

# DAB变换器中高频变压器的设计思路

## Design of The High-Frequency Transformer in DAB Converter

阮征, 梅超, 胡俊杰

合肥华耀电子工业有限公司, 合肥 230031

**摘要:** 本文主要研究了在DAB变换器中高频大功率变压器的设计思路与主要影响因素, 讨论了漏感、铁芯选择和绕组结构对变压器的影响。

**关键词:** DAB变换器, 漏感, 铁芯, 绕组结构

### 1 研究背景

随着生产力和经济的快速发展, 人类对能源资源的需求日益增加。有限的能源资源与快速增长的需求已经成为人与自然不可调和的矛盾。如何实现能源互联和节能高效是电力电子领域面临的新目标和挑战。而随着电力系统的高速发展, 传统工频变压器虽然具有可靠性高、制作工艺成熟等优点, 但是已经无法满足现代电力系统的要求。应用现代电力电子技术可以将电力电子换流器和高频变压器组成新型智能化电器设备即电力电子变压器 (power electronic transformer, PET), 也称作固态变压器 (solid state transformer, SST), 它已经超出了人们对于“变压器”这一概念的理解, 而是面向现代能源互联网和能源路由器的核心设备。其工作原理如图 1 所示, 首先工频交流信号经电力电子变换器转化为高频方波信号, 信号经过高频隔离变压器传输, 再经电力电子变换器将高频方波信号还原成工频交流信号。与传统变压器相比, 电力电子变压器具有如下优点<sup>[1, 2]</sup>:

(1) 采用了高频变压器取代工频变压器, 所以变压器体积和重量都大大减少;

(2) 通过适当控制, 可以实现输入侧单位功率因数运行, 可以吸收负载侧无功功率和隔离谐波电流, 抑制谐波双向流动有效改善电能质量;

(3) 可以消除电源侧电压过压或欠压对负载侧电压的影响, 保证负载侧电压幅值、频率、波形的稳定;

(4) 含有交直流接口, 方便分布式发电系统的联网和直流负载的接入;

(5) 全数字化控制, 方便采集电网信息和联网通信, 从而实现潮流控制, 还可以柔性交流输电协同工作, 增强电网系统的稳定性和可靠性。

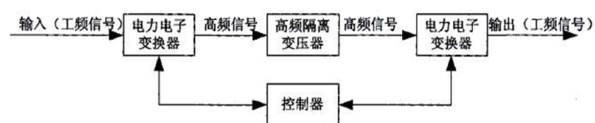


图 1 固态变压器原理图

根据直流环节, 可以将 PET 分为 AC-AC 型和 AC-DC-AC 型, 如图 2 所示。相对于 AC-AC 型 PET, AC-DC-AC 型 PET 变换环节较多, 结构复杂, 但是其具备良好的控制性能, 各级变换器控制都相对独立, 易于实现解耦, 而且由于具有 AC-DC-AC 直流环节, 可以在低压直流侧连接储能设备、分布式发电接入设备等。基于此, 目前各国学者和工程师都致力于 AC-DC-AC 型 PET 研究, 其典型的拓扑结构如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

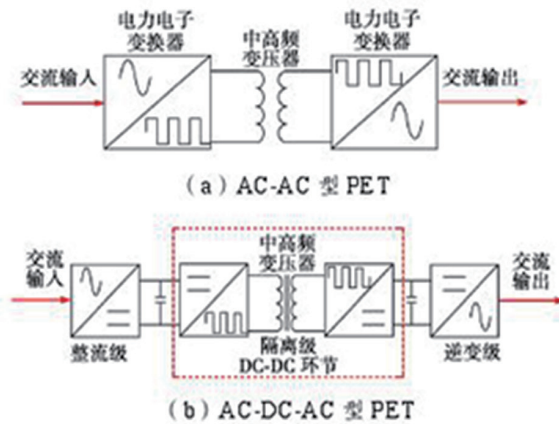


图 2 PET 两种工作模式

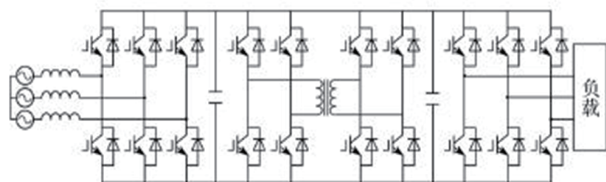


图3 典型的 AC-DC-AC 型 PET 拓扑结构

其中，以双有源桥 (dual active bridge, DAB) 双向 DC-DC 变换器为各国研究热点，其拓扑结构如图 4 所示。整个模块由前后两个以主动开关器件构成的 H 桥，一个理想变压器和一个串联电感组成，其中串联电感可以利用实际变压器的漏感，或者根据功率传递的需求自行选择。整个变换器模块依靠前、后桥臂移相过程内在串联电感两端产生的电压差实现功率传递。它可以实现高功率密度、零电压开关 (zero-voltage switching, ZVS)、双向传输功率、结构对称且控制简单，已被广泛应用于航空技术、电动汽车、可再生能源发电领域<sup>[1-3]</sup>。

在 DAB 变换器设计中，最为关键的问题是高频隔离变压器的设计，它决定着整个 DAB 变换器的转换效率和性能指标。本文主要研究了 DAB 变换器中高频隔离变压器的设计问题，对于其漏感计算、铁芯选择、绕组结构等做了详细分析。

## 2 漏感计算

DAB 变换器中高频隔离变压器从初级传递到次级的功率按照如下公式计算：

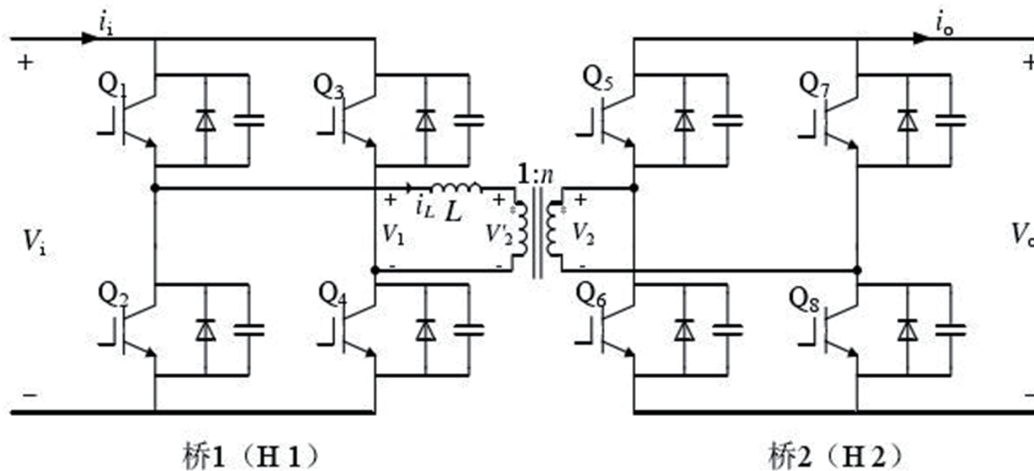


图4 双有源桥双向 DC-DC 变换器原理图

$$P = \frac{V_1^2}{2\pi f L} d \left[ 1 - \frac{\varphi}{\pi} \right] \quad (1)$$

式中， $V_1$  是输入的直流电压， $d$  是初级端反射的输出直流电压与输入直流电压之比值， $f$  是开关频率， $L$  为漏感， $\varphi$  为两相电桥之间的相移<sup>[4]</sup>。

由式 (1) 可见，当初级端的直流变换率  $d$  为 1 时，此变压器具有最优的设计状态。这也要求变压器采取低漏磁技术，同时，由于总电压是由漏感来保证的，因此在设计和实际操作中应尽可能使漏磁场均匀，以防止铁芯局部发热，而损耗相邻的电力电子器件。由上分析可知，在 DAB 变换器中存在一定的漏感，其具体数值大小由额定功率、使用频率和设计制造技术来决定，此外，漏感对变换器的工作状态起着至关重要的作用，它使得其中一个直流电压源变成另一个直流电压源的能量传递手段。因此，我们在设计 DAB 变压器时应该对漏感进行精确的设计与严格的控制<sup>[4]</sup>。

## 3 铁芯选择

在 DAB 变换器设计中，首当其冲的任务是选择合适的铁芯。由于 DAB 变换器往往应用于高频环境下，所以要求铁芯具有低损耗、高饱和磁通密度以及优良的热性能和机械强度。根据目前国内外使用情况，我们选取三种磁性材料，分别是铁氧体材料，坡莫合金、非晶材料和纳米晶材料。其主要性能指标如表 1 所示。参考文献报道，利用方波激励，在不同频率下测量材料的功率损耗与磁通密度的关系。当这四种材料频率在 20-50kHz 范围内，磁通

表 1 铁芯材料特性

类型	铁氧体	坡莫合金	非晶	纳米晶
$B_m(T)$	0.36	1.6	1.59	1.23
$\mu(H/m)$	4000	180000	250000	4000000
电阻率 ( $\Omega \cdot cm$ )	100	$45 \times 10^{-6}$	$130 \times 10^{-6}$	$120 \times 10^{-6}$

密度在 0.01-0.7T 范围内,其功率损耗最大的为非晶材料,功率损耗最小的为纳米晶材料,铁氧体和坡莫合金居中。因此,当变压器在高频大功率场合下使用时,非晶材料由于受到高功率密度、高效率、低损耗等条件制约,不利于做为变压器铁芯材料,而纳米晶材料由于优异的性能可以做为高频大功率的变压器的铁芯材料,但是综合考虑实际生产过程中成本和加工难易等因素,铁氧体材料与坡莫合金材料和纳米晶材料相比不仅具有价格上的优势而且可以做成多种几何形状的铁芯,而且对于高频大功率变压器而言,低漏磁设计尤为重要,可以利用铁氧体易于加工成不同的几何形状而精确控制其漏磁,除此之外,由于铁氧体的电阻率远高于其它三种材料,所以当变压器用于几百千赫兹以上时,纳米晶和坡莫合金都将失去其原有的优势。所以要根据不同的使用场合,综合考虑频率、尺寸、成本、噪音等因素合理选择铁芯<sup>[4]</sup>。

## 4 绕组结构

### 4.1 绕组损耗分析

对于高频大功率变压器损耗分析,变压器损耗分为铁芯本身损耗和绕组铜损,而真正决定变压器损耗数值的往往是绕组的铜损,所以合理设计绕组结构是高频大功率变压器设计环节中非常重要的环节。

高频变压器铜损主要是由趋肤效应和邻近效应引起的。趋肤效应的本质是当交流电通过导线时,交流电所产生的磁场使得导线中间电流减弱,导线表面电流加强,也就是使得电流趋向于导线表面。从电路原理角度分析这种趋肤效应可知,电流的重新分布加大导体的有效电阻,而

有效电阻又受到使用频率、导体类型、材料种类等影响,有效截面积的减少也加大了电流密度,所以也使得射频损耗大幅度增加,由趋肤效应引起损耗计算可以参考如下公式

$$P_s = I^2 \times R_s \quad (2)$$

式中,  $R_s$  是由导体的趋肤效应引起的有效电阻,  $I$  是导体中流过的电流。

邻近效应本质是导体中引起的环形涡流现象,它是由载流导体周围产生的变换磁场所引起的,并受到频率、外加磁场强度和材料种类等影响,由邻近效应引起损耗可以参考如下公式

$$P_p = G \times H^2 \quad (3)$$

式中,  $G$  是邻近效应系数,  $H$  是周围电流所引起的外磁场。

在高频大功率变压器设计过程中,由于趋肤效应和邻近效应等影响,要做到绕组损耗最小需要以下几个问题:首先,要选择合适的导线品种和线径尺寸;其次,要充分了解绕组的几何形状对窗口区域漏磁场分布的影响,要考虑邻近效应产生的绕组损耗对漏磁场的影响<sup>[4]</sup>。

### 4.2 导线选择

参考国内外文献报道和实际生产过程,我们选用三种类型导线进行分析,其具体参数如表 2 所示。分析表 2 数据可知,实心圆导体有效电阻相对直流电阻增加幅度最大,会大幅增加绕组损耗,表明实心圆导体不适合做为高频大功率变压器的绕组导线;金属箔导体的直流电阻和有效电阻相差不大,但是金属箔导体的有效电阻会随着金属箔厚度增加而加大;多股绞合线导体的直流电阻和有效电

表 2 三种类型导体由趋肤效应引起的有效电阻<sup>[4]</sup>

	(f=50kHz)		
	$R_{dc}(m\Omega/m)$	$R_s(m\Omega/m)$	变化率(%)
金属箔	2.0229	2.2571	11.6
实心圆导体	2.0229	6.1756	205.3
多股绞合线	2.0229	2.0233	0.02

阻相差最小，在高频情况下绕组损耗最小。在实际设计和制作过程导线，应根据实际需要和经济成本综合考虑导线类型<sup>[4]</sup>。

### 4.3 绕组配置

在 DAB 变换器中变压器设计和制作的难点之一就是绕组的几何结构，结合实际生产和相关文献报道，有以下几种绕组配置，如图 5 所示。其中 (a) 型绕组配置可以通过大电流，(d) 型绕组配置可以做到漏感最小。无论哪种绕组配置，都要求能够使变压器体积最小、成本最低、最小的漏感和分布电容，除此之外，还要保证变压器具有足够的散热面积和通道。

## 5 总结与展望

本文主要研究了在 DAB 变换器中高频大功率变压器的设计思路与主要影响因素，讨论了漏感、铁芯选择和绕组结构对变压器的影响。由于 DAB 变换器还处于一个发展阶段，国内外学者和广大工程师正在从理论和实际上不断完善，其中做为 DAB 变换器中核心部件，高频变压器

的研究与设计还处于一个起步阶段，还需要广大学者与工程师投入更多的精力。

### 参考文献

- [1] 董彦彦. 固态变压器及控制策略研究. 硕士毕业论文.
- [2] 姚航. 混合型高频隔离直流变换器及滞环控制策略研究. 硕士毕业论文.
- [3] 沙广林. 电力电子变压器中双有源桥 DC-DC 变换器的研究. 博士学位论文.
- [4] M.H. Kheraluwala., D.W. Novotny., D.M., Divan., Design consideration for high frequency transformer [J]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1990: 734-742.

### 作者简介

阮征，1989 年，硕士研究生，合肥华耀电子工业有限公司，从事特种变压器研究。

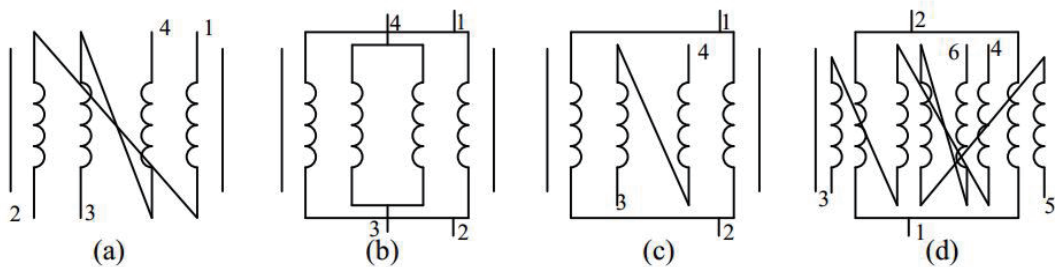


图 5 常用绕组配置图