF current, providing an important reference for the next stage high-parameter experimental control and research platform of advanced control strategy.

**Key words:** toroidal field, motor generator, power supply system, simulation, excitation voltage

中国环流器 2 号 M(HL-2M)是我国目前最大的磁约束聚变实验装置, 等离子体大半径 1.78 m、小半径 0.65 m, 环向磁场为 3 T, 等离子体电流可达 3 MA<sup>[1]</sup>。与中国环流器二号 A(HL-2A)装置相比, 脉冲供电容量和能量需求提高了一倍。为满足 HL-2M 装置的供电需求, 研制了国内首台额定功率 300 MV·A、额定释能 1350 MJ 的立式结构六相脉冲发电机组<sup>[2]</sup>。

HL-2A 和 HL-2M 核聚变实验装置采取同一脉冲供电系统进行供电, 通过切换电路 300 MV·A 脉冲发电机组可分别向环向场线圈电源和极向场线圈电源供电。其中, 环向场线圈电源采用不可控整流电路, 通过调节脉冲发电机组中六相同步发电机的励磁电压实现对电源输出的控制。在脉冲发电机组向环向场脉冲供电的整个过程中, 始

\* 收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-03-24

基金项目: 四川省青年科技创新研究团队项目(21CXTD108)

联系方式: 徐玉麟, xuyulin@swip.ac.cn。

终存在机电、电磁、电路过渡过程,3个过渡过程相互影响、错综复杂,因此,对其整个放电过程进行详细的理论分析是非常困难的。此外,为了得到不同的环向场电流控制波形,需要对发电机励磁电压的强励、逆变、平顶的大小和时间等参数进行主动调整,但必须通过反复多次放电实验来确定最佳参数,实验调试效率不高,调试过程复杂繁琐。因此,需要开展大量脉冲发电机组脉冲放电的模拟仿真研究,目前仅有针对两台 90 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2A 装置环向场供电<sup>[3-6]</sup>、300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置极向场供电的理论和仿真研究<sup>[7]</sup>,因此迫切需求 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电的仿真研究。本文介绍了 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2A 和 HL-2M 装置环向场供电的基本情况,考虑脉冲发电机组的特殊工况,建立脉冲发电机组向环向场供电的等效仿真模型,摸索其控制规律及初步确定控制参数。

## 1 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电系统

### 1.1 主回路

300 MV·A 脉冲发电机组向聚变装置环向场供电主回路由脉冲发电机组、环向场电源和环向场线圈负载三部分组成,其原理图见图 1。

300 MV·A 脉冲发电机组采取无单独飞轮立式结构,由 300 MV·A 同步发电机和 8500 kW 绕线式异步电动机同轴组成<sup>[2]</sup>。同步发电机为双 Y 相移 30° 的凸极式同步发电机,主要参数见表 1。300 MV·A 六相脉冲发电机输出接整流器负载时,定子相电流中 5 次、7 次谐波电流的基波空间磁势合成均为零,从而大大减小了定子谐波磁势对转子表面的发热、转子轴系振动和线棒振动的影响<sup>[8]</sup>。

发电机励磁系统采取静态励磁,其主回路采取十二脉波、静止励磁功率单元和氧化锌快速灭磁系统。

环向场电源由整流变压器、同相逆并联整流柜和平衡电抗器组成,采取不可控整流电路。同相逆并联的特点是利用通过导体产生的磁力线相互抵消,达到减少导排的互感,最终减少交流母线阻抗,达到提高功率因数的目的。此种设计仅需要对发电机励磁展开控制,让整流器工作在自由换相点,这有利于环向场线圈的匝间绝缘。

HL-2A 环向场线圈组共有 16 饼线圈,相间地分成两组进行电气连接,其中每饼线圈 32 匝,每组中的线圈串联后再两组串联,最后两组的连接点经一大电阻接地,以降低线圈最高的对地电位与事故时线圈间的相互作用力<sup>[9-10]</sup>。

HL-2M 环向场线圈组共有 20 饼线圈,每饼线圈 7 匝,采取与 HL-2A 装置环向场线圈类似的接法。HL-2A 和 HL-2M 装置的设计与运行电气参数如表 2 所示。

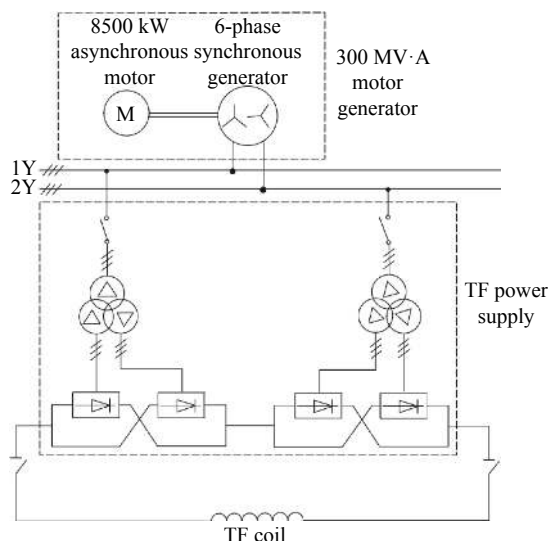


Fig. 1 Schematic diagram of the MG feeding the TF power supply of fusion device

图 1 机组向装置环向场供电原理图

表 1 同步发电机的主要参数

Table 1 Main parameters of synchronous generator

rated voltage/V	rated current/A	connecting mode	rated speed/(r/min)	rated frequency/Hz	rotational inertia/(kg·m <sup>2</sup> )	rated excitation voltage/V	rated excitation current/A
3000	29 000	dual Y shift 30°	335~500	67~100	7 300 000	3492~4093	301~353

表 2 环向场的主要参数

Table 2 Main parameters of the toroidal field

	maximum magnetic induction/T	inductance/mH	resistance/mΩ	time constant/s	maximum flat-top time/s
TF of HL-2A	2.8	230	58	4	5
TF of HL-2M	3	32	4	8	7

### 1.2 环向场供电控制方式

300 MV·A 脉冲发电机组向聚变装置环向场脉冲放电控制采取调节机组同步发电机励磁电压的方法来获得实

验要求的环向场电压和电流。300 MV·A 脉冲发电机组采取机械储能、脉冲放电的工作模式,通过电动机从电网获取电能,在无励磁的状态下,十几分钟内将机组加速到额定转速,把电能转换成机械能,根据装置的需要,在接收到中控放电命令后,按照一定的时序,依次对发电机励磁系统的可控变流器的工作状态进行强励、逆变、平顶、灭磁的控制,调节发电机输出电压,并通过变压器和不可控变流器为装置环向场线圈负荷提供秒级脉冲供电,放电过程机组转速快速下降,放电结束,通过电动机再加速到额定转速,依次循环<sup>[2]</sup>。

每一次放电时,由中央控制系统的放电管理计算机设置放电文件,在两次脉冲放电间隙期间通过以太网将数据传输至时序系统 PLC、数据服务器和 EPICS 服务器上。励磁控制系统读取来自两个服务器的数据资料和参数文件作为调节的基准,根据时序系统 PLC 提供的电平信号进行反馈控制,结束放电后,将采集的波形上传至数据服务器中,工作流程如图 2 所示。

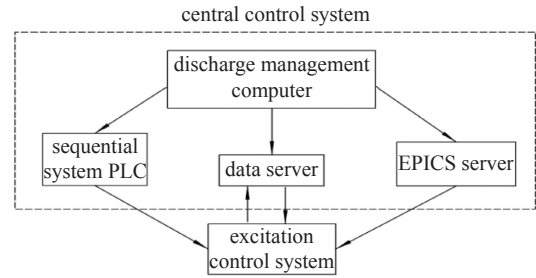


Fig. 2 Working topology diagram of excitation control system

图 2 励磁控制系统工作拓扑图

## 2 建立 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电等效仿真模型

300 MV·A 脉冲发电机组通过其双 Y 相移 30° 的六相同步发电机向环向场脉冲供电,放电过程中的机组模型可以等效处理为一台双 Y 相移 30° 的六相同步发电机,主要的等效分析处理为:(1)只考虑了机组的机械释能,忽略了机组轴系各质量段的机械力学相互作用;(2)将机组整体轴系的转动惯量等效处理为发电机轴系转动惯量;(3)在放电过程中,电动机提供的机械能约等于机组的风磨损耗和轴承损耗等其他损耗之和,可以进行等效处理,即在发电机建模过程中不考虑电动机的拖动转矩,也不考虑轴系的机械磨损,因此,在发电机模型中机械能参数  $P_m$  输入为零,摩擦因子为零。

双 Y 相移 30° 的六相同步发电机的仿真模型可以采用一台三相发电机模型和两个三相理想变压器组成,即将一台三相发电机的输出端分成两条支路,每条支路分别接一个三相理想变压器,一个连接组为 Y, y12, 另一个为 D, y1, 构成互错 30° 的双 Y 输出<sup>[1]</sup>。由于六相双 Y 同步电机向等值三相同步电机转换过程中,转子的电磁参数保持不变,故可以省略转子的电压方程式,等值三相同步电机的 Park 方程如下。

定子电压方程式

$$\begin{cases} u_d = p\psi_d + \psi_q\omega \\ u_q = p\psi_q - \psi_d\omega \\ u_o = p\psi_o \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $u_o$  是在 dq0 坐标系下的定子电压各轴分量;  $\psi_d$ ,  $\psi_q$ ,  $\psi_o$  是在 dq0 坐标系下的定子磁链各轴分量;  $P$  为微分算子  $d/dt$ ;  $\omega$  为电机机械角速度。

磁链方程式

$$\begin{cases} \psi_d = -x_{dM}i_d + x_{ad}i_f + x_{aD}i_D \\ \psi_q = -x_{qM}i_q + x_{aQ}i_Q \\ \psi_o = -\frac{1}{2}(x_o - x_{ss})i_o \\ \psi_f = -x_{ad}i_d + x_f i_f + x_{fD}i_D \\ \psi_D = -x_{aD}i_d + x_{fD}i_f + x_{DD}i_D \\ \psi_Q = -x_{aQ}i_q + x_{Q}i_Q \end{cases} \quad (2)$$

式中: 在 dq0 坐标系下,  $\psi_f$  为励磁绕组磁链,  $\psi_D$  为直轴阻尼绕组磁链,  $\psi_Q$  为交轴阻尼绕组磁链,  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_o$  为定子电流各轴分量,  $i_f$  为励磁绕组电流,  $i_D$  为直轴阻尼绕组电流,  $i_Q$  为交轴阻尼绕组电流,  $x_{dM}$ ,  $x_{qM}$ ,  $x_f$ ,  $x_D$ ,  $x_Q$  为各绕组自感抗,  $x_{ss}$  为六相双 Y 同步电机单 Y 综合净漏抗,  $x_o$  为六相双 Y 同步电机零序电抗,  $x_{ad}$  为电枢反应电抗,  $x_{aD}$ ,  $x_{aQ}$  为定子各绕组与转子各绕组间的互感抗,  $x_{fD}$  为转子绕组的互感。

上述方程中所有电抗均为原六相同步电机单 Y 电抗或单 Y 与转子间互感的标么值(阻抗基值取额定参数)。在等值三相同步电机的等效模型中,由于采取标么值,且基值不同,存在不同的换算关系,因此,在模型中输入参

数时,需要进行数值的转换计算。

机组向环向场脉冲放电过程中,需要通过控制发电机励磁电压实现控制环向场电流的目标,为此需要建立同步发电机励磁系统等效模型,为发电机模型提供励磁电压输入。利用 Signal Builder 模块和 Gain 模块建立静态励磁系统等效模型来产生励磁电压,其中, Signal Builder 模块用于设置励磁电压波形,设置好的励磁电压波形经过 Gain 模块处理,其输出为励磁电压标么值并作为发电机的励磁电压输入。但在模型验证环节,由于需要聚变装置实验时 300 MV·A 脉冲发电机组为环向场供电的实际励磁电压波形,采用 From Workspace 模块直接调用。励磁线圈的电感和电阻值在发电机模型中进行设置。

环向场电源由变压器、整流桥和互感线圈模块组成。仿真平台提供相对理想的仿真环境,可以使用二极管模型搭建同相逆并联整流桥,使用互感线圈模型完成电抗器的功能。另外,环向场线圈可以采取电阻与电感串联模型等效处理;线路上使用电阻模型等效处理。

通过上述等效分析处理,建立了 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场脉冲供电的仿真模型,见图 3。

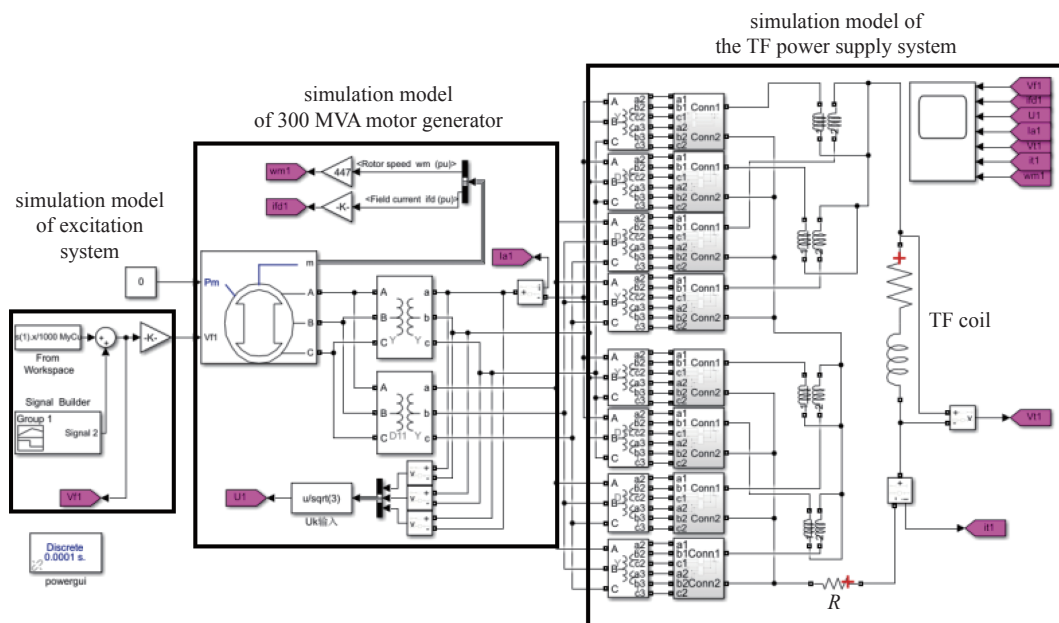


Fig. 3 Simulation model of a 300 MV·A MG feeding the TF power supply

图 3 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电仿真模型

### 3 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电仿真

#### 3.1 仿真模型验证

目前,已进行了 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2A 装置环向场脉冲供电核聚变实验,而未进行向 HL-2M 装置环向场脉冲供电实验。把 HL-2A 装置实验的相关数据代入仿真模型进行模拟放电,用于模型验证。

在 HL-2A 装置实验第 38351-38373 炮中,通过调节励磁电压控制波形和反馈 PID 参数,实现了环向场平顶电流从 15 kA 逐渐增加到 22 kA 的控制目标。选用第 38373 炮的数据与仿真模型仿真结果进行对比验证,并对仿真模型进行修正完善。调试的最终目的是在输入相同参数情况下,模拟仿真放电的实验数据与真实的实验数据基本吻合,仿真模型完善过程中确保了模拟仿真放电波形与真实的实验波形之间所有偏差控制在 5% 以内。

仿真模型中 From Workspace 模块直接调用第 38373 炮 300 MV·A 脉冲发电机组实际的励磁电压波形,如图 4 所示。

通过对仿真模型完善,其仿真的相关波形与实际放电波形基本吻合,见图 5,验证了该仿真模型的有效性。图 5 中分

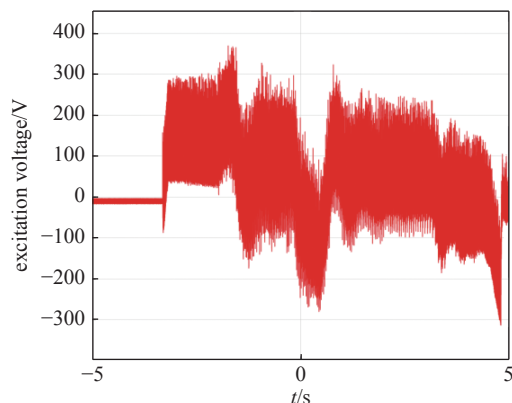


Fig. 4 MG excitation voltage waveform

图 4 脉冲发电机组励磁电压波形



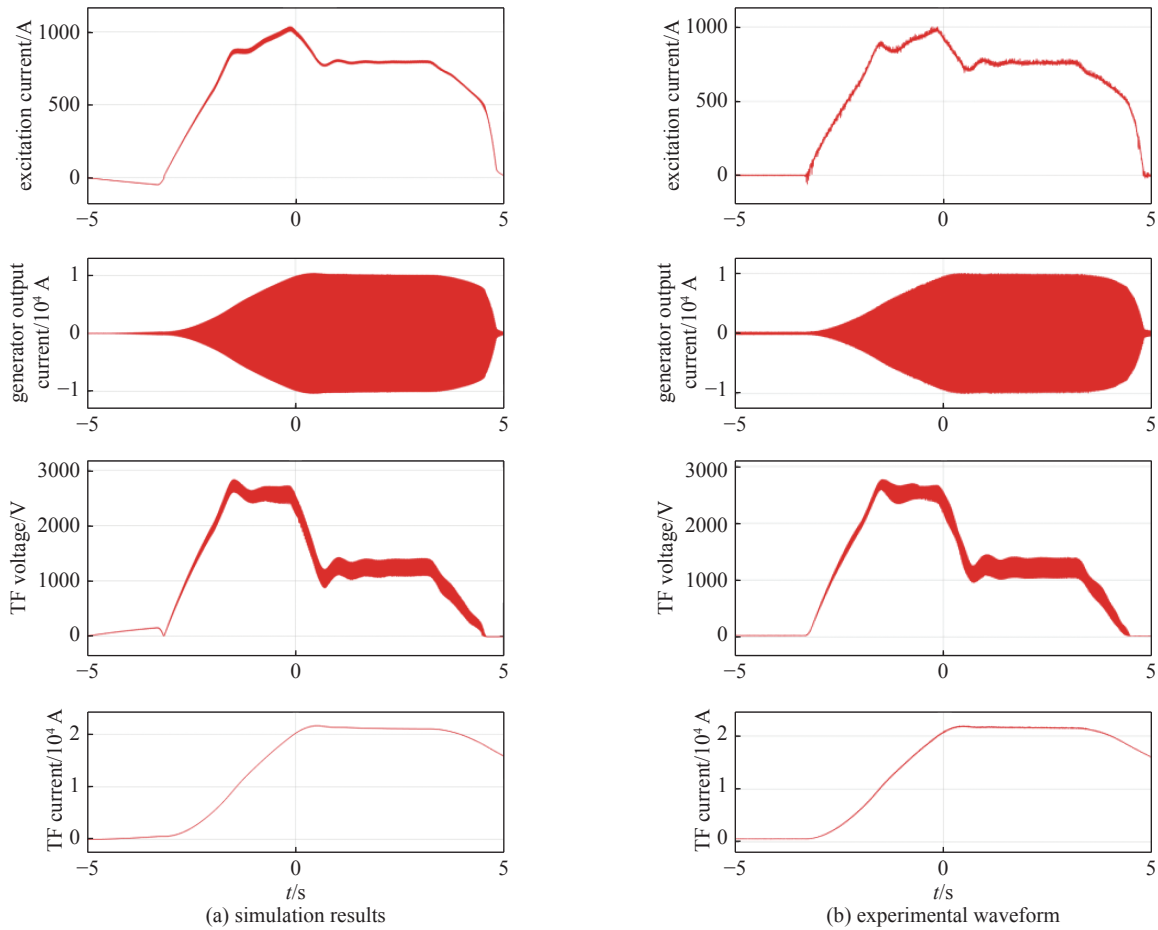


Fig. 5 Comparison between simulation results and experimental waveforms

图 5 机组向环向场供电的对比图

别是 300 MV·A 脉冲发电机组的励磁电流、发电机输出相电流以及环向场线圈的电压、电流。

为了验证该环向场供电系统模型在面对不同发电要求时的可靠性和时效性,在第 38351-38373 炮中,过滤掉实验参数接近的炮号,选择了第 38352、38353、38354、38355、38357、38366 和 38373 一共七炮作为验证对象。验证结果如图 6 所示。验证结果显示:在输入相同的励磁电压控制波形情况下,仿真模型模拟放电结果波形与实际放电基本吻合,建立的 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电仿真模型可以作为 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场供电实验的模拟仿真平台。

### 3.2 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场放电仿真研究

HL-2M 装置分别进行低参数和高参数实验,其主要约束条件为低参数实验中环向场电流最大值不超过 140 kA、

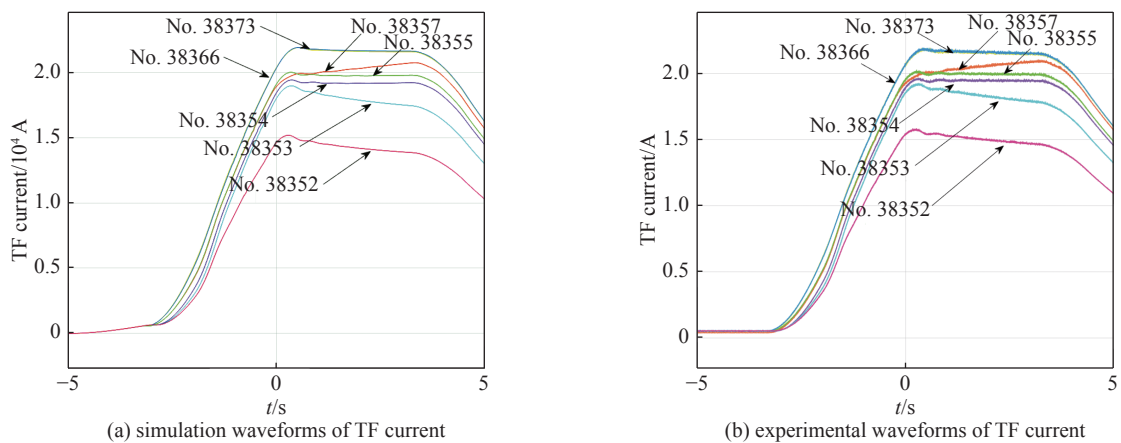


Fig. 6 Contrast diagram of the TF current

图 6 环向场电流的对比图

高参数实验不超过 191 kA、最大平顶电流时间不超过 7 s, 环向场线圈的总电感和总电阻的实测值分别为 32 mH 和 4 mΩ。因此, 300 MV·A 脉冲发电机组对应设定两档运行参数, 其工作转速分别设置为 335~400 r/min 和 335~500 r/min。为了保证机组安全, 335 r/min 为机组脉冲放电最低转速限制, 500 r/min 为机组脉冲放电最高工作转速。

在 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场脉冲放电仿真研究中, 相应的模拟了机组运行在 335~400 r/min 和 335~500 r/min 两种情况下的脉冲放电情况。在放电过程中, 发电机的转速持续下降, 为了保证发电机的正常运行, 考虑到裕量, 在仿真时设定 340 r/min 为发电机脉冲放电过程中最低转速值。模拟放电仿真中, 利用 Signal Builder 模块设置合适励磁电压控制波形, 分别得到两种情况下的环向场平顶电流梯形波如图 7 所示。图 7(a) 中仿真结果显示了当机组脉冲放电工作转速为 400~340 r/min、环向场平顶电流时间为 7 s 时, 不同平顶值的环向场电流, 其中, 最大值的平顶电流为 98 kA。图 7(b) 是当机组最高工作转速为 500 r/min 时, 模拟放电的仿真波形。经不断调节励磁电压控制波形, 得到平顶时间为 7 s, 环向场电流平顶值分别为 20、60、100、140 kA 和 150 kA 的电流波形, 其中, 150 kA 为能维持 7 s 的最大平顶电流。当环向场平顶电流值为 191 kA 时, 整个环向场的平顶时间仅维持在 0.6 s 左右。

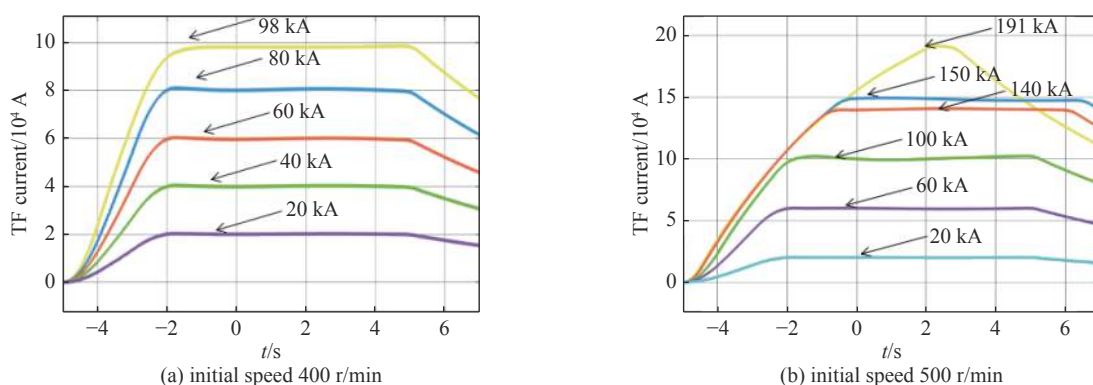


Fig. 7 Simulation waveforms of the TF current

图 7 环向场电流仿真波形

图 8 和 9 分别列出了在 340~400 r/min 和 340~500 r/min 两种情况下脉冲放电(总时间为 12 s)的励磁电压控制波形。包括励磁电压控制波形的强励段、逆变段、平顶段及灭磁段。

针对 HL-2M 装置高参数和低参数的两种实验情况分别进行的放电模拟仿真, 可以作为下一阶段 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场供电实验的重要参考, 进而有效地减少反复调试的次数, 提高实验效率。

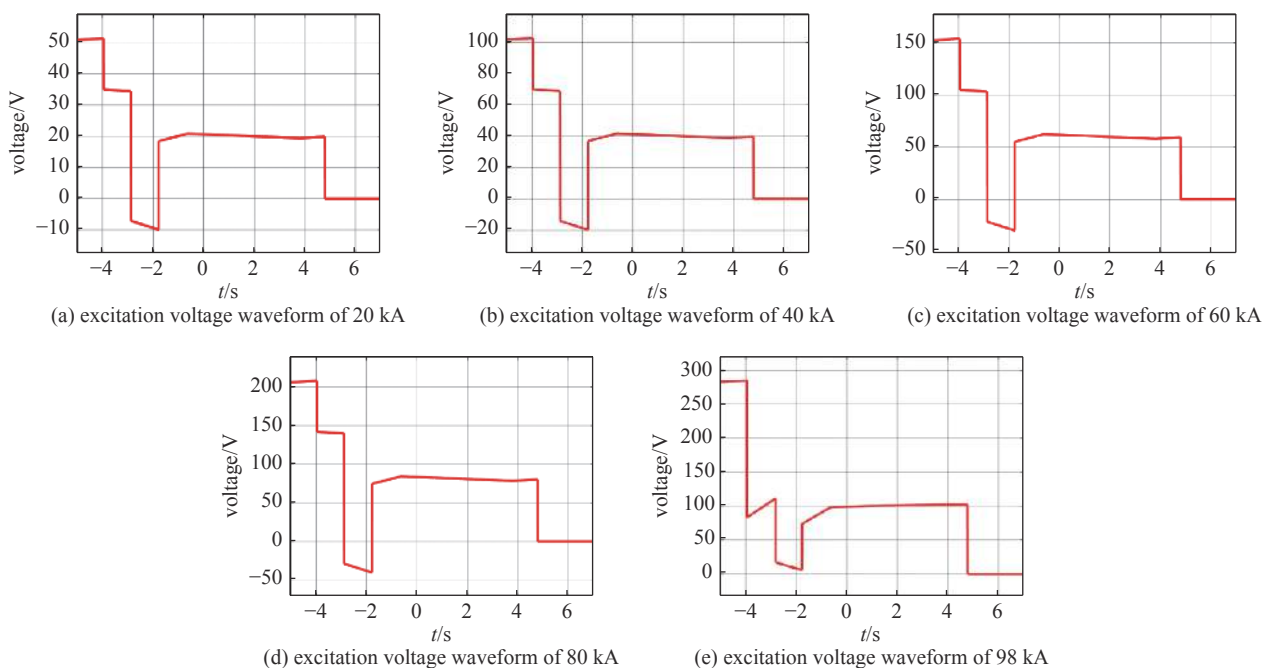


Fig. 8 Excitation voltage control waveforms (initial speed 400 r/min)

图 8 励磁电压控制波形(初始转速 400 r/min)

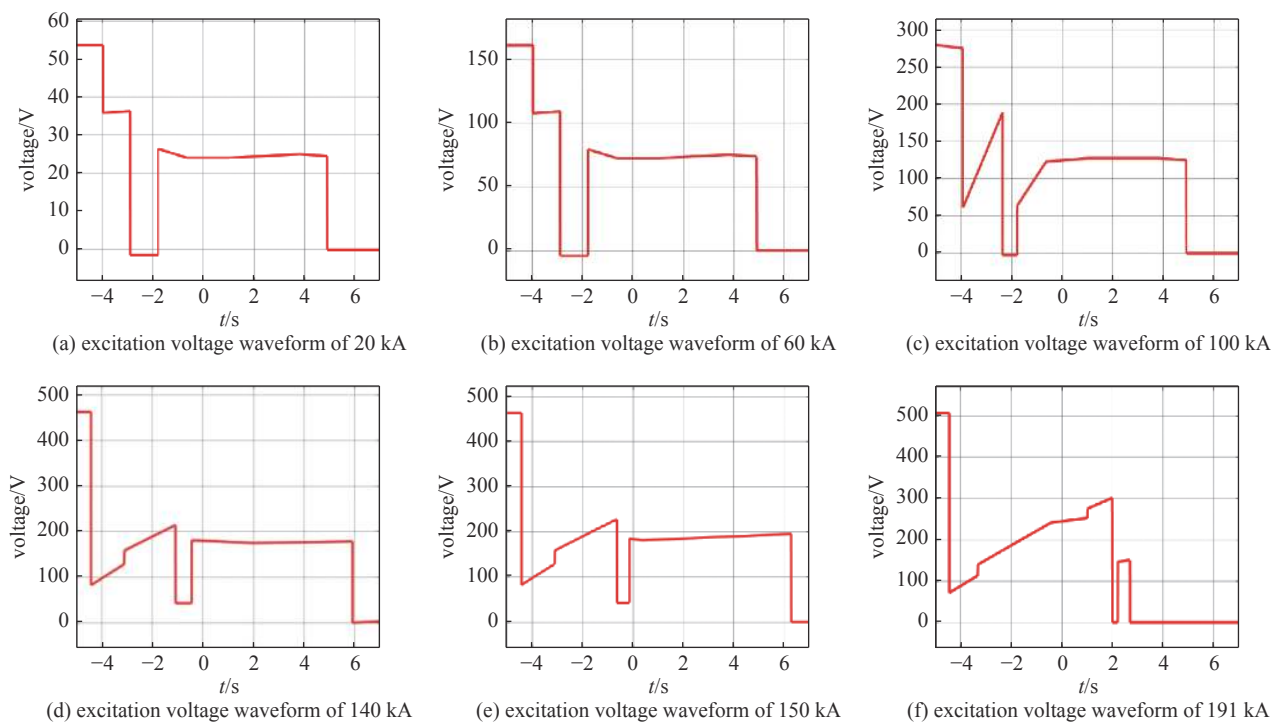


Fig. 9 Excitation voltage control waveforms (initial speed 500 r/min)

图9 励磁电压控制波形(初始转速 500 r/min)

## 4 结论

本文为提高 300 MV·A 脉冲发电机组向环向场的实验调试效率,考虑机组供电时所存在的机电、电磁、电路过渡过程,以等效处理分析为基础搭建了仿真模型,展开了 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2A 和 HL-2M 装置环向场供电的仿真研究。经仿真分析可知,300 MV·A 脉冲发电机组向环向场供电的模型与实际情况基本一致,可以完整地反映出机组向环向场供电的脉冲放电特点及动态放电过程,是合理可靠的。基于建立的仿真模型,开展了 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场放电的模拟仿真,仿真结果显示:平顶时间 7 s 的最大环向场电流为 150 kA,且为满足 HL-2M 装置实验所需的 3 T 环向平顶磁场强度最高参数,机组能提供 191 kA 但平顶时间仅为 0.6 s 的环向场平顶电流。同时得到了系列励磁电压控制波形,可以为下阶段 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场供电实验提供重要的数据参考。建立的虚拟仿真模型也可以作为环向场放电故障和控制策略的研究平台。

## 参考文献:

- [1] 刘永,李强,HL-2M研制团队.中国环流器二号M(HL-2M)托卡马克主机研制进展[J].中国核电,2020,13(6):747-752.(Liu Yong, Li Qiang, HL-2M Development Team. The development progress of the tokamak machine for HL-2M[J]. China Nuclear Power, 2020, 13(6): 747-752)
- [2] 宣伟民,彭建飞,李华俊,等.300MVA脉冲发电机系统研制进展[C]//2013核工业西南物理研究院年报.2014:98-100.(Xuan Weimin, Peng Jianfei, Li Huajun, et al. Development progress of 300MVA motor generator[C]//Southwestern Institute of Physics, Annual Report 2013 of Southwestern Institute of Physics. 2013: 98-100)
- [3] 彭建飞,王树锦,李华俊,等.基于Matlab/Simulink的环向磁场脉冲电源建模与仿真[J].核聚变与等离子体物理,2004,24(4):254-258.(Peng Jianfei, Wang Shujin, Li Huajun, et al. Modeling and simulation of toroidal field power supply system of the HL-2A tokamak based on Matlab/Simulink[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2004, 24(4): 254-258)
- [4] 李华俊,徐丽荣,刘学梅,等.HL-2A装置环向场电源系统及其控制[J].兵工自动化,2004,23(1):55-57.(Li Huajun, Xu Lirong, Liu Xuemei, et al. Power supply system and its control of HL-2A toroidal field[J]. Ordnance Industry Automation, 2004, 23(1): 55-57)
- [5] 陈宇红,王尚柄.HL-2A装置环向场电源系统设计[J].中国核科技报告,1999(s2):52-55.(Chen Yuhong, Wang Shangbing. Design of HL-2A toroidal field power supply system[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1999(s2): 52-55)
- [6] 康莉,王树锦.HL-2A装置环向场电源系统的EMTP仿真[J].电工技术,2003(6):14-15.(Kang Li, Wang Shujin. EMTP simulation of HL-2A unit circular field power supply system[J]. Electric Engineering, 2003(6): 14-15)
- [7] Peng Jianfei, Xuan Weimin, Wang Haibing, et al. Study on matching a 300 MVA motor generator with an ohmic heating power supply in HL-2M[J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(3): 300-302.
- [8] 彭建飞,宣伟民,将宝钢,等.HL-2M装置300MVA脉冲发电机组的设计[J].核聚变与等离子体物理,2021,41(s2):443-448.(Peng Jianfei, Xuan Weimin, Jiang Baogang, et al. Design of 300MVA motor generator on HL-2M tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(s2): 443-448)
- [9] 袁保山,姜韶凤,陆志鸿.托卡马克装置工程基础[M].北京:原子能出版社,2011.(Yuan Baoshan, Jiang Shaofeng, Lu Zhihong. Engineering fundamentals of

tokamak devices[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2011)

[10] 宣伟民, 王英翘, 李华俊, 等. HL-2M装置供电系统研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(s2): 437-442. (Xuan Weimin, Wang Yingqiao, Li HuaJun, et al. Development of HL-2M power supply system[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2021, 41(s2): 437-442)

·研究快讯·

## 4.5 kW, 0.33 nm 近单模窄线宽保偏光纤激光器\*

任 帅, 陈益沙, 马鹏飞, 李 魏, 王广建, 刘 伟, 周 朴

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

高功率窄线宽光纤激光器是光束合成和非线性频率变换等应用领域的重要单纤光源。目前, 课题组已经实现了 6 kW 级非保偏光纤激光输出。然而, 相比于非保偏光纤, 保偏光纤中的受激布里渊散射 (SBS)、受激拉曼散射 (SRS) 等非线性效应更强, 热致模式不稳定 (TMI) 阈值更低, 因此, 线偏振窄线宽光纤激光器的功率增长和光束质量保持更加困难。2021 年, 国内同行报道了 3.6 kW 线偏振窄线宽近单模光纤激光输出; 近期, 我们通过优化 TMI 抑制技术, 近单模保偏光纤激光器的输出功率突破 4.5 kW, 3 dB 线宽为 0.33 nm。

4.5 kW 保偏光纤激光器结构如图 1 所示, 首先, 中心波长为 1064 nm 的线偏振单频激光器通过白噪声相位调制 (WNS-PM) 形成窄线宽种子, 该种子经保偏预放大器 (PM-AMPs) 后功率提升至约 20 W, 保偏环形器 (PM-Circulator) 用来探测后向回光。随后, 种子光通过保偏模式匹配器 (PMMFA) 进入主放大器。主放大器基于双向泵浦结构搭建, 976 nm 的稳波长泵浦源 (LDs) 分别通过两个保偏 (6+1) × 1 合束器 (PM (6+1) × 1 Combiner) 注入长度为 10 m、纤芯/包层直径为 20/400 μm 的大模场保偏掺镱光纤 (PMYDF), 前后两个保偏泵浦光滤除器 (PMCPS) 用来滤除系统中的残余包层光。最后, 信号激光通过保偏光纤端帽输出 (PMQBH)。实验结果如图 2 所示, 其中, 图 2 (a) 为信号激光和后向回光的功率增长曲线, 当注入 5238 W 的泵浦光时, 获得了 4515 W 的输出激光, 斜率效率为 87.1%, 回光功率近似线性增长, 系统中没有发生 SBS 效应; 图 2 (b) 为功率放大过程中的光谱特性, 当激光功率为 4515 W 时, 光谱 3 dB 线宽为 0.33 nm, SRS 抑制比为 48 dB; 图 2 (c) 所示的偏振消光比 (PER) 在功率增长过程中处于 14.7 dB 和 10.3 dB 之间, 4005 W 时的 PER 为 12.5 dB, 随后由于后向合束器的热效应, PER 出现了下降, 最大功率下的 PER 为 10.3 dB, 光束质量测量值为  $M_x^2=1.55$ ,  $M_y^2=1.46$ 。

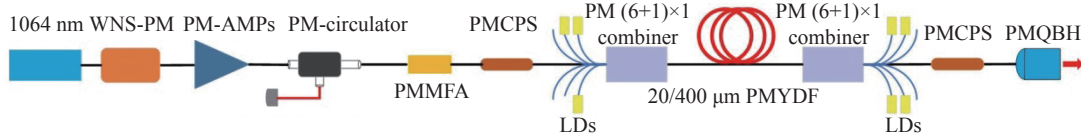


图 1 4.5 kW 窄线宽线偏振光纤激光器结构示意图

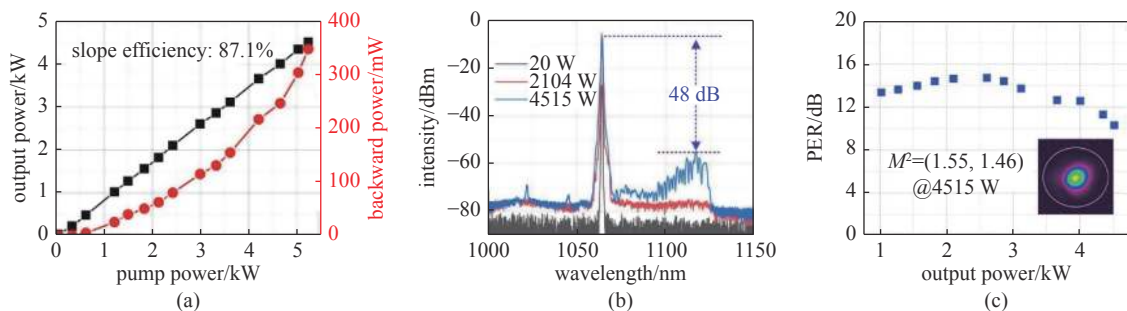


图 2 实验结果图

课题组基于主振荡功率放大结构, 实现了 4.5 kW, 0.33 nm 近单模线偏振光纤激光器。下一步, 将继续优化全保偏光纤激光器中的 TMI 效应抑制方法和相位调制技术, 实现更高功率更窄线宽的激光输出。

**致 谢** 感谢国家自然科学基金项目 (61705264, 62005313)、湖南省创新研究群体 (2019JJ1005) 等对文中工作的支持; 感谢陈子伦老师提供的自制保偏光纤输出端帽和泵浦光滤除器; 感谢实验员周聪、肖亮、宋涛等对本实验的支持。

\* 通信作者: 马鹏飞, [shandapengfei@126.com](mailto:shandapengfei@126.com); 周 朴, [zhoupu203@163.com](mailto:zhoupu203@163.com)。