



دانشگاه زنجان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی

پایان نامه برق- گرایش الکترونیک

عنوان:

کنترل دور موتور القایی به روش DTC بر روی FPGA

استاد راهنما:

آقای دکتر اصغر طاهری

نگارش:

محمد عدالتیان- حسین معصوم خانی

سپاسگزاری

حمد و سپاس خدای را که هر چه داریم از اوست.
سپاس از استاد گرامی جناب آقای دکتر اصغر طاهری که در تمام
مراحل این تحقیق همواره راهنما و راه گشا بودند.
بدین وسیله از مساعدت های جناب آقای مهندس قاسمیان
دانشجوی دکتری برق دانشگاه زنجان تشکر می نمایم.

چکیده

در کنترل DTC بر اساس مکان زاویه‌ای بردار شار استاتور در دستگاه d-q حول مبدا و همچنین با استفاده از دو سیستم کنترل هیستریزس برای اندازه شار و اندازه گشتاور الکتریکی موتور، وضعیت مناسب برای سویچ‌های الکترونیک قدرت برای عملکرد درست موتور تعیین می‌شود. به این ترتیب شار در یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند و اندازه شار و گشتاور در یک بازه هیستریزس حول مقدار مطلوب خود باقی می‌مانند. بهبود عملکرد کنترل‌کننده هیستریزس نیازمند کاهش زمان اجرای حلقه کنترل دیجیتال است. به طور نوعی با پیاده‌سازی الگوریتم DTC به طور کاملاً ساده در یک پردازنده معمولی، با فرکانس کلاک 50 MHz می‌توان به زمان 100 us برای یک بار اجرای حلقه کنترل دست یافت. در این پایان‌نامه نشان داده می‌شود که با بهره‌گیری از یک FPGA با همان فرکانس ساعت و با پرداخت هزینه یکسان می‌توان با استفاده از امکانات پردازش موازی به زمان‌های اجرای کمتر از 10 us هم دست یافت. این در حالی است که افزایش قابلیت‌ها به سیستم کنترل با پردازنده سبب افزایش زمان اجرا می‌شود اما در یک FPGA در صورتی که قابلیت افزوده موازی با سایر بخش‌ها اجرا شود، تاثیر چندانی در زمان اجرا نخواهد داشت.

در این پایان‌نامه نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه و شبیه‌سازی‌های با در نظر گرفتن خطاهای پیاده سازی روی FPGA نشان داده شده است. همچنین سخت افزارهای لازم برای پیاده سازی این سیستم ساخته شده و پس از اطمینان از صحت عملکرد اجزای مختلف سخت افزار الگوریتم DTC روی آن تست شده و تا کنون نتایج اولیه از آن گرفته شده و کار بهبود عملکرد سیستم در حال ادامه است.

کلمات کلیدی

موتور القایی سه فاز، کنترل، سرعت، گشتاور، شار، کنترل برداری، DTC، FPGA، VHDL

فهرست کلی

عنوان

صفحه

۸.....	فصل اول مدل سازی موتور القایی.....
۱۰.....	مقدمه.....
۱۱.....	۱-۱- معادلات موتور القایی.....
۱۵.....	۲-۱- نمایش فازوری.....
۳۱.....	۳-۱- معادلات گشتاور.....
۳۵.....	فصل دوم کنترل DTC.....
۳۶.....	مقدمه.....
۳۷.....	۱-۲- انواع کنترلرهای موتورهای القایی سه فاز.....
۳۸.....	۲-۲- روش V/F.....
۳۹.....	۳-۲- روش جهت دهی میدانی (FOC).....
۴۰.....	۴-۲- کنترل مستقیم گشتاور (DTC).....
۴۷.....	فصل سوم شبیه سازی.....
۴۸.....	مقدمه.....
۵۰.....	۱-۳- مدل موتور القایی.....
۵۰.....	۲-۳- شبیه سازی کلی.....
۵۷.....	۳-۳- شبیه سازی با ملاحظات پیاده سازی.....
۶۳.....	فصل چهارم پیاده سازی.....
۶۴.....	مقدمه.....
۶۵.....	۱-۳- در باره FPGA.....
۶۸.....	۲-۳- سخت افزارها.....
۸۱.....	۳-۳- کد VHDL و شبیه سازی آن.....

۸۴.....	۳-۴- نتایج پیاده‌سازی.....
۸۵.....	نتیجه‌گیری.....
۸۷.....	پیشنهادات.....
۸۸.....	مراجع.....

فهرست تفصیلی

عنوان

صفحه

فصل اول مدل سازی موتور القایی.....	۸
مقدمه.....	۱۰
۱-۱- معادلات موتور القایی.....	۱۱
۱-۱-۱- معادلات ولتاژ.....	۱۱
۱-۱-۲- اعمال تبدیلات پارک.....	۱۳
۱-۱-۳- معادلات ماتریسی ولتاژ.....	۱۴
۲-۱- نمایش فازوری.....	۱۵
۱-۲-۱- فازورهای فضایی جریان.....	۱۷
۲-۲-۱- فازور شار نشتی.....	۲۰
۳-۲-۱- فازور ولتاژهای روتور و استاتور.....	۲۵
۴-۲-۱- شکل فازوری معادلات موتور.....	۲۶
۳-۱- معادلات گشتاور.....	۳۱
۱-۳-۱- مقدمه.....	۳۱
۲-۳-۱- محاسبه معادلات گشتاور با استفاده از روابط انرژی.....	۳۲
۳-۳-۱- ثابت گشتاور.....	۳۴
فصل دوم کنترل DTC.....	۳۵
مقدمه.....	۳۶
۱-۲- انواع کنترلرهای موتورهای القایی سه فاز.....	۳۷
۲-۲- روش V/F	۳۸
۳-۲- روش جهتدهی میدانی (FOC).....	۳۹
۴-۲- کنترل مستقیم گشتاور (DTC).....	۴۰
۱-۴-۲- اساس کنترل DTC.....	۴۰
۲-۴-۲- شماتیک کنترلر DTC.....	۴۳
۳-۴-۲- تخمین شار استاتور و گشتاور الکتریکی.....	۴۴

۴۴	۲-۴-۳-۱- تخمین بردار شار استاتور و گشتاور الکتریکی با استفاده از i_{sA} و i_{sB} و m
۴۶	۲-۴-۳-۲- تاثیر خطای پارامترها.....
۴۷	فصل سوم شبیه‌سازی.....
۴۸	مقدمه.....
۵۰	۳-۱- مدل موتور القایی.....
۵۰	۳-۲- شبیه‌سازی کلی.....
۵۷	۳-۳- شبیه‌سازی با ملاحظات پیاده‌سازی.....
۶۳	فصل چهارم پیاده‌سازی.....
۶۴	مقدمه.....
۶۵	۳-۱- در باره FPGA.....
۶۵	۳-۱-۱- محاسن استفاده از FPGA.....
۶۶	۳-۱-۲- زبان‌های توصیف سخت افزار.....
۶۸	۳-۲- سخت افزارها.....
۶۸	۳-۲-۱- برد FPGA.....
۶۹	۳-۲-۲- برد واسط.....
۷۶	۳-۲-۳- برد اینورتر.....
۷۹	۳-۲-۴- موتور سه‌فاز.....
۸۱	۳-۳- کد VHDL و شبیه‌سازی آن.....
۸۴	۳-۴- نتایج پیاده‌سازی.....
۸۵	نتیجه‌گیری.....
۸۷	پیشنهادات.....
۸۸	مراجع.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- ساده‌سازی سیم پیچی	۱۱
شکل ۲-۱- تبدیل پارک	۱۳
شکل ۳-۱- نمایش فازوری	۱۶
شکل ۴-۱- دستگاه‌های مختصات D-Q و -	۱۷
شکل ۵-۱- جریان استاتور در دستگاه‌های D-Q و -	۲۴
شکل ۶-۱- جریان استاتور در دستگاه گردان با سرعت	۲۶
شکل ۱-۲- روش‌های مختلف کنترل موتورهای القایی [۲]	۳۸
شکل ۲-۲- کنترل FOC [۷]	۳۹
شکل ۳-۲- سکتورهای مختلف برای بردار شار استاتور	۴۱
شکل ۴-۲- دیاگرام کنترلر DTC [۳]	۴۴
شکل ۱-۳- دیاگرام کنترلر شبیه‌سازی شده	۴۹
شکل ۲-۳- مدل سیمولینک موتور القایی	۵۰
شکل ۳-۳- شبیه‌سازی کلی DTC	۵۱
شکل ۴-۳- کنترلر DTC	۵۲
شکل ۵-۳- سرعت موتور، شبیه‌سازی کلی	۵۴
شکل ۶-۳- گشتاور موتور، شبیه‌سازی کلی	۵۴
شکل ۷-۳- نمودار دایره‌ای Fd-Fq ، شبیه‌سازی کلی	۵۵
شکل ۸-۳- اندازه شار بر حسب زمان، شبیه‌سازی کلی	۵۵
شکل ۹-۳- اندازه شار، شبیه‌سازی کلی	۵۶
شکل ۱۰-۳- مولفه‌های جریان استاتور در محورهای D و Q	۵۶
شکل ۱۱-۳- دیاگرام سیمولینک شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۵۹
شکل ۱۲-۳- کنترلر DTC ، شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۵۹
شکل ۱۳-۳- نمودار دایره ای Fd-Fq ، شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۶۰
شکل ۱۴-۳- اندازه شار استاتور، شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۶۱
شکل ۱۵-۳- سرعت، شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۶۱
شکل ۱۶-۳- مولفه‌های جریان استاتور، شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۶۲
شکل ۱۷-۳- گشتاور الکتریکی، شبیه‌سازی با ملاحظات عملی	۶۲
شکل ۱-۴- برد FPGA	۶۹

شکل ۴-۲- بورد واسط	۷۰
شکل ۴-۳- بورد واسط و FPGA	۷۱
شکل ۴-۴- نقشه شماتیک برد واسط	۷۲
شکل ۴-۵- شماتیک مبدل ADY938	۷۳
شکل ۴-۶- شکل ظاهری و ابعاد ADY938 به میلیمتر	۷۴
شکل ۴-۷- سیگنالینگ لازم برای خواندن از مبدل ADY938	۷۴
شکل ۴-۸- سیگنالینگ لازم برای نوشتن در رجیسترهای مبدل ADY938	۷۵
شکل ۴-۹- شبیه‌سازی سیگنالینگ ADC در AHDL	۷۵
شکل ۴-۱۰- بورد اینورتر	۷۶
شکل ۴-۱۱- نقشه شماتیک بورد اینورتر (۱)	۷۷
شکل ۴-۱۲- نقشه شماتیک بورد اینورتر (۲)	۷۸
شکل ۴-۱۳- موتور سه فاز استفاده شده	۷۹
شکل ۴-۱۴- پلاک موتور سه فاز استفاده شده	۷۹
شکل ۴-۱۵- نتایج تست کد تخمین گشتاور در AHDL	۸۱
شکل ۴-۱۶- نتیجه تست بلوک تخمین گشتاور در سیمولینک	۸۱
شکل ۴-۱۷- نتایج شبیه‌سازی کدهای VHDL کنترلر DTC	۸۲
شکل ۴-۱۸- خروجی فرمان‌های کنترلر DTC در محیط سیمولینک	۸۳
شکل ۴-۱۹- نمودار تغییرات fxqyy در محیط سیمولینک	۸۳

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۴	جدول ۱-۱- ثابت گشتاور
۴۲	جدول ۱-۲- بردارهای مناسب برای افزایش و کاهش شار و گشتاور در سکتور k
۴۲	جدول ۲-۲- جدول DTC
۵۳	جدول ۱-۳- بلوک‌های کنترلر DTC
۸۰	جدول ۱-۴- پارامترهای موتور در آزمایش‌های بی باری و روتور قفل شده

فصل اول

مدل سازی موتور القایی

فصل اول

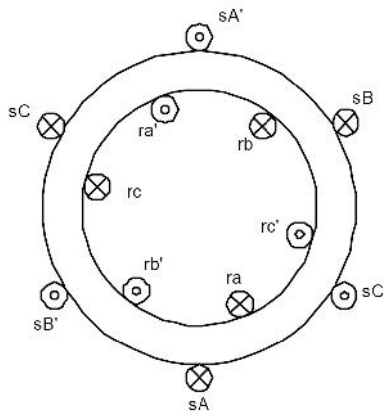
مدل سازی موتور القایی

مقدمه

برای طراحی کنترلر باید مدلی مناسب از موتور القایی داشته باشیم. از آنجایی که یک کنترلر خوب باید با هر گونه تغییر در سیستم رفتار مناسبی داشته باشد پس مدل دینامیکی موتور تقریب خوبی از سیستم می باشد. پس مدل باید همه اثرات دینامیکی موتور که در حالات پایدار و حالت‌های گذرا را در خود داشته باشد. علاوه بر این مدل باید برای هر گونه تغییر در ولتاژها و جریان‌های تغذیه درست باشد. چنین مدلی می‌تواند با دو روش تئوری بردارهای فازور و تئوری دو محوری ماشین‌های الکتریکی بدست آید. اگر چه روش فازوری خلاصه تر و ساده‌تر است، اما هر دو روش خیلی نزدیک به هم هستند و دانستن آنها مفید خواهد بود.

برای سادگی فرضیات زیر را در مورد موتور القایی مورد نظر در نظر می‌گیریم:

- سیم‌پیچی‌ها سه فاز، دو قطبی و متقارن است.
- اثرات شکاف‌ها نادیده گرفته شده است.
- نفوذپذیری قطعات آهنی بی‌نهایت است.
- چگالی شار در فاصله‌های هوایی شعاعی است.
- تلفات آهنی نادیده گرفته می‌شوند.
- سیم‌پیچی‌های استاتور و روتور به شکل یک سیم‌پیچ چند دور تکی در نظر گرفته شده‌اند که در دو طرف فاصله هوایی ساده شده‌اند. این فرض در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱- ساده‌سازی سیم‌پیچی

۱-۱- معادلات موتور القایی

۱-۱-۱- معادلات ولتاژ

در این بخش ولتاژهای استاتور در دستگاه ایستا، یا متصل به استاتور فرمول‌بندی می‌شوند. به طور

مشابه ولتاژهای روتور نیز در دستگاه متصل به روتور بررسی می‌شوند. بنابراین معادلات می‌توانند به

صورت زیر بیان شوند:

$$u_{sA}(t) = R_s i_{sA}(t) + \frac{d\psi_{sA}(t)}{dt}$$

$$u_{sB}(t) = R_s i_{sB}(t) + \frac{d\psi_{sB}(t)}{dt}$$

$$u_{sC}(t) = R_s i_{sC}(t) + \frac{d\psi_{sC}(t)}{dt}$$

[۲] (۱-۱)

به طور مشابه معادلات روترو به صورت زیر می‌شوند:

$$u_{ra}(t) = R_r i_{ra}(t) + \frac{d\psi_{ra}(t)}{dt}$$

$$u_{rb}(t) = R_r i_{rb}(t) + \frac{d\psi_{rb}(t)}{dt}$$

$$u_{rc}(t) = R_r i_{rc}(t) + \frac{d\psi_{rc}(t)}{dt}$$

(۲-۱)

معادلات شارهای ناشی برای استاتور هر فاز می‌توانند به صورت زیر نمایش داده شوند:

$$\begin{aligned} \psi_{sA} &= \bar{L}_s i_{sA} + \bar{M}_s i_{sB} + \bar{M}_s i_{sC} + \bar{M}_{sr} \cos \theta_m i_{ra} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 2\pi/3) i_{rb} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 4\pi/3) i_{rc} \\ \psi_{sB} &= \bar{M}_s i_{sA} + \bar{L}_s i_{sB} + \bar{M}_s i_{sC} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 4\pi/3) i_{ra} + \bar{M}_{sr} \cos \theta_m i_{rb} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 2\pi/3) i_{rc} \\ \psi_{sC} &= \bar{M}_s i_{sA} + \bar{M}_s i_{sB} + \bar{L}_s i_{sC} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 2\pi/3) i_{ra} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 4\pi/3) i_{rb} + \bar{M}_{sr} \cos \theta_m i_{rc} \end{aligned}$$

(۳-۱)

به طور مشابه معادلات شارهای ناشی روتور به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \psi_{ra} &= \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m) i_{sA} + \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m + 2\pi/3) i_{sB} + \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m + 4\pi/3) i_{sC} + \bar{L}_r i_{ra} + \bar{M}_r i_{rb} + \bar{M}_r i_{rc} \\ \psi_{rb} &= \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m + 4\pi/3) i_{sA} + \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m) i_{sB} + \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m + 2\pi/3) i_{sC} + \bar{M}_r i_{ra} + \bar{L}_r i_{rb} + \bar{M}_r i_{rc} \\ \psi_{rc} &= \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m + 2\pi/3) i_{sA} + \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m + 4\pi/3) i_{sB} + \bar{M}_{sr} \cos(-\theta_m) i_{sC} + \bar{M}_r i_{ra} + \bar{L}_r i_{rb} + \bar{M}_r i_{rc} \end{aligned}$$

(۴-۱)

با در نظر گرفتن تمام معادلات بالا و با استفاده از نمایش ماتریسی معادلات زیر بدست می‌آیند:

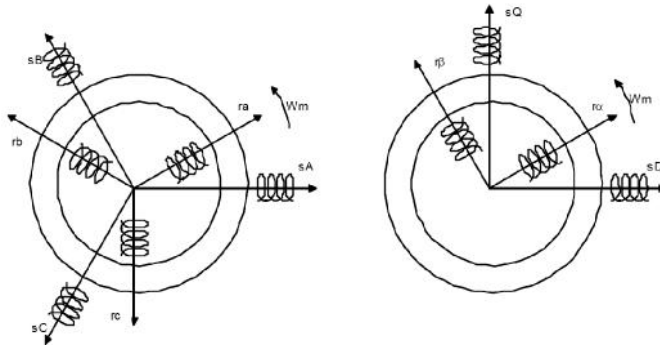
$$\begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \\ u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_m & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m1} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m2} \\ p\bar{M}_s & R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m2} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_m & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m1} \\ p\bar{M}_s & p\bar{M}_s & R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m1} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m2} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_m \\ p\bar{M}_{sr}\cos\theta_m & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m1} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m2} & R_r + p\bar{L}_r & p\bar{M}_r & p\bar{M}_r \\ p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m2} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_m & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m1} & p\bar{M}_r & R_r + p\bar{L}_r & p\bar{M}_r \\ p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m1} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_{m2} & p\bar{M}_{sr}\cos\theta_m & p\bar{M}_r & p\bar{M}_r & R_r + p\bar{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

۱-۲-۱- اعمال تبدیلات پارک

برای خلاصه‌سازی معادلات ولتاژ موتور القایی می‌توان از معادلات پارک استفاده کرد. به طور فیزیکی

با فرض تبدیل سیم‌پیچی‌های موتور به تنها دو سیم‌پیچی به صورت شکل زیر می‌توان این تبدیلات را

تصور کرد:



شکل ۱-۲- تبدیل پارک

در این شکل سیستم سمت چپ همان سیستم سه‌فاز معمول است که متغیرها را می‌توان نسبت به استاتور یا روتور گردان در نظر گرفت. شکل سمت چپ دو دستگاه فرضی را نشان می‌دهد، یک دستگاه دستگاه ثابت $sD-sQ$ است که محور D آن در راستای محور فاز A و محور Q آن عمود بر محور D است. است دستگاه DQ نام دارد. به طور مشابه دستگاه دو محوره دیگری نیز به نام وجود دارد که نسبت به روتور ثابت است. در ماشین سه فاز متقارن در واقع مقادیر در محورهای مستقیم و

۳-۴-۴ نتایج پیاده‌سازی

پس از تایید صحت عملکرد کدهای VHDL، برنامه VHDL به محیط نرم افزار Xilinx منتقل شد و با استفاده از یک کابل پروگرامر بر روی FPGA بارگذاری شد. یک حلقه کنترل DTC در صورت پاسخگو بودن سویچ در سیستم تهیه شده قادر است در حدود ۴۰ میکروثانیه اجرا شود که این مقدار در پردازنده های DSP حدود ۲۰۰ میکروثانیه است. علاوه بر این افزودن قابلیت‌ها به سیستمی که از FPGA استفاده کرده است، تاثیر چندانی روس این سرعت ندارد اما در مورد پردازنده ها که دستورات را پشت سر هم انجام می‌دهند افزایش قابلیت‌های سیستم زمان اجرای حلقه کنترل را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

الگوریتم کنترل DTC بر روی یک FPGA پیاده‌سازی شد و به کمک FPGA توانستیم به کنترلر-های بسیار سریعتر از میکروکنترلرها و پردازنده‌های DSP برسیم. این در حالی است که در سیستم تهیه شده ما به راحتی می‌توانیم بدون کاهش سرعت اجرا، قابلیت‌های جدید به سیستم اضافه کنیم. برای مثال در صورتی که سیستم DTC ما بخواهد از طریق ارتباط سریال با یک کامپیوتر رومیزی ارتباط برقرار کند. این برقراری ارتباط در یک سیستم که با پردازنده یا میکروکنترلر پیاده‌سازی شده باشد، زمان‌های مربوط به برقراری ارتباط سریال به زمان اجرای کل الگوریتم اضافه می‌شود، همچنین در صورتی که برنامه ارتباط سریال به گونه‌ای نوشته شود که مانند دستورات استاندارد معمول بسیاری از کامپایلرهای میکروکنترلرها عمل کند، پردازنده باید منتظر ارسال یک بایت بماند و سپس بایت بعدی را ارسال کند، که این زمان زیادی را از پردازنده خواهد گرفت. اما در صورتی که همین ارتباط سریال به یک سیستم با FPGA اضافه شود، مدار ارتباط سریال به طور موازی با سایر بخش‌ها عمل می‌کند و تاثیر بسیار ناچیزی روی سرعت اجرای حلقه اصلی کنترل خواهد داشت. علاوه بر این با موازی‌سازی بیشتر می‌توانیم به سرعت‌های بیشتری هم دست یابیم. در واقع در FPGA ما می‌توانیم الگوریتم‌ها را با حداکثر قابلیت اجرای موازی خود پیاده‌سازی کنیم. این به این معنی است که می‌توانیم تا جایی که الگوریتم ما را محدود نمی‌کند می‌توانیم کارها را موازی انجام دهیم. اما در پردازنده‌ها این کار امکان‌پذیر نیست و قابلیت پردازش موازی چند دستور محدود در برخی پردازنده‌ها موجود است.

اما در مورد نحوه پیاده‌سازی روی FPGA نیز راه‌های متفاوتی وجود دارد. یک راه استفاده از امکانات نرم‌افزاری شرکت‌هایی مانند Xilinx برای این کار است، این راه برای تولید سریع محصول و راحتی کار مناسب است، اما برای الگوریتم‌های پیچیده چنین ابزارهایی چندان بهینه نیستند. در روش استفاده شده در این پروژه روند تبدیل شبیه‌سازی‌ها به کد VHDL بسیار سریع شد و از طرفی از آنجایی که در این

روش طراح از جزییات کدها و همچنین خود الگوریتم مطلع است می تواند تا حد امکان کدها را موازی با هم اجرا کند و از زمان اجرا بکاهد.

پیشنهادات

در این پروژه پایه سخت افزاری لازم برای کنترل دور موتور القایی سه فاز به کمک FPGA فراهم شده است. برای ادامه این کار موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- اعمال تحلیل خطاهای شبیه‌سازی بر روی کدهای VHDL و اصلاح نتایج پیاده‌سازی.
- افزایش تعداد بیت‌ها و بررسی افزایش تعداد بیت‌های محاسبات بر روی نتایج پیاده‌سازی.
- استفاده از تخمین‌گرهای دیگر برای شار و کاهش خطاهای تخمین انتگرالی.
- استفاده از تخمین‌گر سرعت به جای اندازه‌گیری سرعت.
- پیاده‌سازی الگوریتم‌های دیگر کنترل دور موتور القایی، که امکان پیاده‌سازی آنها بر روی پردازنده‌ها، به دلیل کمی سرعت پردازش، امکان‌پذیر نیست.
- موازی‌سازی بیشتر الگوریتم‌ها و رسیدن به سرعت‌های بالاتر اجرای حلقه کنترلی.
- استفاده از سویچ‌های الکترونیک قدرت سریع‌تر و کاهش زمان کلید زنی.
- ...

مراجع

- [١] Kimmu Rauma, “FPGA Based Control Design For Power Electronic Applications” , Doctor of Science Thesis, University of Lappeenranta , ٢٠٠٦.
- [٢] Marcin Zelechowski, “Space Vector Modulated Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter Fed Induction Motor Drive”, Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology, ٢٠٠٥.
- [٣] A. A. Pujol, “Improvements in Direct Control of Induction Motors”, Ph.D. Thesis, Catalonia University of Thechnology, ٢٠٠٠.
- [٤] E. Monmasson and M. N. Cirstea, “FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems – A Review”, IEEE Trans. Industrial Electronics, VOL. ٥٤, NO. ٤, August ٢٠٠٧.
- [٥] Da Zhang and Hui Li, “A Stochastic-Based FPGA Controller” for an Induction Motor Drive with Integrated Neural Network Algorithms”, IEEE Trans. Industrial Electronics, VOL. ٥٥, NO. ٢, February ٢٠٠٨.
- [٦] B. K. Bose, “Power Electronics and Motor Drives, Advances And Trends”, Elsevier ٢٠٠٦.
- [٧] M. Filippich , “Digital Control of an Induction Motor” , Electrical Engineering Thesis, University of Queensland , ٢٠٠٢.
- [٨] N. P. Quang , J. A. Dittrich , “Vector Control of Three Phase AC Machines” , Springer , ٢٠٠٨.
- [٩] A. Hughes , “Electric Motors and Drives (Third Edition)” , Elsevier , ٢٠٠٦.
- [١٠] B. K. Bose , “Power Electronics and Motor Drives, Advances and Trends” , Elsevier , ٢٠٠٦.
- [١١] F.-J. Lin, D.-H. Wang and P.-K. Huang , “Adaptive backstepping control for linear-inductionmotor drive using FPGA ” , IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. ١٥٣, No. ٤, July ٢٠٠٦.
- [١٢] A. O. Moreno, R. de J. Romero-Troncoso, J. A. Vite-Frias, J. R. Rivera-Gillen, and A. Garcia-Perez , “Automatic Online Diagnosis Algorithm for Broken-Bar Detection on Induction Motors Based on

Discrete Wavelet Transform for FPGA Implementation ” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 5, MAY 2008.

[13] F.-J. Lin, D.-H. Wang and P.-K. Huang , “FPGA-based fuzzy sliding-mode control for a linear induction motor drive ” , IEE Proc.- Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 5, September 2005.

[14] J. Acero, Member, IEEE, D. Navarro, L. A. Barragán, I. Garde, J. I. Artigas, and J. M. Burdío, Member, IEEE , “FPGA-Based Power Measuring for Induction Heating Appliances Using Sigma–Delta A/D Conversion” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 4, AUGUST 2007.

[15] E. Monmasson, Senior Member, IEEE, and M. N. Cirstea, Senior Member, IEEE , “FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems—A Review ” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 4, AUGUST 2007.

[16] Da Zhang, Member, IEEE, and Hui Li, Senior Member, IEEE , “A Stochastic-Based FPGA Controller for an Induction Motor Drive With Integrated Neural Network Algorithms ” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 2, FEBRUARY 2008.

[17] Marcian N. Cirstea, Senior Member, IEEE, and Andrei Dinu, Member, IEEE , “A VHDL Holistic Modeling Approach and FPGA Implementation of a Digital Sensorless Induction Motor Control Scheme ” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 4, AUGUST 2007.

[18] J. N. Nash , “Direct Torque Control Induction Motor Vector Control without an Encoder” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 33, NO. 2, MARCH/APRIL 1997.

[19] P. Marino, M. D’Incecco and N.Visciano , “A Comparison of Direct Torque Control Methodologies for Induction Motor ” , Paper accepted for presentation at PPT 2007 , IEEE Porto Power Tech Conference IO” –13th September, Porto, Portugal.

[20] Jun-Koo Kang, Member, IEEE, and Seung-Ki Sul, Fellow, IEEE , “Analysis and Prediction of Inverter Switching Frequency in Direct Torque Control of Induction Machine Based on Hysteresis Bands and

Machine Parameters ” , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 48, NO. 3, JUNE 2001.

[21] S. K. Shahoo, G. T. R. Das , V. Subrahmaniam ,
“IMPLEMENTATION AND SIMULATION OF DIRECT TORQUE CONTROL SCHEME WITH THE USE OF FPGA CIRCUIT ” , ARPN Journal of engineering and Applied Sciences , VOL. 3, NO. 2, APRIL 2008.

[22] Kimmu Rauma, “FPGA-BASED CONTROL DESIGN FOR POWER ELECTRONIC APPLICATIONS ” , Doctor of Science Thesis , Lappeenranta University of Technology , 2006.

[23] B. Hariram , N. S. Marimuthu , ”A VHDL Library of Modules for Vector Control of Induction Motor” , International Journal of Electrical and Power Engineering , 2007.

[24] Pong P. Chu , “FPGA PROTOTYPING BY VHDL EXAMPLES Xilinx SpartanTM-3V ersion ” , WILEY-INTERSCIENCE , 2008.

[25] “ Spartan-3 FPGA Family Data Sheet” , www.xilinx.com.