

سیستم متصل به شبکه به قدرت ۵ کیلووات با استفاده از مبدل تشدیدی موازی

شاهرخ فرهنگی^(۱) - بهزاد وفاخواه^(۱) - بابک فرهنگی^(۱) - پیمان کنعان^(۲) - سمیرا منشی پور^(۳)

۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی- دانشگاه تهران- ایران

۲- سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)- ایران

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های نو- سیستم‌های فتوولتاییک- سیستم‌های متصل به شبکه- مبدل‌های تشدید

چکیده

در سیستم‌های فتوولتاییک متصل به شبکه انرژی حاصل از مدول‌های خورشیدی به توسط یک پردازشگر توان به صورت جریان متناوب به شبکه نیرو تزریق می‌گردد. تامین مجزا سازی مابین مدول‌های خورشیدی و شبکه نیرو یکی از مقتضیات طراحی پردازشگر توان می‌باشد. در این مقاله، یک سیستم متصل به شبکه به قدرت ۵ کیلووات گزارش می‌گردد که از آرایش مبدل تشدید موازی استفاده می‌کند و مجزا سازی به جای استفاده از ترانسفورماتور سنگین فرکانس ۵۰ هرتز، به توسط ترانسفورماتوری به مراتب کوچکتر در فرکانس ۶۰ کیلوهرتز تامین می‌گردد. سیستم متصل به شبکه مذکور نخستین سیستمی است که اجزای آن کاملاً در کشور ساخته شده‌اند. در این مقاله اجزا سیستم و عملکرد آن گزارش می‌شود.

۱-مقدمه

یکی از منابعی که در حال حاضر و در آینده بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز بشر را تامین می‌کند، انرژی فتوولتاییک است. بیشترین سهم استفاده از این نوع انرژی در آینده به صورت سیستم‌های متصل به شبکه خواهد بود. در حال حاضر کشورهای اروپایی با اتخاذ سیاستهای حمایتی باعث گسترش سیستم‌های متصل به شبکه در کشور خود شده‌اند. قیمت تولید برق فتوولتاییک در کشورهای مرکزی اروپا به ۰/۴۰ یورو الی ۰/۶۰ یورو بر کیلووات ساعت رسیده است. در جنوب اروپا به دلیل سطح بالاتر انرژی تابشی قیمت مذکور به ۰/۲۵ الی ۰/۳۰ یورو بر کیلووات ساعت کاهش می‌یابد. بهای برق تولیدی براساس هزینه سرمایه‌گذاری ۴ الی ۵ یورو بر وات پیک محاسبه شده است [۱].

در آرایش الف که آرایش متداول برای پردازشگر توان سیستم‌های متصل به شبکه است، ترانسفورماتور در فرکانس ۵۰ هرتز کار می‌کند. در این صورت عمده وزن دستگاه را این قطعه تشکیل خواهد داد. آرایش ب از یک مبدل DC/DC ایزوله استفاده می‌کند. در این آرایش ترانسفورماتور در فرکانس کلیدزنی مبدل کار می‌کند، که معمولاً بزرگتر از ۲۰ کیلوهرتز است.

۲- پیاده‌سازی مبدل DC/DC با مبدل تشدید می موازی

پیاده‌سازی مبدل DC/DC ایزوله با تکنیک کلیدزنی سخت، کلیدزنی نرم و مبدلهای تشدید می امکان‌پذیر است. استفاده از کلیدزنی نرم و مبدلهای تشدید می باعث کاهش تلفات کلیدزنی و افزایش بازده می‌شود که یکی از مقتضیات طراحی است. در میان مبدلهای تشدید می، مبدل تشدید می موازی دارای خواص زیر است که استفاده از آن را در این کاربرد پرجاذبه می‌سازد:

۱. خاصیت بالا بردن سطح ولتاژ در بار کم که امکان ردیابی نقطه کار با حداکثر توان را تسهیل می‌سازد.

۲. خاصیت بالا بردن سطح ولتاژ با بار و فرکانس کلیدزنی که موجب قابلیت انعطاف در تعداد مدوله‌های خورشیدی سری شده می‌گردد.

۳. ایجاد جریان و ولتاژ تقریباً سینوسی برای ترانسفورماتور، که باعث می‌گردد تلفات ترانسفورماتور در مقایسه با کلیدزنی سخت کمتر شود.

شکل ۲ مدار مبدل DC/DC را با استفاده از آرایش مبدل تشدید می موازی نشان می‌دهد. تحلیل و طراحی مبدلهای تشدید می در منابع متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۴] [۵] [۶]. سه رابطه

در کشور ایران اخیراً معاونت امور انرژی وزارت نیرو اقدام به نصب دو سیستم متصل به شبکه به قدرتهای ۵ کیلووات در تهران (در ساختمان معاونت امور انرژی) و ۳۰ کیلووات در طالقان (به صورت ۱۲ واحد ۲/۵ کیلوواتی) نموده است [۲]. در این مقاله سیستم ۵ کیلوواتی گزارش می‌شود.

پردازشگر تون متصل به شبکه یک مبدل قدرت DC/AC است که جریان و ولتاژ دائم خروجی مدوله‌های خورشیدی را به جریان متناوب با فرکانس شبکه تبدیل می‌کند. تعدادی از مقتضیات این مبدل عبارتند از [۳]:

۱. امکان ردیابی نقطه کار با حداکثر توان مدوله‌های خورشیدی.
۲. داشتن قابلیت انعطاف در تعداد مدوله‌های خورشیدی که با یکدیگر سری می‌شوند.
۳. تزریق جریان سینوسی به شبکه.
۴. ضریب توان بزرگتر از ۰/۸۵.
۵. تامین مجزا سازی مابین مدوله‌های خورشیدی و شبکه.
۶. بازدهی بالاتر از ۹۰٪ در توانی بیش از ۱۰ درصد توان نامی.

از نظر حفاظت باید علاوه بر حفاظت مدارهای داخلی حالت‌های خطای زیر را تشخیص دهد و سیستم را متوقف کند [۳]:

۱. تشخیص خطای کمبود ولتاژ، بیش‌بود ولتاژ، قطع یکی از فازها در ولتاژ شبکه و قطع سیستم.
۲. تشخیص خطای فرکانس شبکه و قطع سیستم.
۳. تشخیص خطای اتصال زمین مدوله‌های خورشیدی و قطع سیستم.

جهت تامین شرط مجزاسازی استفاده از ترانسفورماتور اجتناب ناپذیر است. در این صورت دو آرایش مطابق شکل ۱- الف و ب می‌تواند به کار رود.

اساسی برای طراحی مبدل عبارتند از:

$$\frac{V_{DC}(out)}{V_{DC}(in)} = \frac{N}{\frac{\pi^2}{8} \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] + j \frac{\omega}{\omega_0 Q}} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r N^2 C_r}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{R_L}{\omega_0 N^2 L_r} \quad (3)$$

طراحی سلف تشدید با قطعات موجود همواره مشکل بوده و نقش گلوگاهی در پیاده سازی مبدلهای تشدید دارد. بدین لحاظ نتیجه طراحی با معیار بهینه سازی سلف تشدید برای پیاده سازی انتخاب شد.

در مرحله بعد مدار با پارامترهای ردیف سه جدول ۱ با برنامه Spice شبیه سازی شد. دلیل این شبیه سازی این است که روابط طراحی (۱) الی (۳) و جدول ۱ براساس این فرض بدست آمده اند که شکل موج جریان تشدید سینوسی باشد. برای افزایش بازده، حداقل سازی Q مطلوب است، ولی به ازای Q کوچکتر از ۲ تقریب روابط زیاد می شود. لذا با برنامه Spice به روش سعی و خطا سلف L_r بزرگتر و خازن C_r کوچکتر انتخاب شد، به نحوی که فرکانس تشدید تقریباً ثابت بماند و مبدل با حداقل ولتاژ ورودی بتواند توان ۱۵۰۰ وات را به باس ۶۰۰V DC تزریق نماید. نتیجه بهینه سازی دستی در جدول ۲ درج شده است. ملاحظه می شود به ازای مقادیر جدید، ضریب کیفیت در حداکثر بار به ۱/۰۵ کاهش یافته و بازده از ۹۴/۱۵٪ به ۹۶٪ افزایش یافته است.

۳- اجزا سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه از اجزایی به شرح شکل ۳ تشکیل یافته است. مدولهای خورشیدی در ۷ سازه ۱۶ تایی نصب و تحت زاویه 30° در پشت بام ساختمان مدیریت امور انرژی نصب شده اند (شکل ۴). در این زاویه انرژی دریافتی از مدولها برای طول سال در شرایط تهران حداکثر می باشد [۸]. انرژی مدولها به توسط ۴ مدار ردیاب نقطه کار با حداکثر توان به قدرت ۱/۵ کیلووات که براساس توپولوژی مبدل تشدید موازی ساخته شده اند، به یک باس DC ۵۶۰ ولت تزریق می شوند. یک اینورتر سه فاز از نوع کنترل شده جریان، به نحوی کنترل می شود که

که در روابط فوق ω_0 فرکانس تشدید و ضریب کیفیت مدار تشدید است. در صورتیکه ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی، توان و فرکانس تشدید مشخص باشند، می توان با انتخاب N و Q به طرحهای متفاوتی دست یافت که همگی شرایط طراحی را تامین کنند. در [۷] یک روش بهینه سازی کامپیوتری برای طراحی مبدل توسعه یافته است که می تواند طراحی مبدل را بر اساس معیارهای بهینه سازی متفاوتی انجام دهد. معیارهای بهینه سازی عبارتند از حداقل سازی حجم سلف تشدید، حداقل سازی حجم ترانسفورماتور، حداقل سازی تلفات کل، یا ترکیب وزن داری از سه معیار فوق. البته برای دقیق بودن نتیجه بهینه سازی، باید مدل تلفات عناصر مبدل به مقادیر واقعی آنها نزدیک باشد. نتیجه طراحی مبدل با معیارهای بهینه سازی تلفات کل، حجم ترانسفورماتور و حجم سلف به ازای مقادیر:

$$255V \leq V_{DC}(in) \leq 271V$$

$$550V \leq V_{DC}(out) \leq 600V$$

$$P_{out}(\max) = 1500W$$

در جدول ۱ درج شده است.

به لحاظ محدودیت دستیابی به هسته فریت ساخته شده از مواد مغناطیسی با تلفات کم در بازار داخلی،

هارمونیکها بر طبق استاندارد IEC-1000-3-2 ارائه شده است [۹]. ملاحظه می‌شود هارمونیکهای شکل موج جریان همواره زیر محدوده مجاز قرار دارند و میزان دستیابی به استاندارد مذکور در هارمونیکهای مرتبه پایین بسیار خوب است.

ملاحظه می‌شود هارمونیکهای شکل موج جریان تا هارمونیک شصتم همواره زیر محدوده مجاز قرار دارند.

در جدول ۳ نتایج اندازه گیری توان خروجی در ساعات مختلف روز ۸۱/۵/۲۷ درج شده است. این اندازه‌گیری مربوط به زمانی بود که سیستم به صورت دستی روشن می‌شده و از ساعت ۹ صبح الی ۵ بعد از ظهر ثبت شده است. حداکثر توان خروجی ۳۷۰۰ وات ثبت شده است. لازم به توضیح است در شرایط تهران، به علت آلودگی هوا و بالا بودن دما، نمی‌توان انتظار توان خروجی متناظر با شرایط استاندارد یعنی دمای 25°C و $1/5\text{AM}$ را داشت. سیستم مذکور از اردیبهشت سال ۱۳۸۱ شروع به کار آزمایشی نموده است. مشکلات متعددی به هنگام عملکرد خودکار سیستم در شرایط اوضاع جوی مختلف بروز نموده که به تدریج حل شده است. از تیرماه ۱۳۸۲ عملکرد سیستم بدون اشکال ادامه داشته است.

نتیجه گیری

در این مقاله سیستم فتوولتاییک متصل به شبکه به قدرت ۵ کیلووات که با استفاده از مبدل‌های تشدید می موازی طراحی و پیاده‌سازی شده است گزارش شد. در این سیستم نیازی به استفاده از ترانسفورماتور سنگین ۵۰ هرتز نمی‌باشد، بلکه مجزاسازی به توسط ترانسفورماتورهایی به مراتب کوچکتر، با استفاده از هسته‌های فریت و در فرکانس ۶۰ کیلوهرتز تامین می‌گردد. جریانی که سیستم به شبکه تزریق می‌کند

ولتاژ باس DC همواره در ۵۶۰ ولت ثابت بماند. بدین ترتیب متناسب با توان دریافتی، توان خروجی اینورتر نیز تغییر می‌کند.

تنظیم پارامترهای کنترل کننده اینورتر یکی از مشکلات این طرح بود که با شبیه سازی سیستم در محیط Simulink و آزمون و خطا میسر شد و خارج از بحث این مقاله است. شکل ۵ دستگاه پردازشگر توان پیاده سازی شده را نشان می‌دهد. به لحاظ آنکه دستگاه به عنوان نمونه‌ای برای بررسی چگونگی عملکرد سیستم فتوولتاییک در کشور به کار می‌رود، در آن وسایل اندازه‌گیری متعددی برای سنجش کمیات الکتریکی ورودی و خروجی پیش‌بینی شده است. واضح است که در نمونه نهایی نیازی به این وسایل نیست.

۴- نتایج عملکرد سیستم

مبدل تشدید می موازی در رژیم بالاتر از فرکانس تشدید طراحی شده است. در این رژیم کلیدزنی در ولتاژ صفر امکان پذیر است، که باعث کاهش تلفات کلیدزنی می‌گردد. طراحی با Q کم تلفات هدایتی را تقلیل می‌دهد، ولی جریان تشدید از حالت سینوسی خارج شده، به صورت قطعه‌هایی از موج نمایی میرا در می‌آید. در شکل ۶، شکل موجهای ولتاژ V_{DS} یک ماسفت قدرت و جریان تشدید نشان داده شده اند. اعوجاج جریان تشدید مشهود است و شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر برای ماسفت تامین شده است.

شکل ۷ جریان خروجی اینورتر را که به توسط کارت اسیلوسکوپ با سرعت ۱۰۰ میلیون نمونه‌گیری در ثانیه ضبط شده است نشان می‌دهد. اینورتر از نوع کنترل شده جریان است. ملاحظه می‌شود که جریان تزریق شده به شبکه تقریباً سینوسی است. در شکل ۸ طیف فرکانس این شکل موج به انضمام محدوده مجاز

۹، ۱۳۸۰

- [8] E. Asl-Soleimani, S. Farhangi, M.S. Zabihi, "The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran," *Renewable Energy*, no. 24, pp. 449-468, 2001.
- [9] Z.Rosseto, P.Tenti, A.Zuccato, "Electromagnetic Compatibility issues in industrial equipment" *IEEE Industry Applications Magazine*, vol.5, no.6, 1999.

سینوسی است. هارمونیکهای جریان خروجی زیر محدوده مجاز تعیین شده به توسط استاندارد IEC-1000-3-2 قرار دارند. بخشی از نتایج عملکرد سیستم در این مقاله ارائه شد.

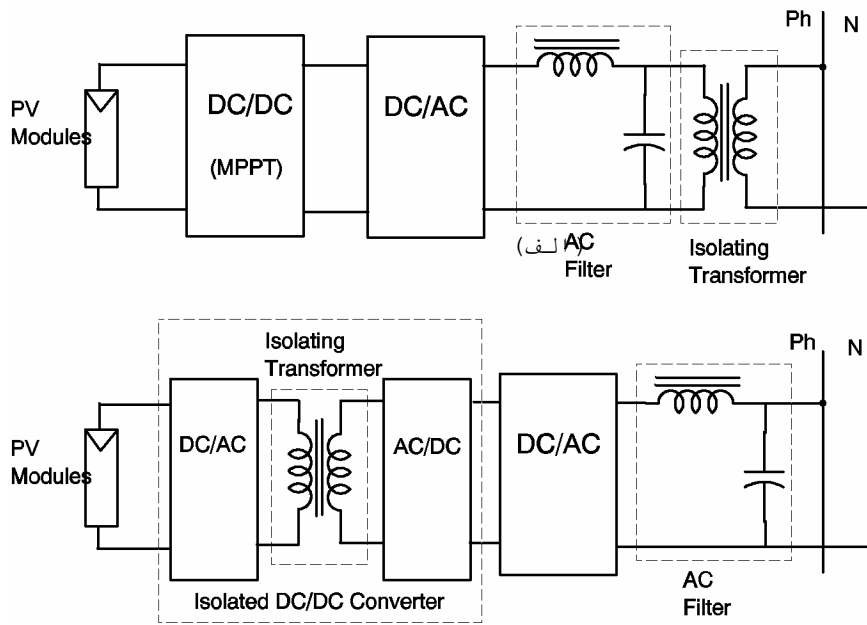
قدردانی

بدین وسیله از معاونت امور انرژی وزارت نیرو و سازمان انرژی های نوایران که پروژه طراحی و ساخت پرازشگر توان متصل به شبکه به قدرت ۵ کیلووات را تصویب، پشتیبانی مالی و نظارت نموده اند قدردانی می گردد.

مراجع

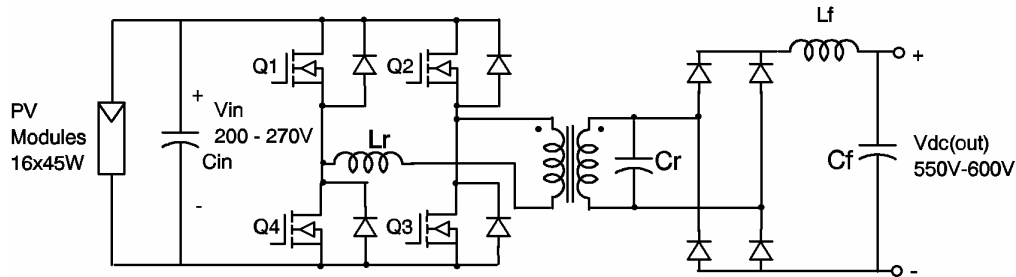
- [1] "Status Report: Solar Energy 1998-2001," Hahn-Meitner-Institute, 2002.
- [2] E. Asl-Soleimani, S. Farhangi "The experience of 10 years production, application of photovoltaic cells, modules and components in Iran," *ISES Solar World Congress*, 2003.
- [3] F. Sick, T Erge, "Photovoltaics in Buildings," James & James (Science Publishers), 1996.
- [4] R. L. Steigerwald, "A Comparison of half-bridge resonant converter topologies," *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp 174-192, 1988.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications, and Design" John-Wiley, 1995.
- [6] M. K. Kazimierczuk, D. Czarkowski, "Resonant power converters," John Wiley, 1995.

[۷] شاهرخ فرهنگی، امیر ناصر یزدانی "طراحی و بهینه سازی مبدل تشدید می موازی به منظور استفاده در اصلاح کننده توان" مجموعه مقالات نهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، جلد قدرت صفحات ۱-۹ الی ۸-

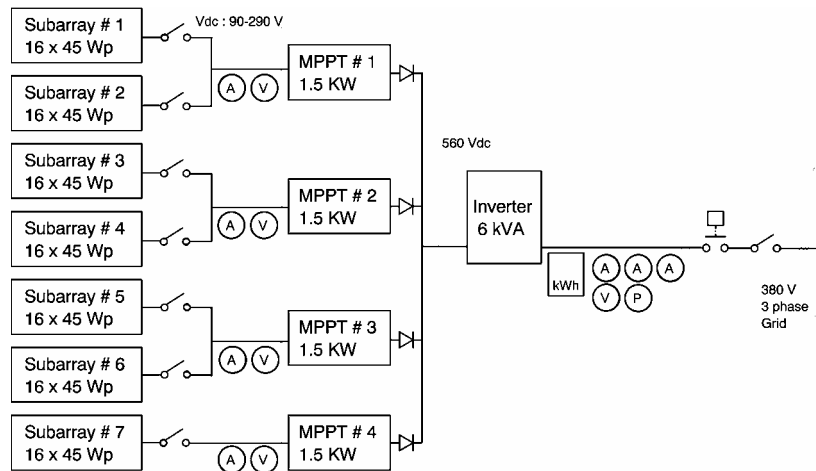


(ب)

شکل ۱- دو آرایش ممکن پردازشگر توان جهت تامین مجزاسازی



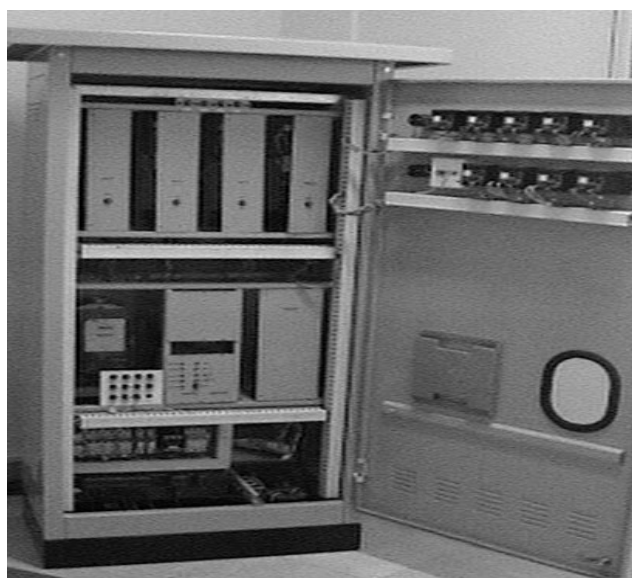
شکل ۲- مدار قدرت مبدل تشدید می موازی



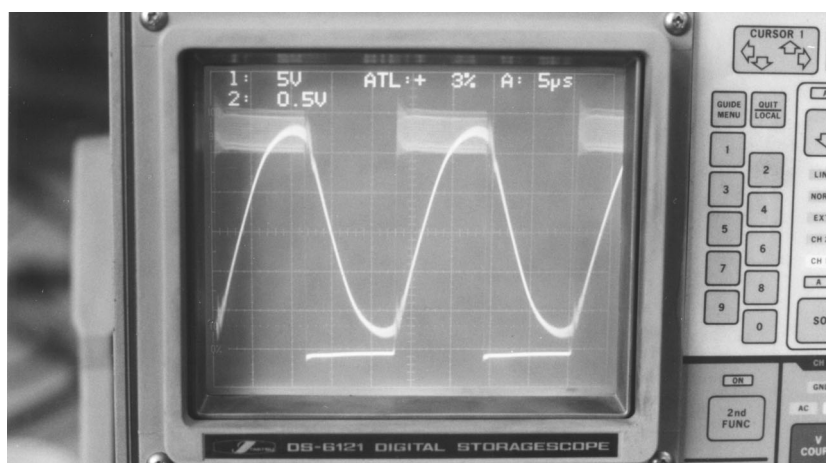
شکل ۳- اجزا سیستم متصل به شبکه به قدرت ۵ کیلووات



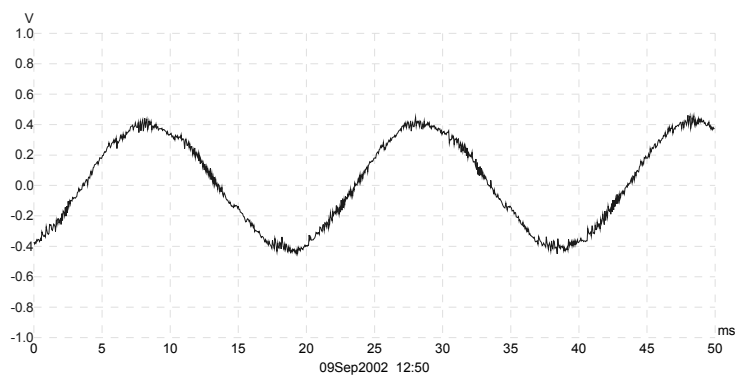
شکل ۴- نمای پشت مدولهای خورشیدی



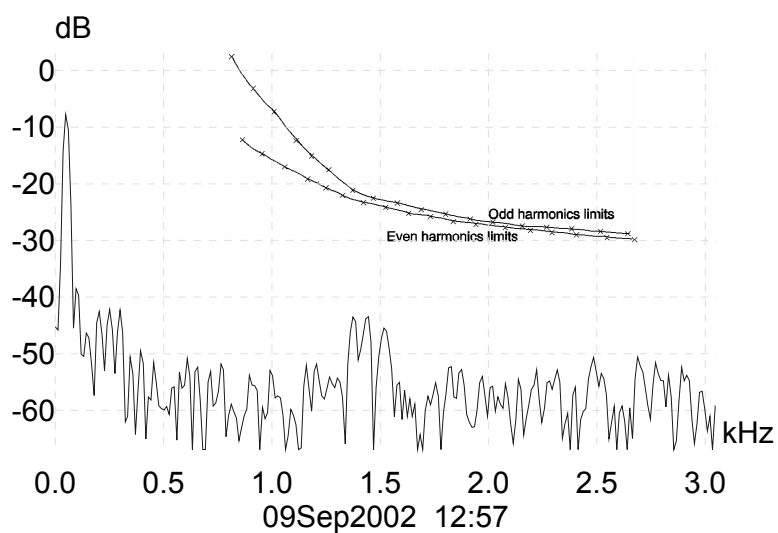
شکل ۵- دستگاه پردازشگر توان پیاده‌سازی شده



شکل ۶- شکل موجهای V_{DS} و جریان شدید



شکل ۷- جریان خروجی اینورتر



شکل ۸- طیف فرکانس جریان خروجی اینورتر

جدول ۱- نتایج طراحی بهینه با معیارهای بهینه سازی تلفات کل، حجم ترانسفورماتور و حجم سلف

f_o (KHz)	Opt	C_r (nF)	L_r (μ H)	N	I_p (A)	Q	η (%)
40	P_{loss}	59	403	0.814	11.81	4.05	96
45	V_{tr}	28	163	1.79	13.05	1.84	95.93
45	V_{ind}	18.5	126.8	2.31	13.99	1.42	94.15

جدول ۲-اصلاح طراحی به کمک برنامه Spice

f_o (KHz)	C_p (nF)	L_r (Mh)	N	I_p (A)	Q	$\% \eta$
42.5	16.4	160	2.31	10.5	1.05	96

جدول ۳-تغییرات توان خروجی در تاریخ ۸۱/۵/۲۷

۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳:۳۰	۱۳	۱۲:۳۰	۱۲	۱۱:۳۰	۱۱	۱۰	۹	ساعت
۴۰۰	۱۴۰۰	۲۱۰۰	۲۹۰۰	۳۷۰۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۳۵۰۰	۳۲۰۰	۳۰۰۰	۲۳۰۰	۹۰۰	توان خروجی (W)