

# تحلیل دینامیکی موتور هیستریزس سنکرون آهنربای دائم با در نظر گرفتن اثر فوکو

زهرا نصیری قیداری<sup>۱</sup>، حمید لسانی<sup>۲</sup> احمد دارابی<sup>۳</sup> و فرید توتونچیان<sup>۴</sup>

## چکیده

موتور هیستریزس آهنربای دائم مزایای هردو موتورهای هیستریزس و آهنربای دائم را دارد. این موتور، برای کاربردهای خودرو برقی، پمپ‌های کمپرسور، ربات‌ها و درایوهای صنعتی دقیق، نظیر سیستم‌های ناوبری اینرسی و ثبت‌کننده‌های ویدئویی که به عملکرد نرم، بی‌سر و صدا با راندمان بالا، احتیاج دارند، بسیار مناسب است. در این مقاله به مدل‌سازی و شبیه‌سازی این موتور می‌پردازیم. ابتدا معادله‌های دینامیکی موتور را با در نظر گرفتن اثر فوکو استخراج می‌کنیم و سپس معادله‌های حالت آن را برای شبیه‌سازی در محیط SIMULINK/MATLAB آرایه می‌کنیم. در نهایت نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی را با نتیجه‌های روش عددی و المان محدود مقایسه می‌کنیم. این مقایسه، تطابق خوب این نتیجه‌های را با هم نشان می‌دهد. روش آرایه شده در این مقاله به لحاظ زمانی، سریع‌تر از روش المان محدود است و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

**کلمات کلیدی:** موتور هیستریزس آهنربای دائم، موتور هیستریزس مرسوم، مدل‌سازی، مدل دینامیکی، اثر فوکو، روش المان محدود

## ۱- مقدمه

موتورهای سنکرون آهنربای دائم مزایای متعددی مانند راندمان بالا، ضریب توان بالا و پایداری مناسب‌تری دارند. عملکرد نرم بدون جاروبک و ساختار ساده رتور موتورهای سنکرون آهنربای دائم، به ویژه در کاربردهای با سرعت بالا اهمیت ویژه‌ای دارد. با وجود این وقتی موتور سنکرون آهنربای دائم با فرکانس خط کار می‌کند، گشتاور راه‌اندازی ندارد. در طراحی مرسوم، با کمک سیم‌پیچی قفسی، گشتاور شتاب‌دهنده کافی تولید می‌شود. وقتی موتور به سرعت سنکرون می‌رسد، گشتاور قفس به صفر کاهش می‌یابد و گشتاور آهنربا تنها منبع گشتاور موتور می‌شود [۲].

رتور موتور هیستریزس آهنربای دائم، دارای فولاد ۳٪ کبالت با آهنربای دائم است. این ترکیب، مزایای موتورهای آهنربای دائم و موتورهای هیستریزس معمولی را هم‌زمان دارد. شکل ۱ شماتیک موتور هیستریزس آهنربای دائم را نشان می‌دهد [۱].

مقاله در تاریخ ۸/۱۱/۸۵ دریافت و در تاریخ ۱۹/۲/۸۶ به تصویب نهایی رسید.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف (نویسنده مسئول)، پست الکترونیکی:

z\_nasiri@ee.sharif.edu

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق و روباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت

ایران

مرسوم آن می‌شود. در ضمن، نوسانات سرعت و گشتاور در این موتور بیشتر است.

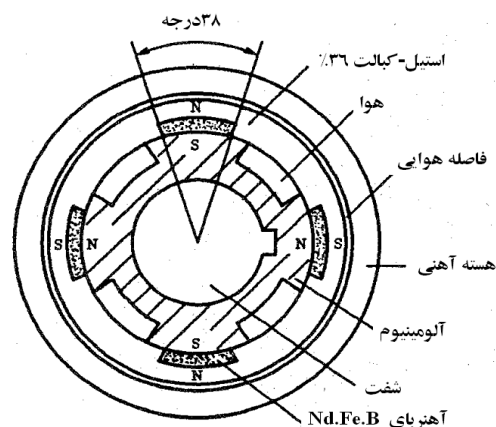
مزایای بی‌شمار این موتور، آن را به صورت یک انتخاب مناسب و خوب برای کاربردهای دقیق معرفی می‌کند. ولی برای بررسی و از بین بردن معایب ذکر شده، لازم است موتور مدل‌سازی شود. مقاله‌های زیادی به طراحی و معرفی این موتور برای کاربردهای متفاوت پرداخته‌اند [۱ و ۶-۸] ولی در این مقاله‌های، اثر تلفات فوکو در مدل ماشین دیده نشده و یا اصلاً مدلی برای موتور ارائه نشده است. مرجع [۵] با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود به شبیه‌سازی و مدل‌سازی دینامیکی این پرداخته است. ولی با توجه به استفاده از روش المان محدود، معادله‌های نظری جامع (دو محوری) موتور به صورت کامل بیان نشده است.

در این مقاله روشی بر اساس مدل دو محوری  $d-q$  برای پیش‌بینی عملکرد دینامیکی موتور هیستریزس آهنربای دائم ارائه می‌شود که افزون بر سادگی و صرفه‌جویی در زمان، از دقتی قابل مقایسه با روش المان محدود، برخوردار است.

## ۲- مدل موتور

- در تحلیل این موتور، فرض‌های زیر انجام شده است:
۱. استاتور یک سیم‌بندی توزیع شده سینوسی دارد [۹].
  ۲. شار مغناطیسی در فاصله هوایی شعاعی و در ماده پسماند رتور محیطی است.
  ۳. اثرات پسماند و جریان فوکو در حالت عملکرد سنکرون و راه‌اندازی مورد توجه قرار گرفته است.
  ۴. حلقه  $B-H$  ماده پسماند با یک متوازی‌الاضلاع مدل شده است [۱۰].
  ۵. تحلیل‌های دینامیکی براساس پارامترهای ثابت حلقه هیستریزس رتور و آهنربای دائم انجام شده است.

شکل ۲ مدل دومحوری موتور هیستریزس آهنربای دائم سه فاز را نشان می‌دهد. پدیده پسماند در رتور، با دو سیم‌پیچی متعادل [۱۰] که اتصال کوتاه شده‌اند و آهنربای دائم با یک سیم‌پیچی روی محور  $d$  مدل شده است.



شکل ۱ موتور هیستریزس آهنربای دائم [۱]

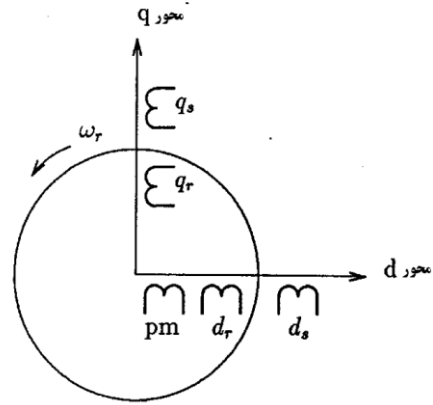
از سوی دیگر، موتور هیستریزس افزون بر ساختار ساده، دارای گشتاور خودراه‌انداز است. ولی محدودیت‌هایی مثل، جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، ضریب توان پایین و راندمان کم، دارد [۳].

ترکیب مواد هیستریزس و آهنربای دائم در رتور، مزایای برجسته‌ای نسبت به موتورهای هیستریزس یا آهنربای دائم مرسوم به وجود می‌آورد [۴]. این موتور ترکیبی که در آن آهنرباهای دائم در شیارها در سطح داخلی حلقه پسماند قرار گرفته‌اند، موتور سنکرون هیستریزس آهنربای دائم نامیده می‌شود [۴]. تا رسیدن به سرعت سنکرون، گشتاور موتور شامل گشتاور هیستریزس، گشتاور جریان فوکو و گشتاور آهنربای دائم است. در سرعت سنکرون گشتاور موتور شامل گشتاورهای آهنربای دائم و هیستریزس است. به این ترتیب، صرف‌نظر کردن از اثر فوکو در مدل‌سازی این موتور به معنی در نظر نگرفتن گشتاور راه‌اندازی ناشی از جریان فوکو است و سبب کندتر شدن پاسخ موتور (کاهش دینامیک پاسخ) می‌شود.

این موتور، برای کاربردهای خودرو برقی، پمپ‌های کمپرسور، ربات‌ها و درایوهای صنعتی دقیق، نظیر ژيروسکوپ‌ها که به عملکرد نرم، با راندمان بالا؛ احتیاج دارند، بسیار مناسب است [۴].

در کنار تمام مزایایی که افزودن آهنربا به موتور هیستریزس به دنبال دارد، یک عیب مهم وجود دارد و آن ناشی از گشتاور شکست آهنرباست که سبب کاهش گشتاور راه‌اندازی این موتور نسبت به مشابه هیستریزس

می‌دهند و  $\omega_b$  سرعت زاویه‌ای الکتریکی است. با توجه به اتصال کوتاه بودن سیم‌پیچ‌های رتور ولتاژهای  $d$  و  $q$  رتور برابر صفرند و شار دور آهنربا عدد ثابتی است [۵].



شکل ۲ مدل دو محوری موتور هیستریزس آهنربای دائم [۱۱]

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V'_{dr} \\ V'_{qr} \\ V'_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ds} & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{qs} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} \\ \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ds} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{qs} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} \\ \frac{p}{\omega_b} X_{md} & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rd} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} \\ 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & 0 & r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rq} & 0 \\ \frac{p}{\omega_b} X_{md} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \\ i'_{pm} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

تاثیر جریان فوکو رتور، با مقاومت معادل  $R_e$  که وابسته به لغزش است، مدل شده است و تاثیر پسماند رتور با مقاومت معادل  $R_h$  که مستقل از لغزش است، نمایش داده شده است. لغزش به عنوان تفاوت بین سرعت سنکرون و سرعت واقعی، به سرعت سنکرون تعریف می‌شود و  $r'_r$  مقاومت معادل حاصل از موازی شدن مقاومت پسماند  $R_h$  و مقاومت جریان فوکو  $R_e/s$  است. این مقاومت‌ها، با در نظر گرفتن تقریب متوازی الاضلاع برای حلقه پسماند رتور به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۰]:

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

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

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 مغناطیس‌زدا،  $V_r$ : حجم ماده پسماند،  $\rho$ : مقاومت ویژه ماده پسماند،  $f$ : فرکانس منبع تغذیه می‌باشد. با جاگذاری معادله های شار دور در معادله های ولتاژ، مدل مداری موتور هیستریزس آهنربای دائم به صورت شکل ۳ خواهد بود.

عبارت‌های  $E_{cod}$  و  $E_{coq}$  در (۵) داده شده‌اند.

متغیرهای استاتور به قاب مرجع رتور انتقال یافته‌اند تا اندوکتانس‌های متغیر با زمان در معادله های ولتاژ حذف شوند. معادله های پارک با تنظیم سرعت قاب مرجع، برابر سرعت رتور و با استفاده از شکل ۲ نوشته می‌شوند [۱۱]. معادله های شار پیوندی عبارت اند از:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= (L_{lds} + L_{md}) i_{ds} + L_{md} i'_{dr} + L_{md} i'_{pm} \\ \lambda_{qs} &= (L_{lqs} + L_{mq}) i_{qs} + L_{mq} i'_{qr} \\ \lambda'_{dr} &= (L'_{ldr} + L_{md}) i'_{dr} + L_{md} i_{ds} + L_{md} i'_{pm} \\ \lambda'_{qr} &= (L'_{lqr} + L_{mq}) i'_{qr} + L_{mq} i_{qs} \\ \lambda'_{pm} &= (L'_{lpm} + L_{md}) i'_{pm} + L_{md} i_{ds} + L_{md} i'_{dr} \end{aligned} \quad (۱)$$

معادله های ولتاژ بر حسب شارهای پیوندی به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۱]:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= r_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} \\ V_{qs} &= r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} \\ V'_{dr} &= r'_r i'_{dr} + p \lambda'_{dr} = 0 \\ V'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + p \lambda'_{qr} = 0 \\ V'_{pm} &= p \lambda'_{pm} \end{aligned} \quad (۲)$$

برای دستیابی به مدار معادل، شارهای پیوندی با جریان جایگزین می‌شوند و معادله های ولتاژ- جریان به صورت معادله‌ی ۳ استخراج می‌گردند که در آن:  $X_{qs} = X_{lqs} + X_{mq}$  و  $X_{ds} = X_{lds} + X_{md}$  آن خودی استاتور  $X'_{dr} = X_{ldr} + X_{md}$  و  $X'_{qr} = X_{lqr} + X_{mq}$  راکتانس‌های خودی رتور و  $X_m$  و  $X_\ell$  به ترتیب، راکتانس‌های مغناطیس‌شوندگی و نشتی هستند. اندیس‌های  $s$  و  $r$  به ترتیب استاتور و رتور و  $d$  و  $q$  محورهای  $d$  و  $q$  را نشان

برای شبیه‌سازی باید هر متغیر حالت بر حسب سایر متغیرهای حالت و خود آن متغیر نوشته شود. برای این منظور باید جریان‌ها را بر حسب شاردها محاسبه کنیم. بر اساس رابطه‌ی ۱ داریم:

$$(8) \quad \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ds} & 0 & X_{md} & 0 & X_{md} \\ 0 & X_{qs} & 0 & X_{mq} & 0 \\ X_{md} & 0 & X'_{dr} & 0 & X_{md} \\ 0 & X_{mq} & 0 & X'_{qr} & 0 \\ X_{md} & 0 & X_{md} & 0 & X'_{pm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \\ i'_{pm} \end{bmatrix}$$

بنابراین، جریان‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$(9) \quad \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i'_{dr} \\ i'_{qr} \\ i'_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ds} & 0 & X_{md} & 0 & X_{md} \\ 0 & X_{qs} & 0 & X_{mq} & 0 \\ X_{md} & 0 & X'_{dr} & 0 & X_{md} \\ 0 & X_{mq} & 0 & X'_{qr} & 0 \\ X_{md} & 0 & X_{md} & 0 & X'_{pm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{pm} \end{bmatrix}$$

[A]

که درایه‌های ماتریس [A] با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$(10) \quad \begin{aligned} A_{11} &= \frac{1 - X'_{ldr} \cdot X'_{ipm}}{M}, \quad A_{13} = A_{31} = \frac{X'_{ipm} - 1}{M}, \quad A_{15} = A_{51} = \frac{X'_{ldr} - 1}{M} \\ A_{22} &= \frac{X'_{lqr}}{X'_{lqr} \cdot X_{qs} - X_{mq}}, \quad A_{24} = A_{42} = \frac{-1}{X'_{lqr} \cdot X_{qs} - X_{mq}} \\ A_{33} &= \frac{1 - X_{lds} \cdot X'_{ipm}}{M}, \quad A_{35} = A_{53} = \frac{X_{lds} - 1}{M} \\ A_{44} &= \frac{X_{lqs}}{X_{lqs} \cdot X'_{qr} - X_{mq}}, \quad A_{45} = A_{54} = \frac{1 - X_{lds} \cdot X'_{ldr}}{M} \\ A_{12} &= A_{14} = A_{21} = A_{23} = A_{25} = A_{32} = A_{34} = A_{41} = A_{43} = A_{45} = A_{52} = A_{54} = 0 \\ M &= X_{ds} (1 - X'_{ldr} \cdot X'_{ipm}) + X_{md} (X'_{ldr} + X'_{ipm} - 2) \end{aligned}$$

با جاگذاری رابطه‌های ۹ و ۱۰ در رابطه‌ی ۷ داریم:

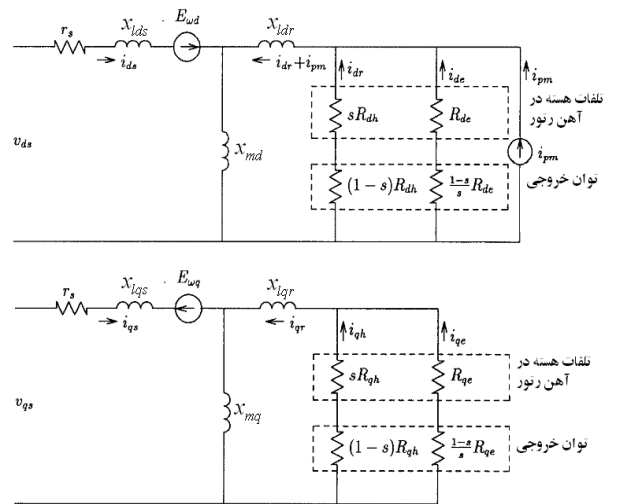
$$(11)$$

$$(5) \quad \begin{aligned} E_{od} &= (1-s) [(X_{ls} + X_m) i_{qs} + X_m i_{qr}] \\ E_{oq} &= (1-s) [(X_{ls} + X_m) i_{ds} + X_m i_{dr}] \end{aligned}$$

عبارت گشتاور الکترومغناطیسی این موتور به صورت زیر است:

$$(6) \quad T_e = \frac{3}{2} P [(L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} + L_{md} (i_{ndh} + i_m) i_{qs} - L_{mq} i_{qgh} i_{ds}]$$

ملاحظه می‌شود که عبارت گشتاور موتور هیستریزیس آهنربای دائم، شامل سه جزء گشتاور رلاکتانسی و برجستگی، گشتاور آهنربا و گشتاور پسماند است.



شکل ۳ مدار معادل الکتریکی موتور هیستریزیس آهنربای دائم

برای شبیه‌سازی موتور، ابتدا معادله‌های حالت را با در نظر گرفتن شار دورها و یا شار دور بر ثانیه‌ها به عنوان متغیرهای حالت، ولتاژ محورهای  $d, q$  استاتور و رتور و گشتاور بار به عنوان ورودی و جریان‌ها و گشتاور الکترومغناطیسی به عنوان خروجی به فرم انتگرالی بازنویسی می‌کنیم.

$$(7)$$

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= \omega_b \int \left( V_{ds} - r_s i_{ds} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} \right) dt \\ \psi_{qs} &= \omega_b \int \left( V_{qs} - r_s i_{qs} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \right) dt \\ \psi'_{dr} &= \omega_b \int (V'_{dr} - r'_r i'_{dr}) dt \\ \psi'_{qr} &= \omega_b \int (V'_{qr} - r'_r i'_{qr}) dt \\ \psi'_{pm} &= \omega_b \int (V'_{pm}) dt \end{aligned}$$

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

موتور مورد بررسی، یک موتور سه فاز و چهار قطب است که مقادیر نامی آن ۲۰۸ ولت، پنج اسب بخار و ۶۰ هرتز است. رتور این موتور از ترکیب آلیاژ استیل کبالت ۳۶٪ و آهنربای نئودیم-آهن-بور ساخته شده است. ابعاد طراحی، پارامترها و مواد مورد استفاده در ساخت موتور در [۵] آمده است.

موتور مذکور به ازای تغذیه سینوسی و در حالت بی‌باری، شبیه‌سازی شده است. مقایسه‌ی نتیجه‌های شبیه‌سازی این مقاله با نتیجه‌های شبیه‌سازی به روش المان محدود و آزمایش عملی مرجع [۵]، در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است.

شکل ۵ منحنی سرعت برحسب زمان موتور هیستریزس آهنربای دائم را نشان می‌دهد. شکل ۵-الف نتیجه شبیه‌سازی مرجع [۵]، ۵-ب تست عملی مرجع [۵] و ۵-ج نتیجه شبیه‌سازی این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مقایسه با زمان بسیار کمتری که شبیه‌سازی ارایه شده به خود اختصاص می‌دهد، نتیجه‌های آن با نتیجه‌های آزمایش عملی و شبیه‌سازی مرجع [۵] که از روش المان محدود استفاده کرده است، قابل مقایسه است.

$$\psi_{ds} = \omega_b \int \left( V_{ds} - r_s A_{11} \psi_{ds} - r_s A_{13} \psi'_{dr} + r_s A_{15} \psi'_{pm} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} \right) dt$$

$$\psi_{qs} = \omega_b \int \left( V_{qs} - r_s A_{22} \psi_{qs} - r_s A_{24} \psi'_{qr} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \right) dt$$

$$\psi'_{dr} = \omega_b \int \left( V'_{dr} - r'_r A_{13} \psi_{ds} - r'_r A_{33} \psi'_{dr} - r'_r A_{35} \psi'_{pm} \right) dt$$

$$\psi'_{qr} = \omega_b \int \left( V'_{qr} - r'_r A_{24} \psi_{qs} - r'_r A_{44} \psi'_{qr} \right) dt$$

$$\psi'_{pm} = \omega_b \int \left( V'_{pm} \right) dt$$

و رابطه‌ی گشتاور موتور به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (12)$$

برای محاسبه سرعت موتور، معادله حرکت رتور با برابر قرار دادن گشتاور بار، با مجموع گشتاورهای شتاب‌دهنده به دست می‌آید. یعنی:

$$j \frac{d\omega_{em}}{dt} = T_e - T_{mech} - T_f \quad (N.m.) \quad (13)$$

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 هستند.

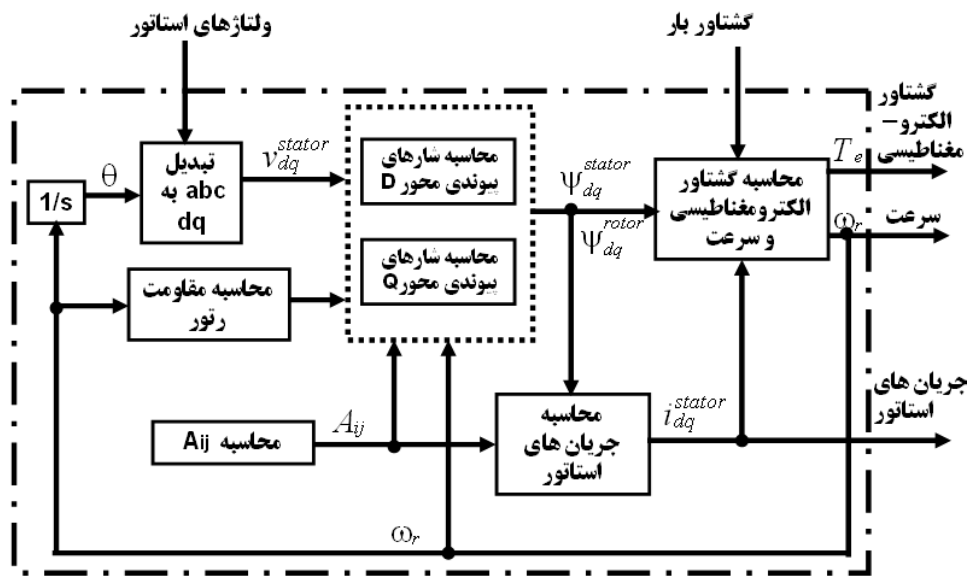
اغلب معادله حرکت رتور بر حسب ثابت اینرسی  $H$ ، نوشته می‌شود که از نسبت انرژی جنبشی جرم دوار در سرعت پایه به توان نامی به دست می‌آید [۱۲]:

$$H = \frac{J\omega_{bm}^2}{2S_b} \quad (14)$$

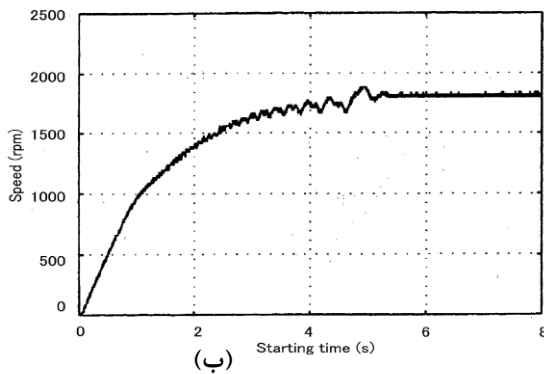
بنابراین، معادله حرکت بر حسب مقدارهای پرینیت توان و ولتاژ پایه موتور، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$2H \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = (T_{em} + T_{mech} - T_f) \quad (15)$$

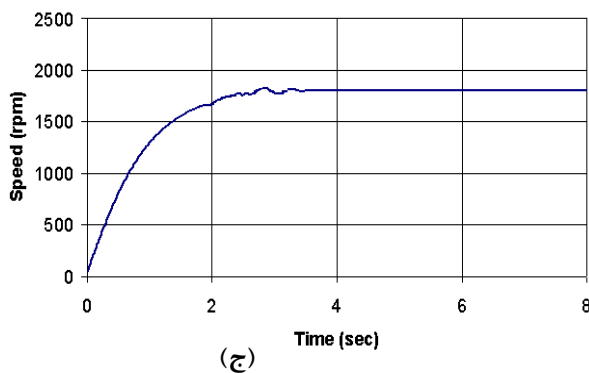
از سوی دیگر با استفاده از رابطه‌های ۹ و ۱۰ جریان‌ها نیز محاسبه می‌شوند. بلوک نمودار شبیه‌سازی موتور PMHS در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴ بلوک‌دیگرام شبیه‌سازی موتور هیستریزیس آهنربای دائم

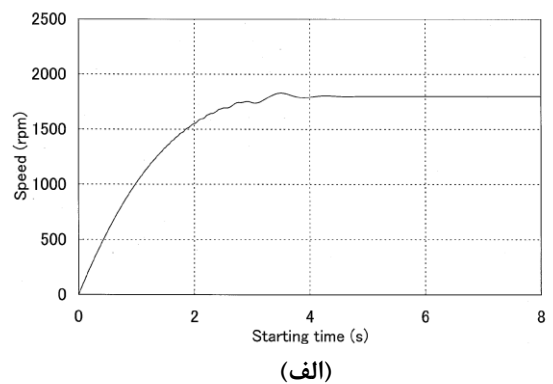


(ب)



(ج)

پاسخ سرعت محاسبه شده در هر دو روش (الف و ج) هموارتر از نتیجه‌ی آزمایش عملی (ب) است و دلیل آن ناشی از تفاوت بین مساحت‌های ذکر شده در کاتالوگ و محاسبه شده حلقه هیستریزیس است. در مرجع [۵] اشاره شده که سطح حلقه پسماند محاسبه شده ۱/۳۸ بار بزرگتر از مقدار ذکر شده در کاتالوگ است. به همین دلیل زمان راه‌اندازی اندازه‌گیری شده به تقریب پنج ثانیه و زمان محاسبه شده در [۵] حدود چهار ثانیه و در روش پیشنهادی حدود ۳/۸ ثانیه است. تفاوت اندکی که بین مقدارهای محاسبه شده به دو روش وجود دارد به دلیل تقریبی بودن روش پیشنهادی در این مقاله است.



(الف)

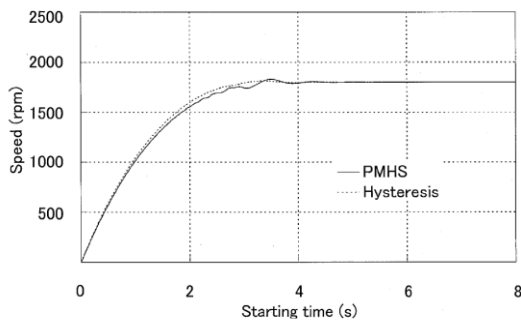
شکل ۵ منحنی سرعت بر حسب زمان در موتور هیستریزیس آهنربای دائم. (الف) نتیجه شبیه‌سازی [۵]. (ب) تست عملی [۵] و (ج) نتیجه مقاله

#### ۴- مقایسه نتیجه های شبیه سازی موتور

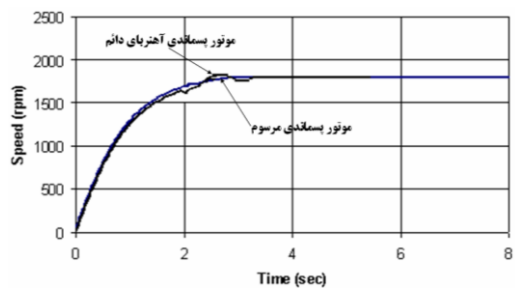
##### هیستریزیس مرسوم با هیستریزیس آهنربای دائم

در این قسمت، نتیجه های شبیه سازی موتور هیستریزیس مرسوم و هیستریزیس آهنربای دائم با تغذیه سینوسی با استفاده از پارامترهای مرجع [۵] با نتیجه های شبیه سازی این مرجع مقایسه شده اند. این مقایسه دو نکته را بیان می نماید؛ اول اینکه روش پیشنهادی این مقاله بر مبنای روش نظری جامع ماشین های الکتریکی (تحلیل دو محوری)، در عین سادگی از دقتی قابل مقایسه با روش تحلیل پیچیده و زمان بر المان محدود برخوردار است و نکته دوم اینکه، پاسخ موتور هیستریزیس مرسوم نسبت به موتور هیستریزیس آهنربای دائم نرم تر و سریع تر است.

شکل ۷ پاسخ های سرعت - زمان محاسبه شده را برای دو موتور نشان می دهد. ۷-الف نتیجه شبیه سازی المان محدود مرجع [۵] و ۷-ب نتیجه شبیه سازی به روش این مقاله را نشان می دهد.



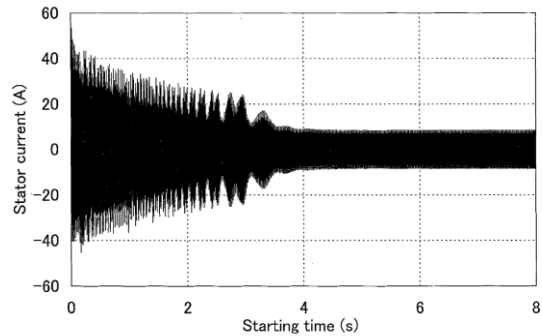
(الف)



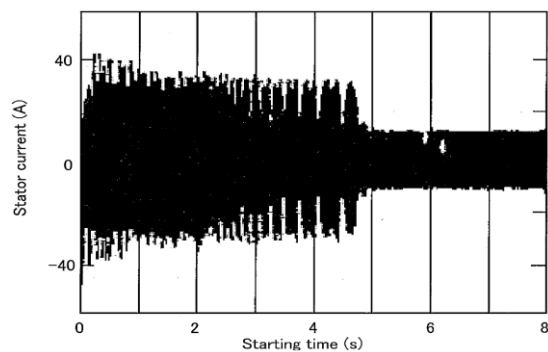
(ب)

شکل ۷ مقایسه منحنی سرعت محاسبه شده برای دو موتور هیستریزیس آهنربای دائم و هیستریزیس مرسوم بر حسب زمان، (الف) نتیجه مقاله [۵] (ب) نتیجه مقاله

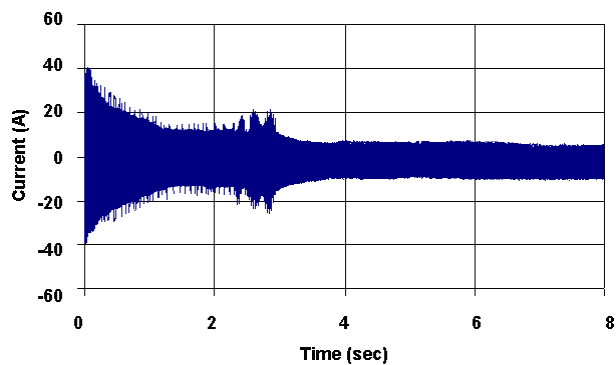
شکل ۶ منحنی جریان استاتور بر حسب زمان را برای این موتور نشان می دهد. شکل ۶-الف منحنی محاسبه شده در مرجع [۵]، ۶-ب اندازه گیری شده [۵] و ۶-ج محاسبه شده به روش تقریبی این مقاله را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است جریان محاسبه شده سریع تر از مقدار اندازه گیری شده به حالت پایدار می رسد.



(الف)

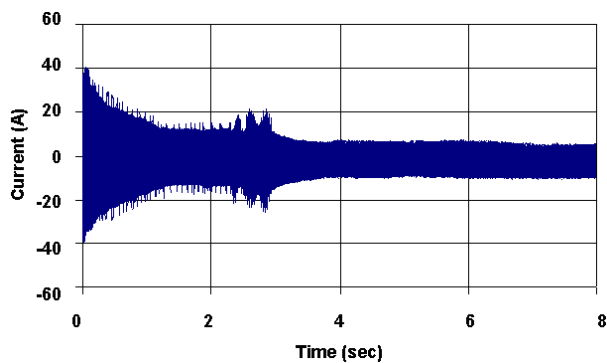


(ب)



(ج)

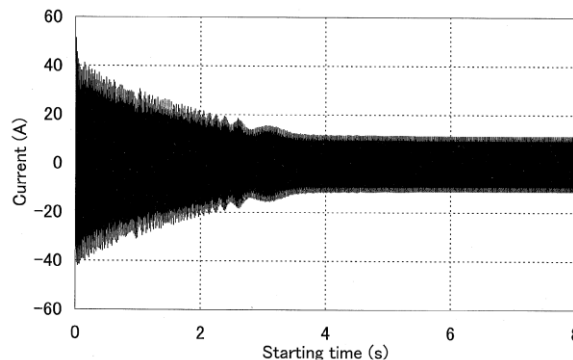
شکل ۶ منحنی جریان بر حسب زمان. (الف) پاسخ شبیه سازی [۵]، (ب) تست عملی [۵] و (ج) پاسخ تقریبی مقاله



(د)

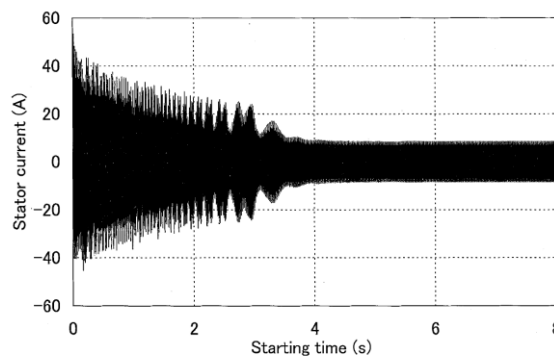
شکل ۸ مقایسه منحنی جریان محاسبه شده بر حسب زمان،  
 (الف) نتیجه مقاله [۵] برای موتور هیستریزیس آهنربای دائم  
 (ب) نتیجه مقاله [۵] برای موتور هیستریزیس مرسوم  
 (ج) نتیجه مقاله برای موتور هیستریزیس آهنربای دائم  
 (د) نتیجه مقاله برای موتور هیستریزیس مرسوم

شکل ۸ جریان محاسبه شده بر حسب زمان در طول دوره راهاندازی و سنکرون شدن را به دو روش المان محدود و SIMULINK نشان می‌دهد.

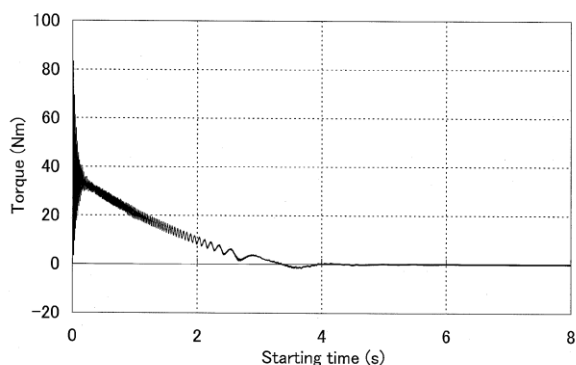


(الف)

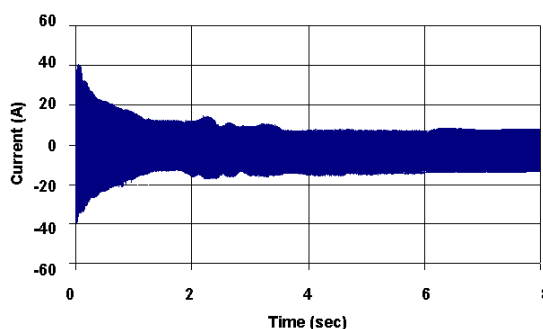
شکل ۹ گشتاور محاسبه شده را نشان می‌دهد. ۹-الف و ب منحنی‌های گشتاور مربوط به دو موتور به روش مقاله [۵] را نشان می‌دهند و ۹-ج و د نتیجه‌های شبیه‌سازی اخیر را ارائه می‌کنند. این شکل‌ها نوسانی‌تر بودن گشتاور موتور هیستریزیس آهنربای دائم و کمتر بودن گشتاور راهاندازی آن را به خوبی نشان می‌دهند.



(ب)



(الف) مربوط به موتور هیستریزیس مرسوم



(ج)



می‌شود و کاهش گشتاور ناشی از آهنربا در راه‌اندازی با گشتاور ناشی از جریان فوکو جبران می‌شود. نتیجه‌های شبیه‌سازی به روش پیشنهادی، با نتیجه‌های شبیه‌سازی [۵] که با استفاده از روش المان محدود بدست آمده بود و نتیجه‌های آزمایش عملی این مرجع، مقایسه شد. این مقایسه ضمن تایید روش شبیه‌سازی مقاله، نشان داد که این روش، ضمن سادگی به زمان کمتری احتیاج دارد.

## ۶- پی نوشت

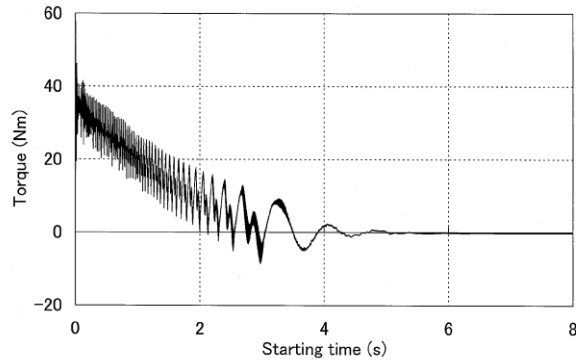
Permanent Magnet Hysteresis Motor (PMHS)

<sup>2</sup> Inertial Navigation

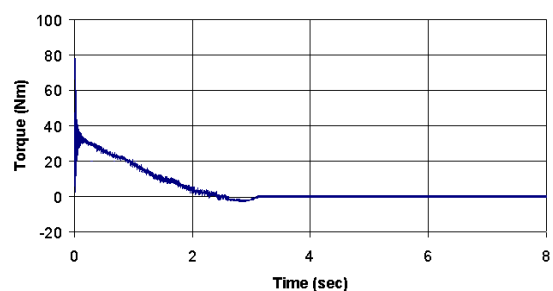
<sup>3</sup> Video Recorder

## مراجع

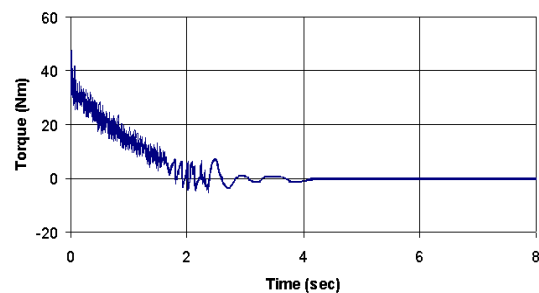
- [1] M. A. Rahman, R. Qin, "A Permanent Magnet Hysteresis Hybrid Synchronous Motor for Electric Vehicles", IEEE Tran. On Industrial Electronics, Vol. 44, NO. 1, 1997, pp. 46-53, Feb.
- [2] T. J. E Miller, "Synchronization of line-start permanent magnet AC motors", IEEE Trans Magn., vol. MAG-20, 1984, pp 507-515, May.
- [3] T. Kataoka, T. Ishikawa, and T. Takahashi, "Analysis of a hysteresis motor with over excitation", IEEE Trans. Magnet., vol. MAG-18, no. 6, 1982, pp. 1731-1733, Nov.
- [4] B. R. Teare, "Theory of hysteresis motor torque", AIEE Trans., vol. 59, 1940, pp. 907-912.
- [5] K. Kurihara, M. A. Rahman, "Transient Performance Analysis for Permanent-Magnet Hysteresis Synchronous Motor", IEEE Trans. On Indus. App., Vol. 40, NO. 1, 2004, pp. 135-142, Jan. /Feb.
- [6] R. Qin, M. A. Rahman, "DSP Based Torque and Speed Controls of the Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motor", IEEE conference, 1997.
- [7] J. Qian, M. A. Rahman, "Analysis of Field Oriented Control for Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 6, 1993, pp. 1156-1163, November/December.



(ب) مربوط به موتور هیستریزس آهنربای دائم



(ج) مربوط به موتور هیستریزس مرسوم



(د) مربوط به موتور هیستریزس آهنربای دائم

شکل ۹ مقایسه منحنی گشتاور بر حسب زمان،

(الف و ب) نتیجه‌های مقاله [۵]

(ج و د) نتیجه‌های روش پیشنهادی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل ریاضی موتور هیستریزس آهنربای دائم بر اساس مدل دو محوری  $d-q$  (مدل نظری جامع) و با در نظر گرفتن اثر فوکو استخراج شد. مقایسه‌ی نتیجه‌های شبیه‌سازی موتور هیستریزس آهنربای دائم با نتیجه‌های مربوط به موتور هیستریزس معمولی نشان داد که موتور هیستریزس معمولی دارای پاسخ نرم‌تر و سریع‌تر است و نوسانات مکانیکی در آن کم‌تر است. وجود آهنربا در موتور هیستریزس آهنربای دائم سبب افزایش گشتاور پالسی

- [8] Osheiba, A. M., Qian, J., Rahman, M. A. "Performance of Hysteresis Permanent magnet Motors", Electric Machines and Power Systems, Vol. 16 No. 4, 1989, pp. 265-280.
- [9] 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, 2006, pp. 138-142, May 29-31.
- [10] M. A. Rahman, "Analytical models for polyphase hysteresis motor", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-92, No. 1, 1973, pp. 237-242, Jan./Feb.
- [11] 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, 2006, pp. 222-226, May 29-31.
- [12] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, ISBN 0-13-723785-5.