

شناسایی و تشخیص عیب ناهم‌محوری در موتور القایی با استفاده از فیلتر کالمن UKBF

احمد باقری^۱، منصور اوجاچی^۲، امیرباقری^۳

^۱ و ^۲ گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۱ahmad_bagheri@znu.ac.ir, ^۲mojaghi@znu.ac.ir, ^۳amir_bagheri@znu.ac.ir

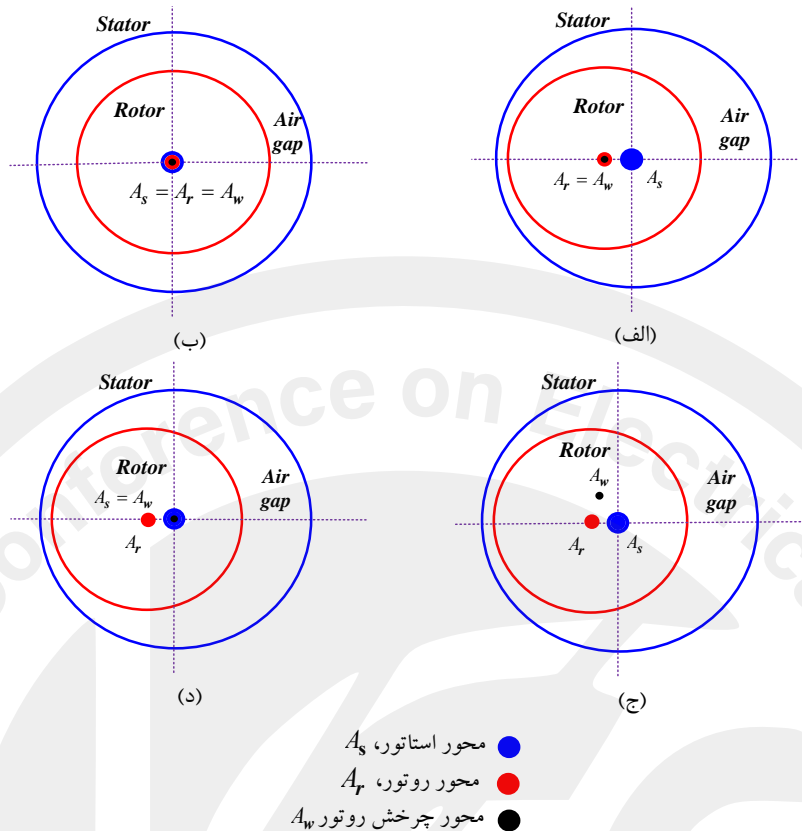
چکیده- در این مقاله روش جدیدی برای تشخیص عیب ناهم‌محوری و تخمین مقدار دقیق مؤلفه‌های آن در موتور القایی، معرفی می‌شود. این روش با استفاده از تخمین‌گر فیلتر کالمن UKBF، که یک فیلتر پیوسته غیرخطی است، به تخمین مقدار مؤلفه‌های استاتیکی و دینامیکی عیب ناهم‌محوری در موتور القایی می‌پردازد. به اینصورت که ابتدا مدل موتور القایی ناهم‌محور شبیه‌سازی شده سپس با استفاده از مدل مذکور، کمیت‌های اندازه‌گیری شده و فیلتر کالمن به شناسایی عیب ناهم‌محوری و تخمین مقدار دقیق مؤلفه‌های آن برای یک موتور واقعی که بصورت مصنوعی ناهم‌محور شده پرداخته می‌شود. با توجه به نتایج عملی آزمایشگاهی و نتایج حاصل از الگوریتم فیلتر کالمن، مشخص می‌شود که روش پیشنهادی توانایی بسیار خوبی در تخمین مقدار دقیق مؤلفه‌های عیب مذکور دارد و عملکرد مناسبی در تمام حالت‌های ناهم‌محوری از خود نشان می‌دهد.

کلید واژه- تشخیص و تخمین مؤلفه‌های عیب، موتورهای القایی، عیب ناهم‌محوری، فیلتر کالمن.

۱- مقدمه

در شرایط ایده‌ال، این سه محور بر هم منطبق بوده و فاصله هوایی بین روتور و استاتور بطور یکنواخت بین آنها توزیع می‌شود. با جدا شدن این محورها از یکدیگر انواع عیب ناهم‌محوری پدید می‌آید (شکل (۱)). مرجع [۴] با استفاده از اندوکتانس استاتور بعنوان شاخص عیب ناهم‌محوری به تشخیص انواع عیب ناهم‌محوری پرداخته است بطوری که شاخص انتخابی توانایی تفکیک نوع عیب ناهم‌محوری (استاتیکی، دینامیکی و مرکب) را دارد و عواملی مانند نوع بارگذاری، سطح بار و نوسان آن، نوع کنترل موتور و همچنین منبع تغذیه موتور نمی‌توانند این شاخص را تحت تأثیر قرار دهند. در مرجع [۵] روش ترکیب داده‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن از ترکیب خطی مؤلفه‌های فرکانس مربوط به جریان استاتور و سیگنال‌های ارتعاشی استفاده شده است و از شاخص خطای ایجاد شده در آن، برای تشخیص عیب ناهم‌محوری استفاده می‌شود. در مرجع [۶] یک روش تشخیص عیب مبتنی بر مدل برای شناسایی عیب‌های ناهم‌محوری استاتیکی، دینامیکی و مرکب در موتورهای القایی ارائه گردیده است. این مرجع از یک مدل تحلیلی و نیز الگوریتم ازدحام ذرات PSO برای تشخیص عیب استفاده می‌کند و عملکرد روش مذکور بسیار وابسته به مدل تحلیلی استخراجی است. در مرجع [۷] تخمین شدت عیب اتصال کوتاه استاتور با استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی برای موتورهای القایی انجام شده است. شدت عیب اتصال کوتاه توسط دو پارامتر تعداد حلقه‌های اتصال کوتاه شده و مقاومت حلقه‌های عیب تخمین زده می‌شود. در مرجع [۸] از فیلتر کالمن غیرخطی UKF (Unscented Kalman Filter) برای شناسایی عیب‌های اتصال کوتاه حلقه‌های استاتور و شکستگی میله‌های روتور در ماشین القایی بر پایه تخمین متغیرهای حالت سیستم استفاده شده است.

موتورهای القایی به دلیل مکانیزم ساده و ساختمان محکم، تنوع ساخت، قیمت مناسب، قابلیت راه اندازی آسان با منابع انرژی قابل دسترس و... امروزه بسیار حایز اهمیت هستند. شرایط نامناسب کاری و محیطی، بارهای سنگین و متغیر، خطاهای انسانی در نصب، راه‌اندازی و بهره‌برداری و همچنین نقص‌های کوچک باقیمانده از مراحل ساخت و مونتاژ این موتورها، می‌تواند باعث ایجاد عیوبی در آنها گردد. اگر عیوب رخ داده به موقع آشکارسازی نشوند، می‌توانند موجب از کار افتادن موتور شده و این از کار افتادگی موتورها بخصوص در کارخانجات صنعتی که خطوط تولید به هم پیوسته دارند، ممکن است بخش اعظمی از فرآیند تولید کارخانه را مختل کرده و باعث ایجاد هزینه‌های بالا برای صاحبان صنایع شود. در حالیکه با شناسایی و تشخیص عیب در مراحل اولیه آن می‌توان از به وجود آمدن هزینه‌های اضافی جلوگیری به عمل آورد. امروزه کنترل و پایش وضعیت تجهیزات شبکه و ماشین‌های الکتریکی مخصوصاً در شبکه‌های هوشمند برق از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین منظور روش‌های پایش وضعیت موتورهای الکتریکی به وجود آمده‌اند و به دلیل عملکرد خوب، حایز اهمیت بوده و روز به روز در حال پیشرفت هستند [۱]. از جمله این روش‌ها استفاده از فیلتر کالمن برای تشخیص عیب در موتور القایی است. فیلتر کالمن یک تخمین‌گر قدرتمند بازگشتی است که می‌تواند در محدوده وسیعی به تخمین متغیرهای حالت یک سیستم دینامیکی با فضای حالت استخراجی از مدل مورد تخمین بپردازد [۲]. از عیوبی که ممکن است در موتور القایی رخ دهد، می‌توان به خروج روتور و استاتور از شرایط هم‌محور بودن اشاره کرد [۳]. در ماشین‌های الکتریکی دوار، سه محور، بنام‌های محور استاتور A_s ، محور روتور A_r و محور چرخش روتور A_ω وجود دارد. در یک ماشین سالم و



شکل ۱: موقعیت محورها و توزیع فاصله هوایی در موتور القایی: الف) سالم، ب) با ناهم‌محوری استاتیکی، ج) با ناهم‌محوری دینامیکی، د) با ناهم‌محوری مرکب

های اندوکتانس برای مدل‌سازی یک موتور القایی سه‌فاز سالم با روابط (۱)–(۳) توصیف می‌شوند. در این روابط ماتریس L_{ls} اندوکتانس پراکندگی هر فاز استاتور، L_{lr} اندوکتانس پراکندگی هر فاز روتور بوده و L_m اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی می‌باشد. اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی در یک موتور القایی سالم از رابطه (۴) بدست می‌آید [۹]، که در آن N_s تعداد دور معادل سیم‌پیچ‌های استاتور، r شعاع داخلی استاتور، l طول هسته روتور و استاتور و g طول فاصله هوایی مؤثر بین استاتور و روتور در جهت شعاع است. با وقوع عیب ناهم‌محوری فاصله هوایی بین روتور و استاتور غیر یکنواخت شده و نامتقارنی در ساختار موتور پدیدار می‌شود. همان‌طور که در رابطه (۴) ملاحظه می‌شود، اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی با معکوس طول فاصله هوایی رابطه مستقیم دارد. لذا با تغییر این فاصله هوایی در اثر عیب ناهم‌محوری ماتریس‌های اندوکتانس نیز تغییر می‌کنند. در مرجع [۹] چگونگی اصلاح ماتریس‌های اندوکتانس برای مدل‌سازی موتور القایی سه‌فاز با ناهم‌محوری استاتیکی ارائه شده است. در این مقاله با اعمال تغییراتی در روش مرجع مذکور، اصلاح ماتریس‌های اندوکتانس به منظور مدل‌سازی هر سه نوع عیب ناهم‌محوری استاتیکی، دینامیکی و مرکب بصورت روابط (۵)–(۱۱) حاصل می‌شود. در این روابط α_m زاویه حداقل فاصله هوایی بین استاتور و روتور است که از رابطه (۱۲) بدست می‌آید [۴] و همچنین α مساوی با $(\alpha_m - \theta_r)$ است. ضمناً برای محاسبه اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی در موتور ناهم‌محور باید از رابطه (۱۳) استفاده شود [۹]، که در آن ρ درجه ناهم‌محوری و تابع موقعیت روتور است و با حرکت روتور مطابق با رابطه (۱۴) تغییر می‌کند [۴]. در رابطه

مرور منابع موجود نشان می‌دهد که در مطالعات گذشته برای تشخیص عیب ناهم‌محوری از شاخص‌هایی که در سیگنال‌های خروجی موتور قابل مشاهده است، برای عیب‌یابی استفاده می‌شد که تشخیص نوع و مقدار عیب مذکور از روی این شاخص‌ها بدلیل اینکه ممکن است این شاخص‌ها تحت تأثیر عوامل دیگری قرار گیرند، بسیار مشکل بود. در این مقاله علاوه بر اینکه می‌توان به تشخیص نوع عیب ناهم‌محوری پرداخت بلکه توسط این روش به مقدار دقیق مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری استاتیکی، دینامیکی و یا ترکیبی از این دو عیب دست یافت. در ادامه به مدل‌سازی موتور القایی تحت انواع عیب ناهم‌محوری پرداخته می‌شود. سپس بر حسب نیاز معادلات موتور معیوب به قاب مرجع منتقل شده و فضای حالت موتور مورد مطالعه، استخراج می‌شود و در بخش بعدی با استفاده از فضای حالت موتور و الگوریتم فیلتر کالمن به تشخیص و تخمین مقدار عیب ناهم‌محوری پرداخته شده، در پایان نتایج الگوریتم فیلتر کالمن و همچنین نتایج آزمایش‌های عملی ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی جامع موتور القایی ناهم‌محور

در پایش وضعیت موتورهای القایی نیاز به مدل معیوب ماشین برای بررسی شاخص‌های عیوب مورد مطالعه و طراحی سیستم پایش وضعیت، وجود دارد. با استفاده از یک مدل ریاضی دقیق برای شبیه‌سازی رفتار ماشین، می‌توان در وقت و هزینه‌ها صرفه‌جویی به عمل آورد. برای استفاده از فیلتر کالمن در تشخیص عیب، وجود مدل ماشین معیوب از ضروریات است. در این مقاله برای مدل‌سازی موتور القایی به صورت سالم و معیوب (ناهم‌محور)، از مدل مدارهای تزویج شده استفاده می‌شود [۹]. ماتریس-

ماتریس نواریاس بویژه‌های تراپید و اداره بیری سیستم به عنوان پارامتر-های تنظیم برای همگرایی الگوریتم عمل می‌کنند. فیلترکالمن UKBF (Unscented Kalman Bucy Filter) زمان پیوسته، اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط سیمو سارکا در مقاله [۱۳] مطرح شد. از این فیلتر برای تخمین حالات سیستم‌هایی استفاده می‌شود که به صورت پیوسته در زمان هستند. در حقیقت در این نوع فیلتر دینامیک و اندازه-گیری‌ها هر دو به صورت پیوسته صورت می‌گیرد. البته در این مقاله اندازه‌گیری‌ها به صورت گسسته ولی با فرکانس نمونه برداری بالا انجام می‌شود که این اندازه‌گیری‌ها را می‌توان به صورت پیوسته فرض کرد. معادلات سیستم در فیلتر کالمن UKBF به شکل معادلات (۲۸)-(۳۲) نمایش داده می‌شوند که در آن ماتریس‌های L و M بترتیب ماتریس‌های متغیر با زمان نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری، K بهره کالمن، X نقاط سیگما حول نقطه کار سیستم و w ، W ماتریس‌های وزنی سیستم هستند. ماتریس X به از رابطه (۳۳) و (۳۴) محاسبه می‌شود. همچنین ماتریس‌های وزنی معادلات سیستم به صورت (۴۴)-(۴۸) محاسبه می‌شود. گردند که در آن‌ها α ، β و K پارامترهای تنظیم فیلتر کالمن هستند. روابط (۴۴) تا (۴۸) وزن‌های مربوط به میانگین و کواریانس سیستم هستند. اندیس m برای میانگین و اندیس c برای کواریانس استفاده می‌شوند و به صورت یک اسکالر به تعداد $(2n+1)$ عدد تولید می‌شوند که n نیز تعداد متغیرهای حالت سیستم می‌باشد.

۶- نتایج الگوریتم UKBF و نتایج آزمایشگاهی

در این بخش یک موتور القایی با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این موتور طوری طراحی شده که امکان اعمال انواع ناهم‌محوری بر روی آن وجود دارد. سپس خروجی‌های جریان و ولتاژ موتور تحت درجات مختلف مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری، اندازه‌گیری و سیگنال‌های ثبت شده، در الگوریتم فیلتر کالمن طراحی شده برای موتور ناهم‌محور مطابق شکل (۲)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده به همراه تخمین متغیرها با فیلتر کالمن در شکل‌های (۳) تا (۹) قابل ملاحظه است. موتور ۱۱ کیلووات مربوطه به صورت سالم و نیز تحت انواع عیب ناهم‌محوری با درصدهای مختلف و زیر بارهای متفاوت مورد عیب یابی و تخمین پارامتر قرار گرفت و نتایج حاصله در جدول (۲) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در تمامی موارد درجات ناهم‌محوری با دقت خوبی تخمین زده شده‌اند.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی ریاضی برای شبیه‌سازی موتور ناهم‌محور (استاتیکی، دینامیکی و مرکب) معرفی شد که نسبت به روش‌های دیگر مدل‌سازی، از پیچیدگی کمتری برخوردار است. در روش پیشنهادی می‌توان به تشخیص عیب و تخمین مقدار دقیق مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری پرداخت که این امکان در روش‌های متداول عیب‌یابی ناهم‌محوری موتور وجود ندارد. با مشاهده نتایج حاصل از فیلتر کالمن UKBF، مشخص می‌شود که این روش توانایی بسیار خوبی در تخمین مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری دارد و می‌تواند با اختلاف بسیار اندک به تخمین شدت عیب بپردازد. همچنین توسط این روش می‌توان به متغیرهای غیر قابل اندازه‌گیری، مانند شارهای پیوندی موتور دست یافت. همچنین می‌توان به منظور کاهش هزینه‌های

استاتور و روتور موتور سالم است نه به اندازه آن محور دوران روتور از محور استاتور جدا می‌شود، ρ_d (درجه ناهم‌محوری دینامیکی) کسری از فاصله هوایی موتور سالم است که به اندازه آن محور دوران روتور از محور روتور جدا می‌شود، α_s زاویه ناهم‌محوری استاتیکی یعنی زاویه خطی است که محور استاتور را به محور دوران روتور وصل می‌کند و به همین ترتیب α_d زاویه ناهم‌محوری دینامیکی یعنی زاویه خطی است که محور روتور را به محور دوران روتور وصل می‌کند.

۳- تبدیل معادلات موتور ناهم‌محور به قاب مرجع ساکن

با انتقال معادلات موتور به قاب مرجع ساکن می‌توان به معادلات و همچنین ماتریس‌های اندوکتانس به مراتب ساده‌تری نسبت به معادلات و ماتریس‌های موتور القایی ناهم‌محور در متغیرهای ماشین دست یافت. به این ترتیب با ساده سازی روابط مربوطه می‌توان حالت‌های مورد تخمین را نیز کاهش داد و از کمترین حالات بر حسب نیاز برای پیاده سازی فیلتر کالمن استفاده کرد. ماتریس‌های اندوکتانس منتقل شده به قاب مرجع ساکن برای موتور ناهم‌محور بصورت ماتریس‌های (۱۵)-(۱۷) هستند که در آن $M_i, i=(1,2,3,4)$ از روابط (۱۸)-(۲۱) بدست می‌آید. با تبدیل به قاب مرجع ساکن شکل ظاهری روابط (۱) و (۲) تغییر نمی‌کند اما محتوای بردارهای آن‌ها بصورت روابط (۲۲)-(۲۷) تغییر خواهد کرد. همچنین، ماتریس‌های مقاومت استاتور و روتور بدون تغییر می‌مانند.

۴- معادلات فضای حالت موتور ناهم‌محور

برای تخمین حالت‌ها و مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری در موتور القایی، باید معادلات فضای حالت مربوط به موتور ناهم‌محور استخراج شود. برای این منظور باید روابطی که برای شبیه‌سازی رفتار این موتور با عیب مذکور استفاده شده، برای استخراج معادلات حالت موتور بکار گرفته شوند. برای استفاده در فیلتر کالمن زمان پیوسته غیرخطی جهت عیب یابی موتور القایی باید فضای حالت سیستم دینامیکی موتور را به صورت روابط (۲۸)-(۳۰) نمایش داد که در آن $x(t)$ بردار حالت سیستم و $\dot{x}(t)$ مشتق آن، $u(t)$ به عنوان ورودی‌های سیستم، $w(t)$ و $v(t)$ بترتیب بردارهای نویز فرآیند و نویز اندازه‌گیری هستند. فرض می‌شود نویزها فرآیندهای گوسی با میانگین صفر و به ترتیب کواریانس Q و R هستند و $v(t)$ بردار متغیرهای اندازه‌گیری شده سیستم است. در این سیستم متغیرهای حالت و اندازه‌گیری به صورت روابط (۳۱)-(۳۵) انتخاب شده‌اند. همانگونه که قبلاً ذکر شد در روابط ذکر شده، ρ_s و ρ_d بترتیب مؤلفه استاتیکی و دینامیکی عیب ناهم‌محوری هستند.

۵- الگوریتم فیلتر کالمن UKBF

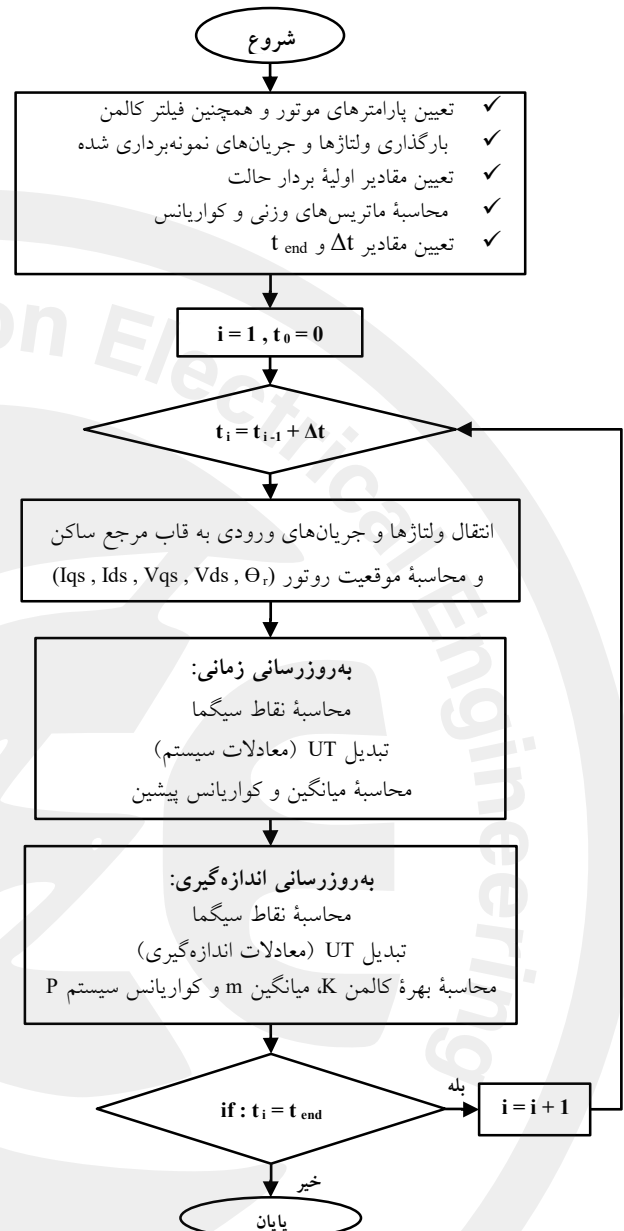
فیلتر کالمن اولین بار توسط رادولف امیل کالمن در سال ۱۹۶۰ میلادی با مقاله معروف [۱۰] مطرح شد. این فیلتر می‌تواند با استفاده از یک یا تعدادی از متغیرهای حالت سیستم دینامیکی، به تخمین دیگر متغیرهای سیستم که نمونه‌برداری از آنها امکان‌پذیر نیست و یا هزینه‌بر است بپردازد. همچنین فیلتر کالمن قادر به تخمین پارامترهایی از سیستم است که معادلات فضای حالت، تابعی از این پارامترها هستند [۱۱] و [۱۲]. در این فیلتر پروسه تخمین حالات با استفاده از سیگنال‌های ورودی و خروجی در دسترس از سیستم همجنب: مدار، فضای، حالت سیستم، انجام شده و عناصر

$[L] = \begin{bmatrix} L+L & -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & L+L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{1}{2}L & -\frac{1}{2}L & L+L \end{bmatrix} (3 \times 3)$	(۱)	$[L_{sr}] = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} (3 \times 3)$	(۲)
$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} (3 \times 3)$	(۳)	$L_m = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 l r}{g}$	(۴)
		$[L_{ss}]_{EF} = [L_{ss}] - (L_l [L_{lss}])$	(۵)
		$[L_{rr}]_{EF} = [L_{rr}] - (L_l [L_{lrr}])$	(۶)
		$[L_{sr}]_{EF} = [L_{sr}] - (L_l [L_{lsr}])$	(۷)
$L_l = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 l r \left(\frac{2 \left(1 - \sqrt{1 - \rho^2}\right) / \left(g \rho \sqrt{1 - \rho^2}\right)}{2} \right)^2$	(۸)		
$[L_{lss}] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_m)\cos(\alpha_m) & \cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m) & \cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m) \\ \cos(\alpha_m)\cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha_m)\cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$	(۹)		
$[L_{lrr}] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha)\cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha)\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha)\cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$	(۱۰)		
$[L_{lsr}] = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_m)\cos(\alpha) & \cos(\alpha_m)\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m)\cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha)\cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha_m - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha)\cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha_m + \frac{2\pi}{3})\cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$	(۱۱)		
$\alpha_m = \alpha_s + \tan^{-1} \left(\frac{\rho_d \sin(\theta_r - \alpha_s - \alpha_d)}{\rho_s + \rho_d \cos(\theta_r - \alpha_s - \alpha_d)} \right)$	(۱۲)	$L_{mEF} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi \mu_0 l r}{g \sqrt{1 - \rho^2}}$	(۱۳)
$\rho = \sqrt{(\rho_s^2 + \rho_d^2 + 2\rho_s\rho_d \cos(\theta_r - \alpha_s - \alpha_d))}$	(۱۴)		
$[L_{ss}]_{EF_{qdo}} = \begin{bmatrix} L_{ls} + M_1 & M_2 & 0 \\ M_4 & L_{ls} + M_3 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}$	(۱۵)	$[L_{rr}]_{EF_{qdo}} = \begin{bmatrix} L_{lr} + M_1 & M_2 & 0 \\ M_4 & L_{lr} + M_3 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix}$	(۱۶)
$[L_{sr}]_{EF_{qdo}} = [L_{sr}]_{EF_{qdo}}^T = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & 0 \\ M_4 & M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	(۱۷)	$M_1 = \frac{3}{2}(L_{mEF} - L_l \cos^2(\theta - \alpha_m))$	(۱۸)
		$M_2 = -\frac{3}{2}L_l \cos(\theta - \alpha_m) \sin(\theta - \alpha_m)$	(۱۹)
$M_3 = \frac{3}{2}(L_{mEF} - L_l \sin^2(\theta - \alpha_m))$	(۲۰)	$M_4 = -\frac{3}{2}L_l \sin(\theta - \alpha_m) \cos(\theta - \alpha_m)$	(۲۱)
$\vec{V}_s = [V_{qs} \quad V_{ds} \quad V_{os}]^T$	(۲۲)	$\vec{I}_s = [I_{qs} \quad I_{ds} \quad I_{os}]^T$	(۲۳)
		$\vec{\lambda}_s = [\lambda_{qs} \quad \lambda_{ds} \quad \lambda_{os}]^T$	(۲۴)

- [5] SB. Chaudhury, M. Sengupta, K. Mukherjee, "Experimental study of induction motor misalignment and its online detection through data fusion", IET Electronic Power Applications, vol. 7, no. 1, pp. 58-67, 2013.
- [6] M. Ojaghi, R. Aghmasheh, M. Sabouri, "Model-based exact technique to identify type and degree of eccentricity faults in induction motors", IET Electric Power Applications, vol. 10, no. 8, pp. 706-13, 2016.
- [7] V. H. Nguyen, D. W. Wang, A. Ukil, N. Sivakumar, V. Viswanathan, and J. Chandana, "A closed-form solution to fault parameter estimation and faulty phase identification of stator winding inter-turn fault in induction machines", 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc, 2016.
- [۸] ع. زکی پور، ش. شکری کجوری، م. سلیمی، "تشخیص و شناسایی خطا در ماشین القایی با استفاده از فیلتر کالمن غیرخطی UKF"، بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق، سال ۱۳۹۳ ایران-تهران.
- [9] L. Wu, B. Lu, X. Huang, T. G. Habetler, R. G. Harley, "Improved online condition monitoring using static eccentricity induced negative sequence current information in induction machines", 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society IECON, 2005.
- [10] R.E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Transactions of the ASME – journal of basic engineering, vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [11] R.E. Kalman, R.S. Bucy, "New results in linear filtering and prediction theory", Transactions of the ASME – journal of basic engineering, vol. 83, no. 1, pp. 95-108, 1961.
- [12] Z. Xinan, G. Foo, M.D. Vilathgamuwa, K.J. Tseng, B.S. Bhangu, C. Gajanayake, "Sensor fault detection isolation and system reconfiguration based on extended kalman filter for induction motor drives", IET Electronic Power Applications, vol. 7, no. 7, pp. 607-617, 2013.
- [13] S. Särkkä, "On unscented kalman filtering for state estimation of continuous-time nonlinear systems", IEEE transactions on automatic control, vol. 52, no. 9, pp. 1631-41, 2007.

جدول ۱: پارامترهای موتور تحت مطالعه

پارامترها	واحد	نماد اختصاری	مقادیر پارامترها
توان موتور	kW	P	۱۱
ولتاژ خط	V	V _L	۳۸۰
اتصال سیم‌پیچ	-	-	Δ
ممان اینرسی روتور	kg.m ²	J _m	۰/۰۶۲۵۰۲
مقاومت استاتور	Ω	r _s	۰/۸۷
مقاومت روتور (در حالت سکون)*	Ω	r _r	۲/۲۳
اندوکتانس پراکندگی استاتور	H	L _{ls}	۰/۰۰۵۲
اندوکتانس پراکندگی روتور	H	L _{lr}	۰/۰۱۲۳
تعداد قطب	-	p	۴
گشتاور بار نامی	N.m	T _N	۷۲/۲
فرکانس	Hz	f	۵۰
شعاع هسته روتور	mm	r	۷۴/۵۷
طول هسته روتور و استاتور	mm	l	۱۶۰
طول فاصله هوایی	mm	g	۰/۴۳۵
تعداد حلقه سیم‌پیچ استاتور در هر فاز	-	N _s	۱۶۲

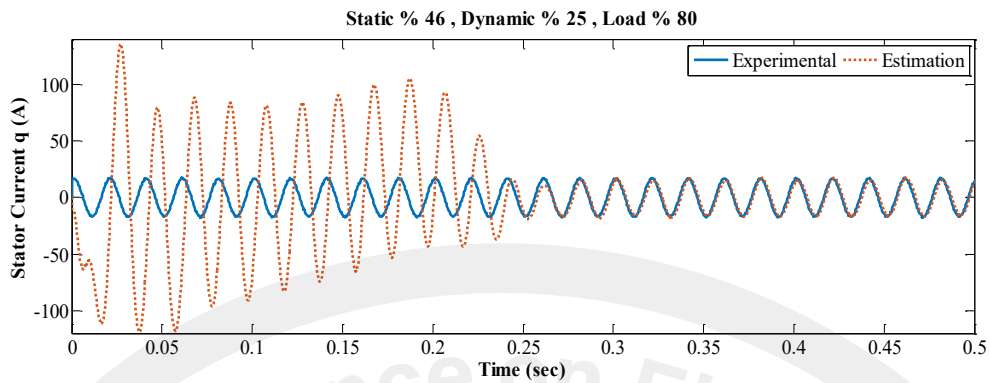


شکل ۲: الگوریتم فیلتر کالمن UKBF

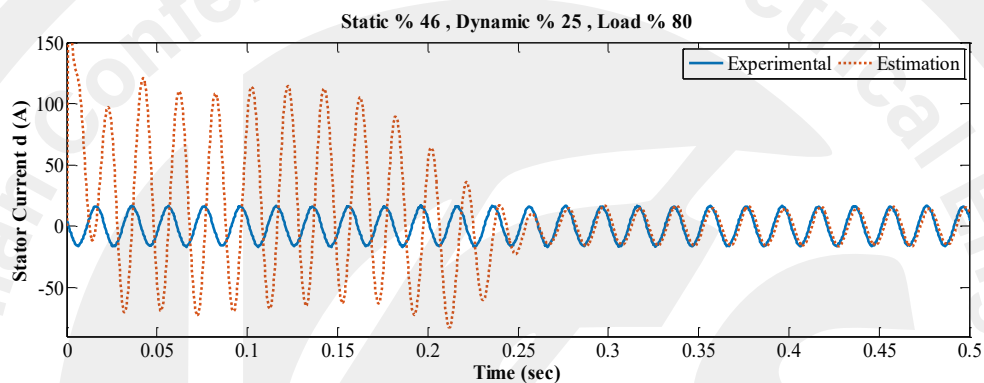
مراجع

- [1] Y. Liu, A.M. Bazzi, "A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art", ISA Transactions, vol. 70, pp. 400-407, 2017.
- [2] R.E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Transactions of the ASME – journal of basic engineering, vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [3] D. Hyun, S. Lee, J. Hong, S. Bin Lee, S. Nandi, "Detection of air-gap eccentricity for induction motors using the single phase rotation test", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, no. 3, pp. 689-96, 2012.
- [4] J. Faiz, M. Ojaghi, "Stator inductance fluctuation of induction motor as an eccentricity fault index", IEEE transactions on

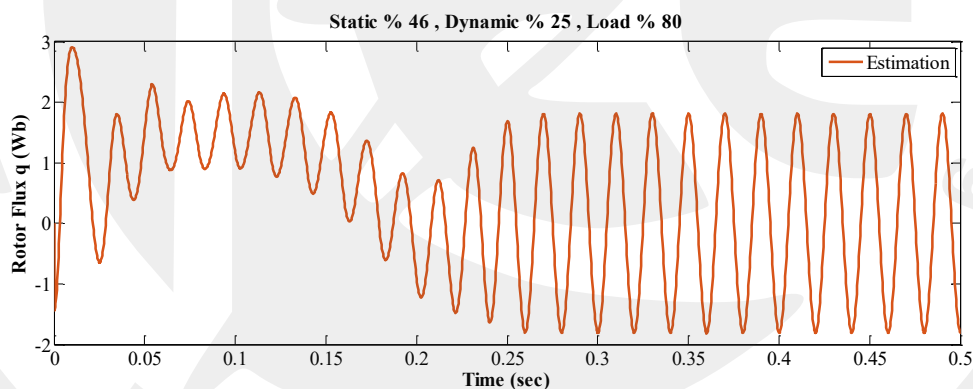
$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) + w(t), w \sim (0, Q)$	(۳۸)	$y(t) = h(x(t), t) + v(t), v \sim (0, R)$	(۳۹)
$\dot{x}(t) = \left[\frac{d}{dt} I_{qs} \quad \frac{d}{dt} I_{ds} \quad \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad \frac{d}{dt} \omega_r \quad \frac{d}{dt} \rho_s \quad \frac{d}{dt} \rho_d \right]^T$	(۳۰)	$x(t) = [I_{qs} \quad I_{ds} \quad \lambda_{qr} \quad \lambda_{dr} \quad \omega_r \quad \rho_s \quad \rho_d]^T$	(۳۱)
$\dot{x}(t) =$	$i_8 I_{qs} + i_9 I_{ds} + j_1 \lambda_{qr} + j_2 \lambda_{dr} + \frac{I}{l_{s1} c_6} V_{qs} + \frac{c_3}{c_6} V_{ds}$ $j_3 I_{qs} + j_4 I_{ds} + j_5 \lambda_{qr} + j_6 \lambda_{dr} + \frac{e_6}{e_9} V_{qs} + \frac{I}{l_{s3} e_9} V_{ds}$ $-\frac{r_r i_5}{i_7} I_{qs} - \frac{r_r i_6}{i_7} I_{ds} - \frac{r_r}{l_{r1} i_7} \lambda_{qr} + \left(\frac{r_r M_2}{l_{r1} l_{r3} i_7} + \omega_r \right) \lambda_{dr}$ $-\frac{r_r a_3}{a_5} I_{qs} - \frac{r_r a_4}{a_5} I_{ds} + \left(\frac{r_r M_4}{l_{r1} l_{r3} a_5} - \omega_r \right) \lambda_{qr} - \frac{r_r}{l_{r3} a_5} \lambda_{dr}$ $\frac{P}{2J_m} \left(\frac{3P}{4} \left(\begin{array}{l} (j_7 I_{qs} + j_8 I_{ds} + j_9 \lambda_{qr} + k_1 \lambda_{dr}) I_{qs} \dots \\ -(k_2 I_{qs} + k_3 I_{ds} + k_4 \lambda_{qr} + k_5 \lambda_{dr}) I_{ds} \end{array} \right) - T_L \right)$ 0 0		(۳۲)
$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + v(t)$	(۳۳)	$u(t) = (V_{qs}, V_{ds})$	(۳۴)
$\frac{d x(t)}{dt} = f(x(t), u(t), t) + L(t) w(t)$	(۳۶)	$y(t) = h(x(t), t) + M(t) v(t)$	(۳۷)
$K(t) = X(t) W h^T(X(t), t) [M(t) R(t) M^T(t)]^{-1}$	(۳۸)	$\frac{d m(t)}{dt} = f(X(t), u(t), t) w_m + K(t) [y(t) - h(X(t), t) w_m]$	(۳۹)
$\frac{d P(t)}{dt} = X(t) W f^T(X(t), u(t), t) + f(X(t), u(t), t) W X^T(t) + L(t) Q L^T(t) - K(t) M(t) R(t) M^T(t) K^T(t)$			(۴۰)
$X(t) = [m(t) \dots m(t)] + \sqrt{c} [0 \quad \sqrt{P(t)} \quad -\sqrt{P(t)}]$			(۴۱)
$c = \alpha^2 (n + \kappa)$	(۴۲)	$w_m = [W_m^{(0)} \dots W_m^{(2n)}]^T$	(۴۳)
$W = (I - [w_m \dots w_m]) \times \text{diag}([W_c^{(0)} \dots W_c^{(2n)}]) \times (I - [w_m \dots w_m])^T$			(۴۴)
$W_m^{(0)} = \frac{\lambda}{(n + \lambda)}$	(۴۵)	$W_m^{(i)} = \frac{1}{2(n + \lambda)}, i = 1, \dots, 2n$	(۴۶)
$W_c^{(0)} = \frac{\lambda}{(n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta)}$	(۴۷)	$W_c^{(i)} = \frac{1}{2(n + \lambda)}, i = 1, \dots, 2n$	(۴۸)



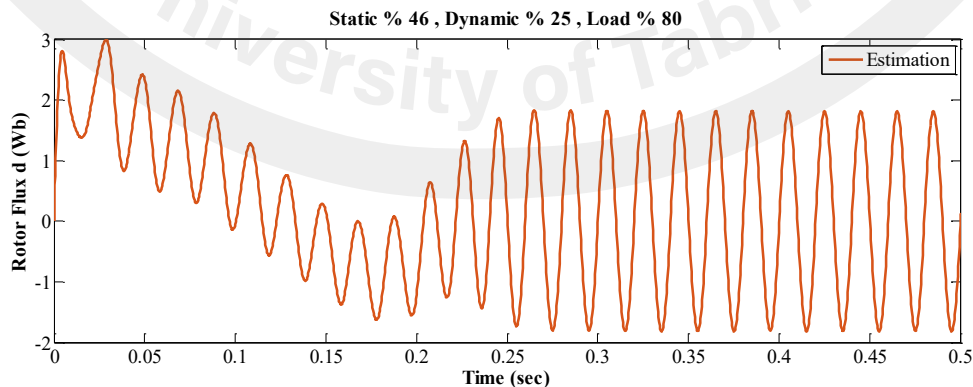
شکل ۳: جریان استاتور در محور q تحت ۸۰٪ بار نامی با ۴۶٪ مؤلفه استاتیکی و ۲۵٪ مؤلفه دینامیکی عیب ناهم‌محوری



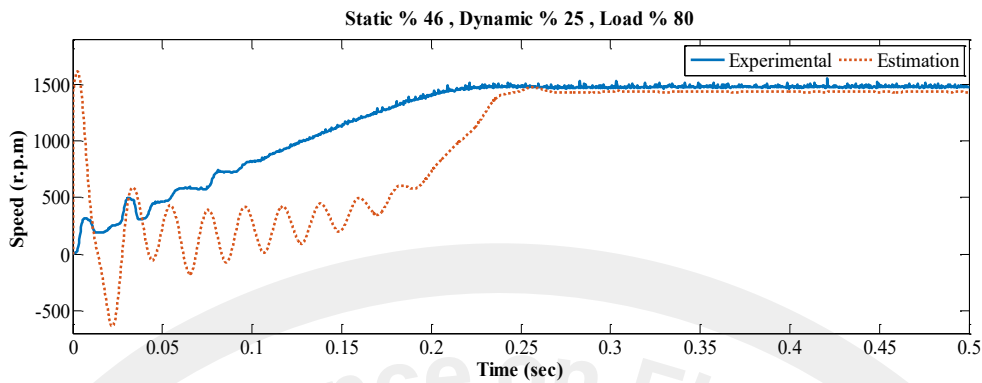
شکل ۴: جریان استاتور در محور d تحت ۸۰٪ بار نامی با ۴۶٪ مؤلفه استاتیکی و ۲۵٪ مؤلفه دینامیکی عیب ناهم‌محوری



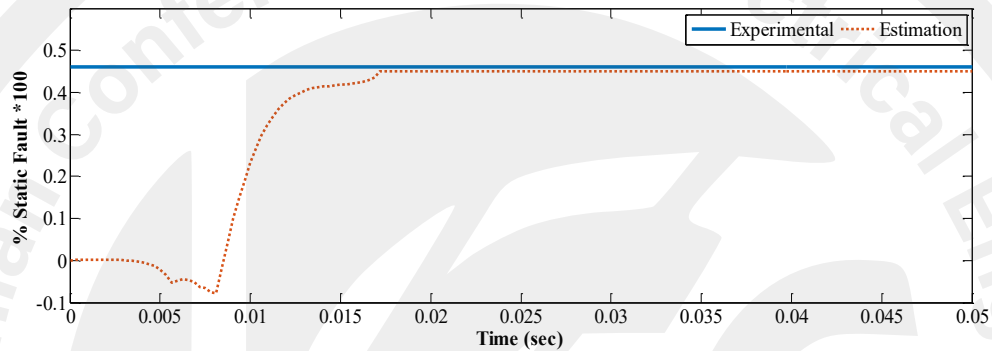
شکل ۵: شارپیوندی روتور در محور q تحت ۸۰٪ بار نامی با ۴۶٪ مؤلفه استاتیکی و ۲۵٪ مؤلفه دینامیکی عیب ناهم‌محوری



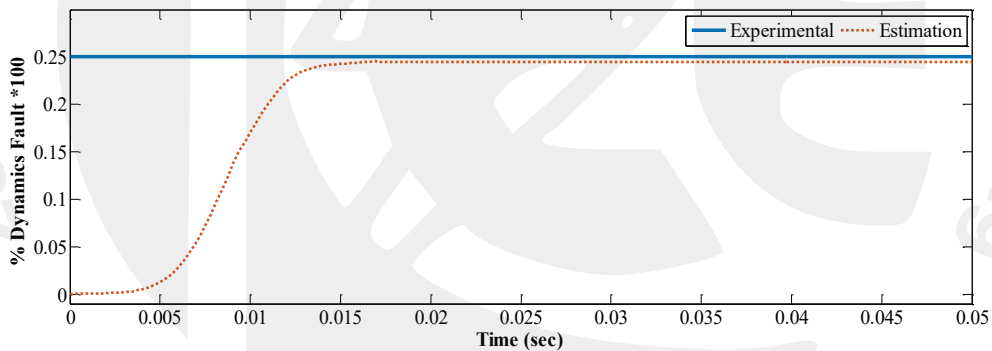
شکل ۶: شارپیوندی روتور در محور d تحت ۸۰٪ بار نامی با ۴۶٪ مؤلفه استاتیکی و ۲۵٪ مؤلفه دینامیکی عیب ناهم‌محوری



شکل ۷: سرعت زاویه‌ای روتور تحت ۸۰٪ بار نامی با ۴۶٪ مؤلفه استاتیکی و ۲۵٪ مؤلفه دینامیکی عیب ناهم‌محوری
Static % 46 , Dynamic % 25 , Load % 80



شکل ۸: مؤلفه استاتیکی عیب ناهم‌محوری تحت ۸۰٪ بار نامی
Static % 46 , Dynamic % 25 , Load % 80



شکل ۹: مؤلفه دینامیکی عیب ناهم‌محوری تحت ۸۰٪ بار نامی

* بدلیل دوقفسی بودن روتور با افزایش سرعت، مقاومت روتور به یک سوم مقدار ارائه شده در جدول، کاهش می‌یابد

جدول ۲: تخمین مؤلفه‌های عیب ناهم‌محوری با فیلتر کالمن UKBF برای انواع عیب، زیر بارهای مختلف

تخمین مؤلفه‌های عیب ناهم-محوری		درصد مؤلفه‌های عیب ناهم-محوری موتور		گشتاور بار موتور درصد بار نامی
دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	
٪۰/۰۰۰۰۱	٪۰/۰۰۰۰۱	۰	۰	٪۵۰
٪۰/۰۰۰۰۹۹	٪۳۶/۰۳	۰	٪۳۶	٪۵۰
٪۳۸	٪۰/۰۰۱	٪۳۸	۰	٪۵۰
٪۳۸/۶	٪۲۳/۰۱	٪۳۸	٪۲۳	٪۲۰
٪۲۴/۹۸	٪۲۳/۱	٪۲۵	٪۲۳	٪۵۰
٪۱۱/۴۳	٪۱۱/۳	٪۱۱/۵	٪۱۱/۵	٪۲۰
٪۲۴/۴۵	٪۴۴/۹۸	٪۲۵	٪۴۶	٪۸۰