



核科学与工程

# 基于 200 kV/15 A 逆变型直流高压电源的控制策略

何开心, 李青, 夏于洋, 张锦涛

(核工业西南物理研究院, 成都 610225)

**摘要:** 针对传统三相三电平逆变器在较小占空比模式下输出电压纹波较大的不足, 提出了一种新的双重控制策略。该策略通过控制直流母线电压大小与逆变器的占空比, 从而实现对输出直流电压较大范围内的可控调整。建立 200 kV/15 A 的逆变型直流高压电源 MATLAB/Simulink 系统仿真模型, 采用上述控制策略, 实现了输出电压分别为 200 kV 和 20 kV 时, 纹波均小于  $\pm 1\%$ , 验证了新型控制策略在输出电压宽范围情况下, 输出电压纹波能够满足负载要求。

**关键词:** 高压电源; 控制策略; 整流器; 三相三电平逆变器; 占空比控制

中图分类号: TM8

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220355

## Direct current high voltage power control strategy based on 200 kV/15 A inverter

He Kaixin, Li Qing, Xia Yuyang, Zhang Jintao

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** A new dual control strategy is proposed to solve the problem of large output voltage ripple of traditional three-phase three-level inverters with small duty cycle mode. By controlling the voltage of the DC bus and the duty ratio of the inverter, this strategy can realize controllable adjustment of the output DC voltage in a large range. The MATLAB/Simulink system simulation model of 200 kV/15 A inverter DC high-voltage power supply was established, and the above control strategy was used to realize that the ripple was less than  $\pm 1\%$  when the output voltage was 200 kV and 20 kV respectively. It is verified that the new control strategy is effective in a wide range of output voltage. The output voltage ripple can meet the load requirements.

**Key words:** high voltage power supply, control strategy, rectifier, three-phase three-level inverter, duty cycle control

高压电源装置是辅助加热系统中不可或缺的部分, 直接决定了辅助加热系统的加热能力和有效性, 是辅助加热系统中的核心部件之一, 对实现聚变点火具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。逆变型高压直流电源方案的控制元件全部设在低压侧, 高压侧不需要直流高压开关, 适用于电压范围在几百千伏或更高电压等级的特高压电源<sup>[3-5]</sup>。根据高压电源在辅助加热领域的特点, 结合中性束注入系统需 200 kV 直流供电电源作为其加速极高压电源。对脉冲阶梯调制(PSM)高压电源、逆变式直流高压电源、模块化多电平(MMC)型柔性直流高压电源以及带脉冲调制器的高压电源方案进行对比后, 200 kV/15 A 高压电源系统宜采用逆变型直流高压电源系统方案。其中负载要求高压电源系统的纹波系数小于  $\pm 5\%$ , 通过逆变型直流高压电源系统控制策略来降低纹波, 当前主要的控制策略有两种: 一种是通过控制逆变器占空比直接对输出电压进行控制, 其控制策略简单可靠, 易于实现, 动态响应速度快, 但在较小占空比模式下输出电压纹波较大; 另一种是通过控制前级整流器触发角间接实现对输出电压控制, 其控制策略能够有效降低输出电压纹波, 但系统结构复杂, 可靠性较差。研究发现, 仅单独使用某一种控制策略不能达到负载的技术要求<sup>[1-2]</sup>。因此, 在保证电压精度的前提下, 采用改变直流母线电压和逆变器占空比两种控制策略相结合的

\* 收稿日期: 2023-01-03; 修订日期: 2023-03-09

基金项目: 四川省科技计划项目 (2022101)

联系方式: 何开心, hekaixin@swip.ac.cn。

通信作者: 李青, liqing@swip.ac.cn。

方式来降低直流高压输出纹波。本文将通过对逆变型直流高压电源系统的整流器和逆变器进行研究,并通过仿真对提出的控制策略进行验证。

## 1 逆变型直流高压电源拓扑

### 1.1 逆变型直流高压电源构成

图1为逆变型直流高压电源系统原理图。该系统主要部分包括二十四脉波相控整流环节、直流母线环节、三相三电平中性点钳位逆变环节、隔离升压环节、高压不控整流环节和滤波环节等。电源系统的触发控制环节全部设在低压侧,通过采用升压变压器实现高压侧与低压侧间的电气隔离,提高了电源控制器和功率器件触发电路的稳定性和灵活性。

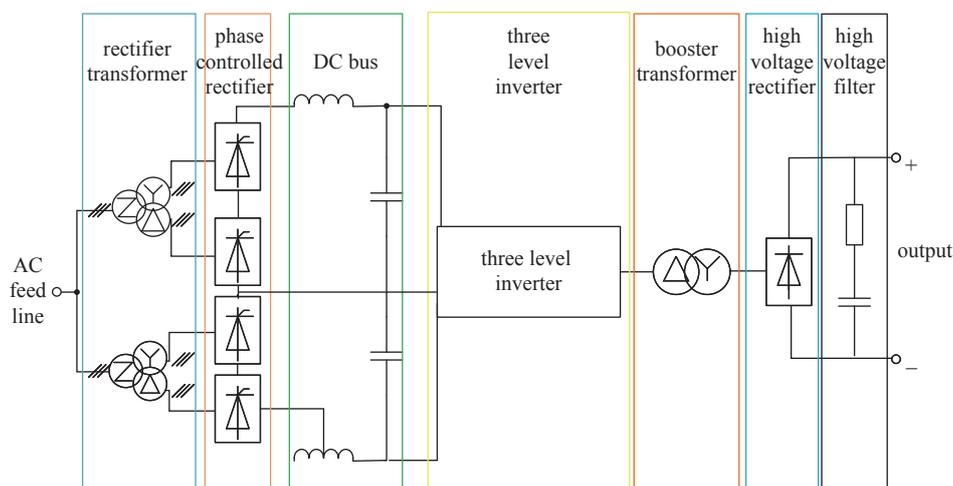


Fig. 1 Inverter direct current high voltage power supply system

图1 逆变型直流高压电源系统原理图

### 1.2 工作原理

高压电源要求能较大范围地调节输出电压。当输出电压很小时,若只通过逆变器加以控制,将无法实现输出电压纹波在 $\pm 5\%$ 以内的技术要求。电压纹波的计算是以输出电压纹波相对值进行替代,其输出电压纹波在 $\pm 5\%$ 以内,等价于输出电压纹波相对值在10%以内<sup>[1,3]</sup>。

输出电压纹波相对值为<sup>[1,3]</sup>

$$u_{0,p-p}\% = u_{0,p-p}/U_p \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $u_{0,p-p}$ 为输出电压纹波峰峰值;  $U_p$ 为输出电压平均值。

二十四脉波相控整流单元主控制电路原理图如图2所示。整流机组主要由两台移相式三绕组变压器和四组六脉波整流桥组成。每台移相三绕组变压器的二次侧绕组分别连接成三角形接法和星形接法<sup>[6-7]</sup>。两台移相三绕组变压器分别进行移相,其角度分别为 $+7.5^\circ$ 和 $-7.5^\circ$ 。每个副边绕组连接一台六脉波整流器。两台变压器除移相角度不同之外,其他参数都相同。这样两台移相三绕组变压器的二次侧绕组电压相量互差为 $15^\circ$ 。移相后的三相电压分别经六脉波整流稳压后,在直流侧串联工作,最后构成二十四脉波相控整流系统<sup>[8]</sup>。

为了达到实现软开关,降低开关损耗的目的。中性点钳位(NPC)三电平逆变器采用了不对称的占空比调制方法。NPC三电平逆变器拓扑结构中A相桥臂上4个开关管的开关时间变化如图3所示,4个开关管分别为S1、S2、S3以及S4,S1管与S3管互补导通,S2管与S4管互补导通,且S4管触发信号滞后于S1管触发信号的半个周期。B相和C相各开关管的触发信号都分别滞后于A相的1/3周期和A相的2/3周期。逆变器占空比D定义为S1管启动持续时间与半周期调制信号持续时间之比<sup>[9-11]</sup>。

### 1.3 电源输出特性

逆变型直流高压电源设计并建设完成之后,隔离升压变压器变比将成为一个恒定值,其电压升高系数就无法进行相应的调整,因此若对逆变型直流高压电源的输出特性进行研究,就应消除隔离升压变压器变比的影响。

定义隔离升压变压器等效升压变比为<sup>[1,3]</sup>

$$k = U_o/nU_i \quad (2)$$

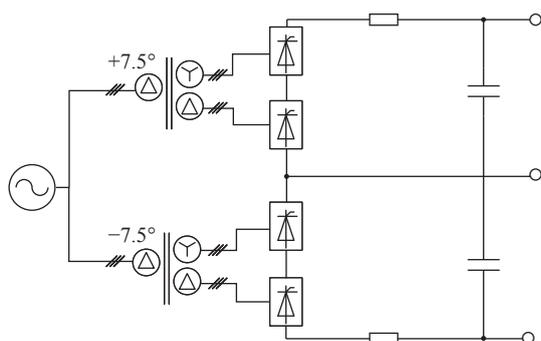


Fig. 2 Main control circuit schematic diagram of twenty-four pulse phase-controlled rectifier unit

图 2 二十四脉波相控整流单元主控制电路原理图

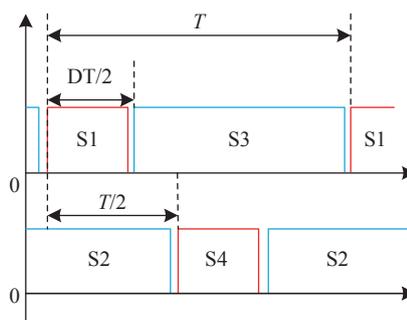
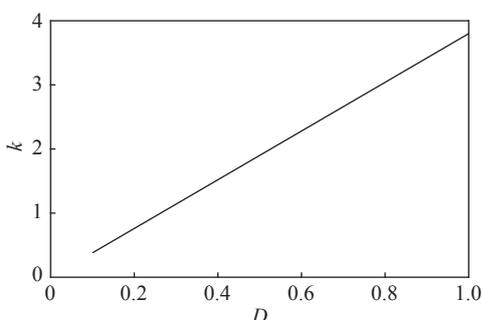


Fig. 3 Switching time variation of each switch tube on phase A bridge arm

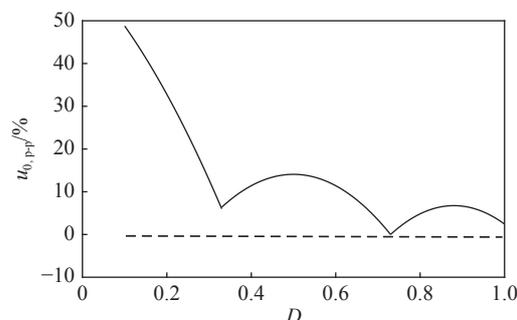
图 3 A 相桥臂上各开关管的开关时间变化

式中:  $U_0$  为输出电压;  $n$  为隔离升压变压器副边相对于原边电压变比;  $U_i$  为直流母线电压。

逆变型直流高压电源输出特性曲线如图 4 所示; 图 4(a) 为等效升压变比与占空比变化曲线, 图 4(b) 为输出电压纹波相对值与占空比变化曲线。在系统参数确定的前提下, 逆变型直流高压电源输出特性随占空比变化体现在: 等效升压变比  $k$  的大小随逆变器占空比  $D$  增大而增大; 输出电压纹波相对值有随占空比的增大而减小的趋势, 但并非简单的单调递减关系, 而是呈“W”型。在占空比从 0 到 1 的区间内有两个极小值点, 其中在占空比较大的极值点处, 输出电压纹波相对值达到最小, 理论上相对值为 0。综上所述, 纹波影响因素有两种: 一种是逆变器占空比, 能够直接影响输出纹波; 另一种因素是等效升压变比, 等效升压变比与占空比的关系是正相关, 所以能够间接影响输出纹波。



(a) equivalent boost ratio vs duty ratio



(b) output voltage ripple relative value vs duty ratio

Fig. 4 Output characteristic curves of inverter DC high voltage power supply

图 4 逆变型直流高压电源输出特性曲线

## 2 控制方法

文献 [12] 提出了控制直流母线电压大小与逆变器的占空比, 从而降低输出电压纹波的想法, 但没有给出具体的控制策略。文献 [13] 提出了对输出电压和输出电流分别进行控制的方法, 形成双环反馈控制, 保证输出电压的稳定, 但没有对较低输出电压时的情况进行研究, 也没有给出具体的控制方法。文献 [14] 研究了一种三电平中性点钳位整流器和五电平中性点钳位逆变器的控制方法, 在满足设计要求的情况下, 还能够大大提高系统在运行过程中的稳态性能, 该方法的实际性能受到很多因素的影响, 没有进行具体的分析。文献 [15] 提出了一种分段比例积分 (PI) 补偿器前馈控制策略, 该策略达到了系统期望和可接受的性能。电源系统运行时, 反馈控制通过对输出电压与参考值进行对比来控制整流器和逆变器, 使系统的误差不断减小, 维持输出电压的稳定。作者在文中描述了该控制系统输出特性, 但没有对实验前后进行对比研究。综上所述, 反馈控制系统作为逆变型直流高压电源系统中的一个重要组成部分, 其性能对输出电压的品质影响很大, 因此深入研究反馈控制系统很有必要 [16-17]。

本文对逆变式直流高压电源进行分析, 设计了一种新型的控制策略, 其控制原理总体方案如图 5 所示。其控制策略的基本原理为: 电源采用双环控制, 分别对晶闸管整流器和中性点钳位三电平逆变器进行独立的 PI 控制, 根据输出不同直流电压, 设定直流母线电压参考值 (记为  $U_i^*$ ) 和输出电压参考值 (记为  $U_0^*$ ), 通过对整流器触发相位角  $\alpha$  和逆变器占空比  $D$  加以调整, 使低压侧直流母线电压  $U_i$  和电源系统输出电压  $U_0$  稳定在参考值, 确保输出电压

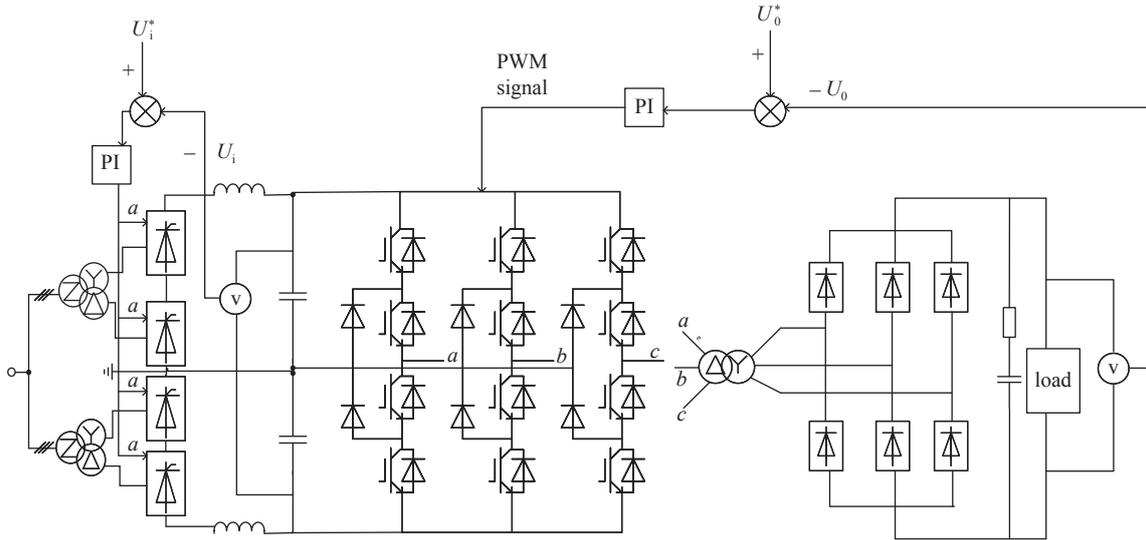


Fig. 5 Control principal framework of inverter direct current high voltage power supply

图5 逆变型直流高压电源控制原理框架

纹波控制在合理范围内。

该控制策略是以直流母线电压作为中间控制变量,系统在接收到低压侧直流母线电压 $U_i$ 后,将与设定好的直流母线电压参考值 $U_i^*$ 进行比较处理,通过控制整流器触发相位角 $a$ ,使直流母线电压 $U_i$ 在接入不同负载时能够稳定在参考值 $U_i^*$ 。其中,另一个控制变量为输出电压,将接收到的输出电压 $U_0$ 与设定好的输出电压参考值 $U_0^*$ 进行比较处理,通过控制中性点钳位三电平逆变器占空比的大小,使输出的直流高压在连接不同负载的情形下,稳定在参考值 $U_0^*$ ,确保输出电压纹波控制在一个合理的区间内。

### 3 仿真实证

为验证所提出的控制策略是否合理有效,建立了200 kV逆变型直流高压电源的MATLAB/Simulink仿真模型,仿真电路中参数如表1所示。输入交流电压为10 kV;交流电网频率50 Hz;移相变压器额定容量为80 MV·A;移相变压器额定电压为10 kV/1.1 kV/1.1 kV;直流母线扼流电感为1 mH;直流母线电容为450 mF;逆变器频率为150 Hz;隔离升压变压器容量为18 MV·A;隔离升压变压器频率为150 Hz;隔离升压变压器额定电压为3.48 kV/142.25 kV;高压滤波电阻为68  $\Omega$ ;高压滤波电容为300 nF。

表1 200 kV 逆变型直流高压电源 MATLAB/Simulink 仿真模型各元件参数

Table 1 Component parameters of MATLAB/Simulink simulation model of 200 kV inverter DC high-voltage power supply

component name	component parameters
input AC voltage	10 kV
AC grid frequency	50 Hz
rated capacity of phase shifting transformer	80 MV·A
rated voltage of phase shifting transformer	10 kV/1.1 kV/1.1 kV
DC bus choke inductor	1 mH
DC bus capacitor	450 mF
frequency of inverter	150 Hz
isolated booster transformer capacity	18 MV·A
isolated booster transformer frequency	150 Hz
rated voltage of isolated boost transformer	3.48 kV/142.25 kV
high voltage filter resistor	68 $\Omega$
high voltage filter capacitor	300 nF

目标输出电压为200 kV直流时,目标输出电压波形如6所示;图6(a)为无控制策略下的波形,图6(b)为采用所提出的控制策略下的波形。可见:在无控制策略下,200 kV输出电压纹波相对值为3%;采用所提出的控制策略

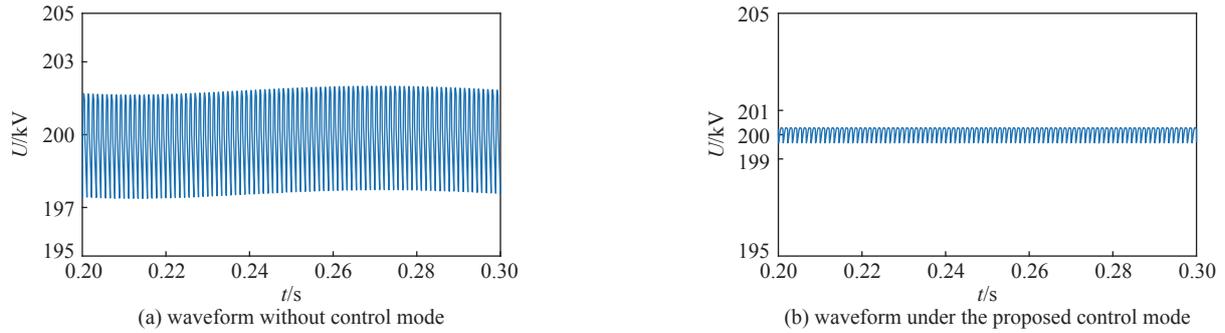


Fig. 6 Target output voltage waveforms at 200 kV

图 6 目标输出电压为 200 kV 时, 目标输出电压波形

下, 200 kV 输出电压纹波相对值为 1%。

目标输出电压为 20 kV 直流时, 目标输出电压波形如图 7 所示; 图 7(a)为无控制策略下的波形, 图 7(b)为采用所提出的控制策略下的波形。可见: 在无控制策略下, 20 kV 输出电压纹波相对值为 3%; 采用所提出的控制策略下, 20 kV 输出电压纹波相对值为 1%。

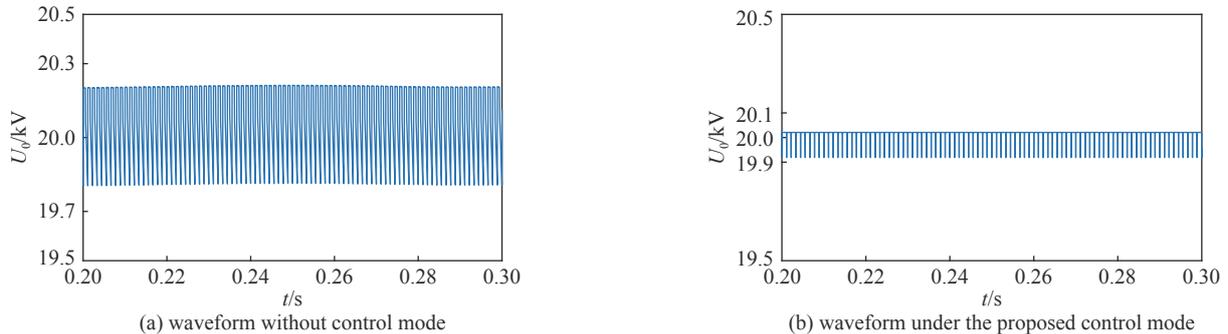


Fig. 7 Target output voltage waveforms at 20 kV

图 7 目标输出电压为 20 kV 时, 目标输出电压波形

可以通过图 6 和图 7 发现, 针对给定不同的输出电压大小, 特别是在输出电压较低的状态下, 控制系统可以对稳态输出电压进行准确控制, 保证输出电压精度限制在 $\pm 0.5\%$ 以内。

## 4 结 论

本文设计了 200 kV/15 A 逆变型直流高压电源方案。通过详细分析二十四脉波晶闸管整流部分和三相三电平逆变器部分, 建立 200 kV/15 A 逆变式直流高压电源控制系统的 MATLAB/Simulink 仿真模型, 对逆变型直流高压电源在不同输出电压的情况下, 输出电压纹波情况进行仿真验证。仿真结果显示新型的控制策略能够通过控制直流母线电压和输出电压参考值, 使逆变式高压电源设备在不同输出电压条件下, 输出电压纹波能够满足负载要求。

### 参考文献:

- [1] 章雪亮. 聚变装置辅助加热系统逆变型直流高压电源技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. (Zhang Xueliang. Research on the technology of inverter type DC high voltage power supply for auxiliary heating system of fusion device[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016)
- [2] 章雪亮. CFETR N-NBI 样机加速器高压电源设计与关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. (Zhang Xueliang. Research and design of the acceleration grid power supply of CFETR N-NBI prototype[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019)
- [3] 夏令龙. 托卡马克辅助加热系统高压电源若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015. (Xia Linglong. The study on several key techniques of high voltage power supply for auxiliary heating system in tokamaks[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015)
- [4] 王一农, 杜世俊, 刘小宁, 等. EAST 中性束注入器加速极电源设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(10): 1292-1295. (Wang Yinong, Du Shijun, Liu Xiaoning, et al. Design of the power supply for the acceleration grids of the neutral beam injectors of the EAST tokamak[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28(10): 1292-1295)
- [5] 张明, 周澜, 王姝, 等. 基于负离子的中性束注入器加速极逆变型高压电源控制策略[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 040012. (Zhang Ming, Zhou Lan, Wang Shu, et al. Control strategy for inverter type high voltage power supply for negative-ion based neutral beam injector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 040012)
- [6] 王威. 高压逆变电源控制方案研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. (Wang Wei. Research on control scheme for high-voltage inverter[D]. Wuhan: Huazhong

University of Science and Technology, 2005)

- [7] 李良威, 李群湛, 刘炜. 24脉波整流器外特性仿真及其在城市轨道交通中的应用[J]. *城市轨道交通研究*, 2007, 10(10): 52-55. (Li Liangwei, Li Qunzhan, Liu Wei. Simulation and application of external characteristic curve of 24-pulse rectifier in urban rail transit[J]. *Urban Mass Transit*, 2007, 10(10): 52-55)
- [8] 张伟, 杜慧聪, 齐铂金, 等. 150kV/30kW逆变式电子束焊接高压电源设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(11): 1531-1536. (Zhang Wei, Du Huicong, Qi Bojin, et al. 150kV/30kW inverter for electron beam welding power supply design[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(11): 1531-1536)
- [9] Ma Mingyao, Meng Na, Wang Hanyu, et al. Online monitoring of IGBT modules based on creating the non-interventional monitoring environment[J]. *Microelectronics Reliability*, 2021, 126: 114220.
- [10] 杨恩清. 三电平逆变器在永磁同步电机驱动系统中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. (Yang Enqing. Application of three-level inverter in permanent magnet synchronous motor drive system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015)
- [11] 胡刚. 三电平高压变频调速系统保护原理与实现技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007. (Hu Gang. Research on protection theory and realization for high voltage three-level converter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007)
- [12] Toigo V, Zanotto L, Bigi M, et al. Progress of the ITER NBI acceleration grid power supply reference design[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(6/8): 956-959.
- [13] 李亚维, 谢敏, 蓝欣, 等. 200 kV低纹波高稳定度直流高压电源[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015016. (Li Yawei, Xie Min, Lan Xin, et al. A 200 kV high voltage DC power supply with high stability and low ripple[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015016)
- [14] Wang Dongyu, Yang Shu, Zhang Ming, et al. Concept design of the control method for the NBI acceleration grid power supply-conversion system of CFETR[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 165: 112253.
- [15] Wang Dongyu, Zhang Ming, Ma Shaoxiang, et al. Design and control of the accelerator grid power supply-conversion system applied to CFETR N-NBI prototype[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22: 085601.
- [16] 赵远哲, 胡纯栋, 谢远来, 等. CFETR NBI控制系统概念设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2021, 41(6): 1066-1073. (Zhao Yuanzhe, Hu Chungong, Xie Yuanlai, et al. Conceptual design of CFETR NBI control system[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2021, 41(6): 1066-1073)
- [17] Suresh K, Parimalasundar E. A novel dual-leg DC-DC converter for wide range DC-AC conversion[J]. *Automatika*, 2022, 63(3): 572-579.