

دانشگاه زنجان

پایان نامه دوره کارشناسی

مهندسی برق - الکترونیک

عنوان:

شبیه سازی و پیاده سازی کنترل سرعت موتور القایی به روش DTC با استفاده از تخمینگر شار و کنترلر PI

مریم نقیلو

استاد راهنمای

دکتر فرهاد بیات

دی ماه ۱۳۹۳

دانشگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکا

دانشگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکا

سپاسگزاری

دانشگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکا

دانشگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکا

حمد و سپاس خدای را که هر چه داریم از اوست.

سپاس از استاد گرامی جناب آقای دکتر فرهاد بیات که در تمام

برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزما

آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزما

می نمایم.

آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزما

برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزمایشگاه پژوهه برق و اینکاگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزماي

شگاه زنجان و ایشندی کروه برق آزماي

چکیده

در کنترل DTC بر اساس مکان زاویه‌ای بردار شار استاتور در دستگاه q-d-q حول مبدأ و همچنین با

استفاده از دو سیستم کنترل هیسترزیس 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 هیسترزیس حول مقدار مطلوب

از نایکاپ پروژه برق و انتگاه زنجان و انتگاههای پروژه برق و انتگاه زنجان و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق

خرود باقی می‌مانند. برای کنترل سرعت روتور از یک کنترل کننده PI استفاده شده است که پاسخ دقیق و

سریع را ممکن می‌سازد. بهبود عملکرد کنترل کننده هیسترزیس نیازمند کاهش زمان اجرای حلقه کنترل

DTC به طور کاملاً ساده در یک پردازنده معمولی، با

فرکانس کلاک ۵۰ مگا هرتز می‌توان به زمان ۱۰۰ میکرو ثانیه 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

میکرو ثانیه هم دست یافت. از طرفی در این پایان نامه سعی شده است با بکارگیری و ارائه روش‌های

ساده، محاسبات کاهش یافته و علاوه بر کاهش زمان اجرای حلقه کنترلی بتوان از پردازنده FPGA

برق آنایکاپ پروژه برق ارزانتر استفاده نمود.

در این پایان‌نامه نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه در شهـ حالت مختلف و شبیه‌سازی‌های با در نظر ممنـسی کروه برق

آنایکاپ پروژه برق و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق

آنایکاپ پروژه برق و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق

پیاده سازی روی FPGA نوشته و بهینه سازی شده است.

کلمات کلیدی

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

زنگنه زنجان و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق و انتگاههای پروژه برق

یک

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان

..... ۳۷-۴-۷- مقدمه فرکانسى

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان

..... ۳۸-۴-۸- توصيف حلقه ی كترلي ۴۱- فصل سوم شبيه سازى ۴۲- مقدمه

کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی

..... ۴۳-۱- مدل موتور القابى ۴۴- ۲- شبيه سازى كلی ۵۳- ۳- شبيه سازى با ملاحظات پياده سازى

آزمايگاهه پروژه برق و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه

..... ۵۹- فصل چهارم پياده سازى ۶۰- پروژه برق و انشاهه زنجان ۶۱- مقدمه

برق آزمايگاهه ۶۱-۱- در باره FPGA ۶۱-۲- زبانهای توصيف سخت افزار ۶۲- ۲- سخت افزارها

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۶۴-۱- بورد FPGA ۶۴-۲- بورد واسط

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده

..... ۶۵- ۲- بورد اينورتر ۶۱-۳- بورد اينورتر ۶۱-۴- موتور سه فاز ۷۴- ۴- موديل HDL ۷۵- ۳- کد VHDL

کروه برق آزمايگاهه پروژه برق ۷۵-۴- نتایج پياده سازى ۷۶- نتیجه گيري ۷۷- پيشنهادات

برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۷- مراجع ۷۸- مراجع

آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه

پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۱- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه

برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۲- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۳- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۴- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۵- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۶- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه ۷۸-۷- پروژه برق و انشاهه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاهه پروژه برق

و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان

فهرست شکل‌ها

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده
صفحه عنوان

هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۱-۱- ساده‌سازی سیم پیچی آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۱-۲- تبدیل پارک ۵

شکل ۱-۳- نمایش فازوری ۷

شکل ۱-۴- دستگاه‌های مختصات $D-Q$ و $\alpha-\beta$ ۸

آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان شکل ۱-۵- جریان استاتور در دستگاه‌های $D-Q$ و $\alpha-\beta$ ۱۴

شکل ۱-۶- جریان استاتور در دستگاه گردان با سرعت ۱۵

پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه
برق آزمايگاه پروژه برق ۲۵

شکل ۱-۷- روش‌های مختلف کنترل موتورهای القایی [۲] ۲۹

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۲-۱- کنترل FOC [۷] ۲۹

و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۲-۲- سکتورهای مختلف برای بردار شار استاتور ۲۸

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۲-۳- دیاگرام کنترل کننده DTC [۳] ۳۰

شکل ۲-۴- پالس کلاک مقسم فرکانسی ۳۷

کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۲-۵- مولفه‌های بردار شار استاتور در صفحه $d-q$ ۳۲

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۲-۶- دیاگرام تخمین سرعت به روش اول ۳۳

هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق شکل ۲-۷- دیاگرام تخمین سرعت به روش دوم ۳۴

کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۲-۸- پالس کلاک مقسم فرکانسی ۴۱

کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۲-۹- دیاگرام کنترل کننده شبیه‌سازی شده ۴۲

آزمايگاه پروژه برق شکل ۲-۱۰- مدل سیمولینک موتور القایی ۴۳

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۳-۱- شبیه سازی کلی DTC ۴۵

آزمايگاه پروژه برق شکل ۳-۲- کنترل کننده DTC ۴۶

آزمايگاه پروژه برق شکل ۳-۳- سرعت موتور، شبیه سازی کلی ۴۷

پروژه برق شکل ۳-۴- گشتاور موتور، شبیه سازی کلی ۴۸

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۳-۵- نمودار دایره‌ای F_d-F_q ، شبیه سازی کلی ۴۹

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۳-۶- اندازه شار بر حسب زمان، شبیه سازی کلی ۴۹

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۳-۷- شبیه سازی کروه برق آزمايگاه پروژه ۵۰

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۳-۸- شبیه سازی کروه برق آزمايگاه پروژه ۵۰

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه شکل ۳-۹- شبیه سازی کروه برق آزمايگاه پروژه ۵۱

و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
شکل ۳-۹- مولفه های جريان استاتور در محورهای D و Q ۵۰

شکل ۳-۱۰- سرعت موتور، اثر تغيير بار ۵۱

شکل ۳-۱۱- گشتاور موتور، اثر تغيير بار ۵۱

شکل ۳-۱۲- اندازه شار بر حسب زمان، اثر تغيير بار ۵۱

شکل ۳-۱۳- مولفه های جريان استاتور در محورهای D و Q، اثر تغيير بار ۵۱

شکل ۳-۱۴- سرعت موتور، اثر تغيير سرعت ۵۲

شکل ۳-۱۵- گشتاور موتور، اثر تغيير سرعت ۵۲

شکل ۳-۱۶- اندازه شار بر حسب زمان، اثر تغيير سرعت ۵۳

شکل ۳-۱۷- مولفه های جريان استاتور در محورهای D و Q، اثر تغيير سرعت ۵۳

شکل ۳-۱۸- دياگرام سيمولينك شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۴

شکل ۳-۱۹- کنترل کننده DTC ، شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۵

شکل ۳-۲۰- نمودار دايره اي Fd-Fq ، شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۶

شکل ۳-۲۱- اندازه شار استاتور، شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۶

شکل ۳-۲۲- سرعت، شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۷

شکل ۳-۲۳- مولفه های جريان استاتور، شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۷

شکل ۳-۲۴- گشتاور الکتریکی، شبيه سازی با ملاحظات عملی ۵۸

شکل ۴-۱- بورد FPGA ۶۴

شکل ۴-۲- بورد واسط ۶۶

شکل ۴-۳- بورد واسط و FPGA ۶۶

شکل ۴-۴- نقشه شماتیک برد واسط ۶۷

شکل ۴-۵- شماتیک مبدل AD7938 ۶۸

شکل ۴-۶- شکل ظاهری و ابعاد AD7938 به ميليمتر ۶۹

شکل ۴-۷- سیگنالینگ لازم برای خواندن از مبدل AD7938 ۶۹

شکل ۴-۸- سیگنالینگ لازم برای نوشتن در رجیسترهاي مبدل AD7938 ۷۰

شکل ۴-۹- اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
هفت

و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
شکل ۹-۴- شبیه سازی سیگنالینگ ADC در AHDL ۷۰

و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
شکل ۱۰-۴- بورد اینورتر ۷۱

شکل ۱۱-۴- نقشه شماتیک بورد اینورتر (۱) ۷۲

شکل ۱۲-۴- نقشه شماتیک بورد اینورتر (۲) ۷۳

شکل ۱۳-۴- موتور سه فاز استفاده شده ۷۴

شکل ۱۴-۴- پلاک موتور سه فاز استفاده شده ۷۴

برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه
پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه
پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه
پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه
فهرست جداول

برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
عنوان صفحه

و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
جدول ۱-۱- ثابت گشتاور ۲۱

جدول ۲-۱- بردارهای مناسب برای افزایش و کاهش شار و گشتاور در سکتور k ۲۸

جدول ۲-۲- جدول DTC ۲۹

جدول ۳-۲- تعیین ناحیه بردار شار استاتور ۳۳

جدول ۳-۱- بلوک های کنترل کننده DTC ۷۴

جدول ۴-۱- پارامترهای موتور در آزمایش های بی باری و رو تور قفل شده ۷۵

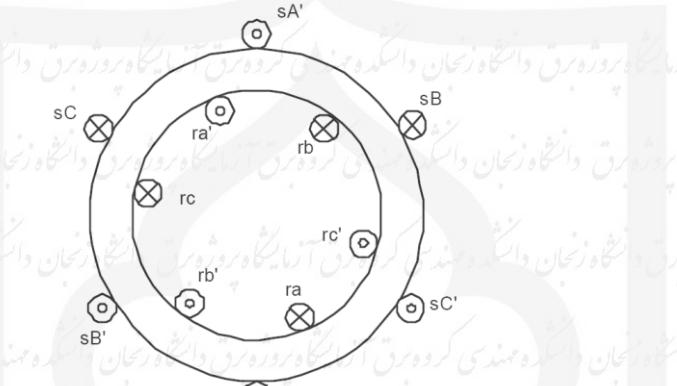
کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه
برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق
آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق
آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه
پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه
برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه
و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروژه برق و انشاوه زنجان
هشت

فصل اول

مدل سازی متود القایی

و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان
زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان
برای سادگی فرضیات زیر را در مورد موتور القایی مورد نظر در نظر می‌گیریم:
و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده
هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی
هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق اثرات شکاف‌ها نادیده گرفته شده است. برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه
کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه
چگالی شار در فاصله های هوایی شعاعی است.
برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق
تلفات آهنهای نادیده گرفته می‌شوند.

آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان - سیم‌پیچی‌های استاتور و روتوور به شکل یک چند دور تکی در نظر گرفته شده‌اند که در کروه برق آزمایشگاه
دو طرف فاصله هوایی ساده شده‌اند. این فرض در شکل زیر نمایش داده شده است.
برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه
و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه
زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان
و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده
هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی
شکل ۱-۱- ساده‌سازی سیم‌پیچی



۱-۱- معادلات موتور القایی

برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق
ازمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق
در این بخش ولتاژهای استاتور در دستگاه ایستا، یا متصل به استاتور فرمول بندی می‌شوند. به طور
ازمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق
مشابه ولتاژهای روتوور نیز در دستگاه متصل به روتوور بررسی می‌شوند. بنابراین معادلات می‌توانند به
پروژه برق و اندکاه زنجان صورت زیر بیان شوند:

برق و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه
و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه
و اندکاه زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه
زنجان و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان
و اندکده هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق آزمایشگاه پروژه برق و اندکاه زنجان و اندکاه هندسی کروه برق و اندکاه زنجان

و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان
و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی
هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه
برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه

به طور مشابه معادلات روتور، به صورت زیر می شوند:

$$\begin{aligned} u_{ra}(t) &= R_r i_{ra}(t) + \frac{d\psi_{ra}(t)}{dt} \\ u_{rb}(t) &= R_r i_{rb}(t) + \frac{d\psi_{rb}(t)}{dt} \\ u_{rc}(t) &= R_r i_{rc}(t) + \frac{d\psi_{rc}(t)}{dt} \end{aligned}$$

معادلات شارهای نشتی برای استاتور هر فاز می توانند به صورت زیر نمایش داده شوند:

$$\Psi_{sa} = \bar{L}_s i_{sa} + \bar{M}_s i_{sb} + \bar{M}_s i_{sc} + \bar{M}_{sr} \cos \theta_m i_{ra} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 2\pi/3) i_{rb} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 4\pi/3) i_{rc}$$

$$\Psi_{sb} = \bar{M}_s i_{sa} + \bar{L}_s i_{sb} + \bar{M}_s i_{sc} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 4\pi/3) i_{ra} + \bar{M}_{sr} \cos \theta_m i_{rb} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 2\pi/3) i_{rc}$$

$$\Psi_{sc} = \bar{M}_s i_{sa} + \bar{M}_s i_{sb} + \bar{L}_s i_{sc} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 2\pi/3) i_{ra} + \bar{M}_{sr} \cos(\theta_m + 4\pi/3) i_{rb} + \bar{M}_{sr} \cos \theta_m i_{rc}$$

هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی
کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه
برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق
آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه

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

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} \\ p\bar{M}_s & R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_s & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} \\ p\bar{M}_s & p\bar{M}_s & R_s + p\bar{L}_s & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m \\ p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & R_r + p\bar{L}_r & p\bar{M}_r & p\bar{M}_r \\ p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_r & R_r + p\bar{L}_r & p\bar{M}_r \\ p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m1} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_{m2} & p\bar{M}_{sr} \cos \theta_m & p\bar{M}_r & p\bar{M}_r & R_r + p\bar{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه
زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان
و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آزمايگاه پروره برق و انشاه زنجان

دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان

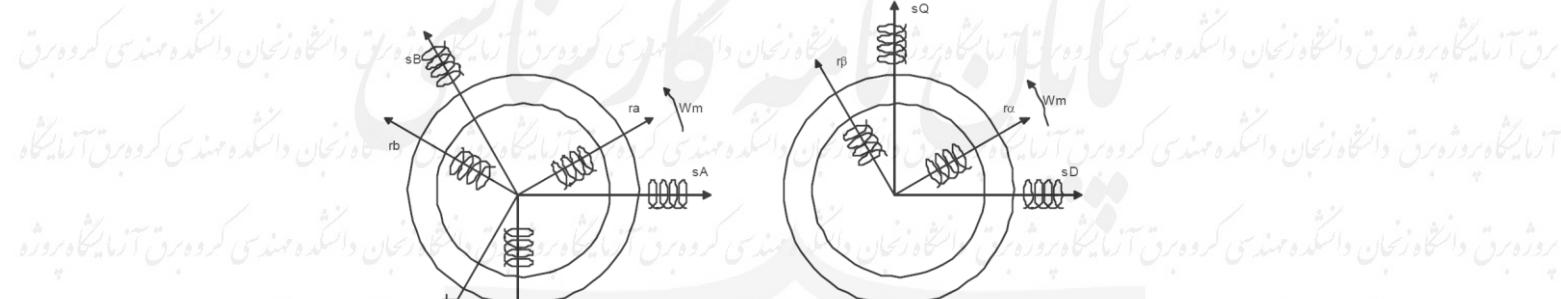
۱-۲-۱-۲- اعمال تبدیلات پارک

دانشگاه هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی

برای خلاصه سازی معادلات ولتاژ موتور القایی می‌توان از معادلات پارک استفاده کرد. به طور

فیزیکی با فرض تبدیل سیم پیچی‌های موتور به تنها دو سیم پیچی به صورت شکل زیر می‌توان این

کروه برق آرایا گاه پروژه برق تبدیلات را تصور کرد:



شکل ۱-۲-۱- تبدیل پارک

در این شکل سیستم سمت چپ همان سیستم سه‌فاز معمول است که متغیرها را می‌توان نسبت به

دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی استاتور یا روتوور 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 که دستگاه DQ نام دارد. به طور مشابه دستگاه دو محوره دیگری نیز به نام aβ وجود دارد که نسبت به روتوور ثابت است. در ماشین سه فاز متقارن در واقع مقادیر در محورهای مستقیم و متعامد

کروه برق آرایا گاه پروژه برق مقادیری خیالی هستند. تبدیلات بین مقادیر برای فازها و مقادیر روی این محورهای فرضی به صورت

برق آرایا گاه پروژه برق زیر است:

$$\begin{bmatrix} u_{s0} \\ u_{sD} \\ u_{sQ} \end{bmatrix} = c \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_{sA} \\ u_{sB} \\ u_{sC} \end{bmatrix} = c \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{s0} \\ u_{sD} \\ u_{sQ} \end{bmatrix}$$

برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی کروه برق آرایا گاه پروژه برق دانشگاه زنجان و اینکده هندسی

و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان

در معادلات بالا "c" یک ثابت است که می‌تواند برای حالت‌های توان متغیر مقادیر ۳/۲ یا ۱ و برای

حالات توان ثابت برابر $\sqrt{\frac{2}{3}}$ باشد. این معادلات می‌تواند برای مقادیر دیگر مانند جریان و شار نیز نوشته شوند.

اما معادلات بالا می‌توانند با استفاده از تبدیلات پارک ارایه شده به معادلات ساده زیر تبدیل شوند:

$$\begin{bmatrix} u_{sD} \\ u_{sQ} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s p\theta_s & pL_m & -L_m (P \cdot w_m + p\theta_r) \\ L_s p\theta_s & R_s + pL_s & L_m (P \cdot w_m + p\theta_r) & pL_m \\ pL_m & -L_m (p\theta_s - P \cdot w_m) & R_r + pL_r & -L_r p\theta_r \\ L_m (p\theta_s - P \cdot w_m) & pL_m & L_r p\theta_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (V-1)$$

۱-۱-۳-معادلات ماتریسی و لتاژ

معادلات ماتریسی و لتاژها به صورت زیر خلاصه می‌شوند: کاه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره

برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه

$$\begin{bmatrix} u_{sD} \\ u_{sQ} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & P \cdot w_m L_m & R_r + pL_r & P \cdot w_m L_r \\ -P \cdot w_m L_m & pL_m & -P \cdot w_m L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (A-1)$$

۱-۱-۳-۱-دستگاه متصل به استاتور:

در این حالت $\omega_s = 0$ و در نتیجه $\omega_m = \omega_r$ است. [۲]

$$\begin{bmatrix} u_{sD} \\ u_{sQ} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s P w_m & pL_m & -L_m P w_m \\ L_s P w_m & R_s + pL_s & L_m P w_m & pL_m \\ pL_m & 0 & R_r + pL_r & 0 \\ -P \cdot w_m L_m & pL_m & 0 & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (9-1)$$

۱-۱-۳-۲-دستگاه متصل به رotor:

در این حالت $\omega_s = \omega_m$ و داریم :

$$\begin{bmatrix} u_{sD} \\ u_{sQ} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s P w_m & pL_m & -L_m P w_m \\ L_s P w_m & R_s + pL_s & L_m P w_m & pL_m \\ pL_m & 0 & R_r + pL_r & 0 \\ -P \cdot w_m L_m & pL_m & 0 & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sD} \\ i_{sQ} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (9-1)$$

۱-۱-۳-۳-دستگاه میدانی:

برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره

برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه

زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه زنجان و اشکده هندسی کروه برق آنرا یکاوه پروره برق و انتگاه

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پژوهش گروه برق مراجعه فرمایید.

نتیجه‌گیری

الگوریتم کنترل DTC بر روی یک FPGA بارگذاری شد و به کمک FPGA توانستیم به کنترل کننده‌های

بسیار سریعتر از میکرو کنترلر 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 پیاده سازی 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

میکروکنترلر 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 داشد. علاوه بر این با موازی‌سازی بیشتر می‌توانیم به

سرعت‌های بیشتری هم دست یابیم. در واقع در FPGA ما می‌توانیم الگوریتم‌ها را با حداقل 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 پیاده سازی روی FPGA نیز راههای متفاوتی وجود دارد. یک راه استفاده از امکانات

نرم افزاری 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 شبیه سازی ها به کد VHDL بسیار سریع شد و از طرفی از آنجایی که در این

روش طراح از جزئیات کدها و همچنین خود الگوریتم مطلع است می‌تواند تا حد امکان کدها را موازی

پردازش کند و از زمان اجرا بکاهد.

و اینجا نشان داده شده است که الگوریتم کنترل کننده بسیار سریع و اثبات شده است که این کار ممکن است.

و اینجا نشان داده شده است که الگوریتم کنترل کننده بسیار سریع و اثبات شده است که این کار ممکن است.

و اینجا نشان داده شده است که الگوریتم کنترل کننده بسیار سریع و اثبات شده است که این کار ممکن است.

پیشنهادات

در این پژوهه پایه ساخت افزاری لازم برای کنترل دور موتور القایی سه فاز به کمک FPGA شده است. برای ادامه این کار موارد زیر پیشنهاد می شود:

- اعمال تحلیل خطاهای شبیه سازی بر روی کدهای VHDL و اصلاح نتایج پیاده سازی.
- افزایش تعداد بیت ها و بررسی افزایش تعداد بیت های محاسبات بر روی نتایج پیاده سازی.
- استفاده از تخمین گرهای دیگر برای شار و کاهش خطاهای تخمین انتگرالی.
- استفاده از تخمین گر سرعت به جای اندازه گیری سرعت.
- پیاده سازی الگوریتم های دیگر کنترل دور موتور القایی، که امکان پیاده سازی آنها بر روی پردازنده ها، به دلیل کمی سرعت پردازش، امکان پذیر نیست.
- موازی سازی بیشتر الگوریتم ها و رسیدن به سرعت های بالاتر اجرای حلقه کنترلی.
- استفاده از سویچ های الکترونیک قدرت سریع تر و کاهش زمان کلید زنی.

مراجع

[1] Kimmu Rauma, “FPGA Based Control Design For Power Electronic Applications”, Doctor of Science Thesis, University of Lappeenranta , 2006.

[2] Marcin Zelechowski, “Space Vector Modulated Direct Torque Controlled (DTC-SVM) Inverter Fed Induction Motor Drive”, Ph.D. Thesis, Warsaw University of Technology, 2005.

[3] A. A. Pujol, “Improvements in Direct Control of Induction Motors”, Ph.D. Thesis, Catalonia University of Thechnology, 2000.

[4] E. Monmasson and M. N. Cirstea, “FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems – A Review”, IEEE Trans. Industrial Electronics, VOL. 54, NO. 4, August 2007.

[5] 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. 55, NO. 2, February 2008.

[6] B. K. Bose, “Power Electronics and Motor Drives, Advances And Trends”, Elsevier 2006.

[7] M. Filippich , “Digital Control of an Induction Motor” , Electrical Engineering Thesis, University of Queensland , 2002.

[8] N. P. Quang , J. A. Dittrich , “Vector Control of Three Phase AC Machines”, Springer , 2008.

[9] A. Hughes , “Electric Motors and Drives (Third Edition)” , Elsevier , 2006.

[10] B. K. Bose , “Power Electronics and Motor Drives, Advances and Trends” , Elsevier , 2006.

[11] 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. 153, No. 4, July 2006.

[12] 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 2001 , IEEE Porto Power Tech Conference IO'' -1 3'h Scptember, 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. Suberahmaaniam , “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.