

## طراحی کنترل کننده ی مقاوم در سیستم های قدرت

## فصل اول

### سیستم های قدرت الکتریکی و مسائل دینامیکی

با پیدایش سیستم های قدرت بزرگ به هم پیوسته ، برخی مسائل دینامیکی جدید برای این سیستم ها ایجاد شده است ، که برای نمونه می توان به نوسانات فرکانس پایین سیستم های قدرت بزرگ به هم پیوسته تا نوسانات پیچشی زیر سنکرون توربین ها در نیروگاههای بخاری با خطوط انتقال جبران شده با خازن سری و مسائل دیگری از این دست اشاره کرد. وظیفه مهندسان هنگام مواجهه با مسائل جدید ، پیشنهاد ابزارهای تحلیلی و پیشرفته برای حل آن مسائل است و وقتی آن ابزار در اختیارشان گذاشته شود ، آنها باید با آن ابزار با چندین روش مسئله را حل کرده تا به راه حل ها و جواب های بهتر و اقتصادی تری برسند.

پیدایش سیستم های قدرت بزرگ به هم پیوسته همزمان با پیشرفت کامپیوتر های دیجیتال و تئوری های کنترل مدرن بوده است و این دو موضوع به مثابه دو چرخ یک درشکه با همدیگر پیشرفت نموده اند. روش های محاسباتی و کنترلی جدید علاوه بر کمک در تحلیل و کنترل سیستم های قدرت الکتریکی ، امروزه کاربرد های دیگری از جمله در پروژه های فضایی و سیستم های اقتصادی دارند.

هدف از توسعه سیستم های قدرت بزرگ به هم پیوسته ، تولید و انتقال انرژی اقتصادی تر و با اطمینان تر است. از مزایای اقتصادی سیستم های قدرت به هم پیوسته می توان به کاهش چشمگیر ذخیره چرخان اشاره کرد. ذخیره چرخان یا ظرفیت تولید رزرو ، برای استفاده در زمان اضطراری و در حین تعمیر و نگهداری است. برای مثال در چند دهه قبل ذخیره چرخان نیروگاهها بیش از 25 درصد کل ظرفیت تولید را به خود اختصاص می داد، ولی در سیستم های قدرت الکتریکی به هم پیوسته جدید این ذخیره در حد ناچیزی می باشد. هرچه اتصالات یک ناحیه به نواحی دیگر بیشتر باشد، قابلیت انتقال توان از یک ناحیه به نواحی دیگر از طریق سیستم قدرت بالاتر می رود و قابلیت اطمینان سیستم به هم پیوسته بهبود می یابد. ولی در عین حال افزایش اتصالات سیستم را از نظر پایداری آسیب پذیرتر می سازد. زیرا در این شرایط پیچیدگی اتصالات بیشتر بوده و ذخیره چرخان نواحی نیز بدلیل بهره برداری اقتصادی تر به شدت پایین است.

با رشد شبکه های به هم پیوسته نیاز به طراحی تجهیزات جدید برای سیستم قدرت احساس می شود. برای مثال خط ارتباطی جریان مستقیم فشار قوی بین مجموعه های تسهیلات اشتراکی شمال غرب و جنوب غرب پسیفیک، جبران سازی خطوط انتقال بلند با خازن سری، سیستم های تحریک سریع و راکتانس های پریونیتی بزرگتر و ثابت های اینرسی کوچکتر در طراحی ماشین های سنکرون جدید، پیچیدگی سیستم های قدرت بزرگ به هم پیوسته را بیشتر می کند.

هر روز مسائل دینامیکی سیستم قدرت الکتریکی پیچیده تر شده ولی امید برای کنترل این مسائل نیز بیشتر می شود. زیرا با افزایش اندازه و پیچیدگی سیستم های قدرت الکتریکی، تجربه مهندسی افزایش یافته و تکنیک های محاسباتی و کنترلی نیز بهبود می یابد. در این شرایط با مواجه شدن با مسائل جدید، ایده ها و روش های جدیدی نیز به کمک حل مسئله می آید. طراحی و بهره برداری یک سیستم قدرت در بر گیرنده برخی فازهای مهندسی است. این فازها شامل پیش بینی بار، تحقیقات در ارتباط با منابع انرژی، طراحی و ساخت نیروگاه و خطوط انتقال، حفاظت سیستم، پخش و کنترل انرژی روز به روز و ساعت به ساعت می باشد. این فصل به معرفی برخی سیستم های قدرت الکتریکی جدید و مسائل دینامیکی مربوطه می پردازد. در اولین بخش اجزای اساسی یک نیروگاه الکتریکی معرفی می شوند.

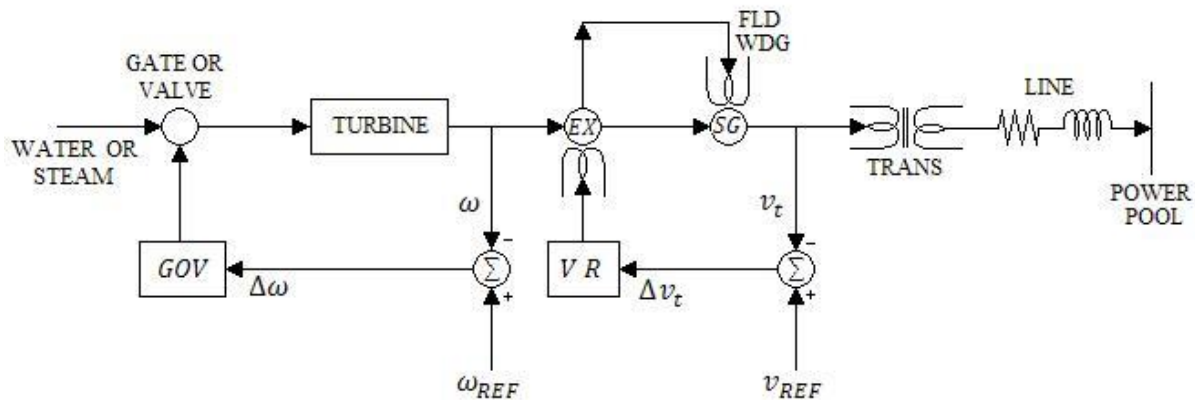
## 1-1 اجزای اساسی یک نیروگاه الکتریکی

برای فهم رفتار دینامیکی یک سیستم قدرت الکتریکی و طراحی کنترل کننده برای بهبود عملکردش، ضروری است که با اجزای اساسی یک نیروگاه به خصوص اجزایی که اثرات چشمگیری بر رفتار دینامیکی سیستم قدرت دارند آشنا شویم.

### 1-1-1 تبدیل انرژی مکانیکی - الکتریکی

اگرچه تبدیل مستقیم برخی صورت های انرژی نظیر انرژی خورشیدی و گداز هسته ای در حال پیشرفت و توسعه است، ولی منابع انرژی اولیه تولید انرژی الکتریکی، هنوز سوخت های فسیلی، انرژی آب و انرژی هسته ای و در حد کمتری جزر و مد دریا و باد است. این انرژی یاب به صورت انرژی مکانیکی نظیر انرژی آب، جزر و مد و باد بوده و یا نظیر سوخت فسیلی و مواد شکافت هسته ای باید قبل از ورود به فرآیند تبدیل انرژی مکانیکی - الکتریکی بوسیله توربین های بخار به انرژی مکانیکی تبدیل شود. بنابراین مهمترین اجزای یک نیروگاه الکتریکی، توربین های بخار و آبی، ژنراتور الکتریکی، گاورنر کنترل کننده انرژی ورودی به توربین ها، تحریک کننده و تنظیم کننده ولتاژ خروجی ژنراتور ها می باشد. بخش اعظم انرژی الکتریکی تولیدی ژنراتور از طریق خطوط انتقال به مراکز بار منتقل شده و در عین حال بخشی از آن صرف بار های محلی و بخشی از آن در شبکه انتقال و توزیع تلف می شود.

اجزای اساسی یک نیروگاه الکتریکی به طور شماتیک در شکل 1-1 نشان داده شده است. در این شکل توربین و گاورنر با فیدبک سرعت  $\Delta\omega$  در سمت چپ، ژنراتور  $SG$ ، تحریک کننده  $EX$  و تنظیم کننده ولتاژ  $VR$  با فیدبک ولتاژ  $\Delta V_t$  در وسط و ترانسفورماتور و خط انتقال در سمت راست نشان داده شده اند.



شکل ۱-۱ اجزای اساسی یک نیروگاه الکتریکی

### 1-1-2 توربین بخار

تبدیل انرژی بخار به مکانیکی یک فرآیند ترمودینامیکی است به طوری که بخار از طریق توربین های فشار بالا، متوسط و پایین که به طور معمول بر روی یک محور نصب شده اند منبسط می شود. انرژی بخار بسیار گرم فشار بالای خارج شده از دیگ بخار به وسیله پره های توربین به انرژی مکانیکی تبدیل شده که این انرژی به محور منتقل می شود. توربین ها بخش های مختلفی دارند. شیر های کنترل، که بخار ورودی را کنترل می کنند، شیر های میانی که برای منحرف کردن بخار از توربین فشار بالا به چگالنده بخار استفاده می شوند و اتاقک بخار در جلوی توربین فشار بالا که باعث تاخیر در شارش بخار می شود، باز گرم کن بین توربین های فشار بالا و فشار متوسط که باعث تاخیر دیگری در شارش بخار است و مفصل تبدیلی بین توربین های فشار متوسط و فشار پایین نیز باعث تاخیر دیگر می شود.

### 1-1-3 توربین هیدرولیک

یکی از قدیمی ترین و مهمترین محرک های اولیه که هزاران سال است به بشریت خدمت می کند چرخ آبی است. برای تولید انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ، چرخ آبی به توربین های آبی جدیدی که ظرفیت توانی در حدود صد ها مگاوات دارند تبدیل شده است. در بسیاری حالات، انرژی پتانسیل آب موجود در مخزن به انرژی جنبشی در کانال آب تبدیل شده و سپس به محور توربین منتقل می شود. انواع مختلفی از توربین های آبی وجود دارد، توربین کاپلان نوع واکنشی با دریچه های قابل کنترل و تیغه های قابل تنظیم که برای جاهایی که ارتفاع آب کم یا متوسط است موثر می باشد. توربین فرانسوی نوع واکنشی که برای ارتفاع آب متوسط یا بالا مناسب است. چرخ پلتون که نوع ضربانی است و برای سد هایی با ارتفاع خیلی زیاد مناسب است.

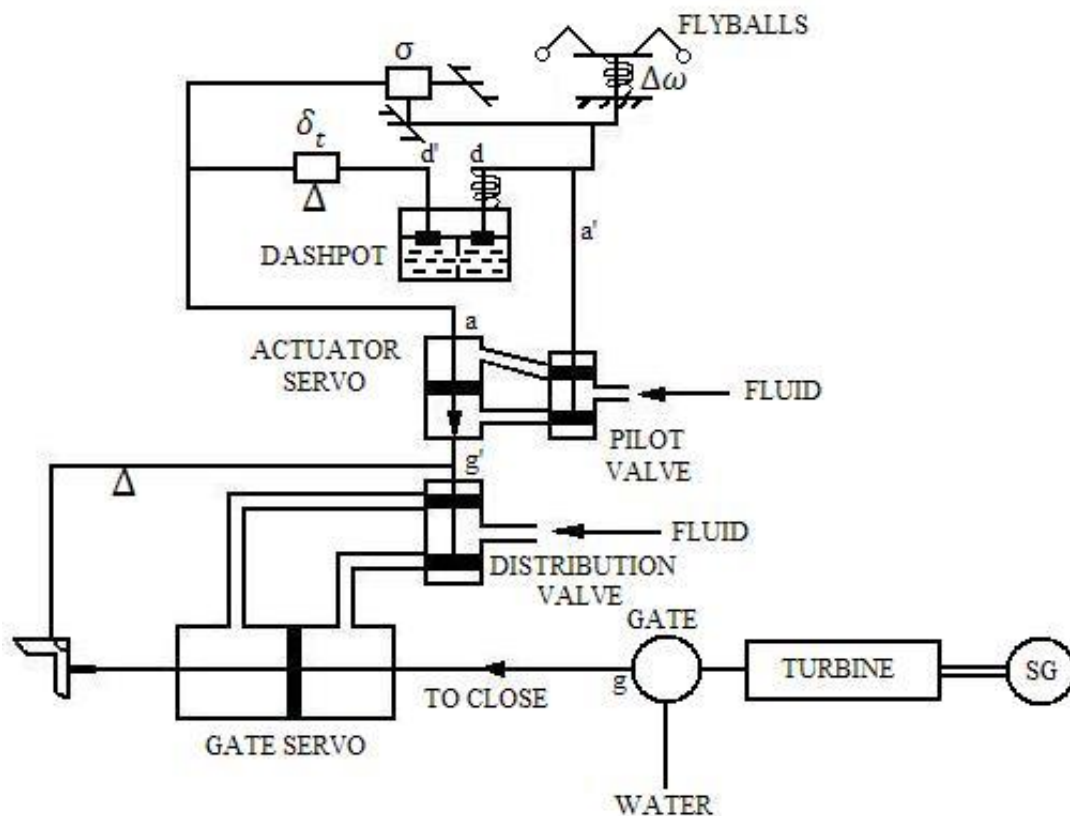
### 1-1-4 گاورنر

وظیفه گاورنر یک نیروگاه الکتریکی، ثابت نگه داشتن سرعت که معمولاً برای مجموعه توربین - ژنراتور سرعت سنکرون می باشد، است. افت سرعت مجموعه به دلیل افزایش توان الکتریکی خروجی، یک سیگنال سرعت به گاورنر

برای افزایش توان مکانیکی ورودی به توربین می فرستد و بر عکس با افزایش سرعت برای ثابت نگه داشتن سرعت، توان مکانیکی ورودی را کاهش می دهد.

در یک سیستم قدرت الکتریکی به هم پیوسته بزرگ، گاورنر نیروگاه اصلی ناحیه، از کنترل کننده توان - فرکانس ناحیه فرمان می گیرد. گاورنر نه فقط به تبادل توان الکتریکی برنامه ریزی شده میان نواحی بلکه به تغییرات فرکانس مربوط به بارهای محلی نیز پاسخ می دهد. استفاده دیگر گاورنر، امکان استفاده از یک کنترل کننده گاورنر تکمیلی برای بهبود پایداری سیستم قدرت الکتریکی است.

دو نوع گاورنر برای توربین بخار و توربین آبی وجود دارد: گاورنر مکانیکی - هیدرولیکی و گاورنر الکتریکی - هیدرولیکی. یک چنین سیستمی در شکل 1-2 نشان داده شده است.



شکل 1-2 گاورنر نیروگاه آبی

### 1-1-5 گاورنر نیروگاه آبی

شکل 1-2 یک گاورنر مکانیکی - هیدرولیکی را برای نیروگاه آبی نشان می دهد. گوی های چرخان در بالا در حین عملکرد نرمال به وسیله فنرها در جای خود نگه داشته می شوند. هر زمان افزایش سرعت  $\Delta\omega$  با گوی های چرخان حس شود، میله عمودی  $a'$  شیر پیلوت به سمت بالا کشیده می شود و سیال تحت فشار در شیر پیلوت به داخل سرو محرک وارد شده تا آن را به سمت پایین فشار دهد. در این زمان، شیر توزیع با میله عمودی  $g'$  به سمت پایین فشار

داده شده و سیال در شیر توزیع به داخل سرو دریچه وارد شده و به سمت چپ فشار داده شده تا دریچه آب را برای کاهش انرژی ورودی آب ببندد. مکانیسم کامل در جهت مخالف نیز می تواند عمل کند و کاهش سرعت باعث افزایش انرژی ورودی آب می شود. یک دش پات در وسط شکل قرار داده شده تا خود محرک را پایدار کند.

### 1-6 ژنراتور سنکرون

تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی در ژنراتور الکتریکی که معمولاً یک ژنراتور سنکرون است و اساس کارش بر مبنای قانون القای فاراده است انجام می شود. اجزای اساسی آن (1) سیم پیچ آرمیچر (2) مدار مغناطیسی و (3) انرژی مکانیکی ورودی به شکل نیرو یا گشتاور است که باعث حرکت نسبی سیم پیچ آرمیچر نسبت به سیم پیچ میدان می شود. یکی از مهمترین نکاتی که همواره در ژنراتور وجود دارد، القای ولتاژ در سیم پیچ آرمیچر هنگامی که نسبت به میدان مغناطیسی دارای حرکت نسبی است و وجود یک گشتاور الکتریکی در جهت مخالف گشتاور مکانیکی محرک اولیه وقتی ژنراتور دارای بار است می باشد.

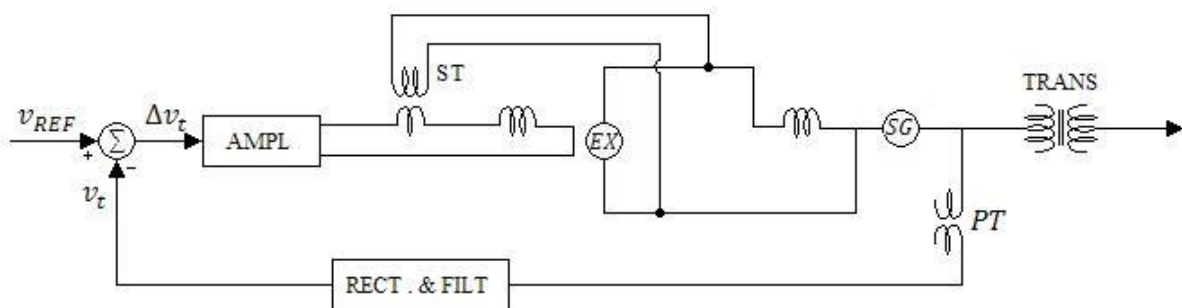
ژنراتور سنکرون سه فاز مورد استفاده در تولید انرژی الکتریکی در مقیاس بزرگ دارای دو میدان دوار سنکرون است. یکی میدان  $dc$  در سیم پیچ میدان است که به طور مکانیکی با سرعت سنکرون چرخانیده می شود و دیگری میدان  $ac$  بر روی استاتور است که مربوط به سیم پیچ آرمیچر می باشد. در این سیم پیچ سه فاز، سیم پیچ هر فاز از دیگری 120 درجه اختلاف فاز مکانی داشته و از آنها جریانهایی که 120 درجه با همدیگر اختلاف فاز زمانی دارند عبور می کند. این دو میدان از نظر رفتاری کاملاً با همدیگر تفاوت دارند. سرعت میدان  $ac$  سه فاز استاتور کاملاً به وسیله فرکانس سیستم دیکته شده و میدان در داخل و اطراف فاصله هوایی ماشین در هر لحظه به علت طبیعت میدان مغناطیسی ظاهر می شود. ولی سرعت میدان  $dc$  رتور تحت تاثیر اینرسی و میرایی سیستم دوار است. در حالت ماندگار وقتی انرژی مکانیکی ورودی و انرژی الکتریکی خروجی به اضافه تلفات با همدیگر برابرند، در سیستم دوار نه گشتاور شتاب دهنده و نه گشتاور ترمزی وجود دارد. در چنین حالتی، دو میدان دوار یعنی میدان  $ac$  سیم پیچ آرمیچر و میدان  $dc$  سیم پیچ تحریک به صورت سنکرون حرکت می کنند و قطب های  $N$  میدان  $ac$  در برابر قطب های  $S$  میدان  $dc$  و قطب های  $S$  میدان  $ac$  در برابر قطب های  $N$  میدان  $dc$  در دو طرف فاصله هوایی ماشین هستند. ولی وقتی اغتشاشی در سیستم رخ می دهد، تعادل انرژی ورودی - خروجی به هم خورده و ارتباط  $N$  به  $S$  و  $S$  به  $N$  اشاره شده در قبل به هم خورده و باعث مسئله ناپایداری می شوند.

### 1-7 تحریک کننده و تنظیم ولتاژ

برای سالها، تحریک  $dc$  سیم پیچ میدان ماشین سنکرون با تحریک کننده چرخان نوع کموتاتوری ایجاد می شده است. ولی در حال حاضر تحریک کننده های استاتیکی که از ترისტورها و دیگر تجهیزات استفاده می کنند در نیروگاهها مورد استفاده واقع می شوند. این تحریک کننده سرعت پاسخ دهی بالاتری نسبت به نوع کموتاتوری دارد.

یک تحریک کننده چرخان وسیستم تنظیم کننده ولتاژ در شکل 1-3 نشان داده شده است. ولتاژ  $ac$  پایانه های ژنراتور سنکرون  $SG$  با ترانسفورماتور ولتاژ  $PT$  حس شده سپس یکسو و فیلتر شده و سرانجام با ولتاژ مرجع  $v_{REF}$  برای بدست آوردن تغییرات ولتاژ  $\Delta v_t$  مقایسه می شود. پس از تقویت سیگنال با تقویت کننده  $AMPL$ ، سیگنال برای کنترل میدان تحریک کننده استفاده شده و خروجی تحریک کننده نیز به نوبه خود سیستم تحریک ژنراتور را کنترل می کند. فیدبک منفی به گونه ای عمل می کند که تحریک، هرگاه ولتاژ پایانه به زیر مقدار مرجع افت کند، افزایش یافته و هرگاه ولتاژ پایانه به بالاتر از مقدار مرجع افزایش یابد، کاهش می یابد. یک ترانسفورماتور پایدارساز  $ST$  برای پایدار نمودن خود سیستم تحریک استفاده می شود.

اگرچه وظیفه اصلی تحریک کننده و سیستم تنظیم کننده ولتاژ تثبیت ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون در یک مقدار از قبل تعیین شده است، ولی این سیستم بوسیله کنترل کننده های تحریک تکمیلی می تواند باعث بهبود پایداری های گذرا و دینامیکی سیستم قدرت شود.



شکل 1-3 تحریک کننده چرخان و سیستم تنظیم کننده ولتاژ

## 1-2 مسائل دینامیکی سیستم قدرت الکتریکی

در این بخش، مسائل مربوط به رفتار دینامیکی سیستم های قدرت الکتریکی معرفی می شوند.

کلمه دینامیکی مورد استفاده در اینجا یک معنی وسیع تر در مقایسه با واژه پایداری در مقالات کلاسیک سیستم های قدرت الکتریکی دارد. آن نه فقط در بر گیرنده تحلیل پایداری سیستم های قدرت الکتریکی بلکه همچنین در بر گیرنده برخی سر فصل ها، نظیر معادله های مکانیکی، نوسانات پیچشی و کنترل است. به عبارت دیگر باید یک خط مرز بین مسائل دینامیکی و برخی مسائل که به دلایل دیگر ایجاد می شوند، کشید.

قبل از در نظر گرفتن مسائل دینامیکی سیستم قدرت الکتریکی، باید برخی تعاریف پایداری را ارائه کنیم.

### 1-2-1 تعاریف پایداری

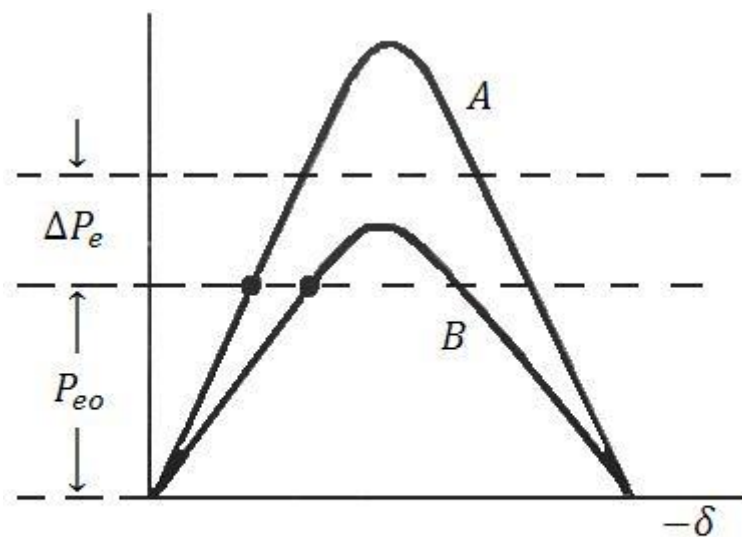
تعاریف پایداری سیستم قدرت در مقالات دائماً در حال تغییر بوده ولی دو تعریف قابل قبول در حال حاضر عبارتند از: پایداری گذرا مربوط به اغتشاشات بزرگ و پایداری حالت ماندگار مربوط به اغتشاشات کوچک است. به هر حال

اینکه یک اغتشاش بزرگ یا کوچک است گاهی به سختی قابل تشخیص است و این موضوع بیشتر بستگی به قابلیت های کنترل کننده پایداری دارد.

دو منحنی نوسان در شکل 1-4 را برای یک سیستم با بار اولیه  $P_{eo}$  و اغتشاش یکسان  $\Delta P_e$  در نظر بگیرید. منحنی  $A$  مربوط به سیستمی با کنترل کننده پایداری موثر و منحنی  $B$  بدون آن است.

برای سیستمی بدون کنترل کننده پایداری موثر (منحنی  $B$ ) سیستم پایداری اش را در اولین نوسان از دست خواهد داد. اغتشاش برای این سیستم بزرگ تلقی شده و مسئله، مسئله پایداری گذرا محسوب می شود. برای سیستم با کنترل کننده پایداری موثر (منحنی  $A$ ) سیستم نه فقط پایدار، بلکه بطور خطی نیز پایدار است. اغتشاش برای این سیستم کوچک تلقی می شود و مسئله، مسئله پایداری حالت ماندگار است. بنابراین اینکه یک اغتشاش به بزرگ یا کوچک دسته بندی شود به موثر بودن کنترل کننده پایداری بستگی دارد. ولی حالتی وجود دارد که به راحتی قابل دسته بندی به پایداری حالت ماندگار یا پایداری گذرا نمی باشند.

کلمه ای که غالباً در مقالات استفاده می شود کلمه پایداری دینامیکی است. که در حقیقت همان حالت منحنی  $A$  در شکل 1-4 می باشد.



شکل 1-4 یک سیستم قدرت با و بدون کنترل کننده پایداری

بنابراین تعاریف پایداری زیر در اینجا نظر گرفته می شوند:

پایداری حالت ماندگار: پایداری یک سیستم قدرت وقتی تحت تاثیر تغییر تدریجی و کوچک در بار است و سیستم پایداری اش را با کنترل کننده های تحریک و گاورنر مرسوم حفظ می کند.

پایداری دینامیکی: پایداری یک سیستم وقتی تحت تاثیر یک اغتشاش ناگهانی و نسبتاً کوچک است. سیستم با معادلات دیفرانسیل خطی توصیف شده و می تواند با یک کنترل کننده پایداری تکمیلی پیوسته و خطی، پایدار



شود. برای مثال نوسانات فرکانس پایین سیستم های قدرت الکتریکی به هم پیوسته بزرگ و نوسانات پیچشی یک نیروگاه الکتریکی بخاری بدلیل تشدید زیر سنکرون خط انتقال جبران شده با خازن از این دست است.

پایداری گذرا: پایداری یک سیستم قدرت وقتی تحت تاثیر یک اغتشاش ناگهانی و سخت ماورای توانایی کنترل کننده پایداری تکمیلی پیوسته و خطی قرار بگیرد، است. سیستم پایداری اش را در اولین نوسان از دست می دهد، مگر اینکه یک راه حل موثر تر و عموماً از نوع گسسته برای مثال ترمز مقاومتی دینامیکی یا باز و بست سریع شیر بخار برای ناحیه با انرژی الکتریکی اضافه یا بار زدایی برای نواحی ای با کمبود تولید انرژی الکتریکی استفاده شود. برای تحلیل پایداری گذرا و طراحی کنترل کننده، سیستم قدرت باید با معادلات دیفرانسیل غیر خطی مدل شود.

پایداری غیر خطی: یک واژه ریاضی که به دسته ای عمومی از مسائل پایداری که در همه مهندسی سیستم ها علاوه بر مهندسی سیستم قدرت مطرح شده است اطلاق می شود. در اینجا نیز سیستم باید دوباره با معادلات غیره خطی مدل شود ولی ضرورتاً این معادلات دیفرانسیل نمی باشند. تحلیل پایداری حالت ماندگار با استفاده از معیار سطوح معادل و تحلیل پایداری گذرا با روش مستقیم لیاپانوف مثال های خوبی از مطالعات پایداری غیر خطی هستند.

## 1-2-2 مدل های اساسی برای مطالعات دینامیکی سیستم قدرت

برای هر مطالعه دینامیکی سیستم قدرت یک مدل مناسب و کافی بایستی انتخاب شود، تا همه اجزای مهم درگیر در مسئله را در مدل جای داده و اجزای کم اهمیت که در مسئله درگیر نمی باشند از مدل خارج کرد. برای مثال برای مطالعه نوسانات فرکانس پایین یک سیستم قدرت الکتریکی بزرگ، انتخاب یک مدل به صورت مدل تک ماشین متصل به شین بینهایت که یک مدل ساده ریاضی فقط با یک ثابت اینرسی، یک مدل ژنراتور سنکرون ساده که فقط با یک معادله دیفرانسیل برای مدار تحریک و یک سیستم تحریک می باشد، کافی است. ولی برای مطالعه نوسانات پیچشی یک نیروگاه بخار به دلیل تشدید زیر سنکرون خطای انتقال جبران شده با خازن سری که به نیروگاه متصل است، مدل ساده ریاضی مطالعه فرکانس پایین نه مناسب و نه کافی است. برای این مطالعه، مجموعه توربین ها و ژنراتور باید به صورت سیستم چند تایی جرم - فنر و همه سیم پیچ های ژنراتور، خطوط انتقال و خازن جبران ساز باید با معادله دیفرانسیل توصیف شوند.

اگرچه مسائل دینامیکی سیستم قدرت متنوع هستند، ولی تعداد مدل های اجزای اساسی توصیف کننده هر مسئله دینامیکی سیستم قدرت محدود می باشد. مدل های اساسی شامل ماشین های سنکرون مرتبه بالا و پایین، تحریک کننده و سیستم های تنظیم کننده ولتاژ، توربین ها و گاورنر ها هستند.

## فصل دوم

### مقدمه ای بر مساله پایداری سیستم های قدرت

پایداری یک سیستم قدرت خاصیتی از سیستم است که باعث می شود ماشین های الکتریکی سیستم بر اثر اختلالات به وجود آمده بتوانند سنکرونیزم خود را با شبکه حفظ نمایند. یک سیستم قدرت را در نظر بگیرید که تحت شرایط عادی کار می کند. اگر اختلالی در سیستم به وجود آید و ماشین های الکتریکی موجود در سیستم به این اختلال طوری پاسخ دهند که شرایط عادی کار جدیدی حاصل شود، در این صورت می گوییم سیستم پایدار است.

مساله مهم برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا هماهنگ باقی بمانند. این جنبه پایداری تحت تاثیر دینامیک روابط زاویه رتور و توان حقیقی - زاویه ژنراتور قرار دارد.

همچنین ممکن است سیستم بدون آنکه سنکرون از دست برود، ناپایدار شود. به عنوان مثال ممکن است سیستمی شامل یک ماشین سنکرون که از طریق یک خط انتقال، یک موتور القایی را تغذیه می کند، در اثر فروپاشی ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مساله پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع پایداری می تواند در مورد بار هایی که در یک محدوده وسیع قرار دارند و از یک سیستم بزرگ تغذیه می شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مساله مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تاثیر یک اغتشاش گذرا قرار گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاش های کوچک به شکل تغییر بار دائما اتفاق می افتد و سیستم خود را با وضعیت متغیر حاصل، تنظیم می کند. سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثر مقدار بار را تامین نماید. همچنین باید بتواند در مقابل اغتشاش های سخت از قبیل اتصال کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور یا بار بزرگ و یا از دست دادن خط ارتباطی بین دو زیر سیستم، باقی بماند. عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش عمدتاً ناشی از نحوه عملکرد تجهیزات تشکیل دهنده آن است. به عنوان مثال، اتصال کوتاهی که بر یک جزء حساس واقع می شود و آن جزء به وسیله رله های محافظ از سیستم جدا می گردد، باعث می شود که تغییراتی را در توان های انتقالی خطوط ارتباطی، سرعت های رتور ژنراتور ها و ولتاژ شین ها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتور ها و سیستم انتقال می شود، حال آنکه تغییرات سرعت رتور ژنراتور ها، گاورنر محرک ها (توربین ها) را به عکس العمل وا می دارد. تغییرات در توان

های انتقالی خطوط ارتباطی ممکن است سیستم های کنترل تولید را به کار اندازد. تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می شود که بستگی به مشخصات آنها، بارهای سیستم به درجات متفاوتی تغییر نماید. به علاوه سیستم های محافظ اجزا ممکن است نسبت به تغییرات در متغیرهای سیستم، عکس العمل نشان دهد و بدین گونه بر عملکرد سیستم تاثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع به خصوص، عکس العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولاً فرضیات زیادی انجام می پذیرد تا مساله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملیکه بر روی مساله پایداری به خصوص تاثیر می گذارند، متمرکز کرد. درک مسائل پایداری را می توان تا حد زیادی با طبقه بندی آنها به انواع مختلف تسهیل کرد.

بخش هایی که به دنبال می آید انواع مختلف ناپایداری سیستم های قدرت به همراه مفاهیم مربوط و نیز در موارد لازم، ترکیب ساده سیستم قدرت را مطرح می نماید. بررسی چنین سیستم هایی با مدل های ایده آل کمک می نماید تا ویژگی های اساسی هر شکل از شکل های پایداری را تشخیص داد.

## 2-1 پایداری زاویه ای رتور

پایداری زاویه ای رتور توانایی ماشین های به هم پیوسته سنکرون یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون با یکدیگر باقی بمانند. مساله پایداری در این حالت شامل مطالعه نوسان های الکترومکانیکی است که به طور ذاتی در سیستم های قدرت وجود دارد. عامل مهم در این مساله، نحوه رفتار توان های خروجی ماشین های سنکرون در مقابل نوسان های رتور آنهاست. در گام اول، بحث کوتاهی در خصوص مشخصه های ماشین های سنکرون می تواند در درک مفاهیم اولیه مربوطه مفید واقع شود.

## 2-1-1 مشخصه های ماشین های سنکرون

یک ماشین سنکرون دو جزء اساسی شامل تحریک و آرمیچر دارد. معمولاً، تحریک روی رتور و آرمیچر روی استاتور واقع است. سیم پیچ تحریک با استفاده از جریان مستقیم تغذیه می شود. زمانی که رتور را با یک محرک (توربین) بچرخانیم، میدان مغناطیسی دوار سیم پیچ تحریک، ولتاژهای متناوبی در سه فاز سیم پیچ های آرمیچر استاتور، القا می کند. فرکانس ولتاژ متناوب القا شده و جریان های حاصل در سیم پیچ های استاتور (زمانی که بار به آنها متصل است) بستگی به سرعت رتور دارد. از این رو مشاهده می شود که فرکانس متغیرهای الکتریکی استاتور با سرعت مکانیکی رتور، سنکرون یا هماهنگ شده اند. از این روست که واژه ماشین سنکرون به کار می رود.

زمانی که دو یا چند ماشین سنکرون به یکدیگر متصل می شوند، باید ولتاژ و جریان استاتور همه ماشین ها دارای یک فرکانس باشند و سرعت مکانیکی هر یک با این فرکانس، هماهنگ باشد. از این رو رتور تمام ماشین های سنکرون به هم پیوسته، باید با یکدیگر سنکرونیزه باشد.

ترکیب فیزیکی (توزیع فضایی) سیم پیچ های آرمیچر استاتور به گونه ای است که جریان های متغیر با زمانی که از سیم پیچ های سه فاز عبور می کنند، در حالت ماندگار میدان مغناطیسی دوار را ایجاد می کنند که با سرعت رتور می چرخد. میدان های رتور و استاتور بر یکدیگر تاثیر می گذارند و از اینکه دو میدان سعی می کنند در یک جهت قرار گیرند، گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد می شود. در یک ژنراتور، این گشتاور با جهت حرکت رتور مقابله می کند به گونه ای که لازم است گشتاوری مکانیکی به وسیله توربین اعمال شود تا چرخش رتور همچنان حفظ گردد.

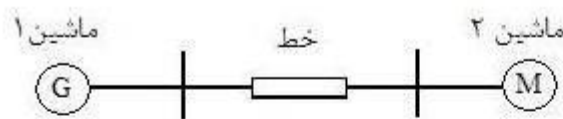
گشتاور (یا توان) الکتریکی خروجی ژنراتور تنها زمانی تغییر می کند که گشتاور ورودی مکانیکی که به وسیله محرک اعمال می شود، تغییر نماید. تاثیر افزایش گشتاور مکانیکی آن است که رتور را در وضعیت جدیدی قرار می دهد که نسبت به میدان دوار مغناطیسی استاتور جلو تر واقع می شود. یا بر عکس، کاهش گشتاور یا توان مکانیکی ورودی، رتور را عقب تر از میدان دوار مغناطیسی استاتور قرار می دهد. در حالت ماندگار، میدان رتور و میدان دوار حاصل از جریان های استاتور دارای سرعت مشابه هستند. با وجود این، مقداری اختلاف زاویه ای بین آنها وجود دارد که بستگی به گشتاور (توان) خروجی الکتریکی ژنراتور دارد.

در یک موتور سنکرون نقش گشتاور های الکتریکی و مکانیکی نسبت به آنچه که در ژنراتور وجود دارد، جابجا می شود. گشتاور الکتریکی چرخش را حفظ می کند حال آنکه بار مکانیکی با چرخش، مخالفت می کند. افزایش بار مکانیکی باعث عقب افتادن موقعیت رتور نسبت به میدان استاتور می شود.

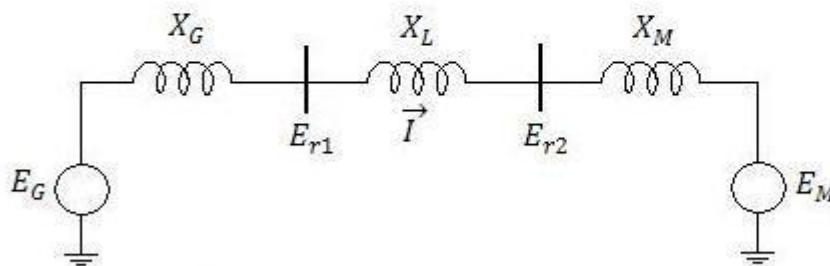
در بحث فوق دو واژه توان و گشتاور تواما استفاده شد. این مساله در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت رایج است زیرا که سرعت چرخشی متوسط ماشین ها ثابت است. هرچند که ممکن است تغییرات زود گذری، بالا و پایین سرعت سنکرون اتفاق افتد. در حقیقت مقادیر توان و گشتاور در مبنای واحد، تقریباً با هم مساوی است.

## 2-1-2 زاویه توان - زاویه

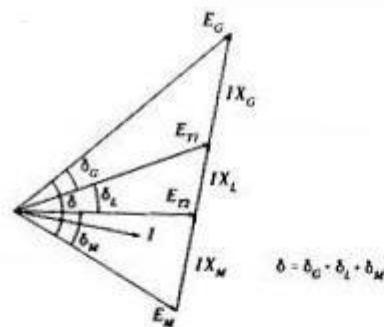
مشخصه مهمی که در خصوص پایداری سیستم قدرت اهمیت دارد رابطه بین توان مبادله شده و موقعیت زاویه ای رتور ماشین های سنکرون است. این رابطه به شدت غیر خطی است. برای نشان دادن موضوع سیستم شکل 2-1-الف را در نظر بگیرید. این سیستم شامل دو ماشین سنکرون است که از طریق خط انتقالی با راکتانس  $X_L$  به یکدیگر متصل شده اند. از مقاومت و ظرفیت خازنی خط صرف نظر شده است. فرض کنید که ماشین شماره 1 ژنراتور سنکرونی است که ماشین شماره 2 را، که یک موتور سنکرون است، تغذیه می کند. توان انتقال یافته از ژنراتور به موتور تابعی از زاویه  $\omega$  است که اختلاف زاویه بین رتور های دو ماشین را نشان می دهد. زاویه  $\omega$  خود از سه مولفه تشکیل شده است: یکی زاویه داخلی ژنراتور به نام  $\delta_G$  (که زاویه ای است که رتور ژنراتور نسبت به میدان حاصل از استاتور آن جلو تر است)، دیگری  $\delta_L$ ، اختلاف زاویه بین ولتاژ های پایانه ژنراتور و موتور (یعنی زاویه ای که میدان استاتور ژنراتور از میدان استاتور موتور جلو تر است) و دیگری  $\delta_M$ ، زاویه داخلی موتور (که زاویه ای است که رتور موتور نسبت به میدان حاصل از استاتور عقب تر است). شکل 2-1-ب مدلی از سیستم را نشان می دهد که به کمک آن می توان رابطه توان - زاویه را بدست آورد. برای هر ماشین مدل ساده ای شامل یک منبع داخلی ولتاژ و یک راکتانس موثر فرض شده است.



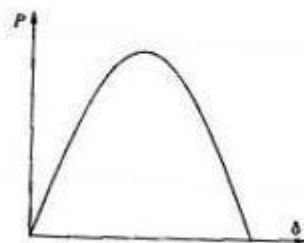
الف) نمودار تک خطی



ب) مدل ایده آل



ج) نمودار فازوری



د) منحنی توان-زاویه

شکل ۱-۲ مشخصه انتقال توان یک سیستم دو ماشینه

مقدار راکتانس ماشین، بستگی به نوع مطالعه ای دارد که در پی آن هستیم. برای مطالعه حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشین را به همراه ولتاژ تحریک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کار برد.

نمودار فازوری که ارتباط بین ولتاژها را نشان می دهد در شکل ۱-۲-ج نشان داده شده است. توان انتقالی از ژنراتور به موتور برابر است با:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (1-2)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad \text{که:}$$

رابطه توان- زاویه در شکل 2-1 د رسم شده است. با مدل های نسبتا ایده آلی که برای ماشین ها فرض شد، رابطه بدست آمده به صورت سینوسی است که رابطه ای کاملا غیر خطی را نشان می دهد. با مدل های دقیق تر ماشین، که تاثیر سیستم های تحریک (تنظیم کننده های خود کار ولتاژ) را نیز در نظر گرفته، رابطه توان- زاویه به میزان زیادی از حالت سینوسی خارج می شود اما به هر حال شکل کلی آن باز هم مشابه است.

زمانی که زاویه صفر است هیچ توانی مبادله نمی شود. هر چه زاویه افزایش داده شود توان نیز افزایش می یابد تا به حداکثر خود برسد. اگر زاویه از  $90^\circ$  بیشتر شود، توان کاهش می یابد. از این رو در حالت ماندگار می توان حداکثر توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار این توان مستقیما با ولتاژهای داخلی ژنراتور و موتور و به طور معکوس با مجموع راکتانس های هر دو ماشین و خط انتقال، متناسب است.

زمانی که بیش از دو ماشین وجود داشته باشد، موقعیت نسبی رتور ها نسبت به هم بر تبادیل توان به طور مشابهی تاثیر می گذارد. با وجود این، مقادیر حداکثر توان های مبادله شده و اختلاف زوایا تابعی پیچیده از توزیع، تولید و بار است. اختلاف زاویه  $90^\circ$  بین هر دو ماشین (که در مورد حالت دو ماشین محدود کننده بود) به خودی خود هیچ اهمیت مشخصی ندارد.

## 2-1-3 پدیده پایداری

پایداری حالت تعادل بین نیرو های متضاد را نشان می دهد. مکانیزمی که به وسیله آن ماشین های سنکرون به هم پیوسته حالت سنکرون را بین یکدیگر حفظ می کنند از طریق نیرو های بازیافت است که، زمانی عمل می نماید که نیرو هایی وجود داشته باشد تا یک یا چند ماشین را نسبت به سایر ماشین ها شتاب مثبت یا منفی دهد. در حالت ماندگار، تعادل بین گشتاور مکانیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می ماند. اگر سیستم دستخوش تغییر شود این تعادل از بین می رود و در نتیجه رتور ماشین ها بر اساس قوانین حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت یا منفی پیدا می کنند. اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به دیگری سریع تر بچرخد، موقعیت زاویه ای رتور آن نسبت به ماشین کند تر، جلو تر قرار می گیرد. بسته به رابطه توان- زاویه، اختلاف زاویه بین رتور دو ماشین باعث می شود تا بخشی از بار ماشین کند به ماشین تند منتقل شود. این موضوع سبب می شود که اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف زاویه رتور ها کاهش یابد. همچنان که ذکر شد، رابطه توان- زاویه به شدت غیر خطی است. بالاتر از حد مشخصی، افزایش در اختلاف زاویه، باعث کاهش در توان مبادله شده می شود. این موضوع سبب می شود که اختلاف زاویه باز هم بیشتر شود و منجر به ناپایداری گردد. در هر وضعیت به خصوص، پایداری سیستم به این بستگی دارد که آیا انحرافات زوایای رتور ماشین ها منجر به گشتاور های بازیافت کافی می شود یا خیر. زمانی که یک ماشین سنکرون، حالت سنکرونیزه یا هماهنگ خود با سایر ماشین ها را از دست داد، رتور آن در سرعتی بالاتر یا پایین تر از سرعتی که برای تولید ولتاژ در فرکانس سیستم لازم است، می چرخد. لغزش بین میدان دوار استاتور (مربوط به فرکانس سیستم) و تحریک رتور منجر به تغییرات بزرگی در توان خروجی، جریان و ولتاژ می شود. این موضوع باعث می شود که سیستم های حفاظتی، ماشین ناپایدار را از سیستم جدا کنند.

از دست رفتن حالت سنکرونیزه ممکن است بین یک ماشین و بقیه سیستم یا بین گروهی از ماشین ها اتفاق افتد. در حالت دوم، ممکن است بعد از جدایی گروهها از یکدیگر، حالت سنکرونیزه بین ماشین های هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونیزه ماشین های سنکرون به هم پیوسته را می توان به مجموعه ای از خودرو هایی تشبیه کرد که به کمک تسمه های لاستیکی به یکدیگر متصل شده اند و در یک مسیر دایره وار می چرخند. رتور ماشین های سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبیه شده است. زمانی که خودرو ها با یکدیگر هممنوا و هم سرعت باشند تسمه های لاستیکی دست نخورده باقی می ماند. زمانی که نیروی یکی از خودرو ها افزایش یابد، سرعت آن نیز موقتا افزایش می یابد. این موضوع باعث می شود که تسمه متصل به آن کش بیاید که در نتیجه سرعت آن کاهش و سرعت سایر خودرو ها افزایش می یابند. به این ترتیب عکس العملی زنجر وار اتفاق می افتد تا مجددا تمام خودرو ها در سرعت مشابه ادامه طریق دهند. اگر نیروی وارده به یکی از تسمه ها از حد توانایی آن بیشتر شود، پاره می شود و باعث می شود که یک یا چندین خودرو از سایر خودرو ها جدا شوند.

در سیستم های قدرت می توان با بروز اغتشاش، تغییرات گشتاور الکتریکی یک ماشین سنکرون را، به دو مولفه تجزیه کرد:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2-2)$$

که  $T_s \Delta \delta$  مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویه رتور،  $\Delta \delta$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفه گشتاور سنکرون کننده یاد می شود.  $T_s$ ، ضریب گشتاور سنکرون کننده است.  $T_D \Delta \omega$  مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات سرعت،  $\Delta \omega$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفه گشتاور میرا کننده یاد می شود.  $T_D$ ، نیز ضریب گشتاور میرا کننده است.

پایداری سیستم بستگی به وجود هر دو مولفه گشتاور برای هر ماشین سنکرون دارد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری از طریق رانش غیر نوسانی زاویه رتور می شود. از طرف دیگر، کمبود گشتاور میرا کننده هم منجر به ناپایداری نوسانی می شود.

به منظور سهولت در امر بررسی پایداری و کسب نگرشی مفید بر طبیعت مسائل پایداری، مناسب است که پدیده پایداری زاویه رتور را بر حسب دو طبقه بندی ذیل، تقسیم کرد:

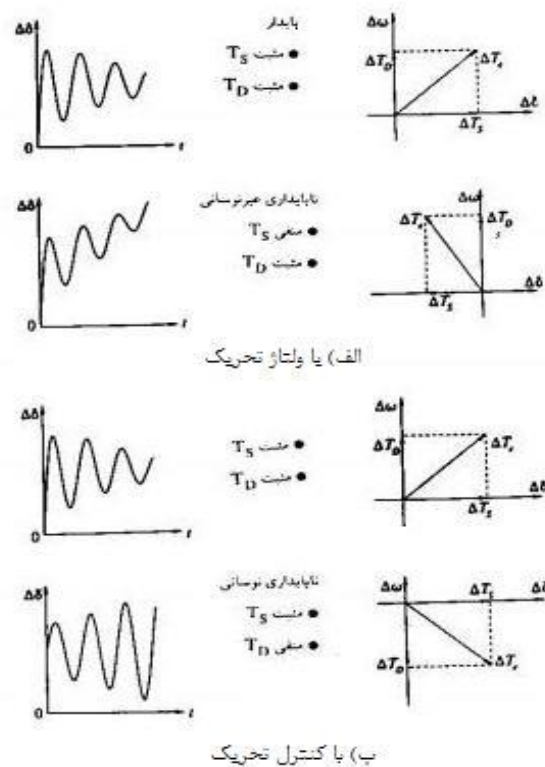
الف) پایداری اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک، توانایی سیستم را برای حفظ حالت سنکرونیزه در اثر اغتشاش های کوچک نشان می دهد. این اغتشاش ها به علت تغییرات کوچک بار و تولید، دائما اتفاق می افتد. اغتشاش ها را می توان به اندازه کافی کوچک به حساب آورد تا اجازه خطی کردن معادلات سیستم را برای بررسی پایداری داشته باشیم. ناپایداری که ممکن است اتفاق بیفتد می تواند به دو صورت باشد: یکی اینکه زاویه رتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده دائما افزایش یابد و دیگری حالتی که به علت کمبود توان میرا کننده، نوسان های رتور با دامنه در حال افزایش اتفاق افتد. عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطه کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به یک سیستم قدرت برگ متصل است، ناپایداری در غیاب تنظیم کننده های خودکار ولتاژ (AVR) (یعنی با ولتاژ تحریک ثابت)، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می افتد. این مسئله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل 2-2 الف می شود. با وجود تنظیم کننده خودکار ولتاژ زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پایدار است که اطمینان حاصل شود نوسان های سیستم میرایی کافی دارند. ناپایداری معمولا خود را به صورت

نوسان هایی با دامنه در حال افزایش نشان می دهد. شکل 2-2- ب عکس العمل سیستم را با وجود تنظیم کننده خودکار ولتاژ به تصویر کشیده است.

در سیستم های قدرت امروزی، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتاً به علت کمبود میرایی نوسان ها اتفاق می افتد. پایداری انواع نوسان های زیر مورد توجه است:

- مد های محلی یا مد های ماشین- سیستم که مربوط به نوسان های واحد های یک نیروگاه نسبت به بقیه سیستم قدرت است. واژه محلی به این دلیل استفاده می شود که نوسان ها به یک نیروگاه یا بخشی کوچک از سیستم قدرت محدود می شود.

- مد های بین ناحیه ای که مربوط به نوسان های تعدادی ماشین سنکرون در یک بخش سیستم نسبت به ماشین های سنکرون سایر بخش هاست. این مد ها زمانی اتفاق می افتد که دو یا چند بخش که هر بخش از تعدادی ماشین سنکرون کاملاً نزدیک به هم متصل تشکیل شده است، به وسیله خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل شده باشند.



شکل 2-2- ۲-۲ طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک

- مد های کنترلی که مربوط به کنترل گر های نیروگاه و سایر کنترل گر هاست. معمولاً در صورتی که سیستم های تحریک، گاورنر ها، کنورتور های HVDC و جبرانگر های استاتیکی توان راکتیو (SVC)، بد تنظیم شده باشند، ناپایداری این گونه مد ها اتفاق می افتد.

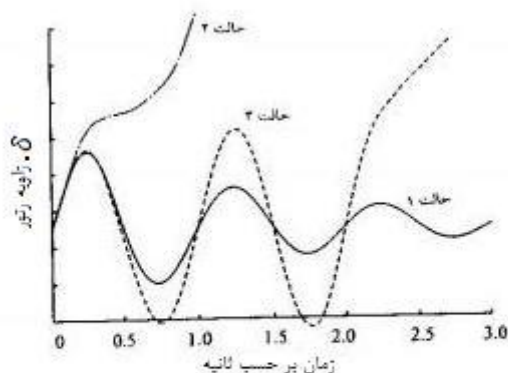


- مد های پیچشی که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین- ژنراتور است. ناپایداری این مد ها ممکن است به علت تاثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترل گر های HVDC و خطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده اند، اتفاق افتد.

ب) پایداری گذرا، توانایی سیستم را به منظور حفظ حالت سنکرونیزه در اثر بروز یک اغتشاش شدید گذرا نشان می دهد. عکس العمل سیستم شامل تغییرات بزرگ زاویه رتور ژنراتور است و از رابطه غیر خطی توان- زاویه تاثیر می پذیرد. پایداری، هم به نقطه کار اولیه سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. معمولا در این حالت، سیستم دستخوش تغییر می شود به گونه ای که نقطه کار حالت ماندگار سیستم بعد از اغتشاش با نقطه کار قبل از اغتشاش متفاوت است.

در سیستم ممکن است اغتشاش هایی با شدت درجات و احتمال وقوع بسیار متفاوت روی دهد. با وجود این، سیستم به گونه ای طراحی می شود که در مقابل مجموعه ای از پیشامد های برگزیده، پایدار بماند. این پیشامد های، عموما اتصال کوتاه فاز به زمین، فاز به فاز و سه فاز است. معمولا اتصال کوتاه را روی خط انتقال فرض می کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شین یا ترانسفورماتور نیز در نظر گرفته می شود. فرض می شود که به وسیله کلید زنی لازم، بخشی که تحت تاثیر خطا واقع شده از بقیه سیستم جدا می گردد. در بعضی شرایط می توان باز بست سریع را فرض کرد.

شکل 2-3 رفتار ماشین سنکرون را در وضعیت های پایدار و ناپایدار نشان می دهد. این شکل، عکس العمل زاویه رتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می دهد. در حالت پایدار (حالت 1)، زاویه رتور ابتدا افزایش یافته، به حداکثر خود می رسد و سپس کاهش یافته و با دامنه در حال کاهش به صورت نوسانی در می آید تا اینکه به حالت ماندگار می رسد. در حالت 2، زاویه رتور به طور پیوسته و یکنوا افزایش می یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. این شکل ناپایداری موسوم به ناپایداری اولین نوسان است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ایجاد می شود. در حالت 3، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنه نوسان ها تدریجا ناپایدار می شود. این شکل ناپایداری عموما زمانی اتفاق می افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه سیگنال کوچک ناپایدار است و لزوما به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی افتد.



شکل 2-3 پاسخ زاویه رتور به یک اغتشاش گذرا

در سیستم های قدرت بزرگ، ممکن است ناپایداری گذرا همیشه به صورت ناپایداری اولین نوسان بروز نکند بلکه می تواند به علت جمع آثار چندین مد نوسانی باشد که باعث تغییرات شدید زاویه رتور بعد از اولین نوسان می شود. در مطالعات پایداری گذرا، زمان مطالعه معمولاً محدود به 3 تا 5 ثانیه بعد از اغتشاش می شود هر چند که ممکن است برای سیستم های بسیار بزرگ با مد های نوسانی بین ناحیه غالب، این زمان به 10 ثانیه هم برسد.

از واژه پایداری دینامیکی نیز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پایداری زاویه رتور یاد شده است. با وجود این، نویسندگان مختلف از این واژه برای جنبه های متفاوت پدیده استفاده کرده اند.

## 2-2 پایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شین های سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از این که تحت یک اغتشاش قرار گرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار، یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تامین توان راکتیو مورد تقاضاست. قلب مسئله معمولاً افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانس های خطوط انتقال ایجاد می گردد.

یکی از معیار های پایداری ولتاژ آن است که در وضعیت کاری خاصی، در هر شین سیستم و در زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، دامنه ولتاژ نیز افزایش یابد. سیستم، از دید ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل برای یک شین سیستم، افزایش توان راکتیو تزریقی به آن ( $Q$ )، باعث کاهش دامنه ولتاژ آن ( $V$ ) شود. به عبارت دیگر سیستمی از نظر ولتاژ پایدار است که حساسیت  $V-Q$  آن برای هر شین مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود.

افت فزاینده در ولتاژ شین ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویه رتور نیز صورت پذیرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدریجی حالت سنکرونیزه ماشین ها، زمانی که زوایای رتور بین دو گروه از ماشین ها به  $180^\circ$  نزدیک شده یا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژهای بسیار پایین در نقاط واسطه ای از شبکه می شود. در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ که مربوط به ناپایداری ولتاژ است زمانی اتفاق می افتد که از نظر پایداری زاویه رتور مشکلی وجود نداشته باشد.

اساساً ناپایداری ولتاژ یک پدیده محلی است. با وجود این، آثار آن ممکن است تاثیر فراگیر داشته باشد. فروپاشی ولتاژ پدیده ای پیچیده تر از ناپایداری ساده ولتاژ است و معمولاً اثر رشته ای از حوادث ناپایداری ولتاژ است که منجر به ولتاژ پایین در بخش عمده ای از سیستم قدرت می شود.

ناپایداری ولتاژ ممکن است به صورت های مختلفی بروز کند. در ساده ترین شکل، موضوع را می توان با توجه به شبکه ساده شکل 2-4 نشان داد. این شبکه شامل یک منبع ثابت ولتاژ ( $E_S$ ) است که باری ( $Z_{LD}$ ) را از طریق یک امپدانس سری ( $Z_{LN}$ ) تغذیه می کند. این شبکه نمونه ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیه ای از بار ها به وسیله یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می شود. جریان  $\tilde{I}$  در شکل 2-4 برابر است با:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_S}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}} \quad (2-3)$$

که  $\vec{E}_S$  و  $\vec{I}$  مقادیر فازوری هستند و داریم:

$$\vec{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta, \quad \vec{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \Phi$$

دامنه جریان برابر است با:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \Phi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \Phi)^2}}$$

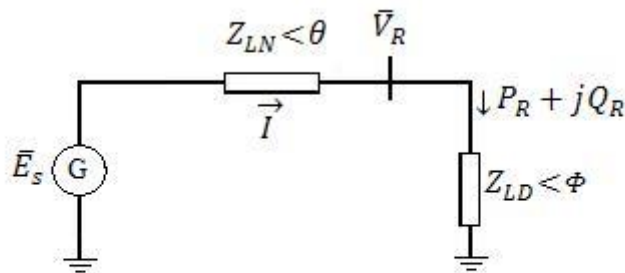
که این رابطه را به صورت زیر هم می توان بیان کرد:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad (2-4)$$

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \Phi) \quad \text{که:}$$

دامنه ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با:

$$V_R = Z_{LD} I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad (5-2)$$

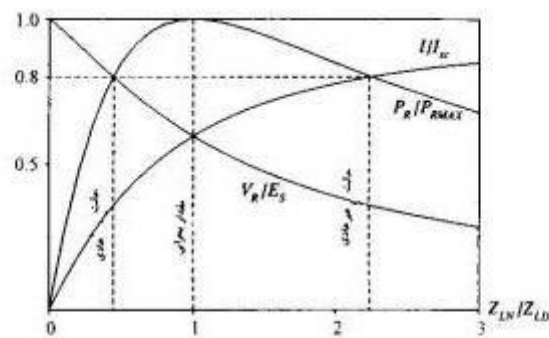


شکل ۲-۴ یک سیستم ساده شعاعی برای نشان دادن پدیده پایداری ولتاژ

و توان حقیقی بار برابر است با:

$$P_R = V_R I \cos \Phi = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}}\right)^2 \cos \Phi \quad (6-2)$$

نمودار  $I$ ،  $V_R$ ،  $P_R$  بر حسب  $Z_{LN}/Z_{LD}$  برای حالتی که  $\tan \theta = 0.0$  و  $\cos \Phi = 0.95$  است در شکل ۲-۵ رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار  $Z_{LN}$  به کار برد، مقادیر  $I$ ،  $V_R$  و  $P_R$  به طور مناسبی نرمالیزه شده اند.



شکل ۲-۵ ولتاژ، جریان و توان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای بار

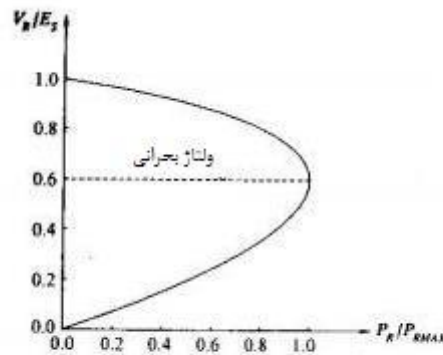
برای شکل ۲-۴

اگر با کاهش  $Z_{LD}$  بار مورد تقاضا را افزایش دهیم،  $P_R$  قبل از رسیدن به یک حداکثر ابتدا سریعاً و سپس کندتر افزایش می یابد و بعد از آن شروع به کاهش می کند. از این رو مقدار حداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طریق یک امپدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط، از نظر مقداری مساوی  $Z_{LN}$  باشد؛ یعنی زمانی که  $Z_{LN}/Z_{LD} = 1$  است. زمانی که  $Z_{LD}$  رفته رفته کاهش می یابد،  $I$  زیاد می شود و  $V$  کم می گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ  $Z_{LD}$ ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه  $P_R$ ،  $Z_{LD}$  سریعاً افزایش می یابد. زمانی که  $Z_{LD}$  به  $Z_{LN}$  نزدیک شد، تاثیر کاهش در  $I$  فقط کمی بیشتر از تاثیر کاهش در  $V_R$  است. زمانی که  $Z_{LD}$  کمتر از  $Z_{LN}$  باشد، کاهش در  $Z_{LN}$  بر افزایش در  $I$  غالبی شود که در نتیجه، تاثیر خالص آن، کاهش  $P_R$  است.

حالت بحرانی کاری که در آن توان حداکثر است، حد بهره برداری قابل قبول را نشان می دهد. در تقاضای بیشتر بار، کنترل توان به وسیله تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد، یعنی کاهش امپدانس بار منجر به کاهش توان می شود. این که آیا ولتاژ به طور فزاینده ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امپدانس ثابت سیستم، در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می شود. از طرفی اگر مشخصه بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فروپاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می شود. با مشخصه های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه های خط انتقال و بار تعیین می گردد. اگر بار به و سیله ترانسفورماتورهای با وجود تغییر دهنده خود کار تپ زیر بار ( $ULTC$ ) تغذیه شود، تغییر دهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می شود که  $Z_{LD}$  موثر از دیدگاه سیستم کاهش یابد که خود باعث می شود  $V_R$  باز هم کاهش یابد و سرانجام منجر به کاهش فزاینده ولتاژ شود. این موضوع شکل ساده و خالص ناپایداری ولتاژ است.

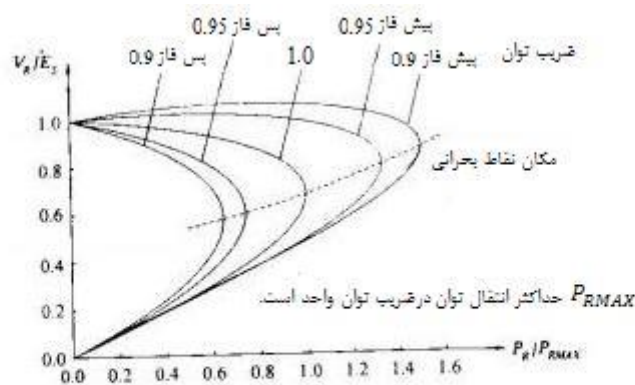
از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطه بین  $P_R$  و  $V_R$  مورد توجه است. این رابطه در شکل ۲-۶ برای سیستم مورد مطالعه، زمانی که ضریب توان بار مساوی 0/95 پس فاز است، نشان داده شده است.

با توجه به معادلات ۲-۵ و ۲-۶، ضریب توان تاثیر مهمی بر مشخصه توان-ولتاژ سیستم دارد. این موضوع، منطقی است زیرا افت ولتاژ در خط انتقال تابعی هم از توان حقیقی و هم از توان راکتیو انتقالی است. پایداری ولتاژ در حقیقت به روابط بین  $P$ ،  $Q$  و  $V$  بستگی دارد.



شکل ۲-۶ مشخصه های توان-ولتاژ سیستم شکل ۲-۴

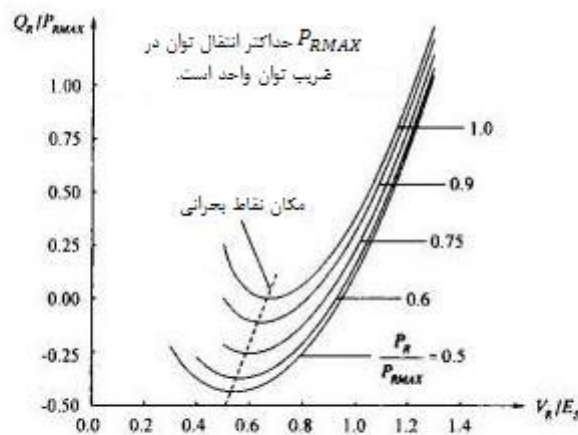
صورت های مرسوم جهت نمایش این ارتباط ها در شکل های ۲-۷ و ۲-۸ نشان داده شده است. شکل ۲-۷ منحنی های  $V_R - P_R$  را برای مقادیر مختلف ضریب توان در سیستم قدرت شکل ۲-۴ نشان می دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولاً تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می دهد. کاهش ناگهانی در ضریب توان (افزایش  $Q_R$ ) می تواند سیستم را از حالت کاری پایدار به یک حالت کاری غیر قابل قبول و احتمالاً ناپایدار (در محدوده پایین منحنی ها) سوق دهد.



شکل ۲-۷ مشخصه های  $V_R - P_R$  مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با ضریب های مختلف بار

تاثیر مشخصه های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیزات جبرانگر) بیشتر در شکل ۲-۸ نمایان است. این شکل مجموعه ای از منحنی ها برای سیستم قدرت شکل ۲-۴ است که هر منحنی رابطه بین  $V_R$  و  $Q_R$  را برای یک  $P_R$  ثابت نشان می دهد. سیستم در محدوده ای که مشتق  $dQ_R/dV_R$  مثبت است، پایدار است. حد پایداری ولتاژ (نقطه بحرانی) زمانی فرا می رسد که مشتق صفر باشد. از این رو بخشی از منحنی ها که در طرف راست نقطه حداقل قرار دارد، نمایانگر محدوده عملکرد پایدار و بخش طرف چپ نمایانگر محدوده ناپایدار است. عملکرد پایدار در محدوده ای که  $dQ_R/dV_R$  منفی است، فقط زمانی قابل کسب است که یک جبرانگر قابل تنظیم توان راکتیو با محدوده کافی کنترلی با بهره  $Q/V$  بالا و با پلاریته عکس حالت عادی، در دسترس باشد.

شرح فوق در خصوص پدیده پایداری ولتاژ، ابتدایی است و هدف کمک به طبقه بندی و درک جنبه های متفاوت پایداری سیستم قدرت است. بررسی، محدود به یک سیستم شعاعی شد که تصویری ساده و در عین حال گویا از مسئله پایداری ولتاژ را نشان می دهد. در یک سیستم عملی پیچیده قدرت، عوامل زیادی به فرایند فروپاشی ولتاژ سیستم در اثر ناپایداری ولتاژ کمک می کنند؛ از جمله قوت سیستم انتقال، مشخصه های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتور ها و مشخصه های تجهیزات جبرانگر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسئله با عملکرد ناهماهنگ سیستم های گوناگون حفاظتی و کنترل، ترکیب می شود.



شکل ۸-۲ مشخصه های  $V_R - Q_R$  مربوط به سیستم شکل ۴-۲ با نسبت های مختلف  $P_R/P_{RMAX}$

به منظور بررسی، مناسب است که پایداری ولتاژ را به دو طبقه ذیل تقسیم نمود:

الف) پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش های بزرگ از جمله خطای سیستم، از دست دادن تولید یا پیشامد های خطوط است. این توانایی به وسیله مشخصه های بار سیستم و تاثیر متقابل سیستم های کنترلی و حفاظت پیوسته و گسسته مشخص می شود. تعیین پایداری اغتشاش بزرگ، مستلزم آن است که عملکرد غیر خطی دینامیکی سیستم در محدوده زمانی کافی که تاثیر متقابل تجهیزاتی از قبیل تغییر دهنده ای تپ زیر بار (ULTC) و محدود کننده های جریان تحریک ژنراتور مشخص می شود تعیین می گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانیه تا چندین دقیقه طول بکشد. از این رو شبیه سازی دینامیکی بلند مدت برای بررسی مسئله ضروری است. معیاری جهت پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ آن است که به دنبال بروز اغتشاش و بعد از عمل کنترل کننده های سیستم، ولتاژ تمام شین ها به سطوح ماندگار قابل قبول برسد.

ب) پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش های کوچک، مثلاً تغییرات کوچک در بار سیستم است. این نوع پایداری به کمک مشخصه های بار، کنترل کننده های پیوسته و کنترل کننده های گسسته در یک لحظه زمانی مشخص، تعیین می گردد. این مفهوم مشخص می کند که در هر زمان سیستم چگونه در مقابل اغتشاش های کوچک، عکس العمل نشان می دهد.

فرایند های اصلی که به پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ کمک می کند اساساً دارای طبیعت حالت ماندگار هستند. از این رو می توان به طور موثر از بررسی استاتیکی برای تعیین حاشیه پایداری، عوامل موثر بر پایداری و مطالعه تاثیر

محدوده وسیعی از وضعیت های سیستم و تعداد زیادی سناریو که به دنبال پیشامد ها و اغتشاشات رخ می دهد، استفاده کرد.

معیاری جهت پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ آن است که در یک حالت کاری مشخص، دامنه ولتاژ هر شین سیستم، از نظر ولتاژ ناپایدار است اگر حداقل در یک شین سیستم، دامنه ولتاژ ( $V$ ) زمانی که توان راکتیو تزریقی ( $Q$ ) به آن افزایش می یابد، کم می شود. به عبارت دیگر سیستم از نظر ولتاژ، پایدار است اگر حساسیت  $V-Q$  برای هر شین، مثبت و ناپایدار است اگر حساسیت  $V-Q$  حداقل برای یک شین منفی باشد.

ناپایداری ولتاژ همیشه به شکل خالص خود بروز نمی کند، اغلب، ناپایداری ولتاژ و زاویه با یکدیگر تداخل می کنند. ناپایداری از یک نوع ممکن است به ناپایداری از نوع دیگر منجر شود و تفکیک، واضح و روشن نباشد. با وجود این، تفکیک مهم است زیرا به دنبال درک و تعیین عوامل موثر بر مسئله است که می توان روش های مناسب بهره برداری و طراحی را برگزید.

## 2-3 پایداری میان مدت و بلند مدت

واژه های پایداری بلند مدت و میان مدت در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت نسبتاً جدید هستند. این واژه ها به دنبال نیاز به بررسی عکس العمل دینامیکی سیستم قدرت در حالاتی که سیستم دستخوش آشفتگی های شدید می شود مطرح شده اند. آشفتگی های شدید در سیستم منجر به تغییرات بزرگی در ولتاژ، فرکانس و توان های انتقالی می شود و فرایند ها، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی کند را که در مطالعات سنتی پایداری گذرا مدل نمی شوند به عکس العمل وا می دارد. مشخصه های زمانی این فرایند ها و تجهیزات که در اثر تغییرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحریک می شوند از محدوده چند ثانیه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی ژنراتور) تا چند دقیقه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل سیستم های تامین انرژی چرخاننده ها و تنظیم کننده های بار- ولتاژ) متغیر است.

در پایداری بلند مدت فرض می شود که نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون، میرا شده است و در نتیجه فرکانس یکنواختی در کل سیستم برقرار است. در اینجا تاکید بر پدیده های کندتر و بلند مدت تر است که همراه با آشفتگی های شدید سیستم و در نتیجه عدم تطابق زیاد و طولانی بین تولید و مصرف توان های حقیقی و راکتیو است. پدیده ها شامل عکس العمل دینامیکی دیگ های بخار واحد های حرارتی، عکس العمل دینامیکی آب گذر و کانال آب واحد های آبی، کنترل خودکار تولید، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی نیروگاهها و سیستم انتقال، اشباع در ترانسفورماتور و تاثیرات فرکانس غیر اسمی بر بار و شبکه است.

عکس العمل میان مدت نمایشگر انتقال بین عکس العمل های کوتاه مدت و بلند مدت است. در مطالعات پایداری میان مدت تاکید بر نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون و از جمله تاثیر بعضی از پدیده های کندتر و احتمالاً تغییرات شدید ولتاژ با فرکانس است. از نظر زمانی بازه های نوعی به صورت زیر است:

- کوتاه مدت یا گذرا : صفر تا 10 ثانیه

- میان مدت : 10 ثانیه تا چند دقیقه



- بلند مدت : چندین دقیقه تا چندین ده دقیقه

باید خاطر نشان کرد که تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت عمدتاً بر اساس پدیده های مورد بررسی و مدل سازی مورد استفاده سیستم به خصوص با توجه به نوسان های زود گذر و بین ماشینی و نه با توجه به دوره زمانی مورد نظر صورت می پذیرد. به طور کلی مسائل پایداری بلند مدت و کوتاه مدت مربوط به نقص در عکس العمل تجهیزات، هماهنگی ضعیف بین سیستم های کنترلی و حفاظتی یا کمبود ذخیره توان های حقیقی و راکتیو اتفاق می افتد.

پایداری بلند مدت معمولاً مربوط به عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگی است که از محدوده معیار های طراحی معمولی سیستم خارج است. این موضوع ممکن است به وقفه های متوالی و پارگی سیستم به چندین زیر سیستم منجر شود که در هر زیر سیستم، ژنراتور ها در حالت سنکرونیزه باقی بمانند. مفهوم پایداری در این حالت آن است که آیا هر زیر سیستم به حالت قابل قبول تعادلی با حداقل بار زدایی می رسد یا خیر. این موضوع از عکس العمل کلی زیر سیستم با توجه به فرکانس متوسط آن و نه با توجه به حرکت نسبی بین ماشین های سنکرون، تعیین می شود. در بدترین وضع، ممکن است عکس العمل تجهیزات حفاظتی سیستم و واحد ها وضعیت را باز هم بدتر کند و فروپاشی زیر سیستم یا بخشی از آن رخ دهد.

کاربرد های دیگر بررسی پایداری بلند مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است که نیازمند به شبیه سازی تاثیر تغییر دهنده های تپ ترانسفورماتور ها، حفاظت فوق تحریک ژنراتور ها، حدود منابع توان راکتیو و بار های ترموستاتی است. در این حالت، کمتر احتمال دارد که نوسان های بین ماشین های سنکرون مهم باشد. با وجود این باید دقت کرد که از بعضی عکس العمل های دینامیکی سریع چشم پوشی نکرد.

در خصوص بررسی پایداری بلند مدت و میان مدت تجربه و مطالعه به صورت محدود انجام گرفته است. همچنان که بر تجربه ها افزوده گردد و روش های بهبود یافته در خصوص شبیه ساز عکس العمل های دینامیکی کند و سریع مطرح شود، تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت اهمیت کمتری پیدا می کند.

## 2-4 طبقه بندی پایداری

پایداری سیستم قدرت یک مسئله منفرد است اما عملی نیست که آن را بدین صورت مطالعه کرد. همچنان که در بخش قبل مطرح گردید، ناپایداری یک سیستم قدرت می تواند شکل های مختلفی داشته باشد و از عوامل گوناگونی تاثیر پذیرد. با طبقه بندی مناسب پایداری می توان بررسی مسائل مربوطه، تشخیص عوامل اصلی سهم بر ناپایداری و ایجاد روش های بهبود عملکرد پایداری سیستم را تا حد زیادی تسهیل بخشید. این طبقه بندی بر اساس نکات زیر صورت می پذیرد:

- طبیعت فیزیکی ناپایداری حاصل

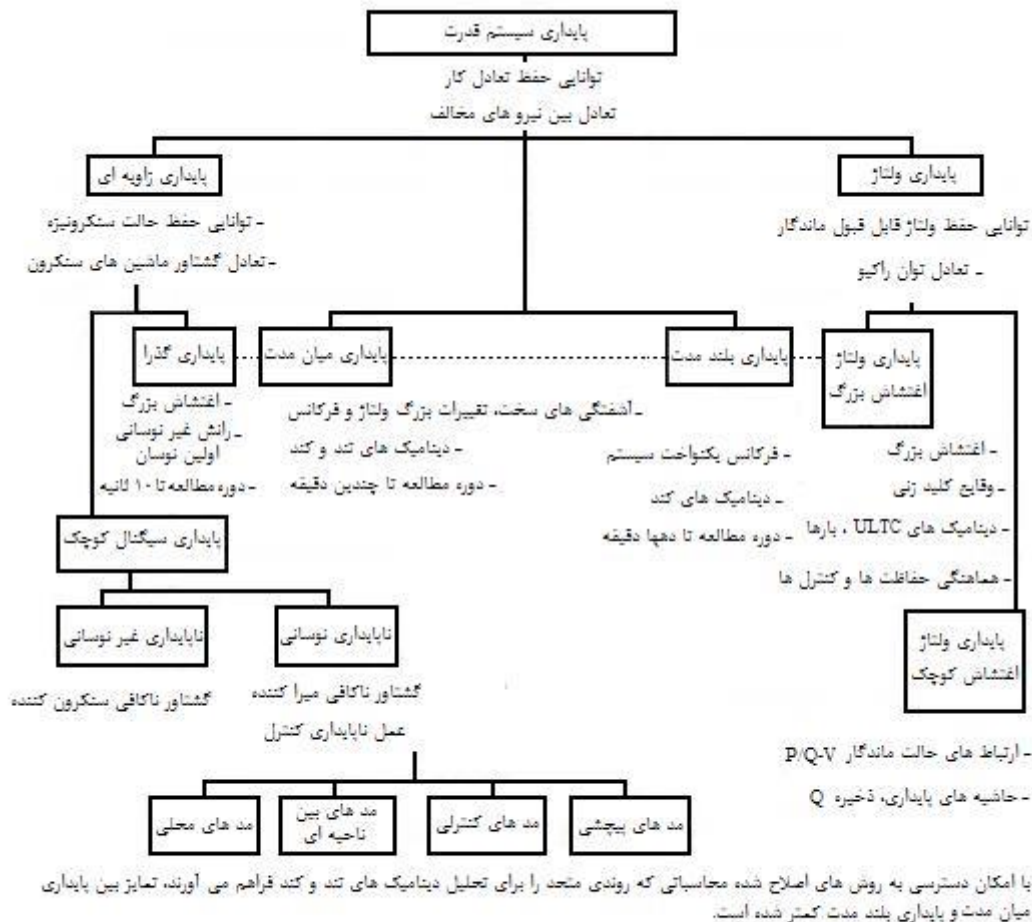
- اندازه اغتشاش موجود

- تجهیزات، فرایند ها و محدوده زمانی که برای تعیین پایداری لازم است مورد توجه قرار گیرند.



- مناسب ترین روش محاسبه و پیش بینی پایداری

شکل 2-9 کلی مسئله پایداری سیستم قدرت را به تصویر کشیده است که در آن طبقات و زیر



طبقه ها بر اساس آنچه که در بخش قبلی بیان گردید، مشخص شده اند. از بعد عملی، طبقه بندی بر اساس نکات متنوعی انجام گرفته که مرزبندی مشخص را بین طبقات و تعیین تعاریفی را که دقیق و در عین حال از دید عملی مفید باشند، مشکل می نماید. به عنوان مثال، همیشه نوعی همپوشانی بین پایداری میان مدت، بلند مدت و پایداری ولتاژ وجود دارد. با مدل سازی مناسب بارها، تغییر دهنده زیر بار با تپ ترانسفورماتورها و حدود توان راکتیو ژنراتورها، شبیه سازی پایداری میان مدت و بلند مدت، مناسب بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ نیز خواهد بود. به طور مشابه، همپوشانی بین پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدت موجود دارد. بدین صورت که از روش های محاسباتی مشابه برای پیش بینی عکس العمل غیر خطی زمانی سیستم در مقابل اغتشاشهای بزرگ استفاده می کنند. اگر چه این سه طبقه، مسئله پایداری را از جنبه های مختلف مورد توجه قرار می دهند، از دیدگاه محاسباتی و شبیه سازی، هر یک تعمیمی از دیگری است و مرز بندی مشخص، مشکل است.

هرچند که طبقه بندی پایداری سیستم قدرت، وسیله موثر و مناسبی در برخورد با پیچیدگی های موجود در مسئله است، اما باید همواره پایداری کلی سیستم را مد نظر داشت. حل مسئله پایداری یک طبقه نباید منجر به تاثیر منفی بر پایداری طبقه دیگر شود. این نکته، اساسی است که باید تمام جنبه های پدیده پایداری را مورد توجه قرار داد و هر جنبه را از بیش از یک دیدگاه بررسی کرد. لازمه این امر آن است که انواع روش های محاسباتی گوناگون ایجاد گردد و از آنها به صورت منطقی استفاده شود. در این صورت است که تا حدی، همپوشانی در پدیده مورد بررسی، مطلوب است.

## فصل سوم

### پایداری سیگنال - کوچک

فصل دوم مقدمه ای کلی بر پایداری سیستم قدرت، شامل مفاهیم اولیه، دسته بندی، و تعاریف عبارات مربوطه را ارائه کرد. اکنون طبقه بندی های مختلف پایداری سیستم را، با شروع این فصل بر روی پایداری سیگنال - کوچک، به تفصیل بررسی خواهیم کرد.

همچنان که در فصل دوم تعریف شد، پایداری سیگنال - کوچک توانایی سیستم قدرت در نگهداری سنکرونیزم است هنگامی که تحت اغتشاش های کوچک قرار گیرد. در این مفهوم، اغتشاش، کوچک در نظر گرفته می شود اگر بتوان به منظور تحلیل سیستم، معادلاتی که پاسخ حاصل از سیستم را توصیف می کنند، خطی کرد. ناپایداری نیز می تواند به دو صورت ظاهر شود: 1) افزایش ماندگار در زاویه رتور ژنراتور ناشی از فقدان گشتاور سنکرون کننده، 2) نوسان رتور با دامنه افزایشی ناشی از فقدان گشتاور میرا کننده کافی. در سیستم های قدرت موجود، مسئله ناپایداری سیگنال - کوچک با به کار گیری روش های خطی اطلاعات ارزشمندی را در خصوص مشخصه های دینامیکی ذاتی سیستم قدرت فراهم می کند که در طراحی سیستم بسیار مفید است.

این فصل جنبه های اساسی پایداری سیستم های دینامیکی را مرور کرده، روش های تحلیلی سودمندی را در مطالعه پایداری سیگنال - کوچک ارائه می کند، پس از نشان دادن مشخصه های مسائل پایداری سیگنال - کوچک، عوامل موثر بر آنها را شناسایی خواهد کرد.

## 3-1 مفاهیم اساسی پایداری سیستم های دینامیکی

## 3-1-1 نمایش فضای حالت

رفتار هر سیستم دینامیکی، مانند سیستم قدرت را می توان به کمک مجموعه ای از  $n$  معادله دیفرانسیل معمولی به صورت زیر توصیف کرد:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-3)$$

که در آن  $n$ ، مرتبه سیستم و  $r$  تعداد ورودیها است. این معادله را می توان با استفاده از نمایش بردار ماتریسی به صورت زیر نوشت:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2-3)$$

که در آن داریم:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

بردار ستونی  $x$ ، بردار حالت، و عناصر آن  $x_i$  متغیرهای حالت نامیده می شوند. بردار ستونی  $u$  بردار ورودی های سیستم است که سیگنال های خارجی هستند که بر عملکرد سیستم تاثیر می گذارند. زمان با  $t$  و مشتق زمانی متغیر حالت با  $\dot{x}$  نشان داده می شوند. اگر مشتقات متغیرهای حالت توابع صریحی از زمان نباشند، سیستم را خودگردان گویند. در این حالت، معادله 3-2 به صورت زیر ساده می شود:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3-3)$$

معمولاً ما به آن دسته از متغیرهای سیستم به عنوان متغیرهای خروجی علاقه مندیم که بتوان آنها را از روی سیستم مشاهده کرد. این متغیرها را می توان بر حسب متغیرهای حالت و ورودی به صورت زیر بیان کرد:

$$y = g(x, u) \quad (4-3)$$

که در آن:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix}$$

بردار ستونی  $y$  بردار خروجی ها، و  $g$  بردار توابع غیر خطی است که متغیرهای حالت و ورودی را به متغیرهای خروجی مرتبط می سازد.

## مفهوم حالت

مفهوم حالت در روش فضای حالت یک مفهوم اساسی است. حالت یک سیستم نشان دهنده مقدار حداقل اطلاعاتی درباره سیستم در هر لحظه زمان ( $t_0$ ) است که لازم است تا به کمک آن بتوان رفتار آینده آن را بدون مراجعه به ورودی قبل از  $t_0$  تعیین کرد.

می توان از هر مجموعه از  $n$  متغیر مستقل خطی سیستم برای توصیف حالت سیستم استفاده کرد. این متغیرها متغیرهای حالت نامیده می شوند که مجموعه حداقلی از متغیرهای دینامیکی را تشکیل می دهند و همراه با ورودی های سیستم، توصیفی کامل از رفتار سیستم را فراهم می آورند. متغیرهای دیگر سیستم را می توان از اطلاعات حالت مشخص کرد.

متغیرهای حالت ممکن است کمیت های فیزیکی سیستم مانند: زاویه، سرعت، ولتاژ باشند، و ممکن است فقط متغیرهای ریاضی مجرد، متناظر با معادلات دیفرانسیل توصیف کننده دینامیک سیستم باشند. انتخاب متغیرهای حالت منحصر به فرد نمی باشد. این بدان معنا نیست که حالت سیستم در هر زمان منحصر به فرد نیست بلکه بدین مفهوم است که نمایش اطلاعات حالت منحصر به فرد نمی باشد. هر مجموعه از متغیرهای حالت را که انتخاب کنیم، اطلاعات یکسانی درباره سیستم فراهم خواهند کرد. اگر سیستم را با تعداد متغیر حالتی بیش از مرتبه سیستم توصیف کنیم، همه آنها مستقل نخواهند بود.

حالت سیستم را می توان در یک فضای اقلیدسی  $n$  بعدی به نام فضای حالت نمایش داد. هنگامی که از مجموعه متفاوت دیگری از متغیرهای حالت برای توصیف سیستم استفاده می کنیم، در واقع یک سیستم مختصات متفاوت را انتخاب کرده ایم.

## نقطه تعادل (یا منفرد)

نقاط تعادل نقاطی هستند که در آن نقاط،  $\dot{x}_1$  و  $\dot{x}_2$  و ... و  $\dot{x}_n$  همزمان صفر می شوند. این نقاط، مکانهایی با سرعت صفر را بر روی مسیر تعریف می کنند. بنابراین سیستم در حالت استراحت است زیرا کلیه متغیرها ثابت و تغییرناپذیر با زمان هستند.

بنابراین نقطه منفرد یا تعادل، باید معادله زیر را برآورده سازد:

$$f(x_0) = 0 \quad (3-5)$$

که در آن  $x_0$  بردار حالت  $x$  در نقطه تعادل است.

اگر توابع  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) در معادله 3-3 خطی باشند، سیستم، خطی است. سیستم خطی تنها یک نقطه تعادل دارد (اگر ماتریس سیستم غیر منفرد باشد). اما یک سیستم غیر خطی ممکن است بیش از یک نقطه تعادل داشته باشد.

نقاط منفرد به خوبی مشخصه رفتار سیستم دینامیکی را بیان می کنند، و بنابراین می توانیم درباره پایداری سیستم از ماهیت این نقاط نتایجی را بدست آوریم.

## 3-1-2 پایداری سیستم دینامیکی

پایداری سیستم خطی، کاملاً از ورودی مستقل است و حالت یک سیستم پایدار با ورودی صفر، همواره مستقل از حالت اولیه کراندار، به مبدا فضای حالت باز خواهد گشت.

بر خلاف سیستم خطی، پایداری سیستم غیر خطی به نوع و اندازه ورودی، و حالت اولیه، بستگی دارد و باید این عوامل را در تعریف پایداری سیستم غیر خطی در نظر داشت.

در نظریه سیستم های کنترل، مرسوم است که پایداری سیستم غیر خطی را به صورت زیر، بسته به ناحیه فضای حالت که در آن بردار حالت تغییر می کند، دسته بندی کنند:

- پایداری محلی یا پایداری در جزء؛

- پایداری محدود؛

- پایداری جامع یا پایداری در کل؛

پایداری محلی

سیستم را حول نقطه تعادل پایدار محلی گویند اگر هنگامی که تحت اغتشاش هایی کوچک قرار گیرد، در داخل ناحیه ای کوچک حول نقطه تعادل باقی بماند. اگر با افزایش  $t$ ، سیستم به حالت اولیه باز گردد، آن را پایدار مجانبی در جزء می گویند.

باید توجه شود که در تعریف کلی پایداری محلی، به بازگشت حالت به حالت اولیه الزامی نیست و بنابراین، چرخه های حدی کوچک را نیز شامل می شود. در عمل معمولاً به پایداری مجانبی علاقه مند هستیم.

شروط پایداری محلی (به عبارت دیگر، پایداری تحت اغتشاش کوچک) را می توان با خطی سازی معادلات غیر خطی سیستم حول نقطه تعادل مورد نظر مطالعه کرد. این مطلب در بخش بعدی نشان داده شده است.

پایداری محدود

اگر حالت سیستمی درون یک ناحیه محدود  $R$ ، به نقطه تعادل اولیه باز گردد، پایدار مجانبی در داخل ناحیه محدود  $R$  خواهد بود.

پایداری جامع

سیستم را پایدار جامع گویند اگر  $R$  شامل کل فضای محدود باشد.

## 3-1-3 خطی سازی

اکنون روش خطی سازی معادله 3-3 را توصیف می کنیم. فرض کنید  $x_0$  بردار حالت اولیه و  $u_0$  بردار ورودی متناظر با نقطه تعادلی باشد که باید حول آن عملکرد سیگنال کوچک را بررسی کرد. از آنجایی که  $x_0$  و  $u_0$  معادله 3-3 را برآورده می سازند، داریم:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (6-3)$$

حال فرض کنید که سیستم را از حالت بالا به صورت زیر منحرف کنیم:

$$x = x_0 + \Delta x, u = u_0 + \Delta u$$

که در آن پیشوند  $\Delta$  نشان دهنده یک انحراف کوچک است.

در این صورت حالت جدید باید معادله 3-3 را برآورده سازد. از این رو داریم:

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (7-3)$$

از آنجا که انحراف کوچک فرض می شود، توابع غیر خطی  $f(x, u)$  را می توان بر حسب بسط سری های تیلور بیان کرد. با صرف نظر کردن از عباراتی که توان های مرتبه دوم و بالاتر از  $\Delta x$  و  $\Delta u$  را شامل می شوند، می توان نوشت:

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f_i[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)]$$

$$= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

از آنجا که  $\dot{x}_{i0} = f_i(x_0, u_0)$  است، نتیجه می شود:

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

که  $i=1, 2, \dots, n$  است. به طور مشابهی، از معادله 3-4 داریم:

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

که  $j=1, 2, \dots, m$  است. بنابراین، صورت خطی شده معادلات 3-3 و 4-3 عبارت است از:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (8-3)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (9-3)$$

که در آن داریم:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (10-3)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

مشتقات پاره ای بالا در نقطه تعادلی که حول آن، انحراف کوچک تحلیل می شود، محاسبه می گردد. در معادلات 3-8 و 3-9:

$\Delta x$ : بردار حالت  $n$  بعدی؛

$\Delta y$ : بردار خروجی  $m$  بعدی؛

$\Delta u$ : بردار ورودی  $r$  بعدی؛

$A$  ماتریس حالت دستگاه با اندازه  $n \times n$ ؛

$B$  ماتریس ورودی یا کنترل با اندازه  $n \times r$ ؛

$C$  ماتریس خروجی با اندازه  $m \times n$ ؛

و  $D$  ماتریس (پیش خور) است که سهمی از ورودی را که مستقیماً در خروجی ظاهر می شود تعریف می کند و اندازه آن  $m \times r$  می باشد.

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات بالا، معادلات حالت را در حوزه فرکانس به دست می آوریم:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (11-3)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (12-3)$$

شکل 3-1 نمودار بلوکی نمایش فضای حالت را نشان می دهد. از آنجا که تابع تبدیل سیستم را نشان می دهیم، شروط اولیه  $\Delta x(0)$  صفر فرض شده است.

روشی متداول در حل معادلات حالت با حل کردن برای  $\Delta x(s)$  و محاسبه  $\Delta y(s)$ ، به صورت زیر بدست می آید:

از مرتب کردن معادله 3-11 داریم:

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0) + B\Delta u(s)$$



از این رو:

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (13-3)$$

$$= \frac{adj(sI - A)}{det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)]$$

و متناظراً

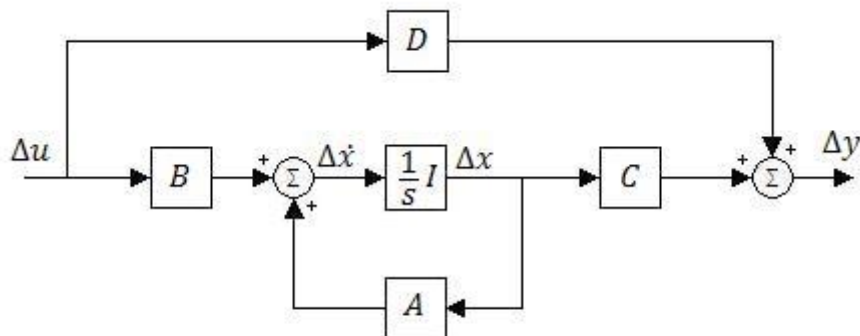
$$\Delta y(s) = C \frac{adj(sI - A)}{det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] + D\Delta u(s) \quad (14-3)$$

همچنان که مشاهده می شود تبدیل های لاپلاس  $\Delta x$  و  $\Delta y$  دو جمله دارند، که یکی به شرایط اولیه و دیگری به ورودیها وابسته است. که به ترتیب تبدیل های لاپلاس مولفه های حالت- صفر و آزاد بردار های خروجی و حالت می باشند.

قطب های  $\Delta x(s)$  و  $\Delta y(s)$  ریشه های معادله زیر هستند:

$$det(sI - A) = 0 \quad (15-3)$$

مقادیر  $s$  که معادله بالا را برآورده می سازند مقادیر ویژه ماتریس  $A$  بوده، و معادله 3-15 را معادله مشخصه ماتریس  $A$  می نامند.



شکل 3-1 نمودار بلوکی نمایش فضای حالت

### 3-1-4 تحلیل پایداری

روش اول لیاپانوف

پایداری در جزء یک سیستم غیر خطی به کمک ریشه های معادله مشخصه سیستم از اولین تقریب ها (یعنی مقادیر ویژه  $A$ ) بیان می شود:

الف) هنگامی که مقادیر ویژه، قسمت های حقیقی منفی دارند، سیستم اصلی پایدار مجانبی است.

(ب) هنگامی که حداقل یکی از مقادیر ویژه، قسمت حقیقی مثبت دارد، سیستم اصلی ناپایدار است.

(ج) هنگامی که مقادیر ویژه، قسمت های حقیقی مساوی با صفر دارند، در حالت کلی استنتاج بر اساس اولین تقریب امکان پذیر نیست.

پایداری در کل را می توان با پاسخ صریح معادلات دیفرانسیل غیر خطی (به وسیله کامپیوتر های دیجیتال یا آنالوگ) مطالعه نمود. روشی که پاسخ صریح معادلات دیفرانسیل سیستم را لازم ندارد، روش مستقیم لیاپانوف است.

روش دوم لیاپانوف، یا روش مستقیم

روش دوم سعی دارد که پایداری را مستقیماً با استفاده از توابع مناسبی که در فضای حالت تعریف می شوند، تعریف کند. علامت تابع لیاپانوف و علامت مشتق زمانی آن نسبت به معادلات حالت سیستم در نظر گرفته می شوند.

تبادل معادله 3-3 پایدار است اگر یک تابع معین مثبت  $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$  چنان وجود داشته باشد که مشتق کلی آن  $\dot{V}$  نسبت به معادله 3-3 مثبت نباشد.

سیستم در ناحیه ای که در آن  $\dot{V}$  نیمه معین منفی است، پایدار است و اگر  $\dot{V}$  معین منفی باشد پایدار مجانبی است.

در این فصل پایداری در جزء سیستم های قدرت مورد نظر بوده، که این پایداری با مقادیر ویژه  $A$  داده می شود. همچنان که در بخش بعدی نشان داده می شود، مد های طبیعی پاسخ سیستم، به مقادیر ویژه وابسته هستند. تحلیل خواص ویژه  $A$ ، اطلاعات سودمندی را در خصوص مشخصه های پایداری سیستم فراهم می آورد.

یادآوری این نکته سودمند است که ماتریس  $A$  ماتریس ژاکوبی است که عناصر  $a_{ij}$  آن با مشتقات نسبی  $\partial f_i / \partial x_j$ ، که در نقاط تعادلی تحت اغتشاش کوچک محاسبه شده، داده شده اند. این ماتریس معمولاً ماتریس حالت یا ماتریس دستگاه نامیده می شود. واژه (دستگاه) از حوزه کنترل فرایند سرچشمه گرفته و در فرهنگ مهندسی کنترل جا باز کرده است. دستگاه آن قسمت از سیستم را که می خواهد کنترل شود نشان می دهد.

## 3-2 خواص ویژه ماتریس حالت

### 3-2-1 مقادیر ویژه

مقادیر ویژه ماتریس مقادیری از پارامتر اسکالر  $\lambda$  است که به ازای آنها برای معادله زیر پاسخ های غیر جزیی (به عبارت دیگر، غیر از  $\Phi=0$ ) وجود داشته باشد:

$$A\Phi = \Phi\lambda \quad (3-16)$$

که در آن:

$A$  ماتریس مربعی  $n \times n$  (که برای سیستم های فیزیکی مانند سیستم قدرت، حقیقی است) و  $\Phi$  بردار  $1 \times n$  است.

برای پیدا کردن مقادیر ویژه معادله 3-16 را می توان به صورت زیر نوشت:

$$(A - \lambda I) \Phi = 0 \quad (17-3)$$

و برای داشتن پاسخ غیر جزئی باید داشته باشیم:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (18-3)$$

بسط دترمینان فوق، معادله مشخصه را می دهد و  $n$  پاسخ  $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ، مقادیر ویژه  $A$  هستند.

مقادیر ویژه ممکن است حقیقی یا مختلط باشند. اگر  $A$  حقیقی باشد، مقادیر ویژه مختلط همواره به صورت جفت های مزدوج رخ خواهند داد.

ماتریس های همانند، مقادیر ویژه یکسانی دارند. به سادگی نیز می توان نشان داد که ماتریس و ترانپوز اش مقادیر ویژه یکسانی دارند.

### 3-2-2 بردار های ویژه

برای هر مقدار ویژه  $\lambda_1$ ، بردار  $n$  ستونی  $\Phi_i$  را که معادله 12-16 را برآورده می سازد، بردار ویژه راست  $A$  متناظر با مقدار ویژه  $\lambda_1$ ، می نامند. بنابراین داریم:

$$A\Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19-3)$$

بردار ویژه  $\Phi_i$  به صورت زیر است:

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \\ \Phi_{2i} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \end{bmatrix}$$

از آنجا که معادله 3-17 همگن است،  $k\Phi_i$  (که در آن  $k$ ، اسکالر است) نیز یک پاسخ می باشد. بنابراین، بردار های ویژه تنها در حدود یک مضرب اسکالر تعیین می گردند.

به طور مشابه بردار  $n$  ردیفی  $\psi_i$  را که در معادله زیر برآورده می سازد:

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20-3)$$

بردار ویژه چپ متناظر با مقدار ویژه  $\lambda_i$ ، نامیده می شود.

بردار های ویژه چپ و راست متناظر با مقادیر ویژه مختلف، متعامد هستند. به عبارت دیگر، اگر  $\lambda_i$  مساوی  $\lambda_j$  نباشد، داریم:

$$\psi_j \lambda_i = 0 \quad (21-3)$$

لیکن، در مورد بردار های ویژه متناظر با همان مقدار ویژه داریم:

$$\psi_i \lambda_i = C_i \quad (22-3)$$

که در آن  $C_i$  ثابتی غیر صفر است.

از آنجایی که بردار های ویژه را می توان در عددی ضرب یا بر عددی غیر صفر بخش کرد، لذا متداول است که این بردار ها را به گونه ای نرمالیزه می کنند که رابطه زیر برآورده شود:

$$\psi_i \lambda_i = 1 \quad (23-3)$$

### 3-2-3 ماتریس های مُدال

برای بیان خواص ویژه  $A$  به طور مختصر، معرفی ماتریس های زیر مناسب است:

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (24-3)$$

$$\Psi = [\psi_1^T, \psi_2^T, \dots, \psi_n^T] \quad (25-3)$$

$$\Lambda = \text{ماتریس قطری، با مقادیر ویژه } \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \text{ روی قطر} \quad (26-3)$$

هر کدام از ماتریس های بالا  $n \times n$  هستند. معادلات 3-19 و 3-23 را می توان بر حسب این ماتریس ها به صورت زیر بسط داد:

$$A\Phi = \Lambda\Phi \quad (27-3)$$

$$\Phi\Psi = I \rightarrow \Psi = \Phi^{-1} \quad (28-3)$$

از معادله 3-27 نتیجه می شود:

$$\Phi^{-1}A\Phi = \Lambda \quad (29-3)$$

### 3-2-4 حرکت آزاد سیستم دینامیکی

با مراجعه به معادله 3-9، مشاهده می کنیم که حرکت آزاد (با ورودی صفر) به صورت زیر بیان می شود:

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x \quad (30-3)$$

همیشه مجموعه ای از معادلات به صورت بالا، حاصل از ملاحظات فیزیکی، بهترین وسیله مطالعات تحلیلی حرکت نمی باشد. مسئله آن است که میزان تغییر هر متغیر حالت، ترکیبی خطی از کلیه متغیر های حالت می باشد. به علت تزویج متقابل بین حالت ها، مجزا کردن آن دسته از پارامتر هایی که حرکت را به طور موثری تحت تاثیر قرار می دهند مشکل است.

به منظور حذف تزویج متقابل بین متغیرهای حالت، بردار حالت جدید  $z$  را در نظر بگیرید که به بردار حالت اولیه  $\Delta x$  به کمک تبدیل زیر رابطه دارد:

$$\Delta x = \Phi z \quad (31-3)$$

که در آن  $\Phi$  ماتریس مدال  $A$ ، تعریف شده با معادله 3-24 است. با جایگزینی عبارت بالا به جای  $\Delta x$  در معادله حرکت 3-30، داریم:

$$\Phi \dot{z} = A \Phi z \quad (32-3)$$

معادله حالت جدید را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{z} = \Phi^{-1} A \Phi z \quad (33-3)$$

با توجه به رابطه 3-29 معادله بالا چنین می شود:

$$\dot{z} = \Lambda z \quad (34-3)$$

تفاوت مهم بین معادلات 3-34 و 3-30 آن است که  $\Lambda$  یک ماتریس قطری بوده، حال آنکه  $A$  در حالت کلی، غیر قطری است.

معادله 3-34،  $n$  معادله مرتبه اول (اسکالر) بدون تزویج را نشان می دهد:

$$\dot{z}_i = \lambda_i z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (35-3)$$

بنابراین، تاثیر تبدیل 3-31، غیر تزویجی کردن معادلات حالت است.

معادله 3-35، یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول ساده است که پاسخ هایی زمانی به صورت زیر دارد:

$$z_i(t) = z_i(0) e^{-\lambda_i t} \quad (36-3)$$

که در آن  $z_i(0)$  مقدار اولیه  $z_i$  است.

با بازگشت به معادله 3-31 پاسخ معادله بر حسب بردار حالت اولیه به صورت زیر داده می شود.

$$\Delta x(t) = \Phi z(t) = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n] \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ \vdots \\ z_n(t) \end{bmatrix} \quad (37-3)$$

که با توجه به معادله 3-36، لازم است که:

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i z_i(0) e^{\lambda_i t} \quad (38-3)$$

حال از معادله 3-37 داریم:

$$z(t) = \Phi^{-1} \Delta x(t) = \psi \Delta x(t) \quad (39-3)$$

این موضوع ایجاب می کند که:

$$z_i(t) = \psi_i \Delta x(t) \quad (40-3)$$

از  $t=0$ ، نتیجه می شود:

$$z_i(0) = \psi_i \Delta x(0) \quad (41-3)$$

با استفاده از  $C_i$  برای نشان دادن حاصل ضرب اسکالر  $\psi_i \Delta x(0)$ ، معادله 3-38 را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i C_i e^{\lambda_i t} \quad (42-3)$$

به عبارت دیگر، پاسخ زمانی  $i$  امین متغیر حالت به صورت زیر داده می شود:

$$\Delta x_i(t) = \Phi_{i1} C_1 e^{\lambda_1 t} + \Phi_{i2} C_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \Phi_{in} C_n e^{\lambda_n t} \quad (43-3)$$

معادله بالا عبارتی را برای پاسخ زمانی حرکت آزاد سیستم بر حسب مقادیر ویژه و بردار های ویژه چپ و راست بدست می دهد. از این رو، پاسخ آزاد (یا شرط اولیه) به صورت ترکیبی خطی از  $n$  مد دینامیکی (متناظر با  $n$  مقادیر ویژه ماتریس حالت) داده می شود.

ضریب اسکالر  $C_i = \psi_i \Delta x(0)$  نشان دهنده اندازه تحریک  $i$  امین مد حاصل از شروط اولیه است. اگر شروط اولیه در راستای  $i$  امین بردار ویژه قرار بگیرد، ضرب های اسکالر  $\psi_i \Delta x(0)$  برای کلیه  $j \neq i$ ، صفر خواهد بود. بنابراین تنها  $j$  امین مد تحریک خواهد شد.

اگر بردار نشان دهنده شرط اولیه، یک بردار ویژه نباشد می توان آن را به صورت ترکیب خطی  $n$  بردار ویژه نشان داد. پاسخ سیستم مجموع  $n$  پاسخ خواهد بود و اگر مولفه ای در راستای یک بردار ویژه از شروط اولیه صفر باشد، مد متناظر تحریک نخواهد شد.

### مقدار ویژه و پایداری

مشخصه وابستگی زمانی هر مد متناظر با مقدار ویژه  $\lambda_i$  به صورت  $e^{\lambda_i t}$  داده می شود. بنابراین می توان پایداری سیستم را به کمک مقادیر ویژه به صورت زیر تعیین کرد:

الف) مقدار ویژه حقیقی، متناظر با مد غیر نوسانی است. مقدار ویژه حقیقی منفی، نشان دهنده مد کاهشی است که هر چه اندازه آن بزرگتر باشد، کاهش سریعتر خواهد بود.

مقدار ویژه حقیقی مثبت نشان دهنده ناپایداری غیر نوسانی است.

(ب) مقادیر ویژه مختلط، به صورت جفت های مزدوج رخ می دهند و هر جفت متناظر با یک مد نوسانی است.

$C$  های متناظر و بردار های ویژه، مقادیر مختلط مناسبی خواهند داشت، به گونه ای که مولفه های  $x(t)$  را در هر لحظه از زمان حقیقی می کنند. برای نمونه:

$$(a + jb)e^{(\sigma - j\omega)t} + (a - jb)e^{(\sigma + j\omega)t}$$

صورت زیر را دارد:

$$e^{\sigma t} \sin(\omega t + \theta)$$

که نشان دهنده سینوسی میرا شده برای  $\sigma$  منفی است.

مولفه حقیقی مقادیر ویژه، میرایی، و مولفه مختلط آن، فرکانس نوسان را می دهد. قسمت حقیقی منفی نشان دهنده نوسان میرا شده و قسمت حقیقی مثبت نشان دهنده نوسان با دامنه افزایشی می باشد. از این رو، برای یک جفت مختلط مقادیر ویژه:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (44-3)$$

فرکانس نوسان بر حسب  $Hz$  به صورت زیر داده می شود:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (45-3)$$

این رابطه بیانگر فرکانس واقعی یا میرا شده است. نسبت میرایی به صورت ذیل داده می شود:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (46-3)$$

نسبت میرایی  $\xi$  تعیین کننده نرخ کاهش دامنه نوسان است. ثابت زمانی کاهش دامنه  $\frac{1}{|\sigma|}$  می باشد. به عبارت دیگر، دامنه به اندازه  $\frac{1}{e}$  یا 37٪ مقدار دامنه اولیه در  $\frac{1}{|\sigma|}$  ثانیه یا در  $\frac{1}{(2\pi\xi)}$  سیکل از نوسان کاهش پیدا می کند. شکل 3-2 شش ترکیب مختلف مقدار ویژه و رفتار مسیر متناظر با هر یک راه، حول نقاط منفرد در دو حالت بعدی نشان می دهد.

حالت های 1 و 3 و 5 پایداری محلی را تضمین می کنند، 1 و 3 پایدار مجانبی هستند.

### 3-2-5 شکل مد، حساسیت، و عامل مشارکت

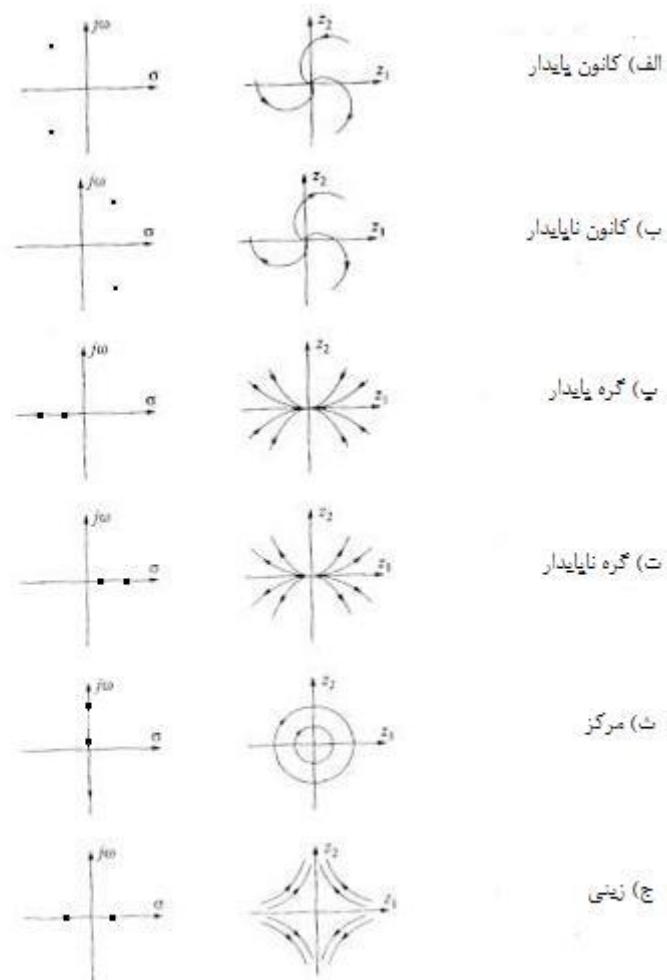
الف) شکل مد و بردار های ویژه

در بخش قبل، پاسخ سیستم را بر حسب بردار های حالت  $\Delta x$  و  $z$ ، که به صورت زیر به هم وابسته اند، مورد بررسی قرار دادیم:

$$\Delta z(t) = \Phi z(t) = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n] z(t) \quad (47-3) \text{ الف}$$

و :

$$z(t) = \Psi \Delta x(t) = \begin{bmatrix} \psi_1^T & \psi_2^T & \dots & \psi_n^T \end{bmatrix}^T \Delta x(t) \quad (3-47 \text{ ب})$$



شکل ۳-۲ نقاط منفرد متناظر با شش ترکیب ممکن جفت های مقدار ویژه

متغیر های  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ ، متغیر های حالت اصلی هستند که برای نمایش عملکرد دینامیکی سیستم انتخاب شده اند. متغیر های  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ ، متغیر های حالت اصلی هستند که برای نمایش عملکرد دینامیکی سیستم انتخاب شده اند. متغیر های  $z_1, z_2, \dots, z_n$ ، متغیر های حالت تبدیل شده به گونه ای هستند که هر متغیر فقط متناظر با یک مد است. به عبارت دیگر، متغیر های تبدیل شده  $z$  مستقیماً به مد ها وابسته هستند.

از معادله 3-47 الف مشاهده می کنیم که بردار ویژه راست، شکل مد یا به عبارت دیگر فعالیت متغیر های حالت را هنگامی که مد خاصی تحریک شود را می دهد. برای نمونه، درجه فعالیت متغیر حالت  $x_k$  در  $i$  امین مد به وسیله عنصر  $\Phi_{ki}$  از بردار ویژه راست  $\Phi_i$  داده می شود.



اندازه عناصر  $\Phi_i$ ، میزان فعالیت های  $n$  متغیر حالت در  $i$  امین مد را می دهد، و زاویه عناصر، جابجایی های فاز متغیر های حالت در خصوص مد را بدست می دهد.

همچنان که از معادله 3-47 ب مشاهده می شود، بردار ویژه چپ  $\psi_i$  این موضوع را شناسایی می کنند که کدام ترکیب از متغیر های حالت اولیه، تنها  $i$  امین مد را نمایش می دهند. از این رو  $k$  امین عنصر بردار ویژه راست  $\Phi_i$  فعالیت متغیر  $x_n$  را در  $i$  امین مد اندازه گیری کرده،  $k$  امین عنصر بردار ویژه چپ سهم این فعالیت را در  $i$  امین مد وزن دهی می کند.

(ب) حساسیت مقدار ویژه

اکنون حساسیت مقادیر ویژه به عناصر ماتریس حالت را بررسی می کنیم. معادله 3-19 که مقادیر ویژه و بردار های ویژه را تعریف می کند، در نظر بگیرید:

$$A\Phi_i = \lambda_i \Phi_i$$

با مشتق گیری از رابطه فوق نسبت به  $a_{kj}$  (عنصر  $k$  امین ردیف و  $j$  امین ستون ماتریس  $A$ ) نتیجه می شود:

$$\frac{\partial A}{\partial a_{kj}} \Phi_i + A \frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} \Phi_i + \lambda_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial a_{kj}}$$

با پیش ضرب کردن یا  $\psi_i$  و توجه به اینکه  $\Phi_i \psi_i = 1$  و  $\psi_i (A - \lambda_i I) = 0$  می توان معادله بالا را به صورت زیر ساده کرد:

$$\psi_i \frac{\partial A}{\partial a_{kj}} \Phi_i = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}}$$

کلیه عناصر  $\frac{\partial A}{\partial a_{kj}}$  به جز عنصر  $k$  امین ردیف و  $j$  امین ستون (که برابر 1 است) صفر هستند. از این رو داریم:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kj}} = \psi_{ik} \Phi_{ji} \quad (3-46)$$

بنابراین حساسیت مقدار ویژه  $\lambda_i$  به عنصر  $a_{kj}$  از ماتریس حالت مساوی با حاصل ضرب عنصر بردار ویژه چپ  $\psi_{ik}$  و عنصر بردار ویژه راست  $\Phi_{ji}$  می باشد.

(ج) عامل مشارکت

یک مسئله در به کار گیری مجزای بردار های ویژه راست و چپ در شناسایی رابطه بین حالت ها و مد ها، آن است که عناصر بردار ویژه به واحد ها و مقیاس بندی متناظر با متغیر های حالت وابسته هستند. یکی از روش های حل این مسئله، در مرجع 2 به کمک ماتریسی به نام ماتریس مشارکت (به عنوان اندازه ای از رابطه بین متغیر های حالت و مد ها) پیشنهاد شده است، که بردار های ویژه راست و چپ را به صورت زیر ترکیب می کند:

$$P = [P_1 P_2 \dots P_n] \quad (3-49 \text{ الف})$$

با :

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \vdots \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \psi_{i1} \\ \Phi_{2i} \psi_{i2} \\ \vdots \\ \Phi_{ni} \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (3-49 \text{ ب})$$

که در آن :

$\Phi_{ki}$  = عنصر موجود در  $k$  امین ردیف و  $i$  امین ستون ماتریس مدال  $\Phi$

$k$  = امین ورودی بردار ویژه راست  $\Phi_i$

$\psi_{ik}$  = عنصر موجود در  $i$  امین ردیف و  $k$  امین ستون ماتریس مدال  $\psi$

$k$  = امین ورودی بردار ویژه چپ  $\psi_i$  است.

عنصر  $P_{ik} = \Phi_{ki} \psi_{ik}$  ضریب مشارکت نام گذاری شده است که سنجشی از مشارکت نسبی  $k$  امین متغیر حالت در  $i$  امین مد و بالعکس می باشد.

از آنجا که  $\Phi_{ki}$  فعالیت  $X_k$  در  $i$  امین مد را اندازه گیری کرده،  $\psi_{ik}$  سهم این فعالیت را وزن دهی می کند، حاصل ضرب  $P_{ki}$  مشارکت خالص را اندازه گیری می کند. همچنین تاثیر ضرب کردن عناصر بردار های ویژه چپ و راست در بدون بعد کردن  $P_{ki}$  ظاهر می شود (به عبارت دیگر، مستقل از انتخاب واحد ها).

نظر به نرمالزه کردن بردار ویژه، مجموع عوامل مشارکت متناظر با هر مد (یعنی  $\sum_{i=1}^n P_{ki}$ ) یا با هر متغیر حالت (یعنی  $\sum_{k=1}^n P_{ki}$ ) برابر با یک است.

از معادله 3-48 مشاهده می کنیم که در واقع عامل مشارکت  $P_{ki}$  برابر با حساسیت مقدار ویژه  $\lambda_i$  به عنصر قطری  $a_{kk}$  از ماتریس حالت  $A$  می باشد؛ یعنی:

$$P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (3-50)$$

### 3-2-6 کنترل پذیری و روئیت پذیری

در بخش 3-3-1 پاسخ سیستم را در حضور ورودی، با معادلات 3-8 و 3-9 بیان کردیم که در اینجا برای مراجعه تکرار می شود:

$$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u$$

که می توان آنها را بر حسب متغیر های تبدیل شده  $z$ ، (تعریف شده با معادله 3-31) به شکل ذیل نوشت:

$$\dot{\Phi}z = A\Phi z + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Phi z + D\Delta u$$

بنابراین معادلات حالت را می توان به صورت نرمال (غیر تزویج) به شکل زیر نوشت:

$$\dot{z} = \Delta z + B'\Delta u \quad (3-51)$$

$$\Delta y = C'z + D\Delta u \quad (3-52)$$

که در آن:

$$B' = \Phi^{-1}B \quad (3-53)$$

$$C' = C\Phi \quad (3-54)$$

است.

با مراجعه به معادله 3-51، اگر  $i$  امین ردیف ماتریس  $B'$  صفر باشد، ورودی ها هیچ تاثیری بر  $i$  امین مد ندارند. در چنین حالتی،  $i$  امین مد را کنترل ناپذیر می گویند.

با توجه به معادله 3-52، مشاهده می کنیم که  $i$  امین ستون ماتریس  $C'$  تعیین می کند که آیا متغیر  $Z_i$  سهمی در تشکیل خروجی ها دارد یا خیر. اگر ستون صفر باشد، مد متناظر روئیت ناپذیر می باشد. این نکته توضیح می دهد که چرا در بعضی اوقات، مد های با میرایی کم به کمک مشاهده پاسخ گذرای چند کمیت اندازه گیری شده، آشکار نمی شوند.

ماتریس  $r \times n$ ،  $B' = \Phi^{-1}B$ ، ماتریس کنترل پذیری مد، و ماتریس  $m \times n$ ،  $C' = C\Phi$  ماتریس روئیت پذیری مد نامیده می شوند.

با بررسی  $B'$  و  $C'$  می توانیم مد ها را به چهار دسته کنترل پذیر و رویت پذیر؛ کنترل پذیر و رویت ناپذیر؛ کنترل ناپذیر و رویت پذیر؛ کنترل ناپذیر و رویت ناپذیر تقسیم کنیم.

### 3-2-7 مفهوم فرکانس مختلط

موج سینوسی میرا شده زیر را در نظر بگیرید:

$$v = V_m e^{\sigma t} \cos(\omega t + \theta) \quad (3-53)$$

واحد  $\omega$  رادیان بر ثانیه و واحد  $\theta$  رادیان می باشد. معمولاً از واحد بدون بعد نپر ( $Np$ ) (به افتخار ریاضی دان جان نپر 1550-1617 م. که لگاریتم را اختراع کرد) برای  $\sigma t$  استفاده می شود. از این رو واحد  $\sigma$  نپر بر ثانیه ( $Np/s$ ) است.

در مدار های که در آنها تحریک و توابع ورودی، به شکل موج های سینوسی میرا شده هستند (همانند سینوسی میرا شده معادله 3-55)، می توان از نمایش های فازوری سینوس های میرا شده، استفاده کرد. این نماد به خوبی فازور سینوسی هایی (میرا نشده) که معمولاً در تحلیل مدار جریان متناوب به کار گرفته می شود، کار می کند، زیرا خواص سینوسی ها که استفاده از فازور ها را امکان پذیر می سازد در سینوسی های میرا شده نیز مشترک است. یعنی آنکه مجموع یا تفاضل دو عدد یا بیشتر، از سینوسی های میرا شده و مشتق یا انتگرال نامعین آنها نیز باز یک سینوسی میرا شده است. در تمامی این موارد،  $V_m$  و  $\square$  ممکن است تغییر کنند اما  $\square$  و  $\square$  ثابت هستند.

شبیه به نماد های علامت گذاری فازوری به کار رفته در سینوسی ها، در مورد سینوسی های میرا شده نیز می توان نوشت:

$$\begin{aligned} v &= V_m e^{\sigma t} \cos(\omega t + \theta) \\ &= \operatorname{Re}[V_m e^{\sigma t} e^{j(\square t + \theta)}] \\ &= \operatorname{Re}[V_m e^{j\theta} e^{j(\square + j\square)t}] \end{aligned}$$

با  $S = \sigma + j\omega$  داریم:

$$v = \operatorname{Re}[\tilde{V} e^{St}] \quad (3-53)$$

که در آن  $\tilde{V}$  فازور ( $V_m \angle \square$ ) بوده، برای هر دو سینوسی های میرا شده و میرا نشده یکسان است. بدیهی است که می توانیم به همان طریقی که با سینوسی های میرا نشده برخورد می کنیم، با استفاده از  $s$  به جای  $j\omega$ ، با سینوسی های میرا شده نیز برخورد کنیم.

از آنجا که  $s$ ، عددی مختلط است، آن را با فرکانس مختلط و  $V(S)$  را فازور تعمیم یافته می نامیم.

تمامی مفاهیم از قبیل امپدانس، ادمیتانس، قضایای تونن و نورتن، جمع آثار و غیره در حالت سینوسی میرا شده نیز صادق هستند.

بنابراین می توان نتیجه گرفت که در حوزه  $s$ ، جریان فازوری  $I(S)$  و ولتاژ  $V(S)$ ، مربوط به شبکه ای در پایانه ای به صورت زیر به هم مربوط اند:

$$V(S) = Z(S)I(S)$$

که در آن  $Z(S)$  امپدانس تعمیم یافته است.

به طور مشابهی، روابط ورودی و خروجی دستگاههای دینامیکی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{V_0(S)}{V_i(S)} = G(S) = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0}$$

و یا به صورت تجزیه شده

$$G(S) = \frac{b_m(S - Z_1)(S - Z_2) \dots (S - Z_m)}{a_n(S - P_1)(S - P_2) \dots (S - P_n)}$$

مقادیر  $Z_1$  تا  $Z_m$  را صفر می نامند. زیرا مقادیری از  $s$  هستند که به ازای آنها،  $G(S)$  صفر می شود. مقادیر  $P_1$  تا  $P_n$  را قطب  $G(S)$  می نامند. مقادیر قطب ها و صفر ها، همراه با  $a_n$  و  $b_m$  به طور منحصر به فردی تابع تبدیل سیستم  $G(S)$  را تعیین می کنند. قطب ها و صفر ها در بررسی خواص حوزه فرکانسی سیستم های دینامیکی سودمندتر هستند.

### 3-2-8 روابط بین خواص ویژه و توابع تبدیل

نمایش فضای حالت نه تنها خواص ورودی و خروجی سیستم بلکه رفتار کامل داخلی آن را نیز مورد نظر دارد. بر خلاف آن، نمایش تابع تبدیل تنها رفتار ورودی- خروجی سیستم را مشخص می کند. از این رو می توان هر انتخاب دلخواهی از متغیر های حالت داشت حال آنکه دستگاه فقط با یک تابع تبدیل مشخص می شود. از طرف دیگر اگر یکی از نمایش های فضای حالت سیستم معلوم باشد، تابع تبدیل آن به طور منحصر به فردی به دست می آید. بنابراین نمایش فضای حالت توصیف کاملی از سیستم است. نمایش فضای حالت به صورت ایده آلی برای تحلیل سیستم های چند متغیره چند ورودی- چند خروجی مناسب است.

در تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستم های قدرت، اصولاً به تحلیل مقدار ویژه ماتریس حالت سیستم وابسته ایم. لیکن در طراحی کنترل به تابع تبدیل حلقه باز بین متغیر های معین علاقه مند هستیم. برای اینکه مشاهده شود که چگونه این موضوع به ماتریس حالت و خواص ویژه آن ارتباط دارد، تابع تبدیل بین متغیر های  $u$  و  $y$  را در نظر می گیریم. از معادلات 3-8 و 3-9، می توان نوشت:

$$\Delta x = A\Delta x + b\Delta u \quad (3-57)$$

$$\Delta y = c\Delta x \quad (3-58)$$

که در آن  $A$  ماتریس حالت،  $\Delta x$  بردار حالت،  $\Delta u$  ورودی،  $\Delta y$  خروجی،  $c$  بردار سطری و  $b$  بردار ستونی است. فرض می کنیم که  $y$  به طور مستقیم به  $u$  وابسته نیست (به عبارت دیگر  $D=0$  است). در این صورت تابع تبدیل خواسته شده عبارت است از:

$$G(S) = \frac{\Delta y(S)}{\Delta u(S)} = c(SI - A)^{-1}b \quad (3-59)$$

این عبارت صورت کلی زیر را دارد:

$$G(s) = K \frac{N(s)}{D(s)} \quad (3-60)$$

اگر بتوان  $D(S)$  و  $N(S)$  را تجزیه کرد، نتیجه می شود:

$$G(S) = K \frac{(S-Z_1)(S-Z_2)\dots(S-Z_i)}{(S-P_1)(S-P_2)\dots(S-P_n)} \quad (61-3)$$

همان طور که در بخش 3-2-7 بحث شد،  $n$  مقدار  $S$ ، یعنی  $P_1, P_2, \dots, P_n$ ، که چند جمله ای مخرج  $D(S)$  را صفر می کند، قطب های  $G(S)$  و  $I$  مقدار  $S$ ، یعنی  $Z_1, Z_2, \dots, Z_i$ ، صفر های  $G(S)$  هستند.

اکنون  $G(S)$  را می توان به صورت کسر های جزئی زیر بسط داد:

$$G(S) = \frac{R_1}{S-P_1} + \frac{R_2}{S-P_2} + \dots + \frac{R_n}{S-P_n} \quad (62-3)$$

که  $R_i$  به نام مانده  $G(S)$  در قطب  $P_i$  نامیده می شود.

برای بیان تابع تبدیل بر حسب مقادیر ویژه و بردار های ویژه، متغیر های حالت  $\Delta x$  را بر حسب متغیر های تبدیل شده  $Z$  تعریف شده با معادله 3-31 بیان می کنیم. به دنبال مراحل به کار گرفته شده در بخش 3-2-4، معادلات 3-57 و 3-58 را می توان بر حسب متغیر های تبدیل شده به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \Phi^{-1} A \Phi Z + \Phi^{-1} b \Delta u \\ &= \Lambda Z + \Phi^{-1} b \Delta u \end{aligned} \quad (63-3)$$

و:

$$\Delta y = c \Phi Z \quad (64-3)$$

پس:

$$G(S) = \frac{\Delta y(S)}{\Delta u(S)} = c \Phi [SI - \Lambda]^{-1} \psi b \quad (65-3)$$

چون  $\Lambda$  ماتریس قطری است، نتیجه می شود:

$$G(S) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{S-\lambda_i} \quad (66-3)$$

که در آن:

$$R_i = c \Phi_i \psi_i \quad (67-3)$$

مشاهده می کنیم که قطب های  $G(S)$  با مقادیر ویژه  $A$  داده می شوند. معادله 3-67 مانده ها را بر حسب بردار های ویژه بدست می دهند. صفر های  $G(S)$  از حل معادله زیر داده می شوند:

$$\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{S-\lambda_i} = 0 \quad (60-3)$$

### 3-2-9 محاسبه مقادیر ویژه

در صورتی که یک سیستم ساده مرتبه دوم را تحلیل نماییم، با حل معادله مشخصه سیستم می توان مقادیر ویژه را بدست آورد. اما برای سیستم های مرتبه بالاتر با مقادیر ویژه ای با اندازه های بسیار متفاوت این روند به شکست خواهد انجامید. روشی که به طور وسیع برای محاسبه مقادیر ویژه ماتریس های غیر متقارن حقیقی به کار گرفته می شود روش تبدیل  $QR$  است که نخستین بار جی.اف فرانسیس آن را مطرح کرده است. این روش از نظر عددی پایدار، مقاوم، و از نظر همگرایی سریع است. این روش در تعدادی از نرم افزار های همه کاره عمومی بسیار خوب استفاده شده است و به طور موفقیت آمیزی در تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستم های قدرت با چند صد حالت به کار رفته است. بردار های ویژه راست را می توان با استفاده از روش تکرار معکوس محاسبه کرد.

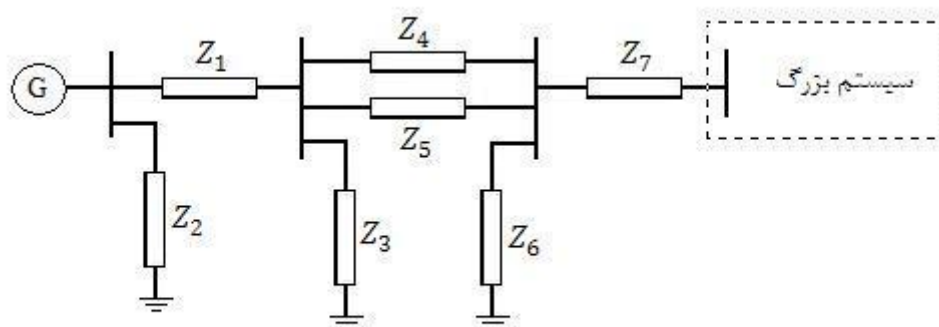
برای سیستم های بزرگ که شامل چند هزار حالت است، روش  $QR$  را نمی توان برای محاسبه مقادیر ویژه استفاده کرد. دلیل این موضوع و توصیفی از روش های ویژه تحلیل مقدار های ویژه در سیستم های بزرگ در بخش 3-8 خواهد آمد.

### 3-3 پایداری سیگنال کوچک یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت

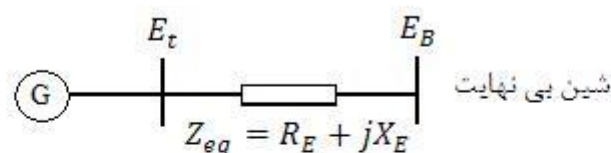
در این بخش عملکرد سیگنال کوچک یک سیستم تک ماشینه را که از طریق خطوط انتقال به سیستم بزرگ متصل شده را مطالعه خواهیم کرد. ترکیب کلی سیستم در شکل 3-3-الف نشان داده شده است. تحلیل سیستم هایی با چنین ترکیب ساده ای در فهم آثار و مفاهیم اولیه بسیار سودمند است. بعد از درک جنبه های فیزیکی پدیده و تحصیل تجربه با روش های تحلیلی با استفاده از سیستم های مرتبه پایین، در موقعیت بهتری برای برخورد با سیستم های پیچیده بزرگ خواهیم بود.

به منظور تحلیل، سیستم شکل 3-3-الف را می توان با به کار گیری معادل تونن شبکه انتقال خارج از ماشین و شبکه انتقال مجاور به صورت شکل 3-3-ب تقلیل داد. به علت اندازه نسبی سیستمی، که توان آن را ماشین فراهم می کند، دینامیک ماشین تقریباً هیچ تغییری در ولتاژ و فرکانس ولتاژ تونن  $E_B$  ایجاد نمی کند. چنین منبع ولتاژی با ولتاژ و فرکانس ثابت را شین بی نهایت می نامند.

برای هر وضعیت داده شده سیستم، هنگامی که ماشین دستخوش اغتشاش می شود اندازه ولتاژ شین بی نهایت  $E_B$  ثابت باقی می ماند. لیکن با تغییر وضعیت حالت- ماندگار سیستم ممکن است که اندازه  $E_B$  تغییر پیدا کند. این موضوع نشان دهنده تغییری در نقطه کار شبکه خارجی است.



الف) ترکیب کلی



ب) سیستم معادل

شکل ۳-۳ تک ماشین متصل به سیستم بزرگ از طریق خطوط انتقال

در قسمت های بعد پایداری سیگنال کوچک سیستم شکل ۳-۳-۳ ب را همراه با ماشین سنکرون تعریف شده با مدل هایی از درجه های مختلف، تحلیل خواهیم کرد. برای این کار ابتدا با مدل کلاسیک شروع کرده، درجه جزئیات مدل را به تدریج و با در نظر گرفتن اثر دینامیک های مدار تحریک، سیستم تحریک، و سیم پیچ میرا کننده افزایش خواهیم داد. در هر مورد عباراتی برای عناصر ماتریس حالت به صورت توابع صریحی از پارامترهای سیستم بدست خواهیم آورد. این کار در روشن کردن اثر عوامل مختلف ناشی از ماشین سنکرون بر روی پایداری سیستم کمک خواهد کرد. علاوه بر نمایش فضای حالت و تحلیل مدال، از نمایش نمودار بلوکی و روابط گشتاور-زاویه برای تحلیل مشخصه های پایداری سیستم استفاده خواهیم کرد. روش نمودار بلوکی را برای نخستین بار هفرون و فیلیپس و سپس دملو و کونکورد برای تحلیل پایداری سیگنال کوچک ماشین های سنکرون به کار گرفتند. گرچه این روش برای مطالعه مشروح سیستم های بزرگ مناسب نیست، لیکن برای بدست آوردن درکی فیزیکی از تاثیر دینامیک های مدار تحریک و نیز در به وجود آوردن پایه ای برای فهم روش های بهبود پایداری از طریق کنترل تحریک سودمند است.

### ۳-۳-۱ ژنراتور نمایش داده شده با مدل کلاسیک

با ژنراتور نمایش داده شده با مدل کلاسیک و نادیده گرفتن از کلیه مقاومت ها، نمایش سیستم به صورت نشان داده شده در شکل ۳-۴ در می آید. در اینجا  $E'$  ولتاژ متصل به  $X'_d$  است و فرض می شود که اندازه آن در مقدار پیش از

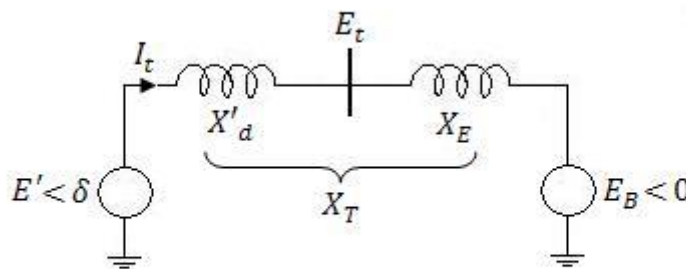


بروز اغتشاش ثابت باقی بماند. فرض کنید که  $\square$  زاویه ای باشد که  $E'$  ولتاژ شین بی نهایت نسبت به  $E_B$  پیش است. در این صورت با نوسان رتور در طی بروز اغتشاش  $\square$  تغییر می کند.

با در نظر گرفتن  $E'$  به عنوان فازو مرجع داریم:

$$\tilde{E}' = E_{to} + jX'_d \tilde{I}_{to}$$

$$X_T = X'_d + X_E$$



شکل ۳-۴

$$\tilde{I}_t = \frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta}{jX_T} = \frac{E' - E_B(\cos \delta - j \sin \delta)}{jX_T} \quad (69-3)$$

توان مختلط متصل به  $X'_d$  به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{aligned} S' &= P + jQ' = \tilde{E}' \tilde{I}_t \\ &= \frac{E'E_B \sin \delta}{X_T} + j \frac{E'(E' - E_B \cos \delta)}{X_T} \end{aligned} \quad (70-3)$$

با در نظر گرفتن مقاومت استاتور توان فاصله هوایی ( $P_e$ ) با توان پایانه ( $P$ ) برابر می باشد و در مبنای واحد، گشتاور فاصله هوایی با توان فاصله هوایی برابر است. از این رو داریم:

$$T_e = P = \frac{E'E_B}{X_T} \sin \delta \quad (71-3)$$

خطی سازی حول نقطه کار نشان داده شده با  $\delta = \delta_0$ ، نتیجه می دهد:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{E'E_B}{X_T} \cos \delta_0 (\Delta \delta) \quad (72-3)$$

معادلات حرکت در مبنای واحد عبارت است از:

$$P \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r) \quad (73-3)$$

$$P \delta = \omega_0 \Delta \omega_r \quad (74-3)$$

که در آن  $\Delta\omega_r$  انحراف سرعت در مبنای واحد،  $\delta$  زاویه رتور بر حسب رادیان الکتریکی،  $\omega_0$  سرعت مبنای زاویه ای رتور بر حسب رادیان بر ثانیه و  $P$  عملگر دیفرانسیلی  $d/dt$  با زمان  $t$  بر ثانیه است.

با خطی سازی معادله 3-73 و جایگزینی  $\Delta T_e$  داده شده با معادله 3-72، بدست می آوریم:

$$P\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_s \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r] \quad (75-3)$$

که در آن  $K_s$  ضریب گشتاور سنکرون کننده داده شده با معادله زیر است:

$$K_s = \left[ \frac{E'E_B}{X_T} \right] \cos \delta_0 \quad (76-3)$$

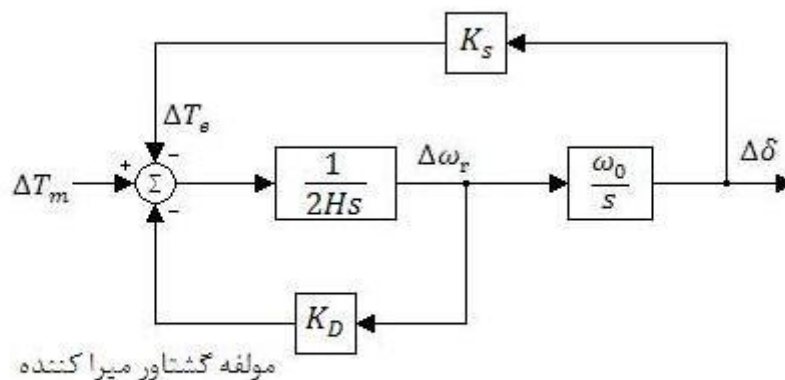
از خطی سازی معادله 3-74 داریم:

$$P\Delta\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (77-3)$$

با نوشتن معادلات 3-75 و 3-77 به صورت بردار- ماتریسی، بدست می آوریم:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_s}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (78-3)$$

که به صورت  $\dot{x} = Ax + bu$  و مشاهده می شود که عناصر ماتیس  $A$  به پارامترهای سیستم  $K_D$ ،  $H$ ،  $X_T$  و شروط اولیه نشان داده شده با مقادیر  $E'$  و  $\delta_0$  بستگی دارد. می توان از نمایش نمودار بلوکی شکل 3-5 برای توصیف عملکرد سیگنال کوچک استفاده کرد.



شکل 3-5 نمودار بلوکی سیستم تک ماشین متصل به شین بی نهایت با مدل کلاسیک ژنراتور

$K_s =$  ضریب گشتاور سنکرون کننده بر حسب مبنای واحد گشتاور بر رادیان

$K_D =$  ضریب گشتاور میرا کننده بر حسب گشتاور مبنای واحد انحراف سرعت مبنای واحد

$H =$  ثابت لختی بر حسب MW.S/MVA

$\Delta\omega_r =$  انحراف سرعت بر حسب  $(\omega_r - \omega_0)/\omega_0$

$\Delta\delta =$  انحراف زاویه رتور بر حسب رادیان الکتریکی

$S =$  عملگر لاپلاس

$\omega_0 =$  سرعت ناشی بر حسب  $2\pi/f_0 = \text{elec. rad/s}$

$= 377$  برای یک سیستم 60 هرتز

از نمودار بلوکی شکل 3-5 داریم:

$$\begin{aligned}\Delta\delta &= \frac{\omega_0}{S} \left[ \frac{1}{2HS} (-K_S \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r + \Delta T_m) \right] \\ &= \frac{\omega_0}{S} \left[ \frac{1}{2HS} \left( -K_S \Delta\delta - K_D S \frac{\Delta\delta}{\omega_0} + \Delta T_m \right) \right] \quad (79-3)\end{aligned}$$

از مرتب کردن این رابطه نتیجه می شود:

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H} S(\Delta\delta) + \frac{K_S}{2H} \omega_0(\Delta\delta) = \frac{\omega_0}{2H} \Delta T_m$$

بنابراین معادله مشخصه به صورت زیر داده می شود:

$$S^2 + \frac{K_D}{2H} S + \frac{K_S \omega_0}{2H} = 0 \quad (80-3)$$

که به صورت کلی زیر است:

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 = 0$$

بنابراین، فرکانس طبیعی میرا نشده عبارت است از:

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}} \text{ rad/s} \quad (81-3)$$

و نسبت میرایی برابر است با:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H\omega_n} = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{K_S 2H\omega_0}} \quad (82-3)$$

با افزایش ضریب گشتاور سنکرون کننده  $K_S$ ، فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرایی کاهش می یابد. از سویی افزایش ضریب گشتاور میرا کننده  $K_D$  نسبت میرایی را افزایش داده، حال آنکه افزایش در ثابت لختی هر دو  $\omega_n$  و  $\xi$  را کاهش می دهد.

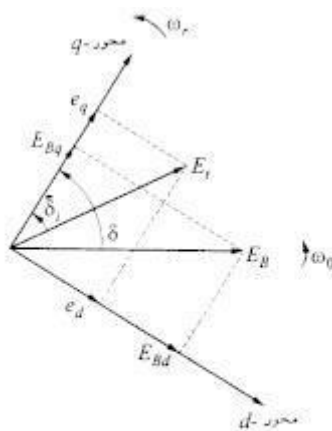
## 3-2 معادلات ماشین سنکرون

همانند حالت مدل کلاسیک ژنراتور معادلات شتاب عبارتند از:

$$P\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D\Delta\omega_r) \quad (83-3)$$

$$P\delta = \omega_0\Delta\omega_r \quad (84-3)$$

که در آن  $\omega_0 = 2\pi f_0$  رادیان الکتریکی بر ثانیه است. در این حالت، زاویه رتور  $\square$ ، زاویه ای است (بر حسب رادیان الکتریکی) که محور  $q$  نسبت به مرجع  $E_B$  پیش است. همان طور که در شکل 3-6 نشان داده شده است، زاویه رتور  $\square$ ، مجموع زوایای داخلی  $\square_i$  و زاویه ای است که  $E_t$  نسبت به  $E_B$  پیش است.



شکل 3-6

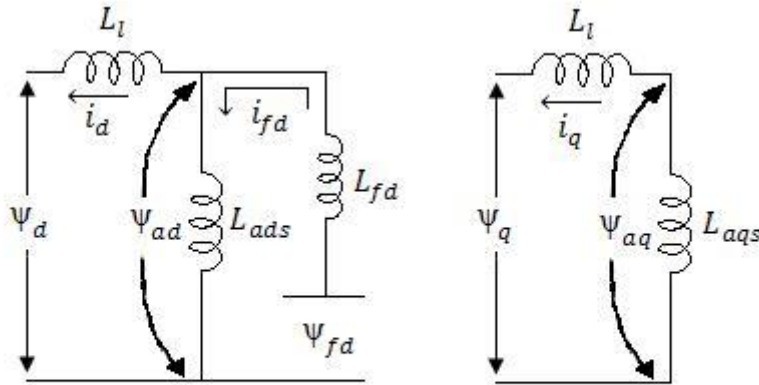
برای شناسایی موقعیت رتور نسبت به یک مرجع مناسب و دنبال کردن آن به هنگام بروز نوسانات رتور، به یک راه حل مناسب نیازمندیم. هنگامی که دینامیک های مدار های رتور در مدل ماشین نشان داده شوند، محور  $q$  این مناسبت را خواهد داد. انتخاب  $E_B$  به عنوان مرجع اندازه گیری زاویه رتور نیز از نظر پاسخ معادلات شبکه مناسب است.

معادله دینامیک مدار تحریک عبارت است از:

$$P\psi_{fd} = \omega_0(e_{fd} - R_{fd}i_{fd}) = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_0 R_{fd} i_{fd} \quad (85-3)$$

که در آن  $E_{fd}$  ولتاژ خروجی تحریک کننده است. معادلات 3-83 تا 3-85 دینامیک ماشین سنکرون را با  $\Delta\omega_r$ ،  $\delta$  و  $\psi_{fd}$  به عنوان متغیر های حالت، توصیف می کنند. لیکن مشتقات متغیر های حالت در این معادلات به صورت توابعی از  $T_e$  و  $i_{fd}$  ظاهر شده است، که نه متغیر حالت و نه منغیر ورودی هستند. به منظور بدست آوردن معادلات کامل سیستم به صورت فضای حالت، لازم است  $T_e$  و  $i_{fd}$  بر حسب متغیر های حالت تعیین شده توسط معادلات شار دور ماشین و معادلات شبکه، بیان کنیم.

با نادیده گرفتن سیم پیچ های میرا کننده، مدار های معادل ارتباطی بین شار دور ماشین و جریان ها در شکل 3-7 نشان داده شده است.



شکل 3-7

شار دور های استاتور و رتور، به صورت زیر داده می شوند:

$$\psi_d = -L_l i_d + L_{ads}(-i_d + i_{fd}) = -L_l i_d + \psi_{ad} \quad (86-3)$$

$$\psi_q = -L_l i_q + L_{aqs}(-i_q) = -L_l i_q + \psi_{aq} \quad (87-3)$$

$$\psi_{fd} = L_{ads}(-i_d + i_{fd}) + L_{fda} i_{fd} = -L_{fda} i_{fd} + \psi_{ad} \quad (88-3)$$

در معادلات بالا  $\psi_{ad}$  و  $\psi_{aq}$  شار دور (متقابل) فاصله هوایی بوده و  $L_{ads}$  و  $L_{aqs}$  مقادیر اشباع شده اندوکتانس های متقابل است.

به کمک معادله 3-88 می توان جریان تحریک را به صورت زیر بیان کرد:

$$i_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{L_{fda}} \quad (89-3)$$

شار دور متقابل محور  $d$  را نیز می توان بر حسب  $\psi_{fd}$  و  $i_d$  به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} \psi_{ad} &= -L_{ads} i_d + L_{ads} i_{fd} \\ &= -L_{ads} i_d + \frac{L_{ads}}{L_{fda}} (\psi_{fd} - \psi_{ad}) \\ &= L'_{ads} \left( -i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fda}} \right) \end{aligned} \quad (90-3)$$

که در آن:

$$L'_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}}} \quad (91-3)$$

از آنجا که مدار های رتور در محور  $q$  در نظر گرفته نشده اند، شار دور متقابل به صورت ذیل داده می شود:

$$\psi_{ad} = -L_{aqs} i_q \quad (92-3)$$

گشتاور فاصله هوایی برابر است با:

$$T_e = \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d = \psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d \quad (93-3)$$

با صرف نظر کردن از عبارت  $P\psi$  و تغییرات سرعت معادلات ولتاژ استاتور عبارتند از:

$$e_d = -R_a i_d - \dot{\psi}_q = -R_a i_d + (L_i i_q - \dot{\psi}_{aq}) \quad (94-3)$$

$$e_q = -R_a i_q + \dot{\psi}_d = -R_a i_q - (L_i i_d - \dot{\psi}_{ad}) \quad (95-3)$$

به عنوان اولین گام،  $i_d$  و  $i_q$  را بر حسب  $\psi_{ad}$  و  $\psi_{aq}$  بیان کردیم. علاوه بر این،  $e_d$  و  $e_q$  بر حسب این متغیر ها بیان شده است که همراه با معادلات شبکه برای بدست آوردن عباراتی برای  $i_d$  و  $i_q$  بر حسب متغیر های حالت به کار خواهند رفت.

مزایای به کار گیری  $\psi_{ad}$  و  $\psi_{aq}$  به عنوان متغیر های واسطه در فرایند حذف، هنگامی که اثر مدار های سیم پیچ میرا کننده را در نظر بگیریم واضح تر خواهد شد.

### معادلات شبکه

از آنجا که فقط یک ماشین وجود دارد، می توان معادلات ماشین و همین طور معادلات شبکه را بر حسب چارچوب مرجعی توصیف کرد. به عبارت دیگر چارچوب مرجع  $d-q$  ماشین.

با مراجعه به شکل 3-6، ولتاژ های پایانه ماشین و شین بی نهایت بر حسب مولفه های  $d$  و  $q$  عبارت است از:

$$\widetilde{E}_t = e_d + j e_q \quad (96-3)$$

$$\widetilde{E}_B = E_{Bd} + j E_{Bq} \quad (97-3)$$

معادله قید شبکه برای سیستم شکل 3-3 ب عبارت است از:

$$\widetilde{E}_t = \widetilde{E}_B + (R_E + j X_E) \widetilde{I}_t$$

$$(e_d + j e_q) = (E_{Bd} + j E_{Bq}) + (R_E + j X_E)(i_d + j i_q) \quad (98-3)$$

از تجزیه مولفه های  $d$  و  $q$  نتیجه می شود:

$$e_d = R_E i_d - X_E i_q + E_{Bd} \quad (99-3)$$

$$e_q = R_E i_q - X_E i_d + E_{Bq} \quad (100-3)$$

که در آن

$$E_{Bd} = E_B \sin \delta \quad (101-3)$$

$$E_{Bq} = E_B \cos \delta \quad (102-3)$$

با به کار گیری معادله های 3-94 و 3-95 برای حذف  $e_d$  و  $e_q$  در معادله های 3-99 و 3-100 و به کار گیری عبارات داده شده با معادله های 3-90 و 3-92 برای  $\psi_{ad}$  و  $\psi_{aq}$  عبارات زیر را برای  $i_d$  و  $i_q$  بر حسب متغیر های حالت  $\psi_{fd}$  و  $\delta$  به دست می آوریم:

$$i_d = \frac{X_{Tq} \left[ \psi_{fd} \left( \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - R_T E_B \sin \delta}{D} \quad (103-3)$$

$$i_q = \frac{R_T \left[ \psi_{fd} \left( \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \right) - E_B \cos \delta \right] - X_{Td} E_B \sin \delta}{D} \quad (104-3)$$

که در آن:

$$R_T = R_a + R_E \quad (105-3)$$

$$X_{Tq} = X_E + (L_{aqs} + L_i) = X_E + X_{qs}$$

$$X_{Td} = X_E + (L'_{aqs} + L_i) = X_E + X'_{ds}$$

$$D = R_T^2 + X_{Tq} X_{Td}$$

راکتانس های  $X'_{ds}$  و  $X_{qs}$  مقادیر اشباع شده هستند که در مبنای واحد برابر با اندوکتانس های متناظر می باشند.

از معادلات 3-103 و 3-104، همراه با معادلات 3-89، 3-92 می توان برای حذف  $i_{fd}$  و  $T_e$  از معادلات دیفرانسیل 3-83 تا 3-85 و بیان آنها بر حسب متغیر ها استفاده کرد. این معادلات، غیر خطی هستند و باید برای تحلیل سیگنال کوچک خطی سازی شوند.

#### معادلات خطی شده سیستم

با توصیف معادلات 3-103 و 3-104 بر حسب مقادیر منحرف شده، می توان نوشت:

$$\Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \psi_{fd} \quad (106-3)$$

$$\Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \psi_{fd} \quad (107-3)$$

که در آن:

$$m_1 = \frac{E_B(X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0)}{D}$$

$$n_1 = \frac{E_B(R_T \sin \delta_0 + X_{Td} \cos \delta_0)}{D} \quad (108-3)$$

$$m_2 = \frac{X_{Td}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})}$$

$$n_2 = \frac{R_T}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})}$$

با خطی سازی معادلات 3-90 و 3-92، و جایگزینی عبارات بالا به جای  $\Delta i_d$  و  $\Delta i_q$ ، نتیجه می شود:

$$\Delta \psi_{ad} = L'_{ads} \left( -\Delta i_d + \frac{\Delta \psi_{fd}}{L_{fd}} \right)$$

$$= \left( \frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) L'_{ads} \Delta \psi_{fd} - m_1 L'_{ads} \Delta \delta \quad (109-3)$$

$$\Delta \psi_{aq} = -L_{aqs} \Delta i_q$$

$$= -n_2 L_{aqs} \Delta \psi_{fd} - n_1 L_{aqs} \Delta \delta \quad (110-3)$$

با خطی سازی معادله 3-89 و جایگزینی برای  $\Delta \psi_{ad}$  از معادله 3-109 داریم:

$$\Delta i_{fd} = \frac{\Delta \psi_{fd} - \Delta \psi_{ad}}{L_{fd}}$$

$$= \frac{1}{L_{fd}} \left( 1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right) \Delta \psi_{fd} + \frac{1}{L_{fd}} m_1 L'_{ads} \Delta \delta \quad (111-3)$$

صورت خطی شده معادله 3-93 عبارت است از:

$$\Delta T_e = \psi_{ad0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta \psi_{ad} - \psi_{aq0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta \psi_{aq}$$

با جایگزینی از معادلات 3-106 تا 3-110 برای  $\Delta i_d$ ،  $\Delta i_q$ ،  $\Delta \psi_{ad}$  و  $\Delta \psi_{aq}$  بدست می آوریم:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta \psi_{fd} \quad (112-3)$$

که در آن

$$K_1 = n_1 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) \quad (113-3)$$

$$K_2 = n_2 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_2 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} i_{q0} \quad (114-3)$$



با خطی سازی معادلات 3-83 تا 3-85 و جایگزینی عبارات برای  $\Delta i_{fd}$  و  $\Delta T_e$  داده شده با معادلات 3-111 و 3-112، معادلات سیستم را به صورت مطلوب نهایی به شکل ذیل بدست می آوریم:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (3-115)$$

که در آن داریم:

$$a_{11} = -\frac{K_D}{2H}$$

$$a_{12} = -\frac{K_1}{2H}$$

$$a_{13} = -\frac{K_2}{2H}$$

$$a_{21} = \omega_0 = 2\pi f_0$$

(3-116)

$$a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L'_{ads}$$

$$a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left[ 1 - \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L'_{ads} \right]$$

$$b_{11} = \frac{1}{2H}$$

$$b_{32} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}$$

و  $\Delta T_m$  و  $\Delta E_{fd}$  به محرکه (توربین) و کنترل های تحریک بستگی خواهند داشت. با گشتاور ورودی مکانیکی ثابت،  $\Delta T_m = 0$  و با ولتاژ خروجی تحریک ثابت،  $\Delta E_{fd} = 0$  است.

مقایسه معادلات فضای حالت بالا با معادلات بدست آمده در بخش 3-3 و 3-1 و با فرض مدل کلاسیک ژنراتور (که با فرض  $R_a = 0$ ،  $R_{fd} = 0$ ،  $X_a = X'_a$  معادل است)، قابل تامل است.

اندوکتانس های متقابل  $L_{ads}$  و  $L_{aqs}$  در معادلات بالا، مقادیر اشباع شده هستند. روش در نظر گرفتن اشباع برای تحلیل سیگنال کوچک در زیر توضیح داده می شود.

### نمایش اشباع در مطالعات سیگنال کوچک

از آنجا که عملکرد سیگنال کوچک را بر حسب مقادیر منحرف شده شار دور و جریانها بیان می کنیم، باید تمایزی بین اشباع کلی و اشباع نموی قائل شد.

اشباع نموی مربوط به مقادیر منحرف شده شار دور ها و جریانهاست. بنابراین، از شیب نموی منحنی اشباع همان طور که در شکل 3-8 نشان داده شده، برای محاسبه اشباع نموی استفاده می شود. با نشان دادن ضریب اشباع نموی با  $K_{sd(incr)}$  داریم:

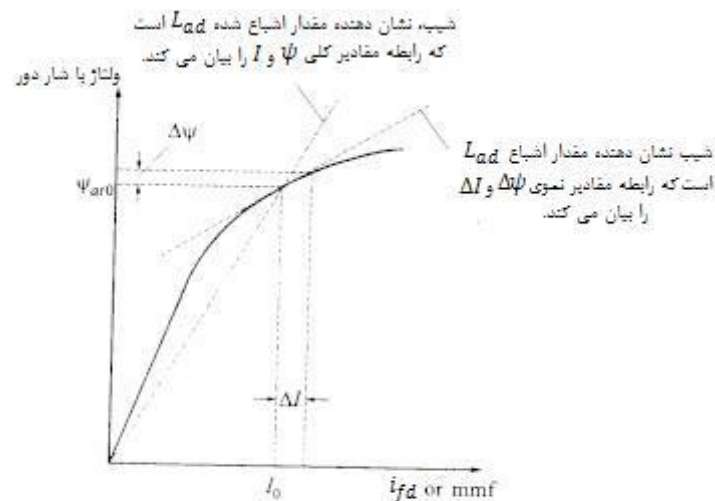
$$L_{ads(incr)} = K_{sd(incr)} L_{adu} \quad (117-3)$$

بر اساس تعاریف  $A_{sat}$ ،  $B_{sat}$  و  $\psi_{Ti}$  می توان نشان داد:

$$K_{sd(incr)} = \frac{1}{1 + B_{sat} A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at0} - \psi_{Ti})}} \quad (111-3)$$

نحوه برخورد با اشباع محور  $q$  نیز به شکل مشابه است.

اشباع کلی برای محاسبه مقادیر اولیه متغیر های مستقیم (نشان داده شده با زیر نویس صفر)، به کار گرفته می شود. برای مربوط کردن مقادیر منحرف شده، یعنی در معادله های 3-105، 3-108، 3-113، 3-114 و 3-116 از ضریب اشباع نموی استفاده می گردد.



شکل 3-8 فرق بین اشباع نموی و کلی

خلاصه روش فرموله سازی ماتریس حالت

الف) نقطه کار حالت ماندگار، پارامتر های ماشین و پارامتر های شبکه در زیر داده شده است:

$$P_t Q_t E_t R_E X_E$$

$$L_d L_q L_i R_a L_{fd} R_{fd} A_{sat} B_{sat} \psi_{Ti}$$

به طور مشابهی ممکن است به جای  $Q_t$  یا  $E_t$ ،  $E_B$  مشخص شود.

ب) اولین گام، محاسبه مقادیر حالت ماندگار اولیه متغیر های سیستم است:

زاویه ضریب توان  $I_t \Phi$

عوامل اشباع کلی  $K_{sq}$  و  $K_{sd}$

$$X_{ds} = L_{ds} = K_{sd} L_{adu} + L_i$$

$$X_{qs} = L_{qs} = K_{sq} L_{aqu} + L_i$$

$$\delta_i = \tan^{-1} \left( \frac{I_t X_{qs} \cos \Phi - I_t R_a \sin \Phi}{E_t + I_t R_a \cos \Phi + I_t X_{qs} \sin \Phi} \right)$$

$$e_{d0} = E_t \sin \delta_i$$

$$e_{q0} = E_t \cos \delta_i$$

$$i_{d0} = I_t \sin(\delta_i + \Phi)$$

$$i_{q0} = I_t \cos(\delta_i + \Phi)$$

$$E_{Bd0} = e_{d0} - R_E i_{d0} + X_E i_{q0}$$

$$E_{Bq0} = e_{q0} - R_E i_{q0} - X_E i_{d0}$$

$$\delta_0 = \tan^{-1} \left( \frac{E_{Bd0}}{E_{Bq0}} \right)$$

$$E_B = (E_{Bd0}^2 + E_{Bq0}^2)^{1/2}$$

$$i_{fd0} = \frac{e_{q0} + R_a i_{q0} + L_{ds} i_{d0}}{L_{ads}}, \quad E_{fd0} = L_{adu} i_{fd0}$$

$$\psi_{ad0} = L_{ads} (-i_{d0} + i_{fd0}), \quad \psi_{aq0} = -L_{aqs} i_{q0}$$

(ج) گام بعد محاسبه ضرایب اشباع نمودی و مقادیر اشباع شده متناظر با  $L_{ads}$ ،  $L_{aqs}$  و  $L'_{ads}$  و سپس:

105-3 از  $R_T, X_{Tq}, X_{Td}, D$  معادله

108-3 از  $m_1, m_2, n_1, n_2$  معادله

114-3 و 113-3 از  $K_1, K_2$  معادله های

می باشد.

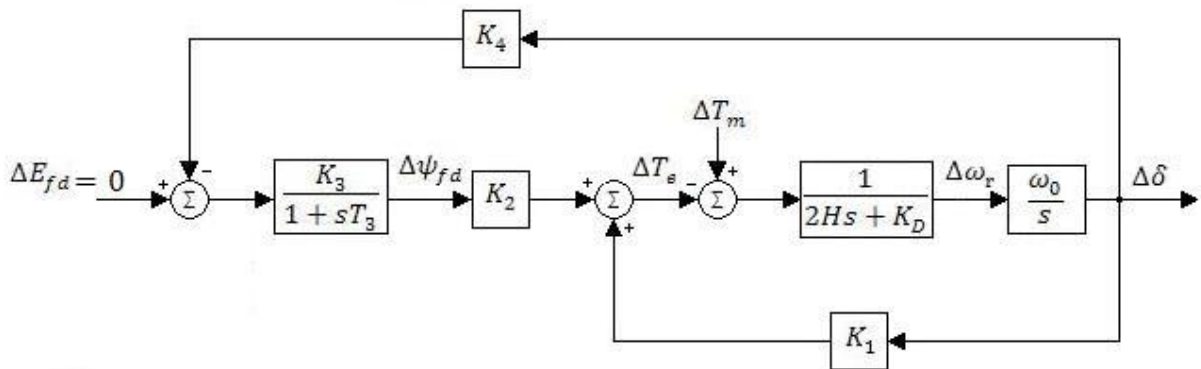
(د) سرانجام، محاسبه عناصر ماتریس  $A$  از معادله 3-116 آخرین بند عملیات است.

### نمایش نمودار بلوکی

شکل 3-9 نمودار بلوکی عملکرد سیگنال کوچک سستم را نشان می دهد. در این نمایش مشخصه های دینامیکی سیستم بر حسب ثابت های موسوم به  $K$  بیان می شود. اصول نمودار بلوکی و عبارت های ثابت های مربوطه در زیر بیان شده است:

از معادله 3-112، می توان تغییر گشتاور فاصله هوایی را به صورت تابعی از  $\Delta\delta$  و  $\Delta\psi_{fd}$  به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta T_e = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta\psi_{fd}$$



شکل 3-9 نمودار بلوکی با  $E_{fd}$  ثابت

که در آن:

$$K_1 = \Delta T_e / \Delta\delta \text{ با } \psi_{fd} \text{ ثابت}$$

$$K_2 = \Delta T_e / \Delta\psi_{fd} \text{ با زاویه رتور ثابت}$$

عبارات  $K_1$  و  $K_2$  با معادلات 3-113 و 3-114 داده شده است.

مولفه گشتاور داده شده با  $K_1 \Delta\delta$ ، با  $\Delta\delta$  هم فاز است و از این رو یکی از مولفه های گشتاور سنکرون کننده را نشان می دهد.

مولفه گشتاور حاصل از تغییرات در شار دور تحریک، با  $K_2 \Delta\psi_{fd}$  داده شده است.

تغییرات  $\psi_{fd}$  به کمک معادله دینامیکی مدار تحریک تعیین می شود:

$$P \Delta\psi_{fd} = a_{32} \Delta\delta + a_{33} \Delta\psi_{fd} + b_{32} \Delta E_{fd}$$

با دسته بندی عبارات شامل  $\Delta\psi_{fd}$  و مرتب کردن آنها، نتیجه می شود:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3}{1+PT_3} [\Delta E_{fd} - K_4 \Delta\delta] \quad (3-119)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} K_3 &= -\frac{b_{32}}{a_{33}} \\ K_4 &= -\frac{a_{32}}{b_{32}} \\ T_3 &= -\frac{1}{a_{33}} = K_3 T'_{d0} \frac{L_{adu}}{L_{ffd}} \end{aligned} \quad (120-3)$$

معادله 3-119، با جایگزین کردن  $s$  به جای  $P$ ، معادله حاکم بر بلوک مدار تحریک در شکل 3-9 است.

عبارات ثابت های  $K$  در صورت بسط داده شده

ثابت های  $K$  را بر حسب عناصر ماتریس  $A$  بیان کرده ایم. اما معمولاً آنها را به طور صریح و بر حسب پارامتر های مختلف سیستم، همان طور که در زیر خلاصه شده است بیان می کنند.

ثابت  $K_1$  در معادله 3-113 به صورت زیر بیان شد:

$$K_1 = n_1 (\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0})$$

از معادله 3-95، اولین عبارت داخل پرانتز در معادله بالا برای  $K_1$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0} = e_{q0} + R_a i_{q0} + X_{qs} i_{d0} = E_{q0} \quad (121-3)$$

که در آن  $E_{q0}$  مقدار پیش از بروز اغتشاش ولتاژ متصل به  $R_a + jX_q$  است. عبارت دوم در داخل پرانتز عبارت  $K_1$  را می توان به صورت زیر باز نوشت:

$$\psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0} = -L_{aqs} i_{q0} + L'_{ads} i_{q0} = -(X_q - X'_d) i_{q0} \quad (122-3)$$

با جایگزینی برای  $m_1$  و  $m_2$  از معادله 3-108 و برای عبارت داده شده با معادله 3-122 در معادله  $K_1$  نتیجه می شود:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{E_B E_{q0}}{D} (R_T \sin \delta_0 + X_{Td} \cos \delta_0) + \\ &\frac{E_B i_{q0}}{D} (X_q - X'_d) (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) \end{aligned} \quad (123-3)$$

به طور مشابهی، شکل بسط داده شده معادله ثابت  $K_2$  عبارت است از:

$$K_2 = \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{ffd}} \left[ \frac{R_T}{D} E_{q0} + \left( \frac{X_{Tq}(X_q - X'_d)}{D} + 1 \right) i_{q0} \right] \quad (124-3)$$

از معادله های 3-91، 3-108 و 3-116 می توان نوشت:

$$\begin{aligned}
 a_{33} &= -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{fd}} \left[ 1 - \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} + \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} \frac{L_{ads} L_{fd}}{(L_{ads} + L_{fd})} \right] \\
 &= -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{ads} + L_{fd}} \left[ 1 + \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}^2}{(L_{ads} + L_{fd})} \right] \\
 &= -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{ads} + L_{fd}} \left[ 1 + \frac{X_{Tq}}{D} (X_d - X'_d) \right]
 \end{aligned} \quad (125-3)$$

با جایگزینی از رابطه فوق در عبارت های  $K_3$  و  $T_3$  در معادله 3-120 داریم:

$$K_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{L_{adu}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Td}}{D} (X_d - X'_d)} \quad (126-3)$$

$$T_3 = \frac{L_{ads} + L_{fd}}{\omega_0 R_{fd}} \frac{1}{1 + \frac{X_{Td}}{D} (X_d - X'_d)} = \frac{T'_{dos}}{1 + \frac{X_{Td}}{D} (X_d - X'_d)} \quad (127-3)$$

که در آن  $T'_{dos}$  مقدار اشباع شده  $T'_{d0}$  است. به طور مشابه از معادله های 3-91، 3-108 و 3-116 می توان نوشت:

$$a_{32} = -\omega_0 \frac{R_{fd}}{L_{fd}} \frac{E_B}{D} (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) \frac{L_{ads} L_{fd}}{L_{ads} + L_{fd}}$$

که از جایگزینی عبارت بالا در رابطه  $K_4$  در معادله 3-120 داریم:

$$K_4 = L_{adu} \frac{L_{ads}}{L_{ads} + L_{fd}} \frac{E_B}{D} (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) \quad (128-3)$$

و اگر تاثیر اشباع نادیده گرفته شود، می توان آن را به شکل ساده تر ذیل نوشت:

$$K_4 = \frac{E_B}{D} (X_d - X'_d) (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0) \quad (129-3)$$

اگر عناصر ماتریس  $A$  در دست باشد، می توان عناصر  $K$  را مستقیماً از آن محاسبه کرد. در اینجا برای نشان دادن شکل عبارت هایی که در منابع استفاده می شود، شکل بسط داده شده آنها را بدست می آوریم. یکی از مزایای این شکل آن است که وابستگی ثابت های  $K$  به پارامتر های مختلف سیستم به سهولت آشکار می شود. لیکن عیب آن این است که ناسازگاری هایی در نمایش اثر اشباع ظاهر می گردد.

در مراجع مختلف به جای  $\psi_{fd}$ ، اغلب از  $\psi_{fd} = (L_{ad}/L_{ffd}) \psi_q$  به عنوان متغیر حالت استفاده می شود. به این ترتیب عبارت  $L_{ad}/(L_{ad} + L_{fd})$  از روابط  $K_2$  و  $K_3$  حذف می شود. اما حاصل ضرب  $K_2 K_3$  همچنان باقی خواهد ماند.

### تاثیر تغییر شار دور تحریک بر پایداری سیستم

از نمودار بلوکی شکل 3-9 مشاهده می کنیم که اگر ولتاژ تحریک ثابت باشد ( $\Delta E_{fd} = 0$ )، تغییرات شار تحریک فقط به وسیله فیدبک  $\Delta \delta$  (و از طریق ضریب  $K_4$ ) ایجاد می شود. این موضوع نشان دهنده تاثیر مغناطیس زدایی

عکس العمل آرمیچر است.

تغییر در گشتاور فاصله هوایی، ناشی از تغییرات شار تحریک ایجاد شده به وسیله تغییرات زاویه رتور به صورت زیر داده می شود:

$$\left. \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \right|_{\text{ناشی از } \Delta \psi_{fd}} = -\frac{K_2 K_3 K_4}{1 + ST_3} \quad (130-3)$$

ثابت های  $K_2 K_3$  و  $K_4$  معمولاً مثبت هستند. همان طور که بحث خواهد شد، میزان مشارکت  $\Delta \psi_{fd}$  در مولفه های گشتاور سنکرون کننده و میرا کننده به فرکانس نوسانی بستگی دارد.

الف) در حالت ماندگار و در فرکانس های خیلی پایین نوسانی ( $s = j\omega \rightarrow 0$ )، می توان نوشت:

$$\Delta T_e = -K_2 K_3 K_4 \Delta \psi_{fd}$$

تغییر شار میدان، ناشی از  $\Delta \delta$  فیدبک (یعنی ناشی از عکس العمل آرمیچر)، موجب ایجاد مولفه گشتاور سنکرون کننده منفی می شود. و هنگامی که این گشتاور از  $K_1 \Delta \delta$  تجاوز کند، سیستم به طور یکنوا ناپایدار می شود. حد پایداری حالت ماندگار هنگامی فرا می رسد که داشته باشیم:

$$K_2 K_3 K_4 = K_1$$

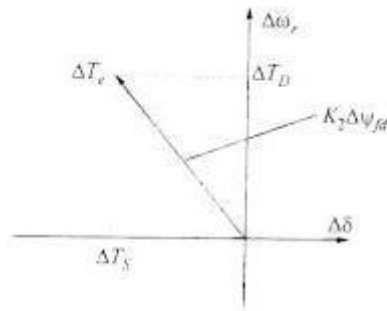
ب) در فرکانس های نوسانی بسیار بالا تر از  $1/T_3$  داریم:

$$\Delta T_e \approx -\frac{K_2 K_3 K_4}{j\omega T_3} \Delta \delta = \frac{K_2 K_3 K_4}{\omega T_3} j \Delta \delta$$

بنابراین، مولفه گشتاور فاصله هوایی ناشی از  $\Delta \psi_{fd}$  یا  $90^\circ$  نسبت به  $\Delta \delta$  پیش فاز است و یا با  $\Delta \omega$  هم فاز است از این رو،  $\Delta \psi_{fd}$  به یک مولفه گشتاور میرا کننده مثبت منجر می شود.

ج) در فرکانس های نوعی نوسانی ماشین در حدود یک هرتز ( $2\pi$  رادیانبر ثانیه)،  $\Delta \psi_{fd}$  به یک مولفه گشتاور میرا کننده مثبت و یک مولفه گشتاور میرا کننده منفی منجر می شود. تاثیر خالص، کاهش مولفه گشتاور سنکرون کننده و افزایش گشتاور میرا کننده می باشد.

حالت های خاص با  $K_4$  منفی. ضریب  $K_4$  معمولاً مثبت است. مادامی که این پارامتر مثبت باشد، اثر تغییر شار تحریک ناشی از عکس العمل آرمیچر ( $\Delta \psi_{fd}$  یا  $E_{fd}$  ثابت) به شکل ایجاد مولفه گشتاور میرا کننده مثبت ظاهر می شود. لیکن ممکن است حالت هایی وجود داشته باشد که  $K_4$  منفی باشد. باتوجه به معادله 3-128، ملاحظه می شود که اگر  $(X_E + X_q) \sin \delta_0 - (R_a + R_E) \cos \delta_0$  منفی باشد انگاه  $K_4$  نیز منفی است. این حالتی است که در آن ژنراتور نیروگاه آبی بدون سیم پیچ های میرا کننده در بار سبک کار می کند و به وسیله یک خط مقاومت دار (که مقاومت آن نسبت به راکتانس خط زیاد است) به سیستمی بزرگ متصل است.



شکل ۳-۱۰ گشتاور میرا کننده مثبت و گشتاور سنکرون کننده  
منفی ناشی از  $K_2 \Delta \psi_{fd}$

همچنین  $K_4$  هنگامی که یک ماشین به بار محلی بزرگ متصل است، که بخشی توسط ژنراتور و قسمتی توسط سیستم بزرگ دور، تغذیه می شود، می تواند منفی گردد. تحت چنین وضعیتی، گشتاور های تولید شده به وسیله جریان های القا شده در تحریک ناشی از عکس العمل آرمیچر، مولفه های غیر هم فاز با  $\Delta \omega$  داشته، موجب تولید میرایی منفی می شود.

### 3-4 اثر سیستم تحریک

در این بخش، مدل فضای حالت و نمودار بلوکی را تعمیم می دهیم تا سیستم تحریک را نیز شامل شوند. سپس اثر سیستم تحریک را بر روی عملکرد پایداری سیگنال کوچک سیستم شین بی نهایت تک ماشینه تحت مطالعه را بررسی می کنیم.

اغلب، سیگنال کنترل ورودی به سیستم تحریک، ولتاژ پایانه ژنراتور  $E_t$  است. در مدل ژنراتور اعمال شده در بخش قبل،  $E_t$  متغیر حالت نمی باشد. بنابراین باید آن را بر حسب متغیر های حالت  $\Delta \omega_r$ ،  $\Delta \delta$  و  $\Delta \psi_{fd}$  بیان کرد.

می توان  $\tilde{E}_t$  را به صورت مختلط زیر بیان کرد:

$$\tilde{E}_t = e_d + je_q$$

از این رو:

$$\tilde{E}_t^2 = e_d^2 + e_q^2$$

حال با اعمال انحراف کوچکی، می توان نوشت:

$$(E_{t0} + \Delta E_t)^2 = (e_{d0} + \Delta e_d)^2 + (e_{q0} + \Delta e_q)^2$$

با نادیده گرفتن عبارات مرتبه دوم مقادیر منحرف شده، معادله بالا به صورت زیر در می آید:

$$E_{t0} \Delta E_t = e_{d0} \Delta e_d + e_{q0} \Delta e_q$$



بنابراین:

$$\Delta E_t = \frac{e_{do}}{E_{to}} \Delta e_d + \frac{e_{qo}}{E_{to}} \Delta e_q \quad (131-3)$$

بر حسب مقادیر منحرف شده، معادلات 3-94 و 3-95 را می توان به صورت زیر باز نوشت:

$$\Delta e_d = -R_a \Delta i_d + L_i \Delta i_q - \Delta \psi_{aq}$$

$$\Delta e_q = -R_a \Delta i_q + L_i \Delta i_d - \Delta \psi_{ad}$$

با به کار گیری معادلات 3-106، 3-107، 3-109 و 3-110 برای حذف  $\Delta i_q$ ،  $\Delta i_d$ ،  $\Delta \psi_{ad}$  و  $\Delta \psi_{aq}$  از معادلات بالا بر حسب متغیر های حالت و جایگزینی از عبارات حاصل برای  $\Delta e_d$  و  $\Delta e_q$  در معادله 3-131، نتیجه می شود:

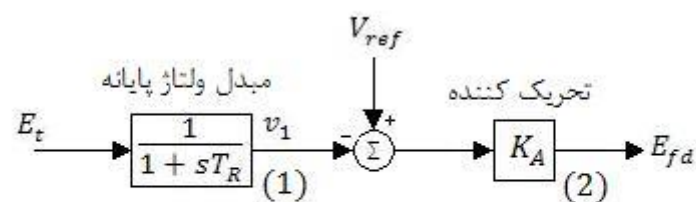
$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd} \quad (132-3)$$

که در آن:

$$K_5 = \frac{e_{do}}{E_{to}} [-R_a m_1 + L_i n_1 + L_{aqs} n_1] + \frac{e_{qo}}{E_{to}} [-R_a n_1 + L_i m_1 + L'_{ads} m_1] \quad (133-3)$$

$$K_6 = \frac{e_{do}}{E_{to}} [-R_a m_2 + L_i n_2 + L_{aqs} n_2] + \frac{e_{qo}}{E_{to}} \left[ -R_a n_2 + L_i m_2 + L'_{ads} \left( \frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \right] \quad (134-3)$$

به منظور نمایش و آزمون اثر پایداری سیگنال کوچک، مدل سیستم تحریک شکل 3-11 را در نظر می گیریم، که نمونه ای از سیستم های تحریک تریستوری نوع STIA است. لیکن این مدل چنان ساده شده که فقط عناصری را شامل می شود که برای نمایش یک سیستم مشخص لازم است. از یک بهره بالای تحریک کننده، بدون کاهش بهره گذرا یا فیدبک مشتق، استفاده شده است. پارامترهای  $T_R$  نشان دهنده ثابت زمانی مبدل ولتاژ پایانه است.



شکل 3-11 سیستم تحریک تریستوری با AVR

تنها عنصر غیر خطی مدل ناشی از سقف موجود بر ولتاژ خروجی تحریک کننده است که با  $E_{FMAX}$  و  $E_{FMIN}$  نشان داده شده است. که در مطالعات سیگنال کوچک، این حد ها نادیده گرفته می شود، زیرا به یک مدل خطی شده حول نقطه کار علاقه مندیم به گونه ای که  $E_{fd}$  در داخل حد ها باشد. چون محدود کننده ها و مدار های حفاظتی ( $V_{HZ}$ ,  $OXL$ ,  $UEL$ ) بر پایداری سیگنال کوچک تاثیری ندارند، مدل نشده اند.

از بلوک 1 شکل 3-11، با به کارگیری مقادیر منحرف شده داریم:

$$\Delta v_1 = \frac{1}{1 + PT_R} \Delta E_t$$

از این رو:

$$P \Delta v_1 = \frac{1}{T_R} (\Delta E_t - \Delta v_1)$$

با جایگزینی از معادله 3-32 به جای  $\Delta E_t$  نتیجه می شود:

$$P \Delta v_1 = \frac{K_5}{T_R} \Delta \delta + \frac{K_6}{T_R} \Delta \psi_{fd} - \frac{1}{T_R} \Delta v_1 \quad (135-3)$$

از بلوک 2 شکل 3-11 داریم:

$$E_{fd} = K_A (V_{ref} - v_1)$$

و بر حسب مقادیر منحرف شده نتیجه می شود:

$$\Delta E_{fd} = K_A (-\Delta v_1) \quad (136-3)$$

معادله دینامیکی مدار تحریک که در بخش قبلی بدست آمد، با در نظر گرفتن اثر سیستم تحریک، چنین می شود:

$$P \Delta \psi_{fd} = a_{31} \Delta \omega_r + a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \psi_{fd} + a_{34} \Delta v_1 \quad (137-3)$$

که در آن:

$$a_{34} = -b_{32} K_A = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A \quad (138-3)$$

روابط مربوط به  $a_{31}$ ،  $a_{32}$  و  $a_{33}$  بدون تغییر خواهند ماند و با معادله 3-116 داده می شوند.

از آنجا که با مدلی مرتبه اول برای تحریک کننده سروکار داریم، مرتبه کل سیستم یک واحد افزایش خواهد یافت که متغیر حالت جدید افزوده شده  $\Delta v_1$  می باشد.

از معادله 3-135 نتیجه می شود:

$$P \Delta v_1 = a_{41} \Delta \omega_r + a_{42} \Delta \delta + a_{43} \Delta \psi_{fd} + a_{44} \Delta v_1 \quad (139-3)$$

که در آن:

$$a_{41} = 0 \quad (140-3)$$

$$a_{42} = \frac{K_5}{T_R}$$

$$a_{43} = \frac{K_6}{T_R}$$

$$a_{44} = \frac{1}{T_R}$$

و  $K_5$  و  $K_6$  با معادلات 3-133 و 3-134 داده می شوند.

از آنجا که  $P\Delta\omega_r$  و  $P\Delta\delta$  مستقیماً از تحریک کننده تأثیر نمی پذیرند، داریم:

$$a_{14} = a_{24} = 0$$

بنابراین مدل فضای حالت کامل سیستم قدرت، شامل سیستم تحریک شکل 3-11 به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega}_r \\ \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\psi}_{fd} \\ \Delta\dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{43} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \\ \Delta\psi_{fd} \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (3-141)$$

با فرض اینکه ورودی گشتاور مکانیکی ثابت باشد، داریم:

$$\Delta T_m = 0$$

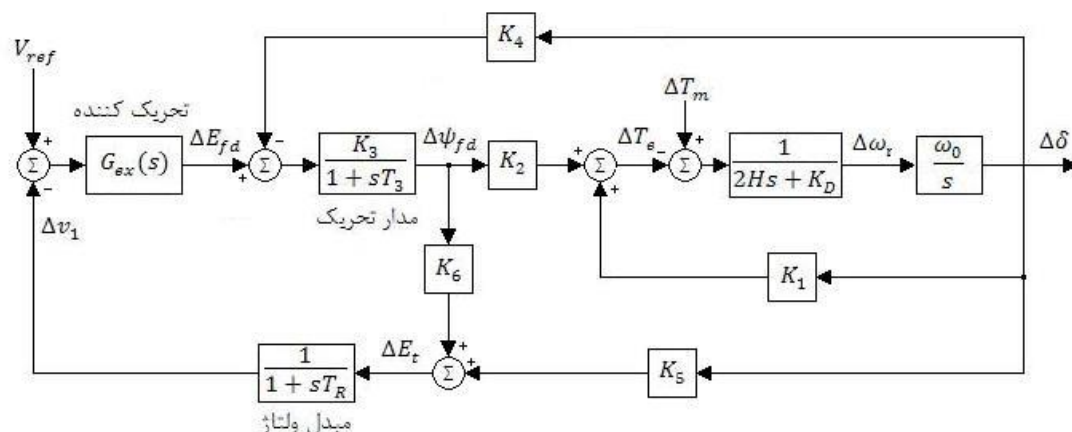
نمودار بلوکی شامل سیستم تحریک

شکل 3-12 نمودار بلوکی حاصل از تعمیم شکل 3-9 را با مخلوط کردن مبدل ولتاژ و بلوک های AVR و تحریک کننده نشان می دهد. این نمایش به هر نوع تحریک کننده، با این فرض که  $G_{ex}(s)$ ، نشان دهنده تابع تبدیل AVR تحریک کننده باشد، قابل اعمال است. برای تحریک کننده تریستوری داریم:

$$G_{ex}(s) = K_A$$

و سیگنال خطای ولتاژ پایانه که ورودی بلوک مبدل ولتاژ را تشکیل می دهد، با معادله 3-132 داده می شود:

$$\Delta E_t = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta\psi_{fd}$$



شکل 3-12 نمودار بلوکی با تحریک کننده AVR

ضریب  $K_6$  همواره مثبت است، در حالی که  $K_5$  می تواند بسته به وضع کاری و امیدانس شبکه خارجی  $R_E + jX_E$  مثبت یا منفی باشد. همان طور که در پایین نشان داده شده است، مقدار  $K_5$  نقش مهمی در تاثیر AVR بر میرای نوسان ها دارد.

### تاثیر AVR بر روی مولفه های گشتاور سنکرون کننده و میرا کننده

با عمل تنظیم کننده خودکار ولتاژ، تغییرات شار تحریک، علاوه بر عکس العمل آرمیچر به وسیله تغییرات ولتاژ تحریک نیز ایجاد می شود. با توجه به نمودار بلوکی شکل 3-12، مشاهده می شود که:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{K_3}{1+ST_3} \left[ -K_4\Delta\delta - \frac{G_{ex}(S)}{1+ST_R} (K_5\Delta\delta + K_6\Delta\psi_{fd}) \right] \quad (142-3)$$

با دسته بندی مجدد شامل  $\Delta\psi_{fd}$  و مرتب کردن مجدد، داریم:

$$\Delta\psi_{fd} = \frac{-K_3[K_4(1+ST_R)+K_5G_{ex}(S)]}{S^2T_3T_R+S(T_3+T_R)+1+K_3K_6G_{ex}(S)} \Delta\delta \quad (143-3)$$

تغییر در گشتاور فاصله هوایی ناشی از تغییر در شار دور تحریک عبارت است از:

$$\left. \frac{\Delta T_e}{\Delta\psi_{fd}} \right| = K_2 \Delta\psi_{fd} \quad (144-3)$$

همچنان که قبلا ذکر شده، ثابت های  $K_2$ ،  $K_3$ ،  $K_4$  و  $K_6$  معمولا مثبتند، لیکن  $K_5$  ممکن است مثبت یا منفی باشد. بنابراین تاثیر AVR بر روی مولفه های گشتاور میرا کننده و سنکرون کننده به طور عمده ناشی از  $K_5$  و  $G_{ex}(S)$  است. این مطلب را با در نظر گرفتن یک حالت مشخص با پارامتر های زیر نشان می دهیم:

$$K_1 = 1.591 \quad K_2 = 1.5 \quad K_3 = 0.333 \quad K_4 = 1.8 \quad T_3 = 1.91$$

$$K_5 = -0.12 \quad K_6 = 0.3 \quad T_R = 0.02 \quad G_{ex}(S) = K_A$$

$$H = 3.0 \quad K_D = 0.0$$

که سیستمی را با یک تحریک کننده تریستوری نشان می دهد و وضع سیستم به گونه ای است که  $K_5$  منفی است.

الف) ضریب گشتاور سنکرون کننده حالت ماندگار: از معادلات 3-143 و 3-144 با فرض  $S = j\omega = 0$   $\Delta T_e$  ناشی از  $\Delta\psi_{fd}$  عبارت است از:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\Delta T_e}{\Delta\psi_{fd}} \right| &= \frac{-K_2K_3(K_4 + K_5K_A)}{1 + K_3K_6K_A} \Delta\delta \\ &= \frac{-1.5 \times 0.333(1.8 - 0.12K_A)}{1 + 0.333 \times 0.3 K_A} \Delta\delta \end{aligned}$$

$$= \frac{0.06 K_A - 0.9}{1 + 0.1 K_A} \Delta \delta$$

از این رو، ضریب گشتاور سنکرون کننده ناشی از  $\Delta \psi_{fd}$  برابر است با:

$$K_{S(\Delta \psi_{fd})} = \frac{0.06 K_A - 0.9}{1 + 0.1 K_A}$$

مشاهده می شود که تاثیر AVR، افزایش مولفه گشتاور سنکرون کننده حالت ماندگار است. با  $K_A = 0$  (به عبارت دیگر،  $E_{fd}$  ثابت)،  $K_{S(\Delta \psi_{fd})} = -0.9$  است. هنگامی که  $K_A = 15$  AVR دقیقاً تاثیر مغناطیس زدایی عکس العمل آرمیچر را جبران سازی می کند.  $K_A = 200$ ،  $K_{S(\Delta \psi_{fd})} = 0.529$  است و ضریب گشتاور سنکرون کننده کلی عبارت است از:

$$K_S = K_1 + K_{S(\Delta \psi_{fd})} = 1.591 + 0.529 = 2.12 \text{ گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

در اینجا  $K_5$  را منفی در نظر گرفتیم. با  $K_5$  مثبت AVR عکس تاثیر بالا را خواهد داشت؛ یعنی آنکه، تاثیر AVR کاهش مولفه گشتاور سنکرون کننده حالت ماندگار خواهد بود.

گرچه در این مثال یک تحریک کننده تریستوری خاصی را در نظر گرفته ایم، اما مشاهدات فوق به هر نوع تحریک کننده ای که بهره حالت ماندگار مربوط به تحریک کننده (یا AVR) اش برابر با  $K_A$  است قابل اعمال می باشد.

(ب) مولفه گشتاور سنکرون کننده میرا کننده در فرکانس نوسانی رتور: جایگزینی مقادیر عددی به حالت خاص تحت مطالعه در معادله 3-143، نتیجه می دهد:

$$\Delta \psi_{fd} = \frac{-0.6 - 0.0333 K_5 K_A - 0.012 S}{0.0382 S^2 + 1.93 S + 1 + 0.1 K_A} \Delta \delta$$

از معادله 3-144 داریم:

$$\left. \frac{\Delta T_e}{\Delta \psi_{fd}} \right| = K_2 \Delta \psi_{fd} = \frac{1.5(-0.6 - 0.0333 K_5 K_A - 0.012 S)}{0.0382 S^2 + 1.93 S + 1 + 0.1 K_A} \Delta \delta$$

فرض می کنیم که فرکانس نوسان رتور 10 رادیان بر ثانیه ( $1/6$  هرتز) باشد. پس با  $S = j\omega = j10$  داریم:

$$\left. \frac{\Delta T_e}{\Delta \psi_{fd}} \right| = \frac{-0.9 - 0.5 K_5 K_A - j0.18}{-2.82 + 0.1 K_A + j19.3} \Delta \delta$$

با  $K_5 = -0.12$  و  $K_A = 200$ ، خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\Delta T_e}{\Delta \psi_{fd}} \right| = \frac{11.1 - j0.18}{17.18 + j19.3} \Delta \delta = 0.2804 \Delta \delta - 0.3255 (j \Delta \delta)$$

بنابراین تاثیر AVR، هنگامی که  $K_5$  منفی است، افزایش مولفه گشتاور سنکرون کننده و کاهش مولفه گشتاور میرا کننده می باشد.

ضریب گشتاور سنکرون کننده کلی عبارت است از:

$$K_S = K_1 + K_{S(\Delta\psi_{fd})} = 1.591 + 0.2804 = 1.8714 \text{ گشتاور مبنای واحد بر رادیان}$$

مولفه گشتاور میرا کننده ناشی از  $\Delta\psi_{fd}$  برابر است با:

$$K_{D(\Delta\psi_{fd})} = -0.3255 (j\Delta\delta)$$

از آنجا که  $\Delta\omega_r = S \Delta\delta/\omega_0 = j\omega\Delta\delta/\omega_0$  است، داریم:

$$K_{D(\Delta\psi_{fd})} = -\frac{0.3255\omega_0}{\omega} \Delta\omega_r$$

با (رادیان بر ثانیه)  $\omega = 10$ ، ضریب گشتاور میرا کننده خواهد شد:

$$K_{D(\Delta\psi_{fd})} = -12.27 \text{ گشتاور مبنای واحد بر تغییر سرعت مبنای واحد}$$

در صورت عدم حضور هر منبع میرا کننده دیگر،  $K_D$  کل برابر است با  $K_{D(\Delta\psi_{fd})}$  است.

به سادگی ملاحظه می شود که  $K_5$  مثبت، مولفه های گشتاور میرا کننده ناشی از  $\Delta\psi_{fd}$  بر خلاف بالا خواهد بود.

برای سیستم تحت مطالعه جدول 3-1 تاثیر AVR را بر روی  $K_S$  و  $K_D$  در (رادیان بر ثانیه)  $\omega = 10$  و برای مقادیر مختلف  $K_A$ ، خلاصه می کند.

$K_A$	$K_{S(\Delta\psi_{fd})}$	$K_S = K_1 + K_{S(\Delta\psi_{fd})}$	$K_{D(\Delta\psi_{fd})}$
-------	--------------------------	--------------------------------------	--------------------------

0/0	-0/0025	1/5885	1/772
10/0	-0/0079	1/5831	0/614
15/0	-0/0093	1/5817	0/024
25/0	-0/0098	1/5812	-1/166
50/0	0/0029	1/5939	-4/090
100/0	0/0782	1/6692	-8/866
200/0	0/2804	1/8714	-12/272
400/0	0/4874	2/0784	-9/722
1000/0	0/5847	2/1758	-4/448
بی نهایت	0/6000	2/1910	-/000

جدول 3-1

با فرض  $K_A = 0$ ،  $\Delta\psi_{fd}$  به طور کامل از عکس العمل آرمیچر ناشی است. تاثیر AVR، کاهش  $K_D$  برای کلیه مقادیر مثبت  $K_A$  می باشد. میرایی کلی برای  $K_A = 200$  حداقل (منفی تری)، و برای  $K_A = \infty$  صفر است. برای مقادیر کم  $K_A$ ، تاثیر AVR کاهش  $K_S$  به مقدار بسیار کم است،  $K_S$  کلی در  $K_A$  تقریباً برابر با 46 حداقل است. با افزایش  $K_A$  بیش از این مقدار،  $K_S$  به طور یکنواخت افزایش می یابد. برای مقدار بی نهایت  $K_A$  گشتاور ناشی از  $\Delta\psi_{fd}$  با  $\Delta\delta$  هم فاز است، و از این رو مولفه میرا کننده ندارد.

ما معمولاً به عملکرد سیستم های تحریک با پاسخ سریع یا متوسط علاقمندیم. برای چنین سیستم های تحریکی، می توان موارد کلی زیر را در خصوص اثر AVR بیان کرد:

- با  $K_5$  مثبت، تاثیر AVR به شکل ایجاد یک گشتاور سنکرون کننده منفی و یک مولفه گشتاور میرا کننده مثبت ظاهر می شود.

- برای مقادیر کم راکتانس سیستم خارجی و خروجی های کم ژنراتور، ثابت  $K_5$  مثبت است.

- معمولاً در چنین حالت هایی، کاهش  $K_5$  ناشی از عمل AVR، چندان مهم نیست، زیرا  $K_1$  آنقدر زیاد است که  $K_5$  کلی به میزان زیادی بزرگتر از صفر است.

- با  $K_5$  منفی عمل AVR یک مولفه گشتاور سنکرون کننده مثبت و یک مولفه گشتاور میرا کننده منفی ایجاد می کند. این تاثیر با افزایش پاسخ تحریک کننده بیشتر ملموس می شود.

برای مقادیر زیاد راکتانس سیستم خارجی و خروجی های زیاد ژنراتور،  $K_5$  منفی است. در عمل، معمولاً موقعیتی رخ نمی دهد که در آن  $K_5$  منفی است. در چنین حالتی، داشتن پاسخ بالای تحریک کننده برای افزایش گشتاور سنکرون کننده، سودمند است. لیکن چنین عملی میرایی منفی ایجاد می کند. یک راه حل ممکن دیگر، رسیدن به مصالحه و تنظیم پاسخ تحریک کننده به گونه ای است که برای محدوده معینی از حالت های کار سیستم مولفه های گشتاور سنکرون کننده و میرا کننده را، به اندازه کافی فراهم آورد. البته ممکن است رسیدن به این حالت همواره ممکن نباشد و ممکن است لازم باشد برای فراهم آوردن گشتاور سنکرون کننده و عملکرد پایدار گذرای

مورد نیاز از پاسخ بالای تحریک کننده استفاده شود. اگر راکتانس سیستم خارجی زیاد باشد، ممکن است حتی با پاسخ پایین تحریک کننده، ضریب کلی گشتاور میرا کننده منفی باشد.

یک راه موثر برای برخورد با ملاحظات متضاد عملکرد تحریک کننده در خصوص پایداری سیستم، کاربرد پایدار ساز سیستم قدرت است که در فصل بعد توضیح داده خواهد شد.



## فصل چهارم

### طراحی پایدار ساز سیستم قدرت (PSS)

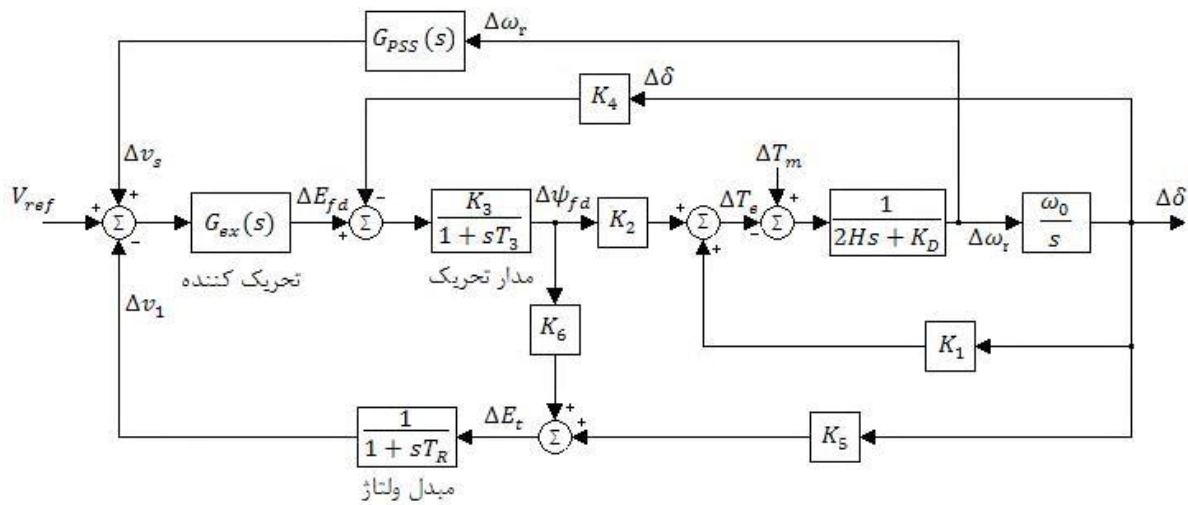
#### 4-1 پایدار ساز سیستم قدرت

نقش اصلی یک پایدار ساز سیستم قدرت (PSS)، افزودن میرایی به نوسان های رتور ژنراتور به وسیله کنترل تحریک آن با استفاده از سیگنال (های) پایدار ساز کمکی است. برای فراهم آوردن میرایی، باید پایدار ساز یک مولفه گشتاور الکتریکی را هم فاز با انحراف های سرعت رتور ایجاد کند.

پایه های نظری PSS را می توان به کمک نمودار بلوکی نشان داده شده در شکل 4-1 نشان داد. که تعمیمی از نمودار بلوکی شکل 3-12 است که تاثیر PSS را نیز شامل می شود.

از آنجا که هدف PSS اعمال مولفه گشتاور میرا کننده است، یکی از سیگنال های مناسب برای کنترل تحریک ژنراتور، انحراف سرعت  $\Delta\omega_r$  می باشد.

اگر تابع تبدیل تحریک کننده  $G_{ex}(s)$  و تابع تبدیل ژنراتور بین  $\Delta E_{fd}$  و  $\Delta T_e$  بهره های خالص بودند، هر فیدبک مستقیمی از  $\Delta\omega_r$  به یک مولفه گشتاور میرا کننده منجر می شد. لیکن در عمل، هم ژنراتور و هم تحریک کننده (بسته به نوع آن) مشخصه های بهره و فازی وابسته به فرکانس از خود نشان خواهند داد. از این رو تابع تبدیل PSS،  $G_{PSS}(s)$  باید مدار های جبران ساز فاز مناسبی داشته باشد تا برای پس فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور خروجی، جبران سازی را انجام دهد. در حالت ایده آل با تعیین مشخصه فاز  $G_{PSS}(s)$  به صورت معکوس دقیق مشخصه های فاز ژنراتور و تحریک کننده ای که باید جبران شوند، PSS در تمامی فرکانس های نوسان به یک گشتاور میرا کننده خالص منجر خواهد شد.



شکل ۴-۱ نمودار بلوکی با AVR و PSS

شایان ذکر اینکه برای ساده شدن مدل سیستم و نمایش آن به صورت نمودار بلوکی، مدل ژنراتور شکل ۴-۱ از سیم پیچ میرا کننده چشم پوشی می کند. لیکن ممکن است سیم پیچ میرا کننده، تاثیر بسزایی بر روی مشخصه های فاز ژنراتور داشته باشد و لذا باید در بدست آوردن پارامترهای PSS در نظر گرفته شود. سیم پیچ میرا کننده در بخش ۴-۲ در نظر گرفته خواهد شد.

در اینجا به منظور بررسی اثر سیستم تحریر، اصول کار PSS را با در نظر گرفتن سیستم کاربردی در فصل قبل نشان خواهیم داد. همانند قبل پارامترهای سیستم عبارت است از:

$$K_1 = 1.591 \quad K_2 = 1.5 \quad K_3 = 0.333 \quad K_D = 0.0 \quad H = 3.0$$

$$T_3 = 1.91 \quad K_5 = -0.12 \quad K_6 = 0.3 \quad G_{ex}(s) = K_A = 200$$

از آنجا که  $T_R$  در مقایسه با  $T_3$  خیلی کوچک است، می توان از تاثیر آن در بررسی عملکرد PSS صرف نظر کرد. این موضوع تحلیل را بدون از دست دادن دقت ساده می کند.

از نمودار بلوکی شکل ۴-۱ با چشم پوشی از  $T_R$ ،  $\Delta \psi_{fd}$  ناشی از PSS به صورت زیر داده می شود:

$$\Delta \psi_{fd} = \frac{K_3 K_A}{1 + sT_3} (-K_6 \Delta \psi_{fd} + \Delta v_s)$$

بنابراین:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \psi_{fd}}{\Delta v_s} &= \frac{K_3 K_A}{sT_3 + 1 + K_3 K_6 K_A} \\ &= \frac{0.333 \times 200}{1.91s + 1 + 0.333 \times 0.3 \times 200} = \frac{66.66}{19.1s + 21} \end{aligned}$$

اکنون جبران سازی فاز PSS را، که برای تولید گشتاور میرا کننده در فرکانس نوسان رتور (10 رادیان بر ثانیه) لازم است، بررسی می کنیم.  $s = j\omega = j10$  داریم:

$$\frac{\Delta\psi_{fd}}{\Delta v_s} = \frac{66.66}{j19.1 + 21}$$

$$\Delta T_{PSS} = \Delta T_e \text{ ناشی از PSS} = K_2 (\Delta\psi_{fd} \text{ ناشی از PSS})$$

بنابراین، در فرکانس 10 رادیان بر ثانیه خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta T_{PSS}}{\Delta v_s} = K_2 \left( \frac{66.66}{j19.1 + 21} \right) = \frac{1.5 \times 66.66}{j19.1 + 21} = 3.522 \angle -42.3^\circ$$

$\Delta T_{PSS}$  باید هم فاز با  $\Delta\omega_r$  باشد. (به عبارت دیگر، گشتاور میرا کننده خالص)، سیگنال  $\Delta\omega_r$  باید از طریق یک مدار پیش فاز به گونه ای پردازش شود که سیگنال به اندازه  $\theta = 42.3^\circ$  در فرکانس نوسان 10 رادیان بر ثانیه پیش افتد. مقدار میرایی اعمال شده، به بهره تابع تبدیل PSS در آن فرکانس بستگی خواهد داشت. بنابراین:

$$\Delta T_{PSS} = (\omega = 10 \text{ بهره PSS در}) (3.522) (\Delta\omega_r)$$

با جبران سازی دقیق مدار پیش فاز برای پس فاز بین  $\Delta T_e$  و  $\Delta v_s$ ، جبران سازی بالا، میرا کننده خالص است.

ضریب گشتاور میرا کننده ناشی از PSS در (رادیان بر ثانیه)  $\omega = 10$  برابر است با:

$$K_D(PSS) = (3.522) (\text{بهره PSS})$$

در فصل قبل،  $K_D$  ناشی از AVR برابر با 12/27- تعیین گردید. بنابراین  $K_D$  کلی در برگیرنده اثر AVR و PSS عبارت است از:

$$K_D = -12.27 + (\omega = 10 \text{ بهره PSS در}) (3.522)$$

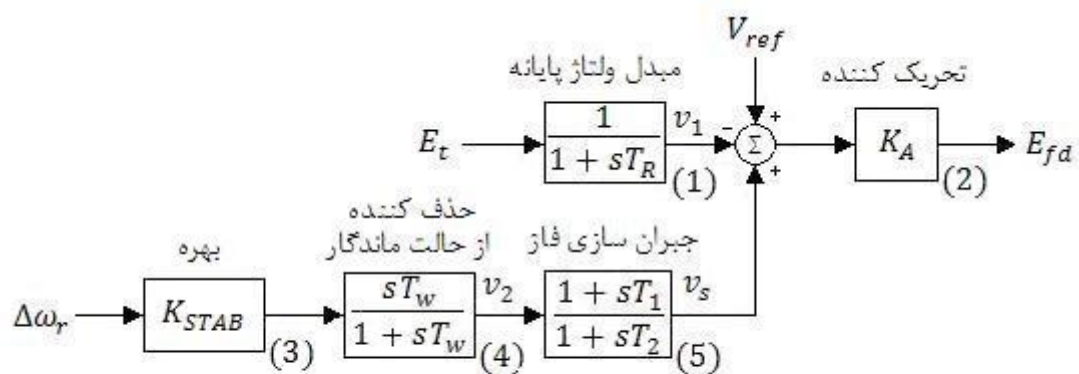
با بهره  $12.27/3.522 = 3.48$ ، PSS فقط به اندازه کافی برای جبران سازی میرایی منفی ناشی از عمل AVR، میرایی ایجاد می کند. با افزایش بهره PSS، مقدار میرایی نیز افزایش می یابد.

اگر مدار پیش فاز، جبران سازی بیشتری از پس فاز بین  $\Delta T_e$  و  $\Delta v_s$  فراهم آورد، PSS علاوه بر مولفه گشتاور میرا کننده، یک مولفه گشتاور سنکرون کننده منفی نیز ایجاد می کند. بر عکس، با زیر- جبران سازی، به یک مولفه گشتاور سنکرون کننده مثبت دست خواهیم یافت. معمولاً، PSS لازم است که در میرایی نوسان های رتور نه در یک فرکانس تک، بلکه در محدوده ای از فرکانس ها نقش داشته باشد.

اینک ساختار کلی مدل سازی، و عملکرد پایدار ساز های قدرت را با در نظر گرفتن سیستم تحریک تریستوری نشان خواهیم داد. شکل 4-2 نمودار بلوکی سیستم تحریک را همراه با AVR و PSS نشان می دهد. از آنجا که عملکرد

سیگنال کوچک در نظر گرفته خواهد شد، حد های خروجی پایدار ساز و خروجی تحریک کننده در شکل نشان داده نشده است. در زیر توصیف مختصری از اصول ترکیب PSS و ملاحظات دربار انتخاب پارامتر ها آورده شده است.

نمایش PSS در شکل 4-2 شامل سه بلوک است: بلوک جبران سازی فاز، بلوک حذف کننده اثر سیگنال حالت ماندگار و بلوک بهره.



شکل ۴-۲ سیستم تحریک ترستوری با AVR و PSS

بلوک جبران سازی فاز، مشخصه پیش فاز مناسب را برای جبران سازی پس فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی ژنراتور (فاصله هوایی) فراهم می آورد. شکل، بلوکی از مرتبه اول را نشان می دهد. اما در عمل ممکن است از دو یا چند بلوک مرتبه اول برای دستیابی به جبران سازی مطلوب فاز استفاده شود. در برخی از نمونه ها از بلوک های مرتبه دوم با ریشه های مختلط بهره برده شده است.

معمولا گستره فرکانسی مورد علاقه 0/1 تا 0/2 هرتز می باشد، و مدار پیش فاز باید جبران سازی را بر روی تمامی این گستره فرکانسی فراهم آورد. مشخصه فازی که باید جبران گردد، با تغییر وضعیت سیستم تغییر می کند، از این رو مصالحه ای صورت می گیرد و مشخصه قابل قبولی برای وضعیت های مختلف سیستم انتخاب می شود. معمولا مقداری نیز جبران سازی لازم است تا PSS، علاوه بر افزایش چشمگیری در گشتاور میرا کننده، به افزایش اندکی در گشتاور سنکرون کننده منجر گردد.

بلوک حذف کننده اثر حالت ماندگار به صورت فیلتری بالا گذر، با ثابت زمانی  $T_w$  به اندازه کافی بزرگ عمل می کند و اجازه می دهد تا سیگنال های متناظر با نوسان های  $\omega_r$  بدون تغییر عبور کنند. بدون آن، تغییرات ماندگار در سرعت، ولتاژ پایانه را تغییر می دهد. این بلوک اجازه می دهد تا PSS فقط به تغییرات سرعت پاسخ دهد. از نظر تابع این بلوک، مقدار  $T_w$  حساس نبوده و می تواند در گستره 1 تا 20 ثانیه باشد. نکته اصلی آن است که باید مقدار  $T_w$  به اندازه کافی زیاد باشد تا سیگنال های پایدار ساز را در فرکانس های مورد علاقه بدون تغییر عبور دهد، ولی آنقدر بزرگ نباشد که به هنگام پارگی سیستم، به انحراف نامطلوب ژنراتور منجر شود.

بهره پایدار سازی  $K_{STAB}$  قدرت میرایی ایجاد شده از PSS را تعیین می کند. به طور ایده آل، باید بهره در مقدار متناظر با حداکثر میرایی تنظیم گردد؛ لیکن، معمولا مقدار آن به واسطه ملاحظات دیگری محدود می شود.

در کاربرد PSS، باید دقت نمود که پایداری کلی سیستم، و نه فقط پایداری سیگنال کوچک، تقویت شود. اهداف عملکرد PSS، سیگنال های ورودی جایگزین و توصیفی تفصیلی از نحوه انتخاب پارامتر های PSS (به منظور تقویت پایداری کلی سیستم) می باشد.

### ماتریس حالت سیستم شامل PSS

از بلوک 4 شکل 4-2 و با به کارگیری مقادیر منحرف شده داریم:

$$\Delta v_2 = \frac{PT_W}{1 + PT_W} (K_{STAB} \Delta \omega_r)$$

بنابراین:

$$P \Delta v_2 = K_{STAB} P \Delta \omega_r - \frac{1}{T_W} \Delta v_2$$

از جایگزینی  $P \Delta \omega_r$  داده شده با معادله 3-115، عبارت زیر را بر حسب متغیر های حالت برای  $\Delta v_2$  بدست می آوریم:

$$\begin{aligned} P \Delta v_2 &= K_{STAB} \left[ a_{11} \Delta \omega_r + a_{12} \Delta \delta + a_{13} \Delta \psi_{fd} + \frac{1}{2H} \Delta T_m \right] - \frac{1}{T_W} \Delta v_2 \\ &= a_{51} \Delta \omega_r + a_{52} \Delta \delta + a_{53} \Delta \psi_{fd} + a_{55} \Delta v_2 + \frac{K_{STAB}}{2H} \Delta T_m \end{aligned} \quad (1-4)$$

که در آن:

$$a_{51} = K_{STAB} a_{11} \quad a_{52} = K_{STAB} a_{12}$$

$$a_{53} = K_{STAB} a_{13} \quad a_{55} = -\frac{1}{T_W} \quad (2-4)$$

از آنجا که  $P \Delta v_2$  تابعی از  $\Delta v_1$  و  $\Delta v_3$  نیست، بنابراین  $a_{54} = a_{56} = 0$  است.

از بلوک 5 نتیجه می شود:

$$\Delta v_S = \Delta v_2 \left( \frac{1 + PT_1}{1 + PT_2} \right)$$

پس:

$$P \Delta v_S = \frac{T_1}{T_2} P \Delta v_2 + \frac{1}{T_2} \Delta v_2 - \frac{1}{T_2} \Delta v_S$$

با جایگزینی  $P \Delta v_2$ ، با معادله 4-1، نتیجه می شود:

$$P \Delta v_2 = a_{61} \Delta \omega_r + a_{62} \Delta \delta + a_{63} \Delta \psi_{fd} +$$

$$a_{64}\Delta v_1 + a_{65}\Delta v_2 + a_{66}\Delta v_S + \frac{T_1 K_{STAB}}{T_2 2H} \Delta T_m \quad (3-4)$$

که در آن داریم:

$$a_{61} = \frac{T_1}{T_2} a_{51} a_{62} = \frac{T_1}{T_2} a_{52} \quad (4-4)$$

$$a_{63} = \frac{T_1}{T_2} a_{53} a_{65} = \frac{T_1}{T_2} a_{55} + \frac{1}{T_2} a_{66} = -\frac{1}{T_2}$$

از بلوک 2 شکل 4-2 می توان نوشت:

$$\Delta E_{fd} = K_A (\Delta v_S - \Delta v_1)$$

معادله مدار تحریک با در نظر گرفتن PSS چنین است:

$$P \Delta \psi_{fd} = a_{32} \Delta \delta + a_{33} \Delta \psi_{fd} + a_{34} \Delta v_1 + a_{36} \Delta v_S \quad (5-4)$$

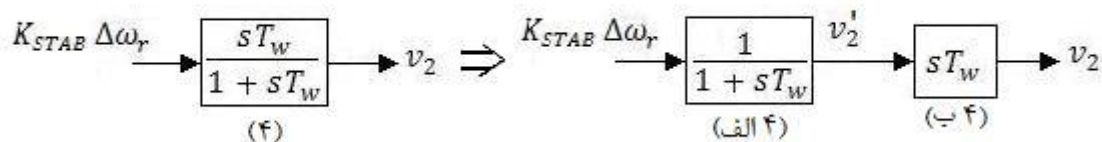
که در آن داریم:

$$a_{36} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} K_A \quad (6-4)$$

مدل فضای حالت کامل با فرض  $\Delta T_m = 0$  و در بر گیرنده PSS به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{v}_1 \\ \Delta \dot{v}_2 \\ \Delta \dot{v}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_S \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

روشهای دیگر برخورد با بلوک های 4 و 5: می توان بلوک 4 را به صورت ترکیبی از دو بلوک در نظر گرفت:



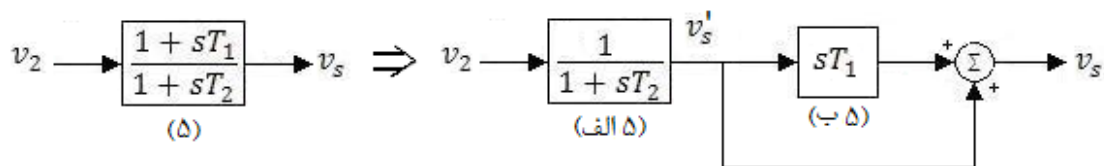
در این صورت  $\Delta v_2'$  متغیر حالت خواهد شد و:

$$p \Delta v_2' = \frac{1}{T_w} (K_{STAB} \Delta \omega_r - \Delta v_2')$$

و خروجی بلوک  $\Delta v_2$  نیز به صورت زیر داده می شود:

$$\Delta v_2 = T_W p \Delta v'_2 = K_{STAB} \Delta \omega_r - \Delta v'_2$$

مزیت این روش، آن است که لازم نیست عبارتی برای مشتق متغیر ورودی به بلوک بیان کنیم. این موضوع در مواقعی مهم است که ورودی جز متغیرهای حالت نیست، در چنین حالتی عبارت مشتق ورودی به سادگی در دسترس نمی باشد. به طور مشابه می توان با بلوک 5 به صورت زیر برخورد نمود:



در این حالت،  $v'_s$  متغیر حالت است و:

$$p \Delta v'_s = \frac{1}{T_2} (\Delta v_2 - \Delta v'_s)$$

و خروجی  $\Delta v_s$  به صورت زیر داده می شود:

$$\Delta v_s = T_1 p \Delta v'_s + \Delta v'_s = \frac{T_1}{T_2} \Delta v_2 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \Delta v'_s$$

عیب این روش آن است که خروجی بلوک جزء متغیرهای حالت نیست و بنابراین نمی توان مستقیماً با محاسبه متغیر حالت بر آن نظارت کرد.

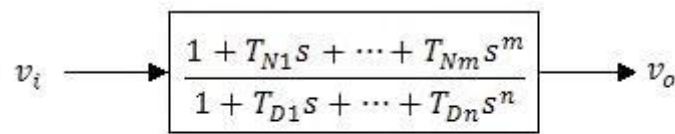
برای مدل های سیستم تحریکی با بلوک های تابع تبدیل درجه بالاتر می توان از روش کلی زیر استفاده کرد.

### بلوک های تابع تبدیل درجه بالاتر

یک تابع تبدیل مرتبه  $n$  را با نمودار بلوکی شکل 4-3 در نظر بگیرید:

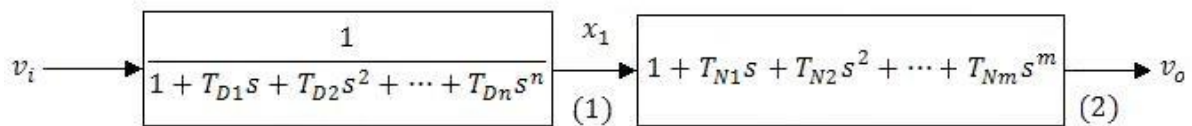
سیستم زیر  $n$  قطب و  $m$  صفر ( $m < n$ ) دارد. تابع تبدیل شکل 4-3 را می توان به دو قسمت زیر تقسیم کرد:

$$G(S) = \frac{v_o(S)}{v_i(S)} = \frac{x_1(S)}{v_i(S)} \frac{v_o(S)}{x_1(S)} \quad (4-8)$$



شکل ۴-۳

بنابراین تابع تبدیل مرتبه  $n$  را می توان برحسب دو بلوک (به صورت شکل ۴-۴) نمایش داد.



شکل ۴-۴

با توجه به بلوک 1 در شکل ۴-۴ می توان نوشت:

$$x_1(1 + T_{D1}s + T_{D2}s^2 + \dots + T_{Dn}s^n) = v_i \quad (4-9)$$

فرض کنید:

$$x_2 = \dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt}$$

$$x_3 = \dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} \quad (4-10)$$

.....

$$x_n = \dot{x}_{n-1} = \frac{dx_{n-1}}{dt}$$

با توجه به معادله ۴-۹ در حوزه زمان می توان نوشت:

$$x_1 + T_{D1}x_2 + T_{D2}x_3 + \dots + T_{D(n-1)}x_n + T_{Dn}\dot{x}_n = v_i$$

بنابراین:

$$\dot{x}_n = \frac{1}{T_{Dn}}[v_i - x_1 - T_{D1}x_2 - \dots - T_{D(n-1)}x_n] \quad (4-11)$$

از ترکیب معادلات ۴-۱۰ و ۴-۱۱ داریم:



$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\frac{1}{T_{Dn}} & -\frac{T_{D1}}{T_{Dn}} & -\frac{T_{D2}}{T_{Dn}} & \cdots & -\frac{T_{D(n-1)}}{T_{Dn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{1}{T_{Dn}} \end{bmatrix} v_i \quad (12-4)$$

از بلوک 2 شکل 4-4، معادله خروجی عبارت است از:

$$v_0 = x_1 + T_{n1}x_2 + T_{n2}x_3 + \cdots + T_{nm}x_{m+1} \quad (13-4)$$

$$= [1 \ T_{n1} \ T_{n2} \ \cdots \ T_{nm} \ 0 \ \cdots \ 0]x + 0v_i$$

معادلات 4-12 و 4-13 به شکل فضای حالت زیر هستند:

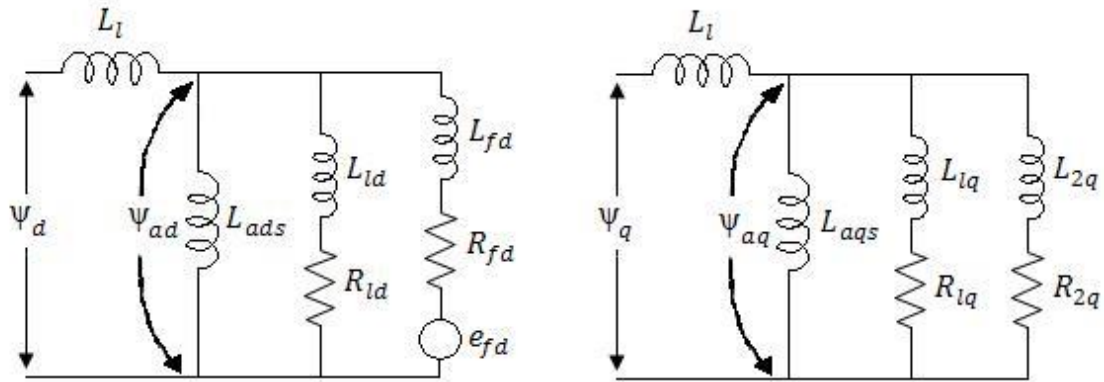
$$\dot{x} = Ax + bu$$

$$y = Cx + du$$

متغیرهای  $x_n, \dots, x_2, x_1$  تعریف شده در بالا متغیرهای فاز نامیده می شوند. که مجموعه ای خاص از متغیرهای حالت، شامل یک متغیر و  $n-1$  مشتق آن هستند.

## 4-2 ماتریس حالت سیستم با سیم پیچ میرا کننده

هنگامی که سیم پیچ های میرا کننده ژنراتور نیز در نظر گرفته شود، معادلات سیستم که در قسمت 3-3 بدست آمد، به صورت زیر تغییر پیدا می کنند. فرض می کنیم مدل، شامل یک سیم پیچ میرا کننده محور  $d$  و دو سیم پیچ میرا کننده محور  $q$  (مطابق شکل 4-5) باشد.



شکل ۴-۵ مدارهای معادل ماشین سنکرون

معادلات مدار رتور

$$P\psi_{fd} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}} E_{fd} - \omega_0 R_{fd} i_{fd} \quad (14-4)$$

$$P\psi_{1d} = -\omega_0 R_{1d} i_{1d}$$

$$P\psi_{1q} = -\omega_0 R_{1q} i_{1q}$$

$$P\psi_{2q} = -\omega_0 R_{2q} i_{2q}$$

جریان های رتور به صورت زیر داده می شوند:

$$i_{fd} = \frac{1}{L_{fd}} (\psi_{fd} - \psi_{ad}) \quad (15-4)$$

$$i_{1d} = \frac{1}{L_{1d}} (\psi_{1d} - \psi_{ad})$$

$$i_{1q} = \frac{1}{L_{1q}} (\psi_{1q} - \psi_{aq})$$

$$i_{2q} = \frac{1}{L_{2q}} (\psi_{2q} - \psi_{aq})$$

شار دور متقابل محور  $q$  و  $d$  به صورت زیر داده می شود:

$$\psi_{fd} = -L_{ads} i_d + L_{ads} i_{fd} + L_{ads} i_{1d} = L''_{ads} \left( -i_d + \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \quad (16-4)$$

$$\psi_{aq} = L''_{aqs} \left( -i_q + \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \quad (17-4)$$

که در آن:

$$L''_{ads} = \frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \quad (18-4)$$

$$L''_{aqs} = \frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1q}} + \frac{1}{L_{2q}}} \quad (19-4)$$

بدین ترتیب روابط مربوط به  $i_d$  و  $i_q$  (متناظر با معادلات 3-103 و 3-104) به شکل زیر در می آید:

$$i_d = \frac{X_{Tq}E_{qN} - R_T E_{dN}}{D} \quad (20-4)$$

$$i_q = \frac{R_T E_{qN} - X_{Td} E_{dN}}{D}$$

که در آن:

$$E_{dN} = E''_d + E_B \sin \delta \quad E_{qN} = E''_q + E_B \cos \delta$$

$$E''_d = \bar{\omega} L''_{aqs} \left( \frac{\psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\psi_{2q}}{L_{2q}} \right) E''_q = \bar{\omega} L''_{ads} \left( \frac{\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\psi_{1d}}{L_{1d}} \right)$$

$$X_{Td} = X_E + \bar{\omega} (L''_{ads} + L_i) = X_E + X''_{ds} \quad (21-4)$$

$$X_{Tq} = X_E + \bar{\omega} (L''_{aqs} + L_i) = X_E + X''_{qs}$$

$$R_T = R_a + R_E D = R_T^2 + X_{Td} X_{Tq}$$

مقدار  $\bar{\omega}$  برابر با  $l pu$  فرض می شود تا اثر ناشی از نادیده گرفتن گذراهای استاتور را خنثی کند.

با بیان معادلات 4-20 و 4-21 بر حسب مقادیر منحرف شده، نتیجه می شود:

$$\Delta i_d = m_1 \Delta \delta + m_2 \Delta \psi_{fd} + m_3 \Delta \psi_{1d} + m_4 \Delta \psi_{1q} + m_5 \Delta \psi_{2q}$$

$$\Delta i_q = n_1 \Delta \delta + n_2 \Delta \psi_{fd} + n_3 \Delta \psi_{1d} + n_4 \Delta \psi_{1q} + n_5 \Delta \psi_{2q} \quad (22-4)$$

$$m_1 = \frac{E_B}{D} (X_{Tq} \sin \delta_0 - R_T \cos \delta_0)$$

$$m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} m_3 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L''_{ads}}{L_{1d}}$$

$$m_4 = -\frac{R_T}{D} \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} m_5 = -\frac{R_T}{D} \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}}$$

$$n_1 = \frac{E_B}{D} (R_T \sin \delta_0 - X_{Td} \cos \delta_0) \quad (23-4)$$

$$n_2 = \frac{R_T}{D} \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} n_3 = \frac{R_T}{D} \frac{L''_{ads}}{L_{1d}}$$

$$n_4 = \frac{X_{Td}}{D} \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} n_5 = \frac{X_{Td}}{D} \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}}$$

و عبارات  $\Delta\psi_{aq}$  و  $\Delta\psi_{ad}$  به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{ad} &= L''_{ads} \left( -\Delta i_d + \frac{\Delta\psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Delta\psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \\ &= (-m_1 L''_{ads}) \Delta\delta + L''_{ads} \left( \frac{1}{L_{fd}} - m_2 \right) \Delta\psi_{fd} + L''_{ads} \left( \frac{1}{L_{1d}} - m_3 \right) \Delta\psi_{1d} \\ &\quad + (-m_4 L''_{ads}) \Delta\psi_{1q} + (-m_5 L''_{ads}) \Delta\psi_{2q} \end{aligned} \quad (24-4)$$

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{aq} &= (-n_1 L''_{aqs}) \Delta\delta + (-n_2 L''_{aqs}) \Delta\psi_{fd} + (-n_3 L''_{aqs}) \Delta\psi_{1d} \\ &\quad + L''_{aqs} \left( \frac{1}{L_{1d}} - n_4 \right) \Delta\psi_{1q} + L''_{aqs} \left( \frac{1}{L_{2d}} - n_5 \right) \Delta\psi_{2q} \end{aligned} \quad (25-4)$$

عبارت  $\Delta T_e$  (متناظر با معادله 3-112) به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= \psi_{ad0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta\psi_{ad} - \psi_{aq0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta\psi_{aq} \\ &= K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta\psi_{fd} + K_{21} \Delta\psi_{1d} + K_{22} \Delta\psi_{1q} + K_{23} \Delta\psi_{2q} \end{aligned} \quad (26-4)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} K_1 &= n_1 (\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) \\ K_2 &= n_2 (\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_2 (\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) + \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} i_{q0} \\ K_{21} &= n_3 (\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_3 (\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) + \frac{L''_{ads}}{L_{1d}} i_{q0} \\ K_{22} &= n_4 (\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_4 (\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) + \frac{L''_{aqs}}{L_{fd}} i_{d0} \\ K_{23} &= n_5 (\psi_{ad0} + L''_{aqs} i_{d0}) - m_5 (\psi_{aq0} + L''_{ads} i_{q0}) + \frac{L''_{aqs}}{L_{2d}} i_{d0} \end{aligned} \quad (27-4)$$

از معادلات 3-83 و 4-26 داریم:

$$\begin{aligned} p \Delta\omega_r &= \frac{1}{2H} [\Delta T_M - \Delta T_e - K_D \Delta\omega_r] \\ &= \frac{1}{2H} [\Delta T_M - K_1 \Delta\delta - K_2 \Delta\psi_{fd} - K_{21} \Delta\psi_{1d} - K_{22} \Delta\psi_{1q} \\ &\quad - K_{23} \Delta\psi_{2q} - K_D \Delta\omega_r] \end{aligned} \quad (28-4)$$

$$= a_{11}\Delta\omega_r + a_{12}\Delta\delta + a_{13}\Delta\psi_{fd} + a_{14}\Delta\psi_{1d} \\ + a_{15}\Delta\psi_{1q} + a_{16}\Delta\psi_{2q} + b_{11}\Delta T_m$$

که در آن:

$$a_{11} = -\frac{K_D}{2H} a_{12} = -\frac{K_1}{2H} a_{13} = -\frac{K_2}{2H} \\ a_{14} = -\frac{K_{21}}{2H} a_{15} = -\frac{K_{22}}{2H} a_{16} = -\frac{K_{23}}{2H} \\ b_{11} = \frac{1}{2H} \quad (29-4)$$

همانند قبل:

$$p\Delta\delta = a_{21}\Delta\omega_r \quad (30-4)$$

که در آن:

$$a_{21} = \omega_0 = \alpha\pi f_0 \quad (31-4)$$

از معادلات 4-14، 4-15 و 4-24 داریم:

$$p\Delta\psi_{fd} = a_{31}\Delta\omega_r + a_{32}\Delta\delta + a_{33}\Delta\psi_{fd} + a_{34}\Delta\psi_{1d} \\ + a_{35}\Delta\psi_{1q} + a_{36}\Delta\psi_{2q} + b_{32}\Delta e_{fd} \quad (32-4)$$

که در آن:

$$a_{31} = 0 \quad a_{32} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_1 L''_{ads} \\ a_{33} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left( 1 - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} + m_2 L''_{ads} \right) \\ a_{34} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} \left( m_3 L''_{ads} - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} \right) \\ a_{35} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_4 L''_{ads} \quad a_{36} = -\frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{fd}} m_5 L''_{ads} \quad (33-4) \\ b_{32} = \frac{\omega_0 R_{fd}}{L_{adu}}$$

به طور مشابهی:

$$p\Delta\psi_{fd} = -\omega_0 R_{1d} \Delta i_{1d} \quad (34-4)$$

$$= a_{41}\Delta\omega_r + a_{42}\Delta\delta + a_{43}\Delta\psi_{fd} + a_{44}\Delta\psi_{1d} + a_{45}\Delta\psi_{1q} + a_{46}\Delta\psi_{2q}$$

که در آن:

$$a_{41} = 0 \quad a_{42} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_1 L''_{ads}$$

$$a_{43} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left( m_2 L''_{ads} - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} \right) \quad (35-4)$$

$$a_{44} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} \left( 1 - \frac{L''_{ads}}{L_{fd}} + m_3 L''_{ads} \right)$$

$$a_{45} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_4 L''_{ads} \quad a_{46} = -\frac{\omega_0 R_{1d}}{L_{1d}} m_5 L''_{ads}$$

$$p \Delta\psi_{1q} = -\omega_0 R_{1q} \Delta i_{1q} \quad (36-4)$$

$$= a_{51}\Delta\omega_r + a_{52}\Delta\delta + a_{53}\Delta\psi_{fd} + a_{54}\Delta\psi_{1d} + a_{55}\Delta\psi_{1q} + a_{56}\Delta\psi_{2q}$$

که در آن:

$$a_{51} = 0 \quad a_{52} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} n_1 L''_{aqs}$$

$$a_{53} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} (n_2 L''_{aqs}) \quad a_{54} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} (n_3 L''_{aqs}) \quad (37-4)$$

$$a_{55} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left( 1 - \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} + n_4 L''_{aqs} \right)$$

$$a_{56} = -\frac{\omega_0 R_{1q}}{L_{1q}} \left( n_5 L''_{aqs} - \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} \right)$$

$$p \Delta\psi_{2q} = -\omega_0 R_{2q} \Delta i_{2q} \quad (38-4)$$

$$= a_{61}\Delta\omega_r + a_{62}\Delta\delta + a_{63}\Delta\psi_{fd} + a_{64}\Delta\psi_{1d} + a_{65}\Delta\psi_{1q} + a_{66}\Delta\psi_{2q}$$

که در آن:

$$a_{61} = 0 \quad a_{62} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} n_1 L''_{aqs}$$

$$a_{63} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} (n_2 L''_{aqs}) \quad a_{64} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} (n_3 L''_{aqs}) \quad (39-4 \text{ الف})$$

$$a_{65} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \left( n_4 L''_{aqs} - \frac{L''_{aqs}}{L_{1q}} \right)$$

$$a_{66} = -\frac{\omega_0 R_{2q}}{L_{2q}} \left( 1 - \frac{L''_{aqs}}{L_{2q}} + n_2 L''_{aqs} \right) \quad (39-4 \text{ ب})$$

بدین ترتیب معادله کامل حالت به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_r \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{\psi}_{1d} \\ \Delta \dot{\psi}_{1q} \\ \Delta \dot{\psi}_{2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta \psi_{1d} \\ \Delta \psi_{1q} \\ \Delta \psi_{2q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (40-4)$$

با گشتاور ورودی ثابت،  $\Delta T_m = 0$  و با ولتاژ تحریک ثابت،  $\Delta E_{fd} = 0$  است.

اگر بخواهیم عمل AVR را نمایش دهیم به معادله  $\Delta E_t$  نیازمندیم. با دنبال کردن روش به کار گرفته شده در بخش 3-3 داریم:

$$\Delta E_t = \frac{e_{d0}}{E_{t0}} \Delta e_d + \frac{e_{q0}}{E_{t0}} \Delta e_q$$

با:

$$\Delta e_d = -R_a \Delta i_d + L_i \Delta i_q - \Delta \psi_{ad}$$

$$\Delta e_q = -R_a \Delta i_q + L_i \Delta i_d - \Delta \psi_{aq}$$

با به کارگیری معادلات 4-22، 4-24 و 4-25 می توان مقدار منحرف شده ولتاژ پایانه را به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta \psi_{fd} + K_{61} \Delta \psi_{1d} + K_{62} \Delta \psi_{1q} + K_{63} \Delta \psi_{2q} \quad (41-4)$$

## فصل پنجم

## شبیه سازی پایدارکننده سیستم های قدرت (PSS)

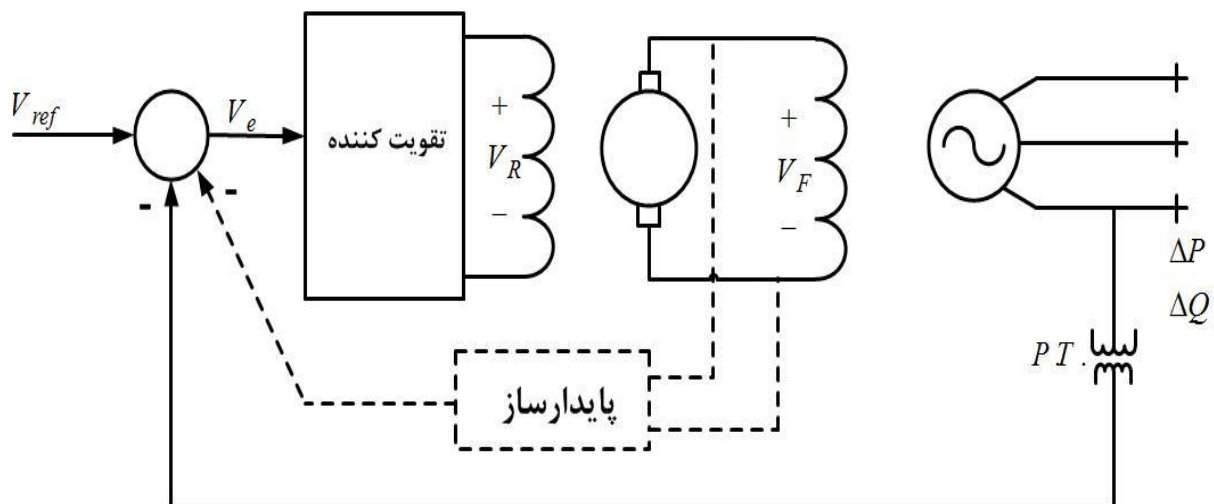
## 5-1 کنترل ولتاژ و توان راکتیو

سیستم تحریک ژنراتور حفظ ولتاژ و کنترل توان راکتیو جاری را به عهده دارد. تحریک ژنراتورهای قدیمی ممکن است از طریق حلقه های لغزشیو جاروبک ها توسط ژنراتورهای  $DC$  نصب شده روی محور روتور ماشین های سنکرون فراهم شود. با وجود این، سیستم های تحریک پیشرفته معمولاً از ژنراتورهای  $ac$  با یکسوسازهای گردان که سیستم های بدون جاروبک نامیده می شوند، استفاده می کنند.

بدیهی است که تغییر در تقاضای توان حقیقی در اساس روی فرکانس اثر می گذارد، در حالی که تغییر در توان راکتیو به طور عمده روی اندازه ولتاژ موثر است. اثرات متقابل بین حلقه های کنترل ولتاژ و فرکانس معمولاً آن قدر ضعیف است که تجزیه و تحلیل جداگانه ی آنها را توجیه می کند.

منابع تولید توان راکتیو عبارتند از : ژنراتورها، خازن ها و راکتورها. توان راکتیو ژنراتورها توسط میدان های تحریک آنها کنترل می شود. دیگر روش های کمکی بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم های انتقال الکتریکی عبارتند از : ترانسفورماتورهای با تغییر دهنده ی تپ زیر بار ، خازن های قابل قطع و وصل، تنظیم کننده های پله ای ولتاژ و تجهیزات کنترل استاتیکی توان راکتیو. منبع اصلی کنترل توان راکتیو ژنراتور کنترل تحریک آنها با استفاده از تنظیم کننده خودکار ولتاژ (AVR) می باشد. نقش یک AVR نگه داشتن اندازه ی ولتاژ پایانه ی ژنراتور سنکرون در سطح تعیین شده می باشد. نمایش بلوکی یک سیستم AVR در شکل (5-1) نشان داده شده است.





شکل (5-1): نمایش نوعی یک سیستم AVR

حال به طور مختصر، مدل های عناصر تشکیل دهنده یک سیستم AVR مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

مدل تقویت کننده:

تقویت کننده سیستم تحریک ممکن است تقویت کننده مغناطیسی، تقویت کننده گردان یا تقویت کننده الکترونیکی پیشرفته باشد. تقویت کننده با یک بهره ی کنترل  $K_A$  و یک ثابت زمانی  $\tau_A$  نمایش داده می شود و تابع تبدیل آن به صورت زیر است:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \quad (5-1)$$

مقادیر نوعی  $K_A$  در حدود 10 تا 400 است. ثابت زمانی تقویت کننده خیلی کوچک بوده و در محدوده ی 0/02 تا 0/01 ثانیه قرار دارد.

مدل تحریک

یک مدل مناسب از تحریک کننده پیشرفته مدل خطی شده ای است که ثابت زمانی اصلی را در نظر گرفته و از پدیده ی اشباع و سایر عوامل غیرخطی چشم پوشی می کند. در ساده ترین شکل تابع تبدیل یک تحریک کننده پیشرفته را می توان با یک ثابت زمانی  $\tau_E$  و یک بهره ی  $K_E$  به صورت زیر نمایش داد:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (5-2)$$

ثابت های زمانی تحریک کننده های پیشرفته خیلی کوچک هستند.

مدل ژنراتور

نیروی محرکه‌ی الکتریکی ( $emf$ ) تولید شده توسط ماشین‌های سنکرون تابعی از منحنی مغناطیس کنندگی ماشین بوده و ولتاژ پایانه‌ی آن به بار ژنراتور بستگی دارد. در مدل خطی شده تابع تبدیل که ولتاژ پایانه‌ی ژنراتور را به ولتاژ میدان آن مربوط می‌سازد می‌توان با بهره  $K_G$  و ثابت زمانی  $\tau_G$  به صورت زیر نمایش داد:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (3-5)$$

این ثابت‌ها به بار وابسته هستند. مقدار  $K_G$  می‌تواند بین 0/7 تا 1 باشد و مقدار  $\tau_G$  بین 1 و 2 ثانیه‌ها حالت بار کامل تا بی‌باری تغییر می‌کند.

مدل حس‌گر

ولتاژ از طریق ترانسفورماتور ولتاژ حس شده و به وسیله‌ی یک پل یکسوساز یکسو می‌شود. حس‌گر توسط یک تابع تبدیل مرتبه اول مدلسازی می‌شود که به صورت زیر است:

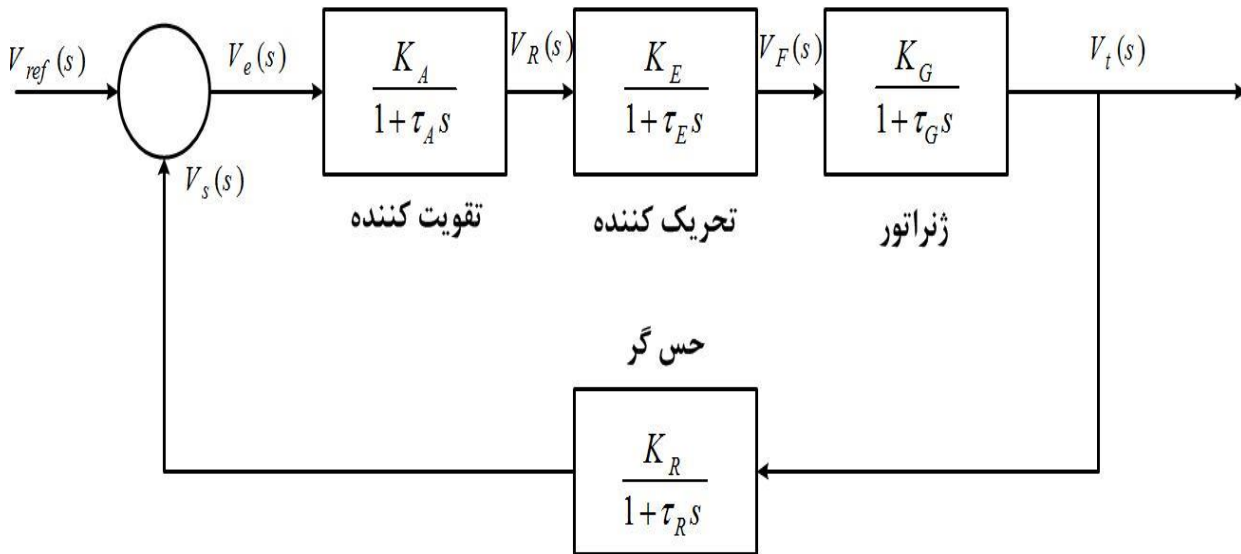
$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s} \quad (4-5)$$

ثابت زمانی  $\tau_R$  خیلی کوچک بوده و می‌توان آن را در محدوده‌ی 0/01 تا 0/06 ثانیه فرض کرد با استفاده از مدل‌های بالا نمایش بلوکی یک AVR مطابق شکل (5-2) است. تابع تبدیل حلقه باز نمایش بلوکی این شکل به صورت زیر می‌باشد:

$$KG(s)H(s) = \frac{K_A K_E K_G K_R}{(1 + \tau_A s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s)} \quad (5-5)$$

و تابع تبدیل حلقه بسته که ولتاژ پایانه  $V_t(s)$  را به ولتاژ مرجع  $V_{ref}(s)$  مربوط می‌سازد به صورت زیر است:

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G K_R (1 + \tau_R s)}{(1 + \tau_A s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (6-5)$$



شکل (5-2) : نمایش بلوکی یک تنظیم کننده خودکار ولتاژ (AVR).

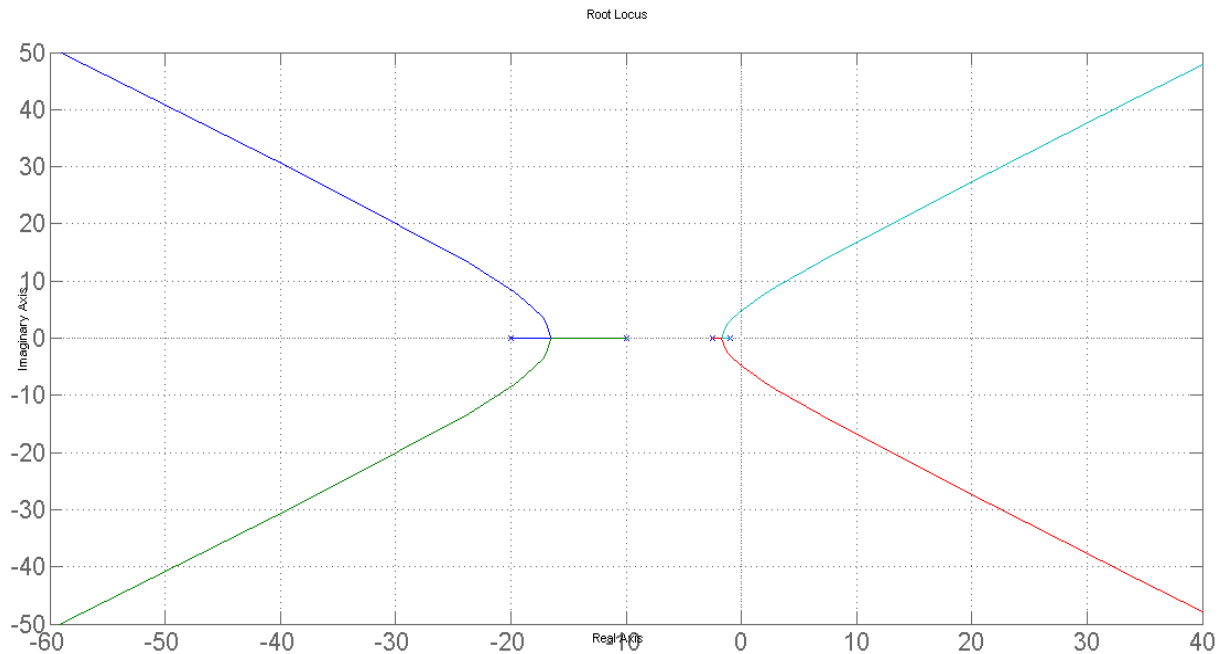
## 2-5 مثال مورد بررسی

برای مثال سیستم AVR یک ژنراتور را مورد بررسی قرار می دهیم. در این مثال پاسخ پله را در حضور و عدم حضور پایدارساز بررسی می کنیم:

در حالت بدون پایدار کننده تابع تبدیل حلقه بسته سیستم به صورت زیر است:

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{45K_A(s+20)}{s^4 + 33.5s^3 + 307.5s^2 + 775s + 500 + 500K_A}$$

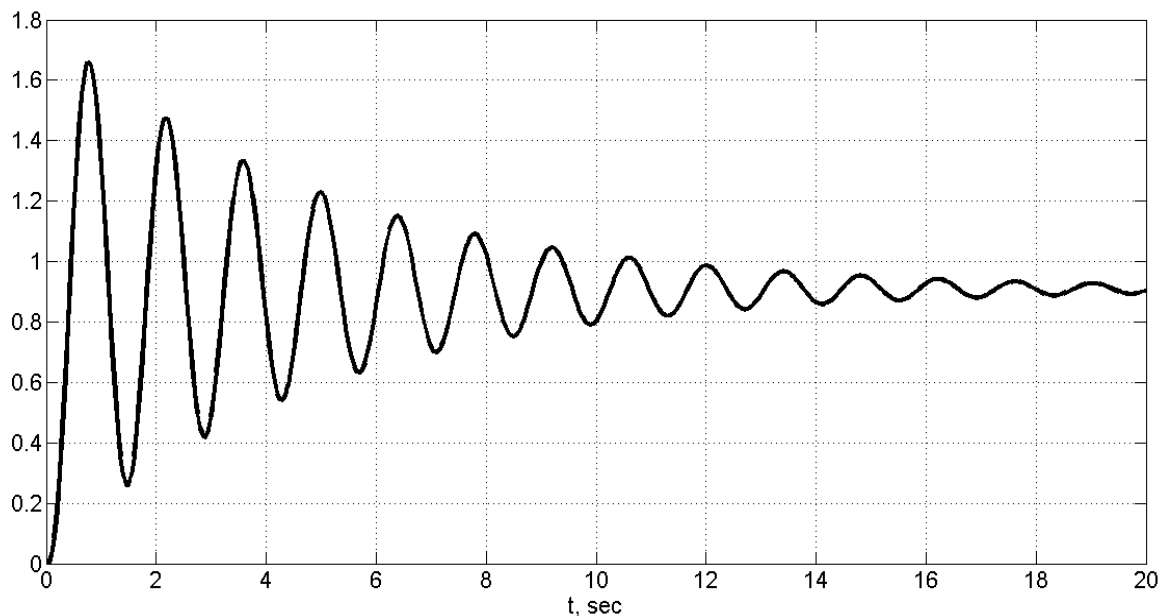
اگر برای سیستم نشان داده شده مکان هندسی ریشه ها را به ازای بهره  $K_A = 10$  رسم نماییم به صورت شکل زیر می باشد:



شکل (5-3) نمودار مکان هندسی ریشه ها در حالت عدم حضور پایدارساز.

همانطور که در شکل (5-3) مشاهده می شود سیستم دارای پایداری حدی می باشد.

در شکل (5-4) پاسخ پله به سیستم یاد شده در قبل نشان داده شده است:



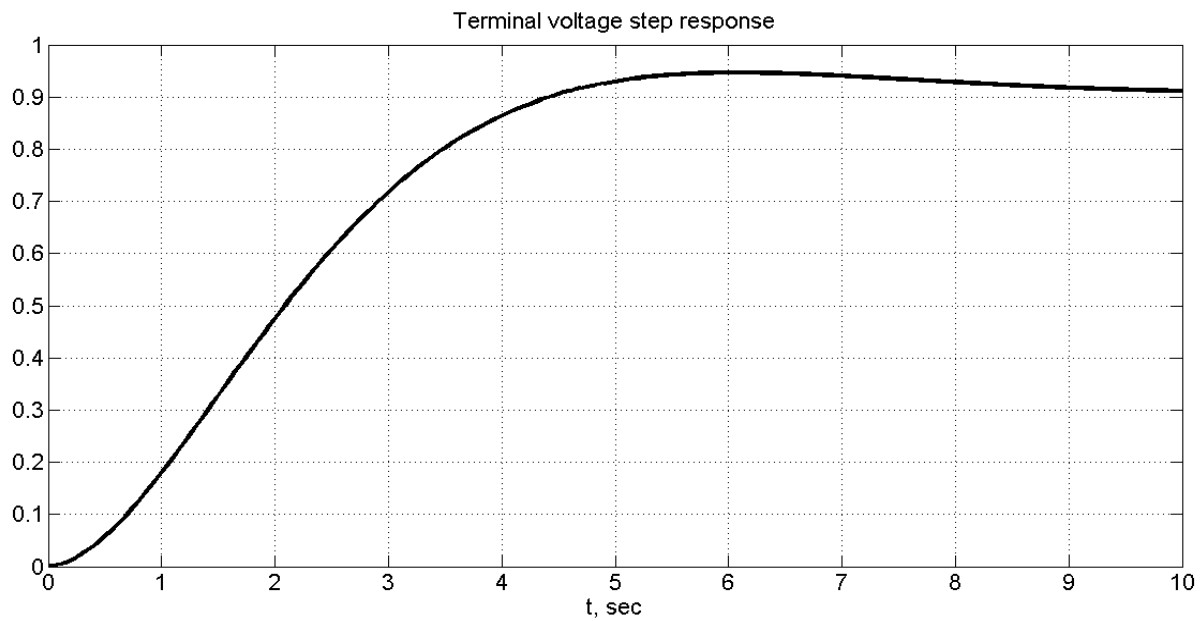
شکل (5-4): پاسخ سیستم به ورودی پله در حالت عدم حضور پایدارساز.

حال به سیستم مورد مطالعه در قبل یک پایدارساز با ثابت زمانی  $TF=0.04\text{Sec}$  با بهره  $KF=2$  اضافه می شود.

در این حالت تابع تبدیل حلقه بسته‌ی سیستم به صورت زیر است:

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{250(s^2 + 45s + 500)}{s^5 + 58.5s^4 + 13645s^3 + 270962.5s^2 + 274875s + 137500}$$

پاسخ سیستم به ورودی پله به صورت نشان داده شده در شکل (5-5) می باشد.



شکل (5-5): پاسخ سیستم به ورودی پله در حالت حضور پایدارساز.