

# 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述

王 优, 郑泽东, 李永东

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 电力电子变压器(PET)作为一种新型的电能路由设备,在智能电网与能源互联网领域有着极大的应用价值。本文针对中高压的应用背景,对典型的PET拓扑及相关的控制策略进行了分析,总结了各类拓扑在系统效率、可靠型以及控制复杂度等应用方面的特点,其中带有多模块级联高压侧变换器的三级式PET拓扑电平数易于扩展,且控制上较为简单,但在系统体积与效率方面仍有优化的空间。本文还对于隔离级中两种不同类型的变换器进行了具体控制方法上的归纳与对比,对两种不同变换器在中高压应用场合的适应性进行了分析。

**关键词:** 电力电子变压器; 中高压应用; 拓扑结构

中图分类号: TM 922

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2017)05-0001-10

## 1 引言

随着能源互联网概念的提出以及智能电网相关技术的推广应用,风能、光伏等可再生能源在现有能源系统中的比例将大大提升,这也表明了未来的电网将更加地智能与灵活。在能源互联网中,由于分布式的用户与能源比例增加,电能的传输需要高度可控,在智能配电网中,电网需要具备高度稳定且优质的电能,在兼容大量分布式可再生能源的同时对电网的运行状态进行监测与管理,以上对于能源或电力网中设备提出了高度智能化的要求,而传统的工频变压器在功能上存在着限制。

电力电子变压器(Power Electronic Transformer, PET)是通过电力电子变换电路进行电能变换并采用中高频变压器进行磁耦合与隔离的电能变换装置。相比于传统工频变压器,PET能够实现交直流形式的电能变换,且由于含有电力电子变换电路,PET兼具功率因素校正、无功补偿、谐波补偿和继电保护等功能。由于其高度的可控性,PET在能源互联网及智能配电网中具有较高的应用优势。

PET的概念早在1968年就已经被提出<sup>[1]</sup>,应用场合也非常广泛,如机车牵引<sup>[2-5]</sup>、风机<sup>[6]</sup>等。相比

于其他应用场合的PET,应用于中高压电网的PET具有以下特点:

(1) PET中连接中高压电网侧的电路具有承受中高压电压等级的能力,同时,由于另一侧常与低压的用户电网相连接,PET应能够完成较大变比的电压变换。

(2) PET的容量能满足中高压等级配电变压器容量的要求,由此低压侧的电流等级较高,具备较大的电流容量。

(3) 为匹配现有电网,PET为三相交流输入输出,同时为了充分体现PET的智能化特点,PET兼具有功无功控制、无功和谐波补偿以及功率因数校正等功能。

(4) 整体系统在不同的负载范围内都有较高的效率,同时保证在不同工况下的可靠性。

由于PET的结构非常灵活,其在拓扑上有着非常大的选择空间,针对于中高压应用场合的PET来说,为了满足以上的应用特点,在拓扑结构和相应的控制方法上与其他应用场合有着相应的区别。本文针对中高压应用场合的PET,将对相关的拓扑结构与相应的控制方法进行总结与比较,并将就以上结构的应用可行性与存在的相关问题加以探讨。

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3161001)

作者简介: 王 优(1994-),女,广西籍,硕士研究生,研究方向为电力电子变压器与能量路由器;  
郑泽东(1980-),男,山东籍,副教授,博士,研究方向为电力电子与电力传动。

## 2 PET 整体结构选择

PET 的拓扑结构形式多样,根据能量变换级数的不同,可以分为单级、双级和三级三大类<sup>[7]</sup>,其中双级结构又包括具有高压和低压直流母线的两类,如图1所示。

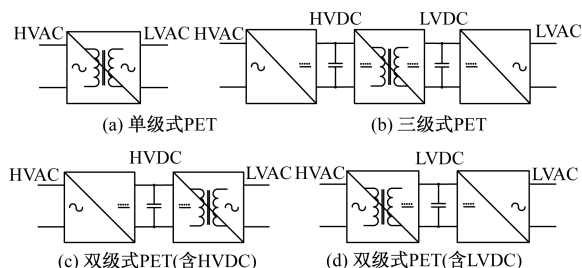


图1 PET 拓扑分类

Fig. 1 Classification of PET topologies

单级式 PET 中,中高频隔离变压器的两端连接 AC/AC 变换器,如图1(a)所示。原边的 AC/AC 变换电路将输入的工频交流电压调制成高频交流电压,经过变压器耦合后再通过副边的 AC/AC 电路变换成工频交流电压输出。单级式 PET 变换级数和使用器件数量少,变换效率高且功率密度大,然而由于没有直流环节不便于应用在交直流混合电网中,同时功率解耦控制复杂。

双级式 PET 在高压或低压侧有直流母线,其隔离变压器一侧的拓扑与单级式 PET 类似,另一侧通过 AC/DC 或 DC/AC 电路与直流母线相连,电路将高压直流变换成高频交流电压,或者将高频交流电压整流成低压直流,如图1(c)及图1(d)所示。由于拥有高压或低压的直流环节,双级式 PET 能够实现在高压侧与中高压直流电网或者是在低压侧与光伏、储能系统的连接,然而隔离变压器两端变换器传递的有功功率对于变压器的漏感参数非常敏感,同时直流母线电容需要承受较大的二倍频波动,且变换器电流波动较大<sup>[7]</sup>,在控制上存在困难。

三级式 PET 在高低压侧均有直流母线,输入的工频交流电通过 AC/DC 变换整流得到高压直流母线,再调制成高频方波,通过中高频变压器耦合至低压侧,整流得到低压直流母线,再通过 DC/AC 逆变得到工频交流电压,如图1(b)所示。三级式 PET 能够连接高压和低压的直流系统,同时各变换级的控制相对独立,易于实现解耦与补偿控制,但变换次数多,结构最复杂。由于变换级数多,三级式的 PET 拓扑结构更易于实现高压侧的级联与低压侧的并

联,能够满足中高压场合的应用需要。因此,在中高压等级的 PET 研究与应用中,三级式拓扑是使用得最多的拓扑形式。

对于应用于中高压领域的 PET 来说,低压侧的电压等级低,对于器件的电压等级限制小,而高压侧整流级与中间隔离级由于电压等级高,对电路拓扑和器件都提出了更高的要求。对此,现有研究重点主要针对两个方向:①基于现有器件电压等级的中高压 PET 新拓扑与控制方法;②采用高电压等级新器件的 PET 拓扑与控制,如 10kV 等级的 SiC 等<sup>[8,9]</sup>。然而目前高压 SiC 器件尚处于实验室研发阶段,商用的器件电压等级仍不能够达到要求,故采用多模块级联或单一模块多电平形式的拓扑满足输入的高电压等级要求,典型的几种拓扑如图2所示,第3部分将针对各拓扑进行分析。

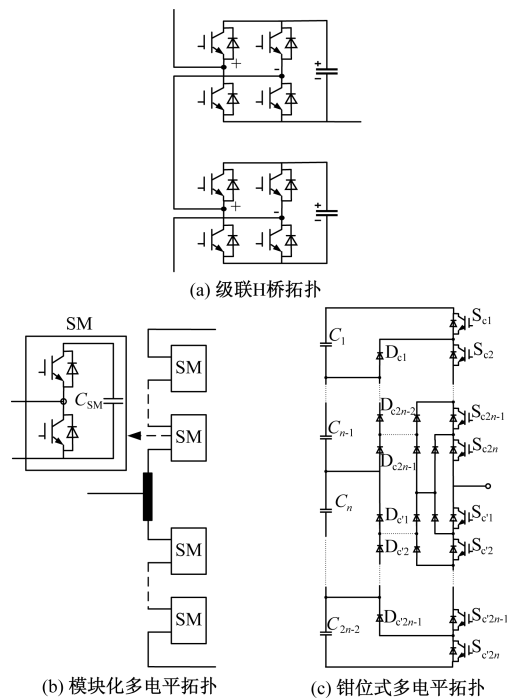


图2 适用于中高压的典型拓扑

Fig. 2 Typical topologies in medium and high voltage applications

## 3 中高压应用领域的典型拓扑

### 3.1 级联 H 桥拓扑

级联 H 桥变换拓扑如图2(a)所示,PET 中每相整流级均由级联的 H 桥子模块构成,由于每个 H 桥子模块需要隔离的直流母线,故 PET 的高压侧直流母线分立,需要连接相互隔离的 DC/DC 变换级。

文献[9]针对 FREEDM 系统提出了第一代中压

等级的 PET 拓扑,输入单相交流电压,整流级采用三级级联的 H 桥,高压侧直流母线分立,并通过后级隔离 DC/DC 变换电路隔离,如图 3 所示。图 3 中拓扑的方案已经在一台  $20\text{kV}\cdot\text{A}$   $7.2\text{kV}\sim 120/240\text{V}$  的样机上得到了实现<sup>[4]</sup>,由于系统高度模块化,样机还通过增加冗余模块以提升系统的稳定性。文献[5]基于类似拓扑,提出了一种应用于配电网的交直流混合多端口能量路由器,并进行了针对参数与能量路由器性能的仿真与实验验证。为了满足能量路由器交直流混合的要求,文中的拓扑除了包含图 3 中的高、低压交流端口外,还将并联的低压侧直流母线引出,得到能量路由器的低压直流端口。

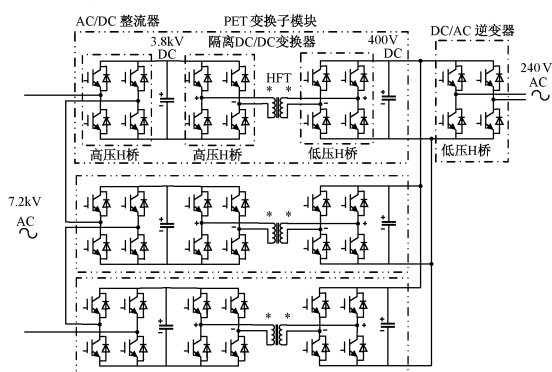


图 3 采用级联 H 桥整流级的单相 PET

Fig. 3 Single phase PET with cascaded H-Bridge rectifier

级联 H 桥整流级的拓扑还被应用于单相供电的机车牵引变流器上。瑞士 ABB 公司研制的一台  $15\text{kV}/1.2\text{MV}\cdot\text{A}$  的牵引变流器样机, PET 中频变压器频率为  $1.8\text{kHz}$ , 变压器原边变换器采用不对称半桥结构, 副边变换器采用对称半桥结构<sup>[10]</sup>。加拿大庞巴迪公司研制的  $400\text{kV}\cdot\text{A}$  牵引变流器样机, PET 输入整流器为 10 级级联的 H 桥, 高频变压器频率为  $8\text{kHz}$ , 变压器原副边连接 H 桥变换器, 低压侧直流母线相互并联, 驱动单个牵引逆变器负载<sup>[11]</sup>。对于牵引变流器来说, 多级级联的拓扑增大了等效开关频率, 减小了牵引变压器由于整流带来的谐波, 降低了输入滤波的要求。

在三相配电网中, 由于以上 PET 拓扑高压侧直流母线分立, 往往使用三套单相 PET 星接或者三角接<sup>[12,13]</sup>, 如图 4 所示。由于级联 H 桥拓扑高度模块化, 易于扩展, 当选择的级联数合适时, 可以在较高的输入电压下使用较低电压等级的器件。对于 H 桥结构的控制相对成熟, 无需额外的复杂算法, 同时级联结构输出电平数多, 谐波特性较好。然而由于级联结构各个子模块流过的电流相同, 各级联模块

输出直流电压控制存在耦合, 导致各直流母线电压不平衡, 需要增加额外的电压平衡控制算法进行控制, 如文献[14]基于有无功定义利用负序电流注入的方法对级联子模块的直流母线电压进行控制, 电压在稳态与动态均有较好的平衡效果。由于高压侧直流母线分立, 三相 PET 采用三个单相系统, 需要三套隔离级和逆变级装置, 且在输入单位功率因数的条件下每相的直流母线还会存在二倍频电压波动, 需要较多的器件数量和较大的母线电容。

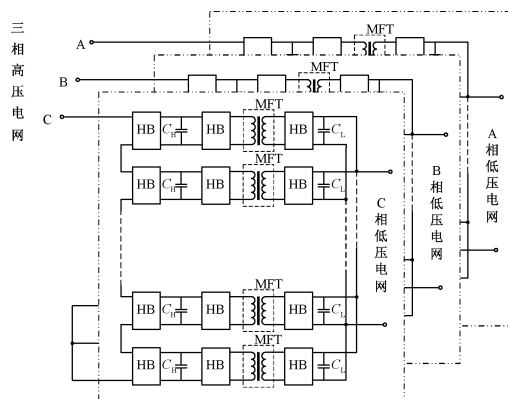


图 4 采用级联 H 桥整流级的三相 PET

Fig. 4 Three phase PET with cascaded H-Bridge rectifier

### 3.2 模块化多电平拓扑

模块化多电平 (Modular Multilevel Converter, MMC) 拓扑结构如图 2(b) 所示, 拓扑中每相桥臂由级联的半桥子模块构成, 每相桥臂的上半与下半部分连接非耦合电感作为电流的缓冲。MMC 拓扑在作为整流级连接高压交流电网时, 通过整流得到高压直流母线, 连接高压直流电网, 同时拓扑模块扩展简单, 使用低电压等级器件进行多模块级联能够增加电平和等效开关频率, 减小谐波、降低滤波要求, 在高压直流输电方面有着较为广泛的应用。

在中高压 PET 方面, 文献[15,16]针对高压直流电网与低压交流电网的电压变换, 将 MMC 应用于如图 3 类型的级联 H 桥型 PET 拓扑中, 得到如图 5(a) 的 MMC 型 PET 拓扑, 其中三相 MMC 连接高压直流母线和三相高压交流电网, 各子模块之间的能量通过三相的双主动桥 (Dual Active Bridge, DAB) 传递至低压侧, 通过同样的低压 MMC 拓扑变换成低压交流和直流母线。文献[17,18]中的拓扑则是将连接单相 MMC 各子模块的 DAB 输出并联, 得到低压直流母线。在图 5(a) 的拓扑中, 由于母线电压依靠各子模块支撑, 高压直流母线电容仅作电压支撑, 系统体积减小。文献[19]基于 MMC 提出的三



相 PET 拓扑通过三相 MMC 整流变换器的高压直流母线进行能量的传递,高压直流母线连接输入级联输出并联的 LLC 谐振变换器,而各子模块的电容悬空作为电压支撑,如图 5(b)所示。由于拓扑中隔离级只有一套,减少了中高频变压器的数量。同时,电容电压的二倍频波动仅存在于子模块电容中,高压母线上输入的三相瞬时功率二倍频分量相互抵消,电压恒定。以上拓扑还在一台 10kV 交流输入 750V 直流输出的能量路由器样机上实现<sup>[20,21]</sup>,系统用于中压配电网与分布式直流电网的连接。

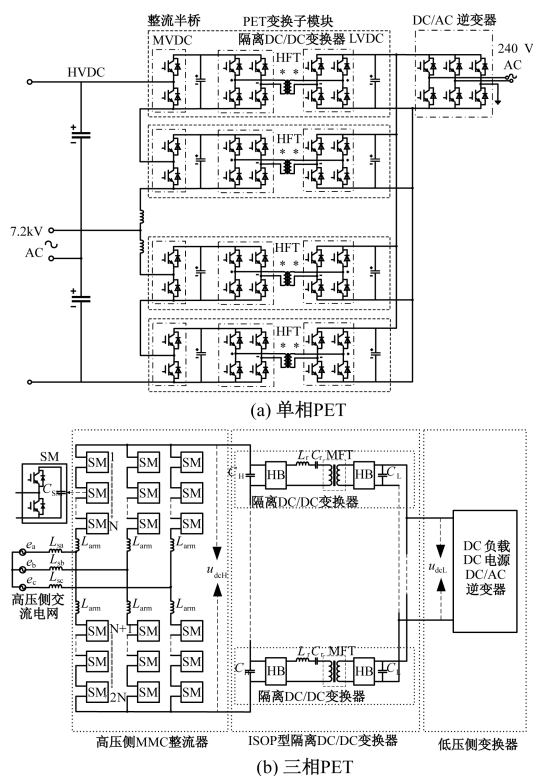


图5 采用 MMC 整流级的 PET

Fig. 5 PET with MMC rectifier

由于能连接单一的直流母线,MMC 变换器还可以作为隔离级的原边变换器连接 PET 的高压直流母线与隔离变换器,如图 6 所示。文献[22]将 DAB 连接高压侧直流母线的变换器替换成 MMC 拓扑,子模块为半桥与全桥混合模块,应用于分布式储能与高压直流电网的连接,该拓扑仅需一台中高频变压器,同时具有低电压穿越能力。文献[23]针对直流分布式电网和高压直流电网的连接也采用了类似的拓扑结构。然而以上拓扑仅完成了模型的仿真验证,在实际应用中尚未实现。

MMC 型 PET 拓扑虽然子模块结构更为简单,但在控制上算法较为复杂。首先,MMC 的三相桥臂

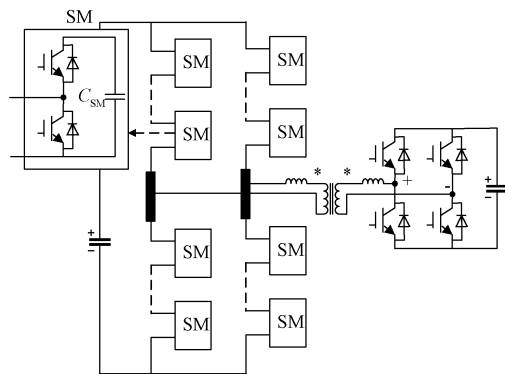


图6 采用 MMC 高压变换器的隔离变换器

Fig. 6 Isolated converter with MMC converter in high voltage side

并联在同一母线上,各相桥臂间存在环流,环流叠加在上、下桥臂电流内会使开关器件额定电容量提高,增加器件损耗。针对 MMC 的环流问题,文献[24,25]分析了 MMC 中环流产生的机理,并针对 MMC 桥臂间水平、垂直环流和二倍频环流提出了相应的抑制方法。其次,由于模块级联,MMC 变换器桥臂中的子模块同样存在电压不平衡问题。文献[26]基于电容电压排序平衡算法进行改进,优先控制电压偏离额定值较多的子模块,降低了器件的开关频率。另外,当高压直流母线出现短路时,由于半桥子模块续流二极管仍然导通,会产生较大的故障电流,通过改进子模块的结构能够对 MMC 拓扑低电压穿越特性进行改善<sup>[27,28]</sup>。

### 3.3 钳位型多电平拓扑

中点钳位型(Neutral Point Clamped, NPC)多电平拓扑如图 2(c)所示,除了图 2(c)中的二极管钳位型 NPC 拓扑外,NPC 拓扑还有飞跨电容型及混合钳位型等其他类型的拓扑,但由于电容体积较大,NPC 拓扑仍多采用无源或有源的开关器件进行钳位。以二极管钳位型多电平拓扑为例,三相整流级拓扑中每相桥臂由级联的开关管和其中的钳位二极管构成,并联在单一高压直流母线上。文献[7]中提出了整流级采用四电平二极管钳位电路的单相 PET 拓扑,单一高压直流母线后连接输入级联输出并联的 DAB,如图 7 所示。以上拓扑可以扩展成为三相结构,同时根据器件耐压水平和高压侧的电压等级对电路的电平数进行改变。同 MMC 拓扑一样,NPC 拓扑还可以应用于隔离级中,连接高压直流母线与隔离变压器,如图 8 所示。文献[29]将三电平二极管钳位 NPC 变换器应用于 LLC 谐振变换

器的高压侧,并在一台 166kW/2kV ~ 400V 的样机上进行了验证,文献[30]将三电平二极管钳位 NPC 电路应用于三相 DAB 中,得到了较理想的 DAB 电压电流特性。

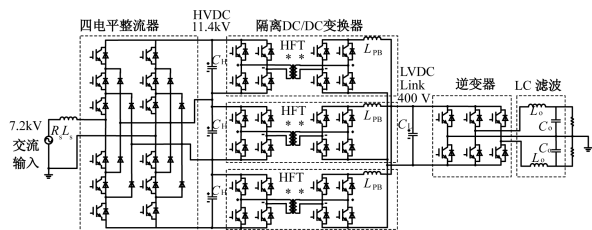


图7 采用二极管钳位 NPC 整流器的 PET

Fig. 7 PET with diode clamped NPC rectifier

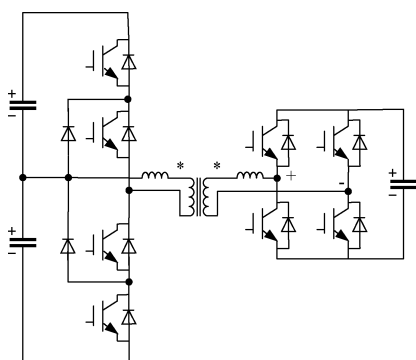


图8 采用二极管钳位 NPC 高压变换器的 PET

Fig. 8 Isolated converter with diode clamped NPC converter in high voltage side

NPC 拓扑作为整流级时不需要隔离的直流母线,隔离级变压器的数量减少,且三相结构的母线上不存在二倍频电压波动。然而由于钳位型拓扑需要大量的钳位器件,在电平数增加时钳位器件数量增加,电平数扩展困难,同时难以实现冗余。在控制上,流入 NPC 变换器各母线电容的电流不相同导致电容电压不均衡,在三电平以上的 NPC 拓扑中尚未有有效的电压平衡算法,且桥臂内外开关管工作时间不一致导致发热不均,仅能通过改变电路整体拓扑解决<sup>[31]</sup>。

电平数扩展所带来的诸多困难使得 NPC 拓扑只能通过器件串联或应用 SiC 的高压器件实现在中高压等级的应用,然而在低电压等级下,相较于单 H 桥拓扑,三电平 NPC 在各个开关管的承压以及电压应力上仅为前者的一半,同时输出电平数多,输出滤波要求低,作为 PET 低压侧的逆变级时有相当的应用优势。如文献[32]采用三电平二极管钳位 NPC 作为 PET 的逆变级驱动三相电机,并进行了实验验

证,得到良好的电机的驱动性能与噪声性能。

### 3.4 输入并联输出级联的隔离级结构

对于应用于中高压场合的 PET 来说,由于隔离级两侧电压等级发生了较大改变,拓扑的选择须兼顾高压侧的高电压等级以及低压侧的高电流等级,由此常采用输入级联输出并联 (Input Series Output Parallel, ISOP) 型的多模块组合式拓扑,如图 9 所示。

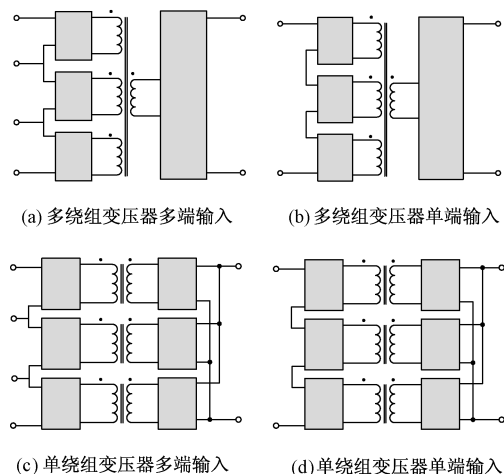


图9 ISOP 型隔离级结构

Fig. 9 ISOP isolation topologies

当 PET 系统对于模块化程度要求较高时,如在图 3 与图 5(a)的拓扑中,采用图 9(c)与图 9(d)中的拓扑形式对多个低电压等级的变换子模块进行组合更为适合,此时变换子模块往往采用单输入单输出的隔离 DC/DC 变换器。图 3 与图 4 中 PET 的隔离级即为连接于级联 H 桥整流器分立直流母线上 ISOP 型的 DAB,而图 5 与图 7 中 PET 的隔离级也采用了相同拓扑结构。当选择的隔离 DC/DC 子模块容量相同时,电路参数分散会导致各子模块电流不均衡,影响系统实际容量,故以上 ISOP 型的拓扑需要增加各子模块间功率或电流的均衡控制。另外,由多个小变换模块以 ISOP 形式构成的隔离级拓扑需要多个中高频变压器,所占体积较大,故也有文献提出了采用单一双绕组中高频变压器的新拓扑,如在 2.2 节中提到的中高压侧采用 MMC 拓扑的 DAB<sup>[22]</sup>,该拓扑仅需一台中高频变压器,适用于中高压场合,但大容量的 PET 对隔离变压器的电流等级有较高的要求。

为了减小多个双绕组中高频变压器带来的体积增加,另一种解决方式是在隔离级采用多绕组的变压器,如图 9(a)和图 9(b)所示。多主动桥 (Multi-

ple Active Bridge, MAB) 拓扑由多绕组变压器和连接在变压器各绕组两端的变换器构成, 数学模型与 DAB 类似, 可以解耦成为多个 DAB 拓扑进行控制<sup>[3]</sup>, 由此可以通过与 DAB 类似的移相的方法控制多绕组变压器中各个绕组功率的分布以及 MAB 各个端口的电压。目前 MAB 结构多作为多端口 PET 实现。文献[33]提出一种应用于微电网中分布式储能及光伏接入的四端口电力电子变压器, 采用四端口 MAB 实现, 同时还讨论了功率的流向关系及相应的控制策略。文献[34]基于家庭式能源路由器提出了一种基于六端口 MAB 的电力电子变压器, 应用于含有光伏、储能、交直流负载的微网中。将 MAB 拓扑应用于中高压 PET 的隔离级中的实例仅存在于专利中, 在实际样机中尚未出现, 然而由于 MAB 拓扑对控制各个端口电压与功率的分布较为方便, 可以作为解决级联母线电容电压不均衡以及单相高压直流母线电容电压波动的一个研究方向。

当变压器的总功率、额定电压以及额定电流都不变时, 采用多绕组变压器和多个双绕组变压器方案的总损耗基本相同。相比于双绕组变压器, 多绕组变压器的各绕组间相互隔离, 连接各绕组的负载灵活性高, 且由于多个绕组共用铁芯, 使得变压器体积小, 然而相对地, 多绕组变压器模块化程度差, 制造难度大, 且控制较为复杂。在隔离级变压器的选择上, 需要根据使用的端口数量以及体积、重量等要求综合考虑决定两种拓扑形式。

#### 4 隔离级典型拓扑的控制

对于三级式 PET 的隔离级来说, 其主要结构包括连接高压侧直流母线的高频逆变单元、连接低压侧直流母线的高频整流单元, 以及承担隔离作用的中高频变压器。隔离 DC/DC 变换电路主要有两种类型, 即 DAB 与 LLC 谐振变换器, 如图 10 所示。下文将针对以下两种隔离 DC/DC 变换电路的控制方法进行分析。

##### 4.1 DAB 变换器

DAB 变换器由隔离变压器和连接在各绕组上的变换器构成, 如图 10(a) 所示。由于 MAB 拓扑可以解耦成多个 DAB 拓扑进行分析, 在此仅讨论采用双绕组隔离变压器的形式。对于变压器两端的变换器来说, 除了最常见的全桥拓扑外, 半桥及三电平 NPC 等也有应用。采用半桥变换器的 DAB 隔离级拓扑由于控制简单、使用器件数量较少, 也在较多场

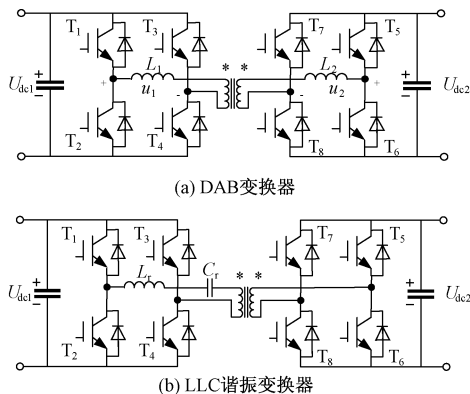


图 10 典型隔离级变换电路

Fig. 10 Typical isolation converters

合有应用<sup>[8,35]</sup>。但相较于全桥变换器, 半桥变换器中每个开关器件的电流应力和通态损耗大, 且采用的两个级联母线电容中点电压存在波动。另外, 在 DAB 拓扑中采用全桥变换器可以输出占空比改变的方波, 使得系统控制更加灵活。

DAB 通过原副边之间的移相角传递能量, 共有两个内移相角和一个外移相角三个控制变量。在目前针对 DAB 控制的研究中, 为了提升整体系统的效率, 实现 DAB 两侧变换器开关器件的零电压开通 (Zero Voltage Switching, ZVS) 是所有策略的基础, 在此基础上进一步对开关器件的导通损耗、电压电流应力和负载特性等参数进行优化。针对 DAB 器件的通态损耗问题, 文献[36]采用通用移相调制, 通过对 DAB 变压器漏感电流进行最优控制以降低两侧开关器件的通态损耗, 在实现 ZVS 的同时实现了最小开关损耗, 极大提升了系统效率, 文献[37]同样针对 DAB 漏感电流进行优化控制, 使得在较大的母线电压范围内开关器件的导通损耗最低。在软开关实现问题上, 文献[38]在低负载的条件下采用三角波电流调制实现了部分器件的零电流开通 (Zero Current Switching, ZCS), 减小了系统的开关损耗。在器件开通的电流应力方面, 文献[3]针对多端口 MAB 拓扑, 利用通用移相调制实现了在不同负载条件下的 ZVS, 并减小了器件开通时的电流尖峰。

以上控制方法优化了 DAB 的性能, 在中高压 PET 的应用场合中, 有助于提升系统的效率和稳定性。然而对于 DAB 来说, 其软开关范围窄, 以上控制在某些特定的工况下并不能达到全范围的软开关。同时, 由于从电源发出的瞬时功率随时间变化, 在 DAB 的开关周期内会出现反向功率流动, 导致 DAB 导通损耗较大, 且 DAB 在连续电流调制模式



下并不能够实现开关的 ZCS, ZCS 仅能在电流断续模式的调制下实现。

## 4.2 LLC 谐振变换器

LLC 谐振变换器主要使用三个谐振器件  $L_r$ 、 $C_r$ 、 $L_m$  构成谐振网络, 其中  $L_r$  常作为变压器漏感出现, 如图 10(b) 所示。谐振型变换器还有其他类型的拓扑, 如 LC 串联、LC 并联拓扑等, 但由于 LLC 谐振变换器在电压可控性和软开关范围等方面特性较好, 在应用中较多使用。

LLC 谐振变换器的控制一般采用占空比 50% 的对称方波作为变压器一侧 H 桥的驱动信号, 另一侧 H 桥作为二极管桥使用, 驱动信号始终为低电平, 当需要实现能量反向流动时, 将驱动信号改为施加在另一侧的 H 桥上。LLC 谐振变换器通过谐振网络传递能量, 目前针对 LLC 谐振变换器的研究主要集中在针对两端器件软开关的实现、针对不同负载的特性的参数选择以及传输效率优化等方面。针对变换器参数的选择, 文献[39]对 LLC 谐振电路的工作模式进行建模, 提出了优化的谐振参数设计方法, 使得变换器中开关器件的导通损耗最优。在输入电压与负载特性优化方面, 文献[40]提出了 LLC 谐振变换器变频与移相混合的控制方法, 保证了宽输入电压范围内系统的效率, 并实现了全电压、负载范围内开关管的 ZVS 和整流二极管的 ZCS, 文献[41]采用类似的方法实现了在不同负载工况下对于输出电压稳态的准确控制, 同时减小了变换器两侧器件的电流尖峰与输出电压纹波。

对于 PET 的应用场合, 在网侧电压波动或负载变化较大时, 需要 DC/DC 变换器的电压在一定范围内可调, 以提升输出性能, 针对于 LLC 谐振变换器的控制与参数优化能够提升系统的效率, 并保证系统的稳定性。相对于 DAB 变换器, LLC 谐振变换器可以同时实现全部器件的 ZVS 和副边的 ZCS, 效率较高, 但在同等电压功率时电流幅值偏大, 有较大的器件应力, 在实现闭环的电压控制时, LLC 谐振变换器对于电压的调节范围有限, 也不能实现与 DAB 相同的宽电压范围控制。

## 5 中高压电力电子变压器应用亟待解决的关键技术问题

由前文的分析总结可知, 针对于中高压应用场合的 PET 在各类拓扑与相应的控制方法上都有了大量研究, 然而在实际应用中, 仍有以下几个方面并

不成熟, 亟待完善与改进:

### (1) 运行可靠性问题

在中高压应用场合, PET 作为取代传统变压器的新一代技术, 需要在恶劣的工作环境下有着同样甚至更高的可靠性。在使用普通硅基的开关器件时, 中高压 PET 需要进行多模块的级联或采用多电平拓扑, 器件数量将大大增加, 由此对系统的稳定性与可靠性提出了很高的要求。对于 PET 来说, 运行的可靠性涉及到器件、电容、变压器等诸多环节, 其可靠性的提升也需依赖于以上方面制造工艺与相关技术的提升, 例如高压 SiC 新器件的使用能够减少系统的开关器件数量, 同时 SiC 器件的温度特性相较硅基器件也有了提升。由此, SiC 等宽禁带材料新器件的使用是中高压 PET 技术发展的一个新的方向。

### (2) 系统功率密度与效率优化问题

在 PET 的隔离级, 已经有大量针对开关器件 ZVS 与 ZCS 的研究, 使系统效率得到提升。由于开关器件工作在较高的开关频率下, 可采用中高频的隔离变压器, 使隔离变压器体积减小, 然而当系统工作频率提升, 器件开关损耗增加, 同时变压器与开关器件工作温度上升, 需要更大的散热装置, 散热部分体积增加, 由此在 PET 系统参数设计中需对隔离变压器与散热等部分的体积进行平衡, 系统功率密度的优化有待进一步研究。另外, 相较于传统工频变压器, PET 在高负载工况下的效率仍有待提升。由此, 在系统层面, 系统的功率密度、效率和工作频率以及相关的拓扑结构、电容、电感器件与变压器的参数选择问题需要进行综合的优化分析。而在器件材料方面, 低损耗的开关器件与高频、高效、大容量的变压器相关新材料的开发与采用新材料产品的未来应用也是中高压 PET 技术发展的一个方向。

由以上分析, 可以看出中高压 PET 的实现除了拓扑选择与控制方法优化外, 还涉及到器件与材料相关技术, 以及实际工程应用如散热系统设计等其他问题。随着研究的深入和技术难题的解决, PET 的应用将会更为普及。

## 6 结论

本文对应用于中高压领域 PET 进行了分析, 针对适用于中高压场合的典型拓扑进行了分析, 对比了各拓扑在系统体积、可靠程度以及控制难易程度等方面的优缺点, 并就 PET 隔离级常用的两种不同

类型的变换器进行了具体控制策略上的总结与适应性分析。随着新器件的普及和电力电子变换技术的发展,应用于中高压场合的 PET 在系统效率、功率密度和可靠性方面的性能会逐步提高,在智能电网与能源互联网中将有着非常广泛的应用前景。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] William M. Power converter circuits having a high frequency link [ P ]. USA Patent: 3517300, 1970-06-23.
- [ 2 ] Zhao C, Dujic D, Mester A, et al. Power electronic traction transformer-medium voltage prototype [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 ( 7 ): 3257-3268.
- [ 3 ] Gu C, Zheng Z, Xu L, et al. Modeling and control of a multiport power electronic transformer (PET) for electric traction applications [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 ( 2 ): 915-927.
- [ 4 ] Wang G, Baek S, Elliott J, et al. Design and hardware implementation of Gen -1 silicon based solid state transformer [ A ]. 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [ C ]. 2011. 1344-1349.
- [ 5 ] Yuan L, Wei S, Ge J, et al. Design and implementation of AC-DC hybrid multi-port energy router for power distribution networks [ A ]. 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems [ C ]. 2015. 591-596.
- [ 6 ] Gu C, Krishnamoorthy H S, Enjeti P N, et al. A novel medium-frequency-transformer isolated matrix converter for wind power conversion applications [ A ]. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ( ECCE ) [ C ]. 2014. 1070-1077.
- [ 7 ] Falcones S, Mao X, Ayyanar R. Topology comparison for solid state transformer implementation [ A ]. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting [ C ]. 2010. 1-8.
- [ 8 ] Huang A Q, Wang L, Tian Q, et al. Medium voltage solid state transformers based on 15 kV SiC MOSFET and JBS diode [ A ]. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [ C ]. 2016. 6996-7002.
- [ 9 ] Rothmund D, Ortiz G, Kolar J W. SiC-based unidirectional solid-state transformer concepts for directly interfacing 400V DC to Medium-Voltage AC distribution systems [ A ]. 2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference [ C ]. 2014. 1-9.
- [ 10 ] Zhao C, Weiss M, Mester A, et al. Power electronic transformer (PET) converter: Design of a 1.2 MW demonstrator for traction applications [ A ]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion [ C ]. 2012. 855-860.
- [ 11 ] Hoffmann H, Piepenbreier B. High voltage IGBTs and medium frequency transformer in DC-DC converters for railway applications [ A ]. 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion [ C ]. 2010. 744-749.
- [ 12 ] Vasiladiotis M, Rufer A. A modular multiport power electronic transformer with integrated split battery energy storage for versatile ultrafast EV charging stations [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 ( 5 ): 3213-3222.
- [ 13 ] Das M K, Capell C, Grider D E, et al. 10 kV, 120 A SiC half H-bridge power MOSFET modules suitable for high frequency, medium voltage applications [ A ]. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [ C ]. 2011. 2689-2692.
- [ 14 ] 王志冰, 于坤山, 周孝信 ( Wang Zhibing, Yu Kunshan, Zhou Xiaoxin ). H 桥级联多电平变流器的直流母线电压平衡控制策略 ( Control strategy for DC bus voltage balance in cascaded h-bridge multilevel converters ) [ J ]. 中国电机工程学报 ( Proceedings of the CSEE ), 2012, 32 ( 6 ): 56-63.
- [ 15 ] Briz F, López M, Rodríguez A, et al. MMC based SST [ A ]. 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics ( INDIN ) [ C ]. 2015. 1591-1598.
- [ 16 ] Lu S, Zhao Z, Ge J, et al. A new power circuit topology for energy router [ A ]. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems [ C ]. 2014. 1921-1925.
- [ 17 ] Liu Y, Escobar-Mejia A, Farnell C, et al. Modular multilevel converter with high-frequency transformers for interfacing hybrid DC and AC microgrid systems [ A ]. 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems [ C ]. 2014. 1-6.
- [ 18 ] Shojaei A, Joós G. A topology for three-stage solid state transformer [ A ]. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting [ C ]. 2013. 1-5.
- [ 19 ] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等 ( Li Zixing, Wang Ping, Chu Zunfang, et al. ). 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究 ( Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer ) [ J ]. 电网技术 ( Power System Technology ), 2013, 37 ( 9 ): 2592-2601.
- [ 20 ] Gao F, Li Z, Wang P, et al. Prototype of smart energy router for distribution DC grid [ A ]. 2015 17th European



- Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe) [C]. 2015. 1-9.
- [21] 李子欣, 高范强, 徐飞, 等 (Li Zixing, Gao Fanqiang, Xu Fei, et al.). 中压配电网用 10kVac-750Vdc/1MVA 电力电子变压器功率密度影响因素研究 (Power density analysis of 10kVac-750Vdc/1MVA power electronic transformer/solid-state transformer for medium voltage distribution grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (6): 1-6.
- [22] Shi Yuxiang, Li Hui. Novel modular Dual-Active-Bridge (DAB) DC-DC converter with DC fault ride-through capability for battery energy storage systems [A]. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. 2016. 1-6.
- [23] Wu Q, Wang G, Feng J, et al. A novel comprehensive control scheme of modular multilevel converter-based power electronic transformer [A]. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies [C]. 2015. 2253-2258.
- [24] 张建坡, 赵成勇 (Zhang Jianpo, Zhao Chengyong). 模块化多电平换流器环流及抑制策略研究 (Research on circulation current and suppressing strategy of modular multilevel converter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 28 (10): 328-336.
- [25] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等 (Yan fayou, Tang Guangfu, He Zhiyuan, et al.). 一种适用于模块化多电平换流器的新型环流控制器 (A novel circulating current controller for modular multilevel converter) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (1): 104-108, 120.
- [26] 管敏渊, 徐政 (Guan Minyuan, Xu Zheng). MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制 (Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31 (12): 9-14.
- [27] Yu X, Wei Y, Jiang Q, et al. A novel hybrid-arm bipolar MMC topology with DC fault ride-through capability [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, DOI: 10.1109/TPWRD. 2016. 2593745.
- [28] Zhang J, Zhao C. The research of SM topology with DC fault tolerance in MMC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30 (3): 1561-1568.
- [29] Ortiz G, Leibl M, Huber J, et al. Design and experimental testing of a resonant DC-DC converter for solid-state transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, (99): 1-10.
- [30] Tripathi A K, Hatua K, Mirzaee H, et al. A three-phase three winding topology for dual active bridge and its DQ mode control [A]. 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. 2012. 1368-1372.
- [31] Kieferndorf F, Basler M, Serpa L A, et al. A new medium voltage drive system based on ANPC-5L technology [A]. 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology [C]. 2010. 643-649.
- [32] Krishnamoorthy H S, Enjeti P N, Pitel I J, et al. New medium-voltage Adjustable Speed Drive (ASD) topologies with medium-frequency transformer isolation [A]. Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference [C]. 2012, 2: 814-819.
- [33] Falcones S, Ayyanar R, Mao X. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (5): 2192-2203.
- [34] Liu X, Zheng Z, Wang K, et al. An energy router based on multi-winding high-frequency transformer [A]. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. 2016. 3317-3321.
- [35] Vasiladiotis M, Rufer A. A modular multiport power electronic transformer with integrated split battery energy storage for versatile ultrafast EV charging stations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (5): 3213-3222.
- [36] Krismer F, Kolar J W. Closed form solution for minimum conduction loss modulation of DAB converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (1): 174-188.
- [37] Han W, Ma R, Liu Q, et al. A conduction losses optimization strategy for DAB converters in wide voltage range [A]. IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. 2016. 2445-2451.
- [38] He X F, Zhang Z, Cai Y Y, et al. A variable switching frequency hybrid control for ZVS dual active bridge converters to achieve high efficiency in wide load range [A]. 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. 2014. 1095-1099.
- [39] 胡海兵, 王万宝, 孙文进, 等 (Hu Haibing, Wang Wanbao, Sun Wenjin, et al.). LLC 谐振变换器效率优化设计 (Optimal efficiency design of LLC resonant converters.) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (18): 48-56.
- [40] 李菊, 阮新波 (Li Ju, Ruan Xinbo). 全桥 LLC 谐振变换器的混合式控制策略 (Hybrid control strategy of full bridge LLC converters) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 33 (18): 48-56.

tions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (4): 72-79, 94.  
[41] Park H P, Jung J H. PWM and PFM hybrid control meth-

od for LLC resonant converters in high switching frequency operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (1): 253-263.

## Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer

WANG You, ZHENG Ze-dong, LI Yong-dong

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As a new intelligent power transmission equipment, power electronic transformer (PET) shows great value in the smart grid and energy Internet applications. In this paper, typical PET topologies and related control strategies are analyzed in view of medium and high voltage application. The characteristics of various topologies in terms of system efficiency, reliability and control complexity are summarized. The three-stage PET with multi-module cascade converter in the high voltage side is easy to expand, and the control is simple, but still there is room for optimization in system volume and efficiency. In this paper, two different types of converters in the isolation stage are summarized and contrasted, and the adaptability of the two different converters in medium and high voltage applications is analyzed.

**Key words:** power electronic transformer; medium and high voltage applications; topology

### 《电工电能新技术》期刊在线投稿系统上线通知

尊敬的作者和读者:

感谢您长期以来对本刊的支持!为适应当前网络出版信息化的需求,更好地为广大作者和读者服务,促进期刊出版的规范化和科学化,《电工电能新技术》在线投稿系统已于2016年3月1日正式上线,投入使用。《电工电能新技术》期刊网站是集编辑部信息,期刊采编系统,网刊发布系统、知识交流平台等为一体的综合管理系统,旨在为读者、作者、审稿专家及编辑提供交流互动平台。期刊采编系统包括作者在线投稿、专家在线审稿、编辑在线办公等功能,能够实现投稿-审稿-编辑-编审整个过程的全在线处理,提供全流程的邮件自动发送及自动提醒功能。作者可通过网站投稿并查询稿件实时处理情况,审稿专家可实现网上审稿并查询稿件审理情况,广大读者可通过网站在线期刊模块阅读并下载已出版的期刊,并根据需求进行检索与个性化订阅,了解行业领域的最近技术进展,促进技术交流与传播。

网站目前处于初运行阶段,欢迎广大作者、审稿专家、读者及时向编辑部反映使用时遇到的问题,提出改进建议,以便我刊不断完善服务工作。

**联系人:**朱龙琴;**联系电话:**010-82547228,82547196;**电子邮箱:**dgdndedit@mail.iee.ac.cn

**使用说明:**

- (1)可点击期刊网址 [http://159.226.64.23/Jwk\\_dgdn/CN/volumn/home.shtml](http://159.226.64.23/Jwk_dgdn/CN/volumn/home.shtml),直接进入网站。
- (2)既是作者又是专家的用户无需重复登陆,登录后可通过身份切换按钮完成界面切换。
- (3)期刊历史数据正逐步建设与完善中,敬请关注。

《电工电能新技术》编辑部