

16.5 MW 高压直流电源的研制与应用

李 宏¹, 杨脱颖¹, 陈晓武²

(1. 西安石油大学, 陕西 西安 710065; 2. 山西灵石碳素有限公司, 山西 晋中 031300)

摘 要: 针对传统的交流调压方案通过改变晶闸管的导通角大小来直接调节交流输出电压而存在的输出电压谐波大、难以获得高电压输出等问题, 设计了一种高压直流电源, 其主电路采用星点控制方式调压、升压变压器隔离及高压二极管阀整流的方案。采用该设计生产的 2 台 55 kV/150 A 规格高压电源组成 16.5 MW、输出电压可在 0~110 kV 之间调节、最大输出电流 300 A 的高压直流电源用于中国环流二号 (HL-2A) 核聚变装置的二级加热系统。工程实际运行结果表明, 该电源性能稳定, 完全满足聚变科学研究中的实验使用需要。

关键词: 交流调压; 星点控制; 高压整流阀; 宽频率触发器

中图分类号: TN86

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2016)06-0066-05

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2016.06.013

Development and Application of 16.5 MW High Voltage DC Power Supply

LI Hong¹, YANG Tuoying¹, CHEN Xiaowu²

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shannxi 710065, China; 2. Shanxi Lingshi Carbon Co., Ltd., Jingzhong, Shanxi 031300, China)

Abstract: Aiming to the problems such as high harmonic content of output voltage and high output voltage acquired difficultly in the regular AC voltage regulator with the scheme of changing conduction angle of thyristor to adjust AC output voltage directly, a high voltage DC voltage power supply was designed which used star control method to regulate AC voltage, step-up transformer to insulate and high voltage diode valve to rectify in the main circuit. 16.5 MW high voltage DC power supply formed with two 55 kV/150 A high voltage DC power supply with such design was developed for the secondary heating system of China circulation II(HL-2A) fusion device which required 0~110 kV adjusted output voltage and 300 A maximum output current. Practical operation results show that this power supply has stable performance and can fully meet the requirements of fusion experiments for scientific research.

Keywords: AC voltage regulation; star point control; high voltage rectification valve; wide frequency trigger

0 引言

高压直流电源常用于高压系统试验、特种供电系统等场合。传统高压直流电源电压的获取方法一般有两种: 一种是通过升压变压器的二次侧倍压整流, 另一种是直接把交流电压升至所需电压值后再经高压阀整流。倍压整流方式, 随着倍压级数的增加, 其输出电流将逐级减小, 一般用于功率要求不是很高的应用场合, 如静电除尘电源。高压阀整流方式, 尽管可以得到较高的直流输

出, 但故障情况下保护工作较困难, 且难以实现很大的功率容量。为了获得可调节的高压直流电源电压, 往往在升压变压器一次侧采用交流调压方式(多为反并联晶闸管串接在升压变压器一次绕组中)或 AC-DC-AC 方式。交流调压方案, 由于采用工频, 相同功率容量下变压器体积相对较大, 但功率容量可以做得相当大^[1-2]; AC-DC-AC 方案, 升压变压器为高频变压器, 工作频率高, 比相同输出功率下晶闸管相控调压后升压方案中变压器的体积小很多, 但受目前高频变压器材料及工艺、全控型电力半导体器件额定容量、高频整流二极管压降和最高工作电压等多重因素限制, 很难同时

获得较高电压和较大功率的直流输出^[3]。目前人们主要以晶闸管作为主控元件、以升压变压器一次侧交流调压和升压变压器二次侧高压阀再整流的方法来获得更大功率的可调直流高压。这种模式由于直接调节交流电压，所以输出电压的谐波含量较大，要得到较平直的直流电压输出往往较为困难^[4]。为此，本文设计了一种高压直流电源，它通过调节激磁电流来调节变压器一次侧电压、经二次侧整流后获得输出直流高压，具有输出电压谐波含量小等优点。

1 基本电路原理

所设计的 16.5 MW 高压直流电源用于中国环流二号 (HL-2A) 核聚变模拟试验装置二级加热系统，主要包括交流调压、高压整流阀及触发控制与保护 3 大环节，图 1 示出其主电路原理。图中，G 为由飞轮储能驱动的发电机；JTY-1 和 JTY-2 为星点控制的交流调压装置；GYZ1 和 GYZ2 为高压整流阀；TB₁ 和 TB₂ 为二次侧相位互差 30° 的 2 台升压变压器，其一次侧输入线电压为 660 V，最高输出线电压为 38 kV。这种结构可使直流输出串联（图 1 (a)）或并联（图 1 (b)）工作，等效构成 12 相整流电路，不仅满足了用户对 110 kV/150 A 与 55 kV/300 A 电源需求，同时降低了谐波电流含量。

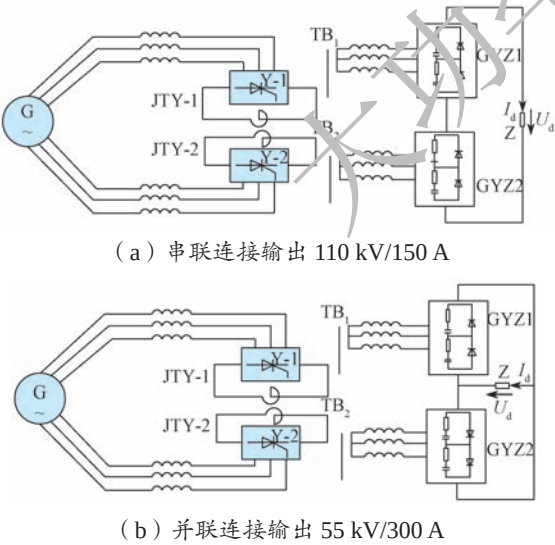


图 1 16.5 MW 高压直流电源的构成原理
Fig. 1 Schematic diagrams of 16.5 MW high voltage DC power supply

2 星点控制交流调压环节

该高压直流电源的交流调压部分采用星点控制交流调压方式，主电路原理如图 2 所示。图中，VT₁~VT₆ 构成标准的三相桥式全控整流电路，VT₇ 为续流晶闸管，平波电抗器 L 用于扩大连续电流范围，TB 为升压变

器。这种交流调压电路与传统的三相交流调压方案的最大不同在于，其通过晶闸管全控桥来控制三相升压变压器一次侧的星点。变压器一次侧三相绕组电流随着三相全控桥中晶闸管触发控制角 α 的不同而不同，即通过调节升压变压器的激磁电流来调节变压器一次侧电压，达到调节二次侧输出电压的目的。显然， $\alpha=0$ 时，流过变压器一次侧绕组的电流最大，相当于变压器一次侧绕组上的压降最大，自然对应升压变压器二次侧的电压最高；相反，若 6 只晶闸管均不导通（即 $\alpha \geq 150^\circ$ ），相当于升压变压器一次三相绕组中没有电流通过，即所有绕组均无压降，则变压器二次侧的输出电压为零。由此可见， α 在 $150^\circ \sim 0^\circ$ 之间变化时，采用这种调压方式可以获得升压变压器二次侧电压从零至最大值之间的调节。

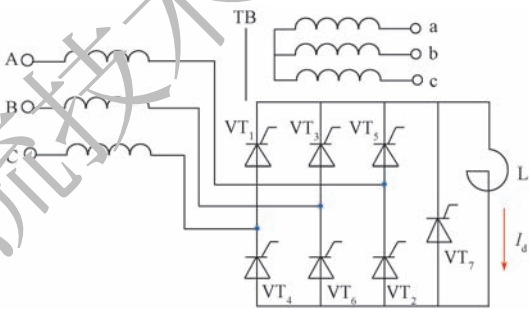


图 2 星点控制交流调压主电路原理
Fig. 2 Main circuit principle of star control AC voltage regulation

图 1 所示方案控制变压器一次侧绕组电流，只要三相全控桥中的晶闸管被触发导通，则升压变压器一次侧绕组中的电压均为正弦，而仅存在电流谐波。与传统的在变压器一次侧绕组中串联双向晶闸管调压的方法相比，采用这种交流调压方式其电压谐波含量要小得多。

平波电抗器 L 的电感量可按用户的需求来设计，因而可保证在一次侧绕组电流连续范围内按需选用。由于升压变压器变比一般很大，故把高压侧电感（保证高压侧电流连续输出）折算到低压侧，与直接在高压阀后串接平波电抗器方式相比，不仅电感量会小得多，而且由于将高压系统应用的电抗器变为低压系统应用的电抗器，使电抗器的加工难度大为下降，造价也降低了很多。当高压直流电源向负载供电时，变压器二次绕组中有电流流过，此电流按升压变压器变比的关系折算到一次侧，并且流过星点控制三相可控整流电路中，使该电路中不仅流过负载电流等效折算到变压器一次侧的电流，而且流过变压器一次绕组的激磁电流；当高压直流电源侧开路时，升压变压器二次

侧无电流流过,此时星点控制三相桥式可控整流电路中仅有变压器的激磁电流流过。故障条件下,封锁变压器一次侧整流桥中所有晶闸管的触发脉冲使变压器一次侧三相绕组的星点打开,同时触发续流晶闸管 VT_7 ,既可使变压器二次侧电压快速降为零,又可为一次星点控制回路中平波电抗器所存储的能量提供泄放通路,为避免电路中出现高压而进行快速有效的保护。

3 高压整流阀

3.1 电路结构

由于每个高压整流阀额定输出为55 kV/150 A,为了降低变压器的造价及其制造难度,所选升压变压器二次侧仅有一个三相绕组。受整流管的最高耐压和成本等因素限制,在升压变压器一次侧采用星点控制交流调压,所以高压整流阀选用三相桥式不控整流方式,且每桥臂由多个整流二极管串联构成。

3.2 串联二极管参数与使用个数 n 的确定^[5]

由于每个高压阀需要的额定输出直流电压为55 kV,理想空载电压 $U_{d0}=62\ 700\text{ V}$ ^[1],由此升压变压器二次侧的最高相电压 $U_{2\max}=26\ 800\text{ V}$;每个整流管阀元件承受的最高反向工作峰值电压 $U_{RRM}=65\ 650\text{ V}$,取电压裕量系数为3,选择多只整流管元件串联后的额定反向工作峰值电压为196 950 V;选择额定电压为5 200 V的整流管元件进行串联,则串联二极管个数 $n=196950/(0.85 \times 5200) \approx 45$ 只,其中0.85为按最恶劣工况考虑的串联元件均压系数。

另外,由于负载要求每个高压阀输出额定电流 $I_{dN}=150\text{ A}$,每个整流管阀导电臂电流 $I_{by}=I_{dN}/3=50\text{ A}$;选取正向平均电流 $I_{F(AV)}=300\text{ A}$ 的元件,考虑电流裕量系数为3倍,则每个高压整流阀共用5 200 V/300 A规格整流二极管270只,实际的电流裕量系数为6。

3.3 均压网络外围参数的选择^[6]

对由多个器件串联构成的整流臂而言,各器件均压运行是保证各串联元件可靠工作的关键。在该高压直流电源高压阀中,在每个整流管两端一方面并联无感电阻进行静态均压,另一方面并联由无感电阻与无感电容串联组成的支路实现动态均压,静态与动态均压网络的参数计算可参考文献[1]。该高压直流电源中,与每个整流管并联的动态均压网络参数为无感电阻50 W/10 Ω 、无感电容1 400 V/1.28 μF ,静态均压电阻为50 W/10 k Ω 。为便于安装,每个高压直流电源由54个分组件(一个分组件包含5只串联整流二极管)构成,包括6个高压整流臂。图3给出了每个分组件的构成原理。

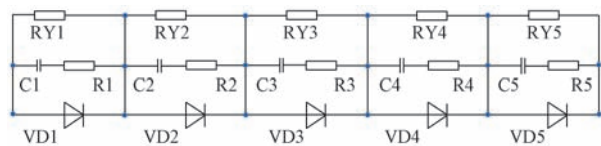


图3 高压阀中二极管分组件电路原理

Fig. 3 Circuit principle of each diode subassembly used in high-voltage rectification valve

4 控制与保护电路

4.1 触发脉冲产生电路

星点控制交流调压控制电路中,触发脉冲不仅须满足三相全控整流桥中的晶闸管依次轮流导通、准确无误地与续流晶闸管进行运行与故障保护条件下工作逻辑正确切换的需要^[7],而且要能自动跟踪本系统中交流电源工作频率在80~120 Hz范围内的变化。为此,我们设计了频率自动跟踪的晶闸管触发器^[8]。以适应同步供电电源频率的变化,使该触发器可自动跟踪同步电源频率的变化范围(20~160 Hz)^[9]。图4示出其触发脉冲的逻辑切换电路。

4.2 过流及短路保护^[10]

该高压直流电源设计有过流及短路保护环节。由于其输出电压较高,加之电流又相对较大,因而其过流及短路保护环节只能通过低压侧控制回路来实现。电源中每个晶闸管串联有快速熔断器进行严重过流及短路状况下的保护;在三相全控桥的直流输出侧串联了霍尔电流传感器,一方面用于检测工作时星点控制调压器每相电流,供显示仪表进行电流指示,另一方面也为电源提供了过流与短路保护。

4.3 过压保护^[10]

为防止尖峰过电压击穿,该高压直流电源设计有过压保护环节。星点控制交流调压用三相全控桥中,不仅每个晶闸管器件均并联了阻容吸收回路(由无感电阻器与无感电容器串联组成)及氧化锌压敏电阻器以吸收过电压,而且在三相输入相线之间亦并联了阻容吸收回路和氧化锌压敏电阻器。高压整流阀中,每个整流管也并联了阻容吸收回路,不仅在静态均压环节能起过电压保护作用,而且还可进行动态均压并吸收尖峰过电压。

4.4 高压直流的检测

对高压电源而言,其输出电压的精确测量与显示一直是一个技术难点。人们一直习惯使用分压器来测量或获取检测信号,而分压器使用时必须有一个极接地,因此分压器无法用于测量输出信号以及高压直流参考地完全隔离的应用场合。在该高压直流电源系统中,利用光纤检测直流高压来获得检测信号,由于光纤的传输速率

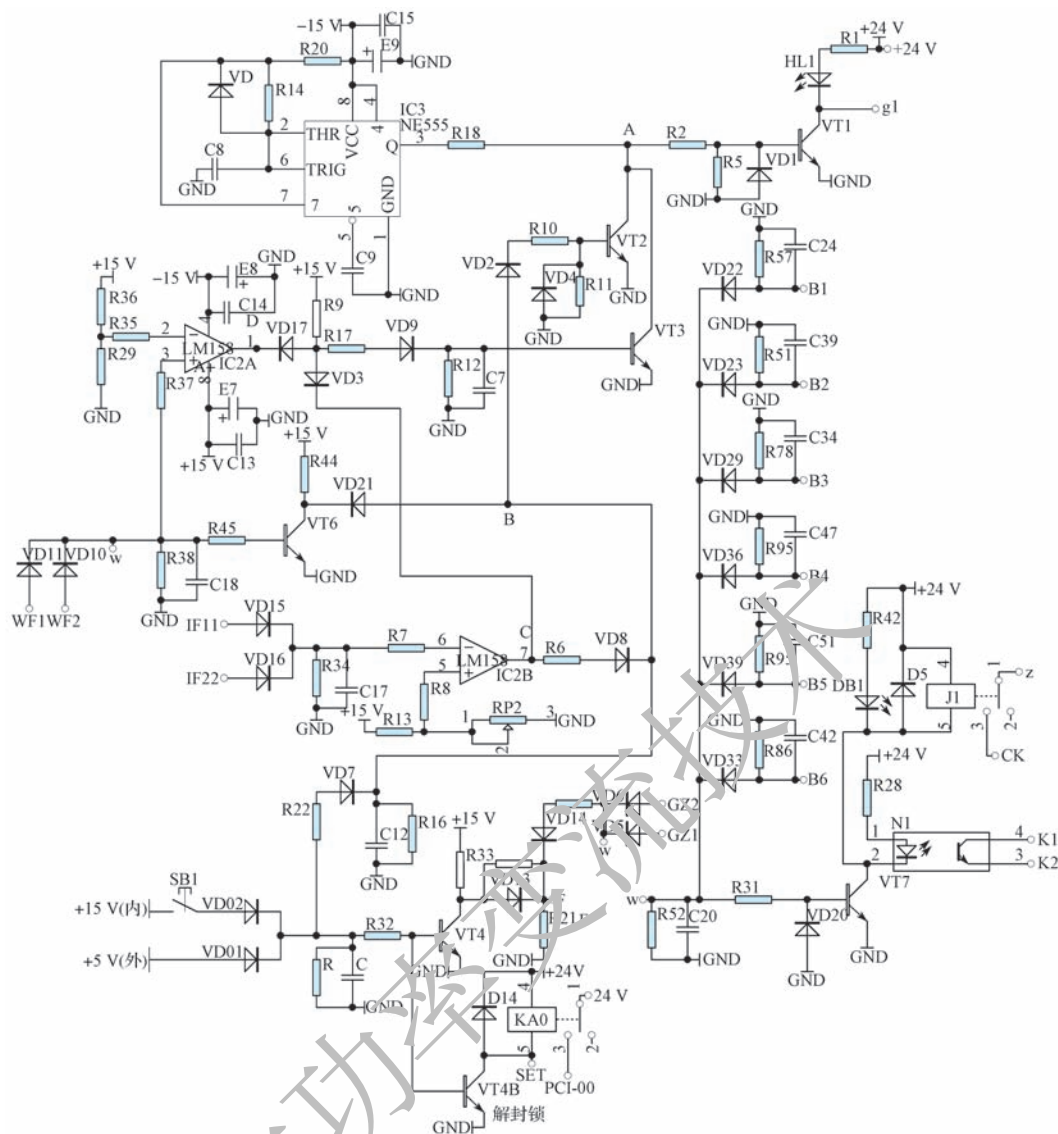


图 4 星点控制交流调压环节触发脉冲的逻辑切换环节原理图
Fig.4 Principle diagram of the switching logical circuit of trigger pulse for star control voltage regulator

很快，且可通过增加长度的方法来提高隔离电压等级，获得了较好的隔离与测量效果。由于光纤隔离后输出为毫伏级信号，需使用高速无零漂的高精度、高放大倍数运算放大器对信号进行放大。

5 实际应用

上述以星点控制进行调压、应用升压变压器隔离并利用高压整流阀整流的方案已成功用于 2 台 55 kV/150 A 高压直流电源中。2 台电源一次侧输入线电压均来自一台飞轮储能的发电机，在一个周期的工作过程中，发电机输出电压在 80~120 Hz 频率范围内随时变化，所用控制电路及触发脉冲产生电路均能极好地适应系统的工作；2 台高压阀输出可串可并，完全满足负载 110 kV/150 A 及 55 kV/300 A 的功率要求，输出电压的调节范围为 0~110 kV(串联工作)或 0~55 kV(并联工作)；升压变压器一次侧额定电压为 660 V，二次侧额定

电压为 38 000 V，额定脉冲容量为 8 500 kVA；每台电源的星点控制交流调压部分选用 8 只 3 800 V/4 000 A 规格晶闸管（其中 2 只为续流晶闸管）；每台高压阀选用 270 只 5 200 V/300 A 规格整流二极管，均流系数不小于 0.97。图 5 示出该高压直流阀体实物。



图 5 55 kV/150 A 高压直流阀体实物
Fig. 5 Picture of the 55 kV/150 A high voltage rectification valve

在西安高压电器研究院高压实验室对该电源进行了均压试验。电源交流输入工频线电压 $U_{ab}=42\ 100\text{ V}$ ，

$U_{bc}=42\ 180\text{ V}$ ， $U_{ac}=42\ 090\text{ V}$ ；整流输出直流电压 $U_d=56\ 638\text{ V}$ ，输出直流电流为 145 A 。表 1 示出其中一个桥臂的均压实验结果，整流管桥 ab 相当于一个桥臂（共 54 只 $5\ 200\text{ V}/300\text{ A}$ 整流二极管串联）。可以看出，臂上元件最高电压为 798 V ，桥臂平均电压 $U=(U_1+U_2+\cdots+U_{54})/54=42083/54=779.32\text{ V}$ ，则均压系数 $K_u=U/\max(U_1, U_2, \cdots, U_{54})=779.32/798=0.9766$ ，完全满足设计要求（ $K_u\geq 0.970$ ）。这 2 台电源用于中国环流二号（HL-2A）聚变研究实验装置二级加热系统中，于 2007 年开始投入实际工程应用，至今已进行了多次聚变科学研究实验，性能稳定，未发生过故障现象。

表 1 均压效果的测试结果
Tab. 1 Test results of uniform compression effect V

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
极间电压	780	782	775	782	777	781	775	779	784	790	782	786	762	773

序号	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
极间电压	799	771	776	785	782	784	775	772	767	781	775	774	784	789

序号	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
极间电压	779	780	775	780	782	773	779	781	778	783	792	775	776	777

序号	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	/	/
极间电压	779	778	779	776	785	778	768	789	778	785	776	780	/	/

6 结语

本文设计了一种星点控制调压的高压直流电源，介绍了其交流调压电路原理及谐波特点、高压整流阀结构

及参数选择要点、控制与保护电路特点及设计要点，理论分析和实际应用效果都证明了该方案及电路的实用性与有效性。星点控制交流调压方案可用于具有隔离与功率匹配变压器且需在其一次侧进行交流调压的系统应用场合，应用前景较广阔。目前，国内外用户对高压脉冲电源容量及输出电压的要求越来越高，后续将就如何进一步扩大功率和提高输出电压和电流容量、同时解决星点调压低端应用的线性度问题开展研究。

参考文献：

[1] 黄俊. 半导体变流技术 [M]. 北京：机械工业出版社，1980.
[2] RASHID M H. Power Electronics [M]. Prentice-Hall, Inc, 1988.
[3] 王兆安，刘进军. 电力电子技术（第 5 版）[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
[4] 李宏. 常用电力电子变流设备的调试与维修基础 [M]. 北京：科学出版社，2011.
[5] 王兆安，张明勋. 电力电子设备设计 and 应用手册（第 3 版）[M]. 北京：机械工业出版社，2011.
[6] 李宏，邹伟，宣为民，等. 浅谈大功率电力电子变流装置中多个电力半导体器件串联的均压问题 [J]. 电气应用，2005(12): 22-24.
[7] 李宏. 常用晶闸管触发电路及应用 [M]. 北京：科学出版社，2010.
[8] 李宏，宣为民，姚立英. 巧用 TCA785 构成宽频率范围跟踪晶闸管触发电路 [J]. 电源技术应用，2005(12): 22-26.
[9] 李宏. 电力电子变流设备控制板应用技术 [M]. 北京：科学出版社，2013.
[10] 李宏. 常用电力电子变流设备的调试与维修实例 [M]. 北京：科学出版社，2011.

《大功率变流技术》微信公众号上线试运行

为加快期刊数字化建设进程，更好地进行学术传播并服务于读者，《大功率变流技术》编辑部推出本刊微信公众平台并于 2016 年 11 月 21 日上线试运行。其底栏设置有“文章阅读”、“信息查询”和“期刊服务”三大互动功能板块，在编辑、读者、作者及专家之间搭建起一个分享、学习、互动的平台。通过“文章阅读”栏目，读者不仅可随时阅读论文摘要，还可免费阅读和下载本刊论文。通过“信息查询”栏目，读者可不择时地遍享期刊网站平台发布的信息、了解国内外最新研究动态及发展前沿等资讯；投稿作者可随时查询所投稿件的进展状态；审稿专家可在手机上进行审稿工作。若想了解期刊相关信息，可查询“期刊服务”栏目。

欢迎大家查找公众号“大功率变流技术”、“dgblbljs”或直接扫描二维码关注本刊的官方微信公众平台，同时也期待各位专家、作者、读者积极建言献策，共同建设好该微信平台。

