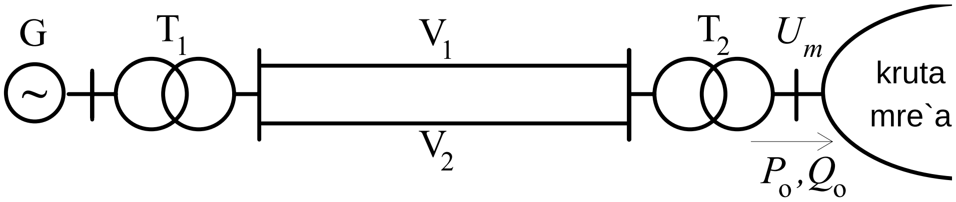
Забелешка: Доколку проблемот го решивме со занемарување на попречните гранки, за коефициентот на статичка резерва ќе добиевме вредност k_S= 0,755, што е за околу 2% повеќе од неговата точна вредност. Значи, попречните гранки не влијаат многу на конечниот резултат, па затоа, заради намалување на обемот на пресметките, при анализите на статичката стабилнот на ЕЕС тие многу често и се занемаруваат.

Од друга страна, занемарувањето на активните отпорности на елементите од ЕЕС дава секогаш понеповолна слика за статичката стабилност на системот, но сега веќе грешките не се занемарливи. Затоа, доколку се бара точен резултат, неопходно ќе биде во пресметките да се уважуваат во секој случај активните отпорности на сите елементи од системот, а пред сѐ, на водовите.

Пример 5.4. Во ЕЕС прикажан на сликата доаѓа до ненадејно исклучување на еден од водовите. Пред исклучувањето на водот, режимот во кој што работел системот ги имал следните параметри (изразени во релативни единици *pu* при базна моќност S_B= 220 MVA и базен напон U_B= 210 kV):

$P_o = 1\ pu$; $Q_o = 0{,}2\ pu$; $U_m = 1\ pu$; $x'_d = 0{,}295\ pu$; $x_{T1} = 0{,}138\ pu$;

$x_{T2} = 0{,}122\ pu$; $x_{V1} = x_{V2} = x_V = 0{,}488\ pu$.



Слика П.5.4.1

За генераторот G се познати следните податоци: $S_n = 1{,}0\ pu$; $T_J = 8{,}18$ s.

Да се утврди дали е системот динамички стабилен и со помош на правилото на еднакви површини да се пресмета максималниот агол на нишање θ_2.

Решение:

а) Режимски параметри пред исклучување на водот:

Ќе го поставиме фазорот на напонот $\underline{U}_m$ на фазната оска, т.е:

$\underline{U}_m = U_m\angle 0° = (1 + j0)\ pu$. Следи:

$$X_{\Sigma 1} = X'_d + X_{T1} + 0{,}5 \cdot X_V + X_{T2} = 0{,}779\ \text{pu},$$

$$E' = (U_m + \frac{Q_o X_{\Sigma 1}}{U_m}) + j\frac{P_o X_{\Sigma 1}}{U_m} = (1{,}16 + j0{,}799) = 1{,}41\angle 34{,}5°\ \text{pu}$$

$\Rightarrow$ $E' = 1{,}41\ pu$ и $\theta_o = 34{,}5°$ ($\theta_o = 0{,}602$ rad).

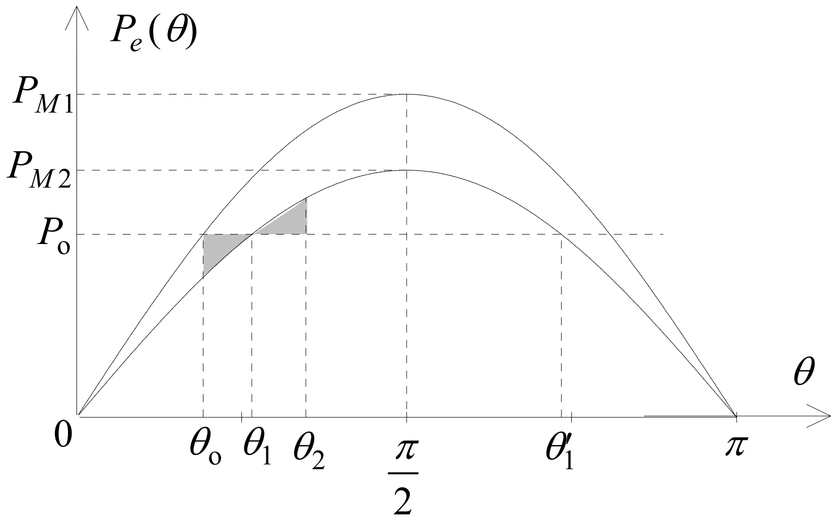
Карактеристиката на моќност на која што ќе работи генераторот G, значи, ќе биде:

$$P_{M1} = \frac{E' \cdot U_m}{X_{\Sigma 1}} = \frac{1{,}41 \cdot 1{,}0}{0{,}799} = 1{,}765 \text{ pu}; \; P_1(\theta) = P_{M1} \cdot \sin(\theta).$$

б) Работа на системот по исклучувањето на водот:

После исклучувањето на еден од водовите ќе дојде до промена на еквивалентната реактанција $X_{\Sigma e}$ и до работа на генераторот на нова аглова карактеристика. Значи, по исклучувањето на водот ќе имаме:

$$X_{\Sigma 2} = X_d^{'} + X_{\mathrm{T1}} + X_{\mathrm{V}} + X_{\mathrm{T2}} = 1{,}043\, pu,$$



Слика П.5.4.2. Аглови карактеристики на моќност

$$P_{M2} = \frac{E^{'} \cdot U_m}{X_{\Sigma 2}} = \frac{1{,}41 \cdot 1{,}0}{1{,}043} = 1{,}35\, pu; \quad P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta).$$

Значи по исклучувањето на водот генераторот ќе премине да работи на карактеристиката $P_2(\theta)$, (види слика П.5.4.2), па системот ќе биде динамички стабилен ако површината на забрзување A^+ е помала од расположливата површина за успорување $A^-_{\max}$. Според тоа, во склад со сликата П.5.4.2 ќе имаме:

$$\theta_1 = \arcsin(P_o / P_{M2}) = \arcsin(1/1{,}35) = 47{,}8°, \text{ или}$$

$$\theta_1 = 0{,}834 \text{ rad}; \quad \theta_1' = 180 - \theta_1 = 132{,}2° = 2{,}307 \text{ rad}.$$

Системот ќе биде динамички стабилен доколку површината на забрзување A^+ е помала од расположливата површина за успорување (кочење) $A^-_{\max}$. Според тоа, ќе имаме:

$$A^+ = \int_{\theta_o}^{\theta_1} \Delta P(\theta) \cdot \mathrm{d}\theta = \int_{\theta_o}^{\theta_1} [P_o - P_{M2}\sin(\theta)] \cdot \mathrm{d}\theta =$$

$$= P_o \cdot (\theta_1 - \theta_o) + P_{M2} \cdot (\cos\theta_2 - \cos\theta_o)$$

$$A^+ = 1 \cdot (0{,}834 - 0{,}602) + 1{,}35 \cdot (\cos 47{,}8° - \cos 34{,}5°) = 0{,}0278\, pu,$$

$$A^{-}_{\max} = \int_{\theta_1}^{\theta_1'} -\Delta P(\theta)\cdot \mathrm{d}\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_1'} [P_{M2}\sin(\theta) - P_{\mathrm{o}}]\cdot \mathrm{d}\theta = P_{\mathrm{o}}\cdot(\theta_1 - \theta_1') + P_{M2}\cdot(\cos\theta_1 - \cos\theta_1'),$$

$A^{-}_{\max}$= 1·(0,834 – 0,602) + 1,35·(cos 47,8° – cos 132,2°) = 0,341 *pu*.

Значи, коефициентот на динамичка резерва во овој случај ќе биде:

$k_d = A^{-}_{\max}/A^{+} = 0{,}341/0{,}0278 = 12{,}3.$

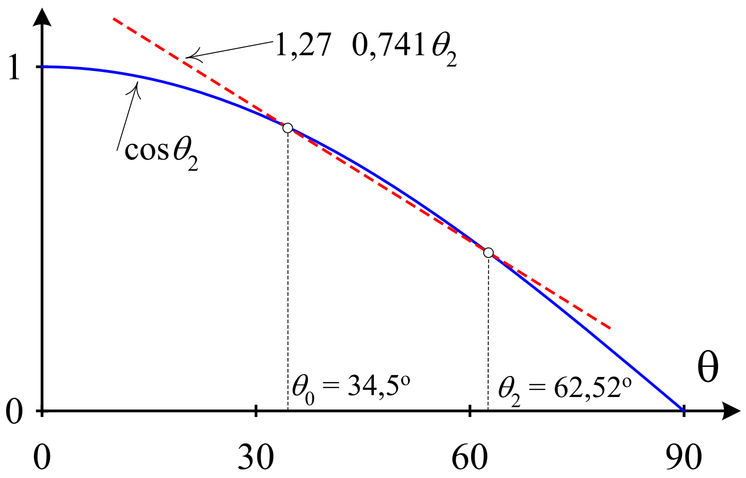
Бидејќи е $k_d > 1$, тоа ќе значи дека за разгледуваното пореметување системот ќе биде динамички стабилен.

Максималниот агол θ_2 што роторот на генераторот ќе го заземе во однос на референтната вртлива оска (односно во однос на фазорот на напонот на мрежата $\underline{U}_m$, ќе го пресметаме со примена на критериумот на еднакви површини, според кој важи $A^{+} = A^{-}_{\max}$, т.е.:

$$\int_{\theta_{\mathrm{o}}}^{\theta_1} (P_{\mathrm{o}} - P_{M2}\sin\theta)\cdot \mathrm{d}\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_{M2}\sin\theta - P_{\mathrm{o}})\cdot \mathrm{d}\theta;$$

$$P_{\mathrm{o}}\cdot(\theta_1 - \theta_{\mathrm{o}}) + P_{M2}\cdot(\cos\theta_1 - \cos\theta_{\mathrm{o}}) = P_{\mathrm{o}}\cdot(\theta_1 - \theta_2) + P_{M2}(\cos\theta_1 - \cos\theta_2),$$

од каде се добива:



Слика П.5.4.3. Графичко решение на равенката cosθ_2 =1,27 – 0,741θ_2

$$\cos\theta_2 = \cos\theta_{\mathrm{o}} + \frac{P_{\mathrm{o}}}{P_{M2}}(\theta_{\mathrm{o}} - \theta_2) \text{ , или}$$

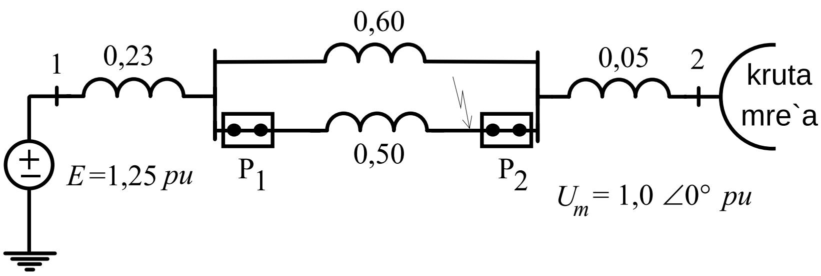
$$\cos\theta_2 = 1{,}27 - 0{,}741\cdot\theta_2 .$$

Како што гледаме, последната равенка, која го дава бараното решение за θ_2 е трансцедентна. Затоа неа ќе ја решиме по графички пат, како што е тоа прикажано на сликата П.5.4.3. Од сликата П.5.4.3 се гледа дека таа има две решенија, од кои едното е веќе познато $\theta_2 = \theta_{\mathrm{o}} = 34{,}5°$, а второто решение, добиено во пресекот на кривата $\cos\theta_2$ и правата $1{,}27 - 0{,}741\cdot\theta_2$, приближно изнесува: $\theta_2 = 62{,}52°$.

* Ова решение може да се добие и на поинаков начин, на пример со примена на некоја нумеричка постапка. Притоа, сосема добра проценка за почетното решение θ_{2p} дава релацијата: $\theta_{2p} = \theta_1 + (\theta_1 - \theta_o)$. Во конкретниот случај, со помош на оваа релација, за почетното решение на трансцедентната равенка добиваме $\theta_{2p} = 61{,}1°$, а тоа е сосема близу до точното решение.

Пример 5.5. Да се пресмета граничниот агол на исклучување за случај на трифазна куса врска на еден од водовите, настаната во непосредна близина на прекинувачот P_2. Пред настанувањето на кусата врска, генераторот работел со внатрешна е.м. сила E = 1,25 *pu* и произведувал активна моќност P_o= 1 *pu*.

Податоците за параметрите на елементите од системот (изразени во *pu*) се прикажани на сликата П.5.5.1.



Слика П.5.5.1. Заменска шема на разгледуваниот ЕЕС

Решение:

Во задачава ќе разгледуваме три различни режими на работа на генераторот, и соодветно на тоа ќе имаме три аглови карактеристики. на моќност: 1. нормален режим; 2. режим на трифазна куса врска и 3. режим на работа по исклучувањето на кусата врска, кога повредениот вод е исклучен.

1 *Нормален режим на работа*

Во нормалниот режим на работа генераторот работел на карактеристиката $P_1(\theta) = P_{M1}\cdot\sin(\theta)$. Тогаш имаме (види сл. П.5.5.1):

$X_{12} = X_{\Sigma 1} = 0{,}23 + 0{,}50 \,\Pi\, 0{,}60 + 0{,}05 = 0{,}553$ *pu*;

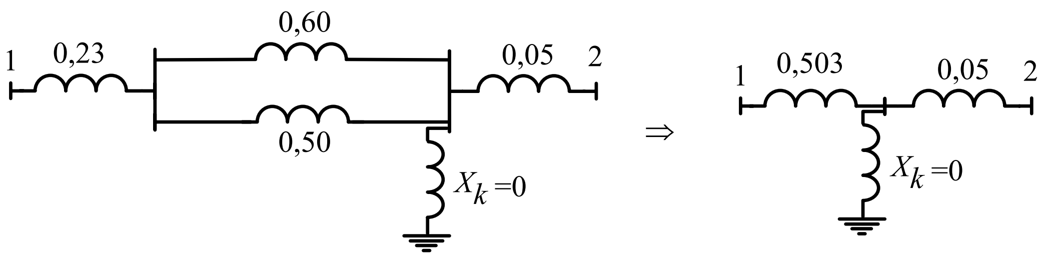
$P_{M2} = E\cdot U/X_{\Sigma 1} = 1{,}25\cdot 1{,}0/0{,}553 = 2{,}26$ *pu*.

2 *Режим на работа со трифазна куса врска*

Во режимот со трифазна куса врска на крајот од еден од водовите ќе имаме состојба како што е тоа прикажано на сликата П.5.5.2. Вршејќи еквивалентирање на редно-паралелните реактанции, се добива Т-заменска шема на ЕЕС, од каде потоа следуваат релациите:

$X_e = 0{,}23 + 0{,}50\Pi 0{,}60 = 0{,}503$ *pu*; $X_k = 0$; $X_{12} = X_{\Sigma 2} = 0{,}503\cdot 0{,}05/X_k = \infty \Rightarrow$

$P_{M2} = 0$.



Слика П.5.5.2. Работа на ЕЕС во режим на к. врска

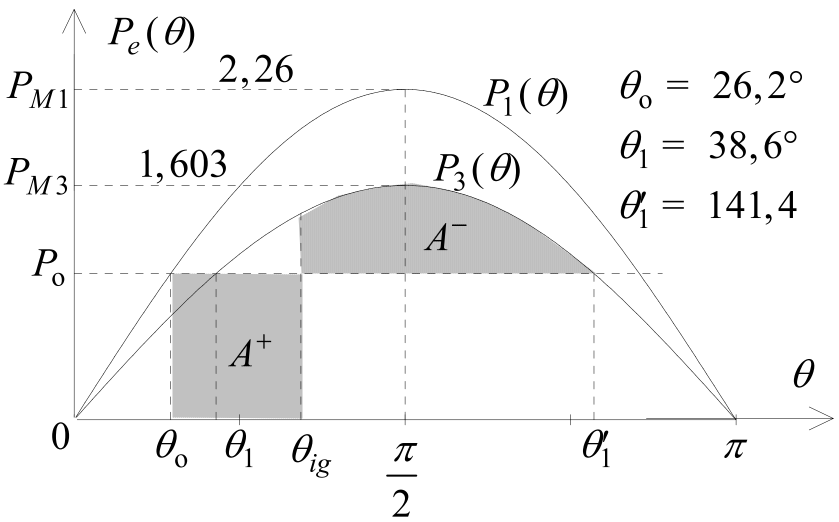
Значи, во овој режим генераторот ќе работи на карактеристиката на моќност $P_2(\theta) = 0$, т.е. нема да оддава никаква моќност во системот.

3 *Режим на работа кога повредениот вод е исклучен*

Во овој режим повредениот вод е исклучен, поради што еквивалентната реактанција на делот од мрежата помеѓу е.м. сила E и собирницата "4" ќе биде: $X_e = 0{,}23 + 0{,}50 = 0{,}73$ *pu*. Понатаму имаме:

$$X_{12} = X_{\Sigma 3} = 0{,}733 + 0{,}05 = 0{,}78 \text{ pu} \Rightarrow P_{M3} = E \cdot U_m / X_{\Sigma 3} = 1{,}25 \cdot 1{,}0/0{,}78 = 1{,}603 \text{ pu}.$$

Според тоа, во овој режим, генераторот ќе работи на карактеристиката $P_3(\theta) = P_{M3} \cdot \sin(\theta)$.



Слика П.5.5.3. Аглови карактеристики на моќност

Почетниот агол θ_o, аголот на новата рамнотежна состојба θ_1 , како и критичниот агол θ_1' ќе ги добиеме со помош на сликата П.5.5.3, преку следните релации:

$$P_o = P_{M1} \cdot \sin(\theta_o) \Rightarrow \theta_o = \arcsin(P_o / P_{M1}) = \arcsin(1{,}0/2{,}26) = 26{,}2° \; (0{,}437 \text{ rad}).$$

$$P_o = P_{M3} \cdot \sin(\theta_1) \Rightarrow \theta_1 = \arcsin(P_o / P_{M3}) = \arcsin(1{,}0/1{,}603) = 38{,}6° \; (0{,}674 \text{ rad}).$$

$\theta_1' = 180° - \theta_1 = 141{,}4°$ (2,47 rad).

Граничниот агол на исклучување θ_1' ќе го добиеме со помош на правилото на еднакви површини. Применувајќи го ова правило, во сообразност со сликата П.5.5.3, добиваме:

$$A^+ = P_o \cdot (\theta_{ig} - \theta_o);\ A^-_{max} = \int_{\theta_{ig}}^{\theta_1'} (P_{M3} \cdot \sin\theta - P_o) \cdot \mathrm{d}\theta \ .$$

Од условот $A^+ = A^-_{max}$ ја добиваме следната релација:

$$P_o \cdot (\theta_{ig} - \theta_o) = P_o \cdot (\theta_{ig} - \theta_1') + P_{M3} \cdot (\cos\theta_{ig} - \cos\theta_1')\ ,$$

од каде што се добива:

$$\cos\theta_{ig} = \cos\theta_1' + \frac{P_o}{P_{M3}} \cdot (\theta_1' - \theta_o)\text{, т.е.}$$

$$\cos\theta_{ig} = -\,0{,}7815 + (1/1{,}603)\cdot(2{,}47 - 0{,}457) = 0{,}4743\ ;$$

$$\theta_{ig} = \arccos 0{,}4743 = 61{,}7°.$$

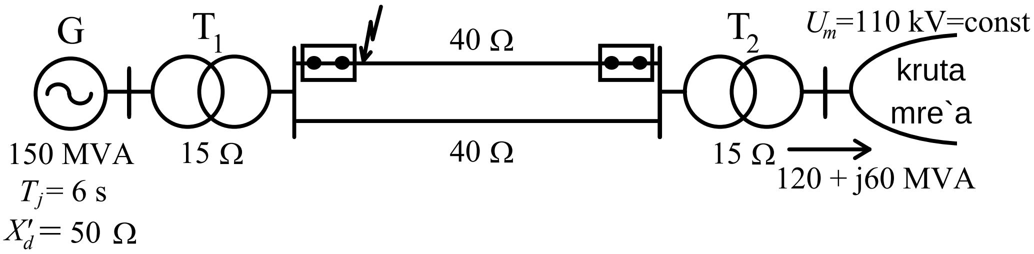
Забелешка: За останатите врсти на куси врски, постапката за пресметување на граничкиот агол на исклучување θ_{ig} е слична на овде изнесената. Може да се покаже дека граничниот агол θ_{ig}, во општ случај, се пресметува со помош на следната релација:

$$\cos\theta_{ig} = \frac{P_o}{P_{M3} - P_{M2}} \cdot (\theta_1' - \theta_o) + \frac{P_{M3}\cos\theta_1' - P_{M2}\cos\theta_o}{P_{M3} - P_{M2}}\ .$$

Според тоа, за разни врсти на куси врски ќе ја имаме следната ситуација во поглед на големината на граничниот агол θ_{ig}:

- еднофазна куса врска ($k = 1$) $X_k = 0{,}0891$ *pu* $P_{M2} = 1{,}497$ *pu* ($A^+ < A^-_{max}$ секогаш);
- двофазна куса врска ($k = 2$) $X_k = 0{,}0443$ pu; $P_{M2} = 1{,}116$ pu; $\theta_{ig} = 121{,}4°$;
- двофазна к. врска со земја ($k = 2$z); $X_k = 0{,}0224$ pu; $P_{M2} = 0{,}746$ pu; $\theta_{ig} = 84{,}1°$.

Пример 5.7. Во прикажаниот систем, на почетокот на еден од водовите доаѓа до појава на трифазна куса врска. Повредениот вод се исклучува 0,2 s по нејзиното настанување. Да се испита дали системот е динамички стабилен.



Слика П.5.7.1

Решение:

Во режимот пред настанувањето на кусата врска ќе ги имаме следните односи:

$$X_{12} = X_{\Sigma 1} = X'_d + X_{T1} + X_V/2 + X_{T2} = 100\ \Omega;$$

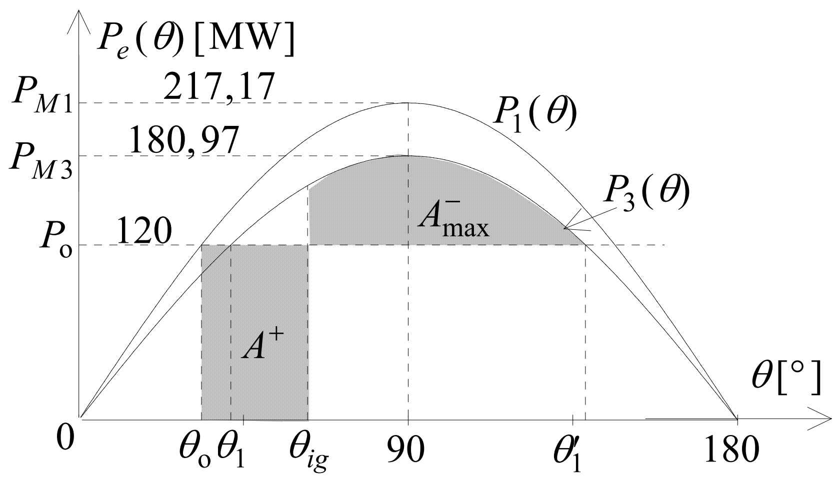
$$\underline{E}' = \underline{U}_m + \frac{Q \cdot X_{\Sigma 1}}{U_m} + j\frac{P \cdot X_{\Sigma 1}}{U_m} = 197{,}4\angle 33{,}5^\circ\ \text{kV}.$$

Значи, во нормален режим на работа генераторот G работи на карактеристиката:

$$P_1(\theta) = P_{M1} \cdot \sin(\theta) = 217{,}2 \cdot \sin\theta,$$

каде што е:

$$P_{M1} = E' \cdot U_m / X_{\Sigma 1} = 197{,}4 \cdot 110/100 = 217{,}2\ \text{MW}.$$



Слика П.5.7.2. Аглови карактеристики на моќност

Почетниот агол на изместување во случајов ќе биде (види сл. П.5.7.2): **$\theta_o = 33{,}54^\circ$ ($\theta_o = 0{,}585$ rad).**

Во режимот на куса врска генераторот не оддава никаква електрична моќност и работи на карактеристиката $P_2(\theta) = P_{M2} \cdot \sin(\theta)$ ($P_{M2} = 0$). По исклучувањето на кусата врска генераторот ќе работи на нова работна карактеристика:

$$P_3(\theta) = P_{M3} \cdot \sin(\theta),$$

и притоа ќе имаме:

$$X_{12} = X_{\Sigma 2} = X'_d + X_{T1} + X_V + X_{T2} = 120\ \Omega;$$

$$P_{M3} = E' \cdot U_m / X_{\Sigma 2} = 181\ \text{MW}.$$

Граничниот агол на исклучување на кусата врска θ_{ig} ќе го добиеме применувајќи го правилото на еднакви површини. Од условот $A^{+} = A^{-}_{\max}$, односно, во склад со сликата П.5.7.2, добиваме:

$$\int_{\theta_o}^{\theta_{ig}} (P_o - 0) \cdot \mathrm{d}\theta = \int_{\theta_{ig}}^{\theta'_1} (P_{M2} \sin\theta - P_o) \cdot \mathrm{d}\theta \text{, или:}$$

$$P_o \cdot (\theta_{ig} - \theta_o) = P_o \cdot (\theta_{ig} - \theta'_1) + P_{M3} \cdot (\cos\theta_{ig} - \cos\theta'_1),$$

од каде што се добива:

$$\cos\theta_{ig} = \cos\theta'_1 + \frac{P_o}{P_{M3}} \cdot (\theta'_1 - \theta_o).$$

Во склад со сликата П.5.7.2 имаме:

$$\theta_1 = \arcsin(P_o / P_{M3}) = \arcsin(120/181) = 41{,}5° \ (\theta_1 = 0{,}725\ \text{rad});$$

$$\theta'_1 = 180° - \theta_1 = 138{,}5°\ (2{,}417\ \text{rad}),$$

па, според тоа, добиваме: $\cos\theta_{ig} = 0{,}466 \ \Rightarrow\ \theta_{ig} = 62{,}2°$.

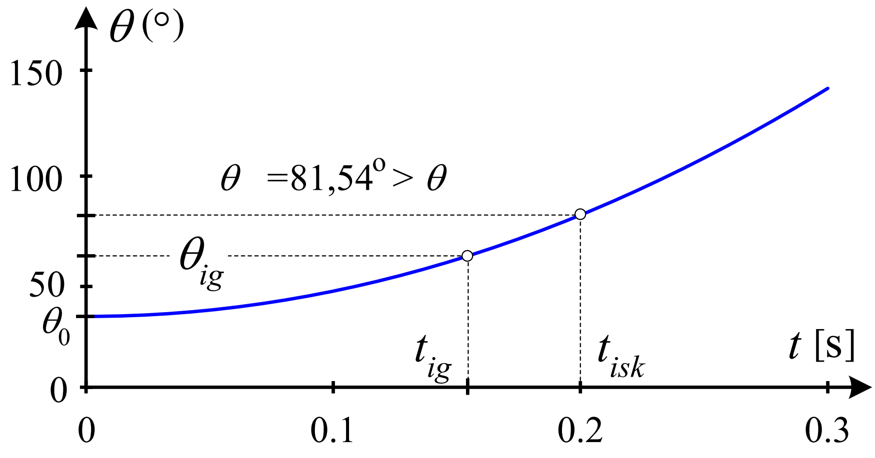
За да испитаме дали системот е динамички стабилен, ќе треба да утврдиме дали аголот на исклучување θ_{isk} (т.е. аголот θ во моментот на исклучувањето на повредениот вод) ја надминал граничната вредност θ_{ig}. За таа цел, потребно ќе биде да ја знаеме зависноста $\theta = \theta(t)$ во режимот на кусата врска. Таа зависност во општ случај се добива со решавање на равенката на движење на генераторот, т.е. со нумеричка постапка. Во специјален случај, кога дебалансот на моќноста $\Delta P = \text{const.}$, неа можеме да ја добиеме и по аналитички пат. Во тој случај диференцијалната равенка на движење може да се реши експлицитно, а решението гласи:

$$\theta(t) = \theta(0) + \frac{\Delta P}{M} \cdot \frac{t^2}{2} = \theta_o + \frac{\Delta P}{M} \cdot \frac{t^2}{2}.$$

Во конкретниот случај константата на иинерција на агрегатот M ќе биде:

$$M = S_n \cdot T_J / \omega_o = 150 \cdot 6 / 18.000 = 0{,}05\ (\text{MW} \cdot \text{s}^2/°\text{el})$$

и сега ќе можеме да ја нацртаме зависноста $\theta = \theta(t)$ (слика П.5.7.3). Од сликата П.5.7.3 ја отчитуваме вредноста на аголот θ во моментот на исклучувањето на повредениот вод: $\theta_{isk} = \theta_{t=0,2s} = 81{,}5°$.



Слика П.5.7.3. Зависност *θ* = *θ*(*t*) во режимот на куса врска

Значи, системот ќе биде динамички стабилен бидејќи кусата врска е исклучена пред да биде достигнат граничниот агол на исклучување θ_{ig}. Граничното време на исклучување на кусата врска t_{ig} ќе го добиеме од условот:

$$\theta_{ig} = \theta_o + \frac{\Delta P}{M} \cdot \frac{t_{ig}^2}{2} \ ,$$

од каде што се добива:

$$t_{ig} = \sqrt{\frac{2 \cdot M \cdot (\theta_{ig} - \theta_{\mathrm{o}})}{\Delta P}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}05 \cdot (62{,}2 - 33{,}5)}{120}} = 0{,}15\mathrm{s} \, .$$