

# 99% 高效隔离三相矩阵型 DAB 降压-升压功率因数校正整流器

Lukas Schrittwieser, *Member, IEEE*, Michael Leibl, *Member, IEEE*, and Johann W. Kolar, *Fellow, IEEE*

**摘要**—三相功率因数校正整流器是电力电子的一个重要领域，它从公共三相电源向直流负载提供几十千瓦或更多的功率，并实现电流的正弦输入。在许多应用中，例如为了确保安全或出于不同的接地方案等原因，电源和负载之间需要进行隔离。本文介绍了一种降压-升压型、单位功率因数、隔离矩阵型、双有源桥三相整流器的调制、设计和实现。它使用了一个与传统的双有源桥相似的电路，但采用直接矩阵变换器将高频变压器的初级绕组和电源相连。提出并综合分析了一种软开关调制方案，导出了闭合形式的解和数值优化问题，以计算实现最小传导损耗的开关时间。在此分析的基础上，讨论了 8-kW 400V 有效值的三相交流至 400V 直流样机的设计，力求实现最高的效率。我们使用 900V 的碳化硅 MOSFETS 和一个有集成电感的变压器，功率密度可达  $4kW \cdot dm^{-3}$  ( $66W \cdot in^{-3}$ )。测量结果表明，标称工作条件下的超高全功率效率为 99.0%，输入电压低 10% 时为 98.7%。

**关键词**—直接矩阵型，双有源桥，隔离型整流器，三相功率因数校正转换器。

## I. 绪论

近年来，住宅区和商业或办公建筑中固有直流 (dc) 负载的数量和功率需求显著增加。这些负载包括电动汽车、LED 照明、节能空调和通风系统的变速驱动器以及信息和通信技术设备，如台式计算机、服务器和数据中心。同时，作为可再生能源，如光伏板和小风力涡轮机，产生的直流电的数量也在增加。因此，仅跨越单个商业建筑、工业厂房或整个住宅区的直流配电系统有望降低转换损耗、提高可靠性和/或降低成本。这些被称作直流微电网的在科学文献、研究和工业中受到了极大的关注 [1]–[4]。

## II. 调制

### A. ZVS/ZCS 开关模式

$$u_p(t) = \begin{cases} u_{ac}, & 0 \leq t < \frac{1}{2} - t_2 \\ u_{ab}, & \frac{1}{2} - t_2 \leq t < \frac{1}{2} - t_1 \\ 0, & \frac{1}{2} - t_1 \leq t < \frac{1}{2} \\ -u_p(t - \frac{1}{2}), & \frac{1}{2} \leq t_1 < 1 \end{cases} \quad (1)$$

### B. 传导损耗最佳功率因数校正 (FPC) 调制

从图 1(b) 所示的整流器原理图中可以看出，变压器的一次侧绕组电流  $i_p$  是由 DMC 的四个 MOSFET 传导，而与 DMC 的导通状态无关。

1) 不连续传导模式 (DCM) : aaaaaa

2) 连续传导模式 (DCM) : bbbbbb

表 I  
标称工作条件和转换器规格

Input Voltage (Line-to-Neutral)	$U_1 = 230V_{rms}$
Input Frequency	$w = 2\pi 50Hz$
Nominal DC Output Voltage	$U_{pn} = 400V$
Nominal Output Power	$P = 8kW$
Nominal Switching Frequency	$f_{sw} = 31kHz$
Leakage Inductance	$L_1 = 36\mu H$
Turns Ratio	$n_p/n_s = 22/17 \approx 1.29$

### C. 变压器波形

对于四种不同的电源电压相角  $\omega t$ ，测量的变压器电压  $u_p$  和  $u_s$  相应的绕组电流  $i_p$  如图 22 所示。这些图是在标称工作条件下记录的，负载电流为 20 A，如表 1 所示。可以看出，初级侧绕组电压的下降沿和次级侧电压的上升沿完全发生在绕组电流  $i_p$  和  $i_s$  为正的情况下，这意味着实现了完全的 ZVS。

表 II  
与其他隔离型三相功率因数校正整流器的比较

Topology	Technology	Rated Power	DC voltage	Meas. Efficiency	Power Density
Phase-Modular SEPIC [43]	Si IGBT & Si Diodes	4 kW	400 V	90 %	unknown
Isolated Full-Bridge Boost [44]	Si IGBT	1.7kW	200 V	91 %	unknown
Swiss-Forward [21]	SiC MOSFET & SiC Schottky	3 kW	270 V	93.5 %	0.44 kW $dm^{-3}$
Matrix-Type Isolated Inverter [45]	SiC MOSFET	1.3 kW	400 V	94.1%	unknown
IMDAB3R [46]	SiC MOSFET & SiC Schottky	1.2 kW	180 V	94.4 %	unknown
Phase-Modular & Scott Transformer [47]	Si IGBT & Si Diode	12 kW	400V	95.1 %	1.33 kW $dm^{-3}$
Phase-Modular Cuk [48]	SiC MOSFET & Si Diode	2 kW	400 V	95.1 %	unknown
Phase-Modular PFC & LLC [49]	Si MOSFET & SiC Diode	10kW	300 V	95.5 %	unknown
IMDAB3R [14]	SiC MOSFET	1 kW	230 V	96.0 %	unknown
Isolated Matrix-Type $\Delta$ Rectifier [50]	SiC MOSFET & SiC Schottky	7.5 kW	400 V	97.2 %	1.03 kW $dm^{-3}$
Phase-Modular PFC & LLC [51]	GaN HEMT	22 kW	400 V	98 %	3.3kW $dm^{-3}$
This Work	SiC MOSFET	8kW	400 V	99.0%	4.0kW $dm^{-3}$

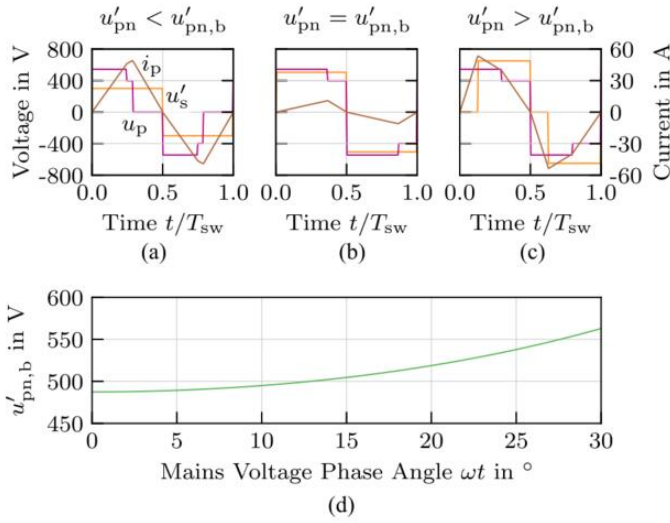


图 1.  $\omega t = 15^\circ$  的变压器电压和变压器电流，工作在 DCM 模式下的最大可能输出电流  $i_{dc,DCM,max}$ 。在 (a) 中，输出电压  $u'_{pn} = 300V$  低于边界值  $u'_{pn,b} = 505V$ ，因此， $u'_s$  的占空比是最大的， $u_p$  和  $u'_s$  的上升沿对齐。(b) 当案例  $u'_{pn} = u'_{pn,b}$  时， $u_p$  和  $u'_s$  都使用最大可能的占空比。(c) 当  $u'_{pn} = 650V > u'_{pn,b}$  时，只有  $u_p$  的占空比最大， $u_p$  和  $u'_s$  的下降沿对齐。(d)，当标称输入电压（相电压）的有效值  $U_1 = 230$  时， $u'_{pn,b}$  关于电源电压相角  $\omega t$  的函数图像。

### III. 总结和结论

本文分析了 IMDAB3R，它最初是作为车辆到电网的接口提出的。由于其结构类似于传统的 DAB 转换器，具有足够大的漏电感的隔离变压器是除 EMI 滤波器之外唯一需要的磁性元件。这简化了机械设计，并潜在地降低了成本和/或体积。此外，IMDAB3R 不需要任何电流传感器，因为通过变压器电流的开环控制，可以获得令人满意的 3% 电源输入电流 THD 值。

### 附录 A

#### 市电输入电流的方程式推导

啦啦啦啦啦

$$\xi(0) = \xi\left(\frac{1}{2}\right) = \xi(1) = 0 \quad (2)$$

$$\xi\left(t + \frac{1}{2}\right) = -\xi(t). \quad (3)$$

#### 感谢

作者要感谢 E. L. Barrios 博士分享了他在极低损耗变压器方面的知识，并帮助设计和测试了一个初始原型机。

### 参考文献

- [1] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications and standardization issues,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 5, pp. 3528–3549, May 2016.
- [2] M. Noritake, K. Yusa, T. Takeda, H. Hoshi, and K. Hirose, “Demonstrative research on DC microgrids for office buildings,” in Proc. IEEE Int. Telecommun. Energy Conf., Sep. 2014, pp. 1–5.
- [3] D. J. Becker and B. J. Sonnenberg, “DC microgrids in buildings and data centers,” in Proc. IEEE Int. Telecommun. Energy Conf., Oct. 2011, pp. 1–7.
- [4] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, “Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, Dec. 2010.



**Michael Leibl** 2010 年在奥地利维也纳的维也纳理工大学获得学士学位，2012 年在瑞士苏黎世的瑞士联邦理工学院获得硕士学位，均为电气工程专业。

他目前在瑞士森瓦尔德的布鲁萨电子公司工作。直到 2017 年，他一直在电力电子系统实验室撰写关于三相整流器和 x 光系统高压电源的博士论文，涵盖了他的主要研究兴趣，包括电感元件的优化设计，特别是高频绕组损耗建模、大功率三相功率因数校正整流器和隔离直流-直流转换器。



**Johann W. Kolar** (10) 分别于 1997 年和 1999 年在奥地利维也纳的维也纳理工大学获得硕士和博士学位。

自 1984 年以来，他一直与维也纳理工大学密切合作，在电力电子、工业电子和高性能驱动系统领域担任独立研究员和国际顾问。他提出了许多新颖的脉宽调制转换器拓扑、调制和控制概念，并指导了 70 多名博士生。他在国际期刊和会议记录中撰写或合著了 880 多篇科学论文，四本书的章节，并申请了 190 多项专利。他目前的研究重点是超紧凑和超高效的 SicAndGanConverters 系统、固态变压器、先进的变速三相电机驱动、集成模块化电机驱动、超高速电机、无轴承电机/执行器以及电力电子/机电一体化设计自动化。

中南大学  
电气 1705 陈宝轩  
翻译  
2021.02.11 (初稿)