

شبیه سازی سیستم کنترل برداری غیر مستقیم و بررسی تاثیر تغییر پارامترهای ماشین بر عملکرد درایو

سارا بهاری
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه تبریز

عادل ذکی پور
دانشکده مهندسی برق
دانشگاه علم و صنعت ایران

عباس شیری
دانشکده مهندسی برق
دانشگاه علم و صنعت ایران

abbas_shiri@yahoo.com

چکیده

در یک سیستم کنترل برداری نیاز به داشتن پارامترهای دقیق ماشین امری ضروری است. هرگونه عدم هماهنگی بین پارامترهای موتور و پارامترهای مورد استفاده در محاسبات سیستم کنترل برداری موجب اختلال در کار سیستم می شود. در این مقاله برای نشان دادن مقدار و چگونگی این اختلال، تغییر کمیت‌های خروجی ماشین نسبت به تغییر پارامترها به صورت کمی مورد مطالعه قرار گرفته و فرمولهایی برای تغییرات گشتاور خروجی و شار روتور ارائه شده است. به این ترتیب تاثیر تغییر پارامترهای ماشین روی خروجی های درایو قابل پیش بینی می باشد. در ادامه برای اثبات نتایج به دست آمده از تئوری، سیستم کنترل برداری و موتور مورد استفاده در محیط simulink/matlab شبیه سازی شد که نتایج شبیه سازی، پیش بینی های روابط تئوری را تأیید می کند.

کلمات کلیدی

کنترل برداری- تغییر پارامتر- حساسیت گشتاور- جهت دهی شار روتور

(۱) مقدمه

قبل از پیدایش کنترل برداری، موتورهای ac با وجود استحکام خوب، قیمت مناسب و پایین بودن اینرسی روتور نمی توانستند با موتورهای dc که برای کاربردهای دقیق نظیر سرو موتورها، رباتیک و ... مورد استفاده قرار می گیرند، رقابت کنند و این به خاطر راحتی کنترل موتورهای dc در مقایسه با موتورهای ac است. با ظهور کنترل برداری، کنترل موتورهای ac با ایجاد کانالهای مستقل کنترل شار و گشتاور، مشابه کنترل موتورهای dc شد. با فرض ثابت بودن موقعیت زاویه ای شار روتور نسبت به قاب مرجع گردان، فازور جریان استاتور به دو مؤلفه همسو با شار روتور و عمود بر آن تجزیه می شود. مؤلفه همسو با شار، جریان تولید کننده میدان (i_f) و مؤلفه عمود بر آن، جریان تولید کننده گشتاور است (i_T). تجزیه جریان استاتور نیازمند اطلاع از موقعیت شار روتور است که با q_f نشان داده می شود. این زاویه شار می تواند مستقیماً در روش کنترل برداری مستقیم اندازه گیری شود یا در روش کنترل برداری غیر مستقیم محاسبه شود. عدم نیاز به سنسورهای زاویه شار و امکان کار در سرعت‌های پایین، کنترل برداری غیر مستقیم را در مقایسه با کنترل برداری مستقیم کاربردی تر کرده است. عیب عمده این نوع کنترل،

وابسته بودن آن به پارامترهای ماشین است چرا که پارامترهای ماشین در محاسبه شار مورد استفاده قرار می گیرد. پارامترهای ماشین با تغییر دما، تغییر فرکانس و با اشباع هسته تغییر می کنند. هر گونه تغییر در پارامترهای موتور موجب عدم مطابقت پارامترهای آن با پارامترهای مورد استفاده در کنترل برداری شده و باعث تضعیف عملکرد سیستم در حالت ماندگار و ایجاد نوساناتی در حالت گذرا در شار روتور، گشتاور و سرعت موتور می شود، که موجب کاهش بازده می شود همچنین وجود این نوسانات در سرعت موتور برای کاربردهای دقیق مطلوب نیست. در مرجع [۱] نگاهی گذرا به بحث حساسیت شده و آن را به صورت کیفی بررسی کرده است. در مرجع [۲] سعی شده اثر تغییر پارامترهای ماشین در خروجی های آن نشان داده شود ولی تنها به نتایج شبیه سازی اکتفا شده است. در [۳] روابطی به صورت تقریبی برای حساسیت به دست آمده است. همچنین در مرجع [۴] مروری بر روشهای به کار رفته در تخمین پارامترهای موتورهای القایی تا سال ۲۰۰۳ شده است. در تمام مطالعاتی که تا کنون انجام شده است هیچ تلاشی در رابطه با کمی کردن بحث حساسیت صورت نگرفته است. در این مقاله سعی می شود روابط دقیقتری برای حساسیت محاسبه شده تا از روی آنها بتوان رفتار خروجی ماشین را با تغییر پارامترهای آن پیش بینی نمود. در ادامه ابتدا کنترل برداری غیر مستقیم بحث شده؛ سپس مسأله حساسیت کنترل برداری نسبت به تغییر پارامترهای ماشین بررسی شده و به صورت کمی تحلیل می شود. به منظور تایید نتایج محاسبات تئوری، سیستم درایو کنترل برداری غیر مستقیم در محیط simulink/matlab شبیه سازی شده و نتایج آن با در نظر گرفتن اثرات تغییر پارامترهای ماشین بر روی خروجی ها، با معادلات کمی به دست آمده مقایسه می شود و در پایان جمع بندی و نتیجه گیری از مطالب بیان شده ارائه می شود.

۲) کنترل برداری غیر مستقیم

در این بخش، کنترل برداری غیر مستقیم از معادلات دینامیکی ماشین القایی در مرجع قاب سنکرون استخراج می شود. معادلات روتور در ماشین القایی به صورت زیر هستند:

$$R_r i_{qr}^e + p I_{qr}^e + w_{sl} I_{dr}^e = 0 \quad (۱)$$

$$R_r i_{dr}^e + p I_{dr}^e - w_{sl} I_{qr}^e = 0 \quad (۲)$$

که در آنها:

$$w_{sl} = w_s - w_r \quad (۳)$$

$$I_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L_r i_{qr}^e \quad (۴)$$

$$I_{dr}^e = L_m i_{ds}^e + L_r i_{dr}^e \quad (۵)$$

در این معادلات حروف و نشانه های مختلف به صورت زیر است: R_r ، مقاومت روتور در هر فاز که به طرف استاتور برده شده است؛ L_m ، اندوکتانس متقابل در هر فاز؛ L_r ، اندوکتانس روتور در هر فاز که به طرف استاتور برده شده است؛ i_{dr}^e و i_{qr}^e ، به ترتیب مؤلفه جریانهای مستقیم و قائم روتور منتقل شده به طرف استاتور؛ p ، عملگر مشتق و w_{sl} ، سرعت لغزش بر حسب rad/s و w_s ، سرعت سنکرون و w_r ، سرعت روتور هر دو بر حسب rad/s و I_{dr}^e و I_{qr}^e ، به ترتیب شار پیوندی روتور در جهت محور d و q هستند.

برای کاهش تعداد مجهولات در معادلات فرض می شود که شار پیوندی منتهی روتور (I_r) در جهت محور مستقیم باشد. به این ترتیب شار روتور دارای یک متغیر می شود. از این رو با اعمال این فرض و منطبق کردن شار روتور روی محور d ، به عبارتهای ساده کننده زیر می رسیم:

$$I_r = I_{dr}^e \quad (۶)$$

$$I_{qr}^e = 0 \quad (۷)$$

$$p I_{qr}^e = 0 \quad (۸)$$

با جایگذاری این روابط در معادلات (۱) و (۲) و استفاده از معادلات (۴) و (۵) می توان روابطی به صورت زیر برای i_f و w_{sl} به دست آورد:

$$i_f = \frac{1}{L_m} [1 + pT_r] I_r \quad (۹)$$

$$w_{sl} = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_T}{I_r} \quad (۱۰)$$

که در آنها

$$i_f = i_{ds}^e \quad (۱۱)$$

$$i_T = i_{qs}^e \quad (۱۲)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (۱۳)$$

جریان در محورهای q و d به ترتیب با مؤلفه های جریان استاتور تولید کننده گشتاور (i_T) و شار (i_f) مشخص شده اند. T_r نشان دهنده ثابت زمانی روتور است. همچنین با استفاده از معادلات (۶) تا (۸) می توان معادله گشتاور را به صورت زیر خلاصه کرد:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} (I_r i_{qs}) = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} I_r i_T = K_{te} I_r i_T \quad (۱۴)$$

که در آن K_{te} ، ثابت گشتاور بوده و برابر است با:

$$K_{te} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \quad (۱۵)$$

به طوری که ملاحظه می شود گشتاور با حاصلضرب شار روتور و جریان محور q استاتور متناسب است، که مشابه گشتاور فاصله هوایی در موتور dc است که با حاصلضرب شار روتور در جریان آرمیچر متناسب است. اگر شار روتور ثابت نگه داشته شود گشتاور با جریان i_T متناسب می شود مانند آنچه که در موتور dc برای کنترل گشتاور جریان تحریک را ثابت نگه می داشتیم. روابط شار روتور و گشتاور که در معادلات (۹) و (۱۴) داده شده است از نظر کنترلی انتقال کاملی از ماشین القایی به ماشین dc تحریک مستقل مشابه است.

۳) حساسیت کنترل برداری غیر مستقیم نسبت به تغییر پارامترهای ماشین

مطابقت بین کنترل برداری و موتور القایی که در طراحی صورت می گیرد با تغییر پارامترهای موتور از میان می رود. تغییر پارامترهای موتور از عواملی چون تغییر دما با کار کردن ماشین و اشباع مواد مغناطیسی در هسته موتور به وجود می آید. همچنین در بعضی مواقع عدم مطابقت از طراحی غلط کنترلر نیز می تواند ناشی شود. به هم خوردن هماهنگی بین پارامترهای مورد استفاده در کنترلر و پارامترهای واقعی ماشین باعث کوپل کانالهای شار و گشتاور در ماشین می شود و به ایده اصلی کنترل که جدا کردن دو کانال از هم بود لطمه وارد می کند. کوپل کانالها باعث بوجود آمدن مشکلات زیر می شود:

- ۱) شار پیوندی روتور از مقدار مرجع آن منحرف می شود.
- ۲) گشتاور الکترومغناطیسی از مقدار مرجع آن منحرف شده و رابطه ای غیر خطی بین گشتاور واقعی ماشین و گشتاور مرجع بوجود می آید.
- ۳) در حالت گذرای درایور، نوسانهایی در گشتاور و شار روتور ایجاد می شود که ممکن است این نوسانات به سرعت منتقل شده و کاربرد موتور را محدود کند.

که می توان از روی $\tan q_T$ عباراتی را برای $\sin q_T$ و $\cos q_T$ به صورت زیر تعریف کرد:

$$\sin q_T = \frac{(w_{sl} T_r) / (1 + p T_r)}{\sqrt{1 + (\frac{w_{sl} T_r}{1 + p T_r})^2}} \quad (24)$$

$$\cos q_T = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{w_{sl} T_r}{1 + p T_r})^2}} \quad (25)$$

با جایگذاری مقادیر $\sin q_T$ و $\cos q_T$ در رابطه (21) معادله گشتاور به صورت زیر به دست می آید:

$$T_e = \frac{1}{K_{it}} \frac{L_m^2}{[R_r (1 + p T_r)^2] [1 + (\frac{w_{sl} T_r}{1 + p T_r})^2]} w_{sl} i_s^2 \quad (26)$$

که در آن از رابطه $T_r = L_r / R_r$ استفاده شده است.

مشابه معادله گشتاور موتور، گشتاور مرجع به صورت زیر خواهد بود:

$$T_e^* = \frac{1}{K_{it}} \frac{L_m^{*2}}{[R_r^* (1 + p T_r^*)^2] [1 + (\frac{w_{sl}^* T_r^*}{1 + p T_r^*})^2]} w_{sl}^* i_s^{*2} \quad (27)$$

برای شار روتور نیز می توان معادله زیر را به دست آورد:

$$I_r = \frac{L_m}{(1 + p T_r) \sqrt{1 + (\frac{w_{sl} T_r}{1 + p T_r})^2}} i_s \quad (29)$$

به طور مشابه برای شار مرجع روتور داریم:

$$I_r^* = \frac{L_m^*}{(1 + p T_r^*) \sqrt{1 + (\frac{w_{sl}^* T_r^*}{1 + p T_r^*})^2}} i_s^* \quad (30)$$

حال با داشتن روابط گشتاور و شار، می توان حساسیت آنها را نسبت به تغییر پارامترهای ماشین بررسی کرد. با تقسیم گشتاور واقعی به گشتاور مرجع خواهیم داشت:

$$\frac{T_e}{T_e^*} = \frac{L_m^2}{L_m^{*2}} \frac{R_r^* (1 + p T_r^*)^2 [1 + (\frac{w_{sl}^* T_r^*}{1 + p T_r^*})^2]}{R_r (1 + p T_r)^2 [1 + (\frac{w_{sl} T_r}{1 + p T_r})^2]} \frac{w_{sl}}{w_{sl}^*} \frac{i_s^2}{i_s^{*2}} \quad (31)$$

همچنین با تقسیم شار واقعی به شار مرجع داریم:

$$\frac{I_r}{I_r^*} = \frac{L_m}{L_m^*} \frac{1 + p T_r^*}{1 + p T_r} \frac{\sqrt{1 + (\frac{w_{sl}^* T_r^*}{1 + p T_r^*})^2}}{\sqrt{1 + (\frac{w_{sl} T_r}{1 + p T_r})^2}} \frac{i_s}{i_s^*} \quad (32)$$

معادلات به دست آمده برای هر دو حالت دینامیکی و استاتیکی معتبر هستند. در حالت ماندگار $p=0$ و نیز می توان فرض کرد $i_s = i_s^*$ و داریم:

$$\frac{T_e}{T_e^*} = ab \frac{[1 + (w_{sl}^* T_r^*)^2] w_{sl}}{[1 + (aw_{sl} T_r^*)^2] w_{sl}^*} \quad (33)$$

$$\frac{l_r}{l_r^*} = b \frac{\sqrt{1 + (w_{sl}^* T_r^*)^2}}{\sqrt{1 + (aw_{sl} T_r^*)^2}} \quad (34)$$

$$\frac{T_r}{T_r^*} = a \text{ و } \frac{L_m}{L_m^*} = b \quad \text{که در آنها:}$$

$$\text{و از تقریب } \frac{L_r^*}{L_r} \approx \frac{L_m^*}{L_m} \text{ استفاده شده است.}$$

رنجهای مختلف a و b

با افزایش دما با توجه به شرایط کاری موتور، مقاومت روتور می تواند تا ۵۰٪ افزایش یابد. همچنین اشباع مغناطیسی نیز می تواند اندوکتانس خودی روتور را تا ۸۰٪ پایین بیاورد، بنابراین محدوده پایین a را به صورت زیر به دست آورد:

$$T_r = \frac{0.8L_r^*}{1.5R_r^*} \cong 0.533T_r^*$$

و چون $a = \frac{T_r}{T_r^*}$ ، پس حد پایین تقریبی a برابر ۰٫۵ خواهد بود. حد بالای a به ۱٫۵ می رسد؛ و این به خاطر

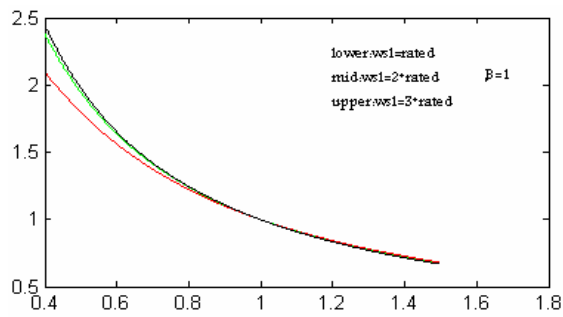
کارموتور در ناحیه خطی (با توجه به طراحی نقطه کار ماشین در زانوی منحنی) منحنی اشباع و نیز اشتباه در طراحی کنترلر می تواند باشد. پس a در محدوده زیر می تواند تغییر کند:

$$0.5 \leq a \leq 1.5$$

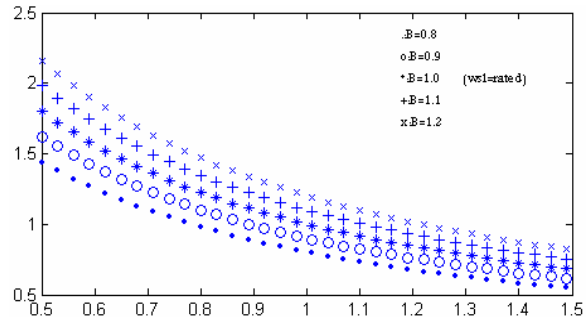
همچنین با توجه به طراحی نقطه کار ماشین در زانوی منحنی $B-H$ ، b بین ۰٫۸ و ۱٫۲ تغییر می کند بنابراین برای تغییرات b خواهیم داشت:

$$0.8 \leq b \leq 1.2$$

منحنی های حساسیت گشتاور و شار روتور نسبت به تغییرات a و b در شکلهای (۲) و (۳) نشان داده شده اند. در شکل (۲-a) به طوری که دیده می شود گشتاور موتور نسبت به گشتاور مرجع با افزایش a کاهش یافته و با افزایش b افزایش یافته است (لغزش ثابت) و در شکل (۲-b) نیز b ثابت نگه داشته شده و تغییرات گشتاور نسبت به تغییر a و w_{sl} رسم شده است به طوری که دیده می شود تغییر w_{sl} تأثیر محسوسی در گشتاور ایجاد نمی کند. در شکل (۳) نیز شار روتور نسبت به شار مرجع با افزایش a و b به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

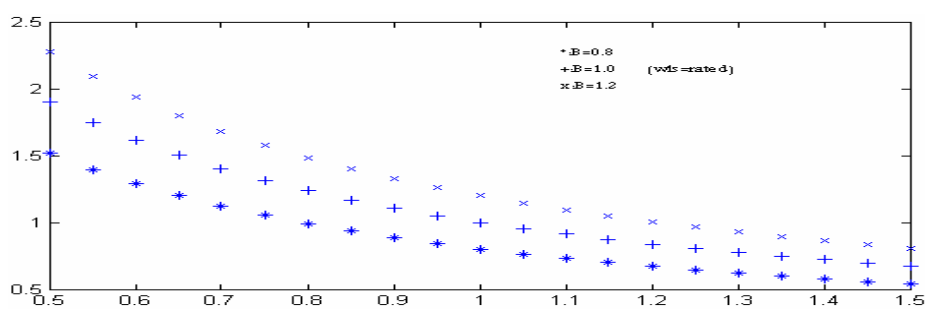


(b)



(a)

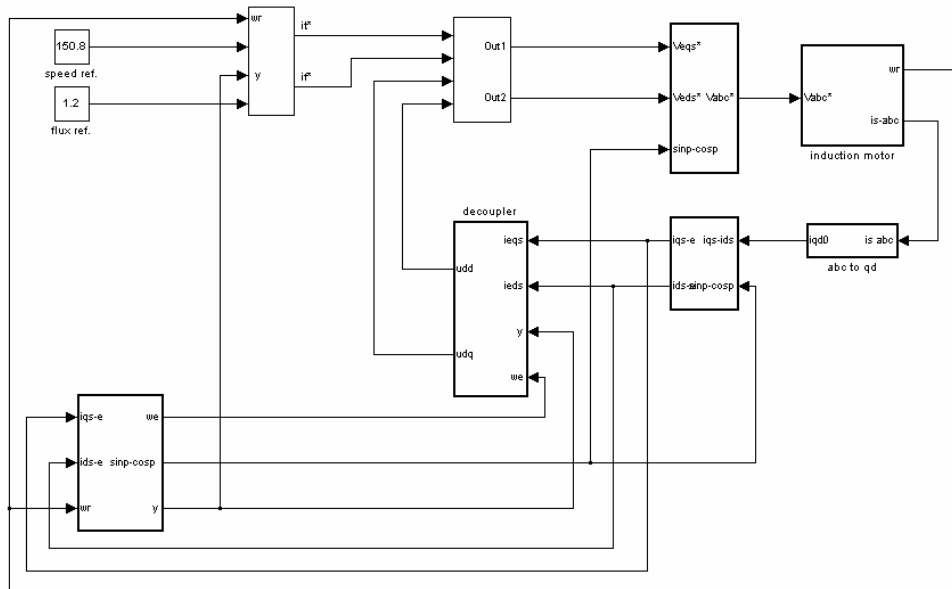
شکل (۲) تغییرات گشتاور نسبت به مقدار مرجع با تغییر a و b
(a) تغییر a و b (b) تغییر a و w_{sl}



شکل (۳) تغییرات شار روتور نسبت به مقدار مرجع با تغییر a و b
($w_{sl} = rated$)

(۴) نتایج شبیه سازی

در شکل (۴) دیاگرام بلوکی درایو شبیه سازی شده در نرم افزار مطلب دیده می شود.



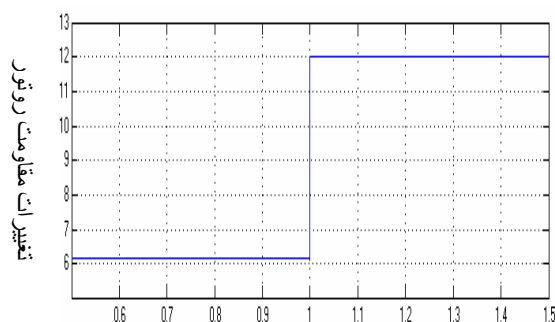
شکل (۴) دیاگرام بلوکی استفاده شده

مقادیر نامی موتور شبیه سازی شده به قرار زیر است:

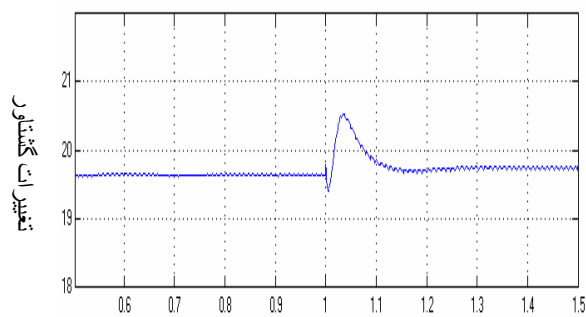
$$r_s = 8.28\Omega, r_r = 6.16\Omega, p_n = 4hp, n_m = 1440rpm, n_s = 1500rpm$$

$$J = 0.04kg.m^2 \text{ و } L_{lr} = L_{ls} = 31.6mH, L_m = .7774H$$

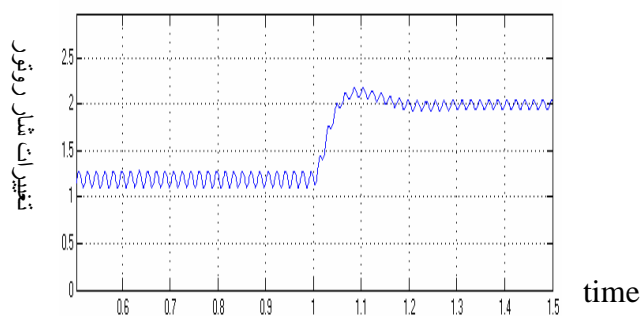
نتایج شبیه سازی برای حالت‌های مختلف تغییر پارامترها در ادامه آورده می شود. در شکل (۵) تمام پارامترها ثابت بوده و فقط مقاومت روتور را تقریباً دو برابر کردیم، با این کار در واقع a نصف شده است. با دقت در نتایج این شکل دیده می شود که با کاهش a ، گشتاور و شار روتور هر دو زیاد می شوند و این همان چیزی است که از معادلات (۳۳) و (۳۴) نیز قابل پیش بینی بود. در شکل (۶) اندوکتانس متقابل به صورت پله افزایش یافته است. به طوری که دیده می شود با افزایش اندوکتانس متقابل (افزایش b) گشتاور و شار روتور زیاد می شوند. باز می توان از معادلات (۳۳) و (۳۴) نیز به این نتیجه رسید. در شکل (۷) مقاومت استاتور به صورت پله افزایش یافته است. نکته ای که قابل توجه است، اینکه با افزایش مقاومت استاتور شار و گشتاور هر دو کاهش می یابند و این به خاطر افزایش افت ولتاژ در دو سر مقاومت استاتور است. با توجه به این که در عمل با کار کردن موتور مقاومت روتور آن تقریباً به صورت شیب افزایش می یابد در شکل (۸) نتایج این حالت آورده شده است. به طوری که دیده می شود باز با افزایش مقاومت روتور شار و گشتاور افزایش یافته است. با بررسی شکل‌ها دیده می شود که شار روتور و گشتاور بیشترین حساسیت را به تغییر مقاومت روتور نشان می دهند، به این ترتیب که با افزایش ۱۰۰٪ ای مقاومت روتور، شار روتور به مقدار ۶۶٪ افزایش می یابد در حالی که برای همین میزان افزایش L_m ، شار روتور تنها ۷٪ افزایش می یابد. شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷).



(a)

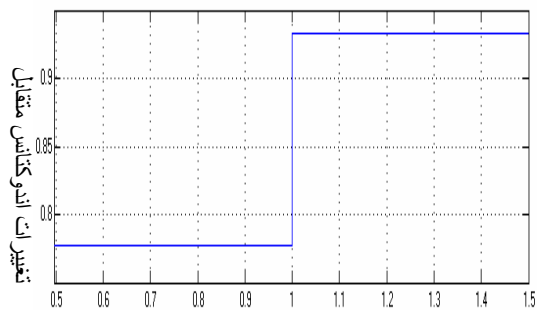


(b)

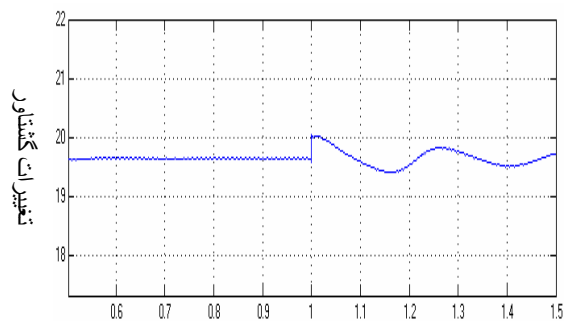


(c)

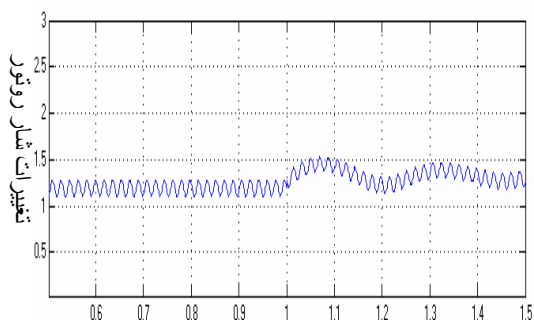
شکل (۵) تغییرات گشتاور و شار روتور با تغییر در مقاومت روتور
(a) تغییرات مقاومت روتور (Ω)، (b) تغییرات گشتاور (N.m) (c) تغییرات شار روتور
(بار و سرعت نامی)



(a)

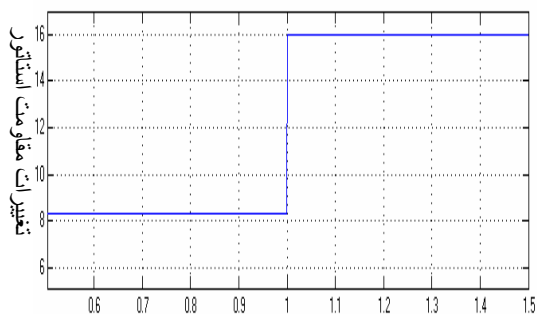


(b)

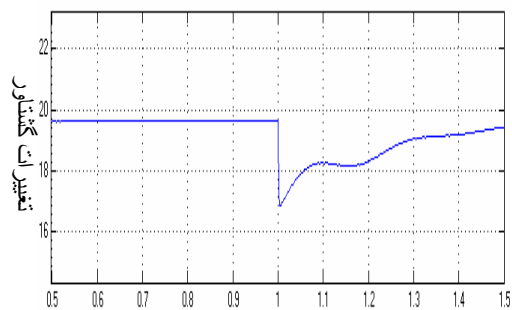


(c)

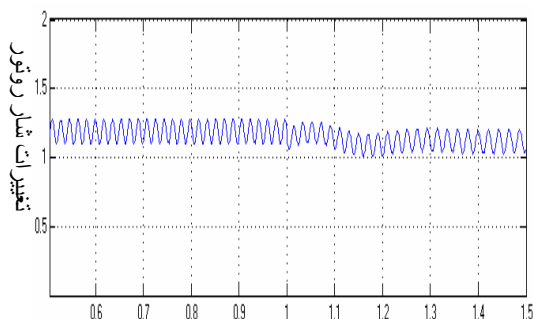
شکل (۶) تغییرات گشتاور و شار روتور با تغییر L_m (افزایش)
 (a) تغییرات L_m (H) (b) تغییرات گشتاور (N.m) (c) تغییرات شار روتور
 (بار و سرعت نامی)



(a)

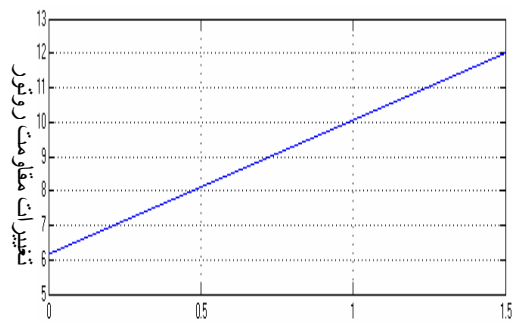


(b)

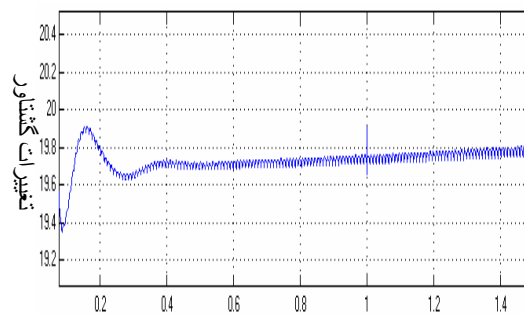


(c)

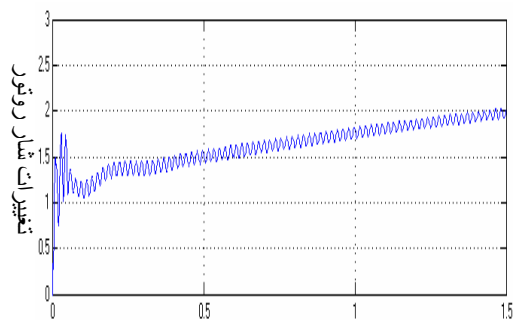
شکل (۷) تغییرات گشتاور و شار روتور با تغییر مقاومت استاتور
 (a) تغییرات مقاومت استاتور (W) (b) تغییرات گشتاور (N.m) (c) تغییرات شار روتور
 (بار و سرعت نامی)



(a)



(b)



(c)

شکل (۸) تغییرات گشتاور و شار روتور با تغییر مقاومت روتور به صورت ramp
(a) تغییرات مقاومت روتور (W) (b) تغییرات گشتاور ($N.m$) (c) تغییرات شار روتور
(بار و سرعت نامی)

نتیجه گیری

در این مقاله اصول کنترل برداری غیرمستقیم مورد بحث قرار گرفت. عمده ترین مشکلی که در این نوع کنترل وجود داشت تغییر پارامترهای ماشین در شرایط کاری بود. با توجه به اینکه در طراحی سیستم کنترل برداری از پارامترهای ثابت موتور استفاده می شود ولی در عمل به خاطر شرایط کاری و تغییر دما و عامل اشباع مغناطیسی هسته، این پارامترها دچار تغییر می شوند و این باعث عدم هماهنگی بین پارامترهای موتور و پارامترهای مورد استفاده در محاسبات سیستم کنترل برداری شده و موجب اختلال در کار سیستم می شود. برای تعیین میزان تغییر کمیت‌های خروجی نسبت به تغییر پارامترها حساسیت سیستم کنترل برداری نسبت به تغییر پارامترهای ماشین با ارائه فرمولهائی معرفی شد، با این کار نحوه تغییرات گشتاور و شار روتور به صورت کمی درآمد. شبیه سازی هایی که در محیط سیمولینک نرم افزار مطلب انجام شد نشان داد که تغییر پارامترهای موتور باعث انحراف شار روتور و گشتاور و در نتیجه سرعت روتور از مقادیر مطلوب شده و موجب نوساناتی به خصوص در گشتاور خروجی می شود. همچنین با توجه به نتایج شبیه سازی، تغییرات مقاومت روتور بیشترین اختلال را در کار سیستم کنترل برداری غیر مستقیم ایجاد می کند. با بحثهایی که مطرح شد، ضرورت تخمین همزمان پارامترهای ماشین- به خصوص مقاومت روتور- و استفاده از این پارامترها در سیستم کنترل برداری غیر قابل اجتناب می نماید. نحوه تخمین پارامترها خود بخشی است که در مقالات متعدد مورد بررسی قرار گرفته که میزان دقت آنها با پیچیدگی الگوریتمهای به رفته متناسب است. [۲ و ۳ و ۴]

مراجع

- 1) R. Krishnan, A. S. Baharadwaj "A Review of Parameter Sensitivity and Adaptation in Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive Systems" IEEE Tran. On power electronics, October 1991.
- 2) B. Karanayil, M. F. Rahman and C. Grantham "PI and Fuzzy Estimators for On-line tracking of Rotor Resistance of Indirect Vector controlled Induction motor drive" IEEE Tran. On 2001.
- 3) R. Krishnan " electric motor drives: modeling, analysis & control" Prentice Hall 2001.
- 4) H. A. Toliyat, E. Levi, M. Raina "A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques" IEEE Tran. on Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003.