

## بررسی رفتار دینامیکی موتور القایی در اثر تغییر پارامتر با استفاده از نرم افزار Matlab

ایمان مظهری، رامتین حدیدی و ابوالفضل واحدی

دانشگاه علم و صنعت ایران

[avahedi@iust.ac.ir](mailto:avahedi@iust.ac.ir), [ramtin\\_hadidi@yahoo.com](mailto:ramtin_hadidi@yahoo.com), [imazhari@gmail.com](mailto:imazhari@gmail.com)

چکیده - در این مقاله شمایی کلی از اثرات تغییر پارامترهای اصلی موتورهای القایی سه فاز بررسی شده است. روش پیشنهادی در این مقاله بر روی چهار نمونه موتور القایی با توانهای نامی مختلف اعمال شده و تحلیل دینامیکی آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور شبیه سازی چهار موتور القایی انجام شده و مقایسه مختلف مشخصه های کنترلی که در بررسی رفتار ماشین مورد استفاده قرار می گیرند مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. برای شبیه سازی از نرم افزار *Matlab* استفاده شده و نتایج حاصله نشان دهنده آن است که اختلاف قابل توجهی بین رفتار دینامیکی موتور های با توان نامی پایین و بالا وجود دارد.

کلید واژه - رفتار دینامیکی، شبیه سازی، موتور القایی، نوسانات اولیه، نوسانات حالت دایم.

### 1- مقدمه

لحاظ کردن تغییرات پارامترهای اصلی نمایش داده شده اند. پارامترهای اصلی تعریف شده در این مقاله که اثر تغییرات آنها مورد بررسی قرار گرفته است عبارتند از:

مقاومت استاتور  $R_s$ ، مقاومت روتور از دید استاتور  $R_r'$ ، راکتانس استاتور  $x_{ls}$ ، راکتانس روتور از دید استاتور  $x_{lr}'$ ، راکتانس مغناطیس کنندگی  $x_m$ ، ممان اینرسی  $J$ . به علاوه ۸ شاخص در منحنی های گشتاور، سرعت و جریان برای درک اثر تغییر پارامتر در رفتار دینامیکی سیستم مورد تحلیل قرار گرفته است.

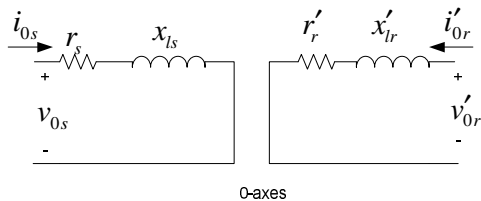
### 2- معادلات موتور

ماشین القایی دارای سه سیم پیچ مربوط به استاتور و سه سیم پیچ مربوط به روتور است. معادلات سیم پیچی های استاتور در حالت ماتریسی به صورت زیر می باشد.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

امروزه، اهمیت موتورهای القایی بر هیچ کس پوشیده نیست؛ به طوریکه ۷۰٪ موتورهای مصرفی در صنعت از این نوع هستند. با مطالعه رفتار دینامیکی موتور های القایی می توان به عملکرد بهینه آنها پی برد [۱]. در تحلیل رفتار دینامیکی و گذرای سیستمهای الکتریکی، مدلسازی موتورهای القایی یکی از مهمترین مسائل است. در سالهای اخیر مطالعات و تحقیقات بسیاری در زمینه مدلسازی موتورهای القایی و درایو انجام شده است [۲-۵، ۸]. در بعضی از مقالات، رفتار دینامیکی موتورهای القایی بررسی شده اما اثر تغییر پارامتر تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است [۵].

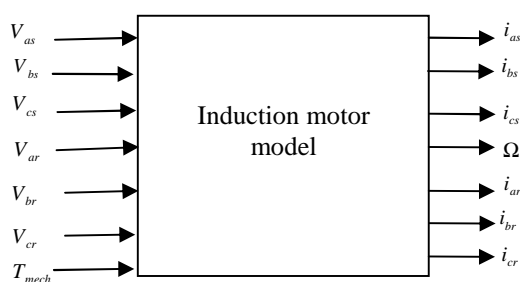
در این مقاله تحلیل و شبیه سازی ۴ نوع موتور القایی با مقادیر نامی مختلف و توانهای نامی ۳، ۵۰، ۵۰۰، ۲۲۵۰ اسب بخار انجام شده است [۶]. برای مقایسه بهتر، نتایج این چهار موتور به دو گروه اصلی تقسیم شده اند، گروه توان پایین و گروه توان بالا. از آنجا که رفتار این دو گروه تا حدود زیادی با یکدیگر متفاوت است، لذا به مقایسه شباهتها و تفاوتهای این دو دسته می پردازیم. شبیه سازیها با استفاده از جعبه ابزار Matlab/ Simulink صورت گرفته و نتایج با



شکل (۱) مدار معادل محورهای qd0

### 3- معادلات و بلوکهای شبیه سازی

برای شبیه سازی ابتدا باید ورودی ها و خروجی ها را مشخص کنیم. در شکل زیر این موارد به صورت گرافیکی مشخص شده است.



شکل (۲) بلوک دیاگرام اصلی موتور القایی

با انتخاب  $\mathcal{Y}$  که حاصل ضرب شارپیوندی در راکتانس است به عنوان متغیر حالت و باز نویسی معادلات نهایی بخش ۲ بر حسب  $\mathcal{Y}$  معادلات زیر را برای محور Q خواهیم داشت.

$$y_{qs}^s = w_b \int (V_{qs}^s - \frac{w}{w_b} y_{ds}^s - \frac{r_s}{x_{ls}} (y_{qs}^s - y_{mq}^s)) dt \quad (4)$$

$$y_{qr}^s = w_b \int (V_{qr}^s - \frac{(w_b - w_r)}{w_b} y_{dr}^s - \frac{r_r}{x_{lr}} (y_{qr}^s - y_{mq}^s)) dt \quad (5)$$

$$y_{mq}^s = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \quad (6)$$

$$i_{qs}^s = \frac{y_{qs}^s - y_{mq}^s}{x_{ls}} \quad i_{qr}^s = \frac{y_{qr}^s - y_{mq}^s}{x_{lr}} \quad (7)$$

$$y_{mq}^s = x_m (\frac{y_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{y_{qr}^s}{x_{lr}}) \quad \frac{1}{x_m} = [\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x_{lr}}] \quad (8)$$

روش فوق را برای بدست آوردن معادلات محور d نیز می توان به کار برد. در این صورت زیرنویس q به d تغییر خواهد کرد. در معادلات فوق  $w_b$  سرعت چرخشی مبنا بوده که در این مقاله به صورت زیر محاسبه شده و مورد

$$w_b = 2p \times 60 = 376.8 \frac{rad}{sec}$$

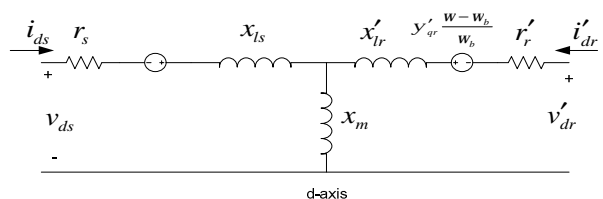
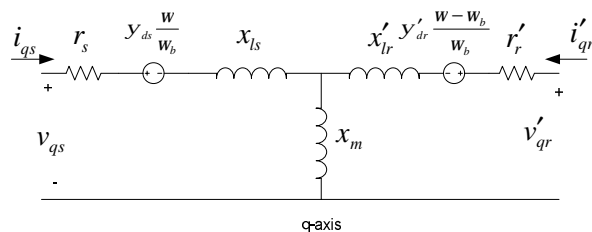
که  $v_c, v_b, v_a$  ولتاژهای سه فاز و اندیس s مشخص کننده استاتور می باشند. به همین ترتیب  $I_{as}, I_{bs}, I_{cs}$  نشانگر شاردرور سیم پیچهای استاتور هستند.  $R_s$  مقاومت سیم پیچهای استاتور است. در مورد روتور نیز روابط مشابهی خواهیم داشت با این تفاوت که اندیس r جایگزین اندیس s می شود. در معادلات فوق شاردرورها خود توسط ماتریس های اندوکتانس با جریان ها ارتباط پیدا می کنند.

$$\begin{bmatrix} I_s^{abc} \\ I_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $I_s^{abc}$  و  $I_r^{abc}$  بردارهای ستونی شامل شاردرورها نام دارند.  $L_{ss}^{abc}$  و  $L_{rr}^{abc}$  ماتریس اندوکتانس خودی روتور و استاتور بوده که دارای عناصر ثابت و نامتغیر با زمان می باشند.  $L_{rs}^{abc}$  و  $L_{sr}^{abc}$  ماتریس های متقابل استاتور و روتور با عناصر متغیر با زمان هستند. حل معادله (۱) و (۲) با توجه به متغیر بودن عناصر ماتریس های  $L_{rs}^{abc}$  و  $L_{sr}^{abc}$  با زمان، مشکل و زمان بر می باشد. با استفاده از تبدیل کلارک این وابستگی به زمان از بین می رود [۶]. در نتیجه خواهیم داشت:

$$[V_s^{qd0}] = R_s [i_s^{qd0}] + p [I_s^{qd0}] + w \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [I_s^{qd0}] \quad (3)$$

که  $I_s^{qd0}, i_s^{qd0}$  و  $v_s^{qd0}$  به ترتیب شاردرور، جریان و ولتاژ در چهارچوب مرجع گردان ناشی از تبدیل کلارک نام دارند.  $w$  نیز معرف سرعت چرخشی مرجع گردان است. با اعمال تبدیلی مشابه به معادلات روتور و انتقال پارامترهای روتور به سمت استاتور مدارهای معادل زیر بدست می آیند.



مهمترین شاخصهای مورد استفاده در منحنی های گشتاور، سرعت چرخشی روتور و جریان تکفاز (برای نمونه فاز A) برای لحاظ کردن اثر تغییر پارامتر مطابق زیر تعریف می شوند. این شاخصها در شکل (۴) نشان داده شده اند.

ابتدا باید نوسانات خروجی را به دو نوع تقسیم کنیم. نوسانات گذرا و یا نوسانات اولیه که پس از راه اندازی موتور ایجاد می شود. نوسانات حالت دائم که حول مقدار نهایی و در زمانی که سیستم به حالت ماندگار خود نزدیک می شود، ایجاد می گردد.

باید توجه کرد که در موتورهای توان پایین (۳ و ۵۰ اسب بخار) نوسانات نوع اول به علت اینکه این موتورها می توانند به آسانی شتاب بگیرند و به مقدار نامی خود برسند، قابل مشاهده نیست. شاخصهای بررسی شده به ترتیب عبارتند از:

**اوج نوسانات اولیه:** حداکثر دامنه نوسانات اولیه که به منحنی های گشتاور و سرعت مربوط است.

**زمان نوسانات اولیه:** مدت نوسانات اولیه را بیان می کند و در منحنی های گشتاور و سرعت دیده می شود.

**اوج نوسانات منفی:** حداکثر دامنه منفی منحنی گشتاور پس از عبور نوسانات گذرا

**اوج نوسانات حالت دائم:** حداکثر دامنه نوسانات حالت دائم که به منحنی های گشتاور و سرعت مربوط است.

**زمان نوسانات حالت دائم:** نشان دهنده مدت زمان بین اوج دامنه نوسانات حالت دائم و لحظه ای که ماشین می تواند به مقدار نهایی و پایدار خود دست یابد. این شاخص در منحنی های گشتاور و سرعت تعریف می شود.

**زمان رسیدن به حالت دائم:** مدت زمان سپری شده برای رسیدن ماشین به حالت دائم را نشان می دهد منظور از حالت دائم نقطه ای است که مقدار گشتاور به ۱/۰٪ اوج نوسانات اولیه در منحنی های گشتاور و سرعت می رسد. این شاخص در هر سه منحنی گشتاور و سرعت و جریان تعریف می شود.

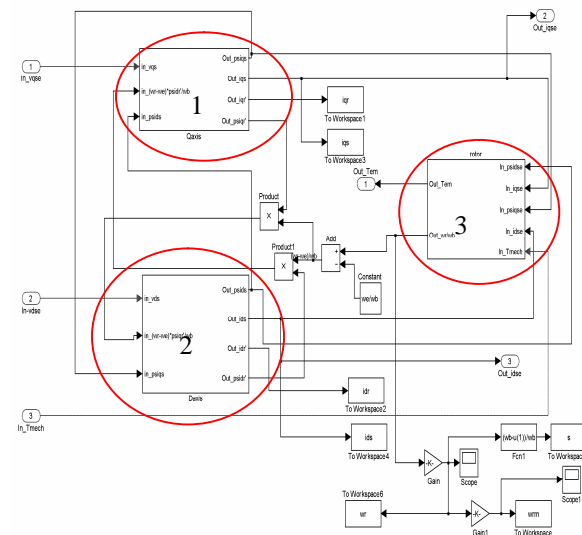
**اوج دامنه جریان:** حداکثر دامنه منحنی جریان که معمولاً در آغاز نوسانات جریان مشاهده می شود.

$W_r$  سرعت چرخشی مربوط به روتور و  $x_m$  راکتانس متقابل محورهای d و q می باشند. با استفاده از معادلات فوق و در محیط Simulink موتور القایی را شبیه سازی می کنیم که شامل بلوک های مختلف مانند بلوک استاتور، روتور، گشتاور و تبدیل از محور های qd0 به abc و بالعکس می باشند که توسط روابط فوق و همچنین رابطه گشتاور به یکدیگر مرتبط می شوند.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2W_b} (y_{ds} i_{qs} - y_{qs} i_{ds}) \quad \Omega_r = \frac{2}{p} w_r \quad (9)$$

$$T_{em} - T_{mech} - T_f = J \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (10)$$

که در روابط فوق  $\Omega_r$  سرعت مکانیکی،  $T_f$  گشتاور ناشی از اصطکاک و سایر گشتاورهای مزاحم و  $J$  ممان اینرسی می باشند.



شکل (۳) بلوک دیاگرام نمونه شبیه سازی

به عنوان نمونه در شکل (۳) قسمت های ۱ و ۲ معادلات محور های d و q را شبیه سازی کرده و قسمت ۳ گشتاور الکترومغناطیسی را تولید می کند.

#### ۴- تعریف شاخصهای مورد نظر

چندین روش برای بررسی اثر تغییر پارامتر در عملکرد موتورهای القایی وجود دارد. افزایش و کاهش به میزان ۳۰٪ و ۱۰۰٪ مقدار نامی برای لحاظ کردن اثر تغییر پارامترها کافی بوده و روند تغییرات را به خوبی نشان می دهد.

(۱) آورده شده است. باید توجه شود که هنگامی که  $x_{ls}$  و  $x_{lr}$  بیشتر از مقدار مشخصی کاهش پیدا کنند، ماشین به سمت ناپایداری پیش می رود. به عنوان مثال برای موتور ۵۰hp این مقدار کاهش ۱۱٪ و برای موتور ۲۲۵۰hp، ۶٪ می باشد. چنانچه این پارامترها بیش از مقادیر ذکر شده کاهش یابند، ناپایداری ایجاد شده و ارزیابی عملکرد سیستم ممکن نیست.

جدول (۱) مقادیر نامی موتورهای مورد بررسی

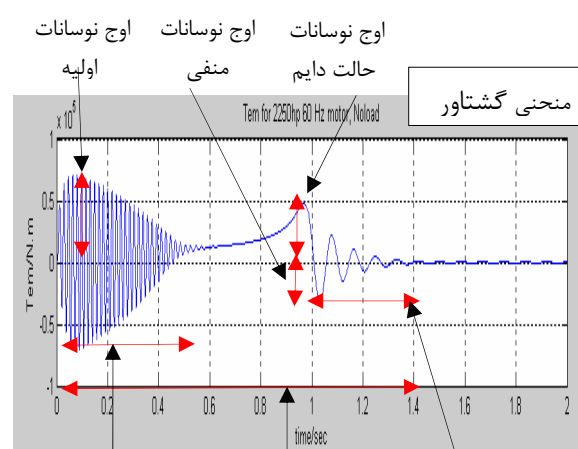
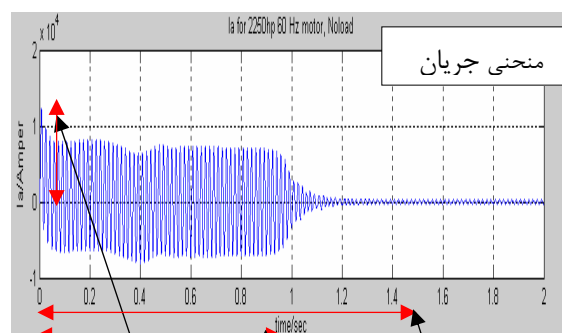
	کم توان		پرتوان	
P	3hp	50hp	500hp	2250hp
V(volt)	220	460	2300	2300
$T_{base}$ (N.m)	11.9	198	1980	8900
$x_{ls}$ ( $\Omega$ )	0.754	0.302	1.206	0.226
$x_{lr}$ ( $\Omega$ )	0.226	0.302	1.206	0.226
$x_m$ ( $\Omega$ )	26.13	13.08	52.02	13.02
$R_s$ ( $\Omega$ )	0.435	0.087	0.262	0.029
$R_r$ ( $\Omega$ )	0.816	0.228	0.187	0.022
$J$	0.089	1.662	11.06	63.87

## ۵- نتایج شبیه سازی

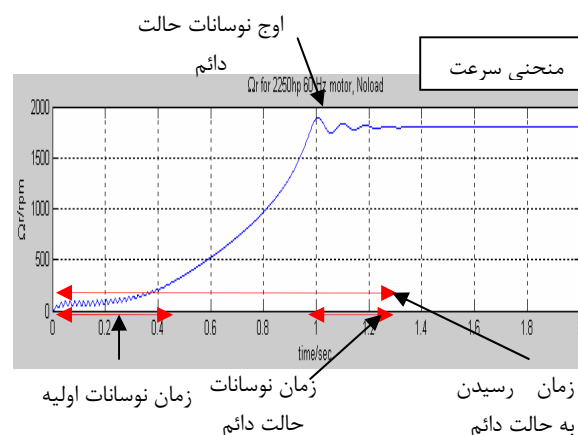
پس از شبیه سازی ۴ نمونه موتور القایی (۳hp، ۵۰hp، ۵۰۰hp، ۲۲۵۰hp)، نتایج نهایی بدست می آیند که در جداول (۲) تا (۷) آورده شده است. با مشاهده نتایج شبیه سازی نکات زیر حاصل می شود. ماشین های با توان پایین (۳hp و ۵۰hp) در بیشتر موارد رفتار مشابهی با نمونه های پر توان ندارند. با کاهش و افزایش شدید در بعضی پارامترها به خصوص مقاومت روتور و راکتانس مغناطیس کنندگی، رفتار سیستم و روند تغییرات شاخصهای اصلی مغایر با سایر حالتها بوده و از روند تغییرات قبلی خود پیروی نمی کند. مانند اثر کاهش مقاومت روتور بر روی زمان و اوج نوسانات گشتاور حالت دائم. باید اشاره شود که در بعضی حالتها، با هرگونه تغییر حول حالت پایه (مقدار نامی)، رفتار یکسانی در روند تغییرات مقدار شاخص دیده شده که به عنوان مثال می توان شاخص زمان رسیدن به جریان حالت دائم را در تغییرات راکتانس استاتور نام برد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله مدلسازی ۴ نمونه موتور القایی سه فاز بررسی



زمان نوسانات اولیه  
زمان رسیدن به حالت دائم  
زمان نوسانات به حالت دائم



شکل (۴) تعریف شاخصهای مورد بررسی

زمان نوسانات زیرگذر: مدت زمانی که طول می کشد تا نوسانات جریان دامنه های مثبت و منفی یکسانی داشته باشد و شروع به میرایی نماید.

مقادیر عددی پارامترها موتور برای ۴ موتور القایی در جدول

- [2] Krishnan, R.; Bharadwaj, A.S." A review of parameter sensitivity and adaptation in indirect vector controlled induction motor drive systems". Power Electronics, IEEE Transactions on, vol 6, oct 1991.
- [3] Guinee, R.A., Lyden, C." Motor parameter identification using response surface simulation and analysis". American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001, vol 6, June 2001.
- [4] Nangsue, P, Pillay, P, Conry, S.E." Evolutionary algorithms for induction motor parameter determination ". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 14, Sep 1999.
- [5] Saffet Ayasun, Chika O.Nwankpa." Induction Motor Tests Using MATLAB/Simulink and Their Integration Into Undergraduate Electric Machinery Courses". *IEEE Transactions on Education*, vol. 48, no. 1, Feb 2005
- [6] Krause. Paul C, Wasynczuk. Oleg, Sudhoff. Scott D. *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, 1995.
- [7] Amuliu Bogdan Proca, Ali Keyhani," Identification of Variable Frequency Induction Motor Models From Operating Data". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 1, march 2002.
- [8] W.N.Fu, S.L.Ho and H.C.Wong. " Design and Analysis of Practical Induction Motors". *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 5, Sep 2001

شده و ۸ مشخصه اصلی که در بررسی رفتار موتور به کار می روند، تعریف گردیدند و سپس اثر تغییر پارامتر نمایش داده شد. در انتها نتایج مهمی حاصل شد. مشخص گردید که رفتار بعضی شاخصها در هر دو نوع موتور توان پایین و توان بالا مشابه هستند اما سایر شاخصها رفتار متفاوتی دارند. باید اشاره شود که در بعضی حالتها نتایج غیر قابل پیش بینی رخ داده و افزایش و یا کاهش مقدار پارامترها بیش از مقدار مشخصی، به شدت بر روی رفتار ماشین اثر می گذارد. این حالت برای پارامترهای راکتانس مغناطیس کنندگی و مقاومت روتور مشهود تر است.

## مراجع

- [1] Chapman, Stephen J, *Electric machinery fundamentals*, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw Hill, 1998, p.378.

جدول (۲) - تغییرات شاخصها به ازای تغییرات مقاومت استاتور

توضیحات	پرتوان	کم توان	نوع موتور / شاخص
	کاهش	افزایش	زمان نوسانات اولیه گشتاور
		کاهش	اوج نوسانات اولیه گشتاور
		افزایش	اوج نوسانات منفی گشتاور
		کاهش	اوج نوسانات حالت دائم گشتاور
		افزایش	زمان نوسانات حالت دائم گشتاور
در موتورهای توان پایین به استثنای کاهش شدید	کاهش	افزایش	زمان دستیابی به گشتاور حالت دائم
		ثابت	مقدار حالت دائم جریان
	کاهش	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	زمان رسیدن به جریان حالت دائم
		کاهش	حداکثر دامنه جریان
		کاهش	زمان نوسانات زیر گذرا

جدول (۳) - تغییرات شاخصها به ازای تغییرات ممان اینرسی

پرتوان	کم توان	نوع موتور / شاخص
افزایش		زمان نوسانات اولیه گشتاور
افزایش		اوج نوسانات اولیه گشتاور
افزایش	کاهش	اوج نوسانات منفی گشتاور
افزایش		اوج نوسانات حالت دائم گشتاور
کاهش	افزایش	زمان نوسانات حالت دائم گشتاور
افزایش		زمان دستیابی به گشتاور حالت دائم
ثابت		مقدار حالت دائم جریان
افزایش		زمان رسیدن به جریان حالت دائم

جدول (۴) - تغییرات شاخصها به ازای تغییرات مقاومت روتور

توضیحات	کم توان	پر توان	نوع موتور / شاخص
	کاهش		زمان نوسانات اولیه گشتاور
	افزایش		اوج نوسانات اولیه گشتاور
	افزایش		اوج نوسانات منفی گشتاور
رفتار عکس با کاهش شدید در موتورهای توان پایین	افزایش	کاهش	اوج نوسانات حالت دائم گشتاور
رفتار عکس با کاهش شدید در موتورهای توان پایین	کاهش	افزایش	زمان نوسانات حالت دائم گشتاور
رفتار عکس با کاهش شدید در موتورهای توان پایین	کاهش	افزایش	زمان دستیابی به گشتاور حالت دائم
	ثابت		مقدار حالت دائم جریان
	کاهش	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	زمان رسیدن به جریان حالت دائم
	کاهش		حداکثر دامنه جریان
	کاهش		زمان نوسانات زیر گذرا

جدول (۵) - تغییرات شاخصها به ازای تغییرات راکتانس استاتور

توضیحات	کم توان	پر توان	نوع موتور / شاخص
	افزایش	کاهش	زمان نوسانات اولیه گشتاور
	کاهش		اوج نوسانات اولیه گشتاور
	افزایش		اوج نوسانات منفی گشتاور
	کاهش		اوج نوسانات حالت دائم گشتاور
رفتار عکس با افزایش شدید در موتورهای توان بالا	افزایش	کاهش	زمان نوسانات حالت دائم گشتاور
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی		زمان دستیابی به گشتاور حالت دائم
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی		مقدار حالت دائم جریان
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی		زمان رسیدن به جریان حالت دائم
	کاهش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	ابتدا افزایش و پس از مقدار خاصی کاهش می یابد	حداکثر دامنه جریان
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	کاهش	زمان نوسانات زیر گذرا

جدول (۶) - تغییرات شاخصها به ازای تغییرات راکتانس مغناطیس کنندگی

توضیحات	کم توان	پر توان	نوع موتور / شاخص
	کاهش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	افزایش	زمان نوسانات اولیه گشتاور
	افزایش		اوج نوسانات اولیه گشتاور
	کاهش		اوج نوسانات منفی گشتاور
	افزایش		اوج نوسانات حالت دائم گشتاور
رفتار عکس با افزایش شدید در موتورهای توان بالا	کاهش		زمان نوسانات حالت دائم گشتاور
رفتار عکس با افزایش شدید در موتورهای توان بالا	کاهش		زمان دستیابی به گشتاور حالت دائم
	کاهش		مقدار حالت دائم جریان
	افزایش		زمان رسیدن به جریان حالت دائم
	کاهش		حداکثر دامنه جریان
	ثابت	کاهش	زمان نوسانات زیر گذرا

جدول (۷) - تغییرات شاخصها به ازای تغییرات راکتانس روتور

توضیحات	پرتوان	کم توان	نوع موتور
			شاخص
رفتار عکس با افزایش شدید در موتورهای توان بالا	کاهش	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	زمان نوسانات اولیه گشتاور
	کاهش		اوج نوسانات اولیه گشتاور
	افزایش		اوج نوسانات منفی گشتاور
	کاهش		اوج نوسانات حالت دائم گشتاور
	افزایش		زمان نوسانات حالت دائم گشتاور
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی		زمان دستیابی به گشتاور حالت دائم
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی		مقدار حالت دائم جریان
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی		زمان رسیدن به جریان حالت دائم
	افزایش	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	حداکثر دامنه جریان
	افزایش در صورت تغییر نسبت به مقدار نامی	کاهش	زمان نوسانات زیر گذرا