

面向储能系统应用的隔离型双向 DC-DC 变换器 分析方法与控制技术综述

孙 凯¹, 陈 欢¹, 吴红飞²

(1. 电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京 100084;
2. 江苏省新能源发电与电能变换重点实验室, 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要:对储能系统中的隔离型双向 DC-DC 变换器进行了较为全面的调研。首先介绍了储能系统的研究发展背景及其对高效率、高功率密度隔离型双向 DC-DC 变换器的要求, 然后对近年来隔离型双向 DC-DC 变换器的国内外研究现状进行了综述, 并着重对 CLLC 谐振变换器和双有源桥 (DAB) 变换器的分析方法和控制技术进行了比较分析。CLLC 谐振变换器和 DAB 变换器都适合于未来大规模储能系统的应用需要, 其中 DAB 变换器技术已经趋于更加成熟, 有望率先实现规模化应用, CLLC 谐振变换器则在中小功率范围内更具效率、功率密度的优势, 随着设计技术和制造工艺的不断进步, 其应用前景也十分广阔。

关键词: 储能系统; 隔离型双向直流变换器; 双有源桥; 谐振变换器

DOI: 10.12067/ATEEE1906021 **文章编号:** 1003-3076(2019)08-0001-09 **中图分类号:** TM46

1 引言

储能系统的应用能够改变传统的供电和用电方式, 其在大型集中式风电场或光伏电站、输电侧、配电侧以及用户侧的应用可以有效平抑可再生能源的出力波动, 促进新能源消纳, 提高电网的调节能力和利用效率, 并减少二氧化碳排放。

近年来, 我国储能产业发展迅速, 其中电化学储能的增速最为瞩目。截至 2017 年底, 累计装机规模约 390MW, 年增长率达 45%^[1]。2017 年 10 月 11 日, 国家发改委、能源局等五个部门联合印发《关于促进储能产业与技术发展的指导意见》, 为储能产业的进一步发展提供了政策保障。

在电池储能系统中, DC/DC 变换器是一个核心组件, 是储能系统中连接高低压直流母线的重要环节。电池储能系统需要根据外界需求灵活地在充电和放电模式之间切换, 因此 DC/DC 变换器必须具备双向的功率传输能力; 考虑到高增益比的实现和系统的安全问题, 还需要 DC/DC 变换器实现高低

压直流母线间的电气隔离。另外基于设备尺寸、系统经济性及节约能源的考虑, 高效率和高功率密度也是电池储能系统对 DC/DC 变换器的两大主要要求。总结来说, 电池储能系统需要高效率、高功率密度的隔离型双向 DC/DC 变换器。

基本上, 隔离型 DC/DC 变换器由非隔离型的 DC/DC 变换器增加高频变压器演化而来, 双向 DC/DC 变换器由单向 DC/DC 变换器增加主动开关器件演化而来。因此, 隔离型双向 DC/DC 变换器拓扑有一大类是由经典的开关电源拓扑演化而来: 隔离型双向 Flyback 变换器^[2,3]、隔离型双向 Cuk 变换器^[4]、隔离型双向 Zeta 变换器^[5]、双向推挽变换器^[6]、双向半桥变换器^[7]等。此外, 还有一些将多种开关电源拓扑组合起来的混合拓扑结构: 隔离型双向正反激变换器^[8]、隔离型双向推挽正激变换器^[9]、隔离型双向推挽反激变换器^[10]等。这些隔离型双向 DC/DC 变换器均能够实现双向的功率变换和电气隔离, 但是由于原始拓扑的局限性, 它们或者运行于硬开关状态, 或者软开关范围很小, 以及传输

收稿日期: 2019-06-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(51877117)
作者简介: 孙 凯(1977-), 男, 北京籍, 副教授, 研究方向为新能源发电与微电网系统中的电力电子技术;
陈 欢(1994-), 男, 陕西籍, 博士研究生, 研究方向为谐振变换器。

功率都相对较小,所以这些拓扑没有得到广泛的研究和应用。

为了实现软开关运行并应对大容量场合,研究人员提出了双有源桥(Dual Active Bridge, DAB)拓扑^[11],其拓扑结构如图 1 所示。由原副边主动开关器件构成的全桥电路、储能电感和高频变压器组成。DAB 变换器电路结构简单,具备零电压软开关(Zero Voltage Switching, ZVS)特性以及可以实现大容量的功率传输,因而受到了广泛的关注、研究和应用。

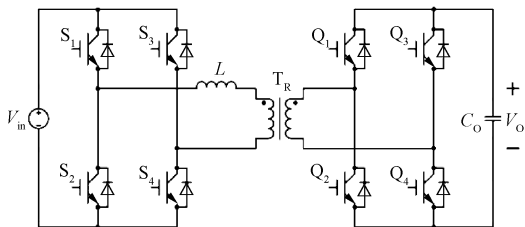


图 1 DAB 变换器的拓扑结构

Fig.1 Topology of DAB converter

单移相控制是 DAB 的传统控制方法,但是在输入输出电压不匹配时,变换器会丧失软开关特性,存在直流偏置问题,以及开关时刻电流应力比较高的问题^[12]。对此,研究人员提出了一些更为复杂的控制算法,部分地解决了上述问题^[13,14]。

另外,针对上述问题,一系列基于 DAB 的改进拓扑被提出和研究,它们被称之为谐振式 DAB。

双向串联谐振变换器^[15](Series Resonant Converter, SRC)在 DAB 的基础上增加了一个串联电容,形成了电感电容谐振网络,可以利用电流的谐振特性拓展软开关范围,且谐振电容天然地起到了隔直的作用。SRC 在采用变频调制时调频范围很宽,这对控制器和滤波器的设计都带来了很大挑战。对此,研究人员提出了移相控制的策略,能够实现定频控制并改善软开关特性^[16]。

LLC 谐振拓扑具备十分优异的软开关特性,其双向运行特性也得到了广泛的关注和研究。从构造上看,双向 LLC 谐振变换器将传统单向 LLC 谐振变换器的整流侧二极管替换为主动开关器件后得到,其正向特性与原 LLC 变换器完全相同,但是反向工作电路特性会发生较大改变,软开关特性变差,只有在重载时才能够实现 ZVS^[17]。

为了解决双向 LLC 谐振变换器面临的上述问题,研究人员提出了 CLLC 拓扑^[18,19]。如图 2 所示,CLLC 拓扑具有完全对称的谐振腔结构。不论正向工作还是反向工作时均与 LLC 谐振变换器工作特

性相同,即实现原边开关管 ZVS 和副边开关管零电流软开关(Zero Current Switching, ZCS)。

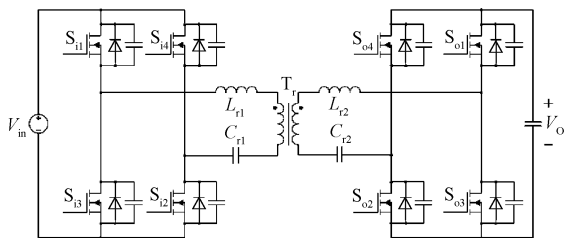


图 2 CLLC 谐振变换器的拓扑结构

Fig.2 Topology of CLLC resonant converter

近年来,研究最深入、应用前景最好的两类隔离型 DC/DC 变换器拓扑是 DAB 变换器和 CLLC 谐振变换器,本文将着重对这两种拓扑进行综述和对比。

2 CLLC 谐振变换器的分析方法

2.1 CLLC 谐振变换器的基本工作原理

文献[18-20]详细介绍了 CLLC 谐振变换器的工作过程。由于拓扑结构的对称性,其正向和反向工作时,电路运行状态相同,且与传统 LLC 电路工作过程类似。以开关频率 f_s 与谐振频率 f_r 的关系为标准,电路有三种工作状态:欠谐振,即 $f_s < f_r$,此时原边开关管实现 ZVS,副边开关管实现 ZCS;准谐振,即 $f_s = f_r$,此时原边开关管实现 ZVS,副边开关管实现临界 ZCS;过谐振,即 $f_s > f_r$,此时原边开关管实现 ZVS,副边整流管会存在反向恢复过程,影响系统的效率。

因此,一般会通过合理的参数设计,使得变换器工作在欠谐振或准谐振状态,从而保证高效率的功率传输。

2.2 基波近似

基波近似(First Harmonic Approximation, FHA)是分析谐振变化器的一个常用方法,文献[18-20]对使用 FHA 方法分析 CLLC 拓扑进行了详细的阐述。FHA 方法的出发点是对 H 桥的输出方波电压进行近似处理,即在分析中仅考虑其基波成分,这样便将问题简化为对正弦稳态电路的分析。

FHA 方法的优点在于简单、直观,能够方便地对很多关键问题进行分析和给出结论。例如,对参数设计至关重要的增益特性和谐振频率,提升系统效率所需的同步整流策略等。

FHA 方法的问题在于模型过于近似,所以仅在谐振频率附近可以保持比较高的精度,远离谐振频

率时,则和实际偏离较大。另外 FHA 方法是从正弦稳态的角度看待电路运行的,和电路实际的运行状态并不一致,因此只能用来分析输入输出的端口特性,无法对短时间尺度的电路运行状态做出分析。

2.3 扩展谐波近似

扩展谐波近似(Extended Harmonics Approximation,EHA)是对 FHA 方法的改进。文献[21]采用 EHA 方法对 CLLC 拓扑进行了分析。EHA 方法将高次谐波也纳入分析,对于每一次谐波,都求解相应的正弦稳态电路,最后将所有频率分量的响应叠加起来,得到最终的电路响应。EHA 方法考虑了更高阶的谐波的影响,因此分析精度好于 FHA 方法,但是计算量也随之增大。此外,EHA 方法也是从正弦稳态的角度看待电路,因此也存在无法真实描述电路运行状态的弊端。

2.4 模态分析

针对 FHA 方法精度不高,同时不能准确描述电路实际运行状态的弊端,研究人员提出了模态分析方法(Operation Mode Analysis,OMA),文献[22]详细阐述了使用模态分析法对 CLLC 拓扑进行分析的过程。这是一种时域的分析方法,根据电路实际的运行情况,总结出任意时刻电路可能处于的三种模态(P 模态、N 模态和 O 模态),对这三种模态进行排列组合便能够得到电路所有可能的运行方式。

对于 P、O、N 三种基本模态,可列写出谐振腔中所有元件的含待定系数的时域解析表达式,根据模态切换时刻的边界条件,数值求解非线性方程组,便能够求出所有待定系数,即求出电路响应的时域解。

图 3 所示 OMA 结果与仿真结果的对比,可以看到两者拟合良好。OMA 方法的优点在于其建模是精确的,因此能够正确地描述电路的运行状态,给出精确的增益特性。但 OMA 方法也有显著的缺点,需要去求解非线性方程组,运算量十分庞大,无法在控制器中在线求解,这限制了 OMA 方法的实际应用。

2.5 动态分析方法

上述所说的 FHA、EHA 以及 OMA 方法均属于稳态分析方法,分析的前提都是假定电路已经运行于稳态,且没有外界干扰。然而,拓扑分析中还有一大类问题,如动态性能,对扰动的稳定性等需要用到动态分析的方法。

对于 CLLC 拓扑而言,一方面拓扑相对较新,研究人员数量还不多;另一方面拓扑结构比较复杂,非

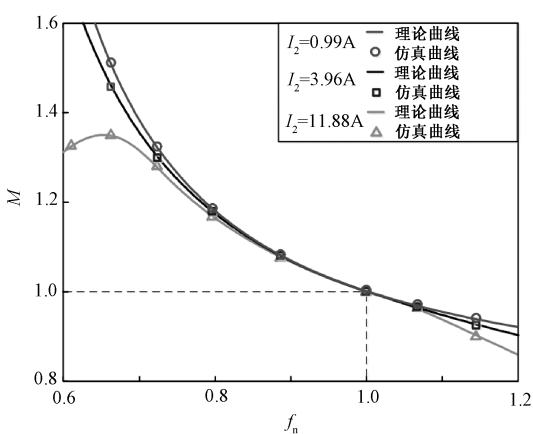


图 3 文献[22]中 OMA 结果与仿真结果对比

Fig.3 Comparison of OMA and simulation results in [22]

线性特性很强。所以对于 CLLC 拓扑的动态分析方法的研究尚属空白。

3 CLLC 谐振变换器的控制方法

3.1 脉冲频率调制

脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation,PFM)是 CLLC 谐振变换器的基本控制方法。文献[18-22]中均采用 PFM 方法对变换器进行控制。PFM 控制的理论基础是,在负载一定的情况下,变换器的增益随开关频率变化而变化,因此可以通过调节开关频率控制输出电压。文献[18]进一步指出,为了保持闭环控制的稳定性,开关频率变化的区间应该处于增益曲线斜率为负值的区域。

3.2 启动控制

变换器的输出侧一般会并联一个直流母线电容稳定输出电压,但在启动时建立电压的过程中,母线电容上可能出现浪涌电流,带来安全隐患。因此,需要采用合适的启动控制对输出浪涌电流进行抑制。

文献[18]提出了一种软启动的控制方法,基本思想是通过控制启动阶段变换器的等效增益,使其缓慢上升,从而控制母线电容充电电流的幅值大小。其方案如图 4 所示,控制流程如图 5 所示。

启动时,首先设置开关频率为一最大值 f_{\max} ,其数值为谐振频率的数倍,并且保持 H 桥输出方波的占空比为 0,随后逐渐增加占空比至 50%,然后逐渐减小开关频率至谐振频率。最后转入闭环控制,启动过程完毕。

通过上述方案,可以有效地抑制启动时输出侧母线电容上的浪涌电流。

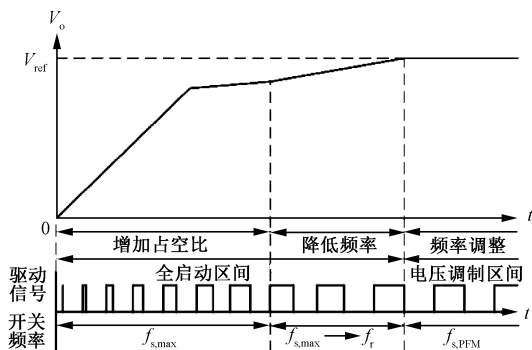


图 4 文献[18]中软启动控制策略的方案

Fig.4 Control scheme of soft start strategy in [18]

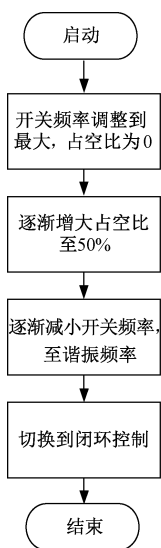


图 5 软启动的控制流程

Fig.5 Flow chart of soft start control

3.3 同步整流控制

3.3.1 同步整流的实现途径

CLLC 谐振变换器运行时, 副边全桥作为整流管工作, 传统上, 直接保持主动器件关断, 利用体二极管整流。但是, 由于体二极管存在较大的导通压降, 这会带来较大的导通损耗, 降低系统的效率。因此, 施加控制, 使整流侧电流均流经主动型器件, 此控制就被称为同步整流控制。

通过控制副边开关管在一个周期内导通合适长度的时间, 即控制死区时间的长短来达到同步整流的效果。典型的 CLLC 谐振变换器的运行波形如图 6 所示, 此时 $f_s < f_r$, 半个周期内, 电路分为两个运行阶段, 只有在谐振阶段一的时间内, 副边才有电流流过的, 此时需要副边相应的开关管导通, 也就是说, 死区时间的长度需要等于谐振阶段二的长度。

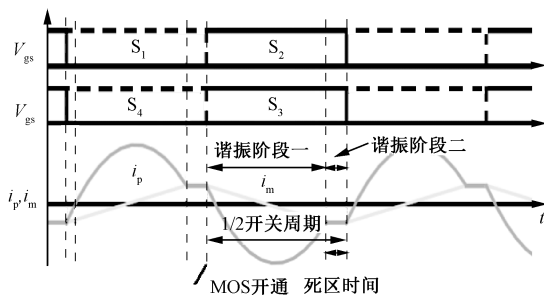


图 6 CLLC 谐振变换器的典型运行波形

Fig.6 Typical waveforms of CLLC Converter

特别的, 死区时间的长度不能小于谐振阶段二的长度, 因为这样会导致电路的运行状态发生改变。

3.3.2 开环方法

文献[23]给出了一种实现同步整流的开环方法。其基本思想是, 将死区时间设置为固定值, 此值大于等于关于所有工况下需要的死区时间的最大值。这样就能保证谐振阶段二所处的时间一定在死区内。

开环方法的优点在于简单有效, 在不增加运算开销的情况下使得部分整流侧电流均流经开关管, 是一种实用的方法。缺点在于, 同步整流实现的并不彻底, 在大多数工况下, 还是会存在整流侧电流流经体二极管的情况, 降低系统效率。

3.3.3 基于传感器检测的方法

LLC 变换器也面临过与 CLLC 相同的同步整流控制问题, 对此, 研究人员提出了多种基于传感器检测的同步整流控制方法。这些方法虽然未见有公开的文献报道其用于 CLLC 谐振变换器的情况, 但是由于原理相同, 这些方法也可以用在 CLLC 谐振变换器上。

文献[24]提出了一种基于电流检测的同步整流控制方法。通过检测副边电流的过零点, 从而控制副边开关管的通断, 保持电流始终流经开关管而非体二极管。文献[25]提出了一种基于电压检测的同步整流控制方法。通过检测开关管两端的压降, 判断电流是否已流经体二极管, 然后对应地控制开关管的通断。

基于传感器检测的方法属于闭环方法, 为了追求实时性, 一般通过硬件直接实现, 不经过 DSP 处理。但是, 硬件电路本身的延迟是不可避免的, 所以在高频场合 (1MHz 及以上), 基于传感器检测的方法不再适用。除此之外, 传感器也比较昂贵, 由此带来的成本增加也不容忽视。

3.3.4 基于模型预测的方法

相比额外增加传感器的方法,直接通过模型预测,从而得到应设置的死区时间长度的方法更有前景,因此也得到了研究人员的关注。

文献[26]和文献[21]分别使用 FHA 和 EHA 方法对 CLLC 拓扑进行了建模研究,并研究了基于 FHA 和 EHA 模型的同步整流控制方法。

两种方法的基本路径相同,但是由于建模精度不同,所以两种方法对于同步整流预测精度不同,对运算的需求也不同,基于 EHA 方法的预测精度高于基于 FHA 的方法,但是运算开销上基于 FHA 的方法更有优势。

这两种基于模型预测的同步整流控制方法的主要算法流程如图 7 所示。

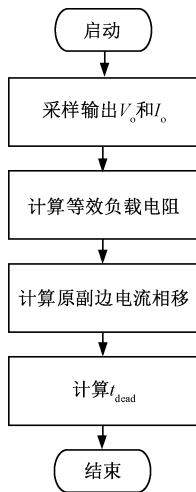


图 7 基于模型预测的同步整流方法的算法流程

Fig.7 Algorithm chart of model-based SR control

FHA 和 EHA 的模型中都蕴含等效负载电阻这一参数,因此需要先通过采样获取到实际的输出电压电流,从而计算出等效的负载电阻,然后通过 FHA 或 EHA 方法计算出原副边电流相位差,最后转换为需要设置的死区时间长度。

基于模型预测的方法优点是不依赖额外传感器,成本低,同时没有时间延迟,对任意开关的开关频率的工作情况均适用。但是,由于 FHA 和 EHA 模型自身的局限性,其精度和计算的复杂度还需要进一步改进。

4 DAB 变换器的分析方法和控制方法

DAB 变换器提出较早,研究也更为深入和成熟。文献[27]综述了高频化能量传输系统(High-Frequency-Link Power Conversion Systems, HFLPCS)

中的 DAB 变换器,其中对 DAB 变换器的基本工作原理、分析方法、控制方法以及其他一些研究进展做了比较全面的总结和梳理。

DAB 变换器结构相对比较简单,分析起来也更为容易。稳态分析时,普遍采用分段求解的方法。即依据电路实际的工作状态,分段求解谐振电感中电流的表达式,再用积分的方式即可求得传输功率。

DAB 动态建模方面,研究人员提出了多种动态模型,如小信号平均模型、简化降阶模型^[28]等。

DAB 的基本控制方法为移相控制,使用最广泛的是单移相控制(Single-Phase-Shift Control, SPS Control)^[29],单移相控制中,在原副边 H 桥相应的对角开关管的控制信号之间施加移相,从而使得原副边 H 桥输出的方波电压存在移相,进而实现控制。SPS 控制的优点在于动态性能好,易于实现软开关。但是在原副边电压不匹配时存在较大的回流功率,并且不能在全负载范围内实现 ZVS 软开关。

扩展移相控制^[13](Extended-Phase-Shift Control, EPS Control)是对 SPS 控制的一种改进。在 EPS 控制中,加入了对其中一个 H 桥的内移相角的控制。所谓内移相角是指同一个 H 桥内的两对对角开关管控制信号的相位差,而在 SPS 控制中,内移相角始终是 180°。这样的效果是一个 H 桥输出的是三电平电压,而另一个 H 桥输出的是依旧是占空比 50%的方波。EPS 控制的优势在于回流功率大大减小,但是在切换功率传输方向时,两个 H 桥的控制状态会发生改变,影响动态性能。

双移相控制(Dual Phase Shift Control, DPS Control)^[14]是对 EPS 控制的改进,DPS 控制中,原副边两个 H 桥均加入内移相角控制,其效果是两个 H 桥输出的均为三电平电压。不过,两个 H 桥的内移相角相等。DPS 控制在切换功率传输方向时,H 桥的控制状态保持不变,从而具备更好的动态性能,同时也易于实际应用。

三重移相控制(Triple-Phase-Shift Control, TPS Control)^[30]在 DPS 的基础上,令两个 H 桥的内移相角独立控制。TPS 控制具备三个控制自由度,因此可以实现复杂的优化控制,达到使损耗最小化的目的。同时,TPS 控制也是 DAB 变换器的一种通用控制方式,SPS、EPS 及 DPS 均是 TPS 的特殊情况,不过 TPS 控制比较复杂,这限制了它的实际应用。

5 CLLC 谐振变换器与 DAB 变换器的比较

5.1 分析方法与控制方法

在第 2~4 节中介绍了 CLLC 谐振变换器与 DAB 变换器的分析与控制方法,比较可知,由于两者谐振腔构造有较大区别,因此分析方法和控制方法均有较大差别。DAB 与 CLLC 在稳态的工作状态类似,均是一个周期分为几个阶段且对称,但是 DAB 变换器在各个阶段内电压电流均为线性变化而 CLLC 是非线性变化,所以在分析时,DAB 可以比较方便地求得解析的表达式,而 CLLC 只能近似求解或数值求解。此外 DAB 的主要短板在于功率回流以及软开关范围,而 CLLC 面临的问题是调频范围过宽、启动浪涌、同步整流,它们拓扑禀赋的不同就决定了其控制方法的研究侧重不同。

5.2 磁元件和 高频变压器

在 DAB 和 CLLC 谐振变换器中,高频变压器是一个非常核心的器件,对变换器的关键性能有直接影响。

对于 DAB 变换器,文献[28]通过配置两个并联的副边线圈,根据电流大小激活其中的一个或两个,从而得到了所谓的双漏感变压器,同时根据负载情况采用变化的开关频率,从而提高轻载效率。文献[31]设计了一种可变的电感,其感值根据输出电流值的不同可以变化,从而能够在轻载时维持 ZVS 状态,以及在重载时减小导通损耗。文献[32]通过在副边绕组上放置一个铁磁材料的漏感层的方法将漏感集成在变压器中,提高功率密度。文献[33]采用了在一对 C 型磁心之间加入绝缘层,布置分离绕组的方式集成漏感并且提高变压器绝缘。

对于 CLLC 谐振变换器,文献[34]采用分裂绕组的结构集成漏感,同时依据 IEEE 绝缘标准设计绝缘材料和绝缘距离,实测变压器绝缘强度达到 30kV。文献[35]设计了一种磁集成的 PCB 绕组的变压器,提出了一种基于 PCB 绕组的磁心结构,采用这种结构,漏感值可以通过改变磁心的截面积和气隙长度方便地调整。文献[36]针对三相 CLLC 谐振变换器设计了一个集成的变压器,通过设计磁心结构,将三个变压器和三个漏感一次性集成在一个磁性元件上,大大减小了变换器的体积。

DAB 变换器和 CLLC 谐振变换器对高频变压器的需求存在共性之处,即将谐振电感通过适当的设

计集成在变压器中,从而减小体积和损耗。此外,针对大容量场合,研究人员还关注高频变压器的绝缘性能。不过,对于 DAB 变换器,由于轻载失去 ZVS 等问题的存在,可变漏感的研究还得到了较多注意,而对于 CLLC 谐振变换器,不存在这一问题,因此集中于磁集成本身的研究。

5.3 实际应用

文献[37]综述了 DAB 变换器中高压电力电子变压器中的应用。文献[38]探讨了 DAB 变换器在电池储能系统中的应用,在电池储能系统中 DAB 变换器替换了传统的 Buck/Boost 变换器和工频变压器,从而大大减小了体积。在大容量系统中,高电压是应用的一个挑战,文献[39]提出了一种级联分压的结构,能够较好地满足高压场合的应用需要。文献[34]中总结了 DAB 变换器在较大容量领域的应用实例,摘录如表 1 所示。表 1 中功率指的是变换器的总容量。

表 1 DAB 变换器的部分应用实例
Tab.1 DAB converters in practical application

机构	功率/kW	开关频率/kHz
UNIFLEX	25	2
FREEDM	7	3
FREEDM	20	20
ETH	166	20

文献[40]提出了一种基于 CLLC 变换器的用于储能系统的两级式直流变换器拓扑。文献[41]提出了一种基于 CLLC 拓扑结构的三端口变换器用于连接直流母线、电池组和超级电容。文献[42]将 CLLC 谐振变换器集成到两级式的多端口系统中,构成高温固体氧化物燃料电池储能系统的能量传输模块。文献[43]提出了一种集成的 CLLC 半桥电路,将一个 Buck/Boost 电路和 CLLC 电路整合在一起,从而能够在谐振频率处利用 PWM 方式控制,更加适合储能系统的应用。图 8 中总结了历年来公开发表的论文中样机功率和开关频率情况。从图 8 中可以明显看出 CLLC 谐振变换器功率等级和开关频率在逐渐上升,目前,公开发表的论文中,功率最大的为 15kW,开关频率为 1MHz。

比较 DAB 变换器与 CLLC 谐振变换器实际应用的趋势可以看出,DAB 变换器比 CLLC 谐振变换器更加成熟,已有不少厂商投入产品开发和运营,百千瓦级模块和兆瓦级系统的产品样机也已经问世,而 CLLC 谐振变换器基本还处于研发阶

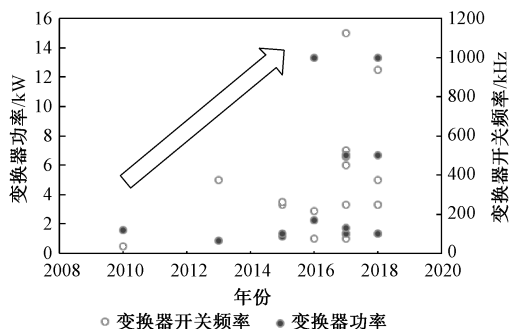


图 8 近年来 CLLC 谐振变换器的功率等级和频率范围
Fig.8 Power level and frequency range of CLLC resonant converter in recent years

段,且主要应用于中小功率范围(小于 30kW)。但是 DAB 变换器的开关损耗大于 CLLC 谐振变换器,因此开关频率提升障碍较大,而 CLLC 谐振变换器则有望达到 MHz 水平。CLLC 谐振变换器实现大容量应用的主要障碍在于大功率谐振腔的设计实现。随着近年来相关研究的不断推进,CLLC 谐振变换器的功率水平逐步上升,未来在大容量场合的应用十分可期。

6 结论

本文对储能系统中的双向隔离型 DC/DC 变换器进行了较为全面的调研,首先介绍了储能系统的研究发展背景和其对高效率、高功率密度隔离型双向 DC/DC 变换器的需求,之后综述了当前隔离型双向 DC/DC 变换器的研究现状,并着重对 CLLC 谐振变换器和 DAB 变换器进行了分析和比较,得到以下主要结论:

(1)CLLC 谐振变换器和 DAB 变换器均具备优异的双向软开关特性,能够实现高效率和高功率密度,是储能系统中隔离型双向 DC/DC 变换器的重要解决方案。

(2)DAB 变换器结构简单,在研究和实用进展方面均领先 CLLC 谐振变换器。从当前的情况看,DAB 变换器已经有百千瓦级模块和兆瓦级系统的产品样机投运,而 CLLC 谐振变换器还主要处于研发阶段,功率等级也较小。

(3)在未来的发展进程中,DAB 变换器可能首先走向成熟并大规模应用于大容量储能系统中。

(4)CLLC 谐振变换器的开关频率可以比 DAB 变换器更高,随着大功率谐振腔技术的逐步成熟,同样有潜力在大容量储能系统中得到广泛应用。

参考文献 (References):

[1] 曾乐才 (Zeng Lecai). 储能锂离子电池产业化发展趋势 (Research and analysis of Li-ion battery industry development for energy storage) [J]. 上海电气技术 (Journal of Shanghai Electric Technology), 2012, 5 (1): 43-48.

[2] Chung S H, Cheung W L, Tang K S. A ZCS bidirectional flyback DC/DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (6): 1426-1434.

[3] Kashif M. Bidirectional flyback DC-DC converter for hybrid electric vehicle; Utility, working and PSPICE computer model [A]. 2012 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics [C]. Hyderabad, India, 2012. 61-66.

[4] Aboulnaga A A, Emadi A. Performance evaluation of the isolated bidirectional Cuk converter with integrated magnetics [A]. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. Aachen, Germany, 2004. 1557-1562.

[5] Murthy-Bellur D, Kazimierczuk M K. Isolated two-transistor zeta converter with reduced transistor voltage stress [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2011, 58 (1): 41-45.

[6] Xiao H, Xie S. A ZVS bidirectional DC-DC converter with phase-shift plus PWM control scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23 (2): 813-823.

[7] Bhajana V, Reddy S R. A novel ZVS-ZCS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application [A]. 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) [C]. Taipei, China, 2009. 12-17.

[8] Zhang F, Yan Y. Novel forward-flyback hybrid bidirectional DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (5): 1578-1584.

[9] Zhang Z, Thomsen O C, Andersen M A E. Optimal design of a push-pull-forward half-bridge (PPFHB) bidirectional DC-DC converter with variable input voltage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (7): 2761-2771.

[10] De Souza E V, Barbi I. Bidirectional current-fed flyback-push-pull dc-dc converter [A]. XI Brazilian Power Electronics Conference [C]. Praiaamar, 2011. 8-13.

[11] Zhu L. A novel soft-commutating isolated boost full-bridge ZVS-PWM DC-DC converter for bidirectional high power applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (2): 422-429.

[12] Kheraluwala M N, Gascoigne R W, Divan D M, et al. Performance characterization of a high-power dual active

- bridge DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28 (6): 1294-1301.
- [13] Zhao B, Yu Q, Sun W. Extended-phase-shift control of isolated bidirectional DC-DC converter for power distribution in microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (11): 4667-4680.
- [14] Hirose T, Matsuo H. A consideration of bidirectional superposed dual active bridge dc-dc converter [A]. The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems [C]. Hefei, China, 2010. 39-46.
- [15] Du Y, Lukic Srdjan M, Jacobson Boris S, et al. Modulation technique to reverse power flow for the isolated series resonant DC-DC converter with clamped capacitor voltage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (12): 4617-4628.
- [16] Corradini L, Seltzer D, Bloomquist D, et al. Minimum current operation of bidirectional dual-bridge series resonant DC/DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (7): 3266-3276.
- [17] Hillers A, Christen D, Biela J. Design of a highly efficient bidirectional isolated LLC resonant converter [A]. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC) [C]. Novi Sad, 2012. 8-13
- [18] Jung J H, Kim H S, Ryu M H, et al. Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (4): 1741-1755.
- [19] Chen W, Rong P, Lu Z. Snubberless bidirectional DC-DC converter with new CLLC resonant tank featuring minimized switching loss [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (9): 3075-3086.
- [20] Zahid Z U, Dalala Z, Chen R, et al. Design of bidirectional DC-DC resonant converter for vehicle-to-grid (V2G) applications [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1 (3): 232-244.
- [21] Sankar A, Mallik A, Khaligh A. Extended harmonics based phase tracking for synchronous rectification in CLLC converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (8): 6592-6603.
- [22] Lv Z, Yan X, Fang Y, et al. Mode analysis and optimum design of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems [A]. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. 2015. 1513-1520.
- [23] Zou S, Lu J, Mallik A, et al. 3.3kW CLLC converter with synchronous rectification for plug-in electric vehicles [A]. 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting [C]. 2017. 1-6.
- [24] Ho G K Y, Yu R, Pong B M H. Current driven synchronous rectifier for LLC resonant converter with a novel integrated current transformer [A]. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012) [C]. 2012. 1-5.
- [25] Wang F, McDonald B A, Langham J, et al. A novel adaptive synchronous rectification method for digitally controlled LLC converters [A]. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. 2016. 334-338.
- [26] Zou S, Lu J, Mallik A, et al. 3.3kW CLLC converter with synchronous rectification for plug-in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54 (2): 998-1005.
- [27] Zhao B, Song Q, Liu W, 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.
- [28] Guidi G, Pavlovsky M, Kawamura A, et al. Improvement of light load efficiency of dual active bridge DC-DC converter by using dual leakage transformer and variable frequency [A]. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. 2010. 830-837.
- [29] 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.
- [30] Zhou H, Khambadkone A M. Hybrid modulation for dual-active-bridge bidirectional converter with extended power range for ultracapacitor application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45 (4): 1434-1442.
- [31] Fan H, Li H. High-frequency transformer isolated bidirectional 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.
- [32] Guidi G, Pavlovsky M, Kawamura A, et al. Efficiency optimization of high power density Dual Active Bridge DC-DC converter [A]. The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA [C]. Sapporo, 2010. 981-986.
- [33] Du Y, Baek S, Bhattacharya S, et al. High-voltage high-frequency transformer design for a 7.2kV to 120V/240V 20kVA solid state transformer [A]. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society [C]. Glendale, AZ, 2010. 493-498.

- [34] Zhao S, Li Q, Lee F C. High frequency transformer design for modular power conversion from medium voltage AC to 400V DC [A]. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Tampa, FL, 2017. 2894-2901.
- [35] Li B, Li Q, Lee F. High frequency PCB winding transformer with integrated inductors for a bi-directional resonant converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (7): 6123-6135.
- [36] Li B, Li Q, Lee F C. A WBG based three phase 12.5 kW 500 kHz CLLC resonant converter with integrated PCB winding transformer [A]. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. San Antonio, TX, 2018. 469-475.
- [37] 王优, 郑泽东, 李永东 (Wang You, Zheng Zedong, Li Yongdong). 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述 (Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 1-10.
- [38] Tan N M L, Abe T, Akagi H. Design and performance of a bidirectional isolated DC-DC converter for a battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (3): 1237-1248.
- [39] Reese B, Schupbach M, Lostetter A, et al. High voltage, high power density bi-directional multi-level converters utilizing silicon and silicon carbide (SiC) switches [A]. 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [C]. Austin, TX, 2008. 252-258.
- [40] 孔玮, 屈克庆, 孙凯, 等 (Kong Wei, Qu Keqing, Sun Kai, et al.). 一种应用于储能系统的两级式直流变换器拓扑与设计 (Topology and design of a two-stage DC/DC converter for energy storage system) [J/OL]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, DOI: 10.12067/AIEEE1811038.
- [41] Lu X, Wang H. Three-port bidirectional CLLC resonant converter based onboard charger for PEV hybrid energy management system [A]. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. Cincinnati, OH, 2017. 1432-1438.
- [42] Lin X, Sun K, Lin J, et al. A multi-port bidirectional power conversion system for reversible solid oxide fuel cell applications [A]. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia) [C]. Niigata, Japan, 2018. 3460-3465.
- [43] Zhang C, Li P, Kan Z, et al. Integrated half bridge CLLC bidirectional converter for energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65 (5): 3879-3889.

A review of analysis method and control technology for isolated bidirectional DC-DC converter used in energy storage systems

SUN Kai¹, CHEN Huan¹, WU Hong-fei²

- (1. The State Key Laboratory of Power Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. The Jiangsu Key Laboratory of Renewable Energy Generation and Power Conversion,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A comprehensive review for isolated bidirectional DC-DC converter is presented in this paper. The research background of energy storage system and its requirement for high frequency and high power density isolated bidirectional DC-DC converter are introduced. Research progress of analysis method and control technology for CLLC and DAB converter are reviewed. This paper points out that both CLLC and DAB converter meet the requirement of future large scale energy storage system. At present, DAB converter is merging to its mature stage while CLLC converter needs to be further researched. However, CLLC converter has advantages over DAB converter in small and medium capacity applications. It still has a wide application prospects.

Key words: energy storage system; isolated bidirectional DC converter; DAB; resonant converter