

## ادامه فصل هفتم

### پایداری و کنترل سیستم های قدرت

## Power System Stability & Control

#### مقدمه ای بر مساله پایداری سیستم های قدرت

در این فصل به معرفی کلی مساله پایداری قدرت شامل مفاهیم فیزیکی، طبقه بندی و تعارف واژه های مربوطه پرداخته می شود. بررسی ساختار های ابتدایی سیستم قدرت با استفاده از مدلسازی ایده آل، ویژگی های اساسی پایداری سیستم قدرت را نشان می دهد. به علاوه، بر پیدایش انواع مسائل پایداری که در حین تکامل سیستم های قدرت شکل گرفته، ضروری شده، بسط و توسعه روش های مطالعه آنها شرح داده خواهد شد. هدف این است که دیدگاه کلی از پدیده پایداری سیستم قدرت عرضه شود و پایه لازم بر اساس دلایل فیزیکی نسبتاً ساده بنیانگذاری گردد. این موضوع کمک خواهد کرد که در فصول آینده به بررسی جامع موضوع از جنبه های مختلف پرداخته شود.

#### ۲ - ۱ مفاهیم اولیه و تعاریف

پایداری سیستم قدرت را می توان به طور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می سازد تا تحت وضع عادی، در حالت تعادل باقی بماند و در صورتی که تحت تاثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجدداً حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به شکل های مختلفی بروز کند. معمول بوده است که مساله پایداری را به عنوان مساله حفظ عملکرد سنکرون ژنراتور ها بشناسند. از آنجا که تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین های سنکرون (ژنراتور ها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا همامنگ باقی بمانند. این جنبه پایداری تحت تاثیر دینامیک روابط زاویه روتور 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 القائی را تغذیه می کند، در اثر

فروپاشی ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مسأله، پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع ناپایداری می تواند در مورد بارهایی که در یک محدوده وسیع قرار دارند و از یک سیستم بزرگ تغذیه می شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مسأله مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش گذرا قرار گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاش های کوچک به شکل تغییرات 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 تأمین نماید. نیز 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 بیت دو زیرسیستم، مقاوم 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 روتور ژنراتورها و ولتاژ شینها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتورها و سیستم انتقال می شود، حال آنکه تغییرات سرعت روتور ژنراتورها، گاورنر محرکها (توربین ها) را به عکس العمل و 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 اجرا ممکن است نسبت به تغییرات در متغیرهای سیستم، عکس العمل نشان دهد و بدینگونه بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع بخصوص، عکس العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولاً فرضیات زیادی انجام می پذیرد تا مسأله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملی که بر روی یک مسأله پایداری بخصوص تأثیر می گذارند، متمرکز کرد. درک مسأله پایداری را می توان تا حد زیادی با طبقه بندی آن 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 استفاده از مدل های ایده آل کمک می نماید تا ویژگی های اساسی هر شکل از شکل های پایداری را تشخیص داد.

## ۱-۱-۲ پایداری زاویه ای روتور

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

## مشخصه های ماشین های سنکرون

مشخصه ها و مدلسازی ماشین های سنکرون به طور مفصل در فصل سوم، چهارم و پنجم مطرح خواهد شد. در این جا بحث به مشخصه های اولیه مربوط به عملکرد سنکرون محدود می شود.

یک ماشین سنکرون دو جزء اساسی شامل تحریک و آرمچر دارد. معمولاً، تحریک روی روتور و آرمچر روی استاتور واقع است. سیم پیچ تحریک با استفاده از جریان مستقیم تغذیه می شود. زمانی که روتور را با یک تحریک (توربین) بچرخانیم، میدان مغناطیسی دوار سیم پیچ تحریک، ولتاژهای متناوبی در سه فاز سیم پیچ های آرمچر استاتور، القا می نماید. فرکانس ولتاژ متناوب القا شده و جریان های حاصل در سیم پیچ های استاتور (زمانی که بار به آن متصل است) بستگی به سرعت روتور دارد. از این رو مشاهده می شود که فرکانس متغیرهای الکتریکی استاتور با سسرعتمکانیکی روتور، 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 فرکانس باشند و سرعت مکانیکی هر یک از این فرکانس، هماهنگ باشند. از این رو روتور تمام ماشین های سنکرون به هم پیوسته، باید با یکدیگر سنکرونیزه باشند.

ترکیب فیزیکی (توزیع فضایی) سیم پیچ های آرمچر استاتور به گونه ای است که جریان های متغیر با زمان که از سیم پیچهای سه فاز عبور می کنن، در حالت ماندگار میدان مغناطیسی دوار را ایجاد می کنند که با سرعت روتور می چرخد (به فصل سوم بخش ۳-۱-۳ مراجعه شود). میدان های روتور و استاتور بر یکدیگر تأثیر 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 روتور مقابله می کند به گونه ای که لازم است گشتاور مکانیکی به وسیله توربین اعمال شود تا چرخش روتور 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. تأثیر افزایش گشتاور مکانیکی آن است که روتور را در وضعیت جدیدی قرار می دهد که نسبت به میدان دوار مغناطیسی استاتور جلوتر واقع می شود. یا برعکس، کاهش گشتاور یا توان مکانیکی ورودی، روتور را عقب تر از میدان دوار مغناطیسی استاتور قرار می دهد. در حالت ماندگار، میدان روتور 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 حفظ می کند حال آنکه بار مکانیکی با چرخش، مخالفت می کند. افزایش بار مکانیکی باعث عقب افتادن موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور می شود.

در بحث فوق دو واژه توان و گشتاور توأما استفاده شد. این مسأله در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت رایج است زیرا که سرعت چرخشی متوسط ماشین ها ثابت است هر چند 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.

### رابطه توان – زاویه

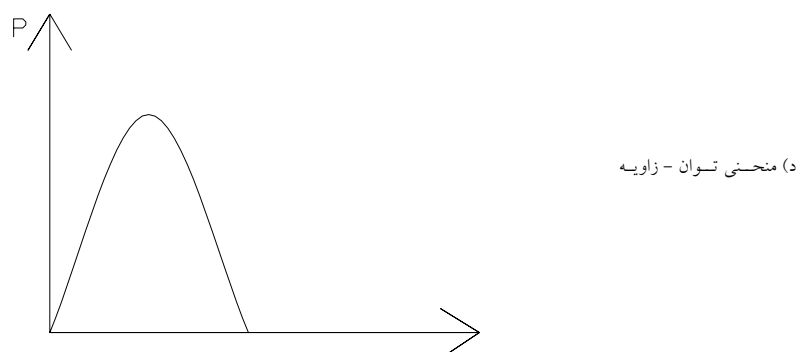
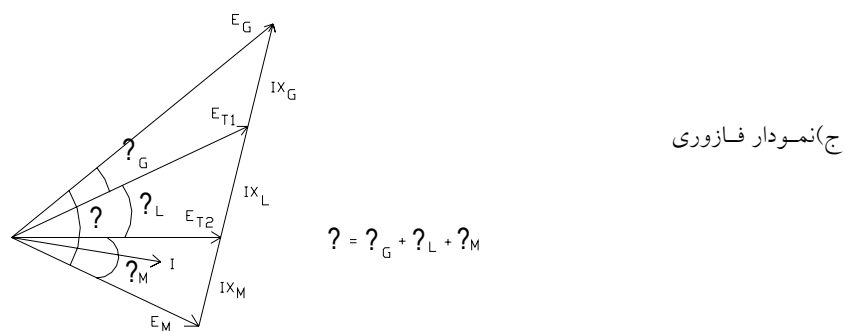
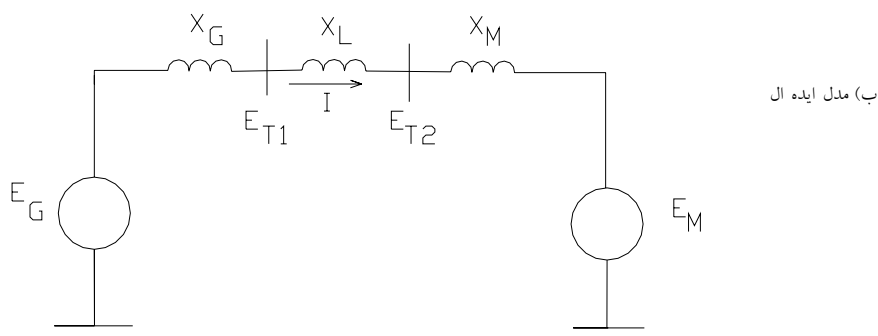
مشخصه مهمی که در خصوص پایداری سیستم قدرت اهمیت دارد رابطه بین توان مبادله شده و موقعیت زاویه ای روتور ماشین سنکرون است. این رابطه به شدت غیر خطی است. برای نشان دادن موضوع، سیستم ساده شکل ۱-۲ "الف" را در نظر بگیرید. این سیستم شامل دو ماشین سنکرون است که از طریق خط انتقالی با راکتانس  $X_L$  به یکدیگر متصل شده اند. از مقاومت و ظرفیت خازنی خط صرف نظر شده است. فرض کنید که ماشین شماره ۱ ژنراتور سنکرونی است که ماشین شماره ۲ را، که یک موتور سنکرون است، تغذیه می کند. توان انتقال یافته از ژنراتور به موتور تابعی از زاویه  $\delta$  است که اختلاف زاویه بین روتورهای دو ماشین را نشان می دهد. زاویه  $\delta$

خود از سه مولفه تشکیل شده است: یکی زاویه داخلی ژنراتور به نام  $\delta_G$  (که زاویه ای است که روتور ژنراتور نسبت به میدان حاصل از استاتور آن جلوتر است)، دیگری  $\delta_L$ . اختلاف زاویه بین ولتاژهای پایانه ژنراتور و موتور (یعنی زاویه ای که میدان استاتور ژنراتور از میدان استاتور موتور جلوتر است) و دیگری  $\delta_M$ ، زاویه داخلی موتور (که زاویه ای است که روتور موتور نسبت به میدان حاصل از اتاتور عقبتر است). شکل ۱-۲ "ب" مدلی از سیستم را نشان می دهد که به کمک آن می توان رابطه توان – زاویه را به دست آورد. برای هر ماشین، مدل ساده ای شامل یک منبع داخلی ولتاژ و یک راکتانس موثر فرض شده است. مقدار راکتانس ماشین، بستگی به نوع مطالعه ای دارد که در پی آن هستیم. برای مطالعات حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشین را به همراه ولتاژ تحریک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کار برد. اساس لازم برای چنین مدلی و تقریبهایی را که در آن به کار رفته در فصل سوم بیان خواهیم کرد. 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 ۱-۲ "د" رسم شده است. با مدل های نسبتاً ایده آلی که برای ماشین ها فرض شد، رابطه بدست آمده به صورت سینوسی است که رابطه کاملاً غیر خطی را نشان می دهد. با مدل های دقیق تر ماشین، که تأثیر 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.



شکل ۱-۲ مشخصه انتقال توان یک سیستم دو ماشین

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 مانگار می توان حداکثر توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار این توان مستقیماً با ولتاژهای داخلی ژنراتور. موتور 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 روتورها نسبت به هم بر تبادیل توان به طور مشابهی تأثیر می‌گذارد. 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.

### پدیده پایداری

پایداری حالت تعادل بین نیروهای متضاد را نشان می‌دهد. مکانیزمی که به وسیله آن ماشین های سنکرون به هم پیوسته، حالت سنکرون را بین یکدیگر حفظ می‌کنند از طریق نیروهای باز یافت است که، زمانی عمل می‌نماید که نیروهایی وجود داشته باشند یا چند ماشین را نسبت به سایر ماشین ها شتاب مثبت یا منفی دهد. در حالت ماندگار، تعادل بین گشتاور میکائیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می‌ماند. اگر سیستم دستخوش تغییر شود این تعادل از بین می‌رود و در نتیجه روتور ماشین ها بر اساس قوانین حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت یا منفی پیدا می‌کند. اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به دیگری سریعتر بچرخد، موقعیت زاویه ای روتور آن نسبت به ماشین کندتر، جلوتر قرار می‌گیرد. بسته به رابطه توان – زاویه، اختلاف زاویه بین روتور بین دو ماشین باعث می‌شود تا بخشی از بار ماشین تند به ماشین تند منتقل شود. این موضوع سبب می‌شود که اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف زاویه روتورها کاهش یابد. همچنان که ذکر شد، رابطه توان – زاویه بشدت غیر خطی است. بالاتر از حد مشخصی، افزایش در اختلاف زاویه، باعث کاهش در توان مبادله شده می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که اختلاف زاویه باز هم بیشتر شود و منجر به ناپایداری گردد. در هر وضعیت بخصوص، پایداری سیستم به این بستگی دارد که آیا انحراف زوایای روتور ماشین ها منجر به گشتاورهای باز یافت کافی می‌شود یا خیر. زمانی که یک ماشین سنکرون، حالت سنکرونیزه یا هماهنگ خود با سایر ماشین ها را از دست داد، روتور آن در سرعتی بالاتر یا پایین تر از سرعتی که برای تولید ولتاژ در فرکانس سیستم لازم است، می‌چرخد. اغزش بین میدان دوار استاتور (مربوط به فرمانس سیستم) و تحریک روتور منجر به تغییرات بزرگی در توان خروجی، جریان و ولتاژ ماشین می‌شود. این موضوع باعث می‌شود 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 جدائی گروه ها از یکدیگر، حالت سنکرونیزه بین ماشین های هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونیزه ماشین های سنکرون به هم پیوسته را می‌توان به مجموعه ای از خودروهای تشبیه کرد که به کمک تسمه های لاستیکی به یکدیگر متصل شده اند و در یک مسیر دایره وار می‌چرخند. روتور ماشین های سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبیه شده است. زمانی که خودرو ها با یکدیگر هم نوا و هم سرعت باشند تسمه های لاستیکی دست نخورده باقی می‌مانند. زمانی که نیروی یکی از خودرو ها

افزایش یابد، سرعت آن نیز موقتاً افزایش می یابد. این موضوع باعث می شود که تسمه متصل به آن کش بیابد که در نتیجه سرعت آن کاهش و سرعت سایر خودروها افزایش می یابند. بدین ترتیب عکس العملی زنجیروار اتفاق می افتد تا مجدداً تمام خودروها در سرعت مشابه ادامه طریق دهند. اگر نیروی وارده به یکی از تسمه ها از حد توانایی آن بیستر شود، پاره می شود و باعث می شود که یک یا چندین خودرو از سایر خودروها 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 روتور،  $\Delta \delta$ ، 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 روتور می شود. از طرف دیگر، کمبود گشتاور میرا کننده هم منجر به ناپایداری نوسانی می شود.

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

**(الف) پایدار 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، دائماً 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 به دو صورت باشد: یکی اینکه زاویه روتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده دائماً افزایش یابد و دیگری حالتی که به کمبود توان میرا کننده، نوسان های روتور 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 بزرگ 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 مسأله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل ۲-۲-الف می شود. با وجود تنظیم کننده های خودکار ولتاژ، زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پایدار است که اطمینان حاصل شود نوسان های سیستم میرایی کافی دارند. ناپایداری معمولاً خود را به صورت نوسان هایی با دامنه در حال افزایش نشان می دهد. شکل ۲-۲-ب "عکس العمل سیستم را با وجود تنظیم کننده خودکار ولتاژ به تصویر کشیده است.

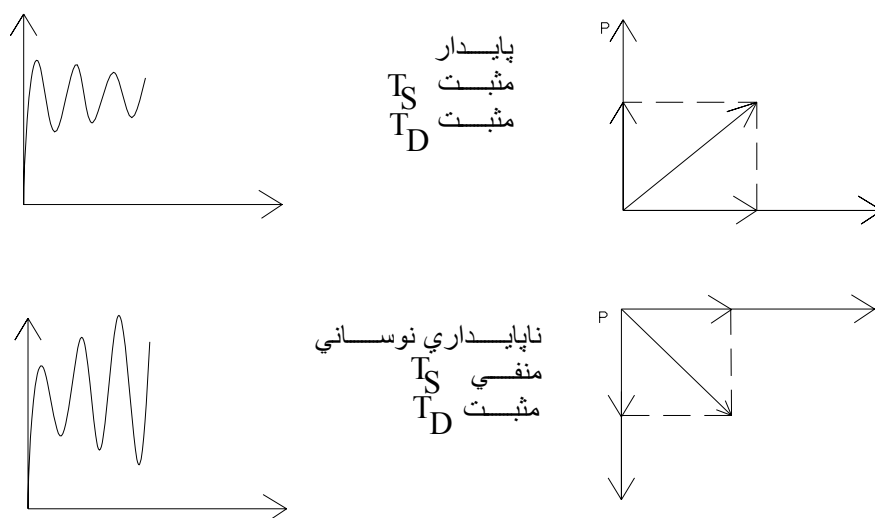
در سیستم های قدرت امروزی، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتاً به علت کمبود میرایی نوسان ها اتفاق می افتد. پایداری انواع نوسان های زیر مورد توجه است:

- **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 علت 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 مدها 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.

- **مد های کنترلی** - که مربوط به کنترلگرهای نیروگاه، کنورتورهای HVDC و جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو (SVC)، بد تنظیم شده باشد، ناپایداری این گونه مدها اتفاق می افتد.

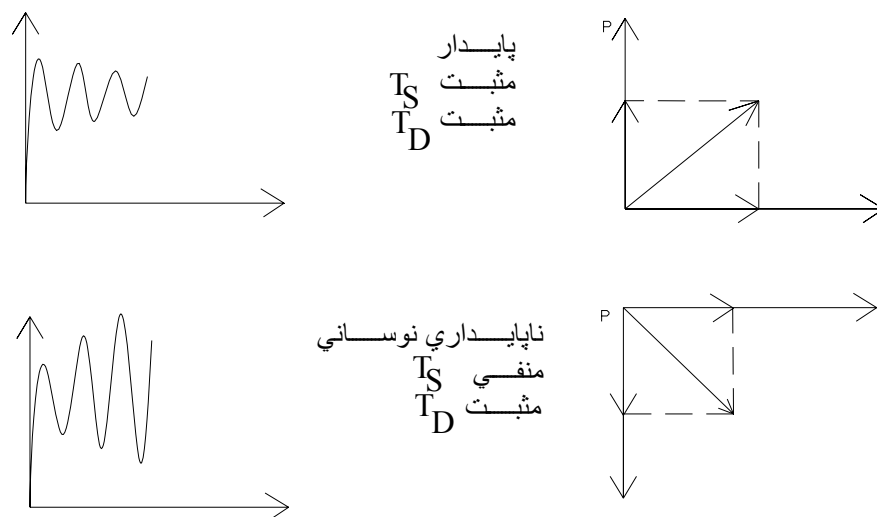
- **مدهای پیچشی** - که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین - ژنراتور است. ناپایداری این مدها ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترلگرهای HVDC و خطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده اند، اتفاق افتد.



الف) با

ولتاژ تحریک





(ب) با کنترل تحریک

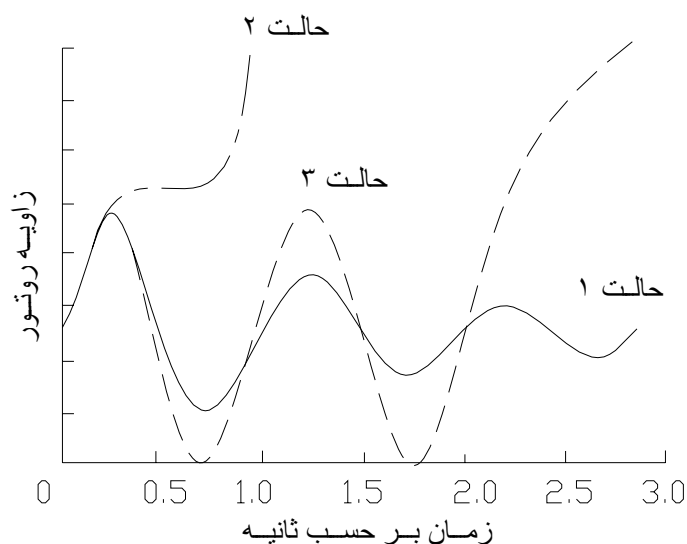
## شکل ۲-۲ طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک

(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 بغیرات بزرگ زاویه روتور ژنراتور است و از رابطه غیر خطی توان - زاویه تأثیر می پذیرد. پایداری، هم به نقطه کار اولیه سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. معمولاً 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 پیشامدهای برگزیده، پایدار بماند. این پیشامدها، عمدتاً اتصال کوتاه فاز به زمین، فاز به فاز و سه فاز است. معمولاً اتصال کوتاه را روی خطوط انتقال فرض می کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شین یا ترانسفورمر نیز در نظر گرفته می شود. فرض می شود که به وسیله کلید زنی لازم، بخشی که تحت تأثیر خطا واقع شده از بقیه سیستم جدا می گردد. در بعضی شرایط، می توان باز بست سریع را فرض کرد.

شکل ۲-۳ رفتار ماشینی سنکرون را در وضعیتهای پایدار و ناپایدار نشان می دهد. این شکل، عکس العمل زاویه روتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می دهد. در حالت پایدار (حالت ۱)، زاویه روتور 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 ۲، زاویه روتور 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 ۳، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنه نوسان ها، تدریجا ناپایدار می شود. این شکل ناپایداری عموماً زمانی اتفاق می افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه "سیگنال کوچک" ناپایدار است و لزوماً به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی افتد.



شکل ۲-۳

پاسخ زاویه روتور 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 روتور بعد از اولین نوسان می شود. در مطالعات پایداری گذرا، زمان مطالعه معمولاً محدود به ۳ تا ۵ ثانیه بعد از اغتشاش می شود هر چند که ممکن است برای سیستم های بسیار بزرگ با مد های نوسانی بین ناحیه ای غالب، این زمان به ۱۰ ثانیه هم برسد.

از واژه پایداری دینامیکی نیز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پایداری زاویه روتور یاد شده است. با وجود این، نویسندگان مختلف از این واژه برای جنبه های متفاوت پدیده استفاده کرده اند. در امریکای شمالی، از این واژه به همان معنای پایداری سیگنال کوچک با وجود تجهیزات کنترل خودکار (عمدتاً تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتور) در مقابل پایداری بدون وجود این تجهیزات یاد شده است [۱، ۲]. در فرانسه و آلمان، از این واژه به همان معنای پایداری گذرا، که در اینجا استفاده شده است یاد گردیده است. از آنجا که استفاده از این واژه ابهامات زیادی را ایجاد کرده، هم CIGRE و هم IEEE به عدم استفاده از آن توصیه نموده اند [۳، ۴].

۲-۱-۲ 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 اینکه 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 تأمین توان راکتیو مورد تقاضاست. قلب مسأله معمولاً افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانس های خطوط انتقال ایجاد می گردد [۵ تا ۷].

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 ولتاژ شین ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویه روتور نیز صورت پذیرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدریجی حالت سنکرونیزه ماشین ها، زمانی که زوایای روتور بین دو گروه از ماشین ها به  $180^\circ$  نزدیک شده یا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژ های بسیار پایین در نقاط واسطه ای از شبکه می شود (به فصل سیردهم، بخش ۱۳-۵-۳ مراجعه کنید). در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ، که مربوط به ناپایداری ولتاژ است، زمانی اتفاق می افتد که از نظر پایداری پایه روتور مشکلی وجود نداشته باشد. اساساً ناپایداری ولتاژ یک پدیده محلی است. با وجود این، آثار آن ممکن است تأثیر 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 ۲-۴ نشان داد [۵]. این شبکه، شامل یک منبع ثابت ولتاژ ( $E_s$ ) است که باری ( $\bar{Z}_D$ ) را از طریق یک امپدانس سری ( $\bar{Z}_L$ ) تغذیه می کند. این شبکه نمونه ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیه ای از بارها به وسیله یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می شود. جریان  $\bar{I}$  در شکل ۲-۴ برابر است با:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_s}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_D} \quad (3-2)$$

که  $\bar{I}$  و  $\bar{E}_s$  مقادیر فازوری هستند و داریم:

$$\bar{Z}_L = Z_L \angle \theta, \quad \bar{Z}_D = Z_D \angle \phi$$

دامنه جریان برابر است با:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_L \cos \theta + Z_D \cos \varphi)^2 + (Z_L \sin \theta + Z_D \sin \varphi)^2}}$$

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

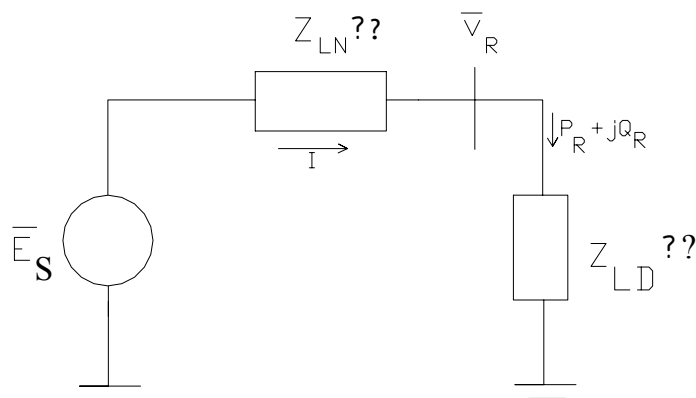
$$I = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{E_S}{Z_L} \quad (۴-۲)$$

$$A = 1 + \left[ \frac{Z_D}{Z_L} \right]^2 + 2 \left[ \frac{Z_D}{Z_L} \right] \cos(\theta - \varphi) \quad \text{که:}$$

دامنه ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با :

$$\bar{V}_R = \bar{Z}_{LD} \bar{I} \rightarrow V_R = Z_{LD} I$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{Z_D}{Z_{LN}} E_S \quad (۵-۲)$$



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

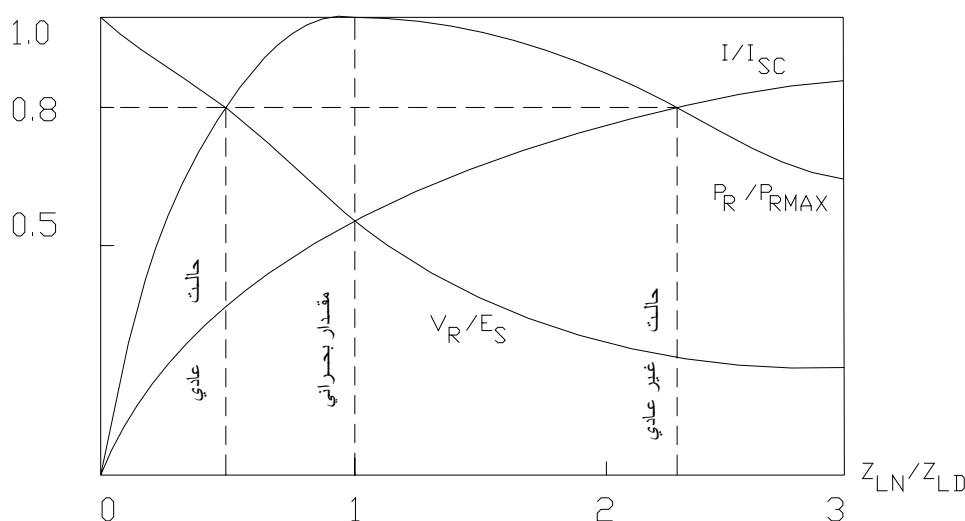
و توان حقیقی برابر است با:

$$P_R = V_R I \cos \varphi$$

$$= \frac{Z_D}{A} \left[ \frac{E_S}{Z_L} \right]^2 \cos \varphi \quad (۶-۲)$$

نمودار  $I$ ،  $V_R$ ،  $P_R$  برحسب  $Z_L/Z_D$  برای حالتی که  $\tan \theta = 0.0$  و  $\cos \varphi = 0.95$  است در شکل ۵-۲

رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار  $Z_L$  به کاربرد، مقادیر  $I$ ،  $V_R$ ،  $P_R$  به طور مناسبی نرمالیزه شده اند.



شکل ۲-۵ ولتاژ، جریان و توان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای جریان بار برای سیستم شکل ۲-۴

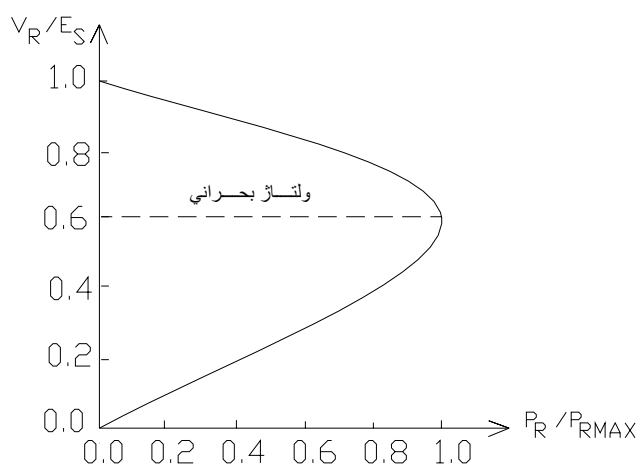
اگر با کاهش  $Z_D$ ، بار مورد تقاضا (جریان بار) را افزایش دهیم،  $P_R$  قبل از رسیدن به یک حداکثر، ابتدا سریعاً و سپس کندتر افزایش می‌یابد و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. از این رو مقدار حداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می‌توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طرق یک امپدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط، از نظر مقدار مساوی  $V_R$ ، باشد یعنی زمانی که  $Z_L / Z_D = 1$  است. زمانی که  $Z_D$  رفته رفته کاهش یابد،  $I$  زیاد می‌شود و  $V$  کم می‌گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ  $Z_{LD}$ ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه با کاهش  $Z_D$ ،  $P_R$  سریعاً افزایش می‌یابد. زمانی که  $Z_D$  به  $Z_L$  نزدیک شد، تأثیر کاهش  $I$  فقط کمی بیشتر از تأثیر کاهش در  $V_R$  است. زمانی که  $Z_D$  کمتر از  $Z_L$  باشد، کاهش در  $V_R$  بر افزایش در  $I$  غالب می‌شود که در نتیجه تأثیر خالص آن، کاهش  $P_R$  است.

حالت بحرانی کاری که در آن توان، حداکثر است، حد بهره‌برداری قابل قبول را نشان می‌دهد. در تقاضاهای بیشتر بار، کنترل توان به وسیله تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد یعنی کاهش امپدانس بار منجر به کاهش توان می‌شود. اینکه آیا ولتاژ به طور فزاینده‌ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه‌های بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امپدانس ثابت، سیستم در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می‌شود. از طرفی اگر مشخصه بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فروپاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می‌شود. با مشخصه‌های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه‌های خط انتقال و بار، تعیین می‌گردد. اگر بار به وسیله ترانسفورمرهایی با وجود تغییر دهنده‌های خودکار تپ زیربار (ULTC) تغذیه‌شود، تغییر دهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می‌شود که  $Z_D$  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.

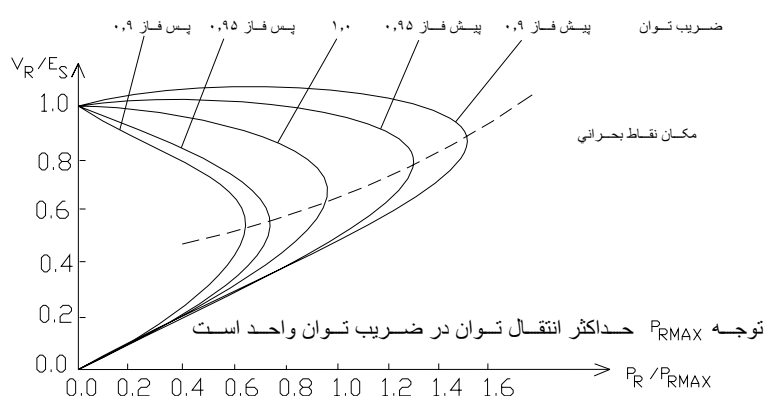
از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطه بین  $P_R$  و  $V_R$  مورد توجه است. این رابطه در شکل ۶-۲ برای سیستم مورد مطالعه، زمانی که ضریب توان بار مساوی ۰,۹۵، پس فاز است، نشان داده شده است.

با توجه به معادلات ۵-۲ و ۶-۲، ضریب توان تأثیر 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  $Q$ ،  $P$  و  $V$  بستگی دارد.



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

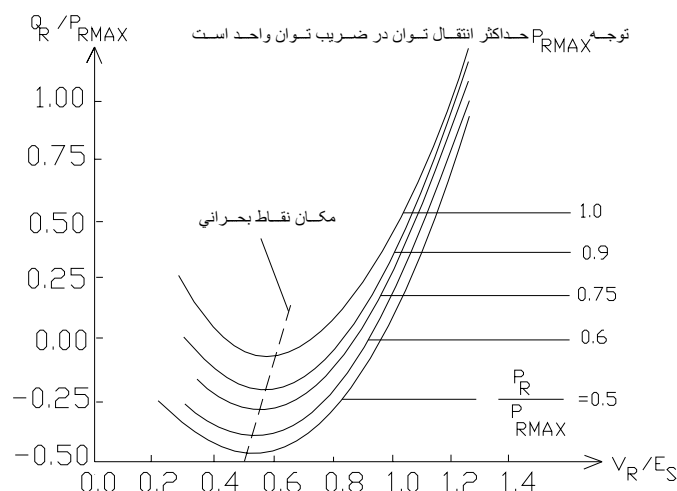
صورت های مرسوم جهت نمایش این ارتباط ها در شکل های ۷-۲ و ۸-۲ نشان داده شده است. شکل ۷-۲ منحنی های  $V_R-P_R$  را برای مقادیر مختلف ضریب توان در سیستم قدرت شکل ۴-۲ نشان می دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولاً تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می دهند. 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 ۷-۲ مشخصه های  $V_R-P_R$  مربوط به سیستم شکل ۴-۲ با ضریبهای مختلف توان بار

تأثیر مشخصه های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیزات جبرانگر) بیشتر در شکل ۸-۲ نمایان است. این شکل، مجموعه ای از منحنی ها برای سیستم قدرت ۴-۲ 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 مسأله پایداری ولتاژ را نشان دهد. در یک سیستم عملی پیچیده قدرت، عوامل زیادی به فرایند فروپاشی ولتاژ سستم در اثر ناپایداری ولتاژ، کمک می کنند؛ از آن جمله، می توان از قوت سیستم انتقال، سطوح توانی انتقالی، مشخصه های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتورها و مشخصه های تجهیزات جبران گر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسأله 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 ۲-۴ با نسبتهای 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 ها بزرگ از جمله خطاهای سیستم، از دست دادن تولید یا پیشامدهای خطوط است. این توانایی به وسیله مشخصه های بار سیستم و تأثیر 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 تأثیر متقابل تجهیزاتی از قبیل تغییر دهنده های تپ زیر بار (ULTC) و محدود کننده های جریان تحریک ژنراتور مشخص می شود، تعیین گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانیه تا چندین دقیقه طول بکشد. از این رو شبیه سازی دینامیکی بلند مدت برای بررسی مسأله، 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 برسند.

**(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 تأثیر محدوده نسبی از وضعیت های سیستم و تعداد زیادی سناریو که به دنبال پیشامدها 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، زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، زیاد شود. سیستم، از نظر ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل در یک شین سیستم، دامنه ولتاژ (V)، زمانی که توان راکتیو تزریقی (Q) به آن افزایش یابد، کم 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 مساله است که می توان روش های مناسب بهره برداری و طراحی را برگزید. شرح مفصل تر پایداری ولتاژ شامل روش های مطالعه و جلوگیری از فرو پاشی ولتاژ در فصل چهاردهم آمده است. بررسی جامع و عمیق مساله در کتاب پایداری ولتاژ سیستم قدرت که قلم تیلور تألیف شده، بیان گردیده است.

## ۲-۱-۳ 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 حالی 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 فرایندها، 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 ای فرایند ها و تجهیزات، که در اثر تغییرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحریک می شوند و 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 تأمین 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 تأکید بر پدیده های گذر 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 آبگذر و کانال آب واحدهای آبی، کنترل خودکار تولید، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی نیروگاه ها و سیستم انتقال، اشباع در ترانسفورمر و تأثیرات 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، تأکید بر نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون و از جمله تأثیر بعضی از پدیده های گذر و احتمالاً تغییرات شدید ولتاژ یا فرکانس است. از نظر زمانی، بازه های نوعی به صورت زیر است:

- کوتاه مدت یا گذرا : صفر تا ۱۰ ثانیه
- میان مدت : ۱۰ 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 مدلسازی مورد استفاده سیستم بخصوص با توجه به نوسان های زودگذر 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، ژنراتورها 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 العملی کلی زیر سیستم با توجه به فرکانس متوسط آن و نه با توجه به حرکت نسبی بین ماشین های سنکرون، تعیین می شود. در بدین وضع، ممکن است عکس العمل تجهیزات حفاظتی سیستم و واحدها وضعیت را باز هم بدتر کند و فروپاشی سیستم یا بخشی از آن رخ دهد.

کاربردهای دیگر بررسی پایداری بلند مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است که نیازمند بهشویه سازی تأثیر تغییر دهنده های تپ ترانسفورمرها، حفاظت فوق تحریک ژنراتورها، حدود منابع توان راکتیو و بارهای ترموستاتی است. در این حالت، کمتر متحمل است که نوسان های بین ماشین های سنکرون، مهم باشد. با وجود این، باید دقت کرد که از بعضی از عکس العمل های دینامیکی سریع چشم پوشی کرد.

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

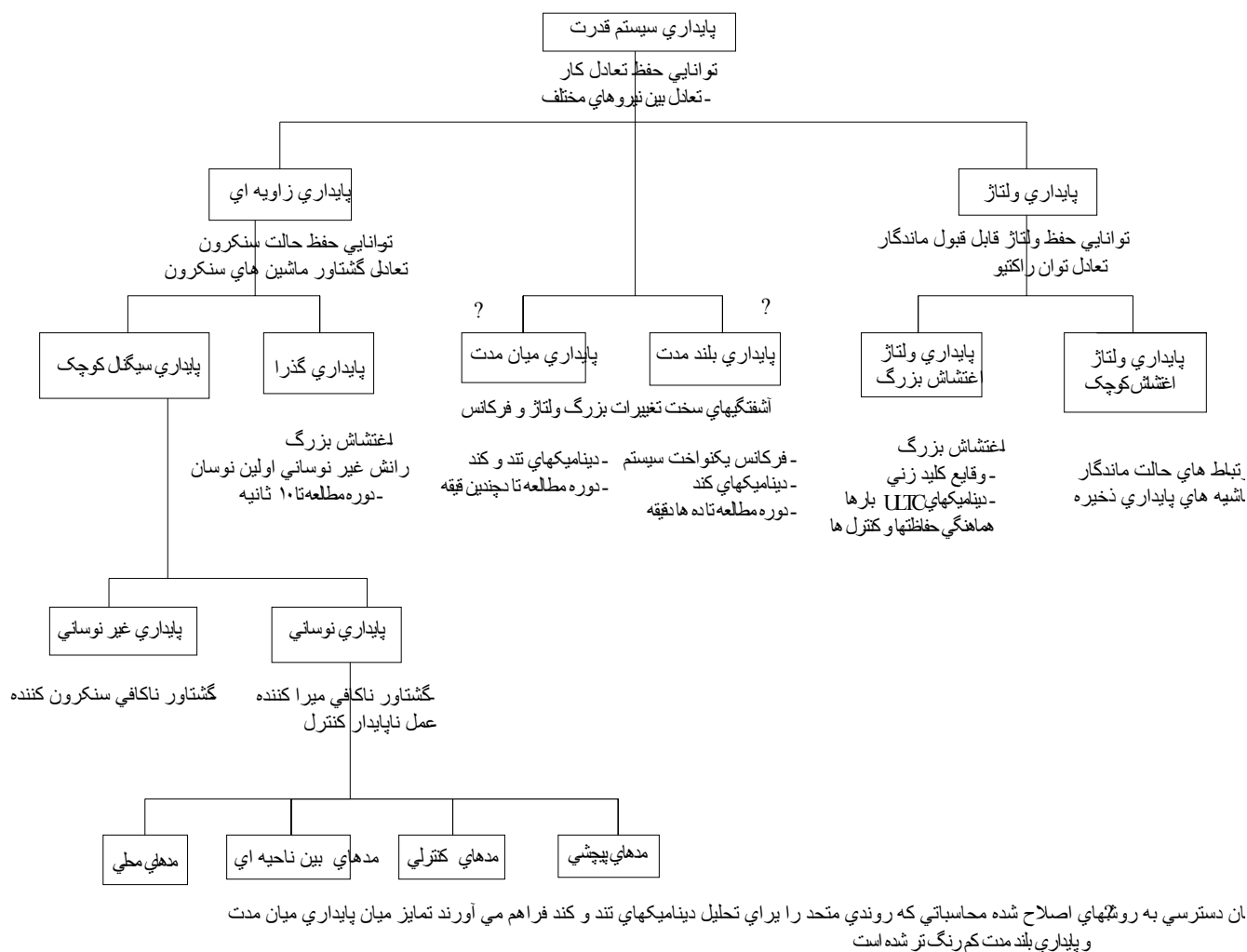
## ۲-۲ طبقه بندی پایداری

پایداری سیستم قدرت یک مسأله 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 تأثیر پذیرد. با طبقه بندی مناسب پایداری، می توان بررسی مسائل مربوطه، تشخیص عوامل اصلی سهم در ناپایداری و ایجاد روش های بهبود عملکرد پایدار 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، فرایندها و محدوده زمانی که برای تعیین پایداری لازم است مورد توجه قرار گیرند؛
- مناسب ترین روش محاسبه و پیش بینی پایداری.

شکل ۹-۲ شکل کلی مسأله 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 هم پوشانی بین پایداری میان مدت، بلند مدت و پایداری ولتاژ وجود دارد. با مدل سازی مناسب بارها، تغییر دهنده زیر بار تپ ترانسفورمرها و حدود توان راکتیو ژنراتورها، شبیه سازی پایداری میان مدت و بلند مدت، مناسب بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ نیز خواهد بود. به طور مشابه، هم پوشانی بین پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدت وجود دارد، بدین صورت که که روش های محاسباتی مشابه برای پیش بینی عکس العمل غیر خطی زمانی سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگ استفاده می کنند. اگر چه این سه طبقه، مسأله 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



شکل ۹-۲ طبقه بندی پایداری سیستم قدرت

هر چند که طبقه بندی پایداری سیستم قدرت، وسیله موثر و مناسبی در برخورد با پیچیدگی های موجود در مسأله است، اما باید همواره پایداری کلی سیستم را مد نظر داشت. حل مسأله پایداری یک طبقه نباید منجر به تأثیر 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، هم پوشانی در پدیده مورد بررسی، مطلوب است.