

# 中低压直流变压器拓扑与控制综述

刘 贝,涂春鸣,肖 凡,余雪萍,郭 祺,帅智康

(湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心,湖南 长沙 410082)

**摘要:**直流变压器作为直流电网中实现电压变换与电能分配的核心装备,其运行特性对直流电网影响深刻。基于此,对中低压直流电网中直流变压器的研究现状进行了总结与分析。首先,简要阐述了直流变压器的基本功能和典型运行场景;考虑到拓扑是直流变压器适应不同电压等级应用场合的关键,从端口数量和能量耦合方式的角度对直流变压器拓扑进行了分类,明确了各类拓扑的主要特征;其次,全面分析了直流变压器在稳态与暂态运行过程中包括效率优化、软启动、直流偏置电流抑制等方面的控制策略,有利于保障直流变压器在复杂工况下的高效可靠运行;然后,对直流变压器核心部件——高频变压器的关键技术进行了讨论,为高频变压器的选型和设计提供了参考;最后,对直流变压器未来的发展趋势进行了展望。

**关键词:**直流电网;直流变压器;拓扑结构;控制策略;高频变压器

**中图分类号:**TM 76;TM 41

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202105042

## 0 引言

随着能源危机和环境问题的加剧,全球能源消费形式逐渐从传统化石能源向光伏、风电、燃料电池等分布式能源方向发展。分布式能源减少了化石能源的使用,降低了二氧化碳排放,缓解了温室效应,但以光伏、风电为主的分布式能源由于其间歇性和随机性,对现有交流电网的稳定性造成了严重影响,如何合理消纳分布式能源已成为当下的研究热点。

近年来,直流电网作为分布式能源消纳的重要途径,得到了广泛研究。现有研究表明,直流电网在容量、建设成本、传输效率等方面相比于交流电网具有诸多优势<sup>[1-3]</sup>。同时,直流电网也是解决传统交流电网无功、谐波、同步振荡与环流等问题的有效途径,可极大缓解大电网与光伏、风电等分布式能源之间的矛盾。目前针对直流电网的研究取得了丰富的成果,包括电网架构、关键设备研制、调度与控制、运行与保护等方面<sup>[4-6]</sup>。其中,针对直流电网中能量汇聚与分配枢纽——直流变压器的研究最受瞩目。

与交流电网中常用的交流变压器通过电磁感应原理进行电压升降变换不同,应用于高压大功率场合的直流变压器进行直流电压升降变换时,只能采用电力电子装置。利用电力电子装置进行直流电能变换在开关电源领域中已取得了卓越的成果,相关直流变换器拓扑在直流变压器研究的早期阶段也得到过广泛关注,并结合直流电网高压大功率的运行场景进行了改进和调整,但并非所有拓扑都满足直

流电网的运行需求。

由于直流电网中可能同时接入多种类型的直流负荷和分布式能源,因此直流电网中将存在多条不同电压等级的直流母线。直流变压器除需具备多直流电压等级电能变换的能力外,还应当具备电气隔离能力,防止电气故障在不同系统中扩散。同时,由于分布式能源的多向性,直流电网中各等级直流母线之间的能量传递也将呈现为多向性,直流变压器需要具备对公共节点潮流的多向调控能力,保障多母线运行时潮流的可靠分配与转移。因此,尽管直流变压器在拓扑结构、控制策略和参数设计等方面可以找到较多的参考与借鉴,但高压大功率场合下直流变压器的设计和运行仍然具有巨大挑战。

本文对中低压直流电网中的直流变压器研究现状进行了总结与分析,介绍了直流变压器的基本功能和典型运行场景,按端口数量和能量耦合方式对直流变压器拓扑进行了梳理和分类,全面分析了直流变压器在暂态和稳态运行中的控制策略,并对直流变压器核心部件——高频变压器的关键技术进行了讨论,最后对直流变压器未来的发展趋势给出了建议。

## 1 典型运行场景

根据前期调研,本文总结了中低压直流电网中直流变压器的典型运行场景,如图1所示,大体可归纳为如下3个:居民小区、城市负荷密集地区、工业园区。在居民低压直流供电场景中,选取了单端放射式供电架构,分布式能源采用集中接入方式,使用一台多端口直流变压器用于连接光伏、储能等分布式能源和直流负荷。在城市负荷密集地区和工业园区直流供电场景中,由于功率和电压等级提高,分别选取了环网供电和辐射供电架构,分布式能源采用

收稿日期:2021-04-01;修回日期:2021-04-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904100);国家电网公司科技项目(SGHB0000KXJS1800685)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904100) and the Science and Technology Project of SGCC(SGHB0000KXJS1800685)

了多点接入方式,因此配备了多台直流变压器。

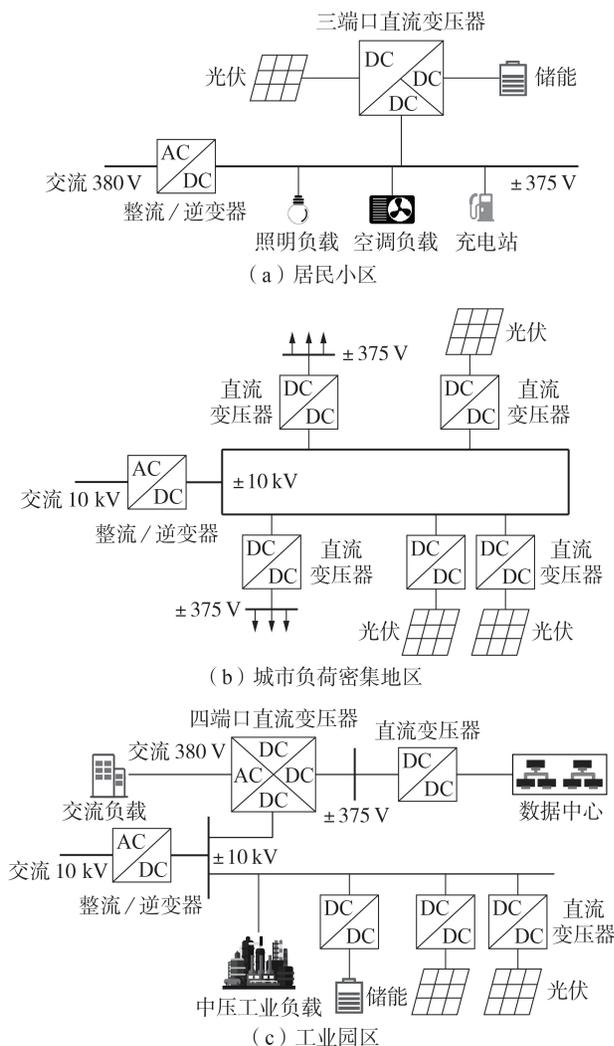


图1 直流变压器在中低压直流系统中的典型运行场景  
Fig.1 Typical operating scenarios of DC transformers in medium- and low-voltage DC systems

对含多条电压等级直流母线的供电场景,可以采用一台多端口直流变压器提供多个直流母线接口,也可以采用多台两端口直流变压器连接不同电压等级的直流母线。在多台直流变压器共同运行的场景中,直流变压器需要根据母线电压状态调整控制方式和工作方式,在定电压、定功率等多种模式中相互切换。对于潮流双向端口,还需要根据端口运行状态调整功率方向。此外,从图1中还可以看到,3种典型运行场景中均包含了与交流电网连接的端口。尽管直流电网在运行效率、传输容量、建设成本等方面相较于交流电网有较大优势,但单一的直流供电并非未来供配电技术发展的最佳策略,交直流供配电技术的相互配合才是未来中低压电网发展的重要趋势。

## 2 直流变压器拓扑

在直流电网中,直流变压器需要兼顾高增益、大

功率、多向潮流和电气隔离等基本特性,同时还需具备一定的可扩展能力。基于对现有相关论文的查阅,本文将直流变压器拓扑分为3类:第一类为两端口直流变压器,第二类为多端口直流变压器,第三类为模块化组合直流变压器。

### 2.1 两端口直流变压器

对于两端口直流变压器,可以按照是否具备电气隔离特性将其分为隔离型和非隔离型。非隔离型直流变压器的输入侧与输出侧没有电气隔离,且难以同时兼顾大功率、高增益的需求,在实际工程中较少应用,故本文主要讨论隔离型两端口直流变压器。现有研究中,隔离型两端口直流变压器主要有桥式、推挽、交错并联等拓扑结构。由于功率器件受耐压、耐流等限制,推挽、交错并联等结构在高压大容量直流供电场景中应用较少,目前隔离型两端口直流变压器中最为常用的是桥式结构。

根据变压器两侧功率单元结构,桥式结构可分为半桥、全桥、全控、不控等结构,如图2所示。其基本工作原理为:通过输入侧功率单元将直流电能逆变为高频交流电能,由高频变压器完成电压升降后,再由输出功率单元将高频交流电能整流为直流电能,因此可以兼顾高增益和大功率的直流电能变换能力。在桥式结构中,应用最广泛的是双有源桥DAB(Dual Active Bridge)变换器。

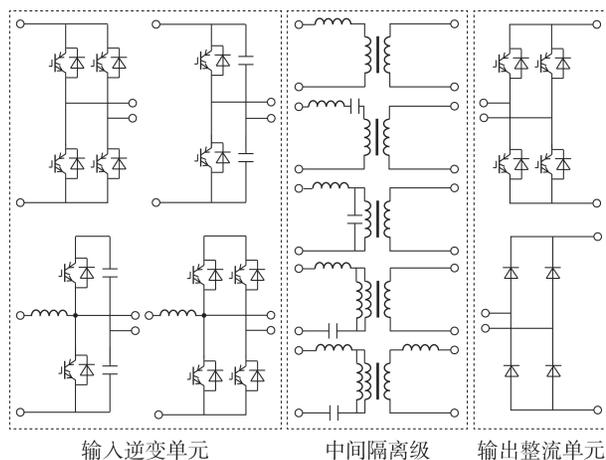


图2 桥式两端口直流变压器拓扑

Fig.2 Topology of bridge type two-port DC transformer

#### 2.1.1 DAB变换器

DAB变换器最早在1988年由德国亚琛工业大学 R. W. de Doncker 等人提出<sup>[7]</sup>,DAB变换器具备高增益、大功率的电能变换特性,同时兼顾电气隔离、高功率密度和灵活可控的双向功率流动能力,在数据中心、电动汽车、电力电子变压器等领域得到了广泛应用。典型的DAB变换器拓扑结构如图3所示,包含由全控器件组成的输入侧和输出侧H桥功率单元、高频变压器、辅助电感以及输入侧和输出侧

滤波电容。图中,  $v_{AB}$  和  $v_{CD}$  分别为输入侧和输出侧 H 桥功率单元桥臂中点电压;  $i_{L_s}$  为辅助电感  $L_s$  上流过的电流。将  $v_{AB}$  和  $v_{CD}$  等效为方波电源, 并将输出侧折算至输入侧, 可以得到如图 4 所示的 DAB 变换器等效电路, 图中  $v'_{CD}$  为  $v_{CD}$  折算至输入侧的等效电压。

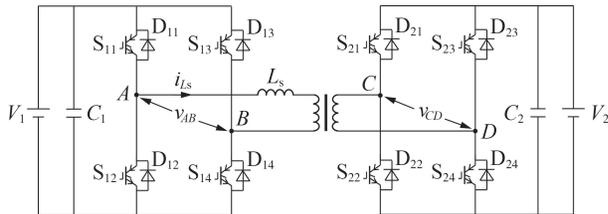


图3 DAB变换器拓扑结构

Fig.3 Topology of DAB converter

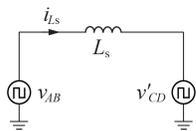


图4 DAB变换器等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of DAB converter

通过控制输入侧和输出侧方波电源之间的相角差, 可以调整输入侧和输出侧之间的功率大小和方向。采用单移相SPS(Single Phase Shift)控制策略的DAB变换器的输出功率 $P_o$ 为:

$$P_o = \frac{V_1 V'_2}{2\pi f_s L_s} \beta \left( 1 - \frac{|\beta|}{\pi} \right) \quad (1)$$

其中,  $V_1$  为输入电压;  $V'_2$  为输出电压  $V_2$  折算至输入侧的等效电压;  $f_s$  为开关频率, 开关周期  $T_s = 1/f_s$ ;  $\beta$  为输入侧和输出侧方波电源之间的移相角, 当功率正向传输时  $\beta$  的取值范围为  $(0, \pi)$ , 当功率反向传输时  $\beta$  的取值范围为  $(-\pi, 0)$ 。

从式(1)中可以看到,  $P_o$  与  $L_s$ 、 $f_s$  成反比, 与  $\beta$  在  $(-\pi/2, 0)$  和  $(0, \pi/2)$  区间内成正比, 且当  $\beta = \pm\pi/2$  时,  $P_o$  有最大绝对值  $V_1 V'_2 / (8f_s L_s)$ 。

### 2.1.2 两级式DAB变换器

DAB变换器输入/输出电压比与变压器变比相等时, 称为电压匹配模式, 否则称为电压不匹配模式。在电压不匹配模式下, 变换器内部存在较大环流, 部分器件软开关区间减小。器件的硬开关限制了器件的开关频率, 开关频率的提高有助于减小高频变压器的体积并提高装置的功率密度。为此, 相关文献提出了两级式DAB变换器, 保证DAB变换器始终工作在电压匹配状态。文献[8]在DAB变换器输入侧和输出侧均增加了半桥子模块单元, 如附录中图A1所示。加入的半桥子模块可以对输入、输出电压进行调整, 保证DAB变换器工作在电压匹配状态。此外, 半桥子模块还可以作为旁路开关, 用于隔离故障模块。文献[9]研究了Buck/Boost+DAB的

两级式拓扑, 如附录中图A2所示。通过两级电路的配合, 在不降低DAB变换器工作效率的同时增大了变换器的输入范围。

### 2.1.3 谐振型DAB变换器

虽然两级式结构在保证运行效率的同时增大了DAB变换器的工作范围, 但两级式的结构降低了系统的集成度, 一定程度上也增加了控制的复杂程度。为进一步提高DAB变换器的软开关范围, 降低DAB变换器开关损耗, 相关文献提出了一系列谐振型DAB变换器, 采用谐振单元替换DAB变换器辅助电感, 实现宽工作范围下的器件软开关。常见的谐振单元结构包括LC、LLC、LCC、CLLC等<sup>[10-16]</sup>, 如图2所示, 其中应用最为广泛的是LLC型谐振单元。文献[12]对单向LLC型谐振变换器的工作模态和谐振腔电流进行了分析, 提出了峰值增益配置的优化设计法。文献[13]针对双向LLC谐振变换器提出了一种变频-移相控制方法, 实现了变换器的宽电压增益及全范围软开关。文献[14]提出了一种LLC型谐振变换器变模式控制策略, 在额定输入电压附近采用常规频率控制方式, 在输入电压偏离额定值时, 采用脉宽调制的控制方式调节电路增益, 有效缩小开关频率工作范围。合理设计谐振单元参数可以实现功率器件宽工作范围下的软开关, 提高变换器运行效率。但高开关频率带来了较大的电压、电流应力, 同时电容与电感等器件随着使用时间的增加, 必然会出现参数的改变或漂移, 给谐振型直流变压器的设计带来了巨大的挑战。

两端口直流变压器拓扑是直流变压器拓扑研究的基础和核心。目前, DAB变换器及其衍生的谐振型拓扑已成为两端口直流变压器在实际工程中的主流方案。同时, 两端口直流变压器的相关研究理论和设计方法也在多端口和模块化组合直流变压器中得到了推广与应用。

## 2.2 多端口直流变压器

分布式能源和不同电压等级的直流负荷接入, 直流电网的重要节点将出现多母线共同运行。为保障多母线运行时潮流的可靠分配与转移, 各电压等级母线之间需安装两端口直流变压器。大量两端口直流变压器的使用增加了能量变换次数, 降低了能量利用率。此外, 多个两端口直流变压器并联运行产生的环流、协调控制、交互影响等问题也不容忽视。多端口直流变压器是解决上述问题的重要途径, 符合直流电网运行和发展的需要。对于多端口直流变压器, 可以按照能量汇聚形式分为磁耦合型和电耦合型。

### 2.2.1 电耦合型多端口直流变压器

电耦合型多端口直流变压器通过公共母线汇聚各端口能量, 具备灵活的端口数量和容量扩展能力,

等效示意图如图 5 所示。电耦合型多端口直流变压器通常采用主从控制方式,由一个端口控制公共母线电压,其余端口根据运行需求独立控制端口电压或功率。根据公共母线的电能类型,电耦合型多端口直流变压器可以分为共直流母线型和共交流母线型。

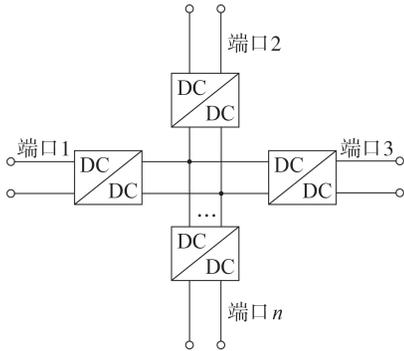


图 5 电耦合型多端口直流变压器示意图

Fig.5 Schematic diagram of electrically coupled multi-port DC transformer

文献[17]提出了一种整合光伏、储能、电动汽车充电站和电网的共直流母线型多端口直流变压器拓扑,如附录中图 A3 所示。该拓扑采用了分层控制,以确保直流变压器在电网调度、并/离网、电动汽车接入/切除等多种工况下的稳定运行。文献[18]提出了一种共直流母线型多端光伏直流升压系统,2 组光伏阵列通过 Boost 变换器与直流升压变压器相连,再由直流升压变压器汇集至  $\pm 10$  kV 电网。文献[19]提出了一种用于多电池组储能系统的共直流母线型多端口直流变压器拓扑。该拓扑由  $n$  组电池组和  $n$  个 Buck/Boost 双向直流变换器并联组成,具有较宽的工作电压范围,并联连接方式也使得该结构具备较强的扩容能力。此外,每个并联的 Buck/Boost 模块可独立调节该电池组电流,因此电池组之间不会产生环流。

共直流母线型多端口直流变压器中,互联的各端口功率大多需要经过 DC/AC/DC 2 次变换,因此直流变压器各端口总容量接近额定容量的 2 倍,这增加了建设成本和能量转换次数。采用交流母线进行能量汇聚,各端口只需进行 1 次 DC/AC 或 AC/DC 变换,减少了端口总容量,并提高了能量利用率。

文献[20]提出了一种共交流母线型多端口直流变压器,等效电路如附录中图 A4 所示。该结构包含 4 个端口,端口 1、2、3 分别通过高频变压器 HFT1、HFT2 和 HFT3 接入高频交流母线,端口 4 则通过高频电感  $L_{1A}$  连接高频交流母线。该拓扑采用模块化设计,端口种类、数量和容量可以根据实际情况进行扩展,同时该拓扑为所有端口之间提供了电气隔离。

相比于共直流母线型多端口直流变压器,共交流母线型多端口直流变压器能减少能量变换次数。但高频交流母线中存在着固有高频振荡,会增加变换器损耗,并危及系统的安全稳定运行<sup>[21]</sup>。文献[22]提出了一种采用电感-电容-电感电路连接的共交流母线型多端口直流变压器拓扑,如附录中图 A5 所示。该拓扑由多个电压源型换流器 VSC (Voltage Source Converter) 通过 LCL 电路匹配不同电压等级的直流母线互联而成,无需使用交流变压器,大幅减小了装置体积。

文献[23]提出了一种多端口直流-直流自耦变压器拓扑,如附录中图 A6 所示。该拓扑由 5 个 VSC 串联而成,VSC 直流侧与对应的直流电网相连,交流侧通过变压器与公共交流母线相连。由多端口直流-直流自耦变压器互联的直流电网之间有直接电气连接,因此在正常工作时,部分能量可以通过直流母线在各端口之间传递,减少了能量转换次数,且降低了直流变压器的总容量。多端口直流-直流自耦变压器互联的直流电网电压等级越接近,直流变压器的总容量越小。

### 2.2.2 磁耦合型多端口直流变压器

磁耦合型多端口直流变压器通过多绕组高频变压器实现对各端口能量的汇聚和分配。受结构限制,相比于电耦合型多端口直流变压器,磁耦合型多端口直流变压器的拓扑种类较少,典型的多有源桥 MAB (Multi Active Bridge) 变换器拓扑结构如图 6 所示。图中,  $V_i (i=1, 2, \dots, n)$  为端口  $i$  电压;  $L_i$  为端口  $i$  辅助电感,  $v_{Hi}$  为端口  $i$  桥臂中点输出电压; MHT 为多绕组高频变压器。与 DAB 变换器相似,磁耦合型多端口直流变压器通常也采用移相控制方式。除用于连接不同等级直流母线外,磁耦合型多端口直流变压器在电力电子变压器中作为中间隔离级也得到了广泛应用<sup>[24]</sup>。

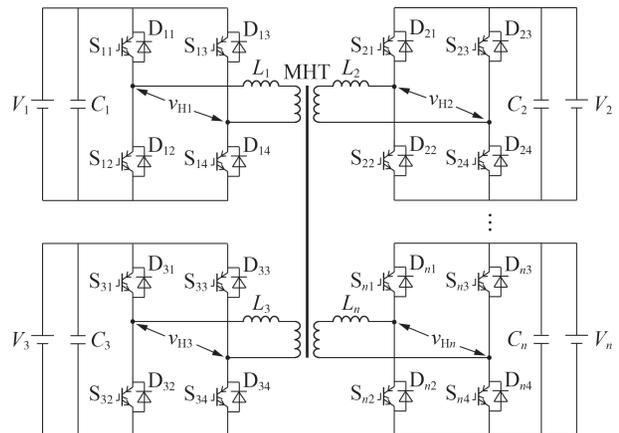


图 6 多源有源桥直流变压器拓扑

Fig.6 Topology of MAB DC transformer

文献[25]研究了连接交直流电网、光伏和储

能系统的MAB变换器,建立了MAB变换器的功率传输模型,并提出了基于回转器理论的MAB变换器功率协调控制策略。文献[26]针对三有源桥TAB(Triple Active Bridge)变换器轻载时运行效率低的问题,提出了TAB变换器的三角波电流控制策略,在轻载时可以实现部分功率器件的零电流关断ZCS(Zero Current Switching),同时减小了电感电流有效值,提升了变换器运行效率。文献[27]建立了TAB变换器的阻抗模型,分析了硬件参数、控制参数对TAB变换器阻抗特性的影响,并定性分析了阻抗的系统参数敏感性。

磁耦合型多端口直流变压器的端口之间具备电气隔离,可以有效防止故障扩散,也易于实现高变比的直流电能变换。但磁耦合型多端口直流变压器需要高压大容量的多绕组高频变压器,在研制过程中对制造工艺提出了更高要求。此外,磁耦合型多端口直流变压器在端口扩展和容量提升等方面的灵活性也略显不足。电耦合型多端口直流变压器本质上是多个两端口直流变压器的并联,设计方便,扩展灵活,但不具备电气隔离,同时各并联直流变压器在容量、阻抗特性、工作模式和控制方式等方面需要进行匹配和协调。

### 2.3 模块化组合直流变压器

受耐压、容量、温升等方面的限制,单功率器件或模块难以直接应用于直流电网高压大功率场合中。模块化组合的方式可以有效减小功率器件承受的电压、电流应力。目前常用的模块化组合方式为输入输出串并联和模块化多电平结构。

#### 2.3.1 输入输出串并联直流变压器

文献[28]采用改进型半桥子模块,以输入串联输出并联ISOP(Input Series Output Parallel)的方式连接12 kV中压直流电网和400 V低压直流电网。文献[29]采用DAB模块以输入串联输出串联ISOS(Input Series Output Series)的方式,实现中高压直流电网的互联。文献[30]提出了基于ISOP-DAB结构的直流变压器拓扑,如附录中图A7所示,并详细介绍了其工作模式、功率传输特性、能量管理策略、研制与设计方法,并指出各DAB变换器单元在串并联端的电压平衡与在并联端的功率平衡等价。

为使得模块化组合直流变压器可以兼顾谐振变换器的高效特性和DAB变换器的高可控特性,文献[31]提出了一种混合型ISOP直流变压器拓扑,子模块包括CLLLC型谐振变换器和DAB变换器。在此拓扑中,直流变压器的绝大部分功率由效率较高的CLLLC型谐振变换器传输,DAB变换器则通过传输较小部分功率实现对直流变压器整体输出功率的控制。

#### 2.3.2 模块化多电平直流变压器

与采用输入输出串并联方式连接的直流变压器不同,基于模块化多电平结构的直流变压器将直流电压调制成阶梯形交流电压,可以有效减小功率器件承受的电压应力。文献[32]提出了一种两相模块化多电平结构的直流变压器拓扑,如附录中图A8所示,并对三角波、方波和正弦3种高频交流链电压调制方式下的直流变压器运行特性进行了分析。该拓扑的功率特性与DAB变换器十分相似,DAB变换器的相关控制策略在该拓扑中具有较强的移植性。

文献[33]提出了一种三相模块化多电平结构的直流变压器拓扑,如附录中图A9所示。输入侧采用半桥或全桥子模块级联,输出侧采用子模块和功率器件混联,减少了器件数量,降低了制造成本。中间级采用350 Hz交流变压器,相比采用工频50 Hz变压器具有更好的功率传输效果,同时也降低了直流变压器体积,但相比于两端口直流变压器中所采用的高频变压器体积依然巨大。

模块化组合直流变压器除具备在高压大功率场合下的运行能力外,还具有较强的故障容错运行能力,可有效提高直流电网的供电可靠性,是直流变压器未来发展的重要方向。采用模块化组合结构的直流变压器在运行特性、控制策略等方面与两端口直流变压器有诸多相似,一定程度上降低了模块化组合直流变压器在研制与设计方面的难度,但由拓扑结构所带来的内部环流、均压和均功率等问题也亟待解决。

## 3 直流变压器控制策略

直流变压器的控制策略总体可以分为稳态运行控制策略和暂态运行控制策略。稳态运行控制策略主要针对直流变压器运行效率的提升,暂态运行控制策略主要用于保障直流变压器在多工况和多模式下的稳定运行,包括软启动、直流偏置电流抑制、功率控制、功率解耦等策略。

### 3.1 效率优化控制策略

针对直流变压器效率优化的研究主要集中在DAB变换器,多端口直流变压器由于控制自由度多,进行效率优化存在较大难度,因此目前鲜有对多端口直流变压器的效率优化方面的研究。

在SPS控制下,DAB变换器只有1个控制自由度,输入侧和输出侧H桥功率单元中位于对角线的开关器件同时导通,位于同一桥臂的开关器件交替导通。SPS控制易于实现,但无法对电感电流进行控制。当DAB变换器工作在电压不匹配状态时,内部存在较大回流功率,增大了变换器的电流应力,降低了变换器的运行效率。为提高DAB变换器的控制灵活性,相关文献提出了多重移相MPS(Multi

Phase Shift)控制策略,在控制输入、输出侧方波电压之间移相角的基础上,加入了对方波电压占空比的控制,包括扩展移相EPS(Extended Phase Shift)控制、双重移相DPS(Dual Phase Shift)控制和三重移相TPS(Triple Phase Shift)控制。EPS控制通常对输入侧方波电压进行占空比控制,在此控制方式下,DAB变换器包含2个控制自由度;DPS控制对输入、输出侧方波电压采用相同大小的占空比控制,因此也含有2个控制自由度;TPS控制对输入、输出侧方波电压采用不同的占空比控制,包含3个控制自由度。SPS和MPS控制下,DAB变换器输出功率 $P_o$ 与移相角 $\beta$ 之间的关系如图7所示。图中,以最大传输功率为功率基准值,对 $P_o$ 进行了标幺化。从图7中可以看到,TPS控制下DAB变换器的功率范围最大,包含了其他3种控制方式,因此也可以将SPS、EPS和DPS控制看作是特殊形式的TPS控制。而在SPS控制下,DAB变换器功率范围最窄,仅为一条正弦曲线。由此也说明,在输出功率相同时,MPS控制相比于SPS控制存在更多移相角组合,因而MPS控制可以实现对变换器运行状态的调整和效率的优化。

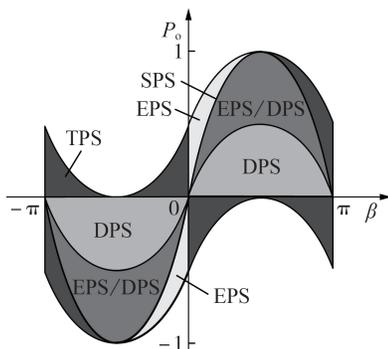


图7 MPS控制下DAB变换器的功率范围

Fig.7 Power range of DAB converter under MPS control

为了对DAB变换器进行精准优化,文献[34-35]建立了DAB变换器的损耗模型。DAB变换器的损耗组成主要包括通态损耗、开关损耗和变压器损耗三部分。为了优化上述三部分损耗,现有文献选取了多种优化目标,主要包括回流功率、电流应力、电流有效值、电流平均值、高频模型下的无功功率等<sup>[36-39]</sup>。

文献[40]提出了基于EPS控制的最优电流应力和全功率范围软开关控制策略,并将输出侧电容电流和运行效率平均值加入控制环路中,当电路运行状态发生突变时可以实现快速动态响应。文献[41]从开关组合规律出发,建立了全功率范围下的DAB变换器功率传输模型,提出了针对TPS控制的分段分析方法,实现了全功率范围内对DAB变换器电流应力的优化。文献[42]分析了TPS控制下回流功率的传输特性,采用KKT(Karush-Kuhn-Tucker)算法对

输入、输出侧回流功率进行了优化。文献[43]通过方波电源叠加建立了DAB变换器的等效电路,求得了TPS控制下全功率范围内的电流有效值表达式,提出了基于全局最优化条件的DAB变换器电流有效值优化控制策略。文献[44]对DAB变换器的高频链电压和电流进行了傅里叶分解,建立了DAB变换器的高频模型,采用粒子群优化算法对高频模型下DAB变换器的无功功率进行了优化。

DAB变换器效率优化的研究工作已取得了丰富的成果,但也存在诸多问题。在现有的研究中,对DAB变换器的回流功率优化通常只考虑输入侧,实际上在输出侧同样也存在回流功率从负载侧向输入侧流动。完全消除回流功率也并非最优策略,回流功率能使部分开关器件实现零电压开关ZVS(Zero Voltage Switching)。此外,对比电流有效值和回流功率的优化研究可以发现,回流功率和电流有效值的最优工作点并非在同一移相角组合下取得,不同优化目标在最优工作点移相角组合选取上存在较大差异。虽然DAB变换器在全功率范围下的优化控制策略难以统一,但在低功率段的优化方式上相关文献具有高度一致性。在低功率段,采用三角波电流控制策略,如图8所示,可以减小开关器件电流应力,并实现部分器件的ZCS。另一方面,在实际应用中难以同时对通态损耗和开关损耗进行优化,因此根据DAB变换器的工作场合选择优化目标是实际应用中的最优方案。一般而言,在高压大功率场合,功率器件开关频率相对较低,通态损耗在总损耗中占比较大,因此优先对通态损耗进行优化;在低压小功率场合,功率器件运行在较高开关频率,暂态损耗是总损耗中的主要部分,因此应当优先实现器件的软开关。

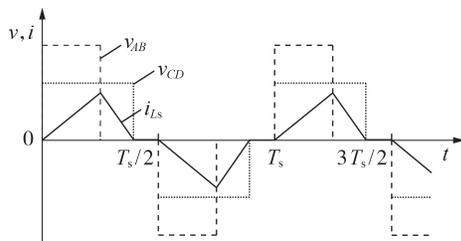


图8 三角波控制策略下DAB变换器方波电压和电感电流

Fig.8 Square wave voltage and inductor current of DAB converter under triangle wave control strategy

### 3.2 软启动策略

直流变压器尚未启动时,直流电容初始电压为0,可视为短路状态<sup>[45]</sup>。因此,直接启动会产生冲击电流,严重时还会造成器件损坏,也可能触发直流变压器内部保护装置误动作,导致启动失败。因此需要在变换器正常投入运行前对直流电容进行预充电,以减小启动时的冲击电流。现有的直流变压器

软启动策略主要包括基于外部辅助电路的软启动策略<sup>[19,46]</sup>和基于直流变压器自身控制的软启动策略<sup>[45,47-51]</sup>。

基于外部辅助电路方面,文献[19]在多电池组储能系统中增加了由启动电阻和直流断路器组成的预充电电路,提出了电流闭环和电压闭环切换的预充电控制策略,该方法具备较好的动态特性,但直流断路器和启动电阻的使用增加了装置的体积和成本。文献[46]提出了一种针对隔离型 Boost 全桥变换器的软启动策略,为输入电感增加了类似反激式绕组的辅助电路,如附录中图 A10 所示。在启动时辅助电路向电感提供能量泄放通路,避免了冲击电流的产生。但该方法只适用于特定拓扑,在直流变压器常用拓扑中难以推广应用。

基于直流变压器自身控制方面,文献[45]提出了一种采用两段式充电的软启动方法:第一阶段中将输出侧功率器件闭锁,输出电容由反并联二极管充电;第二阶段中加入移相控制,调整输出电压至额定值。但该方法在控制模式切换时会导致输出电压发生跌落或振荡。为此文献[47]提出了改进的两段式软启动方法,在切换为移相控制时,结合变换器运行状态给定移相角初始值,有效减小了切换过程中的电压跌落,启动电压波形如附录中图 A11 所示。文献[48]提出了一种包括恒流充电、SPS 控制和输出电压闭环控制的三段式软启动策略,分析了启动过程中移相角、电压比等参数与充电电流应力之间的关系,并考虑了启动过程中产生的直流偏置分量对变压器的影响。文献[49]分析了 DAB 变换器启动过程中冲击电流产生的原因,提出了 SPS 和 TPS 控制下的软启动方法,在启动的第一个 1/4 开关周期内,闭锁系统输出脉冲,可以降低启动时的冲击电流。文献[50]分析了不同启动时刻对 DAB 变换器启动过程中电流应力的影响,在输入、输出侧方波电压占空比逐渐增大的基础上,保持输入、输出侧方波电压始终处于交错位置,确保电感电流前后半个周期内在不同方向上的增量相同,避免了冲击电流和直流偏置分量的产生。

现有文献中提出的软启动策略大多用于实验室样机,并未充分考虑直流变压器在实际运行时的具体工况。在实际工程中,直流变压器高、低压侧二次供电系统通常是各自独立地从高、低压侧直流电容取电<sup>[52]</sup>,上述取能方式对于直流变压器的启动逻辑制定具有重大影响,在后续的研究中应当充分考虑。

### 3.3 直流偏置电流抑制策略

直流变压器在启动、负载投切等暂态过程中,电感电流中会出现直流偏置分量,具体原因是由于暂态过程中电感两端电压伏秒积不为 0,导致电感伏秒平衡被破坏,从而在电感电流中产生了直流偏置

分量。直流偏置分量增加了开关器件的电流应力,严重时还将导致变压器磁饱和,影响了直流变压器的稳定运行。消除直流偏置分量的方式可以分为硬件消除和软件消除。硬件消除方法通常在直流变压器内部加入隔直电容,但隔直电容降低了直流变压器的功率密度,也改变了直流变压器的运行特性。因此,现有文献中通常采用软件消除方式对直流偏置分量进行消除。

采用软件消除方式消除直流偏置分量可以分为电路分析方式<sup>[53-58]</sup>和磁路分析方式<sup>[59-61]</sup>。电路分析方式通过保持电感电压伏秒平衡来抑制直流偏置分量产生,磁路分析方式则通过保持变压器磁平衡来抑制直流偏置分量产生。

在电路分析方面,文献[53]详细分析了移相控制下 DAB 变换器直流偏置分量产生的原理,并提出了适用于各类 MPS 控制的直流偏置分量抑制策略,如附录中图 A12 所示。但该方法需要实时记录暂态过程前的移相角,具体实现有一定难度。文献[54]建立了 DAB 变换器输入、输出侧直流偏置分量的交直流等效模型,提出了一种基于硬件电路的直流偏置分量检测方法。文献[55]提出了一种基于不对称占空比控制和电流预测的直流偏置分量抑制策略,其控制结构简单,仅需 1 个电压比例-积分(PI)环节,但需要准确采集电感高频链电流峰值。文献[56]建立了考虑励磁电感参数的 DAB 变换器小信号模型,分析了高频变压器原、副边高频电流直流分量的耦合机理,提出了基于直流共模差模分量的直流偏磁抑制方法。

在磁路分析方面,文献[59]提出了一种基于主磁芯和辅助磁芯之间磁路共享的磁通量检测方法,并通过该方法对变压器直流磁化分量进行补偿,检测方法的等效电路如附录中图 A13 所示。文献[60]从磁路平衡角度出发,在闭环磁通平衡控制中引入偏差预测环节,提出了一种抑制稳态和暂态直流偏置分量的磁通平衡控制方法。

目前,针对直流偏置分量抑制策略的研究主要集中在两端口直流变压器,对于多端口直流变压器暂态过程中直流偏置分量抑制的研究较少<sup>[62]</sup>。多端口直流变压器内部电磁能量交互相比两端口直流变压器更加复杂,端口间的相互影响也更为显著。此外,多端口直流变压器控制变量增多,增加了暂态过程中直流偏置分量的求解难度。开展多端口直流变压器的直流偏置分量抑制策略研究,有助于进一步认识多端口直流变压器的暂态运行特性,保障复杂工况下多端口直流变压器的稳定运行。

### 3.4 功率控制策略

分布式能源的接入使得直流电网内潮流方向具有多向性,负载投切、线路故障等因素引起的直流母

线电压波动,使得直流变压器的功率控制策略更加复杂。保持多工况下直流母线潮流合理的分配与转移以及维持直流母线电压稳定,是直流变压器功率控制的核心目标。现有的文献中,对两端口直流变压器功率控制策略的研究主要集中在负载投切、输入电压脉动等工况下保持输出端口电压稳定<sup>[63-69]</sup>;对多端口直流变压器功率控制策略的研究主要集中在考虑分布式能源接入后的端口能量管理<sup>[70-76]</sup>。

针对两端口直流变压器,文献[63]提出了一种DAB变换器的直接功率控制方法,利用电压外环PI控制器校正参数偏差,避免了硬件参数误差对控制精度产生的影响,同时将输入、输出电压加入控制环路中,提高了DAB变换器在输入电压脉动下的动态响应能力。文献[64]在直接功率控制的基础上,提出了基于负载电流前馈的DAB变换器功率控制方法,如附录中图A14所示。通过将负载电流加入移相占空比的求取环节中,可以在负载突变时维持输出电压基本不变。文献[65]建立了DAB变换器输出电压离散模型,提出了一种基于模型前馈的电流应力优化方法,在提升变换器运行效率的同时,提高了变换器对负载突变和输入电压突变的响应能力。文献[66]建立了基于开关信号函数的DAB变换器线性动态模型,可以准确表征DAB变换器对参考电压和负载电流变化的瞬态响应,并提出了基于负载电流前馈和死区时间补偿的DAB变换器功率控制策略。文献[67]提出了一种电流模式调制下DAB变换器的负载前馈控制策略,并建立了线性和非线性前馈控制模型。

针对多端口直流变压器,文献[70]提出了应用于风能/光伏混合发电系统的多端口直流变压器功率管理策略。文献[71]构建了基于三端口直流变压器的智能住宅微电网系统,提出了基于模糊控制的能量管理单元,根据实时和长期预测的能量产生和消耗数据选择合理运行模式。文献[72]提出了电动汽车站中多电源和多负载之间的功率切换和功率流动策略,可以同时多个具有不同电压和功率等级的电动汽车进行充电。文献[73]研究了连接燃料电池、超级电容和电网的三端口直流变压器并/离网运行策略。文献[74]利用电压下垂和移相控制实现了多电飞机中多电源之间的能量交互。文献[75]提出了一种基于电压下垂的直流微电网混合储能控制策略,通过直流母线电压、超级电容电压及蓄电池荷电状态自动切换工作模式。单一的下垂控制在对直流微电网间能量交换的协调控制上具有较大局限性,容易受到敏感负荷、电压跌落、线路参数等因素的影响,为此文献[76]提出了基于标幺化下垂移相的三端口直流变压器功率协调控制策略,如附录中图A15所示。将单母线直流微电网的电压-有功功

率下垂特性标幺化,得到不同电压等级直流微电网间需交互的能量,实现在正常、不正常和功率故障等多种运行状态下对直流电网的功率支撑。

现有文献对直流变压器在多工况下的功率控制策略研究取得了丰富的成果,但对直流变压器运行工况的全面梳理还有待完善,对不同运行工况下直流变压器的端口能量交互机理、多运行模式间直流变压器的无缝切换控制策略等关键问题的研究也有待进一步深入。

### 3.5 解耦控制策略

对于电耦合型多端口直流变压器,通常采用主从控制策略,端口间一般不存在耦合功率。对于磁耦合型多端口直流变压器,受移相控制策略影响,方波电压存在移相角的端口之间均有功率流动,因此同为输入或输出端口之间存在耦合功率,图9给出了单输入双输出模式下TAB变换器的等效电路图。图中,端口1为输入端口;端口2、3为输出端口; $v_0$ 为三绕组变压器中性点电压; $P_{ij}$ 为端口*i*、*j*之间的等效传输功率( $i, j=1, 2, 3$ 且*i*≠*j*); $P_i$ 为端口*i*的输入或输出功率; $L_{ij}$ 为端口*i*、*j*之间的等效电感; $L_1$ 为端口1辅助电感; $L'_2$ 、 $L'_3$ 分别为端口2、3辅助电感折算至端口1的等效电感; $v_{H1}$ 为端口1桥臂中点输出电压; $v'_{H2}$ 、 $v'_{H3}$ 分别为端口2、3桥臂中点输出电压折算至端口1的等效电压。从图9(a)中可以看到,由于等效电感 $L_{23}$ 支路的存在,输出端口2、3之间存在耦合功率。耦合功率的存在加剧了端口间的相互影响,在某一端口出现电压或功率波动时,将导致耦合端口也发生波动,严重影响了直流变压器的稳定运行。对此,现有的解耦策略主要包括软件解耦和硬件解耦。

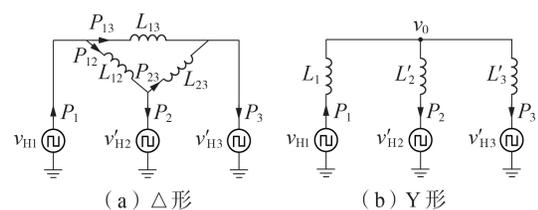


图9 TAB变换器的等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of TAB converter

常用的软件解耦策略包括前馈解耦、逆矩阵解耦和单位矩阵解耦等策略。文献[77]建立了SPS控制策略下的TAB变换器小信号模型,提出了基于逆矩阵的解耦策略。文献[78]提出了一种基于神经网络的解耦矩阵在线计算方法,可以降低解耦算法复杂度,但该方法只适用于固定参数,灵活度不高。为避免前馈解耦策略中产生的电流谐振尖峰,文献[79]在控制环路中增加了虚拟电阻,消除了解耦控制策略中的电流谐振,改善了系统的动态性能。文献[80]提出了一种针对TAB变换器的模型预测控制策略,在不借助解耦矩阵的情况下达到了功率解

耦的效果。

在硬件解耦策略方面,文献[81]提出了基于半桥谐振网络的硬件解耦策略,拓扑结构和等效电路如附录中图A16所示。在变压器和辅助电感之间串入电容构成谐振网络,当串联电感和电容发生谐振时,谐振端口等效电抗趋近于0,谐振端口方波电源直接连接至多绕组变压器中性点 $v_0$ ,使得相互耦合的3条支路变为2条独立支路,达到了功率解耦的效果。文献[82]提出了一种LCLC型多谐振三端口双向直流变换器拓扑,建立了蓄电池端口和超级电容端口之间的功率耦合模型,并提出了基于硬件参数和开关器件驱动频率选型的减小功率耦合的方法。

硬件解耦策略解耦精度高,控制也较为简便,但由于增加了解耦网络,改变了直流变压器的功率传输特性和工作模式。软件解耦策略需要准确获取直流变压器硬件参数和运行参数,而在实际工况中,部分硬件参数和运行参数会随直流变压器工作状态的改变而改变,难以准确获取。因此,如何准确获取解耦矩阵是提高软件解耦策略的解耦精度需要解决的关键问题。

#### 4 高频变压器

高频变压器是直流变压器的重要组成部分,对直流变压器的运行特性有着直接影响。高频变压器可用于直流变压器中高频链电压幅值的升降,有助于实现高增益的直流电能变换;高频变压器的漏感直接影响了DAB变换器的最大传输功率;高频变压器的励磁电感和谐振单元参数匹配,才能实现谐振变换器宽工作范围内的软开关。相比于传统工频变压器,高频变压器在体积、重量等方面也具有明显优势,进一步提高了直流变压器的功率密度。此外,高频变压器还提供了良好的电气隔离特性,有效防止了故障扩散。现有的文献对高频变压器的设计理论与研制方法开展了丰富的研究,本节对高频变压器的磁芯材料、绕组结构、绝缘和散热等关键技术进行了讨论。

##### 4.1 磁芯材料

高频变压器的磁芯材料通常具有高磁饱和密度和高磁导率。较高的磁饱和密度可以减小高频变压器体积,较高的磁导率可以降低磁芯损耗<sup>[83]</sup>。此外,高频变压器磁芯选型时重点关注的参数还包括居里温度、电阻率、磁致伸缩系数、单位损耗等。高频变压器常用的磁芯材料主要包括硅钢片、铁氧体、非晶合金和纳米晶等。

硅钢片是一种含碳量极低的硅铁软磁合金,具有较高的磁导率和磁通密度,但随着工作频率的增加,硅钢片磁芯损耗将大幅提升,因此硅钢片通常应用于低频工作场合。铁氧体高频损耗相比硅钢片较

低,但其磁饱和密度低,一般为硅钢片的1/3左右。因此,同样的设计指标下,采用铁氧体的高频变压器体积相比采用硅钢片的高频变压器较大。常用的非晶合金种类包括铁基、铁镍基、钴基、超微晶合金等<sup>[84]</sup>,非晶合金具有较高的磁导率和磁饱和密度,损耗相比硅钢片可以减小60%~70%,广泛用于配电变压器、大功率开关电源等场合,但非晶合金磁致伸缩效应明显,导致高频变压器振动和噪声较大<sup>[85]</sup>。纳米晶相比其他几种磁芯材料具有出色的综合性能,不但具有较高的磁饱和密度和磁导率,还具备较低的损耗,但其制作成本较高,因此使用范围受限。文献[86]研制了2台具有相同容量、分别采用硅钢片和纳米晶作为磁芯材料的高频变压器,采用纳米晶作为磁芯材料的高频变压器的体积和重量减小超过85%。

表1给出了3种磁芯材料的主要参数<sup>[87]</sup>,表2对比了主要磁芯材料的性能并给出了不同磁芯材料的适用场合<sup>[83-85]</sup>。从表1和表2中可以看到,各种磁芯材料参数存在较大差异,难以同时兼顾损耗小、成本低、功率密度高等特性。在磁芯材料选型时,除对比不同磁芯材料主要参数外,还应当充分结合高频变压器实际工作场合及直流变压器运行特性,从而确定最优磁芯材料选型。

表1 3种磁芯材料参数<sup>[87]</sup>

Table 1 Parameters of three core materials<sup>[87]</sup>

参数	数值		
	铁氧体 (型号3C96)	非晶合金 (型号2605)	纳米晶(型号 VAC500F)
饱和磁密/T	0.5	1.56	1.2
工作频率/kHz	<400	5~100	20~200
磁导率	2200	4000~80000	20000~30000
居里温度/℃	>240	395	600
单位损耗/(mW·cm <sup>-3</sup> )	63.65	107.7	6.7

表2 主要磁芯材料性能比较<sup>[83-85]</sup>

Table 2 Comparison of material characteristics of main magnetic cores<sup>[83-85]</sup>

材料	优点	缺点	适用场合
硅钢片	磁导率极高,磁饱和密度高	高频损耗大	<1 kHz,工频变压器中常使用
铁氧体	电阻率大,涡流损耗小,成本低	磁饱和密度较低,体积大	高频小功率
非晶合金	磁导率和磁饱和密度较高	电阻率低,振动和噪声较大	中低频大功率
纳米晶	磁导率和磁饱和密度高,综合性能突出	成本高,材料脆	高频大功率

##### 4.2 绕组结构

高频变压器常采用铜箔、圆导体及利兹线作为绕组材料。在高频下受导体自身的集肤效应及相邻导体的邻近效应影响,高频变压器绕组导体中电流密度分布不均匀,绕组损耗加剧。为降低绕组损耗,

一般采用利兹线以螺线管的形式缠绕在磁芯上<sup>[88]</sup>。

高频变压器常见的绕组结构有无交叉式、三明治式和交叉换位式3种,如附录中图A17所示。无交叉式结构中原、副边绕组完全分开绕制,工艺相对简单,但会引起很大的漏感,并导致邻近效应增强,变压器铜损较大;三明治式结构中原、副边绕组隔层交叉绕制,工艺较为复杂,漏感和邻近效应相较无交叉式结构较小,相应地变压器铜损也降低;交叉换位式结构中原、副边绕组每层交叉绕制,工艺最为复杂,但漏感和邻近效应得到了进一步降低。此外,采用交叉换位式结构的高频变压器故障率低,可靠性和效率均得到了提高<sup>[89]</sup>。

绕组损耗实质是高频变压器绕组导体的欧姆损耗<sup>[90]</sup>,其损耗特性随工作频率的变化而变化。高频运行时,绕组内存在较大交流损耗。对于工频变压器,由于绕组的交流电阻与直流电阻几乎相等,可以将直流电阻近似等效为工作电阻。对于高频变压器,高频效应增加了绕组的交流电阻,且远大于直流电阻<sup>[85]</sup>,因此高频变压器绕组的损耗计算中需重点考虑高频交流损耗。此外,高频变压器的绕组结构会影响其窗口内磁场分布,进而影响绕组内涡流场分布,使绕组损耗分析更为复杂<sup>[91]</sup>。目前,绕组损耗的计算方法主要有:用于计算铜箔绕组交流电阻的Dowell模型<sup>[92]</sup>;在Dowell模型的基础上,考虑集肤效应和邻近效应,用于计算圆导体交流电阻的Ferreira模型<sup>[93]</sup>;用于计算利兹线绕组损耗的Bartoli和Tourkhani模型等<sup>[94-95]</sup>。

### 4.3 绝缘和散热

相比工频变压器,高频变压器大幅降低了体积,提高了功率密度,但减小了绝缘距离和散热面积。高频高压场合下的复杂工况,如高频脉冲、混合频率应力等,加速了绝缘材料的老化,增加了绝缘击穿的风险<sup>[83,96-97]</sup>。此外,高频变压器多为干式变压器,对紧凑型设计的要求高,导致其绝缘和散热的设计相比传统变压器难度更大。

高频变压器的绝缘设计主要包括主绝缘设计和绕组间绝缘设计<sup>[85]</sup>。常用的主绝缘方式包括环氧树脂浇注和油浸式。环氧树脂浇注的绝缘性能好,但热导率低。油浸式的散热性能佳,但高频下铁芯振动产生的碎屑会进入变压器油中,导致绝缘失效<sup>[84]</sup>。绕组间绝缘则通常采用漆包线漆或绝缘纸分隔绕组导线<sup>[83]</sup>。

高频变压器的散热方式主要有自然对流、强迫风冷、水冷、油冷等。自然对流是高频变压器最理想的散热形式,但需要足够大的空间,不利于装备的紧凑型设计。水冷与油冷可以较好地满足高频变压器的散热需求,但增大了变压器的重量,也增加了绝缘设计的难度。强迫风冷具有较好的综合性能,

采用强迫风冷散热方式的变压器输出容量可提高50%<sup>[83]</sup>。

高频变压器能提高直流变压器功率密度和传输效率,但由于长期工作在高压高频和大功率场合下,其设计存在诸多难题。除磁芯损耗、绕组损耗、绝缘和散热设计外,随着工作频率的提高,高频变压器分布参数对自身和电力电子器件产生的影响也显著增加。在高频变压器的设计过程中,应结合直流变压器的实际运行工况和功率传输特性,开展对磁芯材料、绕组结构、绝缘和散热等设计指标的多目标联合优化,兼顾高效能量传输和可靠运行。

## 5 总结与展望

直流变压器是具有直流电压变换与直流电能分配能力的高效电力电子装备,是直流电网发展与建设的关键技术。本文针对中低压直流变压器的发展现状进行了总结和分析,主要包括直流变压器的基本功能和运行场景、直流变压器的拓扑结构和控制策略、高频变压器的关键技术等。近年来,直流变压器的发展已经颇具规模,在理论工作研究和工程样机研制等方面都取得了重大突破。对于未来直流变压器的研究,笔者有以下展望。

(1)面向全局的直流变压器运行效率提升方法。现有的研究针对直流变压器的运行效率取得了丰富的研究成果,但对直流变压器的效率优化方法尚未取得统一的结论,对直流变压器内部环流、无功功率等物理量也无精准阐释。在后续的研究工作中,可以重点开展直流变压器内部电磁能量交互机理分析,构建直流变压器完备精确的损耗模型,发掘影响直流变压器运行效率的核心因素,从而提出面向全局的直流变压器运行效率优化理论和方法。

(2)多工况下直流变压器瞬态能量平衡控制方法。在实际运行中,直流变压器面临分布式能源波动、负荷随机投切、电网异常扰动、运行方式改变等复杂工况,导致直流变压器端口间能量交互频繁,对直流母线电压和直流电网内的潮流分配与转移造成了严重影响。建立多时间尺度下直流变压器瞬态能量交互模型,探索多工况下直流变压器瞬态能量流动平衡机理,实现直流变压器在多运行模式间的无缝切换,确保直流电网内能量的平稳流动,是未来直流变压器多工况运行研究中值得关注的方向。

(3)直流变压器容错技术研究。直流电网短路、断线等故障引起的直流母线电压突变,对直流变压器的运行与控制造成严重影响,直流变压器自身功率器件、高频变压器等硬件设备故障也将危及直流电网的稳定运行。目前,针对直流变压器外部故障的研究集中在含直流变压器的直流电网极间、极地短路故障的识别和定位,针对直流变压器本体故障

的研究集中在功率器件开路故障下直流变压器的容错运行策略,对直流变压器稳定运行影响最为严重的短路故障鲜有研究。为保障直流变压器在剧烈电压扰动及自身局部故障等极端工况下的稳定可靠运行,实现直流电网的高可靠供电,需对直流变压器的故障容错技术开展深入研究,包括直流变压器故障态下的运行机理分析、运行边界刻画和容错运行策略研究等。

(4)高压大功率高频变压器的设计和制造。高压大功率的工作场合增加了高频变压器绝缘材料击穿的风险;体积的大幅减小,使得高频变压器散热面积减小,导致高频变压器的散热问题突出;工作频率的提高,使得变压器分布参数对功率器件和直流变压器运行特性产生的影响显著增强,给高频变压器的设计和制造带来了严峻挑战。在未来的研究中,刻画高压高频场合下磁芯绕组损耗分布特性,剖析高频高温等恶劣工况下绝缘材料的老化机理,开展高频变压器散热优化设计与综合热管理,探索寄生参数高精度量测方法,完善高压大功率场合下高频变压器的设计理论和制造方法,对提高高频变压器的运行效率和功率密度、保障直流变压器安全稳定运行具有重要意义。

(5)新型功率器件在直流变压器中的应用。直流变压器是高度电力电子化的电能变换装备,功率器件的发展水平直接影响了直流变压器的运行效率、功率密度、可靠性和应用场合。新型功率器件包括以碳化硅SiC(Silicon Carbide)功率器件为代表的宽禁带半导体功率器件,也包括近年来得到广泛关注的混合功率器件。相比于硅基功率器件, SiC功率器件在开关速度、耐压等级和导通损耗等方面有明显优势。但现阶段SiC功率器件还不能完全代替硅基器件,一方面目前尚无商用的高压SiC功率器件,另一方面,高开关频率下的串扰电压、短路耐受时间短等因素降低了SiC功率器件的可靠性,制约了SiC功率器件在高压大功率场合下的应用。对于混合功率器件,其通常将优劣互补的2种功率器件进行组合,充分发挥2种功率器件的优势,弥补各自不足,具有“1+1>2”的效果。混合功率器件应用的关键在于与电力电子装备的实际运行特性相结合,但目前混合功率器件的设计与应用方面还未形成成熟的体系,是未来研究中值得重点关注的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] STARKE M, TOLBERT L M, OZPINECI B. AC vs. DC distribution: a loss comparison[C]//2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, IL, USA: IEEE, 2008: 1-7.
- [2] 郭焱林, 刘俊勇, 魏震波, 等. 配电网供电能力研究综述[J].

电力自动化设备, 2018, 38(1): 33-43.

GUO Yanlin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Load supply capability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 33-43.

- [3] WANG F, PEI Y, BOROYEVICH D, et al. AC vs. DC distribution for off-shore power delivery[C]//2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando, FL, USA: IEEE, 2008: 2113-2118.
- [4] 吴盛军, 王益鑫, 李强, 等. 低压直流供电技术研究综述[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 1-8.
- WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 1-8.
- [5] 冯成, 王毅, 陈启鑫, 等. 能源互联网下的数据中心能量管理综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 1-9.
- FENG Cheng, WANG Yi, CHEN Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1-9.
- [6] 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.
- [7] DE DONCKER R W, DIVAN D M, KHERALUWALA M H. A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 1(27): 63-73.
- [8] ZHAO Biao, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. A modular multi-level DC-link front-to-front DC solid-state transformer based on high-frequency dual active phase shift for HVDC grid integration[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8919-8927.
- [9] 张微微. Buck/Boost变换器与双向全桥DC/DC变换器级联系统建模及控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- ZHANG Weiwei. Modeling and control of Buck/Boost and full-bridge bidirectional DC/DC cascade system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [10] 陈启超. CLLLC谐振型双向DC/DC变换器若干关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- CHEN Qichao. Research on key technologies of bidirectional CLLLC resonant DC/DC converter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [11] 陈一鸣. 宽范围软开关LCC谐振变换器电路及控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- CHEN Yiming. Study on topologies and control of LCC resonant converter with wide soft switching operation range[D]. Chengdu: Xinan Jiaotong University, 2018.
- [12] 胡海兵, 王万宝, 孙文进, 等. LLC谐振变换器效率优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 48-56.
- HU Haibing, WANG Wanbao, SUN Wenjin, et al. Optimal efficiency design of LLC resonant converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 48-56.
- [13] 陶文栋, 王玉斌, 张丰一, 等. 双向LLC谐振变换器的变频-移相控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5856-5863.
- TAO Wendong, WANG Yubin, ZHANG Fengyi, et al. Pulse frequency modulation and phase shift combined control method for bidirectional LLC resonant converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5856-5863.
- [14] 潘海燕, 贺超, 蒋友明, 等. 高效的LLC谐振变换器变模式控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 71-78.
- PAN Haiyan, HE Chao, JIANG Youming, et al. Efficient variant mode control of LLC resonant converter[J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2015, 35(1): 71-78.
- [15] 张航, 赵晋斌, 屈克庆, 等. 高效率LLC谐振变换器的定频混合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 92-98.  
ZHANG Hang, ZHAO Jinbin, QU Keqing, et al. Fixed-frequency hybrid control strategy of high-efficiency LLC resonant converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 92-98.
- [16] 袁义生, 张钟艺, 梅相龙, 等. 三电平LLC谐振变换器关断损耗的优化设计[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 28-37.  
YUAN Yisheng, ZHANG Zhongyi, MEI Xianglong, et al. Optimal design of switching-off loss in three-level LLC resonant converters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 28-37.
- [17] 孙利, 陈武, 蒋晓剑, 等. 能源互联网框架下多端口能量路由器的多工况协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 32-39.  
SUN Li, CHEN Wu, JIANG Xiaojian, et al. Coordinated control of multiple operation conditions for multi-port energy router in energy internet framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 32-39.
- [18] 行登江, 李道洋, 王先为, 等.  $\pm 10$  kV 光伏直流接入线路极间短路故障协调控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3847-3855.  
XING Dengjiang, LI Daoyang, WANG Xianwei, et al. Coordinated control strategy for short-circuit faults of  $\pm 10$  kV photovoltaic DC collection lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3847-3855.
- [19] 田明杰, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于多端口DC/DC变换器的电池储能系统软启动控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2465-2471.  
TIAN Mingjie, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. The soft starting control strategy on the multi port DC/DC converter of battery storage system[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2465-2471.
- [20] LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Synergetic control of high-frequency-link based multi-port solid state transformer[C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 5630-5635.
- [21] 魏树生, 赵争鸣, 文武松, 等. 共交流母线多端口变换器高频振荡特性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(9): 751-762.  
WEI Shusheng, ZHAO Zhengming, WEN Wusong, et al. Analysis of the high-frequency oscillation characteristics of a multi-port converter with an AC link[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(9): 751-762.
- [22] JOVICIC D, LIN Weixing. Multiport high-power LCL DC hub for use in DC transmission grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 760-768.
- [23] 林卫星, 文劲宇, 程时杰. 多端口直流自耦变压器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 727-734.  
LIN Weixing, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Multiport DC-DC autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 727-734.
- [24] COSTA L F, HOFFMANN F, BUTICCHI G, et al. Comparative analysis of multiple active bridge converters configurations in modular smart transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 191-202.
- [25] FALCONES S, AYYANAR R, MAO Xiaolin. A DC-DC multi-port converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2192-2203.
- [26] 涂春鸣, 栾思平, 肖凡, 等. 三端口直流能量路由器在TCM调制下的优化控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2503-2511.  
TU Chunming, LUAN Siping, XIAO Fan, et al. Optimal control strategy of three-port DC energy router under TCM modulation[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2503-2511.
- [27] 郑丹萍. 三端口电力电子变压器控制技术与运行分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.  
ZHENG Danping. Control strategy and operation analysis of triple-port power electronic transformer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [28] FAN Haifeng, LI Hui. High-frequency transformer isolated bi-directional DC-DC converter modules with high efficiency over wide load range for 20 kVA solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3599-3608.
- [29] ENGEL S P, STIENEKER M, SOLTAU N, et al. Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 124-137.
- [30] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295-4303.  
ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. High-frequency-link DC solid state transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303.
- [31] 袁栋, 袁宇波, 贾勇勇, 等. 一种混合型输入串联输出并联直流变压器[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 179-188.  
YUAN Dong, YUAN Yubo, JIA Yongyong, et al. An ISOP hybrid DC transformer to interconnect MVDC and LVDC distribution networks[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 179-188.
- [32] ZHAO Biao, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. High-frequency-link modulation methodology of DC-DC transformer based on modular multilevel converter for HVDC application: comprehensive analysis and experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3413-3424.
- [33] LUTH T, MERLIN M M C, GREEN T C, et al. High-frequency operation of a DC/AC/DC system for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4107-4115.
- [34] 李婧, 袁立强, 谷庆, 等. 一种基于损耗模型的双有源桥DC-DC变换器效率优化方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 66-76.  
LI Jing, YUAN Liqiang, GU Qing, et al. An efficiency optimization method in dual active bridge DC-DC converter based on loss model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 66-76.
- [35] 陈彬, 李琳, 赵志斌. 双向全桥DC-DC变换器中大容量高频变压器绕组与磁心损耗计算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 123-133.  
CHEN Bin, LI Lin, ZHAO Zhibin. Calculation of high-power high-frequency transformer's copper loss and magnetic core loss in dual-active-bridge DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 123-133.
- [36] MOU Di, LUO Quanming, WANG Zhiqing, et al. Optimal asymmetric duty modulation to minimize inductor peak-to-peak current for dual active bridge DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4572-4584.
- [37] SHAO Shuai, JIANG Mingming, YE Weiwen, et al. Optimal phase-shift control to minimize reactive power for a dual active bridge DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 10193-10205.
- [38] WU Fengjiang, FENG Fan, GOOI H B. Cooperative triple-phase-shift control for isolated DAB DC-DC converter to improve current characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7022-7031.

- [39] QIN Zian, SHEN Yanfeng, LOH P C, et al. A dual active bridge converter with an extended high-efficiency range by DC blocking capacitor voltage control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(7): 5949-5966.
- [40] 郭华越, 张兴, 赵文广, 等. 扩展移相控制的双有源桥DC-DC变换器的优化控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3889-3899.  
GUO Huayue, ZHANG Xing, ZHAO Wenguang, et al. Optimal control strategy of dual active bridge DC-DC converters with extended-phase-shift control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3889-3899.
- [41] GU Qing, YUAN Liqiang, NIE Jintong, et al. Current stress minimization of dual-active-bridge DC-DC converter within the whole operating range[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2019, 7(1): 129-142.
- [42] SHI Haochen, WEN Huiqing, HU Yihua, et al. Efficiency optimization of DC solid-state transformer for photovoltaic power systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(5): 3583-3595.
- [43] TONG Anping, HANG Lijun, LI Guojie, et al. Modeling and analysis of a dual-active-bridge-isolated bidirectional DC/DC converter to minimize RMS current with whole operating range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(6): 5302-5316.
- [44] SHI Haochen, WEN Huiqing, HU Yihua, et al. Reactive power minimization in bidirectional DC-DC converters using a unified-phasor-based particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(12): 10990-11006.
- [45] GIULIANI F, DELMONTE N, COVA P, et al. Soft-starting procedure for dual active bridge converter[C]//2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2015: 1-6.
- [46] 姜雪松. 隔离升压全桥DC-DC变换器拓扑理论和控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2006.  
JIANG Xuesong. Research on the topology theory and control technology of isolated Boost full bridge DC-DC converter[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [47] 潘羿威, 袁帅, 陈阿莲, 等. 一种应用于直流配电网的隔离直流变换器软启动方法[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2017, 47(4): 37-42.  
PAN Yiwei, YUAN Shuai, CHEN Ailian, et al. A soft starting method for the isolated DC/DC converter in DC distribution systems[J]. *Journal of Shandong University(Engineering Science)*, 2017, 47(4): 37-42.
- [48] YAO Pengfei, JIANG Xiaohua, WANG F F. Soft starting strategy of cascaded dual active bridge converter for high power isolated DC-DC conversion[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2020: 1031-1037.
- [49] 侯聂, 宋文胜. 全桥隔离DC/DC变换器的三重相移控制及其软启动方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(23): 6113-6121.  
HOU Nie, SONG Wensheng. Full-bridge isolated DC/DC converters with triple-phase-shift control and soft starting control method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(23): 6113-6121.
- [50] ZHU Zhichao, LIU Jilong, XIAO Fei, et al. Start-up procedure and soft-starting strategy for dual active bridge converter[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing, China: IEEE, 2020: 566-571.
- [51] PUGLIESE S, BUTICCHI G, MASTROMAURO R A, et al. Soft-start procedure for a three-stage smart transformer based on dual-active bridge and cascaded H-bridge converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(10): 11039-11052.
- [52] 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.
- [53] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Transient DC bias and current impact effects of high-frequency-isolated bidirectional DC-DC converter in practice[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(4): 3203-3216.
- [54] ZHANG Bocheng, SHAO Shuai, CHEN Linglin, et al. Steady-state and transient DC magnetic flux bias suppression methods for a dual active bridge converter[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(1): 744-753.
- [55] 雷涛, 李龙春, 邹岑颖, 等. 双有源桥DC-DC暂态直流偏置分析和抑制策略研究[J]. *电气工程学报*, 2018, 13(7): 8-15.  
LEI Tao, LI Longchun, ZOU Cenyong, et al. Study of transient DC bias analysis and suppression methods in dual active bridge converter[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2018, 13(7): 8-15.
- [56] 潘羿威. 应用于低压直流配电系统的双有源桥变换器控制技术[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
PAN Yiwei. Control techniques of dual-active-bridge converter for low voltage DC distribution systems[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [57] WANG Shien, LI Chi, WANG Kui, et al. Loss imbalance and transient DC-bias mitigation in dual-active-bridge DC/DC converters[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(2): 1399-1409.
- [58] BU Qinglei, WEN Huiqing, WEN Jiacheng, et al. Transient DC bias elimination of dual-active-bridge DC-DC converter with improved triple-phase-shift control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(10): 8587-8598.
- [59] ORTIZ G, FÄSSLER L, KOLAR J W, et al. Flux balancing of isolation transformers and application of "the magnetic ear" for closed-loop volt-second compensation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(8): 4078-4090.
- [60] YAO Pengfei, JIANG Xiaohua, XUE Peng, et al. Flux balancing control of ungapped nanocrystalline core-based transformer in dual active bridge converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(11): 11463-11474.
- [61] ASSADI S A, MATSUMOTO H, MOSHIRVAZIRI M, et al. Active saturation mitigation in high-density dual-active-bridge DC-DC converter for on-board EV charger applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4376-4387.
- [62] 余雪萍, 涂春鸣, 肖凡, 等. 三端口隔离DC-DC变换器的暂态直流偏置机理及抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(9): 1962-1972.  
YU Xueping, TU Chunming, XIAO Fan, et al. Transient DC bias mechanism and suppression strategy of the three-port isolated DC-DC converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(9): 1962-1972.
- [63] 侯聂, 宋文胜, 武明义. 全桥隔离DC/DC变换器的直接功率控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(17): 204-209.  
HOU Nie, SONG Wensheng, WU Mingyi. Direct power control scheme of full-bridge isolated DC/DC converters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(17): 204-209.
- [64] 侯聂, 宋文胜, 武明义. 双向全桥DC-DC变换器的负载电流前馈控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(9): 2478-2485.

- HOU Nie, SONG Wensheng, WU Mingyi. A load current feed-forward control scheme of dual active bridge DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2478-2485.
- [65] 安峰, 杨柯欣, 王嵩, 等. 基于模型前馈的双有源全桥DC-DC变换器电流应力优化方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2946-2956.
- AN Feng, YANG Kexin, WANG Song, et al. Current stress optimized scheme with model-based feedforward for dual-active-bridge DC-DC converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2946-2956.
- [66] SEGARAN D, HOLMES D G, MCGRATH B P. Enhanced load step response for a bidirectional DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 371-379.
- [67] SHAN Zhenyu, JATSKEVICH J, IU H H, et al. Simplified load-feedforward control design for dual-active-bridge converters with current-mode modulation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 2073-2085.
- [68] WU Yuheng, MAHMUD M, ZHAO Yue, et al. Uncertainty and disturbance estimator-based robust tracking control for dual-active-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1791-1800.
- [69] LIU Jianqiang, YANG Jingxi, ZHANG Jiepin, et al. Voltage balance control based on dual active bridge DC/DC converters in a power electronic traction transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1696-1714.
- [70] ZENG Jianwu, QIAO Wei, QU Liyan, et al. An isolated multiport DC-DC converter for simultaneous power management of multiple different renewable energy sources[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1): 70-78.
- [71] JAFARI M, MALEKJAMSHIDI Z, LU D D, et al. Development of a fuzzy-logic-based energy management system for a multiport multioperation mode residential smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3283-3301.
- [72] REZAAE S, FARJAH E. A DC-DC multiport module for integrating plug-in electric vehicles in a parking lot: topology and operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 5688-5695.
- [73] TAO Haimin, DUARTE J L, HENDRIX M A M. Line-interactive UPS using a fuel cell as the primary source[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 3012-3021.
- [74] KARANAYIL B, CIOBOTARU M, AGELIDIS V G. Power flow management of isolated multiport converter for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5850-5861.
- [75] 文波, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 892-898.
- WEN Bo, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898.
- [76] 涂春鸣, 栾思平, 肖凡, 等. 基于下垂移相的三端口直流能量路由功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4105-4114.
- TU Chunming, LUAN Siping, XIAO Fan, et al. A coordinated power control strategy of three-port DC energy router based on droop phase-shift[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4105-4114.
- [77] ZHAO Chuanhong, ROUND S D, KOLAR J W. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2443-2453.
- [78] 宋家康, 彭勇刚, 王晓明, 等. 基于神经网络的三端口DC-DC变换器解耦控制策略[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(2): 20-26.
- SONG Jiakang, PENG Yonggang, WANG Xiaoming, et al. Decoupling control strategy of three-port DC-DC converter based on neural network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(2): 20-26.
- [79] 邓明杰. 隔离型三端口变换器的分析和控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- DENG Mingjie. Analysis and control of isolated three port DC-DC converter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [80] 年珩, 叶余桦. 三端口隔离双向DC-DC变换器模型预测控制技术[J]. 电工技术学报, 2020, 35(16): 3478-3488.
- NIAN Heng, YE Yuhua. Model predictive control of three-port isolated bidirectional DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3478-3488.
- [81] 杨旭, 王卫, 王盼宝, 等. 基于串联谐振网络的三端口DC/DC变换器解耦方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 478-485.
- YANG Xu, WANG Wei, WANG Panbao, et al. Decoupling method of series resonance based three-port DC/DC converter[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 478-485.
- [82] 李微. 三端口混合储能直流微网母线电压控制器研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- LI Wei. Research on the three-port DC microgrid bus voltage regulator with hybrid energy storage[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [83] 王威望, 刘莹, 何杰峰, 等. 高压大容量电力电子变压器中高频变压器研究现状和发展趋势[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3362-3373.
- WANG Weiwang, LIU Ying, HE Jiefeng, et al. Research status and development of high frequency transformer used in high voltage and large capacity power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3362-3373.
- [84] 杨景刚, 张珂, 陈武, 等. 大功率中频变压器研究综述[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 4-17.
- YANG Jinggang, ZHANG Ke, CHEN Wu, et al. Review on researches of high-power medium-frequency transformer[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 4-17.
- [85] 叶志军, 林晓明, 谭锴佳, 等. 高频变压器技术研究综述[J/OL]. 电网技术. [2020-11-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1442>.
- [86] VILLAR I, MIR L, ETXEBERRIA-OTADUI I, et al. Optimal design and experimental validation of a medium-frequency 400 kVA power transformer for railway traction applications [C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA: IEEE, 2012: 684-690.
- [87] ZHANG Juanjuan, DU Yumei, LI Zixin, et al. Design of a medium frequency, high voltage transformer for power electronic transformer [C]//2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing, China: IEEE, 2014: 1-5.
- [88] 旷建军, 阮新波, 任小永. 集肤和邻近效应对平面磁性元件绕组损耗影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 170-175.
- KUANG Jianjun, RUAN Xinbo, REN Xiaoyong. Analysis of skin and proximity effects on winding losses in planar magnetic components[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 170-175.
- [89] 赵齐荫. 电力电子变压器中高频变压器磁芯和绕组特性的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- ZHAO Zhenghan. Research on high-frequency transformer's magnetic core and winding characteristic in power electronic transformer[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.

- [90] 岳全有. 电子电力变压器的综合损耗分析模型及其应用[D]. 长沙:湖南大学,2018.  
YUE Quanyou. Comprehensive power losses model for electronic power transformer and its application[D]. Changsha: Hunan University,2018.
- [91] 张珂,曹小鹏,乔光尧,等. 高频变压器绕组损耗解析计算分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(18):5536-5546.  
ZHANG Ke, CAO Xiaopeng, QIAO Guangyao, et al. Analysis of winding loss calculation methods for high frequency transformers[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(18):5536-5546.
- [92] DOWELL P L. Effects of eddy currents in transformer windings[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers,1966,113(8):1387-1394.
- [93] FERREIRA J A. Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1994,9(1):127-131.
- [94] BARTOLI M, NOFERI N, REATTI A, et al. Modelling winding losses in high-frequency power inductors[J]. Journal of Circuits, Systems, and Computers,1995,5(4):607-626.
- [95] TOURKHANI F, VIAROUGE P. Accurate analytical model of winding losses in round litz wire windings[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2001,37(1):538-543.
- [96] GUILLOD T, HUBER J E, ORTIZ G, et al. Characterization of the voltage and electric field stresses in multi-cell solid-state transformers[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Pittsburgh,PA,USA:IEEE,2014:4726-4734.
- [97] BENGTTSSON T, DIJKHUIZEN F, LI Ming, et al. Repetitive fast voltage stresses-causes and effects[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2009,25(4):26-39.

#### 作者简介:



刘 贝

刘 贝(1991—),男,湖北黄冈人,博士研究生,主要研究方向为多端口直流变压器(**E-mail**:beiliu@hnu.edu.cn);

涂春鸣(1976—),男,江西南昌人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电能质量与控制、电力电子技术在电力系统中的应用(**E-mail**:chunming\_tu@263.net);

肖 凡(1988—),男,湖南衡阳人,副研究员,博士,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(**E-mail**:woliaokk123@126.com)。

(编辑 李莉)

## Review of topology and control strategy of medium- and low-voltage DC transformer

LIU Bei, TU Chunming, XIAO Fan, YU Xueping, GUO Qi, SHUAI Zhikang

(National Engineering Research Center for Power Conversion and Control, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The DC transformer is the core equipment for voltage conversion and energy distribution in DC power grid, and its operating characteristics have profound impacts on DC power grid. Based on this, the current research status of DC transformers in medium- and low-voltage DC power grids is summarized and analyzed. Firstly, the basic functions and typical operating scenarios of DC transformers are briefly explained. Considering that the topology of DC transformer is the key to adapt to different voltage levels, the topologies of DC transformer are classified from the perspectives of the port numbers and energy coupling methods, and the main characteristics of various topologies are distinguished. Secondly, the control strategies of DC transformers in steady-state and transient operation processes, including efficiency optimization, soft-start, DC bias current suppression, etc., are comprehensively analyzed, which can ensure the efficient and reliable operation of DC transformer under complex working conditions. Thirdly, the key technologies of the core component of DC transformer, i.e. high-frequency transformer, are discussed to provide a reference for the selection and design of high-frequency transformers. Finally, the future development trend of DC transformer is prospected.

**Key words:** DC power grid; DC transformer; topology structure; control strategy; high-frequency transformer

## 附录

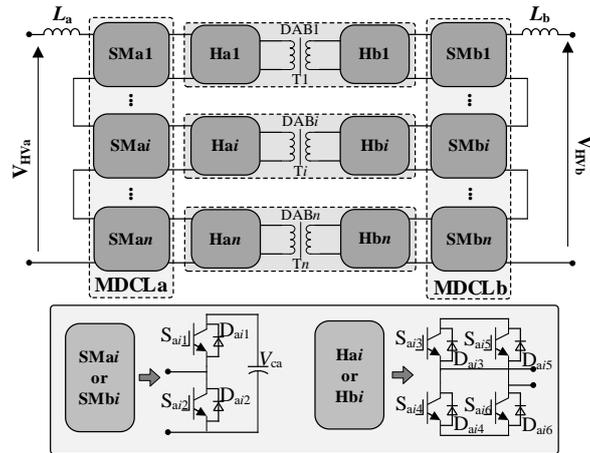


图 A1 加入半桥子模块的两级式 DAB 变换器拓扑<sup>[8]</sup>

Fig.A1 Topology of two-stage DAB converter with half-bridge sub-module<sup>[8]</sup>

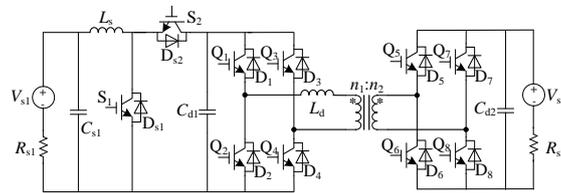


图 A2 Buck/Boost+DAB 变换器拓扑<sup>[9]</sup>

Fig.A2 Topology of Buck/Boost+DAB converter<sup>[9]</sup>

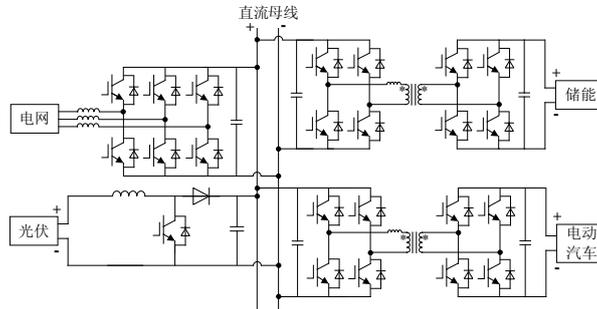


图 A3 电耦合型四端口直流变压器拓扑<sup>[17]</sup>

Fig.A3 Topology of electrically coupled four-port DC transformer<sup>[17]</sup>

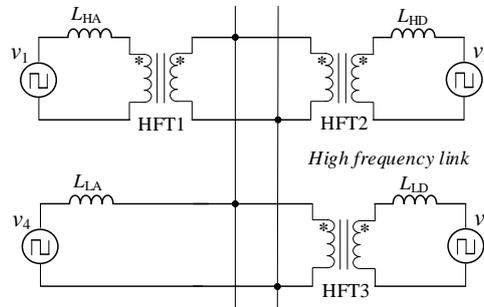


图 A4 共交流母线型多端口直流变压器等效电路<sup>[20]</sup>

Fig.A4 Equivalent circuit of multi-port DC transformer of common AC bus type<sup>[20]</sup>

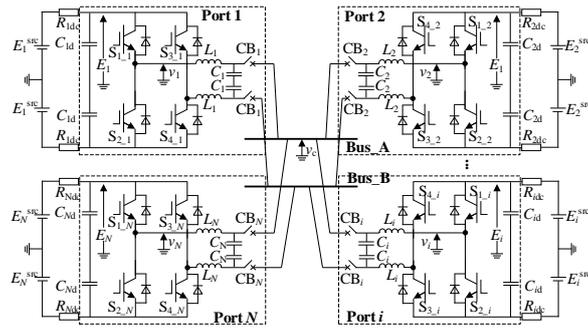


图 A5 N 端口直流变压器拓扑<sup>[22]</sup>

Fig.A5 Topology of *N*-port DC HUB<sup>[22]</sup>

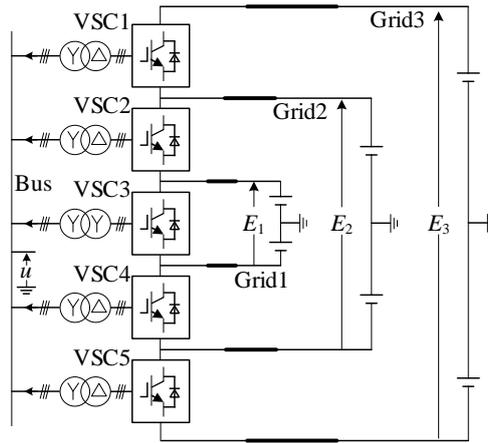


图 A6 多端口直流-直流自耦变压器拓扑<sup>[23]</sup>

Fig.A6 Topology of multiport DC-DC autotransformer<sup>[23]</sup>

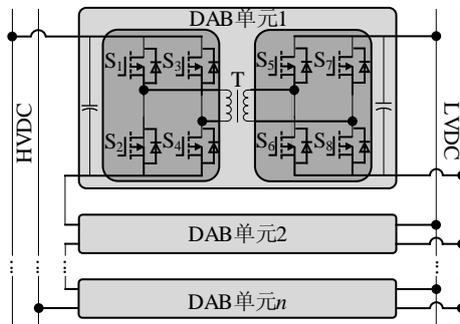


图 A7 ISOP-DAB 直流变压器拓扑<sup>[30]</sup>

Fig.A7 Topology of ISOP-DAB DC transformer<sup>[30]</sup>

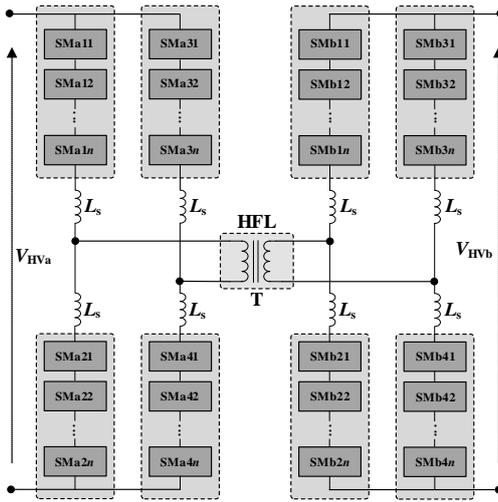


图 A8 两相模块化多电平直流变压器拓扑<sup>[32]</sup>

Fig.A8 Topology of two-phase modular multilevel DC transformer<sup>[32]</sup>

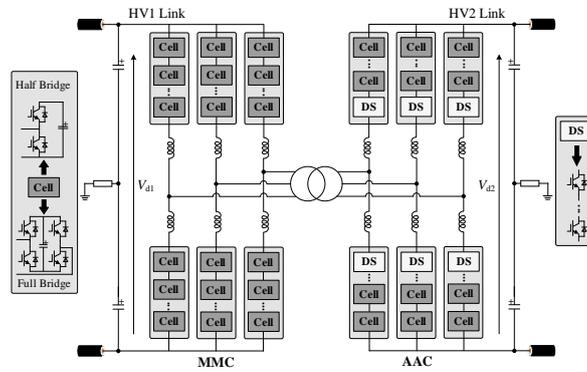


图 A9 三相模块化多电平直流变压器拓扑<sup>[33]</sup>

Fig.A9 Topology of three-phase modular multilevel DC transformer<sup>[33]</sup>

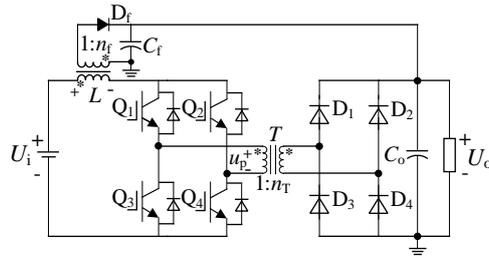


图 A10 含辅助启动电路的隔离型 Boost 变换器拓扑<sup>[46]</sup>

Fig.A10 Topology of isolated Boost converter with auxiliary starting circuit<sup>[46]</sup>

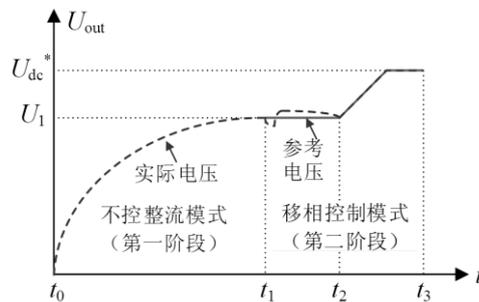
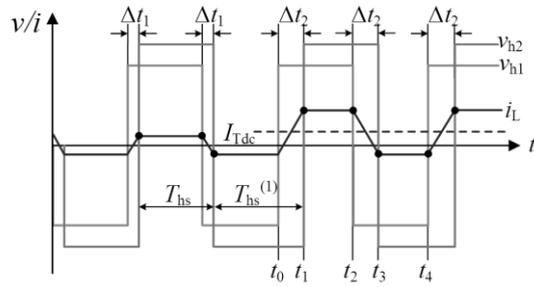
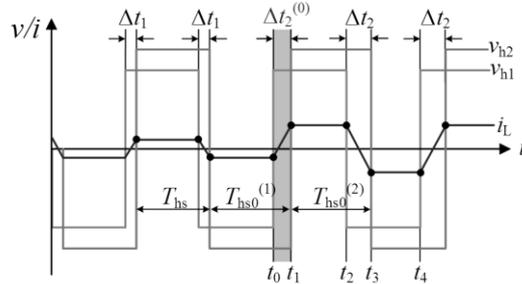


图 A11 改进的两段式软启动策略启动电压<sup>[47]</sup>

Fig.A11 Starting voltage of improved two-stage soft-start strategy<sup>[47]</sup>



(a) 产生原理



(b) 抑制原理

图 A12 直流偏置分量的产生和抑制原理（输出功率增加模式）<sup>[53]</sup>

Fig.A12 Principle of DC bias component generation and suppression(output power increase mode)<sup>[53]</sup>

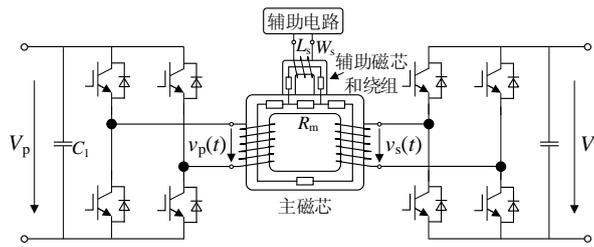


图 A13 “磁耳”等效电路<sup>[59]</sup>

Fig.A13 Equivalent circuit of “Magnetic Ear”,<sup>[59]</sup>

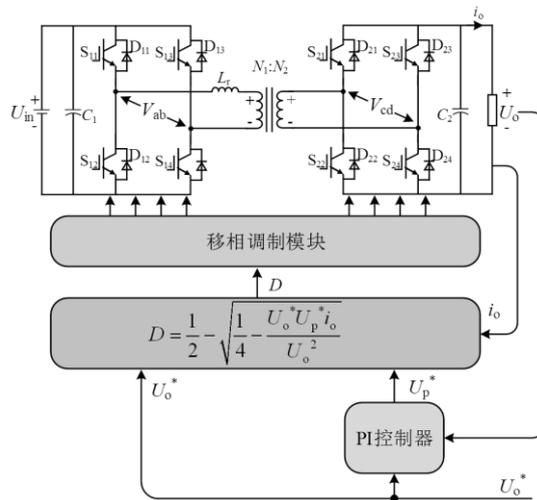


图 A14 DAB 变换器负载电流前馈控制策略<sup>[64]</sup>

Fig.A14 Load current feedforward control strategy of DAB converter<sup>[64]</sup>

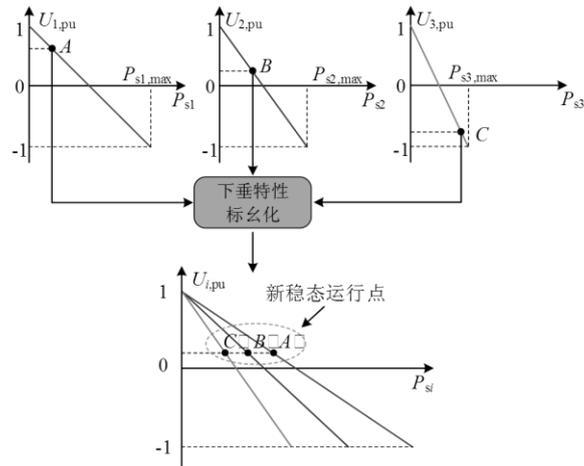
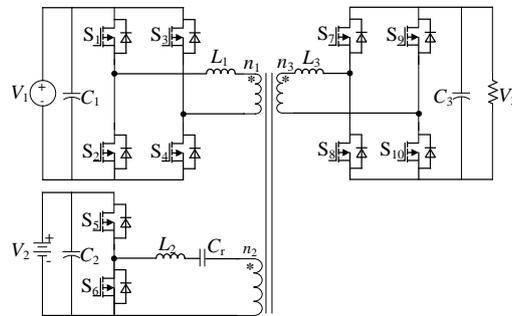
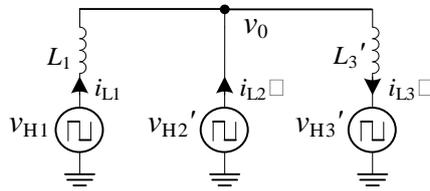


图 A15 三端口直流微电网下垂特性标么化<sup>[76]</sup>

Fig.A15 Normalization for droop control of three-port DC microgrid<sup>[76]</sup>



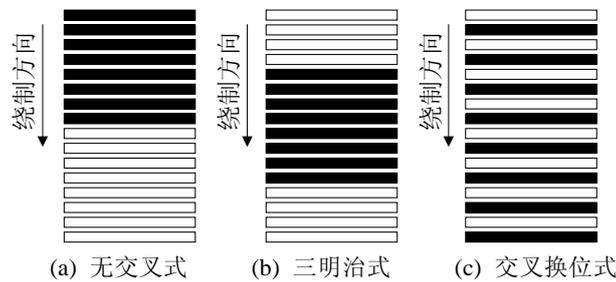
(a) 拓扑结构



(b) 等效电路

图 A16 基于串联谐振网络的三端口变换器拓扑及其等效电路<sup>[81]</sup>

Fig.A16 Topology of three-port converter based on series resonance network and its equivalent circuit<sup>[81]</sup>



(a) 无交叉式 (b) 三明治式 (c) 交叉换位式

图 A17 不同绕组结构模型<sup>[89]</sup>

Fig.A17 Different winding structure models<sup>[89]</sup>