

# کنترل برداری موتور سنکرون آهنربای دائم درونی در راستای شار استاتور تحت رفتار بهینه ماکزیمم ضریب توان بر جریان

آرش حسن پور اصفهانی

کارشناس ارشد مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، ahasanpour@ut.ac.ir

## چکیده

موتور سنکرون آهنربای دائم درونی در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از موتورهای پرکاربرد در زمینه کنترل حرکت مطرح شده است. در این مقاله به طراحی، شبیه سازی و تحلیل نتایج سیستم کنترل برداری در راستای شار استاتور تحت رفتار بهینه ماکزیمم ضریب توان بر جریان برای این نوع ماشین پرداخته خواهد شد. برای رسیدن به این منظور ابتدا مکان هندسی نقطه کار ماشین به دست آورده و سپس با استفاده از نرم افزار MATLAB/Simulink به شبیه سازی و بررسی سیستم می‌پردازیم. در نهایت حساسیت ضریب توان نسبت به مقاومت استاتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## واژه های کلیدی

موتور سنکرون آهنربای دائم درونی، حداکثر ضریب توان به جریان، کنترل برداری، مقاومت استاتور.

## ۱- مقدمه

موتورهای آهنربای دائم به‌خاطر راندمان بالا، چگالی توان بالا و سادگی کنترل کاربرد گسترده ای در صنایع دریایی و کاربردهایی با سرعت متغیر پیدا کرده‌اند [۱-۲]. این موتورها قبلاً به دلیل قیمت بالای مواد مغناطیسی و قدرت کم آنها فقط در توان‌های کم به کار می‌رفتند. با ظهور مواد مغناطیسی قوی و کاهش قیمت آنها این مجال برای این موتورها پیدا شد که در کاربردهایی با توان بیشتر نظیر خودروهای برقی هم استفاده شوند. توسعه و پیشرفت در الکترونیک قدرت نیز مزید بر علت شد تا کاربرد این موتورها در صنعت روز به روز بیشتر شود. موتورهای سنکرون آهنربای دائم درونی (IPMSM)، نوعی از موتورهای آهنربای دائم هستند که به خاطر استحکام مکانیکی در کاربردهایی با سرعت زیاد نیز قابل استفاده‌اند. از دیگر مزایای این موتور می‌توان به مقاومت حرارتی بالاتر، چگالی توان بالاتر و در نتیجه حجم کمتر اشاره کرد. با توجه به توسعه این نوع موتورها ضرورت ساخت سیستم‌های کنترلی با دینامیک سریع کاملاً مشخص است. روش‌های کنترلی بهینه مختلفی با اهداف بهینه‌سازی توان، راندمان و بازده برای این موتورها ارائه شده است [۳-۸]. با این حال ضریب توان در کنترل کمتر مورد توجه بوده است. از آنجا که ضریب توان بالاتر باعث استفاده بهینه از

اینورتر و کاهش تلفات استاتور می‌شود لذا توجه به این پارامتر ضروری به نظر می‌رسد.

در این مقاله به طراحی و بررسی قسمت‌های مختلف یک سیستم کنترل برداری موتور IPMSM با هدف حداکثر ضریب توان بر جریان استاتور در راستای شار استاتور می‌پردازیم. سیستم کنترل به وسیله نرم افزار MATLAB/Simulink به طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت اثر مقاومت استاتور بر ضریب توان نشان داده شده است.

## ۲- اصول کنترل برداری در راستای شار استاتور

نمودار برداری موتور IPMSM در شکل (۱) آمده است. برای این ماشین رابطه گشتاور به صورت زیر است:

$$T_e = \frac{3}{4} P (\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad (1)$$

که برابر است با:

$$T_e = \frac{3}{4} P (i_{sq} \cos \delta - i_{sd} \sin \delta) |\lambda_s| \quad (2)$$

و در نتیجه:

$$T_e = \frac{3}{4} P i_{sy} |\lambda_s| \quad (3)$$

قسمت‌های مختلف این سیستم عبارتند از:

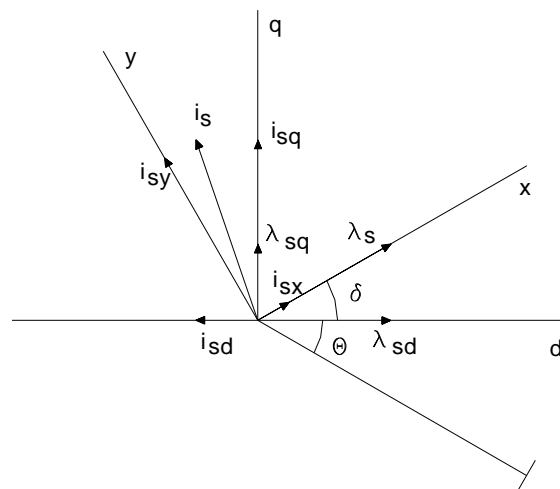
کنترل‌کننده‌های جریان: این کنترل‌کننده‌ها با توجه به خطای جریان‌ها در دستگاه دو محوری جریان‌های لازم برای اعمال به موتور را ایجاد می‌کنند.

کنترل‌کننده سرعت: کنترل‌کننده سرعت، سرعت فرمان را با سرعت واقعی مقایسه کرده و فرمان گشتاور را تولید می‌کند.

تابع رفتار بهینه: این قسمت از سیستم در واقع نقش پیاده‌سازی رفتار بهینه را به عهده دارد.

همان‌طور که در بخش بعدی دیده خواهد شد برای اینکه ماشین با حداکثر ضریب توان بر جریان کار کند معادله‌ای بین  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  برقرار است که ضرایب آن به سرعت زاویه‌ای روتور ( $\omega$ ) و زاویه شار استاتور ( $\delta$ ) بستگی دارد.

تخمین‌گر شار: این قسمت شار استاتور  $\lambda_s$  و زاویه آن  $\delta$  را از روابط زیر و با نمونه‌گیری از  $i_{sq}$  و  $i_{sd}$  می‌سازد.



شکل ۱- نمودار برداری موتور IPMS

و با توجه به اینکه  $\lambda_{sx} = |\lambda_s|$  آنگاه:

$$T_e = \frac{3}{4} P i_{sy} \lambda_{sx} \quad (4)$$

در روابط بالا  $T_e$ ،  $P$ ،  $i_s$  و  $\lambda_s$  به ترتیب گشتاور موتور، تعداد قطب‌ها، جریان استاتور و شار پیوندی استاتورند. همان‌طور که دیده می‌شود  $i_{sx}$  در تولید گشتاور تاثیری ندارد و با کنترل  $i_{sy}$  می‌توان به گشتاور مورد نظر رسید. از  $i_{sx}$  و کنترل آن نیز برای رسیدن به رفتار بهینه‌ای چون ماکزیمم ضریب توان بر جریان، ماکزیمم گشتاور بر جریان، ماکزیمم راندمان بر جریان و ... می‌توان استفاده کرد.

بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری ماشین IPMS در راستای شار استاتور تحت رفتار بهینه حداکثر ضریب توان بر جریان در شکل (۲) نشان داده شده‌است اصول کار این سیستم به این صورت است که از جریان فاز موتور نمونه‌برداری شده و به وسیله آن شار استاتور و زاویه شار استاتور محاسبه شده و به وسیله زاویه شار استاتور  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  محاسبه می‌شود که در نتیجه از رابطه ۳ گشتاور محاسبه شده و با گشتاور فرمان که از خروجی کنترل‌کننده سرعت می‌آید مقایسه می‌شود و نتیجه پس از عبور از یک کنترل‌کننده  $i_{sy\text{ref}}$  را تولید می‌کند و سپس  $i_{sx\text{ref}}$  به وسیله تابعی که تضمین‌کننده رفتار بهینه مورد نظر است محاسبه می‌شود. در نهایت با اعمال فرمان‌های مناسب به اینورتر ماشین تغذیه می‌شود.

$$\lambda_{sq}(k) = L_q i_{sq}(k-1) \quad (5)$$

$$\lambda_{sd}(k) = L_d i_{sd}(k-1) + \lambda_m \quad (6)$$

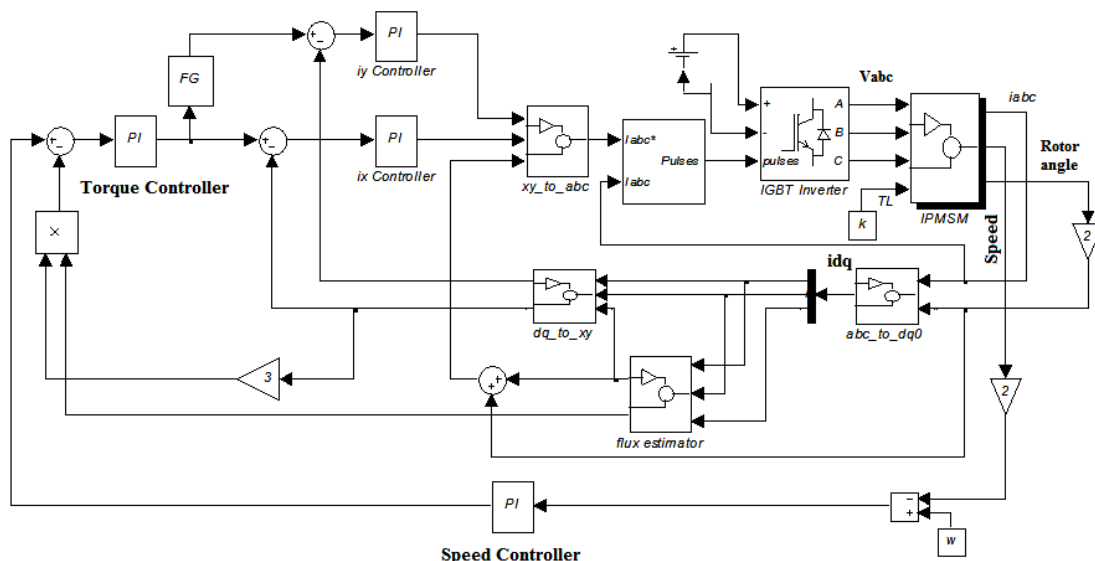
$$|\lambda_s(k)| = \sqrt{\lambda_{sd}^2(k) + \lambda_{sq}^2(k)} \quad (7)$$

$$\delta(k) = \tan^{-1} \frac{\lambda_{sq}(k)}{\lambda_{sd}(k)} \quad (8)$$

در این روابط  $k$  نمایش‌دهنده زمان نمونه‌برداری است و  $L_d$  و  $L_q$  اندوکتانس‌های محور عمودی و افقی هستند. اینورتر: فرمان‌های نهایی را به موتور می‌دهد. بلوک‌های تبدیل دستگاه: برای تبدیل جریان‌ها از دستگاهی به دستگاه دیگر استفاده می‌شود.

### ۳- بررسی رفتار بهینه و مکان هندسی آن

برای دستیابی به مکان هندسی رفتار بهینه مورد نظر باید رابطه موجود بین  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  را در این حالت پیدا کرد.



شکل ۲- بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری در راستای شار استاتور

رابطه ضرب توان در راستای شار استاتور مشتق بگیریم. با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴ و جای گذاری آنها در رابطه ۱۲ رابطه ضرب توان در راستای شار استاتور به دست می آید.

$$i_{sd} = i_{sx} \cos \delta - i_{sy} \sin \delta \quad (13)$$

$$i_{sq} = i_{sx} \sin \delta + i_{sy} \cos \delta \quad (14)$$

حال با حل  $\frac{\partial PF}{\partial i_{sy}} = 0$  و با توجه به ثابت بودن  $\delta$  در حالت

کار دائمی [۹] رابطه‌ای بین  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  به دست می آید. این رابطه ضمنی و پیچیده است و نمی توان به طور مستقیم از این معادله رابطه ای فقط بین  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  به دست آورد زیرا در آن ضرایب  $\omega$  و نقش دارند که به حالت کار ماشین بستگی دارند و ما برای پیاده سازی این استراتژی از تکنیک دیگری استفاده می کنیم که آن را در ادامه شرح خواهیم داد. قبل از هر چیز اجازه بدهید ابتدا برای اینکه دید بهتری نسبت به مسأله پیدا کنیم مسأله را در راستای شار روتور بررسی نمائیم.

برای این منظور باید ابتدا رابطه ضرب توان را بر حسب  $i_{sd}$  و  $i_{sq}$  بنویسیم که در رابطه ۱۲ انجام شده و سپس با جایگزینی  $i_{sd}$  بر حسب  $i_s$  و  $i_{sq}$  و سپس مشتق گیری از آن بر حسب  $i_{sq}$  و سپس با جایگزینی  $i_s$  بر حسب  $i_{sd}$  و  $i_{sq}$  معادله پیچیده ای به دست می آید که با حل این معادله بر حسب  $i_{sd}$  چهار جواب به دست می آید.

نکته اولی که دیده می شود این است که دو جواب از چهار جواب به دست آمده در ضمن کوتاه تر بودن به سرعت نیز بستگی ندارند در

برای یافتن این رابطه در رفتار ماکزیمم ضرب توان بر جریان باید از رابطه ضرب توان بر حسب متغیر  $i_{sy}$  مشتق گرفت. باید توجه کرد که تمام معادلات در حالت کار دائمی هستند زیرا بررسی ضرب توان مربوط به حالت دائمی می باشد و اصولاً ضرب توان در شرایط دائمی مطرح می شود. این کار به این صورت انجام می شود که ابتدا رابطه ضرب توان را به صورت زیر می نویسیم:

$$PF = \frac{v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}}{v_s i_s} \quad (9)$$

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \quad \text{و} \quad v_s = \sqrt{v_{sd}^2 + v_{sq}^2}$$

حال باید این رابطه را بر اساس جریان ها باز نویسی نماییم که با توجه به روابط ۱۰ و ۱۱ و جای گذاری آنها در رابطه ۹ به رابطه ۱۲ می رسیم:

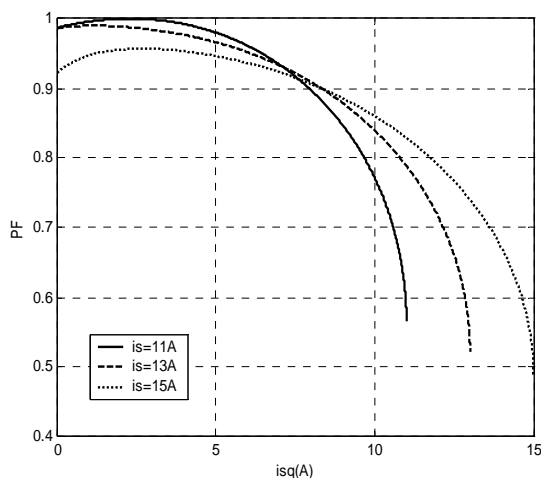
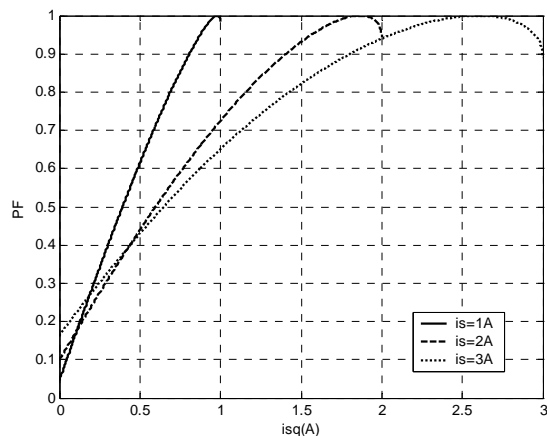
$$v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega L_q i_{sq} \quad (10)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega L_d i_{sd} + \omega \lambda_m \quad (11)$$

$$(12)$$

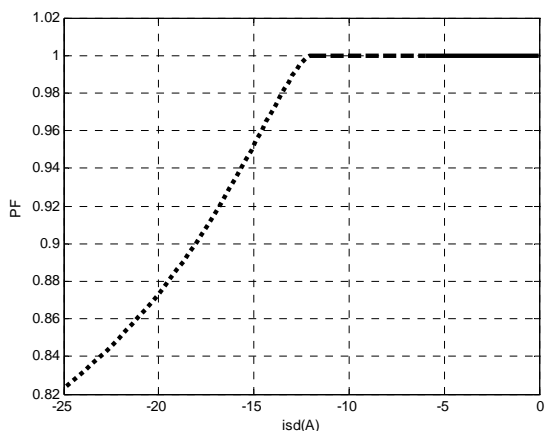
$$PF = \frac{R_s i_s^2 + (L_q - L_d) i_{sd} i_{sq} + \lambda_m i_{sq}}{i_s \sqrt{(R_s i_{sd} - \omega L_q i_{sq})^2 + (R_s i_{sq} + \omega L_d i_{sd} + \omega \lambda_m)^2}}$$

در روابط بالا  $\omega$  و  $v$  به ترتیب سرعت زاویه ای روتور و ولتاژ می باشند. اما این رابطه در راستای شار روتور می باشد و ما باید از



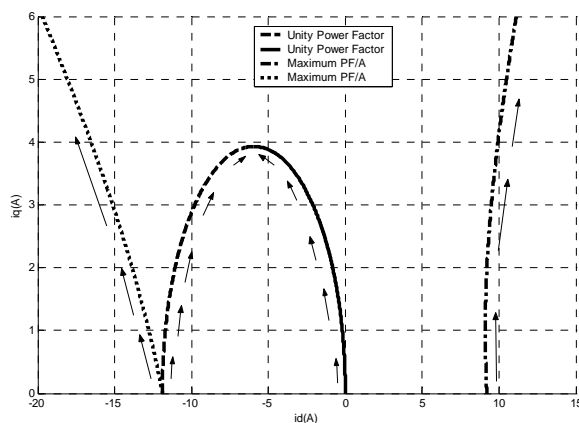
شکل ۴- تغییرات ضریب توان با افزایش جریان  $i_{sq}$  در  $i_s$  ثابت

شکل (۵) نیز تغییرات ضریب توان در مقابل  $i_{sd}$  می باشد که مؤید شکل قبلی می باشد.



شکل ۵- نیز تغییرات ضریب توان در مقابل  $i_{sd}$  با افزایش  $i_{sq}$

حالی که دو جواب دیگر وابسته به سرعت می باشند. اگر ما این جوابها را در دستگاہی با محورهای  $i_{sq}$  و  $i_{sd}$  رسم کنیم شکل (۳) را خواهیم داشت.



شکل ۳- مکان هندسی ماکزیمم ضریب توان بر جریان در راستای شار روتور

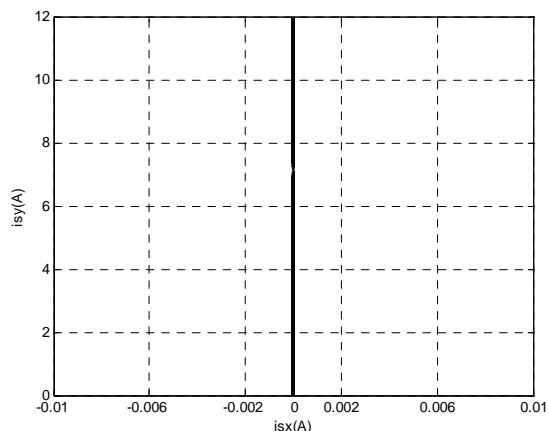
همانطور که در شکل هم دیده می شود ما چهار مسیر داریم که با افزایش  $i_{sq}$  در جهت هایی که با فلش مشخص شده حرکت می کنند. دو مسیر میانی مربوط به دو جوابی است که به سرعت بستگی ندارند و همانطور که خواهیم دید مسیره های ضریب توان واحد می باشند. دو مسیر دیگر مربوط به جایی هستند که دیگر ماکزیمم ضریب توان بر جریان به یک نمی رسد که البته منحنی سمت راست به علت واقع بودن در ناحیه تقویت شار مورد توجه ما نمی باشد.

در واقع می توان گفت که ما با این استراتژی کنترلی تا جریان مشخصی می توانیم ضریب توان را یک کنیم و از آن به بعد باید در مسیر ماکزیمم ضریب توان بر جریان حرکت کنیم و دیگر به ضریب توان یک نمی رسیم.

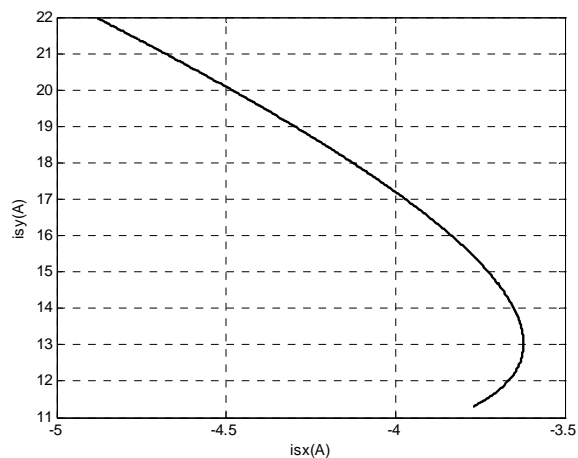
این مطلب در شکل (۴) که ضریب توان بر حسب جریان  $i_{sq}$  در  $i_s$  های مختلف رسم شده به خوبی مشخص است. همان طور که دیده می شود ماکزیمم ضریب توان تا جریان خاصی یک شده و بعد از آن ماکزیمم به یک نمی رسد.

$$i_{sy} = i_{sq} \cos \delta - i_{sd} \sin \delta \quad (17)$$

نتایج به این ترتیب است که مکان هندسی ناحیه ضریب توان واحد در راستای استاتور دقیقاً  $i_{sx} = 0$  می‌باشد. در این ناحیه ماکزیمم  $i_{sy}$  تقریباً ۱۱/۹ آمپر است. شکل (۶) مؤید این مطلب است.



شکل ۶- مکان هندسی تغییرات  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  در ناحیه ضریب توان واحد



شکل ۷- مکان هندسی تغییرات  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  در ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان

با تبدیل نقطه به نقطه مکان هندسی ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان از راستای شار روتور به راستای شار استاتور برای  $i_{sy}$  های مثبت که مورد نظر ما هستند نمودار شکل (۷) به دست می‌آید.

بنابراین ما می‌توانیم تا وقتی  $i_{sy}$  به ۱۱/۹ برسد روی منحنی  $i_{sx} = 0$  و بعد از آن روی منحنی فوق حرکت کنیم. ما می‌توانیم منحنی فوق را بر حسب بازه مورد نظر با یک چند

بنابراین ما باید به این صورت عمل نمائیم که ابتدا در روی منحنی ضریب توان واحد طبق اصول منطقی بر روی آن مسیری که  $i_s$  کمتری دارد (مسیر سمت راست) حرکت کنیم تا جایی که  $i_{sq}$  به ماکزیمم خودش در آن مسیر برسد و از آن به منحنی ماکزیمم ضریب توان برویم.

ماکزیمم  $i_{sq}$  در روی منحنی ضریب توان واحد به طریق زیر محاسبه می‌شود:

معادلات مکان هندسی ضریب توان واحد عبارتند از:

$$i_{sd} = \frac{-\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 4L_q L_d i_{sq}^2}}{2L_d} \quad (15)$$

ماکزیمم  $i_{sq}$  مقداری است که زیر رادیکال را صفر کند که این مقدار برای موتور انتخاب شده تقریباً ۳/۹ آمپر می‌باشد.

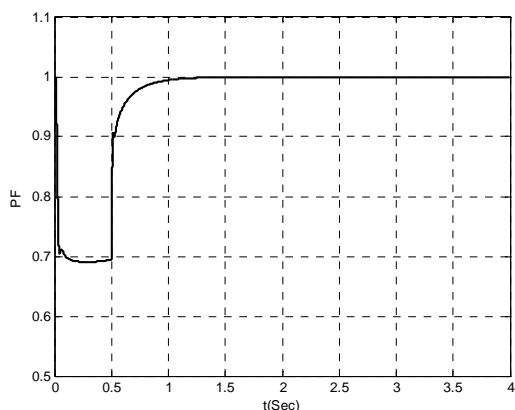
اکنون پس از بررسی استراتژی ماکزیمم ضریب توان بر جریان در راستای شار روتور به بررسی این استراتژی در راستای شار استاتور می‌پردازیم. از دو راه می‌توان به معادلات مسیری در دستگاه شار استاتور رسید یکی با حل معادله  $\frac{\partial PF}{\partial i_{sy}} = 0$  و یافتن  $i_{sx}$  بر

حسب سایر پارامترها که از این راه فقط به دو جواب از یک معادله درجه ۴ می‌رسیم و دو جواب دیگر را نمی‌توان به طور صریح به دست آورد. راه دوم هم تبدیل معادلات منحنی‌های مطلوب از راستای شار روتور به راستای شار استاتور با روابط ۱۳ و ۱۴ و حل آنها بر حسب  $i_{sx}$  می‌باشد که با این روش هم فقط از تبدیل منحنی‌های ضریب توان واحد می‌توان به روابطی صریح برای  $i_{sx}$  رسید که همان جواب‌هایی است که از راه قبلی هم به دست آمده بود و از حل معادله تبدیل شده ماکزیمم ضریب توان بر جریان عاجز خواهیم بود و باید در شبیه‌سازی آن را به روش عددی مثلاً نیوتن رافسون حل کرد البته این روش را می‌توان برای حل معادله  $\frac{\partial PF}{\partial i_{sy}} = 0$  نیز به کار برد.

معادلات به دست آمده برای ضریب توان واحد به زاویه  $\delta$  بستگی دارد و نمی‌توان به طور مستقیم از آنها مکان هندسی جریان‌های موتور در راستای شار استاتور را به دست آورد. هر چند که خود  $\delta$  به جریان‌های موتور در راستای شار استاتور بستگی دارد و با داشتن  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  می‌توان  $\delta$  را به دست آورد ولی این خود مستلزم حل یک معادله مثلثاتی پیچیده است. یک راه حل خوب برای رسم و مشاهده مکان هندسی مورد نظر این از روی مکان هندسی متناظر در راستای شار روتور  $i_{sd}$  و  $i_{sq}$  را یافته و با استفاده از روابط ۵ و ۶ و زاویه  $\delta$  را یافته و با استفاده از روابط زیر  $i_{sx}$  و  $i_{sy}$  محاسبه می‌شود.

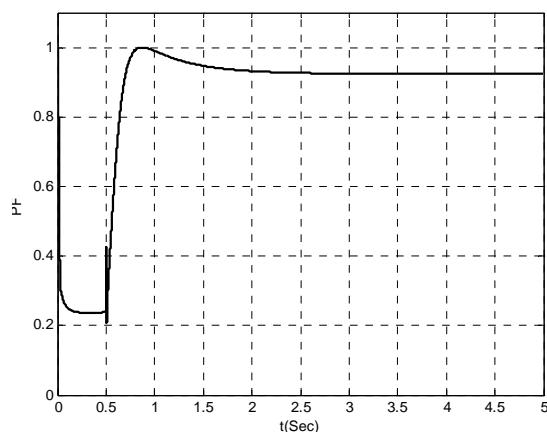
$$i_{sx} = i_{sq} \sin \delta + i_{sd} \cos \delta \quad (16)$$

از حالت گذرا به یک می‌رسد. در این حالت  $i_{sq} = 2.1035A$  و  $i_{sd} = -0.9244A$  که روی منحنی ضریب توان قرار دارد.



شکل ۹ - منحنی زمانی تغییرات ضریب توان

برای اینکه این موتور را به ناحیهٔ ماکزیمم ضریب توان بر جریان ببریم باید گشتاوری چند برابر گشتاور نامی به آن اعمال نمائیم که جریان هم از جریان نامی بیشتر می‌شود. برای این کار باید کنترل کننده‌های مناسبی ولی به علت اینکه در اینجا ما فقط می‌خواهیم به بررسی ضریب توان بپردازیم ما در همان سیستم با تغییر اندکی در کنترل کنندهٔ سرعت گشتاور ۱۸ Nm اعمال می‌نمائیم که نتیجه به صورت زیر است. جریان‌ها  $i_{sd} = -16.573A$  و  $i_{sq} = 4.02A$  هستند و ضریب توان در نهایت یک نمی‌شود و مقدار نهایی آن  $0.9244$  است. شکل (۱۰) تغییرات ضریب توان را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - منحنی زمانی تغییرات ضریب توان

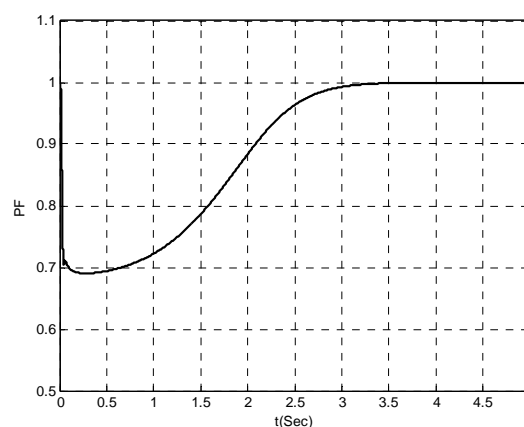
جمله‌ای تقریب بزیم که برای داشتن تقریب خوب باید با چند جمله‌ای درجهٔ بالا تقریب زد. با استفاده از برازش منحنی در محدودهٔ  $i_{sy} = [12, 23]$  معادلهٔ درجهٔ ۳ زیر بدست می‌آید و دارای دقت بسیار خوبی است.

$$i_{sx} = 9 * 10^{-4} i_{sy}^3 - 5.81 * 10^{-2} i_{sy}^2 + 1.0511 i_{sy} - 9.4492 \quad (18)$$

#### ۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

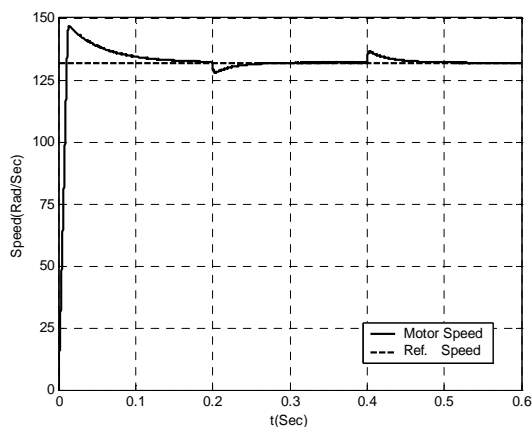
در این قسمت به شبیه‌سازی سیستمی که بحث شد خواهیم پرداخت. ابتدا نتایج را برای سیستم کنترل در راستای شار روتور برای موتوری که مشخصاتش در ضمیمه آمده و طراحی کنترل‌کننده‌های آن در [۲] آمده‌است به‌طور مختصر بررسی می‌کنیم.

به این علت که مشخصات سرعت، گشتاور و جریان‌های این سیستم به طور مفصل در [۲] آمده فقط به بررسی ضریب توان می‌پردازیم. شکل (۸) ضریب توان در حالت بی‌باری را نشان می‌دهد که با توجه به وجود جریان کوچکی ناشی از اصطکاک موتور در ناحیهٔ ضریب توان واحد قرار گرفته و ضریب توان پس از عبور از حالت گذرا به یک می‌رسد. قابل ذکر است در زمان‌های گذرا به علت صادق نبودن معادلات حالت دائمی ولتاژ و جریان ضریب توان ماکزیمم نمی‌باشد.

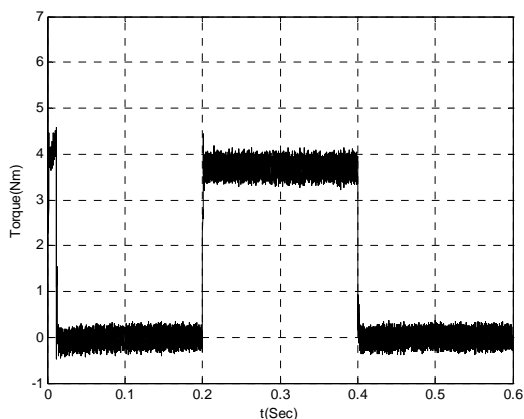


شکل ۸ - منحنی زمانی تغییرات ضریب توان

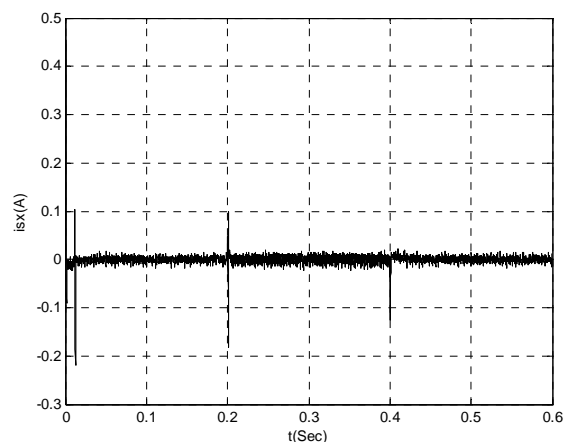
در شکل (۹) منحنی زمانی تغییرات ضریب توان با اعمال گشتاور نامی دیده می‌شود. در اینجا در زمان  $t = 0.5$  گشتاور نامی اعمال می‌شود. باز هم مشاهده می‌شود که ضریب توان پس از عبور



شکل ۱۱ - تغییرات سرعت بر اثر اعمال گشتاور نامی و برداشتن آن



شکل ۱۲ - تغییرات گشتاور ماشین بر اثر اعمال گشتاور نامی و برداشتن آن



شکل ۱۳ - تغییرات جریان محور X بر اثر اعمال گشتاور نامی و برداشتن آن

مقدار جریان به صورت بسیار خوبی با منحنی به دست آمده در شکل (۵) صدق می کند.

اکنون به بررسی رفتار موتور و ضریب توان در راستای شار استاتور می پردازیم. ابتدا برای موتوری که مشخصاتش در ضمیمه آمده سیستم کنترل برداری را در راستای شار استاتور به صورتی که بلوک دیاگرام آن در شکل (۲) آمده است بسته و کنترل کننده ها را برای گشتاور نامی و سرعت نامی طراحی می کنیم. نتایج یک طراحی مناسب با محدود کننده روی جریان و گشتاور به صورت زیر می باشد.

اگر کنترل کننده PI را به صورت رابطه ۱۹ در نظر بگیریم داریم:

$$\frac{K_p T_I * S + K_p}{T_I * S} \quad (19)$$

برای کنترل کننده جریان محور Y

$$K_p = 3 \text{ و } T_I = 0.01$$

برای کنترل کننده جریان محور X

$$K_p = 3 \text{ و } T_I = 0.01$$

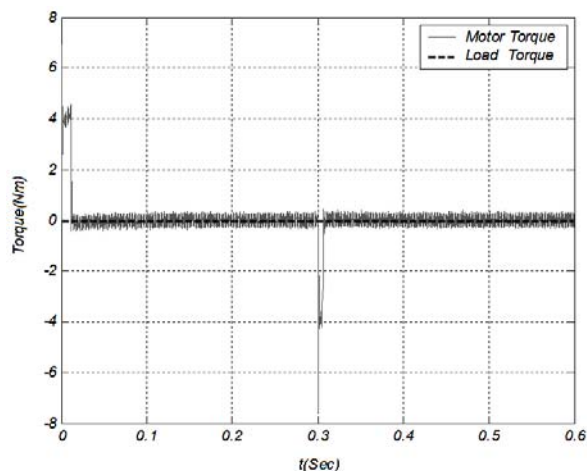
برای کنترل کننده گشتاور

$$K_p = 0.8 \text{ و } T_I = 0.04$$

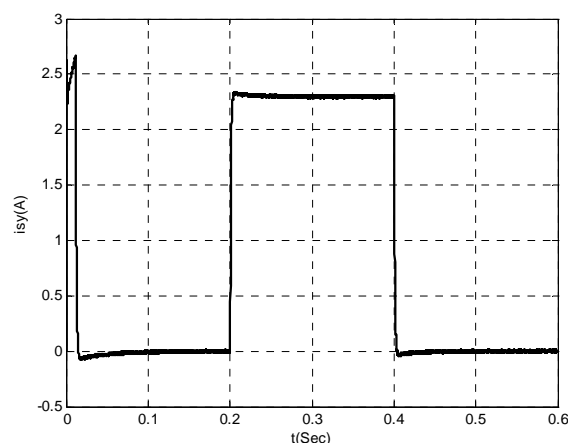
برای کنترل کننده سرعت

$$K_p = 1.5 \text{ و } T_I = 0.05$$

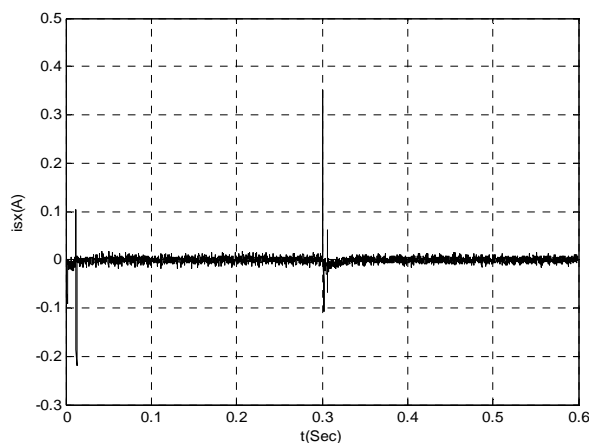
با ضرایبی که به دست آمد سیستم را شبیه سازی می کنیم. ابتدا به بررسی عملکرد کلی سیستم با بررسی پاسخ سیستم به تغییر مرجع سرعت و اعمال و برداشت گشتاور نامی می نماییم. در این سیستم جریان  $i_{sx}$  به وسیله تابعی که در قسمت قبلی بیان شد محاسبه می کنیم به این ترتیب که تا  $i_{sy} = 12$  از  $i_{sx} = 0$  و از آن به بعد از رابطه ۱۸ استفاده می کنیم. نتایج شبیه سازی به صورت زیر می باشد. در شکل (۱۱) پاسخ سرعت را به اعمال گشتاور نامی و سپس برداشتن آن نشان می دهد. ملاحظه می شود که بالازدگی راه اندازی کمتر از ۱۱/۳٪ و تغییر سرعت به ازای اعمال گشتاور نامی ۳٪ و به ازای برداشتن گشتاور حدود ۳/۵٪ می باشد. در شکل (۱۲) هم تغییرات گشتاور رسم شده است ملاحظه می شود که سرعت پاسخ خیلی زیاد است. در شکل های (۱۳ و ۱۴) منحنی جریان های ماشین دیده می شود.



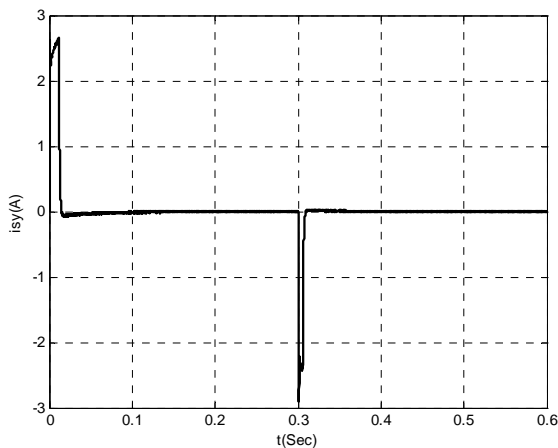
شکل ۱۶ - تغییرات گشتاور موتور با تغییر فرمان سرعت



شکل ۱۴ - تغییرات جریان محور Y بر اثر اعمال گشتاور نامی و برداشتن آن



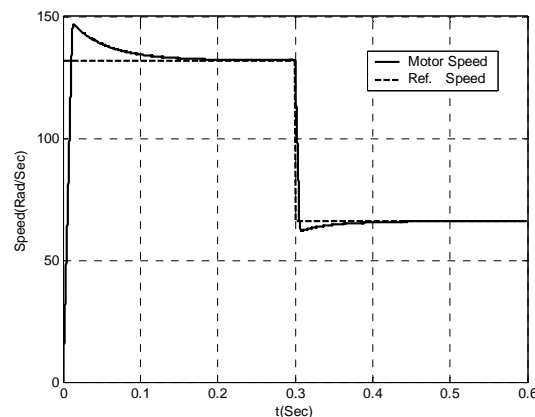
شکل ۱۷ - تغییرات جریان محور X با تغییر فرمان سرعت



شکل ۱۸ - تغییرات جریان محور Y با تغییر فرمان سرعت

ملاحظه می‌شود که با اعمال گشتاور نامی هم جریان به حدی نمی‌رسد که موتور از ناحیه ضریب توان واحد خارج شود و وارد ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان گردد. قبلاً دیدیم که این حد برای موتور مورد بررسی ۱۱/۹ است.

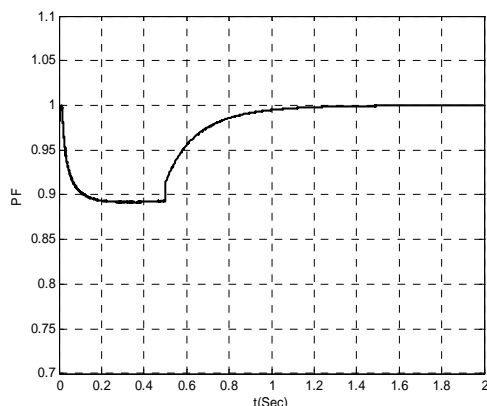
حال به بررسی پاسخ سیستم به تغییر مرجع سرعت می‌پردازیم. منحنی سرعت موتور و سرعت فرمان در شکل (۱۵) دیده می‌شود. پایین زدگی به هنگام کاهش مرجع سرعت کمتر از ۶ درصد است.



شکل ۱۵ - تغییرات سرعت موتور با تغییر فرمان سرعت

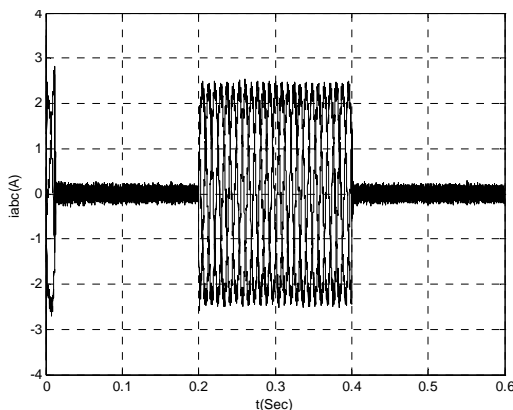
در شکل‌های (۱۶-۱۸) نیز منحنی گشتاور و جریان‌های موتور آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گشتاور در راه اندازی و تغییر سرعت غیر صفر و در سایر مواقع صفر است و جریان‌های موتور هم به همین ترتیب. پس از بررسی رفتار ماشین به بررسی ضریب توان آن می‌پردازیم.





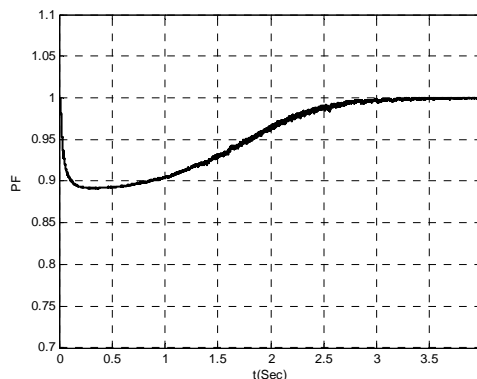
شکل ۲۱ - تغییرات ضریب توان با اعمال گشتاور بار نامی

برای بررسی بیشتر در شکل‌های بعدی منحنی جریان فازهای موتور در بی‌باری با تغییر مرجع سرعت و بار نامی آورده شده‌است. در شکل (۲۲) منحنی جریان فازهای موتور به ازای اعمال گشتاور نامی در  $t=0.25$  و سپس برداشتن آن در  $t=0.45$  رسم شده‌است. در ابتدا جریان راه اندازی را داریم و به سرعت این جریان به جریان بی‌باری تقلیل می‌یابد با اعمال گشتاور جریان زیاد شده و پس از برداشتن آن دوباره کاهش می‌یابد. در شکل (۲۳) نیز در شرایط بی‌باری منحنی جریان فازهای موتور به ازای تغییر مرجع سرعت رسم شده‌است. در این منحنی هم در راه‌اندازی و تغییر مرجع سرعت جریان به علت گشتاور بیشتر از بقیه نقاط بیشتر است.

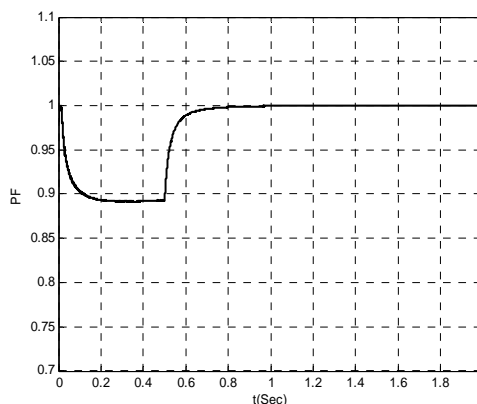


شکل ۲۲ - تغییرات جریان فازهای موتور به ازای اعمال گشتاور نامی

برای بررسی ضریب توان منحنی ضریب توان را در بی‌باری،  $0.1$  بار نامی و بار نامی رسم می‌نماییم. شکل (۱۹) منحنی ضریب توان را در بی‌باری نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل هم دیده می‌شود در نهایت ضریب توان به یک می‌رسد و این نتیجه معقول است زیرا جریان‌های موتور بسیار کم و در اثر اصطکاک می‌باشد و در نتیجه موتور در ناحیه ضریب توان واحد قرار می‌گیرد. شکل‌های (۲۰ و ۲۱) منحنی ضریب توان را به ترتیب در  $0.1$  بار نامی و بار نامی رسم شده‌است. در هر دوی این موارد گشتاور در زمان  $t=0.55$  اعمال می‌شود. در این دو منحنی هم ضریب توان در نهایت به یک می‌رسد زیرا  $i_{sy}$  در هیچ کدام به مرز ناحیه ضریب توان واحد و ماکزیمم ضریب توان بر جریان نمی‌رسد. نکته دیگر که در مقایسه ضریب توان‌ها دیده می‌شود این است که در حالت وجود گشتاور بار دینامیک ضریب توان سریعتر شده و نوسان آن هم کوچکتر می‌شود و این نوسان به دلیل استفاده از اینورتر است زیرا در بارهای کمتر نوسانات جریان ناشی از اینورتر دیگر در مقابل جریان موتور ناچیز نیست.

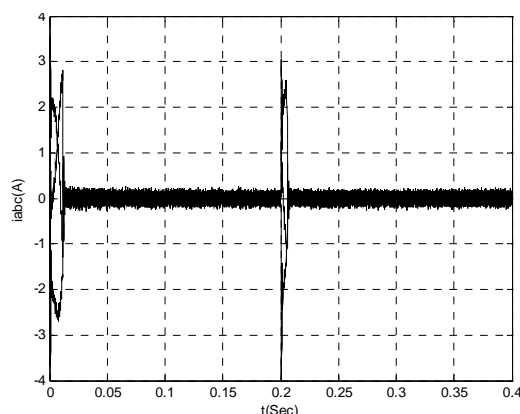
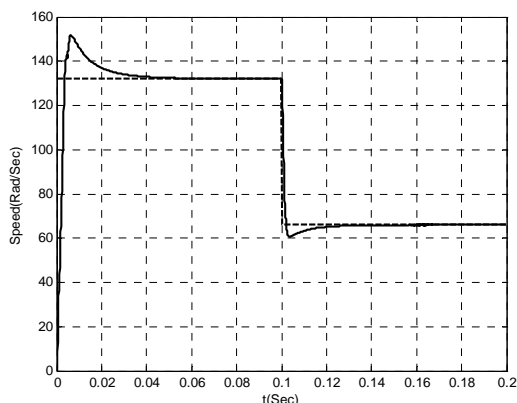


شکل ۱۹ - تغییرات ضریب توان در بی‌باری



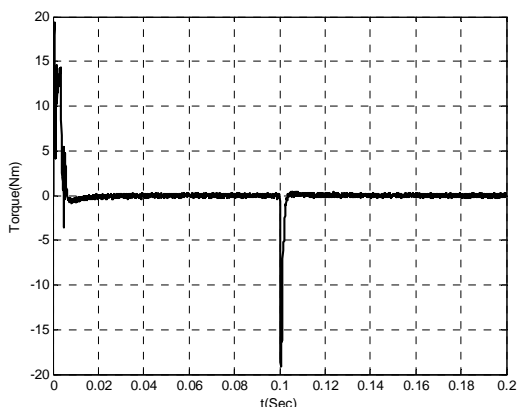
شکل ۲۰ - تغییرات ضریب توان با اعمال  $0.1$  گشتاور بار نامی

حالات گذرا کمتر از دو برابر گشتاور نامی است. در اینجا جریان نامی هم خیلی بزرگتر فرض شده است تا بتوانیم در ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان کار کنیم.

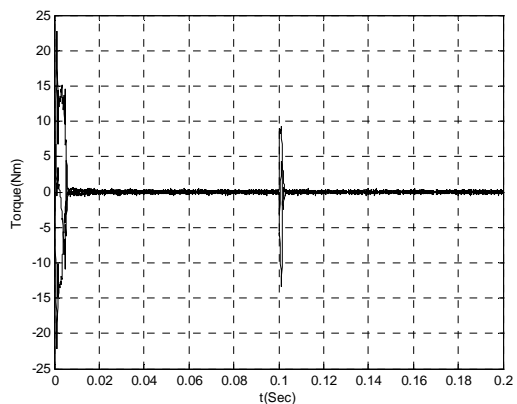


شکل ۲۳ - تغییرات جریان فازهای موتور به ازای تغییر مرجع سرعت

شکل ۲۴ - تغییرات سرعت موتور با تغییر فرمان سرعت



شکل ۲۵ - تغییرات گشتاور موتور با تغییر فرمان سرعت



شکل ۲۶ - تغییرات جریان فازهای موتور به ازای تغییر مرجع سرعت

دیدیم که در قسمت قبلی علی رغم اعمال گشتاور نامی نتوانستیم به ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان برسیم. برای اینکه صحت عملکرد سیستم را در ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان بررسی کنیم باید گشتاور ۱۲ Nm به سیستم اعمال نماییم ولی از آنجا که این گشتاور بیش از سه برابر گشتاور نامی ماشین است و این سیستم برای گشتاور نامی طراحی شده ناچار باید در کنترل کننده ها تغییراتی بدهیم به این صورت که فرض می کنیم که گشتاور نامی موتور ۱۲ Nm باشد و برای اینکه منحنی های ما صادق باشد و رابطه ۱۸ نیز برقرار بماند پارامترهای موتور را تغییر نمی دهیم در عوض ولتاژ موتور را بزرگتر فرض می کنیم. نتایج به دست آمده برای کنترل کننده ها به شرح زیر است:

برای کنترل کننده جریان محور y

$$K_p = 1 \text{ و } T_I = 0.01$$

برای کنترل کننده جریان محور x

$$K_p = 1 \text{ و } T_I = 0.03$$

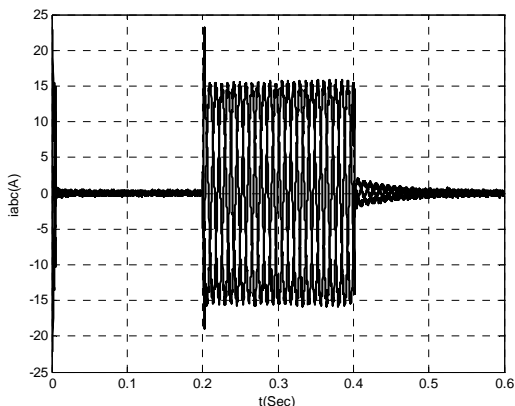
برای کنترل کننده گشتاور

$$K_p = 1.75 \text{ و } T_I = 0.007$$

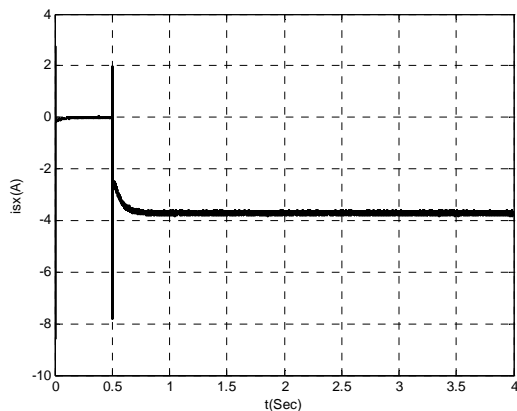
برای کنترل کننده سرعت

$$K_p = 1.3 \text{ و } T_I = 0.015$$

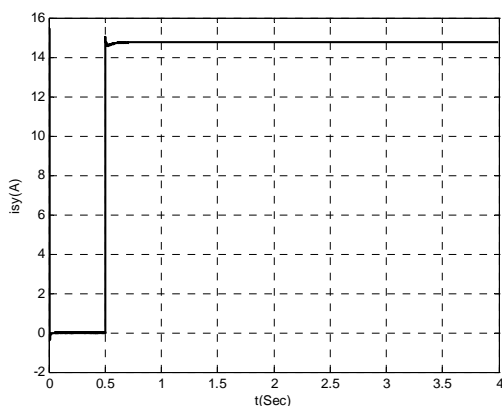
پس از طراحی کنترل کننده ها به بررسی عملکرد سیستم می پردازیم. ابتدا به بررسی عملکرد بی باری و تغییر مرجع سرعت و سپس اعمال گشتاور ۱۲ Nm می پردازیم. شکل (۲۴) تغییرات سرعت موتور را به ازای تغییر مرجع سرعت نشان می دهد شکل های (۲۵) و (۲۶) هم گشتاور و جریان های موتور را در شرایط تغییر مرجع سرعت نشان می دهد. بالازدگی سرعت در راه اندازی کمتر از ۱۵٪ و پایین زدگی در هنگام تغییر مرجع سرعت حدود ۷/۵٪ است. بقیه منحنی ها هم تغییراتی مثل قسمت قبلی دارند. گشتاور هم در



شکل ۲۹ - تغییرات جریان فازهای موتور در اثر اعمال و برداشتن گشتاور بار

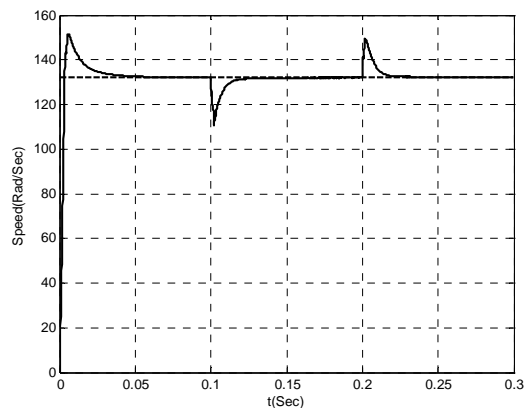


شکل ۳۰ - تغییرات جریان محور X بر اثر اعمال گشتاور بار

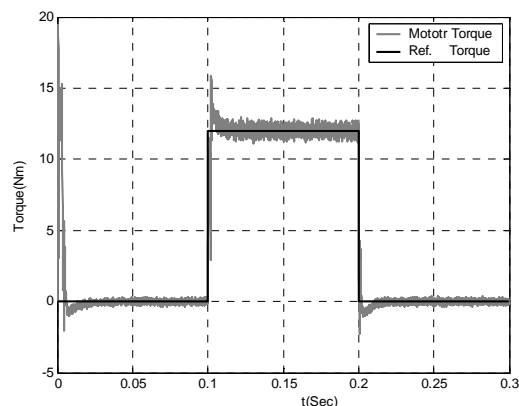


شکل ۳۱ - تغییرات جریان محور Y بر اثر اعمال گشتاور بار

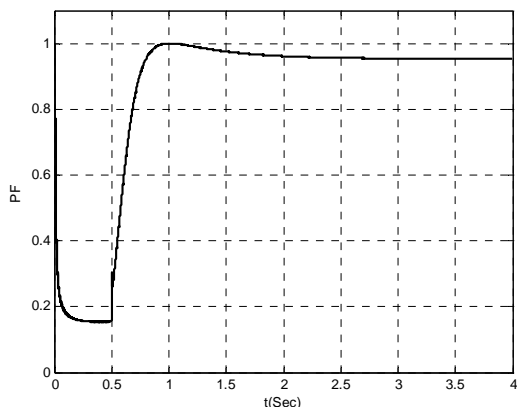
حال به قسمت اصلی یعنی اعمال گشتاور ۱۲ Nm می‌رسیم. به موتور گشتاور ۱۲ Nm را اعمال نموده و سپس بر می‌داریم. شکل (۲۷) تغییرات سرعت موتور را نشان می‌دهد. بالازدگی راه‌اندازی کمتر از ۱۵٪ و پایین زدگی به هنگام اعمال گشتاور حدود ۱۶٪ و بالازدگی در هنگام برداشتن گشتاور در حدود ۱۳٪ است. شکل (۲۸) نیز تغییرات گشتاور موتور را در اثر اعمال گشتاور بار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود گشتاور موتور با دینامیک خوبی گشتاور بار را دنبال می‌کند. شکل (۲۹) پاسخ جریان فاز موتور را نشان می‌دهد. شکل‌های (۳۰) و (۳۱) نیز جریان محورهای X و Y را نشان می‌دهد. مقادیر جریان محورهای X و Y در شرایط وجود بار به ترتیب حدود ۳/۷- و ۱۴/۷۶ می‌باشد که با تقریب بسیار خوبی روی منحنی شکل (۷) که مکان هندسی ناحیهٔ ماکزیمم ضریب توان بر جریان است قرار دارند.



شکل ۲۷ - منحنی تغییرات سرعت موتور در اثر اعمال و برداشتن گشتاور بار



شکل ۲۸ - تغییرات گشتاور موتور در اثر اعمال و برداشتن گشتاور بار



شکل ۳۴ - تغییرات ضریب توان بر اثر اعمال گشتاور بار

### ۵- بررسی اثر مقاومت استاتور بر ضریب توان

در این قسمت اثر مقاومت استاتور بر ضریب توان را از دو دید بررسی می‌کنیم. ابتدا به بررسی اثر مقاومت استاتور بر ضریب توان در راستای شار استاتور می‌پردازیم. در راستای شار استاتور روابط ولتاژها به صورت زیر می‌باشد:

$$v_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d|\lambda_{sx}|}{dt} - \omega |\lambda_{sy}| \quad (20)$$

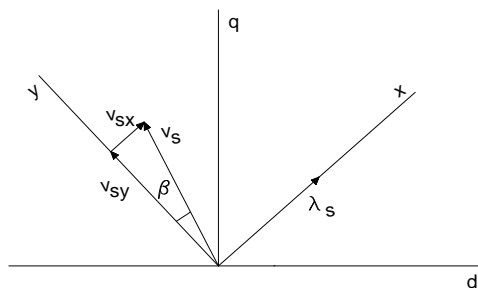
$$v_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d|\lambda_{sy}|}{dt} + \omega |\lambda_{sx}| \quad (21)$$

اما در حالت دائمی و با توجه به اینکه  $\lambda_{sy} = 0$  و  $\lambda_{sx} = \lambda_s$  داریم:

$$v_{sx} = R_s i_{sx} \quad (22)$$

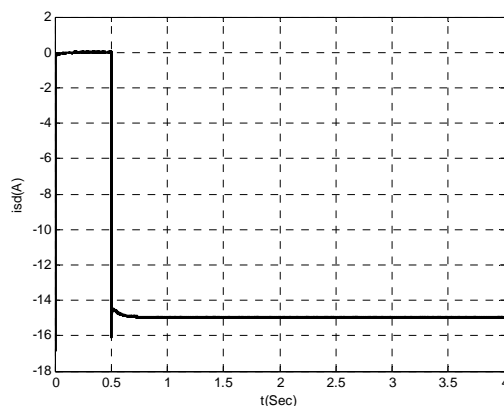
$$v_{sy} = R_s i_{sy} + \omega |\lambda_{sx}| \quad (23)$$

و با توجه به نمودار شکل (۳۵) مقاومت استاتور باعث می‌شود که بردار ولتاژ استاتور با محور  $\gamma$  زاویه  $\beta$  را پیدا کند و با توجه به نمودار زیر ما می‌توانیم با انتخاب مناسب  $i_{sx}$  اختلاف  $\alpha$  و  $\beta$  را کم کرده و ضریب توان را بالا ببریم.

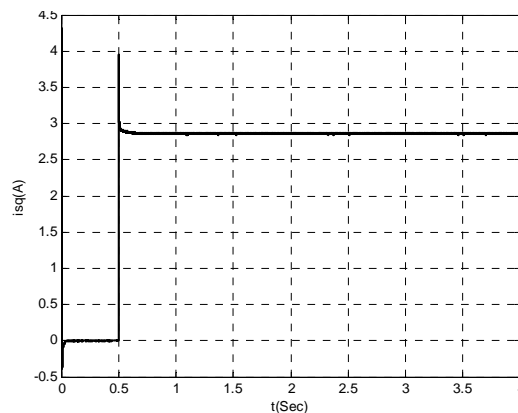


شکل ۳۵ - نمودار برداری جریان

از مقدار جریان محور  $x$  مشخص است که ما در ناحیهٔ ماکزیمم ضریب توان بر جریان قرار داریم برای تأیید این موضوع در ادامه منحنی‌های ضریب توان و جریان‌های محورهای  $d$  و  $q$  رسم شده‌است. مقادیر جریان‌های محورهای  $d$  و  $q$  به ترتیب حدود  $۲/۸۶$  و  $-۱۴/۹۵$  می‌باشد و در این حالت ضریب توان تقریباً  $۰,۹۵۳۵$  می‌باشد که اگر به منحنی شکل (۸) برگردیم ملاحظه می‌شود که ما روی ناحیهٔ ماکزیمم ضریب توان بر جریان قرار داریم.



شکل ۳۲ - تغییرات جریان محور d بر اثر اعمال گشتاور بار



شکل ۳۳ - تغییرات جریان محور q بر اثر اعمال گشتاور بار

همان‌طور که در شکل هم دیده می‌شود با افزایش  $\omega$  بعد از یک سرعت بحرانی حساسیت شروع به کاهش می‌کند و با افزایش گشتاور بار نیز حساسیت ضریب توان به مقاومت استاتور به شدت کاهش می‌یابد. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی هم گفته شد در ناحیه ضریب توان واحد مسیر جریان‌ها در دستگاه دو محوری و مقدار نهایی ضریب توان مستقل از مقاومت استاتور می‌باشد.

### ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

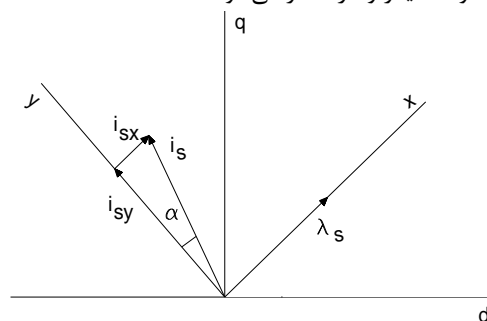
در این مقاله کنترل برداری این موتور در راستای شار روتور و استاتور تحت رفتار بهینه ماکزیمم ضریب توان بر جریان بررسی شد. ما مکان هندسی این رفتار بهینه را به دست آوردیم و دیدیم که تا مرزی مشخص که به پارامترهای ماشین بستگی داشت ضریب توان به یک می‌رسید و از آن به بعد دیگر یک نمی‌شد. شبیه‌سازی سیستم و نتایج آن صحت عملکرد سیستم را تأیید می‌کرد. شبیه‌سازی در راستای شار استاتور بدون حل بلادرنگ معادلات پیچیده و به وسیله تقریب زدن مکان هندسی انجام شد. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی به وسیله تقریب زدن مکان هندسی تقریباً بدون خطا می‌باشد. نتایج بیانگر این واقعیت است که موتورهای با گشتاورهای نامی پایین معمولاً در ناحیه ضریب توان واحد می‌مانند و موتورهای با گشتاورهای نامی بالا بیشتر ممکن است به ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان برسند.

در نهایت اثر مقاومت استاتور بر ضریب توان موتور مورد بررسی قرار گرفت و حساسیت ضریب توان به مقاومت استاتور در سرعت‌های گوناگون و تحت بارهای مختلف تعیین گردید.

### ۷- مراجع

- [1] P. Vas, **Sensorless vector and direct torque control**, Oxford University Press, Inc, New York, 1998.
- [2] S. Vaez-Zadeh, V. I. John and M. A. Rahman, "DSP Control of High Performance Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, Part I: Design and Simulation," in Proc. Iranian Conf. Electrical Eng., ICEE, Vol. 5, Tehran, Iran, May 1998, pp. 21-26.
- [3] C. T. Pan, S. M. Sue, "A linear Maximum Torque Per Ampere Control for IPMSM Drives over Full-speed Range," IEEE Trans. Energy Conv., Vol. 20, pp. 359-366, June 2005.
- [4] J. J. Chen, K. P. Chin, "Minimum Copper Loss Flux-weakening Control of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors" IEEE Trans. Power Elec., Vol. 18, No. 4, pp. 929-936, July 2003.

اگر جریان بر شار عمود باشد مقاومت استاتور هیچ اثری بر ضریب توان ندارد زیرا افت ولتاژ روی آن در راستای عمود بر شار می‌باشد. در این ناحیه مقادیر  $i_{sx}$  بسیار کوچک می‌باشد و می‌توان با صفر قرار دادن  $i_{sx}$  به ضریب توان یک رسید. در ناحیه ماکزیمم ضریب توان بر جریان نیز  $i_{sx}$  چندان بزرگ نیست. مخصوصاً در سرعت‌های بالا زیرا اثر افت ولتاژ روی مقاومت استاتور نسبت به مولفه دیگر ولتاژ کمتر می‌شود.

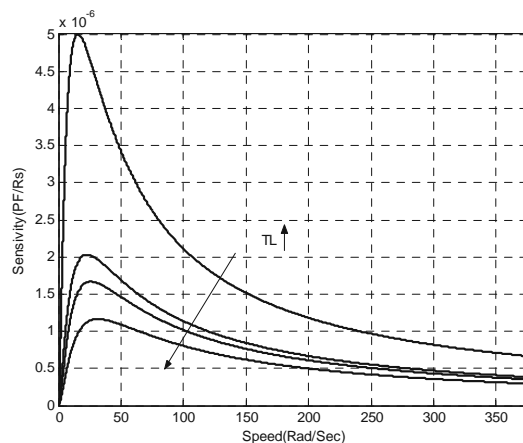


شکل ۳۶ - نمودار برداری ولتاژ

در ادامه به بررسی اثر مقاومت استاتور بر ضریب توان در راستای شار روتور خواهیم پرداخت. در راستای شار روتور مثل قبل نمی‌توان اثر مقاومت استاتور را در معادلات و روابط به‌وضوح مشاهده کرد در نتیجه در اینجا بحث را با به دست آوردن حساسیت ضریب توان به مقاومت استاتور آغاز می‌نماییم. حساسیت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{R_s}^{PF} = \frac{\partial PF}{\partial R_s} \frac{R_s}{PF} \quad (24)$$

رابطه حساسیت ضریب توان به مقاومت استاتور با سرعت و گشتاور بار مشخص می‌شود که منحنی‌های آن در شکل (۳۷) دیده می‌شود.



شکل ۳۷ - منحنی حساسیت ضریب توان به مقاومت استاتور بر حسب سرعت

- [5] Gabriel Gallegos-López, Member, IEEE, Fani S. Gunawan, and James E. Walters, "Optimum Torque Control of Permanent-Magnet AC Machines in the Field-Weakened Region," IEEE transactions on industry applications, Vol. 41, No. 4, July/August 2005, pp. 1020-1028.
- [6] M. Zamanifar, S. Vaez-Zadeh, "Efficiency Optimization of Vector-Controlled PM Synchronous Motor Drives with Online Estimation of All Parameters," in Proc. IEEE Conference on 1<sup>st</sup> Industrial Electronics and Applications, 2006, May 2006, pp. 1 – 6.
- [7] Butt, C.B.; Hoque, M.A.; Rahman, M.A., "Simplified Fuzzy-Logic-Based MTPA Speed Control of IPMSM Drive" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, Issue 6, pp. 1529 – 1535, 2004.
- [۸] صادق واعظزاده و علیرضا پیمان، "عملکرد بهینه موتور سنکرون آهنربای دایم درونی توسط کنترل برداری ولتاژ" سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۱-۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۴، زنجان، ایران، صفحه ۱۷۷-۱۷۱.
- [9] L. Zhong, M. F. Rahman, Y. Hu, and K. M. Lim, "Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Tran. Power Elec., Vol. 12, pp. 528-536, May, 1997.