

超快速二极管的反向恢复特性

Reversed Recovery Characteristic of Ultra Fast Recovery Epitaxial Diode

陈永真 宁武 辽宁工学院

Chen Yongzhen Ning Wu Liaoning Institute of Technology

摘要:本文简要地介绍了超快速二极管的性能对电力电子电路的影响和现代功率变换对超快速二极管反向恢复特性的要求,超快速二极管的反向恢复参数与使用条件的关系和一些最新超快速二极管的性能。

叙词:反向恢复时间 反向恢复峰值电流

Abstract: In this paper the effect of the ultra fast recovery diode to power electronics circuit and the request of modern power convert for ultra fast recovery diode of reversed recovery characteristic are introduced and analysed in brief. relationship between parameters and application conditions of ultra fast recovery diode and the performances of some newest ultra fast recovery diode are also introduced.

Keywords: reverse recovery time reverse recovery peak current

快速二极管的反向恢复特性决定着功率变换器的性能,在双极功率晶体管的电流下降时间大于 $1\mu\text{s}$ (开通时间约 100ns) 时期,二极管的反向恢复在双极功率晶体管的开通过程中完成,而且双极功率晶体管达到额定集电极电流的 $1/2-2/3$ 左右后随着 I_c 上升 H_{fe} 急剧下降,限制了二极管的反向恢复电流的峰值,在某种意义上也限制了 di/dt ,双极功率晶体管的开通过程掩盖了二极管的反向恢复特性,因而对二极管的反向恢复仅仅是反向恢复时间提出要求。随着功率半导体器件的开关速度提高,特别是 Power MOSFET、高速 IGBT 的出现,不仅开通速度快(可以在数十纳秒内将 MOSFET 彻底导通或关断),而且在额定驱动条件下,其漏极/集电极电流可以达到额定值的 5-10 倍,使 MOS 或 IGBT 在开通过程中产生高的反向恢复峰值电流 I_{RRM} ,同时 MOS 或 IGBT 在开通过程结束后二极管的反向恢复过程仍然存在,使二极管的反向恢复特性完全暴露出来,高的 I_{RRM} 、 di/dt 使开关管和快速二极管本身受到高峰值电流冲击并产生较高的 EMI。因而对二极管的反向恢复特性不仅仅限于反向恢复时间短,而且要求反向恢复电流峰值尽可能低,反向恢复电流的下降、上升的速率尽可能低,即超快、超软以降低开关过程中反向恢复电流对开关电流的冲击,减小开关过程的 EMI。

1 反向恢复参数与应用条件

一般的超快速二极管的反向时间定义为小于 100ns ,高耐压超快恢复二极管的反向恢复时间 t_{rr} 比低耐压的长,如耐压 200V 以下的超快恢复二极管的典型反向恢复时间在 35ns 以下,耐压 600V 的典型反向恢复时间约 75ns ,耐压 1000V 的超快恢复二极管的典型反向恢复时间约 $100-160\text{ns}$ 。各生产厂商的产品的反

向恢复特性(主要是反向恢复时间 t_{rr} 和反向恢复峰值电流 I_{RRM}) 是不同的,如图 1、图 2。

(1) t_{rr} 与 I_f 和 di/dt 的关系

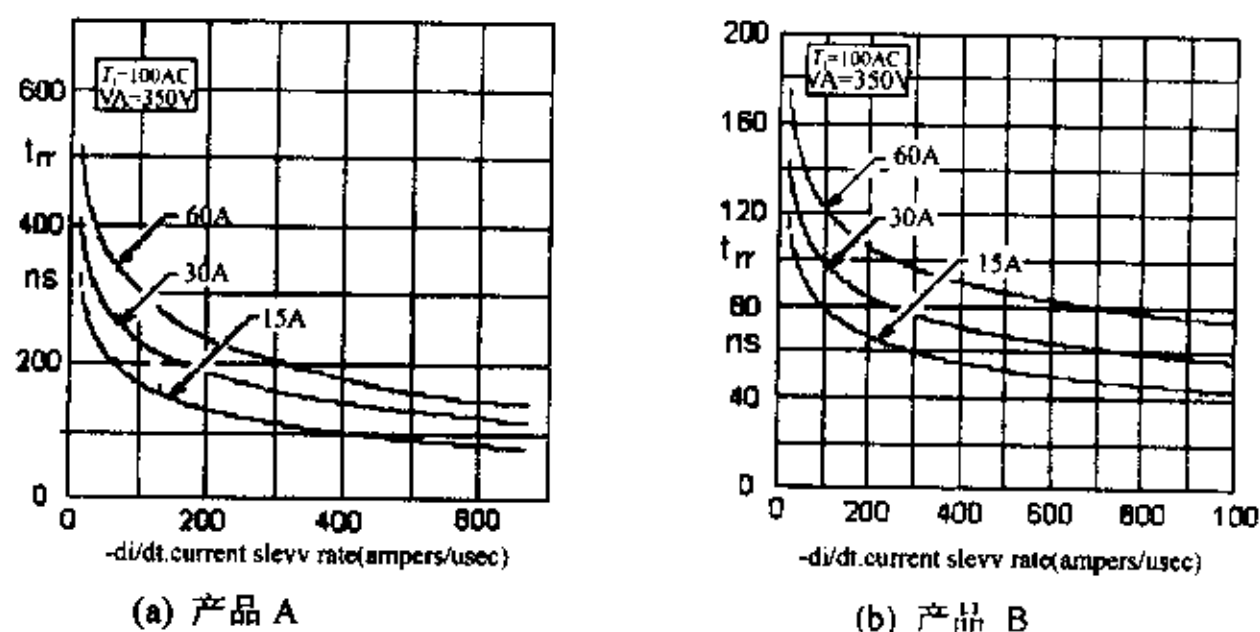


图 1 t_{rr} 与 I_f 和 $-di/dt$ 的关系

t_{rr} 与 I_f 和 di/dt 的关系如图 1 所示。从图中可见,随着二极管的正向电流 I_f 的增加反向恢复时间 t_{rr} 随着增加; di/dt 的增加,反向恢复时间 t_{rr} 减小。因此,以测试小信号开关二极管的测试条件 $I_f = I_R = 10\text{mA}$ 为测试条件的反向恢复时间不能如实表现实际应用情况;以固定正向电流(如 1A)为测试条件也不能在实际应用中得到客观再现;不同电流档次以其额定正向电流或其 $1/2$ 为测试条件则相对客观。

(2) 反向恢复时间与反向电压的关系

反向恢复时间随反向电压增加,如果 600V 超快恢复二极管在反向电压为 30V 时,反向恢复时间为 35ns ,而反向电压为 350V 时其反向恢复时间增加,因此,仅从产品选择指南中按所给的反向恢复时间选用快速二极管,如反向电压的测试条件不同,将导致实际的反向恢复时间的不同,应尽可能的参照数据手册中给

的相对符合测试条件下的反向恢复时间为依据。

(3) 反向恢复峰值电流 I_{RRM}

反向恢复峰值电流 I_{RRM} 随 $-di/dt$ 增加,如图 2,因在不同的 $-di/dt$ 的测试条件下, I_{RRM} 的幅值是不同的。

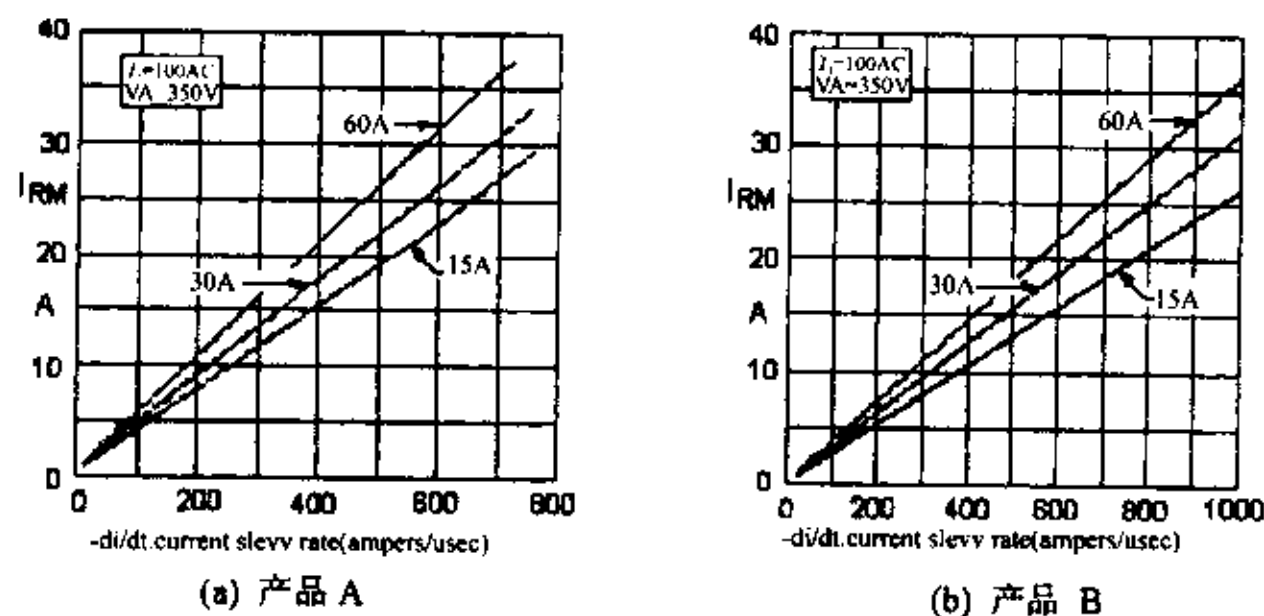


图 2 I_{RRM} 与 $-di/dt$ 的关系

I_{RRM} 随反向工作电压上升,因此额定电压为 1000V 的快速二极管,在相同的 $-di/dt$ 条件下,但反向工作电压不同时(如 500V 与 1000V)则 I_{RRM} 是不能相比较的。

(4) 结温 T 的影响

反向恢复时间 t_r 随工作结温上升,如图 3 所示,结温 125℃ 时的反向恢复时间是结温 25℃ 时的近 2 倍。反向恢复峰值电流 I_{RRM} 随工作结温上升,结温 125℃ 时的反向恢复峰值电流是结温 25℃ 时的近 1.5 倍。反向恢复电荷 Q_{rr} 随工作结温上升,结温 125℃ 时的反向恢复电荷是结温 25℃ 时的近 3 倍以上。

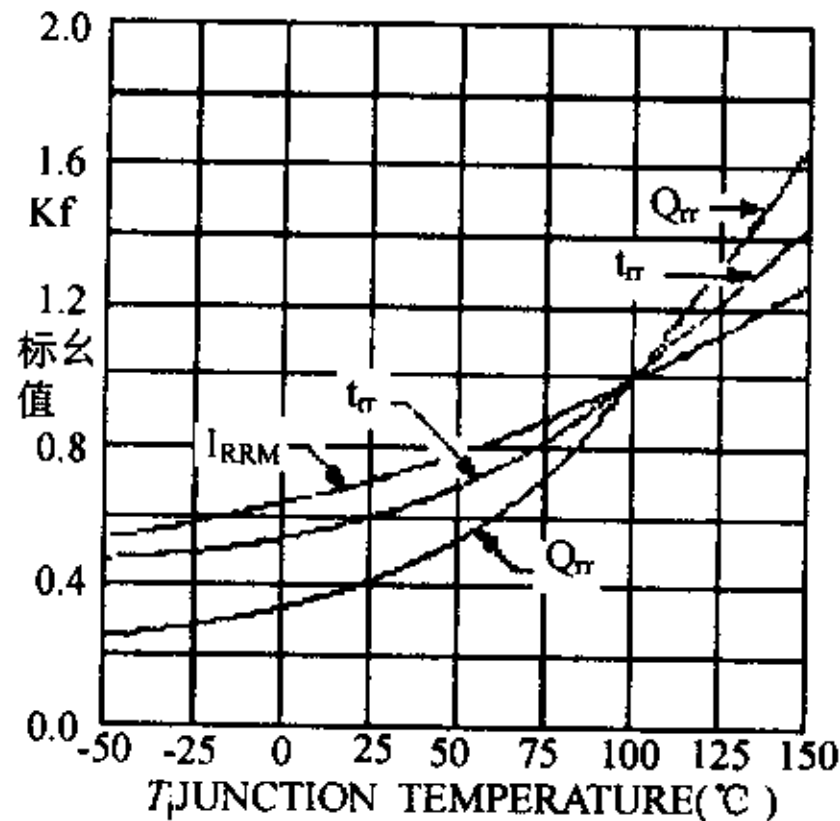


图 3 结温对反向恢复特性的影响

(5) 反向恢复损耗

超快速反向恢复二极管的反向恢复损耗与二极管的反向恢复引起的开关管的开通损耗如图 4 所示,二极管的反向恢复损耗是在反向恢复过程的后半部分 t_1-t_2 期间,其损耗的大小与 I_{RRM} 和 t_1-t_2 的大小有关,在二极管的反向恢复过程中,开关管的开通损耗始终存在。很明显,快速反向恢复二极管的反向恢复损耗与开关管的开通损耗随 I_{RRM} 和反向恢复时间而增加,

(6) I_{RRM} 、反向恢复损耗及 EMI 的减小

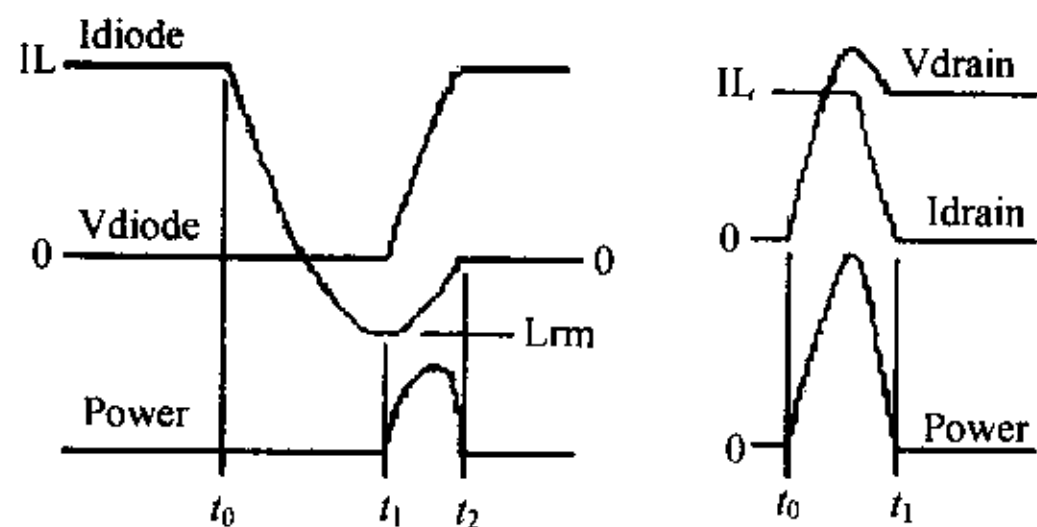


图 4 二极管的反向恢复损耗与二极管的反向恢复引起的开关管的开通损耗

在实际应用中快速反向恢复二极管的反向恢复过程将影响电路的性能,为追求低的反向恢复时间,可能会选择高的 di/dt ,但会引起高的 I_{RRM} 、振铃、电压过冲和高的 EMI 并增加开关损耗,如图 5 所示。

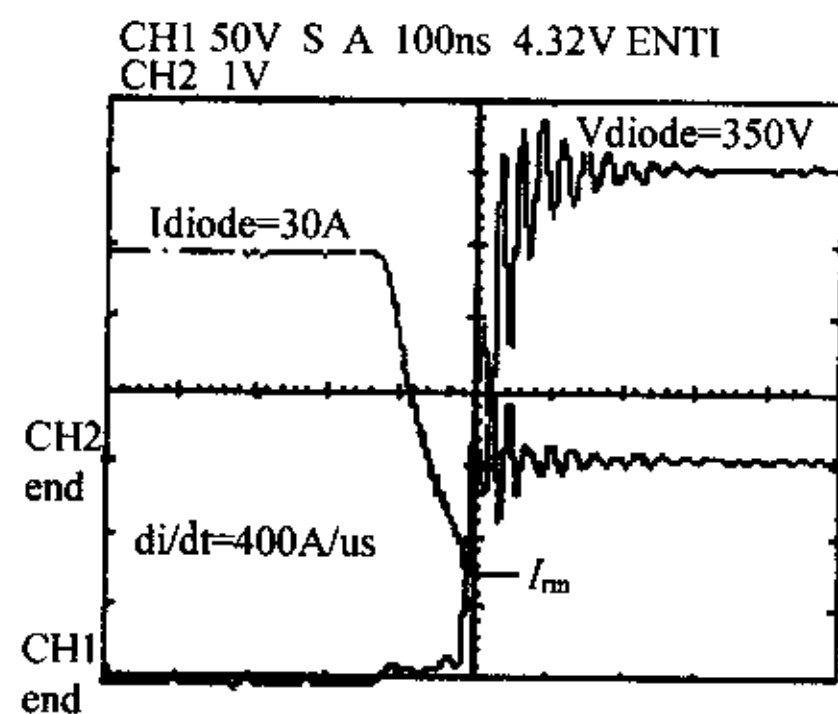


图 5 高 di/dt 下的反向恢复

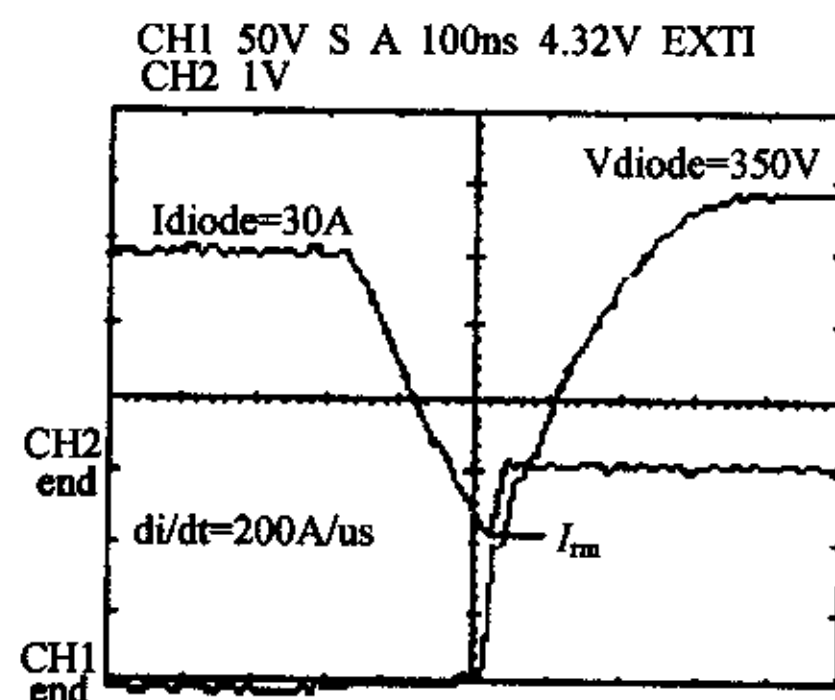


图 6 降低 di/dt 后的反向恢复

若适当减小 di/dt 可降低 I_{RRM} 、EMI,消除振铃和电压过冲和由此产生的损耗,如图 6 所示。而 di/dt 的降低是通过降低开关管的开通速度实现,开关管的开关损耗将增加,因此,改变 di/dt 不能从本质上解决快速反向恢复二极管的反向恢复存在的全部问题,必须改用性能更好的快速反向恢复二极管,即 I_{RRM} 低、 t_r 短、反向恢复特性软,通过各种快速反向恢复二极管的数据,可以找出性能好的快速反向恢复二极管。本文各图数据均

(下转第 530 页)

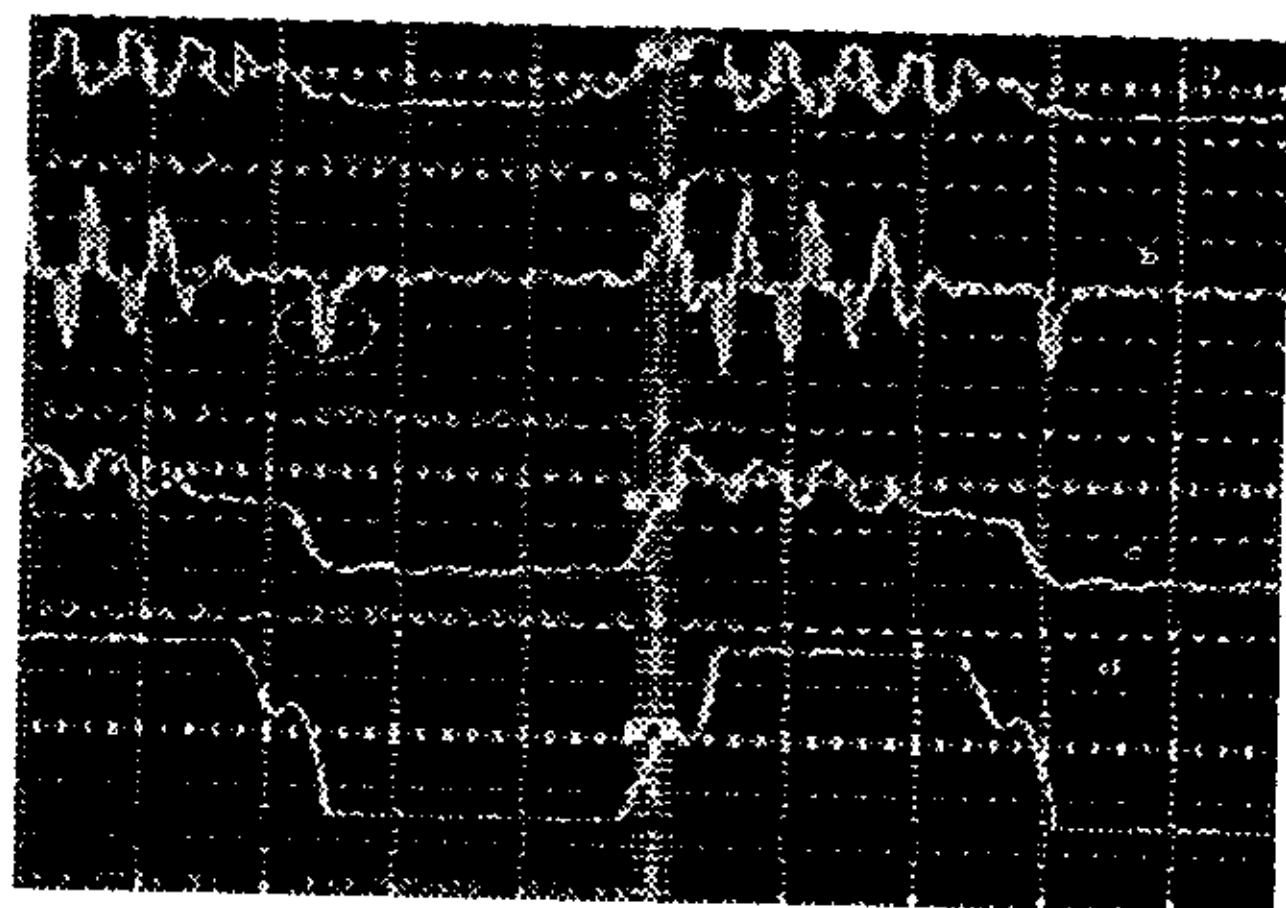


图7 试验波形

a) Q1 门极电压波形 b) T1, C4 谐振电流波形

c) C4 电容电压波形 d) T1 原边电压波形

总体而言,使用这种方法,门极控制结构简单,实用性强,开关损耗小,适用于低成本,大批量的生产使用。

参考文献

[1] Y. Konishi, Efficient Ozonizer using PDM and PWM Controlled Resonant Invert and its Performance Evaluations, 0-7803-3823-5/1997, IEEE.

[2] H. Fujita, Pulse - Density - Modulation Power Control of a 4 kHz

Voltage-Source Inverter for Induction melting applications, Vol. 32, NO. 2, pp. 279-286, 1996, IEEE.

[3] Oleg Koudriavtsev, A Novel pulse-Density-Modulated High-Frequency Inverter for Silent-Discharge-Type Ozonizer, VOL. 38, No. 2, MARCH/APRIL 2002, IEEE.

[4] Wei Cai, Impact of stator Windings and End-bells on Resonant Frequencies and Mode Shapes of Switched Reluctance motors, VOL. 38, NO. 4, JULY/AUGUST 2002.

[5] H. Shioka, K. Kai, T. Nishikawa, and E. Sakai, "High concentration tube ozone generator," in Proc. 13th Ozone World Congr., vol. 2, 1997, pp. 907-912.

[6] R. Feng, G. S. P. Castle, and S. Jayaram, "Automated system for power Measurement in the silent discharge," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 34, pp. 563-570, May/June 1998.

[7] "Standard test methods for measurement of energy and integrated charge transfer due to partial discharges (corona) using bridge techniques," in 1993 Annual Book of ASTM Standards, Section.

作者简介

王峰,男,硕士,从事电力电子及电气拖动方面的研究。

张波,男,博士,教授,博士生导师,从事电力电子及电气拖动,电路系统混沌现象等方面研究。

(上接第 537 页)

为开关性能优良的超快速、软恢复二极管。

2 新型快速反向恢复二极管

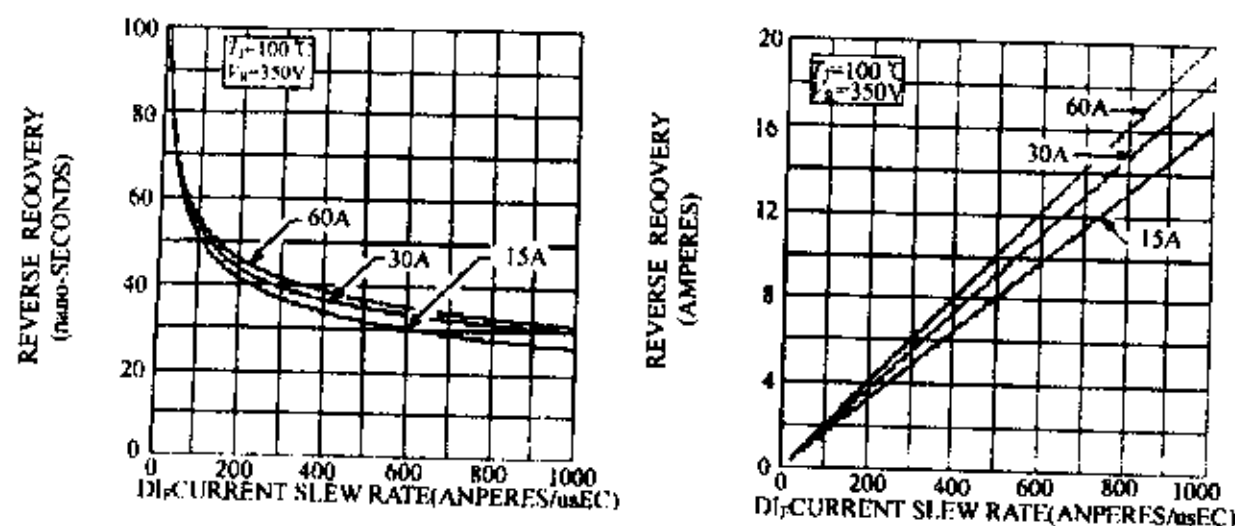


图7 新型超快反向恢复二极管的

di/dt 对 t_{rr} 和 I_{rrm} 的影响

近年来为减小快速反向恢复二极管的反向恢复时间 t_{rr} 、反

向恢复峰值电流 I_{rrm} 和过硬的反向恢复特性,出现了高性能超快软恢复二极管 HiPer FRED、Dyn FRED(或称为高频快恢复二极管 High Frequency Soft Recovery Rectifier);与常规快速反向恢复二极管相比,新型超快速反向恢复二极管的实际反向恢复时间 t_{rr} 降低到 25 ns 左右,反向恢复峰值电流 I_{rrm} 降低到额定正向电流的 1/4 或更多,反向恢复特性软化。如图 7 所示。很明显,新型超快反向恢复二极管的反向恢复时间和反向恢复峰值电流远低于图 1、图 2 器件。可减少功率变换器中的开关管和二极管的开关损耗、输出电压尖峰和 EMI。

参考文献

[1] www.advancedpower.com/pressreleases/data/30d60b.pdf

[2] www.ixys.com/products/power/search/rectifier/ferd/d5.pdf

(上接第 569 页)

参考文献

[2] 张占松、蔡宣三,开关电源的原理与设计,电子工业出版社,1998 年 7 月

[3] 何希才,新型开关电源设计与应用,科学出版社,2001 年 2 月

[4] 林渭勋,电力电子技术基础,机械工业出版社,1990 年 10 月