

EAST 中性束注入器加速极电源设计

王一农¹, 杜世俊¹, 刘小宁², 李文生¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 文章介绍了 80 kV, 80A EAST 托卡马克装置中性束注入器加速极电源的设计方案, 该方案利用脉阶调制技术, 引入一种新颖的 80 个不可控直流电源模块串联的解决方案; 加速极电源的输出电压取决于投入的模块数, 通过开关可调节输出电压在 0%~100% 额定电压范围内阶梯变化; 与传统的整流加串联真空调整管方案相比较, 该方案具有多方面的优点。

关键词: 中性束注入器; 加速极; 电源; 脉阶调制

中图分类号: TM461.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5060(2005)10-1292-04

Design of the power supply for the acceleration grids of the neutral beam injectors of the EAST tokamak

WANG Yi-nong¹, DU Shi-jun¹, LIU Xiao-ning², LI Wen-sheng¹

(1. School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The paper deals with the design of the 80 kV/80 A power supply for the acceleration grids of the neutral beam injectors of the EAST tokamak. In the design, the technology of pulse step modulation is adopted and 80 uncontrollable dc choppers connected in series are utilized. The output voltage depends on the number of choppers which are switched on, and its step variation between 0~100% rated voltages can be controlled by switches. The design has some advantages by comparison with conventional dc power supply with tubes in series.

Key words: neutral beam injector; acceleration grid; power supply; pulse step modulation

在托卡马克受控核聚变实验装置中, 中性束注入是等离子体辅助加热的有效方法之一。EAST 托卡马克装置中性束注入器 NBI (Neutral Beam Injector) 的供电系统由一组大功率直流脉冲电源组成, 包括加速极电源、抑制极电源、灯丝电源和弧电源等^[1,2]。EAST 托卡马克装置 NBI 加速极电源采用脉阶调制 PSM (Pulse Step Modulation) 技术方案。该方案具有效率高、电压调整范围宽、精度高、开关动作快速、输出纹波小, 不需要高压 Crowbar 及稳定可靠等优点。

1 PSM 技术

瑞士 BBC (Brown Boveri) 公司于 1983 年首先提出并发展了 PSM 技术。之后, PSM 技术也逐渐应用于 NBI 或 ECRH 高压电源^[3,4]。PSM 的电路拓扑结构和电压调节原理图, 如图 1 所示。

该电路由若干相同的直流电源模块串联而成, 每个电源模块包括一个直流电源 V_{DC} , 开关 S 和一个旁路二极管 D。开关 S 断开的电源模块由二极管旁路, 为电流提供通道, 任一模块的开断都不

收稿日期: 2004-11-23; **修改日期:** 2004-12-27

作者简介: 王一农 (1975-), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生;

杜世俊 (1950-), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师;

刘小宁 (1964-), 男, 江西南昌人, 博士, 中国科学院等离子体物理研究所研究员, 博士生导师。

影响电源的输出。开关 S 的开断和闭合对应模块输出电压两个状态。

$$V_{off} = -V_D \quad (V_D: \text{旁路二极管的导通压降})$$

$$V_{on} = V_{DC} - V_S \quad (V_S: \text{开关 S 的导通压降})$$

若 PSM 电源由 N 个电源模块串联, 其中 n 个模块导通。则 PSM 电源的输出电压为

$$V_{out} = n(V_{DC} - V_S) - (N - n)V_D$$

若忽略二极管和开关 S 的导通压降, 则有

$$V_{off} = 0, \quad V_{on} = V_{DC}, \quad V_{out} = n \times V_{DC}$$

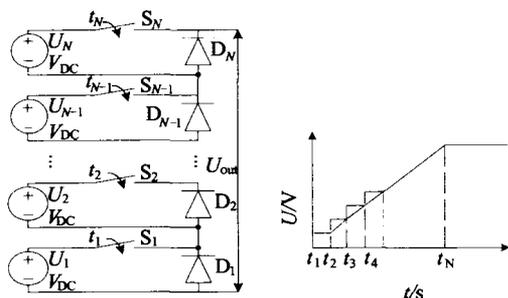


图 1 PSM 拓扑结构和电压调节原理图

任何时刻电源的输出电压取决于投入的模块数。在理想情况下, 通过控制电源模块投入的数量就可以实现输出电压从 $0 \sim N \times V_{DC}$ 的阶梯变化。

2 加速极电源设计

加速极电源原理图, 如图 2 所示。加速极高压电源的预期设计指标为: 输出直流电压: $0 \sim 80 \text{ kV}$; 直流电流: $0 \sim 80 \text{ A}$; 调整精度: $< 1\%$; 纹波(峰-峰): $< 2\%$; 工作脉冲占空比: $100 \text{ s}/10 \text{ min}$; 电流上升时间: $< 20 \mu\text{s}$; 关断时间: $< 5 \mu\text{s}$ 。

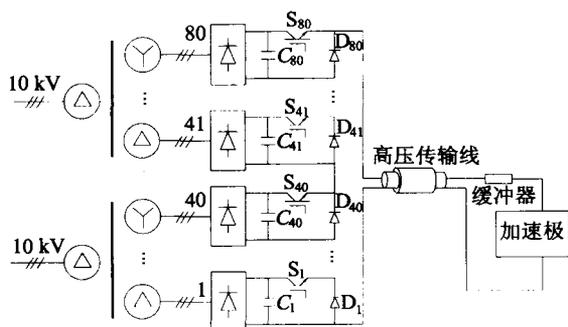


图 2 加速极电源原理图

该电源由 80 个电容滤波型三相桥式不可控整流模块串联组成, 整流桥进线通过 2 台六相 12

脉波的移相变压器与 10 kV 母线相联。移相变压器对应相位的相角互差 15° , 每台变压器的低压绕组由轴向分裂的两组等容量、等电压的绕组组成, 一组为星形, 另一组为三角形联结, 形成 24 脉波直流输出, 理想情况下输出电压只含 24 及其倍数次谐波。为避免由于高电压、大电流快速导通和关断时引起的强电磁场干扰, 保证周围电子设备和电源本身的正常工作, 高压传输线采用同轴结构, 以尽可能的降低这种干扰。

由于系统杂散电容会储存一定能量, 当加速极打火击穿时, 这部分能量会耗散在加速极中。尤其是高压传输线部分电容储存的能量, 在开关开断后, 这部分能量仍然会耗散在加速极中。为保护加速极, 电源输出端串联一个缓冲器 Snubber, 用以吸收高压传输线部分电容储存的能量^[5]。

3 直流电源模块设计

加速极电源由 80 个相同的直流电源模块串联而成, 通过对一个直流电源模块的分析就能了解整个电源的特性。直流电源模块电路图如图 3 所示, 加速极可用一个阻性负载 $R_{load} = 14 \Omega$ 代替。

整流变压器副边, 通过软充电电阻 R 并联接触器辅助触点 CKJ 与三相不可控整流桥相联, 图 4 中 $R = 1.5 \text{ k}\Omega$ 。 10 kV 真空断路器闭合后, 交流电源通过软充电电阻对电容充电, 当电容电压达到 700 V 时, 由控制电路发信号控制 CKJ 闭合, 交流电源通过整流桥直接对电容充电。串联软充电电阻后的电容充电电压可简化计算如下

$$U_c \approx \sqrt{2} \times E_m = 1244$$

其中, E_m 为整流变副边额定电压。

如不串联软充电电阻, 交流电源直接通过整流桥对电容 C 充电, 电容电压会过充到约 1800 V 。电容 C 和放电电阻 R_c 组成滤波电容区, 为了合理选择滤波电容参数, 对电容滤波型三相桥式整流电路进行定性及定量分析, 计算出输出电压的纹波及平均值。选取电容为 1.5 mF 时, 额定负载下电源输出电压计算结果为(忽略 12 次以上谐波)

$$6 \text{ 次谐波峰值: } U_p = 6.89$$

$$\text{输出电压直流分量: } U_d = 1120.6$$

$$\text{纹波: } \gamma = 2 \times U_p / U_d = 1.23\%$$

电源输出直流电压约为 1100 V 。80 个模块全部投入时, 输出直流电压 88 kV 。在母线电压下

降 10% 及个别电源模块损坏的情况下, 加速极电源仍能稳定输出 80 kV 负载电压。单个电源模块输出电压纹波为 1.23%, 电源模块串联后输出 24

脉动整流电压, 纹波会更小。从计算结果来看, 取 $C = 1.5 \text{ mF}$ 已经满足设计指标的要求。电源模块输出电压 Pspice 仿真波形, 如图 4 所示。

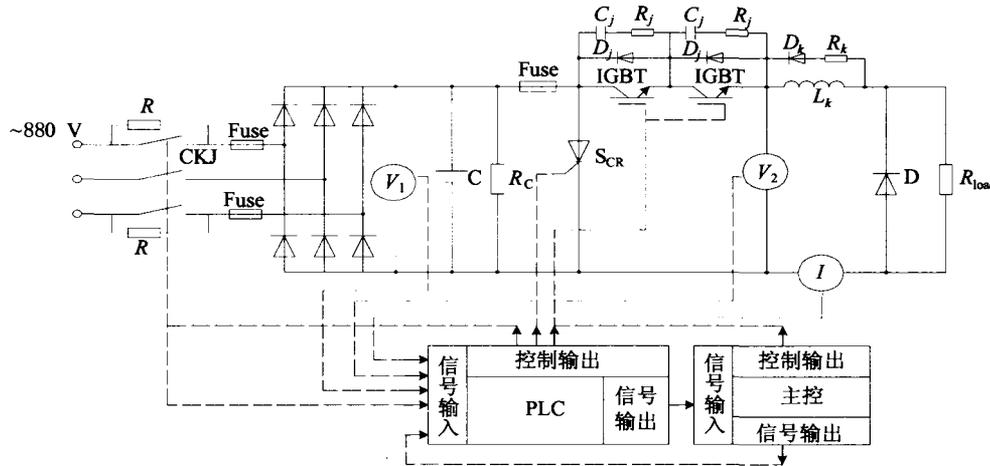


图 3 直流电源模块电路图

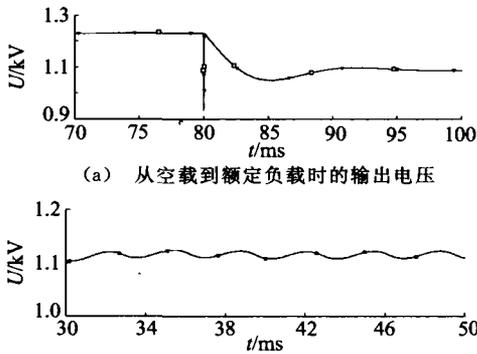


图 4 电源模块输出电压波形图

从图 4 可以看出, 空载时电源输出电压约为 1 200 V。负载接通时, 电容向负载快速放电, 10 ms 内, 电压下降至约 1 100 V, 脉动电压峰值约为 13 V。仿真结果与前面的计算结果基本一致。

直流侧快速熔断器 Fuse 和可控硅 SCR (Crowbar) 组成后备保护电路。在加速极打火击穿时, 如果开关拒动, 由控制回路发信号触发导通 SCR, 将短路电流切换至 SCR 通道。这时有较大的短路电流流过可控硅和快速熔断器, 熔断器快速熔断, 将负载切除。在这个过程中, 可控硅和熔断器会完全损坏, 由于开关拒动的可能性较小, 这一不足之处还是可以接受的。

电源模块的开关由 2 个串联的 1 200 V/200 A

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) BSM200GA120DLC 组成。作为一种新型复合器件, IGBT 综合了 GTR 和 MOSFET 的优点, 并且具有开关容量大、通态、开关损耗低以及工作速度快等优点^[6]。该 IGBT 的导通延迟时间为 $0.12 \mu\text{s}$, 上升时间为 $0.07 \mu\text{s}$, 关断延迟时间为 $0.57 \mu\text{s}$, 下降时间为 $0.08 \mu\text{s}$ ^[7]。开关的快速性既保证了母线电压的波动能迅速得到补偿, 维持电压恒定输出, 又保证了在加速极打火击穿时, 电源可在 $5 \mu\text{s}$ 内被分断, 使加速极得到保护。因 IGBT 处于高电位, IGBT 的驱动信号需通过光纤进行传递。

由于驱动延迟和 IGBT 的参数分散性等因素, 串联 IGBT 在导通和开断时存在动态电压失衡的问题。在加速极电源中, IGBT 工作频率较低, 由 RC 网络组成串联 IGBT 的均压和缓冲电路^[8]。短路时, IGBT 的工作区由饱和区转移到放大区, 如不加以限制, 短路电流会达到额定值的 4~10 倍。在这期间, 短路电流上升率 di/dt 仅与电感 L_k 有关, 直到 IGBT 漏-源电压达到电源电压, $di/dt = 0$ ^[9]。电感 $L_k = 100 \mu\text{H}$ 的作用是限制短路电流上升率。

$$L_k = \frac{di}{dt} = 1\ 100, \quad \frac{di}{dt} = \frac{1\ 100}{L_k} = 11 \text{ A}/\mu\text{s}$$

短路时, IGBT 在 $5 \mu\text{s}$ 内关断, 限制短路电流仅上升到 135 A。实际上, 由于传输线部分电容储

存的能量要释放在加速极,负载短路电流要大很多^[1],这部分短路电流需依靠 Snubber 予以限制。

为消除旁路二极管D 反向恢复过程形成的假短路通道,选用快恢复二极管以尽量缩短二极管反向恢复时间。

4 控制和保护

为实现快速调节,由 DSP 构建主控制系统,前馈和反馈调节被采用。前馈调节是任意取4个电源模块输出电压的平均值,根据设定的加速极电源电压计算所需投入的模块数,得到近似的电压输出,再由反馈进行细调以满足要求。

值得注意的是,前馈调节取的模块电压是空载电压,带负载后电容向负载迅速放电,10 ms 内,模块输出电压从1 200 V 下降至1 100 V,而加速极电源输出电压会从80 kV 下降至约73 kV。输出电压会有一个下降的动态过程(见图5)。有些文献提出通过预先设定投入模块顺序和数量的补偿方法^[10,11]。这里,可通过反馈调节补偿这一过程。

对于母线电压波动和负载阻抗特性的变化引起的输出电压波动,只在实际输出电压与设定的加速极电源电压相差超过550 V,即单个模块输出电压的一半时,反馈调节才起作用。这时,相应投入或切除一个模块,使加速极电源产生一个1 100 V 的跃变。理想状态下,80 kV 输出电压需投入73个模块,调整精度约为0.7%。其次,由于整流变压器副边有4种不同的相移接法,可分成4组。每4个不同相位的副边绕组能输出纹波最小的24脉动整流电压。因此,控制调节时,要尽量保证每组投入的数量均衡。

由 DSP 构建的快保护和 PLC 构建的慢保护组成了加速极电源的保护电路。PLC 实现逻辑控制、状态监控及过压欠压等保护。加速极打火击穿时,由总控来的保护信号直接驱动关断所有IGBT,实现快保护。

5 结束语

采用 PSM 技术的 NBI 加速极高压电源由80个直流电源模块串联组成,每个模块的输出状态由开关 IGBT 的导通和关断来控制,通过开关调节输出电压,实现电源电压的稳定输出。通过分析,各电路参数均满足设计要求。该方案也存在一

些不足,如多副边绕组移相变压器的工艺要求较高,电源控制回路较复杂。但与整流加串联真空整流管的方案相比较,采用 PSM 技术的电源方案仍具有较大优势。

[参 考 文 献]

- [1] Schwarz U, Haltrich S. The operating behavior of the power supplies for the TEXTOR neutral injectors [A]. Proceedings of the 15th Symposium of Fusion Technology [C]. Utrecht: IEEE, 1988. 5-8.
- [2] Baruah U K, Patel P J. Power supply system for 1 000 s neutral beam injector [A]. Proceedings of the 17th Symposium of Fusion Engineering [C]. Honolulu: IEEE, 1997. 1 133-1 136.
- [3] Tomljenovic N, Schminke W, Mathews H G. Solid-state DC power supplies for gyrotrons and NBI sources [A]. Proceedings of the 17th Symposium of Fusion Technology [C]. Rome: IEEE, 1992. 952-956.
- [4] Alex J, Schminke W. Fast switching, modular high voltage DC/AC-power supplies for RF-amplifiers and other applications [A]. Proceedings of the 16th Symposium of Fusion Engineering [C]. Champaign IL: IEEE, 1995. 936-939.
- [5] Alex J, Schminke W. A high voltage power supply for negative ion NBI based on PSM technology [A]. Proceedings of the 17th Symposium of Fusion Engineering [C]. Julich: IEEE, 1997. 1 063-1 066.
- [6] 李序葆, 赵永健. 电力电子器件及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 353-355.
- [7] Zupec. Technical information BSM200GA120DLC [EB/OL]. www.eupec.com, 2003-01-08.
- [8] Chen J F, Lin J N, Ai T H. The techniques of the serial and paralleled IGBTs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996, 32(4), 999-1 004.
- [9] Cotorogea M, Claudio A, Aguayo J. Study of the short-circuit behavior of homogeneous IGBTs using experimental results and a physics based SPICE-model [A]. Power Electronics Specialists Conference, IEEE 31st Annual [C]. Pesc: IEEE, 2000. 1 588-1 593.
- [10] Schwarz U, Haltrich S. Operating of the TEXTOR accel power supply on the neutral injection test stand [A]. Proceedings of the 14th Symposium of Fusion Technology [C]. Avignon: IEEE, 1986. 853-858.
- [11] Boksberg H U. The solid state TEXTOR high voltage neutral beam accelerator power supplies [A]. Proceedings of the 11th Symposium of Fusion Engineering [C]. Austin: IEEE, 1985. 679-680.

(责任编辑 张秋娟)