

# DC/DC 拓扑的分类和选择标准

顾亦磊,吕征宇,钱照明

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 为了提高电力电子产品设计者选择 DC/DC 拓扑的准确性和快速性,分析了现有市场上主流的通信、电脑用电源中 DC/DC 的应用特点,从电气规格出发提出了电力电子产品设计中 DC/DC 变换器的电路拓扑选择的四大标准:输入电压高低决定是否采用软开关;输出电压高低决定是否采用同步整流;输入输出电压变换范围宽窄决定是否采用宽范围拓扑;功率大小决定候选拓扑的开关数量。通过一个关于通信电源中 DC/DC 拓扑初选的例子说明了所提四大标准的用法,并证实了四大标准的实用性和有效性。针对一些经典的 DC/DC 拓扑和最新的 DC/DC 拓扑与这四大标准的关系进行了评价,得出了电气规格和拓扑之间的直接对应关系的表格,便于电力电子产品设计者参考。

**关键词:** 直流-直流;经典拓扑;选择标准

**中图分类号:** TM46; TM13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-973X(2004)10-1375-05

## DC/DC topology classification and selection criterion

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

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

**Abstract:** Popular communication and computer power structures in the present market were analyzed to find ways to improve the veracity and efficiency of power electronics products designers selecting DC/DC topologies. Electrical specification's four novel selection criteria of DC/DC topologies for power product design were presented. Input voltage determines whether the soft switching technique is adopted; output voltage range determines whether the synchronous rectifier technique is adopted; input voltage range determines whether the wide range topology is adopted; conversion power determines the quantity and size of switches of the candidate topology. An example of DC/DC topology selection for communication power was given to show how to use the four criteria, which shows the validity of the criteria. Some classical and novel topologies were evaluated according to these four criteria. For consulting convenience of the power product designer, a table was presented to show the direct relation between electrical specifications and DC/DC topologies.

**Key words:** DC/DC; classical topologies; selection criterion

电力电子产品一般都可以分解成 AC/DC、DC/DC 和 DC/AC 三种变换类中的一种或多种,每一种变换类又有很多种拓扑结构,其中以 DC/DC 的拓扑结构最多,目前研究的也最多。

DC/DC 拓扑发展到现在已不乏许多经典拓扑,然而目前仍有新的拓扑陆续问世。对于大多数电源产品的设计者来说,挑选合适的 DC/DC 拓扑是一项

非常艰巨的任务,但是目前还没有系统、简单、有效的 DC/DC 拓扑筛选标准。所以,提出合适的 DC/DC 拓扑的评价、筛选标准是非常有必要的。根据此标准电源产品设计者可以对大量的 DC/DC 拓扑进行初次的筛选,挑选出少数几种适合某个特定产品的 DC/DC 拓扑,将大大节省时间,提高挑选的准确性。

收稿日期: 2003-10-16.

浙江大学学报(工学版)网址: [www.journals.zju.edu.cn/eng](http://www.journals.zju.edu.cn/eng)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50237030ZD)。

作者简介: 顾亦磊(1978—),男,浙江象山人,博士生,从事电力电子电路拓扑和电源系统集成的研究。E-mail: [guyilei9602@shnu.com](mailto:guyilei9602@shnu.com)

# 1 主流电源产品中 DC/DC 的分析

目前世界上电源产品中 DC/DC 部分已经成为最主要、最核心的部分. 通信设备、电脑设备的供电大多数是直流电压供电. 目前照明虽然还是以交流电压供电为主,但是随着 LED (low emitting diode) 技术(主要是白光合成技术)的发展以及应用领域的扩展,直流电压供电的产品额会逐渐扩大. 此外目前的高强度气体放电灯的驱动器中也通常有 DC/DC 环节.

目前的通信设备电源和电脑服务器电源通常采用分布式电源结构 (distributed power system, DPS), 如图 1(a) 所示. 首先 220 V 或 110 V 市电经过 PFC 电路变换成 400 V 的直流电压;然后由一个功率相对比较大的一次 DC/DC 变换器,将 400 V 的直流电压变换成 48 V/24 V (48 V 或 24 V) 的直流电压给通信或服务器的主设备供电. 但是还有其他的一些设备需要更低的电压供电,48 V/24 V 后面还会有很多个功率相对较小的二次电源变换成 12 V/5 V/3.3 V/2.5 V 等的直流电压. 通常 CPU 的工作电压更加低,而且对负载突变下的电压调整率要求非常高,所以后面还会有一个或多个称为电压调整模块 (voltage regulator module, VRM) 的 DC/DC 专门给 CPU 供电. 有时电信公司用的主功率是 48 V 系统,但是某些特殊设备是 24 V 供电;有时反之,所以还会用到 48 V 24 V 或 24 V 48 V 的 DC/DC 电源.

通常有四种 DC/DC 变换器: 400 V 48 V/24 V; 48 V/24 V 12 V/5 V/3.3 V/2.5 V; 12 V/5 V/3.3 V 1.8 V/1.5 V/1.2 V/1 V; 48 V 24 V 或 24 V 48 V. 其中 和 通常是隔离型的 DC/DC.

图 1(b) 是典型的 UPS 内部结构. 市电正常时,由 PFC 电路将 220 V/110 V 的市电变换成 400 V 的直流电压,然后再由一个逆变器 (DC/AC) 将 400 V 的直流电压逆变成稳定、精确的 220 V/110 V 的交流电压给重要电器供电. 停电时由 48 V 的蓄电池通过一个升压型的 DC/DC 升压到 400 V,再由逆变器逆变成 220 V/110 V 的交流电压给负载供电. 再次来电时由一个降压型的 DC/DC 把 400 V 变换成 48 V 给蓄电池充电. 这里 有 两 种 DC/DC 变 换 器: 400 V 48 V; 48 V 400 V.

图 1(c) 是桌面机 (例如个人电脑) 的电源结构. 先由 PFC 电路将市电变换成 400 V 的直流电压,再经过一个多路输出的 DC/DC 变换成多路的较低的直流电压给不同负载供电. 图 1(d) 是笔记本电脑适配器的电路结构. 首先由 PFC 将市电变换成 400 V 的直流电压,然后经过一个 DC/DC 变换器降压至 19 V (典型值) 给负载供电.

## 2 DC/DC 拓扑选择的实用标准

DC/DC 拓扑的种类繁多,对于大多数电源产品的设计者来说,挑选合适的拓扑结构是一项非常艰

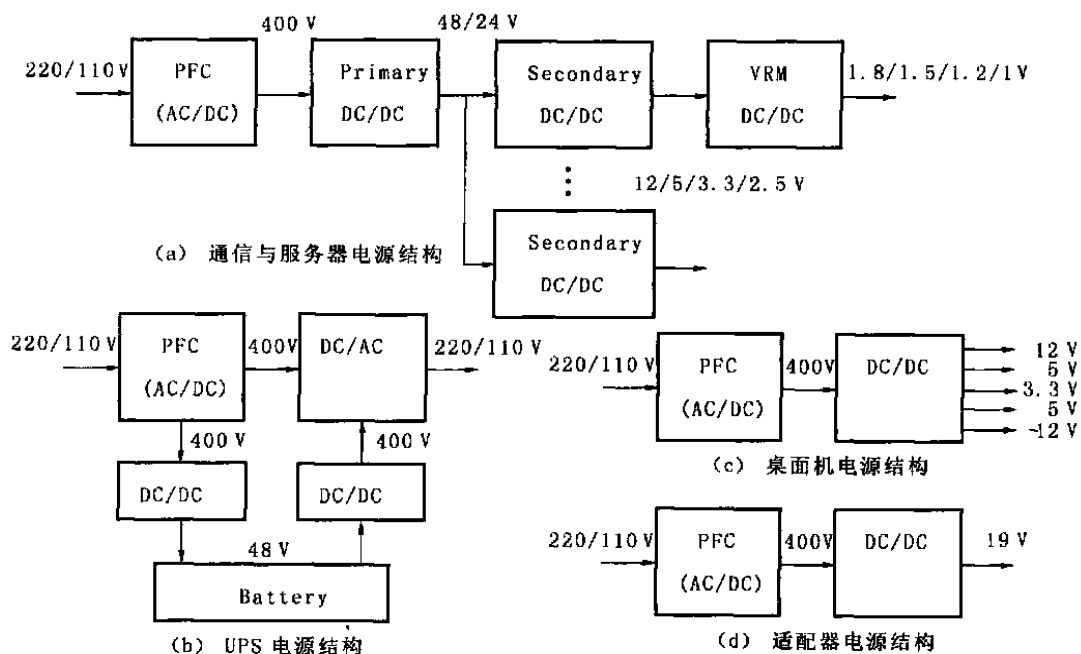


图 1 主流电源设备内部结构

Fig. 1 Structure of mainstream power supply

巨的任务.下面提出在不同应用场合挑选 DC/DC 拓扑的四大关键标准.根据此标准就可以对大量的 DC/DC 拓扑进行初次的筛选,挑选出少数几种适合某个特定产品的 DC/DC 拓扑,大大节省了时间,提高了挑选的准确性.

非隔离型的 DC/DC 拓扑结构并不多,通常根据电压的升降要求以及简单性原则就可以比较容易确定最佳方案.所以下面的标准主要是针对隔离型的 DC/DC.此外,标准的量化是建立在目前元器件的水平上.随着元器件的发展,这些标准的量化也是动态发展的;再者,电源轻小化是目前主流电源追求的重要指标,轻小化体现在电力电子线路上就是要求高频化.所以下面的标准也是建立在电源体积要尽量小的前提下.

四大标准如下:

1) 输入电压高低.输入电压的高低决定了是不是要采用零电压开关(zero voltage switching, ZVS)技术.因为,若是硬开关,开关损耗可近似表示为

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{4} V_{\text{ds}} I_{\text{ds}} + \frac{1}{2} C_{\text{oss}} V_{\text{ds}}^2. \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{ds}}$  为开关开通前漏源间电压,通常和输入电压成正比;  $I_{\text{ds}}$  为开关导通后的电流;  $C_{\text{oss}}$  为开关的等效输出电容.

可以看出第二项开关损耗和输入电压的平方成正比.因此,输入电压越高越有必要采用 ZVS 技术.通常输入电压高于 200 V 就需要采用 ZVS(主开关为 MOSFET),因此,200 V 可以作为 DC/DC 变换器输入电压高低的分界.

2) 输出电压高低.输出电压的高低决定了要不要使用同步整流技术(synchronous rectifier, S.R.).目前市场上最低耐压的肖特基二极管的导通压降都在 0.5 V 以上.通常副边二极管整流的损耗占输出功率的比例可近似表示为

$$\frac{P_{\text{loss}}}{P_o} = \frac{V_T}{V_o}. \quad (2)$$

式中:  $V_T$  为二极管的导通压降,  $V_o$  为输出电压.

输出电压越低,  $P_{\text{loss}}$  的比例就越高,且直接和输出电压成反比.若采用同步整流,可以用多个 MOSFET 并联使得导通损耗降至可以承受的范围.目前的电源产品通常在输出电压为 12 V 以下时才会采用同步整流;当输出电压为 12 ~ 20 V 时,效率要求较高场合也采用同步整流;输出电压高于 20 V 基本不采用同步整流技术.因此,20 V 可以作为 DC/DC 变换器输出电压高低的分界.

3) 输入输出范围宽窄.通常电源的输入电压和

输出电压都有一个变化范围.这里先定义一个指标变化范围“Range”:

$$\text{Range} = \frac{V_{\text{inmax}} V_{\text{omax}}}{V_{\text{inmin}} V_{\text{omin}}}. \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{inmax}}$  是输入电压最大值,  $V_{\text{inmin}}$  是输入电压最小值,  $V_{\text{omax}}$  是输出电压最大值,  $V_{\text{omin}}$  是输出电压最小值.

Range 的大小要求电路拓扑具有两个特性:第一,可工作区占空比  $D$  的范围;第二,输入输出电压和占空比  $D$  的关系.通常 DC/DC 拓扑占空比  $D$  的范围有两种可能,即 0% ~ 50% 或 0% ~ 100% (也有例外的).当然相对而言  $D$  可运行在 0% ~ 100% 更适合 Range 大的场合.输入输出电压和  $D$  的关系通常有四种情况:  $D$ 、 $1/(1-D)$ 、 $D/(1-D)$ 、 $D(1-D)$ .这四种关系对于 Range 大的场合下的适用性的排序为  $D/(1-D) > 1/(1-D) > D > D(1-D)$ .上面是针对 PWM 型的 DC/DC 而言的,对于谐振型的 DC/DC 就是输入输出电压和频率  $f$  的关系.通常在  $\text{Range} > 1.5$ ,就可以认为有宽范围要求,在选用拓扑时就要考虑拓扑的宽范围适用性.因此,DC/DC 变换器的输入输出变化范围分界可以定在 1.5 倍.

4) 功率大小等级:功率大小决定了候选拓扑的开关数量的多少.一般 DC/DC 变换器的主开关有 1、2、4 个和 4 个以上.通常主开关的数量越少越适合于小功率变换;主开关数量越多越适合大功率变换.1 kW 以上可以考虑 4 或 4 以上开关的 DC/DC 拓扑.1 kW 以下则考虑 1 或 2 开关 DC/DC 拓扑.因此,DC/DC 变换器的功率大小分界可以定在 1 kW.

### 3 常用拓扑与标准的关系

下面针对一些经典的和最新的拓扑与四大标准的关系进行评判,然后得出电源规格和拓扑结构的直接对应关系.

ZVS 是每一个拓扑经过一些辅助的电路都能实现的.但是在绝大多数的工业应用中都是利用拓扑自身的特点来实现 ZVS 的.因此,每个拓扑就有一个实现 ZVS 难易程度的指标,这样在有 ZVS 要求的场合,就可以尽量选用容易自然实现 ZVS 的拓扑,而不需要额外的电路和代价.现有 DC/DC 拓扑中,例如不对称半桥<sup>[4]</sup>、移相全桥、Yungtaek 全桥<sup>[11]</sup>、LLC 串联谐振变换器<sup>[1,7]</sup>等可以简单实现 ZVS.它们都有一个特点:存在半桥结构的桥臂,并且桥臂上的两个开关互补导通.这样同一桥臂的两个开关可

以互相利用,作为 ZVS 的辅助开关,再利用变压器的漏感、励磁电感或是滤波电感作为抽取开关输出电容上电荷的电流源,就可以不加任何其他电路实现 ZVS. 根据电流源的强弱还可以细分 ZVS 实现的容易程度. 通常滤波电感要大于励磁电感,励磁电感要大于漏感;负载电流要大于励磁电流. 有源箝位型正激<sup>[5,8,10]</sup>的箝位开关和主开关也构成一个半桥结构,但是由于该拓扑工作原理的原因,其抽取电荷的电流源只是励磁电流加在漏感上的能量,在数量上比较小(除非人为的增大漏感),ZVS 技术不容易实现.

同样,同步整流也是任何一个拓扑都能实现的. 但是有的拓扑可以很轻松地得到极佳的同步整流驱动信号和驱动能量,而有的拓扑却要外加很多电路才能得到驱动信号和能量或是驱动的波形不理想. 因此,DC/DC 拓扑还存在一个同步整流实现难易程度的指标. 例如有源箝位型正激、不对称半桥、Boost-H/B<sup>[9]</sup>,这几种拓扑变压器上的电压波形都是完整的方波,可以直接作为同步整流的驱动波形,并且具有较大的驱动能量. 所以这些 DC/DC 拓扑是很容易实现同步整流的. 但是对于谐振型的 DC/DC,同步整流的驱动信号就较难获得.

Range 大小对 DC/DC 拓扑的占空比  $D$  的要求上面已阐述. 例如反激的可工作  $D$  为  $0\% \sim 100\%$ ,并且输出电压/输入电压和  $D$  的关系是  $D/(1-D)$  关系,所以非常适合宽范围要求. 有源箝位型正激可工作  $D$  为  $0\% \sim 100\%$ ,输出电压/输入电压和  $D$  的关系是  $D/(1-D)$  的关系,也比较适合宽范围要求. 而普通的双管正激可工作占空比  $D$  在  $0\% \sim 50\%$ ,所以相对来说,宽范围适应性就要差一些. 再者,像不对称半桥有效  $D$  是  $0\% \sim 50\%$ ,且输出电压/输入电压和  $D$  的关系是  $D(1-D)$  的关系,所以极不适合宽范围要求场合.

表 1 是经典 DC/DC 拓扑和最新的 DC/DC 拓扑与四大选择标准的关系. 表 2 是根据表 1 和以上的分析,得到 DC/DC 拓扑和电源产品电气规格的直接对应关系,可供电源产品设计者方便的使用. 由于篇幅关系,表 1 和表 2 的详细分析略. 其中提到一些最新的 DC/DC 拓扑可以参见文献[1,7,9,11].

上面根据电源的电气规格提出了 DC/DC 拓扑的四大选择标准以及相应拓扑,事实上还存在很多更细节的选择标准及其相应拓扑,限于篇幅不予详述.

表 1 DC/DC 拓扑与四大选择标准的关系

Tab. 1 Relation between DC/DC topologies and four selection crerterions

拓 扑	ZVS	switch	range	S. R. drive
反 激	Bad	1	Perfect	Good
有源箝位型正激	Bad	1 or 2	Perfect	Perfect
谐振复位型正激	Bad	1 or 2	Perfect	Good
不对称半桥	Good	2	Bad	Perfect
对称半桥	Bad	2	Good	Good
移相全桥	Good	4	Good	Good
Young Taek 全桥	Perfect	4	Good	Good
双管正激	Bad	2	Good	Good
推 挽	Bad	2	Good	Good
LLC 串联谐振	Perfect	2 or 4	Good	Bad
Boost-H/B	Bad	1	Perfect	Perfect

表 2 DC/DC 拓扑和电源产品电气规格的直接对应关系

Tab. 2 Direct relation between DC/DC topologies and electrical specifications of power products

拓 扑	高输入电压	低输出电压	宽范围	大功率	小功率
反 激	-	OK	OK	-	OK
有源箝位型正激	-	OK	OK	-	OK
谐振复位型正激	-	OK	OK	-	OK
不对称半桥	OK	OK	-	-	OK
对称半桥	-	OK	OK	-	OK
移相全桥	OK	OK	OK	OK	-
Young Taek 全桥	OK	OK	OK	OK	-
双管正激	-	OK	OK	-	OK
推 挽	-	OK	OK	-	OK
LLC 串联谐振	OK	-	OK	OK	OK
Boost-H/B	-	OK	OK	-	OK

#### 4 选择标准的应用例子

为了验证四个准则的准确性和有效性,下面举一个 3 000 W 的通信电源的例子.

上面已介绍了典型的通信电源中有两种隔离型的 DC/DC 变换器: 400 V 48 V;48 V 3.3 V. 下面对这两种变换器应用以上的拓扑选择方法进行拓扑选择.

1) 400 V 48 V: 通常有保持时间的要求,需要输入电压范围尽量宽,要求 300 ~ 400 V 的输入范围;另外输出电压要求 40 ~ 60 V 可调. 根据以上的判断标准,属于高电压输入,需要采用 ZVS 技术;高电压输出,不需要同步整流;较宽变化范围,最好选用能适应较宽变化范围的拓扑;大功率、主开关的数量应多一些. 按四大标准分析后,再查看表 2,可以

发现移相全桥、Yungtaek 全桥、LLC 串联谐振变换器是合适的候选拓扑;然后再根据细节的电气规格进行第二次筛选.本文的目的是完成第一次初选.

2) 48 V 3.3 V: 这是二次电源,功率通常较小,典型的是 100 W.行业中的标准是输入电压 36 ~ 75 V 可变,输出电压 3.0 ~ 3.6 V 可调.根据以上的判断标准,属于低输入电压,没必要采用 ZVS 技术.低电压输出,所以需要采用同步整流技术.变化范围非常宽.查看表 2,发现反激、有源箝位型正激、谐振复位型正激<sup>[2,3,5]</sup>、对称半桥、双管正激、推挽式变换器、Boost-H/B 是合适的候选拓扑.因为是低压输入没有 ZVS 的限制,拓扑的选用就自由很多.从现有的产品来看以上的几种 DC/DC 拓扑都有采用.由表 1 可知,最适用的拓扑是有源箝位型正激、谐振复位型正激、Boost-H/B.

## 5 结 语

本文分析了现有市场上主流的通信、电脑用电源中 DC/DC 的应用特点.从电气规格出发提出了电力电子产品设计中 DC/DC 变换器的电路拓扑选择的四大标准.针对这四大标准,对一些经典的 DC/DC 拓扑和最新的 DC/DC 拓扑进行评价,得到表 1.然后根据表 1 和四大标准得出电气规格和拓扑之间的直接对应关系表 2,方便了电力电子产品设计者参考.关于通信电源设计时 DC/DC 拓扑初选的例子进一步说明了四大准则的用法,证实了四大准则的实用性和有效性.关于 DC/DC 拓扑结构的选择标准和针对现有 DC/DC 拓扑的系统比较和评价工作对电源产品设计者很有实用价值.但是此工作刚刚开始,还需要补充和完善.

## 参考文献(References):

- [1] HUANG G S, ZHANG J F, GU Y L. LLC series resonant DC to-DC converter [P]. US Patent: 6344979, 2002-02-05.
- [2] ZHANG J F, HUANG G S, GU Y L. Synchronous rectifier circuit [P]. US Patent: 6370044, 2002-04-09.
- [3] HUANG G S, GU Y L, LIU Z Z, *et al.* Resonant reset dual switch forward DC-to-DC converter [P]. US Patent: 6469915, 2002-10-22.
- [4] PRAVEEN K J, KANATA. Asymmetrical pulse width modulated resonant DC/DC converter[P]. US Patent: 5159541, 1992-10-27.
- [5] ROZMAN A F, RICHARDSON. Low loss synchronous rectifier for application to clamped-mode forward [P]. US Patent: 5303138, 1994-04-12.
- [6] FRONK K T, DERRY. Synchronous rectifier drive mechanism for resonant reset forward converters[P]. US Patent: 6181578, 2001-01-30.
- [7] YANG B, LEE F C, REN Y C. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion [A]. **IEEE APEC** [C]. Dallas, Texas: IEEE, 2002: 1108-1112.
- [8] MURAKAMI N, NAMIKI H, SAKAKIBARA K. A simple and efficient synchronous rectifier for forward DC/DC converters [A]. **IEEE APEC** [C]. San Diego, California: IEEE, 1993: 463-468.
- [9] WATANABE H, HATAKEYAMA H. Switching power supply [P]. US Patent: 6064580, 2000-05-16.
- [10] ZHANG J F, HUANG G S, GU Y L. Asymmetrical full bridge DC-to-DC converter[P]. US Patent: 6466458, 2002-10-15.
- [11] JANG Y, MILAN J. Soft-switched full-bridge converter [P]. US Patent: 6392902, 2002-05-21.

(上接第 1297 页)

- [6] 赵洪山,米增强,牛东晓,等.利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(1):20-25.  
ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, NIU Dong-xiao, *et al.* Power system modeling using hybrid system theory [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(1): 20-25.
- [7] ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, SONG Wei, *et al.* Multiple lyapunov functions analysis of hybrid power systems with discrete event actions[A]. **Power Conference 2002** [C]. Kunming, China: Yunnan Science and Technology Press, 2002: 2026-2029.
- [8] 赵洪山,米增强,任惠,等.含有 OLTC 的电力系统的模型

与分析[J].华北电力大学学报,2003,30(2):1-5.

ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, REN Hui, *et al.* Model and analysis of hybrid power systems with OLTC [J]. **Journal of China Electric Power University**, 2003, 30(2): 1-5.

- [9] HILL D J, MAREELS I M Y. Stability theory for differential/algebraic systems with application to power systems [J]. **IEEE Transaction on Circuits and Systems**, 1990, 37(11): 1416-1423.
- [10] 廖晓昕.动力系统的稳定性理论和应用[M].北京:国防工业出版社,2000:4-6.