

CNIC-01860

SIP-0185

三套大型交流脉冲 飞轮发电机组系统的建造与运行

王树锦 李华俊 李志建 黄昭荣 王小平
徐丽荣 刘学梅 卜明南 胡浩天 毛维成
(核工业西南物理研究院,成都,610041)

摘 要

利用旧有的三套脉冲发电机组进行了合理的配置以及必要的技术改造,成功实现了为 HL-2A 装置供电并满足了物理实验的要求,同时还构成了我国当今装机容量与储能、释能规模均最大的双 Y 移相 30° 脉冲发电机组系统。

关键词: 交流脉冲飞轮发电机组 释能 双 Y 移相 30°

**Built and Operation of
Three Powerful AC Pulse Flywheel Generator Sets**
(*In Chinese*)

WANG Shujin LI Huajun LI Zhijian HUANG Zhaorong WANG Xiaoping
XU Lirong LIU Xuemei BU Mingnan HU Haotian MAO Weicheng
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

Based on modification of the old pulse generator sets the new flywheel generator system has been developed. Now it is successfully used in supplying power to the HL-2A tokamak and meets the needs of HL-2A physical experiments. By far it is the most powerful pulse flywheel generator system on installed gross capacity, energy storage and release in China today. In addition, the characteristic of the flywheel generator system is that each generator stator has two Y windings with 30° phase shift to avoid damaging the rotor due to rectifying load.

Key words: AC Pulse Flywheel Generator Sets, Released energy, Two Y windings with 30° phase shift

前 言

中国环流器 2 号 A(HL-2A)装置是我国第一个带有偏滤器的托卡马克实验装置。HL-2A 装置包括 9 个主要的电源系统,如表 1 所示,为满足一次最高参数的脉冲放电,其供电系统须具有的一次脉冲总容量与总耗能分别约为 300 MVA 与 1 300 MJ。

表 1 HL-2A 装置电源系统的主要供电指标

电源名称	DC 输出电压/V	DC 输出电流/kA	持续时间/s	AC 峰值容量/MVA	总耗能/MJ
环向场电源 TF	3 510	45	3~5(平顶)	170	>1 000
欧姆电源	OH2	±1 200	0.75	±38	<20
	OH1	(-)750	(-)30	5	
垂直场电源 VF	1 000	45	5	48	<70
水平场电源 RF	±100	±4	5	±0.6	2
多极场电源 E1	600	45	5	29	<70
多极场电源 E2	-200	13	5	-3	-3.8
多极场电源 E3	±100	3	5	±0.4	±1.5
多极场电源 E4	±100	3	5	±0.4	±1.5
辅助加热电源	80 000	0.1×4	3	9×4	96

注:此表中负值容量表示吸收能量。

为避免如此规模的变流设备脉冲放电对电网造成反复巨大冲击和高次谐波污染,这些电源的前级电源采用了由交流感应电动机、储能飞轮和同步交流发电机联轴构成的脉冲发电机组。先由功率较小的电动机从电网取能,拖动机组轴系缓慢加速进行机械储能,待机组储能完毕后,给发电机励磁使发电机建立电压,然后通过变流设备以很大的功率放电释能,与此同时机组转速快速下降。

1 交流脉冲飞轮发电机组系统研制的技术路线及主要技术指标

经过多次全方位的论证,对所需的脉冲发电机组系统的主体配置采取,1) 为已有两套 80 MVA 脉冲机组更换大飞轮和配置双馈调速变频装置;2) 通过国际合作引进日本国家核融合科学研究所和名古屋大学弃置不用的一套 125 MVA 旧脉冲机组,为其更换新电动机和配备双馈变频调速装置的技术路线,使原有专用设备得到了充分利用,在满足 HL-2A 装置物理实验要求的前提下,大大降低了供电系统的投资,缩短了建造周期。

1.1 利用原有的两套发电机组加以适当配置,用于 HL-2A 装置环向场系统供电

1.1.1 原有的两套 80 MVA 脉冲发电机组

原有两套 80 MVA 交流脉冲飞轮发电机组,简称 1 号机组和 2 号机组。这两套机组是在 20 世纪 70 年代由上海电机厂专门为中国环流器一号装置(HL-1)环向场供电系统设计制造的。这两套机组除在出厂进行过 1 800 r/min 的超速试验外,从无超速记录,自 1984 年安装试车投入使用以来,也从未发生过发电机短路和其他有损发电机轴系内部强度的重大事故,每年运行时间最多不超过 4 个月。机组的紧急制动采用飞轮涡流能耗制动。每套机

组的构成及主要参数如附录中附表 1。

这两台发电机的电压、电流参数,与表 1 中 HL-2A 装置电源系统的供电指标相近,将它们的 4 个 Y 绕组与在直流侧并联的 4 个桥式不可控整流器直接相连用于环向场线圈供电,通过控制调整发电机的励磁从而控制发电机的端电压来实现环向场电流波形的控制调整。

1.1.2 对原有的两套 80 MVA 脉冲发电机组采取的技术措施

原有的两套机组的释能仅为 200 MJ,这与 HL-2A 环向场电源所要求的 1 000 MJ 相去甚远,必须提高这两套脉冲发电机组的释能能力。

通过下面三种措施,使每套发电机组一次脉冲释能达到 500 MJ:

(1) 将原机组 42 t 飞轮均更换为 88 t 飞轮,使轴系转动惯量 GD^2 由 $106 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 增大到 $287 \text{ t} \cdot \text{m}^2$,以增大轴系储能;

(2) 研制 2 500 kW 拖动电机的超同步双馈调速装置,提高机组的最高转速由额定的 1 488 r/min 到 1 650 r/min;

(3) 降低放电结束时机组的最低转速至 1 200 r/min。

实践证明,这三者相结合是最好的方法,因为转速的提高,对于机组的储能和释能能力最有效,同时也使得发电机的名义容量提高到 90 MVA。

1.1.3 提高机组最高转速、降低最低转速、增加转动惯量的可行性分析

1.1.3.1 脉冲发电机机械强度核算

对原脉冲发电机组采取的技术措施均对机组的机械强度产生影响,故对发电机主要部件的刚度、强度进行了核算。在与离心力有关的计算中转速取最高转速 1 650 r/min(此时离心力最大),在与扭矩有关的计算中转速取最低转速 1 200 r/min(此时转矩最大)。

核算的内容及结果如下:

(1) 护环、中心环核算

护环、中心环应力对应最高转速的 120% 即 1 980 r/min 时,安全因数均大于 2.5。最低分离转速为 1 819 r/min,高于最高转速 10%。

(2) 转子齿、中心孔及槽楔应力核算

转子齿、中心孔及槽楔应力对应最高转速的 120% 即 1 980 r/min 时,安全因数均大于 3。

(3) 两相短路时轴颈、轴伸应力核算

轴颈安全因数为 1.96;轴伸抗扭安全因数为 2.13;挤压安全因数为 1.33。

(4) 刚性联轴器螺栓强度核算

两相短路时安全因数为 2.5。

(5) 定子底脚螺栓强度核算

三相突然短路时螺栓拉应力小于 $[\sigma]$ (抗拉强度) = 500 kg/cm^2 。

(6) 定子定位筋焊缝应力核算

三相突然短路时定子定位筋焊缝应力小于 $[\sigma]$ = 800 kg/cm^2 。

(7) 机座固有频率核算

机座固有频率在工作频率 80%~120% 以外范围。

经计算验证,脉冲发电机在增速(最高转速为 1 650 r/min)增容后,发电机各部件强度仍有足够的安全裕度,增容后可安全运行。

1.1.3.2 拖动电机机械与起动性能的核算

经核算,原拖动电机转动部件的强度仍能满足 1 650 r/min 运行时的要求。

改造后,电动机借助液体滑差调节器拖动机组启动运行,直至额定转速 1 488 r/min,而后切换到双馈调速装置,使机组运转到 1 650 r/min 等待装置放电,放电结束后再借助双馈调速装置由 1 200 r/min 再加速至 1 650 r/min。

在再加速过程中,控制电动机的定子电流和转子电流在其额定值以下,同时由于电动机在该转速范围内已有较好的冷却条件,因此对该过程的定转子温升可不再进行核算。

但是由于机组飞轮力矩 GD^2 增大,飞轮的直径加大,机组的启动时间将大大延长,而在这期间拖动电动机的转速较低,冷却条件差,其启动时间和绕组温升必须进行核算。借助液体滑差调节器以额定子电流拖动机组到 1 488 r/min,耗时约 15 min,转子起动短时温升约为 97 K,低于 F 级绝缘温升限值,从 1 200 r/min 加速到 1 488 r/min,起动时间约为 4 min,转子温升约为 57 K。

计算结果表明,现有的拖动电机不仅可将更换飞轮后的脉冲发电机组从静止加速到 1 488 r/min,还可在机组一次放电后,在约 4 min 的时间内,将机组再加速到 1 488 r/min,满足机组在没有配置超同步调速装置时的低参数放电实验需要。

1.1.3.3 新飞轮的 GD^2 及其形式的确定

由机组脉冲释能公式: $Q = 0.5J\omega_1^2 - 0.5J\omega_2^2$,可知当轴系的转速变化范围从 1 650 r/min 降到 1 200 r/min,单台机组相应的释能为 500 MJ 时,轴系的 GD^2 应大于等于 $280 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 。适当考虑损耗,增大飞轮使每台机组轴系的 GD^2 增至 $287 \text{ t} \cdot \text{m}^2$ 。

飞轮设计包括飞轮尺寸选择、结构形式选择和强度、发热计算三个方面。在飞轮设计时,分别对改造原飞轮、保留原飞轮再增加一个新飞轮、更换新飞轮三种改造形式的多种方案进行了分析对比。

考虑材质机械强度、轴系稳定、锻件提供、整体重量、加工能力等多方面因素,经多方案比较,采用了外本体径 2.6 m,长 1.8 m 的整体锻造,总重约 90 t 的飞轮的方案。

1.1.3.4 脉冲发电机组轴系稳定性计算

脉冲发电机组轴系稳定性计算包括轴系临界转速计算、轴系扭振频率计算和扭振响应计算。

轴系临界转速——高于 1 950 r/min,高于最高转速 1.18 倍。

轴系扭振频率——69 Hz,高于最高工作频率 1.25 倍。

扭振响应——额定工况下运行时,轴颈安全因数为 9.86,轴伸安全因数为 6.45;短路工况时,轴颈安全因数为 1.55,轴伸安全因数为 1.015。

上述短路工况是指事故状态,即发电机在额定电压下,不同组别绕组两相间发生突然短路,这是最严重的短路事故。

上述计算结果表明,增加轴系转动惯量、提高最高转速后,新的轴系可安全运行。

1.2 为 125 MVA 机组配置 50 Hz 电动机和变频调速装置,用作 HL-2A 装置极向场及其他电源系统供电

1.2.1 原 125MVA 机组

通过国际合作的方式引进的 125 MVA 机组(简称 3 号机组)的结构和建造年代与 80 MVA 机组相似,其额定输出和释能可满足所有极向场电源和辅助加热电源的需求,发电

机所具有的较高频率也非常适合这些电源的快速调节要求。由于这些电源均有自身的控制环节,对它们可采用由一台发电机多路供电的方式。为适合我国 50 Hz 电网并尽快投入装置初期运行,更换电动机为 50 Hz,两极 2 000 kW/6 kV 绕线式的异步电动机。机组的启动、再加速借助液体转差调节器,启动时间为 14 min。机组的紧急制动采用电动机能耗制动,制动时间为 20 min。其主要构成和主要参数见附录中附表 2。

125 MVA 机组在容量和能量两个方面与所有的极向场和辅助加热系统供电要求比较匹配,并且其发电机的频率较高,可降低各电源系统变压器的铁芯截面及其造价和电源输出的波纹度,也可提高各系统的快速调节性。

1.2.2 对原 125 MVA 脉冲发电机组采取的技术措施

为使 125 MVA 机组在 50 Hz 电网频率下能够运行到 3 600 r/min 从而达到其额定参数,必须为它配备相应的调速设备,基于与对 1 号和 2 号机组同样的考虑,不宜采用定子侧变频调速方法,而采用为其配备一台新的两极 50 Hz/2 000 kW/6 kV、机械强度能运行在 3 600 r/min 的绕线式异步电动机,以双馈电机的方式超同步运行来实现。更换新电动机,是因为原电动机转子绕组线圈已经松动,影响机组的动平衡,而在 50 Hz 下 2 000 kW 双馈电机的出力可与 60 Hz/2500 kW 的相当。

此外,该机组在机械、频率和磁路方面还允许借助增大其转差由 3 600 r/min 降至 2 400 r/min(相对应的频率为 120~80 Hz),使其释能增加到 330 MJ,从而使三套机组的总释能增大到 1 330 MJ 左右。

1.3 三套机组采用分时启动及再加速的方式

三套机组的拖动电机共用一台 5 MVA,10 kV/6 kV 的变压器,由于输电容量有限,通过控制三台电动机的定子电流来进行分时启动和分时再加速的方式来得以解决。

1.4 改造后三套交流脉冲飞轮发电机组的主要参数

改造后三套交流脉冲飞轮发电机组的主要参数见表 2。

表 2 改造后三套交流脉冲飞轮发电机组的主要参数

	主要参数	1 号和 2 号机组(每套)	3 号机组
发 电 机	脉冲容量	90 MVA	125 MVA
	接线方式	双 Y 相差 30°	双 Y 相差 30°
	相电压	1 500 V	1 732 V
	相电流	11 kA	12 kA
	同步转速	1 500 r/min	3 600 r/min
	频率范围	55~40 Hz	120~80 Hz
电 动 机	额定功率	2 500 kW	2 000 kW
	额定电压	6 000 V	6 000 V
	同步转速	1 500 r/min	3 000 r/min
	频率	50 Hz	50 Hz
轴 系	最大释能	500 MJ(1 650~1 200 r/min)	330 MJ(3 600~2 400 r/min)
	GD ²	287t·m ²	33.5t·m ²

2 脉冲发电机组系统的建造实施

2.1 机组主体及其辅助系统

1号和2号机组两个新飞轮段由东方电机股份公司负责设计、加工及试车。飞轮为整体锻造,本体直径2.6 m,长1.78 m,总长5.858 m,轴颈620 mm;材质为25Cr2Ni4MoV,总重90 t;锻件由意大利SBP公司进口。1号机飞轮经两次1 780 r/min 2 min超速试验,2号飞轮经一次1 900 r/min 2 min超速试验,动平衡均良好。飞轮轴承均为 $\phi 620$ mm,长480 mm的压力循环供油自动调心球面支撑椭圆止推瓦,座为60万机组用轴承座,中心高900 mm,配有铂电阻轴瓦温度测量元件。改造后机组的轴系总长21 109 mm,最宽处3 710 mm,总重约230 t。利用原直流涡流制动器的线圈,重新设计制造了线圈铁芯及其支撑结构。鉴于飞轮直径变大,转速提高,相应增大了飞轮的风冷系统能力。

为3号机组更换的绕线式两极异步50 Hz,2 000 kW/6 kV拖动电机,由北京重型电机厂制造。其底板及螺孔尺寸与原尺寸一致,中心高相同。对该电动机进行了3 900 r/min的超速试验和动平衡调整,在0~3 600 r/min范围内其各方向的座振均小于30 μm 。改造后机组总长20.2 m,总重约168 t。

在油循环系统中,为每套机组配置了两台交流油泵,一用一备;为所有轴承增配了相应的流量计;为1号和2号发电机、飞轮轴承配置了压力可调的具有交流与直流油泵的高压顶油装置。为了保证机组在交流系统断电的情况下能安全停车,将转动惯量增大后的1号和2号机组上油箱的容油量均由原来的10 m³增大至25 m³,为3号机组配置了20 m³的上下油箱,还为三机组各增设了一台由蓄电池供电的18.5 kW的直流循环油泵。

三台发电机均为晶闸管励磁系统,触发系统全改为自行研制的数字触发系统,1号和2号机组励磁参数为DC300 V/2 000 A,3号发电机为600 V/4 500 A。对三台机组的滑差调节器及其控制系统进行了改进,以满足分时启动和分时再加速的要求。另外,为机组冷却水循环系统重新配置了的冷却塔,还为3号机组的能耗制动系统配置了直流电源、制动耗能电组器及其控制系统。

2.2 机组控制保护、监测与数据采集系统

1号和2号发电机的双Y出口仍利用原来的少油断路器,为3号发电机配置了真空断路器,为三台电动机配置了总的和各自的真空断路器。

选用了国家电力公司南京电力自动化总厂生产的ND200自动化系统作为三套机组的实时监控系統。该系统具有计算机图形界面操作、系统状态显示与语音报告、故障灯光显示与声响报警、保护设置、操作与故障记录等功能。记录内容包括动作时间,保护动作幅值及事故前40 ms内38个阵信号,并可对近一个时期的(可选)遥信量、控制量的动作次数、时刻进行事件记录,对发电机、电动机的电压、电流、功率进行实时测量。该系统主要的保护内容有发电机的循环闭锁与比例制动方式差动、基波零序电压型定子接地、复合电压闭锁的过流保护,电动机的速断、堵转保护电流、差动、CT断线等。

为三台机组配置了实时显示与记录的振动监测系统,监测对象为1号和2号机组电动机的各轴承水平和垂直方向座振,3号机组电动机、飞轮和发电机共5个垂直方向1个水平方向座振,以及电动机水平和垂直方向的2个轴振。

还为机组配置了监测各轴承进出口油温、瓦温、发电机与电动机定子温度以及风/水、

水/水冷却器的进水压力与进出口温度等 180 路信号的巡回检测系统,并用数字表对油压、油流量等 33 路信号进行实时显示。

自行研制了机组的数据采集系统,对机组转速、发电机定子电压电流、励磁电压电流、电动机定子电压电流、转子电压电流以及 3 号电动机的垂直及水平方向轴振等 69 路物理量进行实时测量显示与记录。

3 机组的安装、试车与运行

三套机组的机体及机组辅助的油水风系统的安装由核工业 23 安装公司承担。三套机组本体的安装均以飞轮轴承处为零标高,其余按对中进行扬度调整。

2002 年 8 月,1 号和 2 号机组分别连续 4 h 空载试车一次成功,此后又进行了多次空载励磁试车和带载运行,机组各系统均符合设计要求。机组的启动先经顶油,再盘车至 12 r/min,然后合上电动机真空开关,借助液体滑差调节器以 230 A 恒电流加速机组,直至液体电阻电极降至最低位,机组的最高转速为 1 480 r/min,此时电动机电流稳定在 120 A,全部启动时间为 19 min,在 750 r/min 后高压油顶退出。用数字测振仪测出机组各轴承振动值均小于 0.05 mm,机组轴向窜动值小于 0.5 mm,温度巡检仪测出 $\phi 620$ mm 飞轮轴承最高温度为 62 $^{\circ}\text{C}$ 。机组惰走停机历时 125 min,涡流制动停机用时 15 min,这两种情况均在转速下降至 750 r/min 时投入高压油顶系统。

随后进行了 1 号和 2 号机组的分时启动与再加速,由 1 号机组为环向场线圈供电,2 号机组为所有极向场线圈供电,满足了 HL-2A 装置的启动和初步物理实验,实现了初步的偏滤器运行。

在 2002 年 9 月进行的 125 MVA 机组空载试车中,当机组加速至 1 800 r/min(电动机一阶临界转速)时电动机振动剧烈。经电动机精细动平衡,机组扬度调整精细对中,以及轴系精细动平衡(对电动机及其联轴器处)后,于 2003 年 10 月进行的机组再次试车中获得成功。125 MVA 机组启动过程是,首先经过 72 h 盘车后,在液体滑差调节器控制下以 280 A 的恒电流加速至 2 400 r/min,使机组快速通过其临界转速,然后以 240 A 恒电流加速至液体电阻电极降至最低位,在 2 940 r/min 时与液体电阻并联的固体电阻分三次逐步完全短接。机组最高转速为 2 990 r/min,此时定子电流为 120 A。该机组自空载试车成功直至目前的历次放电运行中,其各轴承座各方向的振动从启动直至最高转速均小于 35 μm ,过临界转速时均小于 20 μm ,稳定后均小于 20 μm 。

2003 年 11 月初,完成了三套机组的分时启动与再加速,由 1 号和 2 号机组共同为环向场线圈供电,3 号机组为所有极向场线圈供电运行,为 HL-2A 装置的物理实验取得突破性进展创造了必要条件,三台发电机电流电压波形分别见图 1~3。

目前利用三套机组为 HL-2A 装置线圈供电,在装置上已实现了孔栏圆截面与单零点偏滤器位形放电,达到最大等离子体电流 400 kA,等离子体存在最长时间 2 960 ms。1 号和 2 号机组同时为环向场线圈供电的环向场电流已达到 42.4 kA(环向中心磁场 2.65 T),波形见图 4。由 125 MVA 机组供电的主要电源,如欧姆电源的直流电流达到 40 kA,垂直场电源的直流电流达到 38 kA。

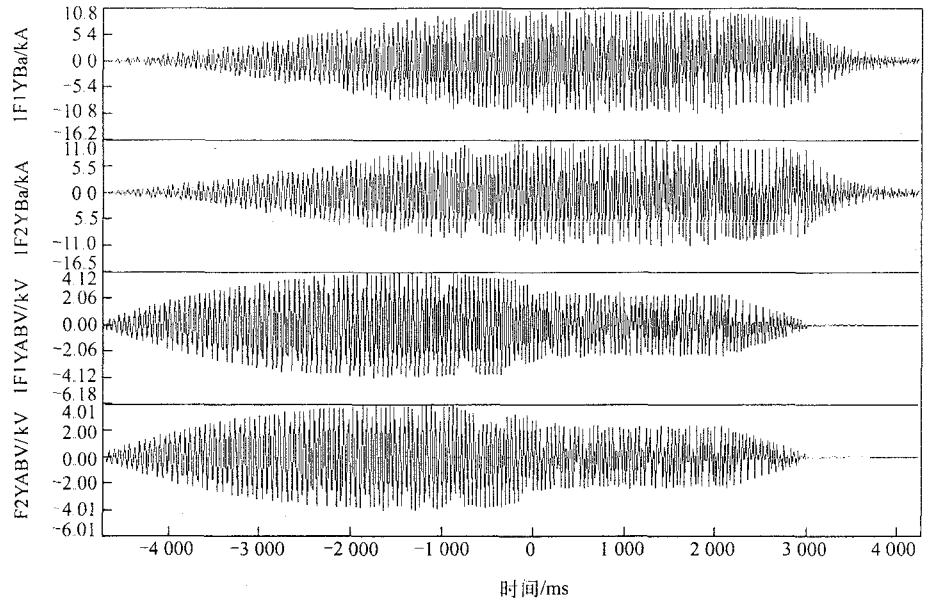


图1 4512次放电1号发电机双Y的电流、电压波形

其中,1FIYBa:1号发电机1YB相电流波形;1F2YBa:1号发电机2YB相电流波形;
1FIYBCV:1号发电机1YBC线电压波形;1F2YABV:1号发电机2YAB线电压波形

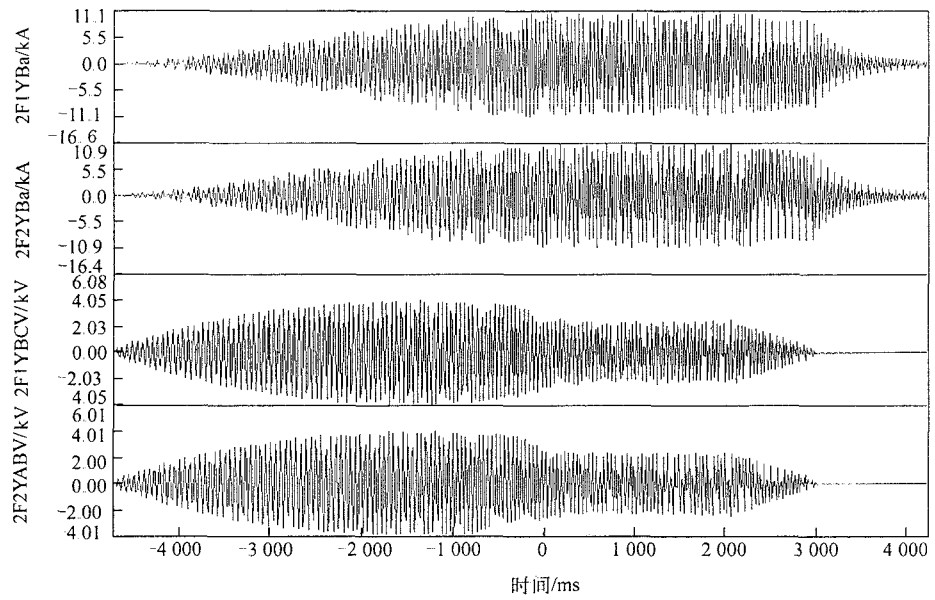


图2 4512次放电2号发电机双Y的电流、电压波形

其中,2FIYBa:2号发电机1YB相电流波形;2F2YBa:2号发电机2YB相电流波形;
2FIYBCV:2号发电机1YBC线电压波形;2F2YABV:2号发电机2YAB线电压波形

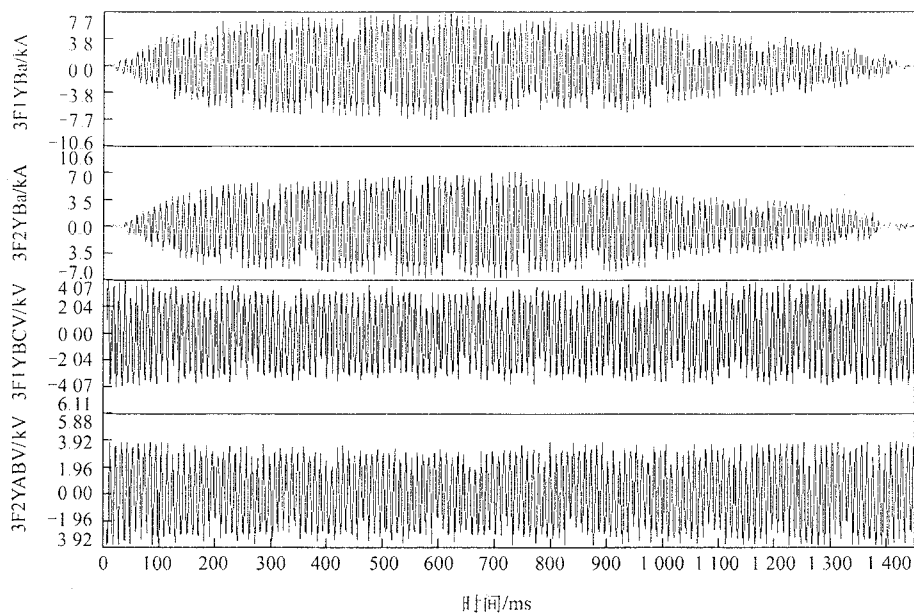


图3 2400次放电3号发电机双Y的电流、电压波形

其中,3F1YBa:3号发电机1YB相电流波形;3F2YBa:3号发电机2YB相电流波形;
3F1YBCV:3号发电机1YBC线电压波形;3F2YABV:3号发电机2YAB线电压波形

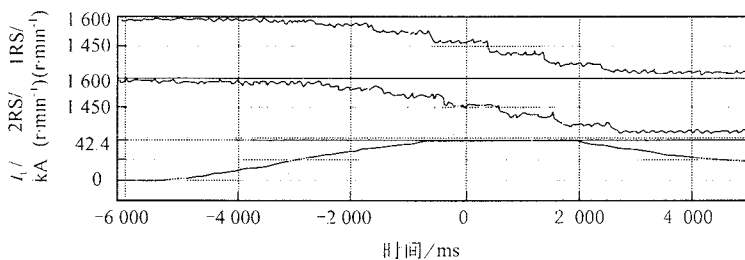


图4 3846次放电波形

其中,IRS为1号机组转速波形;2RS为2号机组转速波形; I_r 为环向场电流波形

4 HL-2A装置三套交流脉冲飞轮发电机组系统特点

4.1 我国当前装机容量与储能、释能规模均为最大的双Y移相 30° 飞轮脉冲发电机组系统

HL-2A装置物理实验要求一次脉冲放电的最大脉冲总容量为300 MVA,最大总耗能为1300 MJ,持续时间10 s左右,放电周期为25 min。为此,HL-2A装置的供电系统采用了三套大型脉冲飞轮发电机组,成为我国当前装机容量与储能、释能规模均最大的双Y移相 30° 脉冲发电机组系统。三套脉冲发电机组已成功地实现了为HL-2A装置线圈供电,装置真空室的环向中心磁场已达2.65 T,等离子体电流已达到400 kA,满足了HL-2A装置物理实验的运行要求。

4.2 频率大范围急剧变化的双Y移相30°脉冲发电机的微机自动化控制保护与监测系统

HL-2A装置物理实验一次脉冲放电过程中,三套双Y移相30°脉冲发电机组在10s左右的时间内转速迅速下降,其中两台80MVA脉冲发电机组的转速下降范围为1650~1200r/min,125MVA机组的转速下降范围为3600~2400r/min,三台脉冲发电机相应的频率变化范围分别为55~40Hz和120~80Hz。针对三台脉冲发电机频率变化范围较大和频率变化较快以及三台发电机定子均为移相30°双绕组的特点,研制了三台脉冲发电机微机自动化控制保护与监测系统,并得到成功运用,使得三台脉冲发电机的控制保护与监测准确、可靠,而且运行稳定。

4.3 大电流脉冲准梯形波的快速数字控制技术

HL-2A装置供电系统中,1号和2号机组共同为HL-2A装置环向场线圈供电,产生2.2~2.8T的环向磁场,以约束真空室内形成的等离子体电流。为了节省投资,环向场电源系统的整流设备采用四组不可控二极管整流桥在直流侧进行并联的方案,因此,环向场线圈电流波形的调节是通过1号和2号发电机组各自的可控硅励磁整流系统调整两台发电机电压来实现的。

根据HL-2A装置物理实验要求,环向场线圈电流为32~45kA的直流电流,波形为大电流脉冲准梯形波,脉冲时间10s左右,其中平顶时间3~5s。由于环向场线圈(230mH,60mΩ)与1号和2号发电机励磁线圈(600mH,161mΩ)均为大电感负载,时间常数分别为3.83s和3.73s,为环向场线圈电流的快速准确控制带来较大困难,为此,研制了以微机及单片机为核心的发电机励磁快速数字控制系统,并对发电机采取强励控制以及两台发电机励磁线圈串接等技术措施,使环向场线圈电流的控制调整快速准确,而且波形重复性很好,完全满足了HL-2A装置物理实验的要求。

4.4 大型高速飞轮脉冲发电机组现场轴系精细动平衡分析调整技术

HL-2A装置供电系统中,125MVA脉冲发电机组为额定转速3600r/min的高速电机,机组轴系总长20.2m,转动惯量 GD^2 为 $33.5t \cdot m^2$,总重约168t。为解决该机组由于高转速和长轴系带来的机组轴承振动超标的技术难题,利用南京东南大学测振仪器厂生产的ZXP-8动平衡分析仪对该机组进行多次现场轴系精细动平衡分析调整,使其各轴承座各方向的振动从机组启动直至最高转速过程中均小于 $35\mu m$,过临界转速(1800r/min)时均小于 $20\mu m$,稳定后均小于 $20\mu m$ 。整个启动过程中振动变化曲线重复性很好,在同一转速下仅相差 $\leq 3\%$ 。典型波形见图5。

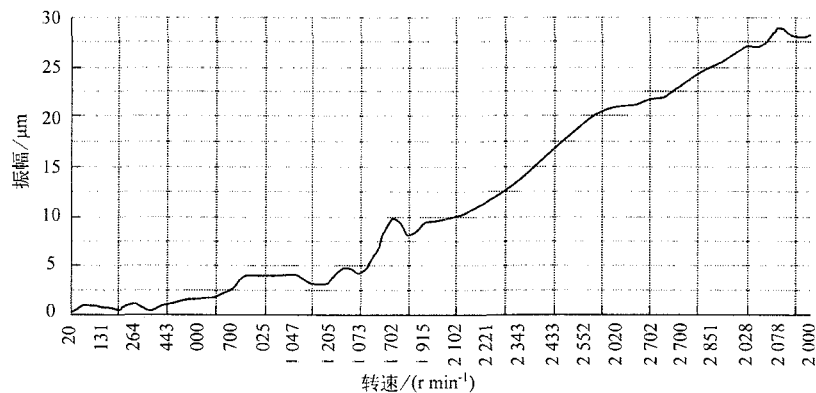


图5 动平衡调整后3号机组启动过程1号轴承座垂直振动曲线(P-P值,即峰—峰值)

5 结 语

HL-2A 装置三套脉冲发电机组的成功运行,满足了装置较高参数的运行要求,为今后在 HL-2A 上进一步开展高参数等离子体条件下的许多与偏滤器位形运行有关领域的研究:如偏滤器和刮离层、器壁处理和再循环控制、等离子体输运、不稳定性和约束、辅助加热、电流驱动和等离子体剖面控制,以及相关工程技术等问题的研究,打下了坚实的供电基础。

附 录

附表 1 原有两套 80 MVA 脉冲发电机组的主要构成及主要参数

	主要参数名称	参数值
发 电 机	电机形式	卧式隐极 4 极同步发电机,定子双 Y 绕组移相 30°
	额定脉冲容量	80 MVA
	额定相电压	1 500 V/1 210 V (49.5 Hz/44 Hz)
	额定相电流	11 kA
	超瞬变电抗 X_d''	0.214 2(标 1 值)
	励磁电压	260 V
	励磁电流	2 020 A
	转子飞轮力矩(GD ²)	31.1 t·m ²
拖 动 电 机	电机形式	4 极绕线式异步电动机
	额定容量	2 500 kW
	额定转速	1 488 r/min
	接线形式	Y/Y
	定子额定电压	6 000 V
	定子额定电流	284 A
	转子额定电压	1 640 V
	转子额定电流	933 A
飞 轮	本体外径	2 00 cm
	本体长度	150 cm
	飞轮力矩(GD ²)	74.9 t·m ²
机 组 轴 系	飞轮力矩(GD ²)	106 t·m ²
	转速变化范围	1 488~1 320 r/min
	机械储能	300 MJ
	最大释能	100 MJ

附表 2 125MVA 脉冲发电机组的主要构成及主要参数

	主要参数名称	参数值
发 电 机	电机形式	卧式隐极 4 极同步发电机, 定子双 Y 绕组移相 30°
	额定脉冲容量	125 MVA
	额定线电压	4 500 V/3 000 V (120 Hz/88 Hz)
	额定相电流	12 028 A
	同步转速	3 600 r/min
	超瞬变电抗 X_d''	0.057 48 Ω
	零序电抗	0.029 34 Ω
	励磁电压	450 V
	励磁电流	4 000 A
	转子飞轮力矩(GD ²)	9.5 t·m ²
拖 动 电 机	电机形式	2 极绕线式异步电动机
	额定容量	2 500 kW
	额定转速	3 570 r/min
	接线形式	Y/Y
	频率	60 Hz
	定子额定电压	6 000 V
	定子额定电流	284 A
	转子额定电压	1 640 V
	转子额定电流	933 A
机 组 轴 系	飞轮力矩(GD ²)	33.5 t·m ²
	转速变化范围	3 600~2 880 r/min
	一次最大释能	214 MJ
	一阶临界转速	2 100 r/min