



SHENZHEN PROMAGTECH CO.,LTD. | 深圳市谱磁科技有限公司

Technical Teardown · www.promagtech.com · PMT-DOC-2026-0822-28 · Rev A/0

Renesas 数据中心电源架构白皮书:磁性元件深度拆解

800VDC → 48V 的 16:1 LLC DCX 与矩阵变压器——白皮书对磁件提出了哪些硬要求

项目	内容
文件编号 / 版本	PMT-DOC-2026-0822-28 · Rev A/0 · 首次发布
文件名称	Renesas 数据中心电源架构白皮书:磁性元件深度拆解
拆解对象	Renesas 《Power Architecture Evolution in Data Centers》(2025-10, R30WP0013EU0100)
拆解范围	矩阵变压器、平面变压器、气隙设计、Vienna 升压电感、VPD 电感与磁集成
作者 / 审阅	张勇 — 电子工程师、谱磁科技创始人
日期	CN-1.0 / 2026-08-22
网站 / 联系	www.promagtech.com · +86 13267069291 · zyong@promagtech.cn

修订记录:A/0 2026-08-22 首次发布。谱磁技术拆解 — 非官方行业标准,亦非 Renesas 官方文件。

引用声明 本文对 Renesas Electronics 白皮书《Power Architecture Evolution in Data Centers》(2025 年10月, Doc No. R30WP0013EU0100)中与磁性元件相关的内容进行技术拆解与评述,所引用的技术观点、参数与图号均标注出处,版权归 Renesas 所有。本文不复制该白皮书的任何图表原件——文中全部插图均由谱磁自行绘制,读者请以原文为准。文中谱磁的分析、推论与工程建议为本公司观点,不代表 Renesas 立场。



摘要与关键点

一句话结论

Renesas 这份白皮书表面上是讲 GaN 和拓扑,但对磁性元件供应商而言,它其实开出了一张明确的规格单:800V→48V 的 16:1 转换用 LLC DCX 实现,开关频率 650kHz–1MHz,变压器必须是平面矩阵结构,且必须做等气隙(equal airgap)设计。白皮书原文直接判定“传统变压器不适合超高功率密度应用”——理由是体积大、漏感难控、无法集成同步整流与电容。这句话等于宣告:进不了这条链路的磁件厂,不是价格问题,是结构能力问题。

关键点(全部引自白皮书原文):

- **架构定调:**800V(2线或3线)直流母线取代 OCP 48V 架构,铜重降低近 50%;16:1 隔离 DC/DC 把 800V 降到 48V,以复用现有生态。
- **功率与堆叠方式:**12kW 系统 = 2 个 6kW 并联;每个 6kW = 2 个 3kW 400V-48V LLC DCX 堆叠(输入串联承受 800V、输出并联)。3kW 400V-48V LLC DCX 是整个高压 DC/DC 的基本积木。
- **频率与效率:**开关频率 650kHz–1MHz(实测原型约 650kHz);LLC DCX 效率 98%;两级方案整体 96%;64:1(800V→12V)方案仿真效率约 96.7%。
- **矩阵变压器是核心使能技术:**白皮书明确列为“两大关键系统技术”之一(另一个是 LLC DCX),不是可选项。
- **传统变压器被明确排除:**原文:传统变压器“因体积大、漏感难以控制、且无法像平面变压器那样集成同步整流与电容”,不适用于超高功率密度场合。
- **等气隙设计被点名:**原文:磁芯各处采用等气隙,可使磁通与损耗分散、磁芯得到充分利用、磁损更低(Ansys 三维仿真验证,双柱结构)。
- **变压器由 Payton Group 合作开发:**白皮书披露该平面变压器是 Renesas 与合作伙伴 Payton Group 共同开发,用 Ansys 建三维模型并做多方案比以最小化铜损与磁损。

说明 本文是谱磁的第三方技术拆解,不是 Renesas 官方文件。所有引用均标注原文出处与图号;本文不复制原白皮书任何图表,建议读者结合原文(链接见第 9 节)对照阅读。

1. 为什么一份“GaN 白皮书”值得磁件工程师逐字读

这份白皮书的作者署名是 Renesas 的电源系统架构、GaN 系统与应用团队,主线确实是 GaN 器件与拓扑。但如果你是做磁性元件的,通读之后会发现:全文对磁件的要求分散在四处——矩阵变压器专节、变压器设计专节、3kW 积木块设计段落、以及 Vienna 前级中一句关于升压电感的话。把这四处拼起来,是一份相当完整、且带否定性判据的磁件规格单。

更重要的是这份文件的产业地位:白皮书结尾明确写道,Renesas 正在与 NVIDIA 就数据中心 800V 新架构展开合作,且全文声明遵循 OCP(开放计算项目)原则。这意味着文中的技术选择不是一家之



言的实验,而是可能成为行业默认方案的候选。磁件厂如果读不懂这份文件对结构的要求,大概率会在下一轮 AIDC 电源招标里失去入场资格。

2. 架构层面:磁件的落点在哪几处

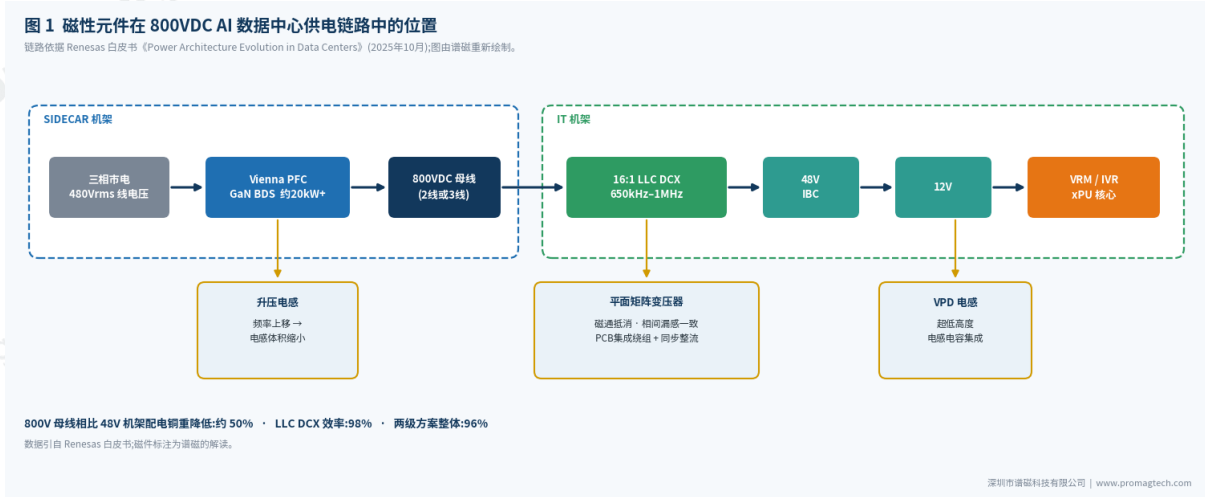


图 1 — 磁性元件在 800VDC 供电电路中的位置。链路依据 Renesas 白皮书,图由谱磁重新绘制。

架构环节	白皮书描述	磁件落点
Sidecar 机架 AC/DC 前级	三相 480Vrms 市电经 Vienna 拓扑(采用 GaN 双向开关 BDS)生成 800V 直流母线;功率等级趋势为 20kW 或更高(见原文 Figure 4)	Vienna 升压电感(boost inductor)
IT 机架 16:1 DC/DC	800V→48V,LLC DCX 拓扑,两级串联堆叠支撑全部输入电压(见原文 Figure 5、Figure 6)	平面矩阵变压器(核心)
64:1 扩展方案	800V→12V,LLC DCX 配 8 路副边中心抽头(见原文 Figure 12)	更多路副边的矩阵变压器
垂直供电(VPD)与 IVR	从 SoC 背面垂直供电以降低分布损耗,电感与电容和有源器件在先进封装中集成,高度极低以适应刀片最大尺寸	超低高度电感、磁集成器件

表 1 — 白皮书所述架构中磁性元件的四个落点(内容引自 Renesas 白皮书,图号为原文图号)



图 2 12kW 怎么堆出来:3kW 积木块的输入串联 / 输出并联

架构依据 Renesas 白皮书,图由谱磁重新绘制。

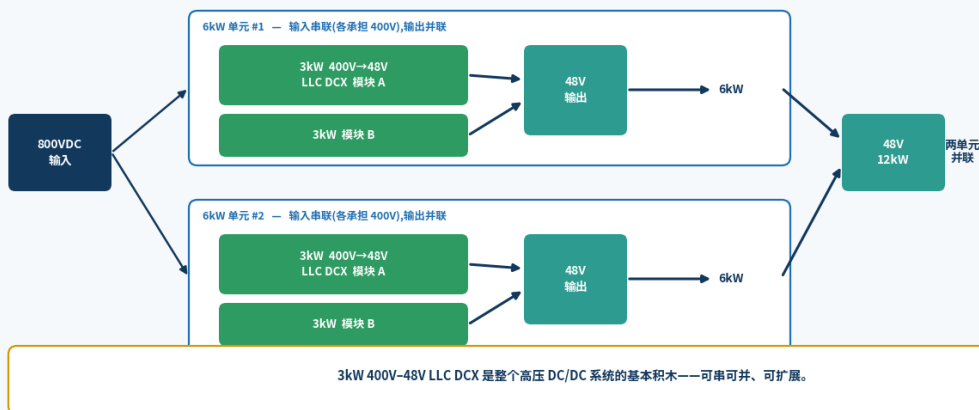


图 2 — 12kW 的堆叠方式:输入串联 / 输出并联。架构依据 Renesas 白皮书,图由谱磁重新绘制。

3. 矩阵变压器:白皮书列出的四条优势逐条解读

白皮书在“Matrix Transformer”专节给出定义:与传统变压器不同绕组使用各自独立磁芯不同,矩阵变压器被设计并制造为一组相互连接、共享同一磁性元件的阵列,整体作为单个变压器工作;绕组可以集成进主功率 PCB,与同步整流(SR)和输出电容共同构成紧凑的协同设计结构(见原文 Figure 8)。

原文列出四条优势,逐条拆解如下:

图 3 分立变压器 vs. 共享同一磁芯的矩阵变压器

概念依据 Renesas 白皮书矩阵变压器一节,图由谱磁重新绘制。

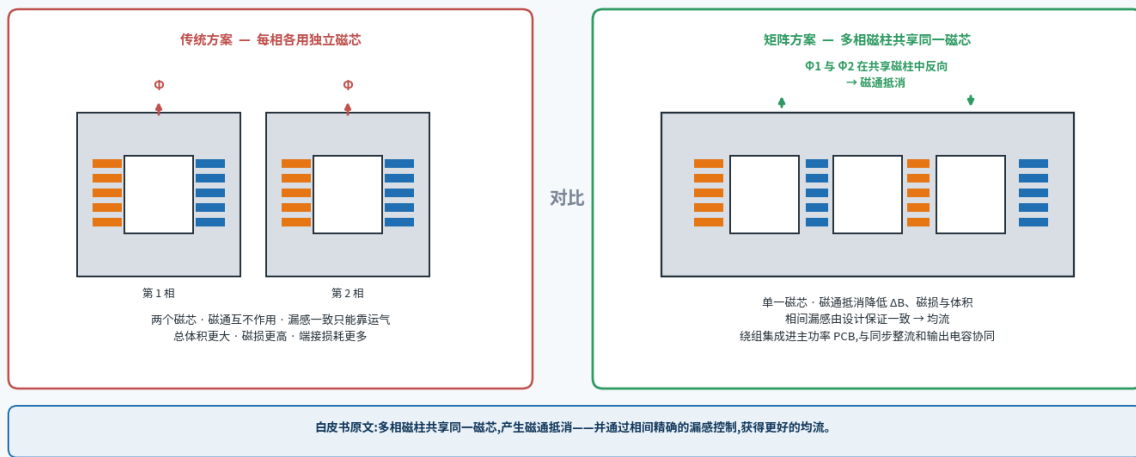


图 3 — 分立变压器 vs. 共享同一磁芯的矩阵变压器。概念依据 Renesas 白皮书,图由谱磁重新绘制。

白皮书原文优势	技术含义	对磁件供应商的要求
多相的磁柱共享同一磁芯,产生磁通抵消	相邻相的磁通在共享磁路中部分抵消,等效磁通摆幅下降	必须能按相位关系设计绕组走向,而非简单并绕
相间精确的漏感控制,以获得更好的均流	各相漏感一致性直接决定并联均流,漏感失配即电流失配	漏感一致性要做到可量产、可复现,不能靠挑选



相间绕组配置产生磁通抵消效应,降低磁损与体积	磁损随 ΔB 的幂次下降,体积随之缩小	要能提供磁通抵消结构的设计与仿真能力
多个小变压器合并进单一磁芯,优化尺寸并最小化磁损	集成度换密度,这是矩阵结构的根本价值	单件即多相,工艺与测试复杂度显著上升
相比单相变压器无需并联器件	副边电流被拆分到多相,单相电流下降	变压器结构直接影响器件 BOM,需与电路侧协同设计
相比单相变压器端接损耗更低	端接(termination)是低压大电流侧的重要损耗项	PCB 集成绕组的端接结构是设计的一部分,不是附属

表 2 — 白皮书列出的矩阵变压器六项优势与工程含义(优势条目引自 Renesas 白皮书原文)

关键 注意第二条:白皮书把“相间精确的漏感控制”直接和“更好的均流”绑定。这是矩阵变压器最容易被低估的一条——它意味着漏感不再只是一个需要压低的寄生参数,而是一个必须在各相之间做到一致的受控参数。做不到一致性,多相并联就会失流。

4. 为什么传统变压器出局:白皮书给出的三理由

在“Transformer Design”专节,白皮书对传统变压器给出了明确的否定判断。原文大意:LLC 应用中传统变压器通常需要独立的铁氧体磁芯加绕组,但在要求超高功率密度的应用中不被采用,原因有三:

- **体积大:**独立磁芯加绕组的结构在同等功率下体积无法压缩到刀片/砖块尺寸。
- **漏感难以控制:**传统绕组结构的漏感受工艺离散影响大,在 LLC DCX 这类依赖谐振参数精度的拓扑里是致命的。
- **无法像平面变压器那样集成同步整流与电容:**这是最根本的一条——集成能力决定了能否把 SR、输出电容与绕组做成协同设计的紧凑结构。

白皮书的结论是:平面结构的矩阵变压器(planar-based matrix transformers)才是 LLC DCX 应用的优选。

提醒 这三条理由中,前两条是程度问题(可以通过优化改善),第三条是结构问题(绕线式变压器在原理上就无法把绕组做进主功率 PCB)。这意味着这条链路对磁件厂的筛选是结构性的:没有平面/PCB 集成绕组能力的供应商,不是做得差一点,而是根本不在候选名单里。

5. 等气隙(Equal Airgap)设计:白皮书点名的关键细节

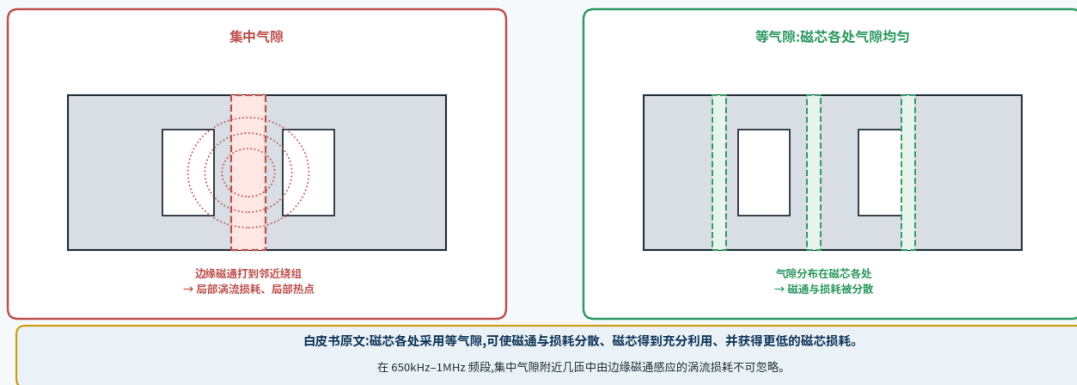
这是全文对磁件最具体的一条技术指示。白皮书披露:该变压器与 Renesas 合作伙伴 Payton Group 共同开发,在 Ansys 工具中建立了双柱(two limb)结构的三维模型(见原文 Figure 10),并对多种方案做了对比分析以最小化传导损耗与磁芯损耗。原文明确指出:

磁芯各处采用等气隙(equal airgap on all parts of the core)带来三项优势:

- ① 磁通与损耗被分散(flux and losses are spread out)
- ② 磁芯得到充分利用(the core is fully utilized)
- ③ 获得更低的磁芯损耗(lower core losses are achieved)

图 4 集中气隙 vs. 等气隙——白皮书为什么专门点名

概念依据 Renesas 白皮书变压器设计一节,图由谱磁重新绘制。



深圳市谱磁科技有限公司 | www.promagtech.com

图 4 — 集中气隙 vs. 等气隙。概念依据 Renesas 白皮书,图由谱磁重新绘制。

白皮书同时给出了集成与非集成结构的对比判据:非集成结构(non-integrated structure)下磁通分布不均匀,导致更高的磁损;集成结构(integrated structure)下磁通分布均匀,确保磁损最小。

工程解读 等气隙的价值在于避免磁通在某个局部磁柱上过度集中。集中气隙不仅会造成局部磁通密度过高、局部磁损攀升,还会产生边缘磁通(fringing flux)垂直穿过邻近绕组、引发额外涡流损耗——在 650kHz-1MHz 这个频段,这项附加损耗不可忽略。这与谱磁在《扁平线高频优势来自层数》一文中讨论的气隙区评估是同一个物理问题。

6. 3kW 基本积木块:变压器在电路中的具体角色

白皮书给出了 3kW 400V-48V LLC DCX 的完整设计(见原文 Figure 9),其中与变压器直接相关的描述如下:

设计要素	白皮书原文内容
拓扑	半桥(HB)LLC,按 DCX 方式设计与控制,始终工作在谐振频率,全范围实现原边 ZVS
原边器件	2 颗 Renesas TP65H030G4PRS,650V / 30mΩ GaN FET,TOLT 封装(顶部散热)
副边电路	两相全桥同步整流,每相各 4 颗 RBE024N08R1SZN6(80V / 2.4mΩ MOSFET,BSC 封装),每相处理约 1.5kW
变压器结构	采用矩阵变压器结构:两相同步整流电路的两组副边绕组绕在同一变压器磁芯的两个磁柱上,以优化磁芯尺寸并最小化磁损
开关频率	650kHz - 1MHz(实测原型约 650kHz),以实现高功率密度
控制器	Renesas RA6T2 MCU,开环控制,无需输出电压调节与实时环路



辅助电源	Renesas iW1825 反激(集成 700V MOSFET,原边侧感测,无需光耦)
12V 版本差异	若改为 12V 输出,副边相数将增加,并采用中心抽头配置配低边驱动

表 3 — 3kW 400V-48V LLC DCX 积木块中与变压器相关的设计要素(内容引自 Renesas 白皮书)

值得注意 白皮书特别提到:采用两相同步整流的首要考虑,是便于管理功率损耗、热、寄生效应与栅极驱动,并且避免器件并联及其带来的漏感控制困难。也就是说——

变压器的多相结构不只是为了变压器自身的体积和损耗,它同时决定了副边功率器件是否需要并联。磁件结构在这里直接影响了半导体 BOM 与热设计——这正是“协同设计(co-design)”一词在这份白皮书里的实际含义。

7. 隔离、爬电与形态:白皮书点出的落地难题

白皮书在测试结果一节直言:加强绝缘要求连同电气间隙与爬电距离要求,给这台板载形态转换器的外形尺寸带来了显著挑战(原文:Reinforced isolation requirements together with clearance and creepage requirements generate significant challenges to the form factor)。目标是把整个 12kW 系统装进略大于标准全砖(full brick)模块的尺寸内。

谱磁视角 这句话是整份白皮书里对磁件工程师最“痛”的一句:一边是 800V 输入要求加强绝缘等级、爬电与间隙必须按 IEC 60664-1 查表放大;另一边是功率密度要求把整个 12kW 压进全砖尺寸。这两个方向直接冲突,是平面变压器层叠设计中最难平衡的取舍——绝缘裕量吃层间距,层间距吃窗口面积,窗口面积吃铜。具体方法论可参见谱磁《绝缘设计与部分放电(PD)测试方法论——800V 平台专篇》。

8. Vienna 前级:一句话里的电感要求

白皮书在 AC/DC 前级一节列举 GaN 双向开关(BDS)用于 Vienna 整流器的关键优势时,提到三点:低导通损耗、仅需三个浮动高压驱动、以及——原文——由于开关频率更高而带来的升压电感尺寸缩小,从而实现更高功率密度。

这一句话对电感供应商的含义是明确的:sidecar 机架 20kW 级 Vienna 前级的升压电感,选型的主要变量正在从“低频大电流”向“更高开关频率下的损耗与体积平衡”迁移。频率上移意味着磁芯损耗项(Steinmetz 公式中的 f 幂次项)权重上升,原本铜损主导的设计逻辑需要重新核算。谱磁在《20-60kW PFC 电感开发评审实录》中给出的评审清单可直接用于这一环节的初步评估。

9. 引用出处

本文所有引用内容出自以下公开文件,建议对照阅读原文:

- [Renesas Electronics 《Power Architecture Evolution in Data Centers》\(2025年10月,Doc No. R30WP0013EU0100\)](#)



原文中与本文相关的图号:Figure 4(Vienna 前级)、Figure 5–6(HV DC/DC 架构)、Figure 8(LLC DCX 与矩阵变压器)、Figure 9(3kW 积木块)、Figure 10(Ansys 等气隙三维视图)、Figure 12(12V 输出配置)。上述图表版权归 Renesas 所有,本文不作复制。

10. 常见问题(FAQ)

问 矩阵变压器和普通平面变压器是一回事吗?

答 不是。平面变压器指的是绕组以 PCB/铜箔层叠形式实现的结构;矩阵变压器指的是多个变压器单元共享同一磁芯、相互连接后整体作为单个变压器工作的架构。白皮书里两者是叠加关系——它用的是“平面结构的矩阵变压器(planar-based matrix transformer)”。

问 为什么白皮书强调漏感一致性而不只是低漏感?

答 因为多相并联时,各相漏感决定各相阻抗,漏感失配直接导致电流分配不均。白皮书把“相间精确漏感控制”和“更好的均流”明确绑定。对供应商而言,这意味着漏感的批次一致性与相间一致性都要进 DVP,不能只标一个典型值。

问 等气隙设计具体难在哪?

答 难在工艺一致性。等气隙要求磁芯各处气隙均匀,而磁芯研磨公差、装配压力、胶层厚度都会引入偏差;在 650kHz–1MHz 频段,局部气隙偏差带来的边缘磁通与局部磁损放大效应很显著。这项能力需要磨芯工艺与装配工装共同保证。

问 650kHz–1MHz 的频段对磁芯材料意味着什么?

答 意味着磁芯材料的选择区间被大幅收窄——低频常用的磁粉芯与普通功率铁氧体在这个频段损耗过高,需要选用为高频优化的铁氧体材质。同时磁损占比上升,原本铜损主导的损耗分解结论不再适用,必须重新核算。

问 这份白皮书对中国磁件厂意味着什么?

答 意味着 AIDC 高压 DC/DC 这条链路的入场门槛是结构能力而非价格:平面/PCB 集成绕组、多相矩阵结构设计、相间漏感一致性控制、等气隙工艺、以及 800V 加强绝缘与紧凑尺寸的平衡。这五项做不到,报价再低也不在候选名单里。

问 谱磁在这条链路上有什么积累?

答 谱磁已发布 1MHz / 3.3kW 矩阵平面变压器应用笔记(800V HVDC AI 数据中心用半桥 LLC 二合一矩阵平面变压器),并有 IBC DCX 变压器损耗分析与 48V AI 服务器 PSU 平面变压器设计指南。具体项目的可行性需按客户拓扑与规格评审确认。

11. 术语

- **LLC DCX** — 以固定频率开环运行、工作在谐振点附近、增益近似为 1 的 LLC 变换器,行为类似“直流变压器”,变比由匝比决定。



- **矩阵变压器(Matrix Transformer)** — 多个变压器单元共享同一磁芯并相互连接、整体作为单个变压器工作的结构。
- **等气隙(Equal Airgap)** — 磁芯各处采用均匀气隙的设计,使磁通与损耗分散、磁芯充分利用。
- **磁通抵消(Flux Cancellation)** — 相邻相的磁通在共享磁路中部分相消,从而降低等效磁通摆幅与磁损。
- **端接损耗(Termination Loss)** — 绕组引出端与外部电路连接处的损耗,在低压大电流侧占比显著。
- **VPD(垂直供电)** — 从 SoC 背面垂直向核心供电以缩短路径、降低分布损耗的供电方式。
- **GaN BDS** — 氮化镓双向开关,可实现理想四象限开关,在 Vienna 拓扑中替代两只背靠背串联器件。

12. 延伸阅读(谱磁相关内容)

- [1MHz / 3.3kW 矩阵平面变压器应用笔记](#)
- [800VDC 母线到 48V——AIDC 电源架构中磁性元件的分工与选型](#)
- [AIDC 磁性元件全链路应用图谱\(Pillar\)](#)
- [IBC DCX 变压器损耗分析\(48V-12V 级\)](#)
- [48V AI 服务器 PSU 平面变压器设计指南](#)
- [绝缘设计与部分放电\(PD\)测试方法论——800V 平台专篇](#)
- [SiC/GaN 高 dv/dt 开关对磁件的影响——800V 平台 EMI 协同设计](#)
- [20-60kW PFC 电感选型与设计指南](#)
- [高电流磁件热设计与温升实测](#)
- [800V 高压功率磁件选型总纲\(Pillar\)](#)

13. 关于谱磁

深圳市谱磁科技有限公司(成立于 2013 年,深圳光明区)研发制造平面变压器、矩阵平面变压器、扁平线电感与共模电感,服务 AI 数据中心电源、800V EV OBC、光伏逆变与储能 PCS 市场。

作者 / 审阅:张勇,电子工程师、谱磁科技创始人。

联系方式: 张勇 · +86 1326706 9291 · zyong@promagtech.cn · www.promagtech.com

最后更新:2026-08-22 · PMT-DOC-2026-0822-28 · Rev A/0

引用声明 本文对 Renesas Electronics 白皮书《Power Architecture Evolution in Data Centers》(2025 年10月, Doc No. R30WP0013EU0100)中与磁性元件相关的内容进行技术拆解与评述,所引用的技术观点、参数与图号均标注出处,版权归 Renesas 所有。本文不复制该白皮书的任何图表原件——文中全部插图均由谱磁自行绘制,读者请以原文为准。文中谱磁的分析、推论与工程建议为本公司观点,不代表 Renesas 立场。