

ITER 聚变装置及其电源系统

胡星光^{1,2,3}, 宋执权^{3,✉}, 高格³, 李华³, 傅鹏³, 李航^{1,2}

(1. 深圳大学物理与光电工程学院, 广东深圳 518061; 2. 深圳大学新能源研究中心, 广东深圳 518060;
3. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: [目的] 为了实现受控核聚变, 研究解决人类未来能源问题, 国际热核聚变反应堆 (ITER) 计划建设核聚变反应超导托卡马克装置。[方法] 简要说明了 ITER 计划的意义与发展, 同时对其电源系统的组成与功能以及主要线圈的变流器电源结构与技术参数进行了针对性介绍。[结果] 最后, 提出了中国在 ITER 磁体电源方面的优化设计, 以及完成的相关磁体电源采购包任务。[结论] 中国通过参与 ITER 计划科研项目, 为国际聚变工程技术发展做出了重要贡献。

关键词: ITER; 聚变能源; 超导线圈; 磁体电源; 交流器

中图分类号: TL4; TL62

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0019-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



ITER Fusion Device and Its Power Supply System

HU Xingguang^{1,2,3}, SONG Zhiquan^{3,✉}, GAO Ge³, LI Hua³, FU Peng³, LI Hang^{1,2}

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;
2. Advanced Energy Research Center, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;
3. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] In order to realize controlled nuclear fusion and solve the future energy problems of mankind, International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is planning to build a superconducting Tokamak device for fusion reaction. [Method] This paper briefly described the significance and development of ITER program and introduced the composition and function of its power supply system, as well as the structure and technical parameters of converter power supply of main coils. [Result] Finally, the optimization design of ITER magnet power supply in China and related procurement task for magnet power supply that have been completed are proposed. [Conclusion] By participating in ITER research projects, China has made important contributions to the development of international fusion engineering technology.

Key words: ITER; fusion energy resource; superconducting coils; magnet power supply; converter

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

目前人类通过多种方式获取能源, 不仅有对煤、石油、天然气等化石燃料燃烧释放热能的使用, 还有对风能、太阳能、水能、地热能等新能源的应用。随着社会生产力不断提高, 对能源的消耗越来越大, 全球有限的化石能源终有一天会被耗尽, 需要开发一种原材料储量丰富、释放能量巨大、安全可靠的能

源利用方式, 这种理想的能源就是原子核的聚变能^[1]。与核裂变相比, 核聚变采用氢的同位素作为反应燃料, 其聚变产物为氦气, 无放射性, 核泄漏危害小^[2]。两个较轻的原子核, 在聚变核反应下, 会生成新的质量更重的原子核, 并释放出巨大的能量, 通过控制与利用核聚变反应, 就能产生源源不断的能源^[3]。

收稿日期: 2021-10-27 修回日期: 2021-12-26

基金项目: 国家重大科技基础设施建设项目“聚变堆主机关键系统综合研究设施”(2018-000052-73-01-001228); 国家重点研发计划资助项目“中国聚变工程实验堆集成工程设计研究”(2017YFE0300500)

1 聚变能源与 ITER 计划

为了在地球上实现受控热核聚变,其条件之一就是为聚变反应维持一亿度以上的高温等离子体环境,并将参加反应的高温等离子体约束在一定范围内并保证充足的反应时间。采用超导托卡马克(Tokamak)技术,其聚变装置基本工作原理如图1所示,中央是一个环形的真空室,外围缠绕着超导线圈,利用导通大电流下超导线圈所产生的强磁场,将等离子体约束在小范围内实现核聚变反应,是目前最有可能率先成功的可控聚变方式^[4]。

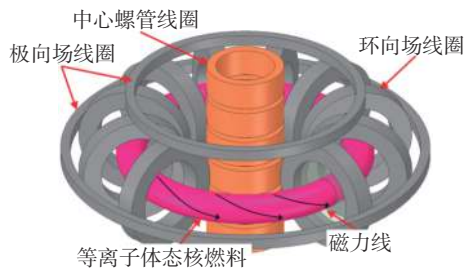


图1 托卡马克聚变装置原理

Fig. 1 Principle of tokamak fusion device

“国际热核聚变实验堆(ITER)计划”,最早于1985年日内瓦峰会上,由美、苏、法三国领导人共同倡议提出,并于1988年由美、苏、欧、日共同启动其概念设计。中国于2003年初参加ITER计划,6月韩国加入,中、欧、日、韩、俄、美六方于2005年6月共同签署了《ITER场址联合宣言》,并将实验堆建

设场址确定于法国卡达拉舍(Cadarache),同年底印度加入ITER计划谈判。2007年10月24日,ITER国际聚变能组织(简称ITER组织)正式成立^[5-6]。

ITER计划目标是建设世界上最大的托卡马克聚变装置。在超导磁约束聚变反应堆装置中,为氘氚等离子体完成受控聚变反应提供条件,该项目的建设一方面攻克工程技术制造难题,验证该受控聚变方案的工程可行性,另一方面可基于该装置完成一系列测试与研究,为未来建设聚变能电站完善技术基础与科学基础^[7],最终实现和平利用聚变能源。

2 ITER 电源系统

电源系统在ITER装置中占据着极其重要的地位,它的功能主要有以下三点:

1)为微波、中性粒子等装置提供能量,维持聚变反应所需高温等离子体环境。

2)为各超导线圈导通电流,产生对应强磁场以约束和控制等离子体位形。

3)为聚变装置各辅助系统供电及磁体失超的保护电路。

如图2所示为ITER电源系统的组成,其中包括稳态、脉冲高压变电站;磁体电源系统;法国400 kV电网;微波、中性粒子装置等电源系统,即中性束注入NB,离子回旋ICRF,电子回旋ECRF,微波加热LHCD;无功补偿及其滤波系统^[8-10]。

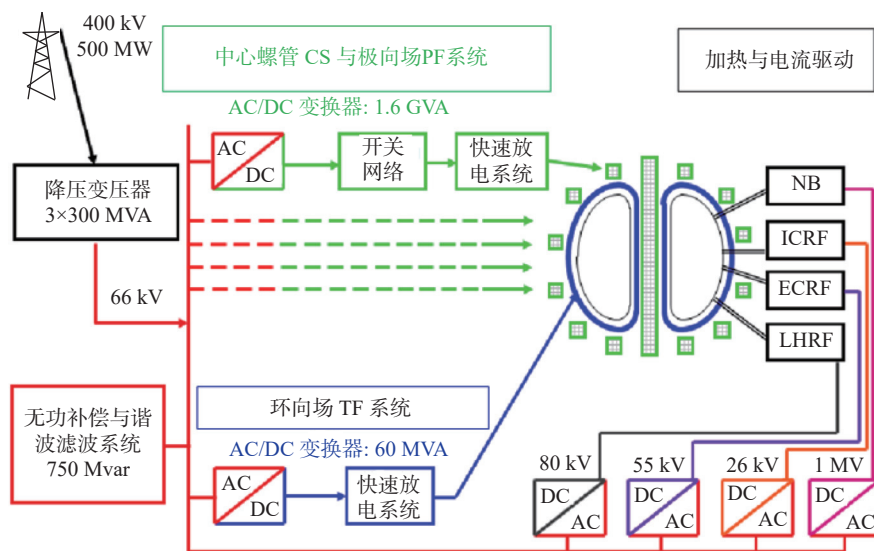


图2 ITER电源系统组成

Fig. 2 Principle of tokamak fusion device

由于超导材料具有零电阻特性, 导通电流下的能量损耗极低, 可以作为一种有效的储能装置, 且能够流通相较于常规导体高达十几倍以上的电流, 并相应地产生十几倍以上的磁场^[1]。在 ITER 托卡马克聚变装置中, 等离子体电流 15 MA, 温度达到数亿度, 故采用了超导磁体作为产生高强磁场的线圈, 其对应电源系统需要快速控制等离子体的不同位置与

形状, 并保证等离子体不接触器壁。

ITER 托卡马克聚变装置, 主要由 18 个环向场线圈 TF、6 个极向场线圈 PF 以及包含 6 个独立绕包模块的中心螺管线圈 CS 组成, 此外还包括部分校正线圈 CCS 等^[12]。ITER 变流器电源的结构示意如图 3 所示, 具体各线圈的变流器电源参数如表 1 所示。

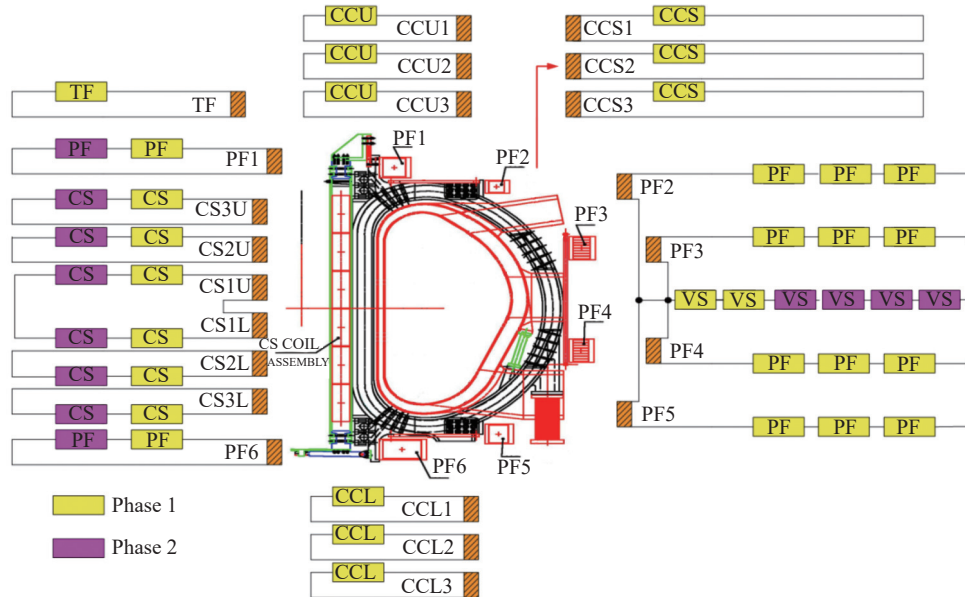


图 3 ITER 主要线圈的变流器电源结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of converter power supply structure of ITER main coil

表 1 ITER 主要线圈的变流器电源额定参数

Tab. 1 Rated power supply parameters of ITER main coil

线圈	额定电流/kA	额定电压/V
TF	68	900
PF	55	1 350
CS	45	1 350
VS	22.5	1 350
CC	10	100/450

3 ITER 磁体电源国内实施

3.1 我国对 ITER 磁体电源系统的优化设计

我国于 2005 年开始正式介入 ITER 电源工作, 原采用的 FDR2001 设计方案, 其内旁通和故障抑制能力具有较大风险和设计缺陷, 主要包括: 在超导磁体电源系统中内旁通不能正常运行; 不能满足故障抑制能力要求; 存在系统过电压和低频振荡^[13]。

针对以上设计风险和缺陷, 国内科研人员提出

了如下电源优化设计方案:

1) 用外旁通代替原设计中的内旁通, 使超导线圈电流具有稳定续航通路, 系统安全性和可靠性大大提高, 如图 4 所示。

2) 采用晶闸管整流桥反并联代替原来的晶闸管反并联设计方案, 大大减少系统最大故障电流 (原 440 kA 降至 320 kA), 提高系统故障抑制能力, 如图 5 所示。

3) 采用多变流器单元串联顺序控制方式来减少系统最大无功, 系统无功可以降低 30% 左右, 从原来的 1 000 MVar 左右降低到 750 MVar 左右。无功容量的降低可以减少甩负荷时系统的过电压和低频振荡, 如图 6 所示。

中方于 2008 年初, 针对 ITER 磁体电源系统原设计方案, 提出了存在的相关问题, 并通过以上外旁通、晶闸管整流桥以及串联顺序控制结构等方面的优化设计与试验验证, 极大降低了 ITER 装置运行的

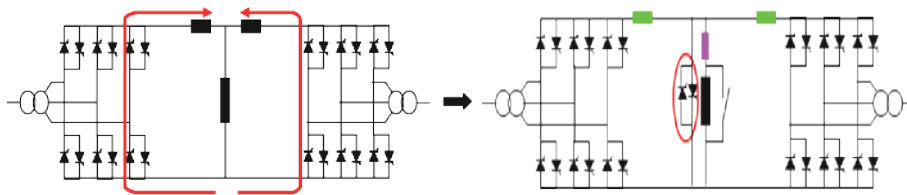


图 4 外旁通优化设计

Fig. 4 Optimization design for external bypass

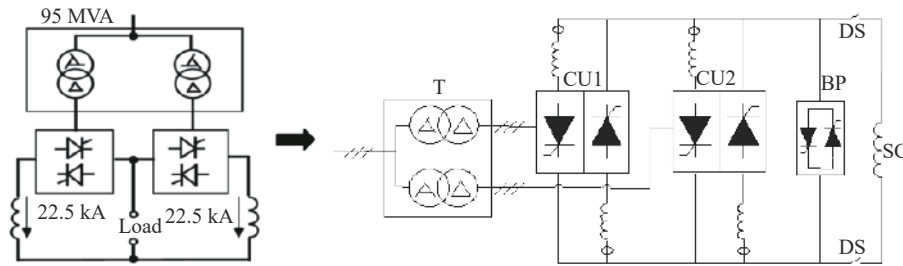


图 5 晶闸管整流桥优化设计

Fig. 5 Optimization design of thyristor rectifier bridge

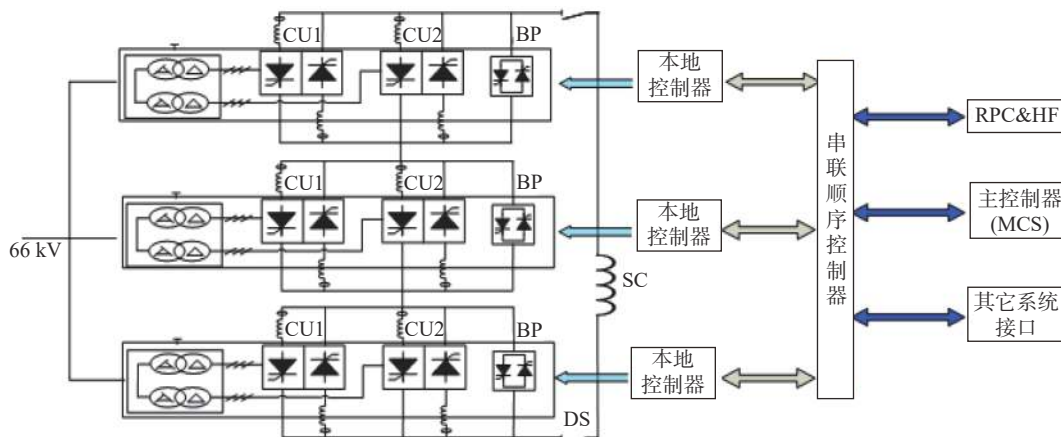


图 6 串联顺序控制结构

Fig. 6 Control structure of series sequence

故障风险,证明了中方提供设计方案的合理性与正确性。ITER 组织与其他六方最终在 2009 年 12 月 IO-DA 会议上同意中方方案,该磁体电源优化设计方案的提出,也为我国争取了大量采购包份额。

3.2 国内承担的磁体电源采购包

中科院合肥研究院等离子体物理研究所,是 ITER 建设计划中国工作组的主要依托单位之一,承担了中国采购包的绝大部分研发任务^[14],主要包括高压变电站、变流系统和无功补偿系统,是 ITER 磁体电源建设的重要组成部分:

1) 变流器电源系统采购包

变流器电源系统能够输出快速变化的电流波形,并根据聚变装置等离子体的位置、形状,进行电流大小实时控制,是 ITER 装置实现成功且安全磁约束聚变反应的关键。该系统包括多组交直流变流器,交流侧电压 66 kV,直流侧最高电压 20 kV,最高电流 68 kA,装机容量 2.3 GVA。ITER 装置变流器系统是目前世界上最大功率和运行工况最复杂的系统。图 7 显示了变流器采购包的主要设备组成。

2) 无功补偿及谐波抑制系统采购包

由于电力变压器输配电以及为磁体线圈供电的

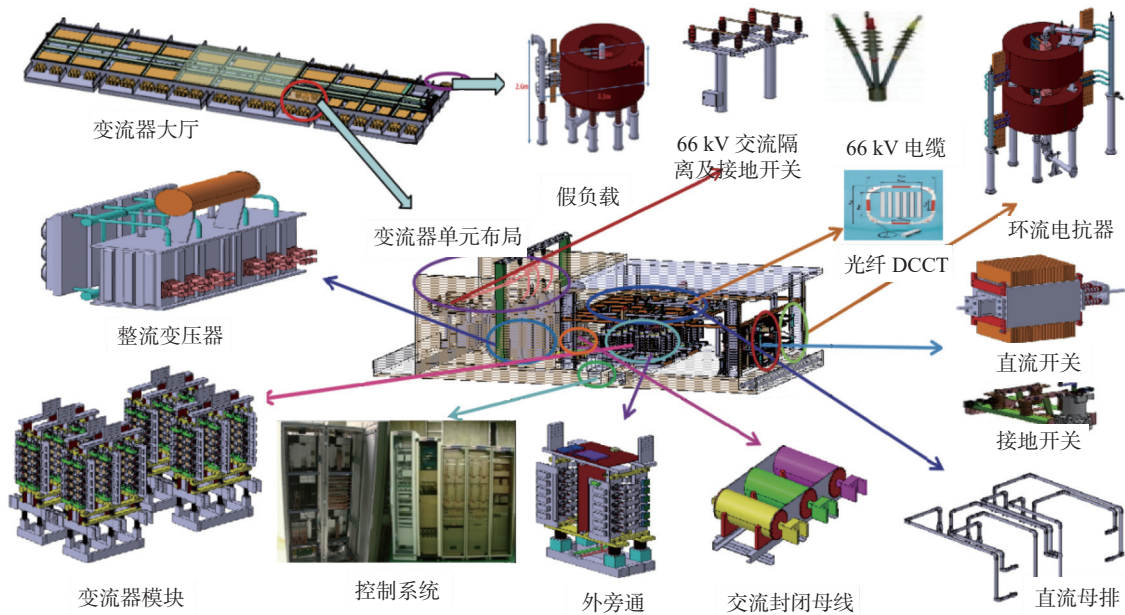


图 7 国内变流器采购包组成

Fig. 7 Composition of domestic converter procurement task

整流器等会产生大量谐波,无功补偿和谐波抑制系统可对等离子体放电过程中磁体电源及辅助加热电源产生的无功和谐波进行有效的补偿和抑制^[15],使电网免受其冲击,稳定电网电压。ITER 装置的动态负载需要 750 MVR 的大容量的可靠无功补偿和谐波抑制系统,是目前世界上运行电压最高,装机容量

最大的无功补偿和谐波抑制系统。图 8 显示了无功补偿及谐波抑制系统组成。

3) 脉冲高压变电站设备采购包

ITER 装置交流电源供电系统是由一个巨大容量的双回路 400 kV 电网组成,系统短路容量为 12 GVA,最终将达到 27 GVA。脉冲高压变电站设



图 8 无功补偿及谐波抑制系统配置

Fig. 8 Configuration of reactive power compensation and harmonic suppression system

备采购包括 400 kV 高压配电站的全部设备,包括 400 kV 和 66 kV 等级相应的主变压器,高压开关,高压互感器,高压电缆,保护与集成及部分 22 kV 开关成套设备,将双回路 400 kV 电压通过三组 300 MVA 变压器变到 66 kV 并通过母线供给各类负荷。其中 400 kV、66 kV 和 22 kV 等级高压开关均采用 SF₆ 技术。由于该变电站设备电压等级和我国通用产品不同,需要专门设计和研制,并要符合法国电网标准。高压变电站主要设备与参数如表 2 所示。

表 2 脉冲高压变电站主要设备与技术参数

Tab. 2 Main equipment and technical parameters of pulse high voltage substation

设备	基本参数
变压器	300 MVA油变,电压等级: 400/66/22 kV
断路器	400 kV和66 kV等级,1 ~ 5 kA, SF ₆
隔离(接地)开关	400 kV和66 kV等级,1 ~ 5 kA
避雷器	400 kV和66 kV等级
互感器	400 kV和66 kV等级 测量/保护级不等
高压电缆	66 kV和30 kV等级,无卤铠装
成套开关	22 kV等级, SF ₆ 开关

为了满足 ITER 电源系统国内采购包的测试需要,2011 年等离子体物理研究所将所内双回路 110 kV 高压变电站容量从 81 MVA 升级为 340 MVA,并建立了获得 CNAS 认证的交、直流测试平台,可提供如表 3 所示实验能力^[16],该测试平台在为 ITER 电源相关设备测试之外,还可以满足日益发展的中国电气工业产品测试需求,为国民经济发展做出贡献。

表 3 交、直流测试平台实验能力

Tab. 3 Experimental capability of AC and DC test platform

直流测试平台		交流短路脉冲测试平台	
最大脉冲电流	500 kA	动稳定电流(峰值)	450 kA
稳态连续电流	120 kA	最大输出电压	400 V
最大输出电压	2 kV	热稳定电流/持续时间	150 kA/2 s
输出功率可调	0 ~ 250 MW	输出功率可调	0 ~ 100 MW

4 结论

本文简要介绍了 ITER 计划的历史及其主要发展历程,针对超导磁体电源系统,说明了其在 ITER 聚变装置中的重要作用以及组成部分。文中还叙述了我国对磁体电源系统中,包括外旁通、整流桥与变流器控制结构的优化设计。最后,重点对国内承担

的磁体电源采购包在 ITER 装置中的作用与主要参数进行了介绍。

依托掌握的聚变工程核心技术,参与国际 ITER 计划科研项目,既能够实现我国聚变技术产业发展,锻炼和培养出一批极具国际竞争力、掌握 ITER 相关知识产权的工程技术人才和国际项目管理专业人才,提升了我国在国际聚变领域的竞争力和影响力。

参考文献:

- [1] 王乃彦. 聚变能及其未来 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. WANG N Y. Fusion energy and its future [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [2] 叶华龙. 核聚变能源的开发与利用 [J]. 中国高科技, 2020(23): 41-42. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4137.2020.23.016. YE H L. Development and utilization of nuclear fusion energy [J]. China High-Tech, 2020(23): 41-42. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4137.2020.23.016.
- [3] PINES V, PINES V, CHAIT A, et al. Nuclear fusion reactions in deuterated metals [J]. Physical Review C, 2020, 101(4): 044609. DOI: 10.1103/physrevc.101.044609.
- [4] WOODS L C. Theory of tokamak transport: new aspects for nuclear fusion reactor design [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley-VCH, 2006.
- [5] 张一鸣, 曾丽萍, 沈欣媛, 等. ITER 计划与聚变能发展战略 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33(4): 359-365. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2013.04.012. ZHANG Y M, ZENG L P, SHEN X Y, et al. ITER project and fusion energy development strategy [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2013, 33(4): 359-365. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2013.04.012.
- [6] 冯开明. 可控核聚变与 ITER 计划 [J]. 现代电力, 2006, 23(5): 82-88. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.013. FENG K M. Controlled fusion and the ITER project [J]. Modern Power, 2006, 23(5): 82-88. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.013.
- [7] 邢超, 吴凤凤. 大科学工程项目管理实施借鉴——以 ITER 项目为例 [J]. 核科学与工程, 2017, 37(3): 341-347. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2017.03.001. XING C, WU F F. Revelation to mega science project implementation—from ITER project [J]. Nuclear Science and Engineering, 2017, 37(3): 341-347. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2017.03.001.
- [8] ROSHAL A, AVANESOV S, KOKTSINSKAYA E, et al. Design and analysis of switching network units for the ITER coil power supply system [J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(6-8): 1450-1453. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.01.032.
- [9] MONDINO P L. The ITER pulsed power supply system [C]// IEEE. 17th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, San Diego CA USA, 6th Nov., 1997. USA: IEEE, 1997: 491-496.
- [10] 傅鹏. 国际聚变堆 ITER 装置电源系统综述 [J]. 电力电子技术, 2014, 48(12): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2014.12.001.

- FU P. Summary of power supply system for ITER unit of international fusion reactor [J]. *Power Electronic Technology*, 2014, 48(12): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2014.12.001.
- [11] 李春杏. 浅谈超导材料的应用与发展 [J]. *科技创新导报*, 2009(29): 222. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2009.29.029.
- LI C X. Application and development of superconductor materials [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009(29): 222. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2009.29.029.
- [12] TAO J, BENFATTO I, GOFF J K, et al. ITER coil power supply and distribution system [J]. *IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering*, 2011, 166(12): 1-8. DOI: 10.1109/SOFE.2011.6052201.
- [13] 刘正之. 国际热核试验堆(ITER)超导磁体变流电源系统基准设计之回顾 [C]// 中国电源学会. 全国特种电源技术学术交流会, 成都, 2012-09. 成都: 中国电源学会, 2012: 45-51.
- LIU Z Z. Retrospection on the baseline design of converter power supply system for superconductive magnets of ITER [C]// China Power Society. National Symposium on Special Power Technology, Chengdu, Sep., 2012. Chengdu: China Power Society, 2012: 45-51.
- [14] 罗德隆, 宋云涛, 段旭如, 等. 中国ITER计划采购包进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学(英文版)*, 2019, 49(4): 15-25. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00285.
- LUO D L, SONG Y T, DUAN X R, et al. Progress of ITER procurement package in China [J]. *Science China(Physics, Mechanics and Astronomy)*, 2019, 49(4): 15-25. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00285.
- [15] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- LUO A. Technology and equipment of harmonic control and reactive power compensation in power grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [16] WANG X D. Operation analysis and upgrade scheme design of high power test platform [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.

作者简介:



胡星光

胡星光(第一作者)

1992-, 男, 安徽巢湖人, 博士, 博士后, 研究方向为失超保护系统、电气设备研制、大容量直流开关技术(e-mail)xghu@ipp.ac.cn。



宋执权

宋执权(通信作者)

1975-, 男, 安徽肥东人, 博士, 研究员, 研究方向为大功率电力电子变换技术、大功率直流开关技术以及强磁场下的电磁兼容分析(e-mail)zhquansong@ipp.ac.cn。

高格

1975-, 女, 安徽安庆人, 博士, 研究员, 研究方向为托卡马克磁体电源及其控制技术研究(e-mail)gg@ipp.ac.cn。

李华

1984-, 男, 湖北黄冈人, 博士, 助理研究员, 研究方向为大功率聚变电源系统及大功率直流开关技术(e-mail)lihua@ipp.ac.cn。

傅鹏

1962-, 男, 湖北英山人, 博士, 研究员, 研究方向为聚变装置的电源及其控制系统(e-mail)fupeng@ipp.ac.cn。

李航

1989-, 男, 山东日照人, 博士, 助理教授, 研究方向为聚变堆位形设计研究(e-mail)lih@szu.edu.cn。

(责任编辑 李辉)

中国与国际热核聚变实验堆组织合作建设世界最大“人造太阳”

国际热核聚变实验堆计划旨在模拟太阳发光发热的核聚变过程, 探索受控核聚变技术商业化可行性。国际热核聚变实验堆是一个能产生大规模核聚变反应的托卡马克, 俗称“人造太阳”。中科院等离子体所自 2009 年 10 月正式签订 ITER 计划国内采购包制造任务首份合同以来, 深度参与 ITER 计划, 承担了导体、校正场线圈、超导馈线、电源、诊断、安装等采购包, 占中国承担 ITER 采购包任务的绝大部分, 为 ITER 计划的顺利推进作出了重要贡献。通过自主研发, 等离子体所掌握了一系列聚变工程关键技术, 承担的 ITER 任务 100% 国产化并以优异的性能指标通过国际评估, 交付进度和产品质量 100% 满足 ITER 要求, 在 ITER 七方中居前列, 创造多项第一, 获得 ITER 组织高度赞誉。2020 年 7 月 28 日, 国际热核聚变实验堆计划重大工程安装启动仪式在法国 ITER 总部举行。国家主席习近平致贺信指出, 计划实施以来, 中方始终恪守国际承诺, 中国企业和科研人员勇挑重担, 与国际同行齐心协力, 为计划的顺利推进贡献了中国智慧和力量。

(中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所 宋执权)