دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

کنترل مستقیم و مستقل توان اکتیو و راکتیو ماشین القایی دو سو تغذیه بدون استفاده از حسگر موقعیت روتور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

نوید امیری

استاد راهنما

دکتر سید محمد مدنی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

کنترل مستقیم و مستقل توان اکتیو و راکتیو ماشین القایی دو سو تغذیه بدون استفاده از حسگر موقعیت روتور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

نوید امیری

استاد راهنما

دکتر سید محمد مدنی

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای نوید امیری

تحت عنوان

کنترل مستقیم و مستقل توان اکتیو و راکتیو ماشین القایی دو سو تغذیه بدون استفاده از حسگر موقعیت روتور

در تاریخ ۹۰/۲/۲۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید محمد مدنی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر حسین ابوترابی زارچی
۳- استاد داور	دکتر محمد ابراهیمی
۴- استاد داور	دکتر بهزاد میرزاییان
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمود مدرس هاشمی

خدا را شاکرم که توانایی اتمام این دوره از تحصیل را به من عطا فرمود. بر خود لازم می‌دانم که از توجه، راهنمایی و پیگیری های استادان راهنما جناب آقای دکتر سید محمد مدنی و مشاورم جناب آقای دکتر حسین ابوترابی زارچی سپاسگذاری کنم. همچنین از پدر و مادرم به خاطر تشویق ها و پشتیبانی های بی دریغشان در طول مدت انجام پایان نامه صمیمانه تشکر می کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بـر نتـایج مطالعـات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این گزارش نامـه متعلـق بـه دانشـگاه صـنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و فداکارم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

فصل دوم: مدل ماشین القایی دو سو تغذیه و مبدل پشت به پشت

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ مدل ماشین القایی دو سو تغذیه ۹

۲-۳ انتقال توان ۱۱

۲-۴ بررسی انتقال توان در مدل دو محوری ماشین القایی دو سو تغذیه ۱۴

۲-۵ کنترل مستقیم توان ۱۹

۲-۵-۱کنترل مستقیم و مستقل توان ۱۹

۲-۵-۲ کنترل مستقیم توان از طریق کنترل بردار شار روتور ۲۲

۲-۵-۳کنترل مستقیم توان به روش باند هیسترزیس ۲۵

۲-۶ معرفی و بررسی عملکرد اینورتر سمت روتور ۲۸

۲-۷ معرفی مبدل سمت شبکه ۳۳

۲-۸ کنترل مبدل یکسو کننده پهنای پالس سمت شبکه ۳۵

فصل سوم: کنترل مستقیم و مستقل توان اکتیو و راکتیو ماشین القایی دو سو تغذیه

۳-۱ مقدمه ۴۰

۳-۲ بررسی اثر تغییرات توان بر شار استاتور ۴۱

۳-۲-۱ تغییرات توان اکتیو ۴۳

۳-۲-۲ تغییرات توان راکتیو ۴۵

۳-۳ بررسی تزویج بین توان اکتبو و راکتیو در شرایط کنترل توان مستقیم منطبق بر مختصات مرجع شار استاتور ۴۶

۳-۴ انتقال توان در ماشین القایی دو سو تغذیه در مختصات منطبق بر شار شبکه ۵۰

۳-۵ مدل ماشین القایی دو سو تغذیه در مختصات منطبق بر شار شبکه ۵۰

۳-۶ کنترل توان ماشین القایی دو سو تغذیه در مختصات منطبق بر شار شبکه ۵۲

۳-۶-۱ کنترل بردار ولتاژ روتور ۵۲

۳-۶-۲ کنترل بردار شار روتور ۵۳

۳-۷ کنترل مستقیم و مستقل توان با استفاده از کنترل بردار شار روتور در مختصات منطبق بر شار شبکه ۵۴

۳-۷-۱ محاسبه شار استاتور مرجع در مختصات منطبق بر شار شبکه ۵۵

۳-۸ توضیح روند کنترل مستقیم و مستقل توان با استفاده از دیاگرام برداری ۵۸

۳-۸-۱ دیاگرام برداری ماشین در مختصات منطبق بر شار استاتور ۵۸
۳-۸-۲ دیاگرام برداری ماشین در مختصات منطبق بر شار شبکه ۶۱
۳-۹ تخمین موقعیت بردار شار شبکه نسبت به روتور بدون استفاده از حسگر موقعیت ۶۵
۳-۱۰ اصلاح پارامتر ۶۸
۳-۱۱ نتایج شبیه سازی ۷۱
۳-۱۲ نتایج عملی ۸۶
فصل چهارم: مدل آزمایشگاهی
۴-۱ مقدمه ۹۰
۴-۲ ماشین القایی دو سو تغذیه و ماشین dc ۹۱
۴-۳ مبدل پشت به پشت ۹۳
۴-۳-۱ ساختار مبدل ۹۳
۴-۳-۲ خازن لینک dc ۹۴
۴-۳-۳ مبدل سمت روتور ۹۴
۴-۳-۴ مبدل سمت شبکه ۹۵
۴-۴ مدار فرمان گیت ۹۶
۴-۵ نمونه بردارهای ولتاژ و جریان ۹۹
۴-۵-۱ نمونه بردارهای جریان ۱۰۰
۴-۵-۲ نمونه بردار ولتاژ ۱۰۱
۴-۵-۳ فیلتر پایین گذر ۱۰۳
۴-۶ پردازنده سیگنال دیجیتال Ti TMS320-F2812 ..... ۱۰۵
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
نتیجه گیری ۱۰۹
پیشنهادات ۱۱۱
پیوست ۱۱۲
مراجع ۱۱۹

چکیده

امروزه بهره برداری از انرژی های تجدید پذیر به دلیل رو به اتمام بودن منابع سوخت فسیلی دارای اهمیت روزافزونی می باشد. انرژی باد یکی از منابع انرژی ذکر شده است که بهره برداری از آن به مراتب ساده تر می باشد. بهره برداری از این انرژی با استفاده از یک توربین بادی متصل به یک ژنراتور الکتریکی میسر است. یکی از ژنراتورهای مورد استفاده برای این منظور ماشین القایی دو سو تغذیه می باشد. در این ماشین می توان توان الکتریکی استاتور متصل به شبکه را از طریق اعمال ولتاژهای صحیح به سیم پیچی های روتور کنترل نمود. در این پایان نامه مدل ماشین القایی دو تغذیه که یکی از پر کاربردترین ژنراتورها برای این منظور است معرفی شده و کنترل توان آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توج به مدل ماشین، توان یک ماشین القایی دو سو تغذیه به طور مستقیم با حاصلضرب بردارهای شار استاتور و روتور دارای رابطه خطی است، با نادیده گرفتن مقاومت استاتور و ثابت در نظر گرفتن شار استاتور و همچنین استفاده از مدل دو محوری ماشین منطبق بر شار استاتور، می توان توان اکتیو و راکتیو الکتریکی استاتور ماشین را به طور مستقل به ترتیب با کنترل شار روتور در راستای عمودی و افقی شار استاتور کنترل کرد. اما در واقعیت به دلیل وجود مقاومت استاتور شار استاتور ثابت نبوده و اندازه و زاویه بردار آن با تغییرات جریان و توان تغییر می کند. این امر علاوه بر ایجاد تزویج میان کنترل توان اکتیو و راکتیو موجب غیر خطی شدن رابطه توان بر حسب شار شده و کنترل مستقل و سریع امکان پذیر نخواهد بود. در این پایان نامه به منظور مستقل سازی کنترل توان ابتدا مدل ماشین در مختصات مرجع شار شبکه (grid Flux) معرفی شده و سپس با در نظر گرفتن مقاومت استاتور و شار نشتی ماشین، شار روتور مرجع صحیح با پیشبینی شار استاتور محاسبه شده و کنترل توان به صورت مستقل انجام می شود. با توجه به این نکته که در ماشین القایی دو سو تغذیه جریان رتور به طور مستقیم قابل اندازه گیری می باشد می توان با استفاده از تخمین جریان روتور و مقایسه آن با مقدار اندازه گیری شده، موقعیت روتور را تخمین زده و روند کنترل را مستقل از سنسور موقعیت انجام داد. منظور تضمین عملکرد صحیح تخمین موقعیت روتور، یک حلقه اصلاح گر پارامتر اندوکتانس مغناطیس کنندگی ماشین به طور همزمان این پارامتر را تخمین می زند. نتایج شبیه سازی انجام شده بر روی یک ماشین 4KW DFIM نشاندهنده توانایی روش ارائه شده در کنترل مستقل و مطلوب توان اکتیو و راکتیو استاتور می باشد. همچنین تخمین موقعیت روتور و اصلاح پارامتر ماشین به طور مطلوبی در طول مدت شبیه سازی انجام شده است. به منظور آزمایش روش ارائه شده، یک مدل آزمایشگاهی 4KW محیا گردید که نتایج بدست آمده از آن نتایج شبیه سازی را تأیید می نماید.

کلمات کلیدی: ۱- انرژی باد ۲-ماشین القایی دو سو تغذیه (DFIM) ۳-کنترل برداری توان ۴-کنترل مستقیم و مستقل توان (DPC) ۵- sensorless ۶- تخمین پارامتر ۷- MRAS

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه بیشتر انرژی الکتریکی با استفاده از منابع غیر قابل تجدید نظیر ذغال سنگ، نفت و گاز است تولید می شود. این امر باعث افزایش روز افزون تولید گازهای گلخانه ای و در نتیجه گرمایش هرچه بیشتر جو خواهد شد، همچنین در حال اتمام بودن سوخت های فسیلی در دسترس در شرایط تقاضای در حال افزایش انرژی الکتریکی نیز یکی از دلایل مهم و توجیه کننده برای استفاده هر چه بیشتر از منابع انرژی تجدید پذیر نظیر انرژی باد، خورشید و ... می باشد. همچنین عدم تأثیر پذیری محیط زیست از استفاده از منابع انرژی های تجدید پذیر نیز یکی دیگر از دلایل مهم استفاده از این منابع انرژی است.

در دو دهه اخیر انرژی جنبشی باد به عنوان یکی از منابع قابل بهره برداری به منظور تولید آسان و قابل دسترس انرژی الکتریکی محبوبیت ویژه ای در سراسر دنیا پیدا کرده است، به طوری که طبق آمار شورای جهانی انرژی باد[1] [۱] تجهیزات بهره برداری از این انرژی در بیش از ۷۰ کشور در حال استفاده است. همچنین ظرفیت نصب شده تا سال ۲۰۰۷ میلادی برابر با 94,189 MW می باشد که نسبت به سال قبل از آن ۲۷ درصد افزایش داشته است. بهره برداری از انرژی های با منابع طبیعی دارای چالش هایی نظیر تصادفی بودن میزان انرژی قابل

[1] Global Wind Energy C (GWEC)

استفاده می باشد، لذا اسفاده از سیستم های بهره برداری انعطاف پذیر جهت تولید کنترل شده انرژی اجتناب ناپذیر است. در حال حاضر این سیستم ها بر اساس طبقه بندی WECC[1] [۲] به چهار دسته اصلی تقسیم می شوند:

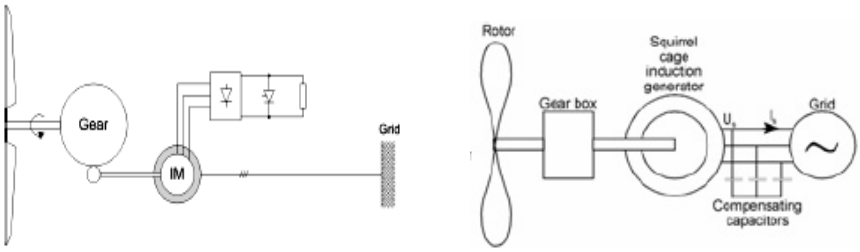
۱- مجموعه توربین و ژنراتور القایی قفسه سنجابی[2] متصل به شبکه

۲- مجموعه توربین و ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده متصل به شبکه با کنترل مقاومت روتور[3].

۳- مجموعه توربین و ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده متصل به شبکه به همراه کنترل ولتاژ روتور از طریق یک مبدل پشت به پشت[4] بین شبکه و روتور[5].

۴- مجموعه توربین و ژنراتور سنکرون یا آسنکرون متصل به شبکه از طریق یک مبدل پشت به پشت[6] در سطح توان نامی ژنراتور.

دسته اول و دوم معرفی شده دارای ساده ترین آرایش هستند به طوری که ژنراتور به طور مستقیم به شبکه متصل است. در این دو دسته جلوگیری از عملکرد در مود موتوری از طریق یک سوئیچ قطع کننده انجام می پذیرد. همچنین از دیگر معایب این آرایش می توان به مصرف توان راکتیو توسط ژنراتور به دلیل عدم قابلیت کنترل بر روی این مؤلفه توان اشاره کرد. در دسته دوم مقاومت متغیر کنترل شده روتور می تواند جهت تغییرات در مؤلفه سرعت – گشتاور ماشین مورد استفاده قرار گیرد. شکل (۱-۱) نشان دهنده آرایش دسته اول و دوم می باشد.



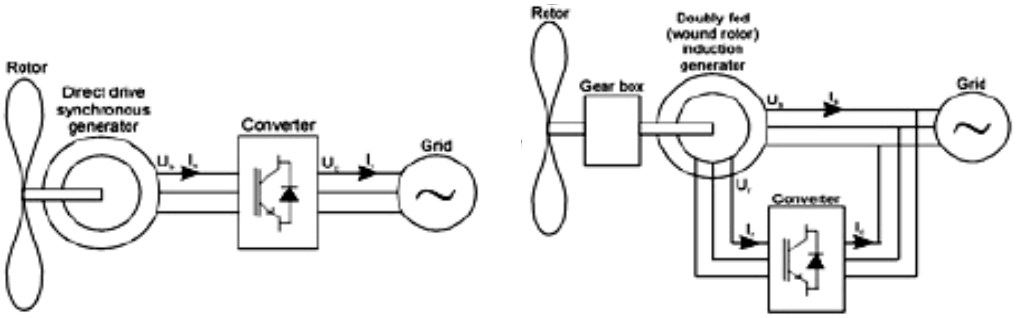
(ب) (الف)

شکل (۱-۱) – الف) ژنراتور القایی قفسه سنجابی متصل به شبکه ب) ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده با کنترل مقاومت روتور

آرایش بکار رفته در دسته سوم معمول ترین نوع بکار رفته در کاربردهای توان بالای شبکه است. در این آرایش، کنترل کامل توان راکتیو از طریق کانورترهای متصل به شبکه و روتور امکان پذیر می باشد. همچنین کنترل سرعت در حدود ۲۵ درصد حول سرعت نامی با استفاده از مبدل سمت روتور امکان پذیر می باشد. از

[1] Western Electricity Coordinating Council
[2] Induction Generator
[3] Wound Rotor Induction Generator
[4] Back to back Converter
[5] Doubly Fed Induction Generator
[6] Direct Drive Synchronous or Asynchronous Generator

محاسن این آرایش می توان به سطح توان مبدل های مورد استفاده در سمت روتور و شبکه نام برد که در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور طراحی شده و توان لغزشی ماشین را در همین بازه کنترل می نمایند[۳]،[۴] و [۵]. در دسته چهارم ژنراتور مستقل از نوع آن توسط یک مبدل back to back در سطح توان نامی ژنراتور به شبکه متصل است. در این دسته کنترل توان و سرعت در ۱۰۰ درصد محدوده امکان پذیر می باشد. لکن قرار داشتن سطح توان نامی مبدل ها در میزان توان نامی ژنراتور یکی از معایب این دسته می باشد که با بالا رفتن توان توربین می تواند باعث عدم مقرون به صرفگی شوند. در شکل (۱-۲) آرایش مربوط به دسته سوم و چهارم را مشاهده می کنیم.



(ب) (الف)

شکل (۱-۲) - الف) ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به شبکه ب) ژنراتور سنکرون متصل به شبکه توسط مبدل پشت به پشت

استفاده از ژنراتور های دو سو تغذیه با توجه به سطح توان پایین مبدل های الکترونیک قدرت مورد استفاده در توان های بالا دارای ارجحیت نسبت به ژنراتور های سنکرون full-speed هستند. همچنین در [۶] نشان داده شده است که میزان دریافت انرژی در توربین های سرعت متغیر می تواند بین ۳ تا ۲۸ درصد توان دریافتی توربین های سرعت ثابت بر حسب محل نصب و نوع طراحی تغییر کند. همچنین در [۷] نشان داده شده است که استفاده از ژنراتور القایی دوسو تغذیه در توربین های سرعت متغیر می تواند تا ۲۰ درصد بهره برداری از انرژی باد را در مقایسه با نمونه ژنراتور القایی دسته چهارم و تا ۶۰ درصد در مقایسه با توربین سرعت ثابت افزایش دهد.

کنترل توان در DFIG از طریق کنترل ولتاژ یا کنترل جریان روتور انجام می پذیرد. روند کنترل مورد استفاده در DFIG از یک ماشین القایی ساده پیچیده تر می باشد. یکی از روش های معمول به منظور کنترل جریان روتور استفاده از روش کنترل منطبق بر شار (برداری) [1] است [۸-۱۳]. روش های متعددی تا به حال به منظور کنترل برداری DFIG ارائه شده اند. به طور مثال در[۱۴-۱۶] کنترل برداری منطبق بر شار استاتور[2] را به منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو استاتور معرفی نمودند. با کوچک در نظر گرفتن مقاومت استاتور می توان مفهومی به نام شار شبکه[3]

[1] Flux Oriented
[2] Stator Flux
[3] Grid Flux

در نظر گرفته شده و کنترل در مبنای این شار انجام می شود[۳-۱۳-۱۷]. شار فاصله هوایی ماشین می تواند مبنای دیگری به منظور کنترل برداری توان باشد که در [۱۸] و [۱۹] به این موضوع پرداخته شده است. امر مشترک در روش کنترل برداری، کنترل جریان روتور در یکی از قاب های مرجع مطرح شده می باشد. این امر باعث کاهش یافتن نوسانات توان خروجی، کنترل دامنه و مقدار ماکزیمم جریان و همچنین امکان پذیر ساختن کنترل توان های اکتیو و راکتیو را به طور مستقل می شود. لکن وجود حلقه کنترل جریان در مسیر کنترل توان باعث کند شدن سرعت کنترل توان ماشین شده در مواردی دینامیک مورد نیاز کنترل را برآورده نمی کند.

در کنار روش های کنترل برداری مبتنی بر جهت یابی شار، در دهه های اخیر روش های دیگری نظیر کنترل مستقیم خودی[1] [۲۰] و کنترل مستقیم گشتاور[2] [۲۱]،[۲۲] به منظور استفاده در موتورهای القایی قفسه سنجابی معرفی شده است. در روش های ذکر شده، کنترل گشتاور و شار موتور القایی به طور مستقل از موقعیت روتور و تنها با جهت یابی شارهای روتور و استاتور انجام می پذیرد. کنترلر های مورد استفاده در روش های ذکر شده نیز می توانند از نوع باند هیسترزیسی و یا از نوع کنترل کننده های PI باشند. در [۲۳] بر پایه روش های فوق روشی به منظور کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو[3] را به منظور استفاده در ماشین های القایی دو سو تغذیه ارائه شده است که علاوه بر دارا بودن مزایایی نظیر دینامیک سریع کنترل توان از خصوصیاتی نظیر مستقل بودن روش کنترل از مدل ماشین و عدم نیاز به سنسور موقعیت[4] نیز برخوردار است. در روش ارائه شده تخمین موقعیت شار استاتور بر پایه مشاهده اثر اعمال هرکدام از بردارهای ولتاژ روتور بر توان راکتیو استوار است. سپس به منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو مورد نظر ، بردارهای ولتاژ مطلوب روتور بر اساس جدول کلید زنی بهینه انتخاب می شوند. لکن روش فوق به دلیل نوع تخمین زاویه شار بر پایه بردارهای ولتاژ روتور دارای عدم دقت کافی به دلیل محدود بودن تعداد بردارهای ولتاژ است. این عدم دقت در تخمین موقعیت شار باعث وجود داشتن نوسان در توان خروجی ماشین و در نهایت کیفیت پایین توان تحویلی به ماشین و یا شبکه می شود. همچنین استفاده از جدول سوئیچ زنی باعث ثابت نبودن فرکانس کلید زنی مبدل سمت روتور می شود که عامل نامطلوبی به شمار می آید. در [۲۴] مشکل عدم دقت در تخمین شار را با استفاده از روابط ماشین و تخمین دقیق بر طرف کرده و نوسان توان را کاهش داده است. در [۲۵] سرعت عملکرد روش های پیشین را بهبود بخشیده شده است. همچنین در [۲۶] و [۲۷] یک روش کنترل توان

[1] Direct Self Control
[2] Direct Torque Control
[3] Direct Power Control
[4] Position sensor

اکتیو و راکتیو ماشین القایی دو سو تغذیه را بر پایه مدل پیش بین[1] ماشین طراحی شده که بر اساس کمینه کردن نوسانات توان حول مقدار مرجع استوار است. در [۲۸] و [۲۹] روش کنترل مستقیم توان به شرایط عدم تعادل ولتاژ تعمیم داده شده و عملکرد مطلوبی از خود نشان داده اند.کنترل انجام شده بر روی ماشین القایی دو سو تغذیه به منظور عملکرد مناسب نیازمند در دسترس بودن موقعیت روتور و همچنین موقعیت بردار شار استاتور نسبت به روتور خواهد بود. این عمل در ساده ترین حالت توسط انکدر موقعیت[2] قابل انجام است. لکن روش هایی به منظور کنترل و تخمین موقعیت شار بدون استفاده از سنسور موقعیت در [۳۰] آورده شده است.

روش های مورد استفاده به منظور کنترل مستقیم توان در عمل دارای عملکرد سریع و مطلوبی هستند. لکن به دلیل وجود پارامترهای ماشین نظیر مقاومت استاتور، شار استاتور از تغییرات توان ماشین تأثیر پذیر بوده و علاوه بر غیر خطی کردن رابطه توان نسبت به شار روتور و استاتور، به عدم استقلال کنترل میان توان اکتیو و راکتیو می انجامد. وجود تزویج میان مؤلفه های توان می تواند باعث بوجود آمدن پدیده های نامطلوبی نظیر نوسانات توان ماشین و گشتاور موجود بر محور ژنراتور شوند. لذا اندیشیدن تمهیداتی جهت از بین بردن تزویج میان توان اکتیو و راکتیو ماشین الزامی به نظر می رسد. به این منظور، در این پایان نامه اهداف زیر مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت:

- بررسی تزویج میان توان اکتیو و راکتیو ماشین القایی دو سو تغذیه. در مختصات مرجع شار استاتور
- معرفی مدل ماشین القایی دو سو تغذیه در مختصات شار شبکه
- کنترل توان ماشین القایی دو سو تغذیه در مختصات شار شبکه
- مستقل سازی کنترل توان اکتیو و راکتیو
- انجام کنترل توان بدون استفاده از سنسور موقعیت روتور
- اصلاح پارامتر اندوکتانس مغناطیس کننده گی ماشین در حین کار
- پیاده سازی عملی

[1] Model Predictive Control
[2] Encoder

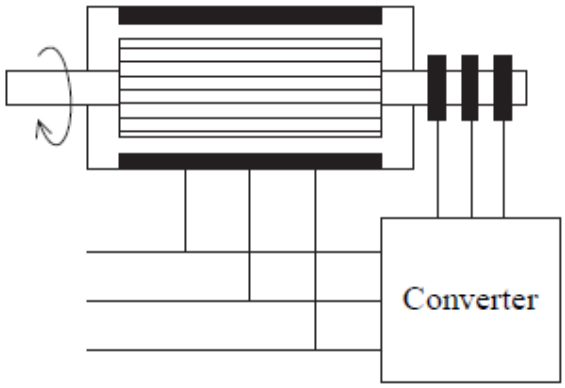
فصل دوم

مدل ماشین القایی دو تحریکه و مبدل پشت به پشت

۲-۱- مقدمه

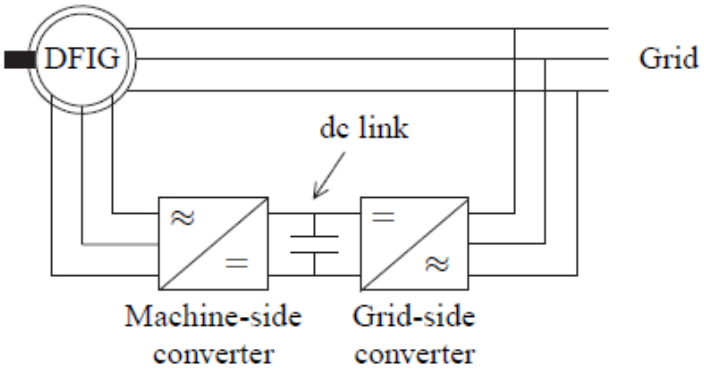
همانطور که در فصل قبل مطرح شد، به منظور بهره برداری از انرژی های با ماهیت تصادفی نظیر انرژی باد نیازمند یک سیستم تبدیل انرژی انعطاف پذیر نسبت به پارامترهای تصادفی منبع انرژی هستیم. یکی از ماشین های مورد استفاده به این منظور ماشین القایی دو تحریکه DFIM می باشد. ماشین القایی دو تحریکه از لحاظ ساختار مشابه یک ماشین القایی قفسه سنجابی است، با این تفاوت که در آن ترمینال های سیم پیچی های روتور از طریق یک سیستم حلقه-جاروبک در دسترس و قابل کنترل هستند. این امر امکان کنترل پارامترهای ماشین نظیر توان، سرعت و گشتاور را در اختیار قرار می دهد. در ساده ترین حالت می توان با اتصال یک مقاومت کنترل شده به سیم پیچی های روتور مشخصه گشتاور سرعت ماشین القایی را به منظور کنترل سرعت و یا توان تغییر داد. لکن یکی از مهمترین ویژگی های در دسترس بودن سیم پیچی های روتور، قابلیت تغذیه آن از طریق یک منبع ولتاژ است. قابلیت تغذیه روتور بوسیله منابع ولتاژ کنترل شده امکان کنترل پارامترهای روتور و در نهایت ماشین را در محدوده وسیع تری فراهم آورده و کنترل بهتری را بر ماشین باعث می شود. از مزایای این روش کنترل می توان به سطح پایین توان نامی روتور اشاره نمود که خود باعث پایین بودن سطح توان مبدل های تغذیه کننده روتور شده و در

نهایت تلفات و هزینه مبدل ها را کاهش می دهد. ارزش این روش کنترل هنگـامی مشـخص مـی شـود کـه اسـتاتور ماشین مستقیما به شبکه متصل بوده و قابلیت کنترل بر روی پارامترهای آن به طـور مسـتقیم وجـود نـدارد. در شـکل (۲-۱) ساختار یک ماشین القایی دو تحریکه متصل به شبکه را به همراه مبدل کنترل کننده ولتاژ روتور مشاهده مـی کنیم. این ساختار دارای بیشترین استفاده در تولید انرژی توربین های بادی است.



شکل (۲-۱) – ساختار یک ماشین القایی دو سو تغذیه

در ساختار مطرح شده استاتور ماشین مستقیما به شبکه متصل بوده و روتـور از طریـق یـک مبـدل پشـت بـه پشت back to back کنترل می شود. یک مبدل پشت به پشت تشکیل شده از دو مبدل dc به ac (مبدل سـمت ماشین و مبدل سمت شبکه) متصل به یک خازن لینک dc است. خازن متصل بین این دو مبدل دارای نقش ذخیـره کننده انرژی و کاهش دهنده ریپل ولتاژ dc مورد استفاده هر دو مبدل است. وظیفه مبدل سمت ماشین کنتـرل ولتـاژ روتور به منظور کنترل سرعت، گشتاور و ضریب توان در ترمینال های استاتور و وظیفه مبدل سمت شبکه ثابت نگاه داشتن ولتاژ خازن dc مورد استفاده هر دو مبدل و واحد نگاه داشتن ضریب قدرت سمت شبکه اسـت. همچنـین بـه دلیل تقویت کننده گی نوع مبدل مورد استفاده در مسیر تغذیه روتور در جهت ac به dc ، و نیز پایین تر بودن ولتـاژ نامی روتور از مقادیر شبکه و استاتور، در مسیر تغذیه روتور از یک ترانسـفورمر اسـتفاده مـی شـود. ایـن امـر باعـث کاهش سطح ولتاژ نامی باس dc شده و همچنین از کاهش ضریب مدولاسیون کانورترها را بـه مقـادیر بسـیار پـایین جلوگیری می کند. در ضمن ترانسفورمر سمت کانورتر شبکه خود به عنوان یک فیلتر جریان و ولتاژ عمـل کـرده و به بهبود کیفیت توان الکتریکی تحویلی کمک خواهد نمود. در شکل (۲-۲) نمای ساختار معرفـی شـده را مشـاهده می کنیم:

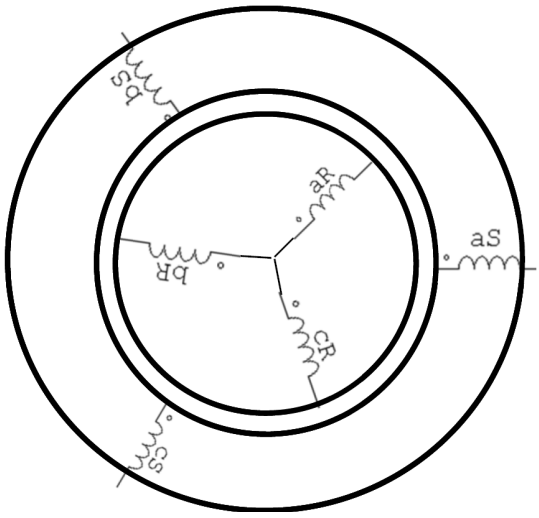


شکل (۲-۲) – نحوه اتصال ماشین القایی دو سو تغذیه به شبکه

به منظور کنترل ماشین القایی دو تحریکه، ابتدا نیاز به تعریف یک مدل از ماشین خواهیم داشت. در این فصل ابتدا مدل ماشین القایی دو سو تغذیه و اینورتر تغذیه کننده روتور معرفی شده سپس نحوه انتقال توان در ماشین القای دو سو تغذیه مورد بحث قرار گرفته و روش های معمول کنترل توان بر روی این ماشین معرفی می گردد. سپس کنترل مبدل سمت شبکه مدار تغذیه روتور توضیح داده شده و وظایف و عمکرد آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

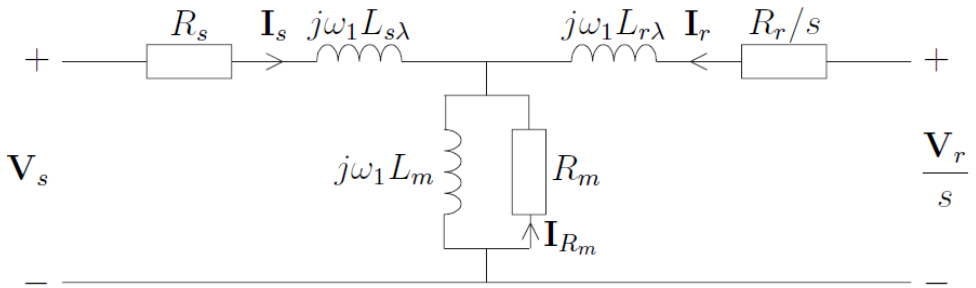
۲-۲- مدل ماشین القایی دو تحریکه [۳۲]

ماشین القایی دو تحریکه از نظر ساختار فیزیکی از یک استاتور و یک روتور هرکدام با سیم پیچی سه فاز تشکیل شده است. در شکل(۲-۳) ساختار یک موتور القایی دو تحریکه به همراه سیم پیچ های معادل فازهای استاتور و روتور مشاهده می شود.



شکل (۲-۳) – شکل فیزیکی ماشین DFIM

با توجه به شکل (۲-۳) می توان یک مدل دقیق معادل تک فاز ماشین را بدست آورد. در صورت در نظر گرفتن مدار یکی از فازهای ماشین و همچنین با در نظر گرفتن اندوکتانس های نشتی و تلفات آهن می توان مدار معادل تکفاز ماشین را مطابق شکل (۲-۴) رسم نمود.



شکل (۲-۴) – مدار معادل تکفاز ماشین القایی دو سو تغذیه

در مدار معادل شکل (۲-۴) پارامترهای بکار رفته به قرار زیر می باشند:

(V_s) : ولتاژ استاتور (R_s) : مقاومت استاتور (V_r): ولتاژ روتور

(R_r): مقاومت روتور (I_s): جریان استاتور (R_m): مقاومت معادل آهن ماشین

(I_r): جریان روتور (L_{ls}): اندوکتانس نشتی استاتور (I_{Rm}) : جریان معادل تلفات آهن

(L_{lr}) : اندوکتانس نشتی روتور (ω_s): فرکانس استاتور (L_m): اندوکتانس مغناطیس کننده گی

(s): لغزش

در تعاریف فوق لغزش s برابر است با :

$$S = \frac{\omega_{sl}}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \qquad ۱-۲$$

که در آن ω_m سرعت مکانیکی روتور و ω_{sl} فرکانس لغزش ماشین است.

بر طبق تعاریف و مدار معادل نشان داده شده و با صرف نظر کردن از تلفات آهن ماشین می توان روابط مداری حاکم بر ماشین را مطابق (۲-۲) و (۲-۳) نوشت:

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s L_{ls} I_s + j\omega_s L_m (I_s + I_r) \qquad ۲-۲$$

$$\frac{V_r}{S} = R_r I_r + j\omega_s L_{lr} I_r + j\omega_s L_m (I_s + I_r) \qquad ۳-۲$$

همچنین شار های الکترومغناطیسی موجود در ماشین را می توان به ترتیب زیر محاسبه کرد:

$$\psi_m = L_m (I_s + I_r) \qquad ۴-۲$$