

引用格式: 苏杭, 李华, 宋执权, 等. 混合式新型聚变电源概念设计 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 1-9. SU Hang, LI Hua, SONG Zhiqian, et al. Conceptual design of novel fusion power supply with energy storage [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-029.

混合式新型聚变电源概念设计

苏杭¹, 李华^{2,✉}, 宋执权², 徐猛², 李振瀚³, 吴乾坤¹

- (1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽合肥 230000;
2. 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 230000;
3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽合肥 230000)

摘要: [目的]近年来, 聚变装置的装机容量在不断增加, 其电源系统需要输出高幅值、长脉冲的功率, 对电网造成了极强的功率冲击, 严重时会导致电源脱网, 严重威胁聚变装置的安全。同时, 高幅值脉冲也使电源系统的设计存在大量冗余。[方法]为了解决这两个问题, 提出了带储能装置的新型聚变电源拓扑, 通过在电源系统中加装储能装置, 缓冲脉冲功率对电网的冲击。在电源运行过程中, 电网提供稳态功率, 储能装置提供脉冲功率, 有效降低电源的成本。[结果]根据工业供配电经验, 得出了不同拓扑中主要元件的选型计算公式。最终根据仿真数据, 对不同电源拓扑的成本展开分析对比。[结论]证明了新型电源不仅可以减小对电网的功率冲击, 提高电源系统的能量利用率, 也可以降低变压器容量, 具有一定的成本优势。

关键词: 聚变电源; 功率冲击; 储能; 托卡马克; 极向场电源

中图分类号: TL4; TL62

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0001-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-029

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



论文二维码

Conceptual Design of Novel Fusion Power Supply with Energy Storage

SU Hang¹, LI Hua^{2,✉}, SONG Zhiqian², XU Meng², LI Zhenhan³, WU Qiankun¹

- (1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230000, Anhui, China;
2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230000, Anhui, China;
3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] In recent years, as the installed capacity of the fusion device has been increasing, the power supply system of the device requires high-amplitude and long-pulse power output, which causes a strong power impact on the grid, and even power supply disconnection in severe cases to pose a serious threat to the safety of the fusion device. Additionally, the high-amplitude pulses also result in a lot of redundancy in the power supply system design. [Method] To solve these problems, this paper proposed a novel fusion power supply topology with energy storage, that is, the power supply system was designed with energy storage to mitigate the impact of pulse power on the grid. During the operation of the power supply, the grid provided steady-state power while the energy storage device delivered pulse power, effectively reducing the cost of the power supply. [Result] According to the experience in industrial power supply and distribution, this paper presents the calculation formulas for the selection of key components in different topologies and conducts a cost analysis and comparison for different power supply topologies based on simulation data. [Conclusion] The experimental results show that the new power supply topology not only reduces the power impact on the grid and improves the energy utilization of the power supply system, but also reduces transformer capacity, thus it is cost-efficient.

Key words: fusion power supply; power impact; energy storage; Tokamak; polar field power supply

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/>).

收稿日期: 2024-01-26 修回日期: 2024-03-14

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)

0 引言

托卡马克装置是最有希望实现聚变发电的技术。近年来,各个国家都在对这项技术加大投入,托卡马克装置的装机容量也在不断增加,部分大型聚变装置的电源参数见表 1^[1-5]。为了实现稳定可控的核聚变反应,托卡马克的超导磁体电源需要输出百兆瓦级的脉冲功率,用于产生约束等离子体的强磁场^[6]。以国际热核聚变实验堆组织(ITER)为例,它的脉冲功率需要达到毫秒级的响应速度,幅值高达 260 MW,每个脉冲周期持续时间长达数百秒^[7-8],这对电网造成了极大的功率冲击,在实验的过程中,可能会造成电源脱网、放电中断等意外事故,严重威胁聚变装置运行安全^[10]。电源产生的无功功率会导致电网电压的有效值下降,电压波形发生畸变等问题,可以通过无功补偿装置进行补偿,但有功功率较难处理^[11],它会导致电网中临近负荷的发电机转子发生震荡,导致电网稳定性下降,严重时甚至会造成电网解体。可见,功率冲击是聚变领域的一个难题。

表 1 聚变装置电源参数^[1-5]

Tab. 1 Fusion device power supply parameters^[1-5]

聚变装置	ITER	ASDEX-U	JT-60SA	KSTAR	JET
电网电压/kV	400	110	275	154	400
主变压器容量/MVA	900	16	388	100	900
脉冲发电机容量/MVA	—	571	615	200	400
磁体电源容量/MVA	2 243	600	256.2	227.5	939
辅助加热电源容量/MVA	270	95	128	28	320

解决这个难题最直接的办法就是增加电网容量,但这种做法的经济性很差。在托卡马克的运行周期里,脉冲功率输出时间占比很小,大多数时间都输出幅值远小于脉冲功率的稳态功率^[10],这造成了极大的浪费。图 1 为 ITER 电源的功率输出曲线,可以看到脉冲功率的输出时间占比不足整个周期的 20%,幅值为稳态功率的数倍。而且,电网的容量受当地经济政策的影响较大,以德国的 ASDEX-U 为例,所在地的电网容量只有 16 MVA,如果想要达到装置运行所需的 600 MVA,需要扩容 37.5 倍,这将带来沉重的经济负担。

加装脉冲发电机是常用的措施^[12-14],在多个托卡马克中得到了应用。ASDEX-U 的电源系统几乎全

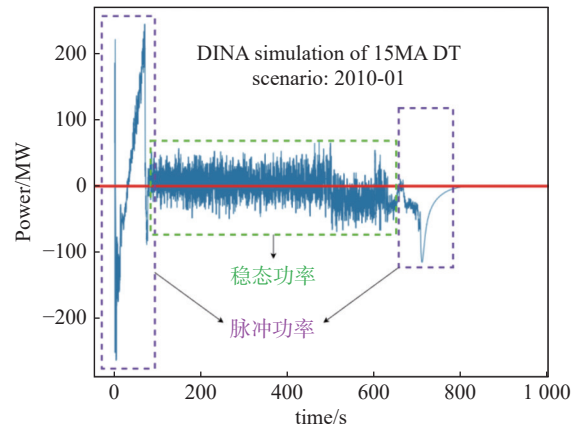


图 1 ITER 电源系统总功率曲线

Fig. 1 Total power curve of ITER power supply system

部使用脉冲发电机供电,可满足短时实验的要求^[13]。KSTAR 也部署了脉冲发电机作为功率补充^[14],避免因功率冲击造成失稳脱网。但是脉冲发电机的发电时间比较短,无法支撑起分钟级的脉冲能量输出,不能匹配当前托卡马克的运行工况。而且脉冲发电机组的运行维护的成本和复杂度较高,综上,脉冲发电机并不是解决该问题的最佳选择。

近年来,加装储能元件是电网对抗功率波动的重要手段之一^[15]。随着技术的发展和政策的支持,越来越多的可再生能源发电厂接入网,截止 2021 年,在中国的电力系统中,可再生能源发电装机容量接近 40%^[16]。受自然环境的影响,新能源发电带有强烈的波动性,大量入网让电网的稳定性有所下降。为了改善电能质量,电力公司会部署部分储能装置,大部分为抽水蓄能(约占 80%),剩下的部分以锂离子电池为主,用以补充短时功率不平衡,2021 年,中国抽水蓄能电站累计装机容量超过 3.4 GW,新型储能装机容量达 4 GW^[17]。储能技术同样也可以用在托卡马克装置上,用于补偿巨大的脉冲功率冲击^[18]。储能技术在解决功率冲击这个问题上的优势非常明显,首先,它在电网中得到了广泛的应用,在电力工业界积累了大量的经验^[19-20],产业成熟度较高;其次,储能元件可通过电力电子变流器快速精准地输出托卡马克装置所需的功率;最后,部署储能装置可以有效减小变压器容量,会带来一定的经济性。

当前聚变电源的设计参数为最大脉冲值,但在托卡马克装置的运行周期中,如图 1 所示,脉冲功率时间只占 20% 左右,80% 的时间里,电源的输出功

率远小于脉冲峰值功率,电源系统的容量利用率非常低。在加装储能装置后,脉冲功率由储能装置提供,稳态功率由电网提供,可以有效降低电源系统的参数需求,降低主变压器和整流变压器的容量,减小断路器、母线等元件的成本。

1 传统聚变电源拓扑介绍

传统的托卡马克电源系统的拓扑结构^[21-23]如图2所示,电源通过1台或多台主变压器接入电网,每个超导磁体都需要一个AC/DC变流器,每台变流器的整流变压器接入到主变压器二次侧的汇流母线上。这种拓扑的容量利用率很低,所有的功率均来自电网,在脉冲工况下会对电网产生很大的冲击。

该种拓扑的参数计算方法如下:

步骤1:计算主变压器容量。

$$P_{MT} = \max(|P_{all}(t)|) \quad (1)$$

$$C_{MT} \geq 1.35 \times P_{MT} \quad (2)$$

式中:

- P_{MT} ——流经主变压器的最大功率(MW);
- $P_{all}(t)$ ——所有超导磁体总功率的瞬时值(MW);
- max ——最大值函数;
- C_{MT} ——变压器的容量(MVA)。

步骤2:计算整流变压器容量。

$$P_{i,RT} = \max(|P_i(t)|) \quad (3)$$

$$C_{i,RT} \geq 1.35 \times P_{i,RT} \quad (4)$$

式中:

- $P_{i,RT}$ ——流经第*i*个整流变压器的最大功率值(MW);

$P_i(t)$ ——第*i*个超导磁体在*t*时刻的瞬时功率值(MW);

$C_{i,RT}$ ——第*i*个整流变压器的容量(MVA)。

一般来说 $P_{MT} < \sum P_{i,RT}$, $C_{MT} < \sum C_{i,RT}$,因为各个磁体的功率尖峰处在不同的时刻,所以流过主变压器的峰值功率小于整流变压器的峰值功率之和。

2 新型聚变电源拓扑概念设计

目前,世界各国的学者对核聚变电源装置中的储能元件研究较少,文章[11]针对ITER的运行工况,提出了使用超级电容器为电源系统提供功率补偿的方案,既可以提供无功功率补偿,也可以提供有功功率补偿;文章[25]针对ASDEX-U提出了MMC与超级电容结合的TF场电源设计方案;文章[10]提出了储能装置与电网共同供电的混合储能方案。

根据上述文章中设计思路,对储能装置的部署方式提出了新方案。在传统的集中式拓扑和分布式拓扑的基础上,提出了混合式拓扑,兼顾集中式和分布式的特点,节省储能装置和整流变压器的容量,这种拓扑的具体特征将在2.3中详细介绍。

2.1 分布式储能电源拓扑

分布式储能电源拓扑如图3所示,将储能装置分散地部署到每个超导磁体的整流变压器二次侧。负载所需要的脉冲功率由储能装置提供,脉冲功率不经过主变压器和整流变压器。与传统的变流器拓扑相比,这种拓扑节省了主变压器和整流变压器的容量。但是由于每个储能装置只能就近补偿处在同一个整流变压器二次侧的负载,容量利用率不高,造

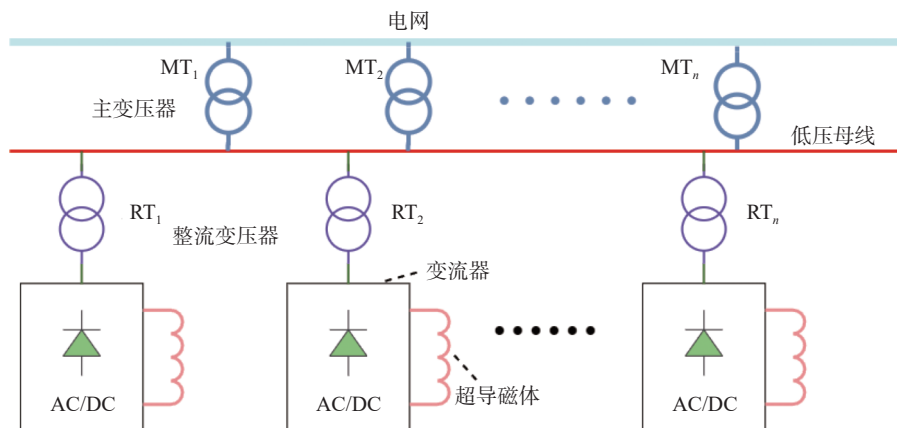


图2 传统变流器聚变电源拓扑

Fig. 2 Traditional converter fusion power supply topology

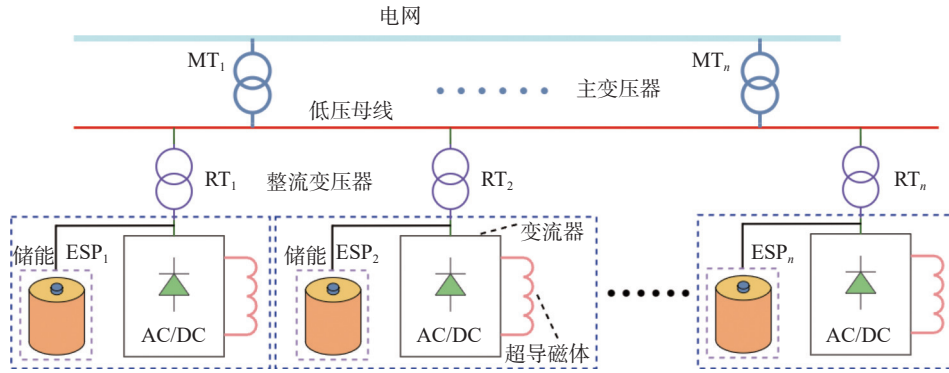


图 3 分布式储能电源拓扑

Fig. 3 Distributed energy storage power supply topology

成了一定程度的资源浪费。

这种拓扑的参数计算如下：

步骤 1: 首先划分稳态功率和脉冲功率。根据仿真结果, 使用三倍平均值来等效替代稳态值, 计算过程如下:

$$P_{i,st} = 3 \times \text{mean}(|P_i(t)|) \quad (5)$$

式中:

$P_{i,st}$ ——第 i 个磁体的稳态功率值(MW);
 mean ——平均值函数。

步骤 2: 计算整流变压器的容量。

$$P_{i,RT} = P_{i,st} \quad (6)$$

$$C_{i,RT} \geq 1.35 \times P_{i,RT} \quad (7)$$

步骤 3: 计算主变压器的容量。

$$C_{MT} \geq 1.35 \times \sum P_{i,RT} \quad (8)$$

步骤 4: 计算储能装置的容量。

$$P_{i,E} \geq \max(|P_i(t)|) - P_{i,RT} \quad (9)$$

$$E_i(t) = \int_0^t P_i(x) dx \quad (10)$$

$$C_{i,E} \geq 1.35 \times \max(E_i(t)) \quad (11)$$

式中:

$P_{i,E}$ ——第 i 个超导磁体的储能装置需要输出的功率值(MW);

$E_i(t)$ ——第 i 个超导磁体所包含的能量(kWh);

$C_{i,E}$ ——第 i 个储能装置的容量(kWh)。

2.2 集中式储能电源拓扑

如图 4 所示, 集中式拓扑的特点是将储能装置集中部署到主变压器二次侧的母线上, 负载所需要的脉冲功率由储能元件提供。这种方式可减小了主变压器的容量。在这个拓扑中, 能量从储能元件到超导磁体的过程中仍然需要经过整流变压器, 所以与传统的变流器拓扑对比, 整流变压器的容量没有降低。由于储能元件集中部署, 相比于分布式拓扑, 其容量利用率大大提高, 所需的容量有所减小, 节约了一部分成本。

这种拓扑的参数计算如下:

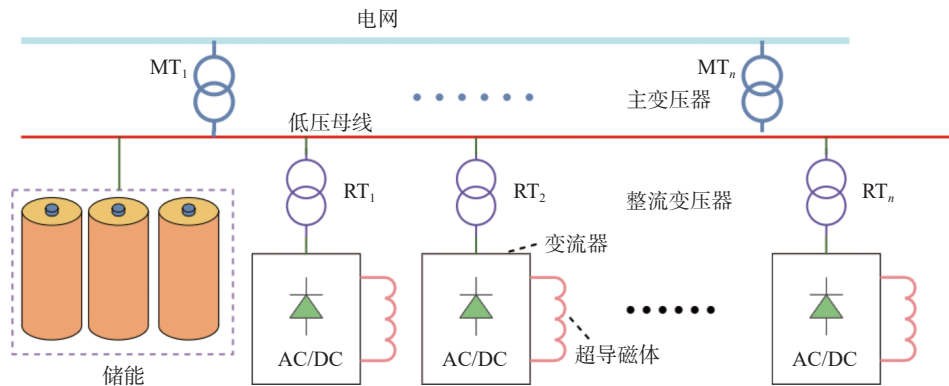


图 4 集中式储能电源拓扑图

Fig. 4 Centralized energy storage power supply topology

步骤 1: 同 2.1 中的步骤 1, 使用公式(5)求稳态功率值。

步骤 2: 计算主变压器的容量。

$$P_{MT} = |P_{all,st}| \quad (12)$$

$$C_{MT} \geq 1.35 \times P_{MT} \quad (13)$$

式中:

$P_{all,st}$ ——所有磁体稳态功率之和(MW)。

步骤 3: 计算整流变压器的容量, 数值和计算方法与 2.1 中相同。

$$P_{i,RT} = \max(|P_i(t)|) \quad (14)$$

$$C_{i,RT} \geq 1.35 \times P_{i,RT} \quad (15)$$

步骤 4: 计算储能装置的容量。

$$P_E \geq \max(|P_{all}(t)|) - P_{MT} \quad (16)$$

$$E(t) = \int_0^t P_{all}(x) dx \quad (17)$$

$$C_E \geq 1.35 \times \max(E(t)) \quad (18)$$

式中:

$P_{all}(t)$ ——所有超导磁体总功率的瞬时值(MW);

C_E ——储能装置的容量(kWh)。

2.3 混合式储能电源拓扑

混合式拓扑的结构如图 5 所示, 它是分布式拓扑的改进型, 将储能装置连接到多个整流变压器二次侧, 使多个超导磁体共用一个储能装置。

与分布式拓扑对比, 这样的好处是节省储能装置的容量。原因在于不同磁体所需的功率和能量之间存在一定的互补关系。如果二者共用一套储能装置,

可以节省储能装置的容量, 而且这种拓扑还具有分布式拓扑的优点, 可同时节省整流变压器的容量。基于此原理, 该拓扑可以有效降低储能装置的容量, 同时也不需要大容量的整流变压器和主变压器, 节约了成本。

然而, 混合式拓扑的控制难度明显高于另外两种拓扑, 它需要控制系统合理分配有限的功率和能量。除此之外, 同一个储能装置连接了多个磁体, 缺乏有效的隔离, 为系统的安全运行带来了一定的隐患, 也为电源系统和超导磁体的保护工作带来了一定的难度。

这种拓扑的参数计算如下:

步骤 1: 主变压器和整流变压器的容量方法计算与 2.2 章节中的步骤 1、步骤 2 以及步骤 3 一致, 故不再赘述。

步骤 2: 筛选出适合共用一个储能装置的磁体电源。一般采用遍历循环的方式, 也可使用优化算法, 寻找出价格最低的最优组合。

步骤 3: 计算储能系统的容量。为了便于说明, 假设超导磁体 i 和超导磁体 j 共用一个储能装置。

$$P_{E,(i,j)} \geq \max(|P_i(t) + P_j(t)| - |P_{i,st} + P_{j,st}|) \quad (19)$$

$$E_{i,j}(t) = \int_0^t P_i(x) + P_j(x) dx \quad (20)$$

$$C_E \geq 1.35 \times \max(E_{i,j}(t)) \quad (21)$$

式中:

$P_{E,(i,j)}$ ——储能装置的功率容量(MW);

$E_{i,j}(t)$ ——磁体 i 和磁体 j 所需求的能量(kWh)。

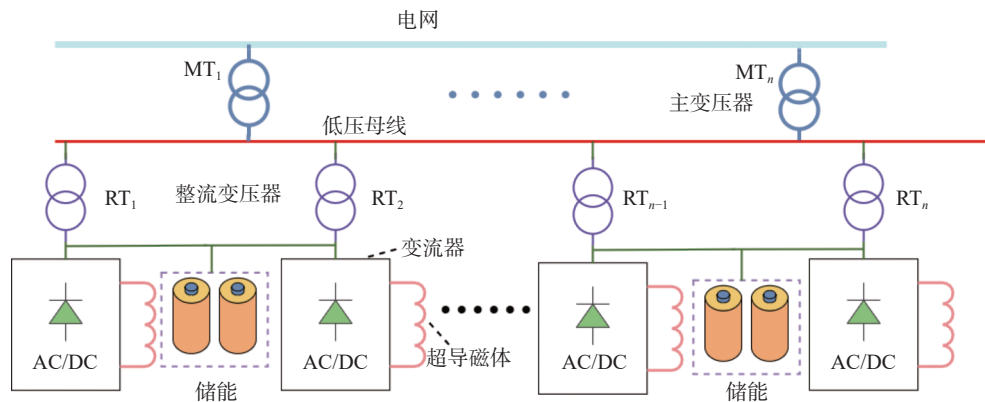


图 5 混合式储能电源拓扑图

Fig. 5 Hybrid energy storage power supply topology

3 成本分析

为了证明储能式新型聚变电源在经济上的可行性,选取国际热核聚变实验堆组织(ITER)DINA simulation of 15MA DT scenario: 2010-01 场景的仿真数据进行成本计算。

首先利用上文中提到的计算公式,对新型电源系统中的主要元器件进行容量计算。再根据计算得到的容量进行参数选型,并确定其价格。一般来说,电气设备的报价都会随时间变化,为保证成本比较的公平性,所有变压器报价来自参考文献[10]。为了满足长时间高倍率的放电需求,储能设备初步选择为锂离子电池^[26-30],报价来自参考文献[31-32]。

3.1 四种拓扑的参数与价格

主变压器和整流变压器的参数及价格如表 2 和表 3 所示。储能装置的参数与价格如表 4 与表 5 所示。

表 2 主变压器参数及价格

Tab. 2 Main transformer parameters and prices

拓扑	电压等级 /kV	容量 /MVA	变压器价格/ M \$	高压变电站价格/ M \$
传统电源拓扑	220	360	2	23
分布式储能电源拓扑	110	250	1.6	5.7
集中式储能电源拓扑	110	120	1	5.7
混合式储能电源拓扑	110	250	1.6	5.7

表 3 整流变压器参数及价格

Tab. 3 Rectifier transformer parameters and prices

拓扑		PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	CS1	CS2U	CS2L	CS3U	CS3L
传统电源拓扑	容量/MW	65	80	140	85	115	45	175	65	80	115	45
	成本/M \$	1.35	1.4	2	1.45	1.7	1	2.8	1.35	1.4	1.7	1
分布式储能电源拓扑	容量/MW	10	30	45	30	60	30	45	30	30	10	10
	成本/M \$	0.18	0.4	1	0.4	1.25	0.4	1	0.4	0.4	0.18	0.18
集中式储能电源拓扑	容量/MW	65	80	140	85	115	45	175	65	80	115	45
	成本/M \$	1.35	1.4	2	1.45	1.7	1	2.8	1.35	1.4	1.7	1
混合式储能电源拓扑	容量/MW	10	30	45	30	60	30	45	30	30	10	10
	成本/M \$	0.18	0.4	1	0.4	1.25	0.4	1	0.4	0.4	0.18	0.18

表 4 分布式和集中式储能装置参数表

Tab. 4 Parameters of distributed and centralized energy storage

拓扑		PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	CS1	CS2U	CS2L	CS3U	CS3L	
分布式储能电源拓扑	功率/MW	41	40	58	41.6	50.7	15.5	100	44	41.5	63.9	27.7	
	容量/kWh	177	111	396	301	471	459	549	176	182	187	119	
	成本/M \$	2.1	2.0	3.0	2.2	2.7	0.8	5.1	1.7	1.6	1.9	1.4	
	总成本/M \$	24.5											
集中式储能电源拓扑	功率/MW							178.63					
	容量/MWh							1.11					
	成本/M \$							9.21					

3.2 四种拓扑的对比与讨论

在加装储能装置后,变压器的容量明显下降。尤其是在分布式拓扑中,主变压器和整流变压器的成本大幅降低。在集中式拓扑中,整流变压器的容

量没有减小,仅仅是降低了主变压器容量,通过表 4 中的数据可知,该拓扑对储能装置的容量要求较低,相比于分布式拓扑,储能装置的成本从 2450 万美元降低至 921 万美元,降低了 62.41%。在表 6 中可以

表5 混合式储能装置参数表
Tab. 5 Parameters of hybrid energy storage

拓扑	PF1和CS1	PF2和PF5	PF3和PF4	PF6和CS2L	CS3U和CS3L	CS2U
功率/ MW	92.7	10.67	8.1	34.8	65.6	44
容量/ kWh	403	577	692	611	296	176
成本/ M \$	4.735 75	6.777 5	0.578	1.892 75	3.354	1.694
总成本/ M \$	12.93					

看到,集中式拓扑的总成本低于分布式拓扑。而表5所列出的混合式拓扑,储能装置的成本略高于集中式拓扑,但该拓扑的整流变压器容量与分布式拓扑的相同,远低于集中式拓扑,所以总成本最低。

表6 四种拓扑的成本对比
Tab. 6 Cost comparison of the four topologies

参数	主变 压器	高压 变电站	储能	整流 变压器	总成本
传统电源拓扑价格/M \$	2	23	-	17.15	87.15
分布式储能电源 拓扑价格/M \$	1.6	5.7	24.5	5.79	82.59
集中式储能电源 拓扑价格/M \$	1	5.7	9.21	17.15	78.06
混合式储能电源 拓扑价格/M \$	1.6	5.7	12.93	5.79	71.02

通过表6可知,在加装储能装置后,电源系统的总成本会有所下降。其中贡献最大的就是主变压器及高压变电站。因储能装置承担了高幅值的脉冲功率,主变压器的容量大大减小,接入电网的电压等级也由220 kV降至110 kV,节约了高压变电站的成本。同时,整流变压器也节约了大部分成本,尤其是在混合式拓扑中,通过两个功率互补的磁体共用一个储能装置,在降低储能装置的成本同时,还兼顾了整流变压器的成本,在这四种拓扑中成本最低。

4 结论

为应对聚变装置对电网的功率冲击,减小电源系统的设计冗余,一种附带储能装置的新型聚变电源拓扑被提出。聚变装置的脉冲功率由储能提供,稳态功率通过主变压器从电网中获取。实现脉冲功率与电网的解耦。

传统的储能装置部署方式一般有分布式和集中式。为了降低新型电源的成本,将二者结合,提出混合式新型电源拓扑结构。可同时降低整流变压器和储能装置的容量。

最终,采用ITER电源系统的仿真数据进行成本计算。经过在不考虑控制系统成本的前提下,与传统变流器拓扑相比,混合式拓扑节约了20%的成本。

参考文献:

- [1] FU P, GAO G, SONG Z H Q, et al. Preliminary design of the poloidal field AC/DC converter system for the ITER coil power supply [J]. *Fusion science and technology*, 2013, 64(4): 741-747. DOI: 10.13182/FST13-A24094.
- [2] KÄSEMANN C P, HUART M, LIESHOUT L V, et al. Extension of the pulsed power supply network of ASDEX upgrade by a set of compact modular generators [J]. *Fusion engineering and design*, 2011, 86(6/8): 1523-1526. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.03.026.
- [3] SHIMADA K, BAULAIGUE O, CARA P, et al. Design study of an AC power supply system in JT-60SA [J]. *Fusion engineering and design*, 2011, 86(6/8): 1427-1431. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.02.097.
- [4] SONG I, EOM D, AHN H. The operation results and study of KSTAR pulsed electric power network for superconducting magnet power supply [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 143: 164-170. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.132.
- [5] BERTOLINI E, MONDINO P L, NOLL P. The JET magnet power supplies and plasma control systems [J]. *Fusion technology*, 1987, 11(1): 71-119. DOI: 10.13182/FST87-A25001.
- [6] 胡星光, 宋执权, 高格, 李华, 傅鹏, 李航. 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.

- [7] NEUMEYER C, BENFATTO I, HOURTOULE J, et al. ITER power supply innovations and advances [C]//2013 IEEE 25th symposium on fusion engineering (SOFE), San Francisco, CA, USA, June 10-14, 2013. San Francisco: IEEE, 2013: 1-8. DOI: 10.1109/SOFE.2013.6635287.
- [8] HOURTOULE J, NEUMEYER C, SUH I, et al. ITER electrical distribution system [C]//2013 IEEE 25th Symposium on fusion engineering (SOFE), San Francisco, CA, USA, June 10-14, 2013. San Francisco: IEEE, 2013: 1-5. DOI: 10.1109/SOFE.2013.6635314.
- [9] GOFF J, GASCON J, MANKANI A, et al. The ITER magnet power supplies and control system [C]//2010 International conference on electrical machines and systems, Incheon, Korea (South), October 10-13, 2010. Incheon: IEEE, 2010: 346-351.
- [10] TIAN Y X, WU Y N, LU J, et al. Research on a novel hybrid power supply scheme with energy storage technology for Tokamak [J]. International journal of energy research, 2023, 2023: 2163067. DOI: 10.1155/2023/2163067.
- [11] 李磊. ITER 电源系统冲击功率补偿策略研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
LI L. Research on impact power compensation strategy of ITER power supply system [D]. Hefei: Anhui university, 2021.
- [12] PENG J F, XUAN W H, WANG H B, et al. Study on matching a 300 MVA motor generator with an Ohmic heating power supply in HL-2M [J]. Plasma science and technology, 2013, 15(3): 300-302. DOI: 10.1088/1009-0630/15/3/22.
- [13] KÄSEMANN C P, GROIS E, STOBBE F, et al. Pulsed power supply system of the ASDEX upgrade Tokamak research facility [C]//2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, June 10-13, 2015. Rome: IEEE, 2015: 237-242.
- [14] AHN H S, LEE D K, CHOI J H, et al. Operation of KSTAR PF superconducting magnet power supplies under MG power system [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2016, 26(4): 0601204. DOI: 10.1109/TASC.2016.2522558.
- [15] SHAO C, WEI B, LIU W F, et al. Multi-dimensional value evaluation of energy storage systems in new power system based on multi-criteria decision-making [J]. Processes, 2023, 11(5): 1565. DOI: 10.3390/pr11051565.
- [16] 孙瑜歌, 丁涛, 黄雨涵, 等. 高比例新能源电力市场不同发展阶段划分及形态结构演进 [J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2725-2743. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230122.
SUN Y G, DING T, HUANG Y H, et al. Development stage division and morphological evolution of power market with high proportion of renewable energy [J]. High voltage engineering, 2023, 49(7): 2725-2743. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230122.
- [17] 国家能源局. 国家能源局公布 2021 年能源成绩单 [EB/OL]. (2021-12-24) [2022-10-25] http://www.nea.gov.cn/2021-12/24/c_1310391383.htm.
- National Energy Administration. The National Energy Administration announces the 2021 energy transcript [EB/OL]. (2021-12-24) [2022-10-25]. http://www.nea.gov.cn/2021-12/24/c_1310391383.htm.
- [18] 梁展鹏, 向魁, 李华, 朱光涛. 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.
LIANG Zhanpeng, XIANG Kui, LI Hua, ZHU Guangtao. 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.
- [19] 常晓勇. 功率型储能系统在直流微电网运行控制中的关键技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
CHANG X Y. Research on key technologies of power-type energy storage systems in DC micro-grid operation and control [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [20] 姜海洋, 杜尔顺, 马佳豪, 等. 考虑长周期供需不平衡风险的新型电力系统规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2024: 1-14. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230440.
JIANG H Y, DU E S, MA J H, et al. Power system optimal planning method considering long-term imbalance risk [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-14. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.230440.
- [21] 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.
- 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.
- [22] COLETTI A, BAULAIGUE O, CARA P, et al. JT-60SA power supply system [J]. Fusion engineering and design, 2011, 86(6/8): 1373-1376. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2011.02.042.
- [23] NOVELLO L, BAULAIGUE O, COLETTI A, et al. Overview of the new magnet power supply systems of JT-60SA procured by EU [J]. Fusion engineering and design, 2015, 98/99: 1122-1126. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.014.
- [24] CHOI J H, YANG H L, AHN H S, et al. Overview of superconducting magnet power supply system for the KSTAR 1st plasma experiment [J]. Nuclear engineering and technology, 2008, 40(6): 459-466. DOI: 10.5516/NET.2008.40.6.459.
- [25] MAGNANIMO A, TESCHKE M, GRIEPENTROG G. Full-bridge submodule development of an MMC-Like topology for ASDEX upgrade toroidal field coils power supply [J]. IEEE transactions on plasma science, 2022, 50(7): 2178-2184. DOI: 10.1109/TPS.2022.3179624.
- [26] ANEKE M, WANG M H. Energy storage technologies and real life applications-a state of the art review [J]. Applied energy, 2016, 179: 350-377. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.097.
- [27] OUDALOV A, CHARTOUNI D, OHLER C. Optimizing a

- battery energy storage system for primary frequency control [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2007, 22(3): 1259-1266. DOI: [10.1109/TPWRS.2007.901459](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901459).
- [28] VERGARA C R. Parametric interface for battery energy storage systems providing ancillary services [C]//2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, Germany, October 14-17, 2012. Berlin: IEEE, 2012: 1-7. DOI: [10.1109/ISGTEurope.2012.6465765](https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465765).
- [29] KOEHLER U, KRUGER F J, KUEMPERS J, et al. High performance nickel-metal hydride and lithium-ion batteries [C]//IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No. 97CH6203), Honolulu, HI, USA, July 27, 1997-August 01, 1997. Honolulu: IEEE, 1997: 93-98. DOI: [10.1109/IECEC.1997.659166](https://doi.org/10.1109/IECEC.1997.659166).
- [30] LUKIC S M, CAO J, BANSAL R C, et al. Energy storage systems for automotive applications [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008, 55(6): 2258-2267. DOI: [10.1109/TIE.2008.918390](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390).
- [31] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation [J]. *Applied energy*, 2015, 137: 511-536. DOI: [10.1016/j.apenergy.2014.09.081](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081).
- [32] NIKOLAIDIS P, POULLIKKAS A. Cost metrics of electrical energy storage technologies in potential power system operations [J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2018, 25: 43-59. DOI: [10.1016/j.seta.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.12.001).

作者简介:



苏杭

苏杭 (第一作者)

1999-, 男, 硕士在读, 研究方向为储能技术与大功率脉冲电源。

李华 (通信作者)

1984-, 男, 湖北黄冈人, 博士, 副研究员, 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。

(编辑 徐嘉铨)