

بنام خدا

مبحث شانزدهم

ماشینهای الکتریکی

III ماشینهای الکتریکی

بررسی پایداری ماشین سنکرون

بررسی پایداری ماشین سنکرون

← منظور از پایداری حالتی است که ورودیها و خروجیهای ماشین متعادل بوده و ماشین بطور عادی در حال کار است. یعنی در حالت پایدار معادله زیر باید برقرار باشد :

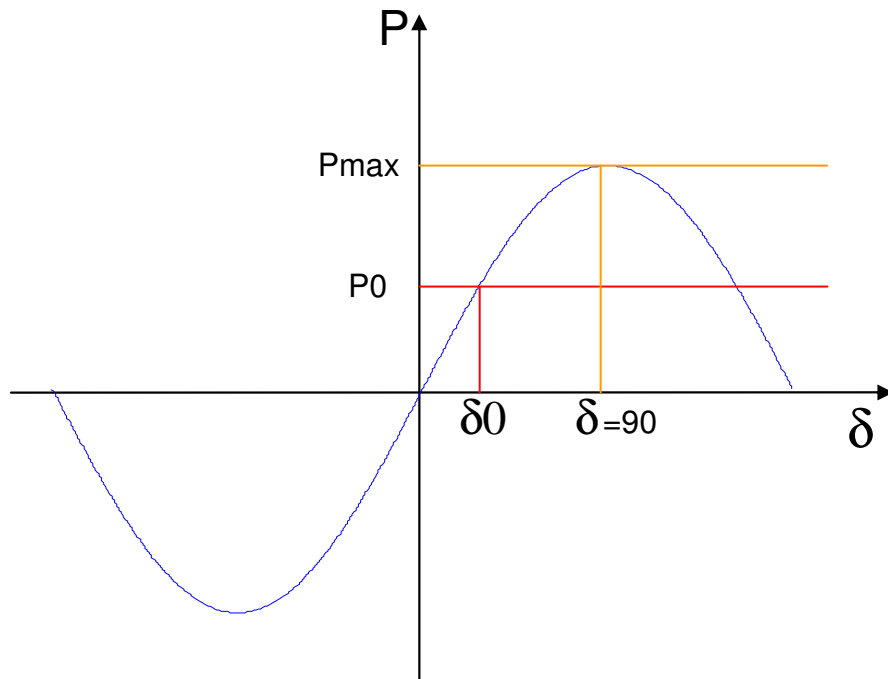
$$P_m - P_l = 0$$

پایداری حالت دایم (استاتیک)

دو نوع پایداری برای ماشین
سنکرون تعریف می شود

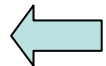
پایداری گذرا (دینامیک)

پایداری حالت دایم (استاتیک ، مانا)

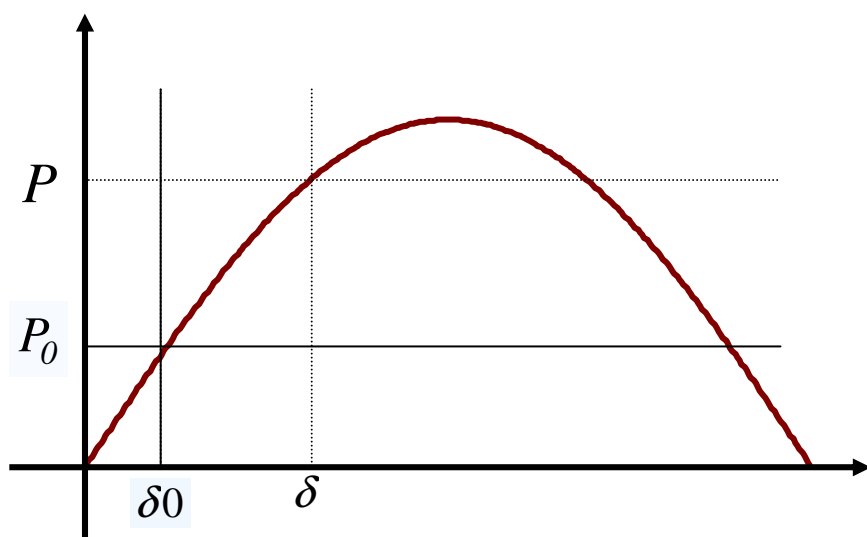


فرض کنیم ماشین با توان اولیه P_0 و زاویه δ_0 مشغول به کار است . اگر بار روی ماشین به آرامی افزایش پیدا کند ، δ زیاد می شود و توان مکانیکی مورد نیاز بار تامین می شود . اگر این فرایند ادامه یابد تا $\delta = 90$ ، از آن به بعد دیگر با تغییر δ ، توان مکانیکی خروجی موتور بیشتر نخواهد شد و در صورت افزایش بار موتور زیر بار خواهد ایستاد . بنا بر این $\delta = 90$ (در موتور قطب صاف) حد پایداری استاتیک می باشد .

نکته مهمی که در پایداری استاتیک مطرح است ، آنستکه در اینجا تغییرات بار آرام می باشد .



پایداری حالت دایم (استاتیک ، مانا)



در پایداری دینامیکی علاوه بر میزان تغییر بار ،
سرعت تغییر بار نیز مطرح است. برای روشن
شدن مطلب شکل روبرو را ملاحظه کنید :

اگر توان بار به آرامی از P_0 به P افزایش یابد ،
زاویه ماشین از δ_0 به δ می رود . اما اگر تغییر
توان ماشین از P_0 به P ناگهانی و بصورت
پله ای باشد ، آیا باز هم ماشین پایدار خواهد ماند
و قادر به تامین توان جدید خواهد بود ؟

ملاحظه شده که در تغییر پله ای بار ، حالت ماشین حول نقطه کار نهائی نوسان کرده تا در نهایت
بوسیله عوامل میرا کننده در نقطه کار نهائی مقیم شود . در شرایط خاص این نوسانات ممکن است
باعث ناپایداری ماشین شود که در بحث پایداری دینامیکی به این موضوع پرداخته می شود .

ادامه بحث پایداری دینامیکی

پیش از ارائه روابطی در این باره باید به دو نکته اشاره کرد :

اول در نظر گرفتن اثر میرائی های موجود در سیستم (اصطکاک و بادخوری) به چند روش ممکن است:

1 آنها را بطور دقیق در روابط وارد کنیم

2 از داخل کردن آنها در روابط پرهیز کرده ولی در تفسیر نتایج، اثر آنها را در نظر بگیریم

(در اینجا برای سادگی بیان مطلب از روش سوم بهره گرفته ایم .)

دوم در بررسی پایداری دینامیکی این مساله مهم است که میزان تغییر ایجاد شده کوچک است یا بزرگ . در مورد تغییرات کوچک می توانیم از روش خطی سازی و سیگنال کوچک به بررسی مساله پردازیم در حالی که در تغییرات بزرگ باید پاسخ معادلات حاکم را به روشی بطور دقیق بدست آوریم .

ابتدا روش سیگنال کوچک بیان شده آنگاه در باب روش دوم مطالبی ارائه می گردد .

بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک

$$\sum_j T_j = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

معادله مکانیکی حاکم بر ماشین چنین می باشد:

که در اینجا J ممان اینرسی و B ضریب اصطکاک می باشد

گفتیم که ما در اینجا اثر اصطکاک را در تفسیر نتایج استفاده می کنیم و در روابط از آن صرف نظر می کنیم در نتیجه معادله ۱ به شکل زیر در می آید :

$$T_i - T_m = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

محرك

مقاوم

$$\theta = \omega t + \delta \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \omega + \frac{d\delta}{dt} \Rightarrow \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (3)$$

در ضمن با فرض
ثابت بودن سرعت
داریم :

که در اینجا δ زاویه بار ماشین می باشد .

بررسی پایداری سیستم با وجود تغییرات کوچک

معادله نوسان (swing equation) :

$$\textcircled{2} \textcircled{3} \rightarrow T_i - T_m = J \frac{d^2 \delta}{dt^2} \xrightarrow{\text{ضرب طرفین در } \omega} P_i - P_m = \underbrace{J\omega}_{M} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \textcircled{4}$$

M ، مومنتوم

در مورد موتور سنکرون، با جایگذاری توان محرک و توان مقاوم داریم :

$$P_m = P_{\max} \sin \delta \xrightarrow{\text{جایگذاری}} P_i - P_{\max} \sin \delta = J\omega \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

همانطور که ملاحظه میشود این معادله غیر خطی است

حل سیگنال کوچک معادله نوسان

در حالت پایدار اولیه داریم: $P_i = P_{m0}$ و $P_{m0} = \frac{EV}{X} \sin \delta_0$

بعد از اعمال تغییر داریم: $P_m = P_{m0} + \Delta P_m$ و $\delta = \delta_0 + \Delta \delta$ (5)

(4) $P_i - P_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$ (5) $\Rightarrow P_i - (P_{m0} + \Delta P_m) = M \frac{d^2 (\delta_0 + \Delta \delta)}{dt^2}$

$\Rightarrow \cancel{P_i - P_{m0}} - \Delta P_m = M \cancel{\frac{d^2 \delta_0}{dt^2}} + M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}$

$\Rightarrow -\Delta P_m = M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2}$

$\Rightarrow M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \Delta P_m = 0$ (6)

در این مرحله ΔP_m را هم بر حسب $\Delta \delta$ می نویسیم

حل سیگنال کوچک معادله نوسان (ادامه)

$$P_m = \frac{EV}{X} \sin \delta$$

$$\Rightarrow P_{m0} + \Delta P_m = \frac{EV}{X} \sin(\delta_0 + \Delta\delta) = \frac{EV}{X} \sin \delta_0 + \underbrace{\frac{EV}{X} \times \frac{d \sin \delta}{dt} \bigg|_{\delta_0}}_{P_{\max}} \Delta\delta$$

$$\Rightarrow \Delta P_m = \frac{EV}{X} \cos \delta_0 \Delta\delta = P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta \quad (7)$$

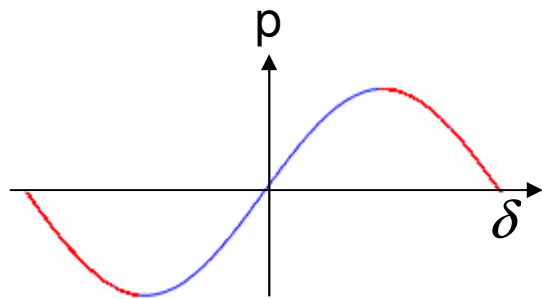
$$\textcircled{6} \textcircled{7} \rightarrow M \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + P_{\max} \cos \delta_0 \Delta\delta = 0$$

در حوزه لاپلاس $\Rightarrow (MS^2 + P_{\max} \cos \delta_0) \Delta\delta = 0 \Rightarrow S = \pm \sqrt{\frac{-P_{\max} \cos \delta_0}{M}}$

حل سیگنال کوچک معادله نوسان (ادامه)

$$S = \pm \sqrt{\frac{-P_{\max} \cos \delta_0}{M}}$$

تعبیر عبارت روبرو :



این رابطه می گوید اگر $P_{\max} \cos \delta_0$ منفی باشد مشخصه سیستم دارای دو ریشه حقیقی است ، یکی مثبت دیگری منفی ، که ریشه مثبت باعث ناپایداری ماشین می شود . این نواحی در شکل روبرو با رنگ قرمز نشان داده شده اند .

اگر $P_{\max} \cos \delta_0$ مثبت باشد مشخصه سیستم دارای دو ریشه موهومی است و در اثر بروز یک تغییر ماشین شروع به نوسان می کند که اگر اثر میرائی های موجود را در نظر بگیریم می توانیم بگوئیم که نوسانات بعد از مدتی میرا شده و سیستم به پایداری میرسد .

بررسی پایداری دینامیکی ماشین سنکرون در حضور تغییرات بزرگ (معیار سطوح برابر)

گفتیم که در این حالت باید معادله نوسان را بطور دقیق حل کنیم که این کار دارای پیچیدگی نسبتاً زیادی است. برای حل این مشکل روشی را ارائه می دهیم که با کمک آن بدون حل معادله نوسان بتوانیم یک برآورد کلی راجع به پایدار بودن یا نبودن سیستم تحت بررسی به عمل آوریم.

$$4 \Rightarrow P_i - P_m = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

ضرب طرفین در $2d\delta/dt$ و گرفتن انتگرال

$$\int \frac{2d\delta}{dt} (P_i - P_m) dt = \int \left(M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) \frac{2d\delta}{dt} dt$$

$$\Rightarrow \frac{2}{M} \int (P_i - P_m) d\delta = \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \quad 8$$

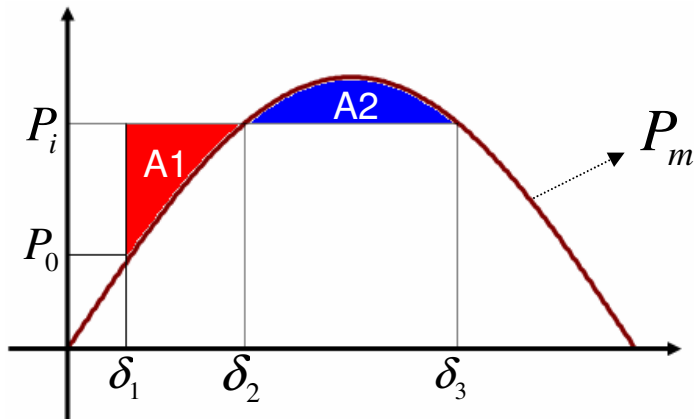
معيار سطوح برابر(ادامه)

ممکنست ماشین چند بار نوسان کند بنا براین $d\delta$ چند بار در بازه δ_1 و δ_2 رفت و برگشت خواهد داشت . اما می توان ثابت کرد که اگر برای اولین نوسان انتگرال فوق برقرار باشد برای نوسانات بعدی هم برقرار خواهد بود لذا ما فقط یک حرکت رفت (از تعداد حرکات رفت و برگشت ممکن) را بررسی می کنیم .

$$(8) \int_{\delta_1}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta = 0$$

معیار سطوح برابر (ادامه)

اما مفهوم این رابطه چیست ؟



$$\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta + \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta = 0 \implies \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta = - \int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_i - P_m) d\delta$$

$$\implies \underbrace{\int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_i - P_m) d\delta}_{\text{A1 area}} = \underbrace{\int_{\delta_2}^{\delta_3} (P_m - P_i) d\delta}_{\text{A2 area}}$$

$A1 = A2 \implies$ پایداری مرزی

$A1 < A2 \implies$ پایداری برقرار می ماند

$A1 > A2 \implies$ سنکرونیزم از دست می رود

مثال



یک موتور سنکرون سه فاز با مشخصات زیر مفروض است :

$$X_d = 0.8 \text{ PU} \quad \text{و} \quad X'_d = 0.3 \text{ PU}$$

جریان تحریک طوری تنظیم شده که $E_f = 1 \text{ PU}$ و سنکرونیزم بین موتور و شبکه بی نهایت برقرار شده است .

الف) حداکثر گشتاوری که می توان به آرامی به موتور اعمال نمود تا موتور از حالت سنکرونیزم خارج نشود چقدر است ؟

ب) حداکثر گشتاوری که می توان بطور ناگهانی به محور موتور اعمال نمود بدون اینکه موتور از حالت سنکرون خارج شود چقدر است ؟ آیا موتور می تواند تحت این بار بماند ؟

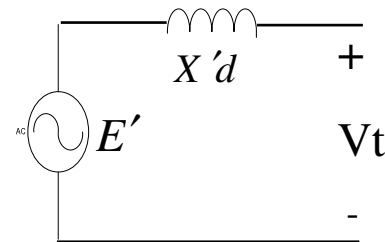
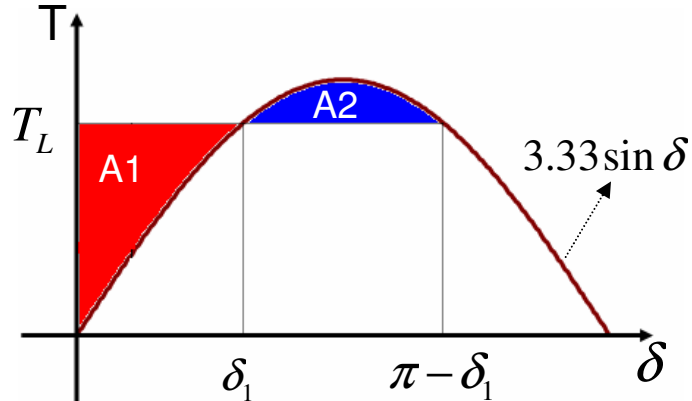


پاسخ

$$\sin \delta = 1 \quad \Rightarrow \quad T = \frac{V_t E_f}{X_d} (PU) = \frac{1}{0.8} = 1.25$$

(الف)

ب) حد اکثر بار قابل اعمال به موتور مربوط به زمانیست که سطح شتاب دهنده و سطح شتاب گیرنده مساوی باشند .



مدار معادل حالت گذرا



پاسخ (ادامه)

$$P = \frac{E'V}{X'd} \sin \delta \Rightarrow T = \frac{E'V}{\omega X'd} \sin \delta$$

$$E' = E - X'dI_a \xrightarrow{I_a=0} E' = E = 1 \text{ PU}$$

$$\Rightarrow T = \frac{1}{1 \times 0.3} \sin \delta = 3.33 \sin \delta$$

δ_l

A2 A1

$$A1 = T_L \delta_l - \int_0^{\delta_l} (3.33 \sin \delta) d\delta = (3.33 \sin \delta_l) \delta_l + 3.33(\cos \delta_l - 1)$$

$$A2 = \int_{\delta_l}^{\pi - \delta_l} (3.33 \sin \delta) d\delta - T_L (\pi - 2\delta_l) = (6.66 \cos \delta_l) - (3.33 \sin)(\pi - 2\delta_l)$$



پاسخ (ادامه)

$$A_1=A_2 \Rightarrow \delta_1 = 46.5 \Rightarrow T_L = 3.33 \sin \delta_1 = 2.42(pu)$$

موتور نمی تواند تحت این بار به کار خود ادامه دهد چرا که این بار فراتر از حد پایداری
استاتیکی ماشین می باشد