

References

1-power system stability and control
kundur (انتشارات دانشگاه تربیت مدرس)

2-electric power system dynamic Yu,Y.n

3-power system control and stability anderson

۴- دینامیک و کنترل سیستم های قدرت دکتر مهدی کراری (انتشارات دانشگاه امیر

کبیر)

تعریف سیستم دینامیکی: سیستمی که رابطه ورودی و خروجی آنی نیست.

آیا سیستم قدرت دینامیکی است؟

- مراحل مطالعه دینامیکی؟
- 1-modeling (بدست آوردن رابطه بین ورودی و خروجی)
- 1-1-analytical modeling
 - رابطه بین ورودی و خروجی با استفاده از قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم بدست می آید
- 1-2-experimental modeling
 - یک ورودی به سیستم اعمال می شود و سپس اطلاعات ورودی و خروجی ذخیره می شود و مدل محاسبه می شود

2-simulation (شبیه سازی با کامپیوتر)

3-analysis (تجزیه و تحلیل حالت‌های مختلف ورودی)

4-controller (یک کنترل کننده مناسب برای پایدار کردن طراحی شود)

مراحل چهار گانه فوق را مطالعات
دینامیکی سیستم گویند

stability

- تعاریف
- پایداری بر مبنای ورودی و خروجی (bounded input ,bounded output)
- سیستمی پایدار است که به ازای هر ورودی محدود خروجی محدود نتیجه دهد.
- پایداری در یک سیستم قدرت
- ۱- پایداری از نظر شدت اغتشاش
- ۲- پایداری از نظر مدت زمانی که اغتشاش باقی می ماند

پایداری از جهت شدت اغتشاش:

Steady state (مانا) ●

Dynamic ●

Transient ●

پای‌داری از نظر مدت زمان (۱)

- پدیده موجی (در حد میکرو ثانیه)
- پدیده الکترو مغناطیسی (در حد میلی ثانیه تا ثانیه)
- پدیده الکترو مکانیکی (از یک تا ۱۰)
- پدیده ترمو دینامیکی (چندین دقیقه)

پای‌داری از نظر مدت زمان (۲)

- کوتاه مدت
- میان مدت
- بلند مدت

سیستم های کنترلی در یک سیستم قدرت

- هدف

- ۱-تامین توان لازم مصرف کننده در فرکانس و ولتاژ مورد نظر
- ۲-از بین بردن سریع نوسانات در صورت بروز اغتشاش

انواع سیستم کنترلی در یک سیستم قدرت

- سیستم کنترلی در نیروگاه

- ۱-گاورنر

- ۲-avr

- ۳-pss

- سیستم کنترلی در خطوط انتقال

- ۱-کنترل کننده های ولتاژ و توان راکتیو

- ۲-کنترل کننده های بار فرکانس

۱- کنترل کننده های ولتاژ و توان راکتیو

- کنترل کننده استاتیکی SVC
- کندانسور سنکرون
- تپ چنجر
- Facts
- Phase shifter

مدل سازی انواع سیستم تحریک

- اگر بار حقیقی به شبکه اضافه شود ← فرکانس افت می کند

گاورنر

- اگر بار اکتیو مصرف کننده اضافه شود ← ولتاژ افت می کند

AVR

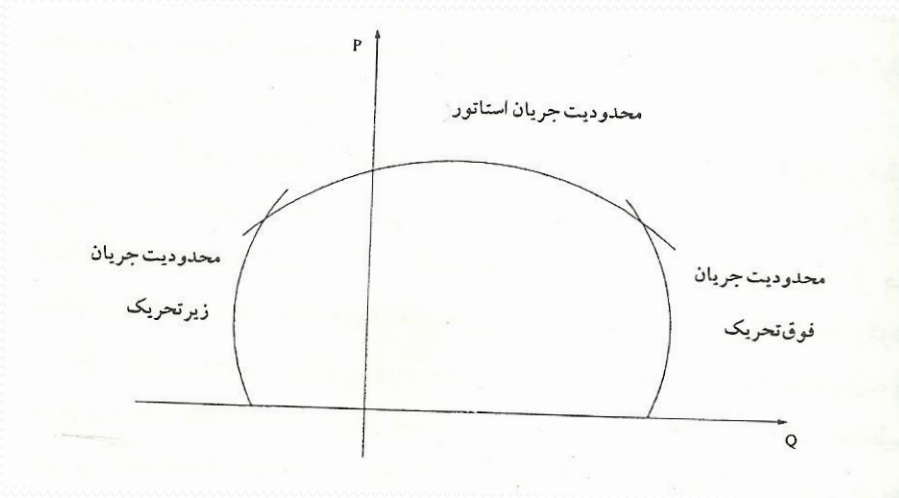
منحنی قابلیت تولید ژنراتور (توان راکتیو)

• اصلی ترین محدودیت تولید توان راکتیو

۱- حد جریان فوق تحریک)

۲- حد جریان استاتور

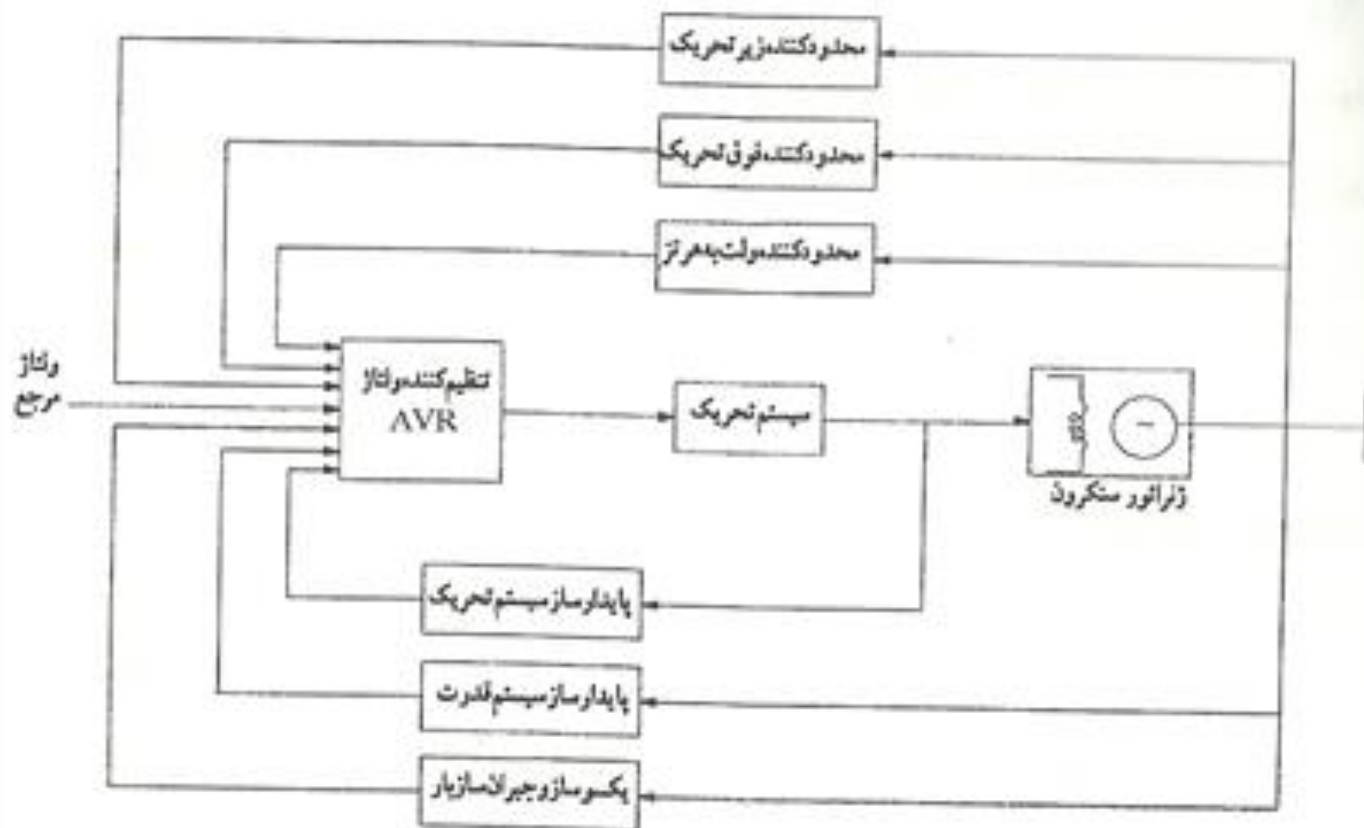
۳- حد گرمایی ناحیه انتهایی استاتور



محدودیتهای سیستم کنترل ولتاژ

- جریان فوق تحریک
- جریان زیر تحریک
- ولت به هرتز

قسمت های اصلی حلقه کنترل ولتاژ



INVERTER AND LOAD COMPENSATOR

- اندازه گیری ویکسو سازی ولتاژ ترمینال و مقایسه با ولتاژ مرجع

UNDEREXCITATION LIMITER

- مقدار توان راکتیو مصرفی از یک مقدار معین نمی تواند کمتر شود.
- عوامل محدود کننده
- حد گرمایی انتهایی استاتور

Over excitation limiter

- محدود کردن حداکثر جریان تحریک

Volt/hertz limiter

- مقدار مجاز شار نشتی

Power system stabilizer(pss)

- سیگنال کنترلی تکمیلی تولید می کند تا نوسانات یک سیستم قدرت پس از یک اغتشاش سریعاً میرا شود

Excitation stabilizer

- برای پایدار کردن سگنال کنترل avr

Avr

- قلب سیستم کنترل

Exciter

- خروجی AVR توان لازم برای فعال نمودن سیستم تحریک ژنراتور را ندارد یک سیستم واسطه مانند ژنراتور جریان مستقیم این کار را می کند

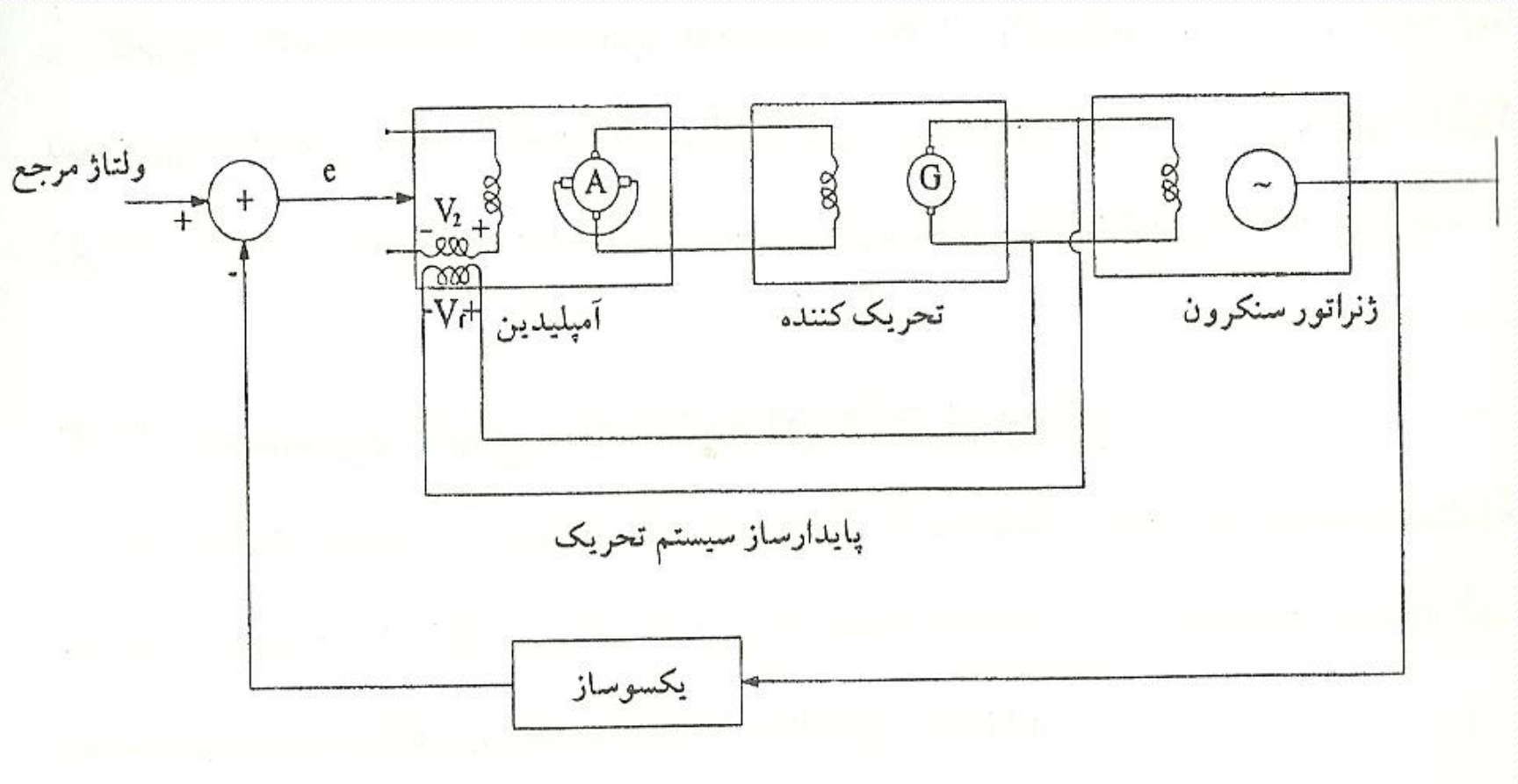
مدل سازی انواع سیستم های کنترل

- با توجه به اینکه سه قسمت سیستم تحریک – پایدار کننده سیستم تحریک – و avr حالت دینامیکی دارد این قسمتها مدلسازی می شوند

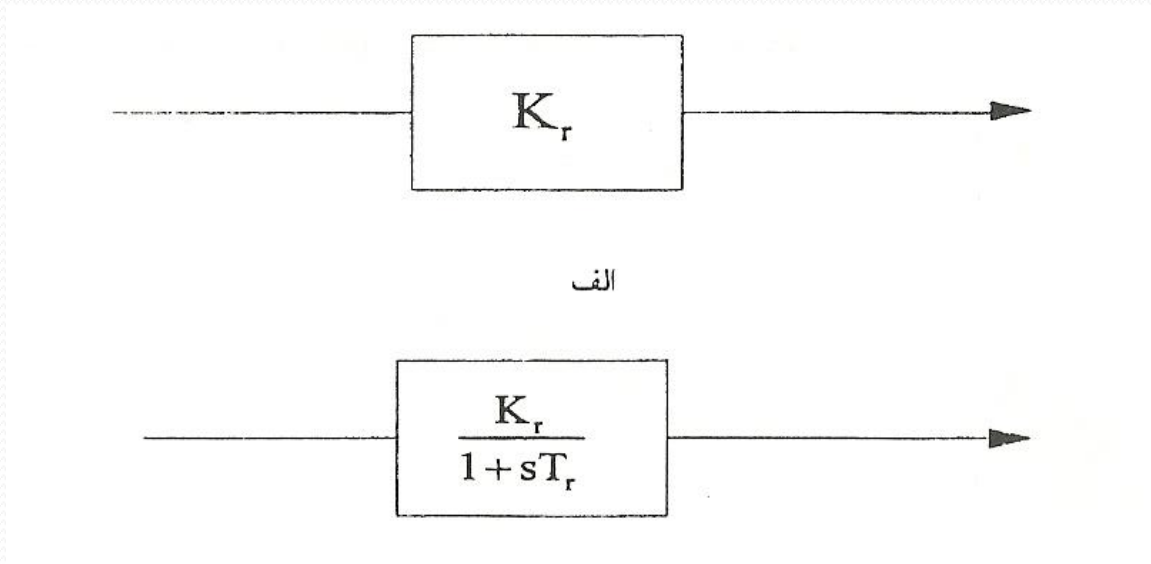
انواع سیستم تحریک (با توجه به نوع تحریک)

- Direct current excitation system
- AC excitation system
- Static excitation system

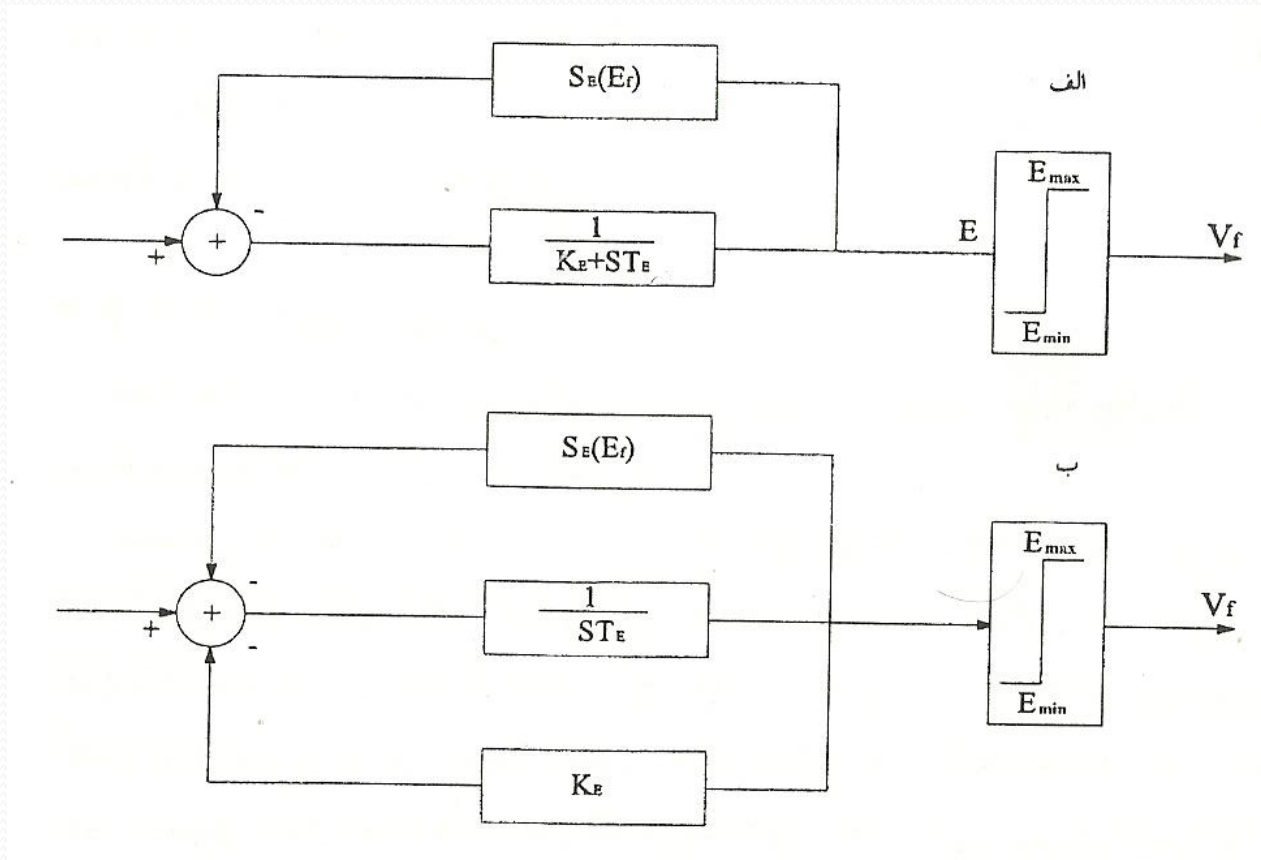
Direct current excitation system مدل



Rectifier $k=v(\text{rectifier})/(v \text{ ac})$

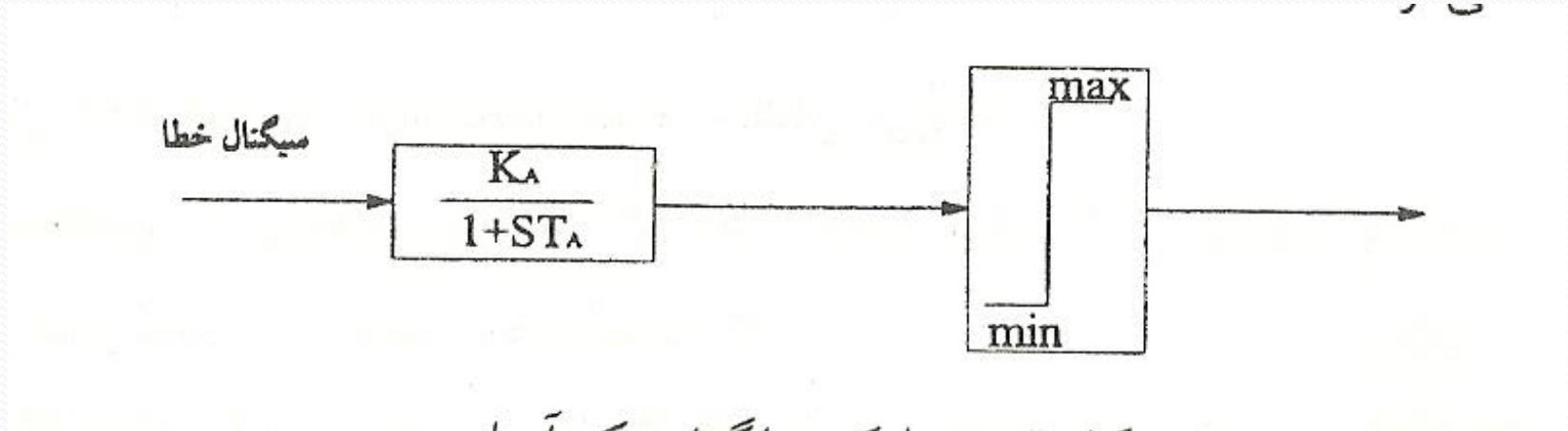


DC generator

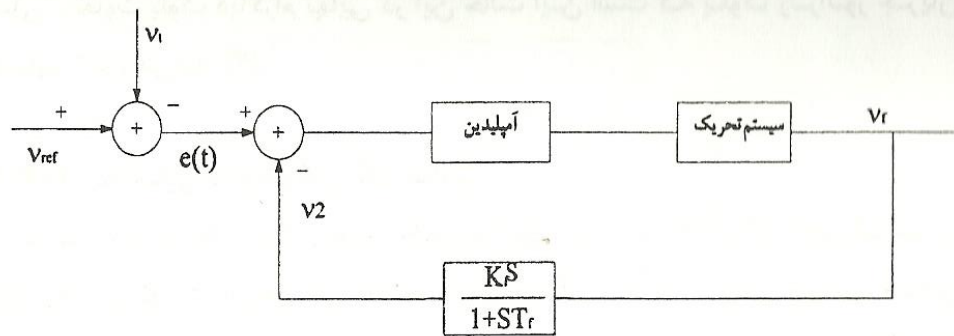


Amplidyne

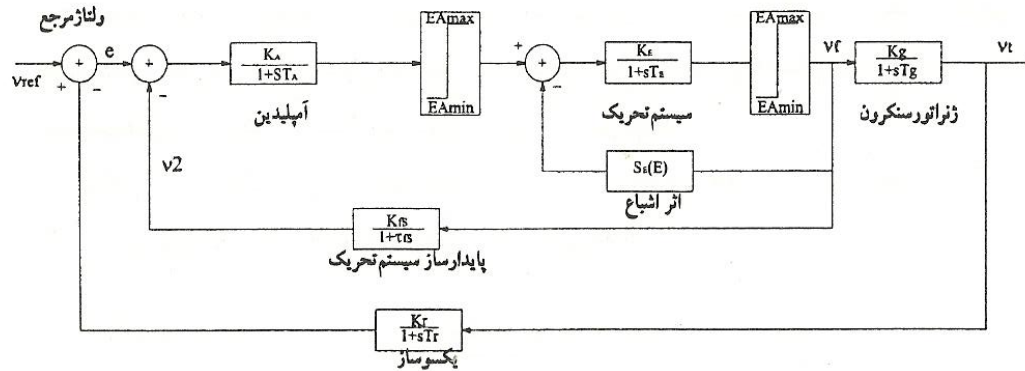
- یک تقویت کننده قدرت است که دامنه ولتاژ خطا و قدرت آن را بسیار زیاد می کند



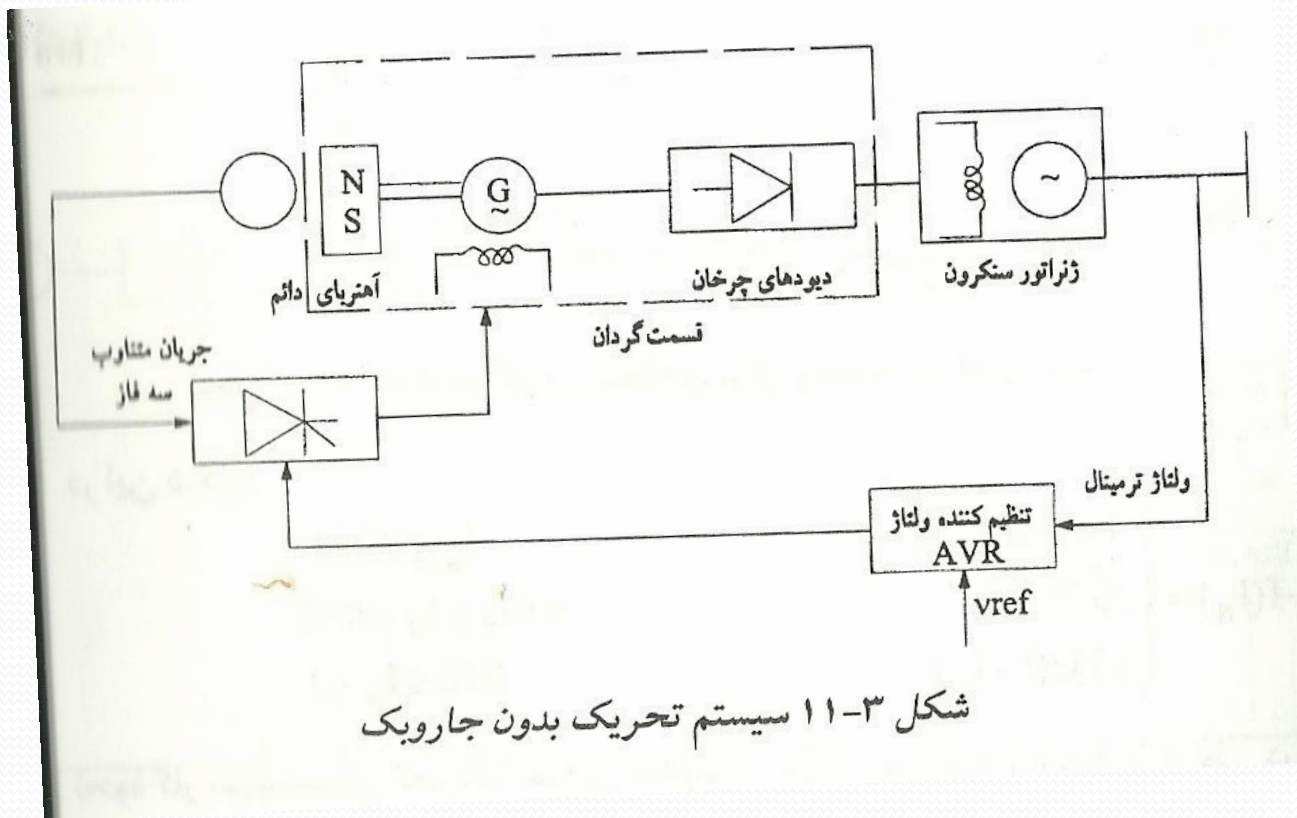
Excitation stabilizer



شکل ۳-۱ بلوک دیاگرام پایدارکننده سیستم تحریک

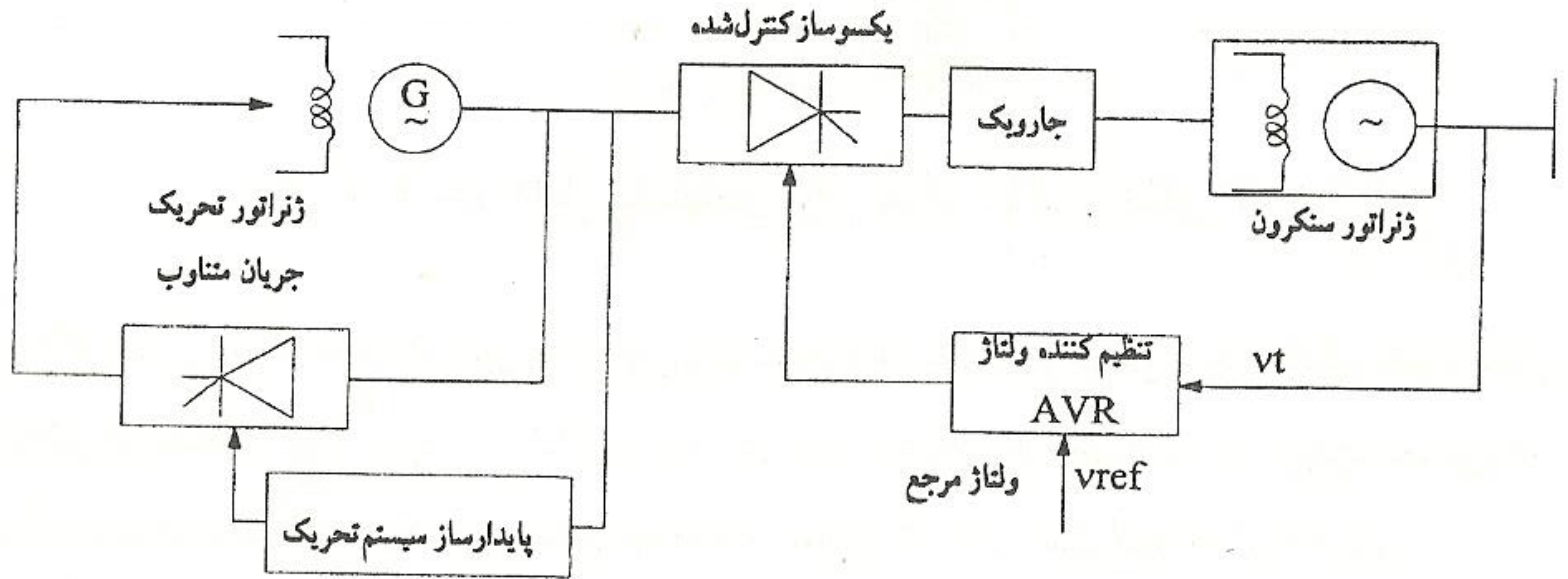


مدل سازی سیستم تحریک متناوب

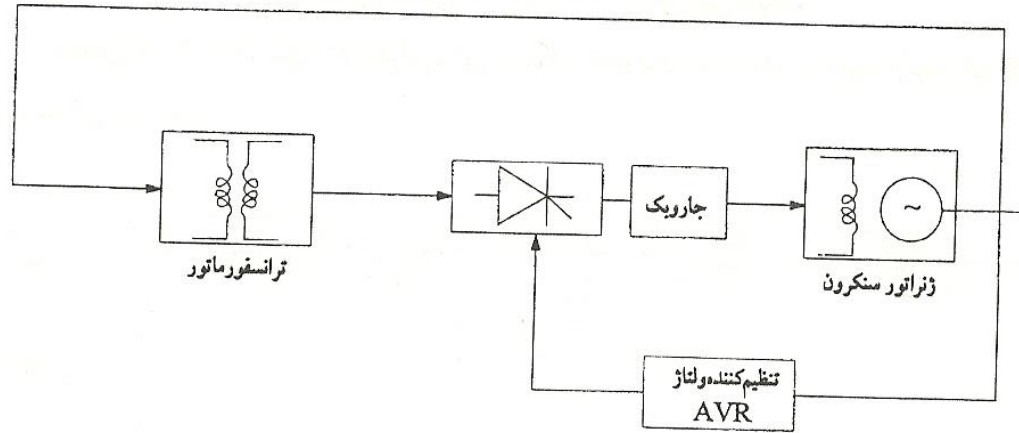


شکل ۳-۱۱ سیستم تحریک بدون جاروبک

با جاروبک



سیستم تحریک استاتیک



شکل ۳-۱۵ یک نمونه از سیستم‌های تحریک استاتیک

Automatic generation control(AGC)

با تغییر بار حقیقی فرکانس شبکه تغییر میکند. برای باز گردادن فرکانس شبکه به حالت عادی باید تغییر دهنده سرعت نقطه کار توربین را تغییر دهد این کار اگر خود کار انجام شود کنترل خودکار تولید گفته میشود.

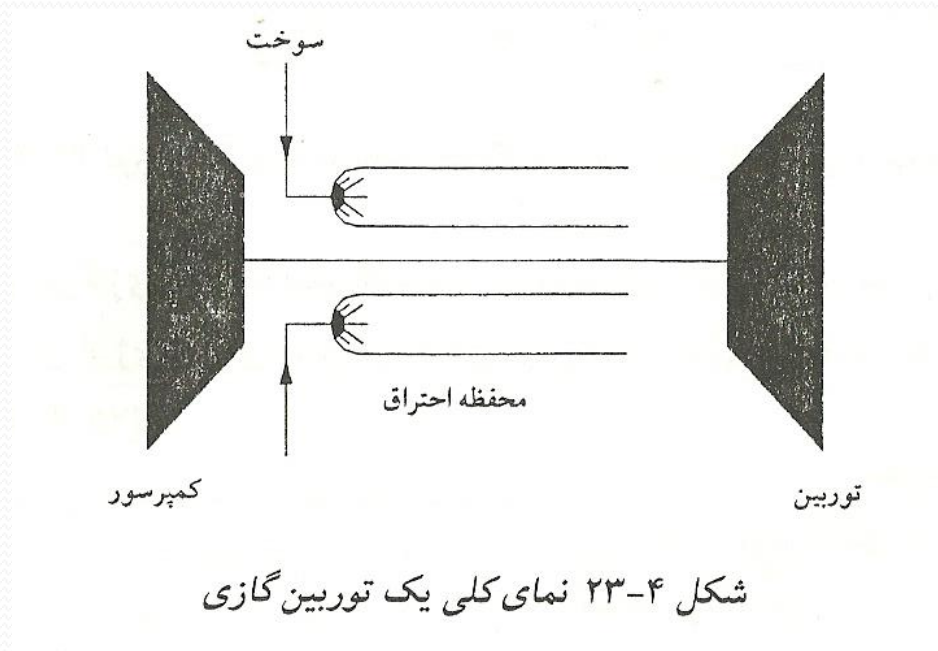
مدل سازی نیروگاه گازی

• توربین گازی

۱-کمپرسور

۲-محفظه احتراق

۳-توربین



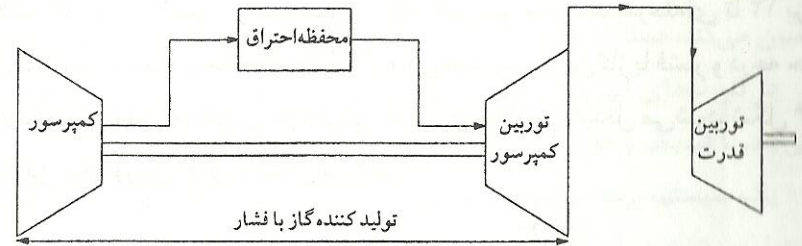
شکل ۴-۲۳ نمای کلی یک توربین گازی

سیکل کاری

- سیکل برایتون
- ۱- بسته
- ۲- باز

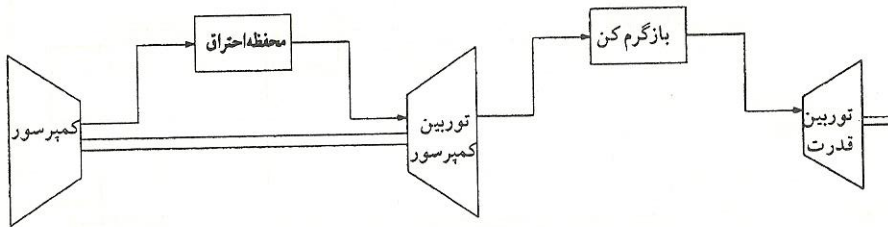
انواع توربین گازی

۱- توربین گازی با دو محور: در این نوع، توربین کمپرسور، تولید کننده قدرت لازم کمپرسور، محور جداگانه‌ای نسبت به توربین قدرت، تولید کننده قدرت لازم برای ژنراتور، دارد (شکل ۴-۲۴).



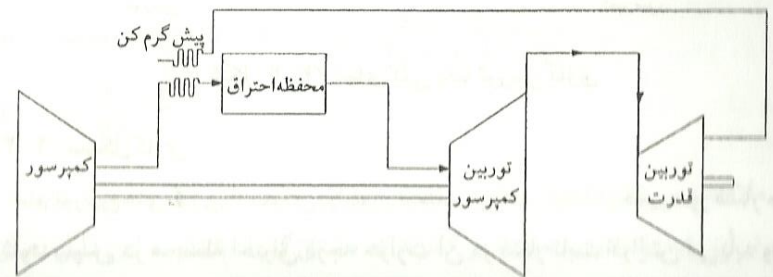
شکل ۴-۲۴ توربین گازی با دو محور جداگانه برای توربین کمپرسور و توربین قدرت

۳- توربین گازی همراه با باز گرم کن^۱: برای بالا بردن راندمان توربین می توان از باز گرم کن، قبل از این که گاز به توربین قدرت برسد، استفاده کرد (شکل ۴-۲۶).



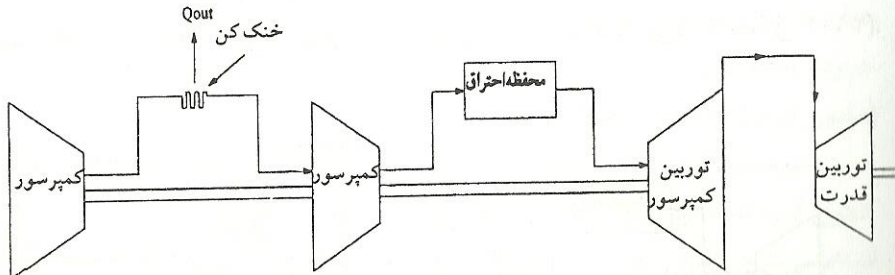
شکل ۴-۲۶ یک توربین گازی همراه با بازگرم کن

۲- توربین گازی همراه با پیش گرم کن^۱: برای بازیابی انرژی گازی هدر رفته می توان مقداری از این انرژی را برای پیش گرم کردن هوای فشرده قبل از محفظه احتراق استفاده نمود (شکل ۴-۲۵).



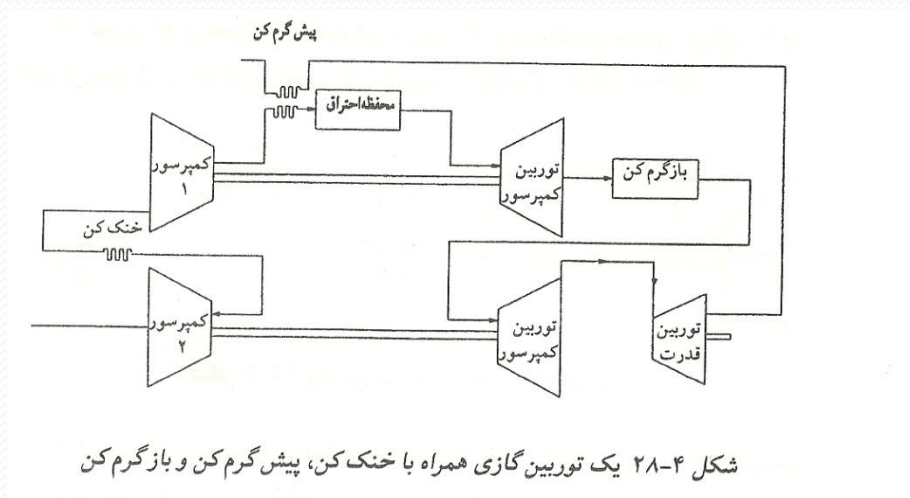
شکل ۴-۲۵ یک توربین گازی با دو محور همراه با پیش گرم کن

۴- توربین گازی همراه با خنک کن^۲: دو مرحله‌ای کردن کمپرسور و استفاده از سیستم خنک کن باعث کمتر شدن کار کمپرسور می شود (شکل ۴-۲۷).



شکل ۴-۲۷ یک توربین گازی همراه با خنک کردن

توربین گازی کامل



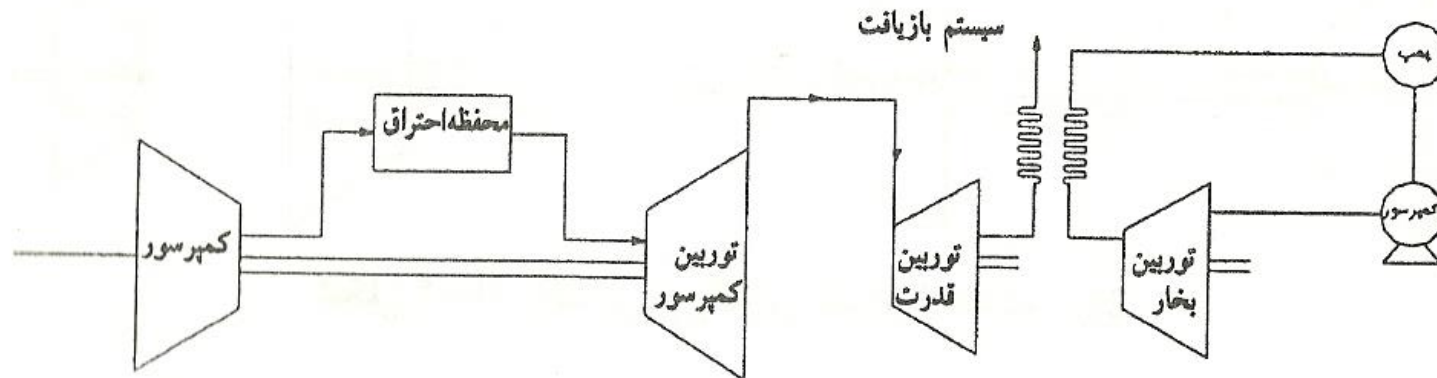
شکل ۴-۲۸ یک توربین گازی همراه با خنک کن، پیش گرم کن و بازرگرم کن

اصول کنترل توربین گازی

- دو مرحله دارد
- ۱-مرحله راه اندازی(مسائلی مانند ضربه- خاموش شدن شعله و حداکثر درجه حرارت مجاز در نظر گرفته میشود)
- ۲-مرحله حین انجام کار(دور و درجه حرارت کنترل میشود)

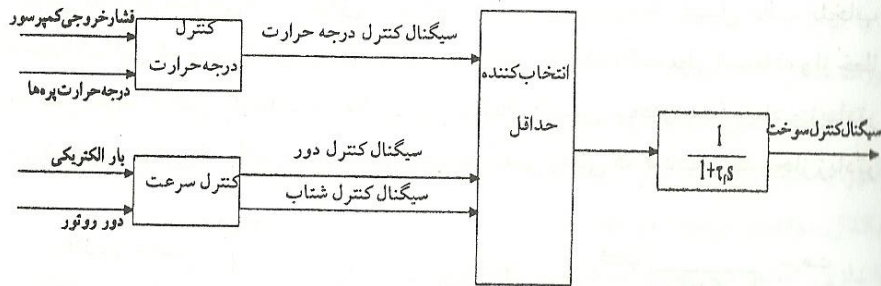
سیکل ترکیبی

۶- نیروگاه سیکل ترکیبی^۱: بهترین روش، برای بالا بردن راندمان، سیکل ترکیبی است که در آن از هر دو نوع توربین گازی و توربین بخار استفاده می‌گردد (شکل ۴-۲۹).

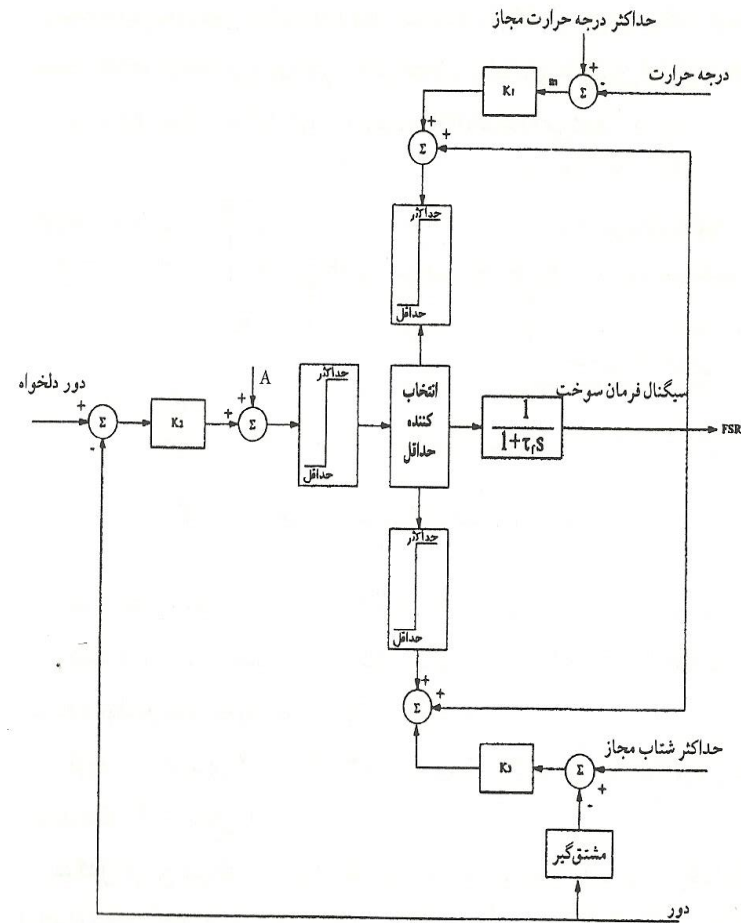


شکل ۴-۲۹ یک نیروگاه سیکل ترکیبی

گاورنر



شکل ۴-۳۹ حلقه‌های کنترل سرعت و درجه حرارت در گاورنر



شکل ۴-۴۲ بلوک دیاگرام کلی گاورنر

- اگر یک نیروگاه متشکل از چندین واحد ژنراتور باشد بهتر است با توجه به مجموعه معادلات کمیت های معادل زیر را تعریف نمود.

$$J_{eq} = \sum_{i=1}^N J_i$$

$$P_{meq} = \sum_{i=1}^N P_{mi}$$

$$\frac{1}{X'_{qeq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{X'_{qi}}$$

$$D_{eq} = \sum_{i=1}^N D_i$$

$$P_{eeq} = \sum_{i=1}^N P_{ei}$$

$$\frac{1}{X_{deq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{X_{di}}$$

$$\frac{1}{X_{qeq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{X_{qi}}$$

$$G_{Aeq} = \sum_{i=1}^N G_{Ai}(s)$$

$$G_{geq} = \sum_{i=1}^N G_{gi}(s)$$

تابع تبدیل هر یک AVRها

تابع تبدیل هر یک گاورنرها

مدل سازی خط انتقال و بار

با مدل خط انتقال و ترانسفورمر آشنایی کامل داشته و لذا به مطالعه مدل بار می پردازیم.

● بارهای موجود در شبکه قدرت از تنوع بسیار زیادی برخوردار هستند.

● ترکیب و تعداد بارهای گوناگون در بخش های مختلف شبکه نیز بسیار متغیر بوده که این امر خود موجب می گردد مدل سازی دقیق شبکه قدرت پیچیده تر گردد.

● در عمده بارهای شبکه رابطه بین ولتاژ و جریان خطی نیست.

مشخصات الکتریکی خطوط هوایی

- R: مقاومت الکتریکی ناشی از مقاومت هادی
- G: کنداکتانس ناشی از جریان ناشی بین فازها و زمین
- L: اندکانتانس سری ناشی از میدان مغناطیسی اطراف هادیها
- C: خازن ناشی از میدان الکتریکی بین هادیها

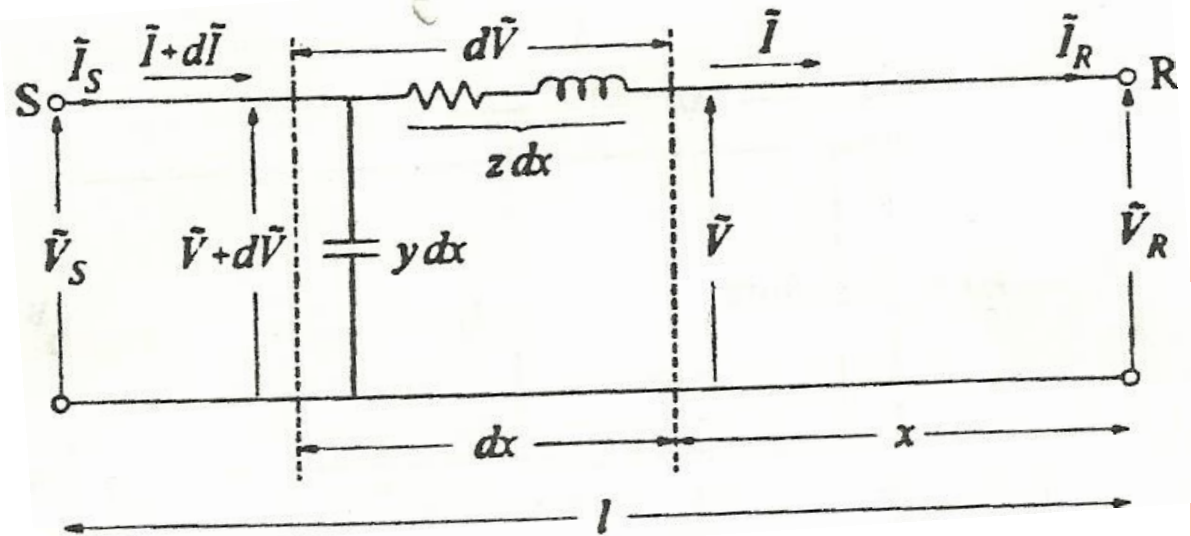
معادلات عملکرد

$$d\tilde{V} = \tilde{I}(z dx)$$

$$\frac{d\tilde{V}}{dx} = \tilde{I}z$$

$$d\tilde{I} = \tilde{V}(y dx)$$

$$\frac{d\tilde{I}}{dx} = \tilde{V}y$$



$$\frac{d^2 \tilde{V}}{dx^2} = z \frac{d\tilde{I}}{dx} = yz \tilde{V}$$

$$\frac{d^2 \tilde{I}}{dx^2} = y \frac{d\tilde{V}}{dx} = yz \tilde{I}$$

شرط مرزی^۱ را می توان با معلوم فرض نمودن V_R (ولتاژ) و I_R (جریان) در طرف گیرنده ($x=0$)، معلوم دانست. حل کلی معادلات برای ولتاژ و جریان در فاصله x از طرف گیرنده به صورت زیر است:

$$\tilde{V} = \frac{\tilde{V}_R + Z_C \tilde{I}_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{\tilde{V}_R - Z_C \tilde{I}_R}{2} e^{-\gamma x}$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{V}_R / Z_C + \tilde{I}_R}{2} e^{\gamma x} - \frac{\tilde{V}_R / Z_C - \tilde{I}_R}{2} e^{-\gamma x}$$

$$Z_C = \sqrt{z/y}$$

$$\gamma = \sqrt{yz} = \alpha + j\beta$$

Z_C به امپدانس مشخصه و γ به ثابت انتشار موسوم است که مقادیر آنها به صورت اعدادی مختلط است. قسمت حقیقی γ به ثابت میرایی (α) و قسمت موهومی آن به ثابت فاز موسوم است. از این رو، عبارت نمایی $e^{\gamma x}$ را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$e^{\gamma x} = e^{(\alpha + j\beta)x} = e^{\alpha x} (\cos \beta x + j \sin \beta x)$$



در سیستم های قدرت دو نوع بار عمده وجود دارد.

الف) بار استاتیکی

در این نوع بارها توان بار به ولتاژ و فرکانس در همان لحظه بستگی دارند مانند لامپ های رشته ای و

ب) بار دینامیکی

در این نوع بارها توان بار ، بازا تغییرات آنی ولتاژ و فرکانس به صورت آنی تغییر نمی کند مانند لامپ های خلاء و یا آنکه بار ذاتا دارای اجزاء مکانیکی متحرک می باشد همانند موتورهای سنکرون و

القائی

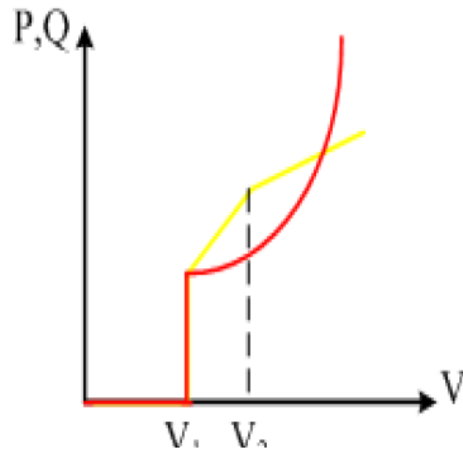
مدل سازی بارهای استاتیکی

در این نوع بار توان اکتیو و راکتیو بار، تابعی غیر خطی از ولتاژ و فرکانس است.

$$P=f_p(v,f)$$

$$Q=f_q(v,f)$$

منحنی های زیر نمایشی از اینگونه توابع می باشند



سه مدل استاندارد پیشنهادی جهت بارهای استاتیکی عبارتند از

مدل اول

$$P = p_0 (\bar{v})^a$$

$$Q = Q_0 (\bar{v})^b$$

که ضرایب **a** و **b** عبارتند از:

$$1.5 < b < 6, \quad 0.5 < a < 1.8$$

$$\bar{v} = \frac{V}{V_0}$$

9

مدل دوم (مدل ZIP)

$$P = p_0(P_1\bar{V}^2 + P_2\bar{V} + P_3)$$

$$Q = Q_0(q_1\bar{V}^2 + q_2\bar{V} + q_3)$$

در روابط فوق هر یک از ضرایب p_1 تا p_3 و q_1 تا q_3 مربوط به جملاتی از توان بار می باشند که بار با توان ثابت ، امیدانس ثابت و جریان ثابت را توصیف می کنند.



مدل سوم : وارد کردن اثر تغییرات فرکانس)

نوع اول

$$P = p_0(\bar{v})^a (1 + k_{pf} \Delta_f) \quad Q = Q_0(\bar{v})^b (1 + k_{qf} \Delta_f)$$

نوع دوم

$$P = p_0(p_1 \bar{v} + p_2 \bar{v} + p_3)^a (1 + k_{pf} \Delta_f)$$

$$Q = Q_0(q_1 \bar{v} + q_2 \bar{v} + q_3)^a (1 + k_{qf} \Delta_f)$$

$$0 < K_{pf} < 3$$

$$-2 < K_{qf} < 0$$

$$\Delta f = f - f_0$$



پایداری دینامیکی (سیگنال کوچک) و نوسانات فرکانس پایین (LOAD FREQUENCY OSCILLATION)

- نوسانات
- ۱- محلی (۱-۵, ۲)
- ۲- بین ناحیه ای (۰,۵-۱)
- منشا نوسانات چیست؟



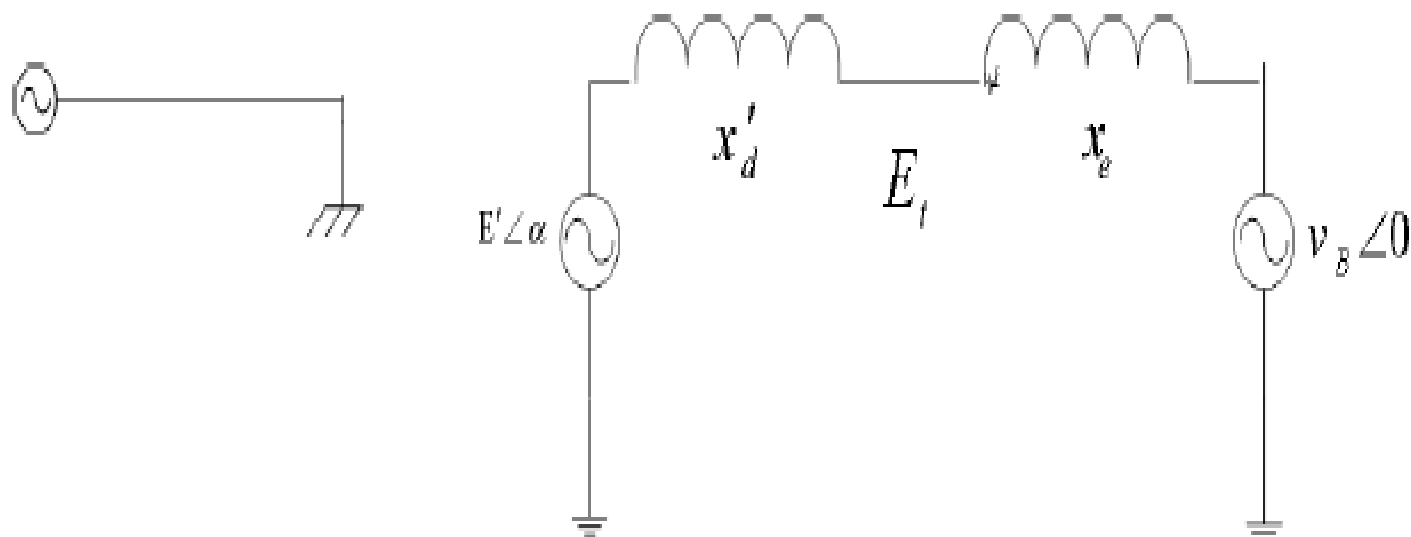
مفهوم پایداری دینامیکی

منظور از پایداری دینامیکی توانایی سیستم در حفظ شرایط جدید پس از نوسانات ایجاد شده با یک اغتشاش کم دامنه است .
عدم پایداری دینامیکی میتواند یکی از دو مورد زیر را ایجاد کند :
الف) افزایش یکنواخت زاویه بار بدلیل عدم وجود گشتاور سنکرون کننده

ب) نوسان زاویه بار بدلیل عدم وجود گشتاور میراکننده کافی

بررسی پایداری دینامیکی در یک سیستم قدرت :

یک ژنراتور متصل به بستن بی نهایت را در نظر بگیرید :



$$T_e \approx P_e = \frac{E' V_B}{X_T} \sin \delta \quad X_T = X'_d + X_e$$

نخست به بررسی معادله مکانیکی سیستم می پردازیم :

$$T_m - T_e = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d \delta}{dt}$$

معادله فوق اساس کار بسیاری از معادلات پایداری و نوسانات فرکانس پایین است .

معادله فوق به همراه معادله حالت زاویه بار و در فرم Perunit به صورت زیر است .

$$\frac{d(\Delta \omega_r)}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - D \Delta \omega_r) \quad \frac{d \delta}{dt} = \omega_0 \Delta \omega_r$$

معادله فوق را در فرم خطی پیاده سازی می کنیم.

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{E V_B}{X_T} \cos \delta_0 (\Delta \delta)$$

$$K_1 = \frac{E V_B}{X_t} \cos(\delta_0)$$

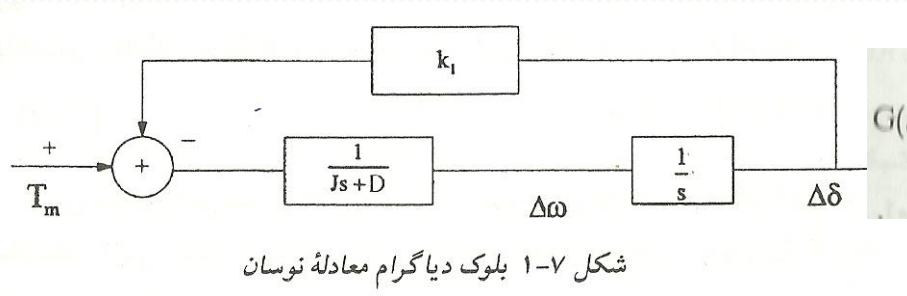
ضریب گشتاور سنکرون کننده

$$\Rightarrow \frac{d(\Delta \omega_r)}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - \Delta T_e - D \Delta \omega_r) \quad \frac{d \Delta \delta}{dt} = \omega_0 \Delta \omega_r$$

بنابراین فضای حالت سیستم در فرم خطی به شکل زیر است

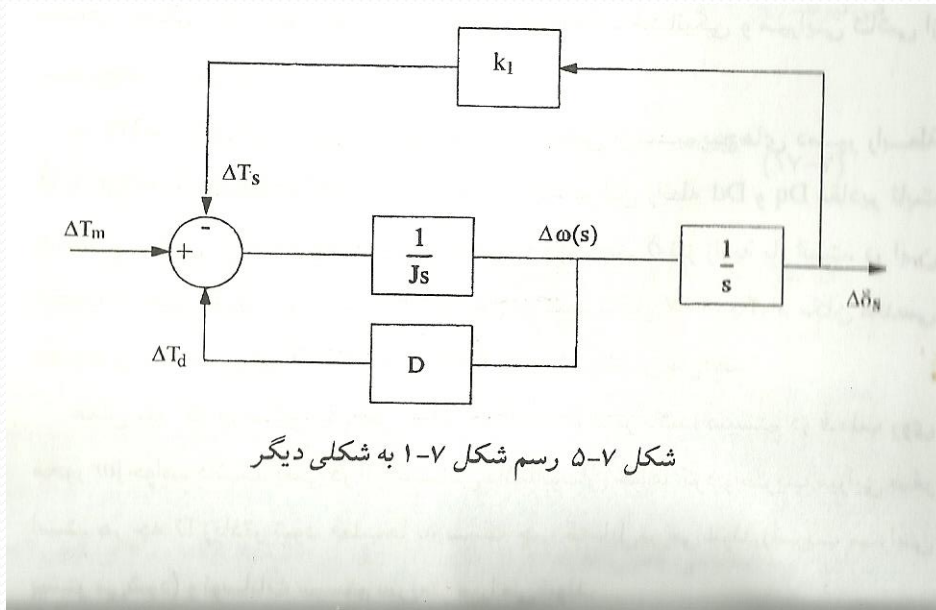
$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega_r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overset{\rightarrow}{\omega_0} \leftarrow 0 \\ \frac{-K_1}{2H} & \frac{-D}{2H} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{2H} \end{pmatrix} \Delta T_m$$

پایداری دینامی کی (سیگنال کوچک) ونوسانات فرکانس پایین (LFO)

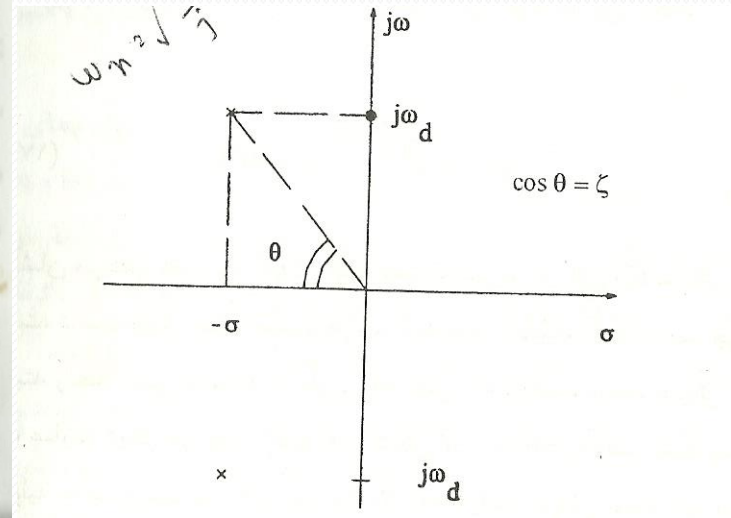


$$G(s) = \frac{\frac{1}{J}}{s^2 + \frac{D}{J}s + \frac{K_1}{J}} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\zeta < 1)$$

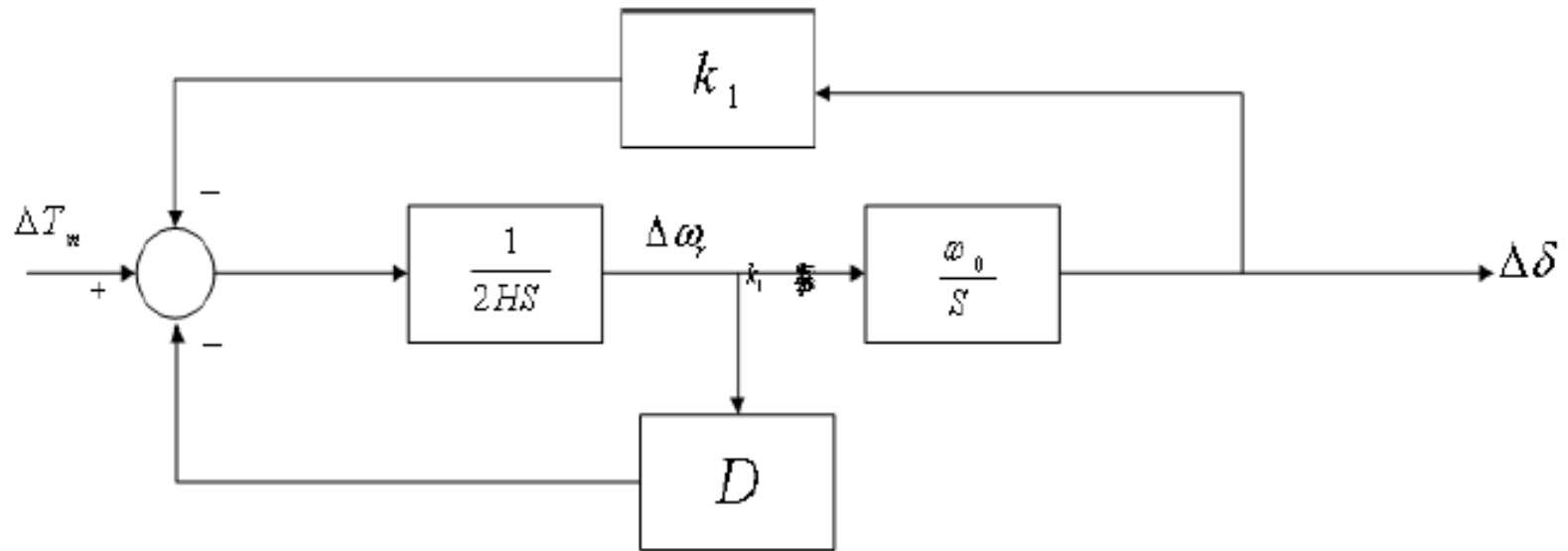
شکل ۱-۷ بلوک دیاگرام معادلہ نوسان



شکل ۵-۷ رسم شکل ۱-۷ به شکلی دیگر



فرم بلوک دیاگرامی سیستم به قرار زیر است .



$$K_1 (\text{pu} / \text{rad})$$

D : Pu گشتاور / pu (انحراف سرعت)

$$\Delta \omega_r = \frac{\omega_r - \omega_0}{\omega_0}$$

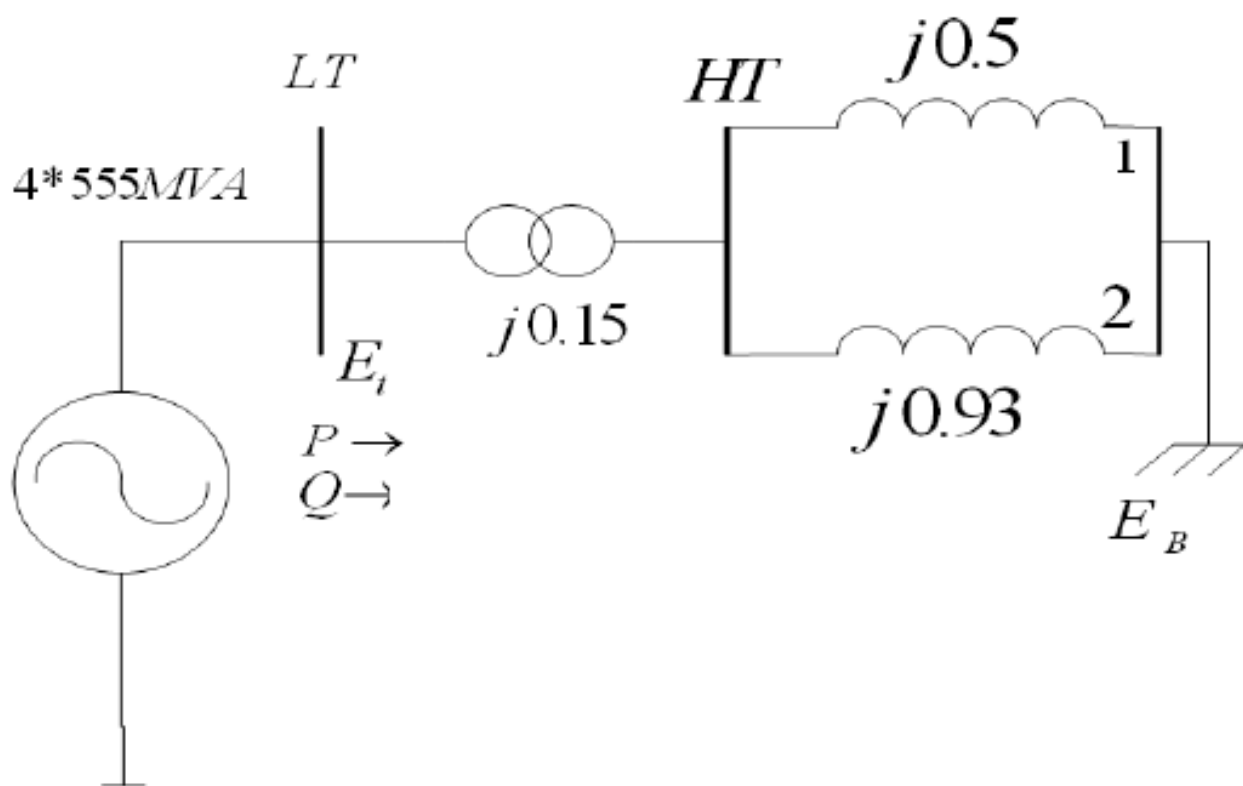
$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

معادله مشخصه سیستم فوق به قرار زیر است

$$S^2 + \frac{D}{2H}S + \frac{K_1\omega_0}{2H} = 0 \quad \omega_n = \sqrt{K_1 \frac{\omega_0}{2H}} \quad \zeta = \frac{1}{2} \frac{D}{\sqrt{2K_1H\omega_0}}$$

مثال

سیستم زیر قابل اعمال به نیروگاهی حرارتی (تشکیل شده از چهار واحد $4 \times 555 \text{ MVA}$ ، 24 KV ، 60 Hz) را نشان می دهد .



راکتانسهای شبکه نشان داده شده در شکل ، در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220 MVA ، 24 KV هستند (به طرف فشار ضعیف ترانسفورمر بالا برنده ارجاع شده است) و فرض شده مقاومتها قابل چشمپوشی باشند . هدف از این مثال ، تحلیل مشخصه های پایداری سیگنال کوچک سیستم ، حول نقطه کار حالت - ماندگار به دنبال از دست دادن مدار ۲ می باشد وضعیت پیش از خطای سیستم در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220 MVA ، 24 KV به صورت زیر است :

$$E_t = 1.0 \angle 36^\circ \quad E_B = 0.995 \angle 0^\circ \quad P = 0.9 \quad Q = 0.3 \quad (\text{فوق تحریک})$$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتور معادل منفرد توصیف شده در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220 MVA ، 24 KV مدل می شوند :

$$X'_d = 0.3 \quad H = 3.5 \quad \text{MWS} / \text{MVA}$$

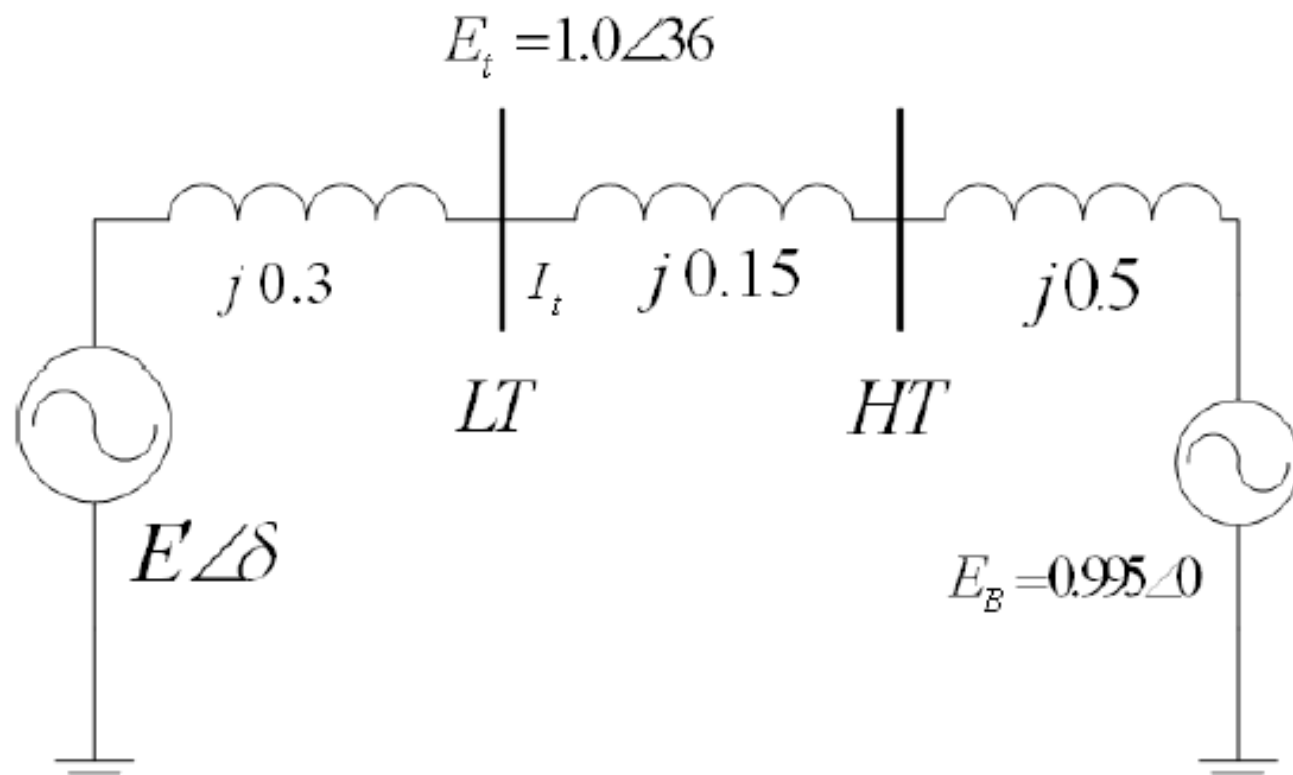
الف) معادلات حالت خطی شده سیستم را بنویسید. مقادیر ویژه، فرکانس میرا شده نوسان (بر حسب Hz)، نسبت میرایی و فرکانس طبیعی غیر میرا را برای هر یک از مقادیر ضریب میرایی (بر حسب سرعت مبنای واحد بر گشتاور مبنای واحد) تعیین کنند:

$$(i) K_D = 0 \quad (ii) K_D = -10.0 \quad (iii) K_D = 10.0$$

ب) برای حالتی که $K_D = 10.0$ باشد، بردارهای ویژه چپ و راست، و ماتریس مشارکت پیدا کنید. اگر $t = 0$ ، $\Delta\delta = 5^\circ$ و $\Delta\theta = 0$ باشد، پاسخ زمانی را تعیین کنید.

حل

الف) شکل زیر، مدل مدار نشان دهنده نقطه کار حالت - ماندگار را پس از از بروز خطا با کلید پارامترهای توصیف شده در مبنای واحد بر پایه 2220 MVA نشان می دهد.



با در نظر گرفتن E_t به عنوان فازور مرجع ، جریان استاتور ژنراتور به صورت زیر داده می شود :

$$\tilde{I}_t = \frac{(p + jQ)^*}{E_t^*} = \frac{0.9 - j0.3}{1.0} = 0.9 - j0.3 \text{ pu}$$

ولتاژ متصل به راکتانس گذرا عبارت است از :

$$\tilde{E}' = \tilde{E}_t + jX'_d \tilde{I}_t = 1.0 + j0.3(0.9 - j0.3) = 1.09 + j0.27 = 1.123 \angle 13.92^\circ$$

زاویه پیش فاز بودن E' نسبت به E_t عبارت است از :

$$\delta_0 = 13.92^\circ + 36^\circ = 49.92^\circ$$

مجموع راکتانس سیستم خواهد شد :

$$X_T = 0.3 + 0.15 + 0.5 = 0.95$$

ضریب گشتاور سنکرون کننده متناظر ، برابر است با :

$$K_S = \frac{E'E_B}{X_T} \cos \delta_0 = \frac{1.123 \times 0.995}{0.95} \cos 49.92^\circ$$

بنابراین معادلات حالت خطی شده عبارت است از :

$$\begin{pmatrix} \Delta' \omega_r \\ \Delta' \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$
$$= \begin{pmatrix} -0.143K_D & -0.108 \\ 377.0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \omega_r \\ \Delta \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.143 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

مقادیر ویژه ماتریس حالت به صورت زیر داده می شود :

$$\begin{vmatrix} -0.143K_D - \lambda & -0.108 \\ 377.0 & -\lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\lambda^2 + 0.143K_D \lambda + 40.79 = 0$$

و با مقایسه با شکل استاندارد ذیل :

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_n \lambda + \omega_n^2 = 0$$

خواهیم داشت :

$$\omega_n = \sqrt{40.79} = 6.387 \text{ rad / s} = 1.0165 \text{ HZ}$$

$$\zeta = 0.143K_D / (2 \times 6.387) = 0.0112K_D$$

پس مقادیر ویژه عبارتند از :

$$\lambda_1, \lambda_2 = -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

فرکانس میرا شده خواهد شد :

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$$

در زیر نتایج خواسته شده برای مقادیر مختلف آورده شده است :

	۰	۰.۱	۰.۱۲	K_D
مقادیر ویژه λ	$0 \pm j6.39$	$-0.714 \pm j6.35$	$-1.12 \pm j6.36$	
فرکانس میرا ω_d	1.0165HZ	1.0101HZ	1.0101HZ	
نسبت میرایی ζ	۰	۰.۱۱۲	۰.۱۱۲	
فرکانس طبیعی غیر میرا ω_n	1.0165HZ	1.0165HZ	1.0165HZ	

ب) بردارهای ویژه راست به صورت زیر داده می شود : $(A - \lambda I)\varphi = 0$
برای سیستم داده شده ، با $K_D = 10$ معادله بالا چنین می شود :

$$\begin{pmatrix} -1.43 - \lambda_1 & -0.108 \\ 377.0 & -\lambda_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{21} \end{pmatrix} = 0$$

برای $\lambda = -0.714 + j6.35$ معادلات متناظر عبارت است از :

$$(0.714 + j6.35)\varphi_{11} + 0.108\varphi_{21} = 0$$

$$377.0\varphi_{11} + (0.714 - j6.35)\varphi_{21} = 0$$

معادلات بالا مستقل خطی نیستند . باید یکی از عناصر بردار ویژه متناظر

بایک مقدار ویژه را به دلخواه انتخاب کرد . بنابراین با فرض : $\varphi_{21} = 1.0$

داریم:

$$\varphi_{11} = -0.0019 + j0.0168$$

به طور مشابهی ، بردار ویژه متناظر با $\lambda_2 = -0.714 - j6.35$ عبارت است از :

$$\varphi_{22} = 1.0 \quad \varphi_{12} = -0.0019 - j0.0168$$

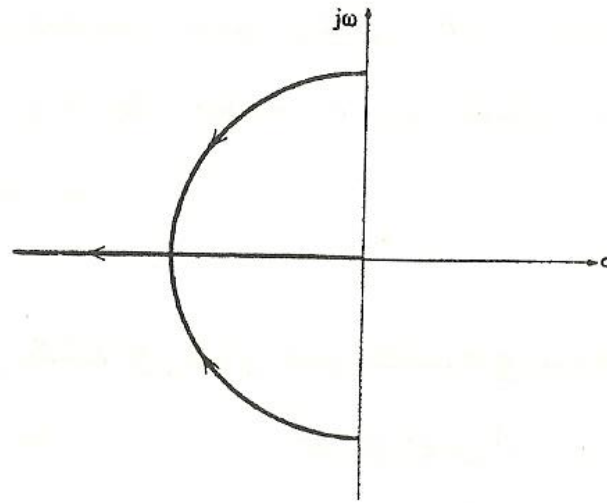
لذا ماتریس مدال بردار ویژه راست عبارت است از :

$$\Phi = \begin{pmatrix} -0.0019 + j0.0168 & -0.0019 - j0.0168 \\ 1.0 & 1.0 \end{pmatrix}$$

بردارهای ویژه چپ نرمالیزه شده به صورت $\psi_1 \varphi_1 = 1.0$ عبارت است از :

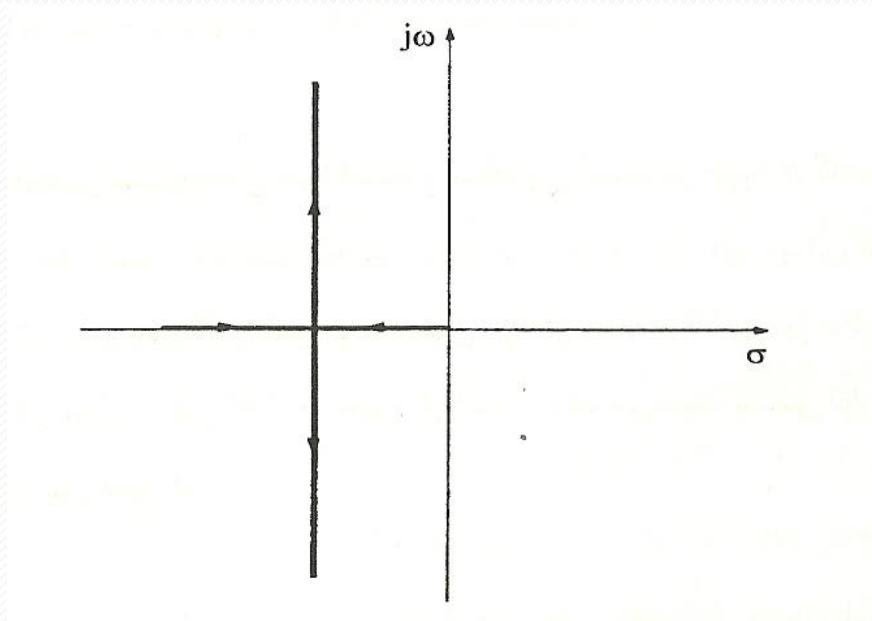
$$\begin{aligned} \psi &= \Phi^{-1} = \frac{\text{adj}(\Phi)}{|\Phi|} = \frac{\begin{pmatrix} 1.0 & -1.0 \\ 0.0019 + j0.0168 & -0.0019 + j0.0168 \end{pmatrix}^T}{(-0.0019 + j0.0168 + 0.0019 + j0.0168)} \\ &= \begin{pmatrix} -j29.76 & 0.5 - j0.056 \\ j29.76 & 0.5 + j0.056 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

اثر D: اثر مثبت



شکل ۴-۷ دیاگرام مکان هندسی ریشه‌ها وقتی D تغییر می‌کند

اثر K_1 (اضافه شدن اثر منفی)



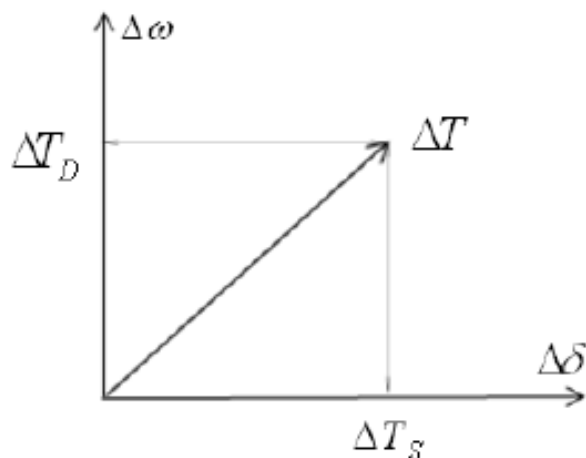
یادآوری می کنیم که K_1 هم به عوامل سیستم همانند X'_d بستگی دارد و هم به نقطه کار ژنراتور δ_0, E_0, V_{B0} .

تحلیلی بر روی گشتاور های میرا کننده و سنکرون کننده در حوزه فرکانس

با توجه به رابطه بین $\Delta\omega$, $\Delta\delta$, $(\Delta\omega = \frac{d\Delta\delta}{dt})$ پس میتوان گفت که $\Delta\omega$ نسبت به $\Delta\delta$, 90° درجه جلو تر است .

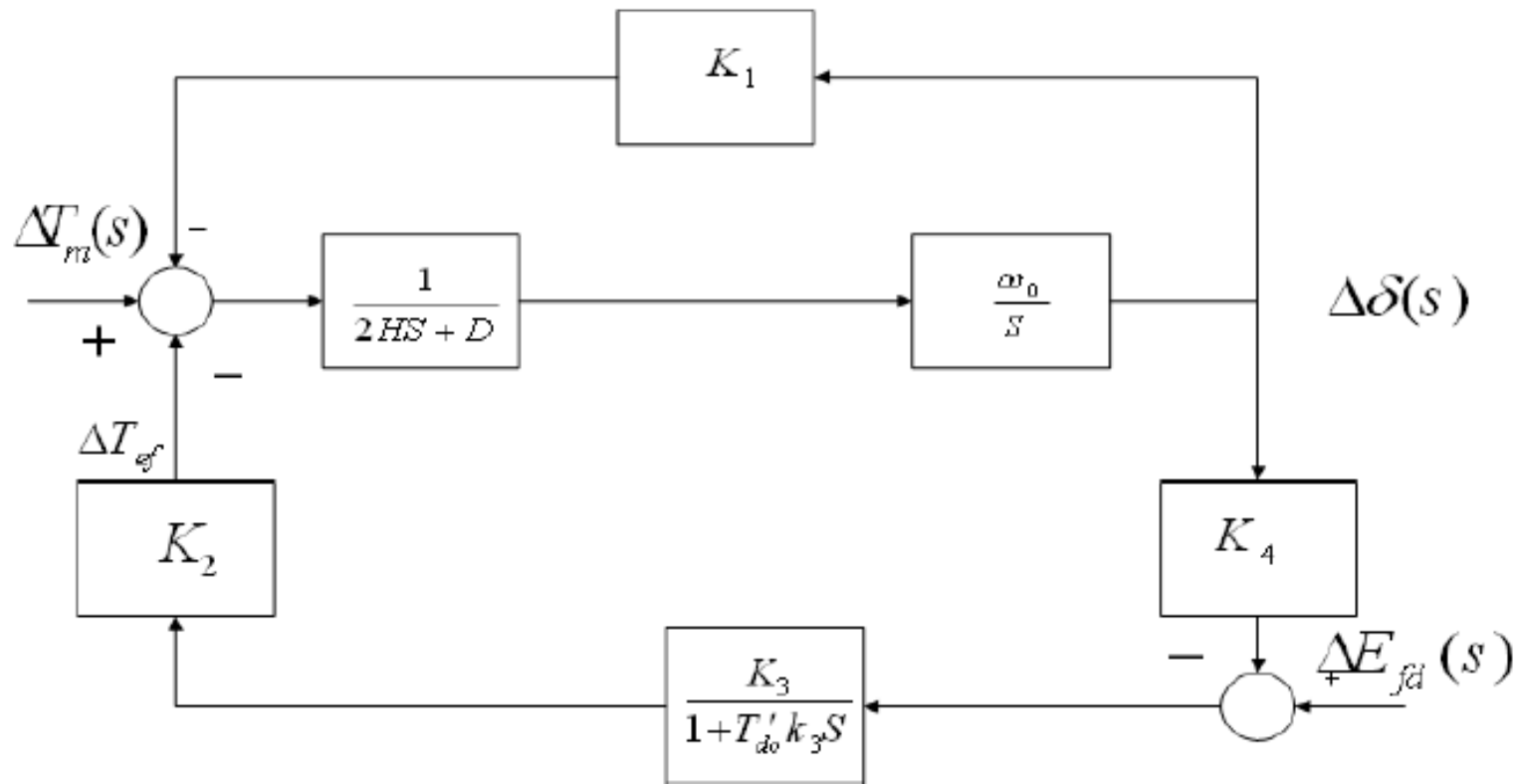
از طرفی چون گشتاور میرا کننده برابر $D\Delta\omega$ و گشتاور سنکرون کننده برابر $K_1\Delta\delta$ می باشد

پس میتوان گفت که هر گشتاور اعمالی به روتور می تواند به دو مولفه میراکننده و سنکرون کننده تجزیه گردد .

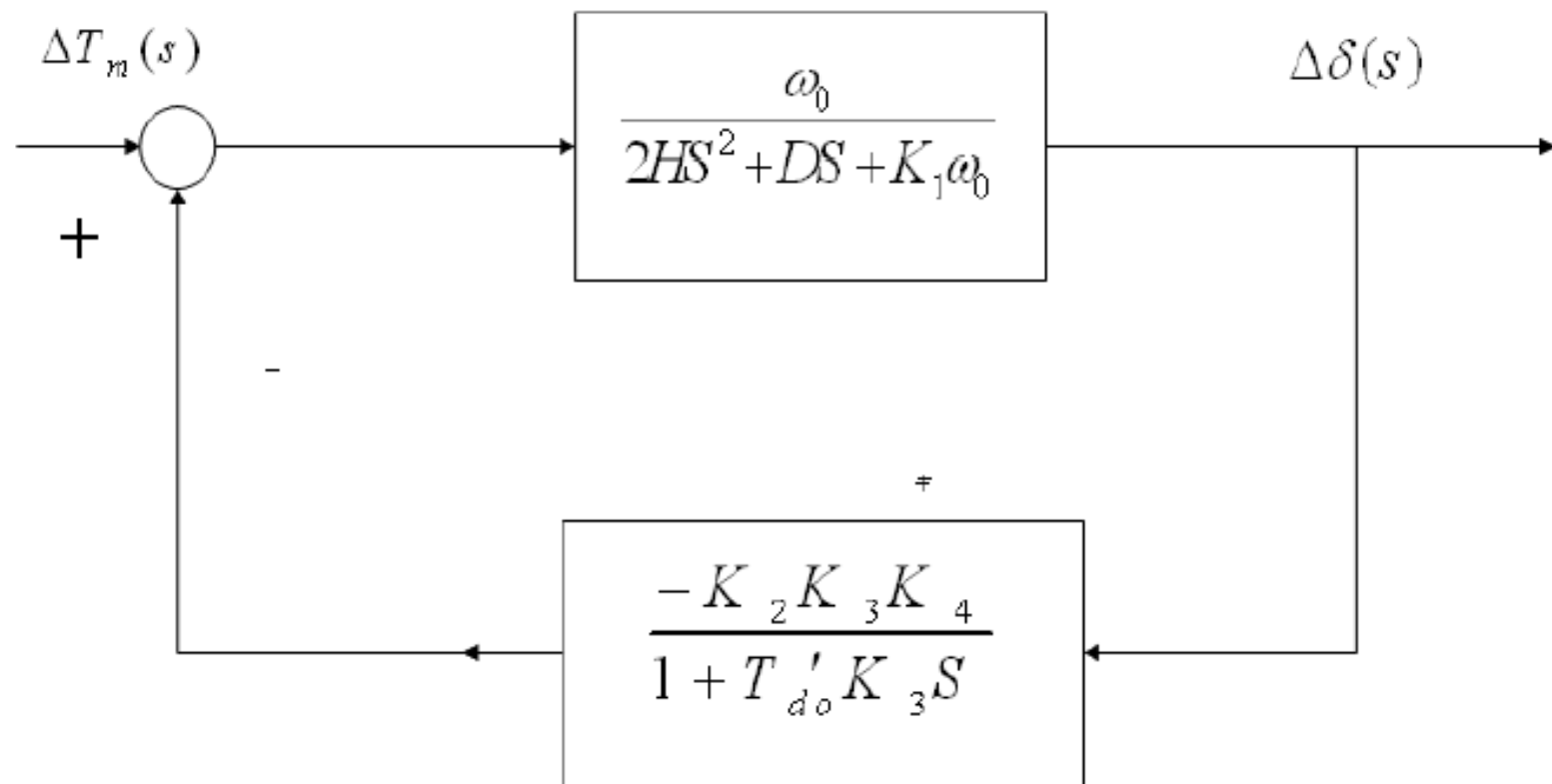


اثر میدان تحریک بر روی نوسانات Lfo

با اضافه کردن اثر میدان تحریک بر روی بلوک دیاگرام مطرح شده در بخش مکانیکی اعمال گردد شکل زیر حاصل می شود :

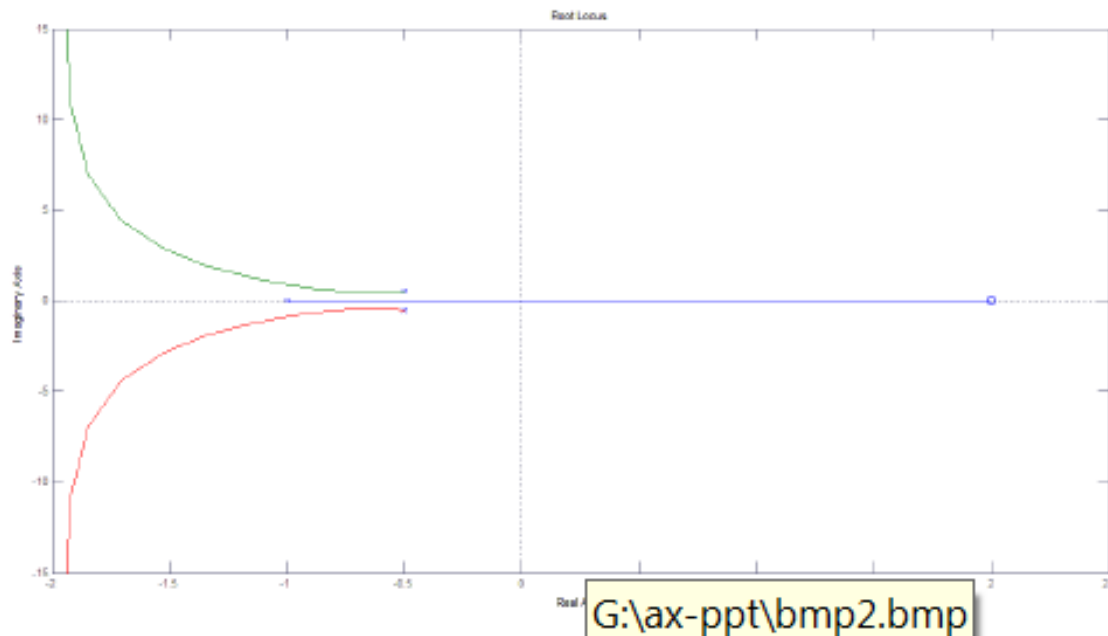


با ساده کردن بلوک دیاگرام فوق داریم (البته اگر $E_{fd}(s)$ لاپلاس تغییرات ولتاژ تحریک صفر فرض شود)

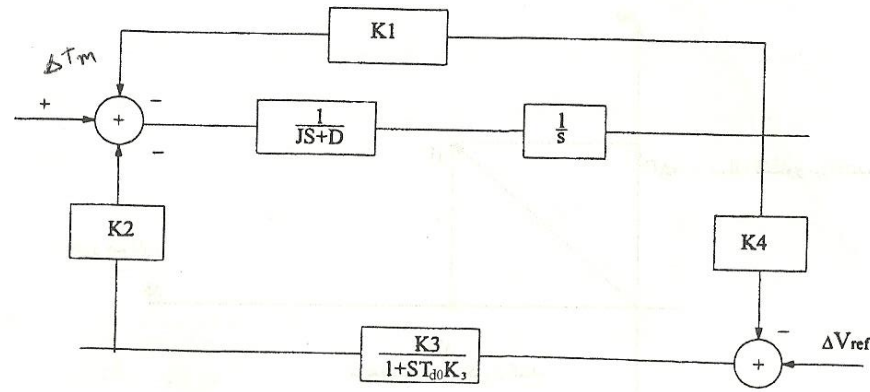


ضریب بهره تابع تبدیل حلقه سیستم را $-K_2K_3K_4$ در نظر می گیریم و آن را K می خوانیم: $K = -K_2K_3K_4$

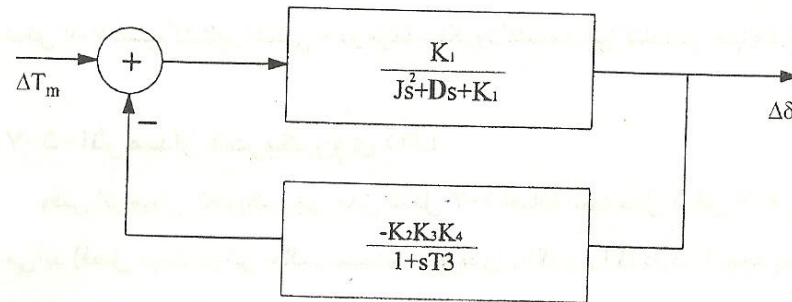
باید توجه داشت که در عمل همواره ضرایب K_4, K_3, K_2 مثبت اند. پس K منفی خواهد بود مکان هندسی ریشه ها را بازای تغییرات منفی K ترسیم می کنیم



اثر میدان تحریک: در کم کردن میزان جهش اولیه و زمان سکون موثر است



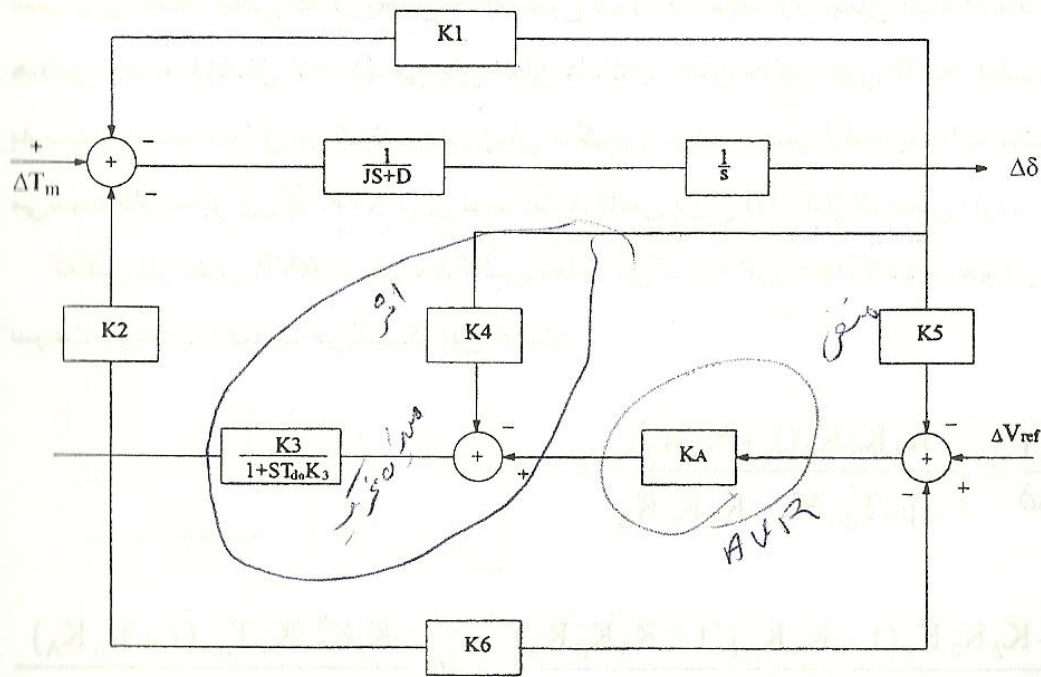
شکل ۸-۷ مدل نوسانات روتور وقتی اثر میدان تحریک در نظر گرفته شود



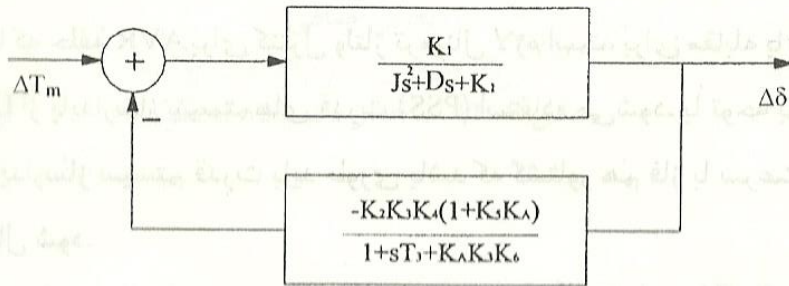
شکل ۹-۷ بلوک دیاگرام ساده شده شکل ۸-۷



اثر AVR (منفی)



شکل ۷-۱۱ بلوک دیاگرام نوسانات روتور وقتی اثر میدان تحریک و AVR در نظر گرفته شوند



شکل ۷-۱۲ بلوک دیاگرام ساده شده شکل ۷-۱۱

مراحل طراحی

۱- مدل هفرون - فیلیپس برای ژنراتور به دست می آید (عوامل مدل محاسبه می شوند).

۲- تابع تبدیل نقطه ۲ و ۳ به دست می آید و $G(s)$ نامیده می شود.

۳- مقدار $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{J}}$ محاسبه می شود.

۴- مقدار زاویه $\angle G(j\omega_n)$ محاسبه می شود.

۵- PSS (تابع تبدیل بین ۱ و ۲) طوری طراحی می شود که در فرکانس ω_n مقدار

$\angle G(j\omega_n)$ را جبران نماید، به طوریکه بین نقاط ۱ و ۳ هیچ اختلاف فازی نباشد.

۶- K_{PSS} طراحی می شود.

معادلات حرکت (مروری بر مکانیزم حرکت)

چرخش			حرکت خطی		
واحد MKS	نشانه و یا معادله	کمیت	واحد MKS	نشانه و یا معادله	کمیت
رادیان (rad)	θ	جابجایی زاویه ای	متر (m)	s	طول
kg.m^2	$J = \int r^2 dm$	گشتاور لختی	کیلوگرم (kg)	M	جرم
rad/s	$\omega = d\theta/dt$	سرعت زاویه ای	متر بر ثانیه (m/s)	$v = ds/dt$	سرعت
rad/s^2	$\alpha = d\omega/dt$	شتاب زاویه ای	m/s^2	$a = dv/dt$	شتاب
rad/s^2	$T = J\alpha$	گشتاور	نیوتن (N)	$a = dv/dt$ m.s ⁻²	نیرو
J, or W.s	$W = \int Tdq$	کار	ژول (J)	$W = \int Fds$	کار
W	$p = dW/dt$ $= T\omega$	توان	وات (W)	$p = dW/dt$ $= Fv$	توان

معادله نوسان

$$T_a = T_m - T_e \quad (195-3)$$

T_a : گشتاور شتاب دهنده بر حسب نیوتن متر؛

T_m : گشتاور مکانیکی بر حسب نیوتن متر؛

T_e : گشتاور الکترو مغناطیسی بر حسب نیوتن متر؛

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (196-3)$$

J : گشتاور لختی ترکیبی ژنراتور و توربین بر حسب kg.m^2 ؛

ω_m : سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه؛

t : زمان بر حسب ثانیه؛

معادله فوق را می‌توان بر حسب ثابت لختی H در مبنای واحد، نرمالیزه کرد. H طبق تعریف برابر با انرژی جنبشی بر حسب وات - ثانیه در سرعت نامی، تقسیم بر ولت آمپر پایه است. اگر سرعت زاویه‌ای نامی را بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه با ω_{m0} نشان دهیم، ثابت لختی برابر است با:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{m0}^2}{VA_{base}} \quad (197-3)$$

گشتاور لختی J بر حسب H برابر است با:

$$J = \frac{\gamma H}{\omega_{\cdot m}^2} V A_{\text{base}}$$

و با جایگزینی آن در معادله ۳-۱۹۶ داریم:

$$\frac{\gamma H}{\omega_{\cdot m}^2} V A_{\text{base}} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e$$

که در نتیجه:

$$\gamma H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{\cdot m}} \right) = \frac{T_m - T_e}{V A_{\text{base}} / \omega_{\cdot m}}$$

$$\gamma H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e$$

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{\cdot m}} = \frac{\omega_r / p_f}{\omega_{\cdot} / p_f} = \frac{\omega_r}{\omega_{\cdot}}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_s = \Delta\omega_r \quad (200-3)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} \quad (201-3)$$

$$= \omega_s \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_s \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt}$$

بنی $d\bar{\omega}_r/dt$ از معادله فوق در معادله ۱۹۸-۲ خواهیم داشت:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (202)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - K_D \Delta\bar{\omega}_r \quad (203)$$

۲۰۰-۳ داریم:

$$\Delta\bar{\omega}_r = \frac{\Delta\omega_r}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \frac{d\delta}{dt}$$

با در نظر گرفتن اصطکال

۳-۹-۴ محاسبه ثابت لختی

طبق تعریف در بخش ۳-۹-۲، ثابت لختی برابر است با:

$$H = \frac{\text{انرژی ذخیره شده در سرعت نامی بر حسب مگاوات - ثانیه}}{\text{مگاوات آمپرنامی}}$$

محاسبه H در سیستم MKS با استفاده از گشتاور لختی

انرژی جنبشی = انرژی ذخیره شده

$$= \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad \text{W.s}$$

$$= \frac{1}{2} J \omega_m^2 \times 10^{-6} \quad \text{MW.s}$$

که:

H	نوع واحد تولیدی
۲/۵ به ۶/۰	واحد حرارتی (الف) ۳۶۰۰ r/min (دوقطبه)
۴/۰ به ۱۰/۰	(ب) ۱۸۰۰ r/min (چهارقطبه)
۲/۰ به ۴/۰	واحد آبی

دینامیک بلند مدت

- پدیده هایی که بعد از چند ثانیه اول اتفاق می افتد
- ۱- فروپاشی فرکانس frequency collaps
- ۲- فروپاشی ولتاژ voltage collaps
- ۳- عکس العمل سیستمهای تامین کننده انرژی
- ۴- عملکرد رله ها پس از اغتشاشات شدید
- ۵- محدودیت ها (نرخ تغییرات توان حقیقی)

مدل اجزا در مظالمات بلند مدت

- باید مدل های اجزای مختلف را به صورت غیر خطی در نظر گرفت

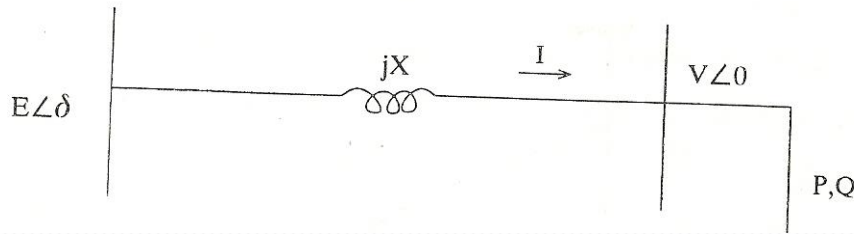
ناپایداری و فروپاشی ولتاژ

- پایداری ولتاژ یعنی توانایی سیستم قدرت در نگهداری ولتاژ در نقاط مختلف شبکه در محدوده قابل قبول
- عامل اصلی ناپایداری ولتاژ: ناتوانی سیستم قدرت در مقابل تامین توان راکتیو است.

انواع ناپایداری و لتاژ

- اغتشاش کوچک (از مدل خطی استفاده می شود)
- اغتشاش بزرگ (از مدل غیر خطی استفاده می شود)
- روش ۲
- کوتاه مدت (۰ تا ۱۰)
- میان مدت (۲ الی ۳)
- بلند مدت (بیش از چند دقیقه)

منحنی p-v , q-v



شکل ۱۱-۴:

$$I = \frac{E\angle\delta - V}{jX} = \frac{E\cos\delta + jE\sin\delta - V}{jX}$$

$$S = P + jQ = V \cdot I^* = V \cdot \left(\frac{E\cos\delta + jE\sin\delta - V}{jX} \right)^* = \frac{EV\sin\delta}{X} + j \frac{EV\cos\delta - V^2}{X}$$

$$\Rightarrow P = \frac{EV\sin\delta}{X} \quad Q = \frac{EV\cos\delta - V^2}{X} \quad (1-11)$$

$$\sqrt{v^2 - v^2 \cos^2\delta} = \sqrt{v^2 - (q + v^2)^2}$$

$$p = \frac{P \cdot X}{E^2}$$

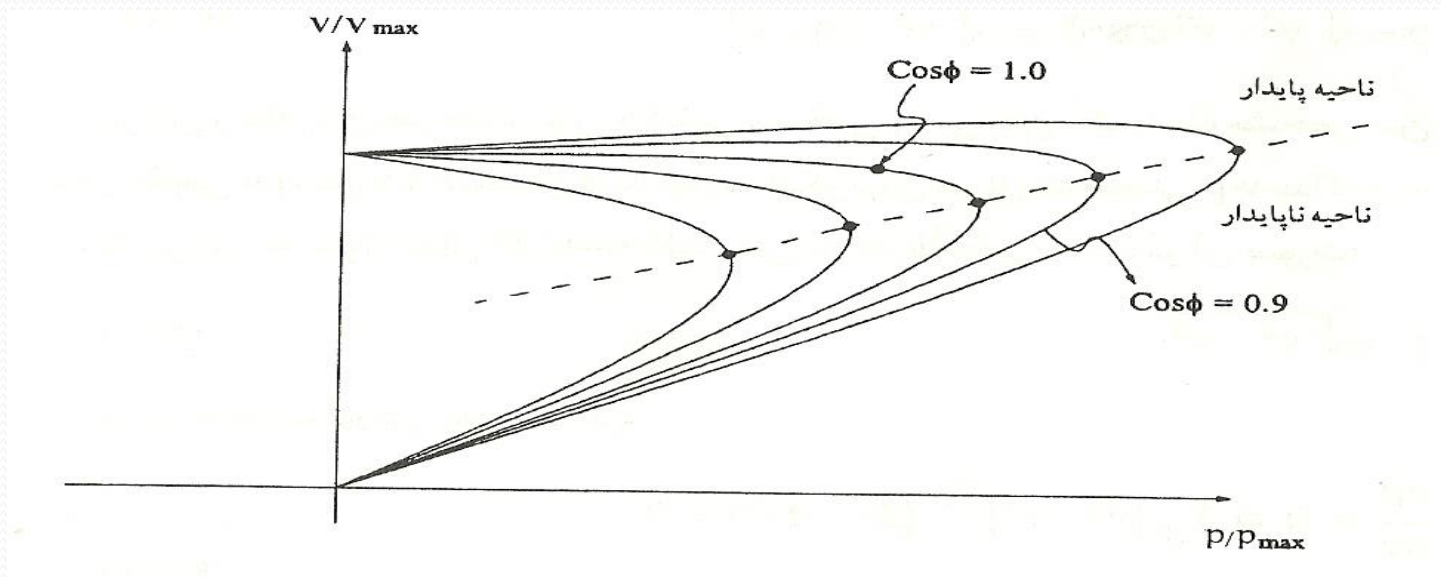
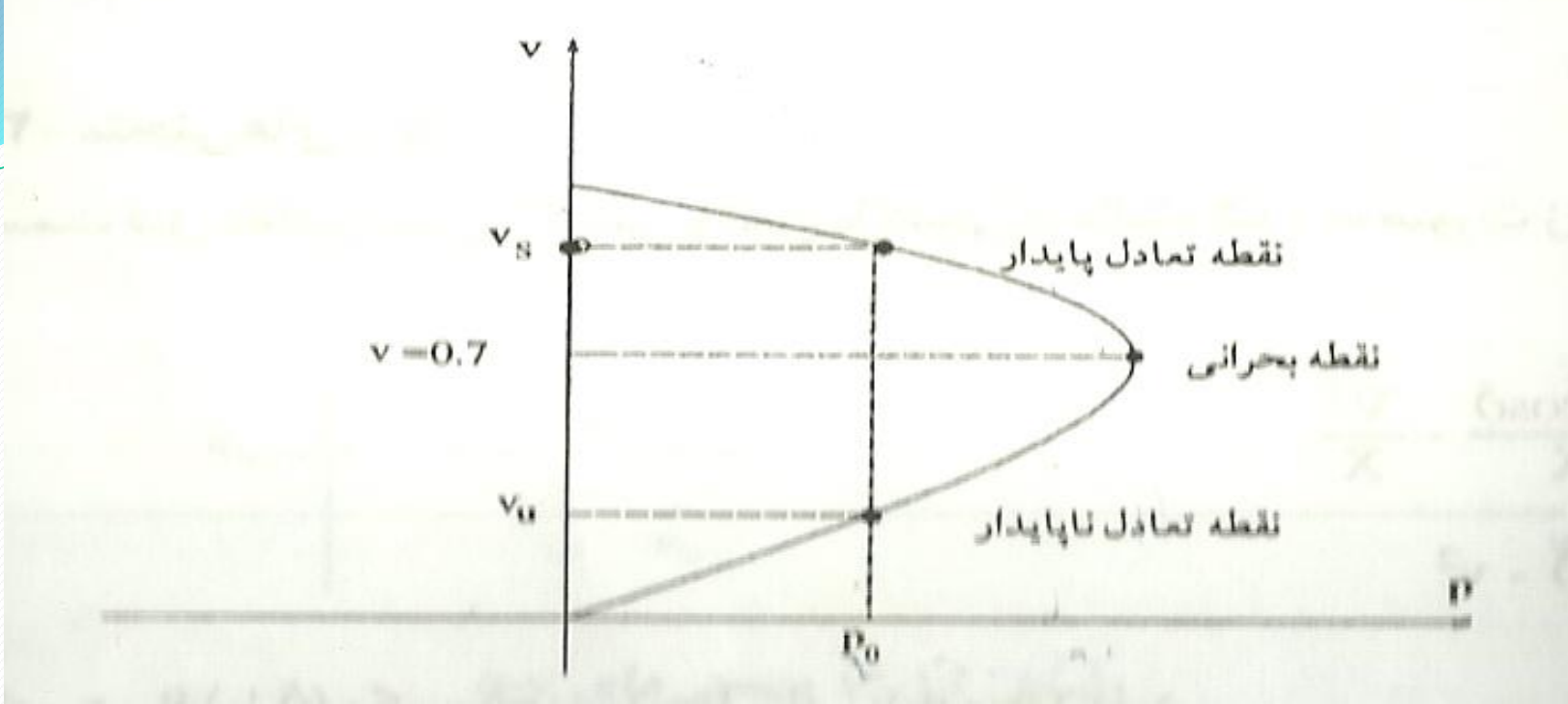
$$q = \frac{Q \cdot X}{E^2}$$

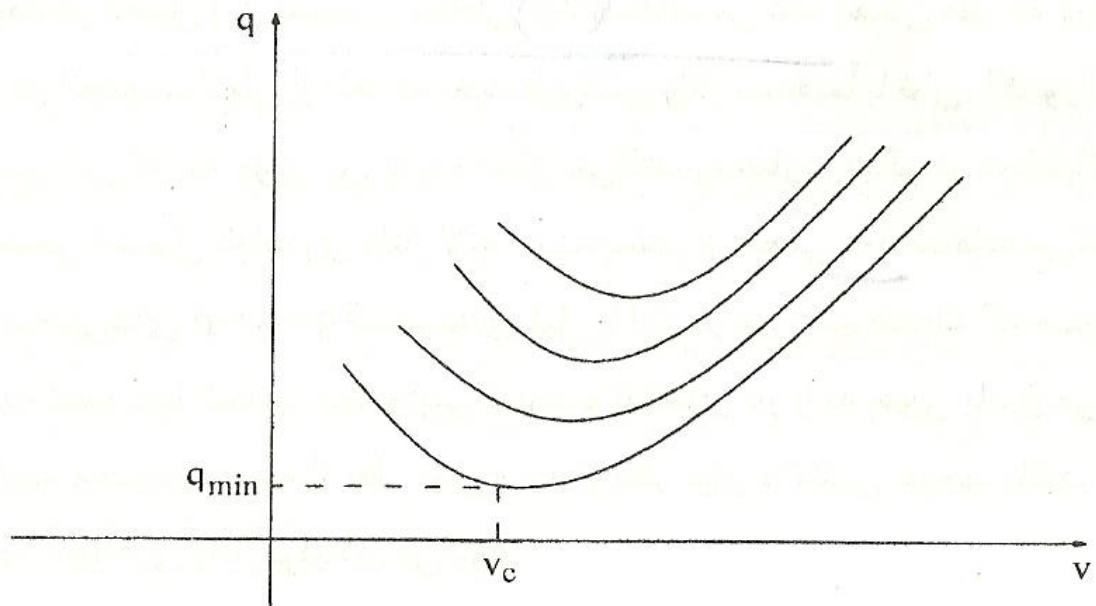
$$v = \frac{V}{E}$$

$$\begin{cases} p = v \sin\delta \\ q = v \cos\delta - v^2 \end{cases}$$

$$0 \Rightarrow 1/2 (v^2 - v^4)^{-1/2} (2v - 4v^3) = 0$$

$$v = 1 \Rightarrow v = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} = \pm 0.7$$





معيار توان واکنشی

$$I = Y \cdot V$$

$$S = V \cdot I^* = P(v, \delta) + Q(v, \delta)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\delta} & J_{pv} \\ J_{Q\delta} & J_{Qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$J_{p\delta} \Delta \delta + J_{pv} \Delta V = 0 \Rightarrow \Delta \delta = -J_{p\delta}^{-1} \cdot J_{pv} \cdot \Delta V$$

$$J_{Q\delta} \Delta \delta + J_{Qv} \Delta V = \Delta Q \Rightarrow \Delta Q = \begin{bmatrix} -J_{Q\delta} \cdot J_{p\delta}^{-1} & J_{pv} + J_{Qv} \end{bmatrix} \Delta V$$

$$J_R \triangleq -J_{Q\delta} \cdot J_{p\delta}^{-1} \quad J_{pv} + J_{Qv}$$

$$\Delta Q = J_R \Delta V$$

کنترل توان اکتیو و فرکانس

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega$$

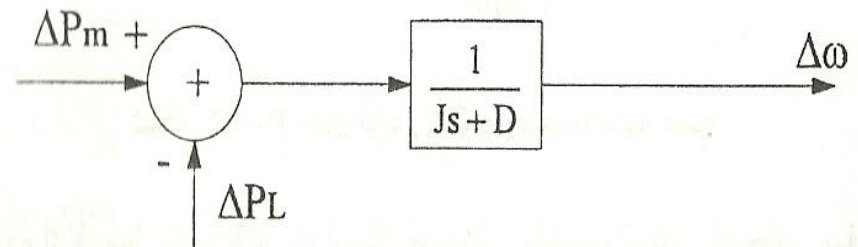
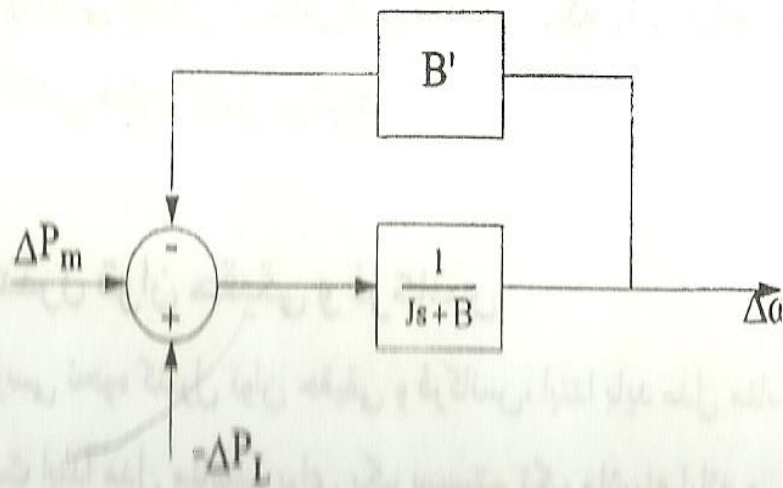
$$\Delta P_e = \Delta P_L + B' \Delta \omega$$

$$\Delta T_m - \Delta T_e = J \cdot \frac{d}{dt} \Delta \omega + B \cdot \Delta \omega$$

$$\Delta P_m - \Delta P_e = J \cdot \frac{d}{dt} \Delta \omega + B \cdot \Delta \omega$$

$$T(S) = \frac{1}{Js + B} \cdot \frac{1}{1 + \frac{B'}{Js + B}} = \frac{1}{Js + B + B'} = \frac{1}{Js + D}$$

$$D \triangleq B + B'$$



واحدهای همپا

- واحدهایی که به دنبال اغتشاش نوسان فرکانسی شبیه به هم دارند

$$J_{eq} = \sum_{i=1}^n J_i$$

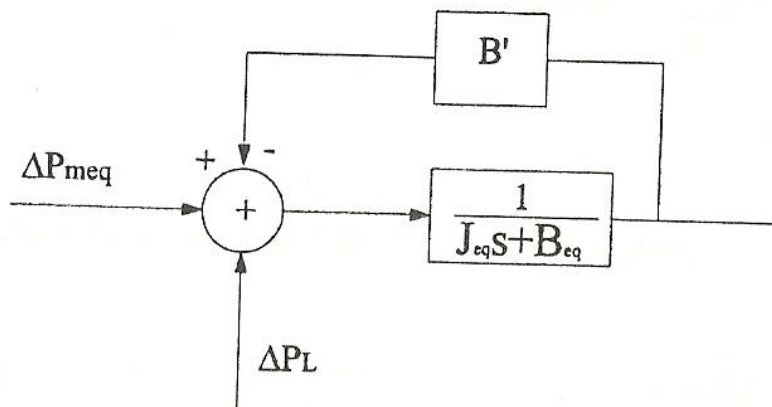
$$B_{eq} = \sum_{i=1}^n B_i$$

$$\Delta P_{eeq} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ei}$$

$$\Delta P_{meq} = \sum_{i=1}^n P_{mi}$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \cdot \omega_0^2}{V A_{base}} \quad (\text{ثابت لختی})$$

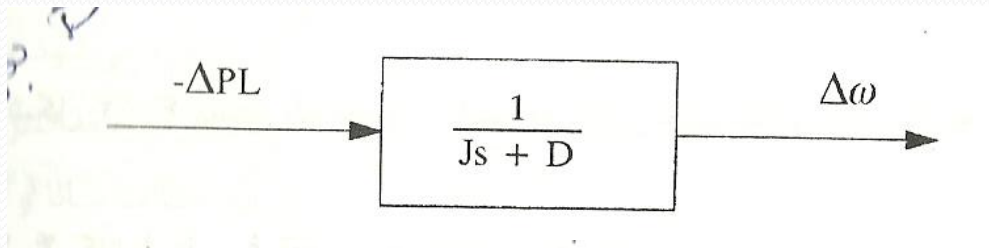
$$H = \frac{J}{2} \Rightarrow J = 2H$$



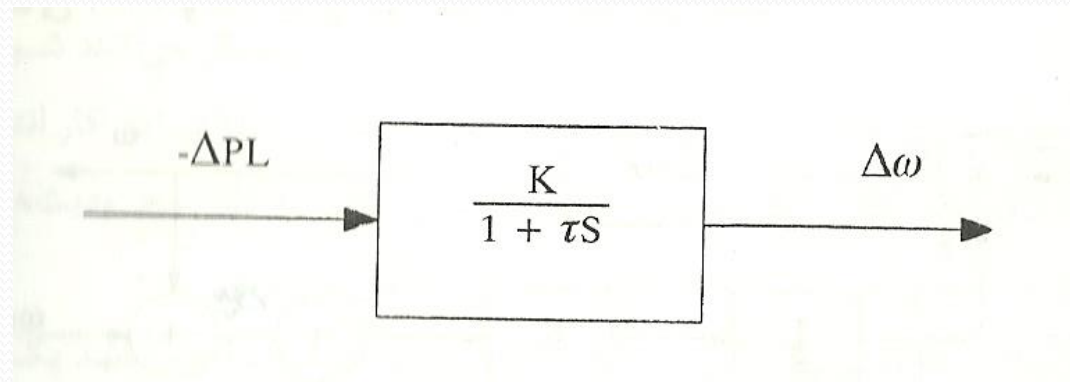
$$H_{eq} = \frac{\sum_i H_i \cdot V A_{basei}}{\sum_i V A_{basei}}$$

تغییرات فرکانس در اثر تغییری بار

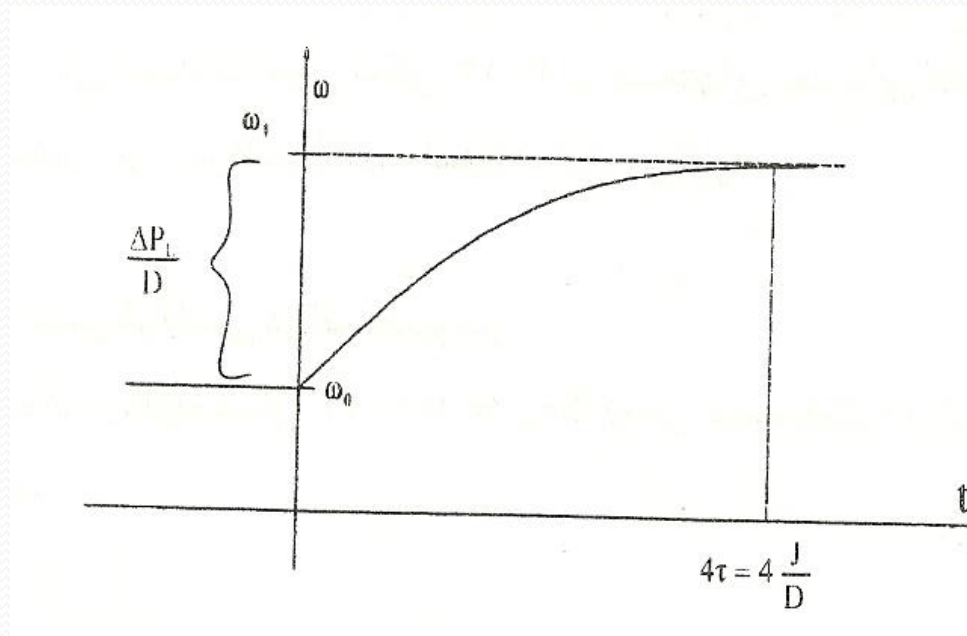
- اگر در بلوک دیاگرام pm برابر صفر باشد



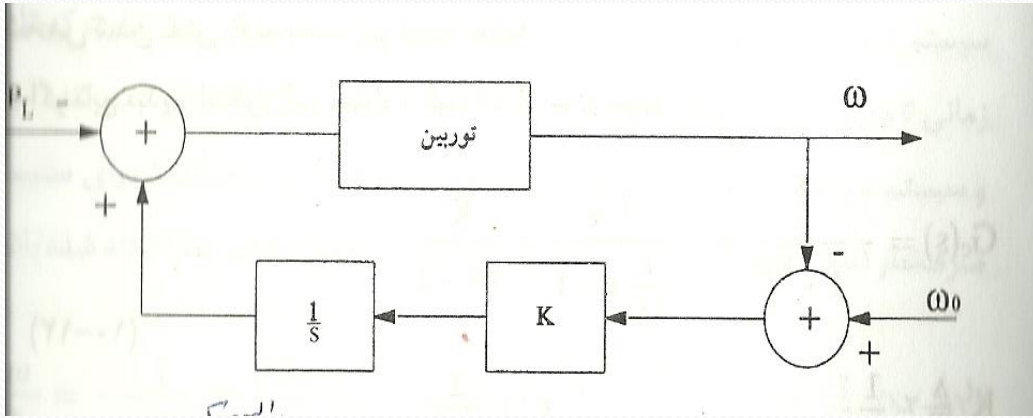
$$\tau = \frac{J}{D} \text{ و } K = \frac{1}{D}$$



پاسخ پله به سیستم درجه ۱

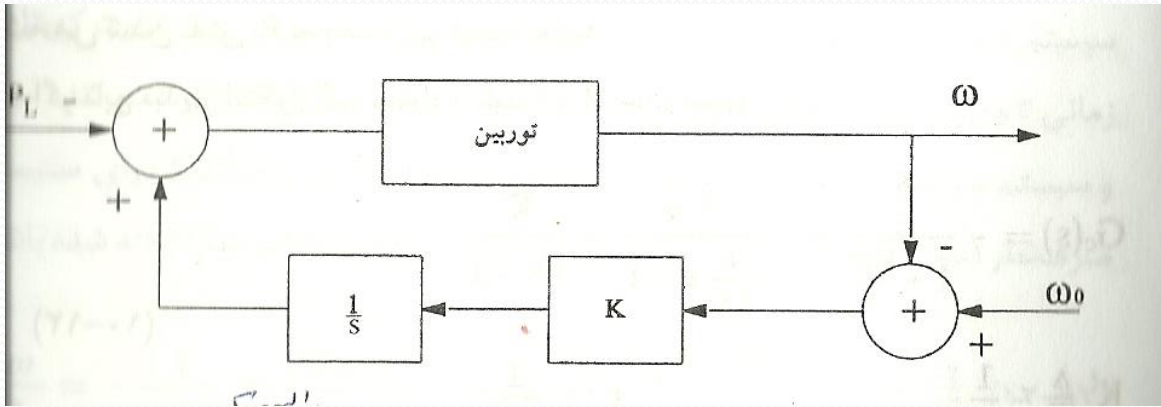


-LOAD FREQUENCY CONTROL(LFC)



1-ISOCHRONOUS ●

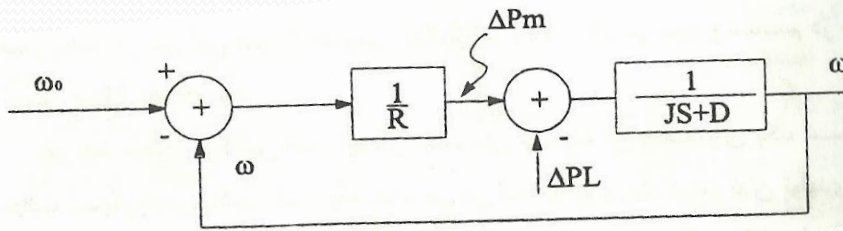
2-DROP ●



تابع تبدیلی انتی گرال گیری همراه با فیدبک

$$G_c(s) = - \frac{\frac{K}{s}}{1 + \frac{RK}{s}} = - \frac{1/R}{\frac{1}{RK} s + 1} = \frac{K'}{\tau' s + 1}$$

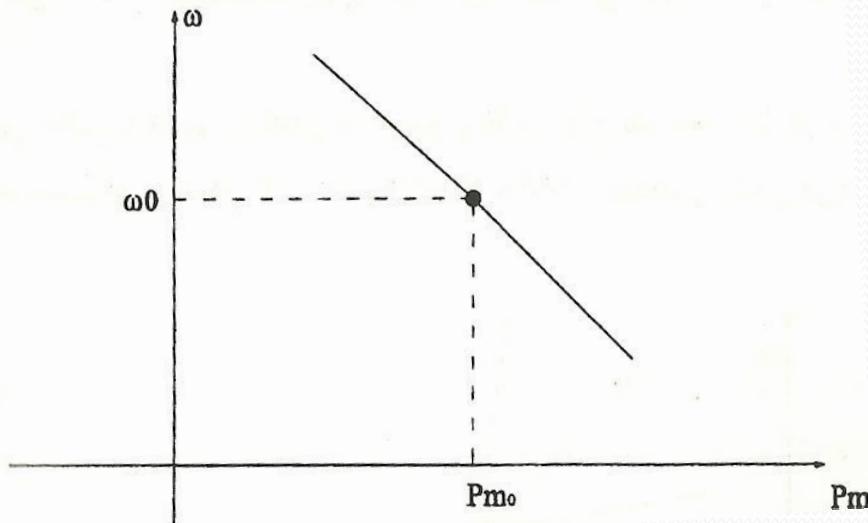
$$K' \triangleq - \frac{1}{R} \qquad \tau' = \frac{1}{RK}$$



$$\frac{\Delta \omega}{\Delta P_m} = T(s) = \frac{\frac{1}{Js + D}}{1 + \frac{1/R}{Js + D}} = \frac{1}{Js + D + 1/R}$$

اگر از حالت گذرا صرفنظر شود

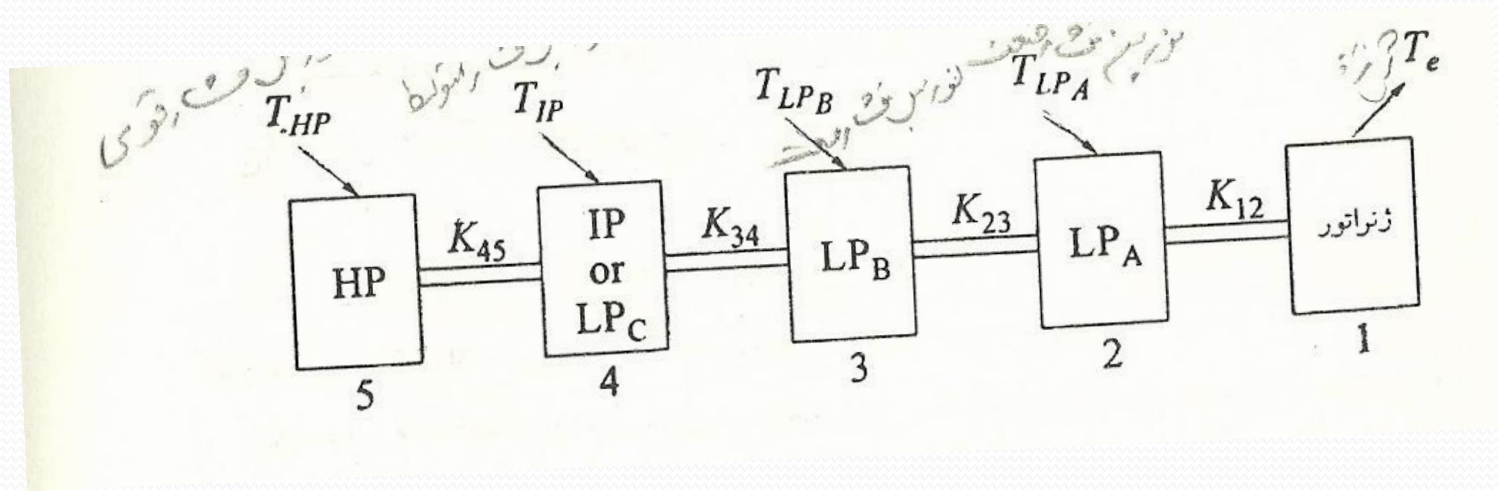
$$\frac{\Delta\omega}{\Delta P_m} = -\frac{1}{D + \frac{1}{R}} \Rightarrow \frac{\Delta P_m}{\Delta\omega} = -(D + \frac{1}{R}) \approx -\frac{1}{R} \Rightarrow \frac{P_m - P_{m_0}}{\omega - \omega_0} \approx \frac{-1}{R} \quad (۱۲-۱۲)$$



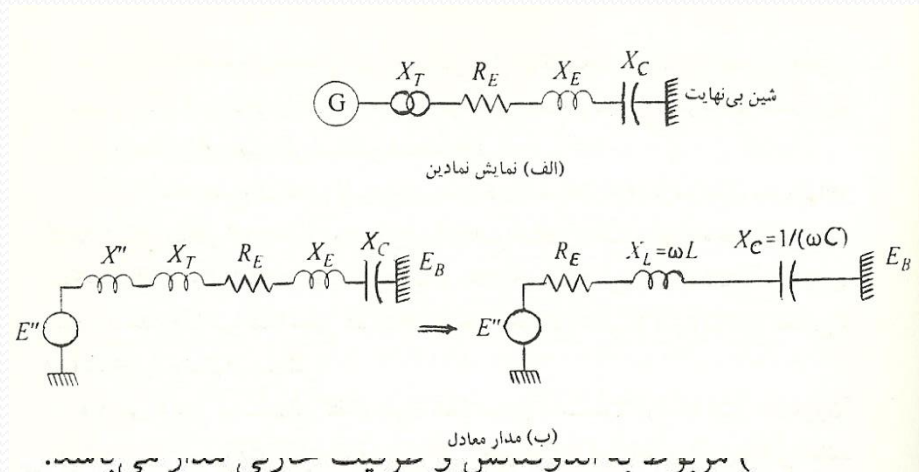
$$R = \frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_0} \times 100\% \text{ درصد}$$

کنترل توان راکتیو

SSR



تداخل نوسان پی‌چشی با خازن سری

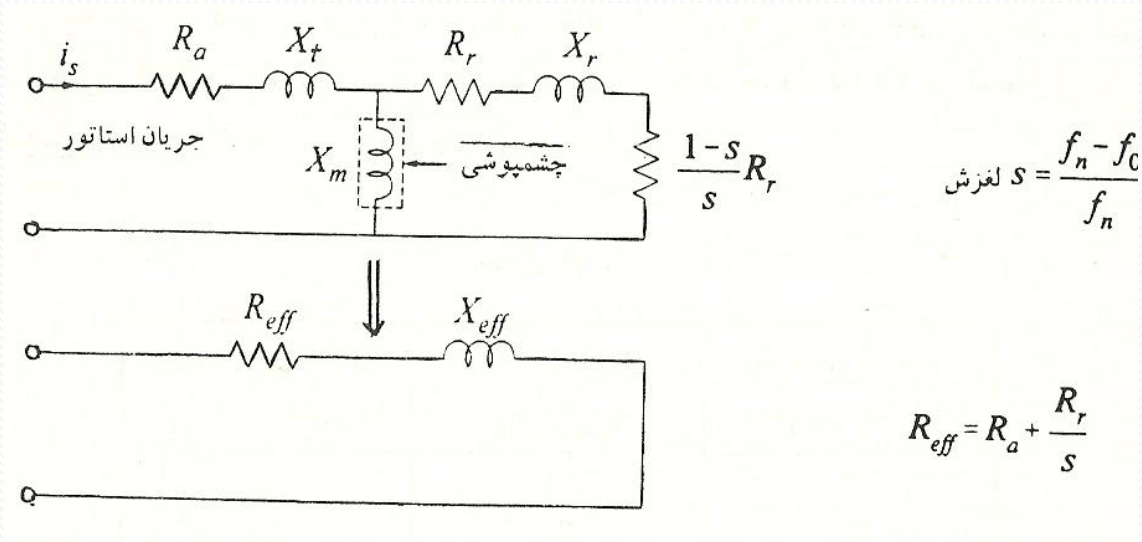


$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0 L)(\omega_0 C)}} = \omega_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

$$f_n = f_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \text{ هرتز}$$

فرکانس لغزشی (هرتز) $60 - f_n$	فرکانس طبیعی (هرتز) f_n	درصد جبران سازی $(X_C/X_L) \times 100$ (%)
42	60 ← 18	10
30	30	25
27/4	32/6	30
22	38	40
17/6	42/4	50

اثر خود تحریکی از ژنراتور القای



روش های تحلیلی

- تحلیل مقادیر ویژه
- مرور فرکانسی
- پاسخ فرکانسی سیستم کامل
- تحلیل حوزه زمان
- تحلیل حوزه فرکانسی

روشهای مواجهه با SSR

- ساخت فیلتر
- کنترل توان راکتیو
- استفاده از HVDC
- در نظر گرفتن نوسانات در هنگام طراحی PSS

الف) فیلتر استاتیکی؛ این فیلتر می‌تواند به صورت یک فیلتر بلوکه کننده (نوع تشدید - موازی) سری با ژنراتور، یا مدارهای میراکننده موازی با خازنهای سری باشد.

ب) فیلتر دینامیکی؛ این فیلتر یک وسیله فعال است که به طور سری با ژنراتور قرار داده می‌شود و سیگنال حاصل از حرکت موتور را گرفته، ولتاژی با فاز مخالف تولید می‌کند، به طوری که ولتاژ زیر سنکرون تولید شده در آرمیچر را جبران نماید یا حتی ممکن است از آن نیز بیشتر باشد.

ج) پایدارساز دینامیکی؛ این وسیله از راکتورهای شنت مدوله شده تریستوری تشکیل شده که به پایانه ژنراتور متصل می‌باشد. کنترل نوسانات زیرسنکرون به کمک مدولاسیون زوایای آتش کلیدزنی تریستور (با استفاده از سیگنالهای حاصل از سرعت محور ژنراتور)، انجام می‌پذیرد.

د) میراکننده سیستم تحریک؛ کنترل تحریک ژنراتور با استفاده از سیگنال حاصل از سرعت محور به گونه‌ای مدوله می‌شود که میرایی نوسانهای پیچشی را افزایش دهد.

ه) رله‌های حفاظتی؛ حالت SSR به کمک رله آشکار می‌شود و واحدهای متأثر عمل می‌کنند. رله ممکن است شکل‌های مختلفی مانند آشکارسازی حرکت پیچشی زیادی به وسیله