



سید رضا عسکری



Islamic Azad University
Khomeinishahr Branch
Faculty of Electrical and Computer Engineering, Department of Electrical
Engineering

"M.A." Thesis
On Power Systems
Subject:

**Dynamic stability modification of the standard network with
three machines and nine buses in IEEE due to asymmetric
two-phase fault and two-phase in the ground fault with
sliding control mode**

Thesis Advisor:
Dr.Soltani

By:
Omid Pedram

Winter 2016

Abstract

Title:

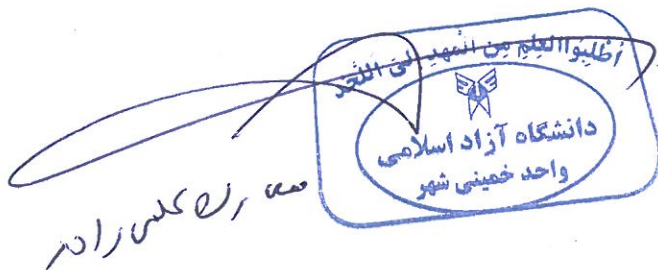
Dynamic stability modification of the standard network with three machines and nine buses in IEEE due to asymmetric two-phase fault and two-phase in the ground fault with sliding control mode.

Abstract:

The purpose of this thesis is to modify the dynamic stability in the standard network with three machines and nine buses in IEEE due to asymmetric two-phase fault and asymmetric two-phase in the ground fault with sliding mode controller in certain places of the system. The analysis method in the time domain uses the positive and negative spatial vectors of the currents and voltages in the network. Sliding mode controller is used to damp the high frequency oscillation and power system stabilizers (PSS) are used to apply additional signals. Using the AVR, the busbars's voltage is kept constant at the nominal values. In this thesis, it is necessary that initial values are obtained based on a Load-Flow solution.

Keywords:

Two-phase fault_ Two-phase fault to ground_ Asymmetric faults-phasor.





دانشگاه آزاد اسلامی

واحد خمینی شهر

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد M.Sc

گرایش مهندسی برق - قدرت سیستمهای قدرت

اصلاح پایداری دینامیکی شبکه استاندارد سه ماشینه و نه باسه IEEE در اثر خطاهای

نامتقارن دوفاز و دوفاز با هم به زمین

استاد راهنما:

دکتر جعفر سلطانی

نگارش:

امید پدram

زمستان ۱۳۹۵

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد خمینی شهر

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد M.Sc

گرایش مهندسی برق - قدرت سیستمهای قدرت

اصلاح پایداری دینامیکی شبکه استاندارد سه ماشینه و نه باسه IEEE در اثر خطاهای

نامتقارن دوفاز و دوفاز با هم به زمین

نگارش:

امید پدram

زمستان ۱۳۹۵

در تاریخ ۱۳۹۵// توسط کمیسیون تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنما پایان نامه

دکتر جعفر سلطانی

۲- داور داخل گروه

دکتر

۳- داور خارج گروه

دکتر

مدیر تحصیلات تکمیلی گروه برق

دکتر ارشادی



معاونت پژوهش و فن آوری

به نام خدا

مشور اخلاق پژوهش

بیاری از خدایان جهان و امتداد به این که عالم محضر خداست و همواره ناظر بر اعمال انسان و به منظور پاس داشت مقام بلند دانش و پژوهش و نظریه اهمیت جایگاه دانشگاه در اضمحلال فرهنگ و تمدن بشری، ماد انجمن و اصنام بیات علمی

و اهدافی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد می گردیم اصول زیر را در انجام فعالیت های پژوهشی مد نظر قرار داده و از آن تعهد می کنیم:

۱- اصل حقیقت جویی: تلاش در راستای پی جویی حقیقت و وفاداری به آن و دوری از هرگونه پنهان سازی حقیقت.

۲- اصل رعایت حقوق: التزام به رعایت کامل حقوق پژوهشگران و پژوهشگران (انسان، حیوان و نبات) و سایر صاحبان حق.

۳- اصل مالکیت مادی و معنوی: تعهد به رعایت کامل حقوق مادی و معنوی دانشگاه و کلیه همکاران پژوهش.

۴- اصل منافع ملی: تعهد به رعایت مصلح ملی و در نظر داشتن همیشرد و توسعه کشور در کلیه مراحل پژوهش.

۵- اصل رعایت انصاف و امانت: تعهد به امانت از هرگونه جانب داری غیر علمی و محافظت از اموال، تجهیزات و منابع در اختیار.

۶- اصل رازداری: تعهد به صیانت از اسرار و اطلاعات محرمانه افراد، سازمان ها و کشور و کلیه افراد و نهادهای مرتبط با تحقیق.

۷- اصل احترام: تعهد به رعایت حریم ها و حرمت ها در انجام تحقیقات و رعایت جانب تعد و خودداری از هرگونه حرمت شکنی.

۸- اصل ترویج: تعهد به رواج دانش و اشتهار نتایج تحقیقات و انتقال آن به همکاران علمی و دانشجویان به غیر از مواردی که منع قانونی دارد.

۹- اصل برنت: التزام به برنت جویی از هرگونه رفتار غیر حرفه ای و اعلام موضع نسبت به کسانی که حوزه علم و پژوهش را به سبب های غیر علمی می آلودند.

نام و نام خانوادگی: امید پدرام

تاریخ و امضا: ۹۵//

«تعه‌دنامه اصالت رساله يا پايان‌نامه»

اينجانب **اميد پدرام** دانش‌آموخته مقطع كارشناسي ارشد ناپيوسته در رشته برق - قدرت سيستمهاي قدرت كه در تاريخ //۱۳۹۵ از پايان‌نامه خود تحت عنوان:

«اصلاح پايداري ديناميكي شبكه استاندارد سه ماشينه و نه باسه IEEE در اثر خطاهاي

نامتقارن دوفاز و دوفاز با هم به زمين»

با كسب نمره و درجه دفاع نموده‌ام بدین وسیله متعهد می‌شوم:

- ۱- اين پايان‌نامه/ رساله حاصل تحقيق و پژوهش انجام‌شده توسط اينجانب بوده و در مواردی كه از دستاوردهای علمي و پژوهشي ديگران (اعم از پايان‌نامه، كتاب، مقاله و...) استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و رويه موجود، نام منبع مورداستفاده و ساير مشخصات آن را در فهرست مربوطه ذكر و درج کرده‌ام.
- ۲- اين پايان‌نامه/ رساله قبلاً براي دريافت هيچ مدرک تحصيلي (هم سطح، پايين تر يا بالاتر) در ساير دانشگاه‌ها و مؤسسات آموزش عالي ارائه نشده است.
- ۳- چنانچه بعد از فراغت از تحصيل، قصد استفاده و هرگونه بهره‌برداري اعم از چاپ كتاب، ثبت اختراع و غيره... از اين پايان‌نامه داشته باشم، از حوزه معاونت پژوهشي واحد مجوزهاي مربوطه را اخذ نمايم.
- ۴- چنانچه در هر مقطع زماني خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشي از آن را مي‌پذيرم و واحد دانشگاهي مجاز است با اينجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصيلي ام هيچگونه ادعائي نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگي: **اميد پدرام**

تاريخ و امضاء: //۹۵

کلیه حقوق مادی مرتبط بر نتایج
مطالعات ، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی
از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به
دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر است.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی:

سپاس بیکران پروردگار عالم را که از میان راه‌های فراوانی که در مقابلم گشود، راه تحصیل علم و کسب دانش و معرفت را نشانم داد و پس از آن این معرفت را در وجودم نهاد که از میان لذایذ گوناگون مادی، لذت فهمیدن و آموختن و به شاگردی در محضر استادان و عالمان نشستن خوش‌تر آید.

حال که به لطف خداوند نگارش این پژوهش به پایان رسیده است، وظیفه خود می‌دانم که از تمامی اساتید ارجمند خود به‌خصوص دکتر جعفر سلطانی که انگیزه این پژوهش را در من ایجاد نمودند و در به ثمر رسیدن این مجموعه راهنمایم بودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم و از خداوند متعال توفیق روزافزون را برای ایشان آرزومندم.

در خاتمه، خالصانه‌ترین سپاس و قدردانی‌ام را تقدیم پدر و مادر فداکار و مهربانم می‌نمایم که در تمام دوران زندگی‌ام با استقامت و گذشت، لحظه‌ای مرا در سختی‌ها و تنگناهای زندگی تنها نگذاشتند.

چکیده

هدف این پایان نامه، اصلاح پایداری دینامیکی یک شبکه استاندارد سه ماشینه و نه باسه IEEE در اثر خطاهای نامتقارن دوفاز و دوفاز با هم به زمین در مکان‌های مشخصی از سیستم می‌باشد. روش تحلیل در حوزه‌ی زمان، با استفاده از بردارهای فضایی مثبت و منفی جریان‌ها و ولتاژهای شبکه مذکور می‌باشد. برای میرا کردن نوسانات فرکانس بالای اسمی شبکه از روش کنترل مد لغزشی برای اعمال سیگنال‌های اضافی و همچنین از پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS) استفاده می‌گردد. با استفاده از حلقه‌ی مدار بسته‌ی رگولاتور اتوماتیک ولتاژ (AVR)، ولتاژ باس‌های ماشین بر روی مقادیر نامی در حالت ثابت نگه داشته می‌شود. در این پایان نامه لازم است در ابتدا مقادیر اولیه بر اساس یک حل پخش بار (Loud-Flow) بدست آیند.

کلید واژه‌ها: خطای دوفاز – خطای دو فاز به زمین – خطاهای نامتقارن – فازور

فصل اول: مقدمه و پیشینه پژوهش

- ۱-۱-۱- مرور کلی ۲-۵
- ۲-۱-۲- پیشینه تحقیق ۵-۶
- ۱-۲-۱- ساختار پایان نامه ۶-۹

فصل دوم: آنالیز فازوری سیستم قدرت

- ۱-۲-۱- مقدمه ۲۳-۲۵
- ۲-۲-۲- ساختار کلی سیستم قدرت ۲۵-۲۶
- ۱-۲-۲- معادلات توازن توان ۲۶
- ۲-۲-۲- نمایش‌های دامنه زمانی ۲۶-۲۸
- ۳-۲-۲- مدولاسیون و دامنه فازور ۳۱
- ۴-۲-۲- تعریف اولیه فازورهای \bar{E}, \bar{I} ۳۱
- ۵-۲-۲- محاسبه فازور ساکن کلاسیک ۳۱-۳۵
- ۶-۲-۲- محاسبه فازور زیر گذرای کلاسیک ۳۵-۳۹
- ۳-۲-۳- خصوصیات تغییر شکل فازور متغیر زمانی P ۳۹-۴۱
- ۱-۳-۲- معادلات توان
- ۴-۲- آنالیز سیستم غیر متوازن
- ۲-۴-۲- مفهوم فازورهای متغیر با زمان
- ۵-۲- مدل سیستم قدرت بزرگ
- ۶-۲- محدودیت‌های مدل π ۴۱-۴۲

فصل سوم: مدل‌سازی شبکه ۳ ماشینه ۹ باسه

- ۱-۳-۱- سیستم قدرت چند ماشینه مورد مطالعه ۴۴-۴۵
- ۲-۳-۲- محاسبات حالت ماندگار ۴۵-۵۳

۵۳	۱-۴-ماتریس ادمیتانس شبکه در حالت قبل از خطا
۵۳-۵۴	۲-۴-ماتریس ادمیتانس شبکه در حین خطا
۵۴-۵۶	۳-۴-ماتریس ادمیتانس شبکه پس از باز شدن خط
۵۴-۵۶	۳-۴-ماتریس ادمیتانس شبکه پس از وصل مجدد خط به شبکه
۵۶-۶۰	۵-۴-کاهش مرتبه ماتریس ادمیتانس شبکه
	فصل پنجم: خطاهای اتصال کوتاه دو فاز و دو فاز به زمین
۶۳-۶۴	۱-۵-مقدمه
۶۴-۶۸	۲-۵-خطای دو فاز
	۳-۵-بلوک‌های AVR و PSS
	۴-۵-خطای دو فاز به زمین
۶۸-۶۹	۵-۵-فلوچارت روند حل معادلات شبکه و شبیه سازی
	فصل ششم: نتایج شبیه سازی
۷۴-۸۵	۱-۵-شکل های مربوط به خطای دو فاز و دو فاز به زمین
۸۶-۹۹	۲-۵-شکل های مربوط به خطای پارگی تکفاز
	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۱	۱-۶-نتیجه گیری
۱۰۲	۲-۶-پیشنهادات

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- پارامترهای گذرا.....	۳۷
جدول ۱-۵- بار سیستم ۹ باسه.....	۷۱
جدول ۲-۵- شرایط پخش بار سیستم ۹ باسه.....	۷۲
جدول ۳-۵- ژنراتورهای سیستم ۹ باسه.....	۷۲
جدول ۴-۵- خطوط انتقال سیستم ۹ باسه.....	۷۳

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: ساختار کلی سیستم قدرت.....	۲۴
شکل ۲-۲: طرحی برای معادلات سیستم قدرت	۲۵
شکل ۳-۲: توان لحظه ای از طریق برش عرضی A-A از یک خط تک فاز.....	۲۸
شکل ۱-۳- سیستم قدرت ۳ ماشینه ۹ باسه IEEE.....	۴۵
شکل ۲-۳- دیاگرام فازوری ماشین ۱.....	۴۸
شکل ۳-۳- دیاگرام فازوری ماشین ۲.....	۴۹
شکل ۴-۳- دیاگرام فازوری ماشین ۳.....	۵۰
شکل ۵-۳- خطای دوفاز در خط واصل شین های ۵ و ۷.....	۵۳
شکل ۲-۴- مدار معادل خطای دوفاز.....	۶۴
شکل ۳-۴- بلوک دیاگرام روند حل معادلات و شبیه سازی.....	۶۸
شکل ۱-۵- خطای دوفاز سرعت ژنراتور ۱.....	۷۴
شکل ۲-۵- خطای دوفاز سرعت ژنراتور ۲.....	۷۴
شکل ۳-۵- خطای دوفاز زاویه رتور ژنراتور ۱.....	۷۵

- شکل ۴-۵- خطای دوفاز زاویه رتور ژنراتور ۲ ۷۵
- شکل ۵-۵- خطای دوفاز جریان محور q در دستگاه رتور ۷۶
- شکل ۶-۵- خطای دوفاز جریان محور d در دستگاه رتور ۷۶
- شکل ۷-۵- خطای دوفاز توالی منفی جریان محور q در دستگاه رتور ۷۶
- شکل ۸-۵- خطای دوفاز توالی منفی جریان محور d در دستگاه رتور ۷۷
- شکل ۹-۵- خطای دوفاز توالی مثبت جریان محور q در دستگاه رتور ۷۷
- شکل ۱۰-۵- خطای دوفاز توالی مثبت جریان محور d در دستگاه رتور ۷۸
- شکل ۱۱-۵- خطای دوفاز ولتاژ محور q در دستگاه سنکرون ۷۸
- شکل ۱۲-۵- خطای دوفاز ولتاژ محور d در دستگاه سنکرون ۷۸
- شکل ۱۳-۵- خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور q در دستگاه سنکرون ۷۹
- شکل ۱۴-۵- خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور d در دستگاه سنکرون ۷۹
- شکل ۱۵-۵- خطای دوفاز توالی مثبت محور q در دستگاه سنکرون ۷۹
- شکل ۱۶-۵- خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور d در دستگاه سنکرون ۸۰
- شکل ۱۷-۵- خطای دوفاز ولتاژ محور q در دستگاه رتور ۸۰
- شکل ۱۸-۵- خطای دوفاز ولتاژ محور d در دستگاه رتور ۸۰
- شکل ۱۹-۵- خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور q در دستگاه رتور ۸۱
- شکل ۲۰-۵- خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور d در دستگاه رتور ۸۱
- شکل ۲۱-۵- خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور q در دستگاه رتور ۸۱
- شکل ۲۲-۵- خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور d در دستگاه رتور ۸۲
- شکل ۲۳-۵- خطای دوفاز توالی مثبت جریان تزریقی ۸۲
- شکل ۲۴-۵- خطای دوفاز توالی منفی جریان تزریقی ۸۳
- شکل ۲۵-۵- خطای دوفاز جریان محور q در دستگاه سنکرون ۸۳
- شکل ۲۶-۵- خطای دوفاز توالی منفی جریان محور q در دستگاه سنکرون ۸۴

- شکل ۵-۲۷- خطای دوفاز توالی مثبت جریان محور q در دستگاه سنکرون..... ۸۴
- شکل ۵-۲۸- خطای دوفاز جریان محور d در دستگاه سنکرون..... ۸۵
- شکل ۵-۲۹- خطای دوفاز توالی منفی جریان محور q در دستگاه سنکرون..... ۸۵
- شکل ۵-۳۰- خطای دوفاز توالی مثبت جریان محور q در دستگاه سنکرون..... ۸۵

فصل اول

مقدمه

۱- فصل اول: مقدمه

۱-۱- مرور کلی

امروزه صنعت برق دنیا به سرعت در حال تغییر و تحول می‌باشد که عواملی چون کمبود منابع طبیعی، بازار و تقاضای رو به افزایش الکتریسیته باعث تحولات سریع و پیش‌بینی نشده‌ای در این صنعت می‌باشند. با توجه به گسترش سیستم‌های قدرت، ریسک بروز خطا در شبکه افزایش می‌یابد بنابراین، مواردی چون حداکثر کردن ظرفیت انتقال خطوط موجود به همراه بالا بردن پایداری [۱-۳]، بهبود انعطاف پذیری شبکه [۴-۸]، کنترل و افزایش ثبات سیستم [۹] و افزایش حاشیه اطمینان و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت و انتقال بسیار مهم است [۱۰]. در راستای این اهداف، لازم است پایداری شبکه بررسی گردد [۱۶] و در صورت بروز اختلال در شبکه، اقداماتی در راستای میرایی نوسانات و بهبود پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت انجام داد [۱۷]. انواع اتصال کوتاه در سیستم‌های قدرت از مهمترین این اختلالات محسوب می‌شوند. در زمان اتصال کوتاه، جریان‌های عظیمی که از ژنراتورها به طرف نقطه عیب جاری می‌شود، سبب وارد شدن تنش‌های دینامیکی و حرارتی بالا به تجهیزات سیستم قدرت از قبیل خطوط هوایی، کابلها،

ترانسفورماتورها و کلیدهای قدرت می شود. انواع اتصال کوتاه‌هایی که در سیستم اتفاق می افتد عبارت اند از، خطای فاز به زمین و خطای فاز به فاز. تجربه نشان داده است که بین ۷۰٪ تا ۸۰٪ عیوب خطوط انتقال از نوع تکفاز به زمین هستند و در صد کمی از این عیوب (حدود ۵٪) ناشی از اتصال کوتاه سه فاز می باشند [۳۵].

جریان‌های اتصال کوتاه به دو دسته متقارن و نامتقارن تقسیم بندی می شوند. تمام این عیوب به استثنای اتصال کوتاه سه فاز از انواع نامتقارن هستند و تعادل فازها را بر هم می زنند. عیوب نامتقارن از طریق امیدانس‌ها، پارگی هادی‌ها و یا اتصال کوتاه‌های نامتقارن به وجود می آیند. عیوب نامتقارن به صورت تک فاز به زمین، فاز به فاز و دو فاز به زمین رخ می دهند. از دیگر عوامل بروز عیوب نامتقارن می توان به پارگی تکفاز و دو فاز اشاره کرد. مسیر جریان عیب از فاز به فاز یا از فاز به زمین ممکن است در برگیرنده امیدانس باشد یا نباشد. جریانی که بلافاصله بعد از وقوع عیب در قسمت‌های مختلف در یک سیستم قدرت می گذرد با جریان گذرنده پس از چند سیکل درست قبل از اینکه مدار شکن‌ها برای باز کردن خط از دو طرف عیب فرا خوانده شوند متفاوت است و هر دوی این جریان‌ها با جریان حالت مانا در صورتی که عیب با عمل مدار شکن‌ها از بقیه سیستم جدا نشود تفاوت عمده‌ای دارد. اختلاف بین مقادیر جریان‌های متقارن و نامتقارن با نسبت X/R در نقطه خطا متناسب می باشد، به این صورت که هر چقدر سیستم مقاومتری تر باشد، اختلاف بین مقادیر جریان‌های متقارن و نامتقارن ناچیز خواهد بود ولی در صورتی که سیستم راکتیو باشد جریان نامتقارن ۳ تا ۵ برابر جریان متقارن خواهد بود [۳۴].

مقادیر بالای جریان اتصال کوتاه، سبب ایجاد نیروهای مغناطیسی در شبکه می شود. در نتیجه هنگامی که در کلید قدرت، جریان اتصال کوتاه جاری می گردد، باس بارهای آن به واسطه نیروی جاذبه به یکدیگر جذب می شوند. لذا این تجهیزات بایستی در مقابل این نیروها مقاومت کنند که به آن withstand rating تجهیز می گویند. از این رو یک کلید قدرت باید در حالت عملکرد نرمال با جریان بار کامل سائز شده، و دارای قدرت تحمل (withstand rating) و قدرت قطع (interrupting rating) مناسب باشد.

با توجه به مواردی که در باب اتصال کوتاه ذکر شد، این عیوب می توانند برای سیستم‌های قدرت بسیار مخرب باشند. بررسی فراوان، توسعه لوازم و در نظر گرفتن تدابیر حفاظت موجب شده‌اند تا در جلوگیری از وارد آمدن خسارت به خطوط انتقال و تجهیزات و پیشگیری از قطع تولید به دنبال وقوع عیب، بهبود مداوم حاصل شود. عبور چنین جریانی از شبکه نیاز به تجهیزاتی دارد که توانایی تحمل این جریان را داشته باشند و برای قطع این جریان نیازمند کلیدهایی با قدرت قطع بالا هستیم که هزینه‌های سنگینی را به سیستم تحمیل می کند. کلیدهای قدرت مورد استفاده در شبکه برای عملکرد کامل نیازمند زمانی معادل چند سیکل (چند میلی ثانیه) می باشند. عبور مقادیر بزرگ جریان از خطوط و تجهیزات سیستم قدرت در همین چند سیکل می تواند موجب تخریب جدی تجهیزات شود

زیرا جریان اتصال کوتاه در لحظات اولیه به ویژه در پریود اول موج جریان، دارای بیشترین دامنه است و بیشترین اثرات مخرب از همین سیکل‌های اولیه ناشی می‌شود. این امر در صورت بالا بودن جریان‌های اتصال کوتاه و عبور آن از سطح عایقی کلیدهای قدرت ممکن است موجب برقراری یک اتصال کوتاه دائمی شود. محاسبات اتصال کوتاه از آنجا اهمیت دارند که برای انتخاب کلیدهای قدرت باید قدرت اتصال کوتاه در شین مشخص باشد و یا برای تنظیم رله‌های ژنراتورهای سنکرون، جریان اتصال کوتاه باید مشخص باشد. از عوامل انتخاب مدار شکن‌ها، جریانی که مدار شکن باید در شرایط کار عادی تحمل کند، حداکثر جریانی که ممکن است مجبور به تحمل آن شود و جریانی که باید در ولتاژ خط قطع کند، می‌باشند [۳۵].

از طرف دیگر وقوع اتصال کوتاه، سیستم را به سمت ناپایداری سوق می‌دهد. تعریف IEEE از پایداری ولتاژ توانایی یک سیستم قدرت در نگهداری ولتاژ دائمی بعد از بروز اغتشاش در شرایط مشخصی از بهره برداری در همه‌ی باس‌های سیستم است. هر گاه شرایط خط انتقال متصل به ژنراتور و بارهای متصل به آن ضعیف باشد نیاز به سیستم PSS در کنار تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ AVR است [۳۲]. PSS دارای سیگنال فیدبک اضافی از جنس سرعت یا فرکانس و یا توان است که با جبران بهره و اضافه نمودن آن به سیگنال خطای تنظیم ولتاژ باعث می‌شود تا نوسان ماشین با افزایش مقدار دمپینگ طراحی شده‌ی ماشین کاهش یابد. این پایدار ساز کنترل کننده‌ای کمکی است که با افزودن سیگنال کمکی به سیستم تحریک عملکرد دینامیکی سیستم قدرت را بهبود میبخشد. PSS در شرایط بارگذاری سنگین و خطوط انتقال طولانی بسیار کارا می‌باشد. AVR توان خروجی تحریک ژنراتور را به منظور کنترل دامنه ولتاژ ترمینال تنظیم می‌کند. هر گاه ولتاژ مبنا افزایش یا کاهش یابد، ولتاژ خروجی رگولاتور Efd را افزایش و یا کاهش می‌دهد که به سیم پیچ میدان ژنراتور اعمال می‌گردد و در نتیجه ولتاژ ترمینال افزایش یا کاهش می‌یابد. همچنین یک ترانسفورماتور ولتاژ و یکسو کننده تغییرات ولتاژ ترمینال را دنبال می‌کنند و در صورتی که این ولتاژ کاهش یابد AVR ولتاژ رگولاتور را افزایش می‌دهد تا Efd افزایش یافته و در نتیجه ولتاژ ترمینال نیز افزایش خواهد یافت [۳۵].

۱-۲- پیشینه تحقیق

در سال ۱۹۱۸ یکی از قویترین ابزار محاسبات شبکه‌های متقارن توسط فورتسکیو Fortesque معرفی گردید، بدین ترتیب که یک سیستم سه فاز متقارن به سه سیستم بردای سه فاز متقارن شامل مولفه های توالی مثبت positive sequence components توالی منفی negative sequence components و توالی صفر zero sequence components قابل تجزیه است [۳۴].

در مرجع [۱۱]، تحقیقات نظری سیستم‌های انتقال برق در شرایط اتصال کوتاه مورد بررسی قرار گرفته است.

در مرجع [۱۲]، محاسبه اتصال کوتاه در سیستم‌های قدرت انجام شده است.

در مرجع [۱۳]، نیروهای اتصال کوتاه در باس‌های فاز جدا شده محاسبه شده است.

در مرجع [۱۵]، تجزیه و تحلیل جریان گذرا اتصال کوتاه در سیستم‌های قدرت HVDC مورد مطالعه قرار گرفته است.

در مرجع [۱۸]، محاسبه دقیق خطاهای همزمان مدار باز و اتصال کوتاه خط به زمین در سیستم‌های قدرت ذاتا نامتعادل بررسی شده است.

در مرجع [۲۱]، تجزیه و تحلیل و روند آینده از قدرت اتصال کوتاه مطالعه گردیده است.

۱-۳- ساختار پایان نامه

در این قسمت مختصری از فصول پایان نامه ارائه می‌گردد.

در فصل اول، کلیات، اهداف و سوابق کارهای انجام شده به نگارش درآمده است.

فصل دوم به بررسی آنالیز فازوری سیستم قدرت می‌پردازد.

در فصل سوم، پخش بار شبکه مورد بررسی قرار گرفته و رفتار شبکه قبل از خطاهای نامتقارن بررسی می‌گردد.

فصل چهارم، رفتار شبکه بعد از خطاهای نامتقارن را رصد می‌کند.

در فصل پایانی، نتایج شبیه سازی‌های انجام شده، نمایش داده می‌شود.

فصل دوم

آنالیز فازوری سیستم قدرت

۲-۱-مقدمه

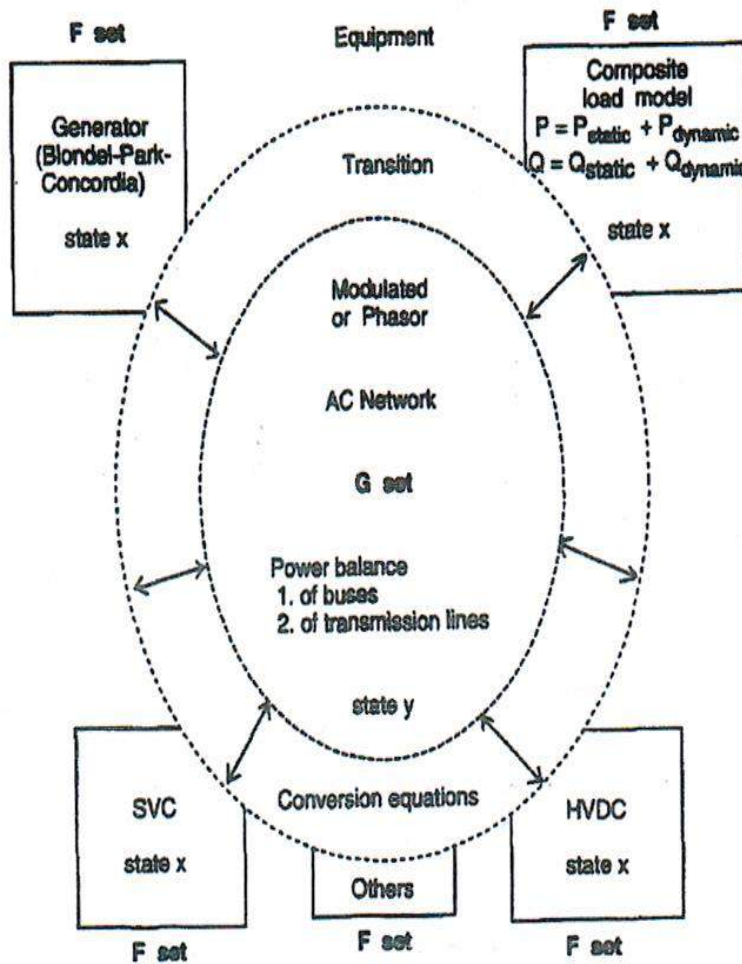
نمایش فازوری سیگنال‌های مدول شده سینوسی، یک ابزار قوی برای آنالیز رفتار حالت ماندگار ولتاژها و جریان‌ها در یک شبکه RLC خطی است. از فازورها برای دهه‌ها، در آنالیز گذرای سیستم قدرت تحت فرضیه نیمه ساکن استفاده شده است. حالات گذرا بدین گونه فرض می‌شوند که به اندازه کافی آهسته هستند، به طوری که می‌توانند تقریباً ساکن باشند. این مورد یک تقریب عالی برای آنالیز اکثر رویدادهای دینامیک آهسته بوده است که در گذشته مطالعه شده است، اما خطای معرفی شده توسط این تقریب را باید موقع آنالیز بعضی از حالت‌های گذرای سریع به خاطر داشت [۲۴].

در صنعت قدرت، با استفاده از وسایل ارتباطاتی پیشرفته، اندازه‌گیری‌های همزمان آنالیز فازورهای زمان واقعی امروزه میسر شده است [۲۵] و با توسعه تکنولوژی پردازش سیگنال دیجیتال، کاملاً واقع‌گرایانه است که فرض کنیم فازورهای متغیر زمانی می‌توانند به صورت صحیح در زمان واقعی اندازه‌گیری شوند. به هر حال آنالیز فازوری هنوز بر مبنای فرضیه نیمه ساکن کلاسیک است که تغییرات فازورها بسیار کوچک هستند.

باید تأکید شود که در این پایان نامه از نمایش مدار TI متعارف استفاده شده است.

۲-۲- ساختار کلی سیستم قدرت

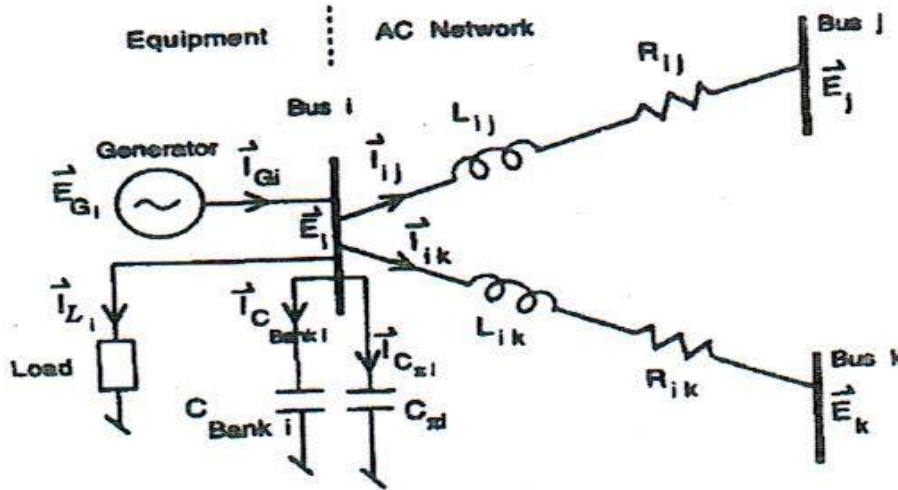
ساختار کلی سیستم توان در شکل ۱-۲ زیر ملاحظه می گردد:



شکل ۱-۲: ساختار کلی سیستم توان

یک سیستم قدرت، متشکل از این اجزای بنیادی زیر است:

(۱) خطوط انتقال: این بخش از سیستم توسط یک مجموعه G از معادلات نمایش داده می شود.



شکل ۲-۲: طرح برای معادلات توازن توان

(۲) تجهیزاتی از قبیل ژنراتورها، بارها و ادوات الکترونیک قدرت (تریستور، SVC، HVDC، FACTS) که متصل به باس های انفرادی هستند و هر کدام دارای دینامیک های خودش به شکل های مختلف است که عموماً به صورت معادلات دیفرانسیل می باشند (برای مثال معادله های پارک برای ماشین ها). هیچ یک از این تجهیزات به صورت فیزیکی در شکل ac مدول شده نیست و هیچ کوپلینگ مستقیمی بین مقوله های انفرادی خارج از اتصال شان به باس ها وجود ندارد (شکل ۲-۲). از این رو دینامیک های تجهیزات، عمدتاً توسط یک مجموعه F در شکل ۱-۲ از معادلات دیفرانسیل معمولی تعریف می شوند.

(۳) از آنجایی که شکل ریاضی توصیف کننده در دینامیک های خطوط انتقال و تجهیزات متصل شده کاملاً متفاوت است، معادلات تبدیل (برای مثال Blondel) نوعاً برای تبادل بین مجموعه های G و F مورد نیاز هستند (شکل ۱-۲).

۲-۲-۱- معادلات توازن توان

مجموعه G نوعاً متشکل از دو مجموعه از معادلات توازن توان است:

(۱) متعلق به باس‌ها: حاصل جمع توان لحظه‌ای در یک باس از همه تجهیزات متصل شده و همه خطوط انتقال

متصل شده صفر است (شکل ۲-۲). باس‌ها دارای هیچ توانایی ذخیره‌ای نیستند.

$$e_1(t)i_1(t) + e_2(t)i_2(t) = 0$$

(۲) متعلق به خطوط: تفاوت توان لحظه‌ای در دو منتهی‌الیه یک خط، در آن خط ذخیره شده یا به صورت گرمای

تلف شده منتشر می‌شود.

اینها نمایش‌های معادل از معادلات کیرشهوف در توان به جای معادلات ولتاژ-جریان هستند و در نتیجه آنها

به طور انحصاری توان را به فرض داشتن یک مجموعه مناسب از ورودی‌ها برای باس‌ها تعریف می‌کنند. توجه داشته

باشید که توازن توان خط به طور اتوماتیک به وسیله وجود معادلات جریان مناسب در هر خط از باس‌ها در هر دو

منتهی‌الیه‌های آن محقق می‌شود. به علاوه برای سیستم قدرت، از آنجایی که کوپلینگ‌ها در هر دو منتهی‌الیه (توان

الکترومکانیکی در منتهی‌الیه فرستنده ژنراتور و مصرف‌توان در منتهی‌الیه گیرنده بار) برحسب توان هستند، ضروری

است که معادلات کوپلینگ در مجموعه G (شکل ۲-۱) را به صورت معادلات توازن توان در نظر بگیریم (نه صرفاً به

صورت معادلات ولتاژ و جریان).

۲-۲-۲- نمایش‌های دامنه زمانی

سیگنال‌های ولتاژ متغیر زمانی کلی $e(t)$ و جریان $i(t)$ را به شکل زیر در نظر می‌گیریم:

$$e(t) = \sqrt{2}E(t)\cos(\omega t + \delta(t)) \quad (1-2)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I(t)\cos(\omega t + \varphi(t)) \quad (2-2)$$

$$e \in y, \delta \in y, i \in y, \varphi \in y, \omega = 2\pi 60 \text{ rad/sec} \quad (3-2)$$

شکل کلی معمول برای توان لحظه‌ای پس از مقداری تغییرات به صورت زیر پدیدار می‌شود.

$$\begin{aligned} p(t) &= e(t)i(t) \\ &= E(t)I(t)\cos\varphi(t)\left[1 + \cos 2(\omega t + \delta(t))\right] \\ &\quad + E(t)I(t)\sin\varphi(t)\left[\sin 2(\omega t + \delta(t))\right] \end{aligned} \quad (4-2)$$

که در آن $\varphi(t) = \delta(t) - \phi(t)$ زاویه power factor است.

به علاوه با فرض داشتن تغییرات یکنواخت E, I, δ, φ و نشان ندادن وابستگی زمانی روابط زیر را داریم:

$$\dot{e} = \sqrt{2}\dot{E}\cos(\omega t + \delta) - \sqrt{2}E(\omega + \dot{\delta})\sin(\omega t + \delta) \quad (5-2)$$

$$\dot{i} = \sqrt{2}\dot{I}\cos(\omega t + \varphi) - \sqrt{2}E(\omega + \dot{\varphi})\sin(\omega t + \varphi). \quad (6-2)$$

از این رو برای یک خازن ($i_C = C\dot{e}_C$) یا یک انداکتور ($e_L = L\dot{i}_L$) (نقطه سنگین برای نمایش مشتق است)، ورودی

توان لحظه‌ای (که فقط می‌تواند واقعی باشد، یعنی فیزیکی) به شکل کلی (4-2) ظاهر می‌شود، اما ضرایب برای

آکولادهای، حاوی مشتقات $\dot{E}, \dot{I}, \dot{\delta}, \dot{\varphi}$ خواهد بود.

$$\begin{aligned} p_C(t) &= e_C(t)i_C(t) \\ &= CE_C\dot{E}_C\left[1 + \cos 2(\omega t + \delta_C)\right] \\ &\quad - CE_C^2(\omega + \dot{\delta}_C)\left[\sin(2\omega t + \delta_C)\right] \end{aligned} \quad (7-2)$$

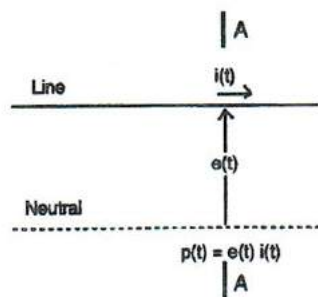
$$\begin{aligned} p_L(t) &= e_L(t)i_L(t) \\ &= LI_L\dot{I}_L\left[1 + \cos 2(\omega t + \varphi_L)\right] \\ &\quad - LI_L^2(\omega + \dot{\varphi}_L)\left[\sin 2(\omega t + \varphi_L)\right] \end{aligned} \quad (8-2)$$

به طرز مشابه، توان در خط انتقال متصل کننده باس های i و j و مقاومت R_{ij} و L_{ij} در باس i مشاهده می شود که به صورت زیر می باشد (شکل ۲-۲).

$$\begin{aligned}
 p_{ij}(t) &= e_i(t)i_{ij}(t) \\
 &= E_i I_{ij} \cos(\delta_i - \varphi_{ij}) [1 + \cos 2(\omega t + \delta_i)] \\
 &\quad + E_i I_{ij} \sin(\delta_i - \varphi_{ij}) [\sin(2\omega t + \delta_i)]
 \end{aligned} \tag{۹-۲}$$

که در آن:

$$e_i - e_j = R_{ij} i_{ij} + L_{ij} \dot{i}_{ij} \tag{۱۰-۲}$$



شکل ۲-۳: توان لحظه‌ای از طریق برش عرضی A-A از یک خط تک فاز

۲-۲-۳- مدولاسیون و دامنه فازور

معادلات (۹-۲) و (۱۰-۲) به صورت تک فاز نمایش داده شده‌اند. خطوط سه فاز متوازن شده و تجهیزات

دیگر متشکل از سه مولفه تک فاز دقیقاً ۱۲۰ درجه در فاز δ فزادگی شده‌اند. دامنه‌های E_i , I_i و غیره دقیقاً به طور

یکسان برای هر یک از سه فاز هستند. بنابراین حالت خنثی که مجموع سه فاز را حمل می‌کند، به طور مشابه جریان

صفر را حمل می‌کند (برای سه فاز متوازن شده).

همه نمایش‌های توان شامل دوتا از آکلادهای (۲-۴) هستند. از این رو همه عبارات مرتبط شده با مجموعه G در معادلات توازن توان باس که حاصل جمع‌های چنین عبارات کلی هستند، شامل هر دوی این آکلادها خواهند بود. به علاوه در سیستم‌های سه فاز متوازن شده، افزودن مولفه‌های سینوسی فضادهی شده به مقدار مساوی (در ۱۲۰ درجه) همیشه منتهی به صفر خواهند شد. از این رو برای توان سه فاز، در همه لحظات زمانی، اولین آکلاد در (۲-۴) به یک حاصل جمع ۳ فاز که با مقداری ثابت جمع شده و دومین آکلاد در (۲-۴) مساوی با صفر می‌باشد. این مورد همیشه برای توان لحظه‌ای درست است اعم از اینکه E, I, δ, ϕ متغیر زمانی یا ساکن باشند. بنابراین، پس از آنکه آکلادها به ترتیب توسط یک و صفر جایگزین شوند، (۲-۴) به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$p(t) = P = E(t)I(t)\cos\phi(t) \quad (۲-۱۱)$$

(۲-۱۱) به صورت توان اکتیو یا حقیقی شناخته شده است.

توجه داشته باشید که معادله‌های دینامیک (۲-۷) و (۲-۸) برای دینامیک‌های وابسته به خازن C و انداکتور L به ترتیب به صورت معادلات توان مربوطه در دامنه فازور، به عنوان معادلات تک فاز بیان شده‌اند. در شبکه‌های سه فاز متوازن شده، می‌توان نشان داد که نمایش معادل تک فاز برای خازن C (اندوکتانس L) با خود خازن برای مثال Ca (خود اندوکتانس برای مثال La) و خازن دوطرفه برای مثال Cab (اندوکتانس دوطرفه برای مثال Lab) از کمیت‌های سه فاز مربوطه توسط یک ارتباط مستقیم به شکل $C = Ca - Cab$ و $L = La - Lab$ مرتبط می‌شود [۲۸]. مشتق این رابطه‌ها از تعریف اپراتور فازور P صحیح است. از این رو یک خط سه فاز متوازن شده در واقع می‌تواند به وسیله یک طرح تک فاز نمایش داده شود.

عبارت:

$$Q = E(t)I(t)\sin\phi(t) \quad (12-2)$$

به صفر میانگین دهی شده و در نتیجه به هیچ توان خالصی کمک نمی کند. اما در مورد ساکن، این دامنه‌ی یک نوسان انرژی بین طرف‌های القایی خالص و خازنی خالص است. زمانی که E, I, ϕ به عنوان متغیر زمانی هستند، چنین معنی فیزیکی برای Q وجود ندارد، اما هنوز به عنوان یک ماهیت ریاضی معنی دار است. این مورد توان اکتیو نامیده شده و نقشی مهم در آنالیز کردن سیستم‌های توان به ویژه در مسائل ولتاژ ایفا می کند.

۲-۲-۴- تعریف اولیه فازورهای \bar{E}, \bar{I}

فازورهای متغیر زمانی را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\bar{E}(t) = E(t) \angle \delta(t) = E(t)e^{j\delta(t)} \quad (13-2)$$

$$\bar{I}(t) = I(t) \angle \phi(t) = I(t)e^{j\phi(t)} \quad (14-2)$$

این فازورها مرتبط با متغیرهای $e(t)$ و $i(t)$ لحظه‌ای بوده و در (۱-۲) و (۲-۲) به وسیله اپراتور تغییر شکل فازور P که در آن:

$$p(e(t)) = \bar{E}(t) = E(t)e^{j\delta(t)} \quad (15-2)$$

$$p(i(t)) = \bar{I}(t) = I(t)e^{j\phi(t)} \quad (16-2)$$

می باشد.

سپس توان مختلط \bar{S} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\vec{S}(t) = P(t) + jQ(t) = \vec{E}(t)\vec{I}(t)^* \quad (17-2)$$

با مراجعه به (۵-۲) و (۶-۲)، به سهولت می توان دید که چگونه مفاهیم سوسپتانس B و راکتانس X به وجود می آیند.

معادلات زیر را در نظر بگیرید:

$$\vec{I}_C = p(i_C(t)) = p(C\dot{e}_C(t)) = C \frac{d}{dt} \vec{E}_C + jB_C \vec{E}_C \quad (18-2)$$

که در آن

$$B_C = \omega C = \frac{1}{X_C} \quad (19-2)$$

و

$$\begin{aligned} \vec{E}_L &= p(e_L(t)) = p(Li_L(t)) \\ &= L \frac{d}{dt} \vec{I}_L + jX_L \vec{I}_L \end{aligned} \quad (20-2)$$

که در آن:

$$X_L = \omega L = \frac{1}{B_L} \quad (21-2)$$

توجه داشته باشید که اولین عبارات در طرف راست (۱۸-۲) و (۲۰-۲) (که شامل مشتقات کمیت های فازور متغیر

زمانی هستند) در محاسبه فازور زیر گذرا یا ماندگار متعارف وجود ندارند (جایی که تمایز زمانی صرفاً شامل ضرب

در ω است). در واقع، فرضیه ی زیر گذرا صرفاً بالغ بر نادیده گیری عبارت های مشتق گیری $\frac{d}{dt} \vec{E}_C(t)$ و $\frac{d}{dt} \vec{I}_L(t)$

در (۱۸-۲) و (۲۰-۲) می شود. لازم به ذکر است که در نماد نویسی، ω دلالت بر فرکانس زاویه ای سنکرون می کند.

همچنین در اینجا سوسپتانس و راکتانس در فرکانس سنکرون تعریف می شوند.

وقتی عبارتهای مشتق‌گیری به صورت مناسب در معادلات فازور برای توان در نظر گرفته شوند، مشاهده خواهد شد که خازن‌ها و انداکتورها دارای توان اکتیو غیرصفر خواهند بود (تغییر انرژی ذخیره ایجاد شده توسط تغییر ولتاژ و جریان باید از توان اکتیو بیاید).

$$P_C = CE_C \dot{E}_C \quad Q_C = -CE_C^2 (\omega + \dot{\delta}_C) \quad (22-2)$$

$$P_L = LI_L \dot{I}_L \quad Q_L = -LI_L^2 (\omega + \dot{\phi}_L) \quad (23-2)$$

که در آن PC و QC توان اکتیو و راکتیو در خازن‌ها بوده و PL و QL عبارات متناظر برای انداکتورها طبق تعریف در (2-11) و (2-12) هستند.

معادلات مشابه برای جریان‌های توان خط انتقال از [26] و [27] دنبال می‌شوند.

۲-۲-۵- محاسبه فازور ساکن کلاسیک

اگر همه مشتقات زمانی $\dot{E}, \dot{I}, \dot{\delta}, \dot{\phi}$ در معادلات (2-1) تا (2-23) مساوی صفر قرار داده شوند، در آن صورت معادلات توان تعریف شده در یک سیستم کاملاً ساکن، به صورت مستقیم به دست می‌آیند. این تعاریف، همان فازورهای کلاسیک هستند که در ابتدا برای آنالیز کردن شرایط ماندگار تعریف شدند و حتی امروزه به صورت معادلات تعریف‌کننده در محاسبات توان ماندگار مورد استفاده قرار می‌گیرند (محاسبه‌ای که معمولاً بیش از همه در عملیات سیستم توان و برنامه‌ریزی استفاده می‌شود).

۲-۲-۶- محاسبه فازور زیرگذرای کلاسیک

محاسبه فازور ماندگار می‌تواند به صورت یک تقریب زیرگذرا مورد استفاده قرار گیرد. ترتیب خطاهایی که تعریف‌کننده محدوده‌های اعتبار مدل زیرگذرا هستند به طور ریاضی در [24] و [25] آنالیز شدند. در آنجا نشان داده

می‌شود که تقریب زیرگذرا برای مسائل نوع الکترومکانیکی ثابت گذرا معتبر است اما لزوماً برای مسائل ثابت ولتاژ معتبر نیست.

۲-۳- خصوصیات تغییر شکل فازور متغیر زمانی P

یک سیگنال کلی سه فاز متغیر زمانی $e(t)$ به شکل زیر را در نظر بگیرید:

$$\underline{e}(t) = \begin{pmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2} E_a(t) \cos(\omega t + \delta_a(t)) \\ \sqrt{2} E_b(t) \cos(\omega t + \delta_b(t)) \\ \sqrt{2} E_c(t) \cos(\omega t + \delta_c(t)) \end{pmatrix} \quad (24-2)$$

در میان این سیگنال‌های سه فاز، مجموعه همه سیگنال‌های سه فاز متوازن شده می‌توانند متمایز شوند. به طور دقیق می‌توان گفت که $e(t)$ متوازن سازی می‌شود اگر:

$$\underline{e}(t) = \begin{pmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2} E(t) \cos(\omega t + \delta(t)) \\ \sqrt{2} E(t) \cos\left(\omega t + \delta(t) - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{2} E(t) \cos\left(\omega t + \delta(t) + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} = \sqrt{3}(t) \begin{pmatrix} E(t) \cos \delta(t) \\ E(t) \sin \delta(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (25-2)$$

که در آن $B(t)$ ماتریس ارتونرمال است.

$$B(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (26-2)$$

مشاهده می‌شود، همانگونه که به طور معمول شناخته شده است، یک سیگنال متوازن شده سه فازی، دارای دو متغیر حالت مستقل $E(t)$ و $\delta(t)$ است.

حالا برای سیگنال‌های متوازن شده سه فاز، می‌توانیم فازور متغیر زمانی وابسته $\vec{E}(t)$ را به وسیله معکوس

کردن تغییر شکل خطی $B(t)$ در (۲-۲۵) تعریف کنیم. اپراتور فازور را به وسیله علامت P نشان می‌دهیم.

نمایش فازور $p(\underline{e}(t) = \vec{E}(t))$ از یک سیگنال سه فازی سینوسی متوازن شده $\underline{e}(t)$ به صورت زیر است:

$$p(\underline{e}(t)) = (1 \quad J \quad 0) \frac{B^{-1}(t)}{\sqrt{3}} \underline{e}(t). \quad (27-2)$$

یا در نماد نویسی متعارف به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned} p(\underline{e}(t)) &= \vec{E}(t) = E_a(t) + JE_q(t) = E(t) \cos \delta(t) + JE(t) \sin \delta(t) \\ &= E(t) e^{j\delta(t)} = E(t) \angle \delta(t) \end{aligned} \quad (28-2)$$

۲-۳-۱- معادلات توان

به فرض اینکه یک ولتاژ متوازن شده سه فاز $\underline{e}(t)$ با دامنه $E(t)$ و فاز $\delta(t)$ آن طور که در (۲-۲۵) نشان داده شده

و یک جریان متوازن شده سه فاز $\underline{i}(t)$ با دامنه $I(t)$ و فاز $\varphi(t)$ داشته باشیم، توان لحظه‌ای سه فاز $\underline{p}(t)$ به صورت

بردار زیر است:

$$\underline{p}(t) = \begin{pmatrix} p_a(t) \\ p_b(t) \\ p_c(t) \end{pmatrix} = \underline{e}(t) \underline{i}(t)^* = \begin{pmatrix} e_a(t) i_a(t) \\ e_b(t) i_b(t) \\ e_c(t) i_c(t) \end{pmatrix} \quad (29-2)$$

در نماد نویسی های فازور، توان مختلط در هر فاز $\bar{S}(t)$ (هر سه فاز مساوی هستند) وابسته با توان $\underline{P}(t)$ عبارت است از $\bar{S}(t)$ یعنی:

$$\bar{S}(t) = \bar{E}(t)\bar{I}(t)^* = P(t) + jQ(t) = E(t)I(t)\cos\varphi(t) + jE(t)I(t)\sin\varphi(t) \quad (30-2)$$

که در آن $\varphi(t) = \delta(t) - \phi(t)$

بخش های حقیقی و موهومی $\bar{S}(t)$ به ترتیب عبارتند از توان اکتیو $P(t)$ و توان راکتیو $Q(t)$.

به فرض داشتن یک سیگنال توان $\underline{P}(t)$ از (۲-۲۹)، متوسط توان لحظه ای سه فاز برابر است با:

$$\frac{1}{3}(p_a(t) + p_b(t) + p_c(t)) = P(t) = \text{Real}(\bar{S}(t)) \quad (31-2)$$

توجه داشته باشید که در نمایش هر واحد، عبارات توان سه فاز و تک فاز به طور اتوماتیک برای سیستم متوازن شده برابر هستند. در سیستم قدرت واقعی، بیشتر بارهای آن سیستم تک فاز هستند (به جز ماشین های سنکرون و القایی یا بارهای موتور الکترونیک توان) اما این میلیون ها بار بین سه فاز، با احتمال مساوی توزیع می شوند. از این رو آنچه که در سطح باس انتقالی دیده می شود، بار سه فاز متوازن شده است.

برای بازنویسی معنی دار معادلات توازن توان لحظه ای بر حسب معادلات توازن توان مختلط، خصوصیت زیر

ضروری است.

فرض شود $\underline{e}_k(t)$ و $\underline{i}_k(t)$ دلالت بر مجموعه ای از به ترتیب ولتاژهای متوازن شده سه فاز و جریان ها کنند.

$$\underline{p}_k(t) = \underline{e}_k(t) \underline{i}_k^*(t) \text{ فرض کنید}$$

برای $k=1,2,\dots,m$

در آن صورت:

$$\sum_{k=1}^m p_k(t) = 0 \Leftrightarrow \sum_{k=1}^m \vec{s}_k(t) = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{k=1}^m P_k(t) = 0 \\ \sum_{k=1}^m Q_k(t) = 0 \end{cases} \quad (32-2)$$

برهان: تعریف کنید $p^*(\vec{i}(t)) = \vec{I}(t)^*$

حال ترکیبی از دو اپراتور خطی داریم بنابراین P^* هم خطی است. با به کار بردن فرم عمومیت یافته قضیه Tellegen با اپراتورهای خطی P بر روی ولتاژها و P^* بر روی جریان‌ها، نتیجه زیر دنبال می‌شود.

بنابراین عملیات ضرب $e(t)i(t)^*$ هنوز هم خصوصیت خطی P را حفظ کرده و اجازه تغییر شکل به صورت عبارت به عبارت را برای $P(t)$ توان اکتیو و $Q(t)$ توان راکتیو را به صورت جداگانه می‌دهد. این کار اجازه نوشتن معادلات توازن توان برای سیستم قدرت به وسیله افزودن ساده در هر باس را می‌دهد، که خصوصیت اصلی برای استفاده از فازورهای متغیر زمانی است. به علاوه معادلات کوپلینگ توان فازور با بارها برحسب توان‌های اکتیو و راکتیو در ترمینال‌های باس، مستقیماً سازگار با مدل‌های بار موجود هستند که رفتار بار را برحسب مولفه‌های توان اکتیو و راکتیو توصیف می‌کنند. یک نمایش مجموعه‌ای از معادلات برای یک سیستم قدرت (با استفاده از مدل‌های ساده برای اختصار اما غیرمحدود) در جدول ۱ ارائه می‌شود.

۲-۴- آنالیز سیستم غیرمتوازن

یک سیگنال سه فازی $e(t)$ را در نظر بگیرید:

$$e(t) = \begin{pmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a(t) \cos(\omega_c t + \delta_a(t)) \\ E_b(t) \cos(\omega_c t + \delta_b(t)) \\ E_c(t) \cos(\omega_c t + \delta_c(t)) \end{pmatrix} \quad (33-2)$$

فرض کنید که سیگنال‌های سه فازی $e_a(\cdot), e_b(\cdot), e_c(\cdot)$ همه متعلق به B هستند. معمولاً، فضای چنین سیگنال‌های برداری سه گانه از شکل $e(t)$ به صورت B^3 علامت گذاری خواهد شد. بنابراین فازور سه فازی برای سیگنال $e(t) \in B^3$ می تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\hat{e}(t) = p(e(t)) = \begin{pmatrix} p(e_a) \\ p(e_b) \\ p(e_c) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a(t) e^{j\delta_a(t)} \\ E_b(t) e^{j\delta_b(t)} \\ E_c(t) e^{j\delta_c(t)} \end{pmatrix} \quad (34-2)$$

فضای سیگنال‌های فازور پایین گذر برداری سه گانه به صورت L^3 علامت گذاری خواهد شد. زمانی که سیگنال‌های سه فاز، در $\delta_b(t) = \delta_a(t) + 120 = \delta_c(t) - 120$ صدق کنند، به این سیگنال‌ها، متوازن گفته می شود. در آنالیز کلی سیستم قدرت، به خوبی مشخص است که سیگنال‌ها به طور نوعی متوازن خواهند شد و هر نوع اختلافی که وجود دارد مقدار ناچیزی است. با توجه به نادیده گرفتن اختلاف در اندازه $E_a(t), E_b(t), E_c(t)$ و اختلاف فاز بین این سه فاز، خطای به وجود آمده در سیستم بزرگ قدرت باید کم باشد. این خطا را می توان با نوشتن معادلات برای هر شبکه و هر فاز و با مقایسه نتایج با نتایج سیستم متوازن در فرمولاسیون فازور متغیر زمانی محاسبه کرد. از طرف دیگر، شرایط مهمی در طول سیستم غیر متوازن و بلافاصله بعد از خطاهای متقارن پدیدار می شود. توجه کنید که خطاهای غیر متوازن، در اکثر موارد خطاهای سیستم قدرت واقعی را شکل می دهند. خطای ایجاد شده توسط عدم توازن را نمی تواند نادیده گرفت. به طور معمول آنالیز سیستم غیر متوازن بر مبنای روش مولفه های متقارن نیمه ساکن بوده است.

در روش مولفه‌های متقارن، حالت های سه فازور غیرمتوازن به مولفه های متقارن شان تغییر شکل داده می شود، یعنی فازورهای توالی مثبت، توالی منفی و فازورهای توالی صفر. هر یک از اجزاء سیستم می توانند به طور جداگانه برای هر یک از شبکه های سه توالی مدل شوند و بسته به نوع خطا به یکدیگر مرتبط شوند.

۲-۴-۱- تکنیک اجزاء متقارن

اجزاء متقارن به صورت $S: L^3 \rightarrow L^3$ علامتگذاری می شوند که فازور متغیر زمانی سه فازی $\hat{e}(t)$ را شرح می دهد که فازورهای توالی مثبت، توالی منفی و توالی صفر را شامل می شود و به صورت $\hat{e}_+(t), \hat{e}_-(t), e_0(t)$ علامتگذاری می شوند.

$$S(\hat{e}(t)) = \begin{pmatrix} \hat{e}_+(t) \\ \hat{e}_-(t) \\ \hat{e}_0(t) \end{pmatrix} = Ae(t) \quad (۳۵-۲)$$

که در آن ماتریس A به صورت زیر است:

$$A = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (۳۶-۲)$$

که در آن

$$\alpha = 1 \angle 120$$

خصوصیات زیر مستقیماً از خصوصیات استاندارد تغییر شکل مثل خطی بودن و قابلیت معکوس شدن پیروی می کنند.

الف: اپراتور $S: L^3 \rightarrow L^3$ یک به یک و خطی است.

بنابراین ترکیب اپراتور فازور P و تغییر شکل اجزاء متقارن S هم خطی است. با توجه به قضیه Tellegen، نتیجه می‌گیریم که معادلات توازن قدرت لحظه‌ای به طور هم ارز بر حسب توان‌های اجزاء متقارن دوباره نوشته می‌شوند.

ب: مجموعه‌ای از n سیگنال ولتاژ سه فازی $e_k(t) \in B^3$ ، و جریان سه فازی $i_k(t) \in B^3$ را برای $k=1,2,\dots,n$ در نظر بگیرید، بنابراین

$$\sum_{k=1}^n e_i(t) i_k(t) = 0 \Leftrightarrow \sum_{k=1}^n \left(\hat{e}_{+k}(t) (\hat{i}_{+k}(t))^* + \hat{e}_{-k}(t) (\hat{i}_{-k}(t))^* + \hat{e}_{0k}(t) (\hat{i}_{0k}(t))^* \right) = 0 \quad (۳۷-۲)$$

پس از ساده سازی شبکه و بدست آوردن شبکه توالی‌ها (مورد نیمه ساکن)، از آنجاییکه اندوکتانس و ظرفیت خازنی عرضه کننده شبکه با امپدانس جایگزین می‌شوند، نمایش این جزءها در دامنه اجزاء متقارن به سهولت با یک تغییر شکل جبری ساده انجام می‌شود. یک رابطه ولتاژ - جریان سه فازی از این شکل به صورت $\hat{e}(t) = Z \hat{i}(t)$ است که در آن Z ماتریس امپدانس 3×3 است که می‌تواند در فرمولاسیون اجزاء متقارن به صورت زیر بیان شود:

$$S(\hat{e}(t)) = \begin{pmatrix} \hat{e}_+(t) \\ \hat{e}_-(t) \\ \hat{e}_0(t) \end{pmatrix} = AZA^{-1} \begin{pmatrix} \hat{i}_+(t) \\ \hat{i}_-(t) \\ \hat{i}_0(t) \end{pmatrix} = AZA^{-1} S(\hat{i}(t)) \quad (۳۸-۲)$$

این مدل‌ها برای هر سیستمی می‌توانند به صورت شبکه‌های متوالی ساخته شوند و این شبکه‌ها می‌توانند برای آنالیز کردن شرایط سیستم غیر متوازن با استفاده از روش‌هایی که برای آنالیز این نوع سیستم‌ها وجود دارند، به یکدیگر مرتبط شوند. توجه داشته باشید که انواع ارتباط، بستگی به نوع خطا دارد. به هر حال در فرمولاسیون فازور پایین گذر، امپدانس‌های نیمه ساکن، جایگزین معادلات دیفرانسیل مرکب می‌شوند زیرا هر خازن و سلف یک معادله دیفرانسیل مرکب خطی را تعریف می‌کند.

همچنین در تکنیک جزءهای متقارن، متصل کردن شبکه‌های متوالی مختلف به یکدیگر برای تشکیل یک شبکه ترکیبی، یکی از مراحل اصلی است. تکنیک اتصال می‌تواند به سهولت توسط تغییرات جبری ساده، بسته به نوع خطا حاصل شود. برای فازورهای متغیر زمانی پایین گذر، از آنجایی که P,S خطی هستند، به سهولت دیده می‌شود که تکنیک اتصال، مشابه به فازورهای نیمه ساکن برای فازورهای پایین گذر موثر واقع می‌شود.

به طور کلی، آنالیز شبکه با استفاده از شبکه‌ی توالی‌ها به صورت زیر انجام خواهد شد:

۱- معادلات دیفرانسیل برای منابع ولتاژ می‌نویسیم (از قبیل ماشین‌های سنکرون، و دیگر وسایل مرتبط برحسب متغیرهای توالی‌های مثبت، منفی و صفر). می‌توان مشاهده کرد که ماشین‌های سنکرون به عنوان منابع فقط در شبکه توالی مثبت ظاهر خواهند شد، اگرچه دینامیک آنها بستگی به متغیرهای توالی‌های دیگر دارد. برای مثال یک شار توالی منفی در ماشین سنکرون، که در جهت منفی می‌چرخد به نوبت هارمونیک‌های بالاتری القا می‌کند و به گشتاور دمپ که می‌تواند در معادله نوسان جایگذاری شود کمک می‌کند.

۲- سیستم انتقال و دیگر اجزاء شبکه از قبیل ترانسفورمرها را توسط مقادیر RLC فشرده مناسب نمایش می‌دهیم.

۳- توالی‌های مثبت، منفی و صفر را، برای شبکه‌ها می‌سازیم و نمایش RLC شبکه را حفظ می‌کنیم.

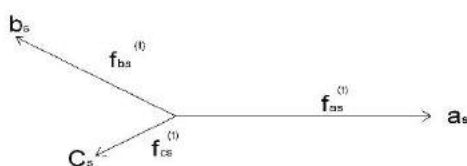
۴- شبکه‌ها را با استفاده از تکنیک‌های استاندارد بسته به نوع خطا مرتبط می‌کنیم. چون اتصال بر مبنای معادلات لحظه‌ای در نقطه خطا است، از آنجایی که اپراتور فازور متغیر زمانی خطی است، این معادلات در دامنه فازور صدق می‌کنند و دقیقاً همان نتایج تکنیک اتصال را دارند.

۵- شبکه را با استفاده از خصوصیات مدار اصلی با فشرده کردن اندوکتانس‌ها به یکدیگر به صورت سری یا غیره، ساده می‌کنیم.

۶- معادلات دیفرانسیل برای اندوکتانس‌ها و خازن‌ها در شبکه ساده شده می‌نویسیم و از قانون مشتق‌گیری بر حسب فازورهای متغیر زمانی مختلط استفاده می‌کنیم. این معادلات همراه با معادلاتی برای اجزاء دینامیکی از قبیل ژنراتورها هستند. سپس این مدل را برای سیستم قدرت غیرمتوازن در محدوده فازور پایین گذر کامل می‌کنیم.

۲-۴-۲- مفهوم فازورهای متغیر با زمان

یک سیستم نامتقارن سه فاز در شکل ۲-۴ آمده است.



شکل ۲-۴: سیستم نامتقارن سه فاز

معادلات این سیستم به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 f_{as}(t) &= \sqrt{2}F_{as}(t) \cos(\omega_e t + \theta_a(0)) \\
 f_{bs}(t) &= \sqrt{2}F_{bs}(t) \cos(\omega_e t + \theta_b(0) - \frac{2\pi}{3}) \\
 f_{cs}(t) &= \sqrt{2}F_{cs}(t) \cos(\omega_e t + \theta_c(0) + \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned}
 \tag{۲-۳۹}$$

فازور متغیر با زمان سیستم به صورت [23]:

$$f_s(t) = \frac{2}{3}(f_{as}(t) + \alpha f_{bs}(t) + \alpha^2 f_{cs}(t)) \quad (40-2)$$

که $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ و در شرایط متقارن:

$$F_{as}(t) = F_{bs}(t) = F_{cs}(t) = F_s(t) \quad (41-2)$$

در نتیجه (40-2) به صورت زیر تغییر می یابد:

$$f_s(t) = \sqrt{2}F_{as}(t)e^{j\omega_e t} \quad (42-2)$$

$F_s(t)$ یک کمیت دائمی در شرایط متعادل پایدار سینوسی است. به عبارت دیگر در این مورد، فازور فضایی به

مانند فازور زمانی، در زمانی که as می باشد، فازور متغیر فضایی (40-2) به سه قسمت مثبت، منفی و صفر تفکیک

می شود، بنابراین داریم:

$$f_s(t) = f_s^+(t) + f_s^-(t) + f_s^0(t) \quad (43-2)$$

زمانی که:

$$f_s^+(t) = \frac{2}{3}(f_{as}^+(t) + \alpha f_{bs}^+(t) + \alpha^2 f_{cs}^+(t)) \quad (44-2)$$

$$f_s^-(t) = \frac{2}{3}(f_{as}^-(t) + \alpha f_{bs}^-(t) + \alpha^2 f_{cs}^-(t)) \quad (45-2)$$

$$f_s^0(t) = \frac{1}{3}(f_{as}(t) + f_{bs}(t) + f_{cs}(t)) \quad (46-2)$$

در معادلات (۴۴-۴۶) مقادیری که با زیرنویس +، - و ۰ تفکیک شده‌اند به ترتیب نمایشگر مولفه‌های مثبت، منفی و صفر هستند.

۲-۵- مدل‌های سیستم قدرت بزرگ

یک کاربرد تغییر شکل فازور متغیر زمانی برای مدل‌های سیستم قدرت در جدول ۱ ارائه می‌شود که نشان دهنده شکل کلی معادلات از هر دو مجموعه F و G (شکل ۱) بدون محدودیت درباره سرعت روند یا اندازه‌ی سیستم یا جزئیات مدلینگ و بدون هیچ محدودیتی برای اجزای خازنی می‌باشد.

موضوع اصلی این بخش درباره کاربرد مفهوم فازور متغیر زمانی بر سیستم انتقال سه فاز متوازن شده است (مجموعه G در جدول ۱) و معادلات ژنراتور در جدول (در مجموعه F) صرفاً به عنوان یک مثال از یک مجموعه معادلات دینامیکی ژنراتور بیان می‌شوند. برای مثال (T.1.1) در جدول ۱، دینامیک‌های استاتور و روتور از یک ژنراتور (توربو) را در یک معادله دیفرانسیل با تقریب به طور گسترده استفاده شده از طریق مفهوم E' ، ولتاژ راکتانس گذرا ترکیب می‌کند. این راکتانس گذرا x'_{d1} (T.1.1) در جدول ۱ حاصل جمع‌ی از امپدانس دینامیک استاتور x_{li} با یک ترکیب "معادل" از امپدانس‌های دینامیک روتور برای مثال x'_{ad1} است. توجه داشته باشید که این کمیت x'_{ad1} به صورت فیزیکی اشاره بر یک احتمال مغناطیسی غیر مدول شده می‌کند، اگرچه آن کمیت به صورت عددی به عنوان یک راکتانس در محاسبات هر واحد نشان داده می‌شود، در حالی که راکتانس نشت استاتور x_{li} یک راکتانس الکتریکی واقعی است. این تقریب به تلاش‌های کلاسیک پارک و کنکور دیا بر می‌گردد و تقریباً به صورت جهانی در دینامیک‌های زاویه روتور از شبیه‌سازی‌های ثابت گذرا استفاده می‌شود. این کمیت در جدول ۲-۱ آمده است.

F set: Dynamic equations (non-modulated non-phasor), $\dot{x} = f(x, y, p)$
(highly simplified to save space, detailed models can be readily used)

1. Generator electromagnetics (simplification from Park-Concordia)

$$T_{d0}' \dot{E}_i' = -\frac{x_{d1}}{x_{d1}'} E_i' + \frac{x_{d1} - x_{d1}'}{x_{d1}'} E_i \cos(\theta_i - \delta_i) + E_{fd_i} \quad (T1.1)$$

2. Generator excitation control (simplified from IEEE Type 1 model)

$$T_i \dot{E}_{fd_i} = -K_i (E_i - E_{ref_i}) - (E_{fd_i} - E_{fd_i}^0) \quad (T1.2)$$

3. Generator electromechanics (swing equation)

$$M_i \ddot{\theta}_i + b_i \dot{\theta}_i = P_{T_i} - \frac{1}{x_{d1}'} E_i' E_i \sin(\theta_i - \delta_i) \quad (T1.3)$$

4. Load:

$$P_{L_i} = P_{S_i} + P_{D_i}, \quad Q_{L_i} = Q_{S_i} + Q_{D_i}, \quad \vec{S}_{L_i} = P_{L_i} + jQ_{L_i} \quad (T1.4)$$

$$\text{Static } P_{S_i} = P_i^0 + M_i(E_i) + G_i(E_i)^2, \quad Q_{S_i} = Q_i^0 + H_i(E_i) + B_i(E_i)^2 \quad (T1.5)$$

$$\text{Dynamic } P_{D_i} = P_{D_i}(x_{D_i}, E_i, \delta_i), \quad Q_{D_i} = Q_{D_i}(x_{D_i}, E_i, \delta_i) \quad (T1.6)$$

$$\dot{x}_{D_i} = f_{D_i}(x_{D_i}, E_i, \delta_i) \quad (T1.7)$$

5. Notation: (see Figure 2) $x_{d1} = x_{ad1} + x_{l1}$, $x_{l1} = \omega L_{l1}$, $C_i = C_{Bank_i} + C_{x_i}$, $\vec{S}_{L_i} = \vec{E}_i \vec{I}_{L_i}^*$

$$\vec{E}_i' = E_i' \angle \theta_i, \quad \vec{E}_i = E_i \angle \delta_i, \quad \vec{I}_{G_i} = I_{G_i} \angle \varphi_{G_i}, \quad \vec{I}_{L_i} = I_{L_i} \angle \varphi_{L_i}, \quad \vec{I}_{ij} = I_{ij} \angle \varphi_{ij}, \quad i, j \in [1, \dots, N]$$

$$E_i' \in x, \quad \theta_i \in x, \quad \delta_i \in x, \quad E_{fd_i} \in x, \quad x_{D_i} \in x$$

$$E_i \in y, \quad \delta_i \in y, \quad I_{G_i} \in y, \quad \varphi_{G_i} \in y, \quad I_{ij} \in y, \quad \varphi_{ij} \in y$$

G set: Network equations (modulated-phasor)

The Power Balance equations (Figure 2)

Quasi-stationary equations $0 = g(x, y, p)$

Bus i:

$$\vec{E}_i \vec{I}_{G_i}^* - \vec{S}_{L_i} - j\omega C_i E_i^2 - \sum_{j=1}^m C_{ij} \vec{E}_i \vec{I}_{ij}^* = 0 \quad (T1.8)$$

$$\vec{E}_{G_i} - \vec{E}_i - j\omega L_{l1} \vec{I}_{G_i} = 0 \quad (T1.9)$$

Line ij:

$$\vec{E}_i - \vec{E}_j - (R_{ij} + j\omega L_{ij}) \vec{I}_{ij} = 0 \quad (T1.10)$$

Time-varying Phasor equations $\dot{y} = g(x, y, p)$

Bus i:

$$\vec{E}_i \vec{I}_{G_i}^* - \vec{S}_{L_i} - j\omega C_i E_i^2 - \sum_{j=1}^m C_{ij} \vec{E}_i \vec{I}_{ij}^* = C_i \vec{E}_i \frac{d\vec{E}_i^*}{dt} \quad (T1.11)$$

$$\vec{E}_{G_i} - \vec{E}_i - j\omega L_{l1} \vec{I}_{G_i} = L_{l1} \frac{d\vec{I}_{G_i}}{dt} \quad (T1.12)$$

Line ij:

$$\vec{E}_i - \vec{E}_j - (R_{ij} + j\omega L_{ij}) \vec{I}_{ij} = L_{ij} \frac{d\vec{I}_{ij}}{dt} \quad (T1.13)$$

Multiplying (T1.10) and (T1.13) by \vec{I}_{ij}^* gives the equivalent line power balance equations.

توجه داشته باشید که استاتور عملاً نشان دهنده بخشی از مجموعه تغییر شکل، در شکل (۱) بین دینامیک روتور غیرمدوله در مجموعه F و دینامیک‌های مدوله شده (احتمالاً لحظه ای) از مجموعه G است. مجموعه F بر روی قسمت ژنراتور از استاتور به وسیله میدان‌های مغناطیسی مدوله نشده رتور در استاتور نشان داده می‌شود. از سمت باس ژنراتور، این کمیت به صورت یک ولتاژ فازور سه فاز متوازن شده ظاهر می‌شود که در سیم‌پیچهای استاتور برای مثال \vec{E}_{G_i} القا می‌شود. بنابراین ارتباط این ولتاژ القا شده \vec{E}_{G_i} با ولتاژ باس \vec{E}_i شامل راکتانس نشت استاتور X_{li} است (و مقاومت) (احتمالاً شامل امپدانس ترانسفورمر) و یک لینک دینامیکی است که در مجموعه G قرار دارد (T.1.12). در جدول ۱ را ببینید). در نتیجه فازورها، در مقابل مجموعه‌های G و F مدول نشده (شکل ۱) توسط ولتاژ القایی در استاتور تغییر شکل می‌یابند.

در جهان کنونی، از مدل‌های دینامیک با جزئیات بیشتری عموماً در مطالعات ثبات برای ژنراتورها (از قبیل معادلات کامل پارک، که جایگزین T.1.1 در جدول ۱ می‌شوند) و ابزارهای دیگر (از قبیل مدل محرک IEEE در T.1.2 در جدول ۱ استفاده می‌شوند. ساختار جدول ۱ را می‌توان مستقیماً توسعه داد تا مدل‌های دارای جزئیات که به خوبی شناخته شده‌اند و ژنراتورها و ابزارهای کنترل را شامل می‌شوند را وارد محاسبات نمود.

دو فرضیه زیربنایی برای توسعه مدل سیستم قدرت مورد نیاز هستند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

فرضیه ۱: سیستم قدرت متوازن می‌شود، به گونه‌ای که هر سه سیگنال سه فاز به شکل (۲۵) متوازن شده و

همه بارها متقارن باشند.

فرضیه ۲: یک نمایش شبکه مدار π از سیستم انتقالی با خطای کوچک معتبر است.

با فرضیه های ۱ و ۲، مدل دینامیک کلی سیستم قدرت بزرگ را می توان به وسیله فرمول زیر خلاصه کرد (

جدول ۱).

$$\begin{aligned} \dot{z} &= h(z, p), \quad z \in \mathbb{R}^{n+m}, \quad p \in \mathbb{R}^q \\ h &: \mathbb{R}^{n+m+q} \rightarrow \mathbb{R}^{n+m} \end{aligned} \quad (۴۷-۲)$$

که در آن $z = \{x, y\}$ ، $h\{z, p\} = \{f(z, p), g(z, p)\}$ و h یک تابع هموار است. در اینجا n و m به ترتیب اشاره بر ابعاد معادلات F و G می کنند.

۲-۶- محدودیت های مدل π

مدارهای π به علت کاربرد گسترده شان در این پایان نامه مورد استفاده قرار می گیرند. به هر حال، نمایش مدار π از خطوط انتقال، نشان دهنده یک تقریب است که حد واسط بین نادیده گیری خازن های خط و نمایش مقدار ثابت توزیع شده ی فیزیکی سخت (معادله موج) می باشد. به آسانی می توانیم مشاهده کنیم که تفاوت فیزیکی زیادی بین واقعیت و مدل π وجود دارد (یعنی مدل RLC فشرده). در سیستم واقعی، هیچ خازن فشرده ای در باس ها وجود ندارند به غیر از مکان هایی که بانک های خازنی متصل هستند. در مدل مدار π ، شارژ یا انرژی در میزان های قراردادی بانک های خازنی، در پایه مدار π در باس، خالی می شود، در حالی که در سیستم واقعی، این شارژ از طریق خط انتقال به شکل یک موج جریان می یابد. در واقع با استفاده از نمایش π ، سیستم انتقال یک شبکه RLC بسیار معمولی به نظر می آید که در واقعیت به این صورت نیست.

فصل سوم
مدلسازی شبکه ۳ماشینه ۹ باسه IEEE

۳-۱- سیستم قدرت چند ماشینه مورد مطالعه

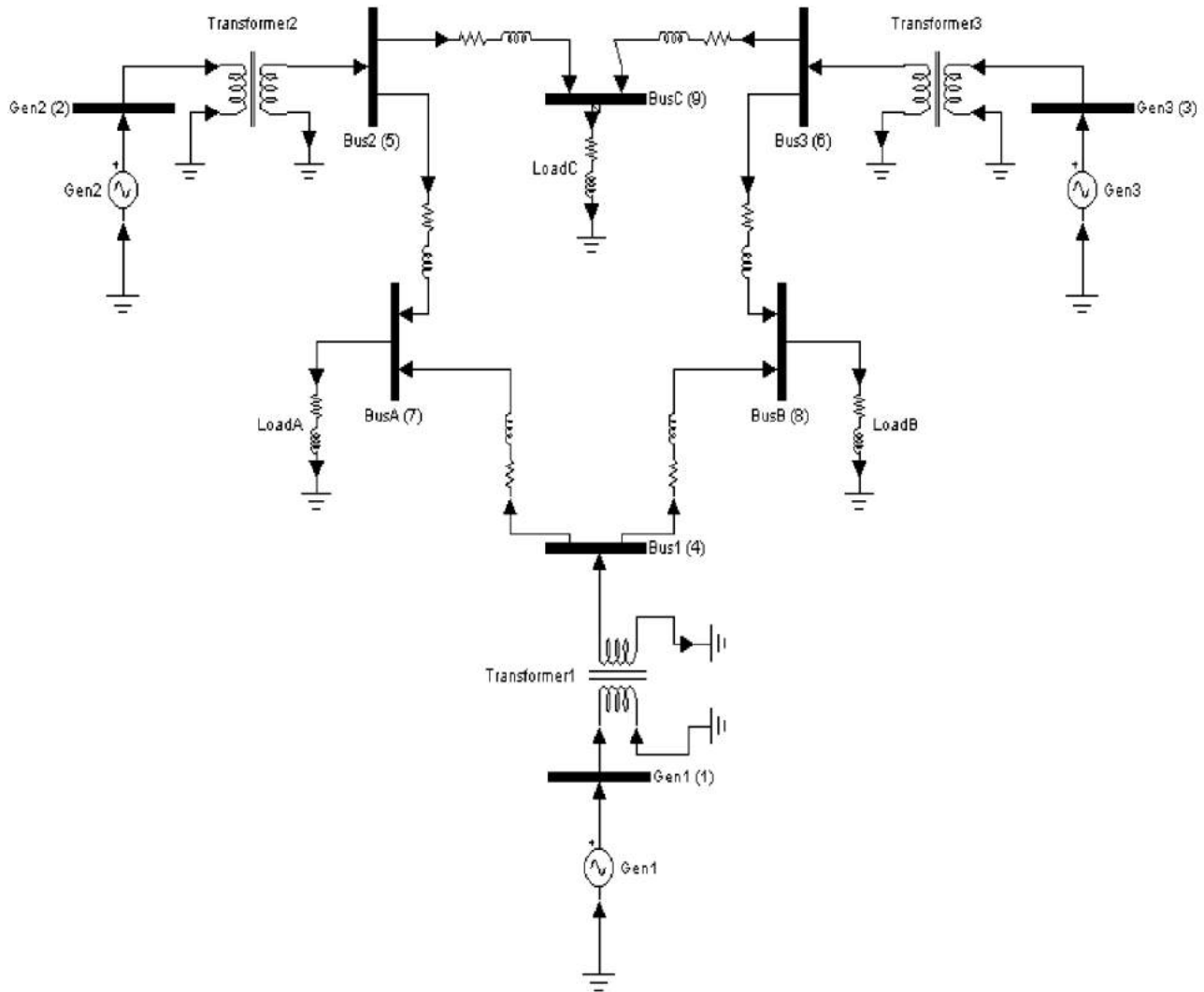
یک سیستم قدرت پایدار، سیستمی است که در آن زمانی که ماشین‌های سنکرون دچار اغتشاش می‌شوند، پس از رفع اغتشاش به حالت اصلی بازگردند. معمولاً اغتشاش باعث ایجاد یک حالت گذرا می‌شود که به طور ذاتی نوسانی است. اما در صورتی سیستم پایدار خواهد بود که این نوسانات میرا شوند [۳۳]. عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین‌های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون هماهنگ باقی بمانند [۹]. اگر اختلاف زاویه روتور بین هر جفت ماشین، به طور نامحدودی افزایش یابد یا اینکه نوسانات به طور مؤثری میرا نشوند، سیستم ناپایدار است [۳۳]. موضوع اصلی این فصل به طور وسیع مطالعه‌ی پایداری بر اساس رفتار زاویه‌ی ماشین در یک سیستم چند ماشینه است.

برای سیستم قدرت چند ماشینه مورد مطالعه فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- توان مکانیکی ورودی ثابت در نظر گرفته شده است.

۲- بارها به صورت امپدانس ثابت مدل می‌شوند.

۳- گشتاور میرا کننده قابل صرف نظر است.



شکل ۱-۲: سیستم قدرت ۳ ماشینه و ۹ باسه IEEE

در اینجا مطالعه بر روی سیستم قدرت ۳ ماشینه و ۹ باسه IEEE متمرکز شده است [۳۳]. سیستم مورد مطالعه در شکل زیر قابل مشاهده است، همچنین داده‌های مربوط در [۳۳] آمده است.

۳-۲- محاسبات حالت ماندگار

برای آماده سازی سیستم جهت مطالعه پایداری، محاسبات اولیه زیر بایستی در نظر گرفته شوند:

۱- محاسبات بر اساس توان پایه 100MVA در سیستم پریونیت انجام شده است.

۲- از سیستم قدرت مورد نظر در حالت ماندگار پخش بار نیوتن-رافسون گرفته شده که نتایج به صورت

زیر قابل دسترسی است:

$$V_{t1} = 1e^{j0}$$

$$V_{t2} = 1.025 e^{j1.1338}$$

$$V_{t3} = 1.025e^{j0.9761}$$

$$V_{t4} = 0.9760e^{-j0.0418}$$

$$V_{t5} = 0.9845e^{j1.01457}$$

$$V_{t6} = 0.9939e^{j0.9641}$$

$$V_{t7} = 0.9943e^{-j0.0811}$$

$$V_{t8} = 0.9588e^{-j0.2094}$$

$$V_{t9} = 0.9656e^{j0.8511}$$

۳- بارها تبدیل به امپدانس یا admittانس معادل می شوند.

در صورتی که بآس مورد نظر دارای ولتاژ \bar{V}_L ، توان اکتیو PL و توان راکتیو QL باشد و جریان بار \bar{I}_L باشد،

admittانس بار به صورت زیر محاسبه می گردد. اگر \bar{Y}_L admittانس بار مورد نظر باشد داریم:

$$\bar{Y}_L = G_L + jB_L \quad (1-3)$$

$$P_L + jQ_L = \bar{V}_L \bar{I}_L^* \quad (2-3)$$

از طرفی داریم:

$$\bar{I}_L = \bar{Y}_L \bar{V}_L \quad (3-3)$$

حال رابطه (3-3) را در رابطه (2-3) جایگذاری می‌کنیم:

$$P_L + JQ_L = \bar{V}_L (\bar{Y}_L * \bar{V}_L *) \quad (4-3)$$

$$P_L + JQ_L = V_L^2 (\bar{Y}_L *) \quad (5-3)$$

$$\bar{Y}_L * = \frac{P_L + JQ_L}{V_L^2} \quad (6-3)$$

$$\bar{Y}_L = \left(\frac{P_L + JQ_L}{V_L^2} \right) * \quad (7-3)$$

$$\bar{Y}_L = \left(\frac{P_L - JQ_L}{V_L^2} \right) \quad (8-3)$$

۴- ماتریس ادمیتانس شبکه محاسبه می‌گردد:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{19} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{91} & \cdots & y_{99} \end{bmatrix}$$

۵- که در آن:

۶- y_{ii} : مجموع ادمیتانس‌های متصل به شین i ام و

۷- y_{ij} : منفی ادمیتانس متصل بین شین i ام و j ام

۸- مقادیر حالت ماندگار کمیت‌های مورد نظر برای شبکه مورد مطالعه به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus} \quad (9-3)$$

۹- در رابطه (9-3) داریم:

$$\mathbf{I}_{bus} = \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \\ I_{a6} \\ I_{a7} \\ I_{a8} \\ I_{a9} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad \mathbf{V}_{bus} = \begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ V_{t3} \\ V_{t4} \\ V_{t5} \\ V_{t6} \\ V_{t7} \\ V_{t8} \\ V_{t9} \end{bmatrix}$$

۱۰- که در این ماتریس‌ها:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= 0.5488 + 0.274j \\ I_{a2} &= 1.5808 + 0.2056j \\ I_{a3} &= 0.9587 + 0.2017j \\ I_{a4} &= I_{a5} = I_{a6} = I_{a7} = I_{a8} = I_{a9} = 0 \end{aligned}$$

همچنین ولتاژهای داخلی برای هر ۳ ژنراتور بایستی محاسبه شوند:

$$\bar{E}_{zi} = \bar{V}_{ti} + \bar{I}_{ai}(R_{si} + jX_{qi}) \quad (۱۰-۳)$$

که در معادله (۱۰-۳) داریم:

$$i = 1, 2, 3$$

همچنین داریم:

$$\bar{E}_{zi} = E_{zi} e^{j\delta_i} \quad (۱۱-۳)$$

$$\bar{I}_{ai} = I_{ai} e^{j\phi_i} \quad (۱۲-۳)$$

$$\bar{V}_{ti} = V_{ti} e^{j\theta_i} \quad (۱۳-۳)$$

ولتاژها و جریان‌های به دست آمده از ژنراتورها (\bar{V}_{ti} و \bar{I}_{ai}) را به مؤلفه‌های dq تبدیل می‌کنیم: (طبق)

دیاگرام فازوری مربوط به هر ژنراتور).

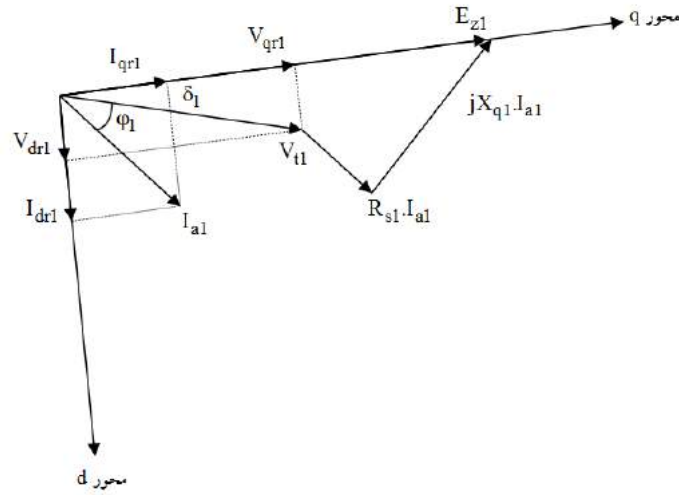
برای ماشین ۱ داریم:

$$\bar{E}_{z1} = E_{z1} e^{j\delta_1} \quad (۱۴-۳)$$

$$\bar{I}_{a1} = I_{a1} e^{j\phi_1} \quad (۱۵-۳)$$

$$\bar{V}_{t1} = V_{t1} e^{j\theta_1} \quad \theta_1 = 0 \quad (۱۶-۳)$$

دیاگرام فازوری برای ماشین ۱ در حالت ماندگار به شکل زیر رسم می شود:



شکل (۲-۲): دیاگرام فازوری ماشین ۱

که با توجه به دیاگرام فازوری برای ماشین ۱، مؤلفه‌های dq جریان و ولتاژ به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$I_{qr1} = I_{a1} \cos(\delta_1 - \varphi_1) \quad (17-2)$$

$$I_{dr1} = I_{a1} \sin(\delta_1 - \varphi_1) \quad (18-2)$$

$$V_{qr1} = V_{t1} \cos(\delta_1 - \theta_1) \quad (19-2)$$

$$V_{dr1} = V_{t1} \sin(\delta_1 - \theta_1) \quad (20-2)$$

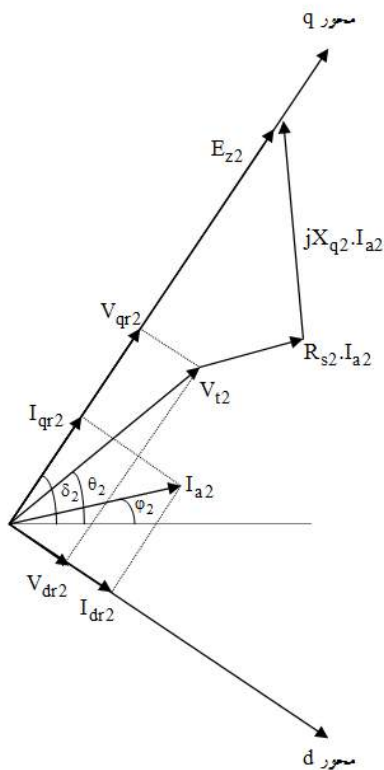
به طریق مشابه برای ماشین ۲ داریم:

$$\bar{E}_{z2} = E_{z2} e^{j\delta_2} \quad (21-2)$$

$$\bar{I}_{a2} = I_{a2} e^{j\varphi_2} \quad (22-2)$$

$$\bar{V}_{t2} = V_{t2} e^{j\theta_2} \quad (23-2)$$

دیاگرام فازوری مربوط به ماشین ۲ در حالت ماندگار به صورت زیر است:



شکل (۳-۳) : دیاگرام فازوری ماشین ۲

که با توجه به دیاگرام فازوری برای ماشین ۲، مؤلفه‌های dq جریان و ولتاژ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{qr2} = I_{a2} \cos(\delta_2 - \varphi_2) \quad (24-3)$$

$$I_{dr2} = I_{a2} \sin(\delta_2 - \varphi_2) \quad (25-3)$$

$$V_{qr2} = V_{t2} \cos(\delta_2 - \theta_2) \quad (26-3)$$

$$V_{dr2} = V_{t2} \sin(\delta_2 - \theta_2) \quad (27-3)$$

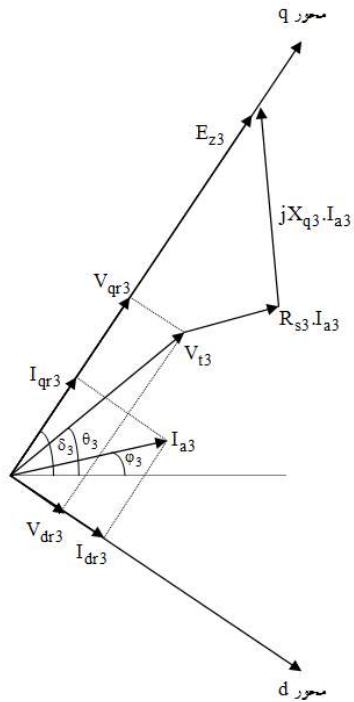
و باز هم به طریق مشابه برای ماشین ۳ داریم:

$$\bar{E}_{z3} = E_{z3} e^{j\delta_3} \quad (28-3)$$

$$\bar{I}_{a3} = I_{a3} e^{j\varphi_3} \quad (29-3)$$

$$\bar{V}_{t3} = V_{t3} e^{j\theta_3} \quad (30-3)$$

که دیاگرام فازوری مربوط به ماشین ۳ در حالت ماندگار به صورت زیر است:



شکل (۳-۴): دیاگرام فازوری ماشین ۳

با توجه به دیاگرام فازوری برای ماشین ۳، مؤلفه‌های جریان و ولتاژ به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{qr3} = I_{a3} \cos(\delta_3 - \varphi_3) \quad (31-3)$$

$$I_{dr3} = I_{a3} \sin(\delta_3 - \varphi_3) \quad (32-3)$$

$$V_{qr3} = V_{t3} \cos(\delta_3 - \theta_3) \quad (33-3)$$

$$V_{dr3} = V_{t3} \sin(\delta_3 - \theta_3) \quad (34-3)$$

کمیت‌های مورد نظر که در حل معادلات دینامیکی به روش رونگه - کوتای مرتبه ۴ نیز مورد استفاده قرار

می‌گیرند، بایستی در حالت ماندگار محاسبه شوند:

$$E_{xfdi} = E_{zi} + (X_{di} - X_{qi}) I_{dri} \quad (35-3)$$

$$I_{fdi} = \frac{E_{xfdi}}{X_{mdi}} \quad (36-3)$$

$$E'_{qi} = E_{xfdi} - (X_{di} - X_{qi}) I_{dri} \quad (37-3)$$

$$\psi_{dsi} = (V_{qri} + R_{si} I_{qri}) \quad (38-3)$$

$$\Psi_{qsi} = -(V_{dri} + R_{si} I_{dri}) \quad (39-3)$$

$$\Psi_{mdi} = \Psi_{dsi} + X_{lsi} I_{dri} \quad (40-3)$$

$$\Psi_{mqi} = \Psi_{qsi} + X_{lsi} I_{qri} \quad (41-3)$$

$$\Psi_{fdi} = \Psi_{mdi} + X_{lfdi} I_{fdi} \quad (42-3)$$

$$\Psi_{kdi} = \Psi_{mdi} \quad (43-3)$$

$$\Psi_{kqi1} = \Psi_{mqi} \quad (44-3)$$

$$\Psi_{kqi2} = \Psi_{mqi} \quad (45-3)$$

$$P_{ei} = V_{qri} I_{qri} + V_{dri} I_{dri} \quad (46-3)$$

$$P_{mi} = P_{ei} \quad (47-3)$$

$$M_j = \frac{1}{2H_i} \quad (48-3)$$

که در روابط بالا داریم:

$$i=1,2,3$$

گفتنی است که روابط بالا با توجه به روابط دینامیکی زیر با در نظر گرفتن حالت ماندگار به دست آمده‌اند [34].

در روابط زیر P عملگر مشتق است:

$$P \triangleq \frac{d}{dt} \quad (49-3)$$

$$P\Psi_{qsi} = \omega_b \left(V_{qsi} - \frac{\omega_{ri}}{\omega_b} \Psi_{dsi} + \frac{R_{si}}{X_{lsi}} (\Psi_{mqi} - \Psi_{qsi}) \right) \quad (50-3)$$

$$P\Psi_{dsi} = \omega_b \left(V_{dsi} + \frac{\omega_{ri}}{\omega_b} \Psi_{qsi} + \frac{R_{si}}{X_{lsi}} (\Psi_{mdi} - \Psi_{dsi}) \right) \quad (51-3)$$

$$P\Psi_{kqi1} = \omega_b \left(V_{kqi1} + \frac{R_{kqi1}}{X_{lkqi1}} (\Psi_{mqi} - \Psi_{kqi1}) \right) \quad (52-3)$$

$$P\Psi_{kqi2} = \omega_b \left(V_{kqi2} + \frac{R_{kqi2}}{X_{lkqi2}} (\Psi_{mqi} - \Psi_{kqi2}) \right) \quad (53-3)$$

$$P\psi_{fdi} = \omega_b \left(\frac{R_{fdi}}{X_{mdi}} E_{xfdi} + \frac{R_{fdi}}{X_{lfdi}} (\psi_{mdi} - \psi_{fdi}) \right) \quad (54-3)$$

$$P\psi_{kdi} = \omega_b \left(V_{kdi} + \frac{R_{kdi}}{X_{lkdi}} (\psi_{mdi} - \psi_{kdi}) \right) \quad (55-3)$$

$$P\delta_i = (\omega_{ri} - \omega_0) \omega_b \quad (56-3)$$

$$P\omega_{ri} = M_i (P_{mi} - P_{ei}) \quad (57-3)$$

در جایی که داریم:

$$I_{qsi} = \frac{-1}{X_{lsi}} (\psi_{qsi} - \psi_{mdi}) \quad (58-3)$$

$$I_{dsi} = \frac{-1}{X_{lsi}} (\psi_{dsi} - \psi_{mdi}) \quad (59-3)$$

$$I_{kq1i} = \frac{1}{X_{lkq1i}} (\psi_{kq1i} - \psi_{mqi}) \quad (60-3)$$

$$I_{kq2i} = \frac{1}{X_{lkq2i}} (\psi_{kq2i} - \psi_{mqi}) \quad (61-3)$$

$$I_{fdi} = \frac{1}{X_{lfdi}} (\psi_{fdi} - \psi_{mdi}) \quad (62-3)$$

$$I_{kdi} = \frac{1}{X_{lkdi}} (\psi_{kdi} - \psi_{mdi}) \quad (63-3)$$

همچنین در معادلات بالا داریم:

$$\psi_{mqi} = X_{aqi} \left(\frac{\psi_{qsi}}{X_{lsi}} + \frac{\psi_{kq1i}}{X_{lkq1i}} + \frac{\psi_{kq2i}}{X_{lkq2i}} \right) \quad (64-3)$$

$$\Psi_{\text{mdi}} = \mathbf{X}_{\text{adi}} \left(\frac{\Psi_{\text{dsi}}}{\mathbf{X}_{\text{lsi}}} + \frac{\Psi_{\text{fdi}}}{\mathbf{X}_{\text{lfdi}}} + \frac{\Psi_{\text{kdi}}}{\mathbf{X}_{\text{lkdi}}} \right) \quad (65-3)$$

که در آن:

$$\mathbf{X}_{\text{aqi}} = \left(\frac{1}{\mathbf{X}_{\text{mqi}}} + \frac{1}{\mathbf{X}_{\text{lsi}}} + \frac{1}{\mathbf{X}_{\text{lkqli}}} + \frac{1}{\mathbf{X}_{\text{lkq2i}}} \right)^{-1} \quad (66-3)$$

$$\mathbf{X}_{\text{adi}} = \left(\frac{1}{\mathbf{X}_{\text{mdi}}} + \frac{1}{\mathbf{X}_{\text{lsi}}} + \frac{1}{\mathbf{X}_{\text{lfdi}}} + \frac{1}{\mathbf{X}_{\text{lkdi}}} \right)^{-1} \quad (67-3)$$

فصل چهارم: ماتریسهای ادمیتانس تحت خطاهای ایجاد شده در شبکه ۹ با سه ماشین IEEE و روش کاهش مرتبه

قبلاً ماتریس ادمیتانس شبکه مورد مطالعه را در حالت ماندگار به دست آوردیم. در این فصل هدف مطالعه پایداری در یک سیستم قدرت چند ماشین است، زمانی که سیستم تحت اغتشاش قرار گیرد. در اینجا اغتشاش مورد نظر خطاهای دو فاز و دو فاز به زمین هستند که در وسط یکی از خطوط رخ می دهد. زمان اعمال این خطاها در لحظه ۰/۱ ثانیه است و فرض می شود که این خطاها تا لحظه ۰/۲ ثانیه وجود داشته باشد (یعنی به مدت ۰/۱ ثانیه شبکه را تحت تأثیر قرار دهد). و پس از آن در لحظه ۰/۲ ثانیه با باز شدن خط خطا دار از طرفین، خطاها رفع شوند و پس از رفع خطاهای مورد نظر در مدت ۱ ثانیه یعنی در لحظه ۱/۲ ثانیه، خط مجدداً به شبکه برگردد. پس می بایست ماتریس ادمیتانس شبکه را در حالت های قبل از خطا، در حین خطا، پس از باز شدن خط و پس از وصل مجدد خط به شبکه بدست آوریم.

۴-۱- ماتریس ادمیتانس شبکه در حالت قبل از خطا

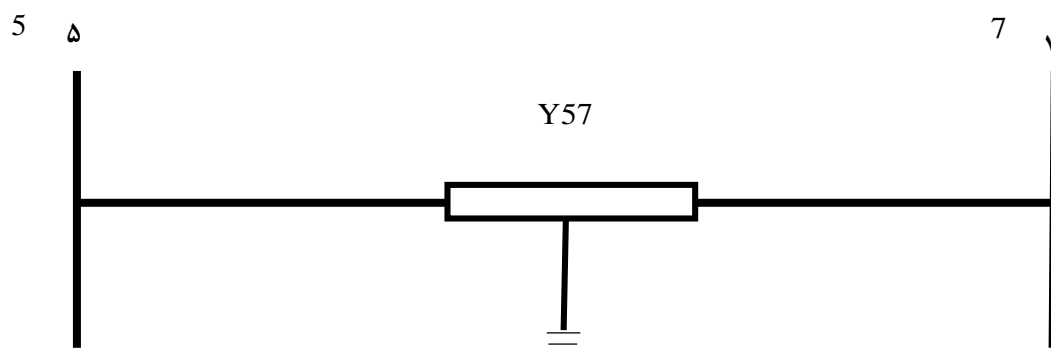
ماتریس ادمیتانس شبکه در حالت قبل از خطا، همان ماتریس ادمیتانس به دست آمده در حالت ماندگار است یعنی:

$$Y_{\text{prefault}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} & Y_{18} & Y_{19} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} & Y_{28} & Y_{29} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} & Y_{38} & Y_{39} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} & Y_{48} & Y_{49} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} & Y_{59} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} & Y_{69} \\ Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} & Y_{79} \\ Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} & Y_{89} \\ Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} & Y_{95} & Y_{96} & Y_{97} & Y_{98} & Y_{99} \end{bmatrix} \quad (1)$$

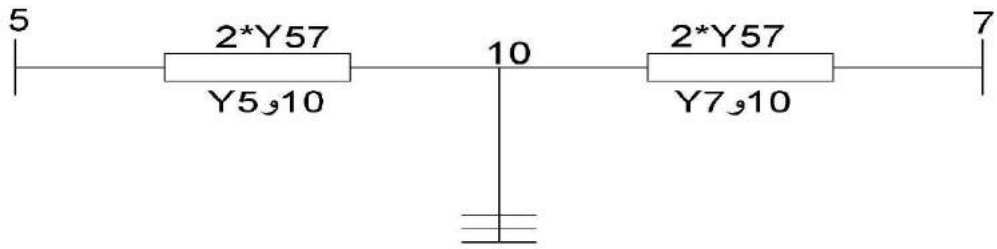
۲-۴- ماتریس ادمیتانس شبکه در حین خطا

در صورتی که خطای دو فاز یا دو فاز به زمین در وسط یکی از خطوط رخ دهد، ماتریس ادمیتانس شبکه به صورت زیر قابل محاسبه است.

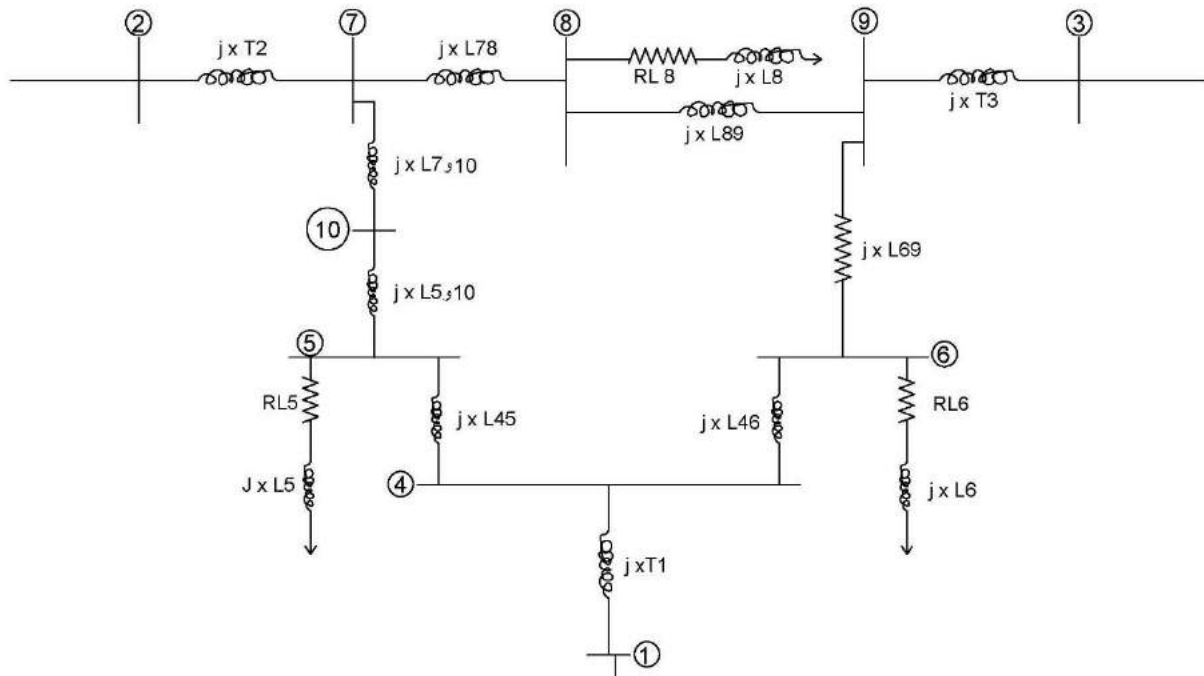
فرض می‌شود که خطاهای نامتقارن در وسط خط واصل شین‌های ۵ و ۷ رخ دهد، داریم:



شکل ۱-۴ : خطای نامتقارن در خط واصل شین و اصل شین



شکل ۲-۴ : خطای نامتقارن در خط واصل شین‌های ۵ و ۷



شکل ۳-۴ : شبکه تحت خطا

ماتریس ادمیتانس شبکه به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$Y_{5,10(\text{new})} = Y_{7,10(\text{new})} = 2Y_{57(\text{old})} = 2Y_{75(\text{old})} \quad (۲-۴)$$

به عبارت دیگر ماتریس ادمیتانس شبکه در حین خطا به صورت زیر است:

$$Y_{\text{fault}} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} & Y_{18} & Y_{19} & Y_{1,10} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} & Y_{28} & Y_{29} & Y_{2,10} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} & Y_{38} & Y_{39} & Y_{3,10} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} & Y_{48} & Y_{49} & Y_{4,10} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} & Y_{59} & Y_{5,10} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} & Y_{69} & Y_{6,10} \\ Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} & Y_{79} & Y_{7,10} \\ Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} & Y_{89} & Y_{8,10} \\ Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} & Y_{95} & Y_{96} & Y_{97} & Y_{98} & Y_{99} & Y_{9,10} \\ Y_{10,1} & Y_{10,2} & Y_{10,3} & Y_{10,4} & Y_{10,5} & Y_{10,6} & Y_{10,7} & Y_{10,8} & Y_{10,9} & Y_{10,10} \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

۳-۴- ماتریس ادمیتانس شبکه پس از باز شدن خط

پس از آن که سیستم‌های حفاظتی خط خطادار را از شبکه جدا کردند، هم ماتریس ادمیتانس شبکه دستخوش تغییر می‌شود که بایستی تغییرات را در محاسبات شبکه لحاظ کرد. ماتریس ادمیتانس شبکه پس از باز شدن خط به شکل زیر دستخوش تغییر می‌شود:

$$Y_{55(\text{new})} = Y_{55(\text{old})} - Y_{57} \quad (4-4)$$

$$Y_{77(\text{new})} = Y_{77(\text{old})} - Y_{57} \quad (5-4)$$

$$Y_{57(\text{new})} = Y_{75(\text{new})} = 0 \quad (6-4)$$

به عبارت دیگر ماتریس شبکه پس از باز شدن خط به صورت زیر است:

$$Y_{\text{clear}} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} & y_{17} & y_{18} & y_{19} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} & y_{27} & y_{28} & y_{29} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} & y_{37} & y_{38} & y_{39} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} & y_{47} & y_{48} & y_{49} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} - y_{57} & y_{56} & 0 & y_{58} & y_{59} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} & y_{67} & y_{68} & y_{69} \\ y_{71} & y_{72} & y_{73} & y_{74} & 0 & y_{76} & y_{77} - y_{57} & y_{78} & y_{79} \\ y_{81} & y_{82} & y_{83} & y_{84} & y_{85} & y_{86} & y_{87} & y_{88} & y_{89} \\ y_{91} & y_{92} & y_{93} & y_{94} & y_{95} & y_{96} & y_{97} & y_{98} & y_{99} \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

۴-۴- ماتریس ادمیتانس شبکه پس از وصل مجدد خط به شبکه

پس از رفع خطا و وصل خط به شبکه ماتریس ادمیتانس شبکه باز هم تغییر خواهد کرد. در این حالت ماتریس ادمیتانس شبکه، مانند شبکه در حالت ماندگار یعنی در حالت قبل از خطاست، پس داریم:

$$Y_{\text{reclose}} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} & y_{17} & y_{18} & y_{19} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} & y_{27} & y_{28} & y_{29} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} & y_{37} & y_{38} & y_{39} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} & y_{47} & y_{48} & y_{49} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} & y_{57} & y_{58} & y_{59} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} & y_{67} & y_{68} & y_{69} \\ y_{71} & y_{72} & y_{73} & y_{74} & y_{75} & y_{76} & y_{77} & y_{78} & y_{79} \\ y_{81} & y_{82} & y_{83} & y_{84} & y_{85} & y_{86} & y_{87} & y_{88} & y_{89} \\ y_{91} & y_{92} & y_{93} & y_{94} & y_{95} & y_{96} & y_{97} & y_{98} & y_{99} \end{bmatrix} \quad (8-4)$$

۴-۵- کاهش مرتبه ماتریس ادمیتانس شبکه

در اینجا بایستی به این نکته اشاره کرد که برای شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه و حل دینامیکی معادلات ماشین‌ها و شبکه به طور همزمان بایستی ماتریس‌های ادمیتانس شبکه در تمام حالات (قبل از خطا، در حین خطا، پس از باز شدن خط و پس از وصل مجدد خط) را تا مرتبه ۳ کاهش داد. یادآور می‌شود که برای کاهش مرتبه یک سیستم به صورت زیر عمل می‌شود. در صورتیکه I_a بردار جریان شین‌های دارای ماشین، I_b بردار جریان شین‌های بار، V_a بردار ولتاژ شین‌های دارای ماشین و V_b بردار ولتاژ شین‌های بار باشد، داریم:

$$I_{\text{bus}} = Y_{\text{bus}} * V_{\text{bus}} \quad (9-4)$$

که در اینجا داریم:

$$\mathbf{I}_{bus} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \end{bmatrix} \quad (10-4)$$

$$\mathbf{Y}_{bus} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

$$\mathbf{V}_{bus} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \end{bmatrix} \quad (12-4)$$

از طرفی می دانیم که:

$$\mathbf{I}_b = 0 \quad (13-4)$$

پس داریم:

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{Y}_1 \mathbf{V}_a + \mathbf{Y}_2 \mathbf{V}_b \quad (14-4)$$

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{Y}_3 \mathbf{V}_a + \mathbf{Y}_4 \mathbf{V}_b \Rightarrow \mathbf{Y}_3 \mathbf{V}_a + \mathbf{Y}_4 \mathbf{V}_b = 0 \quad (15-4)$$

$$\Rightarrow \mathbf{V}_b = -\mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3 \mathbf{V}_a \quad (16-4)$$

$$\Rightarrow \mathbf{I}_a = \mathbf{Y}_1 \mathbf{V}_a + \mathbf{Y}_2 (-\mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3 \mathbf{V}_a) \quad (17-4)$$

$$\Rightarrow \mathbf{I}_a = (\mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_2 \mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3) \mathbf{V}_a \quad (18-4)$$

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{Y}_{bus(new)} \mathbf{V}_a \quad (19-4)$$

که در این رابطه:

$$\mathbf{Y}_{bus(new)} \triangleq \mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_2 \mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3 \quad (20-4)$$

برای کاهش مرتبه ماتریس ادمیتانس شبکه در حالت قبل از خطا، به صورت زیر عمل می کنیم:

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{Y}_{prefault} \mathbf{V}_t \quad (21-4)$$

که در این رابطه:

$$\mathbf{I}_a \triangleq \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{a4} \\ I_{a5} \\ I_{a6} \\ I_{a7} \\ I_{a8} \\ I_{a9} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad \mathbf{V}_t \triangleq \begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ V_{t3} \\ V_{t4} \\ V_{t5} \\ V_{t6} \\ V_{t7} \\ V_{t8} \\ V_{t9} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_{\text{prefault}} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} & y_{17} & y_{18} & y_{19} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} & y_{27} & y_{28} & y_{29} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} & y_{37} & y_{38} & y_{39} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} & y_{47} & y_{48} & y_{49} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} & y_{57} & y_{58} & y_{59} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} & y_{67} & y_{68} & y_{69} \\ y_{71} & y_{72} & y_{73} & y_{74} & y_{75} & y_{76} & y_{77} & y_{78} & y_{79} \\ y_{81} & y_{82} & y_{83} & y_{84} & y_{85} & y_{86} & y_{87} & y_{88} & y_{89} \\ y_{91} & y_{92} & y_{93} & y_{94} & y_{95} & y_{96} & y_{97} & y_{98} & y_{99} \end{bmatrix}$$

با توجه به ماتریس $\mathbf{Y}_{\text{Prefault}}$ زیر ماتریس‌های زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{Y}_1 \triangleq \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \quad (22-4)$$

$$\mathbf{Y}_2 \triangleq \begin{bmatrix} y_{14} & y_{15} & y_{16} & y_{17} & y_{18} & y_{19} \\ y_{24} & y_{25} & y_{26} & y_{27} & y_{28} & y_{29} \\ y_{34} & y_{35} & y_{36} & y_{37} & y_{38} & y_{39} \end{bmatrix} \quad (23-4)$$

$$Y_3 \triangleq \begin{bmatrix} y_{41} & y_{42} & y_{43} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} \\ y_{71} & y_{72} & y_{73} \\ y_{81} & y_{82} & y_{83} \\ y_{91} & y_{92} & y_{93} \end{bmatrix} \quad (24-4)$$

$$Y_4 \triangleq \begin{bmatrix} y_{44} & y_{45} & y_{46} & y_{47} & y_{48} & y_{49} \\ y_{54} & y_{55} & y_{56} & y_{57} & y_{58} & y_{59} \\ y_{64} & y_{65} & y_{66} & y_{67} & y_{68} & y_{69} \\ y_{74} & y_{75} & y_{76} & y_{77} & y_{78} & y_{79} \\ y_{84} & y_{85} & y_{86} & y_{87} & y_{88} & y_{89} \\ y_{94} & y_{95} & y_{96} & y_{97} & y_{98} & y_{99} \end{bmatrix} \quad (25-4)$$

و با توجه به ماتریس‌های V_t و I_a زیر ماتریس‌های زیر تعریف می‌شوند:

$$I_A \triangleq \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \end{bmatrix}$$

و

$$I_B \triangleq \begin{bmatrix} I_{a4} \\ I_{a5} \\ I_{a6} \\ I_{a7} \\ I_{a8} \\ I_{a9} \end{bmatrix}$$

$$V_A \triangleq \begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix}$$

و

$$V_B \triangleq \begin{bmatrix} V_{t4} \\ V_{t5} \\ V_{t6} \\ V_{t7} \\ V_{t8} \\ V_{t9} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 \\ Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} \quad (26-4)$$

$$Y_{\text{prefault(new)}} = Y_1 - Y_2 Y_4^{-1} Y_3 \quad (27-4)$$

$$Y_{\text{prefault(new)}} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \quad (28-4)$$

فرم معادله شبکه در حالت قبل از خطا و پس از کاهش مرتبه ماتریس ادمیتانس شبکه به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$I_A = Y_{\text{prefault(new)}} V_A \quad (29-4)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t1} \\ V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix} \quad (30-4)$$

در رابطه اخیر ولتاژ ترمینال ماشین ۱ یعنی V_{t1} دارای مقدار ثابتی است و در طی فرآیند شبیه‌سازی تغییری نمی‌کند. ضمن اینکه جریان‌های ماشین‌های ۲ و ۳ با توجه به حل دینامیکی معادلات ماشین‌های ۲ و ۳ به روش رونگه-کوتا به روز می‌شوند و در هر Step با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{qri} = \frac{(\psi_{mqi}) - (\psi_{qsi})}{X_{lsi}} \quad (31-4)$$

$$I_{dri} = \frac{(\psi_{mqi}) - (\psi_{dsi})}{X_{lsi}} \quad (32-4)$$

که در این رابطه داریم:

$$\psi_{mqi} = X_{aqi} \left(\frac{\psi_{qsi}}{X_{lsi}} + \frac{\psi_{kqi1i}}{X_{lkqi1i}} + \frac{\psi_{kqi2i}}{X_{lkqi2i}} \right) \quad (33-4)$$

$$\psi_{mdi} = X_{adi} \left(\frac{\psi_{dsi}}{X_{lsi}} + \frac{\psi_{fdi}}{X_{lfdi}} + \frac{\psi_{kdi}}{X_{lkdi}} \right) \quad (34-4)$$

$$I_{ai} = (I_{qri} - jI_{dri}) e^{j\delta_i} \quad (35-4)$$

پس در هر Step، ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۲ و ۳ و همچنین جریان ژنراتور ۱ بایستی محاسبه شوند. طبق رابطه‌ی (۹۹-۲) داریم:

$$I_{a1} = y'_{11} V_{t1} + \begin{bmatrix} y'_{12} & y'_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix} \quad (۳۶-۴)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a2} \\ I_{a3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_{21} \\ y'_{31} \end{bmatrix} V_{t1} + \begin{bmatrix} y'_{22} & y'_{23} \\ y'_{32} & y'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix} \quad (۳۷-۴)$$

از آنجایی که جریان‌های ژنراتورهای ۲ و ۳ قبلاً محاسبه شده، طبق (۱۰۶-۲) داریم:

$$\begin{bmatrix} V_{t2} \\ V_{t3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_{22} & y'_{23} \\ y'_{32} & y'_{33} \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} I_{a2} \\ I_{a3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y'_{21} \\ y'_{31} \end{bmatrix} V_{t1} \right) \quad (۳۸-۴)$$

پس در هر Step، رابطه (۳۸-۴)، ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۲ و ۳ نیز محاسبه می‌شوند و عملاً با محاسبه این ولتاژها، جریان ژنراتور ۱ نیز طبق رابطه (۳۶-۴) محاسبه می‌شود. کاهش ماتریس ادیتمانس شبکه در حین خطا، پس از خارج شدن خط و پس از وصل مجدد به شبکه نیز به طریق مشابه انجام گرفته و به طریق مشابه حالت قبل از خطا، ولتاژ و جریان‌های ژنراتورهای ۱ و ۲ و ۳ در هر Step محاسبه می‌شوند. پس در حالت در حین خطا معادله شبکه به صورت زیر است:

$$I_a = Y_{\text{fault(new)}} V_a \quad (۳۹-۴)$$

و در حالت پس از خارج شدن خط، معادله به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$I_a = Y_{\text{clear(new)}} V_a \quad (۴۰-۴)$$

و بالاخره پس از وصل مجدد خط به شبکه، معادله دقیقاً شبیه به معادله‌ی شبکه در حالت قبل از خطا می‌شود، یعنی:

$$I_a = Y_{\text{reclose(new)}} V_a \quad (41-4)$$

$$\Rightarrow Y_{\text{prefault(new)}} = Y_{\text{reclose(new)}} \quad (42-4)$$

نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است این است که ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۲ و ۳ پس از آن که در هر کدام از حالات شبکه (قبل از خطا، در حین خطا، پس از خارج شده خط و پس از وصل مجدد خط) و در هر Step محاسبه شدند، بایستی به فریم چسبیده به روتور ارجاع داده شوند، این کار به این دلیل انجام می‌شود تا فرآیند حل معادلات دینامیکی به روش رونگه-کوتا کامل شود (برای Step های بعدی لازم و ضروریست). با توجه به رابطه زیر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۲ و ۳ به فریم چسبیده به روتور ارجاع داده می‌شوند.

زمانی که:

$$i=2,3$$

داریم:

$$V_{tri} = V_{ti} e^{-j\delta_i} \quad (43-4)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{qri} = \text{real}(V_{tri}) \\ V_{dri} = -\text{imag}(V_{tri}) \end{cases} \quad (44-4)$$

نکته دیگری که در طی فرآیند شبیه‌سازی بایستی به آن توجه شود این است که برای ژنراتورهای ۲ و ۳ معادلات حالت دینامیکی به طور کامل نوشته می‌شوند و به روش رونگه - کوتای مرتبه ۴ حل می‌شوند ولی برای ژنراتور ۱ فقط معادلات مکانیکی در فرآیند شبیه‌سازی حل می‌گردند. از طرفی ولتاژ ترمینال این ژنراتور در طی فرآیند شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شود در حالی که جریان ژنراتور ۱ با توجه به رابطه (۲-۱۰۵) در هر Step بدست می‌آید و نیازی به مؤلفه‌های dq برای ژنراتور ۱ نیست.

معادلات مکانیکی ژنراتور ۱ به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$P\delta_1 = (\omega_{r1} - \omega_0) \omega_b \quad (45-4)$$

$$P\omega_{r1} = M_i (P_{m1} - P_{e1}) \quad (46-4)$$

از طرفی ولتاژ و جریان ژنراتور ۱ به مؤلفه‌های dq در طی فرآیند شبیه‌سازی تقسیم نمی‌شوند، P_{e1} توان الکتریکی ژنراتور ۱، با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{e1} = \text{real}(V_{t1} I_{a1}^*) \quad (47-4)$$

در صورتی که معادلات مکانیکی برای ژنراتور ۲ و ۳ به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$P\delta_i = (\omega_{ri} - \omega_0) \omega_b \quad (48-4)$$

$$P\omega_{ri} = M_i (P_{mi} - P_{ei}) \quad (49-4)$$

که P_{ei} برای ژنراتورهای ۲ و ۳ به شکل زیر محاسبه می‌گردد، در اینجا

$$i=2,3$$

در نظر گرفته می‌شود.

$$P_{ei} = V_{qri} I_{qri} + V_{dri} I_{dri} \quad (50-4)$$

فصل پنجم: خطاهای اتصال کوتاه دو فاز و دو فاز به زمین

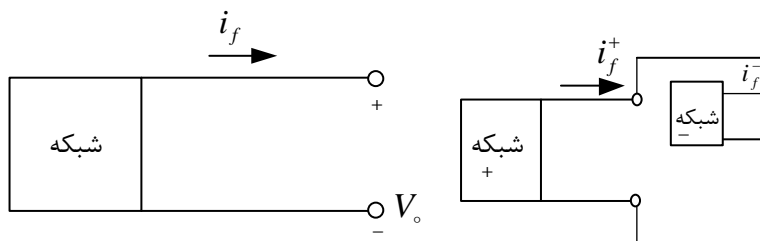
۵-۱-مقدمه: اشاره به روش به کار گرفته شده برای شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت تحت شرایط حالت‌های نامتقارن قبل از رخ دادن فالت برای هر شبکه ای، می‌توان از روش‌های حل پخش توان در شبکه‌های قدرت، مقادیر این متغیرهای شبکه را محاسبه کرد. از جمله این متغیرها ولتاژ ترمینال هر ژنراتور و جریان که هر ژنراتور در شبکه تزریق می‌کند.

مقادیر شار دور سیم پیچ‌های ژنراتور گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی و زاویه رتور هر ژنراتور است که این مقادیر به عنوان شرایط اولیه متغیرها در حل معادلات مربوط به هر ژنراتور برای زمان‌های بعد از فالت در نظر گرفته می‌شوند.

در روش شبیه‌سازی استفاده شده در این پایان‌نامه، تمام ژنراتورهای شبکه به صورت منابع جریانی وصل می‌شوند که به شبکه جریان تزریق می‌کنند. این جریان شامل سه جزء مثبت، منفی و صفر می‌باشد که طریقه‌ی به دست آوردن هر کدام از این اجزا توضیح داده خواهد شد.

نقطه شروع الگوریتم حل شبکه، نقطه‌ای است که در آن فالت اتفاق می‌افتد. در این نقطه جریان ناشی که ژنراتورها به شبکه تزریق می‌کنند همان جریانی است که ژنراتورها در لحظه قبل از فالت به شبکه تزریق می‌کردند و جریان منفی و صفر معادل صفر هستند. این جریان‌ها به طور جداگانه به شبکه‌های مثبت و منفی و صفر تزریق می‌شوند و در شبکه در نقطه فالت بسته به نوع فالت به طور خاصی به یکدیگر اتصال می‌یابند تا جریان گذرنده از محل فالت بدست آید.

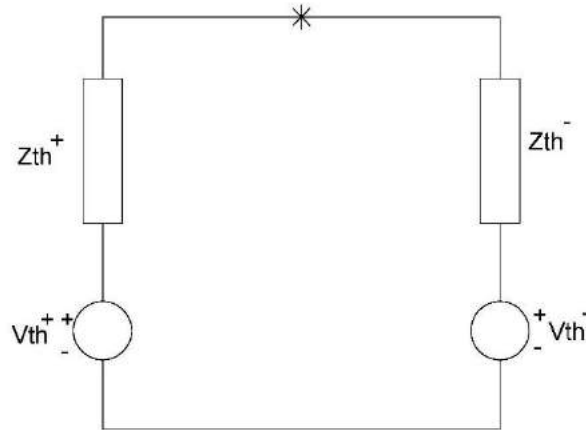
۵-۲- خطای دو فاز



شکل ۴- ۲ مدار معادل خطای دوفاز

برای به دست آوردن جریان‌های فالت می‌توان در هر یک از شبکه‌های بالا به جای هر شبکه مثبت و منفی و صفر از معادل تونن آنها استفاده کرد. بعد از به دست آوردن جریان فالت، هر سه جریان i_F^+ ، i_F^- ، i_F^0 با استفاده از قوانین کیر-شلف قابل محاسبه می‌باشد.

با استفاده از روش تحلیل گره ولتاژهای شبکه با استفاده از سه معادله زیر بدست می آیند:



شکل ۴-۲ مدار معادل خطای دوفاز

مقادیر ولتاژ تونن و ماتریس و مقادیر Z از روابط زیر محاسبه می شود:

$$V_{n+1} = \sum_{k=1}^3 Z_{(n+1)k} i_k$$

$$V_{10} = Z_{10,1} i_1 + Z_{10,2} i_2 + Z_{10,3} i_3$$

$$-V_{th}^+ + Z_{th}^+ I + Z_{th}^- I + V_{th}^- = 0$$

$$I = \frac{V_{th}^+ - V_{th}^-}{Z_{th}^+ + Z_{th}^-}$$

$$Y_{bus}^{-1} = Z_{bus}$$

$$Y^+ V^+ = I^+$$

۴-۴

$$Y^- V^- = I^-$$

$$Y^0 V^0 = I^0$$

بردارهای جریان در سمت راست معادلات بالا شامل جریانهای ژنراتورها و جریانهای فالت می باشند. بنابراین

در معادلات بالا ولتاژ تمام گره های شبکه و از جمله ولتاژ ژنراتورهای شبکه نیز به دست می آیند.

در قدم بعدی این است که این ولتاژها به مقادیر qd در دستگاه مرجع روتور مربوط به هر ژنراتور تبدیل شوند. این تبدیل توسط معادلات زیر انجام می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_q^{r+} \\ V_d^{r+} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q^{e+} \\ V_d^{e+} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_q^{r-} \\ V_d^{r-} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q^{e-} \\ V_d^{e-} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 5-4$$

که δ زاویه ژنراتور مربوطه، V_q^{e+} و V_d^{e+} مقادیر حقیقی و موهومی ولتاژ مثبت در دستگاه مرجع سنکرون $(V^+ = V_q^{e+} - jV_d^{e+})$ و V_q^{e-} ، V_d^{e-} قسمت‌های حقیقی و موهومی ولتاژ منفی در دستگاه مرجع سنکرون هستند $(V^- = V_q^{e-} - jV_d^{e-})$.

W_ℓ فرکانس پایه و فرکانسی است که شبکه بر اساس آن در حوزه‌ی فازور مدل می‌شود.

مقدار کل V_d^r, V_q^r از روابط زیر به دست می‌آید:

$$V_q^r = V_q^{r+} + V_q^{r-}, \quad V_d^r = V_d^{r+} + V_d^{r-}$$

حال اگر این ولتاژها به ژنراتورهای سنکرون اعمال شوند می‌توان با استفاده از معادلات داخلی ژنراتور جریانی که هر ژنراتور به شبکه تزریق خواهد کرد را به دست آورد:

مدل ژنراتورهای سنکرون بر پایه معادلات زیر می‌باشد: $(p=dt)$

$$\varphi_{ds}^r = \frac{\omega_b}{P} \left[V_{ds}^r + \frac{\omega_r}{\omega_b} \varphi_{qs}^r + \frac{r_s}{X_{ls}} (\varphi_{md}^r - \varphi_{ds}^r) \right] 6-4$$

$$\varphi_{os} = \frac{\omega_b}{P} \left[V_{os} - \frac{r_s}{X_{ls}} \varphi_{os} \right] 7-4$$

$$\varphi_{qs}^r = \frac{\omega_b}{P} \left[V_{qs}^r - \frac{\omega_r}{\omega_b} \varphi_{ds}^r + \frac{r_2}{X_{ls}} (\varphi_{mq}^r - \varphi_{qs}^r) \right] 8-4$$

$$\varphi_{kq_1}^r = \frac{\omega_b}{P} \left[V_{kq_1}^r + \frac{r'_{kq_1}}{X'_{lkq_1}} (\varphi_{mq}^r - \varphi_{kq_1}^r) \right] 9-4$$

$$\varphi_{kq_2}^r = \frac{\omega_b}{P} \left[V_{kq_2}^r + \frac{r'_{kq_2}}{X'_{lkq_2}} (\varphi_{mq}^r - \varphi_{kq_2}^r) \right] 10-4$$

$$\varphi_{rd}^r = \frac{\omega_b}{P} \left[\frac{r'_{fd}}{X_{md}} \varphi_{xfd}^r + \frac{r'_{fd}}{X'_{lfd}} (\varphi_{md}^r - \varphi_{fd}^r) \right] 11-4$$

$$\varphi_{kd}^r = \frac{\omega_b}{P} \left[V_{kd}^r + \frac{r'_{kd}}{X'_{lkd}} (\varphi_{md}^r - \varphi_{kd}^r) \right] 12-4$$

$$i_{qs}^r = -\frac{1}{X_{ls}} (\varphi_{qs}^r - \varphi_{mq}^r) 13-4$$

$$i_{ds}^r = -\frac{1}{X_{ls}} (\varphi_{ds}^r - \varphi_{mq}^r) 14-4$$

$$i_{os} = -\frac{1}{X_{ls}} \varphi_{os} 15-4$$

$$i_{kq_1}^r = \frac{1}{X'_{lkq_1}} (\varphi_{kq_1}^r - \varphi_{mq}^r) 16-4$$

$$i_{kq_2}^r = \frac{1}{X'_{lkq_2}} (\varphi_{kq_2}^r - \varphi_{mq}^r) 17-4$$

$$i_{fd}^r = \frac{1}{X'_{lfd}} (\varphi_{fd}^r - \varphi_{md}^r) 18-4$$

$$i_{kd}^r = \frac{1}{X'_{lkd}} (\varphi_{kd}^r - \varphi_{md}^r) 19-4$$

$$\omega_r = -\frac{\omega_b}{2HP} [T_e - T_\tau] \quad 20-4$$

$$\delta = \frac{1}{P} \omega_e (\omega_r - 1) \quad 21-4$$

$$\phi_{md}^r = X_{ad} \left[\frac{\phi_{ds}^r}{X_{ls}} + \frac{\phi_{ds}^{r'}}{X'_{lfd}} + \frac{\phi_{kd}^{r'}}{X'_{lkd}} \right] \quad 22-4$$

$$\phi_{mq}^r = X_{aq} \left[\frac{\phi_{qs}^r}{X_{ls}} + \frac{\phi_{kq_1}^{r'}}{X'_{lkq_1}} + \frac{\phi_{kq_2}^{r'}}{X'_{lkq_2}} \right] \quad 23-4$$

$$X_{aq} = \left[\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lkq_1}} + \frac{1}{X'_{lkq_2}} \right] \quad 24-4$$

$$X_{ad} = \left[\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{ls}} + \frac{1}{X'_{lfd}} + \frac{1}{X'_{lkd}} \right] \quad 25-4$$

در معادلات ماشین چنان چه به جای V_d^r, V_q^r از مقادیر V_d^{r+}, V_q^{r+} استفاده شود و معادلات حل شود در این صورت جریان‌ها به دست آمده i_d^{r+}, i_q^{r+} خواهد بود برای به دست آوردن i_d^{r-}, i_q^{r-} از معادلات زیر استفاده می‌کنیم:

$$i_q^{r-} = i_q^r - i_q^{r+} \quad , \quad i_d^{r-} = i_d^r - i_d^{r+}$$

سپس برای به دست آوردن مقادیر جریان‌ها در دستگاه مرجع سنکرون از معادلات زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} i_q^{e+} \\ i_d^{e+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^{r+} \\ i_d^{r+} \end{bmatrix}$$

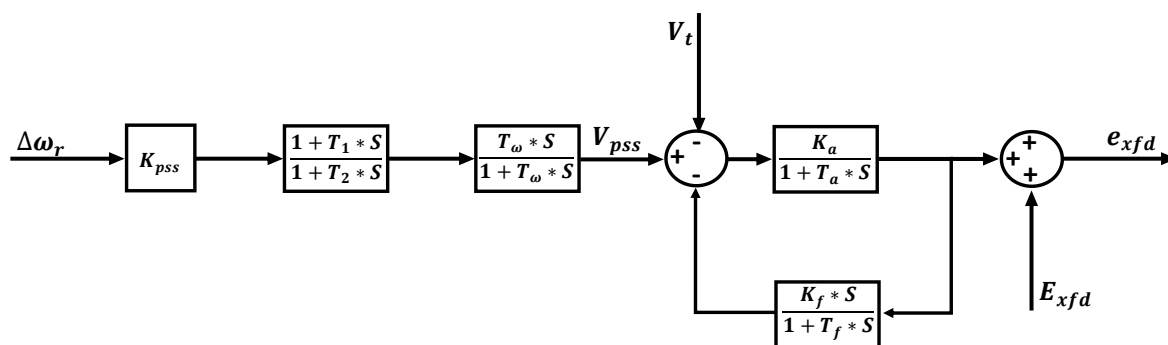
$$\begin{bmatrix} i_q^e \\ i_d^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^{r-} \\ i_d^{r-} \end{bmatrix}$$

فاز در جریان‌های تزریقی ژنراتور به شبکه قدرت از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$i_g^+ = iq^{e+} - J id^{e+}$$

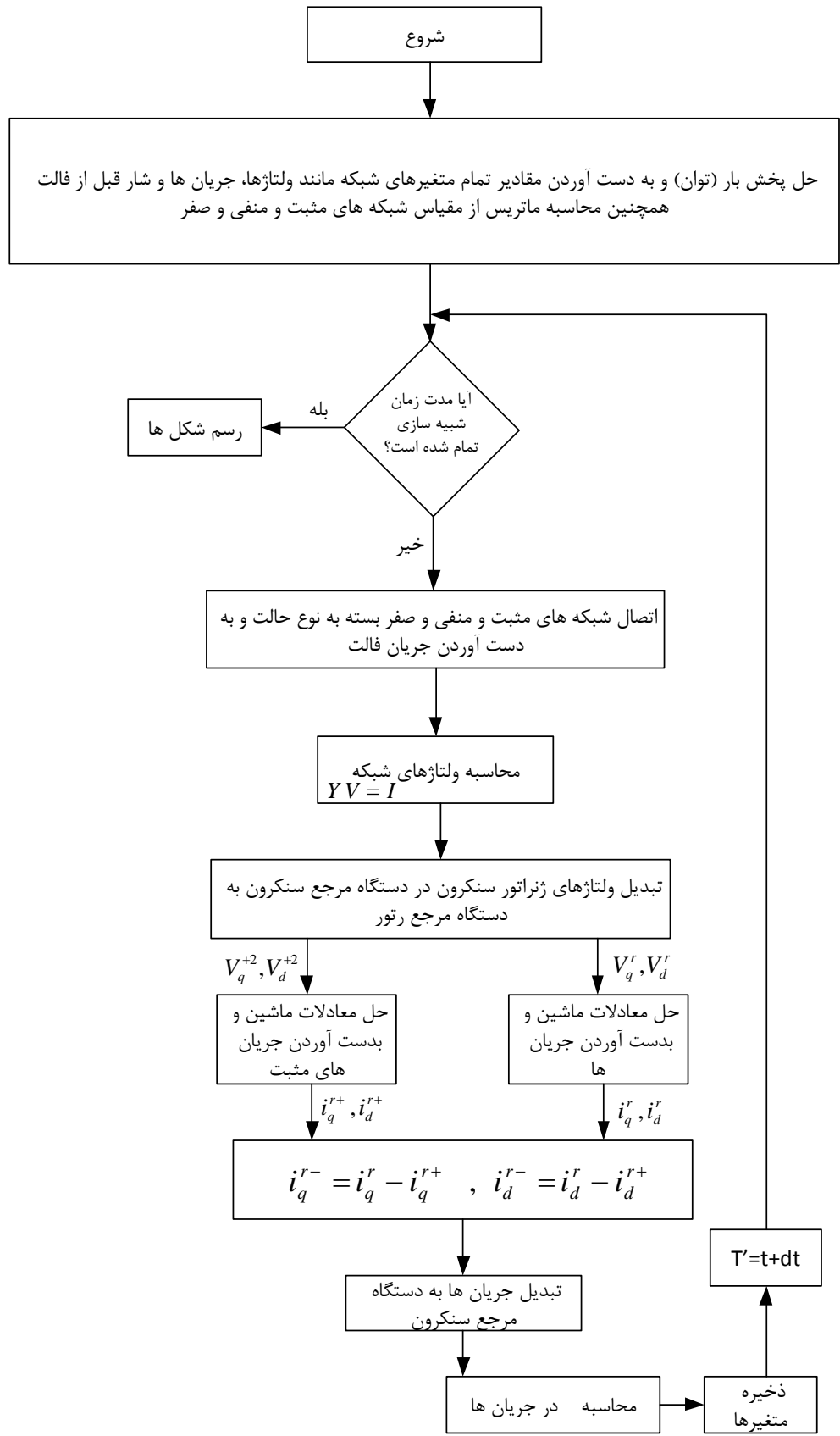
$$i_g^- = (i_e^- - J i_d^{e-}) e^{jr\omega_e t}$$

در این مرحله زمان را به اندازه یک اسپت اضافه کرده و کلیه مراحل بالا را به ازای جریان‌های جدید به دست می‌آوریم و تکرار می‌کنیم تا جریان‌ها در لحظه بعدی به دست آید و این عمل را تا تمام شدن مدت زمان شبیه سازی ادامه می‌دهیم تا شبکه مورد در حضور AVR و PSS که بلوکهای مربوط به آنها به صورت زیر است، پایدار شود:



شکل ۳-۴ بلوک دیاگرام روند حل معادلات و شبیه سازی

۳-۴- فلوچارت روند حل معادلات شبکه و شبیه سازی



فصل ششم

نتایج شبیه سازی

۱-۶- نتایج شبیه سازی

اطلاعات شبکه مورد مطالعه در جداول زیر ارائه شده است.

لازم به ذکر است که کلیه مقادیر راکتانس در جدول (۲-۴) بر مبنای 100MVA و ولتاژ مبنای ۲۳۰kV هستند و کلیه ی ثابت های زمانی بر حسب ثانیه است. همچنین تمامی مقادیر در جدول (۲-۳) بر مبنای ۱۰۰MVA و ولتاژ نامی ترمینال ماشین می باشند.

Bus No	7	8	9
Real power (MW)	125.0	90.0	100.0
Reactive power (MVar)	70.0	40.0	55.0

جدول (۲-۱): بار سیستم ۹ باسه

Bus No	Bus Type
1	Slack Bus (1.0, 0)
2	PV Bus (1.0pu, 1.53pu)
3	PV Bus (1.0pu, 0.7pu)
4	PQ Bus
5	PQ Bus
6	PQ Bus
7	PQ Bus
8	PQ Bus
9	PQ Bus

جدول (۲-۲): شرایط پخش بار سیستم ۹ باسه

	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Rated MVA	247.5	192.	128.
Base voltage (kV)	16.5	18.0	13.8
Power factor	1.	0.85	0.85
Type	Hydro	Stream	Stream
Speed (r/min)	180	3600	3600
Inertia constant 2H(s)	47.28	12.8	6.02
X_l (Ω)	(0.0336 pu)	(0.0521 pu)	(0.0742 pu)
X_d (Ω)	(0.146 pu)	(0.8958 pu)	(1.3125 pu)
X_q (Ω)	(0.0969 pu)	(0.8645 pu)	(1.2578 pu)
X'_d (Ω)	(0.0608 pu)	(0.1189 pu)	(0.1813 pu)
X'_q (Ω)	(0.0969 pu)	(0.1969 pu)	(0.25 pu)
X''_d (Ω)	(0.04 pu)	(0.089 pu)	(0.107 pu)
X''_q (Ω)	(0.04 pu)	(0.089 pu)	(0.107 pu)
T'_{d0} (s)	8.96	6.0	5.89
T'_{q0} (s)	0	0.535	0.6
T''_{d0} (s)	0.04	0.033	0.033
T''_{q0} (s)	0.06	0.078	0.07

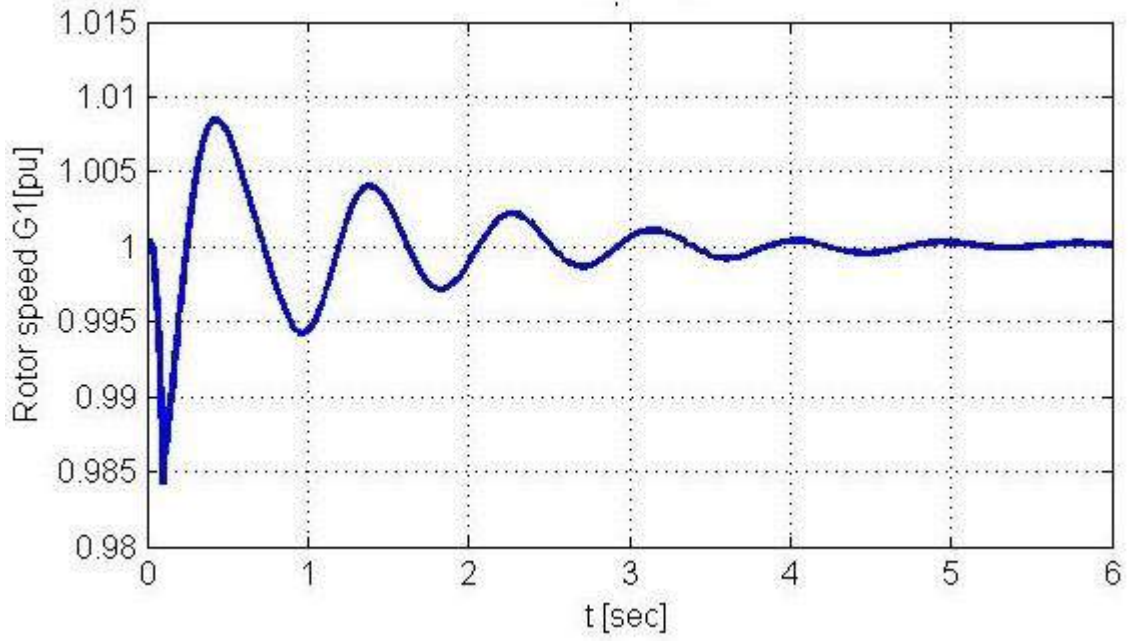
جدول (۲-۳): ژنراتورهای سیستم ۹ باسه

Bus1 No	Bus2 No	Base voltage	Resistance (Ω)	Reactance (Ω)	Inductance (mH)	Susceptance ($\mu\text{mho B/2}$)	Capacitance (μF)
4	7	230 (posi)	5.29 0.01(pu)	44.965 0.085(pu)	143.12804	166.3516 0.088(pu)	0.52951
		(zero)	15.87 0.03(pu)	134.895 0.255(pu)	429.38412	249.52741 0.132(pu)	0.79427
Length=100km, R1=0.0529 Ω /km, L1=0.14313*10e-2H/km, C1=1.05904*10e-8F/km Zs1=367.63 Ω , velocity1=2.568*10e5km/s, travel time=38.93269*10e-5s R0=0.1587 Ω /km, L0=0.42938*10e-2H/km, C0=1.58854*10e-8F/km Zs0=519.9 Ω , velocity0=1.21082*10e5km/s, travel time=82.58897*10e-5s							
4	8	230	8.993 0.017(pu)	48.668 0.092(pu)	154.91506	149.33837 0.079(pu)	0.47536
		(zero)	26.979 0.051(pu)	146.004 0.276(pu)	464.74517	224.00756 0.1185(pu)	0.71304
Length=100km, R1=0.08993 Ω /km, L1=0.1549*10e-2H/km, C1=0.95072*10e-8F/km, Zs1=403.66 Ω , velocity1=2.6057*10e5km/s, travel time=38.3771866*10e-5s R0=0.26979 Ω /km, L0=0.46475*10e-2H/km, C0=1.42608*10e-8F/km, Zs0=570.87 Ω , velocity0=1.22834*10e5km/s, travel time=81.4103*10e-5s							
5	7	230	16.928 0.032(pu)	85.169 0.161(pu)	271.10135	289.22495 0.153(pu)	0.92063
		(zero)	50.784 0.096(pu)	255.507 0.483(pu)	813.30404	433.83743 0.2295(pu)	1.38095
Length=100km, R1=0.16928 Ω /km, L1=0.2711*10e-2H/km, C1=1.84124*10e-8F/km Zs1=383.715 Ω , velocity1=1.4154*10e5km/s, travel time=70.65183*10e-5s R0=0.50784 Ω /km, L0=0.8133*10e-2H/km, C0=2.76189*10e-8F/km Zs0=542.65 Ω , velocity0=0.66722*10e5km/s, travel time=149.8754*10e-5s							
6	8	230	20.631 0.039(p.u)	89.93 0.17(p.u)	286.25608	338.37429 0.179(p.u)	1.07708
		(zero)	61.893 0.117(pu)	269.79 0.51(pu)	858.76824	507.56144 0.2685(pu)	1.61562
Length=100km R1=0.20631 Ω /km, L1=0.28626*10e-2H/km, C1=2.15416*10e-8F/km, Zs1=364.54 Ω , velocity1=1.27345*10e5km/s, travel time=78.5265*10e-5s R0=0.61893 Ω /km, L0=0.85877*10e-2H/km, C0=3.23124*10e-8F/km Zs0=515.53 Ω , velocity0=0.60031*10e5km/s, travel time=166.5799*10e-5s							
5	9	230	4.4965 0.0085(p.u)	38.088 0.072(p.u)	121.23787	140.83176 0.0745(p.u)	0.44828
		(zero)	13.4895 0.0255(pu)	114.264 0.216(pu)	363.71361	211.34216 0.1118(pu)	0.67272

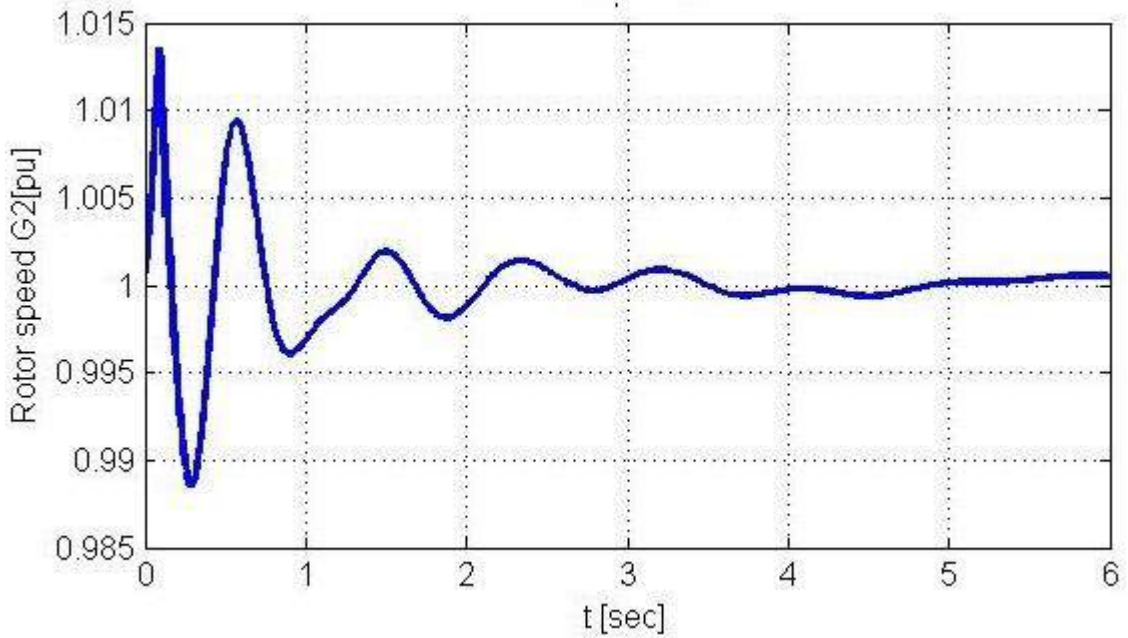
جدول (۲-۴): خطوط انتقال سیستم ۹ باسه

نتایج شبیه سازی سیستم قدرت مورد مطالعه به صورت زیر است:

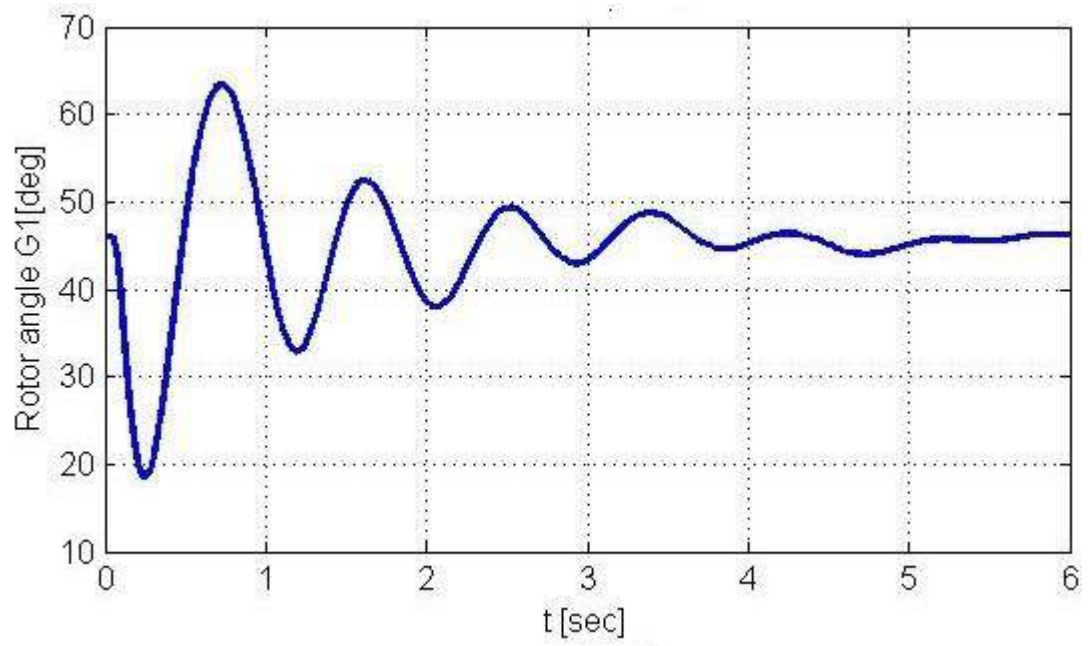
۵-۱- شکلهای مربوط به خطای دوفاز



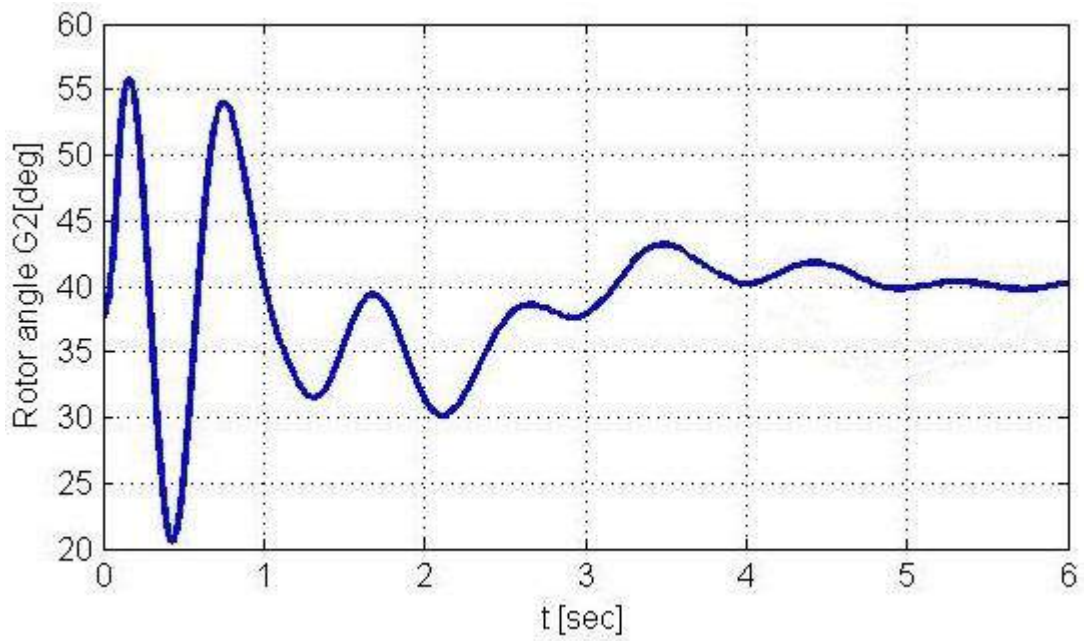
۵-۱- خطای دوفاز سرعت رتور ژنراتور ۱



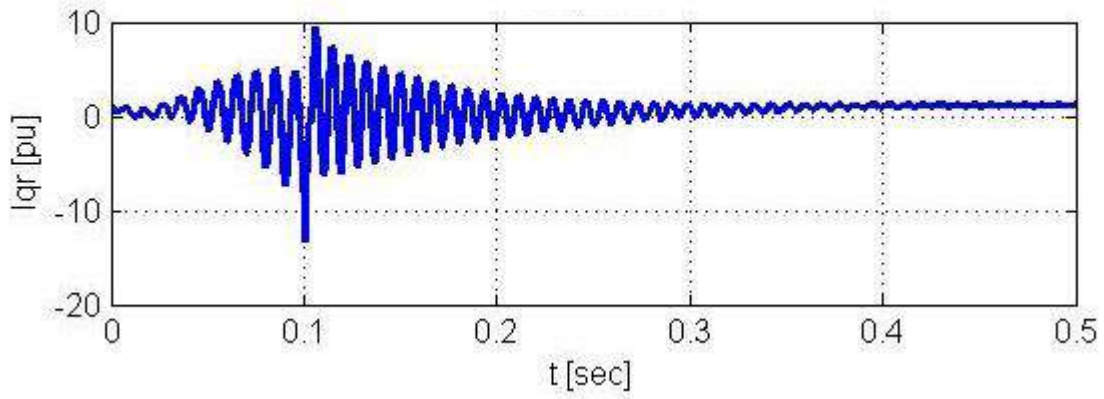
۵-۲- خطای دوفاز سرعت رتور ژنراتور ۲



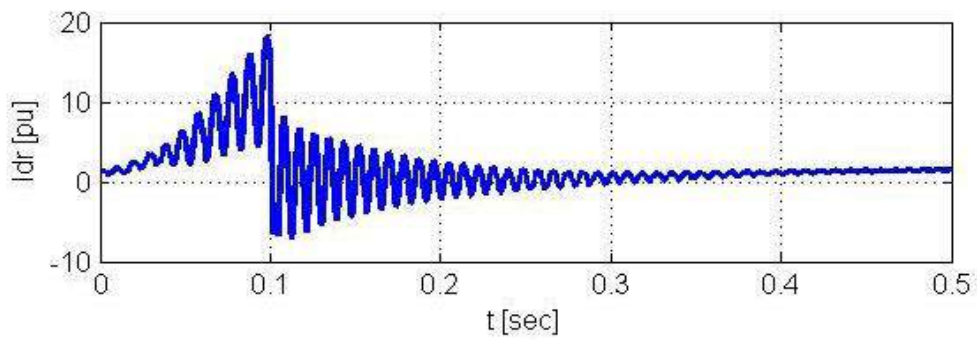
۳-۵- خطاي دوفاز زاويه رتور ژنراتور ۱



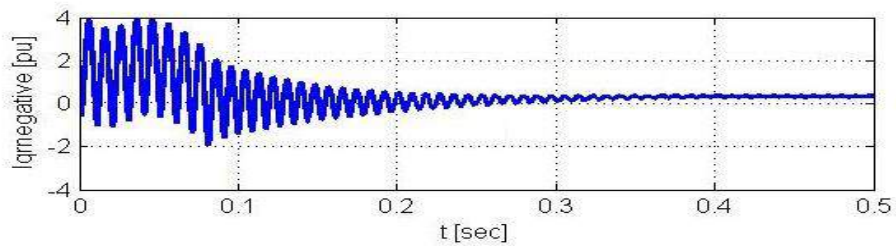
۴-۵- خطاي دوفاز زاويه رتور ژنراتور ۲



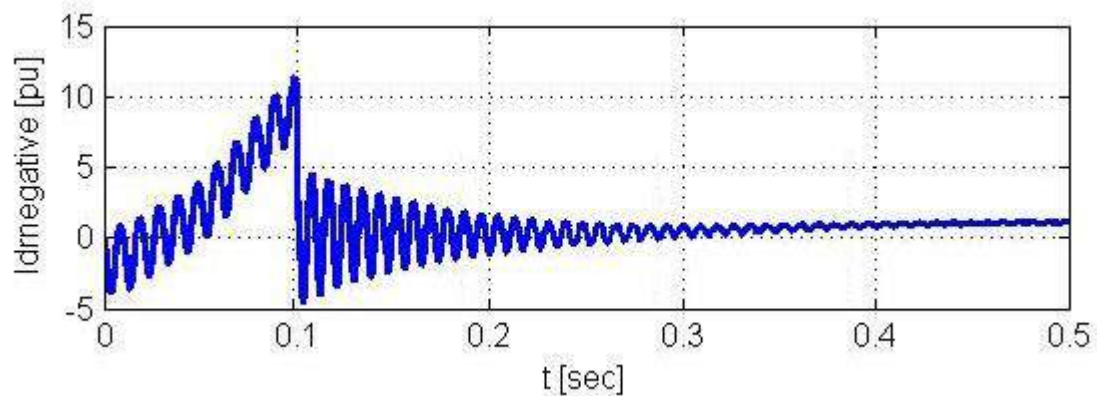
شکل ۵-۵ خطای دوفاز جریان محور q در دستگاه رتور



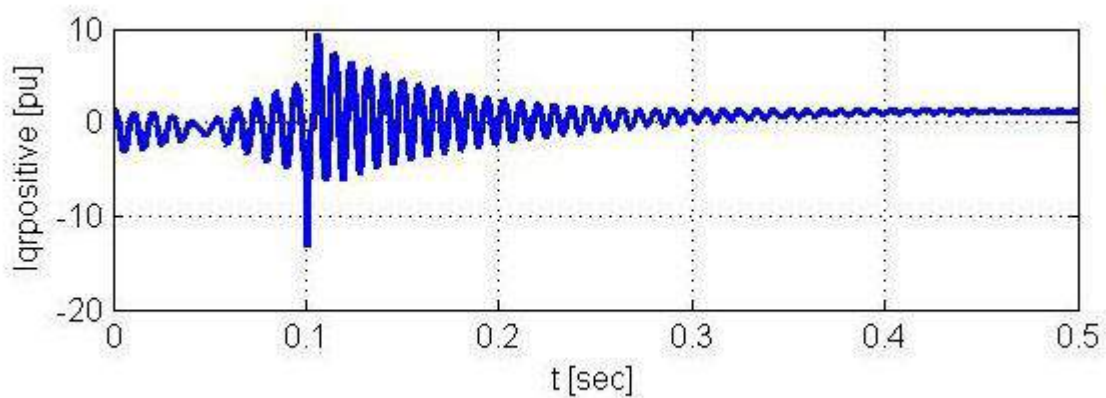
شکل ۶-۵ خطای دوفاز جریان محور d در دستگاه رتور



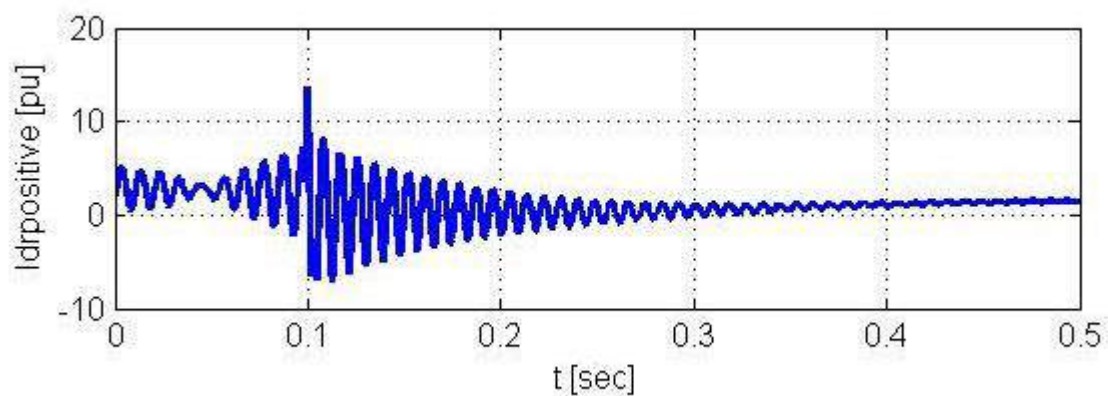
شکل ۷-۵ خطای دوفاز توالی منفی جریان محور q در دستگاه رتور



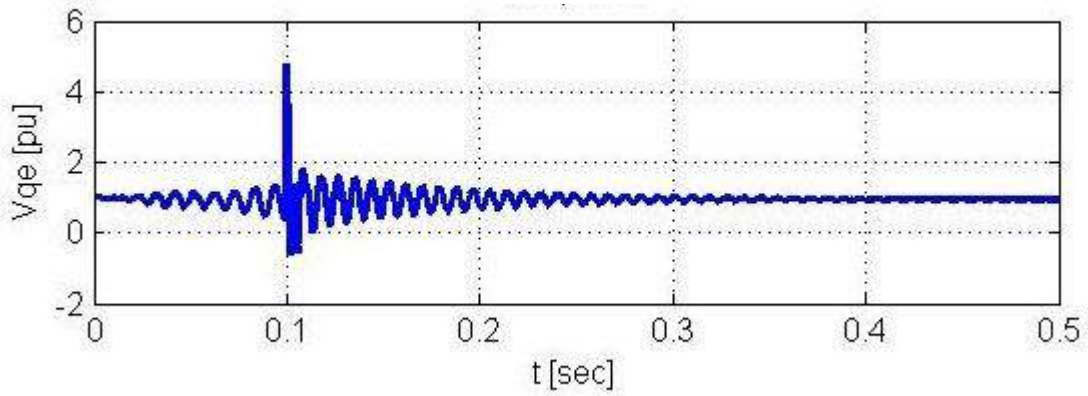
شکل ۵-۸ خطای دوفاز توالی منفی جریان محور d در دستگاه رتور



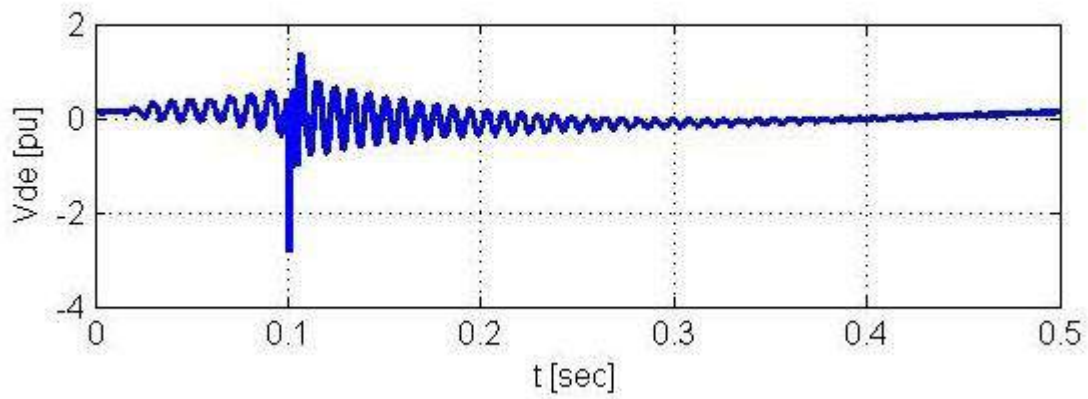
شکل ۵-۹ خطای دوفاز توای مثبت جریان محور q در دستگاه رتور



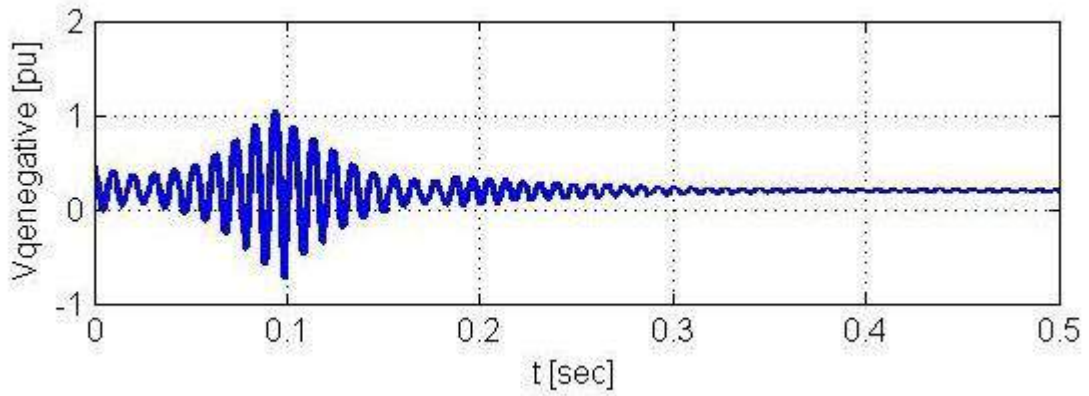
شکل ۵-۱۰ خطای دوفاز توالی مثبت جریان محور d در دستگاه رتور



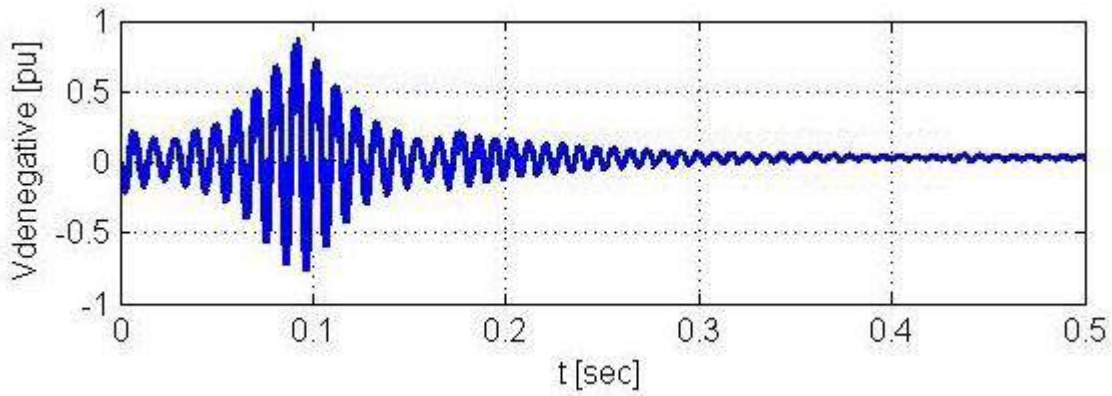
شکل-۵-۱۱ خطای دوفاز ولتاژ محور q در دستگاه سنکرون



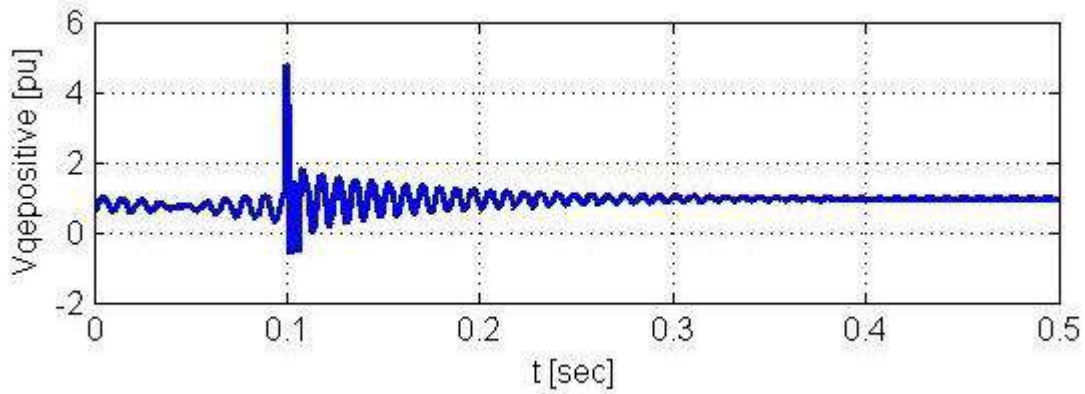
شکل-۵-۱۲ خطای دوفاز ولتاژ محور d در دستگاه سنکرون



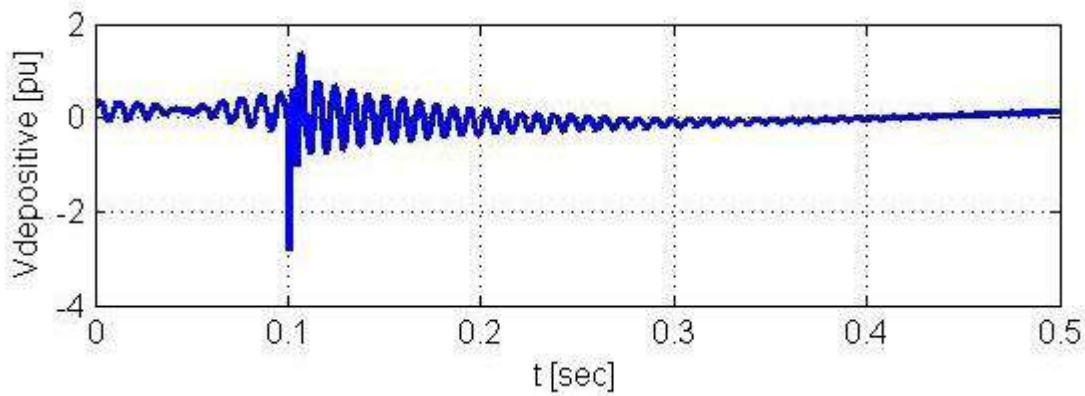
شکل 5-13 خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور q در دستگاه سنکرون



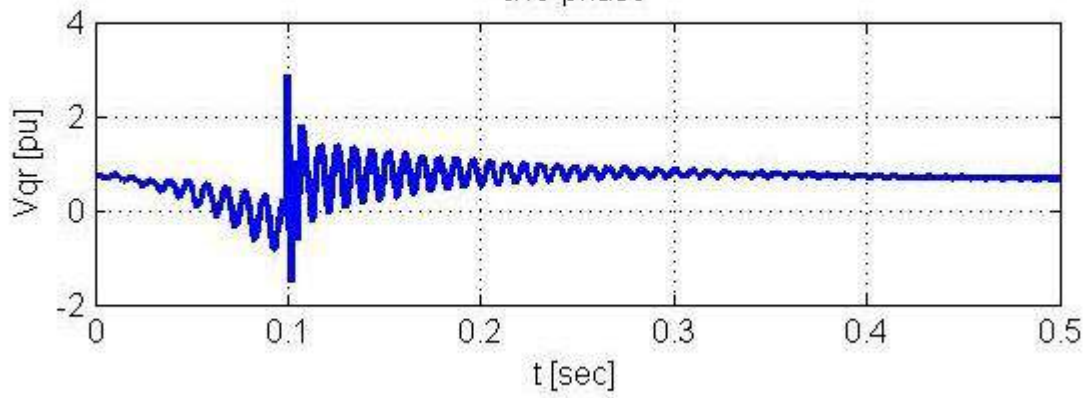
شکل 5-14 خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور d در دستگاه سنکرون



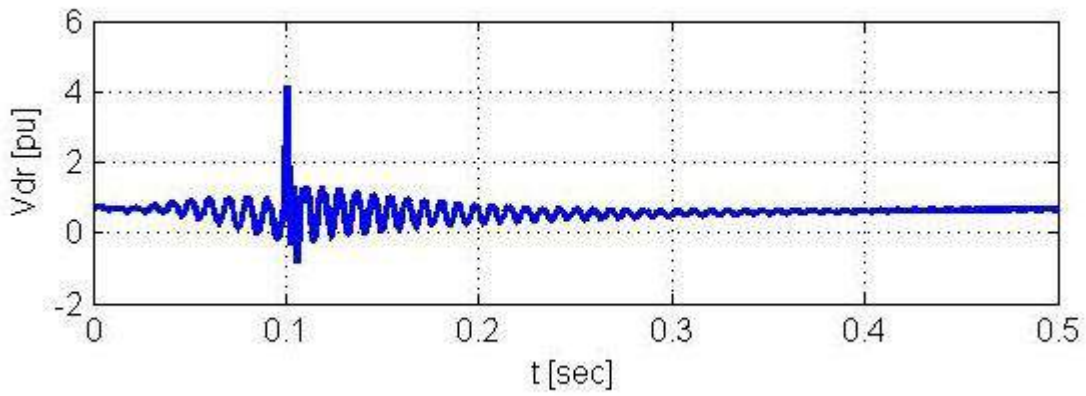
شکل 5-15 خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور q در دستگاه سنکرون



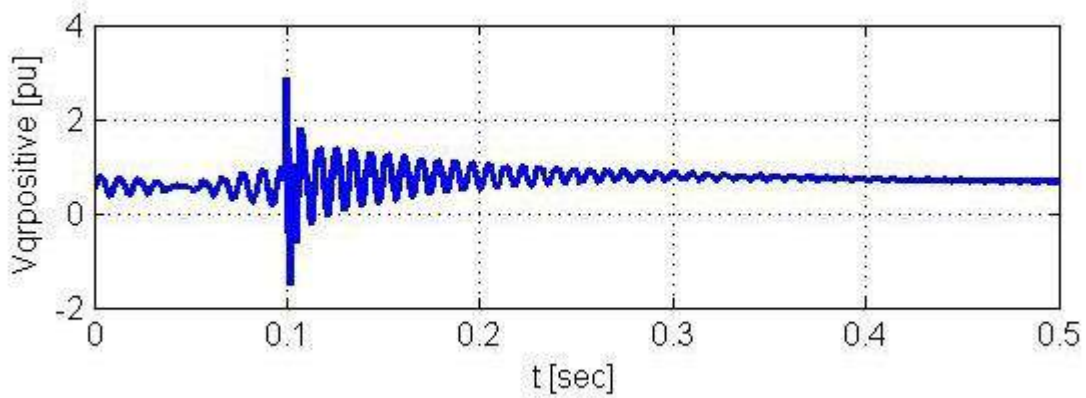
شکل 5-16 خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور d در دستگاه سنکرون



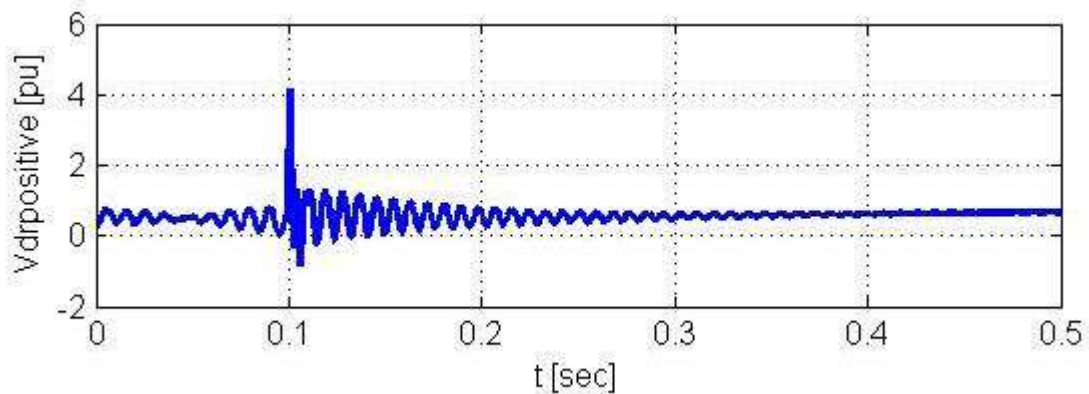
شکل ۵-۱۷ خطای دوفاز ولتاژ محور q در دستگاه رتور



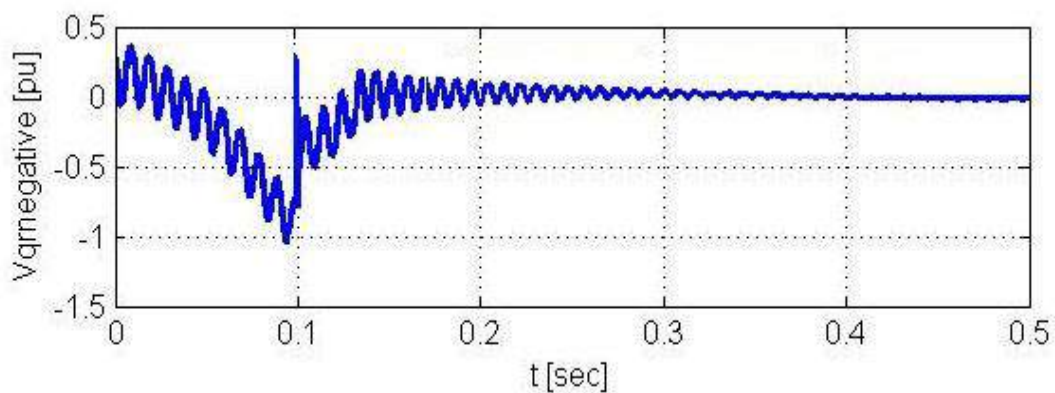
شکل ۵-۱۸ خطای دوفاز ولتاژ محور d در دستگاه رتور



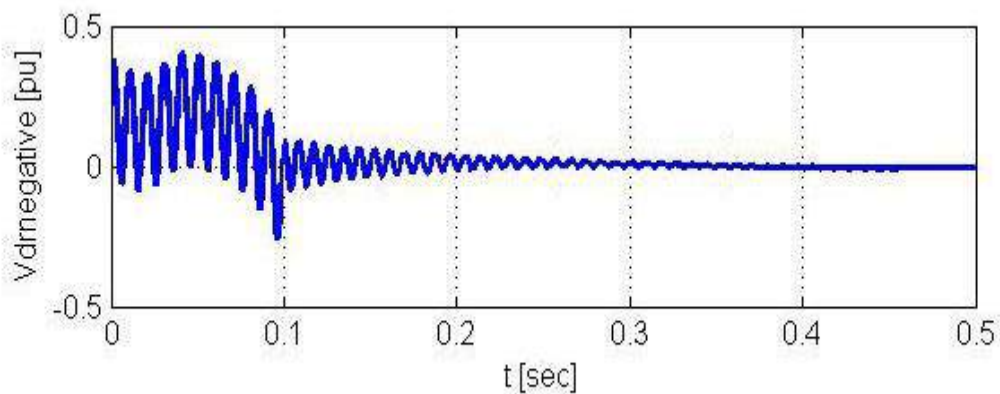
شکل ۵-۱۹ خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور q در دستگاه رتور



شکل ۵-۲۰ خطای دوفاز توالی مثبت ولتاژ محور d در دستگاه رتور

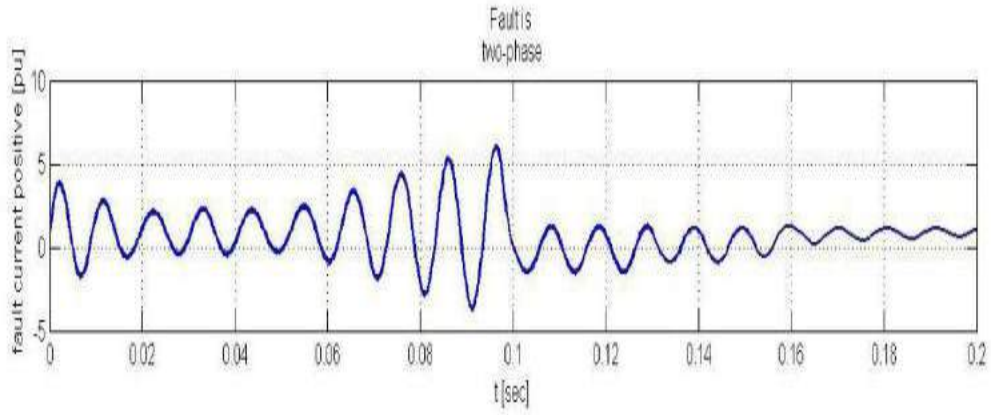


شکل ۵-۲۱ خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور q در دستگاه رتور

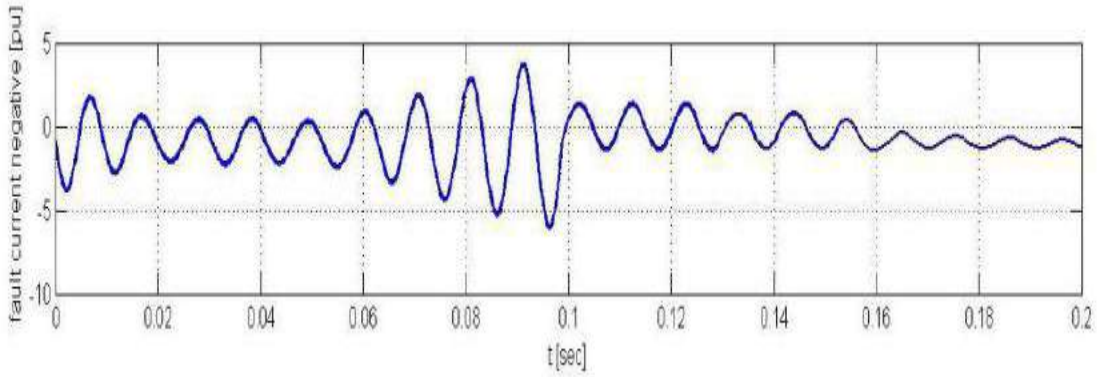


شکل ۵-۲۲ خطای دوفاز توالی منفی ولتاژ محور d در دستگاه رتور

شکل

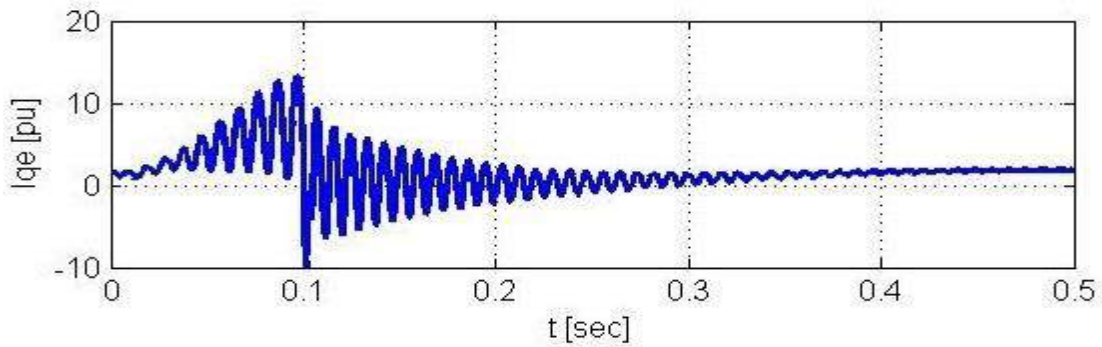


شکل ۲۳-۵ خطای دوفاز توالی مثبت جریان تزریقی

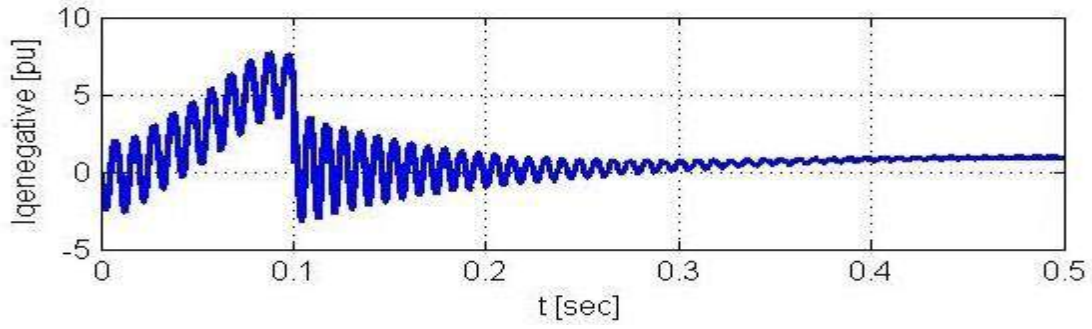


شکل

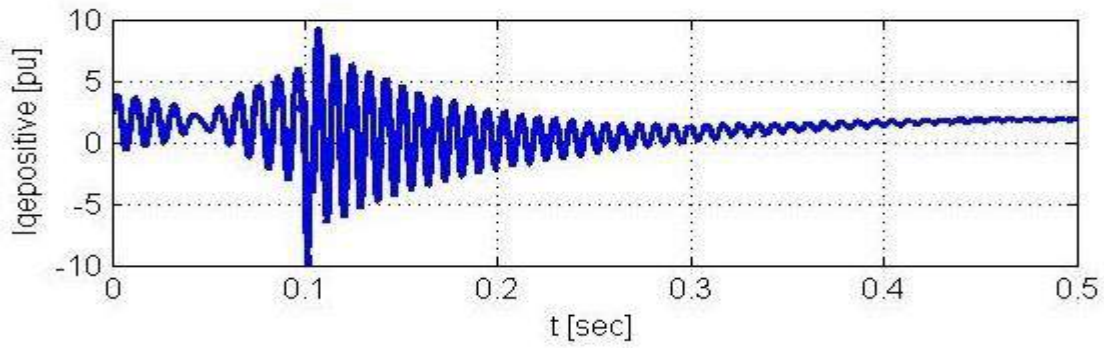
۲۴-۵ خطای دوفاز توالی منفی جریان تزریقی



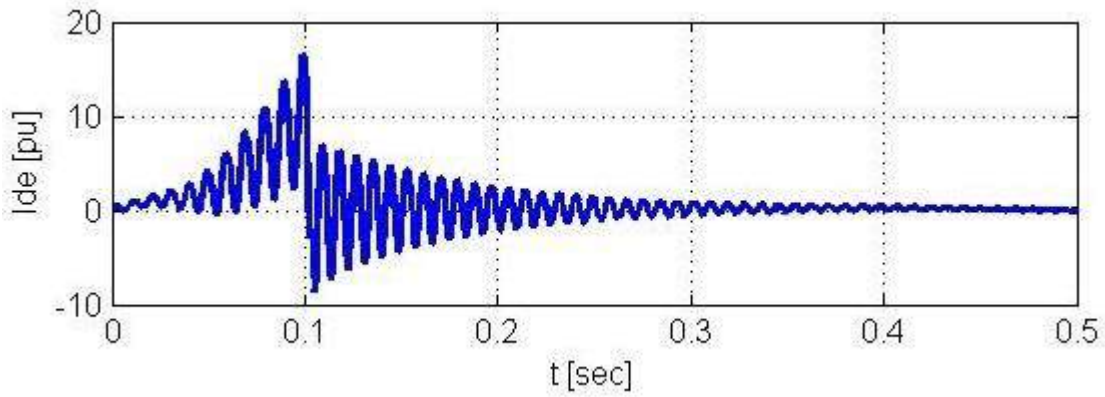
شکل ۲۵-۵ خطای دوفاز جریان محور q در دستگاه سنکرون



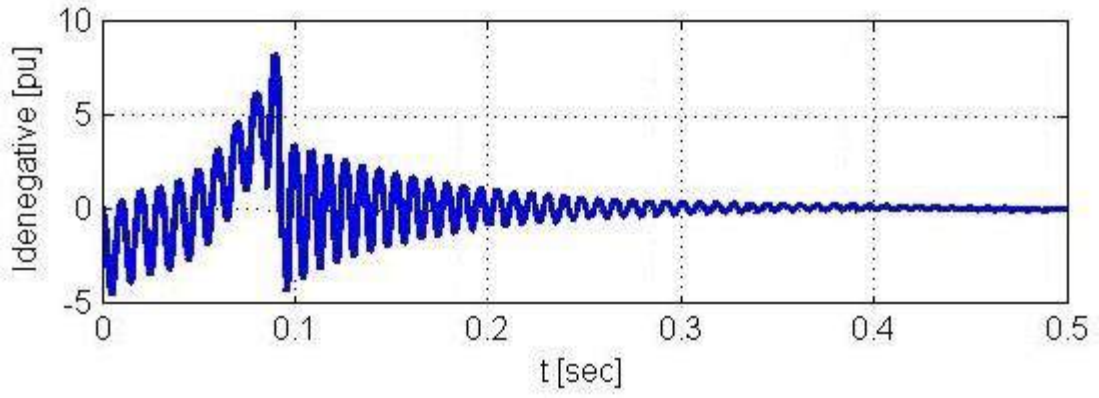
شکل ۵-۲۶ خطاي دوفازتوالی منفی جریان محور q در دستگاه سنکرون



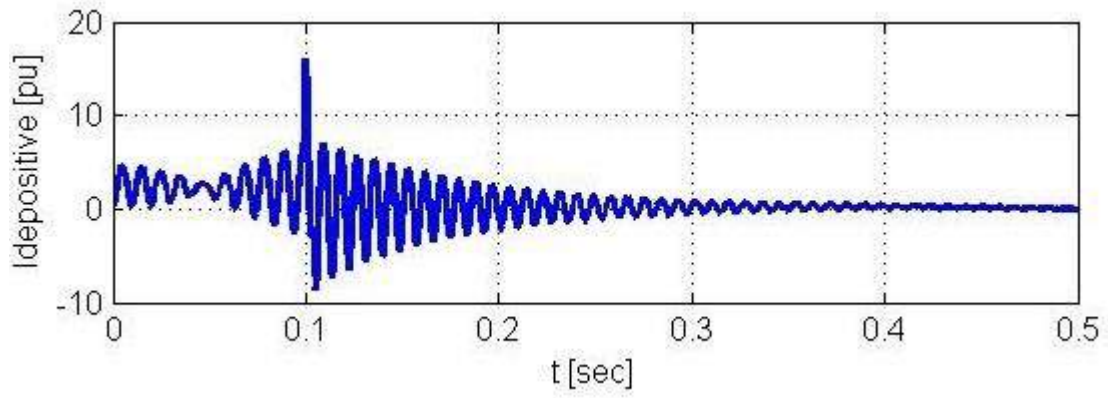
شکل ۵-۲۷ خطاي دوفازتوالی مثبت جریان محور q در دستگاه سنکرون



شکل ۵-۲۸ خطاي دوفاز جریان محور d در دستگاه سنکرون



شکل ۲۹-۵ خطای دوفاز توالی منفی جریان محور d در دستگاه سنکرون



شکل ۳۰-۵ خطای دوفاز توالی مثبت جریان محور d در دستگاه سنکرون

نتیجه گیری

هدف این پایان نامه اصلاح پایداری دینامیکی یک شبکه استاندارد سه ماشینه و نه باسه IEEE در اثر خطاهای نامتقارن دوفاز و دوفاز با هم به زمین در مکان‌های مشخصی از سیستم می‌باشد. ابتدا فرض می‌شود که شبکه در شرایط نرمال کار می‌کند که اطلاعات این حالت با حل پخش بار شبکه مذکور بدست می‌آید. آنگاه با اعمال خطاهای پارگی دوفاز و دوفاز به زمین در محل یکی از خطوط شبکه، رفتار شبکه مذکور در اثر این خطاها بررسی می‌شود. فرض بر آن است که در اثر بروز این خطاها پس از ۰,۱ ثانیه خط مذکور بطور کامل قطع می‌گردد و در حالت بروز خطا هم فرض بر آن است که بعد از ۰,۱ ثانیه این فاز مجدداً وصل می‌شود. در مدلسازی شبکه، ماشین‌های سنکرون با درجه کامل (درجه ۸) مدلسازی می‌شوند. روش تحلیل در حوزه زمان با استفاده از بردارهای فضایی مثبت و منفی برای جریان‌ها و ولتاژهای شبکه مذکور می‌باشد. برای میرا کردن نوسانات فرکانس بالای اسمی شبکه از روش کنترل مد لغزشی و برای اعمال سیگنال‌های اضافی و پایداری سیستم از پایداری‌سازهای PSS استفاده می‌گردد. شایان ذکر است که با استفاده از حلقه مدار بسته AVR، ولتاژ باس‌های ماشین بر روی مقادیر نامی در حالت ثابت نگه داشته می‌شوند.

۲- پیشنهادات

می‌توان برای ادامه این تحقیق و پژوهش به پیشنهادهای زیر اشاره کرد:

۱- طراحی کنترل کننده ای که با تغییر مکان خطا، همچنان مقاوم باقی بماند و شبکه پایدار باشد

۲- بررسی و اعمال مساعل حفاظتی مختلف بر روی شبکه

۳- بررسی پارامترهای قابلیت اطمینان شبکه در برابر خطاهای نامتقارن

بررسی دینامیکی خطاهای نامتقارن دیگر

- [2]E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, "FACTS: modeling and simulation in power networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [3]A. Edris, "FACTS: Technology Development: an update", IEEE Power Engineering Review, (3): 4-9, March 2000.
- [4]P.W. Lehn, M.R. Travani, "Experimental evaluation of STATCOM closed loop dynamics", IEEE Trans. Power Delivery, 13(4)(1998) 1378_1384.
- [5]C. Li, Q. Jiang, Z. Wang, D. Rezmann, "Design of a rule-based controller for STATCOM", IEEE Conf. 11(1998) 467_472.
- [6]C. Li, Q. Jiang, Z. Wang, D. Rezmann "Investigation of voltage regulation stability of static synchronous compensator in power system", IEEE Conf. 11(2000) 2642_2647.
- [7]P. Rao, M.L. Crow, Z. Yang, "STATCOM control for system voltage control applications", IEEE Trans. Power Delivery, 15(4)(2000) 1311_1317.
- [8]P.S. Sensarma, K.R. Padiyar, V. Ramanarayanan, "Analysis and performance evaluation of distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations", IEEE Trans. Power Delivery, 16(2)(2001) 259_264.
- [9]P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw Hill, New York, 1994.
- [10]T. Athay, R. Podmore, S. Virmani, "A Robust control strategy for shunt and series reactive compensators to damp electromechanical oscillations", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, No.4, pp 812_817, Oct, 2001.
- [11]Theoretical investigation of electric transmission systems under short circuit conditions
I. W. Gross, "Theoretical investigation of electric transmission systems under short circuit conditions", Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, IEEE Journals & Magazines, Year: 1915, Volume: 34, Pages: 25 - 69.
- [12]C. F. Wagner; S. H. Wright, "Calculation of short circuits on power systems", Electrical Engineering, IEEE Journals & Magazines, Year: 1932, Volume: 51, Pages: 131-131.
- [13]W. R. Wilson; L. L. Mankoff, "Short-Circuit Forces in Isolated-Phase Buses [includes discussion]", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, IEEE Journals & Magazines, Part III: Power Apparatus and Systems, Year: 1954, Volume: 73, Papers (6).
- [14]Li-Jun Cai and I. Erlich, "simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, No.1, pp 294_300, february, 2005.
- [15]J. Reeve; S. C. Kapoor, "Analysis of Transient Short-Circuit Currents in HVDC Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, IEEE Journals & Magazines Year: 1971, Volume: PAS-90, Pages: 1174 - 1182.

- [16]A. E Hammed, "Analysis of power system stability by static var compensator", IEEE Trans. Power Syst, 1 (4) (1986) 222_227.
- [17]E.Z. Zahu, "Application of static var compensators to increase power system damping ", IEEE:PES Winter Meeting, 92WM164-4 PWRs, New York, 26-30 January, 1992.
- [18]L. Roy; N. D. Rao, " Exact Calculation of Simultaneous Faults Involving Open Conductors and Line-to-Ground Short Circuits on Inherently Unbalanced Power Systems ",IEEE Power Engineering Review, IEEE Journals & Magazines, Year: 1982, Volume: PER-2, Pages: 47 – 48.
- [19]M.Z. El-Sadek, "A flexible ac transmission system (FACTS) for balancing are furnace loads", Fuel and Energy Abstracts, Volume 39, Issue 3, May 1998, Pages 194-195.
- [20]M.Z. El-Sadek, M. Dessouky, G. A. Mahmoud. "A flexible ac transmission system (FACTS) for balancing are furnace loads", Electric Power Systems Research, Volume 41, Issue 3, June 1997, Pages 211-218.
- [21]K. Nose; T. Sakurai, " Analysis and future trend of short-circuit power",IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, , IEEE Journals & Magazines, Year: 2000, Volume: 19, Pages: 1023 – 1030.
- [22]Roman Baburske; Franz-Josef Niedernostheide; Hans-Joachim Schulze; Frank Pfirsch; Caspar Leendertz, " Low-inductive power systems to overcome short-circuit ruggedness limits", 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), IEEE Pages: 323 – 326. Conference Publications, Year: 2016
- [23]Pctcr Vas, "Vectore Control of AC Machines", Clarcndon Press, 1990.
- [24].M.A.Hannoan and K.W.Chan"*Modlem Power systems Transiet Studies Using Dynamic Phasor Models*", IEEE Intcmstional Coaference on power Systems Technology (POWERCON 2004),Sinapore,21-24. Noventar 2004.
- [25].A.M.Stankovie, S.R.Sanders, And T.Aydin, "*Dynamic Phasors in Modeling and Analysis of Unbalaced polyphase Ac Machines*"IEEE Transanctions on Energy Conversions, 17 , no.1.pp. 107-113, Mar."2002.
- [26].P.Mattavell,G.C.Verghese, and A.Stankovie,"*Phasor Dynamics of Thyristor-Controlled Series Capacitor Systems*".IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, no.3.pp.1259-1267, Aug.1997.
- [27]T.Demirey, "*Simulation of Power System Dynamics Using Dynamic Phasor Models*", Ph.D.dissertation, Swiss Fed. Inst. Techno.Zurich, Switzertand, 2008.
- [28]T.Yang, S,Bozhko, J.Mark, L.Penvedie,G.Asher and C.L.Hill, "*Dynamle Phasor Modeling of Multi -Generator Variable Frequency*"*Electical Power Systems*"IEEE Transactions onPower Systems, 2015."
- [29]E. Acha, V. Agelidis, "Power electronic control in electrical system", Liondon: Butterworth Heinemann Press, 2001.

[45] P.M. ANDERSON and A.A. FOUAD, " Power System control in electrical and Stability",
Iowa state university press, Ames Iowa, USA, 1997.

[30] A. At Stankovic and T. Aydin, "Analysis of symmetrical faults power systems using dynamic
theats " IEEE Transactions on power Systems, vol.15 ,no.3.pp.1062-1060, Aug 2000.

[31] H.K. Khalil, Nonlinear Systems. New York: Mcmillan, 1992.

[32] P. Kundur, "Power System Stability and Control", Vice-President, Power Engineering,
Powertech Labs Inc., Surrey, British Columbia.

جعفر. سلطانی، "تئوری جامع ماشین‌های الکتریکی"، نیاز دانش، ۱۳۹۳

احمد. کاظمی، "بررسی سیستم‌های قدرت ۲"، پیام نور، ۱۳۷۸

ویلیام دی. استیونسون، "مبانی بررسی سیستم‌های قدرت"، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۷۲

پاول. سی. کراوز، "تحلیل ماشین‌های الکتریکی"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۳۷۶

