

一种应用于储能系统的两级式直流变换器拓扑与设计

孔 玮¹, 屈克庆¹, 孙 凯², 林 翔², 牟树君³, 周 友³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090;
2. 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, 北京 100084;
3. 北京低碳清洁能源研究所, 北京 102211)

摘要: 针对储能系统功率双向流动和宽工作电压范围的特点设计了一种 CLLC 谐振型直流变换器级联交错 Buck/Boost 变换器的两级式直流变换器。首先, 给出了两级式直流变换器的参数设计方法, 基于电路的等效变换可以将 CLLC 谐振腔简化为 CLLC 谐振腔, 从而减少磁性元件数目, 有利于磁性元件的集成。然后, 介绍了两级式直流变换器的控制方法, 并通过仿真验证了两级式直流变换器的工作原理和控制方法的正确性。最后, 通过一台 1kW 的两级式直流变换器和 DAB 变换器的实验结果对比表明, 设计的两级式直流变换器能够在宽工作电压范围内保持较高的运行效率, 最高运行效率接近 96%, 重载效率明显高于传统的 DAB 变换器, 更适合作为储能系统的双向直流变换器接口。

关键词: 储能系统; CLLC 谐振型直流变换器; 两级式直流变换器

DOI: 10.12067/ATEEE1811038 **文章编号:** 1003-3076(2019)08-0010-09 **中图分类号:** TM910.6

1 引言

近年来, 随着新能源发电的快速发展, 新能源发电弃电问题逐渐显现, 造成了资源的大量浪费, 而储能技术则被认为是解决该问题的有效途径。常见的储能技术通常可分为物理储能、电磁储能和电化学储能方式等, 各种储能方式在容量和功率密度方面有着明显的差别, 各有优缺点, 适用场合也各不相同^[1-3], 但是储能系统普遍具有功率双向流动、工作电压范围宽的特点; 另外, 储能系统通常通过双向直流变换器接口接入电压等级较高的直流母线, 以满足并入交流电网的要求, 因此为储能系统配备的双向直流变换器接口需要具有功率双向流动、宽电压调节范围、高电压变比的特点, 并且应具备电气隔离功能, 保障储能系统的安全。

隔离型双向直流变换器拓扑主要以双主动全桥 (Dual Active Bridge, DAB) 变换器和 CLLC 谐振型直流变换器为代表。DAB 变换器主要采用桥间移

相控制, 通过控制桥间移相角来控制功率的双向流动^[4], 但是 DAB 变换器工作在电压不匹配状态时容易失去软开关特性, 造成较大的开关管电流应力, 增加开关管的开关损耗, 并且在 DAB 变换器重载时, 尤其在低压侧会存在较大的回流功率, 增加了开关管的导通损耗。目前针对 DAB 变换器的研究主要集中在减少开关管的电流应力, 减少回流功率, 拓宽软开关范围等方面, 在文献[5-7]中分别针对回流功率和软开关范围等优化目标提出了改进的多重移相控制方法, 但是控制方法较为复杂, 难以获得实际应用。CLLLC 谐振型直流变换器作为近年来受到广泛关注的一种谐振型拓扑, 具有双向运行特性一致, 开关损耗小, 回流功率小, 功率密度高的优点^[8], 文献[9, 10]对 CLLC 谐振型直流变换器的参数设计和变频控制方法进行了研究, 但是由于 CLLC 谐振型直流变换器的电压增益特性与负载有关, 应用于宽范围调压时存在频率变化范围宽, 谐振腔参数设计困难的问题, 并且谐振腔中含有较多

收稿日期: 2018-11-23
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFE0102600)
作者简介: 孔 玮 (1992-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为储能系统中的电力电子变换器;
屈克庆 (1970-), 男, 河南籍, 副教授, 研究方向为新能源发电系统中的电力电子变换器。

的磁性元件,不利于磁性元件的集成和变换器功率密度的提高。

鉴于以上隔离型双向直流变换器存在的问题,本文提出了一种 CLLC 谐振型直流变换器与交错 Buck/Boost 变换器级联的两级式直流变换器结构,CLLC 谐振型直流变换器的谐振腔参数是基于电路等效变换原理,由 CLLC 谐振腔参数等效变换而来,减少了谐振腔中的磁性元件数目,更有利于减少磁性元件的损耗和磁集成。交错 Buck/Boost 变换器可以在相同的电感电流纹波要求下采用较低的开关频率,减少开关损耗,同时也能减少导通损耗。两级式直流变换器中的 CLLC 谐振型直流变换器采用定频开环控制,工作频率固定在谐振腔的谐振频率点,实现恒定的电压变比和高效电能传输。交错 Buck/Boost 变换器采用 PWM 控制,负责储能系统的功率控制。利用仿真对两级式直流变换器的工作原理和控制方法进行了验证,最后,搭建了 1kW 的两级式直流变换器和 DAB 变换器实验样机进行了实验验证和效率对比。

2 两级式直流变换器拓扑与参数设计

2.1 CLLC 谐振型直流变换器拓扑与参数设计

文献[11]中提出的 CLLC 谐振型直流变换器拓扑结构如图 1 所示, V_{DC} 为高压直流母线电压; R_L 为低压侧等效负载电阻; C_1 和 C_2 分别为谐振腔高压侧和低压侧的谐振电容; L_1 和 L_2 分别为谐振腔高压侧和低压侧的谐振电感; L_m 为高频变压器的励磁电感; n 为高频变压器的变比; i_1 和 i_2 分别为高频变压器原边和副边的谐振腔谐振电流。

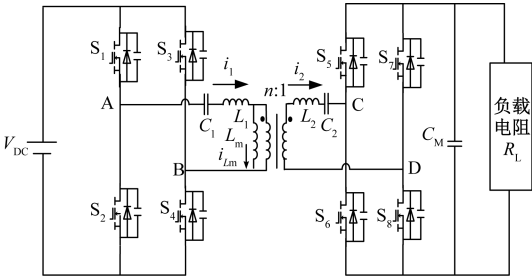


图 1 CLLC 谐振型直流变换器拓扑

Fig.1 Topology of CLLC resonant DC/DC converter

CLLC 谐振型直流变换器的谐振腔参数满足如式(1)和式(2)所示的关系,当其工作在谐振频率点时可以获得稳定的电压增益,与负载变化无关。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \tag{1}$$

$$\begin{cases} L_1 = n^2 L_2 \\ C_1 = \frac{C_2}{n^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中, f_0 为 CLLC 谐振型直流变换器谐振频率。

本文基于谐振腔端口电压电流瞬时值等效原则,在不改变 CLLC 谐振腔谐振频率和谐振电容值的情况下,将 CLLC 谐振腔简化为 CLLC 谐振腔结构,减少了磁性元件的数目和磁性元件的损耗,便于利用高频变压器的漏感进行磁集成。得到的 CLLC 谐振型直流变换器的拓扑如图 2 所示,相比 CLLC 谐振型直流变换器,变压器副边减少了一个电感元件,图 2 中, L_s 为 CLLC 谐振腔的谐振电感; M 为 CLLC 谐振腔高频变压器的励磁电感, n' 为 CLLC 谐振腔高频变压器的变比。

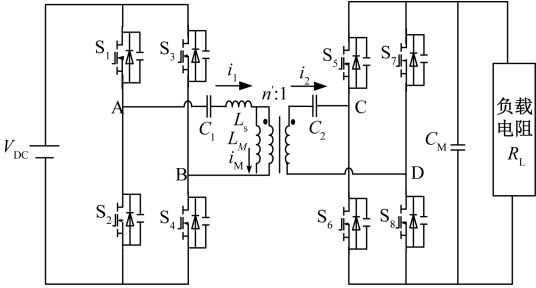


图 2 CLLC 谐振型直流变换器拓扑

Fig.2 Topology of CLLC resonant DC/DC converter

如图 1 和图 2 的 CLLC 和 CLLC 谐振型直流变换器,其谐振腔的基波等效电路如图 3 和图 4 所示。其中,根据两种谐振腔等效的原则,CLLC 谐振腔和 CLLC 谐振腔的谐振腔电流 i_1 、 i'_2 和电压 u_1 、 u'_2 均相同。利用网孔电流分析法分别列写图 3 和图 4 所示的谐振腔等效电路的网孔电流方程如式(3)和式(4)所示。

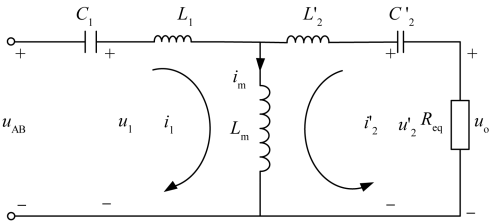


图 3 CLLC 谐振腔基波等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of CLLC resonant tank

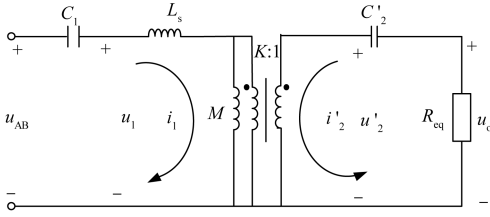


图4 CLLC谐振腔基波等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of CLLC resonant tank

$$\begin{cases} (L_1 + L_m) \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di'_2}{dt} = u_1 \\ (L'_2 + L_m) \frac{di'_2}{dt} + L_m \frac{di_1}{dt} = u'_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} (L_s + M) \frac{di_1}{dt} + \frac{M}{K} \frac{di'_2}{dt} = u_1 \\ \frac{M}{K^2} \frac{di_1}{dt} + \frac{M}{K^2} \frac{di'_2}{dt} = u'_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, K 为高频变压器的变比折算系数, 则有 $n' = Kn$; i'_2 为折算到高压侧的低压侧谐振电流; L'_2 和 C'_2 分别为折算到高压侧的低压侧谐振电感和谐振电容。

由式(3)和式(4)可以得到经过等效变换后的CLLC谐振型直流变换器的谐振电感、励磁电感和高频变压器变比折算系数的表达式, 如式(5)~式(7)所示。

$$K = \frac{L_m}{L'_2 + L_m} \quad (5)$$

$$M = \frac{L_m^2}{L'_2 + L_m} \quad (6)$$

$$L_s = \frac{(L_1 + L_m)(L'_2 + L_m) - L_m^2}{L'_2 + L_m} \quad (7)$$

通过式(5)~式(7)的等效变换方法, 可以得到CLLC谐振腔参数的设计方法, 归纳如下:

(1) 首先确定CLLLC谐振型直流变换器高频变压器的变比 n , 当CLLLC谐振型直流变换器作为高频直流变压器应用时, 可按式(8)确定高频变压器的变比。

$$n = \frac{V_{DC}}{V_{CM}} \quad (8)$$

式中, V_{CM} 为CLLLC谐振型直流变换器的低压侧设计输出电压。

(2) 确定CLLLC谐振腔的谐振频率。

(3) 确定CLLLC谐振腔参数, 为了保证开关管实现ZVS(Zero Voltage Switching)软开关, 励磁电感值与开关频率 f_s 死区时间 t_{dead} 以及开关管的寄生

电容 C_{oss} 需满足式(9)所示的关系^[12]。

$$L_m \leq \frac{t_{dead}}{16f_s C_{oss}} \quad (9)$$

谐振电感 L_1 是根据励磁电感与谐振电感的比值 n_L 确定, 根据文献[13]可知, n_L 取值越大, CLLC谐振型直流变换器在谐振频率点附近的电压增益越平稳, 在变换器作为直流变压器应用时, 能够减少谐振腔参数设计误差造成的电压增益的误差, 但是 n_L 取值也不能过大, 否则会使原边开关管失去ZVS软开关。因此, 综合考虑 n_L 一般取15~20。在确定谐振电感以后, 可以根据式(1)确定谐振电容 C_1 和 C_2 。

(4) 在确定CLLLC谐振腔的参数以后, 可以根据式(5)~式(7)获得等效的CLLC谐振腔参数, 根据等效变换原理, 等效变换并不改变谐振频率和谐振电容, 只是对电感元件和变比进行了变换。

2.2 交错Buck/Boost变换器拓扑与参数设计

交错Buck/Boost变换器的拓扑结构如图5所示, 采用交错并联技术可以在相同电感输入电流脉动的条件下, 采用较低的开关频率, 减少开关管硬开关带来的开关损耗, 同时也可以减少导通损耗。采用磁集成技术可以减少磁性元件的数目, 由文献[14]可知耦合电感采用反向耦合方式可以使变换器获得较快的动态响应速度和较大的等效自感值, 一般耦合电感采用反向耦合方式。

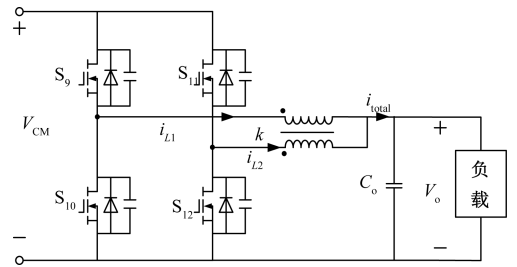


图5 交错Buck/Boost变换器拓扑

Fig.5 Topology of interleaved Buck/Boost converter

耦合电感的自感值, 可按照式(10)进行计算, 针对中大功率应用场合, 一般希望电感电流工作于连续导通模式(Continuous Conduction Mode, CCM), 电感电流纹波系数 r 一般优化选取0.3~0.4^[15]。

$$L = \frac{(V_{CMmax} - V_{omin})V_{omin}}{\Delta I V_{CMmax} f_b} \quad (10)$$

式中, V_{CMmax} 为交错Buck/Boost变换器高压侧的最高输入或输出电压; V_{omin} 为交错Buck/Boost变换器低压侧的最低输入或输出电压; ΔI 为电感电流脉动

值; f_b 为交错 Buck/Boost 变换器的开关频率。

本文中储能系统的电压变化范围为 40~60V, 为了防止后级变换器占空比饱和, CLLC 与交错 Buck/Boost 变换器之间的直流母线电压可设计为 70~80V 之间。储能系统最大负载电流为 50A, 电感电流纹波率取 0.4, 开关频率取 20kHz, 根据式 (10) 计算可得耦合电感的自感值取 100μH 较为合适。由于本文中的交错 Buck/Boost 变换器始终工作于占空比大于 0.5 的大占空比工作模式。文献 [16] 中详细推导了变换器工作于不同的模态下耦合电感的等效自感表达式, 当占空比大于 0.5 时, 采用反向耦合方式的每相耦合电感电流脉动量与非耦合方式下的每相电感电流脉动之比为 K_i , 可以得到 K_i 的表达式如式 (11) 所示。

$$K_i = \frac{1 + \frac{k(1-D)}{D}}{1 - k^2}$$

(11)

式中, k 为耦合电感的耦合系数, 当采用反向耦合方式时, $k \in [-1, 0]$ 。

在不同的耦合系数条件下, 采用电感反向耦合与不耦合方式的电感电流脉动之比 K_i 随占空比 D 的变化情况如图 6 所示。由图 6 可以看出, 随着耦合系数绝对值的增大, 电感电流的脉动逐渐增大, 因此耦合系数的取值不应过大, 本文耦合电感磁心采用铁氧体 EE70 磁心, 由文献 [17] 中的反向耦合电感绕制方法可知, 铁氧体磁心边柱和中柱气隙与耦合电感的关系如式 (12) 所示。

$$\delta_c = \delta_s \frac{2k}{1 - k}$$

(12)

式中, δ_c 为 EE 磁心的中柱间的气隙长度; δ_s 为边柱气隙长度。

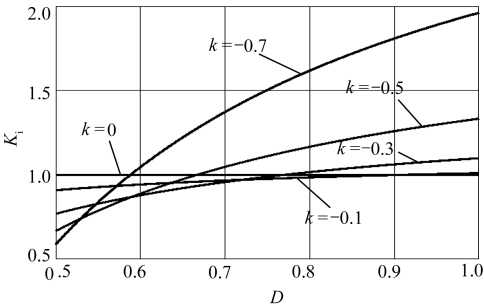


图 6 电感电流脉动之比与占空比的关系 ($D > 0.5$, CCM)

Fig.6 Relationship between ratio of inductance current ripple and duty cycle ($D > 0.5$, CCM)

因此, 为了方便磁心气隙的设计, 同时又不致使

变换器的电感电流脉动较大, 耦合系数选择为 1/3, 此时 EE 磁心边柱气隙与中柱气隙相等。

3 两级式直流变换器的控制

本文采用的 CLLC 谐振型直流变换器与交错 Buck/Boost 变换器级联的两级式直流变换器结构如图 7 所示, CLLC 谐振型直流变换器作为高频直流变压器, 其高压全桥与直流母线相连, 开关频率等于谐振腔的谐振频率, 主要实现高电压变比和能量的高效传输。假设功率由高压直流母线向储能系统充电时功率方向为正方向, 当功率正向传输时开关管 S_1 与 S_4 , S_2 与 S_3 分别施加占空比为 50% 的触发脉冲信号, 低压侧开关管可以不施加触发信号或者施加同步触发信号使其工作于同步整流模式, 当功率反向传输时, 低压侧开关管采用占空比为 50% 的触发脉冲信号, 高压侧开关管可以不控或者控制为同步整流模式。

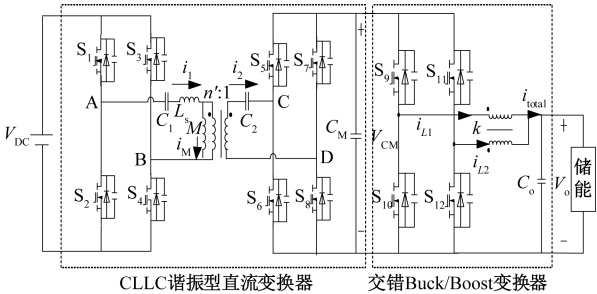


图 7 两级式直流变换器拓扑

Fig.7 Topology of two-stage DC/DC converter

交错 Buck/Boost 变换器负责储能系统的功率控制, 采用 PWM 控制方式, 控制结构如图 8 所示。 I_{ref} 为储能系统的指令电流值, I_{soc} 为储能系统的电流值, 当给定的电流指令为正值时, 变换器工作于降压模式, 功率正向传输, 此时高压直流母线为储能系统充电; 当给定的电流指令为负值时, 变换器处于升压模式, 此时储能系统向高压直流母线放电。

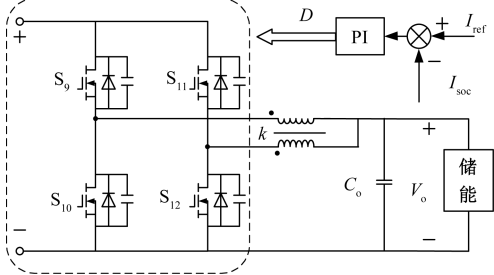


图 8 交错 Buck/Boost 变换器的控制方式

Fig.8 Control method of interleaved Buck/Boost converter

4 仿真与实验

4.1 算例仿真

为了验证两级式直流变换器的工作原理和控制方法的有效性,利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了两级式直流变换器的仿真模型,CLLC 谐振型直流变换器的谐振频率取 55kHz,死区时间 100ns;交错 Buck/Boost 开关频率 20kHz。CLLC 谐振腔的谐振电感 $L_s=97.619\mu\text{F}$;励磁电感 $M=952.38\mu\text{H}$;谐振电容 $C_1=0.168\mu\text{F}$, $C_2=10.718\mu\text{F}$;高频变压器变比折算系数 $K=0.9524$ 。高压侧直流母线电压 $V_{\text{DC}}=600\text{V}$,中间母线电容电压设计值 $V_{\text{CM}}=75\text{V}$;储能工作电压范围为 40~60V;充电模式下,最大充电电流为 50A,最大充电功率为 3kW;放电模式下,最大放电电流为 50A,最大放电功率为 2kW。

由于两级式直流变换器正反向运行特性相似,以正向运行为例,CLLC 谐振腔电压和电流波形如图 9 所示。图 9(a)和图 9(b)分别给出了两级式直流变换器在充电电流 50A 时的谐振腔电压和电流波形。由仿真结果可以看出,CLLC 谐振型直流变换器工作在谐振频率点时,谐振腔电流可看做正弦波形,而且谐振腔副边电压和电流基本同相位,低压侧基本没有功率回流。

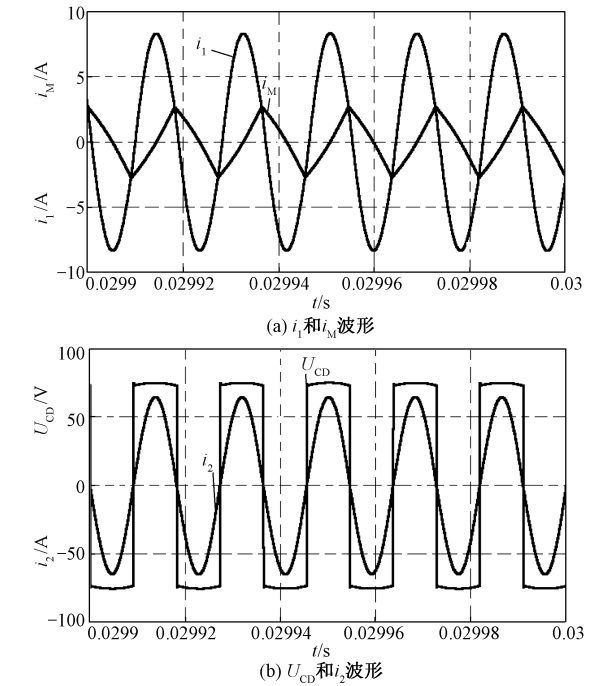


图 9 CLLC 谐振腔电压和电流波形
Fig.9 Current and voltage waveforms of
CLLC resonant tank

图 10 和图 11 中分别给出了 CLLC 谐振型直流变换器在满载和轻载时,开关管 S_1 和 S_5 两端的电压和流过电流的仿真波形,由仿真结果可以看出,CLLC 谐振型直流变换器能够从轻载到重载的宽负载范围内实现高频变压器原边侧开关管的 ZVS 开通和副边侧开关管的 ZCS (Zero Current Switching) 关断。

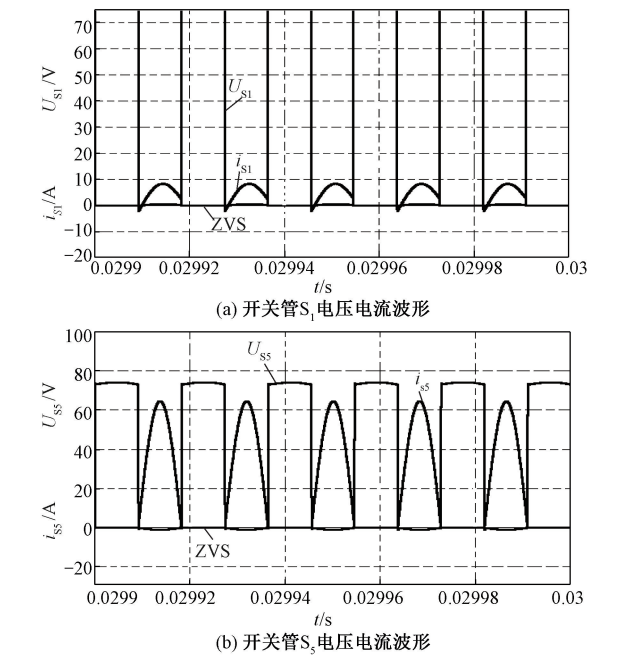


图 10 满载时开关管 S_1 和 S_5 的电压和电流波形
Fig.10 Voltage and current waveforms of S_1 and S_5 at full load

为了验证所提出的两级式变换器的控制原理,分别针对储能系统充电模式和放电模式进行了仿真分析。图 12(a)为储能系统充电时的充电电流和两级式变换器输出电压的变化情况,此时两级式直流变换器工作于降压模式,0.02~0.04s 储能系统的充电电流指令由 30A 升高至 50A,两级式直流变换器输出的充电电流 I_{soc} 能够实现对指令电流的准确跟踪,输出电压升高至 60V。图 12(b)为储能系统放电时的放电电流和两级式直流变换器端口电压的变化情况,此时两级式变换器工作于升压模式,0.02~0.04s 储能系统的放电电流指令由 30A 升高至 50A,两级式直流变换器输出的放电电流 I_{soc} 能够实现对指令电流的准确跟踪,输出电压降低至 40V。

4.2 样机实验

为了验证设计的两级式直流变换器的实用性,实验室分别搭建了一台 1kW 的两级式直流变换器和 DAB 变换器的原理验证样机。CLLC 谐振型直流

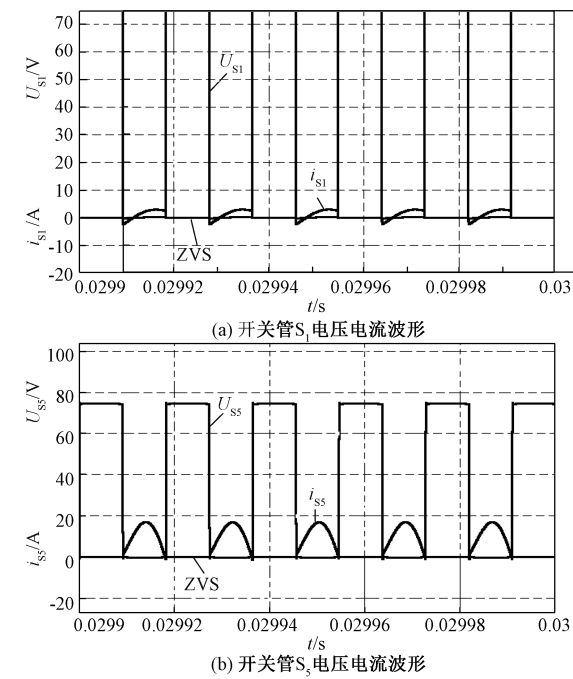


图 11 轻载时开关管 S_1 和 S_5 的电压和电流波形

Fig.11 Voltage and current waveforms of S_1 and S_5 at light load

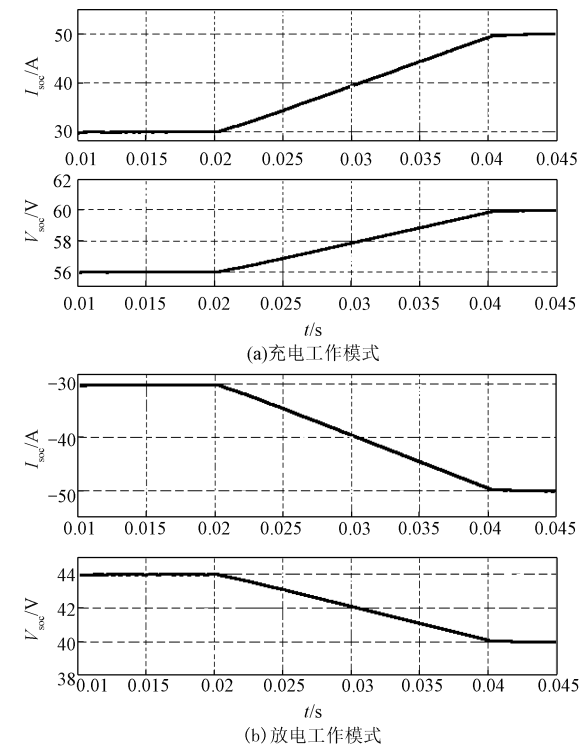


图 12 储能系统充电和放电时的端口电压和电流

Fig.12 Voltage and current during charging and discharging of energy storage system

MOSFET C2M0080120D, 低压侧和交错 Buck/Boost 变换器的开关管采用 Si MOSFET IRFP4127PbF, CLLC 谐振型直流变换器和 DAB 变换器的开关频率为 55kHz, 交错 Buck/Boost 变换器的开关频率为 20kHz, CLLC 谐振型直流变换器的谐振电感 $L_s=25\mu\text{H}$; 高压侧谐振电容 $C_1=0.33\mu\text{F}$; 低压侧谐振电容 $C_2=9.4\mu\text{F}$; 高频变压器励磁电感为 $500\mu\text{H}$, 变比 4:1; 交错 Buck/Boost 变换器耦合电感自感 $L=100\mu\text{H}$; 互感 $M=-34\mu\text{H}$. DAB 变换器的移相电感为 $120\mu\text{H}$; 高频变压器变比为 6:1; 采用桥间移相控制方式。实验中, 高压侧电压为 300V, 低压侧电压为 40~60V。

首先, 实验测量了 CLLC 谐振型直流变换器在不同负载条件下的输出电压和效率如表 1 所示, CLLC 谐振型直流变换器的稳态实验波形如图 13 所示。然后, 测量了两级式直流变换器的稳态工作波形和效率曲线如图 14 和图 15 所示, 与相同输出电压时的 DAB 变换器样机的效率曲线对比如图 16 所示。

表 1 CLLC 谐振型直流变换器实验结果

Tab.1 The experimental results of CLLC resonant DC/DC converter							
负载电阻/ Ω	40	30	20	15	10	7.5	6.6
输出电压/V	72.9	72.8	72.7	72.6	72.3	72	71.9
效率(%)	92.3	94.09	95.7	96.49	97.02	97.1	97.1

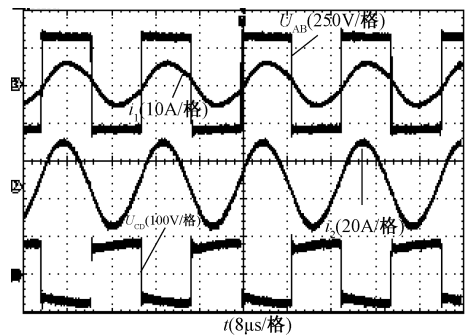


图 13 CLLC 谐振型直流变换器的稳态波形

Fig.13 Steady-state waveforms of CLLC resonant DC/DC converter

由表 1 和图 13 的实验结果可知, CLLC 谐振型直流变换器工作在谐振频率点时, 电压增益随着负载的变化基本保持不变, 谐振腔电压和电流基本同相位, 回流功率很小, 重载时最高运行效率超过 97%。由图 14 中两级式直流变换器的稳态实验波形可以看出, 在低压侧宽调压范围内, CLLC 谐振型直流变换器具有较小的功率回流。

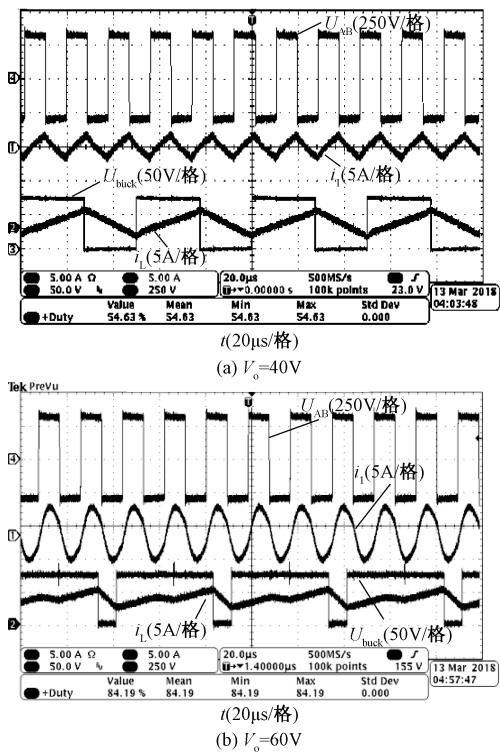


图 14 两级式直流变换器的工作波形

Fig.14 Operating waveforms of two-stage DC/DC converter

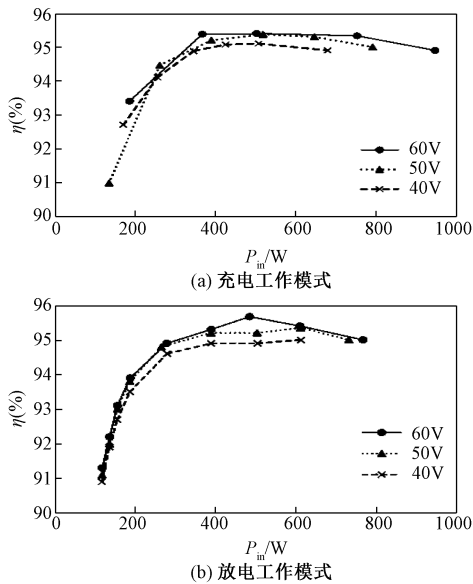


图 15 两级式直流变换器的效率

Fig.15 Efficiency of two-stage DC/DC converter

由图 15(a) 和图 15(b) 可以看出设计的两级式直流变换器能够在低压侧宽工作电压范围内保持较高的运行效率,最高运行效率接近 96%,而且变换器正反向运行效率基本保持一致。图 16(a) 和图

16(b) 分别为两级式直流变换器和 DAB 变换器的效率曲线对比,图 16(a) 中两种变换器的低压侧输出电压均为 50V, DAB 变换器工作在电压匹配模式,此时两种变换器的轻载运行效率相近,重载时两级式直流变换器的效率明显高于 DAB 变换器,这是因为 DAB 变换器在重载时,低压侧会存在较大的回流功率,使导通损耗增加。图 16(b) 中两种变换器的低压侧电压均为 40V, DAB 变换器工作在电压不匹配的状态,导致回流功率和开关管的电流应力都会增大,运行效率不及电压匹配时的效率,在重载时,两级式变换器的效率明显优于 DAB 变换器。

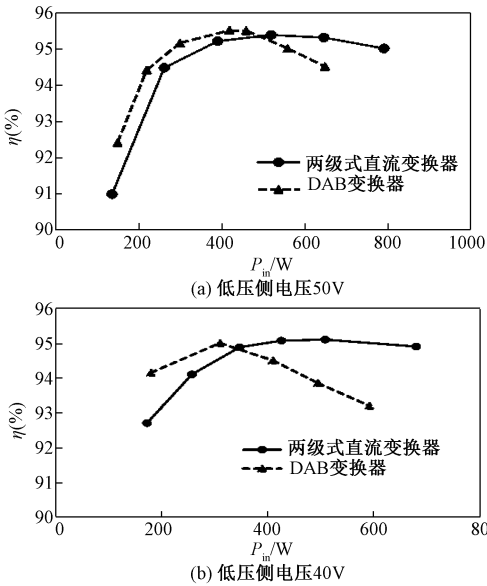


图 16 两种变换器的效率对比

Fig.16 Efficiency comparison of two converters

5 结论

本文为储能系统设计了一种基于 CLLC 谐振型直流变换器与交错 Buck/Boost 变换器级联的两级式直流变换器,该变换器能够满足储能系统宽工作电压范围和高电压变比的需求,采用较少的磁性元件,更有利于充分利用高频变压器的漏感和磁集成。通过仿真验证了两级式直流变换器的工作原理和控制方法的正确性,两级式直流变换器能够实现对储能系统功率的灵活控制。通过两级式直流变换器与传统 DAB 变换器的原理样机运行效率对比证实了两级式直流变换器能够在宽工作电压范围内保持较高的运行效率,重载时的效率明显优于 DAB 变换器,更适合作为储能系统的双向直流变换器接口。

参考文献 (References):

- [1] 张文亮, 丘明, 来小康 (Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang). 储能技术在电力系统中的应用 (Application of energy storage technologies in power grids) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2008, 32 (7): 1-9.
- [2] 骆妮, 李建林 (Luo Ni, Li Jianlin). 储能技术在电力系统中的研究进展 (Research progress of energy storage technology in power system) [J]. 电网与清洁能源 (Power System and Clean Energy), 2012, 28 (2): 71-79.
- [3] 朱永强, 郝嘉诚, 赵娜, 等 (Zhu Yongqiang, Hao Jiacheng, Zhao Na, et al.). 能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式 (Demands, functions and action manners of energy storage in energy internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 68-75.
- [4] 孙伟欣, 宋强, 金一丁 (Sun Weixin, Song Qiang, Jin Yiding). 应用于链式 PCS 系统的双主动全桥移相控制研究 (Research on bi-directional dual active bridge phase shift control in cascaded PCS system) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2011, 45 (10): 24-26.
- [5] 侯旭, 曾正, 冉立, 等 (Hou Xu, Zeng Zheng, Ran Li, et al.). 基于扩展移相控制的双向有源桥变换器回流功率优化 (Backflow power optimization of dual active bridge converter based on extended-phase-shift control) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (23): 7004-7014, 7134.
- [6] 黄珩, 王跃, 李卓强, 等 (Huang Jun, Wang Yue, Li Zhuoqiang, et al.). 基于三重移相控制的双主动全桥直流变换器优化调制策略 (Optimized modulation scheme of dual active bridge DC-DC converter based on triple-phase-shift control) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (6): 1658-1666.
- [7] 王归新, 杨斌, 陈海东 (Wang Guixin, Yang Bin, Chen Haidong). 混合式隔离双向 DC-DC 变换器建模与控制 (Modeling and control of hybrid isolated bi-directional DC-DC converter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 48-57.
- [8] 吕正, 颜湘武 (Lü Zheng, Yan Xiangwu). 直流纳电网中用于高频隔离的 CLLC 型双向直流变压器的模式分析与优化设计 (Mode analysis and optimal design of CLLC-type bidirectional DC-DC transformers for high-frequency isolation in dc nanogrids) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (21): 5918-5929, 6036.
- [9] Chang Hao-Tang, Liang Tsorng-Juu, Yang Wei-Chin. Design and implementation of bidirectional DC-DC CLLC resonant converter [A]. 2018 IEEE Energy Conversion Congress And Exposition [C]. Portland, USA, 2018. 2712-2719.
- [10] 王悦妹, 郑丽君, 宋建成, 等 (Wang Yuemei, Zheng Lijun, Song Jiancheng, et al.). 双向 CLLC 型 DC-DC 变换器变频控制方法的研究 (Research on variable frequency control method of bidirectional CLLC DC-DC converter) [J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2017, 35 (12): 1798-1804.
- [11] Tang Yu, Gong Sicheng, Xie Shaojun. Research on open-loop soft-start strategy of CLLC bi-directional resonant converter [A]. 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition [C]. Shenzhen, China, 2018. 1-6.
- [12] 陈启超, 纪延超, 王建曌, 等 (Chen Qichao, Ji Yanchao, Wang Jianze, et al.). 双向 CLLC 谐振型直流变压器的分析与设计 (Analysis and design of bidirectional CLLC resonant DC-DC transformers) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (18): 2898-2905.
- [13] 陈申, 吕征宇, 姚玮, 等 (Chen Shen, Lü Zhengyu, Yaowei, et al.). LLC 谐振型软开关直流变压器的研究与实现 (Research and verification on LLC resonant soft switching DC-DC transformer) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (10): 163-169.
- [14] 马杰, 杨玉岗, 马云巧 (Ma Jie, Yang Yugang, Ma Yunqiao). 交错并联双向 DC/DC 变换器 Buck 模式下的耦合电感设计规则 (Coupled inductor design rule for interleaving bidirectional DC/DC converter in buck mode) [J]. 电源学报 (Journal of Power Supply), 2014, 12 (3): 80-86.
- [15] 李祥忠, 朱彬, 王善良, 等 (Li Xiangzhong, Zhu Bin, Wang Shanliang, et al.). 交错并联 Buck 中耦合电感的设计 (Design of coupled inductor in interleaved Buck) [J]. 电子设计工程 (Electronic Design Engineering), 2014, 22 (15): 116-118, 121.
- [16] Li Chunhui, Yang Fei, Cao Yong, et al. Two-phase interleaved boost PFC converter with coupled inductor under single-phase operation [A]. 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Portland, USA, 2018. 606-613.
- [17] 杨飞 (Yang Fei). 采用耦合电感的交错并联 Boost

PFC 变换器 (Interleaved boost PFC converter with coupled inductor) [D]. 南京: 南京航空航天大学 (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), 2013.

Topology and design of a two-stage DC/DC converter for energy storage system

KONG Wei¹, QU Ke-qing¹, SUN Kai², LIN Xiang², MU Shu-jun³, ZHOU You³

- (1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: In this paper, a two-stage DC/DC converter with CLLC resonant DC/DC converter cascaded and interleaved Buck/Boost converter is designed for the characteristics of bidirectional power flow and wide operating voltage range in energy storage system. Firstly, the parameter design method of two-stage DC/DC converter is given, and the CLLC resonant tank can be simplified as CLLC resonant tank by equivalent circuit transformation. The purpose is to reduce the number of magnetic elements and facilitate the integration of magnetic elements. Then, the control method of two-stage DC/DC converter is introduced, and the correctness of the working principle and control method of the two-stage DC/DC converter is verified by simulation. Finally, the experimental results of a 1kW two-stage DC/DC converter and a DAB converter show that the designed two-stage DC/DC converter can maintain a high operating efficiency in a wide range of operating voltage, the maximum operating efficiency is close to 96%, and the highload efficiency is significantly higher than that of the traditional DAB converter, so it is more suitable for the bidirectional DC/DC converter interface of energy storage system.

Key words: energy storage system; CLLC resonant DC/DC converter; two-stage DC/DC converter