

ارزیابی و مدل سازی قابلیت اطمینان موتور پرماسین با هدف بهبود عملکرد آن

جواد شیخ هفشجانی

(نویسنده مسؤل) دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
jsheikh@stu.yazd.ac.ir

محمدصابر فلاح نژاد

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. fallahnezhad@yazd.ac.ir

چکیده: موتور پرماسین یک سیستم حیاتی مأموریت محور است که عدم کارایی آن باعث شکست مأموریت اصلی و خسارات جبران ناپذیر می شود. مطالعات جامع و دقیق بر روی قابلیت اطمینان آن می تواند گامی در جهت بهبود عملکرد این سیستم باشد. هدف اصلی در این مقاله، آنالیز قابلیت اطمینان موتور پرماسین شامل زیرسیستم های موتور، درایو، خنک کاری و سیستم اندازه گیری، کنترل و مانیتورینگ در سناریوهای از پیش تعیین شده است. در این مقاله، ابتدا به بیان ساختار موتور پرماسین به عنوان سیستم مورد مطالعه پرداخته و ساختار شکست محصول برای این سیستم ترسیم می گردد. با توجه به مأموریت محور بودن این سیستم، ۲ سناریو زمانی و حالت عملکرد نقطه ای بر اساس عملکرد شناور برای این سیستم تعریف خواهد شد. نرخ خرابی برای قطعات حساس از استاندارد Mil HDB-217 و برای مابقی قطعات از استاندارد NPRD-95 و کاتالوگ سازندگان معتبر در دو حالت خوش بینانه و بدبینانه محاسبه و تعیین خواهد شد. با استفاده از ساختار شکست نحوه ارتباط هر کدام از اجزاء سیستم مشخص شده و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان در نرم افزار Reliability Workbench ترسیم می گردد. در نهایت قابلیت اطمینان زیرسیستم ها و سیستم مورد مطالعه برای هر دو سناریو کاری به صورت مجزا محاسبه می گردد. نتایج نشان می دهد که زیرسیستم درایو و موتور در توان نامی، دارای کمترین سطح قابلیت اطمینان نسبت به زیرسیستم های دیگر است.

واژگان کلیدی: قابلیت اطمینان، موتور پرماسین، تحلیل حالات و اثرات خرابی، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان، نرخ خرابی، مقدمه

آن، میزان خرابی کم و قابلیت اطمینان بالا از این سیستم انتظار می رود. مطالعات جامع و دقیق بر روی قابلیت اطمینان این سیستم می تواند گامی در جهت بهبود عملکرد آن باشد. توجه به قابلیت اطمینان به خصوص در مورد سیستم هایی که در شرایط عملکردی سخت فعالیت می کنند، از جمله سیستم های نظامی، اهمیت زیادی دارد. برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم ها دو روش با عنوان روش های تحلیلی و شبیه سازی رایانه ای وجود دارد، که از مهمترین روش های تحلیلی می توان روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و روش آنالیز درخت خرابی نام برد. اما با توجه به اینکه سیستم یادشده شامل اجزاء خاص بوده که به دلایل الزامات طراحی، عملکردی و محدودیت های فنی از یک طرف و محدودیت های تأمین، دسترسی نداشتن به اطلاعات دقیق

۱- مقدمه

موتورهای سنکرون آهنربای دائم^۱ دارای بازده بالا (در محدوده ی گسترده از توان خروجی)، چگالی توان زیاد، تلفات حداقل (به دلیل عدم وجود سیستم تحریک و تلفات ناشی از آن)، حجم و وزن کم، قابلیت اطمینان بالا در سرعت های زیاد، حداقل بودن ریپل گشتاور خروجی، هزینه تعمیرات پایین و ... می باشد که در صنایع نظامی، خودروسازی، پزشکی و ... بسیار پرکاربرد است. این سیستم در صنایع نظامی به خصوص در سیستم پیشران الکتریکی شناورها کاربرد وسیعی دارد و با توجه به ماهیت حساس

Corresponding Author: jsheikh@stu.yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

دوره ۱۳ / شماره ۱

صفحات ۴۳-۵۸

1. Permanent magnet Synchronous (Permasyn)

اطمینان در سیستم توربین بادی می‌پردازد. به این منظور از مدل بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان برای مدل‌سازی مسئله بهره‌گرفته شده است که توانمندی بالایی در تحلیل سیستم‌های پیچیده و با تعداد اجزای بالا دارد. در [۸]، یک مدل قابلیت اطمینان مارکوف را برای درایوهای موتور القایی ارائه می‌کند. این مدل شامل خطا در ادوات الکترونیک قدرت، ماشین، انکودر و سنسورهای جریان است. در [۹]، یک بررسی جامع از ارزیابی قابلیت اطمینان و بهبود سیستم‌های الکترونیک قدرت در سه سطح ارائه شده که هدف آن ارائه تصویری روشن از چشم‌انداز تحقیقات قابلیت اطمینان در حوزه الکترونیک قدرت است. در [۱۰]، به مدل‌سازی قابلیت اطمینان و ارزیابی مسائل مربوط به موتور وسایل نقلیه الکتریکی، با استفاده از آنالیز درخت خطا و شبکه‌های تصادفی پتری^۳ پرداخته است. در [۱۱]، ارزیابی قابلیت اطمینان درایو موتور سویچ رلوکتانس^۴ تحت یک استراتژی کنترل خاص با استفاده از فرآیند مارکوف و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان ارائه شده است. در مرجع [۱۲]، به ارزیابی قابلیت اطمینان اینورترهای ۳ فاز و ۵ فاز برای کاربرد پیش‌ران‌های دریایی با استفاده از روش فرآیند مارکوف پرداخته است. در [۱۳]، با استفاده از یک مدل آنالیز فرسودگی چندعاملی به ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم عایق الکتروموتور ماشین‌های هیبریدی تحت تنش‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی پرداخته است. در [۱۴]، با بیان اینکه خرابی‌های موتور الکتریکی بیشتر در سیستم بیرینگ اتفاق می‌افتد، به تخمین طول عمر بیرینگ‌های موتور القایی با استفاده از تست عمر شتابدار پرداخته و نتایج آن را با استاندارد ISO 281 مقایسه نموده است. در [۱۵]، برای مطالعه جامع و دقیق قابلیت اطمینان موتور، به ارزیابی قابلیت اطمینان درایو و کنترل‌کننده موتور با استفاده از روش آنالیز درخت خطا می‌پردازد. در [۱۶]، یک روش کلی پیش‌بینی قابلیت اطمینان برای مبدل‌های قدرت با توجه به علل خرابی در اجزای مستعد خرابی ارائه شده و این روش برای یک اینورتر سه‌فاز فتوولتائیک به‌کار می‌رود و قابلیت اطمینان آن تحت دو شرایط عملیاتی در طول عمر مفید و دوره فرسودگی پیش‌بینی شده است. در [۱۷]، با بیان اینکه ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم موتور سوئیچ رلوکتانس^۵ می‌تواند پیوندهای ضعیف را نشان دهد، به ارزیابی کمی قابلیت اطمینان سیستم SRM با استفاده از روش شبکه

نرخ‌های خرابی اکثر اجزاء و قابلیت اطمینان آنها از طرف دیگر، ارائه روشی به منظور تخمین و ارزیابی قابلیت اطمینان ضروری است.

مطالعات اخیر در خصوص موضوع قابلیت اطمینان که اغلب در قالب پایان‌نامه، مقاله و گزارش‌های علمی انجام شده‌اند و در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ اجمالاً به شرح زیر هستند.

در [۱]، به پیاده‌سازی مدل قابلیت اطمینان برای نیروگاه فردوسی پرداخته است. برای انجام اینکار با استفاده از اطلاعات آرشو نیروگاه فردوسی مشهد، داده‌های مورد نیاز قابلیت اطمینان استخراج و بر اساس آن شاخص‌های قابلیت اطمینان بدست آمده‌است و بر اساس این شاخص‌ها، نقاط ضعف سیستم مشخص گردیده و برای بهبود آنها، راهکارها و شیوه‌های تعمیر و نگهداری خاصی عنوان شده است. در [۲]، به محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم الکترونیک دوربین فضایی با استفاده از روش بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان و استاندارد Mil-217 پرداخته شده است. در [۳]، روشی برای محاسبه قابلیت اطمینان یک زیردریایی که دارای چهار زیرسیستم (برق، فرعی، رادیو الکترونیک و رانش) ۹ مرحله‌ای است، طراحی و ارائه شده است. در [۴]، با بکارگیری آنالیز درخت خرابی و همچنین بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان^۲ به بررسی قابلیت اطمینان مجموعه یکسوکننده درسیستم تولید برق زیردریایی هوشمند شامل موتور دیزل ژنراتور ساحلی و یکسوکننده پرداخته شده و با بکارگیری آن، قابلیت اطمینان مجموعه یکسوکننده محاسبه شده و تغییرات طراحی در راستای افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی پیشنهاد گردیده است. در [۵]، پس از بررسی مختصر مکانیزم پیل سوختی متانولی مستقیم، قابلیت اطمینان این سیستم با توجه به نرخ خرابی اجزاء آن و با استفاده از توزیع نمایی به صورت تابعی از زمان محاسبه شده و پس از پیاده‌سازی در نرم‌افزار، میزان در دسترس‌پذیری سیستم با رویکرد زنجیره مارکوف محاسبه شده است. در [۶]، با بیان اینکه سیستم تولید انرژی در زیردریایی به‌عنوان قلب زیردریایی و یکی از سیستم‌های اصلی آن تلقی می‌شود و اطمینان از صحت عملکرد آن در شرایط معین و مدت زمان مشخص اهمیت زیادی دارد، با استفاده از مدل‌سازی قابلیت اطمینان به‌روش بلوک دیاگرام، قابلیت اطمینان اولیه سیستم را تخمین و با اتخاذ دو رویکرد ارتقاء "قابلیت اطمینان" اجزاء و تکنیک ایجاد "افزونگی"، به بهینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم پرداخته است. در [۷]، با رویکردی آماری/شبیه‌سازی به تحلیل پارامترهای قابلیت

3. Extended Stochastic Petri Nets(ESPN)
4. Switched Reluctance Motor Drive(SRD)
5. Switched Reluctance Motor(SRM)

www.pqprc.ir

2. Reliability block diagram(RBD)

نشریه مهندسی و مدیریت کیفیت

برای هر کدام از اجزاء سیستم، قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های موتور پرماسین^۶ برای هر دو سناریو کاری محاسبه می‌گردد.

۲- مفاهیم اساسی در مهندسی قابلیت اطمینان

۲-۱- قابلیت اطمینان^۷

قابلیت اطمینان میزان قابلیت و توانایی انجام کار بدون خطا و شکست محصول با تجهیزات است و ارزیابی این قابلیت ما را قادر به شناسایی علل شکست و اقدام جهت پیشگیری و کنترل علل می‌کند. به عبارت دقیق‌تر قابلیت دوام، احتمال این است که یک محصول کار پیش بینی شده خود را طی یک دوره تعیین شده تحت شرایط محیطی معین بطور رضایت بخش انجام دهد [25]. تابع قابلیت اطمینان به صورت رابطه ۱ نمایش داده می‌شود.

$$R(T) = p(T \geq t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (1)$$

۲-۲- مدل‌سازی بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان

بلوک دیاگرام فیزیکی با نگاشت بلوک‌های مربوطه بر روی بلوک دیاگرام کارکردی و بر اساس مدل‌های سری، موازی و یا ترکیبی، ترسیم می‌گردد. به منظور محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم نیز نیاز است ابتدا قابلیت اطمینان اجزاء را محاسبه نموده و سپس بر اساس مدل ترسیم شده، جهت تحلیل، تخمین و محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم، اقدام می‌شود [7]. روش قراردادن قطعات (به صورت موازی، سری و یا ترکیبی) همچنین تعداد قطعات، بر قابلیت اطمینان کل سیستم اثر می‌گذارد [7].

۲-۲-۱- شبکه سری

شکل ۱ نمونه‌ای از ساختار سری را نمایش می‌دهد. از دیدگاه قابلیت اطمینان برای عملکرد صحیح سیستم شبکه سری باید همه آن در حال کار باشد و بنابراین از کار افتادن هر یک از اعضا موجب از کار افتادن سیستم می‌شود. قابلیت اطمینان سیستم سری به صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شود. R_s قابلیت اطمینان کل سیستم سری و R_i قابلیت اطمینان هر جزء محسوب می‌شود.

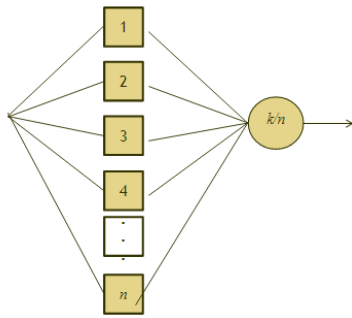
بیزین پرداخته است. در [۱۸]، یک طرح ارزیابی قابلیت اطمینان جدید برای دستیابی به انتخاب بهینه استراتژیهای کنترل برای سیستم ماشین سوئیچ رلوکتانس از منظر قابلیت اطمینان ارائه شده است. برای شروع، یک مدل ترکیبی از مدل k-out-of-n: G و مدل مارکوف برای کاهش پیچیدگی و افزایش دقت ارزیابی قابلیت اطمینان در سطح سیستم ارائه شده است. در [۱۹]، به تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم موتور سنکرون آهنربای دائم ده فاز با روتور و استاتور دوپل و تحمل پذیری در برابر خطا، با استفاده از روش فرآیند مارکوف پرداخته است.

سیستم مورد مطالعه، موتور سنکرون آهنربای دائم ۱۲ فاز (موتور پرماسین) ساخت شرکت زیمنس آلمان است که در پیشران الکتریکی شناورها بکار می‌رود. با توجه به مطالعات انجام شده در بخش پیشینه تحقیق به دلیل گستردگی و پیچیدگی سیستم مورد نظر، در این مقاله روش RBD بهترین روش برای ارزیابی و مدل‌سازی قابلیت اطمینان سیستم انتخاب شده است. از آنجا که سیستم مورد مطالعه در این مقاله به دلیل در مرحله طراحی بودن آن و به عنوان یک محصول جدید، عدم امکان تست بسیاری از اجزاء و دسترسی نداشتن به نرخ خرابی‌ها در محیط کارکردی از یک طرف و استفاده از قطعات صنعتی متفرقه و ناهمگون، هزینه بالا، محدودیت‌ها در تأمین و تست‌های تحلیل خرابی اجزاء، از استانداردهایی مانند Mil-217، NSWC، NPRD-95 جهت تعیین نرخ خرابی استفاده شده است.

در این مقاله، با استفاده از ساختار شکست سیستم به ارزیابی قابلیت اطمینان ۴ زیرسیستم اصلی موتور، درایو، خنک‌کاری و کنترل و مانیتورینگ در ۲ سناریو کاری (بر اساس عملکرد شناور) به روش RBD می‌پردازیم. با توجه به ماموریت محور بودن سیستم مورد مطالعه، ۲ سناریو زمانی و حالت عملکرد نقطه‌ای بر اساس عملکرد شناور برای این سیستم تعریف خواهد شد. با این وجود نرخ خرابی در هر سناریو برای برخی قطعات حساس متفاوت خواهد بود که نیاز به محاسبه با استفاده از استاندارد Mil-217 خواهد داشت. همچنین با توجه به عدم دسترسی به نرخ خرابی برخی قطعات، با استفاده از استاندارد NPRD-95 و کاتالوگ سازندگان معتبر، نرخ خرابی را در دو بازه خوش‌بینانه‌ترین و بدبینانه‌ترین شرایط تعیین می‌کنیم. در نهایت، با شناسایی اصول عملکرد سیستم‌ها و زیرسیستم‌ها، بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان در نرم‌افزار Reliability Workbench ترسیم خواهد شد. با تعیین و محاسبه نرخ خرابی بر اساس سناریو کاری

⁶ Permanent magnet synchronous

⁷ Reliability



شکل ۳- سیستم n از k

برای n جزء یکسان (یعنی مقادیر قابلیت اطمینان یکسان)، قابلیت اطمینان سیستم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P(x) = \binom{n}{x} R^x (1-R)^{n-x}$$

$$R_s = \sum_{x=k}^n P(x) \quad (۱)$$

۲-۲-۲ Reliability workbench Isograph نرم‌افزار

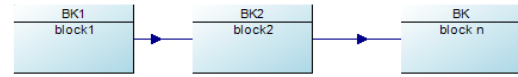
Isograph Reliability Workbench نرم‌افزار تجزیه و تحلیل و تست ایمنی و پایایی می‌باشد که توسط شرکت نرم‌افزاری Isograph منتشر شده است. این نرم‌افزار و سایر مجموعه‌های نرم‌افزاری وابسته از سال ۱۹۸۰ تا به اکنون در حال توسعه و عیب‌یابی بوده و امروز به یک استاندارد جامع در عرصه تست پایایی و ایمنی تبدیل شده است. این نرم‌افزار به دلایل مختلفی نظیر پیش‌بینی‌های دقیق در حوزه تحلیل و بررسی اطمینان و پایایی سیستم‌های مختلف، پشتیبانی از انواع داده‌ها و روش‌های اطلاعاتی موجود، تحلیل امنیت در سطح‌های کلان شرکتی و سازمانی و... به یکی از محبوب‌ترین نرم‌افزارهای تست و بررسی ایمنی و پایداری در نزد متخصصان و مهندسان تبدیل شده است. این نرم‌افزار از ۱۰ ماژول جداگانه تشکیل شده است که هر کدام دارای کاربرد و قابلیت‌های منحصر به فردی است. به منظور ایجاد مدل بلوک دیاگرام، از این نرم‌افزار استفاده می‌شود [۲۲].

۲-۳- روش‌های مختلف تعیین قابلیت اطمینان

روش‌های مختلفی برای تعیین قابلیت اطمینان قطعات وجود دارد. اولین و بهترین روش استفاده از آمار مربوط به خرابی قطعه در گذشته است. با داشتن این آمار می‌توان منحنی عمری را که به بهترین حالت با روش آمار خرابی داده‌های موجود مطابقت دارد

$$R_s = R_1 * R_2 * \dots * R_n \quad (۲)$$

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (۳)$$



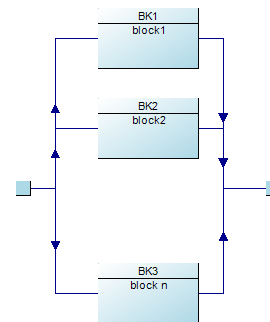
شکل ۱: بلوک دیاگرام سری

۲-۲-۲ شبکه موازی

شبکه موازی برای سیستم‌های با عضو مازاد بکارگرفته می‌شوند. در این سیستم‌ها بلوک‌ها به صورت موازی به هم وصل می‌شوند. برای خرابی سیستم، باید همه بلوک‌های موجود در اتصال موازی دچار خرابی شوند. شکل ۲ نشان‌دهنده این امر است. قابلیت اطمینان سیستم موازی به صورت روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود. R_p قابلیت اطمینان کل سیستم موازی و R_i قابلیت اطمینان هر جزء محسوب می‌شود.

$$R_p = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) \dots (1 - R_n) \quad (۴)$$

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (۵)$$



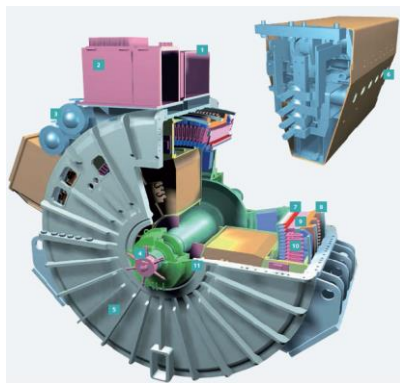
شکل ۲- بلوک دیاگرام موازی

۲-۲-۳ سیستم k از n

گاهی اوقات، یک سیستم به گونه ای است که k تا از n اجزای آن باید برای عملکرد سیستم کار کند. شکل ۳ نشان‌دهنده سیستم k از n است.

۳- ساختار سیستم مورد مطالعه

موتور پرماسین یک موتور سنکرون با سیستم خنک‌کاری آب، تحریک آهنربای دائم و سیم‌پیچی استاتور ۱۲ فاز است. سیم‌پیچ‌های هر فاز، با استفاده از اینورترهای کنترل‌شده با پالس از طریق باس DC تغذیه می‌شوند. سیستم اینورتر بخشی از موتور است. سیم‌پیچ هر قسمت به دو فاز یکسان تقسیم می‌شود و از هم مجزا هستند. هر فاز توسط یک ماژول اینورتر کنترل‌شده با پالس جداگانه تغذیه می‌شود. مجموعه کامل ماژول‌های اینورتر توسط دو فیدر الکتریکی مستقل تغذیه می‌شود. هر مجموعه از سیم‌پیچ‌ها، ماژول‌های اینورتر و فیدرها بخش مستقلی از مدار قدرت موتور را تشکیل می‌دهند. با تغییر تنظیمات کنترل اینورتر، جریان فاز و در نتیجه گشتاور موتور را می‌توان به طور بی‌نهایت در کل محدوده عملیاتی تغییر داد.



شکل ۴- پیکربندی سیستم

شکل ۴ پیکربندی موتور و ماژول درایو را نشان می‌دهد که هر کدام از اجزاء آن به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- ۱- پمپ خنک‌کننده ۸-۲ سیستم مانیتورینگ و کنترل سرعت ۹
- ۳- مبدل حرارتی ۱۰-۴ سنسور موقعیت روتور ۵- محافظ بیرونی بیرینگ ۶- روتور با آهنربای دائم ۷- ماژول اینورتر یکپارچه ۸-رینگ خنک‌کننده آب ۹-هسته استاتور ۱۰- سیم‌پیچ استاتور ۱۱- بیرینگ.

را به عنوان منحنی تابع طول عمر آن قطعه در نظر گرفت و با داشتن تابع طول عمر، سایر توابع و شاخص‌های مربوط به قابلیت اطمینان را تعیین نمود. پیشگویی دقیق قابلیت اطمینان یک سیستم تنها زمانی امکان‌پذیر است که نرخ خرابی قطعات یا واحدهای پایه آن سیستم مشخص باشند. پس از پیشگویی نرخ خرابی قطعات یا واحدهای پایه، می‌توان قابلیت اطمینان آنها را به کمک روابط و توابع مربوطه پیشگویی کرد. روش‌های مختلفی جهت پیشگویی نرخ خرابی قطعات وجود دارد که مهمترین آنها عبارت‌اند از : ۱- روش آمار خرابی در شرایط عملکرد واقعی یا تست‌های میدانی ۲- روش تست عمر شتابدار ۳- روش استفاده از استانداردها یا اسناد مرجع ۴- روش استفاده از کاتالوگ و بروشور ۵- روش استفاده از حدس مهندسی (استفاده از نظر خبره) ۶- روش کیم.

۲-۱-۳ توزیع نمایی

متداولترین توزیع آماری است که در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها به کار می‌رود. وضعیتی از یک موجود را در نظر بگیرید که تحت شرایط کارکرد در معرض شوک‌هایی قرار می‌گیرد که در طول زمان وقوع آن‌ها داری توزیع پواسون و با نرخ ثابت است و هر شوک می‌تواند سیستم را از کار بیندازد. این شوک‌ها کاملاً تصادفی بوده و بنابراین دارای توزیع یکنواخت هستند. در این حالت فاصله بین شوک‌ها (طول عمرموجود) دارای توزیع نمایی است [۵]. مهمترین ویژگی توزیع نمایی یا بهتر است بگوییم توزیع با نمای منفی که در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها به کار می‌رود، ثابت بودن اهنک و وقوع خطر است که با نام اهنک زمان از کار افتادن شناخته شده و با λ نمایش داده می‌شود. احتمال سالم ماندن قطعه‌ای برای مدت زمان t وقتی اهنک از کار افتادن آن ثابت و مستقل از زمان است، از روابط ۷ و ۸ پیروی می‌کند [۲۴].

$$R(t) = \exp\left(-\lambda \int_0^t dx\right) = e^{-\lambda t} \quad (7)$$

در نتیجه توزیع تجمعی آن برابر است با:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad . \leq t \leq \infty \quad (8)$$

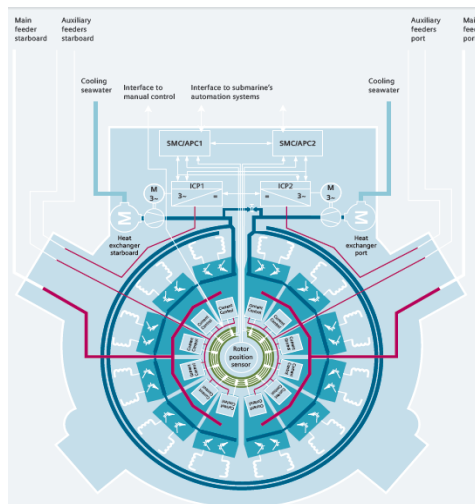
میانگین زمان منتهی به خرابی سیستم برابر $1/\lambda$ و انحراف استاندارد $1/\lambda^2$ می‌باشد [24].

8. Cooling pump supply(ICP)

9. Speed and Monitoring Computer (SMC/APC)

10. Heat exchangers

- دمای محیط در موتورخانه: ۰ درجه سانتیگراد تا ۴۵ درجه سانتیگراد
- دمای آب دریا به عنوان خنک کننده: حداکثر ۳۲ درجه سانتیگراد
- رطوبت مداوم هوا در موتورخانه: حداکثر ۸۰٪ در دمای ۰ تا ۴۵ درجه سانتی گراد
- فشار اتمسفر در موتورخانه: به صورت ثابت ۸۰۰ Mbar تا ۱۴۰۰ Mbar به طور متناوب تا ۶۰۰ Mbar
- موارد زیر برای جابه جایی و ذخیره سازی موتورها (پرز آب خنک کننده) اعمال می شود:
- دمای محیط: ۰ درجه سانتیگراد تا ۷۰ درجه سانتیگراد.
- رطوبت هوا به طور مداوم حداکثر ۸۰٪ به طور موقت تقریباً ۱۰۰٪.



شکل ۵- بررسی جزئیات و اصول طراحی موتور پرماسین [۲۵]

در شکل ۵ جزئیات و ارتباط هر کدام از اجزاء نشان داده شده است. موتور ۱۲ فاز بوده و به ۲ بخش تقسیم می شود. هر بخش دارای ۶ فاز، ۶ ماژول درایو و ادوات اندازه گیری مخصوص خواهد بود. تغذیه سیم پیچ ها و ماژول های درایو از طریق فیدر اصلی که از باتری خانه تغذیه می شود، صورت خواهد گرفت. ساختار درایو و سیم پیچ ها طوری تعبیه شده که برای توان بالای ۵۰۰ kW به هر ۱۲ ماژول باید دسترسی داشته باشیم، اما برای توان کمتر از ۵۰۰ kW دسترسی به ۶ ماژول کافی است. ادوات اندازه گیری مانند از طریق فیدر کمکی تغذیه شده و توسط سیستم مانیتورینگ و کنترل، نظارت می شود. برای هر کدام از اجزاء سیستم کنترل و مانیتورینگ، رزرو هم تعبیه شده است. همچنین سیستم طوری تعبیه شده که هر بخش دارای یک سیستم خنک کاری به صورت مجزا است تا در صورت از کار افتادگی سیستم خنک کاری یک بخش، با استفاده از بای پس تعبیه شده بتوان از یک سیستم خنک کاری برای کل سیستم استفاده کرد.

۳-۱- مشخصات و داده های فنی

❖ شرایط محیطی

سیستم برای کار در یک فضای مملو از نمک مناسب بوده و موارد زیر جهت عملکرد بدون محدودیت اعمال می شود:

❖ داده های الکتریکی

موتور در محدوده ولتاژ حداقل ۳۰۰ تا ۵۶۰ ولت DC کار می کند. حداکثر توان خروجی موتور تقریباً ۱ مگاوات است. همچنین موتور می تواند با گشتاور ۱۱۰٪ مقدار نامی خود برای مدت زمان حداکثر ۲ دقیقه کار کند. حداقل سرعت نامی با توجه به یاتاقان های روغنکاری تقریباً ۲۰۰ rpm لازم است.

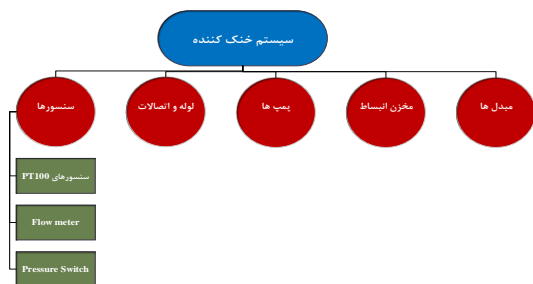
۳-۲- ساختار شکست^{۱۱}

ساختار شکست محصول ابزاری است برای آنالیز، مستندسازی و ارتباط خروجی های پروژه و تشکیل دهنده بخشی از تکنیک برنامه ریزی بر مبنای محصول می باشد. ساختار شکست جهت آنالیز FMEA و مدل سازی قابلیت اطمینان سیستم ها استفاده می شود. زیرسیستم های اصلی جهت استخراج ساختار شکست موتور به صورت زیر تقسیم بندی می شود:

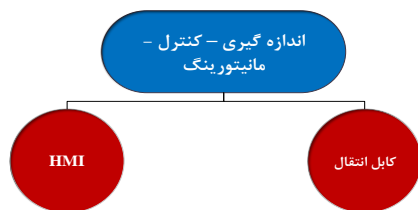
- موتور
- درایو
- خنک کاری
- اندازه گیری، کنترل و مانیتورینگ

شکل ۶ نشان دهنده سطوح ساختار شکست موتور پرماسین بوده که شامل ۵ زیر سطح می شود.

¹¹. Product breakdown structure



شکل ۸- ساختار شکست خنک‌کننده

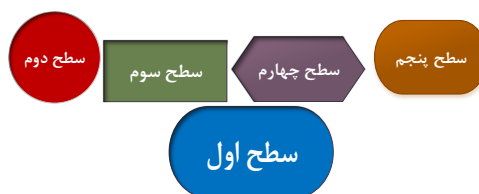


شکل ۹- ساختار شکست سیستم کنترل-مانیتورینگ

۴- تعیین نرخ خرابی

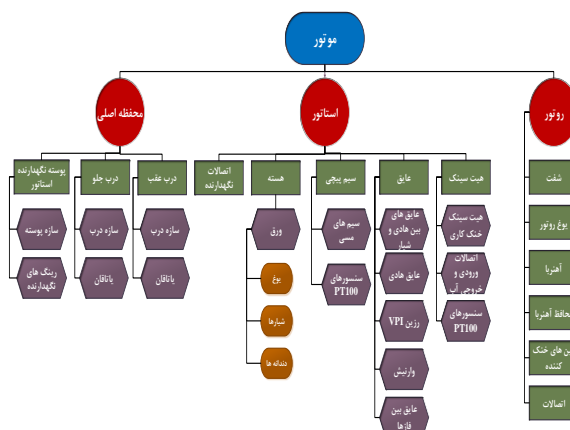
محاسبات و تعیین نرخ خرابی زیرسیستم‌ها به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود:

- موتور پرماسین به عنوان یک سیستم ماموریت محور، در شرایط عملیاتی مشخص، دارای سناریوهای کاری متفاوت خواهد بود. یعنی سیستم بسته به نوع ماموریت، مشخصه‌های کاری (رنج ولتاژ- جریان، توان، دما و...) ثابتی نخواهد داشت. به همین منظور نرخ خرابی زیرسیستم‌های حساس به رنج ولتاژ، جریان، توان، دما و... تحت این شرایط متفاوت خواهد بود. با این اوصاف نرخ خرابی بر اساس مشخصه‌های کاری وابسته به سناریوهای کاری را با استفاده از روابط حاکم بر استاندارد Mil-217 و NSWC محاسبه خواهیم نمود.
- عدم دسترسی به مشخصه‌های کاری برخی زیرسیستم‌ها و همچنین عدم وجود روابط حاکم برای محاسبه نرخ خرابی، موجب استفاده از استاندارد NPRD-95 و یا دیتاشیت سازندگان معتبر خواهد شد. در نتیجه نرخ خرابی را در دو حالت خوش‌بینانه و بدبینانه تعیین خواهیم نمود. با این وجود، شاهد دو نرخ خرابی برای برخی اجزاء خواهیم بود، پس در این صورت قابلیت اطمینان کل برای هر مرحله دارای دو مقدار بین خوش‌بینانه‌ترین و بدبینانه‌ترین حالت

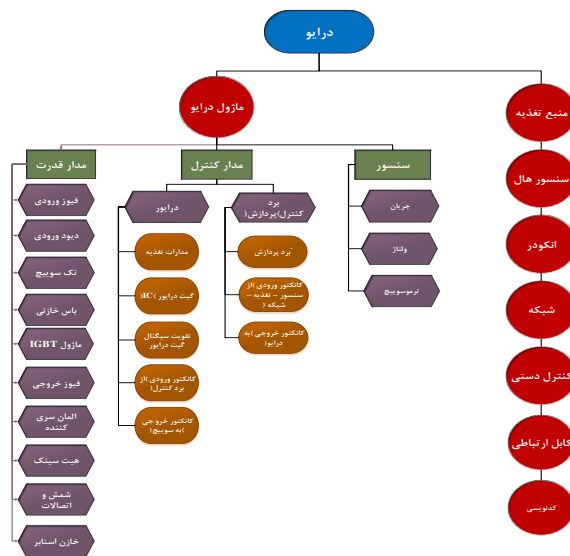


شکل ۶: سطوح ساختار شکست موتور

در ادامه به ارائه ساختار شکست ۴ زیرسیستم اصلی موتور پرماسین طبق شکل ۴ خواهیم پرداخت. شکل‌های ۷ تا ۱۰ ساختار شکست ۴ زیرسیستم اصلی موتور پرماسین را نشان می‌دهد.



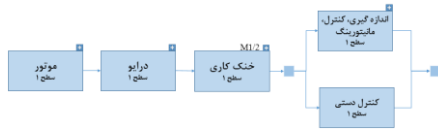
شکل ۷- ساختار شکست موتور



شکل ۸- ساختار شکست درايو

اطمینان یک روش تحلیل کمی برای پیش بینی اولیه و پایه‌ای قابلیت اطمینان و نرخ خرابی سیستم است. در این تحلیل ضمن تخمین نرخ خرابی اجزاء، نرخ خرابی کلی سیستم و قابلیت اطمینان نیز تخمین زده می‌شود. رابطه ۹، $R_{کل}$ سیستم را در هر دو سناریو کاری نشان می‌دهد:

$$(9) \quad R_{کل} = R_{دستی} * (1 - R_{اتوماسیون}) * (1 - R_{خنگ کاری}) * (1 - R_{درایو}) * R_{موتور} * R_{کنترل}$$



شکل ۱۰- بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های اصلی موتور پرماسین

۶- نتیجه‌گیری

در این قسمت به مقایسه قابلیت اطمینان کل سیستم و زیرسیستم‌ها برای هر سناریو خواهیم پرداخت.

۶-۱- محاسبه قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های موتور پرماسین

در جدول ۲ و جدول ۳ قابلیت اطمینان کل موتور پرماسین به تفکیک هر زیرسیستم برای تمام مراحل سناریو اول و دوم محاسبه شده است. در هر دو سناریو زیرسیستم درایو و موتور دارای کمترین سطح قابلیت اطمینان است.

مرحله	پارامتر	موتور	درایو	خنگ کاری	کنترل و مانیتورینگ	کنترل دستی
۱	$R_{بد}$	۰/۹۸۵	۰/۹۷۷	۰/۹۹۲۵	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۸۶
	$R_{خوش}$	۰/۹۸۸	۰/۹۹۱۸	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۵
۲	$R_{بد}$	۰/۹۹۵	۰/۹۹۰۴	۰/۹۹۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۷
	$R_{خوش}$	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹۹
۳	$R_{بد}$	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹۴	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۶
	$R_{خوش}$	۰/۹۹۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
۴	$R_{بد}$	۰/۹۸۵	۰/۹۷۷	۰/۹۹۲۵	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۸۶
	$R_{خوش}$	۰/۹۸۸۶	۰/۹۹۱۸	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۹۹۹	۰/۹۹۹۵

ممکن خواهد بود، به همین منظور قابلیت اطمینان به صورت رابطه زیر بیان خواهد شد:

$$R_{بد\ بینانه} < R_{مرحله} < R_{خوش\ بینانه}$$

۴-۱- سناریو کاری

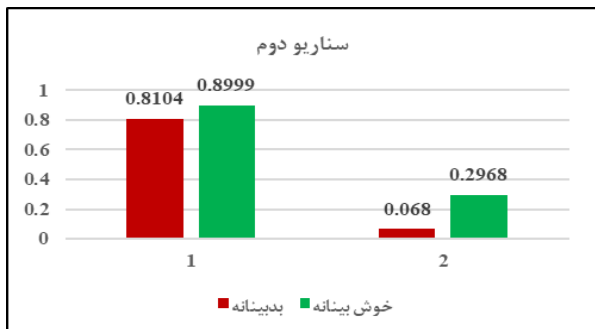
سناریوهای کاری با توجه به ماموریت شناور تعیین می‌شود. در کل، شناور دارای دو سناریو زمانی (سناریو اول) و حالت عملکرد نقطه‌ای (سناریو دوم) است. جدول ۱ سناریوی کاری موتور پرماسین را نشان می‌دهد. همانطور که در بخش قبل گفته شد، طبق جدول ۱، در حالات توانی متفاوت، نرخ خرابی برای اجزاء حساس به پارامترهایی چون توان، ولتاژ، جریان دما و... متفاوت خواهد بود.

جدول ۱- سناریوهای کاری شناور

سناریو	مرحله	ساعات عملکرد (h)	توان عملکرد (kw)
۱	۱	۲۵۰ ساعت	۱۵۰ (۱۲۵ ساعت)
	۲	۵۰ ساعت	۱۰۰۰
	۳	۲۰۰ ساعت	۱۰۰
	۴	۲۵۰ ساعت	۱۵۰ (۱۲۵ ساعت) / ۵۰۰ (۱۲۵ ساعت)
۲	۱	۲۰۰۰۰ ساعت	۱۰۰
	۲	۲۵۰ ساعت	۱۰۰۰

۵- ترسیم بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان موتور پرماسین

با استفاده از ساختار شکست می‌توان به مدل سازی RBD پرداخت. ذکر این نکته ضروری است که سطوح مشخص شده در ساختار شکست برای برخی اجزاء، با شناخت عملکرد آن، در دیاگرام قابلیت اطمینان متفاوت خواهد بود. شکل ۱۱ مدل سازی بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان زیرسیستم‌های سطح ۱ موتور پرماسین را به صورت کلی نشان می‌دهد. زیرسیستم کنترل دستی که در سطح ۳ ساختار شکست سیستم قرار گرفته بود، با توجه به عملکرد آن به عنوان رزرو سیستم اندازه‌گیری، کنترل و مانیتورینگ، در سطح ۱ بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان قرار می‌گیرد. با استفاده از روابط شبکه‌های سری - موازی، با جایگذاری مقادیر نرخ خرابی استخراج شده مربوط به هر مرحله از استانداردها، محاسبات یا کاتالوگ سازندگان معتبر، قابلیت اطمینان هر زیرسیستم و در نهایت قابلیت اطمینان کل سیستم برای هر مرحله از سناریوها پیش‌بینی می‌شود. پیش‌بینی قابلیت



شکل ۱۱- مقایسه قابلیت اطمینان سناریو دوم

با محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم، بیشترین نرخ خرابی در مد توانی کمتر از ۵۰۰kW، مربوط به زیرسیستم موتور و برای مد توانی بیشتر از ۵۰۰kW، مربوط به زیرسیستم درایو است.

۷- مراجع

[1] Parast, M., Kalahan, F., & Mamorian. M. (2007). Determining the type and timing of optimal maintenance and preventive repairs of multi-component systems based on reliability. Journal of technical faculty,41(106). (in Persian)

[2] Rasti, V., Karbasian, M., & Asadollahi, A. (1389). Estimating the reliability of the electronic part of a space camera. 10th conference of the Iranian Aerospace Association. Second International Conference on Management Challenges and Solutions. (in Persian).

[3] Mehdi, K., Al-Binin, Ya., & FatemehR (1389).Presenting a model for reliability estimation in a complex submarine stage-oriented system using advanced functional block diagram. Second International Conference on Management Challenges and Solutions. (in Persian).

[4] Karbasian, M., Salari, S., & Rashidian, F. (1389). Estimating the Reliability Improvement of Submarine Power Generation System Design. Second International Conference on Management Challenges and Solutions. (in Persian)

جدول ۲- قابلیت اطمینان موتور پرماسین برای هر زیرسیستم - سناریو دوم

مرحله	پارامتر	موتور	درایو	خنک کاری	کنترل و مانیتورینگ	کنترل دستی
۱	R _{بد}	۰/۹۳۶۴	۰/۸۶۶۱	۰/۹۹۸۶۸۸	۰/۹۹۹۷۳	۰/۹۹۶۹۱
	R _{خوش}	۰/۹۵	۰/۹۴۷	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۸۵
۲	R _{بد}	۰/۳۶۲۴	۰/۲۹۸۲	۰/۶۰۸۱	۰/۸۶۸	۰/۹۲۰۷۶
	R _{خوش}	۰/۴۴۹۸	۰/۷۸۶۳	۰/۸۴۱۱۴	۰/۹۳۵۲۳	۰/۹۶۰۷۹

محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم

جدول ۴ و ۵ نرخ خرابی و قابلیت اطمینان کل سیستم برای هر دو سناریو کاری را نمایش می‌دهد.

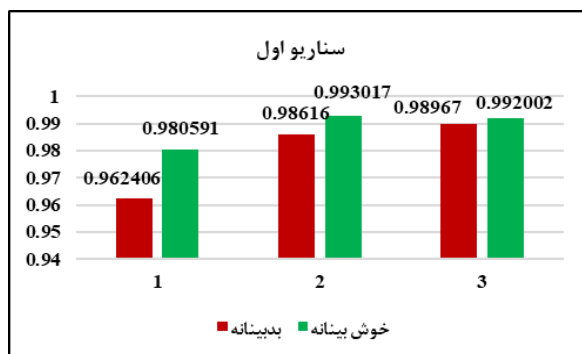
جدول ۳- قابلیت اطمینان و نرخ خرابی کل موتور پرماسین- سناریو اول

مرحله	توان و ساعت عملکرد (kW)	$\lambda_{بد}(10^{-6})$	$\lambda_{خوش}(10^{-6})$	R _{بد}	R _{خوش}
اول	۱۵۰ (۱۲۵ ساعت)	۵۱/۶۴	۴۰/۵۱۸	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴
	۵۰۰ (۱۲۵ ساعت)	۲۵۴/۸۹	۱۱۶/۲۸	۰/۹۶۲	۰/۹۸۰
دوم	۱۰۰۰ (۵۰ ساعت)	۲۷۸/۷۳	۱۴۰/۱۴	۰/۹۸۶	۰/۹۹۳
سوم	۱۰۰ (۲۰۰ ساعت)	۵۱/۹۱۸	۴۰/۱۵	۰/۹۸۹	۰/۹۹۲
چهارم	۱۵۰ (۱۲۵ ساعت)	۵۱/۶۴	۴۰/۵۱۸	۰/۹۹۳	۰/۹۹۴
	۵۰۰ (۱۲۵ ساعت)	۲۵۴/۸۹	۱۱۶/۲۸	۰/۹۶۸	۰/۹۸۵
اول	۱۰۰ (۲۰۰۰ ساعت)	۱۳۴/۴	۶۰/۷۳	۰/۹۶۸	۰/۲۹
دوم	۱۰۰۰ (۷۵۰ ساعت)	۲۸۰/۳	۱۴۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۸۹۹

جدول ۴: قابلیت اطمینان و نرخ خرابی کل موتور پرماسین- سناریو دوم

مرحله	توان و ساعت عملکرد (kW)	$\lambda_{بد}(10^{-6})$	$\lambda_{خوش}(10^{-6})$	R _{بد}	R _{خوش}
اول	۱۰۰ (۲۰۰۰ ساعت)	۱۳۴/۴	۶۰/۷۳	۰/۹۶۸	۰/۲۹
دوم	۱۰۰۰ (۷۵۰ ساعت)	۲۸۰/۳	۱۴۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۸۹۹

با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ در سناریو اول و دوم به ترتیب مراحل ۳ و ۱ دارای بالاترین سطح قابلیت اطمینان است.



شکل ۱۲- مقایسه قابلیت اطمینان سناریو اول

- [13] Pfluegl, H. (2016). advanced simulation models and accelerated testing for the development of electric vehicles. *Transportation Research Procedia*, 14, p. 3641-3650.
- [14] Kim, Y. A. (2017). study on the estimation of bearing life of electric motor using ISO 281 and accelerated life, test2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). 2017. IEEE.
- [15] Shu, X., Guo, Y., Yang, W., Wei, K., Zhu, Y., & Zou, H. (2019). A detailed reliability study of the motor system in pure electric vans by the approach of fault tree analysis. *IEEE, Access*, 8:5295–307.
- [16] Pfluegl, H. (2019). Reliability modeling of power electronic converters. A general approach, 2019 20th workshop on control and modeling for power electronics (COMPEL): IEEE, 1-7.
- [17] Chen, H., Dong, F., Xu, S., Yang, J., & Chan, C. C. (2019). Reliability Evaluation of Switched Reluctance Motor Drive System in Electric Vehicle Based on Bayesian Network. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, 2019. 1-4.
- [18] Xu, S., Chen, H., Dong, F., & Yang, J. (2019). Reliability analysis on power converter of switched reluctance machine system under different control strategies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(8), 6570–80.
- [19] Chen, Y., Liang, S., Li, W., Liang, H., & Wang, C. (2019). Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors. A review. *Applied Sciences*, 9(10), 2116.
- [20] Zacks S. (2012). Introduction to reliability analysis: probability models and statistical methods. Springer Science & Business Media.
- [5] Siraj, H., Abbaspour, A., & Yousefi H. (2018). Calculation of reliability and availability of methanol fuel cell system with Markov chain approach. *renewable and new energies*. (in Persian)
- [6] Karbasian, M., Salari, S., & Rashidian, f. (2020). Estimating Reliability Improvement of Submarine Power Generation System Design. *Hydrophysics*, 5(2), 71–90. (in Persian)
- [7] Sefaldin, Asl., A, Fadaei, A. & Ghanbari K, Zavari S. (2022). Reliability evaluation of wind turbine system by block diagram modeling method. *Two quarterly renewable and new energies*, 9(1), 1-7. (in Persian)
- [8] Bazzi, AM., Dominguez-Garcia, A., Krein PT. (2011). Markov reliability modeling for induction motor drives under field-oriented control. *IEEE transactions on power electronics*, 27(2), 534–46.
- [9] Song, Y., Wang B. (2012). *Survey on reliability of power electronic systems*. *IEEE transactions on power electronics*, 28(1), 591–604.
- [10] Wang, B., Tian, G., & Liang, Y., Qiang T. (2014). Reliability modeling and evaluation of electric vehicle motor by using fault tree and extended stochastic Petri nets. *Journal of Applied Mathematics*, 11(3), 25–208.
- [11] Chen, H., Yang, H., & Chen, Y., Iu HH-C. (2015). Reliability assessment of the switched reluctance motor drive under single switch chopping strategy. *IEEE transactions on power electronics*, 31(3), 2395–408.
- [12] Olmi, C., Sculler, F. (2015). Charpentier, Reliability assessment of an autonomous underwater vehicle propulsion by using electrical multi-phase drive. *IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2015, 000965-000970.*

- [21] Hamidi, M. A. (1383). Evaluation of reliability in floating system components of surface effect (case study of Yunus 22 hovercraft). master's thesis of quality engineering, Tehran, Malik Ashtar University of Technology. (in Persian)
- [22] isograph-reliability-workbench. (2019). from <https://downloadly.ir/software/engineering-specialized>.
- [23] Goble W.M. (1998). The use and development of quantitative reliability and safety analysis in new product design.
- [24] Karbasian, M., Tabatabai, I. (2013). Familiarity with reliability: the pillars of knowledge. (in Persian)

Evaluating And Modeling Permasyn Engine Reliability And Providing Methods To Improve Its Performance

Javad Sheikh Hafeshjani

PhD student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of
Technical Engineering, Yazd University, Yazd. Iran. jsheikh@stu.yazd.ac.ir

Mohammad Saber Fallah Nejad

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of
Engineering, Yazd University, Yazd. Iran. fallahnezhad@yazd.ac.ir

Abstract: Permasyn motor is a permanent magnet synchronous motor that is used in the electric propulsion system of boats [2]. From the point of view of reliability, this system is a mission-oriented system and needs flawless performance during the mission. In this article, firstly, the structure of Permasyn engine was explained and the product failure structure was drawn. Due to the mission-oriented nature of this system, 2times scenarios and point mode of operation were defined for this system. The failure rate for sensitive parts was calculated and determined in two optimistic and pessimistic modes. Using the failure structure, the relationship of each of the system components was determined and RBD was drawn in the Reliability Workbench software [3]. Finally, the reliability of the subsystems and the system was calculated separately for both work scenarios. The results show that drive and motor subsystem in rated power has the lowest level of reliability compared to other subsystems.

Key words: Reliability, Permasyn engine, analysis of failure states and effects, reliability block diagram, failure rate.

Aim and Introduction

Permanent magnet synchronous motors with high efficiency (in a wide range of output power), high power density, minimal losses (due to the absence of the excitation system and the resulting losses), small volume and weight, high reliability at high speeds, minimal Ripple output torque, low repair cost, etc., which is widely used in military, automotive, medical, etc. This system is widely used in military industries, especially in the electric propulsion system of vessels, and due to the nature its sensitivity, low failure rate and high reliability are expected from this system [2]. Comprehensive and detailed studies on the reliability of this system can be a step towards improving its performance. Pay attention to reliability, especially in the case of systems that are in functional conditions. They work hard, including military systems, it is very important. To evaluate the reliability of systems, there are two methods called analytical methods and computer simulation, and the most important analytical methods can be called the reliability block diagram method and the failure tree analysis method [1]. But considering that the mentioned system includes special components that due to the design requirements, functional and technical limitations on the one hand and supply limitations, not having access to accurate information on the failure rates of most components and their reliability on the other hand, providing a method to estimate and Reliability assessment is essential.

Methodology

The studied system is a 12-phase permanent magnet synchronous motor (Permasyn motor) manufactured by Siemens, Germany, which is used in the electric propulsion of ships [2]. According to the studies conducted in the background section of the research due to the extent and complexity of the system in question, in this article the RBD method is chosen as the best method for evaluating and modeling the reliability of the system. Since the system studied in this article is in the design stage and as a new product, the impossibility of testing many components and the lack of access to failure rates in the functional environment on the one hand and the use of various and heterogeneous industrial parts, High cost, limitations in supply and component failure analysis tests, standards such as Mil-217, NSWC, NPRD-95 have been used to determine the failure rate.

In this article, using the system failure structure, we evaluate the reliability of 4 main subsystems of engine, drive, cooling and control and monitoring in 2 working scenarios (based on floating performance) using the RBD method [4]. Due to the mission-oriented nature of the studied system, 2 times scenarios and point performance mode based on floating performance will be defined for this system. However, the failure rate in each scenario will be different for some sensitive parts, which will need to be calculated using the Mil-217 standard [5]. Also, due to the lack of access to the failure rate of some parts, using the NPRD-95 standard and the catalog of valid manufacturers, we determine the failure rate in two intervals, the most optimistic and the most pessimistic. Finally, by identifying the operating principles of systems and subsystems, the reliability block diagram will be drawn in the Reliability Workbench software. By determining and calculating the failure rate based on the work scenario for each of the system components, the reliability of Permasyn engine subsystems is calculated for both work scenarios.

Findings

Permasyn engine reliability for each subsystem – first scenario

Table 1: Permasyn engine reliability for each subsystem – first scenario

Manual control	Control and monitoring	cooling	drive	motor	parameter	level
0.9986	0.99998	0.9925	0.977	0.985	R _{pessimistically}	1
0.9995	0.9999	0.9999	0.9918	0.988	R _{optimistically}	
0.9997	0.999	0.99999	0.9904	0.995	R _{pessimistically}	2
0.9999	0.99	0.9999	0.9963	0.996	R _{optimistically}	
0.9996	0.9999	0.99994	0.9996	0.99	R _{pessimistically}	3
0.999	0.999	0.999	0.999	0.992	R _{optimistically}	
0.9986	0.9999	0.9925	0.977	0.985	R _{pessimistically}	4
0.9995	0.99999	0.9999	0.9918	0.9886	R _{optimistically}	

Table 2: Permasyn engine reliability for each subsystem – second scenario

Manual control	Control and monitoring	cooling	drive	motor	parameter	level
0.99691	0.99973	0.998688	0.8661	0.9364	$R_{\text{pessimistically}}$	۱
0.9985	0.99998	0.9969	0.974	0.95	$R_{\text{Optimistically}}$	
0.92076	0.868	0.6081	0.2983	0.3624	$R_{\text{pessimistically}}$	۲
0.96079	0.93523	0.84114	0.7863	0.4498	$R_{\text{Optimistically}}$	

Table 3-Reliability and failure rate of the entire Permasyn engine - the first scenario

$R_{\text{Optimistically}}$	$R_{\text{pessimistically}}$	$\lambda_{\text{Optimistically}} (10^{-6})$	$\lambda_{\text{pessimistically}} (10^{-6})$	Power and operating hours (kw)	level
0.994	0.993	40.518	51.64	(h ^{۱۲۵}) ۱۵۰	1
0.985	0.968	116.28	254.89	(h ^{۱۲۵}) ۵۰۰	
0.993	0.986	140.14	278.73	(h ^{۵۰}) ۱۰۰۰	2
0.992	0.989	40.15	51.918	(h ^{۲۰۰}) ۱۰۰	3
0.994	0.993	40.518	51.64	(h ^{۱۲۵}) ۱۵۰	4
0.985	0.968	116.28	254.89	(h ^{۱۲۵}) ۵۰۰	
0.29	0.068	60.73	134.4	(h ^{۲۰۰۰۰}) ۱۰۰	1
0.899	0.81	140.62	280.3	(h ^{۷۵۰}) ۱۰۰۰	2

Table 4:Reliability and failure rate of the entire Permasyn engine - the second scenario

$R_{\text{Optimistically}}$	$R_{\text{pessimistically}}$	$\lambda_{\text{Optimistically}} (10^{-6})$	$\lambda_{\text{pessimistically}} (10^{-6})$	Power and operating hours (kw)	level
0.29	0.068	60.73	134.4	(h ^{۲۰۰۰۰}) ۱۰۰	1
0.899	0.81	140.62	280.3	(h ^{۷۵۰}) ۱۰۰۰	2

Discussion and Conclusion

According to the calculations in the first and second scenario, steps 3 and 1, respectively, have the highest level of reliability.

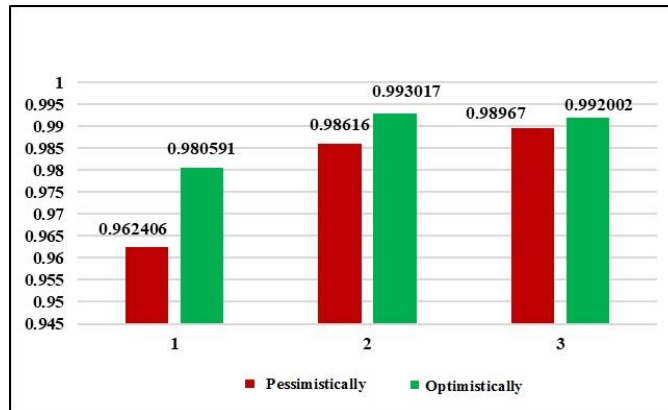


Figure 1: the first scenario

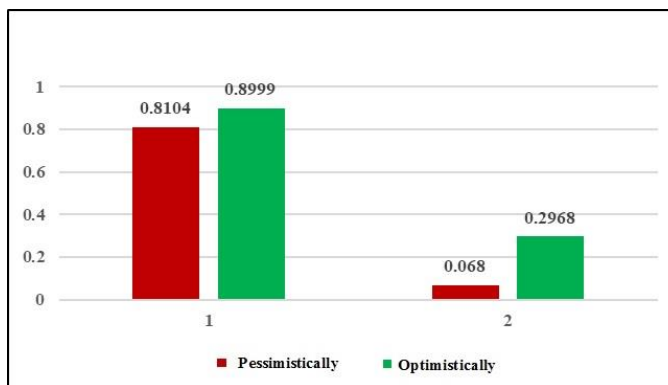


Figure 1: the second scenario

By calculating the reliability of the whole system, the highest failure rate in the power mode less than 500 kW is related to the engine subsystem and for the power mode greater than 500 kW, it is related to the drive subsystem.

Reference

- [1]. Hamidi, M, A. (1383). Evaluation of reliability in floating system components of surface effect (case study of Yunus 22 hovercraft). master's thesis of quality engineering, Tehran, Malik Ashtar University of Technology. (in Persian)
- [2]. Goble WM. (1998). The use and development of quantitative reliability and safety analysis in new product design.
- [3]. isograph-reliability-workbench. (2019). from <https://downloadly.ir/software/engineering-specialized>.
- [4]. Karbasian, M., Salari, S., & Rashidian, F. (1389). Estimating the Reliability Improvement of Submarine Power Generation System Design. Second International Conference on Management Challenges and Solutions. (in Persian)

- [5]. Siraj, H., Abbaspour, A., & Yousefi H. (2018). Calculation of reliability and availability of methanol fuel cell system with Markov chain approach. renewable and new energies. (in Persian)