

中小功率系统集成 DC/DC 标准模块的一族候选拓扑

顾亦磊, 吕征宇, 钱照明

(浙江大学电气工程学院 浙江省 杭州市 310027)

A FAMILY OF CANDIDATE TOPOLOGIES FOR LOW TO MEDIUM POWER SYSTEM INTEGRATION STANDARD DC/DC MODULE

GU Yi-lei, LÜ Zheng-yu, QIAN Zhao-ming

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: Considering the trends of system integration of power electronics, Active Clamped Forward (ACF) converter is a preferable candidate for standard DC/DC module of low to medium power due to its merits of wide operating range, low voltage stress on switches and comparatively simple self-driving strategy of synchronous rectifier. This paper comprehensively summarizes the typical topologies of ACF family, meanwhile a series of novel configurations and several specific viewpoints about the very type are presented, which enrich the family of ACF and its theory. According to the characteristic of ACF and various requirements of input and output, the topologies of the very family are separated into primary circuit and secondary circuit to characterize. Furthermore, primary side is combined with secondary side, three strategies of control type soft switching are concluded and consideration of selective additional components is presented, hard switching or soft switching operation can be selected according to various applications. Finally, both analysis and theory are verified by experimental results.

KEY WORDS: Active clamped; Forward; System integration; Power electronics

摘要: 有源箝位正激型变换器(简称 ACF)以其极佳的宽范围适应性、较低的开关电应力、简单的同步整流自驱动方式而被选为中小功率电力电子系统集成中 DC/DC 标准模块的较佳候选拓扑。该文将系统地总结各种经典的 ACF 结构,同时也将提出一些新颖的结构以及独特的观点,使得 ACF 更加的完善。根据 ACF 的特点,将它拆成原边电路和副边电路两部分独立来描述,以适应不同输入要求和输出要求。最后将原副边电路配合起来,论述了 ACF 的三种控制性软开关的方案,以及提出以可选择性外挂配件的思路,根据不同的使用场合选择硬开关或是软开关工作状态。最后,实验

结果验证了以上的分析和理论。

关键词: 有源箝位; 正激; 系统集成; 电力电子

1 引言

系统集成是电力电子今后发展的方向,电力电子标准模块的研究是系统集成中一项重要的工作。当形成了一系列标准模块之后,在开发电源系统时只需要将这些标准模块进行合理的拼装和组合即可。这些标准模块最基本的要求是通用性,即有尽量宽的适应性^[1-6]。

正激变换器是应用得非常广泛的一种隔离型 DC/DC 变换器,特别是应用在中小功率场合^[7-8]。有源箝位正激型变换器(Active Clamped Forward converter, 下面简称 ACF)又是正激型变换器中性能最佳的一种,其复位时间的利用率最高,原边开关及副边二极管的电压应力最低,占空比可以大于 50%,具有很强的宽范围适应性。另外在低压输出场合,应用同步整流技术时,也可以简单地采用自驱动方案。所以 ACF 是中小功率系统集成中 DC/DC 标准模块的较佳候选拓扑。

已有不少文献将一些实用的技术(例如同步整流技术^[9-10]、倍流整流技术^[11])与 ACF 结合起来,使得该变换器性能更加完善,可以适应更多的应用场合。本文系统地总结了各种经典的 ACF 结构^[12],同时也提出了一些新颖的结构以及独特的观点,使得 ACF 的结构和理论更加的完善。根据 ACF 的特点,将它拆成原边电路和副边电路两部分分别来描述。各种原边电路结构的变化是为了适应不同输入要求;而各种副边电路结构的变化是为了适应各种不

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50237030ZD)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50237030ZD).

同输出要求。最后将原副边电路结构配合起来论述了ACF的三种控制性软开关的方案,以及提出以可选择性外挂配件的形式选择硬开关还是软开关工作状态。所有这些系统性的研究的目的是为下一步电力电子系统集成的实施提供理论基础,同时也为电源设计者提供拓扑选择的依据。

2 典型的 ACF

图1是最典型的ACF变换器,原边电路包含一个主开关 S_1 和一个辅助开关 S_{a1} 。主开关和辅助开关互补导通(下面提到的所有变形结构都遵循主开关和辅助开关互补导通的原则,不再一一说明)。

为了获得一些特殊的性能或是应用于某些特定场合,ACF的原边电路和副边电路都有很多变形结构,但是不管怎么变形,有一点是不变的:变压器上的电压波形始终是完整的方波,这个方波是完全由原边电路产生的,同时作为副边的输入源。而桥式电路等拓扑变压器上电压并不是完整的方波,有一段时间电压为零,此时依靠副边二极管的导通来对变压的电压进行箝位。因此ACF的原边电路和副边电路相对比较独立,可以分开来讨论。

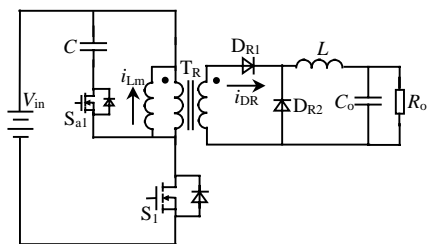


图1 典型的 ACF

Fig.1 Typical active clamp forward converter

3 各种原边电路

典型的ACF的原边电路包含一个主开关 S_1 和一个辅助开关 S_{a1} ,如图2(a)所示。主开关流过的是负载电流,而辅助开关流过的是激磁电流,因此辅助开关的容量通常比主开关要小的多。图2(b)所示的变换器的主开关用N沟道的MOSFET,而容量较小的辅助开关用P沟道的MOSFET来实现。这样可以省去一个高边驱动,简化结构,降低成本。图2(a)和(b)所示的两种原边电路结构都是一个主开关一个辅助开关,因此称为单主单辅结构。

图2(c)和(d)所示的结构有两个主开关,两个辅助开关,称为双主双辅结构。这两个结构适用于较高输入电压的场合。在单主单辅结构里每个开关承受的电压是输入电压 V_{in} 和变压器复位电压 V_{reset} (下简称复位电压)之和。而在双主双辅结构里每个开关承受的电压是输入电压或复位电压,也就是说原

先一个开关承担的电压现在由两个开关分别承担。从这个角度理解,这种结构和三电平DC/DC变换器的思路非常相似。文献[13]中已经将双管正激变换器称为简化的三电平正激变换器。这里同样也可以将双主双辅ACF称为简化的三电平ACF。

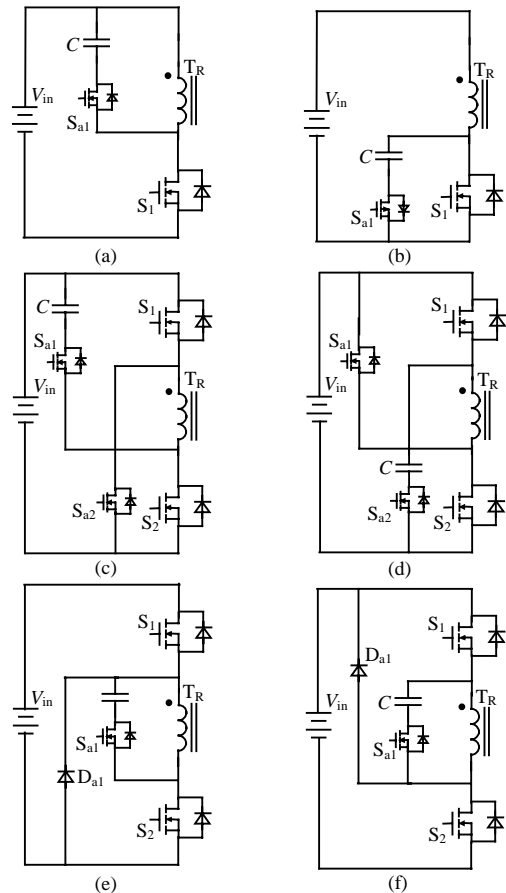


图2 ACF 原边电路的各种变形结构

Fig.2 Transfigurations of primary side circuit of active clamp forward converter

图3详细展示了从三电平ACF向双主双辅ACF的等效和演化过程。在图3(a)中,为了降低开关电压应力,简单地用两个开关串联代替原来的一个开关(主开关和辅助开关都是如此)。由文献[13]对三电平DC/DC变换器的构造思路可以知道还必须加上钳位二极管 D_1 和 D_2 对串连的两个开关电压应力进行可控性分配。对应于图中 D_1 、 D_2 的这种接法, S_2 应比 S_1 先关断, S_{a1} 应比 S_{a2} 先关断。钳位电容 C 上的电压为变压器提供复位电压 V_{reset} ,它可能大于输入电压 V_{in} ,也可能小于 V_{in} ,在这里将其拆成固定项 V_{in} 和补偿项 V_C 两部分,即 $V_{reset}=V_{in}+V_C$ 。虚线框A与 S_{a2} 串联连接,可以将它们交换次序;虚线框B与 S_1 串联连接,也可以将它们交换次序,这样就得到图3(b)的结构了。然后

不改变电路结构,将图3(b)画成图3(c)的形状。这

时可以看到，若将两个电压源 V_{in} 并联起来并不会改变电路的工作状况，同时 D_1 可以由 S_{a1} 的体二极管代替，所以可以省去；同样 D_2 可以由 S_2 的体二极管代替，也可以省去，这样就构成了图 3(d)。图 3(d)的结构比图 3(a) 的结构省去了两个钳位二极管 D_1 和 D_2 。并且可以发现图 3(d)的结构由于开关的体二极管相互钳位，对开关的关断次序已没有类似图 3(a) 结构中的限制了，所以不必人为地控制驱动信号的先后次序。再一个好处是：钳位电容上的电压也不是原来的复位电压了，而仅仅承受补偿复位部分，这样钳位电容的电压应力也大大降低。图 3(d)的结构就是双主双辅结构，与原始的三电平 ACF(图 3(a) 所示的结构) 相比，不仅同样实现了降低开关电压应力的目的，还具有上述的 3 个优点。图 2(c)的结构和图 2(d)的结构是类似的。

图 2(e)和(f)所示的结构有两个主开关，一个辅助开关，称为双主单辅结构。其中一个主开关承受输入电压；另一个主开关承受复位电压；辅助开关承受输入电压和复位电压之和。二极管 D_{a1} 用来对开关电压应力进行可控性分配。对应于图 2(e)的结构 S_1 应比 S_2 先关断；对应于图 2(f)的结构 S_2 应比 S_1 先关断。双主双辅结构虽然性能较佳，但是结构相对复杂，有 4 个开关，需要四套驱动电路。实际上辅助开关的电流应力非常小，即使使用性能较差的高压 MOSFET 也是可以忍受的，这样可以省去一个开关和一套驱动电路。所以双主单辅结构是一种折衷的方案，可用在输入电压不是特别高的场合。

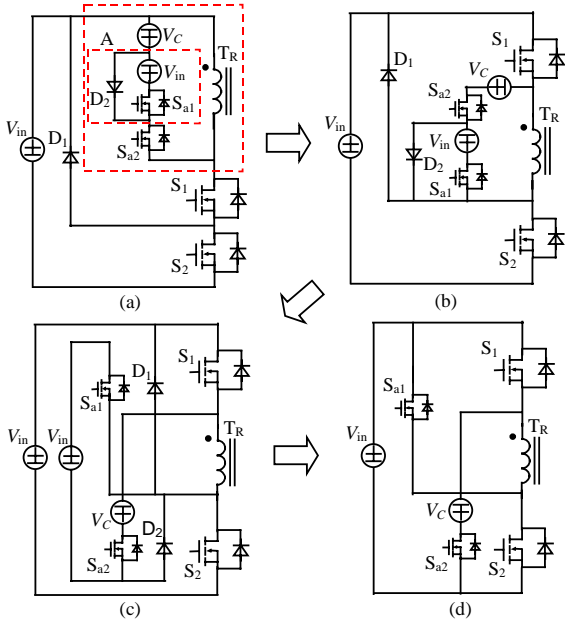


图 3 三电平 ACF 的简化
Fig.3 Simplification of three level active clamp forward converter

表 1 给出了上述各种 ACF 原边电路结构的性能比较。其中低边驱动是指驱动的地线和输入电源的地线相连的驱动；而高边驱动是指驱动的地线和输入电源的地线不相连的驱动。

表 1 各种原边电路结构的性能比较
Tab.1 Performance comparison of the primary side circuits

	单主单辅 (a)	单主单辅 (b)	双主双辅 (c)(d)	双主单辅 (e)(f)
主开关电压应力	$V_{in}+V_{reset}$	$V_{in}+V_{reset}$	V_{in} 或 V_{reset}	V_{in} 或 V_{reset}
辅助开关电压应力	$V_{in}+V_{reset}$	$V_{in}+V_{reset}$	V_{in} 或 V_{reset}	$V_{in}+V_{reset}$
开关数量	2	2	4	3
低边驱动数量	1	2	2	2
高边驱动数量	1	0	2	1
钳位电容电压	$V_{in}+V_{reset}$	$V_{reset}-V_{in}$	$V_{reset}-V_{in}$	$V_{in}+V_{reset}$

4 各种副边电路

典型的 ACF 的副边电路如图 4(a)所示。 D_{R1} 称为整流二极管，在 DT 阶段承受负载电流； D_{R2} 称为续流二极管，在 $(1-D)T$ 阶段承受负载电流。

图 4(c)所示的是中心抽头式的整流电路，也可以作为 ACF 的副边电路。但是这种结构的 ACF 和典型的单端 ACF 的工作过程有所差异。在 DT 阶段和典型的单端 ACF 类似，但是在 $(1-D)T$ 阶段却不是单纯的续流阶段，而是由变压器的激磁能量对输出侧提供能量。因此也有人将它称为正反激变换器，实际上在 $(1-D)T$ 阶段，这个电路和反激变换器还是有很大区别的。从副边的电压波形来看，这种结构有点类似不对称半桥变换器。因此输出滤波器的压力比较小。在占空比 D 为 50%的时候可以实现零电流纹波。但是这种结构中的变压器需要加气隙，以便磁芯可以储存较大的激磁能量。

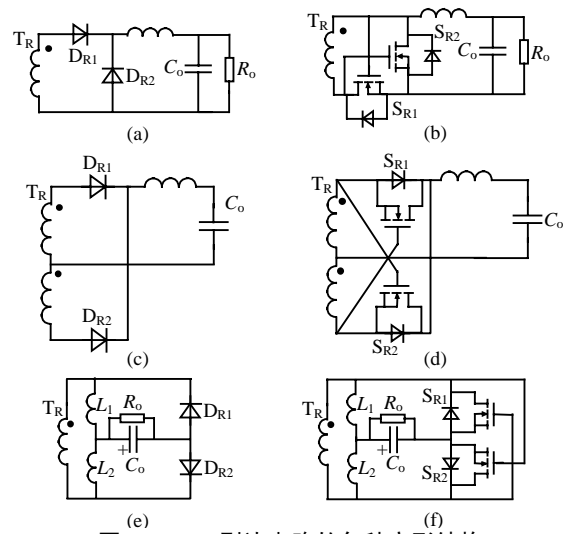


图 4 ACF 副边电路的各种变形结构
Fig.4 Transfigurations of secondary side circuit of active clamp forward converter

既然图 4(c)结构的 ACF 副边的电压波形类似不对称半桥变换器,那么如图 4(e)所示的倍流结构也就非常好理解了。这个结构的优点是变压器副边只有一个绕组,并且铜损会比较小,适用于大电流输出的场合。

对于低电压输出的场合,可以采用同步整流的结构。同步整流的驱动问题是同步整流技术中的关键。上面已经分析,不管 ACF 原边采用哪种结构,其变压器上电压波形始终为完整的方波,这就为 ACF 的同步整流带来了便利,即可以简单地采用自驱动的方案。图 4(b)、(d)、(f)的结构分别是图 4(a)、(c)、(e)所对应的同步整流自驱动结构。

5 软开关的实现

软开关的实现对于提高标准模块的开关管频率进而提高标准模块的功率密度有重要的意义。对于系统集成的候选拓扑来说,软开关实现的难易程度也是一个重要的指标。上面描述了 ACF 的 6 种原边电路结构和 6 种副边电路结构。由这些原副边电路结构组合起来的 ACF 中的辅助开关都很容易实现软开关,而主开关通常都是工作在硬开关状态。上面的分析都是原边电路和副边电路完全独立状态下进行的,然而主开关软开关的实现需要原副边的配合才能较好地获得。下面的软开关都是指主开关的软开关。

以原边结构(c)和副边结构(a)组成的ACF来讨论,实现软开关的条件有 3 个方案。第 1 个方案如图 5(a)所示, $t_0 \sim t_1$ 是死区时间,实际上非常短,为了能看清楚,故意将其画得比较长,在这段时间里可以近似认为 i_{Lm} 和 i_{DR1} 保持不变,分别为 I_m 和 I_L 。

$$I_m = \frac{V_{in}DT}{2L_m} \quad (1)$$

$$I_L = I_o - \frac{V_o(1-D)T}{2L} \quad (2)$$

式中 D 是占空比; T 是开关周期; I_o 是输出电流。

在辅助开关 S_{a1} 关断之后,先是由激磁电流 I_m 对主开关 S_1 的输出结电容 C_{oss1} 放电(辅助开关的结电容相对主开关来说可以忽略不计),直至 C_{oss1} 上的电压降至 V_{in} , 此时副边二极管 D_{R1} 导通。如果能满足条件

$$(I_m - I_L) \geq \frac{V_{in}C_{oss1}}{t_1 - t_0} \quad (3)$$

则由 $(I_m - I_L)$ 继续对 C_{oss1} 放电直至零,实现软开关条件。将式(1)、(2)代入(3)可得

$$\frac{V_{in}DT}{2L_m} + \frac{V_o(1-D)T}{2L} - I_o \geq \frac{V_{in}C_{oss1}}{t_1 - t_0} \quad (4)$$

所以实现软开关的第一个思路是将 L_m 设计得比较小,并且将 L 也设计得比较小,来满足条件(4)。当然 I_L 最小也只能设计成零,即断续状态。

第 2 个方案是针对副边采用同步整流结构的正激变换器。对于这种结构 I_L 还可以设计成小于零,如图 5(b)所示,这样更加容易满足软开关条件。

当输出纹波要求比较高而不希望将 L 设计得比较小的时候,还可以在变压器副边串联饱和电感,使得 $t_0 \sim t_1$ 时间段里变压器副边的电流一直为零,如图 5(c)所示。这样,软开关条件就要改写为

$$\frac{V_{in}DT}{2L_m} \geq \frac{V_{in}C_{oss1}}{t_1 - t_0} \quad (5)$$

这样软开关条件就和 L 没有关系了,可以单纯的设计变压器激磁电感来满足要求。这就是第 3 种方案,也是最可取的 1 种方案。

在系统集成方案里,可以将标准模块设计成硬开关状态,留出一对和变压器原边或副边相连的端口,当应用于效率要求非常高的场合,外挂一个电感配件来减小等效的激磁电感 L_m , 从而加强软开关的条件。

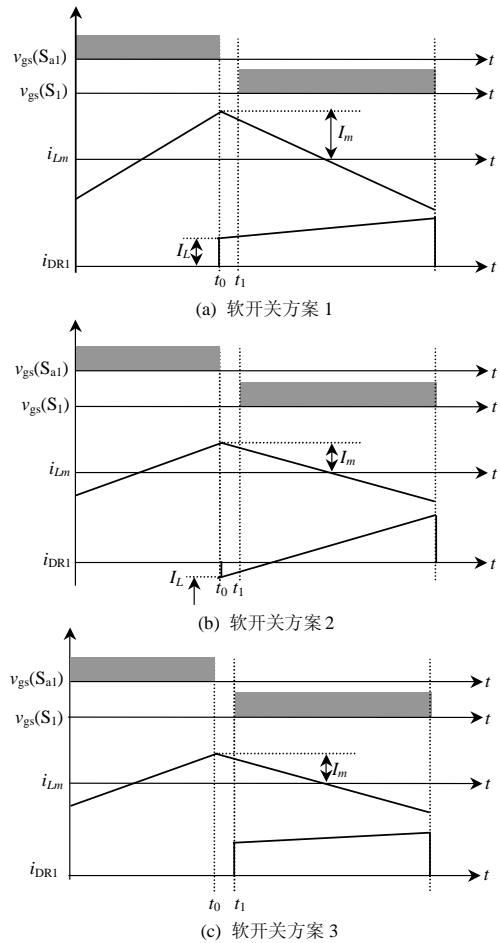


图 5 原理波形

Fig.5 Principle waveform

6 实验结果

一台采用原边结构(c)与副边结构(a)相结合的样机验证了双主双辅结构的特性。同时样机中采用了饱和电感来实现软开关,验证了实现控制性软开关的第 3 个方案。该变换器输入电压为: 250V~400V; 输出电压: 54V; 输出电流: 0~5A; 开关频率: 100KHz。图 6 是实验波形,可以看到四个开关的电压应力和以上分析的一致。并且四个开关都实现了 ZVS, 证明实现软开关的第三个思路是正确、可行的。

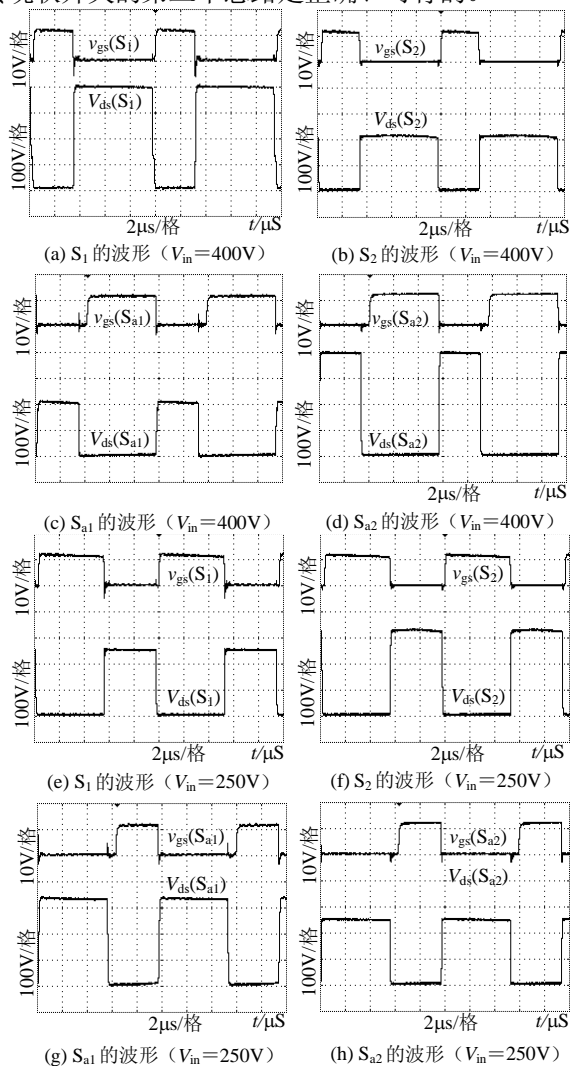


图 6 实验波形 ($I_o=5A$)

Fig.6 Experimental waveform ($I_o=5A$)

7 结论

有源箝位正激型变换器具有极佳的宽范围适用性、较低的开关电应力、简单的同步整流自驱动方式,非常适合作为中小功率电力电子系统集成中 DC/DC 标准模块的候选拓扑。所描述的各种原边电路的变化结构是为了适应不同输入要求; 而各种副边电路的变化结构是为了适应各种不同输出要求。

文中还证明了双主双辅 ACF 和三电平 ACF 是等效的。ACF 三种控制性软开关的方案以第三种最实际可行。在系统集成方案里, 以可选择性外挂配件的形式选择硬开关还是软开关工作状态。

参考文献

- [1] 钱照明, 张军明, 吕征宇. 电力电子系统集成[J]. 中国集成电路, Qian Zhaoming, Zhang Junming, Lu Zhangyu. Power Electronics System Integration[J]. China Integrated Circuit, 2003, (50), 39-45.
- [2] 王兆安, 杨旭, 王晓宝. 电力电子集成技术的现状及发展方向[J]. 电力电子技术, 2003, 37(5): 90-94. Wang Zhaoan, Yang Xu, Wang Xiaobao. State-of-art and Development Trends of Power Electronics Integration Technology [J]. Power Electronics, 2003, 37(5): 90-94.
- [3] 陈文洁, 杨旭, 杨栓科, 等. 分立元件构成的电力电子集成功率模块的设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 104-110. Chen Wenjie, Yangxu, Yang Shuanke et al. A design of discrete components based integrated power modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 104-110.
- [4] 赵川红, 徐德鸿, 范海峰, 等. PWM 加移相控制的双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 72-77. Zhao Chuanhong, Xu Dehong, Fan Haifeng et al. A PWM plus phase-shift control bidirectional DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 72-77.
- [5] 詹长江, 陈坚. 三电平脉宽调制高频整流器系统数学模型及仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 45-48. Zhan Changjiang, Chen Jian. Study on mathematical model and system simulation of the three-level PWM reversible rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 45-48.
- [6] 顾亦磊, 吕征宇, 钱照明. 一种新型的三电平软开关谐振型 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 24-28. Gu Yilei, Lu Zhengyu, Qian Zhaoming. A novel three level soft switching resonant DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 24-28.
- [7] 潘尚志, 钱照明, 雷娜. 一种通用的新型单/双正激型直流变换器电路仿真平均模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 58-62. Pan Shangzhi, Qian Zhaoming, Lei Na. A average model for unified forward DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 58-62.
- [8] 张方华, 王慧贞, 严仰光. 推挽正激整流及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 168-173. Zhang Fanghua, Wang Huizhen, Yan Yangguang. The push-pull forward rectifier and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 168-173.
- [9] Rozman A F, Richardson. Low loss synchronous rectifier for application to clamped-mode forward[P]. US Patent, No.: 5303138, Apr. 12, 1994.
- [10] Ji H K, Kim H J. Active clamp forward converter with MOSFET synchronous rectification[C]. IEEE PESC Proceedings, 1994, 2, 895-901.
- [11] Laszlo Huber, Milan M J. Forward-flyback converter with current-doubler rectifier: analysis, design, and evaluation results[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1999, 14(1): 184-192.
- [12] Tan F D. The forward converter: from the classic to the contemporary [C]. IEEE APEC 2002: 857-863.
- [13] Xinbo Ruan, Bin Li, Qianhong Chen. Three-level Converters—a new approach for high voltage and high power DC-to-DC converter [C]. IEEE PESC Proceedings, 2002: 663-668.

收稿日期: 2004-11-22。

作者简介:

顾亦磊 (1978-), 男, 博士研究生, 现从事电力电子电路拓扑和电源系统集成的研究。