٣٨١٧٤

۱۳۸۰ /۱۰/ ۳

دانشگاه مازندران

دانشکده فنی و مهندسی

موضوع :

کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو در اینورترهای کلاس روتور سیم پیچی شده متصل به شبکه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق – گرایش قدرت

استاد راهنما : آقای دکتر سعید لسان

استاد مشاور : آقای دکتر سید علی نبوی

نگارش : هادی طاریمرادی

015569

۳۸۷۷۶

خرداد ۱۳۸۰

باسمه تعالی

دانشگاه مازندران

معاونت آموزشی

تحصیلات تکمیلی

ارزشیابی پایان نامه در جلسه دفاعیه

دانشکده فنی و مهندسی

نام و نام خانوادگی دانشجو: هادی طاریمرادی شماره دانشجوئی : ۷۷۴۹۰۸

رشته تحصیلی : مهندسی برق - قدرت مقطع: کارشناسی ارشد

سال تحصیلی: نیمسال دوم ۸۰-۱۳۷۹

عنوان پایان نامه :

" کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو در مولدهای القائی روتور سیم بندی شده به شبکه"

تاریخ دفاع : ۱۳۸۰/۳/۱۶

نمره پایان نامه (به عدد) : ۱۸/۲۵

نمره پایان نامه (به حروف): هجده و بیست و پنج صدم

هیات داوران :

استاد راهنما: دکتر سعید لسان امضا

استاد مشاور: دکتر سید علی نبوی نیاکی امضا

استاد مدعو: دکتر عرب خاپوری امضا

استاد مدعو: دکتر ابوالفضل رنجبر نوعی امضا

نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی : دکتر حسن آبروش امضا

تشکر و قدردانی

لازم می دانم از استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر سعید لسان و استاد مشاور جناب آقای دکتر سید علی نبوی به خاطر زحمات و راهنمایی هایشان تشکر و قدردانی کنم . همچنین از اساتید و داوران حاضر در جلسه دفاعیه آقایان : دکتر عرب خابوری از دانشگاه علم و صنعت ، دکتر رنجبر نوعی از دانشگاه مازندران ، نماینده محترم تحصیلات تکمیلی گروه ، آقای دکتر آبروش و مدیریت محترم گروه برق ، جناب آقای دکتر کرمی تشکر و سپاسگزاری می نمایم .

تقدیم به دو راهنمای واقعی زندگیم

پدر و مادرم

چکیده :

ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه دارای قابلیت های بسیار جالبی هستند. استاتور این ژنراتورها مستقیماً و روتور آنها نیز از طریق یک کانورتر به شبکه متصل خواهد شد . این ژنراتورها قادر هستند حتی در صورت تغییر سرعت روتور , در استاتور ولتاژی با فرکانس ثابت تولید کنند . با استفاده از کنترل برداری که از روشهای کنترل بسیار خوب و سریع در ماشینهای القایی است , امکان کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو استاتور یا گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور وجود دارد . در این پایان نامه ابتدا چگونگی کنترل مستقل توان راکتیو استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی که برای ژنراتورهای بادی و تبعیّت از مشخصه گشتاور سرعت بهینه بسیار مناسب است , بررسی شده است . سپس چگونگی کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو استاتور که برای نیروگاههای آبی و کمک به پایداری شبکه یا کنترل فرکانس می تواند مفید باشد , بررسی می شود . سرعت قابل تغییر از قابلیت های بسیار خوب ژنراتورهای القایی روتور سیم پیچی شده است , زیرا این امکان را به وجود می آورد که از طریق کنترل سرعت , انرژی ذخیره شده در یک جرم گردان را به صورت توان الکتریکی لحظه ای به شبکه تزریق کرد و یا اینکه توان الکتریکی لحظه ای از شبکه دریافت کرده و در جرم گردان ذخیره کرد , تزریق/ جذب توان لحظه ای در پریودهای زمانی کوتاه به/ از شبکه کمک بسیار خوبی به پایداری شبکه خواهد کرد . چگونگی این مطلب نیز به وسیله نتایج شبیه سازی بررسی شده است .

فهرست

عنوان	صفحه
۱- فصل اول : مقدمه	**۱**
۲- فصل دوم : ماشین های القایی و اصول کنترل برداری	**۶**
۱-۲ – مدل مداری ماشین های القایی	۷
۲-۲- مدل ماشین های القایی در دستگاه *odq* با سرعت دلخواه	۱۰
۱-۲-۲- معادلات ولتاژ در دستگاه *odq*	۱۲
۲-۲-۲- روابط شار پیوندی در دستگاه *odq*	۱۳
۳-۲-۲- معادله گشتاور الکترومغناطیسی در مرجع *odq*	۱۵
٤-۲-۲- توانهای اکتیو و راکتیو استاتور در مرجع *odq*	۱٦
٥-۲-۲- معادله مکانیکی ماشین القایی	۱۷
٦-۲-۲- معادلات نهایی ماشین القایی در مرجع *odq*	۱۸
۳-۲- کنترل برداری در ماشین های القایی	۲۰
۱-۳-۲- روش مستقیم کنترل برداری	۲۳
۲-۳-۲- روش غیر مستقیم کنترل برداری	۲٦
۳-۳-۲- حساسیت روش های کنترل برداری به خطای پارامترها	۲۸
٤-۳-۲- یک روش مدار بسته برای تخمین میدان	۲۹
۳- فصل سوم : ژنراتورهای القایی	**۳۶**
۱-۳- ژنراتور القایی	۳۷

۲-۳- مقایسه ژنراتورهای سنکرون و ژنراتورهای القائی قفس سنجابی ۳۹

۳-۳- ژنراتورهای القایی روتور سیم پیچی شده ۴۲

۱-۳-۳- تزریق توان لحظه ای به شبکه ۴۵

۲-۳-۳- سیستم ذخیرهٔ انرژی در چرخ طیار MJ ۲۰۰ ۴۸

۴-۳- ژنراتورهای القائی با تغذیه دوگانه در نیروگاههای آبی ۴۹

۴- فصل چهارم : بررسی و شبیه سازی کنترل مستقل در ژنراتورهای القایی ۵۲

مقدمه ۵۲

۱-۴- ردیابی میدان استاتور یک ماشین القایی با تغذیه دو گانه در نیروگاههای بادی ۵۳

۲-۴- کانورترهای قدرت در ماشین های القایی ۶۰

۱-۲-۴- اینورترهای PWM فرکانس ثابت با کنترلر PI ۶۱

۳-۴- عملکرد ژنراتورالقایی نیروگاه بادی در حالت ماندگار ۶۷

۴-۴- عملکرد دینامیکی ۶۸

۵-۴- کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو استاتور ۸۰

۶-۴- کنترل توانهای اکتیو و راکتیو کلی ماشین ۸۵

۷-۴- تزریق توان لحظه ای به شبکه ۸۷

۸-۴- رفتار گذرای ماشین در صورت افت ۵۰٪ در ولتاژ شبکه ۹۱

۹-۴- طرح ترکیبی موتور القایی به عنوان کنذانسور گردان و تزریق توان لحظه ای ۹۳

۵- فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۶

منابع و مراجع ۱۰۲

فهرست اشکال و منحنی ها

شکل (۱-۲) : مدل ایده آل ماشین القایی ۷

شکل (۲-۲) : رابطه بین محورهای abc و dq ۱۱

شکل (۳-۲) : مدار معادل ماشین آسنکرون در مرجع odq ۱۵

شکل (٤-۲) : مقایسه ماشین DC و ماشین القایی در کنترل برداری ۲۱

شکل (٥-۲) : دیاگرام فازوری چگونگی کنترل مستقل ۲۲

شکل (٦-۲) : تعیین اندازه و موقعیت میدان از مولفه های آن ۲۳

شکل (۷-۲) :تعیین زاویه میدان استاتور از مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ و جریان ۲٥

شکل (۸-۲) : دیاگرام فازوری روش غیر مستقیم کنترل برداری ۲۷

شکل (۹-۲) : تعیین زاویه میدان استاتور در دستگاه مرجع سنکرون به روش غیر مستقیم
کنترل برداری ۲۸

شکل (۱۰-۲) : مدل ولتاژ برای مشاهده میدان ۳۰

شکل (۱۱-۲) : مدل جریان برای تخمین میدان ۳۲

شکل (۱۲-۲) : روش حلقه بسته تخمین میدان استاتور از ولتاژهای روتور و استاتور ،
جریان استاتور و موقعیت روتور بر مبنای استفاده از مدلهای ولتاژ و جریان ۳۳

شکل (۱۳-۲) : روش مدار بسته تخمین میدان روتور ۳٤

شکل (۱-۳) : ژنراتورهای القایی استفاده شده در سیستم توزیع کانادا ۳۹

شکل (۲-۳) : ژنراتورهای القایی با تغذیه دو گانه ٤۳

شکل (۳-۳) : ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه و استفاده از سیکلو کانورتر در طرف روتور ٤٤

شکل (٤-۳) : انرژی ذخیره شده در جرم گردان ٤٦

شکل (۱-٤) : دیاگرام کلی کنترل برداری ژنراتور القایی با جهت یابی میدان استاتور ٥٦

شکل (۲-٤) : بلوک دیاگرامهای تعیین گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور ٥٨

شکل (۳-٤) : تولید گشتاور الکترومغناطیسی مرجع ٥٩

شکل (٤-٤) : سیستم PWM رگولاتور جریان که به عنوان یک منبع جریان سه فاز عمل می کند. ٦١

شکل (٥-٤) : مبنای اینورتر PWM مقایسه با Ramp برای یک فاز ٦٢

شکل (٦-٤) : نحوه ایجاد پالس PWM و هارمونیک اصلی موج خروجی ٦٣

شکل (۷-٤) : دامنه هارمونیک اصلی ولتاژ خروجی بر حسب شاخص مدولاسیون ٦٤

شکل (۸-٤) : بلوک دیاگرام رگولاتور جریان PI در دستگاه مرجع سنکرون ٦٦

شکل (۹-٤) : بلوک دیاگرام رگولاتور جریان PI در دستگاه مرجع ساکن ٦٦

شکل (۱۰-٤) : مشخصه های حالت ماندگار ماشین القایی با تغذیه دوگانه ٦۷

شکل (۱۱-٤) : سرعت مرجع و واقعی روتور ٦۹

شکل (۱۲-٤) : گشتاور شافت و گشتاور الکترومغناطیسی ٦۹

شکل (۱۳-٤) : الف - مولفه های مولد از جریان روتور ب- شار محور d استاتور λ_{ds}^{e} ۷۰

شکل (۱٤-٤) : جریانهای فاز استاتور و روتور ۷۰

شکل (۱٥-٤) : الف - گشتاور الکترومغناطیسی ب- توان راکتیو استاتور ۷۲

شکل (۱٦-٤) : مولفه های مولد از جریان روتور i_{dr}^{e} و i_{qr}^{e} ۷۲

شکل (۱۷-٤) : جریان سه فاز روتور ۷۳

شکل (۱۸-٤) : جریان فاز استاتور ۷۳

شکل (۱۹-٤) : جریان فاز استاتور بررسی (دقیق تر) ۷۳

شکل (۲۰-٤) : گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور.(تغییر پله در توان راکتیو) ۷٤

شکل (۲۱-٤) : مولفه های مولد از جریان روتور i_{dr}^{e} و i_{qr}^{e} ۷٤

شکل (۲۲-٤) : جریانهای سه فاز روتور و فاز استاتور ۷۵

شکل (۲۳-٤) : الف – توان ظاهری کانورتر در سرعتهای محتلف روتور ۷۷

ب- توانهای اکتیو و راکتیو روتور در سرعتهای مجتلف روتور ۷۷

شکل (۲٦-٤) : چگونگی کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو استاتور (تغییر پله در توان اکتیو) ۸۳

شکل (۲۷-٤) : چگونگی کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو استاتور (تغییر پله در توان راکتیو) ۸٤

شکل (۲۸-٤) : توانهای اکتیو و راکتیو روتور ، استاتور و کلی ماشین (تغییر پله در توان اکتیو کلی) ۸٦

شکل (۲۹-٤) : توانهای اکتیو و راکتیو روتور ، استاتور و کلی ماشین (تغییر پله در توان راکتیو کلی) ۸٦

شکل (۳۰-٤) : تزریق توان الکتریکی لحظه ای به شبکه ۸۹

شکل (۳۱-٤) : جریان فاز a استاتور در مراحل تغییر سرعت ۹۰

شکل (۳۲-٤) : جریان فاز a روتور در مراحل تغییر سرعت ۹۰

شکل (۳۳-٤) : رفتار ماشین در نتیجه افت ۵۰٪ ولتاژ ۹۲

شکل (۳٤-٤) : عملکرد به عنوان کندانسور سنکرون ۹٤

فصل اول :

مقـدمه

بعد از بحران انرژی در دهه ۷۰ افزایش قابل ملاحظه ای در گسترش نیروگاههای کوچک بوجود آمد . این نیروگاهها بر مبنای استفاده از انرژی های تجدید پذیر تولید انرژی می کنند ، که این نیز نتیجه سیاست عدم اتکا به سوختهای فسیلی بود که از طرف حکومتها اعمال می شد. در این میان آب و باد به عنوان منابع انرژی تجدید پذیر بیشتر مورد توجه قرار گرفتند .

انتخاب نوع ژنراتور برای نیروگاههای کوچک بحث مهمی است ، که عمدتاً از بین ژنراتورهای سنکرون یا ژنراتورهای القایی باید یکی را به عنوان مولد الکتریسیته انتخاب کرد . ژنراتورهای القایی خود تحریک قفسه سنجابی با توجه به فاکتورهایی مانند : ساختمان ساده و بدون جاروبک روتور آنها ، راحتی کارکرد ، پایین بودن هزینه واحد ، قابلیت نگهداری و اطمینان بالا و عدم وابستگی به یک تحریک *dc* جداگانه ، مورد توجه بیشتری قرار گرفتند .اما مشکل این ژنراتورها و در کل ژنراتورهای القایی احتیاج به یک منبع خارجی برای تامین و پایداری میدان مغناطیسی است .و در صورت اتصال به شبکه توان راکتیو تقریباً زیادی را از شبکه دریافت خواهند کرد .

ژنراتورهای القایی روتور سیم پیچی شده یکی دیگر از نامزدهای تولید الکتریسیته در نیروگاههای کوچک و متوسط هستند . ژنراتورهای القایی روتور سیم پیچی شده با اعمال یک روش کنترل خوب یک انتخاب بسیار جالب برای تولید توان در این نیروگاهها هستند .

روش های مختلفی برای کنترل ماشین های القایی وجود دارد که عمدتاً به دو دسته کنترل اسکالر و کنترل برداری تقسیم می شوند .در روشهای کنترل اسکالر نمی توان به صورت مستقل از یکدیگر میدان و گشتاور را کنترل کرد ، بلکه در کنترل یکی از این مولفه ها دیگری نیز تغییر خواهد کرد . برای جبران این تغییر در مولفه دیگر از روشهای مختلفی استفاده می شود . ولی در کل روشهای کنترل اسکالر پاسخ دینامیکی خوب و سریعی ندارند . از شاخه های کنترل اسکالر می توان به ، کنترل لغزش ، کنترل ولتاژ – فرکانس ($\frac{v}{f} = cte$) ، کنترل شار و ... اشاره کرد .

کنترل برداری امروزه به عنوان روشی مناسب و بسیار سریع برای کنترل ماشین های القایی پذیرفته شده است . این روش ابتدا توسط آقای *Blaschke* از آلمان مطرح شد که از روش پسخور[1] سیگنالها استفاده می کرد و آنرا روش مستقیم کنترل برداری نامیدند . پس از آن روش غیر مستقیم کنترل برداری توسط آقای *Hasse* مطرح گردید که از پیشخور[2] سیگمنالها استفاده می کرد .

اصول کنترل برداری بر مبنای تقریب عملکرد ماشین های القایی به ماشین های *DC* است و این عمل از طریق تقسیم جریان به دو مولفه عمود بر هم انجام می شود که یکی مولفه مولد شار (میدان) بوده و همواره در راستای میدان باشد ، دیگری نیز مولفه مولد گشتاور باشد و همواره بر راستای میدان عمود باشد . چون میدان با سرعت سنکرون و یک موقعیت لحظه ای در حال چرخش است ، این جریانها نیز باید در یک دستگاه مرجع باشند ، که با سرعت سنکرون در حال چرخش است .

---

[1] - *Feedback*
[2] - *Feedforward*

ژنراتورهای القایی با تغذیه دو گانه ، از طریق استاتور مستقیماً به شبکه متصل شده و روتور آنها از طریق یک کانورتر تغذیه می شود . نشان داده خواهد شد که در این نوع ژنراتور و با استفاده از کنترل برداری علاوه بر کنترل مستقل شار و گشتاور ، امکان کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو استاتور و یا گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور نیز ، ازطریق مولفه های مولد آنها ، وجود دارد . کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو یا توان راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی در ژنراتورها مزیت بسیار بزرگی است. در نیروگاههای بادی برای دریافت ماکزیمم انرژی از باد ، لازم است که ماشین از یک پروفیل گشتاور سرعت از قبل تعیین شده تبعیت کند . با استفاده از کنترل مستقل گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور می توان علاوه بر دریافت ماکزیمم انرژی از باد ، توان راکتیو استاتور را نیز در مقدار مطلوب کنترل کرد . در نیروگاههای آبی نیز کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو امر مهمی است ، مخصوصاً در مواردی که برای کنترل فرکانس یا کمک به پایداری شبکه بکار گرفته می شوند . که این مسئله نیز از طریق کنترل برداری محقق و عملی خواهد شد .

سرعت ژنراتورهای القایی روتور سیم پیچی شده با تغذیه دوگانه می تواند در رنج مشخص ومعینی تغییر کند و در عین حال فرکانس و ولتاژ استاتور ثابت بماند . این امکان کنترل و تغییر سرعت این اجازه را به ما خواهد داد که از طریق ذخیره انرژی در جرم گردان ، توان لحظه ای به شبکه تزریق کرده و یا از شبکه توان لحظه ای دریافت کرد . این دریافت و جذبهای انرژی لحظه ای ، با توجه به ظرفیت ماشین و اینرسی جرم گردان ، می تواند در رنج تغییرات انرژی بزرگ و در پریودهای زمانی کوتاه ، انجام شود .

در فصل دوم این پایان نامه ابتدا با توجه به مدل مداری ماشین های القایی ، معادلات کلی ماشین در دستگاه سه فاز نوشته خواهد شد . سپس این معادلات با استفاده از ماتریس انتقال بدست آمده به دستگاه مرجع *odq* انتقال داده خواهد شد تا به مدار معادل و معادلات کلی ماشین در این دستگاه برسیم . و در