

تشخیص عیب گیربکس در موتورهای القایی با استفاده از روش آنالیز سیگنال مربع جریان

حامد الماسی^۱، سید محمد جواد رستگار فاطمی^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات ساوه، hamed.alma30@yahoo.com

^۲ هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات ساوه، rastegar.fatemi@gmail.com

چکیده - با توجه به اهمیت و کاربرد فراوان موتورهای القایی در صنعت و لزوم تشخیص به موقع خطا به منظور پیشگیری از گسترش آن، استفاده از تکنیک‌های پایش وضعیت (CM) بسیار کاربردی می‌باشد. در این زمینه روش آنالیز سیگنال مربع جریان موتور (MSCSA) برای تشخیص خطای گیربکس که از جمله خطاهای رایج مکانیکی در موتورهای القایی روتور قفسی می‌باشد، ارائه می‌گردد. روش پیشنهادی بر مبنای تحلیل طیف فرکانسی سیگنال مربع جریان استاتور و به کمک تکنیک‌های پردازش سیگنال توسعه یافته است. این سیستم با مربع نمودن سیگنال نمونه‌گیری شده از جریان استاتور و با استفاده از روش تبدیل فوریه سریع (FFT)، وضعیت موتور را از لحاظ وجود و یا عدم وجود خطای گیربکس مشخص می‌کند. نتایج تجربی، کارایی روش پیشنهادی را به منظور تشخیص خطای گیربکس تایید می‌کند. کلید واژه - آنالیز سیگنال مربع جریان، تشخیص خطا، خطای گیربکس، ماشین القایی.

۱- مقدمه

به طور کلی دو منطق پایه جهت تشخیص عیوب در ماشین‌های الکتریکی وجود دارد: ۱- تشخیص خطا (رخداد خطا) ۲- شناسایی خطا (نوع خطا). شناخته شده‌ترین روش تشخیص خطا، بر اساس نظارت و پردازش سیگنال‌های جریان و ارتعاش، شناسایی باندهای کناری در اطراف فرکانس پایه^۱ است که به آن روش آنالیز سیگنال مربع جریان موتور^۲ (MCSA) گفته می‌شود و یکی از مناسب‌ترین روش‌ها جهت تشخیص خطاهای متداول در موتورهای القایی قفس سنجابی، هم از لحاظ فنی و هم از لحاظ اقتصادی می‌باشد [۳].

موتورهای القایی سه فاز به دلیل دارا بودن فاکتورهایی از قبیل، هزینه پایین، قدرت بالا و استحکام زیاد نقش پر رنگی را در حوزه صنعت ایفا می‌کنند، و معمولاً وظیفه مهم و حساسی را در پروسه تولید بر عهده دارند، به همین دلیل خروج ناگهانی و بدون برنامه‌ریزی آن‌ها از روند تولید، خسارت‌های مالی سنگینی به همراه خواهد داشت. از این رو، بحث تشخیص به موقع خطا به منظور پیشگیری از گسترش آن از اهمیت زیادی در صنعت برخوردار است، به این دلیل که اولاً اجازه خروج برنامه‌ریزی شده را می‌دهد و ثانیاً منجر به کاهش هزینه و زمان تعمیرات می‌گردد. در سال‌های اخیر تشخیص خطا و نگهداری پیشگیرانه که هدف آن جلوگیری از وقوع خطاهای بزرگ در موتورهاست، مورد توجه بسیاری از محققان و مهندسان قرار گرفته است. در این زمینه تا کنون روش‌های مخرب و غیرمخرب زیادی پیشنهاد شده است [۱]. روش‌های غیر مخرب روش‌هایی هستند که بر پایه اندازه‌گیری‌های ساده و ارزان بنا شده‌اند و نیازی به تغییر ساختار موتور ندارند [۲].

در این مقاله روش جدید آنالیز سیگنال مربع جریان^۳ (MSCSA) برای شناسایی خطای گیربکس در مسئله تشخیص عیب ماشین‌های الکتریکی ارائه می‌گردد. این روش را می‌توان شبیه به روش توان لحظه‌ای^۴ در نظر گرفت، هرچند روش ارائه شده تنها نیاز به استفاده از یک مجموعه سنسور (اندازه‌گیر جریان) را دارد و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. نتایج

¹ - Fundamental

² - Motor Current signature Analysis

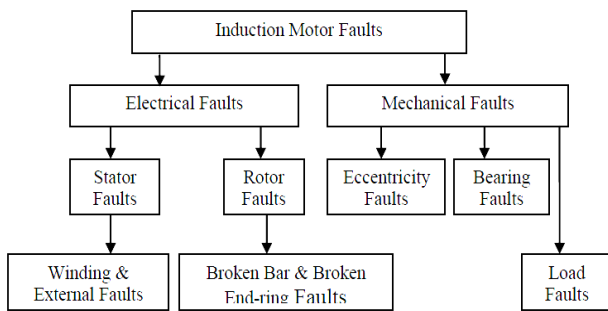
³ - Motor Square Current Signature Analysis

⁴ - Instantaneous Power Method

۱. عیوب الکتریکی

۲. عیوب مکانیکی

شکل ۱ این عیوب را به صورت نمودار نمایش می دهد [۵].



شکل ۱: دسته بندی انواع عیوب در موتورهای الکتریکی

۲-۲- خطای گیربکس

گیربکس یکی از اجزای بسیار مهم در ماشین های الکتریکی می باشد. وجود هرگونه عیب در گیربکس می تواند به توقف ماشین منجر شود که در نهایت به از دست دادن تولید خواهد انجامید. به همین جهت همواره پایش و تشخیص عیوب مربوط به آن یکی از مسائل پر اهمیت در صنعت به شمار می رود. به همین منظور روش های زیادی برای تشخیص عیب و پایش گیربکس ارائه شده است [۸-۶]. بیش از ۹۰٪ تمامی موتورهای مورد استفاده در صنعت موتورهای القایی AC می باشند. بیشترین علت شکست موتور در حین کار مربوط به عیوب گیربکس، عیوب عایق بندی و عیوب روتور می باشد. تشخیص سریع عیوب گیربکس این اجازه را می دهد تا به جای تعویض موتور، گیربکس را تعویض نماییم. در هر صورت جایگزینی و تعویض گیربکس معیوب، مقرون به صرفه تر از تعمیر موتور می باشد. از طرفی موتوری که پیوسته در حال کار است نمی تواند متوقف شود، بنابراین باید روش های پایش وضعیت آن ها را بهبود بخشید [۹]. عواملی که منجر به بروز عیب در گیربکس می شوند عبارتند

از:

۱. شکستن یکی از دنده های چرخ دنده ها

۲. آلودگی و عدم روغن کاری صحیح

شبه سازی بر روی داده های واقعی دریافت شده از موتور القایی دارای عیب گیربکس نشان دهنده مولفه های جدید فرکانسی می باشد و همچنین نشان دهنده کارآمدی روش پیشنهادی است.

۲- خطا در موتور القایی

خطا را می توان به صورت اتفاقی که رفتار سیستم را تغییر می دهد تعریف نمود. به گونه ای که دیگر، سیستم نتواند اهدافش را دنبال کند. خطا می تواند به واسطه یک رخداد داخلی در سیستم و یا به واسطه شرایط محیطی مانند، ایجاد نویز بیشتر به دلیل تغییرات دما در حسگرها به وجود آید. همچنین ممکن است خطا به واسطه یک عمل اشتباه توسط اپراتور در سیستم و یا به واسطه وقوع اشتباه در طراحی آن به وجود آمده باشد و تا مدت ها خود را در سیستم پایش وضعیت اتاق کنترل نمایش ندهد. به هر حال آنچه که در مورد وقوع خطا در سیستم مهم می نماید این است که باعث کاهش کارایی سیستم و گاهی از دست رفتن فعالیت آن می شود.

امروزه، تولید کنندگان و همچنین کاربران این ماشین های الکتریکی علاقمند به استفاده از سیستم های تشخیص خطا برای افزایش قابلیت و پایداری سیستم های خود هستند. در این زمینه علاوه بر مشخص کردن هارمونیک های خاص در سیگنال جریان، سیگنال های دیگری چون: سرعت، گشتاور و ارتعاش نیز مورد تجزیه و تحلیل فرکانسی قرار می گیرند. به علاوه، نقش انسان در فرایند تصمیم گیری در رابطه با خطا به صورت تدریجی با فرایندهای خودکار چون سیستم های خبره، شبکه های عصبی، سیستم های فازی و ... جایگزین می گردد [۴].

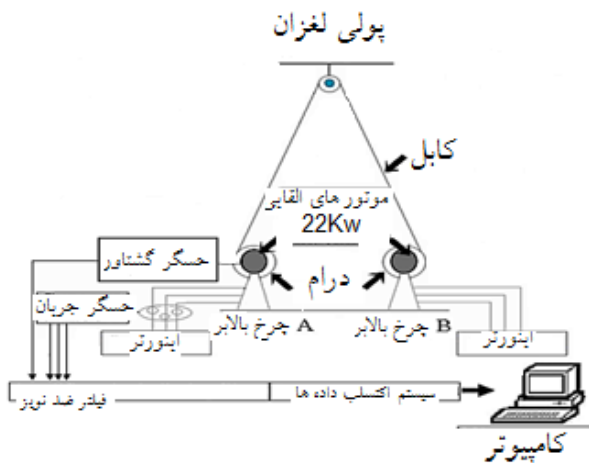
۲-۱- زمینه های پیدایش عیوب مختلف در ماشین های الکتریکی

به طور قطع موتورهای القایی بیشترین کاربرد را در حوزه صنعت ایفا می کنند، با این حال مستعد ابتلا به بسیاری از انواع عیوب در این زمینه می باشند. این عیوب را می توان به دو گروه عمده تقسیم بندی نمود:

اگر هر یک از این گامها حذف شود و یا در نظر گرفته نشود، با سادگی به یک نتیجه غلط از علت واقعی خرابی می رسیم. از این رو مشکل به وجود آمده برطرف نمی شود و بدون شک خرابی هایی از همان نوع در آینده رخ خواهد داد. کلاس یا مد خرابی موقعیت خطا را مشخص می کند و نیز بیان کننده آن است که خطا در کدام قسمت از موتور رخ داده است.

۴- تنظیمات سیستم آزمایشی

در شرایط عملی مجموعه ای از دو جرثقیل که هر یک از موتور القایی قفس سنجابی سه فاز با توان ۲۲ کیلو وات، جفت قطب و ولتاژ ۲۳۴/۴۴ ولت مورد استفاده قرار گرفته است. طرح کلی از نحوه اتصالات این سیستم آزمایشی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: طرح کلی سیستم آزمایشی شده

در شکل فوق، جرثقیل A به منظور بالا بردن و جرثقیل B جهت شبیه سازی شرایط عملکردی مورد استفاده قرار گرفته است. جرثقیل A توسط موتور به گیربکس خورشیدی با نسبت کاهش ۱:۷۷ برای کاهش سرعت و افزایش گشتاور خروجی متصل است. آزمایش انجام شده توسط اینورتر با فرکانس ۴۵,۰۵ هرتز در دو سطح بار ۳۰۰ و ۱۰۰۰ دکانیوتن در حالت خطادار در نظر گرفته شده است. جریان استاتور خروجی ۲۴ آمپری در یک بازه زمانی ثابت $T = 90s$ و فرکانس نمونه برداری $f_s = 25kHz$ اندازه گیری شده است. الگوریتم پردازش سیگنال در این پژوهش توسط نرم افزار متلب انجام می گردد.

۳. خرد شدن چرخ دنده ها
۴. سائیدگی سر دنده ها در اثر برخورد دو چرخ دنده و کارکرد آنها
۵. کج شدن دنده ها در اثر فشار بار اضافی
۶. افزایش بیش از حد درجه حرارت و تاثیر منفی روی چرخ دنده ها

حتی در شرایط نرمال کارکرد یک ماشین، اصطکاک یک گیربکس یا خراشیدگی کوچک روی سطوح دوار، شروع به رشد کرده و با پیشرفت این عمل گیربکس شروع به تولید یک سری سیگنال ارتعاشی قابل تشخیص می کند. سر منشا خارجی خرابی گیربکس می تواند از عدم روغن کاری صحیح، گریس کاری یا خوردگی به دلیل وجود آب یا اسید در روغن (گریس) باشد. طبق آمار به دست آمده از پژوهش های انجام شده نشان می دهد که بیش از ۱۰ درصد از خطاها، مربوط به عیوب گیربکس می باشد [۱۰]. در جدول (۱) سهم عیوب هر قسمت از ماشین الکتریکی بر حسب درصد بیان شده است.

جدول (۱): درصد عیوب قسمت های مختلف ماشین الکتریکی

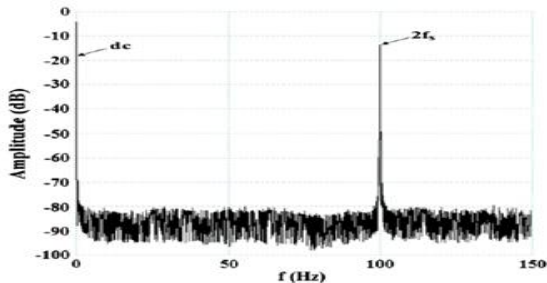
درصد	عیوب
۴۱٪	بلبرینگ
۳۷٪	استاتور
۱۰٪	روتور
۱۲٪	سایر عیوب (گیربکس)

۳- آنالیز خرابی های موتورهای القایی قفس سنجابی

به جهت پی بردن به علت واقعی خرابی ماشین، روش آنالیز خرابی های ماشین پیشنهاد می گردد. گام های اساسی آنالیز عبارتند از:

- الف. یافتن کلاس یا مد خرابی
- ب. یافتن نوع یا الگوی خرابی
- ج. بررسی شکل و مشخصات ظاهری موتور
- د. دانستن شرایط عملکرد موتور در زمان به وجود آمدن خرابی
- ه. دانستن سابقه تعمیر و نگهداری موتور و کاربرد آن

در روش معرفی شده MSCSA برای یک موتور سالم، طیف مربع جریان برای مولفه اصلی در فرکانس $2f_s = \omega/(2\pi)$ به همراه مولفه DC وجود دارد. همان طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: طیف مربع جریان استاتور برای موتور سالم در شرایط ایده آل

۵-۲- تشخیص خطای گیربکس توسط روش MSCSA

در صورت به وجود آمدن خطای گیربکس، مولفه های فرکانسی جدیدی بر روی سیگنال مربع جریان مشخص خواهند شد. متغیرهایی که در آنالیز مربع جریان مورد بررسی قرار می گیرند شامل، f_r فرکانس گردش موتور، f_{mesh} فرکانس مش و در نهایت فرکانس هارمونیک سوم f_{dr} که مطابق با فرکانس چرخش سه حلقه از گیربکس خورشیدی می باشد. این مولفه ها خود را توسط روابط زیر در سیگنال جریان نمایش می دهند.

$$2f_{G1} = 2f_s \pm u f_r \quad (2)$$

$$2f_{G2} = 2f_s \pm v f_{dr} \quad (3)$$

$$2f_{G3} = 2f_s \pm w f_{mesh1} \quad (4)$$

که در این روابط:

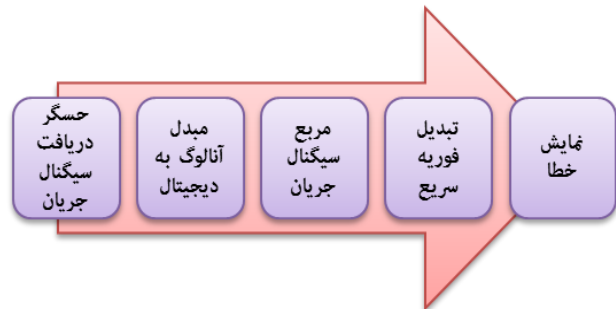
$2f_{G1}$ مربع فرکانس تولید شده توسط چرخ دنده اول، $2f_{G2}$ مربع فرکانس تولید شده توسط چرخ دنده دوم، $2f_{G3}$ مربع فرکانس تولید شده توسط چرخ دنده سوم، $2f_s$ مربع فرکانس تغذیه و w, v, u اعداد صحیح می باشند.

۵-۳- بررسی خطای گیربکس با بار ۳۰۰ دکانیوتن توسط روش MSCSA

توسط روش پیشنهادی، طیف فرکانسی مربع جریان استاتور موتور در حالت خطای گیربکس با بار ۳۰۰ دکانیوتن

۵- روش آنالیز سیگنال مربع جریان موتور (MSCSA)

روش آنالیز سیگنال مربع جریان موتور، بر اساس مربع نمودن سیگنال جریان دریافتی از ترانس مبدل جریان و تجزیه و تحلیل روی آن توسط روش های پردازش سیگنال، کار تشخیص خطا را در موتور القایی انجام می دهد. بنابراین این روش بر اساس سه مرحله می باشد: مرحله اول، دریافت جریان فاز ورودی موتور القایی توسط سنسور اندازه گیری جریان. مرحله دوم، محاسبه مربع جریان دریافت شده از سنسور. مرحله سوم، آنالیز فرکانس به دست آمده توسط روش تبدیل فوریه سریع^۵ FFT. دیاگرام شماتیک این سیستم تشخیص خطا در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: دیاگرام شماتیک سیستم تشخیص خطا

۵-۱- بررسی موتور سالم در شرایط ایده آل توسط روش MSCSA

با توجه به در نظر گرفتن شرایط ایده آل برای موتور القایی در حالت سالم و ولتاژ تغذیه متعادل سینوسی، مربع جریان فاز 'a' طبق رابطه ۱ به دست می آید:

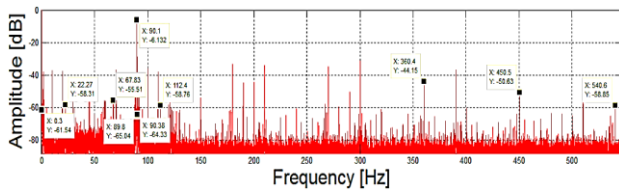
$$i_a^2(t) = \frac{I_{max}^2}{2} + \frac{I_{max}^2 \cdot \cos(2\omega t)}{2} \quad (1)$$

که در این رابطه:

$i_a^2(t)$ مربع جریان فاز 'a' استاتور

$\frac{I_{max}^2}{2}$ مربع مقدار موثر جریان که به صورت مولفه DC ظاهر می گردد.

$\frac{I_{max}^2 \cdot \cos(2\omega t)}{2}$ مربع طیف فرکانس اصلی تغذیه.



شکل ۵: طیف فرکانسی به دست آمده از موتور با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن در حالت خطای گیربکس توسط روش MSCSA

در این شرایط، دامنه مولفه های فرکانسی باندهای جانبی مربع جریان استاتور برای موتور دارای خطای گیربکس در فرکانس های $2f_s$, f_r , $2f_s \pm uf_r$, $2f_s \pm vf_{dr}$, $2f_s \pm wf_{mesh}$ (۳) نشان داده شده است. مقدار W, V, U برابر با یک در نظر گرفته شده است.

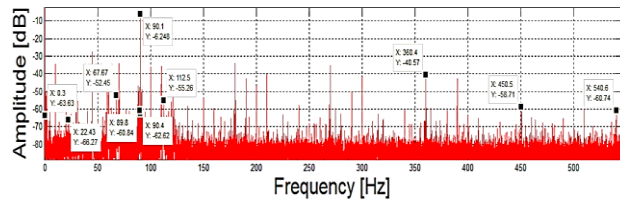
جدول (۳): نتایج آزمایش موتور القایی در حالت خطای گیربکس با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن توسط روش MSCSA

موتور القایی در شرایط خطای گیربکس		
	فرکانس [Hz]	دسیبل [dB]
$2f_s$	90.1	-6.132
f_r	22.27	-58.31
$2f_s - uf_r$	67.83	-55.51
$2f_s + uf_r$	112.4	-58.76
$2f_s - vf_{dr}$	89.8	-65.04
$2f_s + vf_{dr}$	90.38	-64.33
$2f_s - wf_{mesh1}$	360.4	-44.15
$2f_s + wf_{mesh1}$	540.6	-58.85

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص خطای گیربکس با دقت بالاتر در موتورهای القایی ارائه گردید. روش معرفی شده دارای سه مرحله اصلی می باشد: در مرحله اول جریان موتور اندازه گیری می شود، سپس مربع جریان محاسبه شده و در نهایت تجزیه و تحلیل بر روی فرکانس مربع جریان انجام می پذیرد. این روش اجازه می دهد تا اطلاعات با دقت بیشتری از یک موتور با خطای گیربکس، نسبت به روش کلاسیک آنالیز سیگنال جریان (MCSA) به دست آید. یک روش تشخیص خطای کارآمد روشی است که خطای مورد نظر باعث تغییر منحصر به فردی در آن شود و به وقوع آن حساس باشد.

مورد بررسی قرار گرفته و در این حالت مشخصه فرکانسی مورد نظر به دست آمده است، که در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۴: طیف فرکانسی به دست آمده از موتور با بار ۳۰۰ دکانیوتن در حالت خطای گیربکس توسط روش MSCSA

برای بررسی موتور القایی در حالت خطای گیربکس، دامنه مولفه های فرکانسی باندهای جانبی مربع جریان استاتور در فرکانس های $2f_s$, f_r , $2f_s \pm uf_r$, $2f_s \pm vf_{dr}$, $2f_s \pm wf_{mesh}$ (۲) نشان داده شده است. مقدار W, V, U برابر با یک در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): نتایج آزمایش موتور القایی در حالت خطای گیربکس با بار ۳۰۰ دکانیوتن توسط روش MSCSA

موتور القایی در شرایط خطای گیربکس		
	فرکانس [Hz]	دسیبل [dB]
$2f_s$	90.1	-6.248
f_r	22.43	-66.27
$2f_s - uf_r$	67.67	-52.45
$2f_s + uf_r$	112.5	-55.26
$2f_s - vf_{dr}$	89.8	-60.84
$2f_s + vf_{dr}$	90.4	-62.62
$2f_s - wf_{mesh1}$	360.4	-40.57
$2f_s + wf_{mesh1}$	540.6	-60.74

۴-۵- بررسی خطای گیربکس با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن توسط روش MSCSA

توسط روش پیشنهادی، طیف فرکانسی مربع جریان استاتور موتور در حالت خطای گیربکس با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن مورد بررسی قرار گرفته و در این حالت مشخصه فرکانسی مورد نظر به دست آمده است، که در شکل ۵ قابل مشاهده می باشد.

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

روش آنالیز سیگنال مربع جریان استاتور موتورهای القایی برای تشخیص خطای گیربکس دارای این دو خاصیت می باشد. این خطا با مولفه های اضافی که در طیف مربع جریان استاتور ایجاد می کند باعث تغییر منحصر به فردی در آن می شود که امکان تشخیص این خطاها را با بررسی این طیف فراهم می سازد. نتایج تجربی ارائه شده حاکی از آن است که روش آنالیز سیگنال مربع جریان (MSCSA) با دقت خوب و با قابلیت اطمینان بالا، توانایی تشخیص انواع عیوب را در موتورهای القایی دارا می باشد.

منابع

- [1] Benbouzid M. E. H., "Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 1065-1074, Dec. 1999.
- [2] Kliman G. B., Koegl R. A., Stein J., Endicott R. D., Madden M. W., "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. EC- 3, No. 4, pp. 873-879, Dec. 1988.
- [3] W. T. Thomson And R.J. Gilmore, "Motor Current Signature Analysis To Detect Faults In Induction Motor Derives- Fundamentals, Data Interpretation, And Industrial Case Histories", *Proceedings Of 32nd Turbomachinery Symposium, Texas, A&M University, USA, 2003.*
- [4] بابارحیم، ناصر " تشخیص عیوب مکانیکی در ماشین های القایی توسط آنالیز سیگنال الکتریکی " پایان نامه ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه ۱۳۹۲
- [5] Nandi S, Toliyat HA, Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review. *IEEE Trans Energy Convers*;20(4):719-29, 2005.
- [6] B. Li, P.L. Zhang, H. Tian, Et Al., A New Feature Extraction and Selection Scheme for Hybrid Fault Diagnosis of Gearbox, *Expert Systems with Applications* 10000-10009, 38 (2011).
- [7] C. Kara, A.R. Mohanty, Vibration And Current Transient Monitoring For Gearbox Fault Detection Using Multiresolution Fourier Transform, *Journal Of Sound And Vibration* 109-132, 311 (2008).
- [8] N. Baydar, A. Ball, Detection Of Gear Failures Via Vibration And Acoustic Signals Using Wavelet Transform, *Mechanical Systems And Signal Processing* 787-804, 17 (4) (2003).
- [9] M.H.Sadeghi, J.Rafiee, F.Arvani, and A. Harifi. "A Fault Detection and Identification System for Gearboxes using Neural Networks". 0-7803-9422-2005 IEEE.
- [10] Giri, Fouad "AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Application" 2013 John willy & sons, Ltd.