

## طراحی و پیاده سازی اینورتر سه فاز چهار سوئیچ (FSTPI) با استفاده از میکروکنترلر قدرتمند Xmega

احسان بلور کاشانی<sup>۱</sup>، دکتر ابولفضل حلوائی نیاسر<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> دانشگاه کاشان، E.Boloor.kashani@gmail.com  
<sup>۲</sup> دانشگاه کاشان، Halvaei@kashanu.ac.ir

چکیده - با توجه به بازدهی بالای موتورهای سه فاز و مزایای دیگر از جمله پایین بودن نویزهای صوتی و ارتعاشات مکانیکی تولید شده توسط آن، استفاده از موتورهای سه فاز در همه ی مصارف از جمله مصارف خانگی بر موتورهای تکفاز برتری دارد. ولی به دلیل در دسترس نبودن برق سه فاز در خانه ها مجبوریم از موتورهای تکفاز استفاده کنیم. پیشرفت علم الکترونیک قدرت این امکان را به ما می دهد که بتوانیم برق تکفاز شهری را به برق سه فاز مورد نیاز برای کار موتورهای القایی سه فاز تبدیل کنیم.

هدف ما در این مقاله طراحی و ساخت یک چنین تبدیلی است. از آنجا که کاهش قیمت مبدل های الکترونیک قدرت یکی از پارامترهای اساسی در رقابت پذیری آن ها است، کاهش تعداد سوئیچ های به کار رفته در مبدل، به عنوان یکی از گران ترین قطعات به کار رفته در ساختار مبدل، همواره مورد توجه بوده است. مبدل های تکفاز به سه فاز ۴ سوئیچ به عنوان جایگزین مبدل های ۶ سوئیچ از سال ۱۹۹۰ مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفت. به لحاظ تئوری روش ها گوناگون کلید زنی برای رسیدن به هدف که همان داشتن سه ولتاژ هم دامنه و با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه از یکدیگر است ارائه شده است. در این مقاله ما قصد داریم یک اینورتر ۴ سوئیچ با توان حداکثر ۵ اسب بخار که در موتور های خانگی بسیار مورد استفاده است را به کمک الگوریتم سوئیچینگ SPWM (مدولاسیون پهنای پالس) را طراحی کنیم.

کلیدواژه: اینورتر سه فاز چهار سوئیچ، موتور القایی، مدلاسیون پهنای پالس، میکروکنترلر

### ۱- مقدمه

در سالهای اخیر با توجه به پیشرفت تکنولوژی مخصوصا در زمینه میکروکنترلرها و ورود آنها در عرصه الکترونیک قدرت این امکان فراهم گردیده است تا مشکلات موجود در صنعت روز به روز کاهش پیدا کند. در این مقاله برای ساخت اینورتر سه فاز از ۴ سوئیچ استفاده شده است که این روش علاوه بر کاهش نویزهای ناشی از سوئیچ زنی دارای الگوریتم ساده تری برای کنترل نیز می باشد.

میکروکنترلر Xmega64A3 یک پردازشگر فوق العاده قوی با فرکانس پردازش مرکزی حداکثر 200MHZ می باشد که از جمله ویژگی های آن علاوه بر فرکانس کاری بالا صنعتی بودن این کنترلر، قیمت مناسب، امکانات جانبی بسیار زیاد از جمله خروجی های PWM بسیار پیشرفته می باشد. که در اجرای این طرح عملی این مقاله از آن استفاده شده است.

### ۲- روش پیشنهادی:

در شبیه سازی و پیاده سازی این طرح ابتدا برق تکفاز ورودی توسط یکسو ساز تمام پل از AC به DC تبدیل میشود، و بعد به اینورتر FSTPI اعمال می گردد.

اینورتر این ولتاژ DC را با توجه به روش کنترلی به ولتاژ سه فاز تبدیل خواهد نمود میکروکنترلر Xmega پالس های کنترلی را برای انجام این مقوله تامین می نماید و به گیت های Power Mosfet ها اعمال می نماید و در نتیجه خروجی مناسب برای راه اندازی و کنترل موتور القایی بدست می آید.

### ۲-۱- منطق کاربردی FSTPI

مدار قدرت مر بوط به FSTPI و اتصال آن به موتور القایی در شکل 1 نشان داده شده است. این مدار تشکیل شده است از ۴ سوئیچ قدرت S1، S2، S3 و

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 4 & -2 \\ -2 & 4 \\ -2 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} + \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در جدول ۱ مدل‌های متفاوت عملکردی سوئیچ‌ها متناظر با ولتاژ خروجی فازها نشان داده شده است:

حالت‌های سوئیچ زنی		ولتاژ خروجی		
$S_1$	$S_2$	$V_{as}$	$V_{bs}$	$V_{cs}$
0	0	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$2V_c/3$
0	1	$-V_c$	$V_c$	0
1	0	$V_c$	$-V_c$	0
1	1	$V_c/3$	$V_c/3$	$-2V_c/3$

جدول ۱- ولتاژهای خروجی برحسب حال سوئیچ

### ۳- تولید PWM توسط Xmega

میکروکنترلر انتخابی در این مقاله از خانواده Xmega می‌باشد که از لحاظ کارایی در سطح بسیار بالایی قرار دارد. خانواده XMEGA نسل دوم از میکروکنترلرهای با مصرف توان پایین (Pico Power Technology) با قابلیت‌ها و کارایی بسیار بالاتر نسبت به سری قبل میکروهای AVR می‌باشند و قابلیت پردازش داده هم بصورت ۸ بیتی و هم به صورت ۱۶ بیتی را فراهم می‌نمایند همچنین از نظر معماری و ساختار تراشه این سری میکروکنترلرها مشابه خانواده قبل میکروهای AVR می‌باشند.

در سری ATXMEGA سرعت تراشه نسبت به نسل قبل خانواده AVR افزایش یافته (MIPS at 32 MHz) و ولتاژ تغذیه میکرو تا ۱.۶ V کاهش یافته است همچنین این خانواده دارای رنج مناسبی از حافظه قابل برنامه ریزی (16 to 384 KB) و به صورت پکیج‌های (44 to 100-pin) در دسترس می‌باشند. خانواده XMEGA با امکانات جانبی بسیار بالا شرایط مناسبی را جهت طراحی سیستم‌های کنترلی و ابزار دقیق - منابع تغذیه - سیستم‌های بی سیم و تحت شبکه - سیستم‌های اپتیکال - کنترل دور موتور - کنترل توان - سیستم‌های اندازه گیری و... با حداقل قطعات جانبی فراهم می‌نمایند. AWeX (Advanced Waveform Extension) یک واحد سخت افزاری طراحی شده برای پیاده سازی عملیات کنترل دور موتور و درایورهای قدرت است.

$S_4$  و نیز ۲ خازن مجزای  $C_1$  و  $C_2$ . دو فاز  $a$  و  $b$  به دو شاخه اصلی اینورتر و فاز  $c$  به نقطه میانی اتصال خازن‌ها وصل می‌گردند.

سوئیچ‌های  $S_1$  تا  $S_4$  توسط ورودیهای باینری به گیت خاموش و روشن می‌گردند ۱ به منزله روشن بودن و ۰ به منزله خاموش بودن سوئیچ تلقی می‌گردد.

سوئیچ‌های بالا و پایینی در هر شاخه نباید به صورت همزمان فرام بگیرند زیرا در این صورت یک اتصال کوتاه در باس DC رخ خواهد داد و موجب سوختن نوارهای مسی برد و سوئیچ‌ها می‌گردد. قدرت خواهد گریخت که در این مورد برای پیاده سازی حتما باید زمان‌های بازبایی معکوس و زمان‌های اعمال فرمان تا راه اندازی کامل در نظر گرفته شود، که این مسئله در خروجی‌های پالسهای PWM میکرو کنترلر ما باید لحاظ شود (Dead time insertion).

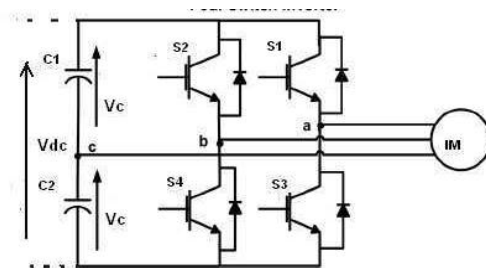
با این وجود در بعد واقعی باید  $S_3 = 1 - S_1$  و  $S_4 = 1 - S_2$  لحاظ گردد.

ولتاژ ترمینال‌های  $V_{as}$ ،  $V_{bs}$  و  $V_{cs}$  که بصورت ستاره به موتور القایی اعمال می‌شوند را می‌توان بصورت معادلات (1,2,3) بر اساس سوئیچ‌های بالایی شاخه‌ها نوشت:

$$V_{as} = \frac{V_c}{3} (4S_1 - 2S_2 - 1) \quad (1)$$

$$V_{bs} = \frac{V_c}{3} (-2S_1 + 4S_2 - 1) \quad (2)$$

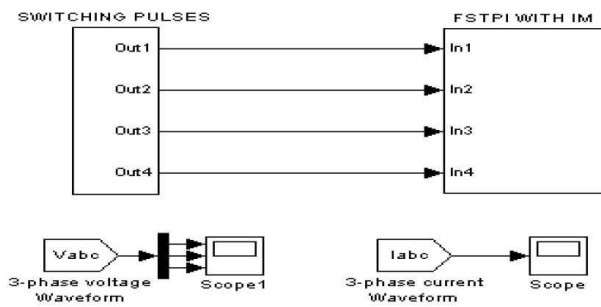
$$V_{cs} = \frac{V_c}{3} (-2S_1 - 2S_2 + 2) \quad (3)$$



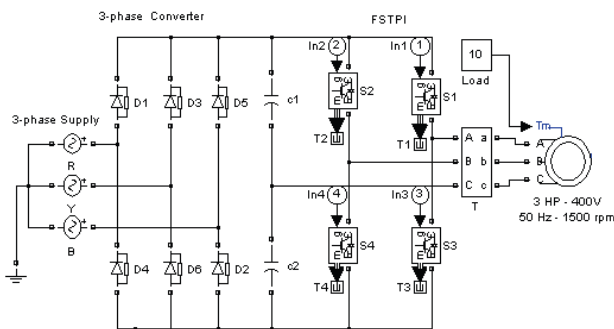
شکل ۱- مدار قدرت اینورتر ۴ سوئیچه

در اینجا  $V_{as}$ ،  $V_{bs}$  و  $V_{cs}$  ولتاژهای خروجی اینورتر،  $V_c$  ولتاژ دروسر لینک dc و  $V_{dc}$  ولتاژ دوسر خازن‌های  $C_1$  و  $C_2$  می‌باشد. ( $V_{dc} = V_c/2$ )

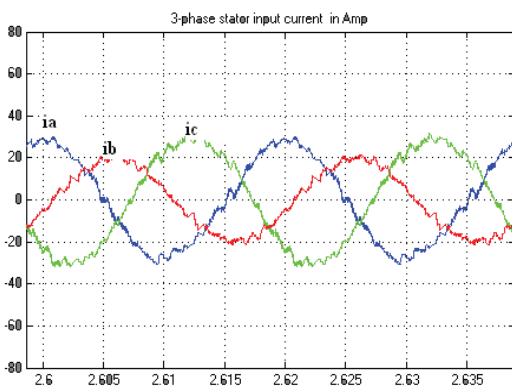
می‌توان معادلات بالا را بصورت زیر به فرم ماتریسی بازنویسی کرد:



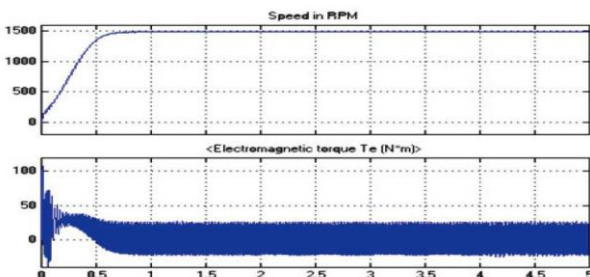
شکل ۲- بلوک دیاگرام FSTPI



شکل ۳- شماتیک ترسیم شده در متلب



شکل ۴- جریان های خروجی فاز ها



شکل ۵- سرعت روتور و گشتاور الکترو مغناطیسی بدون بار

در مورد Dead time insertion می توان این توضیح را ارائه کرد که در یک پل (Bridge) تشکیل شده از سوئیچ های قدرت مانند Mosfet یا IGBT، بین خاموش شدن هر سوئیچ قدرت و روشن شدن سوئیچ دومی که در همان بازو قرار دارد، باید یک زمان حداقل در حد میکروثانیه تاخیر وجود داشته باشد. در غیر اینصورت قبل از اینکه جریان سوئیچ روشن به صفر برسد، سوئیچ دوم هم روشن خواهد شد و یک جریان بسیار شدید بین ولتاژ مثبت و منفی پل ایجاد می شود و در یک لحظه باعث از بین رفتن سوئیچ های قدرت خواهد شد (به این جریان shoot through هم گفته می شود). به این زمان تاخیر به اصطلاح Dead time گفته می شود که یک منبع تولید فرمان برای درایور، باید بتواند آنرا بصورت سخت افزاری تامین کند. در واحد AWeX خانواده XMEGA، چنین امکانی پیش بینی شده که مقدار Dead time بصورت نرم افزاری و توسط رجیسترهای کنترلی یکبار تعریف و به سخت افزار اعمال شود.

#### ۴- شبیه سازی در متلب

در شکل ۲ اینورتر ۴ سوئیچه قبل از ساخت در نرم افزار متلب بصورت بلوک دیاگرام ترسیم شده است. و مدار داخلی نیز بصورت کامل در شکل ۳ به نمایش در آمده است. یکسو ساز از بصورت پل سه فاز پیاده سازی شده و FSTPI از ۴ سوئیچ و ۲ خازن تشکیل یافته است.

- ولتاژ تغذیه سه فاز: ۴۰۰ ولت و ۵۰ هرتز

- مشخصات موتور استفاده شده: ۳ اسب بخار، ۴۰۰ ولت، ۵۰ هرتز و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه

جریان های سه فاز خروجی  $I_a$ ،  $I_b$  و  $I_c$  که به موتور القایی اعمال گشته اند در شکل ۴ و خروجی مشخصه گشتاور سرعت موتور القایی بدون بار نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.

سرعت به صورت خطی و طی زمان بندی تعیین شده برای رسیدن به سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بعد از ۰.۷۵، به سرعت نامی خود می رسد که در شکل ۶ نمایان است. و نیز مشخصه گشتاور سرعت موتور برای بار ۱۰ نیوتن بر متر در این شکل مشخص است.

THD (اعوجاج هارمونیک کل) نیز در دو حالت با بار (5.7%) و بدون بار (9.41%) در شکل های (۸ و ۷) نشان داده شده اند.



جدول ۲ لیست شده اند.

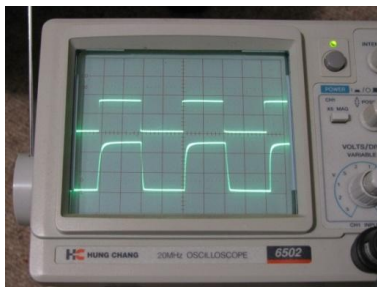
در پیاده سازی سخت افزاری به نکات زیادی از جمله ایزولاسیون بین مدار فرمان و قدرت باید در نظر گرفته شود. زیرا در صورت عدم محاسبه نویز به مشکلاتی همچون ریست شدن های متوالی یا آسیب به قطعات موجود در مدار فرمان می توان اشاره کرد.

مهمترین قسمت ایزولاسیون جدا کردن زمین های فرمان و قدرت می باشد که این کار توسط اپتوکوپلر انجام میگردد اما ذکر این نکته نیز بسیار مهم است که باید در انتخاب این قطعه بسیار دقت کرد زیرا خود این قطعات دارای تاخیر انتقال می باشند که این تاخیر بصورت عملی در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به این مورد و تحقیقات انجام شده اپتوکوپلر HCPL2531 استفاده شده است.

اساس کار این قطعات بر اساس تبدیل سیگنال های الکتریکی به نور و انتقال آن می باشد .

مشخصه	قطعات
1000uf 250V	خازن
Power Mosfet(IRF 640)	سوئیچ ها
0.5hp,3-phase,50Hz,400v,1430rpm	موتور القایی
Xmega64A3	میکروکنترلر
240v,10A,single phase bridge rectifier	یکسوساز

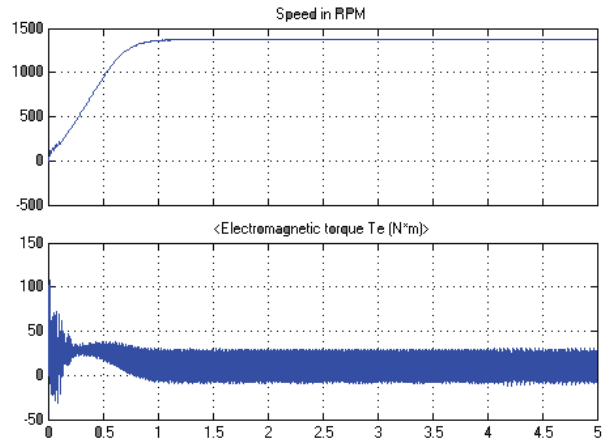
جدول ۲- مشخصات سخت افزاری



شکل ۹- شماتیک اپتوکوپلر بانضمام سرعت تغییرات ورودی و خروجی HCPL2531 در فرکانس 25KHz

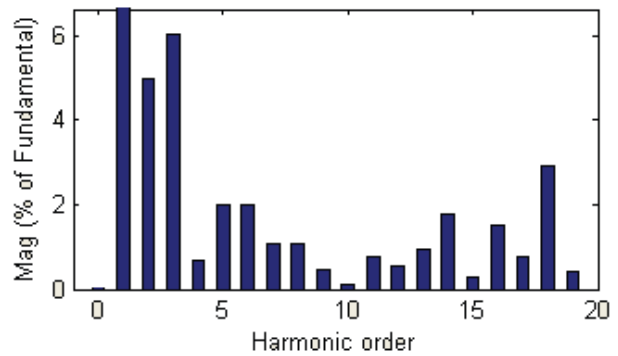
فرکانس کریبر برای ساخت پالس های PWM در این پروژه 7.6KHz در نظر گرفته شده است که یک انتخاب نرمال و بهینه می باشد ، زیرا هم نیاز به فیلتر خروجی را کاهش می دهد و هم تفات سوئیچینگ را خیلی بالا نمی برد.

تغییرات روی فرکانس و ولتاژ بر منطق V/F ثابت پایه ریزی



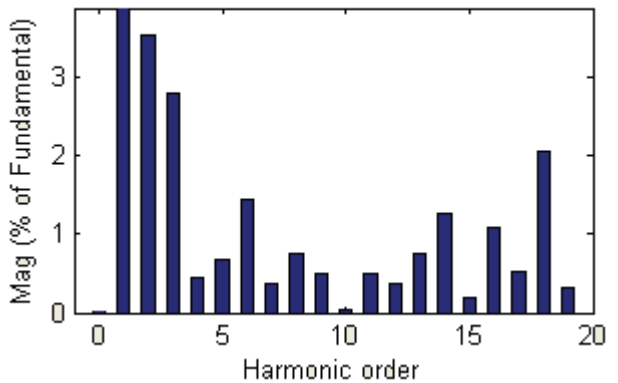
شکل ۶- سرعت روتور و گشتاور الکترو مغناطیسی با بار

THD= 9.41%



شکل ۷-عوجاج هارمونیک کل بدون وجود بار

THD= 5.70%



شکل ۸-عوجاج هارمونیک کل با وجود بار

## ۵- پیاده سازی طرح

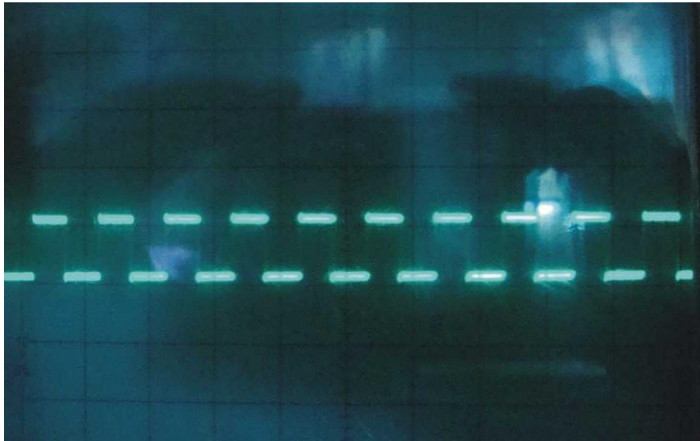
### ۵-۱- پیاده سازی نرم افزاری

برای ساخت ابتدا برنامه نوشته شده توسط زبان C در نرم افزار CodeVisionAVR کامپایل شده و توسط پروگرامر سخت افزاری کد ماشین بر روی تراشه Xmega64A3 دانلود می گردد.

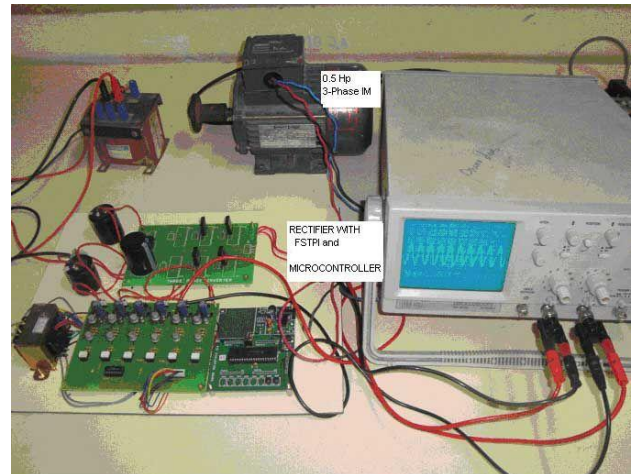
### ۵-۲- پیاده سازی سخت افزاری:

پیاده سازی کلی با تجهیزات کامل در حین تست در شکل ۱۰ نمایان است. مشخصات قطعات اساسی استفاده شده نیز در

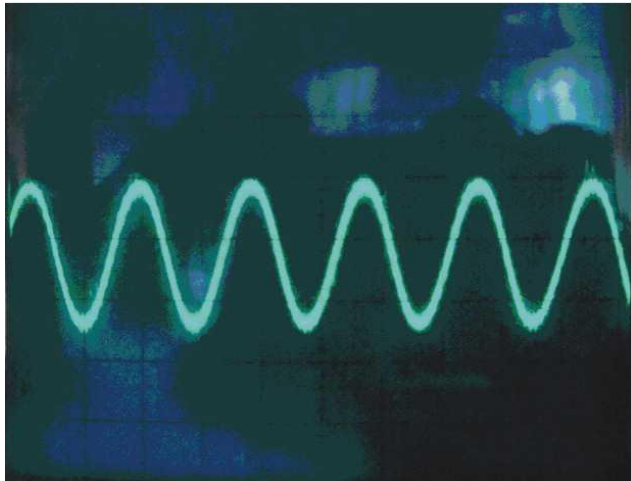
شده است ، و برای تغییر فرکانس و ولتاژ از تغییرات ولتاژ توسط پتانسیومتر هایی تعبیه شده بر روی برد استفاده می گردد که بعد از تبدیل آنالوگ به دیجیتال توسط واحد A/D میکروکنترلر توسط برنامه تغییرات بر روی خروجی اعمال خواهد گشت.



شکل ۱۲-پالس ورودی گیت S2



شکل ۱۰-پایاده سازی اینورتر FSTPI



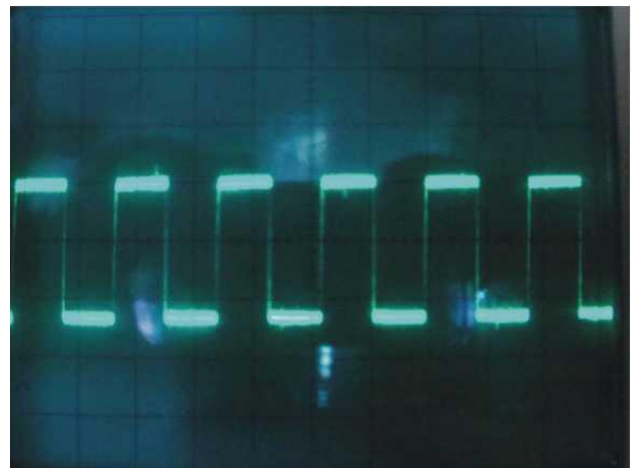
شکل ۱۳-جریان خروجی فاز a

### ۵-۳-نتایج عملی:

نتایج عملی در شکل های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده اند. شکل های ۱۱ و ۱۲ سیگنال های اعمالی به گیت سوئیچ های S1 و S2 می باشد، سیگنال های اعمالی به دو سوئیچ دیگر معکوس همین ۲ شکل می باشد و جریان خروجی فاز a نیز در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

### ۶-نتیجه گیری:

شبه سازی و پایاده سازی اینورتر ۴ سوئیچه بر پایه میکروکنترلر Xmega با موفقیت به انجام رسید. و همان طور که مشاهده می گردد جریان خروجی بسیار به شکل sin نزدیک است . پس بهترین نتیجه را میتوان کاهش هزینه نسبت به اینورتر ۶ سوئیچه و نیز کاهش تلفات را نیز برشمرد.



شکل ۱۱-پالس ورودی گیت S1



- [1] J. Kim, J. Hong, K. Nam: A Current Distortion Compensation Scheme for Four-switch Inverters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 4, April 2009, pp. 1032 – 1040.
- [2] .B.R. Correa, C.B. Jacobina, E.R.C. Silva, A.M.N. Lima: A General PWM Strategy for Four-switch Three-phase Inverters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 6, Nov. 2006, pp. 1618 – 1627.
- [3] M.N. Uddin, T.S. Radwan, M.A. Rahman: Fuzzy-logic-controller-based Cost-effective Four-switch Three-phase Inverter-fed IPM Synchronous Motor Drive System, IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 42, No.1, Jan/Feb. 2006, pp. 21 – 30.
- [4] C.T. Lin, C.W. Hung, C.W. Liu: Position Sensorless Control for Four-switch Three-phase Brushless DC Motor Drives, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 1, Jan.
- [5] F. Blaabjerg, D.O. Neacsu, J.K. Pedersen: Adaptive SVM to Compensate DC-link Voltage Ripple for Four-switch Three-phase Voltage-source Inverters, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No. 4, July 1999, pp.743 – 752.
- [6] M. Vasudevan, R. Arumugam, S. Paramasivam: High-performance Adaptive Intelligent Direct Torque Control Schemes for Induction Motor Drives, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, May 2005, pp.93 – 116.
- [8] M. Bounadja, A. Mellakhi, B. Belmadani: A High Performance PWM Inverter Voltage-fed Induction Machines Drive with an Alternative Strategy for Speed Control, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 4, No. 1, June 2007, pp.35 – 49.
- [9] K. Rathnakannan, V. Ranjan: The Modeling and the Analysis of Control Logic for a Digital PWM Controller based on a Nano Electronic Single Electronic Transistor, Serbian Journal of Electrical Engineering Vol. 5, No. 2, Nov. 2008, 285 – 304.