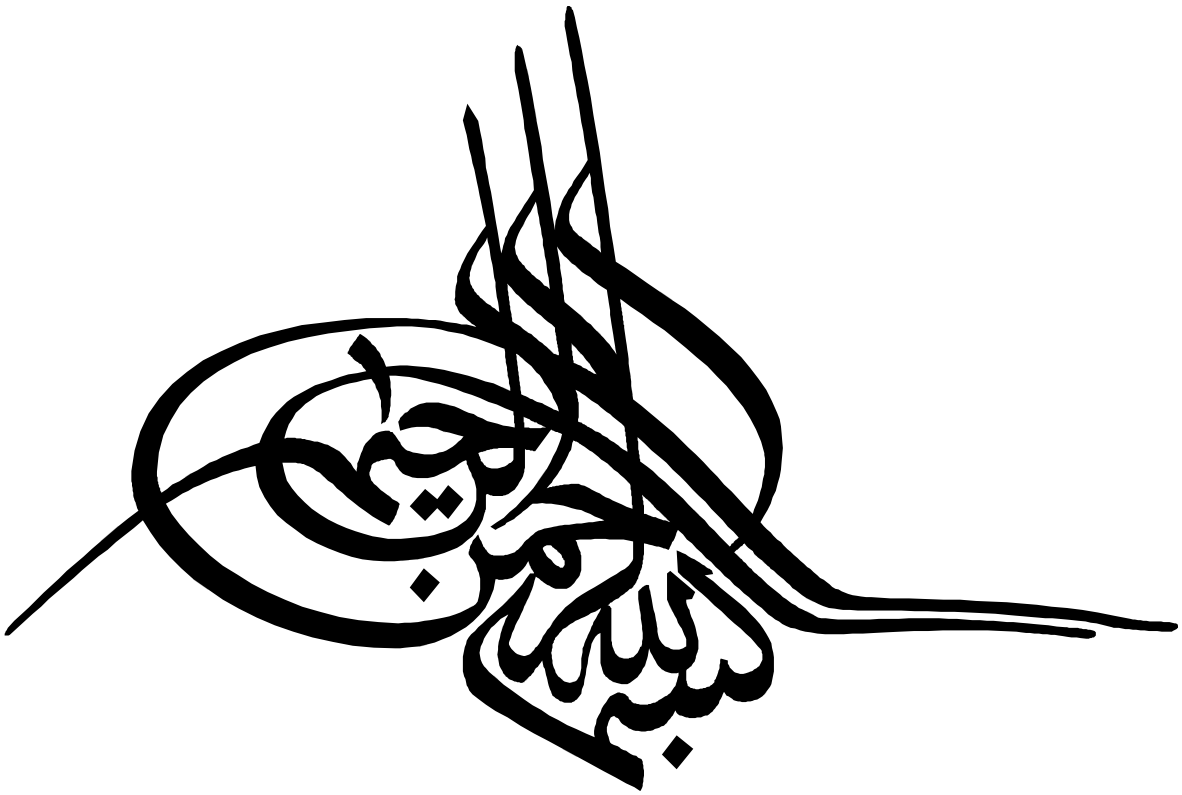

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی((نوشیروانی)) بابل
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق-قدرت

موضوع:

شبیه سازی عملکرد و تعیین تلفات موتور القائی سه فاز تحت ولتاژهای تغذیه نامتعادل و هارمونیکی با استفاده از روش اجزاء محدود

استاد راهنما:

دکتر محمد میرزائی

استاد مشاور:

دکتر سید اصغر غلامیان

نام دانشجو:

علی عبادی

تیرماه ۱۳۹۰

تقدیم به پدر و مادر مهربانم...

تشکر و قدردانی:

بر خود لازم می‌دانم سپاسگزار تمام آنهایی باشم که در این دوره، همراهی صمیمانه شان رهگشایم بود؛ خداوند بخشنده ام که علیرغم تمامی غفلت هایم لطف و رحمت بی پایانش هر لحظه شامل حالم بود، پدر و مادر مهربانم بخاطر تمامی صبر، گذشت و محبت بی دریغشان، اساتید عزیز و گرانقدر دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بخصوص جناب آقای دکتر محمد میرزائی که شاگردی ایشان برایم افتخاری بزرگ و تجربه ای گرانبها بوده است و یقیناً این پایان نامه بدون راهنمایی های دلسوزانه ایشان و همینطور مشاوره صمیمانه جناب آقای دکتر سید اصغر غلامیان به سرانجام نمی رسید، برای ایشان و دکتر غلامیان عزیز آرزوی سلامتی و سربلندی دارم، تشکر فراون دارم از مسئولین محترم شرکت تولید موتور و ژنراتور موتوژن- تبریز بخصوص آقایان مهندس رحمانی و مهندس ستاره بخاطر ارائه اطلاعات مورد نیاز موتور مورد مطالعه در این پایان نامه و همینطور بی نهایت سپاسگذارم از کارمندان بخش برق شرکت سیمان مازندران- نکا بخصوص آقایان مهندس آشکاران و مهندس بهرامی برای کمک های صمیمانه شان جهت انجام تست آزمایشگاهی.

چکیده

نامتعادلی ولتاژ همراه با اضافه و یا افت ولتاژ یکی از مشکلات کیفیت ولتاژ می باشد بطوریکه بعنوان یک پدیده شایع در سیستم های قدرت سه فاز شناخته می شود. در واقع ولتاژهای تولیدی در سطوح تولید و انتقال متعادل سینوسی می باشند و این درحالیست که بدلایل متعددی ولتاژ در سیستم های توزیع انرژی الکتریکی و نقاط مصرف عموماً نامتعادل می باشد. از جمله عوامل نامتعادلی ولتاژ می توان از توزیع نامتوازن بارهای تک فاز در شبکه سه فاز، امپدانس های نامتقارن سیم پیچی ترانسفورماتورها، بانک های ترانسفورماتوری با اتصالات ستاره باز و یا مثلث باز، جابجایی ناکامل خطوط انتقال قدرت، فیوزهای معیوب در بانک های خازنی و غیره نام برد.

از مشکلات دیگر کیفیت ولتاژ شبکه، اعوجاج هارمونیکی ولتاژ می باشد. هارمونیک ها توسط بارها و دستگاه های غیر خطی تولید می گردد. شایان ذکر است که گستره وسیعی از تجهیزات غیرخطی وجود دارند که می توانند در نقاط مختلف به شبکه قدرت متصل گردند.

بر اساس توضیحات فوق، بررسی عملکرد تجهیزات موجود در سیستم های قدرت در شرایط ولتاژی غیر ایده آل حائز اهمیت می باشد. موتورهای القایی سه فاز از تجهیزاتی است که بطور گسترده ای برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی در بخش های صنعتی، تجاری و خانگی به کار گرفته می شود بطوریکه امروزه استفاده از این نوع موتورها به دلایل فنی و اقتصادی حتی بیشتر از گذشته می باشد. شایان ذکر است که این ماشین ها برای کار تحت ولتاژهای سینوسی متعادل طراحی می گردند، با این حال، بیشتر آن ها بطور مستقیم به شبکه های توزیع الکتریکی متصل می گردند و در نتیجه وجود ولتاژهای نامتعادل و غیرسینوسی در تغذیه شان گریز ناپذیر می باشد.

در این پایان نامه، آثار ولتاژهای نامتعادل و هارمونیک های ولتاژی بر عملکرد یک دستگاه موتور القایی سه فاز قفسه سنجابی با استفاده از روش اجزاء محدود مطالعه گردیده است. برای این کار، یک موتور القایی سه فاز با ولتاژ و توان نامی بترتیب ۳۸۰ ولت و ۲۲۰۰ وات، در نرم افزار Maxwell 12.1 شبیه سازی شده و آثار انواعی از ولتاژهای نامتعادل و همینطور تعدادی از ولتاژهای هارمونیکی (هارمونیک های پنجم، هفتم و یازدهم) بر عملکرد مدل شبیه سازی، بررسی گردیده است.

واژه‌های کلیدی:

موتور القایی سه فاز، نامتعادلی ولتاژ، ضریب نامتعادلی ولتاژ، ولتاژهای هارمونیکی، روش اجزاء محدود

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

فصل اول

مروری بر موتورهای القایی سه فاز و کاربرد آن در صنایع ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- عملکرد موتورهای القایی سه فاز ۲

۱-۳- اهمیت استفاده از موتورهای القایی در صنعت ۳

۱-۴- انواع موتورهای القایی ۳

۱-۵- ساختار موتورالقایی ۴

۱-۵-۱- استاتور ۴

۱-۵-۲- رتور ۴

۱-۶- طبقه بندی موتورهای القایی قفسه سنجابی ۶

۱-۶-۱- موتورهای کلاس A ۶

۱-۶-۲- موتورهای کلاس B ۶

۱-۶-۳- موتورهای کلاس C ۷

۱-۶-۴- موتورهای کلاس D ۷

۱-۷- مدار معادل موتور القایی ۸

۱-۸- تلفات در موتورهای القایی ۱۰

۱-۸-۱- تلفات ثابت ۱۰

۱-۸-۲- تلفات متغیر ۱۰

۱-۹- راندمان ۱۱

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های انجام شده درخصوص عملکرد موتورهای القایی‌تحت تأثیر ولتـاژهای نامتعادل و هارمونیکی ۱۲

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- نامتعادلی ولتاژ ۱۳

۲-۲-۱- عوامل ایجاد نامتعادلی ولتاژ در شبکه قدرت ۱۳

۲-۲-۲- تعاریف نامتعادلی ولتاژ ۱۴

۲-۲-۲-۱- نرخ نامتعادلی ولتاژ فاز ۱۴

۲-۲-۲-۲- نرخ نامتعادلی ولتاژ خط ۱۴

۲-۲-۲-۳- ضریب نامتعادلی ولتاژ ۱۵

۲-۲-۲-۴- ضریب نامتعادلی ولتاژ مختلط ۱۷

۲-۲-۳- بررسی تعاریف گوناگون نامتعادلی ولتاژ ۱۷

۲-۲-۳-۱- بررسی تعریف $NEMA$ ۱۷

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

۲-۲-۳-۲- بررسی تعریف IEC ۱۸
۲-۲-۳-۳- بررسی تعریف ضریب نامتعادلی ولتاژ مختلط ۲۰
۲-۲-۴- آثار ولتاژ نامتعادل در شبکه الکتریکی ۲۱
۲-۲-۵- حدود مجاز نامتعادلی ولتاژ در شبکه قدرت ۲۲
۲-۳- ولتاژهای هارمونیکی ۲۲
۲-۳-۱- عوامل ایجاد ولتاژهای هارمونیکی در شبکه قدرت ۲۲
۲-۳-۲- تعاریف ولتاژهای هارمونیکی ۲۳
۲-۳-۳- آثار ولتاژهای هارمونیکی بر روی عملکرد تجهیزات و سیستم قدرت ۲۵
۲-۳-۴- حدود مجاز اعوجاج هارمونیکی ولتاژ ۲۶
۲-۴- مروری بر پژوهش های پیشین درخصوص‌آثار ولتاژهای نامتعادل و هارمونیکی برعملکرد موتورهای القایی سه فاز ۲۶
۲-۴-۱- عملکرد موتورالقایی سه فاز تحت نامتعادلی ولتاژ ۲۶
۲-۴-۱-۱- تلفات و راندمان موتور القایی سه فاز تحت نامتعادلی ولتاژ ۲۷
۲-۴-۱-۲- مسائل حرارتی موتور القایی سه فاز تحت نامتعادلی ولتاژ ۳۱
۲-۴-۱-۳- گشتاور موتورهای القایی سه فاز تحت نامتعادلی ولتاژ ۳۵
۲-۴-۱-۴- کاهش نرخ موتورهای القایی سه فاز تحت نامتعادلی ولتاژ ۴۱
۲-۴-۲- عملکرد موتورالقایی سه فاز تحت ولتاژهای هارمونیکی ۴۲
۲-۴-۲-۱- تحلیل تلفات و راندمان موتورهای القایی به روش اجزاء محدود ۴۳
۲-۴-۲-۲- تحلیل حرارتی موتورهای القایی تحت ولتاژهای هارمونیکی به روش اجزاء محدود ۴۹
۲-۴-۲-۳- تحلیل گشتاور موتورهای القایی تحت ولتاژهای هارمونیکی به روش اجزاء محدود ۴۹

فصل سوم

شبیه سازی عملکرد موتور القائی سه فاز تحت ولتاژهای تغذیه نامتعادل سینوسی با استفاده از روش اجزاء محدود ۵۱

۳-۱- مقدمه ۵۲
۳-۲- روش اجزاء محدود ۵۲
۳-۳- شبیه سازی موتور القایی سه فاز به روش اجزاء محدود ۵۳
۳-۳-۱- مشخصات موتور القایی قفسه سنجابی تحت مطالعه ۵۳
۳-۳-۲- فرآیند شبیه سازی موتور مورد مطالعه به روش اجزاء محدود ۵۴
۳-۳-۲-۱- روابط اصلی استفاده شده در شبیه سازی دوبعدی با گام زمانی ثابت ۵۵
۳-۳-۲-۲- محاسبات تلفات مسی ۵۶
۳-۳-۲-۳- محاسبه تلفات هسته ۵۶
۳-۳-۲-۴- معادله مکانیکی ماشین ۵۷

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

۳-۳-۲-۵- مدل تحلیلی ماشین و شرایط مرزی ۵۹
۳-۳-۲-۶- مش بندی و تنظیمات شبیه سازی ۶۰
۳-۳-۲-۷- اجرای شبیه سازی و تحلیل نتایج حاصله در شرایط نامی ۶۰
۳-۴- استخراج و تخمین پارامترهای مدل مداری ماشین از مدل اجزاء محدود ۶۴
۳-۴-۱- یافتن تابع هدف جهت تخمین پارامترهای موتور القایی با توجه به نتایج حاصل از روش اجزاء محدود ۶۴
۳-۴-۲- بهینه سازی تابع هدف توسط الگوریتم ژنتیک ۶۶
۳-۵- مقایسه برخی نتایج حاصل از تحلیل عملکرد موتور القایی تحت نامتعادلی ولتاژ به روش اجزاء محدود با نتایج حاصل از مدل های مداری ۶۷
۳-۵-۱- تحلیل عملکرد موتورالقایی تحت ولتاژهای نامتعادل با استفاده از تئوری مؤلفه های متقارن... ۶۷
۳-۵-۲- مقایسه روش اجزاء محدود و تئوری مؤلفه های متقارن در مطالعه عملکرد موتورالقایی سه فاز تحت شرایط ولتاژهای نامتعادل ۶۹
۳-۶- اندازه گیری جریان موتور مورد مطالعه در شرایط مختلف ولتاژ ورودی و مقایسه نتایج شبیه سازی با آن ۷۲
۳-۷- بررسی عملکرد موتور القایی تحت نامتعادلی ولتاژ با استفاده از روش اجزاء محدود ۷۵
۳-۷-۱- عملکرد موتور القایی تحت ولتاژهای نامتعادل با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۵
۳-۷-۱-۱- تعیین توان، تلفات و راندمان ۷۶
۳-۷-۱-۲- گشتاور ۷۹
۳-۷-۲- عملکرد موتور القایی تحت ولتاژهای نامتعادل دارای مؤلفه توالی مثبت ولتاژ مشابه ۸۰
۳-۷-۲-۱- توان، تلفات و راندمان ۸۰
۳-۷-۲-۲- گشتاور ۸۲

فصل چهارم

شبیه سازی عملکرد موتورالقائی سه فاز تحت ولتاژهای تغذیه هارمونیکی متعادل با استفاده از روش اجزاء محدود ۸۴

۴-۱- مقدمه ۸۵
۴-۲- هارمونیک های زمانی ۸۵
۴-۳- شبیه سازی عملکرد موتور القایی تحت ولتاژهای هارمونیکی به روش اجزاء محدود ۸۶
۴-۳-۱- انتخاب محتوای هارمونیکی ولتاژها ۸۶
۴-۳-۲- شبیه سازی و نتایج ۸۶
۴-۳-۲-۱- جریان ماشین ۸۷
۴-۳-۲-۲- تلفات، توان خروجی و راندمان ۸۸
۴-۳-۲-۳- گشتاور ۹۰

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحات**

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۹۲

۵-۱- نتیجه گیری..... ۹۳

۵-۲- پیشنهادات..... ۹۵

منابع و مراجع ۹۶

فهرست شکل ها

عنوان **شماره صفحات**

فصل اول

شکل (۱- ۱) : نحوه عملکرد موتور القایی ۳
شکل (۱-۲): استاتور موتور القایی (الف) سیم پیچی شده (ب) با شیارهای خالی ۴
شکل (۱-۳): نمونه‌ای از هسته های رتور قفس سنجابی (الف) نوع مورّب (ب) نوع غیر مورّب ۵
شکل (۱-۴): نمونه‌ای از میله های هادی رتور قفس سنجابی (الف) نوع مورّب (ب) نوع غیر مورّب ۵
شکل (۱-۵): منحنی های گشتاور سرعت برای کلاس های مختلف موتورهای القایی طبق استاندارد *NEMA* ۸
شکل (۱-۶): مدار معادل الکتریکی یک فاز موتور القایی سه فاز ۹

فصل دوم

شکل (۲-۱): مکان هندسی ولتاژهای ترمینال موتور با ۶ درصد نامتعادلی بر پایه تعریف *NEMA* ۱۸
شکل (۲-۲): تغییرات ولتاژ ترمینال موتور با ضریب نامتعادلی ولتاژ معادل ۶ درصد ۱۹
شکل (۲-۳): تغییرات ولتاژ ترمینال موتور با ضریب نامتعادلی ولتاژ معادل ۶ درصد از نمای دیگر ۱۹
شکل (۲-۴): تغییرات ولتاژ ترمینال با ضریب نامتعادلی ولتاژ ۶ درصد و مؤلفه توال مثبت ولتاژ برابر ۲۳۰ولت .. ۲۰
شکل (۲-۵): تغییرات ولتاژ ترمینال با ضریب نامتعادلی ولتاژ مختلط ۶ درصد با زاویه معادل ۱۲۰ درجه ۲۱
شکل (۲-۶): مقایسه افزایش دما موتور القایی سه فاز تحت ضریب نامتعادلی ولتاژ برابر ۴ درصد ۲۱
شکل (۲-۷): راندمان موتور در شرایط متعادل همراه با اضافه یا افت ولتاژ ۲۸
شکل (۲-۸): راندمان موتور در شرایط گوناگون نامتعادلی ولتاژ ۲۸
شکل (۲-۹): تلفات مسی فازهای مختلف تحت نامتعادلی ولتاژ و بار نامی در(الف) استاتور و (ب) رتور ۲۹
شکل (۲-۱۰): تلفات کل ماشین در شرایط گوناگون نامتعادلی ولتاژ ۳۰
شکل (۲-۱۱): اتلاف کل موتور در بارهای متفاوت و نامتعادلی ولتاژ ۳ و ۶ درصد ۳۰
شکل (۲-۱۲): راندمان ماشین (الف) قبل از اعمال کاهش نرخ و (ب) بعد از اعمال آن ۳۰
شکل (۲-۱۳): مدل حرارتی برای (الف) استاتور و (ب) رتور ۳۱
شکل (۲-۱۴): روند محاسبه و تخمین عمر ماشین تحت نامتعادلی ولتاژ ۳۲
شکل (۲-۱۵): عملکرد موتور در حالات گوناگون (الف) افزایش دماو (ب) کاهش عمر ۳۲
شکل (۲-۱۶): مدل حرارتی ماشین ۳۳
شکل (۲-۱۷): توزیع دمایی(بر حسب سانتی گراد) ماشینِ با منحنی اشباع قوی در شرایط نامتعادل متناظر با بهترین حالت ۳۴
شکل (۲-۱۸): چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده در مرجع[۲۴] ۳۵
شکل (۲-۱۹): مدل شبیه سازی شده (الف) نمای موتور (ب) مدل مش بندی شده ۳۶
شکل (۲-۲۰): گشتاور بی باری ماشین در (الف) حالت گذرا (ب) حالت دائمی ۳۶
شکل (۲-۲۱): گشتاور نوسانی ۱۲۰هرتزی درسطوح مختلف نامتعادلی ولتاژ محاسبه شده به‌روش اجزاء محدود ۳۷
شکل (۲-۲۲): طیف فرکانسی توان اکتیو ماشین تحت ۳/۶ درصد نامتعادلی و در ۷۵ درصد بار نامی (نتیجه شبیه سازی) ۳۸

فهرست شکل ها

عنوان **شماره صفحات**

شکل (۲-۲۳): دامنـه مؤلف ۱۰۰ هرتزی توان اکتیو لحظـه ای در شرایط نامتعادلی و بارهای متفاوت (نتـیجه شبیه سازی) ۳۸
شکل (۲-۲۴): نتایج تست حالت متعادل در ۷۵ درصد بار نامی (الف) طیف فرکانسی توان (ب) طیف فرکانسی گشتاور ۳۸
شکل (۲-۲۵): نتایج تست تحت ۳/۶ درصد نامتعادلی و در۷۵ درصد بار نامی (الف) طـیف فرکانسی توان (ب) طیف فرکانسی گشتاور ۳۹
شکل (۲-۲۶): ساختمان موتورهای مطالعه شده دارای (الف) رتور با شکاف بسته (ب) رتور با شکاف باز ۳۹
شکل (۲-۲۷): مؤلفه دومِ (الف) توان و (ب) گشتاور مربوط به موتور با رتور شکاف باز ۴۰
شکل (۲-۲۸): مؤلفه دومِ (الف) توان و (ب) گشتاور مربوط به موتور با رتور شکاف بسته ۴۰
شکل (۲-۲۹): منحنی کاهش نرخ $NEMA$ ۴۲
شکل (۲-۳۰): روش محاسبه تلفات آهنی بکار رفته در مرجع [۳۰] ۴۴
شکل (۲-۳۱): تلفات آهنی محاسبه شده بر حسب مرتبه هارمونیک ۴۴
شکل (۲-۳۲): مدل $LSPM$ شبیه سازی شده به روش اجزاء محدود ۴۴
شکل (۲-۳۳): مدل شبیه سازی شده موتور القایی به روش اجزاء محدود ۴۵
شکل (۲-۳۴): تلفات آهنی محاسبه شده در موقعیت های مختلف هسته ماشین ۴۶
شکل (۲-۳۵): تلفات هدایتی میله های رتور ۴۶
شکل (۲-۳۶): مقایسه حلقه مغناطیسی‌پیش بینی شده با مقدارآزمایشگاهی با اعمال یک‌چگالی شارمغناطیسی دلخواه با فرکانس پایه ۶۰۰ هرتز ۴۸
شکل(۲-۳۷): اثر اعمال گُوِه مرکب بر ریپل‌گشتاور در مقایسه با گُوِه غیر مغناطیسی (الف)تحت ولتاژ سینوسی (ب) تحت ولتاژ PWM ۵۰

فصل سوم

شکل (۳-۱): نمای کلی از موتور القایی سه فاز مورد مطالعه ۵۴
شکل (۳-۲): شیار های ماشین (الف) شیار استاتور (ب) شیار رتور ۵۴
شکل (۳-۳): مدل شبیه سازی موتور القایی مورد مطالعه به روش اجزاء محدود دوبعدی ۵۶
شکل (۳-۴): مدل تحلیلی شامل شرایط مرزی ۵۹
شکل (۳-۵): مدل تحلیلی مش بندی شده ۶۰
شکل (۳-۶): توزیع خطوط شار مغناطیسی در حالت دائمی و سیکل ۲۵ ام ۶۱
شکل (۳-۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالت دائمی و سیکل ۲۵ ام ۶۱
شکل (۳-۸): جریان های سه فاز متعادل ۶۲
شکل (۳-۹): گشتاور تولیدی حالت دائمی ماشین در حوزه زمان ۶۳
شکل (۳-۱۰): گشتاور تولیدی حالت دائمی ماشین در حوزه فرکانس ۶۳
شکل (۳-۱۱): سرعت ماشین بر حسب زمان ۶۳

فهرست شکل ها

عنوان **شماره صفحات**

شکل(۳-۱۲): مدل مداری موتور القایی ۶۵
شکل (۳-۱۳): مدار معادل توالی مثبت ۶۷
شکل (۳-۱۴): مدار معادل توالی منفی ۶۸
شکل (۳-۱۵): توزیع خطوط شار مغناطیسی تحت ولتاژهای نامتعادل و در حالت دائمی (سیکل ۲۰ ام) ۷۰
شکل (۳-۱۶): توزیع چگالی شار مغناطیسی تحت ولتاژهای نامتعادل و در حالت دائمی (سیکل ۲۰ ام) ۷۰
شکل (۳-۱۷): جریان های سه فاز نامتعادل ۷۱
شکل (۳-۱۸): گشتاور ماشین تحت نامتعادلی ولتاژ در حوزه زمان ۷۱
شکل (۳-۱۹): گشتاور ماشین تحت نامتعادلی ولتاژ در حوزه فرکانس ۷۱
شکل (۳-۲۰): نمودار سرعت- زمان ماشین تحت نامتعادلی ولتاژ ۷۲
شکل (۳-۲۱): طرح چیدمان آزمایشگاهی ۷۳
شکل (۳-۲۲): نمایی از چیدمان آزمایشگاهی برای انجام تست موتور ۷۳
شکل (۳-۲۳): توان ورودی و خروجی نرمالیزه شده ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۷
شکل (۳-۲۴): تلفات مسی استاتور، رتور وکل‌نرمالیزه شده ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۷
شکل (۳-۲۵): تلفات هسته نرمالیزه شده ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۸
شکل (۳-۲۶): راندمان ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۸
شکل (۳-۲۷): گشتاور متوسط تولیدی ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۹
شکل (۳-۲۸): هارمونیک دوم ریپل گشتاور تولیدی ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با ضریب نامتعادلی ولتاژ مشابه ۷۹
شکل (۳-۲۹): توان ورودی و خروجی نرمالیزه شده ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ بامؤلفه توالی مثبت ولتاژ مشابه ۸۱
شکل (۳-۳۰):تلفات مسی نرمالیزه شده ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با مؤلفه توالی مثبت ولتاژ مشابه ۸۱
شکل (۳-۳۱): تلفات هسته نرمالیزه شده ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با مؤلفه توالی مثبت مشابه ۸۲
شکل(۳-۳۲): راندمان ماشین تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با مؤلفه توالی مثبت مشابه ۸۲
شکل (۳-۳۳): مقدار متوسط و هارمونیک دوم ریپل گشتـاور تولیدی تحت انواع نامتعادلی ولتاژ با مؤلفه توالی مثبت مشابه ۸۳

فصل چهارم

شکل (۴-۱): جریان فاز a در حوزه زمان در حضور هارمونیک پنجم و اعـوجاج هارمونیکی کل ۱۰ درصد برای ولتاژ تغذیه موتور مورد مطالعه ۸۷
شکل (۴-۲): طیف فرکانسی جریان فاز a در حضور هارمونیک پنجم و اعوجاج هارمونیکی کل ۱۰ درصد برای ولتاژ تغذیه موتور مورد مطالعه ۸۷

فهرست شکل ها

عنوان **شماره صفحات**

شکل (۴-۳): اعوجاج هارمونیکی کل جریان در شرایط سینوسی و همینطور در حضور هارمونیک های ولتاژی. ۸۸
شکل (۴-۴): درصد افزایش تلفات مسی موتور مورد مطالعه در حضور هارمونیک های ولتاژی..... ۸۸
شکل (۴-۵): مقایسه افزایش تلفات هسته در حضور هارمونیک های ولتاژی با روش اجزاء محدود و رابطه (۴-۴) ۸۹
شکل (۴-۶):توان خروجی ماشین در شرایط سینوسی و همینطور در حضور هارمونیک های ولتاژی..... ۹۰
شکل (۴-۷):راندمان ماشین در شرایط سینوسی و همینطور در حضور هارمونیک های ولتاژی..... ۹۰
شکل (۴-۸): ریپل گشتاور تولیدی ماشین در شرایط سینوسی و همینطور در حضور هارمونیک های ولتاژی ... ۹۱
شکل (۴-۹): متوسط گشتاور تولیدی ماشین در شرایط سینوسی و همینطور در حضور هارمونیک های ولتاژی ۹۱

فصل پنجم

–

فهرست جدول ها

عنوان **شماره صفحات**

فصل اول

جدول (۱-۱): دمای ماشین در بار نامی برای کلاس های عایقی متفاوت ۹

جدول (۱-۲): مقادیر مفروض برای تلفات سرگردان ۱۱

فصل دوم

جدول (۲-۱): حدود مجاز درصد نامتعادلی ولتاژ ۲۲

جدول (۲-۲): حدود مجاز اعوجاج هارمونیکی ولتاژ با احتساب ولتاژ مؤلفه اصلی نامی ۲۶

فصل سوم

جدول (۳-۱): مقادیر نامی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز مورد مطالعه ۵۳

جدول (۳-۲): مشخصات ساختمانی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز مورد مطالعه ۵۳

جدول (۳-۳): نتایج آزمایشات انجام شده برای یافتن ضریب میرایی ۵۸

جدول (۳-۴): نتایج حاصل از روش اجزاء محدود در هنگام تأمین گشتاور بار نامی توسط ماشین ۶۵

جدول (۳-۵): پارامترهای تخمین زده شده موتور القایی به کمک الگوریتم ژنتیک ۶۶

جدول (۳-۶): مقایسه نتایج روش اجزاء محدود و تئوری مؤلفه های متقارن ۷۲

جدول (۳-۷): ولتاژهای اندازه گیری شده برای شرایط متعادل و نامتعادل ۷۴

جدول (۳-۸): مقایسه نتایج حاصل از تست و روش اجزاء محدود ۷۴

جدول (۳-۹): هشت حالت خاص از ولتاژهای نامتعادل با ضریب نامتعادلی ولتاژ ۶ درصد ۷۶

جدول (۳-۱۰): ولتاژهای نامتعادل با ضریب نامتعادلی ولتاژ ۱ تا ۷ درصد ۸۰

فصل چهارم

جدول (۴-۱): مقادیر مؤثر هارمونیک های ولتاژی استفاده شده در شبیه سازی ۸۶

فصل پنجم

–

فصل اول:

مروری بر موتورهای القایی سه فاز و کاربرد آن در صنایع

۱-۱- مقدمه

موتورهای متناوب القایی عمومی ترین موتورهایی هستند که در کاربرد های صنعتی، تجاری و خانگی استفاده می‌شوند. امروزه پرکاربردترین موتورهای القایی را موتورهای رتور قفسی تشکیل می‌دهند. طراحی ساده و مستحکم، قیمت ارزان، هزینه نگه داری پایین و اتصال ساده و کامل به یک منبع متناوب، از مزایای موتورهای القایی متناوب هستند. دراین فصل اصول عملکرد، ساختمان، کلاس های طراحی و ویژگی های این نوع از موتورها، مدار معادل الکتریکی، انواع اتلاف و تعاریف موجود برای راندمانِ این تجهیز بسیار ارائه گردیده است.

۱-۲- عملکرد موتورهای القایی سه فاز

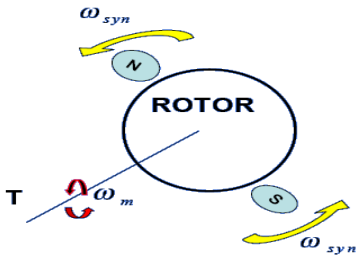
موتورهای القایی، ماشین های جریان متناوبِ یک تحریکه ای هستند که در آن ها سیم پیچی استاتور به منبع جریان متناوب وصل شده و رتور از طریق القاء(عمل ترانسفورماتوری)، انرژی را از استاتور دریافت می کند[۱]. به طور کلی نحوه کار موتورهای القایی را به اختصار می توان به صورتِ مراحل زیر در نظر گرفت:

- چرخش قطب های یک آهنربا با سرعت زاویه‌ای سنکرون(شار گردان)
- القاء ولتاژ و جاری شدن جریان در رتور در جهت مخالف عامل بوجود آورنده
- ایجاد گشتاور بر روی رتور و چرخش در جهت میدان اصلی
- رسیدن سرعت رتور به نزدیکی سرعت سنکرون

شایان ذکر است، با توجه به عدم القاء ولتاژ و جریان در سرعت سنکرون، موتورهای القایی نمی توانند به سرعت سنکرون برسند. بر این اساس، نسبت تفاوت سرعت مکانیکی رتور و میدان گردان(سرعت سنکرون)، به سرعت سنکرون را اصطلاحاً لغزش[۱] ماشین القایی می نامند.

شکل (۱-۱) مراحل فوق را نشان می‌دهد.

۱- Slip



شکل (۱- ۱) : نحوه عملکرد موتور القایی

۱-۳- اهمیت استفاده از موتورهای القایی در صنعت

طبق گزارش دپارتمان انرژی[۱] ایالات متحده، ۷۰ درصد کل انرژی الکتریکی تولیدی را الکتروموتورهای صنعتی مصرف می کنند و در صنایع عموماً ۸۰ درصد بارها شامل موتورهای القایی سه فاز می‌باشند و بیشتر این موتورها به طور مستقیم به سیستم توزیع قدرت[۲] متصل می‌شوند[۲]. موتورهای القایی به دلیل سهولت در بهره برداری، قابلیت اطمینان بالا، صرفه جویی در هزینه، قابلیت راه‌اندازی مناسب، سهولت کار با آن، ساختار محکم، نگهداری آسان، قیمت پایین و سر وصدای کم، بیشتر از موتورهای دیگر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. نقش این موتورها در صنعت بعد از گسترش درایو های سرعت کنترل‌پذیر افزایش یافت[۳]. در کنار مزایایی که برای موتور القایی عنوان شده است، این موتورها دارای معایبی نیز می‌باشند که عبارتند از: سرعت غیرثابت، کنترل دور مشکل و ضریب قدرت نسبتاً پایین و غیرثابت.

۱-٤- انواع موتورهای القایی

عموماً موتورهای القایی، حسب تعداد فازها، به دو دسته موتورهای القایی سه فاز(خود راه انداز[۳]) و موتورهای القایی تک فاز(غیرخود راه انداز) تقسیم بندی می شود.ازجمله موتورهای القایی تک فاز می توان به موتور القایی فازشکسته، با استارت خازنی و با خازن دائمی اسپلیت اشاره نمود. همچنین موتورهای القایی به لحاظ نوع رتور، به دو نوع رتور قفس سنجابی و سیم پیچی شده طبقه بندی می شوند.

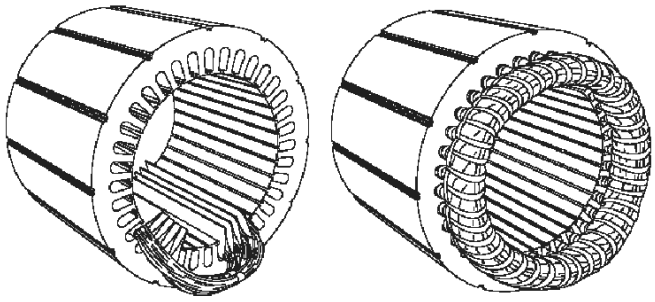
۱- Department of Energy(DoE)
۲- Power Distribution System(PDS)
۳- Self Starter

۱-۵- ساختار موتورالقایی

به طورکلی موتورهای القایی از دو جزء مهم، یعنی استاتور و رتور تشکیل شده است،که درذیل بدان اشاره می شود.

۱-۵-۱- استاتور

استاتور یا قسمت ساکن موتورهای القایی، شامل قطب‌های سیم‌پیچی شده‌ای هستند که با عبور جریان از آنها و بالتبع با تولید میدان مغناطیسی، در رتور ولتاژ القا می‌کنند. تعداد قطب‌ها با توجه به سرعت و گشتاور مورد نیاز می‌تواند مختلف باشد اما همواره یک عدد زوج خواهد بود. هسته استاتور از ورقه هایی از جنس فولاد مرغوب ساخته می شود. این ورقه ها به صورت یک سیلندر توخالی با شیارهایی که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، به هم منگنه و محکم شده‌اند. سیم‌پیچی‌ها با سیم‌های روکش‌دار در این شیارها جاسازی می‌شوند[۴].



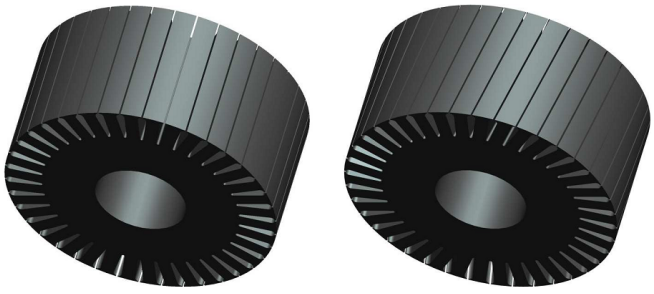
(ب) (الف)

شکل (۱-۲): استاتور موتور القایی (الف) سیم پیچی شده (ب) با شیارهای خالی

۱-۵-۲- رتور

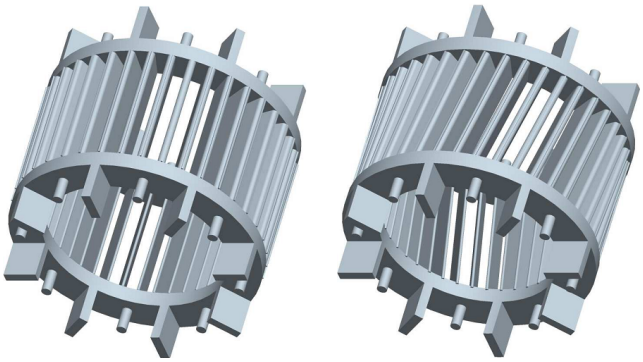
رتور یا قسمت متحرک(گردان) موتورهای القایی می تواند به دو صورت قفسه سنجابی و یا سیم پیچی شده باشد. به دلیل مزایای بالای رتورهای قفسی مانند سادگی، هزینه کمتر، نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری و... رایج‌ترین رتورها در موتورهای القایی رتورهای قفسی هستند. این رتورها از میله‌هایی از جنس مس یا آلومینیوم تشکیل شده‌اند که به صورت یک استوانه به همدیگر متصل و در دو طرف به وسیله دو حلقه اتصال کوتاه شده‌اند.

این طرح به این دلیل رتور قفس سنجابی نامیده می‌شود که مجموعه میله های هادی شبیه چرخ‌هایی هستند که سنجابها روی آن می‌دوند. رتورهای سیم‌پیچی شده در صنعت کاربردهای خاص خود را دارند و بیشتر در موتورهایی که نیاز به گشتاور راه‌اندازی بالایی دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. هسته رتور از ورقه های فولادی از جنس هسته استاتور تشکیل می شود. معمولاً ورقه های مذکور طوری طراحی می شوند که اگر در کنار هم قرار بگیرند شیار های مورّبی را برای جاسازی میله های هادی (در نوع قفسی) وکلاف ها(در نوع سیم پیچی شده) تشکیل دهند. تعداد شیارهای رتور از تعداد شیارهای استاتور کمتر است. دلیل این امر، بر طرف نمودن نقطه مرگ و جلوگیری از شرایطی است که گشتاور راه اندازی را از بین می برند. مورّب بودن شیارها درکاهش هارمونیک های شیاری و یکنواخت کردن تغییرات گشتاور خروجی مؤثر می باشد[۴]. برای درک بهتر، نمونه هایی از هسته رتور و میله های هادی در نوع قفسه سنجابی به ترتیب در شکل های (۱-۳) و (۱-۴) نشان داده شده اند.



(ب) (الف)

شکل (۱-۳): نمونه‌ای از هسته های رتور قفس سنجابی (الف) نوع مورّب (ب) نوع غیر مورّب



(ب) (الف)

شکل (۱-۴): نمونه‌ای از میله های هادی رتور قفس سنجابی (الف) نوع مورّب (ب) نوع غیر مورّب

۱-٦- طبقه بندی موتورهای القایی قفسه سنجابی

معمولاً درصنعت با بارهای مکانیکی گوناگون روبرو هستیم. برای ایجاد محیطی مناسب برای راه اندازی و کار عادی این بارهای مکانیکی، انواع طرح های مختلف از موتورهای قفسه سنجابی به بازار عرضه می شود.سازندگان طبق استاندارد $NEMA$[۱] ، موتورهای قفسه سنجابی را در چهار کلاس A ، B ، C و D می سازند. تفاوت عمده موتورهای قفسه سنجابی در این چهار کلاس، در طراحی رتور آن ها می باشد. در ذیل ویژگی های موتورهای القایی کلاس های فوق به اختصار توضیح داده شده است[۵،۶] :

۱-٦-۱- موتورهای کلاس A

این نوع موتورها دارای رتور با شیارهای بزرگ و نزدیک به سطح(رتور با مقاومت و راکتانس کم) می باشند. موتورهایی که در این کلاس طراحی می شوند دارای ویژگی های زیر می باشند:

- گشتاور راه اندازی آن ها عادی است.
- جریان راه اندازی آن ها زیاد است.
- در شرایط کار عادی لغزش کم است.
- مقاومت رتور کم است و لذا در لغزش کم، بازده نسبتاً خوب می باشد.
- کاربرد این موتورها در مواردی است که بار به گشتاور راه انداز کمی نیاز داشته باشد.

۱-٦-۲- موتورهای کلاس B

رتور این نوع موتورها دارای شیارهای بزرگ و عمیق (دارای مقاومت کم و راکتانس زیاد) می باشد. در این موتورها می توان به نکات ذیل توجه کرد:

- گشتاور راه اندازی این موتورها شبیه کلاس A است.
- جریان راه اندازی در این موتورها، ۷۵ درصد موتورهای کلاس A می باشد.

۱- National Electrical Manufacturers Associations