

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.013

基于IGCT-Plus直流变压器均流问题的研究

韩迪, 张猛, 王红斌, 刘世钊, 王雪薇, 骆天宇

(中国能源建设集团北京电力设备总厂, 北京 102401)

摘要: 针对双主动桥DC-DC变换器(DAB)的模块化直流变压器, 我公司在新型双有源DC-DC拓扑直流变压器进行设计应用, 开展了适用于IGCT-Plus作为模组开关器件的直流变压器试验, 实现不同电压等级的直流系统的互联, 为不同直流负荷提供稳定的直流电压, 试验中该直流变压器存在各支路电流长期不平衡流动, 会严重影响直流变压器及整个电力系统的长期稳定运行。根据以往工程经验, 通过加装均流磁环可对直流变压器低压侧各支路进行均流, 均衡三条并联支路的输出特性, 防止某一路长期电流应力过大, 造成器件老化损坏, 大大提高变压器运行的稳定性。

关键词: 直流变压器; IGCT-Plus; 均流; 均流磁环

Research on Current Equalizing in DC Transformers Based on IGCT-Plus Device

HAN Di, ZHANG Meng, WANG Hongbin, LIU Shizhao, WANG Xuewei, LUO Tianyu

(China Energy Engineering Corporation Beijing Electric Power Equipment General Factory, Beijing 102401, China)

Abstract: For the modular DC transformer based on the dual-active bridge DC-DC converter (DAB), the design and application work on a novel dual-active DC-DC topology DC transformer is performed in our company. The test on a DC transformer using IGCT-Plus as the modular switching device is developed to achieve interconnection between DC systems of different voltage levels and provide stable DC voltage for different DC loads. During the test, the long-term unbalanced current flow in each branch of the DC transformer is existed, which can severely affect the long-term stable operation of both DC transformer and entire power system. Based on previous engineering experience, the addition of current equalizing magnetic rings can balance the currents in the low-voltage side branches of the DC transformer, equalizing the output characteristics of the three parallel branches, preventing excessive current stress on any single branch over prolonged periods that could cause device aging and damage, and significantly improving the operation stability of the transformer.

Key words: DC transformer; IGCT-Plus; current equalizing; current equalizing magnetic ring

0 引言

目前国家正在大力扶持新能源行业, 其中除大规模新能源并网的场景外, 分布式新能源并网因布置简单、安装方便的特点也得到快速发展^[1]。在配网领域以光伏为主的“源网荷储”直流微网体系中需要直流变压器实现不同的直流电压等级互联, 使得直流配电系统更加适用于大量新能源的友好接入^[2-7]。

按变换器能量传输能力的角度, 直流变压器可

以分为单向直流变压器和双向直流变压器; 此外通过直流变压器的并联与串联组合可以构成大容量的直流变压器^[8-12]。

目前针对直流变压器的研究主要有3种常见电路拓扑^[13]:

1) 双向半桥。双向半桥直流变压器见图1。在双向半桥变换器的正常工作过程中, 双向半桥变换器的两个功率器件中, 每一时刻只有一个开关工作。当工作在升压变换器模式时, 功率开关 S_1 工作则 S_2 截止。当工作在降压变换器模式时, 功率开关

S_2 工作, S_1 截止, 为了保证变换器在两个工作状态间顺利的交替, 两个功率开关器件的驱动信号必须保证在一个开关完全关断后, 另一个开关才能导通。

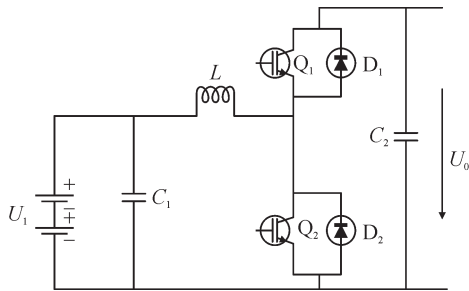


图1 双向半桥直流变压器

Fig. 1 Bi-directional half-bridge DC transformers

2) 串联谐振变换器。串联谐振变换器见图2。要实现该拓扑直流变压器的软开关工作, 需要确保死区时间内, 实现对开关管输出电容和副边整流二极管结电容的充、放电。充、放电的电荷量是由谐振腔电流提供的^[14]。该电荷供给量太小, 无法实现软开关, 电荷供给量太大增加损耗。而电荷供给量是由死区时间决定, 所以设计死区时间尤为重要。

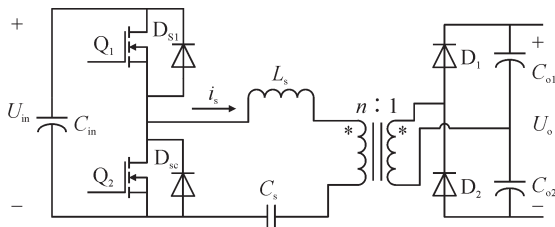


图2 串联谐振变换器

Fig. 2 Series resonant converter

3) 双主动全桥(dual active bridge, DAB)。双主动全桥变换器由两个全桥变换器、两个直流电容、一个高频电感和一个高频变压器构成, 见图3。高频变压器实现输入和输出侧的电气隔离和电压匹配功能, 高频电感和直流电容实现瞬时能量的存储功能。

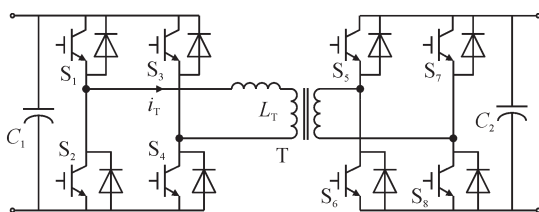


图3 双主动全桥直流变压器

Fig. 3 Double active full bridge DC transformer

DAB型直流变压器因其无功功率需求小、工作频率高、体积小、能量密度大, 以及元件的电压和电流利用率高等特点, 成为了最基础的单元拓扑方案。但是, 限于开关器件电压及容量的限制^[15], 大部分的直流变压器仅适用于较低电压等级和较小功率的场景中。

对于高电压、大功率的应用场合, 业内目前最常见的做法是采用基于DAB基本单元进行输入输出串并联的多重模块化结构, 提高整个DCT的电压和容量。为提高DAB单通道的接入电压和输送容量, 采用高压侧器件串联, 低压侧多支路并联的方式, 将高压侧的电压可以提高至10 kV, 单个DAB输送容量提高至1.5 MW。然后这种拓扑方案在试验测试过程中, 会出现低压侧并联支路之间电流不均衡的情况, 降低了装置的效率和可靠性。

对于并联各支路之间电流不均衡的问题, 已有部分文献对其原因和改进措施进行了研究。其中文[16]提出在多个开关器件并联支路中, 主要由器件、回路杂感参数、脉冲差异, 导致各支路采用参数相同的器件, 增加一致性。器件的差异是无法避免的, 如果需要大批量的遴选器件, 会升高产品的制造成本。

文[17]提出在直流变压器安装设计过程中, 各个并联支路与副边电压源距离不相等, 由此各个支路的等效阻抗存在差异, 同时脉冲处理回路的移相电阻、电容参数改变会导致移相特性不一致, 进而使得并联支路脉冲偏移较大, 从而造成均流不平衡。通过每个支路加装不同气隙大小的磁环来改变回路的阻抗大小, 但是这种方法在实际使用过程中, 回路阻抗参数测量存在困难, 且各支路之间差异较小, 因此容易出现均流效果不好的情况。

文[18]提到在电力机车的变流器上采用了一种铁磁耦合的均流电抗器, 提高了同一桥臂器件间的均流性, 但没有给出具体的均流电抗器计算方法。

文[19]提出了一种基于耦合电感的主动均流方案, 并给出了电感磁环的数学计算模型, 但只是在一个小容量的测试电路下完成了试验验证, 缺乏实际场景下的验证。

文中在以往研究成果基础上, 提出了基于磁路耦合作用下的均流磁环来提高均流特性的技术方案^[20]。通过对其工作原理的分析和参数设计, 说明了此均流方式的具体实施方法, 并在此基础上, 将均流磁环加装在单通道1.5 MW DAB型的直流变压器产品低压侧, 验证了均流磁环的均流效果。

1 DAB型直流变压器均流特性分析

直流变压器采用DAB型拓扑方案, 装置高压侧直流电压10 kV, 低压侧直流电压750 V, 频率600 Hz, 移向角 38.52° , 移向电感 $52.5 \mu\text{H}$ 、 9.33 mH 。在开关器件方面, 选择了相较于模块式IGBT和压接式IGBT, 通态压降更小、抗浪涌电流能力更大、故障率更低, 以及更低成本的IGCT-Plus器件作为主器件^[21-22]。IGCT-

Plus 器件外形图见图4。模块式IGBT、压接式IGBT与IGCT-Plus对比见表1。



图4 4 500 V/5 000 A IGCT-Plus 器件

Fig. 4 4 500 V/5 000 A IGCT-Plus device

表1 模块式IGBT、压接式IGBT与IGCT-Plus对比

Table 1 Comparison of module IGBT, pressure connection IGBT and IGCT-Plus

项目	模块式IGBT	压接式IGBT	IGCT-Plus
器件类型	压控	压控	流控
通态压降	较大	较大	小
抗浪涌电流能力	小	较小	大
故障率	中	中	低
器件差异	较小	较小	较小
失效特性	断路	暂时短路	长期短路

其中低压侧电流 i 副边计算式为

$$i_{\text{副边}} = \frac{(k+1)U_2}{L_{\text{副边}}} \times D \frac{1}{4f} = \frac{2 \times 0.75 \times 10^3}{52.5 \times 10^{-6}} \times 0.2136 \times \frac{1}{4 \times 600} = 2542 \text{ A} \quad (1)$$

式(1)中, $L_{\text{副边}}$ 按变压器漏感折算。

将装置参数代入式(1), 可得副边电流为2542 A, 由于低压侧电流较大, 考虑冗余化设计, 单桥臂设计成由3只IGCT-Plus并联的方式, 其中1个为冗余, 当某一个器件失效时, 仍然可以保证设备正常运行, 具体低压侧拓扑见图5。

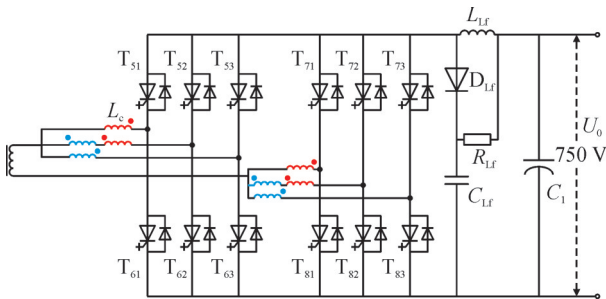


图5 双有源全桥DC-DC变换器拓扑结构

Fig. 5 Double-affiliated bridge DC-DC transform side topology structure

DAB型直流变压器根据其工作原理可以简化为拓扑结构见图6。装置原理波形见图7。图6、7中: S_1 - S_4 为高压侧开关器件; K_1 - K_4 为低压侧开关器件; U_{h1} 、 U_{h2} 为变压器两侧交流电压; U_L 为电感 L_r 上的电压; I_L 为电感电流; $[t_0, t_3]$ 为半个开关周期, 用 T_{hs} 表示; D 为两侧全桥之间在驱动信号上的移相比。

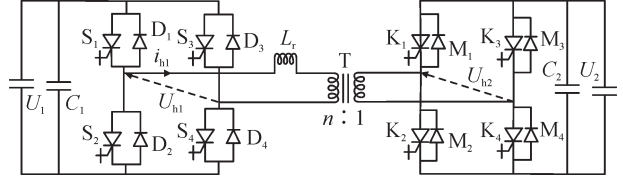


图6 双有源全桥DC-DC变换器拓扑结构

Fig. 6 Double-affiliated bridge DC-DC transform side topology structure

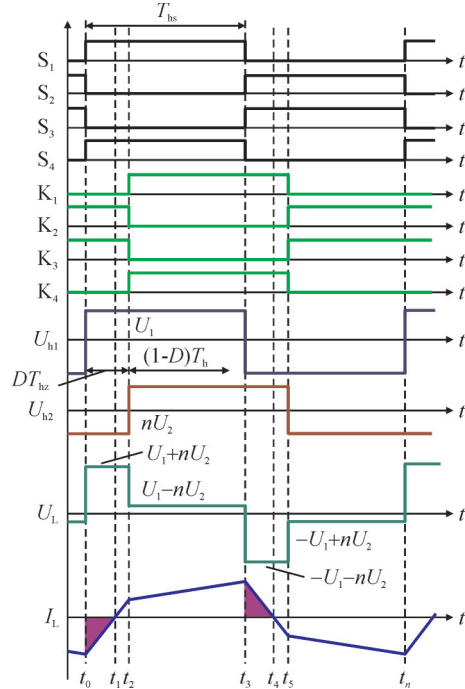


图7 装置原理波形图

Fig. 7 Principle waveform diagram

从图7可以看出, 器件动作时, 存在电流的变化, 即 di/dt 是随着器件开通关断的变化而变化的, 不同时刻的 I_L 表达式为

$$\begin{cases} i_L(t) = i_L(t_0) + \frac{U_1 + nU_2}{L_s}(t - t_0) & t \in [t_0, t_1] \\ i_L(t_2) = i_L(t_0) + \frac{U_1 + nU_2}{L_s}DT_{hs} & t \in [t_1, t_2] \\ i_L(t) = i_L(t_2) + \frac{U_1 - nU_2}{L_s}(t - t_2) & t \in [t_2, t_3] \\ i_L(t_3) = i_L(t_2) + \frac{U_1 - nU_2}{L_s}(1 - D)T_{hs} & t \in [t_2, t_3] \end{cases} \quad (2)$$

由此可以分析出, 低压侧如需并联多支器件时, 不均流的问题主要是由于器件及回路阻抗参数差异导致的动态均流问题, 只需要使各器件上的 di/dt 趋于一致, 在相同的开关周期下即可保证各支路之间的均流。

2 均流磁环的工作原理和设计

2.1 工作原理

根据上文分析, 直流变压器只需要限制动态电

流量 di/dt 的大小,即可达到动态均流的效果。考虑到应用场景为器件直接并联,同时为保证整个设备的紧凑程度和可靠性,不适合使用过于复杂的均流电抗器方式,因此采用基于磁路耦合的均流磁环来满足动态均流的要求^[23-25]。

均流磁环由一个铁心和绕制在同一铁心上的两个匝数相同的绕组组成,两个绕组同名端相反,即绕向相反,整体对外表现为一个进口两个出口,器件串联均流磁环后,流过器件的电流受到铁心磁路耦合的作用。

当流过的电流相同时,在同一铁心中产生相同大小、方向相反的感应电势,感应电势相互抵消,电流大小不变;当流过器件的电流不同时,根据楞次定律,这个感应电流会通过磁力线来阻止其变化。由于外加交变电源的变化,磁力线就发生了变化,而磁环线圈在交流电路中具有阻止电流变化的特性。通过调节磁环的磁阻大小,可改变并联线路的交流阻抗。当磁阻较小时,所产生的磁场强度越大,其等效阻抗也越大,从而实现增加并联线路的交流阻抗,达到均衡并联电路输出电流的效果。

2.2 均流磁环的参数设计

器件的导通时间与关断时间为 $1 \mu\text{s}$ 左右,驱动的误差时间约为 50 ns ,要求并联模块之间的最大电流差 ΔI_m 小于单模块额定工作电流的 10%,因此均流磁环的电感值应满足

$$L_{cs} \geq \frac{U\Delta T}{\Delta I_m/2} = \frac{750 \times 50 \times 10^{-9}}{90/2} = 0.833 \mu\text{H} \quad (3)$$

方案实施过程中选择宝钢公司的 B20R065 取向硅钢片作为均流磁环的铁心材料,工作磁密 0.2 T ,相对磁导率为 27 928。作为绕组的通流铜排的宽度为 64 mm ,厚度为 8 mm (增加绝缘皮后为 12 mm),电流密度为 $900 \text{ A}/64/8=1.76 \text{ A}/\text{mm}^2$ 。

考虑到铜排尺寸和绝缘间距,实际生产的均流磁环见图 8,内矩形为 $84 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,外矩形为 $104 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,磁环厚度为 30 mm 。



图8 均流磁环图形

Fig. 8 Current equalizing magnetic ring

在三支路电流流入口和流出口之间加装均流磁环,每相邻两支路电路电流铜排套入一个磁环,每个均流磁环通过环氧卡槽固定。直流变压器均流磁环安装见图 9、10,直流变压器低压侧现场照片见图 11。

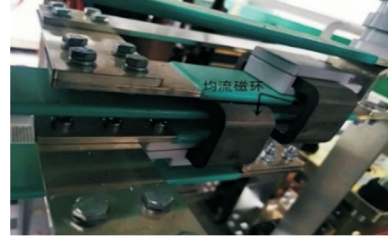


图9 加装均流磁环

Fig. 9 Installed current equalizing magnetic ring

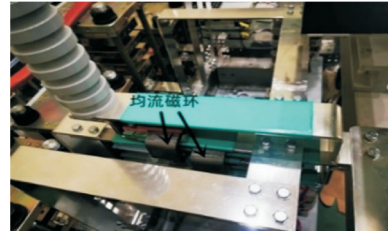


图10 均流磁环安装

Fig. 10 Current equalizing magnetic ring installation

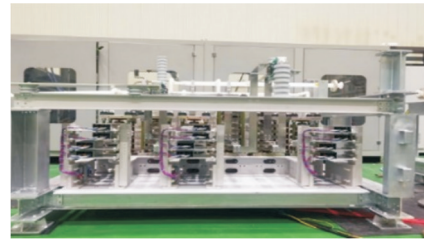


图11 直流变压器低压侧现场照片

Fig. 11 Onsite photo of DC transformer low-voltage side

其磁路横截面积 A_c 为 300 mm^2 ,等效磁路长度 l_c 为 288 mm 。所以差模电感为

$$L_{cs} = \frac{\mu A_c N^2}{l_c} = \frac{27\,928 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 300 \times 10^{-6} \times 4}{288 \times 10^{-3}} = 146.2 \mu\text{H} \quad (4)$$

式(4)中,由于两个均流电感是在一个均流磁环上的,其匝数为 2。因此,并联模块间最大电流差为

$$\Delta I_m \geq \frac{2U\Delta T}{L_{cs}} = \frac{2 \times 750 \times 50 \times 10^{-9}}{146.2 \times 10^{-6}} = 0.51 \text{ A} \quad (5)$$

3 试验测试

在双脉冲试验过程中,通过记录有无均流磁环情况下 IGCT 和二极管在换流过程中的动态开关波形,验证均流磁环的动态均流特性。

试验时并联侧功率模块额定电压为 750 V ,额定电流 $2\,700 \text{ A}$ 。双脉冲测试直流电压 900 V ,试验电感 $80 \mu\text{H}$,试验回路见图 12。首先对 T_5 、 D_6 进行测试,正确连接试验电感和电压、电流探头,使用单双脉冲发生器设置脉冲时间。

试验时确保 T_6 、 T_7 、 T_8 处于闭锁,按试验电压由低到高的顺序,分几个电压点进行测试,根据试验需要和试验电压值设定好脉冲发生器 t_1 、 t_2 、 t_3 值(均

从100 μs开始设置),由试验电源对功率模块的直流支撑电容进行充电,并设置好示波器的触发方式和时间,启动脉冲发生器下发PWM信号,储存试验波形且依据波形对器件电气应力分析,测试电流。

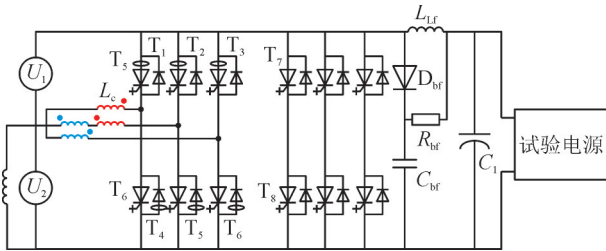


图12 并联侧功率模块双脉冲试验回路

Fig. 12 Dual pulse test circuit for parallel power module

测试完成后,再依次对T6、D5、T7、D8、T8、D7进行双脉冲试验。通过将直流变压器低压侧进行双脉冲对比实验,直流变压器电流在1500 A电流下均流波形见图13-15。有均流磁环相较于无均流磁环电流波形均流图形趋势重合,均流效果明显。通过具体数据记录分析,有均流磁环的均流系数相较于无磁环的均流系数明显提高。加装均流磁环前后各IGCT电流对比见表2。

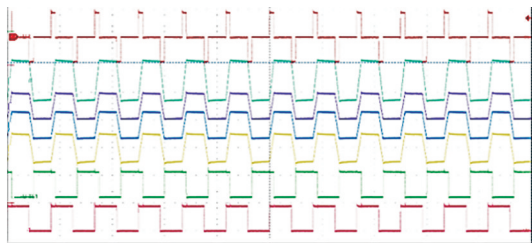


图13 满载运行时电压、电流波形

Fig. 13 The voltage and current waveform when running at full load

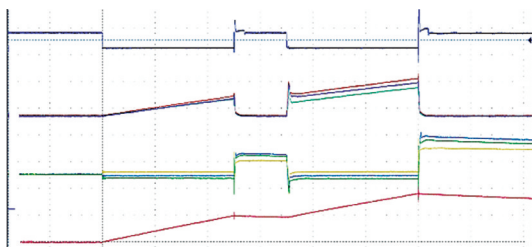


图14 无均流磁环下IGCT及二极管各路均流

Fig. 14 IGCT and diode current equalizing without current equalizing magnetic ring

4 示范应用

直流变压器是不同电压等级直流网络互联的必要环节,也是将目前的点对点直流输电工程组建成多端直流系统乃至直流电网的关键设备之一,因此研究直流变压器具有重要的理论意义及实用价值^[26]。北京电力设备总厂交直流混网园区项目中建

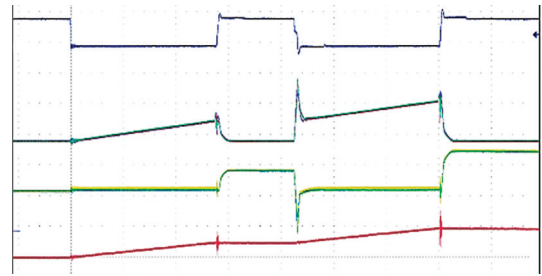


图15 均流磁环下IGCT及二极管各路均流

Fig. 15 IGCT and diode current equalizing with current equalizing magnetic ring

表2 加装均流磁环前后各IGCT电流对比

Table 2 Comparison of IGCT currents before and after installing current equalizing magnetic ring

类型	IGCT ₁ 管路/A	IGCT ₂ 管路/A	IGCT ₃ 管路/A	均流系数
无磁环	1 571	1 153	1 429	0.88
有磁环	1 036	1 137	1 018	0.93
无磁环	1 786	1 373	1 631	0.89
有磁环	1 725	1 747	1 784	0.98

设1.5 MW直流变压器结构模型图和园区项目见图16、17,为公司在直流配网及新能源并网等领域开拓新的市场份额。为不同直流负荷提供稳定的直流电压,与其他设备相互协调工作,实现不同电压等级的直流系统的互联。

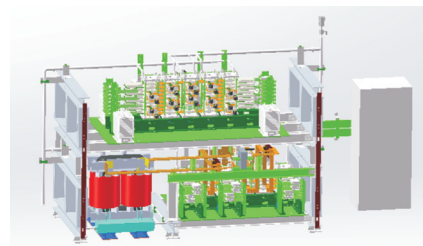


图16 直流变压器结构模型图

Fig. 16 Structure model diagram of DC transformer



图17 直流变压器设备舱

Fig. 17 Device cabin of DC transformer

5 结语

目前直流配网系统中直流变压器的应用工程正在逐渐增多,市场需求量也在快速增长,因此研究直流变压器具有重要的理论意义及实用价值。针对直流变压器运行工作中支路电流不均流问题,

设计出一种外形美观、装卸便捷的均流磁环,通过加装均流磁环对直流变压器并联支路电流达到良好的均流效果,提供了整体装置的稳定性。为后续直流变压器工程应用具有很好参考价值。

致谢

本文受到中国能源建设集团“基于IGCT-Plus(新一代高电压国产功率半导体)的电力电子产品研发(CEEC2021-ZDYF-11)”基金的支持。

参考文献:

- [1] 卢才云,陈峰,齐磊,等.电力调度系统基于整县分布式光伏接入技术分析[J].农村电气化,2022(4):70-73.
LU Caiyun, CHEN Feng, QI Lei, et al. Research on power dispatching system based on distributed photovoltaic access technology [J]. Rural Electrification, 2022(4): 70-73.
- [2] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [3] 黄伟钢.面向园区微网的“源—网—荷—储”一体化运营方案设计[J].微型电脑应用,2023,39(3):205-208.
HUANG Weigang. Design of integrated operation scheme of “source-network-load-storage” for micro-network in the campus [J]. Microcomputer Applications, 2023, 39(3): 205-208.
- [4] 李政,孙毅超,鄢寅宇,等.一种模块化多电平直流变压器的欠阻尼振荡抑制策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(10):1-12.
LI Zheng, SUN Yichao, YAN Yinyu, et al. Underdamped oscillation suppression strategy for modular multilevel DC transformers [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 1-12.
- [5] 王允建,张昌杰,孙星,等.一种混合型双向直流变压器的改进虚拟直流电机控制[J].电力系统保护与控制,2024,52(22):93-103.
WANG Yunjian, HANG Changjie, SUN Xing, et al. Improved virtual DC motor control for a hybrid bi-directional DC transformer [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 93-103.
- [6] 刘旭明,何晓坤,陈武.基于辅助变压器的无环流全桥直流变换器[J].电力工程技术,2025,44(6):202-210.
LIU Xuming, HE Xiaokun, CHEN Wu. A circulating current free medium frequency DC-DC converter based on auxiliary transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 202-210.
- [7] 刘若鹏,徐辉,赵庆杰,等.基于多粒度声纹图谱和时延神经网络的变压器直流偏磁故障程度识别方法[J].智慧电力,2025,53(3):99-106.
LIU Ruopeng, XU Hui, ZHAO Qingjie, et al. A method for identifying transformer DC magnetic bias fault severity based on multi-granularity voiceprint pattern and time-delay neural network [J]. Smart Power, 2025, 53(3): 99-106.
- [8] 张帆,辛德锋,柳龙,等.适用于光伏直并网发电的DC/DC变换器研究[J].自动化技术与应用,2022,41(9):8-12.
ZHANG Fan, XIN Defeng, LIU Long, et al. Research on DC/DC converter apply to photovoltaic DC grid-connected power generation [J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(9): 8-12.
- [9] 魏晓光,王新颖,高冲,等.用于直流电网的高压大容量DC/DC变换器拓扑研究[J].中国电机工程学报,2014,34(3):218-224.
WEI Xiaoguang, WANG Xinying, GAO Chong, et al. Topologies research of high voltage and high power DC/DC converters used in DC grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 218-224.
- [10] 姚为正,辛德锋,甘江华,等.适用于ISOP拓扑的DC/DC变换器研究[J].高压电器,2020,56(1):104-113.
YAO Weizheng, XIN Defeng, GAN Jianghua, et al. Study on DC/DC converter for ISOP topology [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 104-113.
- [11] 陈志伟,田丰,李文涛,等.特高压大容量柔直变压器的研发设计[J].变压器,2025,62(2):1-4.
CHEN Zhiwei, TIAN Feng, LI Wentao, et al. Design of UHV and large capacity transformer for VSC-HVDC [J]. Transformer, 2025, 62(2): 1-4.
- [12] 李先巧.基于超薄硅钢材料的中频变压器设计与分析[J].变压器,2025,62(4):1-11.
LI Xianqiao. Design and study of medium frequency transformer based on super-thin silicon steel sheet [J]. Transformer, 2025, 62(4): 1-11.
- [13] 范世源,王超,向鑫,等.中高压直流变压器拓扑综述[J].东北电力大学学报,2022,42(5):15-24.
FAN Shiyuan, WANG Chao, XIANG Xin, et al. Topology review of medium-high voltage DC transformers [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2022, 42(5): 15-24.
- [14] 赵彪,安峰,宋强,等.双有源桥式直流变压器发展与应用[J].中国电机工程学报,2021,41(1):288-298.
ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, et al. Development and application of DC transformer based on dual-active-bridge [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 288-298.
- [15] 任琦梅,姜建.光伏微逆变器用串联谐振型直流变压器的设计[J].可再生能源,2014,32(3):279-282.
REN Qimei, JIANG Jian. Design for series resonant DC/DC transformer applied in photovoltaic micro-inverter [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(3): 279-282.
- [16] 聂振勇,杨斌.火电厂励磁均流性能影响因素与治理[J].东北电力技术,2011,32(3):37-39.
NIE Zhenyong, YANG Bin. Influence factors and treatment on exciting current balancing performance in fossil-fired power plants [J]. Northeast Electric Power Technology, 2011, 32(3): 37-39.
- [17] 张亚萍.励磁整流柜高性能均流磁环[J].中国新技术新产品,2013(3):25.
ZHANG Yaping. High performance current sharing magnetic ring for excitation rectifier cabinet [J]. China New Technologies and New Products, 2013(3): 25.
- [18] 朱家欣.通过加装电抗器提高整流装置均流系数的建议[J].电力机车与城轨车辆,2007,30(6):29-31.
ZHU Jiaxin. Suggestion on improving rectifier current balance coefficient by adding reactor [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(6): 29-31.
- [19] 曾正,邵伟华,胡博容,等.基于耦合电感的SiC MOSFET并

- YANG Jiameng. Study on vibration generation mechanism and suppression measures of dry - type air - core reactor[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [18] 祝令瑜, 杜一鸣, 高璐, 等. 不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3201-3209.
- ZHU Lingyu, DU Yiming, GAO Lu, et al. Vibration distribution characteristics of dry - type air - core reactor with turn - to - turn insulation defects excited by different frequencies[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3201-3209.
- [19] 傅亮. 平式平波电抗器噪声测量问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- FU Liang. Research on the noise measurement problems of dry-type smoothing reactor[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [20] SMEDE J, JOHANSSON C G, WINROTH O, et al. Design of HVDC converter stations with respect to audible noise requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 747-758.
- [21] 刘宏, 梁基重, 牛曙, 等. 匝间短路故障下干式空心电抗器振动特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 69-75.
- LIU Hong, LIANG Jizhong, NIU Shu, et al. Study on vibration characteristics of dry - type air - core reactor under interturn short circuit fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 69-75.
- [22] 张德金, 张月华, 赵杨, 等. ± 800 kV 直流输电工程干式空心滤波电抗器降噪措施研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 139-143.
- ZHANG Dejin, ZHANG Yuehua, ZHAO Yang, et al. Novel noise reduction device for dry-type air-core filter reactors in the ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 139-143.
- [23] 沈加曙. 电力电抗器的隔声设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- SHEN Jiashu. Research on acoustical enclosure design of reactors [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [24] 张林, 孙刚, 沈加曙, 等. 电抗器隔声罩设计和试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(12): 1352-1355.
- ZHANG Lin, SUN Gang, SHEN Jiashu, et al. Design and experimental study of acoustical enclosure for reactor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(12): 1352-1355.
- [25] 张弛. 噪声控制中的隔声罩设计[J]. 噪声与振动控制, 1999, 19(2): 46-47.
- ZHANG Chi. Design of sound insulation cover in noise control[J]. Noise and Vibration Control, 1999, 19(2): 46-47.
- [26] 贺启环. 环境噪声控制工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- HE Qihuan. Environmental noise control engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [27] 倪园, 张建功, 周兵, 等. 并联电抗器隔声罩隔声性能测试及分析[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 77-83.
- NI Yuan, ZHANG Jianguo, ZHOU Bing, et al. Test and analysis of sound insulation performance of sound insulation cover for UHV shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 77-83.
- 王悦阳(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为干式空心电抗器的振动噪声特性及其减振降噪措施(E-mail: wangyueyang1998@stu.xjtu.edu.cn).
- 赵彦珍(1967—), 女, 博士, 教授, 从事电路和电磁场方面的教学和科学研究工作, 主要研究方向为工程电磁场数值计算和软件技术(通信作者)(E-mail: zhaoyzh@mail.xjtu.edu.cn).
- (上接第 123 页)
- 联主动均流[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2068-2080.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, HU Borong, et al. Active current sharing of paralleled SiC MOSFETs by coupling inductors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2068-2080.
- [20] 余前军, 李自淳, 钱厚军, 等. 励磁整流柜高性能均流磁环[J]. 大电机技术, 2009(3): 48-50.
- YU Qianjun, LI Zichun, QIAN Houjun, et al. Flux diverter with high performance for exciting commutator[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2009(3): 48-50.
- [21] 曾嵘, 赵彪, 余占清, 等. IGCT 在直流电网中的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4307-4317.
- ZENG Rong, ZHAO Biao, YU Zhanqing, et al. Development and prospect of IGCT power device in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4307-4317.
- [22] 周文鹏, 曾嵘, 赵彪, 等. 大容量全控型压接式 IGBT 和 IGCT 器件对比分析: 原理、结构、特性和应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2940-2957.
- ZHOU Wenpeng, ZENG Rong, ZHAO Biao, et al. Comparative analysis of large-capacity fully controlled crimped IGBT and IGCT devices: Principle, structure, characteristics and applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2940-2957.
- [23] 杨斌, 王文栋. 发电厂励磁功率柜均流因素分析及处理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 199-202.
- YANG Bin, WANG Wendong. Analysis and treatment of excitation power cabinet current sharing factors in power plants[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 199-202.
- [24] 胡俊轩. 励磁系统功率柜均流系数低的原因及对策——以大唐彬长发电有限责任公司为例[J]. 山西科技, 2017, 32(1): 155-157.
- HU Junxuan. Causes for and countermeasures of the low flow of the even coefficient of the power cabinets of excitation system-taking binchang power Generation Co., Ltd. of datang group as an example [J]. Shanxi Science and Technology, 2017, 32(1): 155-157.
- [25] 刘翔宇, 董正坤. 机组励磁系统不均流原因分析及对策[J]. 河北电力技术, 2011, 30(1): 40-42.
- LIU Xiangyu, DONG Zhengkun. Cause analysis and treatment on excitation system unbalancing current[J]. Hebei Electric Power, 2011, 30(1): 40-42.
- [26] 赵彪, 崔彬, 马己青, 等. 基于 IGCT-Plus 和中频隔离的大容量直流变压器[J]. 中国电机工程报, 2023, 43(3): 1114-1123.
- ZHAO Biao, CUI Bin, MA Yiqing, et al. High-power DC transformer based on IGCT-Plus and medium-frequency isolation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1114-1123.
- 韩迪(1992—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力电子产品相关技术研究(E-mail: joseph123567@163.com).
- 刘世钊(1995—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电抗器特高压产品研究(通信作者)(E-mail: 812631349@qq.com).