مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۴۶-۳۷

شناسایی و کنترل گشتاور دینامومتر جریان فوکوی قطب پنجه‌ای

سام روزبهانی[۱]، حامد نظیفی[۲]، سامان ساکی[۳]، خلیل کنزی[۴]

[۱] مربی- دانشجوی دکتری ، جهاد دانشگاهی واحد خواجه نصیرالدین طوسی،گروه پژوهشی تولید برق تجدیدپذیر، samroozbehani@jdnasir.ac.ir
[۲] کارشناس ارشد، جهاد دانشگاهی واحد خواجه نصیرالدین طوسی،گروه پژوهشی تولید برق تجدیدپذیر، h.nazifi@ jdnasir.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری، جهاد دانشگاهی واحد خواجه نصیرالدین طوسی،گروه پژوهشی تولید برق تجدیدپذیر، saman_saki@ jdnasir.ac.ir
[۴] دانشیار، جهاد دانشگاهی واحد خواجه نصیرالدین طوسی،گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی، khkanzi@ jdnasir.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۲/۲۲، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۶/۷)

چکیده: در این مقاله، هدف شناسایی و کنترل گشتاور سیستم دینامومترجریان فوکوی قطب پنجه‌ای می‌باشد. دینامومترجریان فوکو ، دارای یک سیم‌پیچی تحریک DC، تعدادی قطب و سیلندر چرخان است که از طریق شفت به موتور الکتریکی کوپل می‌شود. از طریق کنترل گشتاور دینامومتر، امکان تست بارگیری از موتور در نقاط کار مختلف فراهم می‌شود. سیستم کنترل گشتاور دینامومتر، دارای دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی است. در حلقه کنترل خارجی، لزوم شناسایی رابطه گشتاور سیستم وجود دارد. در این راستا، ابتدا گشتاور سیستم بصورت تابعی چند جمله‌ای از جریان تحریک DC و سرعت دورانی آن تخمین زده می‌شود. سپس گشتاور تخمینی با گشتاور مرجع مقایسه می‌شود. در مرحله بعد کنترل‌کننده، جریان مرجع تحریک DC را با توجه به خطای گشتاور تعیین می‌کند. در حلقه کنترل داخلی نیز، کلیدزنی منبع جریان طوری صورت می‌پذیرد که خروجی آن جریان مرجع را ردیابی کند. کنترل‌کننده‌های طراحی شده در هر دو حلقه از نوع PID می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی بر روی دینامومتر فوکوی ۲۲/۵ کیلووات، کارآیی روش تخمین و کنترل را نشان می‌دهد. پیاده‌سازی سیستم کنترلی بر روی ریزپردازنده ARM سری LPC-1788 انجام شده است.

کلمات کلیدی: دینامومتر جریان فوکوی قطب پنجه‌ای، شناسایی و کنترل گشتاور، تست بارگیری موتور.

Identification and Torque Control of a Claw Pole Eddy Current Dynamometer

Sam Rozbehani, Hamed Nazifi, Saman Saki, Khalil Kanzi

Abstract: In this paper, the object is an estimation and torque control of a claw pole eddy current dynamometer system. The eddy current dynamometer is included DC excitation coil, poles and rotational cylinder that is coupled to the electrical motor through the shaft. Load testing of electrical motor in different operating point is provided by torque control using dynamometer. The close loop system of the eddy current dynamometer is consisted of two inner and outer control loops. In the outer control loop, the torque relation should be estimated. In this regard, first the torque estimation is presented as a function of DC excitation current and rotational speed and then, the estimated torque is compared with reference torque. In the next step, the reference current is determined according to the torque error. In the inner control loop, the switching of the DC current source is done such that its output tracks the reference current. Both designed controllers for two loops are PID controllers. The experimental and simulation results for 22.5 KW eddy current dynamometer reveals the efficiency of the proposed estimation and control method. The control system is implemented on the ARM-LPC-1788 micro controller.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]

Keywords: Claw pole eddy current dynamo meter, Identification and torque control, load testing of motor.

۱- مقدمه

طراحی و ساخت یک دستگاه دینامومتر جریان فوکوی قطب پنجه ای ۴۵ کیلووات جهت تست بارگیری از موتور معکوس‌گرد در [۳-۱] ارائه شده است. با توجه به شکل ۱، سیستم مورد مطالعه شامل یک موتور معکوس‌گرد، دو دستگاه دینامومتر جریان فوکو و منابع جریان مربوط به هر بخش می‌باشد. موتور معکوس‌گرد دارای دو شفت داخلی و خارجی است. بطوریکه شفتها بطور همزمان در دو جهت مخالف می‌چرخند.

گشتاور الکترومغناطیسی موتور معکوس‌گرد برای هر دو شفت برابر می‌باشد. از آنجایی که لختی دو بخش دوار متفاوت است، سرعت آنها نیز برابر نخواهد بود. تست بارگیری از این نوع موتور معکوس‌گرد، با استفاده از دو دستگاه دینامومتر فوکو ۲۲/۵ کیلووات انجام می‌شود [۳-۱].

در شکل ۲ ساختار دینامومتر فوکو شامل سیلندر، پنجه قطب‌ها و سیم‌پیچی تحریک نشان داده شده است. سیم‌پیچی تحریک توسط تعدادی پنجه قطب ثابت احاطه می‌شود. اگر سیم‌پیچی تحریک به منبع جریان **DC** وصل شود، میدان مغناطیسی دوقطبی در هسته ایجاد می‌شود. اما به دلیل وجود پنجه قطب‌ها، این میدان دوقطبی تبدیل به میدان چند قطبی می‌شود. در این حالت اگر سیلندر دینامومتر فوکو توسط شفت موتور چرخانده شود، جریان فوکو در سیلندر شکل می‌گیرد. در نتیجه تقابل بین این جریان و شار مغناطیسی هسته، گشتاور مقاوم در جهت خلاف گشتاور موتوری ایجاد می‌شود. در این حالت با توجه به تقابل این دو گشتاور، نوعی تلفات گرمایی تحت عنوان تلفات فوکو در سیلندر ایجاد می‌شود.

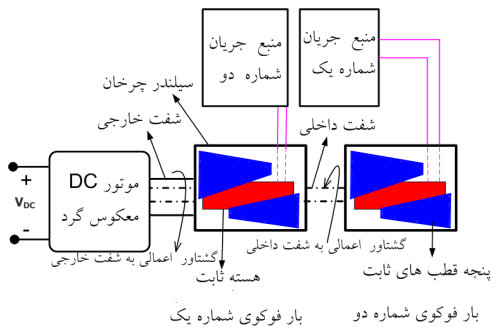
ویژگی بارز دینامومتر جریان فوکو در [۳-۱] ، از لحاظ چیدمان و ساختار قطب است که در واقع یک نوآوری در ساختار سیستم محسوب می‌شود. بطوریکه دینامومتر فوکوی ساخته شده از نوع قطب پنجه‌ای می‌باشد. مزیت‌های این ساختار در مقایسه با نوع معمولی آن شامل موارد ذیل می‌باشد:

- ضخامت سیلندر دینامومتر فوکوی قطب پنجه‌ای در مقایسه با دینامومتر فوکوی معمولی بسیار کوچکتر است که این موضوع باعث کاهش اثر پوستی در ساختار مذکور می‌شود.
- استفاده از ساختار پنجه قطب، منجر به ایجاد تعداد قطب بیشتر در مقایسه با نوع معمولی می‌شود. در نتیجه در سرعت دورانی یکسان، نوع پنجه قطب می‌تواند تلفات فوکوی بیشتری را در مقایسه با نوع معمولی ایجاد کند.

البته سیستم تست ارائه شده دارای دو عیب اساسی می‌باشد که مربوط به روش اندازه‌گیری گشتاور و همچنین روش کنترل گشتاور می‌باشد. در این مقاله، نوع‌آوری و روش پیشنهادی برای رفع معایب سیستم تست پیشنهادی در [۳-۱] ارائه شده است.

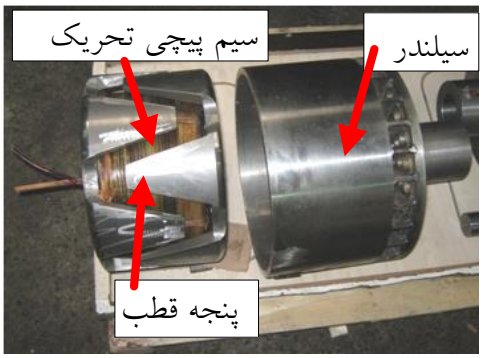
در سیستم تست [۳-۱]، اندازه‌گیری گشتاور دینامومتر فوکو با نصب گشتاورسنج دورانی روی شفت موتور انجام می‌شود. این نوع گشتاورسنج‌ها بسیار گران می‌باشند و نرخ خرابی ادوات مذکور نسبتا زیاد می‌باشد. بدین جهت یکی از راهکارهای مرسوم در این شرایط، تخمین تلفات فوکو و یا تخمین گشتاور فوکو است. مراجع زیادی به تخمین تلفات فوکو با استفاده از روشهای تحلیلی و یا عددی پرداخته‌اند.

در [۹-۴]، تحلیل تلفات فوکو با استفاده از روش‌های عددی شامل روش اجزای محدود و یا روش المان مرزی انجام شده است. مدل‌سازی با استفاده از روشهای عددی از دقت زیادی برخوردار می‌باشد، اما از عیبهای این روش‌ها به کند بودن آن می‌توان اشاره کرد. به همین دلیل استفاده از روشهای تحلیلی، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد [۱۱-۱۰]. در طراحی بهینه ماشینهای الکتریکی، از روش‌های تحلیلی به دلیل کاهش زمان محاسبات در مقایسه با سایر روش‌ها، استفاده می‌شود. یکی از معایب روشهای تحلیلی اعمال یک سری تقریب‌ها و فرض‌هایی است که ممکن است منجر به ایجاد نتایج با خطای قابل توجه نسبت به نتایج واقعی شود. دو پدیده شامل اثر واکنش آرمیچر و اثر پوستی از مواردی است که می‌تواند در عملکرد و تحلیل دینامومتر فوکو تاثیرگذار باشد. در [۱۲] به مدل‌سازی دینامومتر فوکو با استفاده از روش تحلیلی و با در نظرگرفتن اثر واکنش آرمیچر و اثر پوستی پرداخته شده است.



شکل ۱: سیستم تست موتور معکوس‌گرد شامل دو دستگاه دینامومتر فوکو و منابع جریان [۳]

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]



شکل ۲: ساختار دینامومتر جریان فوکو قطب پنجه‌ای [۳]

در [۱۳]، مدل‌سازی گشتاور ترمز فوکو به صورت تابعی از جریان تحریک و سرعت دورانی سیلندر ارائه شده است. در این مقاله نیز برای مدل‌سازی و شناسایی گشتاور دینامومتر فوکو از روش [۱۳] استفاده شده است.

مشکل بعدی در سیستم تست [۳-۱]، مربوط به کنترل حلقه باز گشتاور می‌باشد. در سیستم تست [۳-۱]، کنترل گشتاور هر یک از دینامومترها به صورت حلقه باز از طریق تغییر جریان سیستم تحریک صورت می‌پذیرد. بدین صورت که اپراتور دستگاه با تغییر جریان سیستم تحریک، میزان گشتاور دینامومتر فوکو را تغییر می‌دهد. با توجه به افزایش دمای سیلندر، گشتاور دینامومتر فوکو در شرایط عدم تغییرجریان تحریک، تغییر می‌کند. بنابراین در این حالت جریان تحریک باید دوباره توسط اپراتور تنظیم شود. برای حل این مشکل، گشتاور دینامومتر فوکو باید بصورت حلقه بسته از طریق منبع جریان کنترل شود. در [۱۴]، روش کنترل سرعت بهینه از طریق کنترل جریان منبع تغذیه سوئیچینگ برای ترمز فوکو مورد استفاده در صنایع ریلی پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۵]،کنترل سرعت ترمز فوکو کوپل شده به موتور، از طریق کنترل حلقه بسته جریان مبدل الکترونیک قدرت پیاده‌سازی شده است. در این مقاله بر خلاف مراجع [۱۴] و [۱۵]، هدف اصلی کنترل گشتاور دینامومتر جریان فوکو بجای کنترل سرعت است.

بر همین اساس در این مقاله، طراحی و ساخت کنترل گشتاور بدون سنسور برای دینامومتر جریان فوکوی ۲۲/۵ کیلووات ارائه شده است. مدار کنترل هوشمند گشتاور بدون سنسور ساخته شده، قابلیت تخمین و کنترل حلقه بسته گشتاور دینامومتر جریان فوکو و تست موتور کوپل شده به آن را تا حد گشتاور ۱۱۰ نیوتون متر دارد. این سیستم، شامل یک منبع جریان **DC** سوئیچینگ است که با استفاده از دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی پشت سرهم کنترل می‌شود.کنترلرهای طراحی شده در هر دو حلقه از نوع **PI** می‌باشد و سیستم پردازنده مورد استفاده **ARM** سری **LPC-1788** می‌باشد.

ساختار این مقاله به نحوی است که در بخش ۲، شناسایی سیستم و تعیین رابطه گشتاور تخمینی انجام شده است. سپس در بخش ۳، روش طراحی کنترل‌کننده‌های سیستم آورده شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی برای بررسی کارآیی روش شناسایی و کنترل دینامومتر جریان فوکوی ۲۲/۵ کیلووات ارائه شده است.

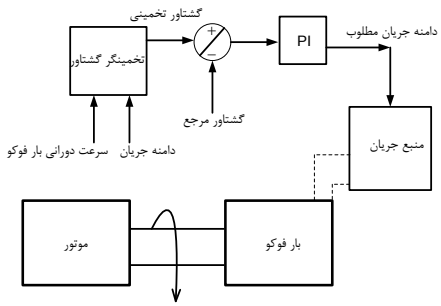
۲- ساختار کنترلی پیشنهادی دینامومتر جریان فوکو

بلوک دیاگرام طرح پیشنهادی سیستم کنترل دینامومتر جریان فوکو در شکل ۳ ارائه شده است. در این طرح، سیستم کنترل حلقه بسته دینامومتر فوکو، شامل یک منبع جریان **DC** است که با استفاده از دو حلقه کنترلی داخلی و خارجی پشت سرهم کنترل می‌شود. در حلقه کنترل خارجی، لزوم شناسایی رابطه گشتاور سیستم وجود دارد. در این راستا، ابتدا گشتاور سیستم بصورت تابعی چند جمله‌ای از جریان تحریک **DC** و سرعت دورانی آن تخمین زده می‌شود. سپس گشتاور تخمینی با گشتاور مرجع مقایسه می‌شود. در مرحله بعد کنترل‌کننده، جریان مرجع تحریک **DC** را با توجه به خطای گشتاور تعیین می‌کند. در حلقه کنترل داخلی نیز، کلیدزنی منبع جریان طوری صورت می‌پذیرد که خروجی آن جریان مرجع را ردیابی کند. کنترلرهای طراحی شده در هر دو حلقه از نوع **PID** می‌باشد. طراحی بلوک دیاگرام شکل ۳ شامل بخش‌های ذیل می‌باشد:

- شناسایی و تخمین گشتاور
- طراحی کنترلر گشتاور و تعیین جریان مرجع
- طراحی کنترلر منبع جریان

۲-۱ بخش شناسایی و تخمین گشتاور

برای شناسایی رابطه گشتاور، ابتدا به ازای جریان‌های تحریک و در سرعت‌های مختلف، مقادیر گشتاور دینامومتر فوکو در شرایط کوپل موتور **DC** به دینامومتر فوکو ثبت می‌شود. سپس تابع تقریبی تخمین گشتاور به صورت تابعی از جریان تحریک و سرعت دورانی استخراج می‌شود. نحوه تست بارگیری از موتور در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به اینکه موتور در این تست از نوع معکوس‌گرد می‌باشد، برای تست بارگیری آنها لزوم استفاده از دو دستگاه دینامومتر فوکو وجود دارد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام طرح کنترلی گشتاور بار فوکو

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]

جهت مدل‌سازی یک دینامومتر فوکو همواره یکی از دینامومترها قفل شده و جلوی چرخش آن گرفته می‌شود. در گام اول، موتور در شرایط بی‌باری تست می‌شود. بنابراین جریان تحریک هر دو دینامومتر فوکو روی مقدار صفر تنظیم شده و یکی از بارها قفل می‌باشد. با توجه به صفر بودن جریان تحریک بار فوکو، تلفات فوکو در این حالت صفر می‌باشد. تلفات مکانیکی سیستم در زمان بی‌باری موتور با تفاضل توان الکتریکی ورودی موتور و تلفات مسی موتور برابر می‌باشد. بنابراین داریم:

$$P_{No-loading\,loss} = P_{mechanichal\,loss} = V_m I_m - R_m I_m^2 = A \qquad (۱)$$

که در آن R_m، I_m و V_m به ترتیب معرف مقاومت آرمیچر، جریان و ولتاژ موتور می‌باشند. در مرحله بعد، در شرایط قفل بودن یکی از بارهای فوکو، هدف تست موتور در شرایط بارداری آن می‌باشد.

بنابراین در این شرایط، جریان تحریک دینامومتر فوکو برای یکی از بارها روی مقدار غیر صفر تنظیم می‌شود. در این حالت برای مجموع تلفات مکانیکی کل سیستم و تلفات بار فوکو داریم:

$$\begin{aligned} P_{loading\,loss} &= P_{mechanical\,loss} + P_{eddy\,current\,loss} \\ &= V_m' I_m' - R_m I_m^2 = A' + B \end{aligned} \qquad (۲)$$

حال با فرض اینکه تلفات مکانیکی سیستم در شرایط بارداری و بی‌باری موتور در سرعت‌های مشابه برابر می‌باشند، رابطه (۳) نتیجه می‌شود:

$$A' = A \qquad (۳)$$

بنابراین تلفات دینامومتر فوکو از رابطه (۴)، نتیجه می‌شود:

$$P_{eddy\,current\,loss} = (A' + B) - A = B \qquad (۴)$$

به این روش، اندازه‌گیری تلفات فوکو به روش تجربی گفته می‌شود. برای محاسبه گشتاور دینامومتر فوکو در هر سرعت و جریان تحریک مشخص، گشتاور دینامومتر فوکو از رابطه (۵)، حاصل می‌شود:

$$T_{eddy\,load} = \frac{P_{eddy\,current\,loss}}{\omega} \qquad (۵)$$

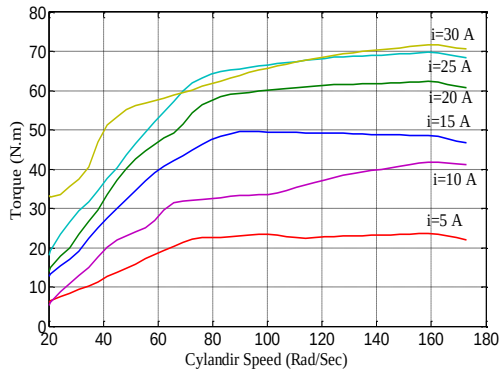
حال با توجه به رابطه (۵)، مشخصه دو بعدی گشتاور- سرعت دورانی دینامومتر فوکو به ازای جریان‌های تحریک ۵ تا ۳۰ آمپر در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین مشخصه سه بعدی گشتاور- سرعت دورانی- جریان تحریک دینامومتر فوکو با استناد به نتایج تجربی در شکل ۵ نشان داده شده است. جهت تخمین گشتاور دینامومتر فوکو با توجه به نتایج تجربی مشخصه شکل ۵، تابع تقریبی دو متغیره گشتاور بصورت رابطه (۶) قابل تخمین می‌باشد:

$$\begin{aligned} T_{estimate}(\omega, i) &= a_1 + (a_2 i + a_3 \omega) \\ &+ (a_4 i^2 + a_5 i\omega + a_6 \omega^2) \\ &+ (a_7 i^3 + a_8 i^2\omega + a_9 i\omega^2 + a_{10}\omega^3) \\ &+ (a_{11} i^4 + a_{12} i^3\omega + a_{13} i^2\omega^2 + a_{14} i\omega^3 + a_{15}\omega^4) \\ &+ (a_{16} i^5 + a_{17} i^4\omega + a_{18} i^3\omega^2 + a_{19} i^2\omega^3 + a_{20} i\omega^4 + a_{21}\omega^5) \end{aligned} \qquad (۶)$$

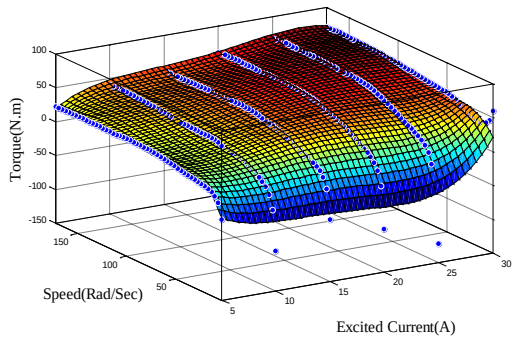
در رابطه (۶)، پارامتر i معرف جریان تحریک بر حسب آمپر و پارامتر ω بیانگر سرعت دورانی بارفوکو بر حسب رادیان بر ثانیه می‌باشد. همچنین $T_{estimate}$ معادل گشتاور تخمینی می‌باشد. در شکل ۶، مقادیر گشتاور تخمینی (رابطه (۶)) با مقادیر گشتاور ثبت شده سیستم (رابطه (۵))، به ازای جریان تحریک ۲۰ آمپر مقایسه شده است. با توجه به این شکل، خطای رابطه تخمینی با مقادیر ثبت شده تجربی، در حد قابل قبولی است.

۲-۲- طراحی کنترلر گشتاور و تعیین جریان مرجع

در این بخش هدف طراحی کنترل‌کننده در حلقه خارجی است. با توجه به شکل ۷، گشتاور تخمینی بار فوکو در هرلحظه از طریق رابطه (۶) تخمین زده شده و سپس با گشتاور مرجع مقایسه می‌شود. سپس خطای گشتاور مرجع و تخمینی به عنوان ورودی به واحد کنترل‌کننده داده می‌شود و بر اساس مقدار خطا، سیگنال کنترلی توسط کنترل‌کننده تعیین می‌شود. سیگنال کنترلی در حلقه خارجی، جریان مرجع منبع تغذیه سوئیچینگ می‌باشد.

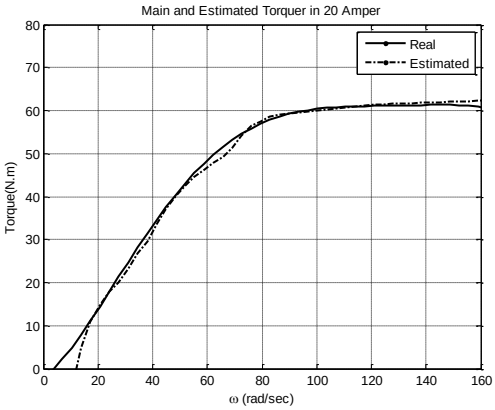


شکل ۴: مشخصه گشتاور- سرعت دورانی سیستم بار فوکو



شکل ۵: مشخصه سه بعدی گشتاور- سرعت دورانی- جریان تحریک بار فوکو

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]



شکل ۶: گشتاور تخمینی و گشتاور ثبت شده در جریان تحریک ۲۰ آمپر

برای طراحی کنترل‌کننده خارجی، بهره حلقه داخلی یک فرض می‌شود. در این شرایط ابتدا مدل فضای حالت موتور **DC** کوپل شده به دینامومتر به صورت رابطه (۷)، مفروض می‌باشد [۱۴]:

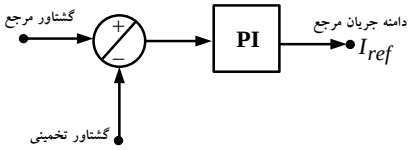
$$\begin{cases} \dot{i}_a = \dfrac{1}{L_a}\left(V_a - R_a i_a - K^{'} i_a \omega\right) \\ \dot{\omega} = \dfrac{1}{J}\left(T_e - T_l - B\omega\right) \end{cases} \qquad (۷)$$

که در این رابطه پارامترهای V_a، R_a، L_a، $K^{'}$، J و B به ترتیب ولتاژ ترمینال موتور، مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر، اندوکتانس، ثابت تناسب، ممان اینرسی شفت و ضریب اصطکاک می‌باشند. همچنین $T_e = K^{'} i_a^{\,2}$ گشتاور الکتریکی و T_L گشتاور بار مغناطیسی است. در این معادله فضای حالت متغیرهای حالت جریان آرمیچر i_a و سرعت دورانی شفت ω می‌باشند. در صورتی که بخواهیم از کنترل‌کننده **PI** به منظور کنترل سیستم استفاده کنیم، باید ابتدا معادله (۷) حول نقطه کار خطی‌سازی شود. بنابراین معادله خطی سیستم حول نقطه کار به صورت رابطه (۸) قابل ارائه است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{i}_a \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -80882.35\omega^o - 73.53 & -80882.35 i_a^o \\ 617.98 i_a^o & -0.0011 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -5.62 \end{bmatrix} T_l \qquad (۸)$$

در این مدل خطی، اندیس o در بالای پارامترها بیانگر نقطه کار سیستم است. این بدان معنی است که سیستم در هر نقطه کار دارای مدلی متفاوت است. بنابراین در انتخاب کنترل‌کننده **PI** باید دقت نمود تا ضرایبی انتخاب شوند که در محدوده عملکرد سیستم، پایداری مطلوبی داشته باشد. برای تابع تبدیل سیستم حلقه بسته داریم:

$$\frac{\Delta T_e(s)}{\Delta T_l(s)} = \frac{5\times10^7 i_a^{o2}}{s^2 + \left(73.53 + 80882.35\omega^o\right)s + 90.88\omega^o + 0.08 + 5\times10^7 i_a^{o2}} \qquad (۹)$$



شکل ۷: بلوک دیاگرام طرح کنترلی گشتاور بار فوکو

با توجه به مخرج تابع تبدیل که به ازای نقاط کار متفاوت محاسبه شده است، مشاهده می‌شود که سیستم حلقه باز پایدار است. از طرفی چون سیستم در مبدا مختصات قطبی ندارد، لذا ردیابی حالت ماندگار برای ورودی پله امکان پذیر نبوده و باید از یک انتگرال‌گیر در ساختار کنترل‌کننده استفاده شود. بنابراین کنترل‌کننده مورد نظر برای تست عملی و پیاده‌سازی به صورت **PI** درنظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین ضرائب **PI** از محک راث استفاده می‌شود. با توجه به تابع تبدیل رابطه (۹) و استفاده از کنترل‌کننده **PI** به صورت $C(s) = k_p + k_i/s$، داریم:

$$\begin{cases} k_i > 0 \\ k_p > \dfrac{-\left(90.88\omega^o + 0.08 + 5\times10^7 i_a^{o2}\right)}{5\times10^7 i_a^{o2}} \\ k_p > \dfrac{k_i - \left(73.53 + 80882.35\omega^o\right)\left(90.88\omega^o + 0.08 + 5\times10^7 i_a^{o2}\right)}{5\times10^7 i_a^{o2}\left(73.53 + 80882.35\omega^o\right)} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

با توجه به شرایط رابطه (۱۰)، سیستم پایدار بوده و خطای ردیابی در حالت ماندگار برابر با صفر است. همچنین توجه داریم که به دلیل وجود انتگرال‌گیر، دفع اغتشاش پله به راحتی صورت می‌گیرد. در این شرایط، با توجه به نقطه کار سیستم و نامعادله (۱۰)، ضرایب کنترل‌کننده انتخاب می‌شوند.

۲-۳- طراحی کنترلر منبع جریان

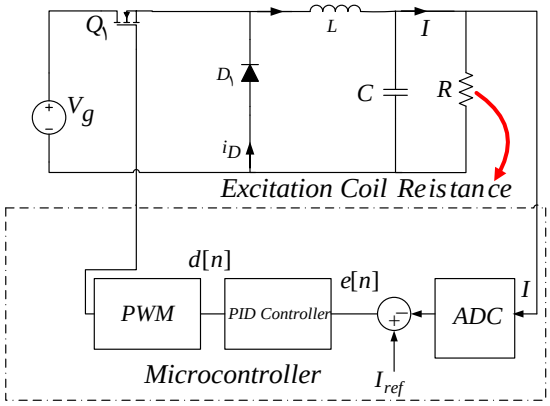
با توجه به شکل ۸، منبع جریان در واقع یک مبدل **DC-DC** می‌باشد که جریان آن قابل کنترل است. کنترل جریان خروجی مبدل **DC-DC** از طریق مدولاسیون دوره کاری کلیدزنی صورت می‌پذیرد. بدین ترتیب که مبدل **DC-DC** شامل یک سیستم کنترل فیدبک است که ابتدا جریان مرجع با جریان خروجی را مقایسه می‌کند. با توجه به خطای حاصل از این مقایسه، کنترل‌کننده **PID** دوره کاری کلید زنی مطلوب را مشخص می‌کند. برای تابع تبدیل مبدل **DC-DC** شکل ۸، داریم:

$$\frac{RI(s)}{V_x(s)} = \frac{RI(s)}{V_g d(s)} = \frac{1}{LC(S^2 + S(\frac{1}{RC}) + \frac{1}{LC})} \qquad (۱۱)$$

این رابطه در حوزه زمان گسسته به صورت رابطه (۱۲) است:

$$\frac{I(z)}{d(z)} = \frac{V_g}{R(1 + \frac{(1-z^{-1})L}{RT_s} + \frac{(1-z^{-1})^2 LC}{(T_s)^2})} \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]



شکل ۸: کنترل جریان مبدل **DC-DC**

که در آن **d** معادل دوره کاری کلید الکترونیک قدرت است که توسط کنترل‌کننده **PID** تنظیم می‌شود. با توجه به توضیحات قبل، سیگنال خطا به صورت رابطه (۱۳)، تعریف می‌شود:

$$e_2(s) = I_{ref}(s) - I(s) \qquad (۱۳)$$

از طرفی، برای واحد کنترل‌کننده داریم:

$$\frac{d(s)}{e_2(s)} = K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} + K_{d2}s \qquad (۱۴)$$

$$\frac{d(z)}{e(z)} = \frac{K_pT_s(1-z^{-1}) + K_iT_s^2 + K_d(1-z^{-1})^2}{T_s(1-z^{-1})} \qquad (۱۵)$$

که در آن زمان نمونه برداری برابر با ۰/۱ میلی ثانیه می‌باشد. به منظور پیاده‌سازی کنترل‌کننده بر روی پردازنده **ARM**، ضرائب کنترل‌کننده **PID** به صورت رابطه (۱۶) تعیین می‌شوند:

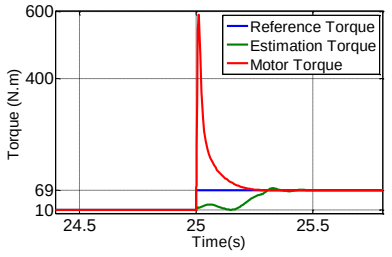
$$K_{p2} = \frac{L}{RT_s}; K_{i2} = \frac{1}{T_s}; K_{d2} = \frac{LC}{T_s} \qquad (۱۶)$$

پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیستم در پیوست ۱ ارائه شده است.

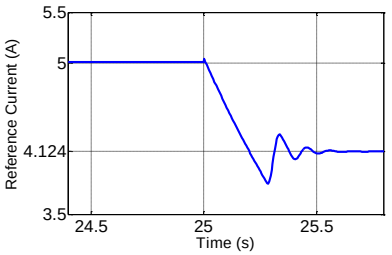
٤- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله به بررسی نتایج شبیه‌سازی در مورد مسئله ردیابی و اثر دفع اغتشاش سیستم حلقه بسته پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت ارائه شده است. در حالت اول، نتایج شبیه‌سازی ردیابی گشتاور مرجع ۱۰ نیوتن متر و ۶۹ نیوتن متر به ترتیب در بازه‌های زمانی ۰ تا ۲۵ ثانیه و بازه زمانی ۲۵ تا ۲۵/۵ ثانیه، ارائه شده است. اندازه ولتاژ موتور، برای گشتاور مرجع ۱۰ نیوتن متر، ۸ ولت و برای گشتاور مرجع ۶۹ نیوتن متر، برابر با ۸۵ ولت است. در شکل ۹-الف به ترتیب شکل موج گشتاور موتور، گشتاور تخمینی دینامومتر فوکو و همچنین گشتاور مرجع نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ردیابی گشتاور مرجع، در شرایط حالت ماندگار با دقت بسیار بالایی انجام شده است و در این شرایط گشتاور موتور و دینامومتر برابر می‌باشند. البته در شرایط حالت گذرا یک فراجهش نسبتا بزرگ مربوط به گشتاور موتور مشاهده می‌شود. دلیل این موضوع، افزایش پله‌ای ولتاژ موتور است که منجر به تغییرات ناگهانی دامنه جریان موتور و در نهایت این موضوع منجر فراجهش ناگهانی گشتاور موتور می‌شود. البته اشاره به این نکته لازم است که با توجه به اینکه رابطه (۶) که تخمین گشتاور بر اساس آن صورت می‌گیرد یک رابطه استاتیکی است، لذا این رابطه تخمین مقدار گشتاور را فقط در حالت ماندگار ارائه می‌دهد. به همین دلیل در نتایج شبیه‌سازی در لحظه تغییر ولتاژ اختلاف زیادی بین مقدار گشتاور و تخمین آن در حالت گذرا دیده می‌شود.

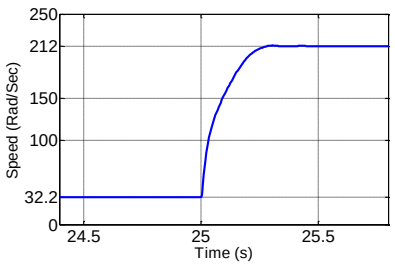
پس از میرا شدن سرعت موتور، گشتاور موتور نیز در مقدار ماندگار تثبیت می‌شود. همچنین به ازای افزایش گشتاور مرجع در ثانیه ۲۵ام، جریان مرجع نیز با توجه به شکل ۹-ب، نوسان می‌کند. این موضوع به علت وجود لختی دینامومتر و عدم تغییرات پله‌ای سرعت آن می‌باشد. به عبارت بهتر با توجه به شکل ۹-ج پس از میرا شدن سرعت دینامومتر، جریان مرجع و گشتاور تخمینی نیز در مقادیر ماندگار مربوطه میرا می‌شوند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده در حالت اول.
الف- گشتاور ب- جریان تحریک ج-سرعت دورانی دینامومتر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]

در حالت دوم ولتاژ موتور در طی کل زمان تست روی مقدار ۸۰ ولت ثابت است. همچنین گشتاور مرجع، تا لحظه ۵۴ ثانیه برابر با ۴۹ نیوتن‌متر می‌باشد و سپس در لحظه ۵۴ ثانیه، گشتاور مرجع اعمال شده به مقدار ۷۱ نیوتن‌متر تغییر پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۱۰-الف، فراجهش ناگهانی گشتاور موتور در این شرایط مشاهده نمی‌شود، دلیل این موضوع عدم تغییرات ولتاژ موتور در لحظه تغییر گشتاور مرجع می‌باشد. همچنین به ازای افزایش گشتاور مرجع در ثانیه ۵۴ام، جریان مرجع نیز با توجه به شکل ۱۰-ب ، نوسان می‌کند. این موضوع به علت وجود لختی دینامومتر و عدم تغییرات پله‌ای سرعت آن می‌باشد. به عبارت بهتر با توجه به شکل ۱۰-ج، پس از میرا شدن سرعت دینامومتر، جریان مرجع و گشتاور تخمینی نیز در مقادیر ماندگار مربوطه میرا می‌شوند.

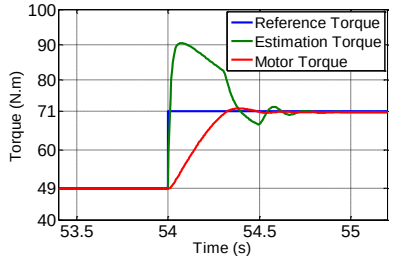
در مرحله بعدی، نتایج موضوع اثر اغتشاش بر سیستم کنترلی بررسی شده است. دفع اغتشاش در این آزمایش می‌تواند بر روی جریان اعمالی به سیم‌پیچ و یا گشتاور بار بررسی شود. به دلیل اینکه اعمال اغتشاش به گشتاور مکانیکی منطقی‌تر بوده و در عمل بیشتر اتفاق می‌افتد، در این آزمایش ابتدا اغتشاش گشتاور بار بررسی می‌شود و سپس در ادامه به منظور بررسی بهتر عملکرد کنترل‌کننده، اغتشاش منبع جریان نیز ارائه شده است. در این بررسی، ولتاژ موتور ثابت و ۸۰ ولت فرض شده است. به منظور ایجاد تنوع در نقاط کار، گشتاور مرجع تا ثانیه ۵۴ بر روی ۵۵ نیوتن‌متر و از این لحظه به بعد، ۷۵ نیوتن‌متر فرض شده است. در لحظه ۵۴/۳ ثانیه، گشتاور اغتشاشی برابر با ۳۰ نیوتن‌متر به خروجی سیستم اضافه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی دفع اغتشاش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که گشتاور بار اعمال شده به موتور در مدت زمان بسیار کوتاهی توسط کنترل‌کننده دفع می‌شود.

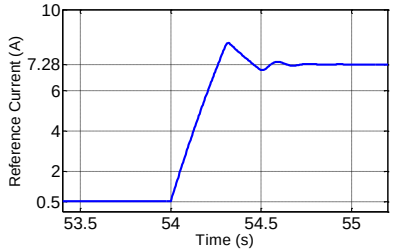
به همین ترتیب در شکل ۱۲ نتایج ردیابی برای حالتی که اغتشاش جریانی برابر با ۶ آمپر وجود دارد، نشان داده شده است. این اغتشاش در ثانیه ۵۴/۳، به سیستم حلقه بسته اعمال می‌شود. با توجه به شکل ۱۲، ردیابی گشتاور با حذف اثر اغتشاش، در این حالت نیز به سرعت توسط کنترل‌کننده دفع شده است.

۵- نتایج عملی

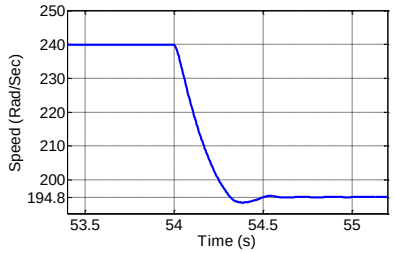
در شکل ۱۳ پیاده‌سازی سیستم تخمین گشتاور و کنترل حلقه بسته گشتاور فوکو در پردازنده **ARM** نشان داده شده است. با توجه به این بلوک دیاگرام، مشاهده می‌شود که ورودی‌های پردازنده شامل سرعت دورانی، گشتاور مرجع و جریان فیدبک منبع جریان می‌باشد که توسط مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال بر روی پورت ورودی قرار می‌گیرند. در محیط نرم‌افزاری پردازنده، محاسبات مربوط به تخمین گشتاور انجام می‌شود. سپس جریان مرجع تعیین شده و در نهایت عرض پالس **PWM** برای کنترل جریان منبع به پورت خروجی فرستاده می‌شود. در شکل ۱۴، برد قدرت و برد کنترل طراحی شده توسط پردازنده **ARM** مدل **LPC-1788** نشان داده شده است.



(الف)

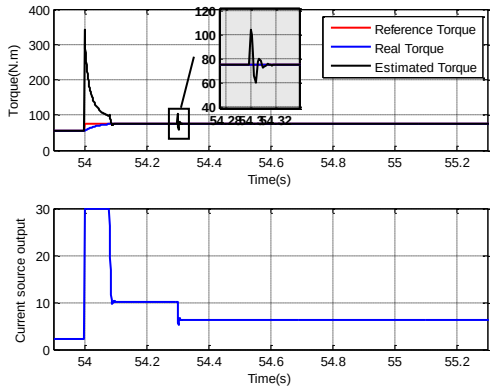


(ب)



(ج)

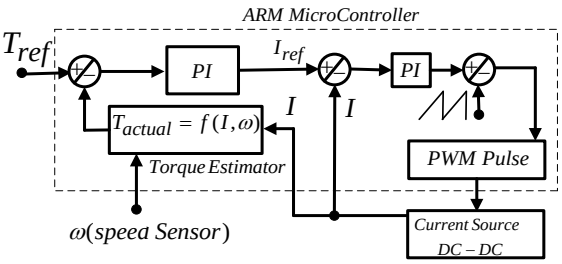
شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده در حالت دوم.
الف- گشتاور ب- جریان تحریک ج-سرعت دورانی دینامومتر



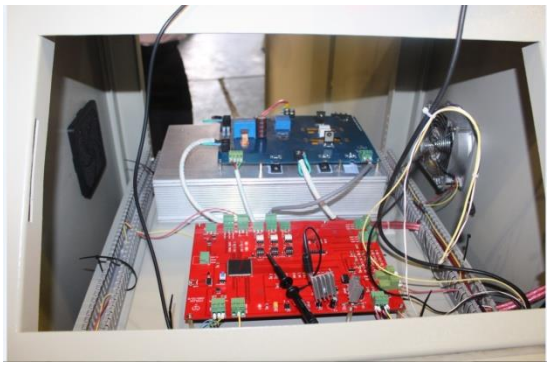
شکل ۱۱: بررسی دفع اغتشاش وارد شده به گشتاور مکانیکی سیستم

سیستم تحت کنترل شامل دو دستگاه دینامومتر فوکو با توان ۲۲/۵×۲ کیلووات، رک کنترل و پایش دینامومتر فوکو و یک دستگاه موتور معکوس‌گرد ۶۰ کیلووات، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شفت داخلی موتور معکوس‌گرد به یکی از دینامومترها و شفت بیرونی آن به دینامومتر دیگری وصل است. در این مقاله در شرایط تست موتور معکوس‌گرد، فقط یکی از بارهای فوکو کنترل و پایش می‌شود و بار فوکوی دوم، قفل می‌باشد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]



شکل ۱۳: پیاده‌سازی کنترل گشتاور در پردازنده



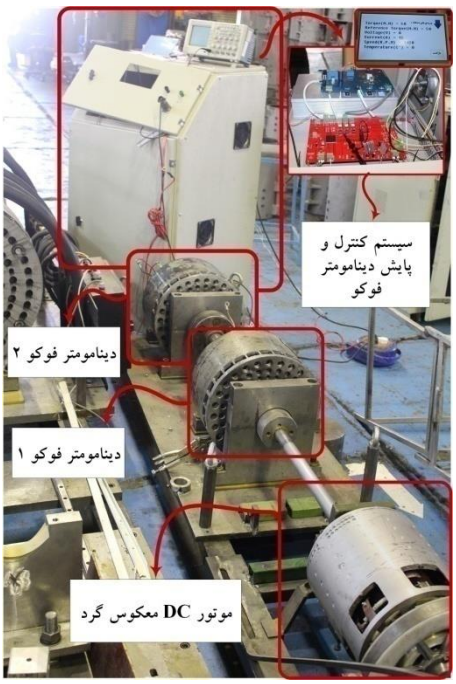
شکل ۱۴: برد کنترلی طراحی شده برای پیاده‌سازی بلوک دیاگرام شکل ۹

به منظور آماده سازی سیستم برای تست و ارزیابی، دو سناریو درنظر گرفته می‌شود. در این دو سناریو، چهار نقطه کار برای تست سیستم حلقه بسته درنظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در این سناریوها به منظور بررسی بهتر نتایج، دو ورودی مرجع به سیستم اعمال شده است تا نتایج و زمان ردیابی را واضح‌تر بتوان تحلیل کرد. در شکل ۱۶، ورودی پله‌ای با دامنه ۱۰ نیوتن‌متر به منظور ورودی مرجع تا ثانیه ۲۵ درنظر گرفته شده است. سپس از ثانیه ۲۵ به بعد مقدار گشتاور مرجع بر روی ۶۹ نیوتن‌متر تغییر وضعیت می‌دهد. با توجه به نتایج تست عملی، مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده طراحی شده به همراه تخمین‌گر گشتاور که هر دو در پردازنده **ARM** برنامه‌نویسی شده‌اند، کنترل سیستم را به خوبی انجام داده است. در ادامه آزمایش عملی، در شکل ۱۷ نتایج ردیابی برای دو نقطه کار جدید ۴۹ و ۷۱ نیوتن‌متر درنظر گرفته شده است. در این حالت نیز مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده به همراه ساختار تخمین گشتاور، نتایج ردیابی قابل قبولی را بدون خطای حالت ماندگار ارائه داده است. از طرفی همانطور که در بلوک دیاگرام شکل ۱۳ نشان داده شده است، عرض پالس **PWM** کلید ماسفت منبع جریان، از طریق سیگنال خروجی **PI** دوم تعیین می‌شود. شکل موج **PWM** کلید ماسفت در شکل ۱۸ در شرایطی نشان داده شده است که گشتاور خروجی سیستم بر روی گشتاور بار مرجع ۷۱ نیوتن‌متر قرار گرفته است. در این حالت مشاهده می‌شود که دوره کاری کلید ماسفت (عرض پالس) برابر با ۲۰٪ می‌باشد. با توجه به اینکه حداکثر جریان خروجی منبع جریان برابر با ۴۰ آمپر(جدول ۱ پیوست) می‌باشد، لذا در این حالت جریانی برابر با ۸ آمپر به سیم‌پیچ تزریق می‌شود که نتایج آن نسب به شبیه‌سازی شکل ۱۰-ب، که ۷/۲۸ آمپر است، اختلاف ناچیزی دارد. دلیل این اختلاف جزئی، می‌تواند ناشی از تلفات سیم‌پیچی تحریک در سیستم عملی باشد. به عبارت بهتر، در سیستم تست عملی برای ایجاد گشتاور مورد نظر، جریان تحریک بیشتری باید ایجاد شود.

همچنین علت عدم وجود دامنه گشتاور فراجهش فوکو در نتایج عملی در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی، زمان نمونه‌برداری سیستم تست عملی می‌باشد. به عبارت بهتر، گشتاور فراجهش لحظه‌ای در نتایج شبیه‌سازی در فاصله زمانی کمتر از ۰/۰۵ ثانیه اتفاق افتاده است، که با توجه به بزرگ بودن زمان نمونه‌برداری سیستم پایش از عدد مذکور، گشتاور فراجهش در بازه زمانی گذارا ثبت نشده است. البته نتایج شبیه‌سازی گشتاور تخمینی با نتایج عملی گشتاور تخمینی در شرایط حالت ماندگار کاملا با هم همخوانی دارد.

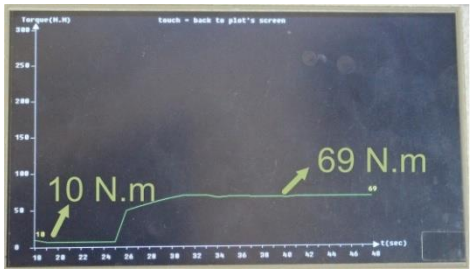
٦- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله، طراحی و ساخت سیستم تخمین گشتاور و کنترل دینامومتر فوکوی ۲۲/۵ کیلووات می‌باشد. در این راستا، به منظور شناسایی سیستم و استخراج دینامیک مدل ابتدا تخمینی از گشتاور به صورت تابع تقریبی وابسته به جریان تحریک و سرعت دورانی سیلندر ارائه شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و تجربی، تخمین گشتاور دینامومتر فوکو با خطای قابل قبولی انجام شده است. همچنین سیستم پیشنهادی جهت کنترل گشتاور فوکو شامل دو حلقه کنترلی سری بوده که در نهایت جریان سیستم تحریک را کنترل می‌کند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و عملی روی بر روی دینامومتر فوکو، ردیابی گشتاور با خطای قابل قبولی انجام شد.

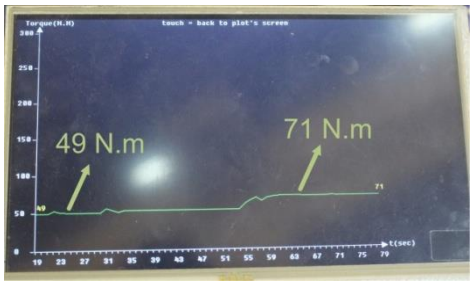


شکل ۱۵: ساختار سیستم کنترل گشتاور دینامومتر فوکو

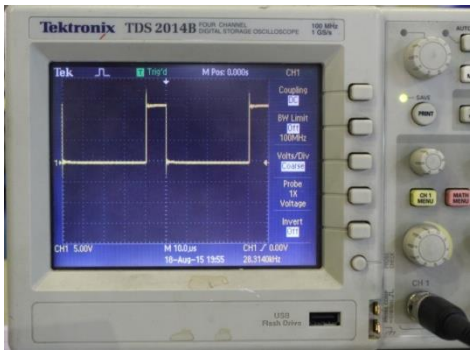
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]



شکل ۱۶: نتایج تست عملی ردیابی گشتاور مرجع برای دو گشتاور ۱۰ و ۶۹ نیوتن‌متر



شکل ۱۷: نتایج تست عملی ردیابی گشتاور مرجع برای دو گشتاور ۴۹ و ۷۱ نیوتن‌متر



شکل ۱۸: پالس گیت ماسفت منبع جریان در شرایط گشتاور مرجع ۷۱ نیوتن‌متر

پیوست ۱:

مقادیر پارامترهای سیستم در تست‌های شبیه‌سازی و پیاده‌سازی به صورت جداول ۱ تا ۳ می‌باشند.

جدول ۱- طراحی پارامترهای مدار قدرت منبع

پارامتر	واحد	مقدار
Maximum V_{in}	V	۴۹
Minimum V_{in}	V	۵۱
Maximum I_o	A	۴۰
Minimum I_o	A	۵
R_L	Ohm	۰,۱
f_s	Hz	۲۸۰۰۰
L	uH	۰,۶۲۸۲۲
C	uF	۱۵

جدول ۲- مشخصات فنی نمونه بار فوکوی ساخته شده

پارامتر	مقدار
توان نامی ترمز	۲۲/۵×۲KW
جریان تحریک	۳۰A
قطر خارجی سیلندر	۳۶۱,۴۰ mm
قطر داخلی سیلندر	۳۴۰,۴۰ mm
ضخامت سیلندر	۱۰,۵ mm
قاعدع کوچک پنجه قطب	۴۱,۹۸ mm
قاعده بزرگ پنجه قطب	۱۲۰,۵۳ mm
ارتفاع پنجه قطب	۱۳۸ mm
جنس هسته، سیلندر و قطب‌ها	Fe-St۳۷

جدول ۳- مشخصات فنی نمونه الکتروموتور معکوس‌گرد جریان مستقیم

پارامتر	مقدار
توان نامی ترمز	۶۰KW
ولتاژ نامی	۲۰۰V
جریان نامی	۳۰۰A
طول موتور	۳۱۰mm
کلاس عایقی	H
سرعت نسبی بین دو بخش دوار	۴۰۰۰-۳۵۰۰rpm
سرعت آرمیچر	۲۰۰۰-۱۷۵۰rpm
سرعت قطب‌ها	۲۰۰۰-۱۷۵۰rpm

مراجع

[1] Kh. Kanzi, A. Dehafarin, S. Roozbehani, M. Kanzi, Q.Vasheghani, "Novel Claw pole Eddy Current Load for Testing DC Counter Rotating Motor Part I: Construction," Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, vol. 1(3), pp.57-65, 2012.

[2] Kh. Kanzi, S. Roozbehani, A. Dehafarin, M. Kanzi, "Novel Claw pole Eddy Current Load for Testing DC Counter Rotating Motor Part II: Design and Modeling," Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, vol. 1(4), pp. 16-22, 2012.

[۳] سام روزبهانی، مجید کنزی، ابوالفضل ده آفرین، خلیل کنزی، مدلسازی و ساخت بارفوکوی قطب پنجه ای جهت تست الکتروموتور معکوس گرد، بیست و هفتمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، پژوهشگاه نیرو، آبان ۱۳۹۱.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]

[4] J.R. Bowler, T.Theodoulidis, "Boundary element calculation of eddy currents in cylindrical structures containing cracks," IEEE Trans. Magn, vol. 45(3), pp. 1012–1015, 2009.

[5] D. Pusch, J. Smajic, Z. Andjelic, J.M. Ostrowski, "Comparison between BEM and classical FEM for a 3D low-frequency eddy-current analysis," IEEE Trans. Magn, vol. 46(8), pp. 2919–2921, 2010.

[6] H. De Gersem, "Combined spectral-element finite-element discretization for magnetic-brake simulation," IEEE Trans. Magn, vol. 46(8), pp. 3520–3523, 2010.

[7] E. Dlala, "Comparison of models for estimating magnetic core losses in electrical machines using the finite-element method", IEEE Trans. Magn, vol. 45(2), pp. 716–725, 2009.

[8] J. Pippuri, A. Belahcen, E. Dlala, A.Arkkio, "Inclusion of eddy currents in laminations in two-dimensional finite element analysis", IEEE Trans. Magn, vol.46 (8), pp. 2915–2918, 2010.

[9] S.E. Gay, M. Ehsani, "Parametric analysis of eddy-current brake performance by 3-D finite-element analysis", IEEE Trans. Magn, vol. 42(2), pp.319–328, 2006.

[10] H. Shin, J. Choi, H. Cho, S. Jang, "Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake", IEEE Trans. Magn, vol.49 (7), 4152–4155, 2013.

[11] R. Yazdanpanah, M. Mirsalim, "Axial-Flux Wound-Excitation Eddy-Current Brakes: Analytical Study and Parametric Modeling", IEEE Trans. Magn, vol.50 (6), 2014.

[12] S. Sharif, J. Faiz, K. Sharif, "Performance analysis of a cylindrical eddy current brake", IET Electric Power Applications, Vol. 6(9), pp. 661–668, 2012.

[13] S. Anwar, A Parametric Model of an Eddy Current Electric Machine for Automotive Braking Applications, IEEE Trans.Control system Tech, Vol.12, No.3, May 2004.

[14] Zamani A. Design of a controller for rail eddy current brake system. IET Electrical Systems in Transportation. 2014 Jun; 4(2):38-44.

[15] Yazdanpanah R, Mirsalim M. Hybrid electromagnetic brakes: design and performance evaluation. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2015 Mar; 30(1):60-9.

[16] S. Roozbehani, S. Saki, H. Nazifi, and K. Kanzi, "Identification and fuzzy-PI controller design for a novel claw pole eddy current dynamometer in wide speed range," in Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on, 2016, pp. 1038-1042.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.1.4]