

# 适合中高频应用的 NFM 系列 IGBT 模块

宫崎裕二, 村岡宏記, 日吉道明

(三菱电机功率器件福岡制作所, 日本 福岡 819-0192)

**摘要:**针对医疗仪器和电焊机市场领域对中高频开关应用的需求,三菱电机开发了 NFM 系列中高频 IGBT 模块。本文分析了电流谐振逆变器在两种不同工作模式下的波形和特征,然后详细介绍了 NFM 系列模块设计中采用的关键技术,包括 IGBT 硅片、超高速续流二极管(Free Wheeling Diode, 简称 FWD)、低电感封装技术等,并指出这种模块在中高频开关应用时在低损耗方面的优越性。

**关键词:**电力半导体器件; 逆变器; 谐振; 模块/绝缘栅双极型晶体管模块; 软开关

**中图分类号:** TM56, TN32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-100X(2006)04-0127-03

## NFM Series IGBT Module for Mid Switching Frequency Application

YUUJI Miyazaki, HIROKI Muraoka, MICHIAKI Hiyoshi

(Mitsubishi Electric Corporation Power Device Works, Fukuoka 819-0192, Japan)

**Abstract:**In order to meet the requirement of switching mid-high frequency application in the fields of medical instrument and welder marketing, Mitsubishi Electric developed NFM series IGBT module. In this paper, the waveforms and features with the current resonant inverter under two different operating modes are analyzed firstly. Then, some key technologies related to NFM series IGBT module designing are introduced, which include IGBT chip, super fast recovery Free Wheeling Diode (FWD) and low stray inductance packaging etc. Finally, the advantage of low power loss in switching mid-high frequency application is pointed.

**Key words:** power semiconductor; inverter; resonant; modes/IGBT modes; soft switch

## 1 引言

在变频器、交流伺服驱动器、电源等各种电力变换器的应用领域中,IGBT 是一种能够满足广泛需求,并具有很好通用性的功率器件。为了满足市场对不断改善 IGBT 性能的需求,三菱电机采用最新开发的载流子存储式沟槽型双极晶体管 (Carrier Stored Trench-gate Bipolar Transistor, CSTBT™) 功率硅片,实现了第五代 IGBT 模块的产品化。通过不断降低 IGBT 的损耗和噪声,电力变换器的性能也日趋完善。

通常,在开关频率超过 20kHz 的应用领域,一般要求功率器件具有优异的高速开关性能。然而,随着使用这些功率器件的目标产品的不同,主电路和控制方法也随之变化,很多时候仅仅依靠改善高速开关特性并不一定是最好的解决办法。着眼于技术发展醒目的医疗仪器和市场迅速扩大的电焊机应用领域,三菱电机开发了最适合这些应用的 NFM 系列中高频 IGBT 模块。

## 2 NFM 系列 IGBT 模块的特征<sup>[1]</sup>

这种模块的主要特征是:

(1)第五代 IGBT 硅片(CSTBT™)开关速度控制

的最优化;

(2)采用超高速续流二极管 (Free Wheeling Diode, 简称 FWD);

(3)采用低寄生电感的封装。

表 1 给出 NFM 系列模块产品一览表。该系列产品的额定电压为 1200V,额定电流从 100~600A 共有 6 个等级。此外,模块的封装也采用了目标市场广泛应用的标准外形。图 1 给出 NFM 系列 IGBT 模块的尺寸。

表 1 NFM 系列模块产品一览

型号	额定电压/V	额定电流/A	电路	封装外形
CM100DC-24NFM	1200	100	半桥	
CM150DC-24NFM		150		
CM200DC-24NFM		200		
CM300DC-24NFM		300		
CM400DC-24NFM		400	单管	
CM600DC-24NFM		600		

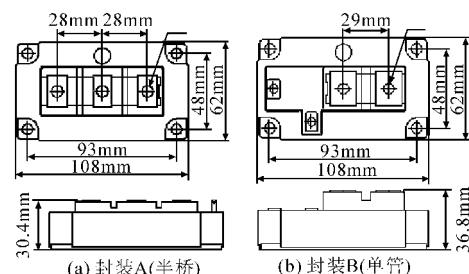


图 1 NFM 系列 IGBT 模块的尺寸

定稿日期:2006-07-20

作者简介:宫崎裕二(1968-),男,日本人,大学本科,研究方向为功率模块设计。

### 3 目标产品的特征

首先,说明 NFM 系列模块应用对象目标产品的特征和相关控制技术要点。

#### 3.1 电流谐振型逆变器

电流谐振型逆变器是医用 X 光机和电焊机电源部分经常采用的电力变换方式,工频电源经过整流变换成直流后,通过谐振电路变换成数十千赫的交流电。图 2 示出其基本电路构成。逆变部分通常由 H 桥构成,负载为 LC 串联谐振电路,负载能量通过隔离变压器从初级侧传递到次级侧,IGBT 工作于开关状态,通过调节相位可控制输出电压。这里,根据 IGBT 栅极控制的相位时序,IGBT 的工作模式可分为工作模式 A 和工作模式 B 两种。工作模式 A 在 IGBT 导通时,关断控制;工作模式 B 在 FWD 通电时,关断控制。

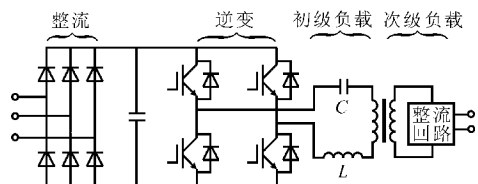


图 2 电流谐振型逆变器主要电路的一般构成

图 3 示出电流谐振逆变器在 A 和 B 两种工作模式下的工作波形。图 4 列出这两种工作模式下的详细损耗情况。工作模式 A 一般应用在电焊机上,产生的 IGBT 损耗主要是关断损耗  $E_{off}$ 。这种情况下,IGBT 在交流电流过零点时开通,所以不产生开通损耗  $E_{on}$ 。工作模式 B 一般应用在医用 X 光机上,产生的 FWD 恢复损耗占总损耗的大部分。类似于模式 A 的原理,模式 B 不产生 IGBT 关断损耗,但是必须考虑后面介绍的 IGBT 正向恢复损耗,暂称为  $E_{fr}$  (即 Energy of Transistor Forward Recovery)。

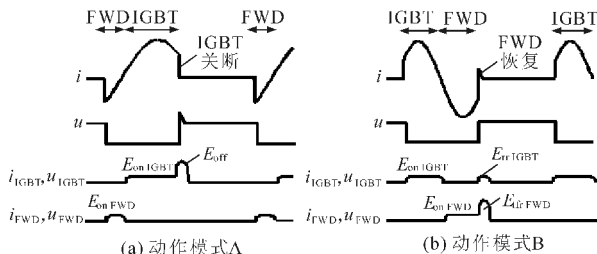


图 3 电流谐振型逆变器的工作波形

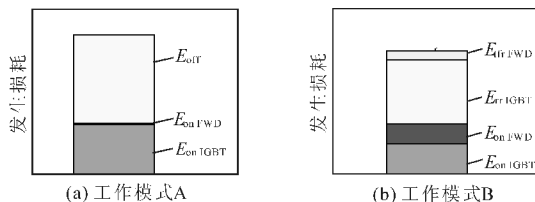


图 4 电流谐振型逆变器的损耗

(开关频率  $f_s=50\text{kHz}$  时)

#### 3.2 软开关技术

为了解决高频化带来的问题,在电力电子领域积极的引入了软开关技术。软开关就是利用谐振现象避免开关动作时电流电压的交叉,从而减少开关损耗,抑制  $di/dt$  和  $dv/dt$  以及降低高次谐波和 EMI 噪声。实际上医疗用 X 光机采用谐振的例子很多,通过采用零电压开关(ZVS)开通技术,在上述的工作模式 B 下,IGBT 的开通损耗几乎为零。

### 4 NFM 系列 IGBT 模块的设计

为了设计适合于目标产品电流谐振型逆变器用的 IGBT 模块,采取了以下各项改善措施。

#### 4.1 IGBT 硅片的最优化

第五代 IGBT 硅片(CSTBT™)具有最先进的基本性能和很强的实用性。作为第五代 IGBT 模块代表的 NF 系列已经开始量产化。CSTBT™ 的高速化采用原来的寿命控制技术,关断损耗和饱和电压特性的控制也更加容易。通用高速型 NFH 系列也已经量产化,而现在开发的 NFM 系列的寿命控制是针对上述目标的应用进行的最优化设计。图 5 给出实施了寿命控制时关断损耗  $E_{off}$  和饱和电压  $U_{ce(sat)}$  的折衷曲线。NFM 系列设定在 NF 和 NFH 系列的中间,设定值是经过 IGBT 单元的损耗仿真验证得到的。

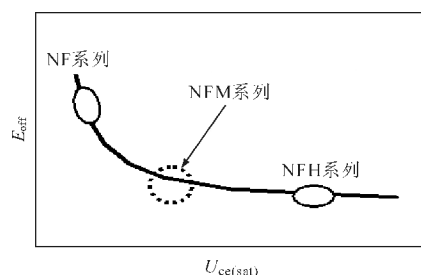


图 5  $E_{off}$  和  $U_{ce(sat)}$  的折衷曲线

对于 3.1 节中提到的电流谐振型逆变器的两种工作模式,进行了 IGBT 单元(FWD 除外)的损耗仿真,比较对象是现在开发的产品 CM150DC-24NFM 和同一规格的另外两个产品,即低饱和电压型 CM150DY-24NF 和通用高速型 CM150DU-24NFH。图 6 给出两种模式下的 IGBT 损耗和开关频率  $f_s$  的关系。图 6a 为产生关断损耗的工作模式 A 的仿真结果。在其  $f_s=10\sim 60\text{kHz}$  范围内,NFM 系列表现得最好。

另一方面,对于不产生关断损耗的工作模式 B,在 FWD 恢复时,其  $dv/dt$  会导致特有的 IGBT 的  $E_{fr}$  损耗。电流谐振时,由于没有施加集电极电压,集电极电流为零,N 层蓄积的少数载流子(空穴)不容易被释放,因此便需在之后 FWD 恢复动作时

再释放出残留的多数载流子。对于集电极电压从零到开始上升之间的时间间隔比较短的高频动作,  $E_{\text{off}}$  损耗将变得更大。为了抑制这种特殊现象, 寿命控制技术就十分有效。在无电场下, 为了易于消灭残留的载流子, 引入了最优寿命控制, 在  $f_s=20\sim 70\text{kHz}$  的范围内, 工作模式 B 下 IGBT 损耗 (静态损耗与  $E_{\text{off}}$  之和) 成功地实现了最小化, 图 6b 为工作模式 B 的仿真结果。

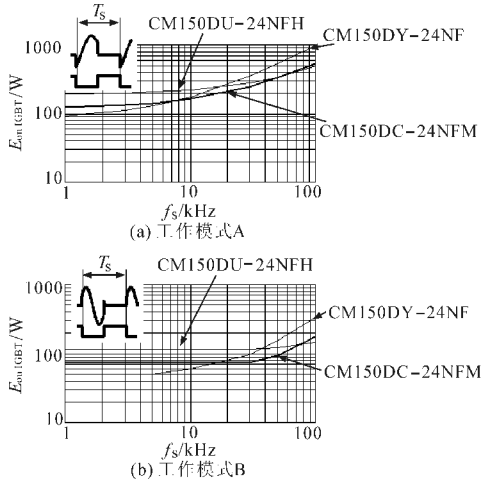


图 6 IGBT 损耗和开关频率

#### 4.2 超高速续流二极管(FWD)

在工作模式 B 下, FWD 的恢复损耗  $E_r$  (Energy of diode Reverse Recovery) 占总损耗的多数, 所以 FWD 特性成为非常重要的因素。图 7 示出在  $U_{\text{ce}}=600\text{V}, I_c=150\text{A}, U_{\text{CE}}=\pm 15\text{V}, R_g=5.1\Omega, T_j=125^\circ\text{C}, di/dt=280\text{A}/\mu\text{s}$  的条件下, ZVS 模式开通时的恢复波形。因为在恢复的后半段, 集电极电压急速上升,  $E_r$  将主要取决于恢复电流的尾电流的大小。以往用于通用逆变器上的 IGBT 模块, 为了降低噪声, 二极管的软恢复性非常重要, 有较大的尾电流的扩散型 PiN 构造的 FWD 成为主流。而与之相反的是, 电流谐振型逆变器的理想状况是零尾电流, 所以 NFM 系列中搭载的超高速 FWD 采用外延晶圆, 使得尾电流几乎为零, 大幅度减小了 FWD 的损耗。

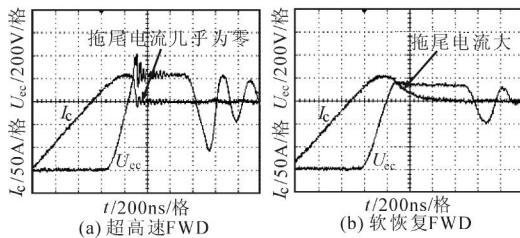


图 7 FWD 恢复波形的比较

#### 4.3 总损耗特性

NFM 系列, 将最优化的 CSTBT™ 和超高速 FWD 组合在一起, 实现了电流谐振型逆变器的超低损耗化。图 8 给出 IGBT 和 FWD 的总损耗与开关频率  $f_s$  的关系曲线。目标市场的医疗用 X 光机和电焊机的开关频率主要在  $30\sim 70\text{kHz}$ , 因此 NFM 系列在这个频率段具有最好的损耗性能。

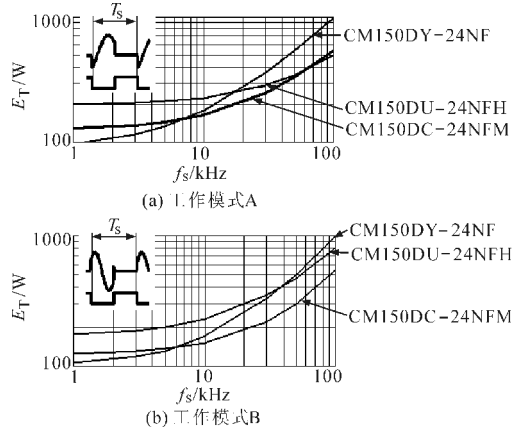


图 8 总损耗与开关频率

#### 4.4 封装技术

(1) 中高频模块封装很重要的一点就是要尽可能地降低模块内部的寄生电感, 这在很大程度上依赖于内部电极的截面积和配线的长短。目前为止, IGBT 模块因需要利用电极形状来缓和热应力, 结果造成寄生电感很大。

(2) 新开发的封装设计减小了模块内部的热应力, 而且电极焊锡的部分采用应力缓和型构造, 实现了最优化的内部电极配线构造。

(3) 采用这种构造, 寄生电感比原来降低了约 1/3。

#### 5 结论

着眼于电流谐振型逆变器市场, 在详细分析了其工作模式后, 三菱电机开发了 NFM 系列中频 IGBT 模块。这种模块采用最优化设计的 CSTBT™ 硅片和 FWD 硅片, 以及低寄生电感的新构造封装, 应用于电流谐振逆变器时损耗较以前大大降低, 而且外形尺寸和目前市场上所普遍采用的完全兼容。

#### 6 备注

该文由科菱机电(上海)有限公司负责编译。

#### 参考文献

- [1] 田畑光晴. 低駆動電力新トレンイ IGBT モジュール “NFシリーズ”[J]. 三菱電機技報, 2003, 77(9):563-566.