

双向 CLLC 谐振变换器研究现状与应用前景*

文伟仲^{1,2,3}, 舒 杰^{1,3†}, 王 浩^{1,3}, 吴昌宏^{1,3}, 吕 杰⁴

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518100)

摘 要: 双向 CLLC 谐振变换器是双向直流/直流 (direct current, DC) 变换器中一类重要拓扑, 具有实现软开关频率范围宽、调压范围大、功率密度高等特点。本文从基本拓扑及工作原理、建模分析方法、控制策略和应用这几个方面, 对双向 CLLC 谐振变换器的现有研究成果进行了总结, 分析了现有的问题, 并提出了未来研究重点。结论表明, 双向 CLLC 谐振变换器仍处于关键技术研究和小容量样机试验阶段, 其在储能领域具有广阔的应用前景, 是高压大容量双向变换器拓扑的重要发展方向。

关键词: 分布式微电网; 储能系统; 双向直流变换器; 谐振变换器

中图分类号: TK02

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.05.005

Research Status and Application Prospect of Bidirectional CLLC Resonant Converter

WEN Wei-zhong^{1,2,3}, SHU Jie^{1,3}, WANG Hao^{1,3}, WU Chang-hong^{1,3}, LÜ Jie⁴

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. China Nuclear Power Design Co., Ltd.(Shenzhen), Shenzhen 518100, Guangdong, China)

Abstract: Bidirectional CLLC resonant converter is one important topology of bidirectional DC/DC converter, it has the advantages of wide frequency range, large voltage regulation range and high power density. Herein, the existing research results of bidirectional CLLC resonant converter were summarized from the aspects of basic topology and working principle, modeling analysis method, control strategy and application. The existing problems were analyzed and the future research emphases were put forwarded. Conclusion showed that the bidirectional CLLC resonant converter was still in the stage of key technology research and small capacity prototype test, and it has a broad application prospect in the field of energy storage and is an important development direction of the high-voltage and large-capacity bidirectional converter topology.

Key words: distributed micro-grid; energy storage systems; bidirectional DC/DC converter; resonant converter

0 引 言

随着传统化石能源的短缺和对环境污染的加剧, 可再生能源如风能、海洋能、太阳能等的开发利用发展迅速。由于风能和太阳能等受环境影响较大, 具有不连续性, 将其直接大规模并网发电会对供电的稳定性产生严重影响。若通过分布式微电网接入大电网, 可以降低传输损耗, 提高电网局部的稳定性和电能质量。而在分布式直流微电网中, 双

向 DC/DC 变换器 (bidirectional DC/DC converter, BDC) 是储能系统的重要组件, 是将其并入大电网的通路。BDC 的双向能量通路可以保证储能系统在充放电模式下灵活切换, 以消除负载端电能断流或不稳的现象。除此之外, BDC 还被广泛应用于电动汽车 (electric vehicles, EVs)、航天航空装置和大容量不间断电源等领域^[1], 具有广阔的应用前景。

综上所述, 研制具有高功率密度、高效的 BDC 具有重要意义。其中, 提高变换器的开关频率可以

* 收稿日期: 2020-06-12 修订日期: 2020-07-29

基金项目: 广东省海洋经济发展专项资金项目 (GDNRC[2020]020); 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室基金项目 (Y909jk1001)

† 通信作者: 舒 杰, E-mail: shujie@ms.giec.ac.cn

大幅度减小电容、电感元件的体积,从而提高功率密度;而在开关频率较高的场合,提高变换器效率的主要途径是减小开关损耗,所采用的最主要方法是软开关技术。

传统的 BDC 拓扑是将基本的单相 DC/DC 变换器中的无源开关元件替换成有源开关元件而成,其抗干扰能力弱,开关损耗较大,而且输入输出端无电气隔离,故不适用于高压大功率场合。

因此文献[2-5]研究了双有源桥电路(dual active bridge, DAB)。其电路结构简单,且原、副边有电气隔离,还具备零电压软开关(zero voltage switching, ZVS)特性,可以实现大容量的功率传输,不足之处是不能实现零电流软开关(zero current switching, ZCS),且轻载会失去 ZVS 特性,使得效率降低。

为了解决上述问题,研究人员提出了谐振变换器。谐振变换器可以实现 ZVS 及 ZCS,相对于 DAB 进一步减小开关损耗。

文献[6]提出了一种双向串联谐振(series resonance converter, SRC)变换器,串联谐振变换器的输出电压增益最大值为 1,即只能在降压模式下工作,因此不适用于输出电压范围较宽的场合,而且当开关频率小于谐振频率时不能实现 ZVS 和 ZCS。文献[7]中的双向 LLC 变换器可以在较大频率范围内实现 ZVS 及 ZCS。双向 LLC 变换器相比于串联谐振变换器更容易实现 ZVS。除此之外,LLC 变换器既可以在升压(BOOST)模式下工作,也可以在降压(BUCK)模式下工作,因此 LLC 变换器比串联谐振变换器应用领域更为广泛。LLC 变换器只有在开关频率接近谐振频率时效率较高;且由于

电路结构不对称,在反向工作时相当于串联谐振电路,增益小于 1,不适合调压范围较大的场合。因此,文献[8]提出双向 CLLC 谐振变换器,在原双向 LLC 变换器的基础上,在变压器副边增加一组 LC 器件,使变换器在正向或反向工作时,电路拓扑完全对称,因此变换器的正反向工作特性完全一致。双向 CLLC 变换器的特点有:可以在双向运行、较大频率范围内实现软开关,这样大大减小了开关损耗;功率密度高;双向工作时调压范围均较大。所以在高压、高频、大功率场合应用具有很大优势。近年来,随着 BDC 研究的不断发展与深入,双向 CLLC 谐振变换器也受到了广泛关注,具有广阔的研究前景和良好的发展潜力。

本文将从基本工作模式、建模方法、控制策略和应用这几个方面,对于现有的双向 CLLC 谐振变换器的研究成果进行介绍;然后根据已有的研究成果和尚未解决的问题展望该拓扑未来的发展。

1 双向 CLLC 变换器的工作模式

全桥双向 CLLC 谐振变换器的电路图如图 1 所示。其中, U_i 表示原边输入侧电压, U_o 表示副边输出侧电压。原边逆变桥和副边整流桥的开关管分别为 $S_1 \sim S_4$ 和 $S_5 \sim S_8$,变换器 T 工作时,能量先经过前级逆变器,再经过后级整流器。 L_m 为变压器的励磁电感, L_{r1} 和 L_{r2} 分别为变压器原、副边谐振电感, C_{r1} 和 C_{r2} 分别为原、副边谐振电容。每个开关管都有反并联二极管和并联寄生电容。在未采用同步整流技术时,副边侧作为整流侧时,开关管不工作,通过反并联二极管进行整流。

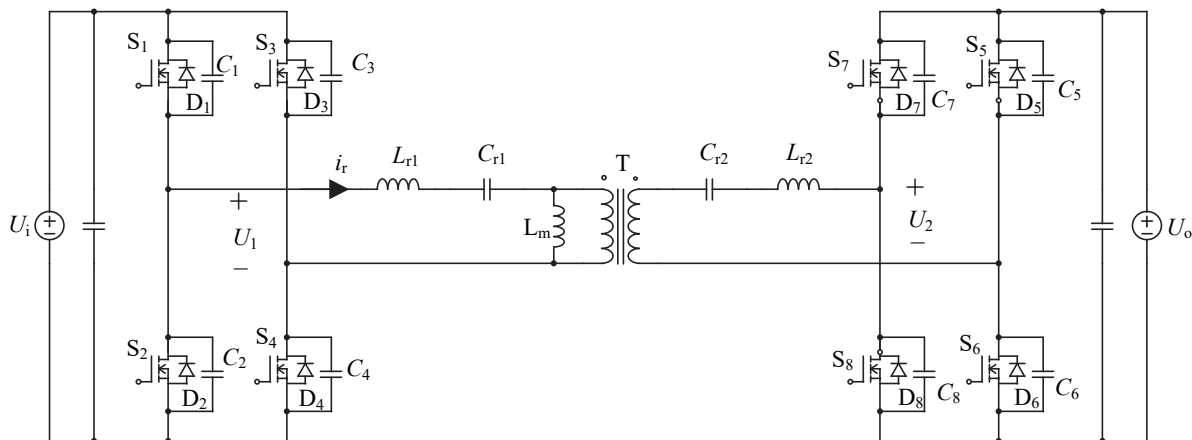


图 1 一种全桥双向 CLLC 谐振变换器

Fig. 1 A full-bridge CLLC DC-DC resonant converter

双向 CLLC 变换器有两个谐振频率点, 一个是由变换器原边谐振电感 L_{r1} 和谐振电容 C_{r1} 串联谐振产生, 另一个是由变换器原边谐振电感 L_{r1} 、谐振电容 C_{r1} 同励磁电感 L_m 共同谐振产生。这两个谐振角频率的表达式如下:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_{r1} C_{r1}}} \quad (1)$$

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{(L_{r1} + L_m) C_{r1}}} \omega \quad (2)$$

一般来说, 电路的谐振参数 $L_m \gg L_r$, 故有 $\omega_r \gg \omega_m$, 按照开关频率 ω_s 与谐振频率 ω_r 的关系, 可将 CLLC 拓扑的工作模式分为 $\omega_s \leq \omega_r$ 和 $\omega_s > \omega_r$ 两种, 图 2 为不同模式下变换器工作波形 (假定寄生电容不参与谐振), 其中 i_r 为原边电流^[9]。

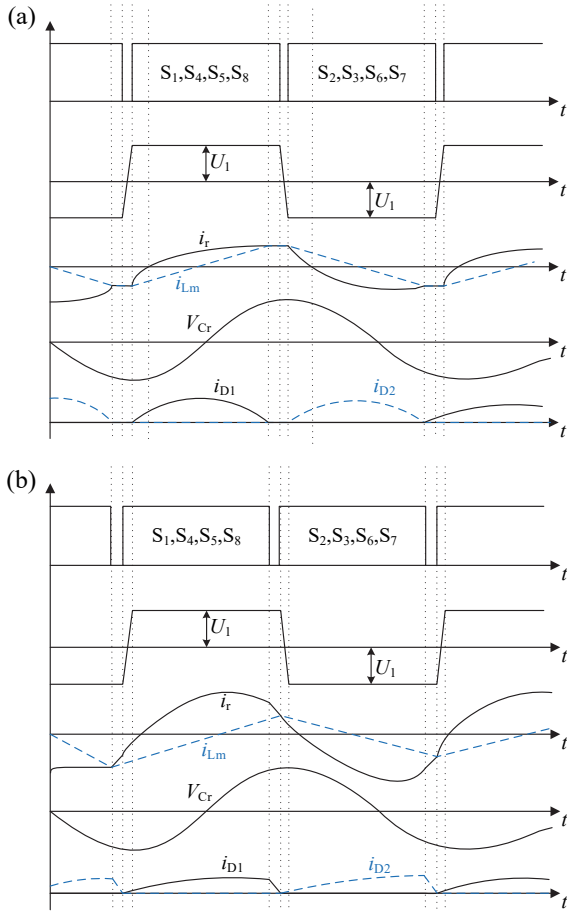


图 2 工作波形: (a) $\omega_s \leq \omega_r$; (b) $\omega_s > \omega_r$ ^[9]

Fig. 2 Waveform of converter: (a) $\omega_s \leq \omega_r$; (b) $\omega_s > \omega_r$ ^[9]

2 双向 CLLC 变换器的建模方法

由于双向 CLLC 谐振变换器的谐振槽结构复杂, 工作方式多样, 其固有特性和谐振特性难以获得和研究, 这给变换器的谐振元件和控制回路的设计带来了很大的障碍。而基于其他谐振变换器设计, 运用的几种建模方法, 可以为 CLLC 变换器的特性分析和参数设计带来便利。一般来说, 电路的建模可以基于频域和时域两种参考系, 而对于谐振型 BDC, 常用的频域建模方法为谐振近似法, 常用的时域建模方法为模态分析法。这两种方法也是 CLLC 变换器建模的主要方法。

2.1 谐波近似法

谐波近似法指在建模时仅考虑某次或某几次谐波, 忽略其他谐波的影响的方法, 这样可以简化模型, 方便计算。应用到 CLLC 变换器中的主要有基波近似法和扩展谐波近似法。

基波近似法 (first harmonic approximation, FHA)^[8,10] 是用于谐振变换器的一种常用的建模方法^[11], 主要思想是忽略高阶分量, 仅考虑电流的基波分量对功率传输的影响。该方法将对变换器的分析简化为对正弦稳态电路的分析, 将时域模型转化为频域模型, 可以避免在时域分析中求解非线性方程组的问题。同时, FHA 的建模过程简单, 算式简洁, 在增益特性分析等方面有较高效率。

FHA 方法的缺点是当频率远离变换器谐振频率的时候, 准确度会大大降低。当 CLLC 变换器的原、副边的 LC 参数存在不匹配时, 没有准确的谐振频率, 这样也会降低 FHA 方法的准确度。准确度的降低给双向 CLLC 电路的谐振槽参数的优化设计带来了很大的障碍。

文献[12-13]在 FHA 方法的基础上, 提出了扩展谐波近似 (extended harmonics approximation, EHA) 方法, 这种方法除了基波之外, 还考虑了其他奇次谐波的影响, 将每一次谐波的计算叠加, 获得总的结果, 这样相对 FHA 方法提高了精度。

谐波近似法这一类方法是基于正弦稳态的电路状态, 并不能动态表现出电路的运行, 如电路的各个工作阶段等。

2.2 模态分析法

基于时域的模态分析法 (operation mode analysis, OMA) 是为了解决 FHA 方法存在的问题而提出的。

OMA 方法不仅可以解释电路的各种工作状态, 而且可以准确描述其固有特性和谐振特性。

OMA 方法基于基本电路时域理论和较复杂的数值计算方法。它将变换器的运行分为若干个基本模态, 电路的任何运行方式都由这些模态组成。对每个模态的等效电路进行分析, 得到各元件的时域表达式, 再根据基本模态的具体排列求解表达式。它的精确度相对于谐波近似方法有较大提高, 而且由于是在时域中分析, 可以较好地表现电路运行的实际情况。

文献[14-17]均以 OMA 方法对 CLLC 变换器进行建模和分析, 相较于谐波近似法, 其计算和分析过程相当复杂, 尤其是在求解非线性方程组时。此时最重要的是确定初值和选取更高效的迭代算法。

3 双向 CLLC 变换器的闭环控制

图 3 为双向 CLLC 变换器闭环控制系统的示意图, 采用闭环反馈系统以得到稳定的输出。输出电压或者电流构成的闭环回路包含 PID (比例、积分、微分) 控制器, 开关控制器和同步整流控制器。基本原理是输出变化量经 PID 控制器, 与同步整流控制器产生的原、副边相差, 共同构成开关控制器的输入信号。其中开关控制策略主要包括脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM)、脉冲频率调制 (pulse frequency modulation, PFM) 和移相控制 (phase shift modulation, PSM), 同步整流的策略主要基于 PWM 控制, 包括实时监测和建立模型两类方法, 在其他双向 DC/DC 变换器的控制系统已经得到了广泛的应用, 基于此也有很大的研究空间。

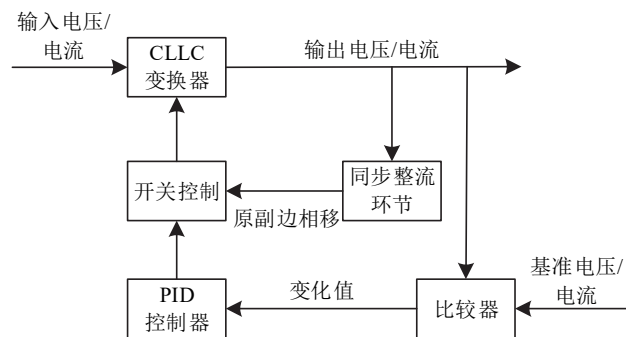


图 3 闭环控制简图

Fig. 3 Closed-loop control

3.1 开关控制策略

3.1.1 PWM 和 PFM 控制

PWM 指在恒定周期中, 通过改变开关控制信号的宽度, 即开关的导通时间来控制输出稳定的方法。具有控制结构简单, 易于控制和计算的优点。文献[18-20]采用的是 PWM 方法。

PFM 是指改变开关的工作频率来控制输出^[10,12]。与 PWM 相比, PFM 方法的瞬态性能好、轻载效率高、可以在宽输入电压和宽负载范围实现 ZVS, 但是稳压精度差, 而且存在轻载环流功率大的问题^[21-22]。

文献[21]采用 PWM 和 PFM 混合控制的方法来控制 LCC 谐振变换器。这种混合控制方法结合了 PWM 和 PFM 的优点, 解决了精度和轻载效率的问题, 也能保证稳压输出。

上述方法从原理上来说可以应用到 CLLC 谐振变换器中, 但目前尚未有相关的文献, 以后可以作为改进 CLLC 拓扑控制方法的一个研究方向。

3.1.2 移相控制

PWM 控制虽然比较简单, 易于实施, 但是其动态性能较差且电压调节范围较窄, 相比之下, 移相控制的惯性小、动态性能好且易于实现软开关, 具有一定优势^[23-25]。

如图 4a, 传统的 PSM 是控制原边侧和副边侧全桥之间开关信号的相移, 这个相移可以改变变压器漏感的电压, 从而控制功率的流向和大小, 其中 V_{h1} 和 V_{h2} 分别指原、副边电压。传统移相控制的不足在于容易产生环流, 这样会增大各器件的电流应力, 也会导致变换器的整体效率降低。文献[26]将传统 PSM 用于 CLLC 变换器。

文献[27-28]所采用的扩展移相控制法 (extended phase shift, EPS) 是在传统方法的基础上, 增加了全桥两桥臂开关间的内部移相角控制, 如图 4b, 减小了功率回流, 可以提升效率, 增大 ZVS 的工作范围, 减小电流应力, 使操作更加灵活。

基于 EPS, 还有更加复杂的双重移相控制 (dual phase shift, DPS) 和三重移相控制 (triple phase shift, TPS)^[4], 增加了副边侧桥臂之间的移相角作为控制量, 能进一步优化环流、电流应力和效率等指标, 在未来的研究中, 可以选其作为更优秀的 CLLC 拓扑控制策略。

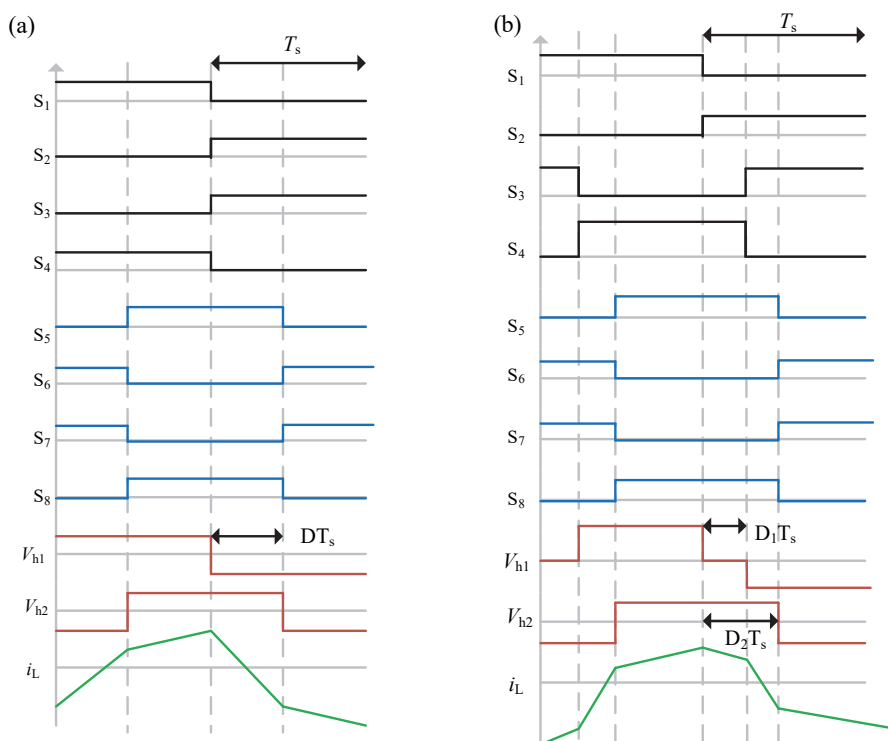


图 4 移相控制开关信号示意图: (a) 传统 PSM; (b) EPS^[4]

Fig. 4 Schematic diagram of phase shift control switch signal: (a) traditional PSM; (b) EPS^[4]

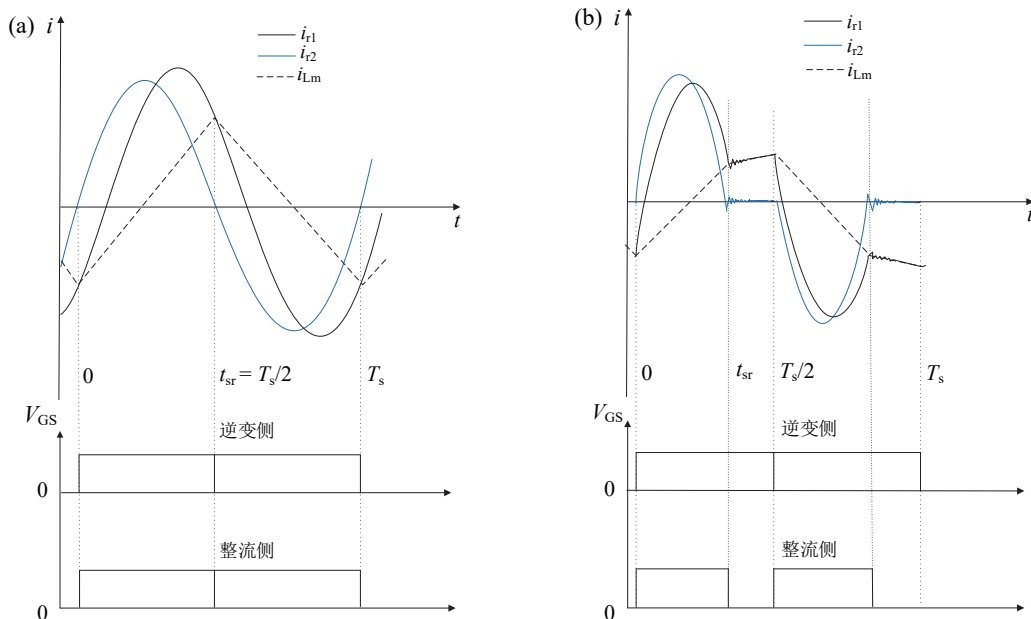


图 5 两种工作模式下的稳态波形和开关驱动信号: (a) $\omega_s > \omega_r$; (b) $\omega_s \leq \omega_r$ ^[29]

Fig. 5 Steady-state waveform and switch drive signals in two operation modes: (a) $\omega_s > \omega_r$; (b) $\omega_s \leq \omega_r$ ^[29]

3.2 同步整流

3.2.1 同步整流的基本原理

在 CLLC 变换器工作时, 原边作为逆变侧, 开关由控制电路驱动; 副边作为整流侧, 若仅仅依靠开关管的体二极管进行整流, 其正向压降会

产生很大的开关损耗。同步整流技术 (synchronous rectification, SR) 就是为了减小这一部分损耗, 增加控制信号控制副边开关管的通断来进行整流的技术。其基本原理就是保证副边整流侧有电流通过时, 相应的开关开通, 这样电流就不会流过其体二极管,

如图 5^[29]。

在传统的 LLC 型变换器中, 同步整流技术同样已经得到较广泛的应用^[30-31], 这些方法也都被运用到 CLLC 拓扑中。其方法主要分为基于检测和基于模型两大类, 下面进行具体介绍。

3.2.2 基于检测的同步整流方法

基于检测的同步整流方法在 LLC 电路的同步整流上有较多应用^[8,19,32-33], 主要是使用电流变压器或罗氏线圈, 利用传感器实时检测副边电流的过零点, 或者直接检测开关管两端的压降, 判断电流是否流经体二极管, 即是否应该开通整流侧的开关管。

文献[19]介绍了一种 CLLC 电路同步整流的检测方法, 在检测开关管两端电压的基础上, 还在变压器上设置第三个绕组如图 6, 检测其感应电压, 其中 L_{leak} 为第三绕组电感, V_{sensing} 为检测电压。用感应电压判断开关打开的时机, 用开关管两端电压判断开关关断的时机, 这种检测方式的优势是可以减小延迟误差。

实时检测的方法不需要复杂的计算, 实施起来较为简单, 但是由于传感器的成本较高、且测量电路有额外损耗而且电路的时延会导致高频工作时误差较大, 所以应用不广泛。

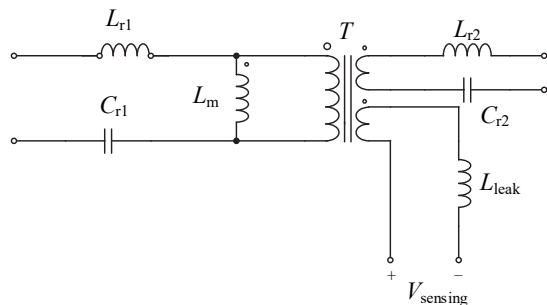


图 6 设置第三绕组的示意图^[19]

Fig. 6 Setting of the third winding^[19]

3.2.3 基于建模分析的同步整流方法

该方法是利用各种模型对电路进行分析, 推导出开关导通时间的计算公式或预测公式。较前一种方法, 若模型选取合适, 会使同步整流的控制更加合理。

基于建模分析的同步整流控制方法的主要算法流程如图 7 所示^[11]。

文献[29]采用 FHA 方法分析整流侧电流波形, 将其近似成正弦电流波形, 由电荷守恒推导出电流

不连续模式副边开关的最佳导通时间 t_{sr} , 仅与谐振电路的参数有关。

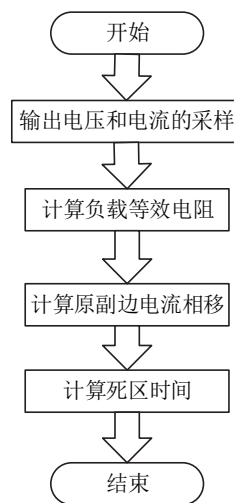


图 7 模型预测的算法流程图^[11]

Fig. 7 Algorithm flow chart of model prediction^[11]

由于在开关频率和谐振频率相差较大的场合, FHA 法的精度不尽如人意, 文献[12]采用 EHA 方法, 推导死区时间, 由于其最终结果与负载的等效电阻有关, 所以对于特定负载的某一工作状况, 仍需要检测电路的实时输出电压和输出电流的数值, 再进行计算。

上述的基于频域模型的同步整流方法, 有一个缺陷是仅考虑了副边电流连续时的情况, 而在电流不连续时会出现 SR 控制失效的状况, 因此文献[17]在 CLLC 拓扑的时域模型中进行计算, 这样就可以解决问题。

与实时检测的方法相比, 建立模型的计算方法可以减少成本和时间延时, 没有测量电路的相关损耗, 且精度不会受到高频的影响, 所以是更适用于 CLLC 变换器控制的 SR 方法。其主要误差都源自模型的误差, 所以随着建模方法的发展, 这种同步整流的方法还有很大的优化前景。

4 双向 CLLC 谐振变换器的应用

现阶段, 双向 CLLC 谐振变换器发展尚处于起步阶段, 虽然已经受到了各领域的广泛关注和研究, 但是由于是近几年出现的拓扑, 研究时间较短, 所以主要还是在中小功率方面取得进展, 如在 EV 充电模块和微电网储能系统的改进中, 对其减小损耗、

提升效率、增大容量等方面有着独特的优势。因此, CLLC 变换器的应用功率等级也在逐年上升。

4.1 EV 方面的应用

文献[34]提出的基于容性功率传输的补偿系统, 应用在 EV 充电模块, 在原边和副边均采用 CLLC 补偿电路拓扑结构, 与功率传输电容器产生谐振。谐振提供高电压, 以增加系统功率水平, 相较于以往的拓扑, 可以显著减小谐振电感的数值, 设计的实验样机容量为 2.9 kW, 最高效率为 89.3%。

文献[35]研究了双向 CLLC 变换器在 EV 车载充电模块方面的应用, 提出的带集成磁变压器的 CLLC 双向 DC/DC 变换器可以减少其体积, 在保持高效率的同时改善变换器的散热性能。最后以 3.3 kW 的样机进行验证, 效率能达到 95%以上。

文献[36]提出了一种创新的同步整流方法, 应用在车载充电器的 CLLC 变换器上, 对谐振参数进行了优化, 提高了效率和功率密度。利用所提出的同步整流控制逻辑实现了一种闭环补偿技术, 进一步提高了转换效率, 实验结果表明, 同步整流技术的实施使系统效率提高了 2%。

基于 LLC 谐振变换器的常规车载 EV 充电器在反向工作和工作频率偏离谐振频率的情况下会产生较大的损耗, 而谐振频率往往随着电池电压的变化而变化。文献[37]提出了具有最大效率跟踪的双向 CLLC 谐振变换器的 EV 充电器, 相较 LLC 变换器, 减小了环流, 减小了开关元件的电流应力, 而且具有高功率转换效率和高功率密度的特点。

4.2 微电网方面的应用

在直流微电网系统中, 为了同时保证储能系统的性能, 需要由电池和超级电容器特性互补, 共同组成储能系统, 采用电池稳定直流母线电压, 采用超级电容提供高频负载的功率。文献[38]利用双向 CLLC 拓扑构成包含两种储能元件的混合储能系统, 充分利用两种储能元件的优点, 使整个储能系统具有高能量密度和高功率密度的特点。

在交流/直流微电网中, CLLC 型 DC 变换器 (CLLC-type DC transformer, CLLC-DCT) 以其高功率密度优势和良好的双向功率传输能力, 也非常受欢迎。通常 CLLC-DCT 在谐振频率下工作, 且采用简单、低成本的半调节开环方案, 以保证电力传输。文献[39-40]提出了一种新的调频方式, 考虑到由于 CLLC 拓扑高低侧相角导致的谐振频率不唯一的问

题, 这种方式不仅提高了效率, 而且相较于闭环控制成本也较低。

文献[41]提出了一种适用于 CLLC-DCT 电路的鲁棒参数设计方案, 该方案在实际电感/电容值随实际功率和温度变化的情况下, 仍能表现出良好的功率传输和电压调节能力, 并且在 6 kW 的实验系统上得以验证。

5 双向 CLLC 谐振变换器的研究前景

从上文可以看出, CLLC 谐振变换器在建模方法和控制策略方面仍存在优化空间, 这些方面的提升对于变换器的分析和设计有很大帮助。

在建模方法方面, 基于时域分析的 OMA 方法精度较高但是建模过程和计算较复杂, 而计算较简单的 FHA 和 EHA 方法精度较低而且是采用频域分析的思想。因此, 提高建模方法精度的同时, 简化建模及计算过程是优化建模方法的重要途径。

在变换器的控制方面, 可以考虑采用 PWM 和 PFM 混合控制的策略优化开关控制方法, 也可以采用 DPS 和 TPS 方法; 同步整流方法的误差与建模方法的精度有直接联系, 而目前同步整流的模型预测主要是基于 FHA 和 EHA 方法, 如果能采用精度更高的 OMA 方法, 可以大大减小其误差。

在变换器的性能方面也同样存在一些问题。辅助电感、电容的使用增加了成本和体积; 电流应力较大、轻载情况下效率较低; 重载情况下变换器负载为感性时, 其电压增益曲线存在不单调变化的情况等, 在实际应用中受到一定限制; 另外由于谐振电路更复杂等原因, 其电压调压范围有限, 相对于 LLC 的效率提升也有限, 还有很大的优化改进空间。这些问题都可以通过电路结构的改进逐步优化。

总的来说, 双向 CLLC 谐振变换器的研究前景还是十分广阔的。

6 总 结

从基本原理、建模分析、控制、应用等方面对双向 CLLC 谐振变换器的研究进行了较为全面的总结, 结论如下:

(1) 相较于其他双向变换器, 双向 CLLC 谐振变换器的优势在于在双向运行时可在较大频率范围内实现软开关、功率密度高、调压范围大, 更适用于在高压、高频、大功率场合。

(2) 目前在建模方法, 控制方法和性能等方面还有很多问题有待解决, 故该拓扑具有广阔的研究前景。

(3) 在应用方面尚未成熟, 主要集中在中小功率范围。但是 CLLC 拓扑在效率和容量的提升等方面有优势, 而且开关频率提升的潜力大, 故拥有很好的应用前景, 尤其是在高压和大功率场合, 将会成为未来双向变换器拓扑的主流。

参考文献:

- [1] 王浩宇. 基于 LCLC 谐振网络的双向直流变换器拓扑研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [2] WU K Y, DE SILVA C W, DUNFORD W G. Stability analysis of isolated bidirectional dual active full-bridge DC-DC converter with triple phase shift control[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(4): 2007-2017. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2167243.
- [3] 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. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2108317.
- [4] ZHAO B, SONG Q, LIU W H, 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. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
- [5] 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. DOI: 10.1109/TPEL.2006.889939.
- [6] IBANEZ F, ECHEVERRIA J M, FONTAN L. Novel technique for bidirectional series-resonant DC/DC converter in discontinuous mode[J]. IET power electronics, 2013, 6(5): 1019-1028. DOI: 10.1049/iet-pel.2012.0540.
- [7] JIANG T Y, ZHANG J M, WU X K, et al. A bidirectional LLC resonant converter with automatic forward and backward mode transition[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(2): 757-770. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2307329.
- [8] CHEN W, RONG P, LU Z Y. 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. DOI: 10.1109/TIE.2009.2037099.
- [9] 张嘉翔. CLLC 谐振隔离型双向 DC/DC 变换器的设计与控制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [10] ZAHID Z U, DALALA Z M, 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. DOI: 10.1109/TTE.2015.2476035.
- [11] 孙凯, 陈欢, 吴红飞. 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[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(8): 1-9. DOI: 10.12067/ATEEE1906021.
- [12] 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. DOI: 10.1109/TIE.2018.2874348.
- [13] ZHANG Z, KHALIGH A. Modelling and optimisation of a dual-control MHz-level CLLC converter with minimised power losses in battery charging applications[J]. IET power electronics, 2020, 13(8): 1575-1582. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.1221.
- [14] DE OLIVEIRA E F, ZACHARIAS P. Comprehensive mode analysis and optimal design methodology of a bidirectional CLLC resonant converter for E-vehicles applications[C]//Proceedings of the 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe). Genova, Italy: IEEE, 2019: 1-10. DOI: 10.23919/EPE.2019.8915513.
- [15] MARTINS L F, STONE D, FOSTER M. Modelling of bidirectional CLLC resonant converter operating under frequency modulation[C]//Proceedings of 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 3750-3757. DOI: 10.1109/ECCE.2019.8913203.
- [16] LV Z, YAN X W, FANG Y K, et al. Mode analysis and optimum design of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems[C]//Proceedings of 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC: IEEE, 2015: 1513-1520. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7309873.
- [17] REN X F, PEI L, SONG S J, et al. A digital sensor-less synchronous rectification algorithm for symmetrical bidirectional CLLC resonant converters[C]//Proceedings of 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2020: 962-968. DOI: 10.1109/apec39645.2020.9124171.
- [18] SCHOBRE T, SIEBKE K, MALLWITZ R. Operation analysis and implementation of a GaN based bidirectional CLLC converter with synchronous rectification[C]//Proceedings of the 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe). Genova, Italy: IEEE, 2019: 1-10. DOI: 10.23919/EPE.2019.8915572.
- [19] PARK H P, KIM M, CHOI H, et al. Synchronous rectification method for high frequency CLLC resonant converter[C]//Proceedings of 2019 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia). Taipei, Taiwan: IEEE, 2019: 1-4. DOI: 10.1109/WiPDAAsia.2019.8760308.
- [20] 李鹏程, 张纯江, 阚志忠, 等. 软开关高增益 Buck-Boost 集成 CLLC 型直流双向变换器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3295-3305. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.170494.
- [21] 曹靖, 许建平, 陈一鸣, 等. PWM-PFM 混合控制 LCC 谐振变换器研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3629-3638, 23. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171355.
- [22] 周国华, 许建平. 开关变换器调制与控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 815-831. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.06.001.
- [23] DAS P, MOUSAVI S A, MOSCHOPOULOS G. Analysis and design of a nonisolated bidirectional ZVS-PWM DC-DC converter with coupled inductors[J]. IEEE

- transactions on power electronics, 2010, 25(10): 2630-2641. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2049863.
- [24] LI W H, LI W C, DENG Y, et al. Single-stage single-phase high-step-Up ZVT boost converter for fuel-cell microgrid system[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25(12): 3057-3065. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2079955.
- [25] 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. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248.
- [26] HUA W M, WU H F, YU Z Y, et al. A phase-shift modulation strategy for a bidirectional CLLC resonant converter[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia). Busan, Korea (South): IEEE, 2019: 1-6.
- [27] ZHAO B, YU Q G, SUN W X. 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. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2180928.
- [28] ZHU T H, ZHUO F, ZHAO F Z, et al. Optimization of extended phase-shift control for full-bridge CLLC resonant converter with improved light-load efficiency[J]. IEEE transactions on power electronics, 2020, 35(10): 11129-11142. DOI: 10.1109/tpel.2020.2978419.
- [29] SCHNEIDER T, KRATZ S, WEGENER R, et al. Symmetrical bidirectional CLLC-converter with simplified synchronous rectification for EV-charging in isolated DC power grids[C]//Proceedings of the IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2019: 990-995. DOI: 10.1109/ISIE.2019.8781269.
- [30] MOHAMMADI M, SHAFIEI N, ORDONEZ M. LLC synchronous rectification using Coordinate Modulation[C]//Proceedings of 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA: IEEE, 2016: 848-853. DOI: 10.1109/APEC.2016.7467970.
- [31] FENG W Y, LEE F C, MATTAVELLI P, et al. A universal adaptive driving scheme for synchronous rectification in LLC resonant converters[J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(8): 3775-3781. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2184304.
- [32] 王菲菲. 双向车载充电机中宽范围 CLLC 变换器的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [33] LI H R, BAI L, ZHANG Z L, et al. A 6.6kW SiC bidirectional on-board charger[C]//Proceedings of 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX: IEEE, 2018, 1171-1178. DOI: 10.1109/APEC.2018.8341164.
- [34] LU F, ZHANG H, HOFMANN H, et al. A CLLC-compensated high power and large air-gap capacitive power transfer system for electric vehicle charging applications[C]//Proceedings of 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA: IEEE, 2016: 1721-1725. DOI: 10.1109/APEC.2016.7468099.
- [35] LIU G, LI D, ZHANG J Q, et al. Bidirectional CLLC resonant DC-DC converter with integrated magnetic for OBCM application[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Seville: IEEE, 2015: 946-951. DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125219.
- [36] ZOU S L, LU J S, MALLIK A, et al. 3.3kW CLLC converter with synchronous rectification for plug-in electric vehicles[C]//Proceedings of 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Cincinnati, OH: IEEE, 2017: 1-6. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101708.
- [37] LIU C H, WANG J B, COLOMBAGE K, et al. A CLLC resonant converter based bidirectional EV charger with maximum efficiency tracking[C]//Proceedings of the 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Glasgow, UK: IET, 2016: 1-6. DOI: 10.1049/cp.2016.0152.
- [38] WEN C X, HU M M, HU C B, et al. Research on characteristics of bidirectional CLLC DC-DC transformer used in DC microgrid[J]. The journal of engineering, 2019, 2019(18): 5351-5354. DOI: 10.1049/joe.2019.0909.
- [39] ZHAO B, ZHANG X, HUANG J. Design of CLLC resonant converters for the hybrid AC/DC Microgrid applications[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen: IEEE, 2018: 1-5. DOI: 10.1109/PEAC.2018.8590451.
- [40] HUANG J J, ZHANG X. Three-step switching frequency selection criteria for symmetrical CLLC-Type DC transformer in hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(10): 9379-9385. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2904045.
- [41] HUANG J J, ZHANG X, SHUAI Z K, et al. Robust circuit parameters design for the CLLC-type DC transformer in the hybrid AC-DC microgrid[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2019, 66(3): 1906-1918. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835373.

作者简介:

文伟仲 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源发电电力电子控制相关技术研究。

舒 杰 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事分布式可再生能源及微电网技术研究。