طراحی و ساخت یک راه‌انداز گیت IGBT با حفاظتهای لازم و ادوات SMD

مهدی فاضلی، سید ادیب ابریشمی فر و سید حسین سید مهدی

چکیده: راه‌اندازهای گیت در مبدل‌های قدرت نوین که از عنصر قدرت IGBT استفاده می‌کنند، باید چندین عملکرد اساسی همچون ایزولاسیون الکتریکی، تقویت جریان و حفاظت در برابر اضافه جریان و ولتاژ را به اجرا بگذارند. مقاله حاضر یک نمونه از چنین راه‌اندازهایی را توصیف می‌کند که تماماً توسط ادوات SMD ساخته شده و برای IGBT های قدرت متوسط یا زیاد مناسب است. این راه‌انداز شامل منبع تغذیه سوئیچینگ ایزوله، مدارهای بافر، برخی توابع حفاظتی و همچنین حفاظت در برابر اتصال کوتاه IGBT است. مدار توانائی اعمال جریان تا اوج ٦ آمپر با تدوام ۵۰٪ با اعمال سیگنال ورودی در سطح TTL را دارد.

کلید واژه: **راه‌انداز IGBT، کنترل IGBT، مدارهای راه‌انداز گیت IGBT.**

۱- مقدمه

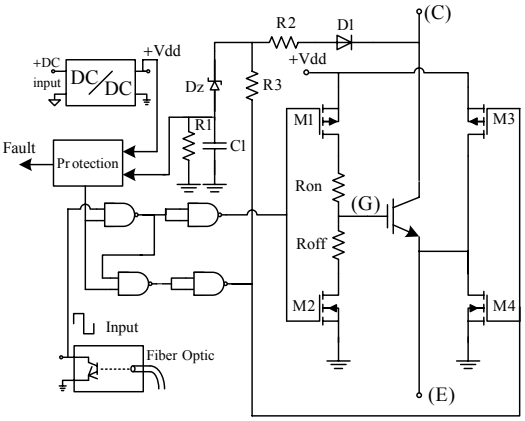
عنصر IGBT نیازمند ولتاژ گیت–امیتر جهت کنترل میزان هدایت میان کلکتور و امیترش است. این ولتاژ توسط مدارهای راه‌انداز مختلفی می‌تواند اعمال شود. مدار راه‌انداز تأثیر به سزائی بر عملکرد IGBT از نظر اتلاف روشنی و خاموشی، توانایی حفاظت اتصال کوتاه، زمان سوئیچینگ و حفاظت در برابر dv/dt گذرا دارد [۱]. بنابراین طرح مدار راه‌انداز جهت عملکرد مناسب ادوات IGBT نسبتاً بحرانی محسوب می‌شود.

نقطه نظراتی که در طرح یک راه‌انداز مناسب باید لحاظ شوند به طور خلاصه عبارتند از :

۱. تهیه ولتاژ گیت–امیتر مناسب به منظور روشنی کامل IGBT.
۲. تهیه جریان اولیه نسبتاً زیاد در فرآیند روشنی به جهت کاهش اتلاف روشنی. جریان مورد نیاز اغلب در حد ۶ آمپر و یا بالاتر می‌باشد.
۳. تأمین ولتاژ معکوس در طی زمان خاموشی به جهت بهبود گذرای dv/dt، نویز EMI و کاهش اتلاف زمان خاموشی IGBT.
۴. فراهم آوردن ایزولاسیون کافی میان مدار قدرت و کنترل. اغلب ایزولاسیون ۲/۵ kV به بالاتر نیاز می‌شود.
۵. محافظت IGBT به هنگام اتصال کوتاه. در این حالت راه‌انداز گیت، ولتاژ معکوسی به گیت- امیتر اعمال کرده و سیگنال خطا را به واحد کنترل ارسال می‌کند.

این مقاله در تاریخ ۱۸ خرداد ماه ۱۳۸۴ دریافت و در تاریخ ۱۶ آذر ماه ۱۳۸۴ بازنگری شد.

مهدی فاضلی، گروه پژوهشی برق، جهاد دانشگاهی علم و صنعت، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران (email: mfazeli@jdevs.com).
سید ادیب ابریشمی فر و سید حسین سید مهدی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران(email: abrishamifar@iust.ac.ir) .



شکل ۱: بلوک دیاگرام راه‌انداز IGBT.

خوشبختانه مدارهای راه‌انداز متنوعی که اغلب برای راه‌اندازی ماژول‌های IGBT مناسب می‌باشند طراحی و ساخته شده‌اند [۲] و [۱۰]، اما متأسفانه این مدارها بسیار گران هستند و در نتیجه در تولید مبدل‌های قدرت نیازمند آن هستیم که راه‌اندازهای گیت ارزان که برای شرایط کاری مختلف (با اندک تغییر) مناسب باشند، توسعه داده شوند.

در این مقاله یک راه‌انداز گیت IGBT که برای انواع جریان متوسط و یا حتی زیاد مناسب است و از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه بوده و به دلیل استفاده از ادوات SMD ابعاد نسبتاً کوچکی نیز دارد، طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی شده است.

۲- ساختار راه‌انداز

شمای ساده شدهٔ راه‌انداز گیت مورد نظر را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید، که شامل خروجی تمام پل، مدارهای کنترل منطقی و تأخیرهای مورد نیاز است. این ساختار در اغلب مدارهای راه‌انداز با اندک تغییرات مورد استفاده واقع می‌شود.

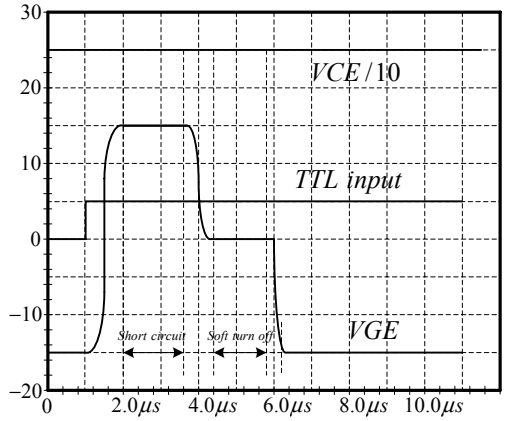
۲-۱- طبقه خروجی

راه‌اندازهای IGBT مرسوم معمولاً از یک طبقه پوش- پول به منظور تهیه جریان مثبت و منفی زیاد استفاده می‌کنند تا قادر به شارژ و تخلیه سریع خازن ورودی IGBT در طی زمان‌های سوئیچینگ باشند. بدیهی است که این چنین ساختاری نیازمند دو تغذیه یکی مثبت و دیگری منفی برای تأمین گرایش ترانزیستورهای پوش- پول خواهد بود. گرایش منفی گیت تأثیر قابل توجهی بر روی سرعت سوئیچینگ و افزایش قابلیت اعتماد مبدل دارد [۴].

با ساختار تمام پل در طبقه خروجی راه‌انداز، ولتاژ مثبت در طی زمان روشنی (M1=M4=On و M2=M3=Off)، ولتاژ منفی در طی خاموشی (M2=M3=On و M1=M4=Off) و تنها با یک منبع تغذیه بر روی گیت–امیتر IGBT می‌تواند قرار داده شود. به این ترتیب برای کنترل

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲: نتیجهٔ شبیه‌سازی عملکرد مدار اتصال کوتاه، VCE: ولتاژ کلکتور– امیتر، VGE ولتاژ گیت – امیتر و TTL input : ولتاژ تحریک ورودی.

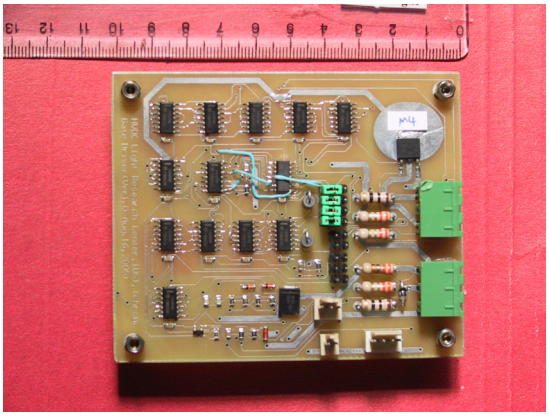
جدول ۱: مشخصات IRF7389 مورد استفاده در طبقهٔ خروجی.

پارامتر	نماد	کانال N	کانال P	واحد
ولتاژ درین– سورس	VDSM	۳۰	−۳۰	ولت
ولتاژ گیت– سورس	VGSM	±۲۰	±۲۰	ولت
جریان پیوسته درین	ID (۲۵ °C)	۷٫۳	−۵٫۳	آمپر
جریان پالسی درین	IDM (۲۵ °C)	۳۰	−۳۰	آمپر
حداکثر توان تلفاتی	PDM (۲۵ °C)	۲٫۵	۲٫۵	وات
مقاومت حرارتی بدنه تا محیط	RθjA	۵۰		سانتی گراد بر وات

زمان خاموشی و روشنی نیازمند مقاومت‌های خارجی بر روی گیت Ron و Roff خواهیم بود تا سرعت سوئیچینگ مورد نظر بدست آید. در طرح ارائه شده برای زوج ترانزیستورهای M1 و M2، همچنین M3 و M4 از زوج ترانزیستور با شماره IRF7389 که ساختار آن به صورت SMD است، استفاده شده است. مشخصات این زوج ترانزیستورها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

۲-۲- حفاظت اتصال کوتاه

این حفاظت با استفاده از ادوات D1، Dz، C1، R2 و R1 شکل می‌گیرد. وقتی ولتاژ گیت– امیتر IGBT در حالت روشن بوده و به دلیل اتصال کوتاه در خروجی، IGBT از اشباع کامل (VCEsat~ 2-3 V) به ناحیهٔ فعال وارد شود (VCE»VCEsat)، با قطع دیود D1، زنر DZ هدایت کرده با تحریک مدار حفاظت موجب عدم ارسال پالس گیت به IGBT می‌شود. در طی سوئیچینگ عادی IGBT به دلیل حضور همزمان جریان کلکتور و ولتاژ کلکتور– امیتر، امکان عملکرد ناخواسته مدار حفاظت اتصال کوتاه وجود دارد. بنابراین فیلتر R1C1 جهت حذف این اثر اضافه شده است. تنظیم دقیق مقدار ثابت زمانی این فیلتر می‌تواند زمان عملکرد مدار حفاظت اتصال کوتاه را تا حدود چند میکروثانیه (که در طی آن IGBT صدمه نمی‌بیند) به تأخیر بیاندازد. جهت تعیین مقادیر بهینه R1، R2 و C1 می‌توان از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار PSPICE بهره گرفت. با انتخاب مقادیر R1=۱۰ kΩ، R2=۱۰۰ kΩ و C1=۱۰۰ nF زمان تأخیر عملکرد مدار اتصال کوتاه حدود ۵ میکروثانیه بدست می‌آید که مناسب به نظر می‌رسد. در شکل۲ نتیجه شبیه‌سازی مدار مشاهده می‌شود.



شکل ۳: نمای فوقانی مدار راه‌انداز (اولیهٔ) ساخته شده با دو خروجی جهت راه‌اندازی همزمان دو IGBT موازی. توجه شود که برد دو رو بوده و ترانزیستورهای قدرت راه‌انداز و برخی دیگر از اجزاء مدار در زیر برد نصب شده‌اند. ابعاد تقریبی نمونه نهایی این برد (که در شکل نشان داده نشده) ۷۸×۸۱ میلیمتر مربع است.

۳- پیاده سازی راه‌انداز

جهت تأمین شرایط راه‌اندازی بهینه (یعنی شرایطی که حداقل تلفات در عنصر قدرت به وجود می‌آید)، نیازمند آن هستیم که مقدار مقاومت روشنی ترانزیستورهای تمام پل کوچک باشد. توانائی جریان راه‌اندازی زیاد و مقاومت روشنی کم می‌تواند با استفاده از ترانزیستورهای VMOS نسل پنجم که توسط شرکت IR ارائه شده است، حتی به صورت SMD بدست آید. ورودی مدار راه‌انداز، سیگنال در سطح TTL را دریافت و تولید خروجی ۰ تا ۱۵ ولت، با جریان خروجی ۶ A مناسب برای راه‌اندازی گیت می‌کند. شکل۳ مدار راه‌انداز ساخته شده را به تصویر می‌کشد.

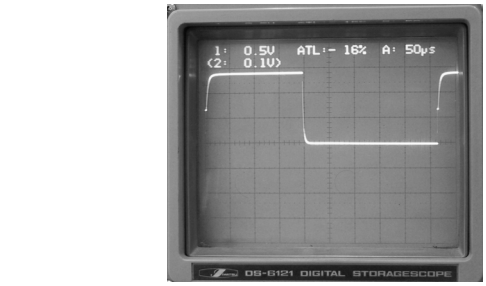
٤- نتایج آزمایش

توانائی مدار راه‌انداز IGBT در شکل۴ نمایش داده شده است. این مدار با تغذیه ۱۵ ولتی کار می‌کند، که توسط منبع سوئیچینگ موجود بر روی برد تأمین می‌گردد. سیگنال خروجی برای Roff=۱۰ Ω، Ron=۴٫۷ Ω و IGBT به شماره IMBI600PX با مشخصات VCES=۱۴۰۰ V و Cies=۶۰ nF و Coes=۹ nF و Cres=۴ nF بدست آمده است. سیگنال ورودی، موج مربعی در سطح TTL با فرکانس ۲٫۲ kHz و تدوام ۴۵٪ می‌باشد. در این شرایط، حداکثر جریان اوج خروجی به ۶ آمپر برای زمان روشنی و به ۴ آمپر در زمان خاموشی می‌رسد.

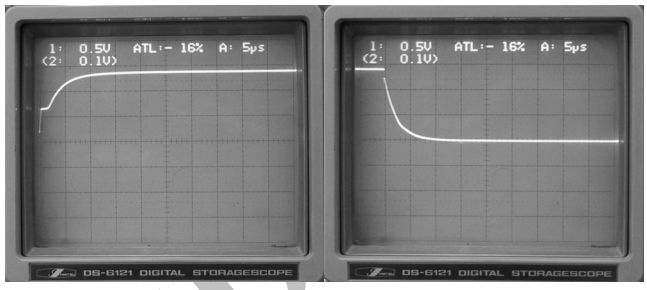
جهت بررسی دقیقتر پاسخ دینامیکی خروجی، همان آزمایش فوق به کرات در زمان‌های مختلف انجام و نتیجه متوسط‌گیری شده در جدول ۲ ذکر شده است. این مقادیر می‌تواند با یک نمونه معروف از راه‌انداز گیت SKHI23/12 ساخت شرکت سمیکرون[1] که در بازار با قیمت حدودی ۱۰۰,۰۰۰ تومان قابل خریداری است، مقایسه گردد. این راه‌انداز مناسب برای راه‌اندازی گیت IGBT با ولتاژ حداکثر ۱۲۰۰ V است. جریان خروجی (جمع دو خروجی) ۸ A، میزان تأخیر روشنی و خاموشی برابر با ۱٫۴ µs است که بدون احتساب حداقل زمان مورد نیاز برای روشنی و خاموشی IGBT می‌باشد. با احتساب این زمان‌ها برای همان IGBT مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها، تأخیرهای فوق به حدود ۸٫۵ µs خواهند رسید. ضمناً ابعاد تقریبی برد ۹۹×۱۲۴ میلیمتر مربع می‌باشد. موارد یاد شدهٔ فوق همگی نشان از قابلیت مناسب برد طرح شده دارند.

1. Semikron

Archive of SID
www.SID.ir



(الف)



(ب)

شکل ۴: (الف) پاسخ خروجی راه‌انداز طرح شده Time/div=۵۰ µs ،Volt/cm=۰٫۵ V، Probe=×۱۰ و (ب) با بزرگ‌نمائی هر لبه Time/div=۵ µs ،Volt/cm=۰٫۵ V، Probe=×۱۰.

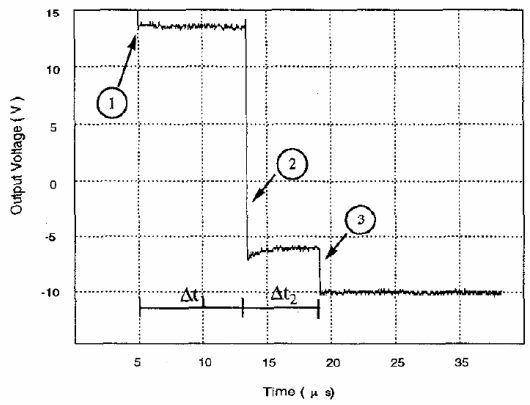
جدول ۲: نتایج متوسط گیری شده پاسخ دینامیکی مکرر راه‌انداز

tr	tf	tdH	tdL
۶ µs	۸ µs	۰٫۵ µs	۰٫۴ µs

آزمایش اتصال کوتاه خروجی نیز انجام گرفته است که توسط آن زمان عملکرد مدار اتصال کوتاه حدود ۸ میکروثانیه بدست آمده است. مقدار بدست آمده در توافق با مقادیر طرح شده در شبکه آشکار ساز اتصال کوتاه است و همخوانی نسبتاً خوبی با شبیه‌سازی‌های انجام شده دارد (به شکل۵ و تأخیر میان اتصال کوتاه خروجی و قطع پالس گیت توجه شود). آزمون دیگری که بر روی برد انجام شده است، قطع پالس گیت با کاهش ولتاژ تغذیه (۱۵ولت) مدار راه‌انداز به زیر مقدار حداقل قابل قبول (۱۳٫۵ولت) و ارسال سیگنال خطا به واحد کنترل می‌باشد. لازم به ذکر است که قیمت تمام شدهٔ یک عدد از برد طرح شده حدود ۳۵,۰۰۰ تومان می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

یک مدار راه‌انداز با ادوات SMD طراحی و پیاده‌سازی شده است که نسبت به مدارهای راه‌انداز موجود در بازار ارزانتر، با سطح انرژی مصرفی کمتر و دارای قابلیت‌های منحصر به فردی همچون حفاظت اتصال کوتاه، حفاظت در برابر کاهش ولتاژ تغذیه و جریان راه‌اندازی نسبتاً زیاد است. طبقه خروجی تمام پل مورد استفاده موجب شده تا مدار تنها با یک تغذیه ۱۵ ولتی به راحتی کار کند. مشخصات سوئیچینگ مناسب مدار نیز تأئیدی بر عملکرد خوب آن بوده است.



شکل ۵: سیگنال‌های مربوط به آزمایش اتصال کوتاه خروجی و قطع پالس گیت، ۱- اعمال پالس گیت ۲- زمان اتصال کوتاه ۳- قطع پالس گیت.

مراجع

[1] R. Chokhawala, J. Catt, and B. Pelly, "Gate drive considerations for IGBT modules," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 31, no. 3, pp. 603-611, May-June 1995.

[2] C. Kuratli, Q. Huang, and A. Biber, "Implementation of high peak current IGBT gate driver in a VLSI compatible BiCMOS technology," *IEEE J. of Solid State Circuits*, vol. 31, no. 7, pp. 924-932, Jul. 1996.

[3] J. M. Park *et al*., "a monolithic IGBT gate driver for intelligent power modules in 0.8 µm high voltage (50 V) CMOS process," *Microelectronical Journal*, vol. 32, no. 5-6, pp. 537-541, May/Jun. 2001.

[4] N. McNeil, K. Sheng, B. W. Williams, and S. J. Finney, "Assessment of off-state negative gate voltage requirements for IGBT's," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 13, no. 3, pp. 436-440, May, 1998.

مهدی فاضلی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی الکترونیک در سال ۷۱ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. وی از سال ۷۱ همکاری خود را با جهاد دانشگاهی علم و صنعت آغاز کرد و هم اکنون مدیر فنی و عملیات مرکز مبدل‌ها و منابع تغذیه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از : طراحی و ساخت UPSهای موازی، طراحی و ساخت اینورترهای قدرت با ضریب اطمینان بالا، UPS های سه فاز، طراحی و ساخت سیستم‌های سریع جمع آوری اطلاعات صنعتی.

سید ادیب ابریشمی فر تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۶۸، ۷۱ و ۸۰ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم اکنون عضو هیات علمی دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. وی در طی سالهای ۶۸-۸۰ در دانشگاه‌های علم و صنعت، سیستان و بلوچستان و شهید بهشتی در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی برق مشغول تدریس بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارهای مجتمع آنالوگ و الکترونیک قدرت.

سید حسین سید مهدی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی الکترونیک در سال ۸۴ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. وی به مدت یک سال بر روی ساخت گیت درایور IGBT با حداقل سطح فعالیت نموده است و زمینهٔ کار فعلی وی بهینه سازی ترانس‌های PCB بدون هسته با ساختار حلزونی برای فرکانس‌های بالا جهت استفاده در منابع تغذیهٔ سوییچینگ و گیت درایور می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir