

引用格式: 许一泽, 林睿, 王思巍. 基于超级电容器的核聚变磁体电源系统环形场线圈电源设计 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 117-125. XU Yize, LIN Rui, WANG Siwei. Supercapacitor-based toroidal field coil power supply design for nuclear fusion magnet power system [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 117-125. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.13.

# 基于超级电容器的核聚变磁体电源系统环形场线圈电源设计

许一泽<sup>✉</sup>, 林睿, 王思巍

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 研究旨在为核聚变磁体电源系统中的环形场线圈开发一种高效可靠的脉冲电源系统。针对核聚变装置在高功率需求下的挑战, 提出了一种基于超级电容器的电源解决方案, 旨在增强能量存储的效率和系统的稳定性。[方法] 通过采用模块化多级转换器技术, 开发了一种新型的脉冲电源结构。利用超级电容器的高功率密度和快速充放电能力, 作为主要的能量存储单元, 以满足环形场线圈的高频脉冲运行需求。此外, 探讨了超级电容器与模块化多级转换器技术结合的优势, 如系统的灵活性和可扩展性。[结果] 研究结果显示, 所开发的电源系统能够有效支持核聚变反应堆的脉冲操作需求, 确保了能量的高效输送和转换。[结论] 基于超级电容器的脉冲电源系统为核聚变装置提供了一种有效的能量解决方案。该系统不仅提高了能量转换的效率, 也增强了整个设备的运行稳定性和可靠性。未来的研究将进一步优化电源结构和性能, 以适应更广泛的应用场景。

**关键词:** 核聚变磁体电源系统; 飞轮发电机; 环形场线圈; 超级电容器; 模块化多电平转换器

中图分类号: TL4; TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0117-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.13

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Supercapacitor-Based Toroidal Field Coil Power Supply Design for Nuclear Fusion Magnet Power System

XU Yize<sup>✉</sup>, LIN Rui, WANG Siwei

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] This study aims to develop an efficient and reliable pulse power supply system based on supercapacitors (SC) for toroidal field (TF) coils in nuclear fusion magnet power systems to address high power demands while improving energy storage efficiency and system stability. [Method] A pioneering pulse power supply structure was devised employing Modular Multilevel Converter (MMC) technology, leveraging the high power density and swift charging-discharging capabilities of SC as primary energy storage units. This design targeted the high-frequency pulse operation requirements of TF coils. Additionally, the benefits of integrating supercapacitors with MMC technology, including system flexibility and scalability, were explored. [Result] The study demonstrates that the developed power supply system effectively meets the pulse operation requirements of nuclear fusion reactors, guaranteeing efficient energy delivery and conversion. [Conclusion] The supercapacitor-based pulse power supply system offers an efficient energy solution for nuclear fusion devices, enhancing energy conversion efficiency, operational stability and device reliability. Subsequent research will focus on optimizing the power structure and performance for diverse applications.

**Key words:** Nuclear fusion magnet power system; flywheel generator; toroidal field coil; supercapacitor; modular multilevel converter

收稿日期: 2024-03-29 修回日期: 2024-04-22

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目“热核聚变发电岛概念设计研究”(CEEC2021-ZDYF-08)

2095-8676 © 2024 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/>).

## 0 引言

世界上已建成或在建的大中型托卡马克 (Tokamak) 装置主要包括: 韩国的 KSTAR、欧洲的 JET、我国的 EAST、日本的 JT-60SA 以及由多国政府合作共同投资建造的 ITER 项目<sup>[1]</sup>。根据负荷运行容量及供电能量, 不同装置采用的供电方式和配电方案也不相同。目前主流的方式是由电网直接供电<sup>[2-3]</sup>, 但 Tokamak 装置中存在着较大的大容量、波动性冲击功率问题, 另外目前 Tokamak 反应堆暂不具备稳态运行条件, 其供电系统必须设计成能够支持脉冲运行, 这也加剧了电源侧波动。因此在 Tokamak 装置的电源系统设计和运行时, 电源系统与电网的兼容性是不可忽略的重要因素<sup>[4-5]</sup>。

为此, 核聚变装置如我国的 HL-2A 和 HL-2M 采取脉冲供电系统进行供电, 通过切换电路 300 MV·A 脉冲发电机组可分别向环向场 (TF) 线圈电源和极向场 (PF) 线圈电源供电, 其原理图如图 1 所示。脉冲发电机组采取立式结构飞轮发电机 (FG), 由 300 MV·A 同步发电机和 8.5 MW 绕线式异步电动机同轴组成<sup>[6]</sup>。

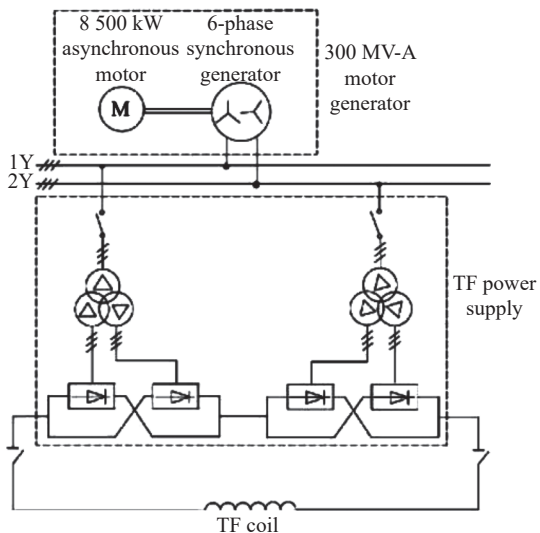


图 1 HL-2M 采取脉冲供电系统为 TF 线圈供电示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the pulse power supply system for the TF coil in HL-2M

尽管 FG 提供了重要的功率支撑, 但它在发生重

大故障或需要快速响应时存在局限。FG 的机械结构和运行机制限制了其快速动态响应能力, 而且市场上缺乏可以快速替换的同类设备, 这在紧急情况下可能会导致电源系统的不稳定。此外, FG 的维护成本高且寿命相对较短, 特别是在高频率启停的操作环境下更为明显<sup>[6]</sup>。自本世纪之初以来, 模块化多级转换器 (MMC) 因其应用于大功率设备和高压直流 (HVDC) 传输系统的潜力而广受关注<sup>[7-9]</sup>。与传统的两级转换器相比, MMC 展示了多个优势: 它提供了可扩展的输出电压、分散的能量存储, 并且在出现故障时, 可以更换损坏的子模块 (SM)<sup>[10]</sup>。目前这些优势特性在核聚变领域越发受到重视。

另一方面, 超级电容器 (SC) 因其高功率密度而闻名, 一些基于 SC 的托卡马克线圈高功率需求的应用已在开发中<sup>[11]</sup>。表 1 显示了 SC、FG、常见电池和标准电容器之间的比较: SC 的功率密度高于锂离子电池 (高达 5~10 kW/kg), 但其能量密度显著较低<sup>[12]</sup>; 由于它们的材料组成和设计结构, SC 也具有较低的等效串联电阻。这些特性导致了更高的效率、更大的电流充放电能力和更低的热损失。得益于它们的高功率密度, SC 有几个潜在的应用领域, 但它们主要用于不间断电源系统和混合动力电动汽车<sup>[13]</sup>。

表 1 在能量密度和功率密度方面对 SC、FG 和常见电池比较

Tab. 1 Comparison of SC, FG, and common batteries in terms of energy density and power density

参数	电池	飞轮发电机	超级电容器
能量密度/(Wh·kg <sup>-1</sup> )	10~200	5~50	1~10
功率密度/(kW·kg <sup>-1</sup> )	0.03~0.50	0.3~1.2	5~10

为了增加 SM 的储能, SC 代表了一个值得探索的有前途的替代方案。然而, SC 不能直接连接到线圈上, 它们需要一个合适的转换拓扑结构能够以受控方式驱动它的输出电流。实际上, 在脉冲期间, 为了确保适当的等离子体约束, 环形磁场波动不得超过固定值。由于它严格依赖于环形场线圈电流波动 (在第 4 节中定义), 必须采用能够控制该电流的合适转换器。文章将 MMC 的电容器替换为超级电

SC 模块, 构建出一个为聚变应用开发的基于 SC 的脉冲系统电源。

对于反应堆脉冲负荷, 因为 PF 线圈需要控制和调整等离子体的形状和位置, 这需要电源系统具有高度的动态响应能力和调节灵活性, 故研究针对 PF 线圈进行 MMC 电源转换拓扑设计开展较早<sup>[14-17]</sup>, 文章中不再详述。文章将着重针对反应堆脉冲负荷中的 TF 线圈供电进行基于 SC 的电源设计。考虑到 TF 线圈的性能直接影响到整个聚变系统的稳定性与效率, 且其在反应堆脉冲运行条件下负荷占比高, 这使得对其供电性能的深入了解尤为关键。

### 1 TF 线圈的 MMC 电源拓扑结构

以 HL-2M 项目举例, TF 线圈由 FG 组合二极管换流器供电。多个串联的非超导 TF 线圈可等效为一个电感串电阻的负载。图 2 显示了 HL-2M 项目 TF 线圈在典型的等离子体脉冲周期内的主要电气需求。电流首先增加, 然后在平顶阶段保持平滑和恒定, 最后在脉冲结束时减少。TF 线圈的阻抗几乎完全恒定, 并且与托卡马克的其他负载解耦。电流的增加和减少不是理想的平顶波, 因为电流控制是通过修改 FG 的励磁电压直接实现的, 而 FG 有一个较大的时间常数。另外可见 TF 电流增加阶段电压

比平顶阶段高, 而平顶阶段电压是一个恒定值, 以覆盖欧姆损耗。托卡马克实际电源的详细描述可以在相关文献中找到<sup>[18]</sup>。

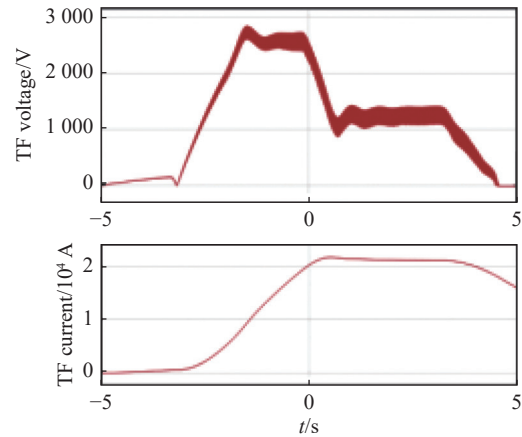


图 2 托卡马克 TF 线圈的电压、电流(0 值左侧为上升阶段, 0 值右侧为平顶阶段)

Fig. 2 Voltage and current of the tokamak TF coil (ramp-up phase on the left of zero value, and flat-top phase on the right of zero value)

MMC 拓扑结构如图 3 所示, 主要用于高压直流输电(HVDC)、中压应用和柔性交流输电系统。常规三相 MMC 换流器拓扑结构由六个臂组成, 每个臂包含  $n$  个单元的串联连接和一个电感  $L$ 。每个单

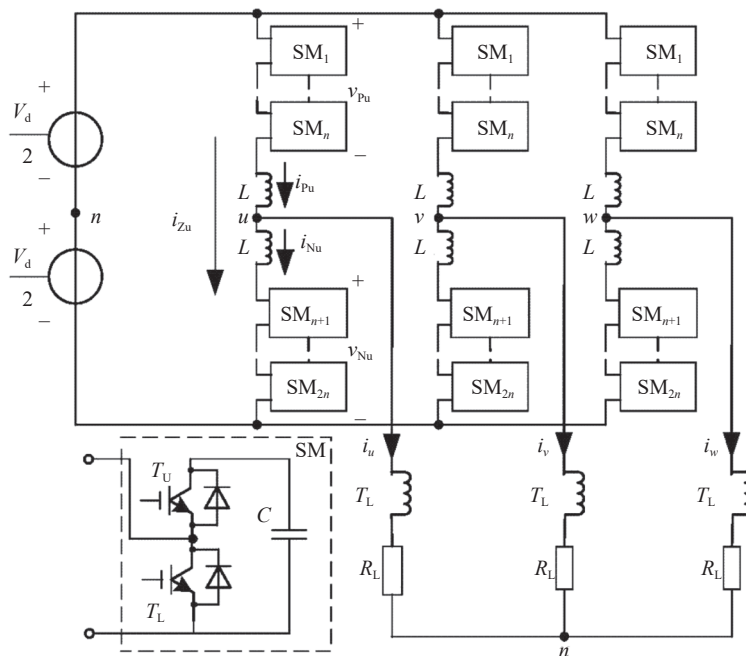


图 3 传统 MCC 结构搭配三相负载

Fig. 3 Traditional MCC structure with three-phase load

元(或切换模块 SM)包含两个 IGBT 和一个电容器组成的半桥。电容器充电电压为  $V_c$ , 该电压受到流经三相负载的相电流的影响。每个 SM 可以在两种不同状态之间切换, 如图 4 所示。

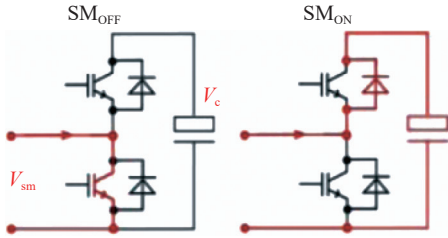


图 4 半桥开关状态

Fig. 4 Half-bridge on/off state

ON-状态: 电流通过上部开关流动( $V_{sm} = V_c$ );

OFF-状态: 电流通过下部开关流动( $V_{sm} = 0$ )。

如果  $n$  个单元中的  $r$  个处于 ON-状态(其中  $0 \leq r \leq n$ ), 这  $r$  个电容器的电压之和将在相应的相上产生<sup>[19]</sup>。这种换流器的主要优点如下: (1)可扩展的电压; (2)可以替换故障的模块; (3)存储的能量分布在 SM 中, 因此在出现故障时可以更好地处理; (4)结构简单。

实现这种拓扑的挑战来自于大量的半导体和门控单元, 导致控制器较为复杂。为了满足替换 FG 的需要而设计的 MMC 拓扑的简化版本如图 5 所示。它由 MMC 拓扑的单个臂组成(因为 TF 线圈是单相

负载), 其中电容被 SC 模块替换, 且能够通过多个 SM 的并行操作有选择地增加总输出电流。在文章提出的系统中, SC 被用作 MMC 子模块中的能量存储组件, 替代传统的电容器。这种替代增强了系统的能量存储能力和快速响应特性。通过精确控制每个子模块的开关状态, 系统可以在极短的时间内从存储状态转换到能量释放状态, 满足核聚变装置对快速动态响应的需求。结合使用 SC 和 MMC 允许系统实现更高的能量密度与功率密度, 同时提高了系统的总体效率和可靠性。SC 的快速充放电特性与 MMC 的高效电能转换能力相结合, 使得本系统能够更有效地管理大规模能量的快速流动, 特别是在核聚变装置的脉冲运行模式下。

MMC 电源部分由三相整流器组成, 它整流来自 50 Hz 母线的电压和电流, 并在 SM 开关的帮助下为 SC 模块充电, 充电过程将在下一节中详细讨论。每一行(定义为  $m$  个并行且同步的 SM)拥有一个“行控制器”和  $m$  个单元控制器: 行控制器只与其行的第一个和最后一个 SM 通讯(环形拓扑), 门控信号、电压、电流、温度和 SM 状态信息在相邻的单元控制器之间交换。

分布式时钟方法确保了 SM 间的同步: 每个单元控制器都有自己的时钟, 该时钟与参考时钟(通常是行的第一个 SM 的时钟)同步; 在网络初始化期间, 计算并补偿单元控制器之间的抖动。每行首尾二条

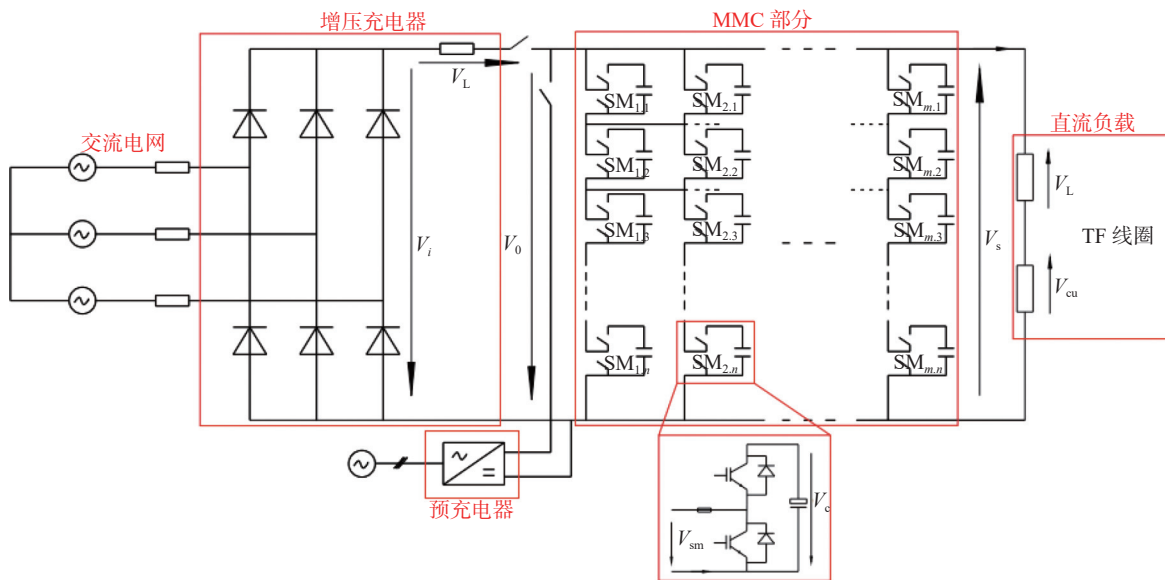


图 5 TF 电源 MMC 拓扑结构

Fig. 5 MMC topology of the TF power supply

通讯路径在一个 SM 故障时保证冗余性<sup>[20]</sup>。SM 的故障由单元控制器本地管理(行控制器仅接收有关它们状态的信息): 通过一个额外的开关, 其单元控制器将隔离故障 SM, 不影响行的运作, 并且由于臂间连接, 电流将通过其他  $m-1$  个 SM 流动。主控制器通过与  $n$  行控制器的主通讯总线通讯, 从中接收电压、电流和行状态信息, 并最终实现电流控制, 根据它们的电压水平选择连接/断开哪些行。这种方法在可扩展性方面是最佳的, 因为一旦开发出所需的功率电子设备, 无论能源需求有多大, 总阵列都可以复制。

仿真的每个 SC 模块由 48 个 2.7 V 的电容器串联组成, 额定电压为 130 V, 电容量为 71 F, 峰值电流为 2 kA。根据提出的拓扑结构, 为了供应 TF 线圈的所有负载, 将需要 23 行串联( $n$ )和 30 个并行( $m$ )模块, 以达到 3 kV 电压(包括 400 V 的安全余量)和脉冲期间所需的 20 kA 电流, 这意味着大约需要 700 个超级电容器模块。

## 2 充电阶段

充电过程分为两个子阶段: 预充电阶段和增压充电阶段(图 6)。预充电阶段是通过低功率降压整

流器实现的: 它同时为各 SC 模块充电并逐渐达到增压充电阶段所需的电压。在增压充电阶段中, SC 模块通过基于增压整流器的充电器被充至其满电压, 该充电器借助功率 IGBT 实现, 从而具有可扩展性。在此阶段, 电感以充电电流变化率  $di/dt$  首先存储能量, 然后将此能量用于给 SC 充电。为了将电感器存储的能量转移到 SC 上, 电感器的电流变化率  $di_L/dt$  必须为负值(电感的能量表达式为  $0.5LI^2$ , 这里  $L$  是电感值,  $I$  是通过电感的电流。电流的任何变化都会影响在电感中存储的能量)。电感器两端的电压由以下公式给出:

$$V_L \approx V_i - V_0 \quad (1)$$

其中  $V_0$  定义为充电器的输出电压, 其数值必须高于输入电压  $V_i$ 。因此需要额外配置预充电设备。

为了更好地理解充电过程, 对从单个 SC 模块的电压电流波形进行了仿真, 如图 7 所示。

考虑到电压和电流限制条件(仿真选择了单个 SC 额定 10 A, 预充上限 70 V)以及拓扑结构中并行模块的数量, 一个 40 kW 的预充电器需要大约 10 min 时间, 以 300 A 的总电流(30 个并行模块)将每一组超级电容器模块充电至 70 V。增压充电阶段的限制条件为可用的功率和充电时间: 前者为交流电网的

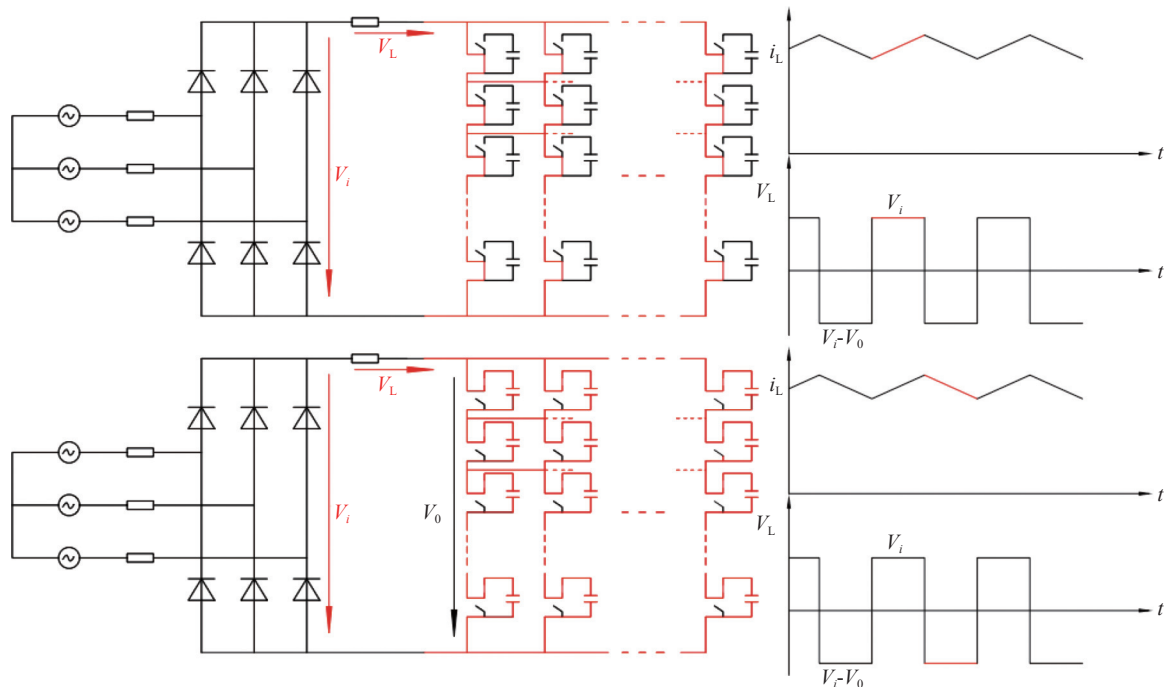


图 6 预充电阶段和增压充电阶段示意

Fig. 6 Schematic diagram of the pre-charging and boost-charging phases

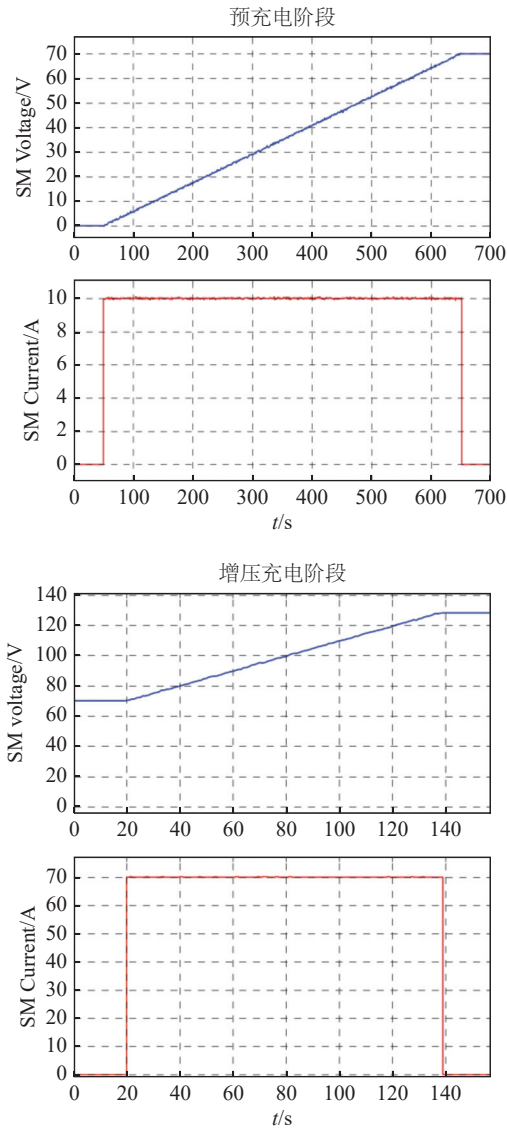


图 7 SC 模块在预充电及增压充电阶段电流及电压波形  
Fig. 7 Current and voltage waveforms of the SC module during the pre-charging and boost-charging stages

最大可提供功率(仿真中假设为 5 MW), 后者则应尽量缩短; 在总充电电流为 2.1 kA(每支臂 70 A)和输入电压为 1.5 kV 的条件下, 充电器需大约 120 s 将超级电容器模块充至满电压。

### 3 放电阶段

一旦 SC 完全充电, 它们即准备通过储存的能量为线圈供电。出于此目的, 充电电路与 SM 断开连接, 并仅将它们与线圈相连。在此阶段, 系统拓扑可由图 5 右侧部分所示, 其中 TF 线圈由串联的 RL 电路表示( $V_L$  表示穿过线圈电感的电压,  $V_{cu}$  表示穿过

其电阻的电压降), 而 SM 矩阵则可以视作可变电压源。

在电流上升阶段, 流过 TF 线圈的电流应尽可能快速地提升至 20 kA 或更高(更快的上升阶段意味着在此时间框架内更少的能量损失), 为此, 电源输出电压需要最大化, 意味着所有可用的矩阵行都将被利用以保持输出电压尽可能高。

平顶阶段至关重要: 在此阶段, 电流应保持在约高位一段时间(依据等离子体脉冲的要求而定), 但实际上, 线圈电流会出现波动( $\Delta i$ ), 其必须维持  $i$  在  $i_{Coils}$  电流值的 0.1% 以下。 $\Delta i$  定义为:

$$\Delta i \approx \frac{V_s - V_{cu}}{L_{Coils}} t_{on/off} \quad (2)$$

式中:

$V_s$  ——电源电压(V);

$V_{cu}$  ——等效电阻压降(V);

$t_{on}$  ——( $V_s - V_{cu}$ ) 为正( $\Delta i$  为正)的时间(s);

$t_{off}$  ——( $V_s - V_{cu}$ ) 为负( $\Delta i$  为负)的时间(s)。

图 8 展示了高频开关状态下放大后的平顶阶段电流及电压波形理想状态(忽略了由  $\Delta i$  和 SC 电压损失引起的  $V_{cu}$  变化), 并用虚线强调了在  $t_{on}$  和  $t_{off}$  期间  $V_s$  的假定值。从图 6 的电路可以清楚看出, 当  $V_s > V_{cu}$  时,  $i_{Coils}$  增加; 而当  $V_s < V_{cu}$  时, 它按照  $|V_s - V_{cu}|$  的斜率减少, 然后这一差值被最小化。最小化  $|V_s - V_{cu}|$  意味着  $V_s$  采用最接近  $V_{cu}$  的可用值( $\Delta V$  取决于 MMC 拓扑可操作的最小单位)。提高 IGBT 的切换频率同样可以限制  $\Delta i$  ( $t_{on}/t_{off}$  会减小), 但这将增加功率电子的切换损失, 并减少 SC 的寿命。因此, 将尽

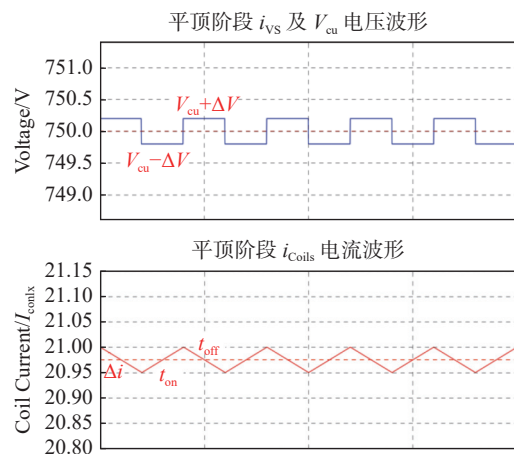


图 8 TF 线圈在平顶阶段电流及电压波形  
Fig. 8 Current and voltage waveforms of the TF coil during the flat-top phase

量保持尽可能低的切换频率, 而降低电流波动的首选方法是调整电压。

在电流下降阶段, SM 被短路, TF 线圈的能量在其内部电阻中耗散。此阶段内,  $i_{\text{Coils}}$  的变化为负, 一旦线圈中储存的所有能量耗尽, 该变化量变为零。原则上, 这些能量可以被回收, 并用于为 SC 充电。但在此场合, 切换模块必须是 IGBT 全桥而不是半桥<sup>[21]</sup>, 这会导致功率电子的导通损失翻倍, 因为在全桥配置中, 两个 IGBT 将持续导电, 而在半桥配置中只有一个导电。

完整脉冲阶段的波形仿真如图 9 所示。其展示了标准 30 s 脉冲期间的  $i_{\text{Coils}}$ 、 $V_s$  和所需功率, 可见与图 2 的 FG 脉冲电源相比, 设计得到的仿真曲线与其基本一致, 且响应速度更快。而图 10 展示了在等离子体脉冲期间单个 SC 模块的电压和电流曲线。在平顶阶段, SC 主要用于补偿铜损失, 此时它们处于高频切换操作模式。从线圈的角度看, 一个 4 Hz 的切换频率足以将电流波动保持在 0.1% 以下, 但为了保持 SC 电压的平衡, 它们会以更高的频率运行。

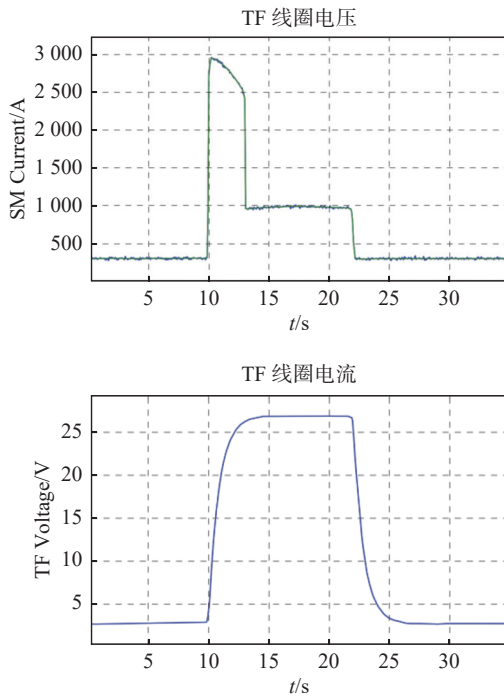


图 9 TF 线圈在标准 10 s 脉冲期间的电压和电流

Fig. 9 Voltage and current of the TF coil during a standard 10-second pulse period

#### 4 经济性分析

初始投资成本方面根据市场调查和供应商报价,

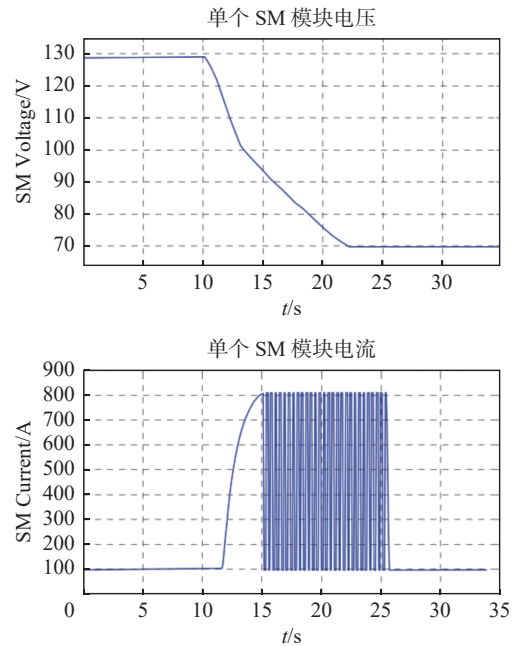


图 10 SC 单个模块在标准 10 s 脉冲期间的电压和电流

Fig. 10 Voltage and current of a single SC module during a standard 10-second pulse period

单个 MMC 模块的平均成本为 3 万元 ~ 10 万元不等, 具体取决于技术规格和采购量。超级电容器的成本则在 1.5 万元 ~ 3.5 万元每单位, 依容量和材料类型而异。飞轮系统的能量密度较低, 对于大规模能量存储系统而言, 成本会迅速增加。

运行和维护成本方面, SC 系统的平均效率为 90% ~ 95%, 而传统飞轮系统的效率为 85% ~ 90%。高效率意味着在相同能量输出下, 超级电容器系统的能耗更低。

维护成本方面, SC 的维护成本大约为每年系统总成本的 1%, 主要是检查和替换监控系统部件; 相比之下, 飞轮系统因涉及机械运动部件, 维护成本高达总成本的 3% ~ 5%。

从长期经济效益看, SC 系统的寿命可达 10 ~ 15 a, 而飞轮系统的平均寿命为 8 ~ 10 a。考虑到较长的使用寿命和较低的维护频率, 超级电容器系统的总拥有成本在整个生命周期中可能比传统系统低 20% ~ 30%。

#### 5 结论

文章介绍了一种基于 SC 的 TF 线圈供电方案, 该方案提出了一种可能替代 FG 为 Tokamak 反应

TF 线圈供电的可能性,并详细论述了方案的实施方法与优势。文章采用了 MMC 的拓扑结构来将 SC 的能量转化为托卡马克线圈的电能,此结构的高单元数比 FG 提供了更高的灵活性,并且在某些模块出现故障时,转换器仍能继续运行,而 FG 则不能做到这一点。方案同时提出了主控制器、行控制器和 SM 控制器的通信架构,通过可扩展的功率模块和集中-分散控制方法,可满足超高功率线圈电源“无限”可扩展性的需求。

文章的仿真计算基于理想化的 SM 假设,没有考虑在实际应用中可能出现的子模块之间的环流问题和电压不平衡问题。尽管这些假设简化了设计和仿真过程,能够集中研究基于超级电容器的脉冲电源系统的基本特性,但实际操作中,子模块的非理想特性可能对系统性能产生重要影响。未来的研究可以进一步探索这些实际问题,特别是研究环流抑制和电压平衡控制策略,以提高系统的实际应用性能和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 胡星光,宋执权,高格,等. ITER 聚变装置及其电源系统 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 19-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002).
- [2] SHIMOMURA Y, SPEARS W. Review of the ITER project [J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2004, 14(2): 1369-1375. DOI: [10.1109/TASC.2004.830580](https://doi.org/10.1109/TASC.2004.830580).
- [3] 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](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2014.12.001).
- [4] 熊连松,修连成,王慧敏,等. 储能系统抑制电网功率振荡的机理研究 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(20): 4373-4380. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181506](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181506).
- [5] 梁展鹏,向魁,李华,等. CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007).
- [6] 宣伟民,彭建飞,李华俊,等. 300 MVA 脉冲发电机系统研制进展 [C]//刘永. 2013 核工业西南物理研究院年报. 成都: 四川科学技术出版社, 2014: 98-100.
- [7] DEKKA A, WU B, FUENTES R L, et al. Evolution of topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters [J]. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2017, 5(4): 1631-1656. DOI: [10.1109/jestpe.2017.2742938](https://doi.org/10.1109/jestpe.2017.2742938).
- [8] RODRIGUEZ J, FRANQUELO L G, KOURO S, et al. Multilevel converters: an enabling technology for high-power applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(11): 1786-1817. DOI: [10.1109/JPROC.2009.2030235](https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2030235).
- [9] ABU-RUB H, HOLTZ J, RODRIGUEZ J, et al. Medium-voltage multilevel converters-state of the art, challenges, and requirements in industrial applications [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2010, 57(8): 2581-2596. DOI: [10.1109/TIE.2010.2043039](https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2043039).
- [10] DENG F J, LU Y Q, LIU C K, et al. Overview on submodule topologies, modeling, modulation, control schemes, fault diagnosis, and tolerant control strategies of modular multilevel converters [J]. *Chinese journal of electrical engineering*, 2020, 6(1): 1-21. DOI: [10.23919/CJEE.2020.000001](https://doi.org/10.23919/CJEE.2020.000001).
- [11] LAMPASI A, ROMANO R, COCCHI A, et al. Poloidal power supply system of the Divertor Tokamak Test (DTT) facility [C]//Proceedings of the IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Palermo, Italy, July 15, 2020. Palermo: IEEE, 2020: 634-639. DOI: [10.1109/MELECON48756.2020.9140640](https://doi.org/10.1109/MELECON48756.2020.9140640).
- [12] 乔亮波,张晓虎,孙现众,等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(1): 98-106. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0229](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0229).
- [13] SHI L S, CROW M L. Comparison of ultracapacitor electric circuit models [C]//Proceedings of 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, July 20-24, 2008. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-6. DOI: [10.1109/PES.2008.4596576](https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596576).
- [14] GAIO E, FERRO A, MAISTRELLO A, et al. The EU DEMO plant electrical system: issues and perspective [J]. *Fusion energy storage techniques for CFETR fusion power plant* [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007).
- [15] HU X G, SONG Z Q, GAO G, et al. ITER fusion device and its power supply system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 19-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002).
- [16] FU P. Introduction of power supply system for international fusion reactor ITER [J]. *Power electronics*, 2014, 48(12): 1-7. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2014.12.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2014.12.001).
- [17] XIONG L S, XIU L C, WANG H M, et al. Mechanism of energy storage system to suppress grid power oscillations [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2019, 34(20): 4373-4380. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181506](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181506).
- [18] LIANG Z P, XIANG K, LI H, et al. Applicability analysis of energy storage techniques for CFETR fusion power plant [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007).



- engineering and design, 2020, 156: 111728. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2020.111728](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111728).
- [15] NEUMEYER C, BENFATTO I, HOURTOULE J, et al. ITER power supply innovations and advances [C]//Proceedings of the IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE), San Francisco, CA, USA, June 10-14, 2013. Francisco: IEEE, 2013: 1-8. DOI: [10.1109/SOFE.2013.6635287](https://doi.org/10.1109/SOFE.2013.6635287).
- [16] FERRO A, LUNARDON F, CIATTAGLIA S, et al. The reactive power demand in DEMO: estimations and study of mitigation via a novel design approach for base converters [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 146: 2687-2691. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2019.04.085](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.04.085).
- [17] 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](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.01.032).
- [18] 徐玉麟, 彭建飞, 卜明南, 等. 300 MV·A 脉冲发电机组向 HL-2M 装置环向场供电仿真研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(6): 065002. DOI: [10.11884/HPLPB202234.210477](https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210477).  
XU Y L, PENG J F, BU M N, et al. Simulation of 300 MV·A motor generator feeding the toroidal field power supply [J]. *High power laser and particle beams*, 2022, 34(6): 065002. DOI: [10.11884/HPLPB202234.210477](https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210477).
- [19] 钱峰, 罗钢, 杨银国, 等. 一种并网 MMC 的直流电压控制特性分析方法: CN201710936117.4 [P]. 2021-05-28.  
QIAN F, LUO G, YANG Y G, et al. A method for analyzing DC voltage control characteristics of grid-connected MMCs: CN201710936117.4 [P]. 2021-05-28.
- [20] BURLACU P D, MATHE L, REJAS M, et al. Implementation of fault tolerant control for modular multilevel converter using EtherCAT communication [C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain, March 17-19, 2015. Seville: IEEE, 2015: 3064-3071. DOI: [10.1109/ICIT.2015.7125551](https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125551).
- [21] KALLA U K, VERMA A, SINGH B, et al. A controller for cascaded h-bridge multilevel inverter [C]//Proceedings of the IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India, November 25-27, 2016. Bikaner: IEEE, 2016: 1-6. DOI: [10.1109/POWERI.2016.8077312](https://doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077312).

## 作者简介:



许一泽

许一泽 (第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统分析运行和电力系统智能技术(e-mail) [305989424@qq.com](mailto:305989424@qq.com)。

林睿

1979-, 女, 正高级工程师, 研究方向为各类型发电及电力工程技术(e-mail) [linrui@gedi.com.cn](mailto:linrui@gedi.com.cn)。

王思巍

2000-, 男, 工程师, 研究方向为可再生能源并网和智能电网交互能源系统(e-mail) [570061829@qq.com](mailto:570061829@qq.com)。

(编辑 徐嘉铖)

## 广 告

“受控核聚变工程技术”专刊封面-----	封一
中核集团牵头! 可控核聚变创新联合体成立-----	封二
“受控核聚变工程技术”专刊特约主编寄语-----	A1
“受控核聚变工程技术”专刊客座编辑-----	A2
中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所-----	159
华中科技大学聚变与等离子体研究所-----	160
东华理工大学核科学与工程学院“天环一号”-----	161
中山大学中法核工程与技术学院-----	162
中国核工业集团公司核工业西南物理研究院-----	封三
“受控核聚变工程技术”专刊封底-----	封四