

双有源桥式直流变压器发展与应用

赵彪, 安峰, 宋强, 余占清, 曾嵘

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Development and Application of DC Transformer Based on Dual-active-bridge

ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, YU Zhanqing, ZENG Rong

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: DC transformer (DCT) is the key to achieve efficient integration of new energy and connection of dc transmission and distribution buses. This paper gave a discussion on development and application of DCT based on dual-active-bridge. Firstly, the typical scenarios of DCT was summarized. On this basis, the analysis, design and implement scheme, including core circuit, typical topology, operation control, practical design, implementation and application, were discussed. At last, future research directions were prospected. Along with the rapid development of new energy and dc grid systems, the development and large-scale application of DCT are worth to expect.

KEY WORDS: dc grid; dc transmission and distribution; energy internet; dc transformer; dual-active-bridge converter

摘要: 直流变压器是实现新能源高效、经济的大规模汇集和构建直流输电一体化网络的关键设备。文中对双有源桥式直流变压器关键技术和应用进行介绍和展望。首先, 通过梳理直流变压器的典型应用场景, 对不同场景下的应用特点进行概述。在此基础上, 针对中高压直流输电应用场景, 从核心电路、典型结构、运行控制、工程化设计、实现和应用等多个方面对直流变压器的分析、设计和实用化方案进行介绍和讨论。最后, 对直流变压器的未来发展方向进行展望。随着新能源和直流输电系统迅速发展, 直流变压器的大规模推广应用值得期待。

关键词: 直流电网; 直流输配电; 能源互联网; 直流变压器; 双有源桥变换器

0 直流变压器的发展背景

直流电网可以独立、快速地控制有功和无功功率, 提升输送功率与系统稳定性, 并且减少储能和

新能源系统接入的中间环节, 降低成本, 提高功率转换效率和电能质量, 已成为国际学术界的研究热点, 并在近年得到了快速发展^[1-4]。

目前, 国外已投运柔性高压直流输电工程十余项, 而 2025 年前规划的工程达百余项。我国已投运中海油文昌海上平台^[5]、南汇风电^[6]、南澳三端^[7]、大连柔直^[8]、舟山五端^[9]、厦门真双极^[10]、云南异步联网^[11]等柔性直流输电工程, 而正在建设张北直流电网^[12]、乌东德混合直流^[13]等工程。在中压直流配电方面, 我国也相继投运了贵州五端直流配电^[14]、杭州大江东直流配电、珠海唐家湾直流配电^[15]等多个示范工程, 正在建设东莞、苏州等工程。而在低压直流微电网方面的实际工程则更多^[16-18]。随着直流输、配、用电系统的快速发展, 不同电压等级直流母线的互联和能量转递需求变得迫切。与交流电网不同, 直流电网不能简单的基于工频变压器、采用电磁感应原理进行电压和功率变换, 必须采用基于电力电子技术的直流变压器(DC transformer, DCT)才能组网^[19-20]。

在直流电网中, DCT 不仅仅需要具有功率双向流动能力, 并且需要提供电气隔离以保障安全, 目前主要方式是通过功率变换器实现高频变换, 并通过高频隔离变压器实现电压的变换和电气隔离。双有源桥式 DC-DC 变换器具有双向流动能力、软开关实现容易、模块化程度高、动态响应快等优点, 被认为是最适合于中高压大容量 DCT 的核心电路^[12-22]。

为了推动直流变压器技术更好的发展, 本文对以双有源桥为核心的中高压直流变压器发展和应用进行介绍和展望。首先, 通过梳理直流变压器的典型应用场景, 对不同场景下的应用特点进行概

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877116)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877116).

述。在此基础上,针对中高压直流输配电应用场景,从核心电路、典型结构、运行控制、工程化设计、实现和应用等多个方面对直流变压器的分析、设计和实用化方案进行介绍和讨论。最后,对直流变压器的未来发展方向进行展望。

1 直流变压器的典型应用场景

固态变压器是采用电力电子器件及中高频变压器实现的具有但不限于传统变压器功能的电力电子装置,直流变压器是固态变压器的一种典型形式。从系统构成来看,直流变压器也可以看成是组成多级型固态变压器的核心环节,只是根据不同的系统要求,直流变压器的构造方式存在区别,或是分散的 DC/DC 变换环节,或是集中的 DC/DC 变换系统。

1.1 场景 1: 能量路由器或柔性变电站

在未来电网中,由机械开关和磁性变压器构成的传统配电系统已无法满足分布式电源大规模接入和高电能质量等日益增长的需求,越来越多的电力电子设备将接入电网。在此背景下,采用三级式固体变压器替代传统的工频磁性变压器,其中 DC/DC 变换级采用基于高频隔离的直流变压器,可以大幅减小系统体积和重量,如图 1 所示。根据选用的拓扑结构和电压制式的不同,直流变压器或为集中式以连接中高压和低压直流母线,或为分散式以连接离散化的低压直流环节。本文中对直流变压器的描述主要是针对具有中高压直流母线的方案。借助于电力电子系统强大的控制管理能力,系统除了实现电压变换和电气隔离外,可集成更多高级功能,包括:1) 电压控制、谐波控制、低压穿越、孤岛控制等功率管理功能;2) 电流限制和分断、故障隔离等故障管理功能;3) 能源利用监测、能

源交易代理、能源分配与调度、需求侧管理等能源管理功能。

针对此类应用场景,目前主要有两种典型的应用概念:柔性变电站^[23]和能量路由器^[24]。在智能电网概念的背景下,通过采用固态变压器替代配电变压器、开关和电能质量治理设备,实行电能的柔性控制和管理,将这样的变电站称为柔性变电站。与此类似,在能源互联网概念的背景下,以固态变压器为核心的能量路由器将分布在每个不同电压和容量等级的输配电环节中,连接不同的交直流输配电母线,并且识别和管理所有连接在这些母线上的分布式电源、储能和负载设备等,实现可再生能源的大规模利用。

1.2 场景 2: 高密度机车牵引供电

在传统的机车牵引供电系统中,主要采用低频或工频系统供电,例如:15kV/16Hz 和 25kV/50Hz。为了实现中高压系统连接和电气隔离,通常采用低频的多绕组变压器,造成系统体积和重量巨大。而采用中高频隔离的直流变压器替代多绕组磁性变压器方案^[25],可以大幅减小系统体积和重量,如图 2 所示。与场景 1 类似,在机车牵引供电系统中,若采用集中式 DC/DC 方案,连接中高压和低压直流母线,则直流变压器将是核心环节。

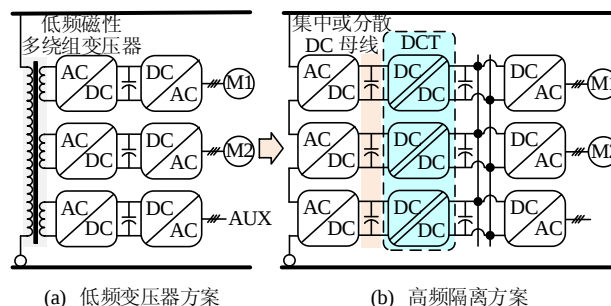


图 2 直流变压器在机车牵引供电中的应用

Fig. 2 Application of DCT in locomotive traction

1.3 场景 3: 新能源直流汇集

在未来电网中,光伏、风电等新能源系统将大规模接入,尤其在远距离大容量电缆输送系统中,交流电缆电容充电效应严重限制了交流输电的发展,直流输送方式成为必然选择。以海上风电系统为例,风机经过 AC-DC-AC 变频后输出 690V 工频交流电,经过升压变压器进行 35kV 交流汇集,然后再经过升压变压器和柔直换流器转换成数百 kV 的高压直流进行输送。如此,在风机塔筒和海上换流平台中均需要放置大容量的工频变压器、换流器

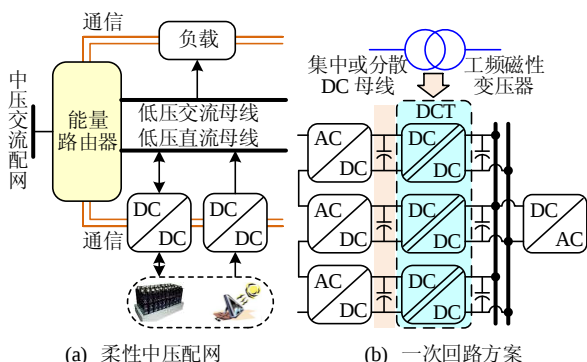


图 1 直流变压器在能量路由器或柔性变电站中的应用

Fig. 1 Application of DCT in energy router or flexible power station

及其附属设备,造成系统体积庞大和造价巨大,尤其是大幅提高了海上平台的建设难度。如图3所示,采用直流汇集和直流输送的方式^[26],通过中高频隔离的直流变压器替代工频变压器和一级DC/AC变换,可以大幅减小系统体积、重量和损耗,并减小造价。

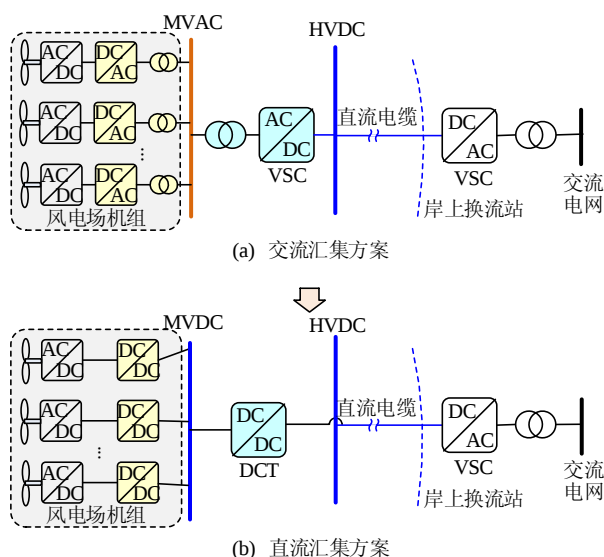


图3 直流变压器在新能源汇集中的应用

Fig. 3 Application of DCT in connection and transmission of renewable energy

1.4 场景4: 直流输配电的一体化建设

随着直流输配电的快速发展,未来电网中将会存在各种不同电压等级的直流系统,不同母线间互联需求变得迫切。如果仍采用交流电网为互联核心的方案,将会经过多级DC/AC和交流磁性变压器,技术经济性大幅降低,如图4所示。在此场景下,基于中高频隔离的直流变压器将会是必然选择,将大幅减小系统互联成本、体积和损耗,实现不同电压等级的直流输配电母线的直接连接,推动直流电网的一体化建设^[27]。

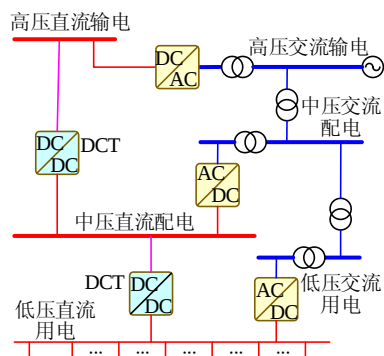


图4 直流变压器在直流电网中的应用

Fig. 4 Application of DCT in dc grid

根据上述分析,从一次系统特征来看,对于柔性变电站或能量路由器场景,采用三级变换的交流固态变压器替代传统的工频变压器,同时带来了能量管理等高级功能,但是成本、损耗等瓶颈有待突破;对于机车牵引供电场景,采用单级DC/DC变换的直流变压器取代工频变压器,大幅降低系统重量和体积,但是变换器成本有所提升;对于新能源直流汇集场景,采用直流变压器取代工频变压器和一级AC/DC变换,成本、体积和损耗都有所下降;对于直流输配电一体化建设场景,直流变压器将是必然选择。

2 直流变压器的典型结构

2.1 双有源桥式核心电路

图5为双有源全桥DC/DC(dual-active-bridge, DAB)的基本结构和工作原理。两个全桥变换器的交流侧通过电感和变压器连接,全桥变换器采用方波调制在交流侧产生高频方波,忽略励磁电抗,则DAB等效为两个交流源连接在电感两端,通过调节两个交流源间的相移变可以调节功率流动的大小和方向。采用DAB可以实现直流变压器的电气隔离和功率的双向流动,而高频隔离变压器则大幅提高了功率密度和模块化程度。在高压领域应用中,由于受限于器件电压和容量等级,通常采用DAB串联提高电压等级,并联提高功率等级。图5中: V_1 和 V_2 分别为DAB两侧全桥直流侧电压; v_{h1} 和 v_{h2} 分别为DAB两侧全桥交流侧电压; i_{h1} 为DAB交流侧变压器的原边电流; T_{hs} 为半个开关周期时间; D 为 v_{h1} 和 v_{h2} 之间移相时间相比 T_{hs} 的比例。

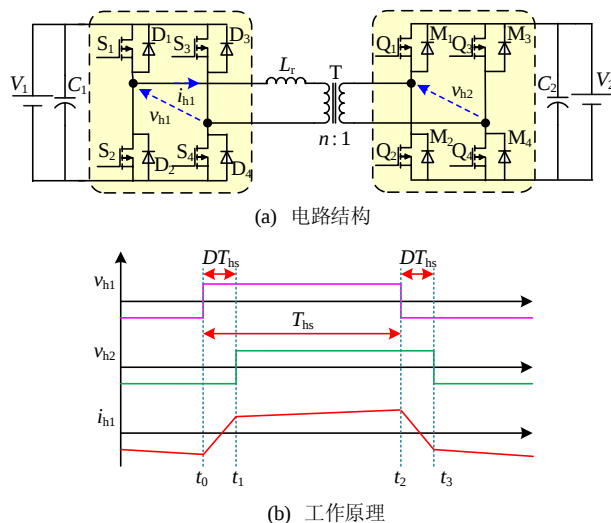


图5 DAB电路及工作原理

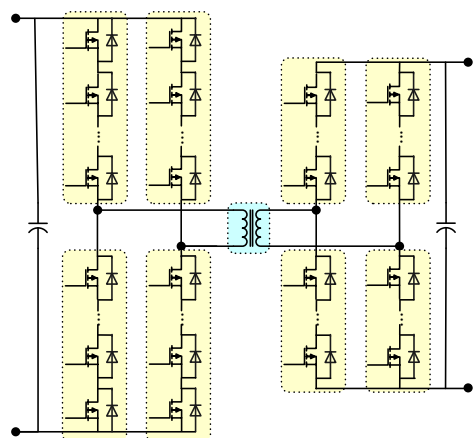
Fig. 5 Topology and operation principle of DAB

在 DAB 中, 双有源移相调制使得其具有良好的软开关行为。当直流端电压与变压器变比具有较好的匹配度时, DAB 中所有开关管的导通行为均为 ZVS 导通, 则对应的所有二极管的关断均为零电流关断^[19]。通常二极管的开通损耗较小, 可以忽略, 因此在 DAB 工作过程中, 开关损耗仅存在于开关管的关断过程中。在设计中, 为了进一步减小关断损耗, 可以选用关断损耗较低的器件, 例如碳化硅 (silicon carbide, SiC) 金属氧化物场效应管 (metal-oxide-semiconductor FET, MOSFET) 器件。

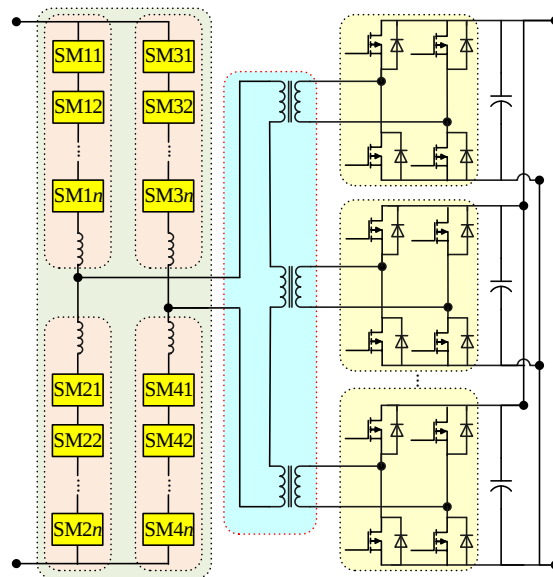
独立的 DAB 变换器可以用于低压直流微电网中直流负荷、储能、分布式电源等的接入, 但由于器件电压和功率等级限制, 需要进行器件或变换器的串并联组合才能接入更高电压等级系统。需要注意的是, 本文中的直流变压器主要指数 kV 及以上的中高压直流变压器。

2.2 器件串联型 DCT

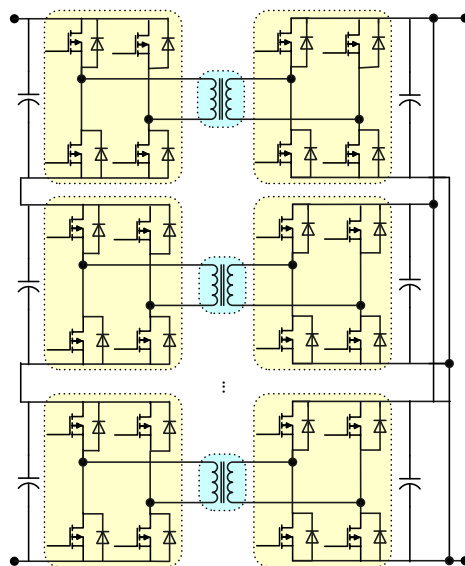
为了提高 DCT 的电压和功率等级, 器件串联是一种最典型的技术思路, 如图 6(a)所示。借鉴器件串联的技术思路, 文献[28]中提出了一种基于结型场效应管 (junction field effect transistor, JFET) 串联的 DCT 方案。高压侧采用单相全桥拓扑, 每一桥臂采用多个 JFET 和一个 MOSFET 组成, 低压侧采用三电平拓扑; 并且 JFET 采用 SiC 材料, 开关频率可达 50kHz。事实上, 虽然在解决开关器件直接串联所带来的静态均压问题上已有较多研究, 但开关器件串联目前仍被视为技术风险较大的方案^[29-30]。目前主流器件制造商均不推荐采用开关器件串联方案, 或者不直接提供这方面的支持。除开关器件直接串联的自身问题之外, 在工艺和结构方面也将带来较大的实施困难。串联阀的长度较大, 如何通过合理的结构设计使回路面积最小, 减小回



(a) 器件串联型



(b) 模块化多电平型



(c) DC/DC 串并联组合型

图 6 直流变压器的典型结构

Fig. 6 Typical structure of DCT

路的杂散参数, 降低开关器件的关断过电压尖峰, 这将给结构设计带来极高的要求。

2.3 模块化多电平级联型

在器件串联型方案的基础上, 部分文献提出了基于模块化多电平原理的 DCT 方案^[31], 如图 6(b)所示。虽然模块化方案可以有效减少器件串联的难度和可靠性, 但是中压侧器件数量增加了一倍。相比后面介绍的 DC/DC 串并联组合型 DCT, 模块化多电平级联型 DCT 将中压直流侧的集中电容分散到了各个子模块内部, 可以快速的切除短路故障和设置冗余单元运行, 可靠性提高。但是, 相比 DC/DC 串并联组合型 DCT 中每个子模块都可以作为 DC/DC 独立调试和运行, 此类拓扑中子模块无法独

立调试和运行,模块化程度和灵活性降低。

2.4 DC/DC 串并联组合型 DCT

将低压小容量 DC/DC 变换器进行串并联组合是一种典型的方案以提高变换器的电压和功率等级^[32],如图 6(c)所示。此类方案避免了开关器件的直接串联,并且通过采用高频隔离的 DC/DC 变换器为基本单元,DCT 不仅实现了高低压等级的变换,还实现了高低压直流母线的电气隔离。尽管如此,在直流电网相关的系统级应用时,由于集中电容的存在,直流母线发生故障时,会导致直流电容迅速放电,产生较大的过电流;并且故障清除后,需要对直流电容重新充电,使直流系统的动态恢复过程变慢。另外,子单元发生故障后,无法设置冗余单元运行,否则会造成直流电容短路,这也使得子单元发生故障后,DCT 便要停止运行,降低系统可靠性。除此之外,对于采用 DAB 为基本单元的系统,当两端直流电压与变压器变比不匹配时存在很大的环流,进而导致很大的电流应力、较低的效率。而图 6(c)所示的 DCT 方案在系统级组网应用时,由于直流母线电压会存在波动,使得各子单元两端直流电压与变压器变比不匹配,降低 DCT 的运行效率。

在此基础上,文献[33]提出了改进型 DC/DC 串并联组合型 DCT,如图 7 所示。在图 6(c)的基础上,每个模块的中压侧均增设半桥接口模块。如此,与模块化多电平级联型类似,在中压侧不存在集中的

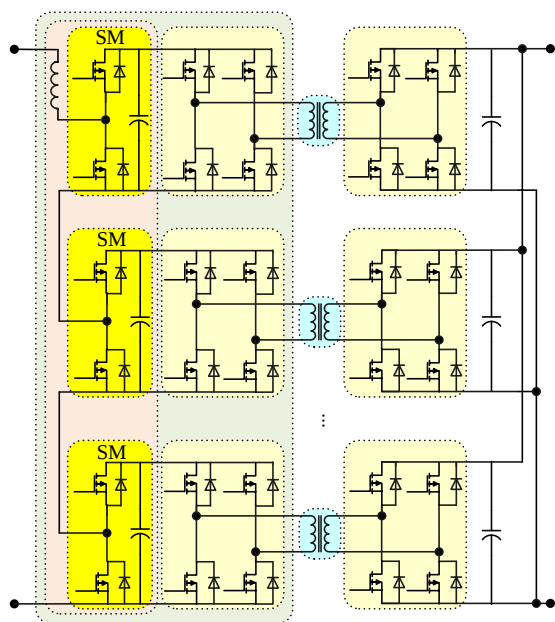


图 7 具有宽调压和故障处理能力的改进型 DCT

Fig. 7 Improved DCT with wide voltage regulation and fault handling ability

直流电容,当直流母线故障时,封锁脉冲即可,直流电容不会放电,不会产生过电流,并且便于故障后系统的快速恢复;子单元发生故障后,可以快速旁路故障单元,投入冗余单元保证正常运行,提高 DCT 的可靠性;并且串联侧半桥接口单元可以通过调节开关管的状态调节 DAB 子单元直流端电压,保证 DAB 子单元始终工作在匹配状态下,减小环流。另外,对于低压直流侧,可以将集中电容变为开关电容从而切断直流母线短路故障电流,保证系统故障后快速恢复。

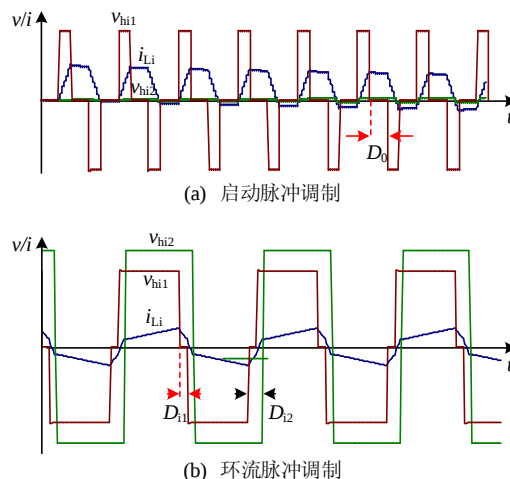
目前来看,由于模块化设计容易,控制简单,中压直流变压器的工程化样机多采用图 6(c)和图 7 所示的 DAB 串并联组合及其改进型拓扑进行设计。

3 直流变压器的运行控制

3.1 全过程优化调制策略

直流变压器的启动过程主要是对直流电容的充电过程。由于电容的初始电压为 0,对于直流变压器的电源接入端通常采用加入软启动电阻和旁路开关的方式接入。对于控制端,若采用稳态调制的 50%方波进行启动,则控制端直流电容充电会很快,但是会产生较大的过电流,影响器件的安全运行。如图 8(a)所示,通常控制电源端全桥工作在逆变状态,控制端全桥工作在整流状态,逆变交流侧产生占空比小于 50%的窄脉冲进行充电,使得启动电流小于器件安全运行电流,待直流电容电压升高后逐渐增大脉冲占空比到 50%,然后解锁控制端全桥脉冲,移相闭环投入运行^[22]。

稳态运行过程中,DAB 采用双有源移相调制对电压或功率进行闭环控制。当直流端电压不匹配时,变换器会产生较大的环流,增大了开关和通态损耗,使得系统效率大幅降低。在此状态下,可以



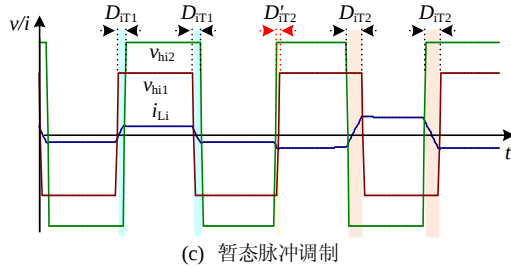


图 8 DCT 全过程优化调制方法

Fig. 8 Full process optimal modulation of DCT

采用基于扩展移相的双移相调制方式,如图 8(b)所示。通过在高频链电压方波中增加内移相角度,使得高频方波变为三电平阶梯波,从而减小无功功率,降低环流。在具体操作中,可以基于基波无功的优化来选取内移相角度^[34]。

在系统电压或功率发生变化时,相邻开关周期的移相角度会发生变化,如图 8(c)所示。如果在下一个开关周期直接切换至新的移相角度,会产生直流偏置和较大的电流冲击。通常在移相角度发生较大变化时,需要进行移相角补偿,将下一开关周期的上下沿移相拆分为两个角度,其中第一个移相角度为前后移相角度的平均值^[35],如此可以消除暂态直流偏置和电流冲击。

图 8 中: v_{hi1} 、 v_{hi2} 、 i_{Li} 与图 5 中的定义一致; i 为 DCT 采用多个 DAB 级联时的某个单元的序号; D_0 为启动时窄脉冲占空比; D_{i1} 和 D_{i2} 为环流优化时内、外移相比^[34]; D_{iT1} 、 D_{iT2} 、 D'_{iT2} 为暂态切换时不同阶段的移相比^[35]。

3.2 多模式运行方式

不同的应用场景下,直流变压器的运行方式存在区别,很多场景也要求直流变压器具有多种运行方式。总的来说,直流变压器的运行可以分为 4 种典型方式。

模式 1—高压侧电压控制模式: 低压直流母线由系统电压支撑,高压直流母线电压由直流变压器控制,功率流动大小和方向由负载决定。

模式 2—低压侧电压控制模式: 高压直流母线由系统电压支撑,低压直流母线电压由直流变压器控制,功率流动大小和方向由负载决定。

模式 3—恒变比控制模式: 高压直流母线或低压直流母线由系统电压支撑,直流变压器控制高低压侧的电压变比恒定,功率流动大小和方向由负载决定。这种运行方式和交流磁性变压器类似,任一侧电压给定,另一侧按恒变比输出电压。

模式 4—功率控制模式: 高压和低压直流母线均由系统电压决定,直流变压器控制功率流动的大小和方向。

3.3 控制策略

根据上述分析,对于中压直流变压器通常采用模块串联接入中压母线,采用并联接入低压母线,其控制的关键在于不同模块间的串联侧电压平衡和并联侧电流平衡。理论上,串联侧电压平衡和并联侧电流平衡是等效的,因此仅需要对电压和功率平衡之一进行控制即可。但是,从暂态扰动的稳定性来看,当采用串联侧电压平衡控制时,功率可以自动平衡;当采用并联侧电流平衡控制时,串联侧电压不稳定,无法自动平衡^[33]。因此,在实际中,通常采用串联侧电压平衡来控制串并联侧的电压和功率平衡。

对于 DAB 高压侧串联低压侧并联组成的 DCT,图 9 给出了不同运行模式下的控制策略。在高压侧控制模式时,低压侧电压由系统给定,每个模块仅需控制各自高压端口的直流电压,通常采用电流内环和电压外环控制^[36]。在低压侧控制模式时,高压侧电压由系统给定,每个模块除了控制低压侧电压还需要增加串联电压的平衡控制环以保证高压串联侧子模块电压平衡,另外各个子模块的电压外环通常采用公共的电压环。对于功率控制模式,与低压侧控制模式类似,只是高低压侧电压均由系统给定,每个模块根据功率给定控制各自的输出电流即可,同时也需要增设串联侧电压平衡控制环。在恒变比控制模式时,不管是高压侧电压还是

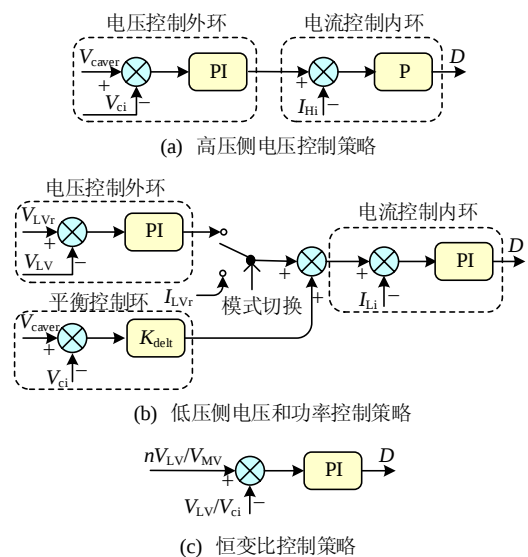


图 9 DCT 全过程控制策略

Fig. 9 Full process control strategy of DCT

低压侧电压给定, 仅采用恒变比控制环控制两侧电压变比恒定, 相对简单, 并且当电压切换时动态响应比较快^[37-38]。图 9 中: V_{MV} 为所有 DAB 串联侧的电压之和; V_{ci} 为每个 DAB 串联侧的直流电压; V_{caver} 为所有 DAB 串联侧电压的平均值; V_{LVr} 为 DAB 并联侧的给定参考电压; V_{LV} 为 DAB 并联侧的实际电压; I_{Hi} 为每个 DAB 串联侧电流; i_{Li} 为每个 DAB 并联侧电流; I_{LVr} 为 DAB 并联侧的给定参考电流。

4 直流变压器的工程化设计问题

本节中, 主要介绍直流变压器的几个典型的工程化设计问题, 包括: 供电系统设计、闭锁平衡设计和电气隔离及绝缘设计。

4.1 供电系统设计

在直流系统中, 原则上不存在给 DCT 二次控制系统供电的额外交流电源, DCT 供电电能需从高低压直流系统得到。而考虑到高低压侧系统电气隔离的要求, 高低压侧变换器的二次供电系统也需要保证足够的电气隔离电压, 通常是各自独立的从高低压侧直流电容取电, 如图 10(a)所示。DCT 在多模式运行方式下 DCT 的系统供电状态存在差异, 当高压侧先带电时, 先给高压侧变换器二次控制系统供电, 然后高压侧变换器脉冲打开工作在逆变状态, 按照 4.1 节的启动策略, 给低压侧电容充电, 待低压侧电容电压达到阈值, 低压侧变换器二次控制系统供电电源启动; 反之对于低压侧先带电的供电方式同样如此。

另外, 对于主控制器的供电方式可以选用自励

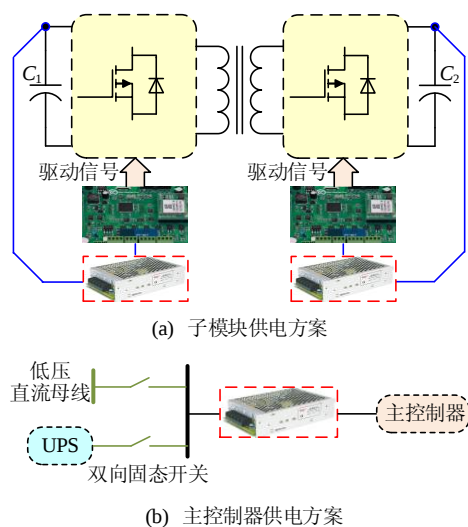


图 10 DCT 供电方案

Fig. 10 Power supply scheme of DCT

供电与 UPS 供电相结合的方式, 如图 10(b)所示。低压侧直流母线有电时, 主控制器从低压母线取电; 低压侧直流母线无电, 高压侧直流母线有电时, UPS 供电, 待启动后低压直流母线带电时, 切换至低压直流母线供电。

4.2 闭锁平衡设计

在闭锁运行状态中, 所有开关管的驱动信号均闭锁, DCT 没有输出功率。尽管如此, 控制系统仍需要取电以供给人机界面或保障控制系统处于待机状态等。根据 5.1 节的分析, 每个模块的供电电源(control power source, CPS)均是从各自的直流电容上取电。对于高压侧供电时, 每个 CPS 需要从各自串联电容上取电, 由于 CPS 电压和电流的反比例效应, 如果不同 CPS 间具有微小的差异, 电压平衡也会被破坏。尤其是 DCT 采用高频调制, 其直流电容的容量通常较小, 这种不平衡效应会尤其严重。

在闭锁运行状态中, 主电路开关管无法控制, 因此解锁状态中通过调节 DCT 功率而使得电压平衡的控制方法无法使用。最简单的方案是对每个直流电容并联电阻, 电阻的电压和电流的正比例效应可以抵消 CPS 的反比例效应, 从而可以达到闭锁状态时的电压平衡。只是并联电阻会带来较大的功率损耗, 通常需要大于 CPS 的耗散功率。

如图 11 所示, 文献[39]中提出了一种基于开关电阻的闭锁平衡方案, 通过增加小电流开关与辅助电阻串联, 从而等效电阻值可以通过调节开关的占空比进行控制, 进而也可以调节功率损耗。如此电阻的功率损耗仅仅是各 CPS 间耗散功率的差值, 因此电阻仅需要耗散最大功率差异即可。电阻越小,

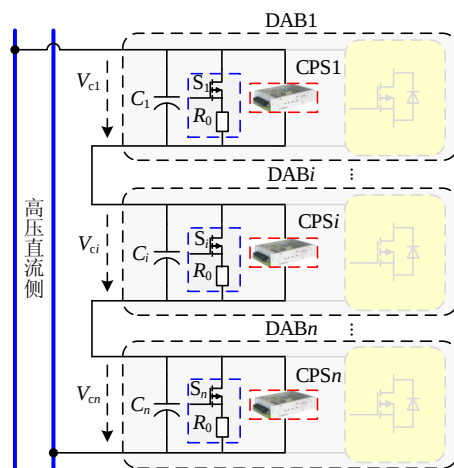


图 11 基于开关电阻的闭锁平衡方案

Fig. 11 Balance scheme during lock state

平衡恢复速度越快，但是开关管的电流应力也约大，而功率损耗始终是恒定的。为了保证启动起始阶段的供电电源正常供给开关管脉冲，通常可以将开关管设计为常通型器件。

4.3 电气隔离与绝缘设计

如图 12 给出了一种典型的串并联型 DCT 的电气隔离和绝缘设计，图中以 $\pm 10\text{kV}$ (伪双极)/ $\pm 375\text{V}$ (真双极)系统为例。

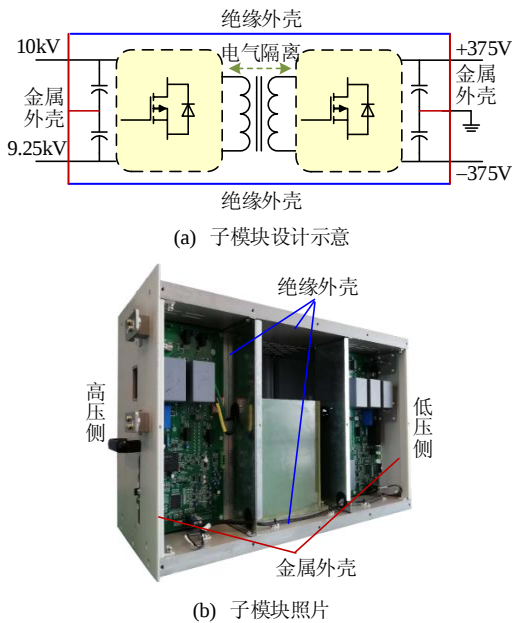


图 12 DCT 电气隔离与绝缘设计

Fig. 12 Electrical isolation and insulation design of DCT

每个子模块具有 6 面外壳，其中正负极引出端的 2 面外壳采用金属外壳，其它 4 面采用绝缘外壳。为了保证子模块设计的一致性，所有绝缘外壳耐压标准均按照 10kV 直流设备设计。对于 2 面金属外壳，均与两端直流电容的中性点连接，同时也将高低压侧各驱动板卡等二次设备接地端与各自的金属外壳连接，使得整个高低压侧各自都接近等电位^[40]。对于高频变绕组，采用灌胶注入，高低压之间的电气隔离按照 10kV 设计，而高低压侧绕组的对地绝缘无特殊要求。

另外，考虑到 $\pm 10\text{kV}$ 伪双极和 $\pm 375\text{V}$ 真双极系统要求，对于高压侧在所有子模块串联的中性点接地，对于低压侧在所有子模块并联的电容中性点接地，如此所有模块的电气设备均具有固定电位。对于系统的接地方式包括高阻接地、低阻接地，具体可根据系统级控制保护策略的设计来确定。

5 直流变压器的实现与应用

目前，国内对于直流变压器的设计与实现主要

是依托几个直流配电系统进行，如表 1 所示。

表 1 典型中压直流变压器工程化产品
Table 1 Typical medium-voltage DCT

序号	年份	高压侧电压/kV	低压侧电压/V	容量/MW
1	2014	± 7.5	400	0.2
2	2018	± 10	± 375	0.5
3	2018	± 10	± 375	1.0
4	2018	± 10	± 375	2.0
5	2019	10	± 375	0.2

序号	年份	器件	拓扑	依托项目或工程
1	2014	IGBT	DAB 串并联	深圳直流配电 863
2	2018	IGBT	改进型 DAB 串并联	贵州直流配电
3	2018	SiC MOSFET	SRC 串并联	杭州江东直流配电
4	2018	SiC MOSFET	全桥+DAB 串并联	珠海唐家湾直流配电
5	2019	SiC MOSFET	改进型 DAB 串并联	平顶山直流配电

在我国首个直流配电主题的 863 课题“基于柔性直流的智能配电关键技术研究与应用”的支持下^[41]，深圳供电局、清华大学和荣信公司等单位合作成功研制我国首个中压级别的直流变压器工程样机。样机电压 $\pm 7.5\text{kV}/0.4\text{kV}$ ，容量 0.2MW，采用基于 DAB 模块的串并联组合型拓扑结构，采用 IGBT 器件，最高运行效率 $>97\%$ 。除此之外，在 2018 年 9 月投运的贵州五端柔性直流配电示范工程^[42]，直流变压器也采用基于 IGBT 器件的 DAB 串并联组合型拓扑结构，直流电压 $\pm 10\text{kV}/\pm 375\text{V}$ ，容量 0.5MW。

2018 年 8 月在杭州江东新城投运的智能柔性直流配电网示范工程，直流变压器采用基于串联谐振变换器(series resonant converter, SRC)的串并联组合型拓扑结构，为了保证 SRC 的软开关为，系统采用开环控制，低压端直流电压随着中压端直流电压的变化而变化。

2018 年 12 月在珠海唐家湾投运的直流配电示范工程^[15]，直流变压器同样采用基于 DAB 模块的串并联组合型拓扑结构，但是子模块单元从交流电力电子变压器移植过来，接口环节中具有一级 H 桥电路，一定程度上提高了器件成本和系统体积，但是也带来了故障电流切断和在线冗余等附加功能。该设备电压 $\pm 10\text{kV}/\pm 375\text{V}$ ，容量 2MW，采用 SiC MOSFET 器件，最高运行效率 $>98\%$ 。

2019 年 10 月在平顶山投运的直流配电示范工程中，直流变压器采用了图 8 所示的基于改进型 DAB 模块的串并联组合型拓扑结构。在 DAB 的中压接口中增设了半桥接口模块，直流变压器具有了故障电流切断和在线冗余等附加功能。另外，半桥

接口电路可以工作在调压状态,提高了电压调节能力和电压变化时系统的平均效率。该设备电压 $\pm 10\text{kV}/\pm 375\text{V}$,容量 0.2MW ,采用 SiC MOSFET 器件,最高运行效率 $>98\%$,电压 10% 波动下的平均效率 $>97\%$ 。

总的来说,由于模块化设计容易,控制简单,现有中压直流变压器的工程化方案主要采用的是DAB串并联组合拓扑,通过采用 SiC MOSFET 器件,现有最高效率可达 98% ,但仍具有可提升空间。

6 结论与展望

总的来说,随着国内外多个直流配电示范工程投运,中压型直流变压器的分析和设计技术已趋于成熟,通过采用 SiC MOSFET 和纳米晶磁芯等新型元件以及DAB串并联型拓扑,直流变压器的效率可以达到 98% 以上,已达到实际应用要求。但是,充分结合系统级运行功能和故障特性等应用要求的优化方案有待进一步探讨,可靠性、成本和体积等工程化表现性能有待进一步提升。

针对第2节所述的大规模新能源直流汇集和更高电压等级的直流输配电互联应用场景,百 kV 百 MW 级高压大容量直流变压器的理论与装备技术的研究涉及的较少。事实上,中压应用场景中直流变压器的电气隔离环节多采用基于纳米晶或铁氧体的高频隔离变压器,运行频率也多在 10kHz 以上。而在百 kV 百 MW 级高压大容量应用场合,局部放电现象将会变得明显。随着时间推移,将使得电气隔离被破坏,并且随着频率的增加,这种老化效应将会显著增加。另外,在大电流应用场合,随着频率的增加,电磁场的高频效应(集肤效应和邻近效应)会导致电流在各并联绕组层不均分,产生较高的交流电阻,造成很大的热量,使得绕组的散热变的困难。因此,在高压大容量直流变压器中,隔离变压器的频率将会受到限制,通过提高开关频率的方式也无法带来系统体积和重量的减小。就目前来看,数千伏兆瓦级的隔离变压器工作频率大多低于 1kHz ,如此也规避了IGCT等新型高压大容量器件运行频率低的缺点,为其在高压大容量直流变压器中的应用带来了巨大契机。

因此,结合新型器件,通过对百 kV 百 MW 级高压大容量直流变压器展开理论和实践研究,有望开辟直流电网和大功率电力电子研究的新的前沿方向,同时对于推动我国新能源高效、经济的大规

模汇集和直流输配电的一体化建设具有重要意义。

参考文献

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [2] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Modeling of multi-terminal VSC HVDC systems with distributed DC voltage control[J]. IEEE Transactions on Power System, 2014, 29(1): 34-42.
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 江道灼,郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104(in Chinese).
- [5] 许树楷,梁允源,郭自勇.中海油文昌柔性直流输电系统现场试验[J].南方电网技术,2011,5(4): 1-4.
XU Shukai, LIANG Yunyuan, GUO Ziyong. Field commissioning test of CNOOC Wenchang VSC-HVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 1-4(in Chinese).
- [6] 乔卫东,毛颖科.上海柔性直流输电示范工程综述[J].华东电力,2011,39(7): 1137-1140.
QIAO Weidong, MAO Yingke. Overview of Shanghai flexible HVDC transmission demonstration project[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1137-1140(in Chinese).
- [7] 饶宏.南方电网大功率电力电子技术的研究和应用[J].南方电网技术,2013,7(1): 1-5.
RAO Hong. Research and application of the high-power electronic technology in China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 1-5(in Chinese).
- [8] 葛维春,顾洪群,贺之渊.大连跨海柔性直流输电科技示范工程综述[J].东北电力技术,2012,33(2): 1-4.
GE Weichun, GU Hongqun, HE Zhiyuan. Overview on Dalian flexible HVDC transmission demonstration project[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(2): 1-4(in Chinese).
- [9] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等.舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J].高电压技术,2014,40(8): 2490-2496.
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496(in Chinese).

- [10] 严有祥, 方晓临, 张伟刚, 等. 厦门 $\pm 320\text{kV}$ 柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1147-1153.
YAN Youxiang, FANG Xiaolin, ZHANG Weigang, et al. Cable section and laying of Xiamen $\pm 320\text{kV}$ flexible DC cable transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1147-1153(in Chinese).
- [11] 周剑, 黄磊, 刘春晓, 等. 基于鲁西背靠背柔性直流系统的南方电网黑启动方案[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 8-14.
ZHOU Jian, HUANG Lei, LIU Chunxiao, et al. Black-start scheme of China Southern Power Grid based on Luxi back-to-back VSC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 8-14(in Chinese).
- [12] 韩亮, 白小会, 陈波, 等. 张北 $\pm 500\text{kV}$ 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 42-47.
HAN Liang, BAI Xiaohui, CHEN Bo, et al. Control and protection system design of Zhangbei $\pm 500\text{kV}$ converter station in VSC-HVDC power grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 42-47(in Chinese).
- [13] 饶宏, 洪潮, 周保荣, 等. 乌东德特高压多端直流工程受端采用柔性直流对多直流集中馈入问题的改善作用研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(3): 1-5.
RAO Hong, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Study on improvement of VSC-HVDC at inverter side of Wudongde multi-terminal UHVDC for the problem of centralized multi-infeed HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(3): 1-5(in Chinese).
- [14] 徐玉韬, 谈竹奎, 郭力, 等. 贵州电网柔性直流配电系统设计方案[J]. 供用电, 2018, 35(1): 34-39.
XU Yutao, TAN Zhukui, GUO Li, et al. Design scheme of flexible DC power distribution system in Guizhou power grid[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 34-39(in Chinese).
- [15] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6790-6802.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6790-6802(in Chinese).
- [16] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [17] 孟明, 卢玉舟, 陈世超. 绿色数据中心直流供电系统的运行控制[J]. 电力建设, 2016, 37(10): 33-40.
MENG Ming, LU Yuzhou, CHEN Shichao. Operation control of DC power supply system in green data center [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(10): 33-40(in Chinese).
- [18] 刘国伟, 赵彪, 赵宇明, 等. 中压柔性直流配电技术在深圳电网的应用框架[J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 1-10.
LIU Guowei, ZHAO Biao, ZHAO Yuming, et al. Application framework of VSC medium-voltage DC distribution technology in Shenzhen power grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 1-10(in Chinese).
- [19] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4091-4106.
- [20] INOUE S, AKAGI H. A bidirectional DC-DC converter for an energy storage system with galvanic isolation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(6): 2299-2306.
- [21] INOUE S, AKAGI H. A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 535-542.
- [22] ZHAO Bao, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. Full-process operation, control, and experiments of modular High-frequency-link DC transformer based on dual active bridge for flexible MVDC distribution: a practical tutorial[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6751-6766.
- [23] 傅守强, 高杨, 陈翔宇, 等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术与工程实践[J]. 电力建设, 2018, 39(5): 46-55.
FU Shouqiang, GAO Yang, CHEN Xiangyu, et al. Research and project practice on AC and DC distribution network based on flexible substations[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5): 46-55(in Chinese).
- [24] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834.
ZHAO Zhengming, FENG Gaohui, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834(in Chinese).
- [25] 王优, 郑泽东, 李永东. 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(5): 1-10.
WANG You, ZHENG Zedong, LI Yongdong. Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(5): 1-10(in Chinese).
- [26] MEYER C, HOING M, PETERSON A, et al. Control and design of DC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1475-1482.
- [27] 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(in Chinese).
- [28] AGGELER D, BIELA J, KOLAR J W. A compact, high voltage 25kW, 50kHz DC-DC converter based on SiC JFETs[C]//2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Austin, TX, USA: IEEE, 2008: 801-807.
- [29] 刘钟淇. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [30] SOTO D, GREEN T C. A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5): 1072-1080.
- [31] ZHAO Biao, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. Modular multilevel high-frequency-link DC transformer based on dual active phase-shift principle for medium-voltage dc power distribution application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 1779-1791.
- [32] CARRIZOSA M J, BENCHAI B A, ALOU P, et al. DC transformer for DC/DC connection in HVDC network[C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, France: IEEE, 2013: 1-10.
- [33] ZHAO Biao, SONG Qiang, LI Jianguo, et al. High-frequency-link DC transformer based on switched capacitor for medium-voltage DC power distribution application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4766-4777.
- [34] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Universal high-frequency-link characterization and practical fundamental-optimal strategy for dual-active-bridge DC-DC converter under PWM plus phase-shift control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6488-6494.
- [35] 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.
- [36] 李建国, 赵彪, 宋强, 等. 直流配电网中高频链直流变压器的电压平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 327-334.
- LI Jianguo, ZHAO Biao, SONG Qiang, et al. DC voltage balance control strategy of high frequency link DC transformer in DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 327-334(in Chinese).
- [37] SHI Haixu, SUN Kai, LI Yunwei, et al. Virtual transformer control for DC-DC interlinking converters in DC microgrids[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 4268-4273.
- [38] AN Feng, ZHAO Biao, WANG Jing, et al. An adaptive control method of DC transformers imitating AC transformers for flexible DC distribution application[C]//2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2020: 332-337.
- [39] LI Jianguo, ZHAO Biao, SONG Qiang, et al. Minimum voltage tracking balance control based on switched resistor for modular cascaded converter in MVDC distribution grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5437-5441.
- [40] 刘瑞煌, 杨景刚, 贾勇勇, 等. 中压直流配电网中直流变压器工程化应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 131-140.
- LIU Ruihuang, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Engineering applications of DC transformer in medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 131-140(in Chinese).
- [41] 刘国伟, 赵宇明, 袁志昌, 等. 深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 1-7.
- LIU Guowei, ZHAO Yuming, YUAN Zhichang, et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC-DC distribution system in Shenzhen[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 1-7(in Chinese).
- [42] 徐玉韬, 谈竹奎, 郭力, 等. 含多微电网的柔性中压直流配电中心优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 148-158.
- XU Yutao, TAN Zhukui, GUO Li, et al. An optimal dispatching method with multi-microgrid for flexible medium voltage DC distribution center[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 148-158(in Chinese).



赵彪

在线出版日期: 2020-11-05.

收稿日期: 2020-09-01.

作者简介:

赵彪(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为柔性直流输配电, 大功率电力电子, 112904829@qq.com;

安峰(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为直流变压器技术;

宋强(1975), 男, 博士, 副教授, 研究方向为柔性输配电、大功率电力电子;

余占清(1981), 男, 博士, 副教授, 研究方向为柔性直流输配电、电力系统电磁环境;

曾嵘(1971), 男, 博士, 教授, 研究方向为直流电网关键装备与电力电子器件、交直流系统电磁暂态及其防护。

(责任编辑 吕鲜艳)

Development and Application of DC Transformer Based on Dual-active-bridge

ZHAO Biao, AN Feng, SONG Qiang, YU Zhanqing, ZENG Rong

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University)

KEY WORDS: dc grid; dc transmission and distribution; energy internet; dc transformer; dual-active-bridge converter

DC transformer (DCT) is the key equipment to realize efficiently and economically harvest large-scale renewable energy, and it is also significant for constructing the integrated network of DC transmission and distribution. Generally, not only the bidirectional power flow capability is needed for DCT, but the electrical isolation is also required to ensure safety. At present, the main way to construct DCTs is achieving high-frequency conversion with power converters and achieving voltage conversion and electrical isolation with high-frequency isolation transformer, as shown in Fig. 1. Dual active bridge DC-DC converter is considered to be the most suitable core circuit for medium/high voltage large capacity DCT due to its advantages such as bidirectional power flow ability, easy realization of soft switching, high modularization and fast dynamic response. This paper introduces and prospects the development and application of medium/high voltage DCT with dual active bridge as the core circuit.

By combing the typical application scenarios of DCTs, it can be seen that the technical and economic benefits of DCTs in different scenarios are also different.

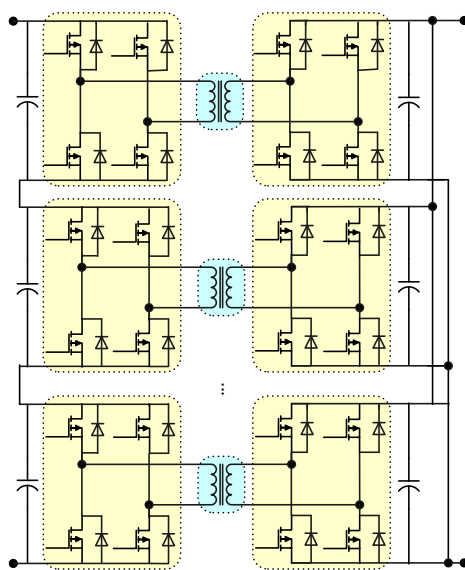


Fig. 1 Typical dc transformer structure based on dual-active-bridge

Judging from the characteristics of primary system, a three-stage AC solid-state transformer is used to replace the traditional power frequency transformer for flexible substation or energy router scenario. Although it demonstrates advanced functions such as energy management, the challenges such as high cost and loss are still needed to be solved. For the scenario of locomotive traction power supply, the single-stage DC/DC converter is used to replace the industrial frequency transformer, which greatly reduces the weight and volume of the system, but the cost of the converter is increased. For the scenario of renewable energy DC convergence, the cost, volume and loss of system will be reduced through replacing industrial frequency transformer and primary AC/DC converter with DCTs. For the scenario of DC transmission and distribution integration, DCTs will be an inevitable choice.

On this basis, this paper introduces and discusses the analysis; design and practical scheme of DCTs from the aspects of core circuit, typical structure, operation control, engineering design, implementation and application.

Generally speaking, with the commissioning of several DC power distribution demonstration projects both at home and abroad, the analysis and design technology of medium voltage DC transformer has become mature. By adopting new components such as SiC MOSFET, nanocrystalline core and DAB series-parallel topology, the efficiency of DC transformer can reach more than 98%, which has met the practical application requirements. However, the optimization scheme fully combined with the application requirements such as system level operation function and fault characteristics etc. needs to be further explored, and the engineering performance such as reliability, cost and volume needs to be further improved.

Finally, the future development of DC transformer is prospected. With the rapid development of renewable energy and DC transmission and distribution system, the large-scale application of DC transformer is expected.