



## ۲-۷- مقالات ارائه شده به صورت پوستر

- پیاده سازی درایو جریان ثابت موتور پله‌ای پنج‌فاز به روش کنترل تک سیکلی (OCC) با استفاده از مدار منطقی برنامه پذیر پیچیده (CPLD)

✓ نویسندگان: ابوالفضل حلوائی نیاسر  
احسان بلورکاشانی

چکیده:

با پیشرفت روزافزون علم و فناوری همواره نیازهای جدید به وسایل و دستگاههای جدیدتر جهت هماهنگی همه بخشهای صنعت با آن به وجود می‌آیند. بدین منظور شناخت و طراحی راهکارهای مناسب امری است اجتناب ناپذیر؛ از جمله این پیشرفت‌ها ساخت نوع جدید و پیشرفته‌تری از موتورهای الکتریکی به نام موتورهای پله‌ای پنج‌فاز است. در این مقاله از روش نوین کنترل تک سیکلی (OCC)، برای اولین بار بمنظور تنظیم جریان فازهای موتور پله‌ای پنج‌فاز استفاده شده است که نتیجه آن کاهش تلفات سوئیچینگ با توجه به فرکانس کلیدزنی ثابت و همچنین پاسخ دینامیکی سریع‌تر می‌باشد. پیاده‌سازی سخت‌افزاری این روش بر اساس مدار منطقی برنامه‌پذیر پیچیده CPLD برای اولین بار انجام شده است؛ از این رو مشکلات متعدد میکروکنترلرها در درایوها و اینورترها از جمله نویز و تاخیر غیر قابل اندازه‌گیری در حین انجام دستورات بصورت ترتیبی در این نوع درایو وجود ندارد.

# پیاده سازی درایو جریان ثابت موتور پله‌ای پنج‌فاز به روش کنترل تک سیکلی (OCC) با استفاده از مدار منطقی برنامه پذیر پیچیده (CPLD)

ابوالفضل حلوائی نیاسر<sup>۱</sup>، احسان بلورکاشانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، halvaei@kashanu.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، Boloor@grad.kashanu.ac.ir

سوئیچینگ با توجه به فرکانس کلیدزنی ثابت و همچنین پاسخ دینامیکی سریع‌تر می‌باشد. پیاده‌سازی سخت‌افزاری این روش بر اساس مدار منطقی برنامه‌پذیر پیچیده CPLD برای اولین بار انجام شده است؛ از این رو مشکلات متعدد میکروکنترلرها در درایوها و اینورترها از جمله نویز و تاخیر غیر قابل اندازه‌گیری در حین انجام دستورات بصورت ترتیبی در این نوع درایو وجود ندارد. کلید واژه- کنترل تک سیکلی OCC، مدار منطقی برنامه‌پذیر CPLD، موتور پله‌ای پنج‌فاز، مدولاسیون عرض پالس PWM، درایو.

چکیده - با پیشرفت روزافزون علم و فناوری همواره نیازهای جدید به وسایل و دستگاه‌های جدیدتر جهت هماهنگی همه بخش‌های صنعت با آن به وجود می‌آیند. بدین منظور شناخت و طراحی راه کارهای مناسب امری است اجتناب ناپذیر؛ از جمله این پیشرفت‌ها ساخت نوع جدید و پیشرفته‌تری از موتورهای الکتریکی به نام موتورهای پله‌ای پنج‌فاز است. در این مقاله از روش نوین کنترل تک سیکلی (OCC)، برای اولین بار بمنظور تنظیم جریان فازهای موتور پله‌ای پنج‌فاز استفاده شده است که نتیجه آن کاهش تلفات

کاربری، نوع خاصی از موتورها را بکار برد. اما ساخت موتور پله ای با توجه به امکاناتی همچون ساختار مکانیکی ساده، پیاده‌سازی آسان درایو و همچنین هزینه بسیار پایین [۱] سبب کاهش هزینه‌ها در اجرای طرح بر پایه این نوع موتورها شده است. یکی از چندین مزایای بسیار زیاد این نوع الکتروموتورها تبدیل مکانیزم های بسیار پیچیده مکانیکی، به تنها یک محرک پله‌ای ساده می‌باشد. از جمله کاربردهای این نوع موتورها در زمینه‌های رباتیک (کنترل موقعیت)، اتوماسیون صنعتی [۲] و بصورت جزئی‌تر کنترل موقعیت در دستگاه‌هایی همچون چاپگرها، اسکنرها، کنترل هارددیسک و هرآنچه که نیاز به کنترل دقیق

## ۱- مقدمه

با درک میدان‌های مغناطیسی و کشف آنکه می‌توان انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل نمود تحولی عظیم در تاریخ بشری بوجود آمد، بگونه‌ای که بشر روز به روز به تفکر و طراحی و ساخت وسایلی که بتوانند با استفاده از انرژی الکتریکی، انرژی مکانیکی تولید نمایند روی آورد. از این رو انواع موتورهای الکتریکی به صحنه وجود آمده و همچنان سیر تکمیلی خود را طی نمودند تا به امروز که می‌توان برای هر نوع

دارد، می توان اشاره نمود. همچنین دارا بودن گشتاور راه اندازی با توجه به استفاده از آهنربای دائمی در ساختار روتور، گشتاور بهتری را نسبت به گشتاور موتورهای رلوکتانسی [۳] بوجود می آورد. موتورهای پله ای بصورت دوفاز و پنج فاز مورد استفاده قرار می گیرند که استفاده از نوع دو فاز آن معمول تر است؛ اما نوع پنج فاز ویژگی های برتری همچون دقت بالاتر، لرزش کمتر، و همچنین بازدهی بالاتری نسبت به دوفاز دارا می باشد. میزان حرکت زاویه ای این موتور در روش کنترلی تمام پله ای ۰/۷۲ درجه در هر پله یا عبارتی ۵۰۰ پالس در هر چرخش است که این دقت به میزان ۲/۵ برابر بیشتر در مقایسه با موتور پله ای دوفاز می باشد. اینگونه موتورها با توجه به گشتاور مناسب در سرعت های پایین معمولاً بصورت حلقه باز مورد استفاده قرار می گیرند [۴]. برای راه اندازی مناسب اینگونه موتورها با توجه به اینکه از ولتاژ و جریان DC استفاده می گردد؛ همچنین مقاومت اندک سیم پیچ ها استفاده از تکنیک های کنترل جریان الزامی می باشد.

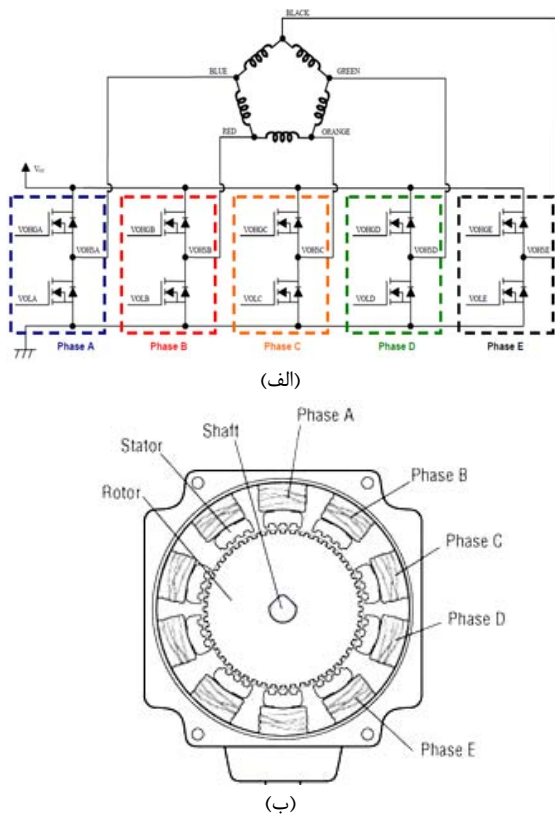
یکی از روش های رایج در این زمینه استفاده از مدولاسیون پهنای پالس یا PWM می باشد که در مراجع [۵] و [۶] و [۷] به آنها پرداخته شده است. یکی از معایب موجود در روش PWM فرکانس سوئیچینگ متغیر و نیز قابلیت دینامیکی کند در دنبال کردن تغییرات خروجی و اعمال پالس های مناسب به ورودی ترانزیستورهای راه انداز می باشد. پیاده سازی های متنوعی با استفاده از میکروکنترلرها در این زمینه صورت گرفته است؛ از جمله در مراجع [۸] و [۹]. از انواع متداول پیاده سازی های معروف در زمینه کنترل موتورهای پله ای دوفاز استفاده از مدار مجتمع L297 [۱۰] می باشد که در آن برای کنترل جریان از روش مدولاسیون پهنای پالس chopping استفاده می گردد. در مرجع [۱۱] استفاده از این مدار مجتمع به همراه میکروکنترلر برای موتورهای پنج فاز نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما همچنان اشکالات استفاده از میکروکنترلر و همچنین روش کنترلی جریان پا برجاست. البته این روش با استفاده از FPGA برای موتورهای پنج فاز در مرجع [۱۲] نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله برای کنترل جریان از روش کنترل تک سیکلی بهره گرفته شده است. این روش در کاربردهایی همچون فیلترهای اکتیو، اینورترها، مبدل های باک و بوسست استفاده گردیده است [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]. البته این روش بیشتر برای کنترل ولتاژ و یا جبران سازی توان راکتیو مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله با تغییر در پیاده سازی این روش، از آن جهت کنترل بهینه جریان در موتورهای پله ای استفاده شده

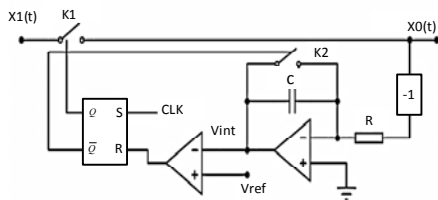
است. از مهم ترین مزایای این روش پیاده سازی بسیار ساده و تمام آنالوگ آن است. همچنین پیاده سازی کامل درایو بر پایه روش کنترل تک سیکلی با استفاده از مدار منطقی برنامه پذیر پیچیده CPLD باعث شده که مزیت هایی همچون سادگی، هزینه پایین، و قابلیت اطمینان بالا را به همراه داشته باشد.

## ۲- مدل سازی موتور پله ای پنج فاز

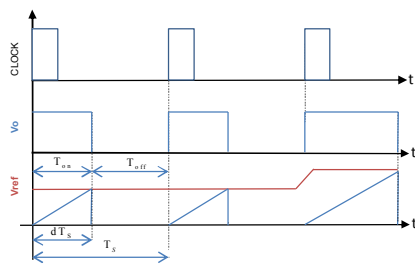
نحوه اتصال سیم پیچ های استاتور به ترانزیستورهای قدرت در این نوع موتور در شکل (الف-۱) نشان داده شده است که سوئیچ ها با توجه به راه اندازی بصورت تمام پله؛ ده حالت متفاوت (۷۲). درجه در هر پله) و یانیم پله؛ بیست حالت متفاوت (۳۶). درجه در هر پله) به خود می گیرند. نحوه قرارگیری سیم پیچ ها و همچنین دندانه ای روتور از لحاظ فیزیکی نیز در شکل (ب-۱) نشان داده شده است. روتور آهنربای دائم با قطب N می باشد و با توجه به نحوه تغذیه سیم پیچ ها و ترتیب روشن شدن سوئیچ ها، قطب S توسط سیم پیچ های استاتور بوجود می آید. نحوه حرکت مکانیکی موتورهای پله ای با توجه به اعمال میدان الکتریکی در مرجع [۱۶] بصورت کامل بررسی شده است.



شکل ۱: (الف) ساختار کلی موتور پله ای پنج فاز (ب) نحوه اتصالات فازهای موتور به درایو



(الف)



(ب)

شکل ۲: (الف) شماتیک کنترل کننده تک سیکلی (ب) شکل موج های نقاط مختلف کنترل کننده

$$K(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < t_{on} \\ 0, & t_{on} < t < T_s \end{cases} \quad (5)$$

که در آن  $T_s$  دوره تناوب کلاک پالس اعمالی به سوئیچ‌ها می‌باشد. در هر دوره تناوب سوئیچ به اندازه  $t_{on}$  ثانیه روشن و به مدت  $t_{off}$  ثانیه خاموش می‌باشد که  $T_s = t_{on} + t_{off}$  می‌باشد و ضریب روشن بودن  $d = t_{on} \cdot (T_s)^{-1}$  که از مقایسه موج مرجع با موج خروجی انتگرال‌گیر حاصل می‌گردد. زمانی که کلاک پالس به ورودی set فلیپ‌فلاپ اعمال می‌گردد؛ خروجی، اصلی یک  $(K1=1)$  و خروجی معکوس نیز صفر  $(K2=0)$  می‌گردد؛ در این زمان انتگرال‌گیر شروع به کار می‌کند؛ شکل (۲-ب) که رابطه آن بصورت زیر می‌باشد:

$$V_{int} = \frac{1}{RC} \int_0^{t_{on}} x(t) dt = V_{ref} \quad (6)$$

پس از هم‌سطح شدن ولتاژ مرجع و ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر ورودی Reset فلیپ‌فلاپ یک شده و سریعاً خروجی  $Q$ ، صفر  $(K1=0)$  و  $\bar{Q}$  نیز یک  $(K2=1)$  می‌گردد. مشخص است که فرکانس سوئیچ زنی کاملاً ثابت، و فقط این عرض پالس است که تغییر می‌کند. پس می‌توان در یک پرپود سوئیچ‌زنی  $x(t)$  را مساوی متوسط خروجی  $X_0(t)$  قرار داد:

برای مدل کردن کامل یک موتور پله‌ای پنج‌فاز، ولتاژهای القا شده در سیم‌پیچ‌های هر فاز استاتور در اثر حرکت روتور باید در نظر گرفته شوند؛ این ولتاژهای القایی که شبه سینوسی هستند در اثر وجود شار پیوندی مغناطیسی آهنربای دائمی بکار رفته در روتور بوجود می‌آیند [۱۷]. میزان شار پیوندی برای یک موتور پله‌ای پنج‌فاز بصورت روابط زیر تشریح می‌گردند:

$$\begin{aligned} \psi_a &= \psi_m \sin(P_\theta) \\ \psi_b &= \psi_m \sin(P_\theta - 2\pi/5) \\ \psi_c &= \psi_m \sin(P_\theta - 4\pi/5) \\ \psi_d &= \psi_m \sin(P_\theta - 6\pi/5) \\ \psi_e &= \psi_m \sin(P_\theta - 8\pi/5) \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\psi_m$  ماکزیمم شار پیوندی هر سیم‌پیچ  $P_\theta$ ، زاویه الکتریکی می‌باشد که از  $\omega_p$  بدست محاسبه می‌گردد.  $P$  تعداد دندان‌های روتور بوده که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = 90 / \text{step length} = 90 / 0.72 = 125 \quad (2)$$

ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ‌های هر فاز برابر است با نرخ تغییرات شار پیوندی است لذا این ولتاژها از رابطه (۳) و همچنین شار محاسبه شده توسط معادلات (۱) بدست می‌آیند:

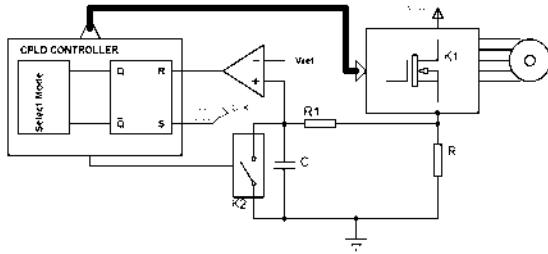
$$e_i = \frac{d\psi_i}{dt} \quad (3)$$

$$V_i = R i_i + L (di_i / dt) + e_i \quad (4)$$

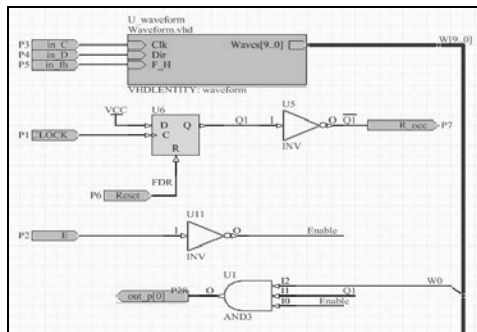
که  $i = a, b, c, d, e$  می‌باشد. همچنین ولتاژ و جریان لحظه‌ای هر فاز را بصورت معادله (۴) می‌توان بیان نمود.

### ۳- کنترل موتور پله‌ای پنج‌فاز به روش کنترل تک سیکلی

روش کنترل تک‌سیکلی از نوع کنترل غیرخطی می‌باشد که کاربردهای بسیار گسترده‌ای را شامل می‌شود. در واقع این روش، روش توسعه یافته مدولاسیون عرض پالس PWM می‌باشد که از یک انتگراتور با مدار ریست سخت افزاری، فلیپ‌فلاپ نوع D، مقایسه‌گر و مولد کلاک پالس تشکیل شده است و در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. اصول این روش کنترل دقیق کلیدهای  $K1$  و  $K2$  می‌باشد که توسط رابطه (۵) تعریف شده است.



شکل ۳: شمای کلی درایو و کنترلر جریان به روش کنترل تک سیگلی



شکل ۴: رفتار کدنویسی شده جهت برنامه ریزی CPLD بصورت شماتیک

کنترل تک سیگلی به این قسمت اتصال داده می‌شود، همچنین برای ایجاد  $\bar{Q}$  از یک گیت معکوس کننده استفاده شده است که خروجی  $R\_occ$  را جهت اعمال به سوئیچ ریست انتگرال گیر تشکیل می‌دهد. جهت اعمال روش کنترلی تک سیگلی به خروجی احتیاج به یک گیت AND می‌باشد تا زمانی که سطح یک به هر کدام از سیم پیچ‌های موتور باید اعمال گردد، با خروجی Q فلیپ فلاپ همزمان گردد تا بجای سطح کامل یک، سیگنالی با عرض پالس کنترل شده مطابق با جریان محدود شده به سیم پیچ اعمال گردد. ورودی دیگری بنام E نیز جهت فعال و یا غیرفعال سازی خروجی‌ها به صورت کلی نیز در نظر گرفته شده است. در شکل زیر فقط یکی از خروجی‌ها نشان داده شده است که این روند جهت تمامی خروجی‌ها اعمال می‌گردد. ورودی F\_H نیز برای تعیین وضعیت تمام پله و یا نیم پله در نظر گرفته شده است. جهت شبیه سازی منطق برنامه از قسمت شبیه سازی نرم افزار ISE Design Suite استفاده شده است که در شکل (۵) نشان داده شده است. در این شکل به ورودی Clk قطار پالسی اعمال شده است همچنین فعال ساز E در وضعیت یک و ورودی‌های Dir، F\_H بصورت پیش فرض مقداردهی شده‌اند. با توجه به این نکته که در این شبیه سازی رفتار انتگرال گیر و مقایسه گر خارجی را نمی‌توان لحاظ کرد؛ ورودی RESET بصورت دستی نگاشته شده است.

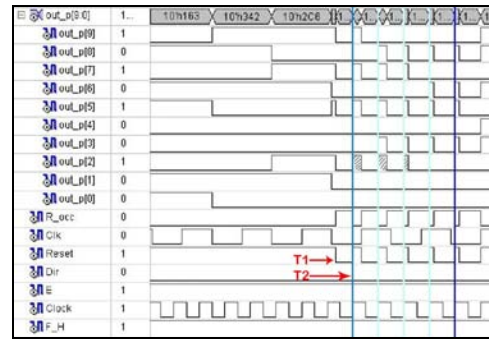
$$x(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} x_0(t) dt = KV_{ref}(t) \quad (7)$$

که در آن  $K=R.C.(T_s)^{-1}$  می‌باشد. در واقع K ضریبی از ثابت زمانی  $T_s$  می‌باشد؛  $K=1/k.T_s$  پس انتخاب مقادیر مناسب برای R و C در این روش بسیار مهم هستند.

جهت کنترل جریان موتور پله ای ابتدا باید میزان جریان اندازه گیری شود و سپس با استفاده از روش کنترل تک سیگلی محدود گردد. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است جریان پس از عبور از سیم پیچ‌های موتور (با توجه به سوئیچ زنی کلیدهای K1) از مقاومت R که مقاومت ناچیزی (کمتر از یک اهم) می‌باشد عبور کرده و سبب افت ولتاژی متناسب با مقدار مقاومت می‌گردد؛ انتگرال گیری از این ولتاژ توسط مقاومت‌های  $R_1$  و C انجام شده و سپس با ولتاژ مرجع مقایسه می‌گردد. در واقع میزان ولتاژ مرجع است که میزان جریان سیم پیچ‌ها را تعیین می‌کند و در مقایسه با خروجی انتگرال گیر عرض پالس خروجی کنترلر را تعیین می‌کند. کلید K2 نیز در زمان هم سطح شدن مقادیر ولتاژ مرجع و متوسط جریان موتور، وظیفه ریست انتگرال گیر را برعهده دارد.

#### ۴- شبیه سازی

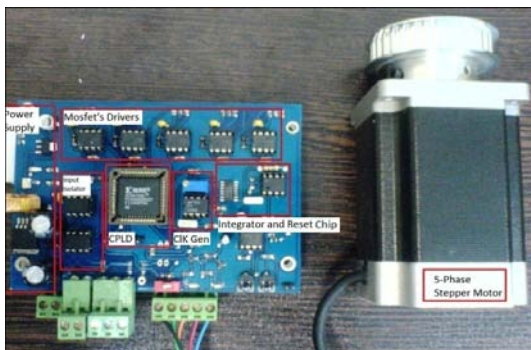
برای شبیه سازی ابتدا نیاز است تا رفتار فلیپ فلاپ و نیز جداول مربوط به حالت‌های سوئیچ‌ها در هر پله کدنویسی شده، و بر روی تراشه CPLD که از خانواده تراشه‌های شرکت Xilinx به نام Xc9572xl [۱۸] انتخاب گردیده است، بارگذاری گردد؛ که برای این قسمت از نرم افزار ISE Design Suite جهت کدنویسی به زبان VHDL استفاده شده است؛ رفتار این برنامه بصورت شماتیک نیز در نرم افزار Altium Designer مدل گردیده است که در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن ورودی Clk جهت اعمال پالس (جهت حرکت هر پله موتور)، ورودی Dir جهت تعیین جهت چرخش موتور (راست گرد و یا چپ گرد)، ورودی فرکانس ثابت جهت اعمال به ورودی SET فلیپ فلاپ (رفتار فلیپ فلاپ RS جهت استفاده در روش کنترل تک سیگلی با توجه به عدم وجود فلیپ فلاپ RS بدون کلاک، با یک فلیپ فلاپ نوع D مدل شده است؛ بدین صورت که ورودی D به سطح یک منطقی اتصال دارد و پالسهای ثابت ورودی به کلاک این فلیپ فلاپ اعمال می‌گردد؛ پس در هر لبه بالارونده سطح یک به خروجی اعمال می‌گردد؛ و این فلیپ فلاپ دارای ورودی ریست اجباری است که خروجی مقایسه گر در روش



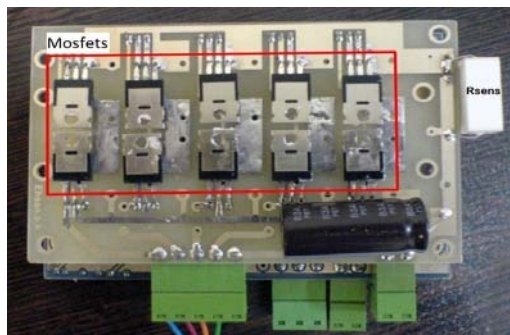
شکل ۵: رفتار ورودی و خروجی‌های CPLD

(۶) نشان داده شده است. برد دوم مربوط به طبقه قدرت می‌باشد که طبق شمای شکل (الف-۱)، با استفاده از سوئیچ‌های ماسفت بصورت سخت‌افزاری پیاده سازی شده است؛ در شکل (ب-۶) نشان داده شده است. موتور استفاده شده جهت پیاده سازی، یک موتور پله ای پنج فاز با جریان نامی ۱.۴ آمپر در هر فاز می‌باشد همچنین مقاومت سیم‌پیچ ۴ اهم در هر فاز می‌باشد؛ همانطور که مشخص می‌باشد در صورت استفاده از ولتاژی در حد ۱۲ ولت جریان سه آمپری باعث افزایش حرارت و همچنین مشکلاتی همچون از بین رفتن عایق سیم‌پیچ‌ها و در نتیجه سوختن موتور را در بر خواهد داشت که با توجه به استفاده از روش کنترل جریان تک سیکلی ولتاژهای مختلف هیچگونه تحدیدی برای موتور نیستند.

با توجه به تنظیم جریان مرجع سطح انتگرال‌گیری تغییر خواهد کرد که در شکل (۷) شکل موج خروجی انتگرال‌گیر (با توجه تنظیم جریان مرجع در مقدار نامی) بهمراه سیگنال اعمالی به سوئیچ ریست کننده خازن انتگرال‌گیر نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۶: (الف) برد قسمت کنترل (ب) برد قسمت قدرت متصل به موتور پله ای

تا زمانی که سطح این ورودی یک می‌باشد (سطح انتگرال‌گیری کمتر از سطح مرجع می‌باشد یعنی جریان کمتر از نقطه دلخواه است) خروجی‌های ۰ تا ۹ با توجه به جدول زمانی بصورت سطح کاملا صفر و یا یک ظاهر می‌شوند؛ خروجی R\_occ نیز در این محدوده صفر می‌باشد (سوئیچ ریست انتگرال‌گیر در حالت باز قرار داشته و فرصت انتگرال‌گیری از جریان فراهم می‌باشد).

زمانی که ورودی ریست صفر می‌گردد بدین معنی که ولتاژ خروجی انتگرال‌گیر به سطح ولتاژ مرجع رسیده است (زمان T1)، در همین زمان خروجی R\_occ نیز تغییر وضعیت داده و خازن انتگرال‌گیر ریست می‌گردد؛ پس از آن در زمان (زمان T2) لبه بالا رونده CLOCK، خازن انتگرال‌گیر از ریست خارج گردیده و همچنین ورودی RESTE یک می‌شود، در این لحظه خروجی‌هایی که سطح یک داشته‌اند تا زمانی که سطح ورودی RESTE یک (با توجه به زمانی که طول می‌کشد تا سطح انتگرال‌گیری از جریان به سطح مرجع برسد) می‌باشد، یک و همزمان با صفر شدن RESTE خروجی‌ها نیز صفر می‌گردند. همانطور که در شکل نشان داده شده است این روند در پریودهای بعدی CLOCK نیز به همین صورت تکرار می‌گردد و فقط این عرض یک بودن پالس‌های خروجی است که تغییر می‌نماید. همان‌طور که سطح یک بودن بصورت هاشور خورده روی خروجی دوم نشان داده شده است، ثابت بودن فرکانس و سنکرون بودن با CLOCK نمایان است.

## ۵- پیاده سازی سخت‌افزاری

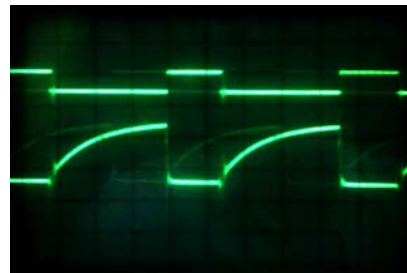
پیاده سازی بصورت دو برد مجزا که برد اول مربوط به قسمت کنترل و تحلیل و بررسی سیگنال می‌باشد که در آن از مدار منطقی برنامه پذیر پیچیده CPLD (Xc9572x1) که از ۱۶۰۰ گیت تشکیل شده استفاده شده است که در شکل (الف)-

داراست. علاوه بر آن ثابت بودن فرکانس در روش کنترل تک سیکی امکان محاسبه دقیق تلفات و همچنین افزایش راندمان درایو را نیز به همراه دارد. در نتیجه این روش می تواند جایگزین بسیار مناسبی جهت کنترل جریان در این نوع موتورها گردد.

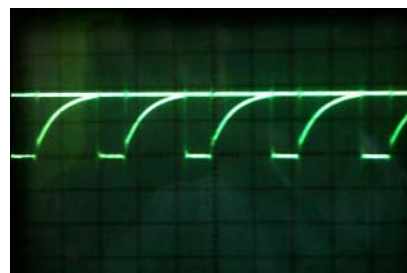
## مراجع

- [1] Y. Li, J. Huo, X. Li, J. Wen, Y. Wang and B. Shan, "An Open-Loop Sin Microstepping Driver based on FPGA," International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), pp. 223-227, 2010.
- [2] K-M. Lee, and C-K. Kwan, "Design concept development of a spherical stepper for robotic applications," IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 7, No. 1, pp. 175-181, 1991.
- [3] T. Kenjo and a. Sugawara. "Stepping Motors and Microprocessor Control," Oxford Clarendon Press, p. 41-47, 2003.
- [4] N.Q Le and W.J Jae, "An open-loop stepper motor driver based on FPGA," IEEE International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1322-1326. 2007.
- [5] A. Bellini, C. Concarì, G. Franceschini, and A. Toscani, "Mixed Mode PWM for High Performance Stepping Motors," IEEE Industrial Electronics Society Conf, pp.1212-1217, 2004.
- [6] A. Bellini, C. Concarì, G. Franceschini, and A. Toscani, "Mixed-Mode PWM for Highperformance Stepping Motors," IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 54, No. 6, pp. 3167-3177, 2007.
- [7] P. adhikari and M. Okaro, "Five-level Five-phase PWM Signal Generation using FPGA," IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 55, No. 5, pp. 1-5, 2008.
- [8] S.M. Yang and E.L. Kuo, "Damping a Hybrid Stepping Motor with Estimated Position and velocity," IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 18, No. 3, pp.880-888, 2003.
- [9] K.W.H. Tsui, N.C. Cheung and K.C.W. Yuen. "Novel Modeling and Damping Technique for Hybrid Stepper Motor," IEEE Trans.On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 1, pp. 202-211, 2009.
- [10] Data sheet of the L297 IC, available: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/L/2/9/7/L297.shtm](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/2/9/7/L297.shtm)
- [11] T.S. Weerakoon and L. Samaranayake, "Development of a Novel Drive Topology for a FivePhase Stepper Motor," IEEE Industrial and Information Systems Conf. pp. 1-6, 2008.
- [12] S.M Jong, S.T Siao and Y. Kang, "An Implementation Of FPGA based Driver For approaching High Resolution Of Five-phase Hybrid Step Motor", International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), Vol. 5, pp. 2543-2548, 2010.
- [13] Tang, Y and et al. "Improved one-cycle-control scheme for three-phase active rectifiers with input inductor-capacitor-inductor filters," IET Power Electronics, pp. 603-614, 2011.
- [14] C. Huang, L. Wei-ming, and G. Xiao-jun. "One-Cycle Control of single-phase PFC rectifiers with fast dynamic response and low distortion," International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Vol. 3. pp. 1621-1625, 2012.
- [15] M. Wang, H. Yaqian and X. Chengyu. "One-cycle control based voltage source inverter," IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Vol. 2, pp. 1176-1180 2005.
- [16] W. Douglas "Control of stepping motors," Jones on Stepping Motors, 1995.
- [17] K.C. Lim, J.P. Hong and G.T. Kim. "Characteristic analysis of 5-phase Hybrid Stepping Motor Considering the Saturation Effect," IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 37, pp. 3518-3521, 2001.
- [18] Data sheet of the Xc9572xl CPLD <http://www.xilinx.com>

زمانی که سوئیچ در وضعیت خاموش قرار دارد انتگرال گیری شروع به کار کرده و از میزان افت ولتاژ دو سر مقاومت قرار داده شده در مسیر زمین سوئیچ های قدرت شروع به انتگرال گیری می کند و این عمل تا زمانی که این مقدار به سطح ولتاژ مرجع که معادل جریان نامی از سیم پیچ ها است برسد ادامه پیدا می کند و پس از آن سریعاً ریست می گردد؛ که با توجه به عملکرد روش کنترلی و اعمال پالسهای PWM و همچنین خاصیت سلفی سیم پیچ فاز در زمان یک بودن عرض پالس؛ سلف شروع به شارژ و در زمان صفر بودن، دشارژ می گردد که در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷: شکل موج خروجی انتگرال گیر به همراه سیگنال کنترلی مدار ریست آن



شکل ۸: شکل موج خروجی انتگرال گیر به همراه ولتاژ مرجع

## ۶- نتیجه گیری

استفاده از مدار منطقی برنامه پذیر پیچیده CPLD و تلفیق آن با روش کنترل جریان به روش تک سیکی جهت کنترل موتور پله ای علاوه بر مزایایی همچون سرعت دینامیکی بسیار بالا، عدم اجرای برنامه بصورت ترتیبی با توجه به پیاده سازی سخت افزاری کامل، سادگی پیاده سازی، قیمت تمام شده بسیار پایین تری نسبت به روش های کنترل جریان به روش های مرسوم را