

# کنترل برداری موتور هیستریزیس سنکرون سه فاز با تفکیک متغیرهای $d$ و $q$

زهرا نصیری قیداری\*، حمید لسانی\*\*، احمد دارابی\*\*\* و فرید توتونچیان\*\*\*\*

## چکیده

کاربرد موتور هیستریزیس در سیستم‌های دقیق، نظیر ناوبری اینرسی<sup>۱</sup> و ثبت‌کننده‌های ویدئویی<sup>۲</sup> مستلزم داشتن دینامیک سریع و کنترل دقیق این موتور است. سیستم کنترل برداری یک سیستم کنترلی حلقه بسته است که سبب افزایش سرعت پاسخ سیستم می‌شود و در واقع با استفاده از آن موتورهای جریان متناوب به صورت موتور جریان دائم در نظر گرفته می‌شوند. موتورهای جریان دائم در کاربردهای بسیاری که نیاز به کنترل دقیق و دینامیک سریع پاسخ است مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما با توجه به معایب بسیار موتورهای جریان دائم، نظیر هزینه زیاد تعمیر و نگهداری؛ استفاده از موتورهای جریان متناوب در سیستم‌های درایو مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، روش کنترل برداری نیز برای بهبود عملکرد موتورهای جریان متناوب مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله رفتار دینامیکی موتور هیستریزیس مرسوم بر اساس مدل دو محوری  $d-q$  بررسی شده و سپس سیستم کنترل برداری آن شبیه‌سازی شده است. در ضمن متغیرهای محورهای  $d$  و  $q$  با استفاده از روش فیدبک به خوبی از هم تفکیک شده‌اند و به صورت مستقل از هم کنترل شده‌اند. نتیجه‌های حاصل از مقاله نشان می‌دهد که استفاده از این روش کنترلی تاثیر چشمگیری در افزایش دینامیک سیستم داشته است.

کلمات کلیدی: موتور هیستریزیس، کنترل برداری، تفکیک متغیرهای  $d$  و  $q$ ، مدل دو محوری

## ۱- مقدمه

این مزایا سبب انتخاب این موتور برای رنج وسیعی از کاربردهای صنعتی و درایوهای با سرعت قابل تنظیم می‌شود.

به دلیل کاربرد صنعتی و دقیق موتور، بحث کنترل آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اما در روش‌های متفاوت کنترل اسکالر، ولتاژ و یا جریان همراه با فرکانس به عنوان متغیرهای کنترل‌کننده موتورهای جریان متناوب در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت گشتاور و شار هر دو تابعی از ولتاژ (یا جریان) و فرکانس هستند.

موتور هیستریزیس به طور گسترده‌ای در کاربردهای با موتورهای کوچک استفاده می‌شود. این موتور ساختمان ساده‌ای دارد، با یک سیم‌پیچی معمولی برای استاتور و یک حلقه هیستریزیس برای رتور. این موتور از راه‌اندازی تا سرعت سنکرون، گشتاور ثابتی تولید می‌کند و با هر باری که شتاب بگیرد، می‌تواند به سنکرونیسم برسد. جریان راه‌اندازی آن به طور معمول از  $1/8$  برابر جریان بار کامل کمتر است. در ضمن موتور هیستریزیس حین عملکرد در عمل بدون نویز است.

\* کارشناس آزمایشگاه، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف،  
(نویسنده مسئول)، پست الکترونیکی: z\_nasiri@ee.sharif.edu

\*\* استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تهران

\*\*\* استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شاهرود،

\*\*\*\* کارشناس آزمایشگاه، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت

ایران

1 . Inertial Navigation  
2 . Video Recorder

لذا این دو متغیر اثر ترویجی<sup>۱</sup> متقابل بر یکدیگر خواهند داشت و باعث کندی پاسخ موتور نسبت به تغییر سیگنال مرجع ورودی می‌شوند [۱].

امروزه در صنایع متفاوت به خاطر وجود این مشکلات در روش کنترل سنتی، از روش‌های کنترل برداری به علت عملکرد مطلوب آنها، در سطح گسترده‌ای استفاده می‌شود. کنترل برداری امکان کنترل موتور جریان متناوب را به طور مشابه با یک موتور جریان دائم با تحریک مستقل فراهم می‌سازد.

برای تحلیل و تحقیق سیستم کنترل برداری این موتور، ابتدا لازم است مدل دینامیکی آن استخراج شود. در سال‌های اخیر، کارهای زیادی روی عملکرد حالت دائمی موتورهای هیستریزیس با جهت شار رتور شعاعی یا محیطی انجام شده است [۲-۴]. چنین تحلیلی بر اساس روش‌هایی که از حلقه  $B-H$  تقریبی مواد هیستریزیس استفاده می‌کنند، انجام می‌شود [۲-۳]. تحلیل‌های عملکرد دینامیکی چنین موتورهایی اهمیت زیادی دارد. با وجود این، تاکنون اطلاعات کمی در مقاله‌های راجع به مشخصات دینامیکی موتور هیستریزیس، وجود دارد. در ضمن در مورد کنترل برداری این موتور نیز کمتر بحث شده است.

قاله‌های [۵ و ۶] به کنترل برداری موتور هیستریزیس آهنربای دائم (روی رتور این نوع موتور افزون بر حلقه هیستریزیس ماده‌ای از جنس آهنربای دائم پر انرژی نظیر  $Nd-Fe-B$  قرار گرفته است) پرداخته‌اند ولی به تقریب کنترل برداری موتور هیستریزیس مرسوم در هیچ مقاله‌ای بررسی نشده است.

هدف این مقاله ارائه مدل ریاضی تقریبی با در نظر گرفتن اثر تلفات فوکو برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی موتور هیستریزیس تحت شرایط عملکرد متفاوت و بررسی سیستم کنترل برداری این موتور با تفکیک متغیرهای محورهای  $d$  و  $q$  است. در این مقاله جریان مولفه گشتاور ( $i_q$ ) و جریان مولفه شار ( $i_d$ ) به صورت مستقل از هم کنترل شده‌اند. نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی بیانگر

سرعت و دقت پاسخ موتور با استفاده از کنترل برداری است.

## ۲- مدل موتور

مدل موتور هیستریزیس با استفاده از فرض‌های زیر استخراج شده است:

۱. سیم‌بندی استاتور توزیع شده و سینوسی است [۷].
۲. شار مغناطیسی در فاصله هوایی شعاعی و در ماده هیستریزیس رتور محیطی است [۸].
۳. اثرهای پسماند و جریان فوکو مواد پسماند رتور در هر دو حالت عملکرد سنکرون و راه‌اندازی مورد توجه قرار گرفته است [۸].
۴. حلقه  $B-H$  با یک متوازی‌الاضلاع مدل شده است [۹].
۵. تحلیل‌های دینامیکی براساس پارامترهای ثابت حلقه هیستریزیس رتور انجام شده است.

شکل ۱، مدل مداری موتور هیستریزیس سه فاز را نشان می‌دهد. هر سیم‌بندی استاتور، شار نشتی و شار اصلی‌ای دارد که با رتور پیوند می‌خورد. پدیده پسماند در حلقه رتور با یک سیم‌بندی چند فاز متعادل<sup>۲</sup> [۱۰] نمایش داده شده است. تاثیر جریان فوکو رتور، با مقاومت معادل  $R_e$  که وابسته به لغزش است، مدل شده است. تاثیر پسماند رتور با مقاومت معادل  $R_h$  که مستقل از لغزش است، نمایش داده شده است [۹]. لغزش به عنوان تفاوت بین سرعت سنکرون و سرعت واقعی، به سرعت سنکرون تعریف می‌شود.

۲. با دوسیم پیچی اتصال کوتاه با تعداد دور برابر با تعداد دور سیم پیچی‌های استاتور [۲]

1. Coupling Effect

مقاومت مدل کننده تلفات فوکو  $R_e$  و مدل کننده تلفات هیستریزیس  $R_h$ ، با توجه به تقریب متوازی الاضلاع منحنی پسماند رتور از رابطه های زیر به دست می آید [۱۱]:

$$R_e = \frac{12 \ell_r \rho}{10^4 A_h} \quad (۴)$$

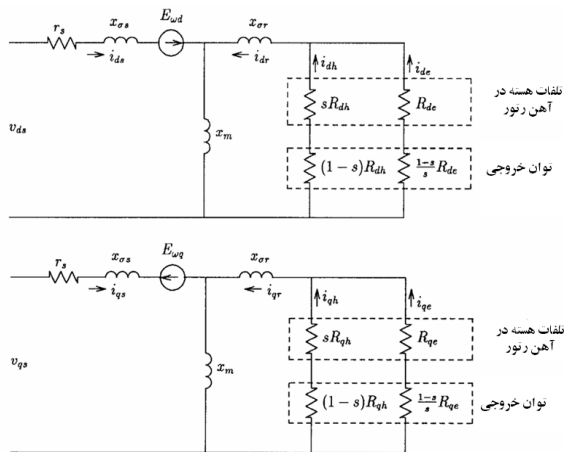
$$R_h = \frac{m E_g^2}{4 B_r H_c V_r f}$$

که در آنها:

$\ell_r$ : طول حلقه رتور،  $A_h$ : سطح مقطع حلقه پسماند،  $E_g$ : ولتاژ فاصله هوایی،  $B_r$ : چگالی شار پسماند ماده پسماند،  $H_c$ : نیروی مغناطیس زدا،  $V_r$ : حجم ماده پسماند،  $\rho$ : مقاومت ویژه ماده پسماند،  $f$ : فرکانس منبع تغذیه است.

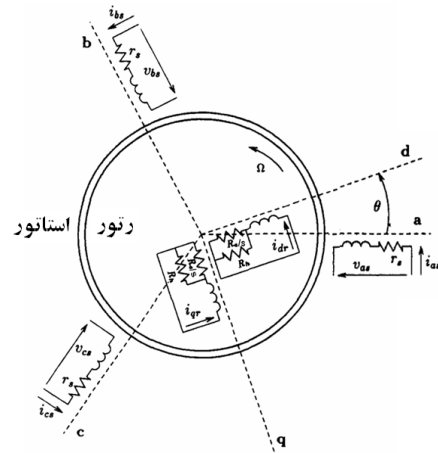
با توجه به معادله ۱ مدار معادل موتور هیستریزیس به صورت شکل ۲ خواهد بود. عبارت های  $E_{\alpha q}$ ،  $E_{\alpha d}$  در (۵) داده شده اند.

$$\begin{aligned} E_{\alpha d} &= (1-s)(x_{\ell s} + x_m) i_{qs} + x_m i_{qr} \\ E_{\alpha q} &= (1-s)(x_{\ell s} + x_m) i_{ds} + x_m i_{dr} \end{aligned} \quad (۵)$$



شکل ۲ مدار معادل الکتریکی موتور هیستریزیس

معادله های ولتاژ موتور پسماندی در قاب مرجع گردان با سرعت رتور بر حسب شار دور بر ثانیه و راکتانس در فرکانس پایه به صورت زیر هستند:



شکل ۱ مدل مداری موتور هیستریزیس سنکرون [۱۰]

با توجه به شکل ۱، معادله های ولتاژ و گشتاور موتور هیستریزیس در قاب مرجع سنکرون به صورت زیر نوشته می شوند [۸]:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} & V_{qs} & V_{dr} & V_{qr} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ss} & \frac{p}{\omega_b} X_m & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_m \\ \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ss} & R_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_m & \frac{p}{\omega_b} X_m \\ \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 & R_r + \frac{p}{\omega_b} X_{rr} & 0 \\ 0 & \frac{p}{\omega_b} X_m & 0 & R_r + \frac{p}{\omega_b} X_{rr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} & i_{dr} & i_{qr} \end{bmatrix}^T \quad (۱)$$

$$T_e = \left( \frac{3}{2} \right) \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (۲)$$

که در آن:

$$R_r = R_e R_h / (s R_h + R_e) \quad (۳)$$

$V_{qs}$  و  $V_{dr}$ : ولتاژهای استاتور محور  $d$  و  $q$ ،  $i_{qs}$  و  $i_{dr}$ : جریان های استاتور محور  $d$  و  $q$ ،  $i_{ds}$  و  $i_{qr}$ : جریان های رتور محور  $d$  و  $q$ ،  $R_s$  و  $X_{ss}$ : مقاومت و راکتانس مدار استاتور،  $R_r$  و  $X_{rr}$ : مقاومت و راکتانس مدار رتور،  $L_m$ : اندوکتانس متقابل بین رتور و مدارهای استاتور،  $\omega_b$ : فرکانس زاویه ای مبنا،  $\omega_r$ : فرکانس زاویه ای رتور،  $P$ : تعداد قطب هاست. با توجه به اتصال کوتاه بودن سیم پیچی رتور، ولتاژهای  $d$  و  $q$  رتور، صفر هستند.

$$\begin{aligned}\psi_{qs} &= \omega_b \int \left( V_{qs} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \right) dt \\ \psi_{ds} &= \omega_b \int \left( V_{ds} + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} \right) dt \\ \psi'_{qr} &= \omega_b \int \left( V'_{qr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{mq} - \psi'_{qr}) \right) dt \\ \psi'_{dr} &= \omega_b \int \left( V'_{dr} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi'_{md} - \psi'_{dr}) \right) dt\end{aligned}\quad (8)$$

$$\psi_{mq} = x_M \left( \frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{qr}}{x'_{lr}} \right)$$

$$\psi_{md} = x_M \left( \frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi'_{dr}}{x'_{lr}} \right)$$

$$x_M^{-1} = x_m^{-1} + x_{ls}^{-1} + x'_{lr}{}^{-1}$$

برای محاسبه سرعت موتور، معادله حرکت رتور (به صورت پریونیت) با برابر قرار دادن گشتاور بار، با مجموع گشتاورهای شتاب‌دهنده به دست می‌آید:

$$2H \frac{d(\omega_r/\omega_b)}{dt} = (T_e + T_{mech} - T_f) \quad \text{per unit} \quad (9)$$

که در آن  $T_{mech}$  گشتاور مکانیکی اعمال شده از بیرون (بار) در جهت چرخش رتور و  $T_f$  گشتاور میرایی در جهت مخالف چرخش و  $H$  ثابت اینرسی بر حسب ثانیه هستند. از سوی دیگر برای محاسبه جریان‌ها، با توجه به رابطه‌های ۷ و ۸ داریم:

$$\begin{aligned}\psi_{qs} &= x_{ls} i_{qs} + \psi_{mq} \rightarrow i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - \psi_{mq}}{x_{ls}} \\ \psi_{ds} &= x_{ls} i_{ds} + \psi_{md} \rightarrow i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - \psi_{md}}{x_{ls}}\end{aligned}\quad (10)$$

$$\psi'_{qr} = x'_{ls} i'_{qr} + \psi_{mq} \rightarrow i'_{qr} = \frac{\psi'_{qr} - \psi_{mq}}{x'_{lr}}$$

$$\psi'_{dr} = x'_{ls} i'_{dr} + \psi_{md} \rightarrow i'_{ds} = \frac{\psi'_{ds} - \psi_{md}}{x'_{lr}}$$

به این ترتیب جریان‌های استاتور و رتور نیز در دستگاه  $d-q$  محاسبه می‌شوند. بلوک نمودار شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است.

موتور مورد بررسی، یک موتور سه فاز و چهار قطب است که مقدارهای نامی آن ۲۰۸ ولت، پنج اسب بخار و ۶۰ هرتز است.

$$\begin{aligned}V_{qs} &= r_s i_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \\ V_{ds} &= r_s i_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}\end{aligned}\quad (6)$$

$$V_{dr} = r'_r i'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} = 0$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} = 0$$

و معادله های شار دور و گشتاور عبارت اند از:

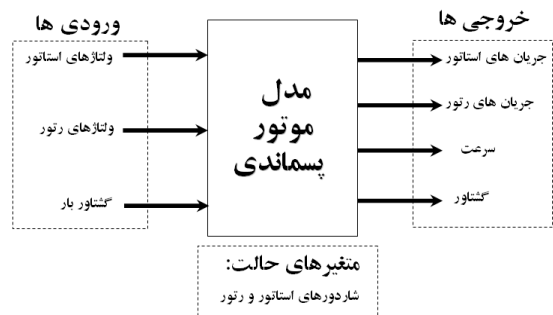
$$\begin{aligned}\psi_{ds} &= X_{ss} i_{ds} + X_{m} i'_{dr} \\ \psi_{qs} &= X_{ss} i_{qs} + X_{m} i'_{qr}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\psi'_{dr} = X_{m} i_{ds} + X'_{rr} i'_{dr}$$

$$\psi'_{qr} = X_{m} i_{qs} + X'_{rr} i'_{qr}$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

برای شبیه‌سازی، معادله های حالت با در نظر گرفتن شار دور بر ثانیه به عنوان متغیر حالت، ولتاژهای استاتور و رتور و گشتاور بار به عنوان ورودی و جریان‌های استاتور و رتور و سرعت زاویه‌ای به عنوان خروجی، به فرم انتگرالی نوشته می‌شوند. شکل ۳ ورودی‌ها، خروجی‌ها و متغیرهای حالت در شبیه‌سازی موتور پسماندی را نشان می‌دهد.



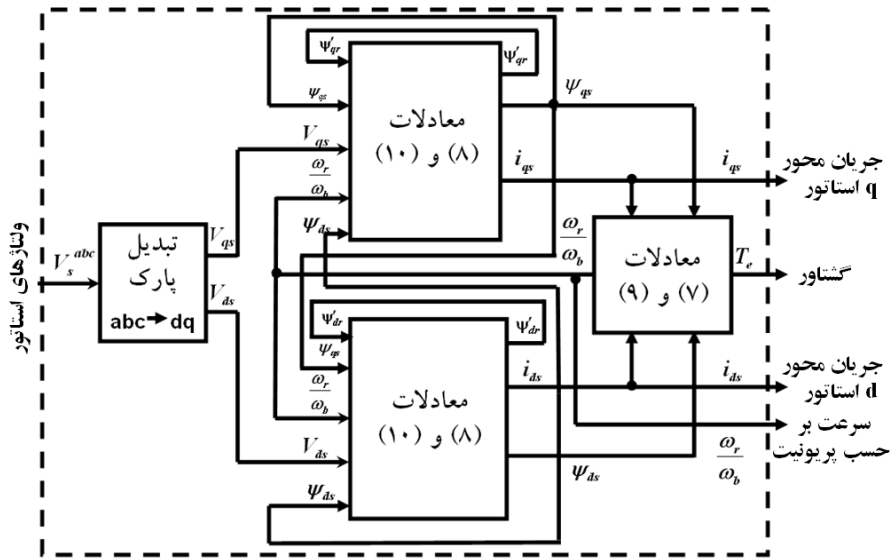
شکل ۳ نمایش ورودی‌ها، خروجی‌ها و متغیرهای حالت در شبیه‌سازی موتور هیستریزیس

معادله های حالت به شرح زیر هستند:

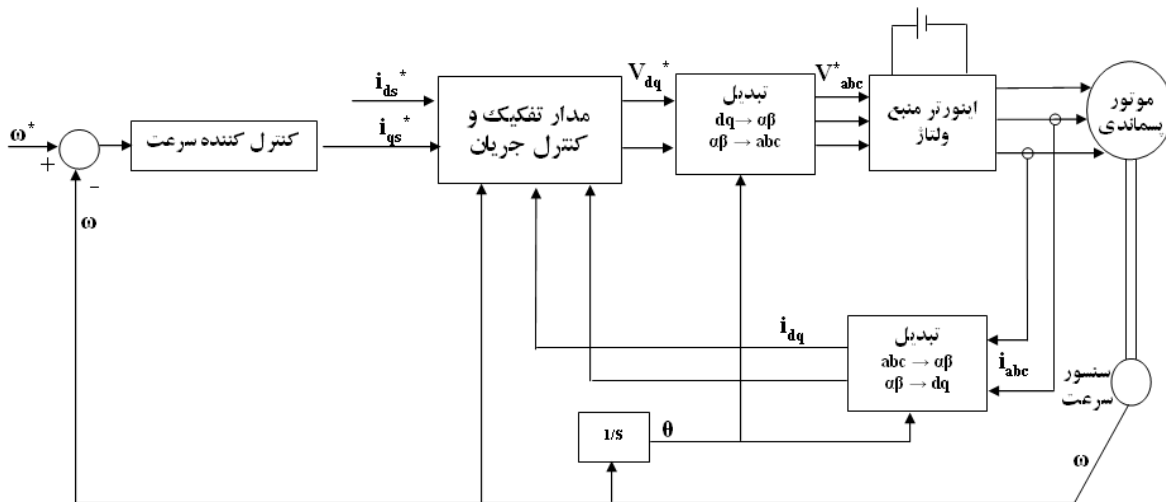
### ۳- سیستم کنترل برداری

شکل ۵، سیستم کنترل برداری یک موتور هیستریزیس را نشان می‌دهد. در این سیستم، موتور در دستگاه مرجع  $d-q$  کنترل شده است. ابتدا از جریان‌های استاتور نمونه برداری شده و از قاب مرجع  $abc$  استاتور به قاب

رتور این موتور از آلیاژ استیل کبالت ۱۷٪ ساخته شده و تحت عنوان موتور  $RT-2$  در [۱۲] معرفی شده است. ابعاد طراحی، پارامترها و مواد مورد استفاده در ساخت موتور در [۱۲] آمده است.



شکل ۴ بلوک‌دیگرام شبیه‌سازی موتور هیستریزیس



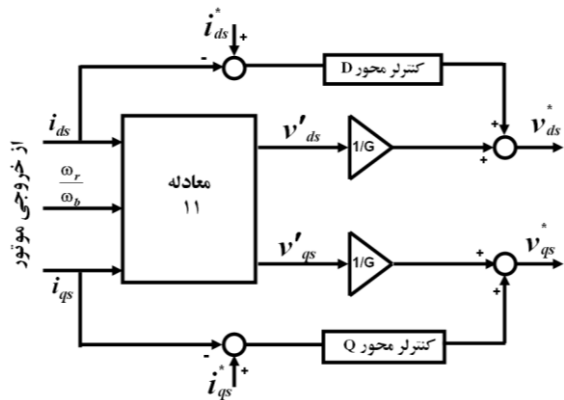
شکل ۵ سیستم کنترل برداری موتور هیستریزیس

در این مقاله برای تفکیک متغیرهای  $d$  و  $q$  از روش فیدبک استفاده شده است. در این روش عبارت های تزویج در ولتاژ محورهای  $d$  و  $q$  محاسبه می شوند و با فرمان ولتاژ این محورها جمع جبری می شوند. به این ترتیب آنچه سبب ایجاد تزویج بین محورهای  $d$  و  $q$  است، با فیدبک در خارج مدار ماشین خنثی می شود و کار کنترل ماشین ساده تر می شود. این عبارت، برای موتور هیستریزیس مرسوم به صورت زیر است.

$$V'_{ds} = -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ss} i_{qs} \quad (11)$$

$$V'_{qs} = \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ss} i_{ds}$$

که این عبارت ها با فرمان های ولتاژ محورهای  $d$  و  $q$  استاتور که از خروجی کنترل کننده های جریان این محورها می آیند، جمع جبری می شوند. البته چون سرعت و جریان ها، از خروجی اینورتر برای فیدبک، گرفته شده اند؛ گین اینورتر ( $G$ ) نیز باید در این عبارت ها به صورت معکوس وارد شود. شکل ۶، بلوک نمودار مدار تفکیک متغیرهای استاتور را نشان می دهد.



شکل ۶ مدار تفکیک متغیرهای استاتور

با توجه به توضیحات ذکر شده درباره مدار تفکیک و سایر بلوک های سیستم، نتیجه های حاصل از شبیه سازی در قسمت بعد ارایه می شوند.

مرجع  $d-q$  رتور انتقال داده شده است. این جریان ها با جریان های مرجع  $d-q$  استاتور مقایسه شده اند و خطای آنها وارد کنترل کننده های جریان محورهای  $d$  و  $q$  که از نوع  $PI$  هستند می شود. خروجی کنترلرهای جریان وارد مدار تفکیک پارامترهای محورهای  $d-q$  می شود. خروجی این بلوک که فرمان ولتاژ محورهای  $d-q$  است، به قاب مرجع استاتور ( $abc$ ) انتقال می یابد و به اینورتر منبع ولتاژ و سپس موتور اعمال می شود. در ضمن سرعت خروجی موتور با سرعت مبنا مقایسه می شود و خطای آن وارد کنترل کننده سرعت (از نوع  $PI$ ) می شود. خروجی این کنترل کننده فرمان جریان محور  $q$  را می سازد. فرمان جریان محور  $d$  به طور معمول به صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته می شود و یا از حلقه کنترل بالاسری می آید. به عنوان مثال، جریان مرجع محور  $d$  به گونه ای محاسبه می شود که نسبت گشتاور خروجی ماشین به جریان استاتور آن حداکثر شود و یا ممکن است، این جریان با هدف افزایش و حداکثر کردن راندمان موتور محاسبه شود.

#### ۴- روش تفکیک متغیرهای $d$ و $q$

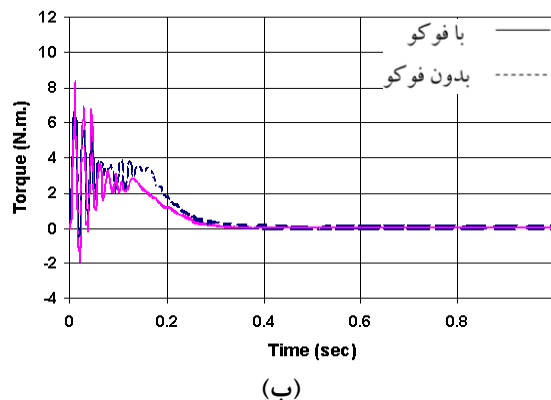
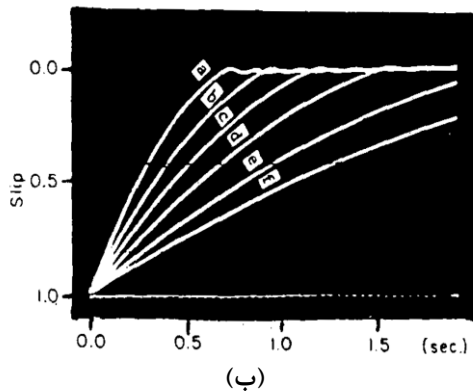
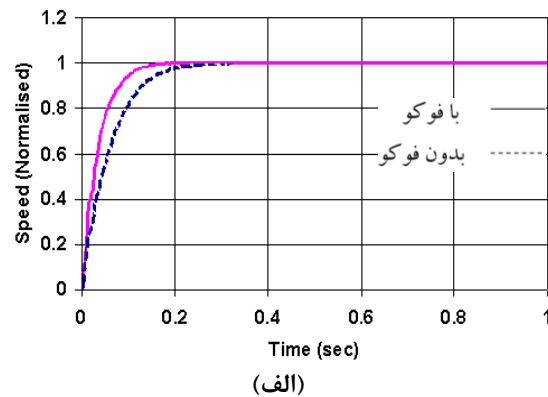
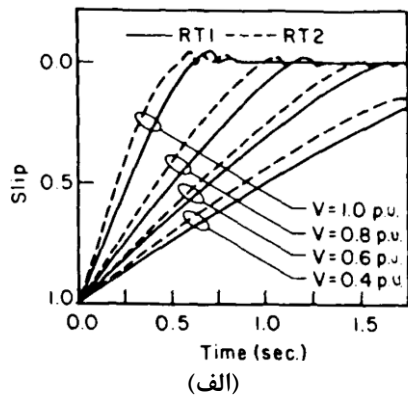
هدف از اعمال سیستم کنترل برداری روی موتور جریان متناوب این بود که این موتور به مثابه موتور جریان مستقیمی شود که دارای دو جریان مستقل است؛ یک جریان، شار و دیگری گشتاور را کنترل کند. ولی رابطه ولتاژها در موتور هیستریزیس نشان می دهد که با وجود اعمال کنترل برداری هر دو ولتاژ  $V_{ds}$  و  $V_{qs}$  به هر دو جریان  $i_{ds}$  و  $i_{qs}$  وابسته اند و کنترل، غیرخطی است. به این ترتیب کنترل خطی گشتاور، فقط با کنترل  $i_{qs}$  میسر نخواهد بود. هر چند بدون استفاده از روش تفکیک، اعمال کنترل برداری میسر است؛ ولی استفاده از این روش سبب برجسته تر شدن مزایای کنترل برداری نسبت به کنترل سنتی است.

۱. فرمان های ولتاژ محورهای  $d$  و  $q$

## ۵- نتیجه های حاصل از شبیه سازی

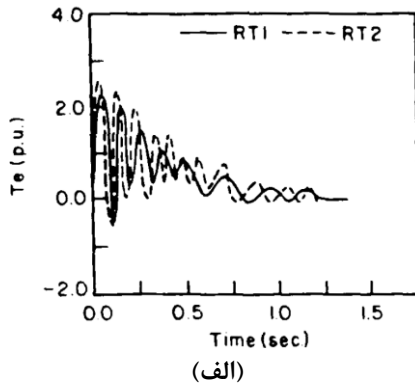
برای نشان دادن مزایای استفاده از سیستم کنترل برداری و اطمینان از درستی روند مدل سازی موتور، ابتدا پاسخ های حلقه باز موتور ارایه می شود. شکل ۷ پاسخ های سرعت و گشتاور موتور را در دو حالت (با در نظر گرفتن اثر تلفات فوکو و بدون آن) و با تغذیه سینوسی نشان می دهد. در این شبیه سازی موتور بدون بار است و خط پیوسته مربوط به حالتی است که اثر تلفات فوکو لحاظ شده و خط چین مربوط به حالتی است که از این اثر صرف نظر شده است. مقایسه نتیجه های این شبیه سازی ها نشان می دهد که در نظر گرفتن مقاومت مدل کننده تلفات فوکو سبب کاهش زمان خیز پاسخ سرعت می شود. زیرا گشتاور جریان فوکو در راه اندازی بیشترین مقدار است و به راه اندازی راحت تر کمک می کند.

شکل ۸، تغییرهای محاسبه و اندازه گیری شده لغزش بر حسب زمان را برای  $RT-2$  در بی باری و ولتاژهای تغذیه متفاوت ( $a: V = 1 pu, b: V = 0.85 pu, c: V = 0.75 pu, d: V = 0.65 pu, e: V = 0.55 pu, f: V = 0.50 pu$ ) نشان می دهد. شکل ۸-الف نتیجه های شبیه سازی [۱۲]، ۸-ب نتیجه های آزمایش عملی روی این موتور از [۱۲] و شکل ۸-ج نتیجه شبیه سازی این مقاله است. نتیجه شبیه سازی [۱۲] به ازای ولتاژ تغذیه یک پروینیت پس از حدود  $0/85$  ثانیه به حالت پایدار می رسد، نتیجه آزمایش عملی این مرجع پس از حدود  $0/72$  ثانیه و نتیجه شبیه سازی این مقاله  $0/6983$  ثانیه به حالت ماندگار می رسد. علت تفاوت نتیجه های شبیه سازی و آزمایش عملی در نظر نگرفتن اثر اشباع در دو شبیه سازی و اثر فوکو در شبیه سازی است [۱۲].

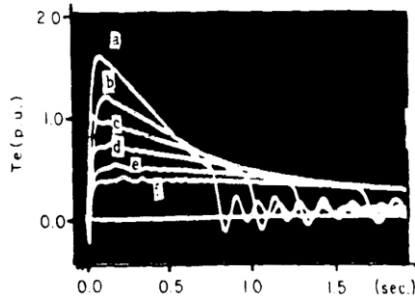


شکل ۷ شکل موج های (الف) سرعت (ب) گشتاور

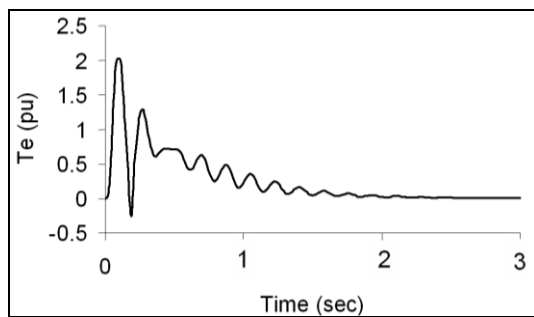
الکترومغناطیسی



(الف)



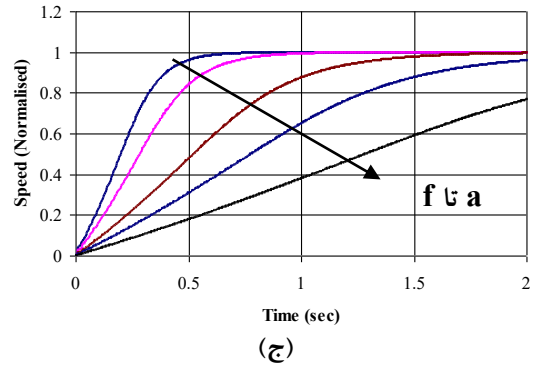
(ب)



(ج)

شکل ۹ نمودار گشتاور بر حسب زمان با تغییر ولتاژ تغذیه مختلف (الف) شبیه‌سازی [۱۲] به ازای  $V=1 pu$ ، (ب) آزمایش عملی از [۱۲]، (ج) نتیجه‌ی مقاله به ازای  $V=1 pu$

شکل ۹ نشان می‌دهد که گشتاور راه‌اندازی در شبیه‌سازی [۱۲] حدود  $2/4$  پریونیت، در آزمایش عملی حدود  $1/7$  و در شبیه‌سازی این پروژه حدود دو پریونیت است. تفاوت نتیجه‌های شبیه‌سازی و آزمایش عملی مربوط به نادیده گرفتن اثر اشباع در دو شبیه‌سازی و اثر جریان فوکو در شبیه‌سازی است [۱۲].



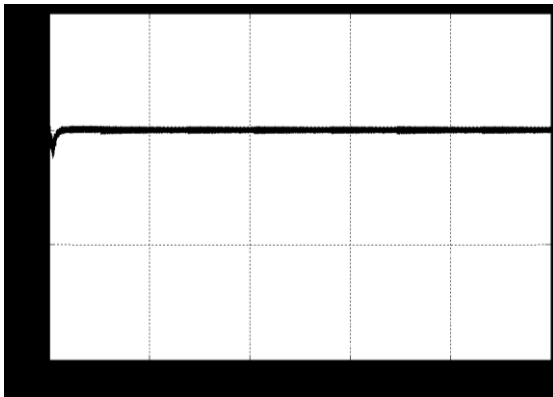
(د)

شکل ۸ لغزش بر حسب زمان برای ولتاژهای تغذیه مختلف، (الف) نتیجه‌ی شبیه‌سازی از [۱۲]، (ب) آزمایش عملی روی موتور  $RT-2$  از [۱۲]، (ج) نتیجه‌ی مقاله

در ضمن این نمودارها نشان می‌دهند که موتور می‌تواند در ولتاژهای کم (کمتر از  $0.5 pu$ ) هم سنکرون شود. به عنوان مثال به ازای ولتاژ تغذیه  $0.4$  پریونیت به تقریب در زمان  $3/75$  ثانیه به سرعت سنکرون می‌رسد.

شکل ۹ تغییرهای گشتاور بر حسب زمان را طی زمان شتاب‌گیری برای موتور  $RT-2$  در بی‌باری و با تغییر ولتاژ تغذیه (a:  $V=1 pu$ , b:  $V=0.85 pu$ , c:  $V=0.75 pu$ , d:  $V=0.65 pu$ , e:  $V=0.55 pu$ , f:  $V=0.50 pu$ ) نشان می‌دهد. شکل ۹-الف منحنی گشتاور-زمان محاسبه شده در [۱۲] را به ازای ولتاژ یک پریونیت نشان می‌دهد و ۹-ب منحنی ناشی از آزمایش عملی، ۹-ج منحنی شبیه‌سازی حاضر را به ازای ولتاژ یک پریونیت نشان می‌دهد. این شکل‌ها نشان می‌دهند که موتور هیستریزیس گشتاور راه‌اندازی بالایی که ناشی از اثرهای پسماند و فوکو است، تولید می‌کند و در سرعت‌های کمتر، گشتاور بیشتر است. وقتی رتور به سرعت سنکرون می‌رسد، سرعت شار رتور با سرعت شار استاتور یکی می‌شود و گشتاور ناشی از جریان فوکو ناپدید می‌شود.





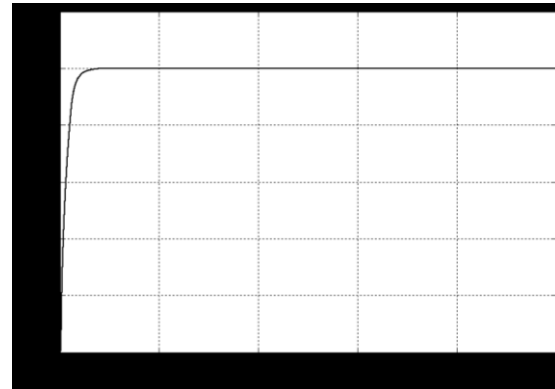
(د)

شکل ۱۰ نتیجه های شبیه سازی سرعت، گشتاور و جریان های محور  $d$  و  $q$  استاتور را به ازای گشتاور بار صفر و فرمان سرعت یک پریونیت

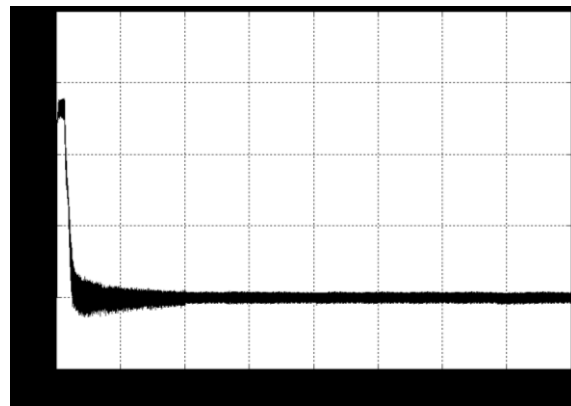
همان طور که از شکل ۱۰ مشخص است، موتور در زمان حدود  $0/25$  ثانیه به حالت ماندگار خود می رسد. در حالی که این زمان در سیستم حلقه باز (در شرایطی که موتور با ولتاژ مربعی دو سطحی (مشابه خروجی اینورتر) تغذیه شود) حدود  $0/36$  ثانیه بود. این دینامیک سریع در گرو اعمال حداکثر گشتاور در راه اندازی به وسیله کنترل برداری است. شکل ۱۱ نتیجه های شبیه سازی سرعت، گشتاور و جریان های محور  $d$  و  $q$  استاتور را به ازای گشتاور بار صفر و تغییر پله ای فرمان سرعت از یک پریونیت به  $0/8$  پریونیت و سپس دوباره یک پریونیت نشان می دهد.

ملاحظه می شود که زمان لازم برای رسیدن سرعت موتور از یک به  $0/8$  پریونیت  $0/15$  ثانیه و زمان لازم برای شتاب گیری از  $0/8$  به یک پریونیت نیز حدود  $0/14$  ثانیه است و این موضوع نشان دهنده دینامیک سریع موتور می باشد. وجود پالس های تیز در نمودار گشتاور و جریان، در لحظات تغییر فرمان سرعت نیز بیان دیگری از سریع بودن پاسخ سیستم است.

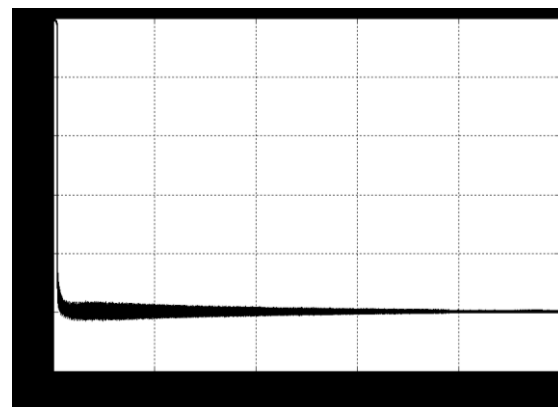
شکل ۱۰ نتیجه های شبیه سازی سرعت، گشتاور و جریان های محور  $d$  و  $q$  استاتور را به ازای گشتاور بار صفر و فرمان سرعت یک پریونیت نشان می دهد.



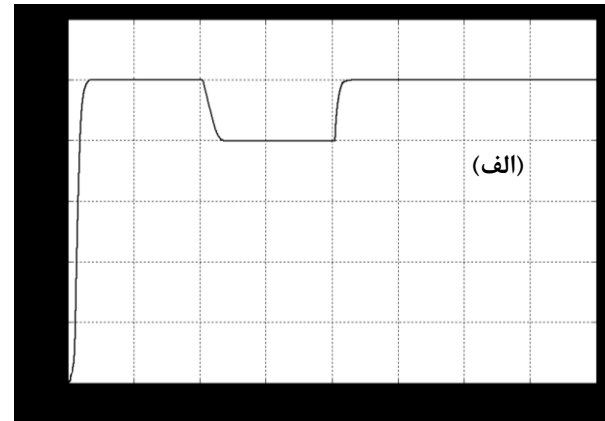
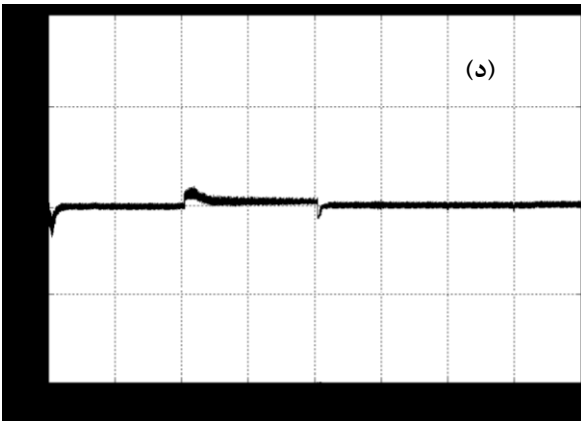
(الف)



(ب)

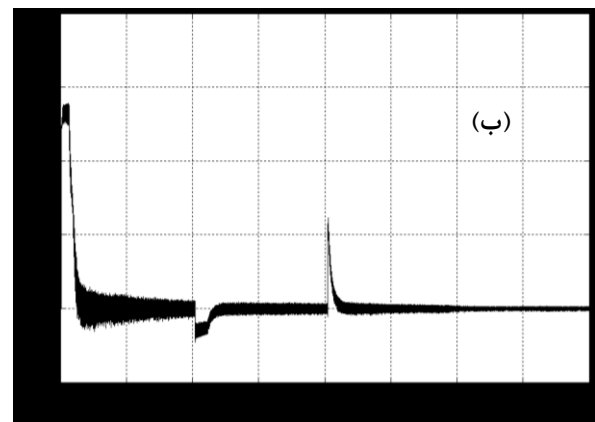


(ج)

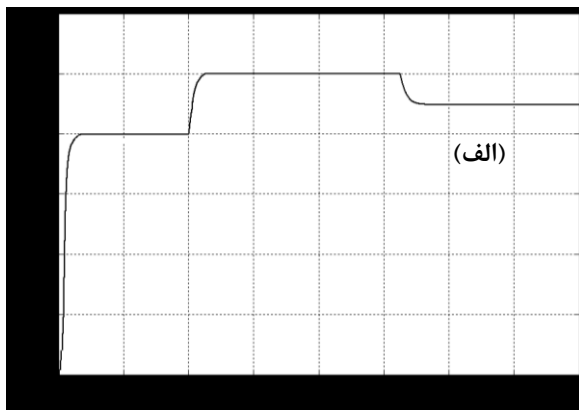
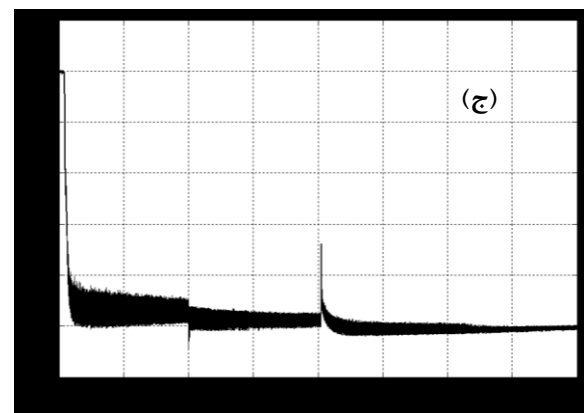


شکل ۱۱ نتیجه های شبیه سازی سرعت، گشتاور و جریان های محور  $d$  و  $q$  استاتور به ازای گشتاور بار صفر و تغییر پله ای فرمان سرعت از یک پریونیت به  $۰/۸$  پریونیت و سپس دوباره یک پریونیت

تغییر بسیار اندک جریان محور  $d$  از مقدار فرمان آن در لحظات تغییر جریان محور  $q$  بیانگر تفکیک خوب جریان های استاتور است. شایان ذکر است برای اینکه تفکیک متغیرهای دو محور به صورت کامل انجام شود، لازم است اثر زاویه کشش هیستریزیس نیز در الگوریتم تفکیک مد نظر قرار گیرد [۵].



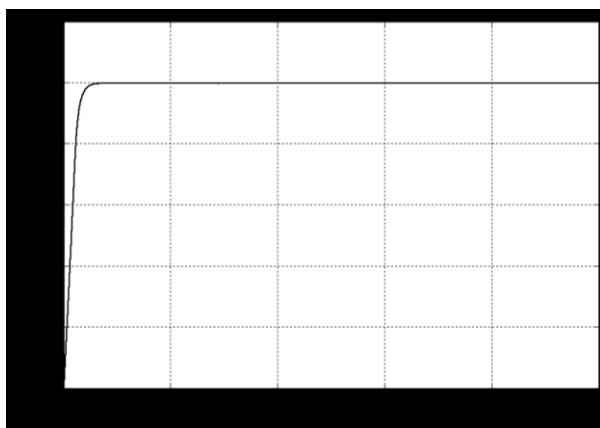
شکل ۱۲ نتیجه های شبیه سازی سرعت، گشتاور و جریان های محور  $d$  و  $q$  استاتور را به ازای گشتاور بار صفر و تغییر پله ای فرمان سرعت از  $۰/۸$  پریونیت به یک پریونیت و سپس  $۰/۹$  پریونیت نشان می دهد.



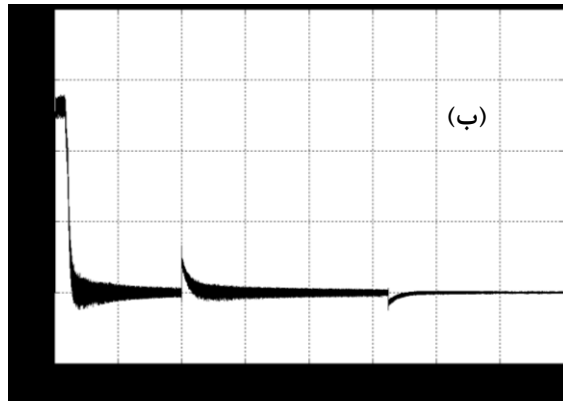
شکل ۱۲ نشان می‌دهد که موتور در مدت کمتر از  $0/15$  ثانیه به فرمان سرعت که  $0/8$  پریونیت است می‌رسد و سرعت در مدت  $0/14$  ثانیه از  $0/8$  به یک پریونیت افزایش می‌یابد. رفتار موتور در کاهش شتاب نیز سریع و نرم است و در مدت حدود  $0/15$  ثانیه از یک پریونیت به  $0/9$  آن می‌رسد.

در شکل ۱۳، نتیجه‌های شبیه‌سازی سرعت، گشتاور و جریان‌های استاتور به ازای فرمان سرعت یک پریونیت و تغییر پله‌ای گشتاور بار از صفر به یک پریونیت نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که گشتاور موتور در مدت حدود  $0/2$  ثانیه از بی‌باری به بار نامی می‌رسد. با افزایش و کاهش پله‌ای گشتاور بار، کنترل کننده سرعت، سرعت موتور را در فرمان اولیه به صورت ثابت و بدون نوسان نگه می‌دارد. کنترل کننده سرعت در هر دو مورد افزایش و کاهش گشتاور بار به خوبی عمل کرده و سرعت موتور را روی فرمان داده شده نگه می‌دارد.

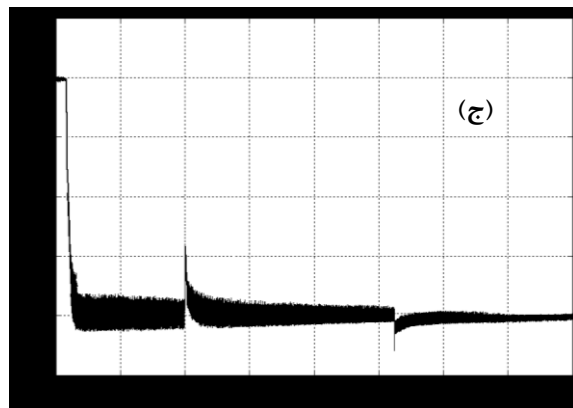
در شکل ۱۴، نتیجه‌های شبیه‌سازی سرعت، گشتاور و جریان‌های استاتور به ازای فرمان سرعت یک پریونیت و تغییر پله‌ای گشتاور بار به صورت  $0-0/5-1-0/5-0$  پریونیت نشان داده شده است.



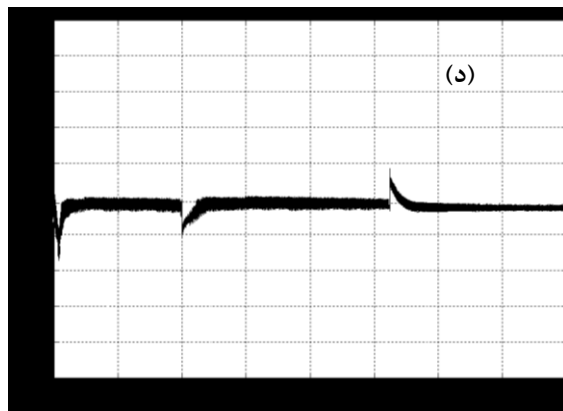
(الف)



(ب)



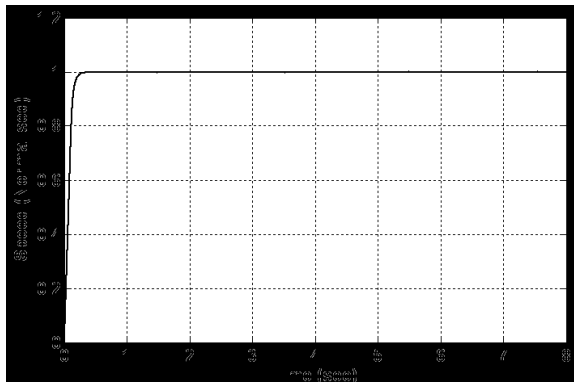
(ج)



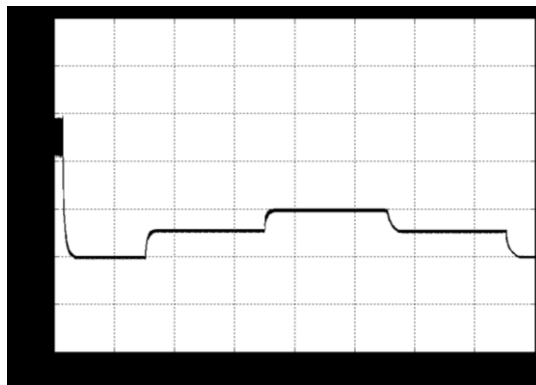
(د)

شکل ۱۲ نتیجه‌های شبیه‌سازی سرعت، گشتاور و جریان‌های محور  $d$  و  $q$  استاتور به ازای گشتاور بار صفر و تغییر پله‌ای فرمان سرعت از  $0/8$  پریونیت به یک پریونیت و سپس کاهش به  $0/9$  پریونیت

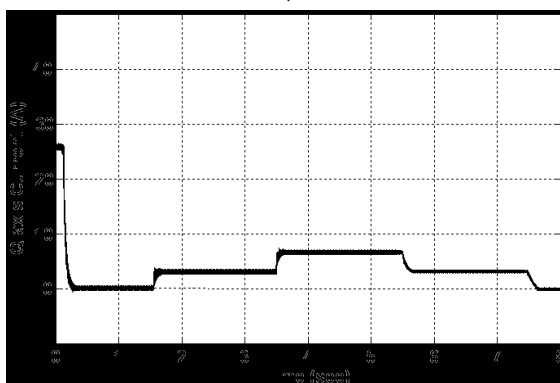
کردن نوسانات یکنواخت مکانیکی که حین تغییر پله‌ای بار در موتور هیستریزیس به وجود می‌آید نیز موثر است. بدیهی است استفاده از بلوک تفکیک کننده مقادیر محورهای  $d$  و  $q$  به افزایش دینامیک سیستم کمک می‌کند.



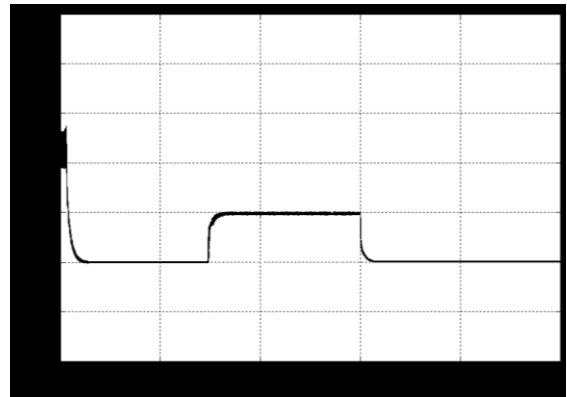
(الف)



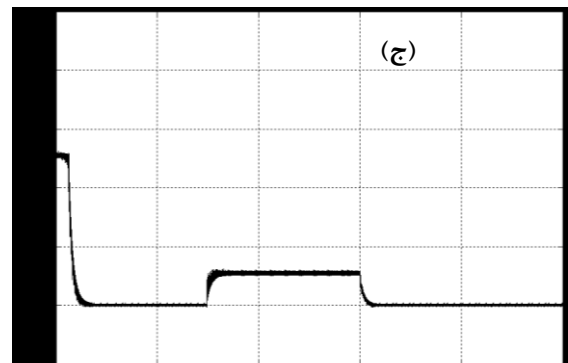
(ب)



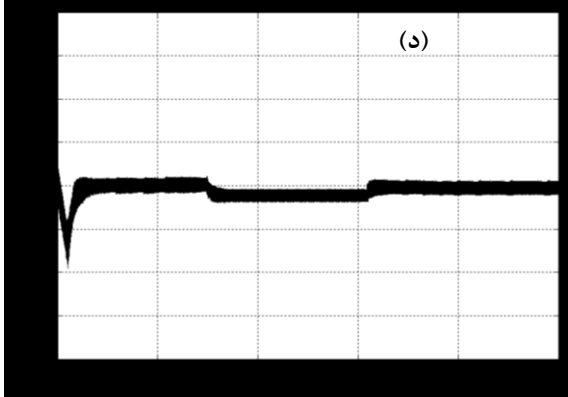
(ج)



(د)



(ه)



(و)

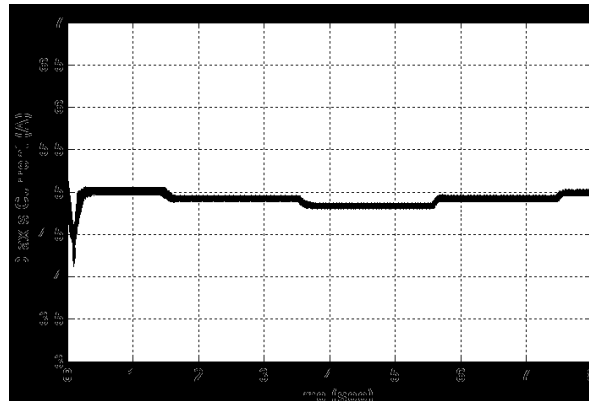
شکل ۱۳ نتیجه‌های شبیه‌سازی سرعت، گشتاور و جریان‌های استاتور را به ازای فرمان سرعت یک پریونیت و تغییر پله‌ای گشتاور بار از صفر به یک و سپس دوباره صفر پریونیت

همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است کنترل کننده سرعت در همه تغییرهای پله‌ای گشتاور به خوبی عمل می‌کند و سرعت موتور را روی فرمان داده شده نگه می‌دارد. به عبارت دیگر استفاده از کنترل برداری در میرا

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله سیستم کنترل برداری موتور هیستریزیس مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظه شد که استفاده از این سیستم کنترلی سبب افزایش دینامیک سیستم و بهبود پاسخ سیستم است. در ضمن جریان‌های گشتاورساز ( $i_{qs}$ ) و شارساز ( $i_{ds}$ ) به صورت موفقیت‌آمیزی با استفاده از روش فیدبک از هم تفکیک شدند و به صورت مستقل از هم کنترل شدند.

در ضمن یک روش تحلیل جدید موتور هیستریزیس در حالت دینامیکی با در نظر گرفتن اثر تلفات فوکو نیز ارائه شد. نتیجه های شبیه‌سازی این مدل نشان داد که در نظر گرفتن اثر فوکو سبب افزایش دینامیک پاسخ سرعت و گشتاور راه‌اندازی می‌شود. برای اطمینان از درست بودن مدل موتور نتیجه های مقاله با نتیجه های عملی و شبیه‌سازی [۱۲] مقایسه شدند که با هم تطابق و هماهنگی خوبی داشتند.



(د)

شکل ۱۴ نتیجه های شبیه‌سازی سرعت، گشتاور و جریان‌های استاتور را به ازای فرمان سرعت یک پریونیت و تغییر پله‌ای گشتاور بار به صورت  $0-0.5-1-0.5-0$  پریونیت

## ۷- مراجع

- [1] محمد ابراهیمی، " کنترل درایوهای الکتریکی"، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان، چاپ اول، پاییز ۱۳۸۱.
- [2] H.Lesani, A. Darabi, Z.Nasiri Gheidari, " Starting & Synchronizing Of Conventional Hysteresis Motors With Comparison of Permanent Magnet Hysteresis Motors", 3rd International Conference on "Technical and Physical Problems in Power Engineering" (TPE-2006), Gazi University, Ankara, TURKEY, pp. 138-142, May 29-31, 2006.
- [3] T. Kataoka, T. Ishikawa, and T. Takahashi, "Analysis of a hysteresis motor with overexcitation," IEEE Trans. Magnet., vol. MAG-18, no. 6, pp. 1731-1733, Nov. 1982.
- [4] M. A. Copeland and G. R. Slemon, "Analysis of the hysteresis Motor: II-The circumferential-flux machine," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-83, pp. 619-625, June 1964.
- [5] J. Qian, M. A. Rahman, "Analysis of Field Oriented Control for Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motors", IEEE Tran. On Industry Applications, VOL. 29, NO. 6, Nov./Dece. 1993.
- [6] Blaschke, F. "The principle of Field orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System for Rotating Field Machines" IEEE/IAS Annual Conference Record, Pittsburgh, pp. 320-326, 1988.
- [7] H.Lesani, A. Darabi, Z.Nasiri Gheidari, "Dynamic Performance Prediction of Polyphase Hysteresis Motors With Considering Eddy Current Effect", 3rd International Conference on "Technical and Physical Problems in Power Engineering" (TPE-2006), Gazi University, Ankara, TURKEY, pp. 138-142, May 29-31, 2006.
- [8] M. A. Rahman and R. Qin, "Starting and Synchronization of Permanent Magnet Hysteresis Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, NO. 5, pp. 1183-1183, September/October 1996.
- [9] M. A. Rahman, "Analytical models for polyphase hysteresis motor," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-92, no. 1, pp. 237-242, Jan./Feb. 1973.
- [10] D. O' Kelly, "Eddy-current and hysteresis effects in rotating machines," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 116, no. 3, pp. 391-395, Mar. 1969.
- [11] R. Zhong, R. Qin, and Y. Xu, "Application of inertia reaction dynamometer in the study of hysteresis gyro motors," in First Int. Symp. Inertia Technology, Beijing, pp. 315-322, 1989.
- [12] M. A. Rahman, A. Osheiba, "Dynamic Performance Prediction of Polyphase Hysteresis Motors", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 26, no 6. Nov./Dec. 1990.
- [13] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, ISBN 0-13-723785-5.