

「多电平转换器」

新型多电平转换器拓扑结构及应用综述

文/四川师范大学工学院电气工程系 冯娟 万星 李自鹏

介绍了现代多电平变换器最新研究，包括了新型拓扑结构、优化的调制方案、以及运行控制方面遇到的问题等。同时提出了现代多电平变换器研究的瓶颈和发展趋势，为该技术的应用和研究提供了重要的参考。

多电平变换器作为大功率电力电子变换器在工业界和学术界得到了越来越多的重视，已经在工业领域发展成熟。目前，多电平变换器已经有了商业化标准和定制的产品，因此有着广泛的应用。比如水泵、风机、汽轮机起动机、矿井提升机、船舶推进系统、高压直流传输（HVDC）、抽水储能、风能转换、以及铁路牵引系统等。

尽管这是一种成熟的技术，多电平变换器发展依然面临着巨大的挑战。研究人员都在致力于进一步提高多电平变换器的转换效率，降低其成本和复杂性，使其电子元件数量最少化，输出电平数量最大化。让该技术有更广的应用范围和更大的竞争力。

新型多电平拓扑结构

近年来，多电平拓扑结构经历了巨大的发展。它们中的大多数都是三种经典多电平拓扑结构的变种类型或者是混合体，但大部分都还没有应用到工业上。在新型拓扑结构中已经有了实际应用的有：五电平H桥中性点钳位变换器（5L-HNPC）；三电平有源中性点钳位变换器（3L-ANPC）；五电平有源中性点钳位变换器（5L-ANPC）；模块化多电平变换器（Modular Multilevel Converter, MMC）；以及级联矩阵变换器（Cascaded Matrix Converter, CMC）。除此之外，一些其他的新型拓扑结构正在发展中，如：晶体管钳位变换器（Transistor Clamped Converter, TCC）、使用不相等直流源的CHB或者不对称CHB、混合NPC-CHB以及混合FC-CHB拓扑结构等。下面介绍常见新型多电平拓扑结构。

1. 有源中性点钳位变换器

在3L-NPC拓扑结构中，为了控制功率损耗分配的问题，提高功率，克服其电容电压不平衡的局限性，采用了有源中性点钳位开关。将钳位二极管替换成了相应的集成门极换流晶闸管（Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT），所以该变换器称为有源中性点钳位变换器ANPC，如图1所示。虽然ANPC和NPC在换流原理上有本质的不同，但ANPC的换流不对电力半导体器件或者变换器的运行提供关键条件，因此ANPC的全部换流方式都能应用在新型中压变换器中。另外一种常见的结构是5L-ANPC，这种拓扑结构通过添加飞跨电容单元有效地增加了变换器的电平数，使NPC变换器模块化，解决了电容电压平衡的问题，提高了额定功率，但增加了器件的数量，引入了更多的开关损耗和通态损耗。

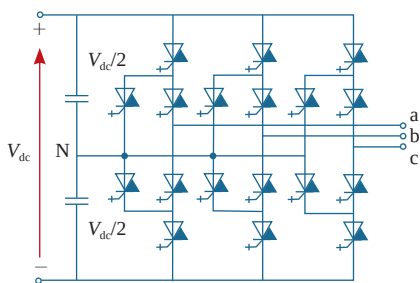


图1 采用IGCT的三电平有源中性点钳位转换器

2. H桥中性点钳位变换器

HNPC由NPC按H桥结构连接构成，如5L-HNPC由两个基于IGBT的单相3L-NPC连接组成。由3L-NPC（ $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$ ）的每边组合成了五种不同的输出电平（ V_{dc} , $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$, $-V_{dc}$ ）。

$-V_{dc}$)。这种带36脉冲整流系统的大功率变换器可以在实际应用中找到,功率范围为2~7 MW(空气冷却)或者5~22 MW(水冷)。它可以应用在直接转矩控制系统,达到250 Hz的输出频率以及6.9 kV的输出电压。但缺点是随着电平数增加,所需钳位二极管的数目也急剧增加,而且为了避免直流连接短路,每个H桥都需要独立的直流源,增加了整个系统的复杂性。

3. 模块化多电平转换器

模块化多电平转换器也称为MMC或M2C,如图2所示,经典模块化多电平拓扑由多个两电平电压源变换器(Two-Level Voltage Source Converter, 2L-VSC)串联构成。为了在交流边产生相同数目的正负电平,每一相分成了两个相等的部分(单元数必须为偶数),其子模块结构相同,都是由两个IGBT串联后与电容并联构成。除此之外,为了在短暂短路时起保护作用,每相边都包含电感。在实际应用中为了容错运行,还需要一个额外的旁路开关来完全独立每个单元,所以一旦子模块发生故障,可以及时切除故障模块,投入新模块,保证系统的正常运行。这种模块化的结构让它更容易达到中高压,提高了交流电网的电能质量,解决了串联设备中电压分配不均衡的问题。

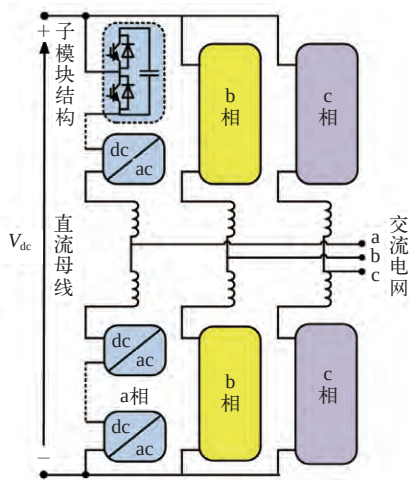


图2 模块化多电平拓扑结构

4. 晶体管钳位变换器

晶体管钳位变换器(Transistor Clamped Converter, TCC)和二极管钳位变换器(DCC)的概念类似,通过双向开关给钳位器件提供电流通路。在《Capacitor voltage balancing of flying capacitor multilevel converters by space vector

PWM》一文中,提出了一个基于两个反向串联IGBT的双向开关三电平拓扑结构,和NPC一样,在三电平的情况下有一个全控中性钳位点,所以这种拓扑结构也被称作中性点控制式(Neutral Point Piloted, NPP)变换器,它可工作中压(3.3 kV, 6.6 kV和9.9 kV)以及48 MW的大功率场合。通过设备均分损耗可让开关器件工作在更高的频率,有效地提高了最大输出频率。

5. 多电平矩阵变换器

多电平矩阵变换器(Multilevel Matrix Converter, MMC)如图3所示,通过双向开关直接把输入交流线路连接到输出交流线路上,没有使用电容电阻等能量存储器件因此属于直接变频电路。多电平矩阵变换器具有重量轻、体积小、固有四象限运行特性、能够改善输出电压波形畸变、适合高电压大功率场合运行等优势。这对于交通运输系统(如电动汽车、电动飞机、军用车辆等)来说是理想的条件。但由于缺少电容电阻并不利于实现高压运行,因此该结构被限制在了低功率的应用范围内。矩阵拓扑结构通过串联功率模块提升电压,正确的控制开关状态可以在负载边产生阶梯式的电压波形。但缺点是需要大量的开关器件,这降低了它的可靠性和运行效率。

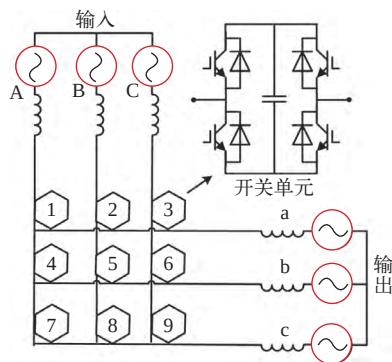


图3 多电平矩阵变换器

6. 非对称级联H桥变换器

如果在CHB拓扑结构上每个单元间提供不相等的直流电压比,则可以消除一些甚至所有电平冗余的开关状态,使变换器产生的电平数量达到最大化而不需要大量增加开关器件。这种“三重混合多电平变换器”通过每相串联一个或者多个H桥提供不相等的直流电压比。

由于CHB变换器在相同的输出电平下,所需器件最少、易于封装、谐波含量少、技术成熟,

因此得到了广泛的应用。D类数字音频功率放大器虽然不在大功率和高压范围内,但是为了提高电能质量(主要是降低了总谐波失真)、达到更高开关频率而不明显提高平均器件开关频率,研究人员正在努力把多电平变换器应用到这一领域。其中最具有优势的是非对称CHB,因为它能够轻易地达到更多的电平数(更低的THD),提高音频质量并有利于高频滤波。

7. 新型模块化级联型多电平变换器

H桥级联多电平逆变器在高压大容量变频调速领域得到了广泛的应用,其最大的缺点是需要使用庞大、复杂而昂贵的多绕组移相隔离变压器。为了省去传统H桥级联多电平变换器中的多绕组移相变压器,《Performances of DTC system fed by a three-level NPC VSI》一文提出了一种新型的无变压器级联型多电平变换器拓扑结构,该拓扑由通用拓扑结构派生而来,如图4所示,全部由基本单元级联而成,不需要大量独立直流电源,省去了多绕组移相隔离变压器,具有模块性强、结构简单、易于扩展等优点。和现有的主要的多电平拓扑结构相比,随着电平数的增多,使用元件较少,更适合五电平及以上多电平使用。

由图4中可以看出,M电平新拓扑结构每相桥臂由 $(2M-3)$ 个基本单元级联组成,可分成上桥臂、中间单元和下桥臂三个部分。上下桥臂分别由 $(M-2)$ 个基本单元级联组成,每增加一个电平,只需上下桥臂各增加一个基本单元即可,结构简单,模块性强。

在调制方案上的最新进展

目前,新型调制方案期望被用于大功率变流器上以追求更高的电能质量和更低的开关频率,但这两个性能往往相互制约,这也成为了多电平技术最大的挑战之一。

工业中经典的多电平调制方法有多种,常用的有阶梯波调制、正弦载波调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)、选择谐波消去法(Selective Harmonic Elimination, SHE)等。一般来说,好的调制方案需要满足开关次数少、输出谐波少、直流侧电容电压平衡、器件易实现等条件。但阶梯波调制输出谐波大,SPWM法直流利用率低,而SHE法计算复杂且动态性能较差。因此近年来发展了许多新型调制方案,具有代表性的是空间矢量调制(Space Vector Modulation,

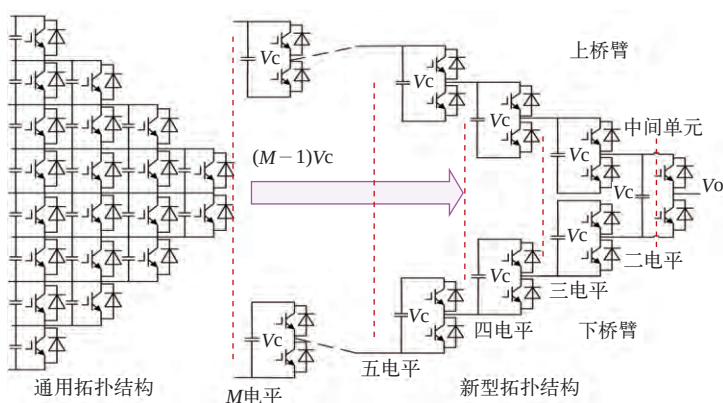


图4 新型模块化级联多电平变换器

SVM),该调制方案采用了2-D算法和3-D算法,具有降低开关频率,抑制共模电压,降低总谐波畸变率(THD)等优点,但缺点是计算复杂。

作为替代SHE的方案,提出了特定谐波抑制方案(Selective Harmonic Mitigation, SHM)这种技术和SHE一样需要离线计算,计算量随着电平数增多呈非线性的增加。不过一旦完成了方程和等式的求解,就只需把结果放在查找表中。这两种方法和SHE相比都有着各自相应的缺点,比如SHM没有完全消除谐波,但降低了总谐波失真,SHE虽然限制了低次谐波却把谐波能量限制在了高频,等等。

在控制方法和运行问题上的最新进展

为了适应多电平拓扑结构的特殊需求和开关状态,需要在控制方法上面进行更多的研究。实际上,变速电动机驱动使用的多电平变换器和双电平电压源变换器采用了同样的控制方法,如压频比(V/f)控制、磁场定向控制(Field-Oriented Control, FOC)、直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)等。

由于压频比控制和FOC在控制回路中有调制级,所以不能改变控制方案,只能改变调制级。而DTC涉及到转换器在电动机特殊的磁通和转矩改变下会产生开关状态和电压矢量的问题,因此不能从双电平直接延伸到多电平。而3L-NPC已经解决了这个问题,它通过使用多个滞后带控制器更好地划分了空间矢量复平面,目前这种技术已经成功应用在工业领域。

飞跨电容拓扑结构尽管有自动平衡电容电压的特性,但电容电压动态响应低,因此一些工程提出了基于空间矢量调制(SVM)的控制方法,

利用冗余的开关状态来改善电压平衡性能。在多电平变换器领域也提出了预测控制技术，用预测控制器代替调制器和线性控制器，避免了负载侧控制电流产生，解决了NPC逆变器中电容电压不平衡的问题、减少了换向数量、花费低、重量小，是非常有发展潜力的技术。

在多电平变换器应用的最新发展

1. 在列车牵引，船舶推进和运输系统中的应用

通常牵引驱动工作中在中压大功率范围，并且需在很宽的频率范围达到高性能的高速运行。为了达到高速，需要更高的开关速度来控制基本频率。多电平变换器可以在不增加设备平均开关频率的情况下产生更高频率的开关输出波形。此外，额外的电平从本质上提高了电压总谐波失真，所以可以进一步降低开关频率。

火车的大惯性让这一应用更倾向于支持可再生回馈制动和四象限运行的拓扑结构。目前，背靠背配置的3L-NPC已经应用在了列车牵引系统。由于需要牵引变压器来降低接触网电压以适应电动机驱动，增加了列车的质量，降低了运行效率。因此对于NPC转换器提出了一些新的配置方案，它能够在接触网侧达到足够高的电压，在每个直流连接段使用直流-直流中频隔离段以给不同的电动机驱动分配电压，而摆脱了笨重的变压器。

多相电动机是船舶推进系统中多电平变换器的重要发展方向，它有着高可靠性、容错性、高转矩、高功率密度等优点。多相电动机和多电平技术的结合增加了这一领域的应用优势，这让它更加适合于船舶推进系统。目前，多电平变换器已经推出了在汽车牵引方面的应用。

2. 在电能产生，转换和传输上的应用

目前风力发电机组已经发展到了兆瓦级的功率范围，并且需要大型风能转换系统来控制无功功率，甚至在电压骤降的时间内，也必须保持电网正常运行。而采用容量较低的变换器段可以调整系统的应力、减少系统压力、提高发电效率等。因此多电平变换器已经成为风能系统电能转换接口最有前途的替代品之一。采用背靠背配置的3L-NPC可在高性能发电机侧控制实现最大功率点跟踪（Maximum Power Point Tracking, MPPT），当断开电网与发电机直流连接时可以有效地控制有功和无功功率。

多电平变换器可以用作光伏并网系统的电源

接口。随着光伏模块成本的降低，光伏并网电厂在持续的增加，目前有数百个大型超过10 MW的光伏发电厂正在运行。所以光伏并网系统是发展最快的可再生能源系统。多电平变换器可以用更智能的方式连接到光伏电池阵列以达到更高的电压，甚至和公共连接点达到相同的值。特别在孤岛这类地区，采用多电平变换器的光伏发电系统是最可行的能源方案。

多电平转换器另一个新型应用是抽水储能。把湖、江，甚至海洋中的水抽到更高的水库中形成一个大规模的能源存储系统，当需要的时候，这些水被用来发电。抽水储能对于核电厂非常有利，因为反应堆的运行不能突然改变，因此在能源要求较低的时候，多余的能量可以用来把水抽到更高的水库中。同样的方式可以用在风力发电厂，当风能超过消耗需求的时候，就可以使用这种方法。相对应在大功率需求时，水库中的水可以用来产生额外需求的能量。图5展示了抽水储能系统的简要模型，该系统使用了一个可逆混流水泵/涡轮，它可以用来抽水或者发电。由于同步电机/发电机额定功率高，系统常以固定的转速运行。然而，在同步转速上下很小比例的转速百分比变化都可以在不同负载和运行情况下提高运行效率。因此，通过双馈感应发电机和部分额定功率的转换器连接到电网，可以给大额定功率的水泵/涡轮提供一个变速百分比。目前，一家制造商生产了一种3L-ANPC，可以用在200 MV·A的抽水储能系统中，通过这种方案提高了大约10%的效率。除此之外，转化器的有源前端可以通过减小小电力系统波动以及控制无功功率来提高电力系统的稳定性。

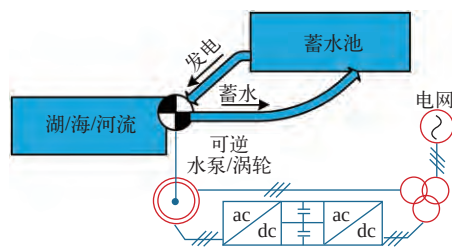


图5 背靠背配置的ANPC双馈感应电动机/发电机的抽水储能应用

3. 多电平在数字功放中的应用

虽然D类数字音频功率放大器不在大功率和高压范围内，但是为了提高电能质量（降低总谐波失真）、达到更高开关频率而不明显提高平均器

件开关频率，激励着研究人员把多电平变换器应用到这一领域。其中最具有优势的是带不等直流源的CHB，因为它能够轻易地达到更多电平数（更少的THD），提高音频质量并有利于高频滤波。

大输送机系统是多电平变换器的一个标准应用之一，它并不需要高性能和高的动态控制。然而，大下坡传送带系统基本工作在再生回馈状态，由于涉及到大功率，电阻制动不仅低效而且需要大功率电阻和冷却系统。在这种应用条件下，背靠背配置的多电平解决方案就有巨大的优势。尽管有着较高的初始变换器成本，但四象限运行使得双向功率流成为可能，增加了整个系统的效率，同时也控制了输入功率因数。

多电平技术发展的趋势和挑战

大多数制造商提供的多电平变换器产品（基于IGBT和IGCT）的平均器件开关频率从500 Hz到700 Hz，主要是为了提高效率、扩展设备使用范围以及有一个可行的冷却系统。然而工作在低开关频率下常常会引入低次谐波，因此效率匹配和高性能依然是多电平变换器发展最大的挑战。如果引入了更高数量的电平，可以从本质上改善多电平波形。所以现在许多新型多电平拓扑结构追求更高数量的电平，而这也是未来发展的趋势。

在另一方面，变换器的开关损耗依然存在，而这部分取决于调制方案。因此，对于一个给定的拓扑结构，需要通过选择调制方案和设计参数来修正开关损耗。另外，一旦选定了拓扑结构，通态损耗就基本上不能改变了。因此在变换器构思、设计和选择阶段中考虑通态损耗就显得尤为重要。

除了通态损耗和开关损耗，还需考虑变换器产生的谐波对效率的影响。在电机和电网侧的谐波损耗同时依赖于拓扑结构和调制方案。但在这个方面，任何多电平拓扑结构都优于传统双电平电压源逆变器。

可靠性也是多电平变换器未来发展的一个关键因素。一些多电平拓扑结构通过添加一些硬件以实现在内部故障的情况下使系统有足够的容错裕度来运行。实际上，这种特性依赖于故障检测和诊断技术，以便在故障发生和产生损坏前对变换器进行容错重构。电容器故障或半导体短路/开路故障发生十分迅速，以现在的技术水平，还无法实现一个完全可靠的功能故障检测诊断系统，因此提高可靠性还需要解决很多问题。

电源变换器技术的发展将始终和功率半导体的发展紧密结合起来。当下多电平变换器发展的两种不同的趋势：第一种是使用更简单的电路结构（NPC、ANPC、H-NPC、等），可以使用IGCT这类更高额定值的元件来达到中压。第二种是使用模块化的结构，它们在结构上更复杂（如CHB，FC和MMC），但可以使用IGBT这类较低额定值的元件通过串联变换器单元来达到高压。这两种方法有各自的优点，而且将在未来几年在不同的应用领域中共存。在另一方面，发展成熟的碳化硅（SiC）器件可以大大减少开关损耗，这将有利于多电平变换器在工业应用领域的渗透。如今，碳化硅二极管已经作为商业产品出现在了低电流应用场合以替换传统的硅二极管。未来的高压碳化硅功率半导体将把多电平变换器的应用拓展到高压领域。

目前，多电平变换器已经渗透到了一些基于晶闸管负载换流逆变器和周波变换器占主导地位的应用当中，比如碾磨机、船舶推进机、抽水储能系统、超大风机等而且这个趋势将持续下去。和负载换流逆变器和周波变换器相比，多电平变换器有更高的性能和电能质量。对于多电平变换器技术来说，只有挑战更优的实用性、可靠性、效率、体积和更低费用，才能使它在这些应用领域中拥有更大的竞争力。

另一个多电平技术发展的方向是减少体积和质量。目前大多数涉及到大型机械的工业对空间和重量的限制都不高。但在交通运输中，体积和质量却是非常重要的。除此之外，在风能转换中，特别是海岸的涡轮机，转换器需要整合在塔的顶端，重量和体积的减少可以释放大量的结构应力。因此，电能质量的提高需要电力转换系统多个方面的发展，从拓扑结构的设计到变压器、直流连接、滤波器和散热阶段。

结束语

近年来，各种新型多电平拓扑结构及其调制方案的出现使其有了更广的应用范围。多电平技术虽然已经发展成熟且在工业应用中取得了成功，但这一领域仍然有很大的发展空间。本文对常见的多电平拓扑结构进行了归纳总结，为该技术的工业应用提供了重要的参考。EA

（收稿日期：2014.05.27）

【栏目编辑 白文亭】