

## فصل هفتم

### پایداری و کنترل سیستم های قدرت

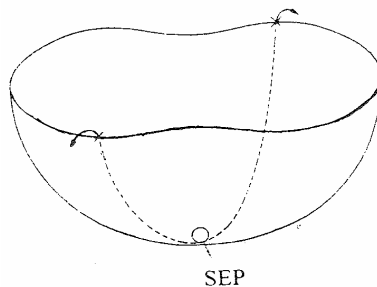
## Power System Stability & Control

#### ۱-۷ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا

روش های مستقیم پایداری را بدون حل صریح معادلات دیفرانسیل سیستم تعیین می کنند. این روش، از نظر اکادمیک جذاب است و از زمان کارهای اولیه ماگنوسن و آیلت، که انرژی گذرا را برای ارزیابی پایداری گذرا به کار گرفتند، تاکنون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. روشهای مبتنی بر انرژی، حالت خاصی از روش کلی دوم لیاپانوف یا روش مستقیم است و تابع انرژی، یک تابع مناسب لیاپانوف است. این بخش مفاهیم اساسی را توضیح می دهد که روشهای مستقیم بر آنها استوار شده است.

#### ۲-۷ توصیف روش تابع انرژی گذرا

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، روش انرژی گذرا را میتوان با در نظر گرفتن توپی که بر روی سطح داخلی یک کاسه می چرخد توصیف کرد. محدوده داخل کاسه نشان دهنده ناحیه پایداری است و محدوده خارج آن ناپایداری را نشان می دهد. لبه کاسه، صورت نامنظمی دارد و از این رو نقاط مختلف روی لبه دارای ارتفاعات متفاوتی هستند.



نمایش توپ چرخان بر روی سطح داخلی یک کاسه

در آغاز توپ در پایین کاسه در حالت سکون است، این حالت را نقطه تعادل پایدار (Stable Equilibrium Point) می‌نامند. هنگامی که مقداری انرژی جنبشی به توپ وارد شود، توپ در جهت خاصی حرکت می‌کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیری که با جهت حرکت اولیه تعیین می‌گردد به طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه ای که توپ از حرکت باز خواهد ایستاد با مقدار اولیه انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم تعیین میشود. اگر توپ قبل از آنکه به لبه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند، به طرف پایین غلت می‌خورد و در نهایت بعد از مقداری رفت و برگشت در نقطه تعادل پایدار مستقر خواهد شد. لیکن اگر انرژی جنبشی وارد بر سیستم به اندازه کافی بزرگ باشد، توپ به لبه کاسه رسیده و از آن بیرون می‌افتد. در این صورت توپ به محدوده ناپایداری وارد می‌شود و به نقطه تعادل پایدار باز نخواهد گشت. سطح داخل کاسه، سطح انرژی پتانسیل و لبه کاسه، سطح مرزی انرژی پتانسیل (Potential Energy Boundary Surface) را نشان می‌دهند.

برای تعیین اینکه آیا توپ وارد محدوده ناپایداری خواهد شد یا نه، دو کمیت لازم است: الف) انرژی اولیه جنبشی وارد شده به سیستم و ب) ارتفاع لبه در نقطه عبور، موقعیت نقطه عبور به جهت حرکت اولیه بستگی دارد.

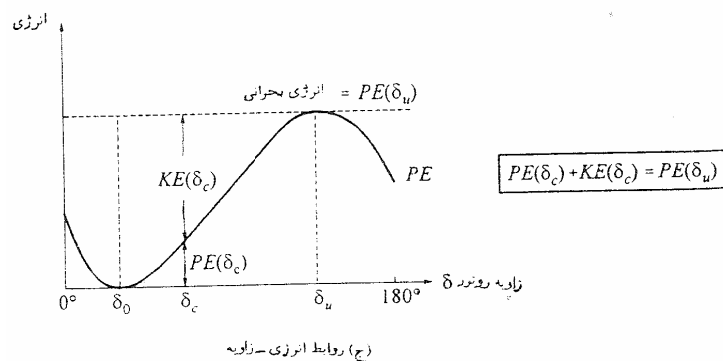
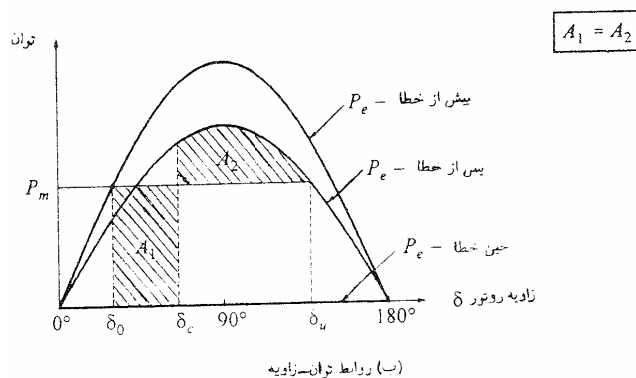
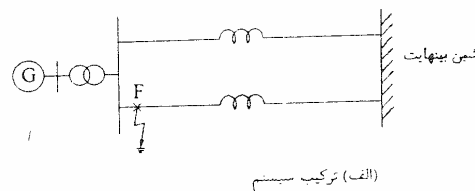
## ۷-۲ کاربرد در سیستمهای قدرت

اصول لازم برای اعمال روش تابع انرژی گذرا (Transient Energy Function) TEF) به تحلیل پایداری سیستم قدرت، به طور مفهومی مشابه اصول حاکم بر توپ غلتان در کاسه است. در آغاز، سیستم در یک نقطه تعادل پایدار عمل می‌نماید؛ اگر خطایی رخ دهد، تعادل دچار اغتشاش می‌شود و ماشینهای سنکرون شتاب می‌گیرند. در طول زمان خطا، سیستم قدرت مقداری انرژی جنبشی و پتانسیل می‌گیرد و از SEP دور می‌شود. بعد از رفع خطا، سیستم انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتان روی به بالای سطح انرژی پتانسیل، به انرژی پتانسیل تبدیل می‌کند. برای اجتناب از ناپایداری در زمانیکه نیروهای وارد بر ژنراتور سعی در آوردن آنها به طرف موقعیتهای تعادل جدید دارند، سیستم باید توانایی جذب انرژی جنبشی را داشته باشد. این موضوع به توانایی جذب انرژی پتانسیل به وسیله سیستم بعد از اغتشاش، بستگی دارد. در یک ترکیب مشخص و پس از بروز اغتشاش در شبکه، مقدار انرژی گذرای حداکثری وجود دارد که سیستم توانایی جذب آنرا دارد. در نتیجه، ارزیابی پایداری گذرا مستلزم موارد ذیل است:

الف) توابعی که بطور کافی انرژی گذرای مسبب جداسازی یک یا چند ماشین سنکرون از باقیمانده سیستم را توصیف می‌کنند.

ب) تخمینی از انرژی بحرانی مورد نیاز برای از دست دادن سنکرونیسم.

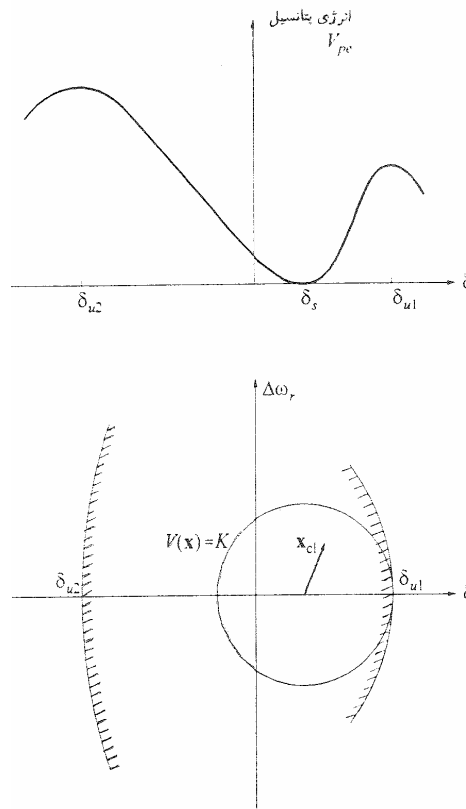
برای یک سیستم دو ماشینه، انرژی بحرانی به طور منحصر به فردی تعریف میشود و تحلیل TEF معادل با معیار سطوح مساوی توضیح داده شده در فصل پایداری گذرا است. این موضوع در شکل زیر نمایش داده شده است، که دو نمودار را با زاویه روتور ( $\delta$ ) بعنوان محور افقی نشان می دهد. نمودار بالا معیار سطوح مساوی را نشان می دهد، که در آن زاویه بحرانی رفع ( $\delta_c$ ) از تساوی سطوح A1 و B1 به دست می آید. نمودار پایین روش انرژی گذرا را نمایش می دهد که از آن می توان برای مشخص کردن زاویه بحرانی رفع بر حسب انرژی جنبشی و پتانسیل استفاده کرد. انرژی جنبشی به دست آمده در طول دوره وجود خطا با انرژی پتانسیل در زاویه روتور متناظر جمع می شود و برای تعیین پایداری، با انرژی پتانسیل بحرانی مقایسه می گردد.



نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح معادل

با بروز اغتشاش، نقطه تعادل پایداری برای سیستم پس از خطا وجود خواهد داشت. می توان برای این SEP پس از خطا ناحیه جذبی را مطابق شکل زیر تعریف کرد. بطوریکه هر مسیر سیستم پس از خطا در حالتی

که حالت سیستم در رفع خطا ( $x_d$ ) در راخل این ناحیه جذب قرار داشته باشد، در نهایت به سمت SEP همگرا خواهد شد و سیستم پایدار می ماند. از طرف دیگر، اگر  $x_d$  خارج از ناحیه جذب قرار داشته باشد، سیستم پس از خطا به نقطه تعادل پایدار همگرا نمی شود و آنرا ناپایدار می نامند.



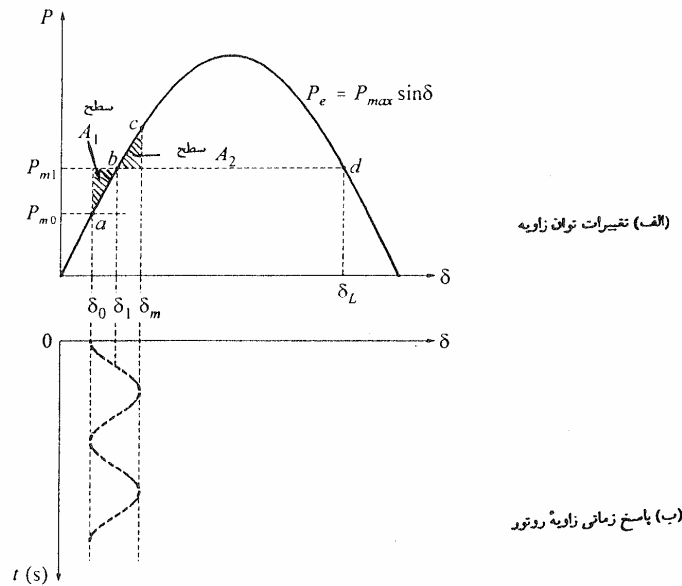
ناحیه پایدار و تقریب محلی  $\delta_n$

حالت سیستم در رفع خطا ( $x_d$ ) را می توان با مقدار تابع انرژی محاسبه شده در  $x_d$ ، به عبارت دیگر  $V(x_d)$  توصیف کرد. از این رو روش مستقیم، مساله پایداری را با مقایسه  $V(x_{cl})$  با انرژی بحرانی  $V_{cr}$  حل می کند. سیستم پایدار است اگر  $V(x_{cl})$  کمتر از  $V_{cr}$  باشد و کمیت  $V_{cr} - V(x_{cl})$  معیار خوبی از پایداری نسبی سیستم است. این کمیت بعنوان حاشیه انرژی گذرا تعریف می شود.

کمیت  $V(x_{cl})$ ، مقدار انرژی گذرای وارد به سیستم به وسیله خطا را اندازه گیری می کند. حال آنکه انرژی بحرانی، قدرت سیستم را پس از خطا اندازه گیری می کند. به طور دقیق تر، انرژی بحرانی توانایی سیستم را در جذب انرژی پس از خطا، اندازه گیری می کند.

با مراجعه به شکل فوق ملاحظه می شود اگر روتور در گستره  $\delta_{u1}$  تا  $\delta_{u2}$  نوسان کند، سیستم پایدار گذرا باقی می ماند و اگر فراتر از این نوسان کند سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو نقاط  $\delta_{u1}$  و  $\delta_{u2}$  بر روی

منحنی انرژی پتانسیل، مرزی را برای کلیه مسیرهای زاویه روتور پایدار تشکیل می دهند. این مرز را سطح مرزی انرژی پتانسیل (PEBS) می نامند و نقاط روی این مرز اوجهای محلی انرژی پتانسیل هستند. مرز ناحیه پایداری، همانطور که در شکل فوق نشان داده شده است، معمولا با یک سطح انرژی ثابت  $\{V(x)=k\}$  تقریب زده میشود که در آن  $k$  نشاندهنده انرژی بحرانی  $V_{CR}$  سیستم پس از خطا می باشد.



پاسخ به تغییر پله ای در ورودی توان مکانیکی

