

CNIC-01615
SWIP-0154

HL-2A 装置水平场电源初步方案
THE PRELIMINARY SCHEME OF POWER SUPPLY
FOR RADIAL FIELD COILS IN HL-2A TOKAMAK
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01615
SWIP-0154

HL-2A 装置水平场电源初步方案

毛晓惠 姚列英 邵葵 卜明南 宣伟民
康自华 刘平

(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

摘 要

提出了水平场线圈供电的几种方案, 分析了它们各自的特点。认为采用可控硅和晶体管为水平场线圈供电都是可行的。可控整流供电包括全波整流和半波整流; 晶体管供电有 4 种方式, 它们是开关电源供电; 晶体管调整供电; 载波供电; 可控整流后的晶体管变流器。通过分析装置对水平场电源的要求, 同时比较了前面几种方案中所用设备的工作性能、响应速度、波形质量以及实现的可能性, 认为装置在低参数放电的情况下, 可控整流电源基本可以满足要求, 高参数放电且等离子体有拉长比的条件下, 第 4 种晶体管供电方式在技术上、响应速度以及波形质量是可行的。

关键词: 晶体管电源, 水平场线圈, HL-2A

The Preliminary Sheme of Power Supply for Radial Field Coils in HL-2A Tokamak

(In Chinese)

MAO Xiaohui YAO Lieying SHAO Kui BU Mingnan
XUAN Weimin KANG Zihua LIU Ping
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041)

ABSTRACT

Various schemes of power supply for Radial field coils are presented, and their characteristics are analyzed. The result is that both thyristor and power transistor are appropriate to power supply for radial field coils. There are two ways of power supply with thyristor, they are half-wave power supply and full-wave power supply. There are four ways of power supply with transistor, the first one is switching power supply, the second one is transistor regulator power supply, the third one is carrier waves power supply, and the fourth one is transistor converter power supply. Having analyzed the requirement of power supply for radial field coil, and compared the performances, reaction speed and feasibility of involved devices of the above schemes, it is concluded that thyristor is suitable to the power supply in low parameter plasma discharge, but for the high parameter plasma discharge, the power transistor is appropriate.

Keywords: Transistor power, Radial field coil, HL-2A

引言

目前在托卡马克装置中，中大功率脉冲电源主要采用晶闸管相控变流器，其优点是结构简单、技术成熟、性能稳定，但同时又存在系统的死区时间、低压输出波动大等缺点。以晶体管构成的中大功率电源目前还是一个较新的供电方式，但它高质量的输出波形克服了晶闸管电源输出纹波大、死区时间、高次谐波等缺陷，系统的整体供电水平和质量都得到了提高，相对而言又存在结构繁琐、成本较高、工作条件苛刻等缺点。

HL-2A 水平磁场是装置极向场之一，它主要用来控制等离子体的垂直位移，使等离子体处于一个相对平衡位置。由于水平场电源系统的性能是直接影响装置的整体放电质量因素之一，如何为其提供高效可靠的供电满足装置对水平场线圈工作要求，就显得尤为重要。本文概述了水平场电源的设计情况，认为在低参数放电条件下，可以采用晶闸管方式供电。高参数运行对电源要求较高的条件下，可以采用晶体管电源供电方式。给出了高参数条件下水平场电源主回路的设计方案及设备和器件的主要参数。

1 水平场线圈参数和要求

在 HL-2A 托卡马克装置中，等离子体的垂直位置由水平场线圈控制，此线圈在真空室外，纵场线圈内，其主要电气参数为：

线圈电感	0.07 mH
线圈电阻	3.89 mΩ
线圈时间常数	18 ms
允许最大电流	±4 kA

HL-2A 装置偏滤器线圈，可以将等离子体截面调节成几种形状。对于轴对称圆形等离子体，要求水平场能够在电流没有快速破裂的条件下，有效控制其在垂直位置上下移动；而在不对称单零偏滤器和非圆截面等离子体运行时，等离子体垂直位移对水平场相对而言比较敏感，对垂直位置控制的要求就更高。为了使水平场电源对不同截面形状和参数的等离子体都能够有效控制，必须使其具有波动小、响应迅速且快速精细调节的性能。

等离子体位移控制有被动反馈和主动反馈两种控制机制。被动控制是通过被动线圈完成的，它可以抑制等离子体位移的快速变化，使等离子体电流不至于由于快速碰壁而消失，但持续时间有限。主动控制可以对等离子体位移的慢速变化及漂移进行反馈控制和调节，抵消或减弱水平杂散场，使等离子体处于某一平衡位置。由物理组得知，在轴对称圆形小等离子体运行条件下，允许水平场电源波动约 5%，而且平衡所需水平场电流与等离子体电流 I_p 和初始位置 Z_0 成正比，即 $I_{//} \propto I_p \cdot Z_0$ ，即小电流的 I_p ，只需较小的 $I_{//}$ ；而高参数 I_p ， $I_{//}$ 就相应较大。在工作于有拉长比且垂直位置向上靠近偏滤器线圈情况下，等离子体漂移时为使其返回原来的位置，所需水平场电流比没拉长比条件下的大 5 倍，对电流波动要求在 2% 范围内，所以对水平场电源的控制精度和波纹度又有了较高的要求。因而我们认为，在装置的工作初期低参数放电的条件下，可控整流设备可以达到

水平场的工作要求，在高参数运行的条件下，传统的晶闸管变流器存在惯性大、响应慢等缺陷，应由现代电力晶体管电源完成供电。

2 供电方案选择

对水平线圈的供电，有晶闸管变流器或晶体管变流器两种形式。

晶闸管变流器供电如图 1 所示，它实际是一个可调的 AC/DC 变流器。交流通过变流器后输出可调的直流后，用来对负载供电。变流器可由 12 脉波可控硅整流器或者是不同参数的可控硅整流器组合而成。该方式具有结构简单、控制可靠、调节灵活的特点，但由于变流器自身固有的特性，存在响应速度慢、低压输出纹波大，且有 1.7 ms 或 3.3 ms (50 Hz) 死区时间等缺点。

晶体管变流器如图 2 所示，它实际是一个 DC/DC 变换器。直流输入经过 DC/DC 变换器调节后得到满足要求的直流输出，用来对负载供电。相对于晶闸管变流器而言，晶体管变流器具有一定的优越性：

(1) 没有控制死区时间，晶闸管变流器都存在控制信号和输出的滞后响应，而晶体管变流器是对晶体管的控制极进行控制，其响应速度快，延迟时间小，几乎不存在死区时间。

(2) 减少谐波电流对装置电磁测量的干扰。

(3) 在输出电流较小的情况下，仍能提供平稳的波形，克服了晶闸管变流器在低电压下锯齿状波形。

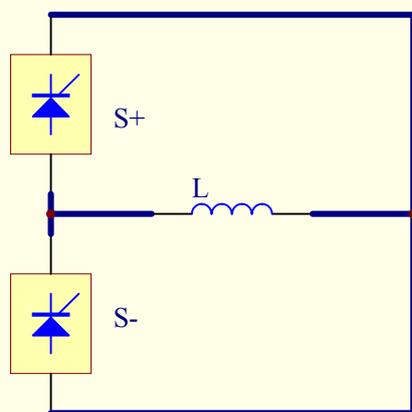


图 1 晶闸管供电方式

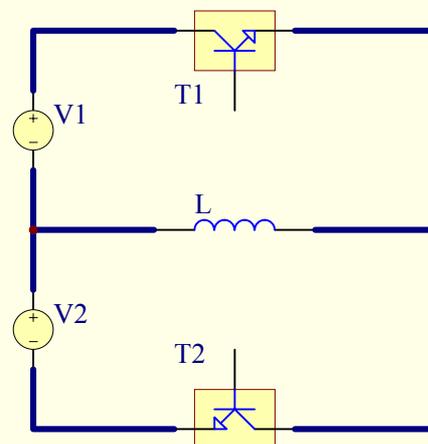


图 2 晶体管供电方式

DC/DC 变换器组成的结构形式有几种：开关电源方式、晶体管调整方式、载波方式及数字控制方式。

开关电源供电方式：该方式是通过开关器件把直流电压调制成中频电压，经中频变压器耦合，再整流输出直流电压，调节中频电压的占空比（其实在大电流工作时这一点

很难做得到)对负载的调节控制。目前如此大功率的中频变压器制作困难、价格昂贵。所以这一方案不考虑。

晶体管调整供电方式:用晶体管设计电流放大器对输出进行调节。其优点是控制灵活,输出波形纹波小,电流调节速度比较快。但对于电源 4.5 kA/120 V 的参数要求,主要存在调整管上功耗的问题,需由许多个晶体管并联而构成,而元件性能的各自差异,造成各自工作点不同,并联困难。虽然目前已有大功率电力晶体管 IGBT 2400 A/1800 V, GTR 1000 A/1200 V,实际上也是作为功率开关研制的,其耗散功率最大 10 kW。如果要工作于放大状态,只能降低使用指标使其工作于 200 A 左右,且放大区域狭窄,驱动困难,从经济或技术方面考虑都不太理想。

载波工作方式:晶体管工作于中频开关状态,改变其占空比来调节输出电压。其特点是负载得到的是中频电压波形,通过负载本身电感的作用变换成电流。但由于大电流的此类器件开关速度无法达到足够高,造成输出纹波较大。虽然驱动简单,但由于有多个器件在中频工作时并联困难,要求有非常同步的驱动电路和非常可靠的缓冲电路和保护环节。

数控工作方式:根据电源输出的要求,使其中的一条或几条支路的管子导通或截止,达到对输出电流的调节控制目的。在工作过程中,管子的导通频率可以根据反馈调节的要求,设定最高频率 <1 kHz,通过在各支路上串联不同阻值的电阻,可以得到不同大小的电流。特点是电路结构清晰、灵活,波形输出纹波较小,控制采用数控方式,相对简单。缺点是各条支路可能存在一些潜在的换流问题以及器件的保护要采用相当可靠措施。

根据水平场线圈的供电要求,电源输出电压纹波小、电流上升快、响应灵敏。由于晶闸管变流器自身存在的缺陷,无法满足直接供电要求,经综合比较后采用可控整流后的晶体管数控变流器对水平场线圈供电,即由可控整流器配合数控变流器协同供电。为了提供能够快速上升的电流波形,设计电源的输出参数为 120 V/4.5 kA,如图 3 所示。

可控整流器由两组输出 60 V 的三相全控整流桥串联而成。数控变流器的调节速度虽然比较快,但实际上电流上升速度还要受回路参数的影响。水平场线圈的时间常数 $\tau \approx 18$ ms,加上线路电感时,回路时间常数更大,如果在回路上串联了电阻,虽然减少时间常数,但在要求电流快上升时,也还要采用强励手段以增加电流上升速度。如果采用不可控整流器,控制精度为 ± 20 A 时,在等离子体平顶段、水平场线圈的电流所需约为 500~1000 A,则相对精度就不是很高,约 $\pm 4\% \sim \pm 2\%$;另外由于正反组整流器都处于开通状态,当晶体管变流器断开或换流时,瞬间电压叠加在整流电压上,对晶体管变流器的工作也不利。而采用可控整流器,可以在根据需要提供不同等级的电压,如在电源系统的强励阶段,使两组可控整流器共同处于全开通,在平顶段可关断一组可控整流器,而在下降段也可降低输出整流电压;另外正负组整流器处于反相工作状态,也有利于晶体管变流器的换流工作,因而在一定程度上不仅增加了电源系统的灵活性,也提高了其控制精度和工作性能。

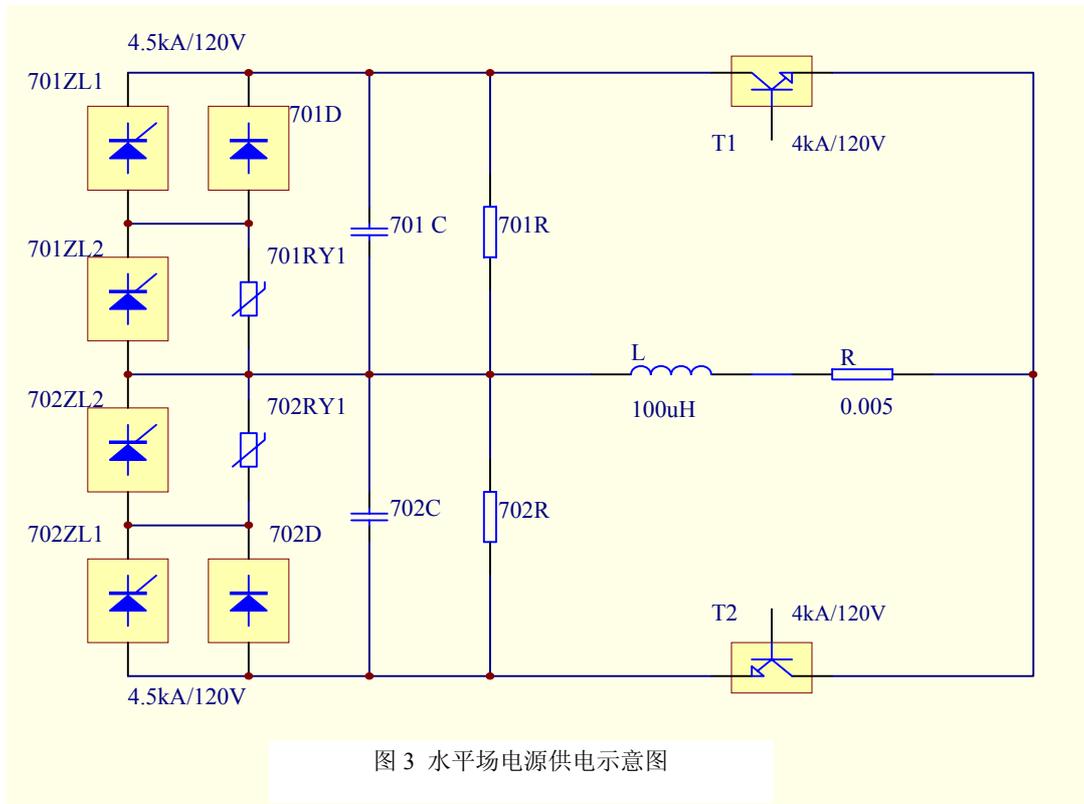


图3 水平场电源供电示意图

3 数控晶体管变流器

数控变流器的构成框图如4所示。

它由多组电流支路组成，每条支路由不同参数的电阻和开关管串联而成，支路电流根据串联的电阻大小确定。

针对水平电源输出平顶电流为4.5kA的要求，我们选取了9条支路，使前8条支路的电流总和为4096A，满足正常的电流需要，第9条支路的电流为2048A，以作为在强励阶段或电流快上升时提供的额外补充电流。

支路电流以2的倍数变化，设定第一条支路（最小电流支路）的电流 $I_1=16\text{A}$ ，则 $I_2=32\text{A}$ ， $I_3=64\text{A}$ ， \dots ， $I_8=2048\text{A}$ ， $I_9=2048\text{A}$ 。这样最小电流变化量为16A，电流调节精度约为0.4%。

支路开关器件的选取。目前可以选用的开关器件有功率晶体管GTR，功率MOS场效应管MOSFET，绝缘栅双极晶体管IGBT等，从理论上说它们都有响应速度快、噪音低、效率高等特点，但从器件的应用范围、参数选型方面考虑，我们选取了IGBT元件作为开关器件。在参数选择方面，虽然流经每条支路电流不同，可以选择不同参数的IGBT管子，而从系统工作的可靠性和维护的简便方面考虑，统一选用参数为1600A/1800V的IGBT管子作为每条支路的开关器件。这样在小于1024A支路上可以使用一只管子，而2048A支路则以两条1024A支路并联而成。

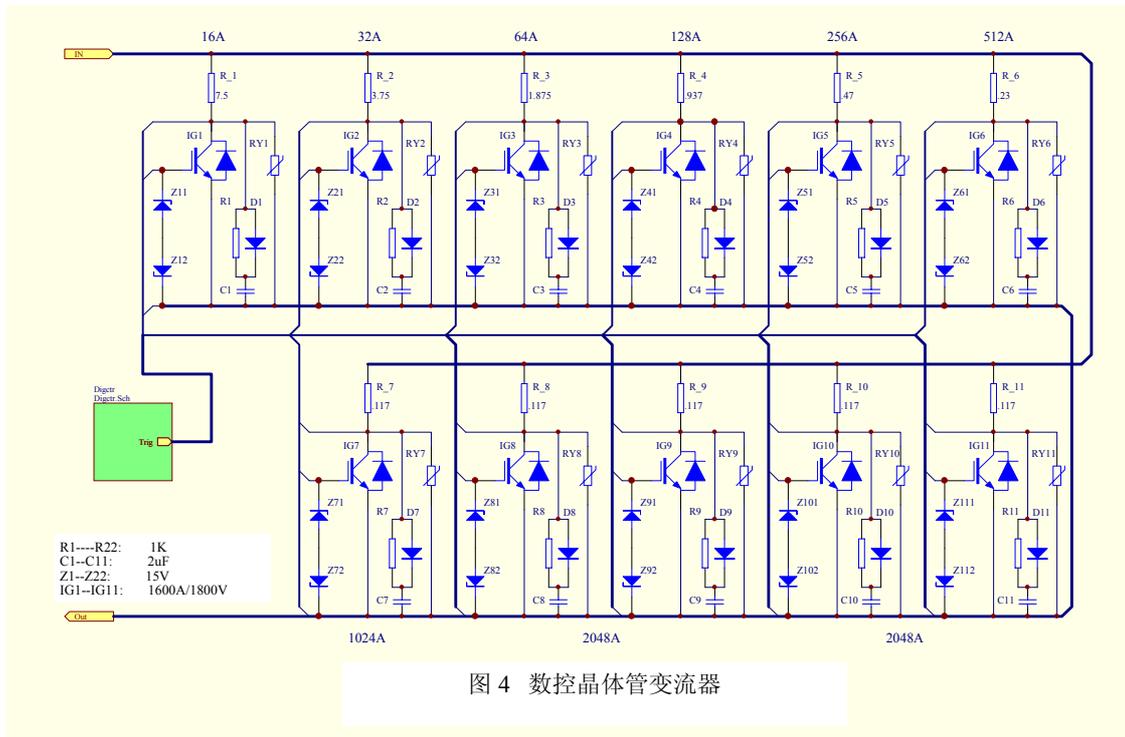


图 4 数控晶体管变流器

支路电阻的选取。输入的直流电压为 120 V，在忽略回路总阻抗 (5 mΩ) 条件下，则第一条支路 (16 A) 电阻 $R_1=120/16=7.5 \Omega$ ， $R_2=3.75 \Omega$ ，第 7 条支路 (1024 A) $R_7=0.117 \Omega$ 。由于第 8 条 2048 A 支路是由两条 1024 A 支路并联，它们的分支路电阻也为 0.117 Ω。将回路阻抗考虑进来后，则每条支路电阻要略小于上面的阻值。

针对 IGBT 管子的结构特点及其工作特性，考虑回路中可能产生的电压特性及干扰因素，采取了多项保护措施。在栅极和发射极之间联接齐纳二极管，用于保护管子的输入极，集电极和发射极连接阻容吸收网络和压敏电阻等，吸收在管子上产生的浪涌电压、反向电压及干扰电压。

在系统工作过程中，当需要减少电流或断开电流时，遵循“先断大，后断小”的原则。即在大电流支路断开前，必须保证小电流支路处于导通状态，使系统电流有一个逐步减小的过程，这样在一定程度上也可以起到保护管子的作用。这些规则可通过软件编程或硬件电路完成。

4 整流器的选择

根据晶体管变流器 4 kA/120 V 的要求，整流器输出电压 $U_{dV}=120 \text{ V}$ ，电流 $I_d=4.5 \text{ kA}$ ，正组和负组都采用两个三相整流桥串联，一个三相整流桥的输出电压 $U_d=60 \text{ V}$ ， $I_d=4.5 \text{ kA}$ ，而空载电压 $U_{dio}=65 \text{ V}$ 。

变压器输出线电压 $U_{V0}=U_{dio}/1.35 \approx 49 \text{ V}$ ，取 50 V。

变压器输出线电流 $I_V=0.816I_d=3.67 \text{ kA}$ ，取 3.7 kA。

变压器输出容量 $P_V=1.05P_d=288.5 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。

过压保护：交流侧采用阻容吸收网络。在晶闸管上并联电阻、电容吸收变流器开断、快速熔断器等引起的过电压。直流侧采用并联压敏电阻在变流器的输出端上，用于吸收负载侧电感释放电磁能量等引起的过电压。

过流保护：对于变压器副边短路、直流输出短路等故障，除采用控制封锁触发脉冲方式保护外，在每个变流器的桥臂上串接快速熔断器以保护桥臂上的晶闸管击穿造成的过流，输出以快速开关、过流继电器检测保护。

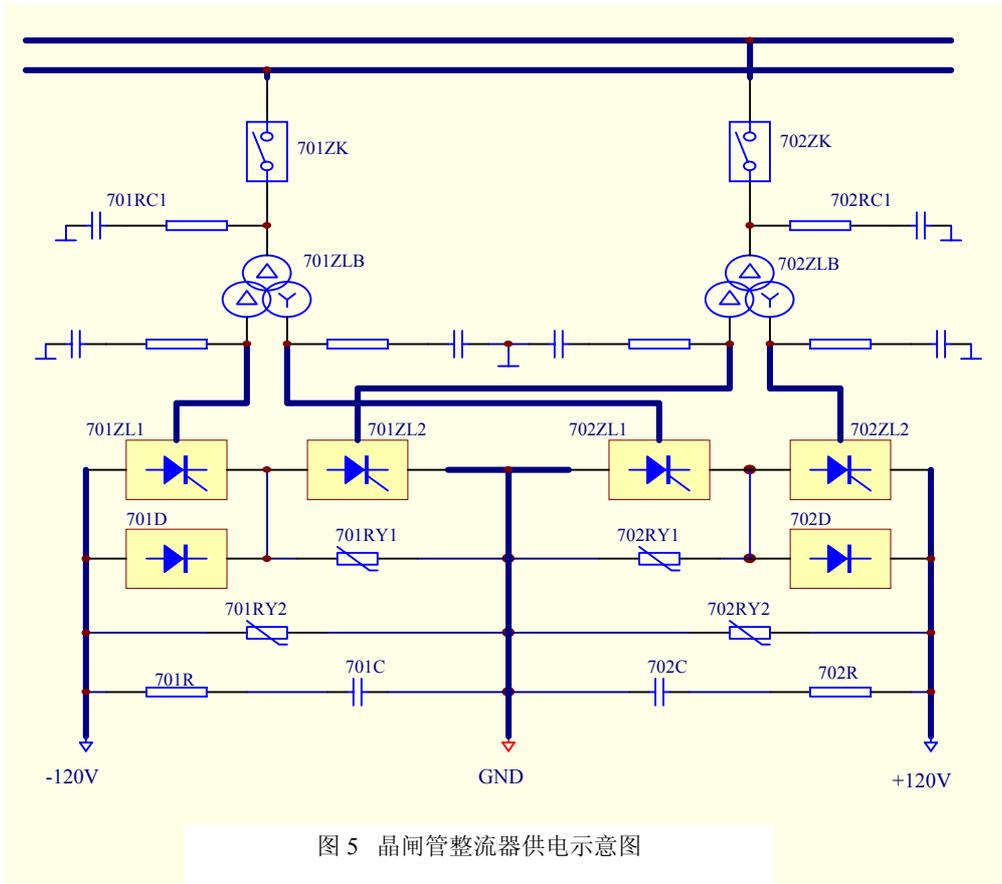


图 5 晶闸管整流器供电示意图

5 用 PSPICE 程序作局部模拟仿真

为了弄清楚晶体管数控变流器在支路换流和正负换流暂态过程的一些细节问题，采用电路分析程序 PSPICE 对系统进行局部等效模拟，进行瞬态分析。模拟电路如图 6。正负两组各采用两支路组合。改变 R_2 , R_{20} , R_5 , R_{22} 的电阻值，设置支路不同的电流值，控制激励源 V_{11} , V_{12} , V_{13} , V_{14} 在不同的时域通断，分析线圈电流、支路电流和支点电压的变化。

考虑到实际连接线路有引线电感，而电感在电流源中起较大影响，特别是在 di/dt 较大时，影响更大。另外主回路的引线电感对电源的时间常数有较大影响，所以不能忽略。

直流侧引线电感估算：

采用圆截面电缆来回并行走线时，引线电感为

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left(\ln \frac{D}{r} + \frac{1}{4} \right)$$

其中： μ_0 ——磁导率；

l ——引线长度；

D ——并行导线的中心距离；

R ——导线截面半径。

取 $l=25$ m, $D=5r$, $L=18.6$ μ H。采用同一根五芯电缆来回走线，因电缆内部互绞又靠近，实际电感比两根电缆来回走线时电感值要小，如果电缆靠近大地，则还可以用下式修正。

$$L' = L - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{D^2}{2h^2} \right)$$

其中： h ——导线中心到地面的距离。

采用铜排或铝排来回并行走线时的电感为

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \left(\ln \frac{d}{b+c} + \frac{3}{2} \right)$$

其中： d ——并行母线中心距离；

b, c ——分别为母线的长和宽；

当取 $d=b+c$ 时， $L=15$ μ H。直流侧引线电阻 R 估算：

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

其中： ρ ——电阻率，铜排的电阻率取 0.0175 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

S ——导线截面，取 1000 mm^2 ；

l ——导线长度，取 50 m。

则 $R=0.89$ $\text{m}\Omega$ 。

因此在模拟分析时，负载电感取 100 μ H，电阻取 5 $\text{m}\Omega$ 。 L_1, L_2 都为电容器的一端到 IGBT 的 D 端，IGBT 的 S 端到电源输出端和电源另一输出端到电容器的另一端三段线路的电感之和。短线电感可以用下式计算。

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right)$$

通过优化工艺布置，可以减小 L_1, L_2 的值。 L_1, L_2 越小，晶体管关断时产生的浪涌电压越小，越利于晶体管的可靠工作。降低浪涌电压也可以通过降低电流的变化率来实现，即控制 IGBT 的关断速度和关断电流。模拟时 L_1, L_2 都取 0.5 μ H， dI/dt 最大取 5 $\text{kA}/\mu\text{s}$ 。

从不同参数模拟分析说明：

(1) 通过控制支路 IGBT 的通断可以控制线圈电流的上升、再上升、下降、关闭、反向上升等，电流上升按 L/R 的回路时间常数变化，其中 R 随开通的支路数变化；电流下降也可以按 L/R 变化的时间常数下降，当一组 IGBT 全部关闭时，按另一组的 RLC 回路时间常数下降。

(2) 控制不同支路 IGBT 的通断来组合成所需要的电流值。

(3) 小电流调整时，时间常数小，电流上升速度快。

(4) R_1, R_4 能够分别消耗 C_1, C_3 的储能，以免在 IGBT 的关断过程中 C_1, C_3 累加高的电压。

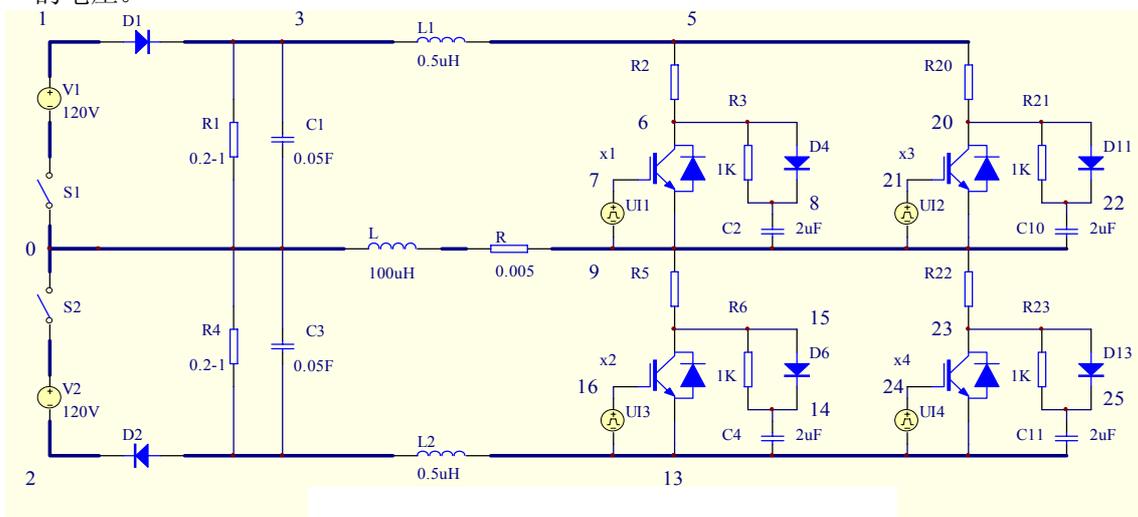


图 6 局部模拟仿真线路图

6 结束语

上面主要介绍了水平场线圈供电系统，给出了装置对水平场电源系统工作的要求，提出了几种不同供电方案并比较了它们各自的优缺点。对可控整流后的晶体管变流器的工作原理、保护环节、参数选型等方面进行了一定程度的说明，做了部分模拟仿真计算。最后认为，在放电初期小参数轴对称圆形等离子体运行条件下，晶闸管相控变流器可以满足工作要求，高参数非圆截面放电条件下，采用具有大功率、响应快的 IGBT 数字变流器作为水平场线圈供电系统是比较合适的。

感谢主回路组及有关同事给予的支持和帮助。

参考文献

- 1 莫正康 [编]. 晶闸管变流技术. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 2 王英剑, 常敏慧, 何希才 等. 新型开关电源实用技术. 北京: 电子工业出版社, 1999
- 3 满永奎, 韩安荣, 吴成东. 通用变频器及其应用. 北京: 机械工业出版社. 1997

毛晓惠：核工业西南物理研究院助理工程师，1997年毕业于重庆大学电气工程系。
MAO Xiaohui: Assistant Engineer of Southwestern Institute of Physics, CNNC. Graduated from Electrical Engineering Department, Chongqing University in 1997.