

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی - گروه برق

## پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی یک سیستم کنترل از راه دور ، جهت بهبود رفتار دینامیکی شبکه  
قدرت از طریق اینترنت

استاد راهنما:

دکتر سهیل گنجه فر

اساتید مشاور:

دکتر محمدحسن مرادی - دکتر حمیدرضا مؤمنی

نگارنده:

مصطفی رضائی

۱۳۸۸/۵/۱۴

شهریورماه ۱۳۸۷

دفتر اطلاعات مرکز علمی پژوهش  
تیمپ رانک

۱۱۶۲۰۶

همه امتیازهای این پایان نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد و در صورت استفاده تمام یا بخشی از مطالب پایان نامه در مجلات، کنفرانسها و یا سخنرانی ها باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر اینصورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیم به

# پدر و مادر مهربان و فداکارم

## چکیده

یک بخش اساسی از مطالعه و گسترش سیستم‌های قدرت الکتریکی، کنترل و پایداری آن می‌باشد. در حقیقت توسعه یک سیستم قدرت بدون توجه به مسأله پایداری آن امکان پذیر نیست. در این راستا، توانایی سیستم در میراسازی نوسانات کوچک که به پایداری دینامیکی (سیگنال کوچک) موسوم است، بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

وسایل کنترلی که برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت بکار می‌روند به پایدارسازهای سیستم قدرت<sup>1</sup> (PSS) موسومند. این پایدارسازها، بنا بر نیاز سیستم، در کنار برخی از ژنراتورهای شبکه قرار می‌گیرند. در این پایان‌نامه پس از توضیح مختصر درباره پایداری دینامیکی سیستم قدرت، روش نوینی جهت اعمال پایدارسازها به شبکه توسط اینترنت معرفی می‌شود.

ابتدا پس از معرفی سیستم‌های دورعملیات، (روش بیان شده در این رساله برگرفته از سیستم‌های دورعملیات است) کلیه پایدارسازهای شبکه در یک نقطه به نام بانک PSS جمع آوری می‌شوند و سپس توسط اینترنت به ژنراتورهای شبکه مرتبط می‌گردند. درحقیقت سیگنالهای خطای ژنراتورها توسط اینترنت به پایدارسازهای موجود در بانک فرستاده می‌شوند و پس از مدولاسیون سیگنالها توسط پایدارساز موجود در بانک پایدارسازی، سیگنالهای کنترلی پایدارسازها توسط اینترنت به ژنراتورها بازگردانده می‌شوند.

در بخش بعد، تأخیر زمانی به عنوان یک عامل ناپایدارساز مورد بررسی قرار گرفته و اثر نامطلوب آن در سیستم ارزیابی می‌گردد. سپس با استفاده از روش نوین متغیرهای موج، اثر این تأخیر زمانی کاهش می‌یابد.

پس از آن، بروز قطعی در اینترنت به عنوان یک عامل ناپایدارساز دیگر مورد توجه قرار گرفته و با دو روش شبکه‌های عصبی و پیش‌بینی سیگنال، عملکرد سیستم هنگام بروز قطعی در اینترنت بهبود می‌یابد.

در بخش پایانی، پیش‌بینی سیگنال، همزمان با استفاده از روش متغیرهای موج، مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی روشهای ذکر شده می‌باشند.

---

<sup>1</sup> Power System Stabilizer

## تقدیر و تشکر

با سپاس از استاد ازجمند جناب آقای دکتر سهیل گنجه فر که علاوه برآنکه به عنوان استاد راهنما در تهیه این پایان نامه از وجودشان بهره بردم ، در طول دوران تحصیل از ایشان درس تلاش و پشتکار آموختم.

با سپاس از استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد حسن مرادی که علاوه برآنکه به عنوان استاد مشاور در تهیه این پایان نامه اینجانب را یاری فرمودند ، در طول دوران تحصیل به بنده درس بردباری و سختکوشی را آموختند.

با سپاس از استاد معزز جناب آقای دکتر حمیدرضا مؤمنی که به عنوان استاد مشاور در تهیه این پایان نامه راهگشای اینجانب بودند.

با سپاس از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر علی دیهیمی که محبتهای ایشان را به عنوان استادی مهربان هیچگاه فراموش نخواهم کرد.

با سپاس از آقایان امین ناصر و علی رسولی که محبتهای این عزیزان در طول دوران تحصیل همواره در یاد اینجانب باقی خواهد ماند.

با سپاس از آقایان مهندس محمد حسن امیریان ، مهندس فرشید پناهی و مهندس حمید سراوکی که هیچگاه که در طول دوران تحصیل محبت خویش را از اینجانب دریغ نکردند.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول : مقدمه
۵	فصل دوم : پایداری سیستم قدرت الکتریکی
۱۷	فصل سوم : پایداری دینامیکی سیستم قدرت
۲۷	فصل چهارم : پایدارساز سیستم قدرت
۳۴	فصل پنجم : انواع پایدارسازها در سیستم قدرت
۳۸	فصل ششم : مسائل مربوط به پایداری دینامیکی و پایدارسازها
۴۵	فصل هفتم : پایدارسازی سیستم قدرت توسط اینترنت
۵۲	فصل هشتم : تأخیر زمانی و روش متغیرهای موج
۵۹	فصل نهم : ایجاد قطعی و شبکه های عصبی
۷۰	فصل دهم : ایجاد قطعی و پیش بینی سیگنال
۷۸	فصل یازدهم : پیش بینی موج هنگام بروز قطعی
۸۳	فصل دوازدهم : نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۶	ضمیمه ۱ : مقاله کنفرانس ملی مهندسی برق
۹۲	ضمیمه ۲ : مقاله کنفرانس بین المللی مهندسی برق

## فهرست اشکال

### فصل دوم

- شکل ۱-۲- سیستم تک ماشینه قدرت ۶
- شکل ۲-۲- ژنراتور و ترانسفورماتور متصل به شین بینهایت (شبکه بزرگ) توسط خط انتقال ۷
- شکل ۳-۲- نمودار توان اکتیو انتقالی بر حسب زاویه قدرت ۸
- شکل ۴-۲- کوپل توربین - ژنراتور ۹
- شکل ۵-۲- زاویه قدرت در حالت دائمی ۱۰
- شکل ۶-۲- وزنه های به هم پیوسته توسط ریسمان های لاستیکی ۱۱
- شکل ۷-۲- پاسخ سیستمهای پایدار و ناپایدار از دیدگاه گذرا و دینامیکی ۱۱
- شکل ۸-۲- واکنش ژنراتور در برابر خطای اتصال کوتاه در شبکه ۱۲
- شکل ۹-۲- مقایسه دو ژنراتور با منحنی مشخصه های متفاوت ۱۳
- شکل ۱۰-۲- پاسخ سیستم با ضرایب سنکرونی و میرایی متفاوت ۱۴
- شکل ۱۱-۲- سیستم تک ژنراتور با یک بار وافت ولتاژ سمت بار در اثر انتقال توان ۱۶

### فصل سوم

- شکل ۱-۳- ژنراتور سنکرون در مقابل شبکه بزرگ (شین بینهایت) ۱۹
- شکل ۲-۳- بلوک دیاگرام ماشین سنکرون ۲۱
- شکل ۳-۳- بلوک دیاگرام ساده شده ماشین سنکرون ۲۲
- شکل ۴-۳- بلوک دیاگرام ماشین سنکرون با در نظر گرفتن سیستم تحریک ماشین ۲۳
- شکل ۵-۳- بلوک دیاگرام سیستم با در نظر گرفتن AVR ۲۵

### فصل چهارم

- شکل ۱-۴- نمودار بلوکی سیستم با PSS ۲۹
- شکل ۲-۴- بخشهای اصلی یک PSS معمولی ۳۰
- شکل ۳-۴- محل قطبهای ماشین بدون PSS ۳۰
- شکل ۴-۴- پاسخ سیستم به اغتشاش بدون PSS ۳۱
- شکل ۵-۴- محل قطبهای ماشین با PSS ۳۲
- شکل ۶-۴- پاسخ سیستم به اغتشاش با PSS ۳۳

### فصل ششم

- شکل ۱-۶- محاسبه سرعت از فازور ولتاژ و جریان ۴۰
- شکل ۲-۶- عملکرد فیلترهای بالاگذر در محاسبه سیگنال تغییرات سرعت ۴۰
- شکل ۳-۶- مقایسه پاسخ سیستم در روش نو و روش حلقه باز ۴۱



- شکل ۴-۶- استفاده از برنامه‌ریزی پویا در تنظیم PSS ۴۲
- شکل ۵-۶- مقایسه عملکرد کنترلر P-I-D با کنترلر معمولی ۴۳
- شکل ۶-۶- مقایسه عملکرد PSS مقاوم و معمولی ۴۴

### فصل هفتم

- شکل ۱-۷- سیستم حرکتی از راه دور ۴۶
- شکل ۲-۷- ارتباط ژنراتورهای یک بخش با مرکز مالتی پلکس و دی مالتی پلکس آن بخش ۴۸
- شکل ۳-۷- ارتباط بخشهای محلی با بانک PSS ۴۹
- شکل ۴-۷- پاسخ سیستم کنترل شده با اینترنت به اغتشاش دینامیکی ۵۱

### فصل هشتم

- شکل ۱-۸- ناپایداری شدن ژنراتور G1 با افزایش تأخیر ۵۴
- شکل ۲-۸- نحوه اعمال متغیر موج به سیستم ۵۵
- شکل ۳-۸- اعمال اغتشاش به سیستم با متغیر موج و تأخیر ثابت (۰/۳ ثانیه) ۵۶
- شکل ۴-۸- پاسخ سیستم بدون متغیر موج به تأخیر متغیر ۵۷
- شکل ۵-۸- پاسخ سیستم با متغیر موج به تأخیر متغیر با زمان ۵۸

### فصل نهم

- شکل ۱-۹- تأثیر قطعی اینترنت در عملکرد سیستم ۶۱
- شکل ۲-۹- بخشهای مختلف یک شبکه عصبی مصنوعی ۶۳
- شکل ۳-۹- توابع فعالسازی گوناگون برای یک بخش ۶۵
- شکل ۴-۹- یک شبکه تک لایه با دو ورودی و یک خروجی ۶۶
- شکل ۵-۹- چگونگی اعمال شبکه عصبی به سیستم ۶۸
- شکل ۶-۹- خروجی PSS و شبکه عصبی آموزش دیده آن ۶۸
- شکل ۷-۹- پاسخ سیستم با استفاده از شبکه‌های عصبی ۶۹

### فصل دهم

- شکل ۱-۱۰- مقایسه سیگنال تخمینی با سیگنال کنترلی اصلی ۷۵
- شکل ۲-۱۰- استفاده از تخمینگر سیگنال در سیستم ۷۶
- شکل ۳-۱۰- پاسخ سیستم به قطعی با تخمینگر موج ۷۷

### فصل یازدهم

- شکل ۱-۱۱- پاسخ سیستم با تأخیر ثابت و قطعی ۸۰
- شکل ۲-۱۱- پاسخ سیستم با تأخیر متغیر و قطعی ۸۰
- شکل ۳-۱۱- سیستم همراه متغیرهای موج و دارای تخمینگر موج ۸۱

۸۱

شکل ۴-۱۱- پاسخ سیستم دارای تخمینگر موج با تأخیر ثابت

۸۲

شکل ۵-۱۱- پاسخ سیستم دارای تخمینگر موج با تأخیر متغیر

## فصل اول

### مقدمه

## تاریخچه کنترل سیستمهای قدرت الکتریکی [۱]

می‌توان گفت که نخستین سیستم قدرت کامل توسط ادیسون در سال ۱۸۸۲ میلادی با استفاده از نیروگاه خیابان "پیرل" شهر نیویورک بوجود آمد [۱]. این سیستم شامل یک ژنراتور، کابل، فیوز و اندازه‌گیر بود و لامپهای قوسی خیابان و منازل بار آن بودند. ژنراتور فوق یک ژنراتور جریان مستقیم بود که با توربین بخاری می‌چرخید و قدرت مورد نیاز ۵۹ مشتری را در منطقه ای به شعاع ۱/۵ کیلومتر تأمین می‌کرد. با توجه به محدودیتهای سیستمهای جریان مستقیم و تلفات زیاد آنها در تأمین انرژی فواصل دورتر، کوششها برای دست یافتن به روشی بهتر شدت گرفت. با اختراع ترانسفورماتور توسط "گاولارد" و "گیس" فرانسوی، جریان متناوب به عنوان جایگزینی مناسب برای جریان مستقیم معرفی شد. نخستین بار "وستینگهاوس" حقوق قانونی مربوط به توسعه این سیستمها را در ایالات متحده کسب کرد و در سال ۱۸۸۶، "اِلِتانلی" یک سیستم توزیع جریان متناوب و ترانسفورماتور را برای ۱۵۰ لامپ در شهر بارینگتن ایالت ماساچوست طراحی کرد.

در سال ۱۸۸۹ میلادی، اولین خط انتقال جریان متناوب به طول ۲۱ کیلومتر و در ولتاژ ۴۰۰۰ ولت بین دو شهر "ویلامت" و "پرتلند" در آمریکای شمالی بصورت تکفاز مورد بهره‌برداری قرار گرفت. پس از بوجود آمدن سیستمهای چند فاز توسط "تسلا"، استفاده از جریان متناوب شکل گسترده‌تری به خود گرفت. در دهه ۱۸۹۰ میلادی بحث بر سر استفاده از جریان مستقیم یا متناوب در صنعت برق بیشتر شد. در این بحثها، ادیسون طرفدار استفاده از جریان مستقیم و وستینگهاوس خواهان استفاده از جریان متناوب بود. با توجه به خصوصیات جریان متناوب در ساختار ساده‌تر ترانسفورماتورهای آن و کارکرد ساده‌تر و تلفات کمتر موتورهای جریان متناوب، نظریه استفاده از جریان متناوب در صنعت برق به پیروزی رسید.

در سالهای پس از آن با اختراع مبدلهای تریستوری، سیستمهای انتقال ولتاژ بالای جریان مستقیم (HVDC) بیشتر مورد توجه قرار گرفتند، و در بخشهای آمریکای شمالی و کانادا مورد استفاده قرار گرفتند. اکنون سیستم قدرت آمریکای شمالی به چنان پیچیدگی رسیده است که به گفته مهندس سرشناس برق، چارلز اشتاین متز، بزرگترین و پیچیدهترین ماشین ساخت بشر است. یک سیستم قدرت باید توانایی ایجاد تعادل در تولید و مصرف را داشته باشد. علاوه بر آن باید تثبیت فرکانس، تثبیت ولتاژ و ایجاد سطح قابلیت اعتماد مناسب مورد توجه قرار گیرد. دسترسی به این قابلیتها و همچنین حفظ شرایط مناسب کاری در شرایط مختلف و بویژه بروز خطا، در مبحث پایداری سیستم قدرت گنجانده می شود. به عبارت دیگر، یک سیستم قدرت الکتریکی بدون داشتن سیستم کنترل مناسب و معیارهای پایداری مطمئن قابل استفاده نیست. با گسترش بیشتر یک سیستم، مبحث پایداری و کنترل آن اهمیت بیشتری پیدا می کند.

پایداری یک سیستم قدرت ابتدا در سال ۱۹۲۰ بصورت یک مسأله جدی مطرح گردید [۲]. نخستین آزمایشها بر روی یک سیستم با مقیاس کوچک در سال ۱۹۲۴ انجام شد [۳] و اولین آزمایشهای پایداری بر روی یک سیستم قدرت واقعی در سال ۱۹۲۵ صورت گرفت [۴ و ۵]. خاموشی کامل در نوامبر سال ۱۹۶۵ در منطقه شمال شرق ایالات متحده آمریکا اهمیت مسأله پایداری را بیش از پیش آشکار کرد [۱]. در اوایل بیشتر مسائل پایداری مربوط به نیروگاههای آبی می شد که توسط خطوط انتقال طولانی به شهرها متصل می شدند. به دلایل اقتصادی، از سیستمها در نزدیکی حدود پایداری استفاده می شد و ناپایداری، بیشتر به دلیل کمبود گشتاور سنکرونی بوجود می آمد. در آن زمان سیستمهای رفع خطا کند بودند و در محدوده ۰/۵ تا ۲ ثانیه و حتی بیشتر عمل می کردند.

با ساخت تحلیلگر شبکه در سال ۱۹۳۰، روشهای محاسباتی پیشرفت قابل ملاحظه ای کردند. این تحلیلگر یک مدل با مقیاس کوچک از سیستم قدرت جریان متناوب بود که با استفاده از مقاومتها، راکتورها و خازنهای قابل تنظیم، بار و شبکه انتقال را مدل می کردند. منابع ولتاژ با دامنه و زاویه قابل تنظیم در جایگاه ژنراتورها قرار گرفتند.

اثر سیستم تحریک سریع برای بهبود پایداری ماندگار مورد مطالعه قرار گرفت و مسائل مربوط به پایداری دینامیکی بطور حاشیه ای مورد بررسی قرار می گرفت. با دستیابی به سیستمهای تحریک با عکس العمل سریع و توانایی آنها در میراسازی نوسانات کوچک، مسأله پایداری دینامیکی شکل جدی تری به خود گرفت.

در اوایل دهه ۱۹۵۰، از کامپیوترهای آنالوگ برای بررسی عملکرد ماشینهای سنکرون همراه با سیستم تحریک و گاورنر استفاده می شد. در ادامه دهه ۱۹۵۰ کامپیوترهای دیجیتال وارد بازار شدند و اولین برنامه تحلیل سیستمهای قدرت بر روی این کامپیوترها در سال ۱۹۵۶ ایجاد شد. در دهه ۱۹۶۰، سیستمهای قدرت ایالات متحده آمریکا و کانادا بصورت دو بخش بزرگ شرقی و غربی درآمدند. در سال ۱۹۶۷، از خطوط ارتباطی فشار قوی جریان مستقیم برای ارتباط دو بخش شرقی و غربی بهره برداری شد.

از دهه ۱۹۶۰، بیشتر تلاشهای محققین مربوط به بهبود پایداری گذرای سیستم شد. با پیشرفت روشهای عددی و تکنولوژی کامپیوترهای دیجیتال امکان تحلیل شبکههای پیچیده و بزرگ قدرت فراهم گردید. همچنین تجهیزات سریع رفع خطا سطح پایداری گذرای سیستمهای قدرت را بالا بردند. هرچند که سیستمهای تحریک سریع به بهبود پایداری گذرا کمک می‌کردند، ولی اثر آنها در افزایش نوسانات سیستم آشکار گشت. به عبارت دیگر با افزایش پایداری گذرای یک سیستم قدرت در اثر استفاده از سیستمهای تحریک سریع، پایداری اغتشاش کوچک نوسانی یا همان پایداری دینامیکی سیستم دچار تضعیف می‌شد. هرچه اندازه واحدهای تولیدی نسبت به قدرت خطوط انتقال افزایش می‌یافت این تضعیف نمود بیشتری پیدا می‌کرد.

تلاش برای بهبود پایداری دینامیکی در اثر استفاده از سیستمهای تحریک سریع، به تولید پایدارسازهای سیستم قدرت منجر شد. با استفاده از این ادوات کنترلی، بهبود پایداری دینامیکی سیستم، علیرغم بهره‌برداری از سیستمهای تحریک سریع، امکان‌پذیر گردید. مسأله پایداری با پیشرفت هرچه بیشتر سیستمهای قدرت اهمیت بیشتری پیدا کرده است و اکنون پایداری به عنوان یک بخش غیر قابل انکار در طراحی و گسترش سیستمهای قدرت درآمده است.

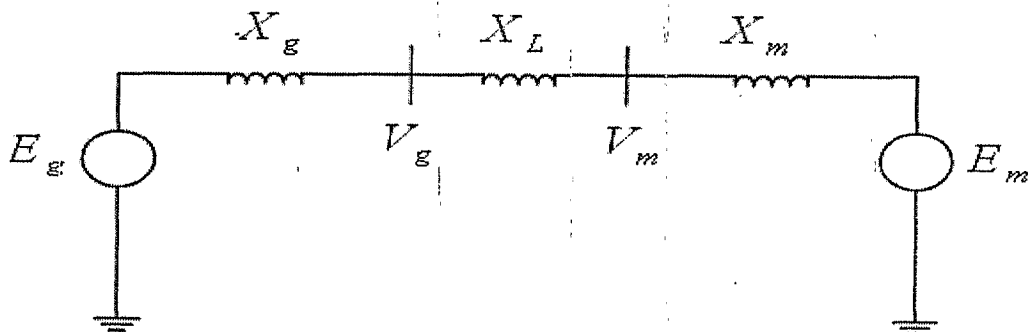
فصل دوم

## پایداری سیستم قدرت الکتریکی

### توصیف کلی سیستم قدرت

یک سیستم قدرت الکتریکی از سه بخش اساسی تشکیل شده است: ۱- تولید ۲- انتقال ۳- توزیع در بخش تولید، توان الکتریکی مورد نیاز بخشهای مصرف کننده تولید می‌شود. عامل تولید انرژی الکتریکی ژنراتور است که توان مکانیکی دریافت شده از توربین نیروگاه را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. در بخش انتقال، انرژی الکتریکی تولیدی توسط ژنراتور به بخش توزیع منتقل می‌شود. در بخش توزیع، انرژی الکتریکی به مصرف کننده می‌رسد.

شکل ۱-۲ یک سیستم قدرت ساده با یک ژنراتور، خط انتقال و یک موتور (به عنوان مصرف کننده) را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- یک سیستم تک ماشینه قدرت



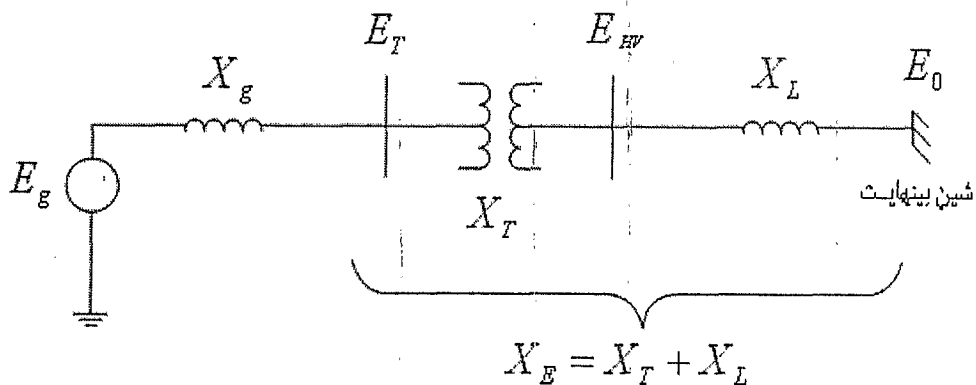
ولتاژ القایی در استاتور ژنراتور با  $E_g$  ، ولتاژ استاتور موتور با  $E_m$  و راکتانسهای القایی ژنراتور و موتور به ترتیب با  $X_m$  و  $X_g$  نشان داده شده‌اند. با صرف نظر کردن از مقاومت و ظرفیت خازنی، می‌توان خط انتقال را با راکتانس  $X_L$  مدل کرد. ولتاژ ترمینال ژنراتور با  $V_g$  و ولتاژ ترمینال موتور با  $V_m$  نمایش داده شده‌اند. توان الکتریکی انتقالی از ژنراتور به موتور از رابطه مقابل بدست می‌آید.

$$P_e = \frac{E_g \cdot E_m}{X_T} \sin \delta \quad (2-1)$$

$X_T$  مجموع همه راکتانسهای بین  $E_m$  و  $E_g$  در مدار ذکر شده است  $(X_T = X_g + X_L + X_m)$  .  $\delta$  زاویه بین بردارهای  $E_m$  و  $E_g$  است که شامل سه بخش است :

$$\delta = \delta_g + \delta_L + \delta_m \quad (2-2)$$

$\delta_g$  زاویه بین بردار  $E_g$  و ولتاژ ترمینال ژنراتور ( $V_g$ ) است.  $\delta_L$  زاویه بین بردارهای ولتاژهای دو سر خط انتقال است. و سرانجام  $\delta_m$  زاویه بین  $E_m$  و  $V_m$  می‌باشد. برای بررسی عملکرد یک ژنراتور به عنوان مولد انرژی الکتریکی در پایداری سیستم، مدل ژنراتور را همراه با ترانسفورماتور قدرت و خط انتقال متصل به شین بینهایت در نظر گرفته می‌شود که نمایش دهنده معادلی از سایر قسمت‌های یک شبکه بزرگ است. دیاگرام این مدل در شکل ۲-۲ قابل مشاهده است.

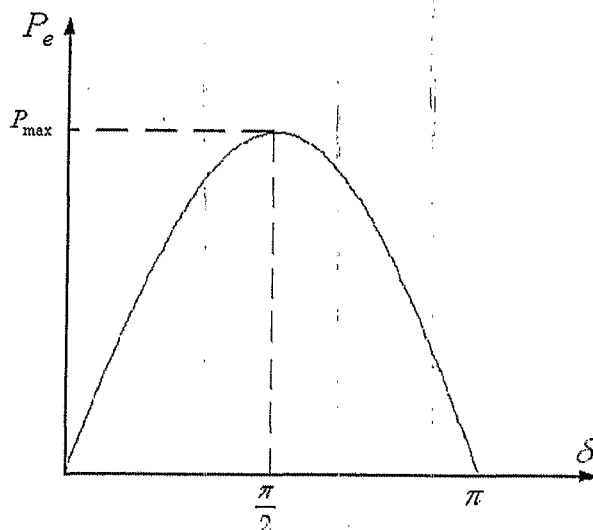


شکل ۲-۲- یک ژنراتور و ترانسفورماتور متصل به شین بینهایت (شبکه بزرگ) توسط خط انتقال

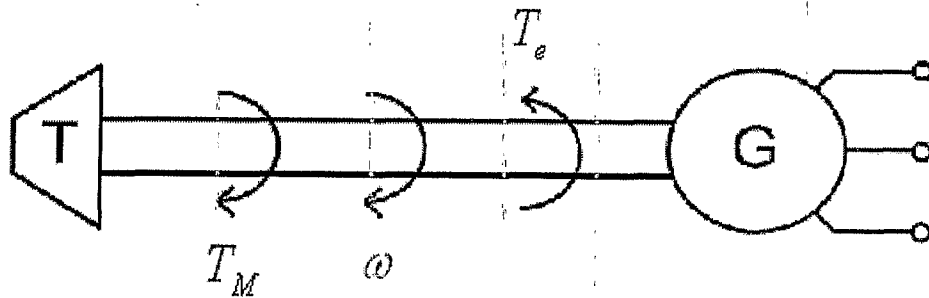
طبق مدار شکل ۲-۲، ژنراتور برای کاهش تلفات به یک ترانسفورماتور افزایشده ولتاژ متصل شده و سپس توسط خط انتقال  $X_L$  به شین بینهایت با ولتاژ  $E_0$  مرتبط شده است. مجموع راکتانسهای ترانس و خط را  $X_E$  می‌نامیم ( $X_E = X_T + X_L$ ).

توان خروجی ژنراتور از رابطه  $P_e = \frac{E_g \cdot E_T}{X_g} \sin \delta$  قابل محاسبه است که  $\delta$  زاویه بین بردار mmf ناشی از جریان روتور با بردار mmf ناشی از جریان روتور و استاتور با هم است.  $\delta$  همچنین زاویه بین دو بردار  $E_T$  و  $E_g$  نیز هست. بنابراین با ثابت در نظر گرفتن  $E_T$ ،  $E_g$  و همچنین  $X_g$  رابطه بین توان الکتریکی خروجی ژنراتور و زاویه  $\delta$  (زاویه قدرت) یک رابطه سینوسی است که در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است. همانگونه که دیده می‌شود، حداکثر توان الکتریکی قابل تولید توسط ژنراتور مقدار محدودی است که با افزایش زاویه  $\delta$  از صفر تا  $\frac{\pi}{2}$  به آن می‌رسیم، ولی با افزایش بیشتر  $\delta$  توان الکتریکی شروع به کاهش می‌کند.

متناسب با توان الکتریکی ژنراتور (و با صرفنظر از برخی حالات گذرا و عوامل صرفنظر شده در مدل ژنراتور)، با توجه به سرعت چرخش روتور، یک گشتاور الکتریکی توسط ژنراتور تولید خواهد شد که با نماد  $T_e$  نمایش داده می‌شود. این گشتاور الکتریکی که از کنش متقابل میدانهای دوار استاتور و روتور بوجود می‌آید، در حالت ژنراتوری در خلاف جهت چرخش روتور است و به عنوان یک گشتاور مقاوم در برابر گشتاور مکانیکی اعمال شده از جانب توربین عمل می‌کند. در حالت موتوری جای گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی از نظر هم جهت بودن با جهت گردش روتور عوض می‌شود.



شکل ۲-۳- نمودار توان اکتیو انتقالی بر حسب زاویه قدرت



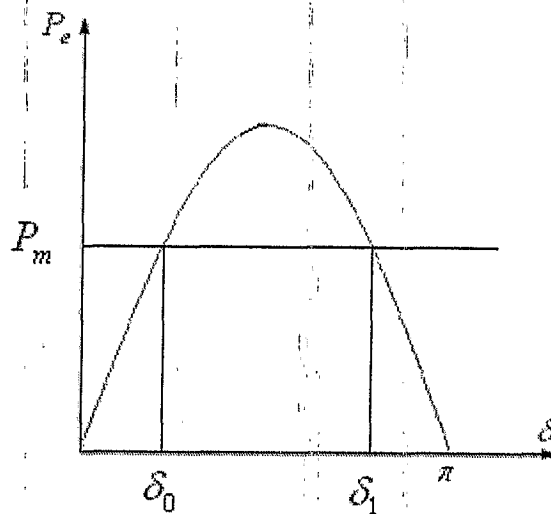
شکل ۴-۲- کوپل توربین - ژنراتور

برای بررسی پایداری شبکه، باید پایداری ژنراتور در حفظ تعادل عملکرد (شرایط گردش و زاویه قدرت) و همچنین توانایی سیستم در حفظ ولتاژ شینه‌ها تحت شرایط مختلف مورد تحلیل قرار گیرد. از اینرو پایداری شبکه در چهار بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱- پایداری دائمی ۲- پایداری گذرا ۳- پایداری دینامیکی (سیگنال کوچک) ۴- پایداری ولتاژ

#### ۲-۲- پایداری دائمی

شکل ۴-۲ یک کوپل توربین - ژنراتور را با گشتاورهای اعمالی به محور کوپل در مود ژنراتوری ماشین سنکرون نشان می‌دهد.

در حالت ماندگار از برابری گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی اعمالی به محور روتور طبق رابطه  $\sum T = J\alpha$  عدم وجود شتاب روی محور روتور حاصل می‌شود. در این رابطه  $\sum T$  (که در حالت تعادل صفر است) نمایانگر برآیند گشتاورها،  $J$  ممان اینرسی گردشی و  $\omega$  سرعت زاویه ای چرخش روتور است. اگر بر اثر هر اتفاقی مانند اتصال کوتاه در سیستم و یا تغییر بار، تعادل گشتاورها از بین برود ماشین شروع به افزایش سرعت یا کند شدن می‌کند، که نتیجه آن تغییر زاویه قدرت  $\delta$  است. به عنوان مثال اگر در اثر اتصال کوتاه، توان خروجی کمتر از توان مکانیکی توربین شود، سرعت گردشی  $\omega$  افزایش می‌یابد که خود باعث افزایش  $\delta$  می‌شود. این پیشامد می‌تواند باعث تغییر فرکانس تولیدی ماشین شود و اگر جلوی آن گرفته نشود ممکن است حتی سنکرون بودن ژنراتور نیز مختل شود.



شکل ۵-۲- زاویه قدرت در حالت دائمی

در این شرایط حتی ممکن است ژنراتور از سیستم خارج شده و برخی کنندگان دچار بی برقی شوند. در پایداری دائمی هدف، رسیدن به نقطه کار مطلوب برای سیستم است تا سیستم در آن نقطه کار به گشتاورهای پیش بینی شده و فرکانس مطلوب دسترسی پیدا کند. شکل ۵-۲ دو نقطه  $\delta_0$  و  $\delta_1$  را به عنوان نقاط کار احتمالی برای سیستمی با مشخصه توان الکتریکی داده شده و توان مکانیکی ثابت توربین  $P_m$  نشان می‌دهد.

اگر در اثر عاملی مانند اتصال کوتاه، توان خروجی کاهش یابد، با ثابت بودن توان مکانیکی، ماشین شروع به شتاب گرفتن می‌کند که در نتیجه  $\delta$  رو به افزایش می‌گذارد و اگر در نقطه  $\delta_1$  باشیم، توان الکتریکی کاهش بیشتری خواهد یافت و سرعت بیشتر خواهد شد تا اینکه  $\delta$  از زاویه  $180^\circ$  درجه بیشتر شده و ماشین از حالت سنکرون خارج شود. بنابراین  $\delta_1$  یک نقطه تعادل ناپایدار است و در نتیجه در حالت دائمی باید مشخصات سیستم در نقطه  $\delta_0$  تنظیم شود.

### ۲-۳- پایداری گذرا

هدف از این پایداری، حفظ سنکرون بودن ماشین در اثر بروز یک اغتشاش سریع و بزرگ است. طبق شکل ۶-۲، در یک شبکه بزرگ، ژنراتورها مانند وزنه‌هایی می‌باشند که توسط ریسمانهای لاستیکی به هم متصل هستند.