

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

«ДИНАМІКА ТА СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ»
(частина 2 «Електромеханічні перехідні процеси»)

*(для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»)
(Електронне видання)*

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електричної інженерії
Протокол № 7 від 17.02.2021 р.

Сєверодонецьк – 2021

УДК 621.31(075.8)

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Динаміка та стійкість електроенергетичних систем» (для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») (Електронне видання) / Уклад.: О.І. Шевченко, І.В. Мелконова, Ю.А. Романченко. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. – 36 с.

Методичні вказівки призначені для набуття навиків практичної роботи, вивчення методики виконання необхідних розрахунків статичної та динамічної стійкості вузлів навантаження електроенергетичних систем і їх детального аналізу. Методичні матеріали розраховані на студентів вищих навчальних закладів.

Укладачі

О.І. Шевченко, к.т.н., доц.
І. В. Мелконова, ст. викл.
Ю. А. Романченко, к.т.н., доц.

Рецензент

К.В. Філімоненко, к.т.н., доц.

ЗМІСТ

Практичне заняття №1 Статична стійкість. Визначення ідеальної межі потужності.....	4
Практичне заняття №2. Статична стійкість. Вплив параметрів елементів системи на статичну стійкість.....	9
Практичне заняття №3. Дослідження статичної стійкості двох станцій, що працюють на загальне навантаження. Визначення дійсної межі потужності.....	13
Практичне заняття №4. Дослідження статичної стійкості комплексного навантаження.....	18
Практичне заняття №5. Дослідження динамічної стійкості. Двофазне коротке замикання на землю.....	22
Практичне заняття №6. Метод послідовних інтервалів.....	28
Практичне заняття №7. Статична стійкість у вузлах навантаження. Стійкість одиночного асинхронного електродвигуна.....	33
Перелік рекомендованої літератури.....	36

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1

Тема: Статична стійкість. Визначення ідеальної межі потужності

Завдання

На рисунку 1.1 показана досліджувана система, що полягає із джерела нескінченної потужності, представленій шиною постійної напруги з $U_c = 340$ кВ; генератора Г, двох трансформаторів Т1, Т2 і лінії Л.

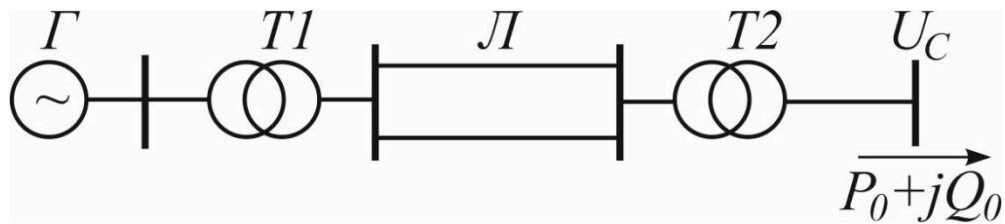


Рис. 1.1 Схема досліджуваної системи

Початкові дані:

генератор Г: $S_H = 125$ МВА, $U_H = 13,8$ кВ, $\cos = 0,91$, $X_d = 1,8$,

$$X'_d = 0,25;$$

трансформатор Т1: $S_H = 125$ МВА, $U_{BH} = 110$ кВ, $U_{HH} = 13,8$ кВ,

$$U_K = 10,5\%;$$

трансформатор Т2: $S_H = 125$ МВА, $U_{BH} = 330$ кВ, $U_{HH} = 110$ кВ,

$$U_K = 10,5\%;$$

лінія Л: довжина $l = 120$ км, $X_0 = 0,4$ Ом/км, $U_{BH} = 110$ кВ;

режим: передана потужність $P_0 = 50$ МВт, $\cos = 0,88$.

Потрібно визначити коефіцієнт запасу статичної стійкості системи для трьох випадків:

- а) генератор не має АРВ;
- б) генератор має АРВ пропорційної дії;
- в) генератор має АРВ сильної дії.

Рішення

На рисунку 1.2 наведена схема заміщення досліджуваної системи. Розрахунки проводимо в системі відносних одиниць при наближеному приведенні. Прийmemo $S_6 = 1000$ МВА и базисні напруги рівними середнім номінальним напругам $U_{\text{ср.ном.}}$.

Розрахуємо опори елементів досліджуваної системи:
трансформаторів T1 і T2:

$$X_{T1}^* = X_{T2}^* = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,84.$$

генератора Г:

$$X_d^* = X_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,8 \cdot \frac{1000}{125} = 14,4;$$

$$X_d'^* = X_d' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{1000}{125} = 1,64.$$

лінії Л:

$$X_{\text{ле}}^* = 0,5 \cdot X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном.}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 120 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,81.$$

Передана потужність:

$$P_0^* = \frac{P_0}{S_6} = \frac{50}{1000} = 0,05;$$

$$Q_0^* = \frac{Q_0}{S_6} = \frac{27}{1000} = 0,027,$$

$$\text{де } Q_0 = P_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = 50 \cdot 0,54 = 27 \text{ МВАр.}$$

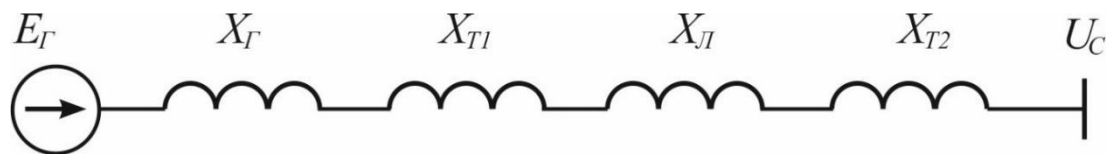


Рис. 1.2 Схема заміщення досліджуваної системи

Напруга системи

$$U_C^* = \frac{U_C}{U_{\text{ср.ном.}}} = \frac{340}{340} = 1.$$

a) генератор не має АРВ

Межа переданої потужності визначається виходячи з умови сталості синхронної ЕРС генератора $E_q^* = \text{const.}$

Синхронна ЕРС генератора:

$$E_q^* = \sqrt{\left(U_{c^*} + \frac{Q_0 \cdot X_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,027 \cdot 17,89}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,05 \cdot 17,89}{1}\right)^2} = 1,63,$$

де

$$X_{d\Sigma^*} = X_{d^*} + X_{\tau 1^*} + X_{\text{ле}^*} + X_{\tau 2^*} = 14,4 + 0,84 + 1,81 + 0,84 = 17,89.$$

Ідеальна межа потужності

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_q^* \cdot U_{c^*}}{X_{d\Sigma^*}} = \frac{1,63 \cdot 1}{17,89} = 0,091.$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості системи

$$K_3 = \frac{P_{\text{пр}} - P_0^*}{P_0^*} = \frac{0,091 - 0,05}{0,05} = 0,82,$$

або $K_3 = 82\%$.

б) генератор має АРВ пропорційної дії

Межа переданої потужності визначається виходячи з умови сталості перехідної ЕРС генератора E_q' .

Перехідна ЕРС генератора:

$$E_q' = \sqrt{\left(U_{c^*} + \frac{Q_0 \cdot X_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,027 \cdot 5,09}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,05 \cdot 5,09}{1}\right)^2} = 1,17,$$

де

$$X_{d\Sigma^*} = X_{d^*} + X_{\tau 1^*} + X_{\tau 2^*} + X_{\text{ле}^*} = 1,6 + 0,84 + 1,81 + 0,84 = 5,09.$$

Кут між векторами E_q' і U_{c^*} :

$$\delta_0' = \arctg \frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}^2 + Q_0 \cdot X_{d\Sigma^*}} = \arctg \frac{0,05 \cdot 5,09}{1 + 0,027 \cdot 5,09} = 16,7^\circ.$$

Кут між векторами E_q^* і U_{c^*} :

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_0 \cdot X_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}^2 + Q_0 \cdot X_{d\Sigma^*}} = \arctg \frac{0,05 \cdot 17,89}{1 + 0,027 \cdot 17,89} = 31,22^\circ.$$

Перехідна ЕРС по поперечній осі

$$E'_q = E' \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,17 \cos(31,22^\circ - 16,7^\circ) = 1,17 \cos 14,52^\circ = 1,13.$$

Рівняння потужності генератора з АРВ пропорційної дії:

$$\begin{aligned} P_{E'_q} &= \frac{E'_q U_{c*}}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U_{c*}^2 (X'_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma})}{2 X'_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta = \\ &= \frac{1,13 \cdot 1}{5,265} \sin \delta - \frac{0,5(18,065 - 5,265)}{18,065 \cdot 5,265} \sin 2\delta = \\ &= 0,21 \sin \delta - 0,067 \sin 2\delta. \end{aligned}$$

Знайдемо похідну $\frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta}$ і дорівнюємо її нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta} &= 0,21 \cos \delta - 2 \cdot 0,067 \cos 2\delta = \\ &= 0,21 \cos \delta - 0,134 \cos 2\delta = 0,21 \cos \delta - 0,134 (2 \cos^2 \delta - 1) = \\ &= 0,21 \cos \delta - 0,27 \cos^2 \delta + 0,134 = 0, \end{aligned}$$

$$\text{або} \quad 0,27 \cos^2 \delta - 0,21 \cos \delta - 0,134 = 0$$

Розв'яжемо квадратне рівняння відносно $\cos$:

$$\begin{aligned} \cos_{1,2} &= \frac{0,21 \pm \sqrt{(-0,21)^2 - 4 \cdot 0,27 \cdot (-0,134)}}{2 \cdot 0,27} = \frac{0,21 \pm 0,44}{0,54}; \\ \cos_1 &= 1,22; \\ \cos_2 &= -0,4; \delta_m = 113,5^\circ. \end{aligned}$$

Підставимо $\delta_m = 113,5^\circ$ у рівняння потужності:

$$\begin{aligned} P_{\text{пр}} &= 0,21 \sin \delta - 0,067 \sin 2\delta = 0,21 \sin 113,5^\circ - 0,067 \sin 2 \cdot 113,5^\circ = \\ &= 0,21 \cdot 0,9 + 0,067 \cdot 0,73 = 0,239. \end{aligned}$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості системи рівний

$$K_3 = \frac{P_{\text{пр}} - P_{0*}}{P_{0*}} = \frac{0,239 - 0,05}{0,05} = 3,78,$$

$$\text{або } K_3 = 378\%.$$

в) генератор має АРВ сильної дії

Межа переданої потужності визначається виходячи з умови сталості напруги генератора по поперечній осі U_{rq} .

Напруга генератора:

$$U_{\Gamma} = \sqrt{\left(U_{c^*} + \frac{Q_{0^*} X_{c^*}}{U_{c^*}}\right)^2 + \left(\frac{P_{0^*} X_{c^*}}{U_{c^*}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,027 \cdot 3,665}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,05 \cdot 3,665}{1}\right)^2} = 1,12,$$

де $X_{c^*} = X_{\Gamma 1^*} + X_{\Gamma 2^*} + X_{\Gamma^*} = 0,84 + 0,84 + 1,99 = 3,665$.

Кут між векторами $U_{\Gamma q^*}$ і U_{c^*} :

$$\delta_{0c} = \arctg \frac{P_{0^*} X_{c^*}}{U_{c^*}^2 + Q_{0^*} X_{c^*}} = \arctg \frac{0,05 \cdot 3,67}{1 + 0,027 \cdot 3,67} = 9,47^0.$$

Напруга генератора по поздовжній осі

$$U_{\Gamma q} = U_{\Gamma} \cos(\delta_0 - \delta_{0c}) = 1,12 \cdot \cos(31,22^0 - 9,47^0) =$$

$$= 1,12 \cdot \cos 21,75^0 = 1,04.$$

Рівняння потужності генератора з АРВ сильної дії:

$$PU_{\Gamma q} = \frac{U_{\Gamma q} U_{c^*}}{X_{c^*}} \sin \delta - \frac{2U_{c^*} (X_{d\Sigma^*} - X_{c^*})}{2X_{d\Sigma^*} X_{c^*}} \sin 2\delta =$$

$$= \frac{1,04 \cdot 1}{3,67} \sin \delta - \frac{0,5(18,065 - 3,67)}{18,065 \cdot 3,67} \sin 2\delta =$$

$$= 0,28 \sin \delta - 0,11 \sin 2\delta.$$

Знайдемо похідну $\frac{\partial PU_{\Gamma q}}{\partial \delta}$ і дорівнюємо її нулю:

$$\frac{\partial PU_{\Gamma q}}{\partial \delta} = 0,28 \cos \delta - 2 \cdot 0,11 \cos 2\delta = 0,28 \cos \delta - 0,22 \cos 2\delta =$$

$$= 0,28 \cos \delta - 0,22(2 \cos^2 \delta - 1) = 0,28 \cos \delta - 0,44 \cos^2 \delta - 0,22 = 0,$$

або $0,44 \cos^2 \delta - 0,28 \cos \delta + 0,22 = 0$.

Розв'яжемо квадратне рівняння відносно $\cos$:

$$\cos_{1,2} = \frac{0,28 \pm \sqrt{(-0,28)^2 - 4 \cdot 0,44 \cdot (-0,22)}}{2 \cdot 0,44} = \frac{0,28 \pm 0,69}{0,88},$$

$$\cos_1 = 1,14;$$

$$\cos_2 = -0,43; \delta_{\text{ін}} = 116,5^0.$$

Підставимо $\delta_{\text{ін}} = 116,5^0$ у рівняння потужності

$$P_{\text{пр}} = 0,28 \sin \delta - 0,11 \sin 2\delta = 0,21 \sin 116,5^\circ - 0,11 \sin 2 \cdot 116,5^\circ = \\ = 0,28 \cdot 0,895 - 0,11 \cdot (-0,79) = 0,337.$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості системи рівний

$$K_3 = \frac{P_{\text{пр}} - P_{0^*}}{P_{0^*}} = \frac{0,337 - 0,05}{0,05} = 5,74,$$

або $K_3 = 574\%$.

Висновок: наявність АРВ у генератора підвищує статичну стійкість системи.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

Тема: *Статична стійкість. Вплив параметрів елементів системи на статичну стійкість*

Завдання

На рис. 2.1 показана електрична система, яка складається із джерела нескінченної потужності, представленого шиною постійної напруги з $U_C = 230$ кВ, станції С, що складена із двох генераторів, трансформатора Т та лінії Л.

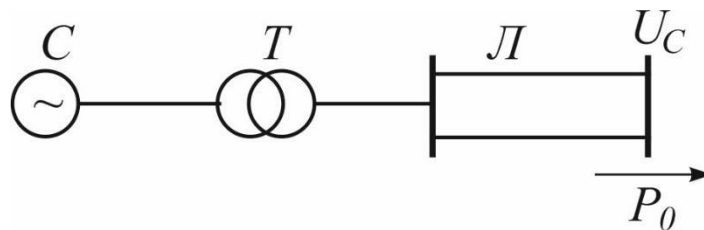


Рис. 2.1. Схема електричної системи

Початкові дані:

генератори станції С: $S_H = 125$ МВА, $n = 2$ шт., $U_H = 10,5$ кВ,
 $\cos = 0,8$, $X_d = 1,91$, $X'_d = 0,28$;

трансформатор Т: $S_H = 250$ МВА, $U_{BH} = 220$ кВ, $U_{HH} = 10,5$ кВ,
 $U_K = 11\%$;

лінія Л: довжина $l = 240$ км, $X_0 = 0,43$ Ом/км, $U_{BH} = 220$ кВ;
 Передана потужність $P_0 = 200$ МВт, $\cos_0 = 0,85$.

Потрібно дослідити вплив на статичну стійкість системи перехідного опору генераторів і довжини лінії. Побудувати залежності коефіцієнта запасу у функції від перехідного опору $K_3 = \varphi(X_d')$ і коефіцієнта запасу у функції від довжини лінії $K_3 = \varphi(l)$.

Рішення

Розрахунки елементів проводимо в системі відносних одиниць при наближеному приведенні. Прийmemo $S_6 = 125$ МВА і базисні напруги, рівними середнім номінальним напругам $U_{\text{ср.ном.}}$. Опори елементів схеми заміщення системи:

$$\text{трансформатора Т: } X_{T*} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{125}{250} = 0,055.$$

генераторів:

$$X_{d*} = 0,5 \cdot X_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,5 \cdot 1,91 \cdot \frac{125}{125} = 0,955;$$

перехідний

$$X_{d*}' = 0,5 \cdot X_d' \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,5 \cdot 0,28 \cdot \frac{125}{125} = 0,14.$$

лінії Л:

$$X_{л*} = 0,5 \cdot X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{порів.ном.}}^2} = 0,5 \cdot 0,43 \cdot 240 \cdot \frac{125}{220^2} = 0,133.$$

Передана потужність:

$$P_0^* = \frac{P_0}{S_6} = \frac{200}{125} = 1,6;$$

$$Q_0^* = \frac{Q_0}{S_6} = \frac{124}{125} = 0,99,$$

$$\text{де } Q_0 = P_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = 200 \cdot \operatorname{tg} 31,8^\circ = 200 \cdot 0,62 = 124 \text{ МВАр.}$$

$$\varphi_0 = \arccos \cos \varphi_0 = \arccos 0,85 = 31,8^\circ.$$

Напруга системи

$$U_{c*} = \frac{U_c}{U_{\text{ср.ном.}}} = \frac{230}{230} = 1.$$

Перехідна ЕРС:

$$E'_* = \left(U_{c^*} + \frac{Q_{0^*} X'_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{0^*} X'_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}} \right)^2 =$$

$$= \left(1 + \frac{0,99 \cdot 0,328}{1} \right)^2 + \left(\frac{1,6 \cdot 0,328}{1} \right)^2 = 1,42,$$

$$\text{де } X'_{d\Sigma^*} = X'_{d^*} + X_{T^*} + X_{L^*} = 0,14 + 0,055 + 0,133 = 0,328.$$

Кут між векторами E_{q^*} і U_{c^*} :

$$\delta_0 = \arctg \frac{P_{0^*} X'_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}^2 + Q_{0^*} X'_{d\Sigma^*}} = \arctg \frac{1,6 \cdot 1,143}{1 + 0,99 \cdot 1,143} = 40,63^0,$$

$$\text{де } X'_{d\Sigma^*} = X'_{d^*} + X_{T^*} + X_{L^*} = 0,955 + 0,055 + 0,133 = 1,143.$$

Кут між векторами E'_* і U_{c^*} :

$$\delta'_0 = \arctg \frac{P_{0^*} X'_{d\Sigma^*}}{U_{c^*}^2 + Q_{0^*} X'_{d\Sigma^*}} = \arctg \frac{1,6 \cdot 0,328}{1 + 0,99 \cdot 0,328} = 21,61^0.$$

Поперечна складова перехідної ЕРС

$$E'_{q^*} = E'_* \cos(\delta_0 - \delta'_0) = 1,42 \cos(40,63^0 - 21,61^0) = 1,17 \cos 19,02^0 = 1,34.$$

Рівняння потужності генератора з АРВ пропорційної дії:

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U_{c^*}}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U_{c^*}^2 (X_{d\Sigma} - X'_{d\Sigma})}{2 X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} \sin 2\delta =$$

$$= \frac{1,34 \cdot 1}{0,328} \sin \delta - \frac{0,5(1,143 - 0,328)}{1,143 \cdot 0,328} \sin 2\delta =$$

$$= 4,085 \sin \delta - 1,087 \sin 2\delta.$$

Знайдемо похідну $\frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta}$ і дорівняємо її нулю:

$$\frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta} = 4,085 \cos \delta - 2 \cdot 1,087 \cos 2\delta =$$

$$= 4,085 \cos \delta - 2,174 \cos 2\delta = 4,085 \cos \delta - 2,174 (2 \cos^2 \delta - 1) =$$

$$= 4,085 \cos \delta - 4,348 \cos^2 \delta + 2,174 = 0,$$

$$\text{або} \quad 4,348 \cos^2 \delta - 4,085 \cos \delta - 2,174 = 0$$

Розв'яжемо квадратне рівняння відносно $\cos$:

$$\cos_{1,2} = \frac{4,085 \pm \sqrt{(-4,085)^2 - 4 \cdot 4,348 \cdot (-2,174)}}{2 \cdot 4,348} = \frac{4,085 \pm 7,382}{8,696};$$

$$\cos_1 = 1,319;$$

$$\cos \delta_m = -0,379; \delta_m = 112,27^\circ.$$

Підставимо значення $\delta_m = 112,27^\circ$ у рівняння потужності:

$$P_{\text{пр}} = 4,085 \sin \delta - 1,087 \sin 2\delta = 4,085 \sin 112,27^\circ - 1,087 \sin 2 \cdot 112,27^\circ = \\ = 4,085 \cdot 0,925 - 1,087 \cdot (-0,712) = 4,543.$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості системи рівний

$$K_3 = \frac{P_{\text{пр}} - P_0}{P_0} = \frac{4,543 - 1,6}{1,6} = 1,83,$$

або $K_3 = 183\%$.

Розглянемо вплив перехідного опору генераторів і довжини лінії на величину коефіцієнта запасу статичної стійкості.

Будемо задаватися різними значеннями перехідного опору й довжини лінії й розраховувати коефіцієнт запасу. Результати розрахунків представлені в табл. 2.1, 2.2 і на рис. 2.2 і 2.3, по ним побудовані залежності $K_3 = \varphi(X'_d)$ і $K_3 = \varphi(l)$.

Таблиця 2.1. Результати розрахунків коефіцієнта запасу статичної стійкості системи залежно від перехідного опору

X'_d , в.о.	$X'_{d\Sigma}$, в.о.	E'_* , в.о.	δ'_0 , грд.	E'_q , в.о.	δ'_m , грд.	$P_{\text{пр}}$, в.о.	K_3 , %
0,12	0,308	1,39	20,69	1,31	112,89	4,77	198,1
0,14	0,328	1,42	21,61	1,34	112,27	4,543	183,9
0,16	0,348	1,46	22,5	1,39	111,48	4,4	175

Таблиця 2.2. Результати розрахунків коефіцієнта запасу статичної стійкості системи залежно від довжини лінії

l , км	$X_{d\Sigma}$, в.о.	$X'_{d\Sigma}$, в.о.	δ'_0 , грд.	E'_* , в.о.	δ'_0 , грд.	E'_q , в.о.	δ'_m , грд.	$P_{\text{пр}}$, в.о.	K_3 , %
200	1,12	0,306	40,36	1,39	20,59	1,31	112,84	4,795	199,7
240	1,14	0,328	40,63	1,42	21,61	1,34	112,27	4,543	183,9

280	1,16 5	0,35	40,88	1,46	22,58	1,39	111,56	4,377	173,6
-----	-----------	------	-------	------	-------	------	--------	-------	-------

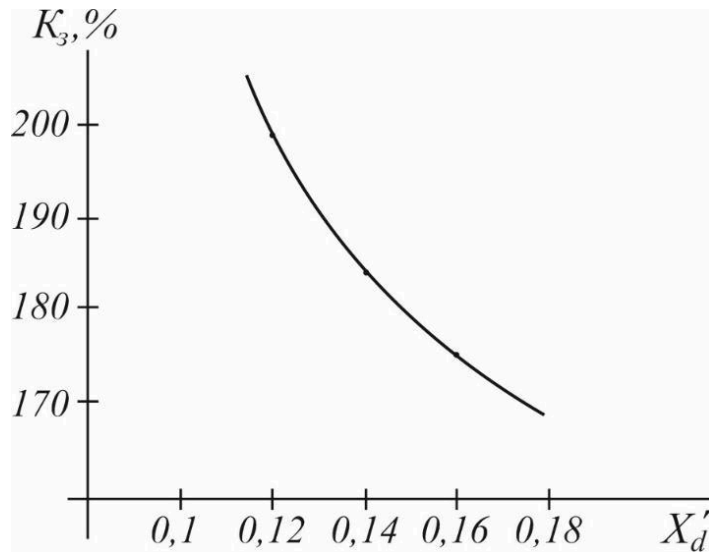


Рис. 2.2 Залежність $K_3 = \varphi(X'_d)$

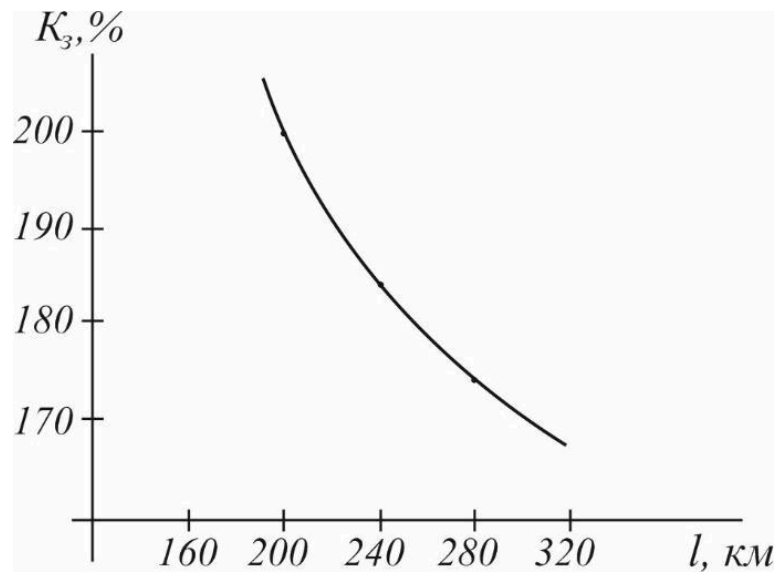


Рис. 2.3 Залежність $K_3 = \varphi(l)$

Висновки:

1. При збільшенні перехідного опору генератора коефіцієнт запасу статичної стійкості зменшується.
2. При збільшенні довжини лінії коефіцієнт запасу статичної стійкості зменшується.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №3

Тема: Дослідження статичної стійкості двох станцій, що працюють на загальне навантаження. Визначення дійсної межі потужності

Завдання

Визначити коефіцієнт запасу статичної стійкості K_3 системи (рис. 3.1), що складається із двох станцій Ст1 і Ст2, які працюють на загальне навантаження Н, за допомогою критерію $\partial P / \partial \delta_{12}$. Генератори забезпечені АРВ пропорційної дії. Навантаження Н представити постійним опором Z_H . Прийняти, що ЕРС E'_1 і E'_2 постійні.

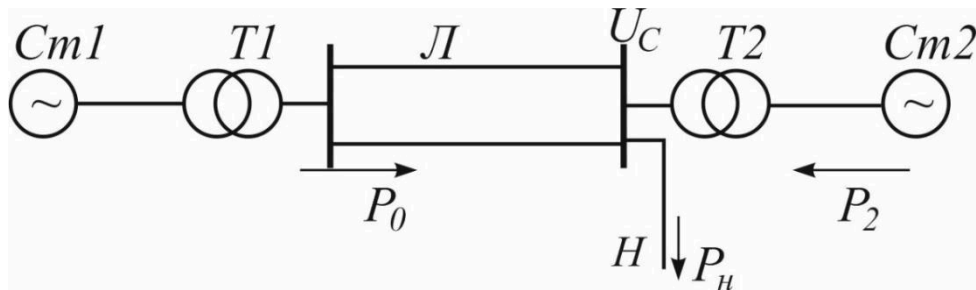


Рис.3.1 Схема електричної системи

Початкові дані:

генератор Г1 станції Ст1: $S_{H1} = 125$ МВА, $U_{H1} = 10,5$ кВ, $\cos = 0,91$

$$X'_{d1} = 0,2;$$

генератор Г2 станції Ст2: $S_{H2} = 65$ МВА, $U_{H2} = 10,5$ кВ, $\cos = 0,8$,

$$X'_{d2} = 0,2;$$

трансформатор Т1: $S_{H1} = 125$ МВА, $U_{BH1} = 110$ кВ, $U_{HH1} = 10,5$ кВ,

$$U_K = 10,5\%;$$

трансформатор Т2: $S_{H2} = 80$ МВА, $U_{BH2} = 110$ кВ, $U_{HH2} = 10,5$ кВ,

$$U_K = 10,5\%;$$

лінія Л: $l = 110$ км, $X_0 = 0,4$ Ом/км, $U_{BH} = 110$ кВ;

режим: передана потужність $P_0 = 50$ МВт, $\cos = 0,9$;

навантаження: $P_H = 50$ МВт, $\cos = 0,87$; $U_C = 115$ кВ.

Рішення

Розрахунки проводимо в системі відносних одиниць при наближеному приведенні. Прийmemo $S_6 = 1000$ МВА і базисні напруги рівними середнім номінальним $U_{\text{ср.ном.}}$

Опори елементів схеми заміщення (рис.3.2):
трансформаторів Т1 і Т2:

$$X_{T1}^* = \frac{U_{k1}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{H1}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,84;$$

$$X_{T2}^* = \frac{U_{k2}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{H2}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,31.$$

генераторів станції Ст1 і Ст2 відповідно:

$$X'_{d1} = X'_{d1} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,2 \cdot \frac{1000}{125} = 1,64.$$

$$X'_{d2} = X'_{d2} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,25 \cdot \frac{1000}{65} = 3,8.$$

лінії Л:

$$X_{\text{л}}^*/2 = 0,5 \cdot X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном.}}^2} = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 110 \cdot \frac{1000}{115^2} = 1,65.$$

Передана станцією Ст1 потужність:

$$P_0^* = \frac{P_0}{S_6} = \frac{50}{1000} = 0,05;$$

$$Q_0^* = \frac{Q_0}{S_6} = \frac{27}{1000} = 0,027,$$

де $Q_0 = P_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = 50 \cdot 0,54 = 27$ МВАр.

Напруга системи:

$$U_C^* = \frac{U_C}{U_{\text{ср.ном.}}} = \frac{115}{115} = 1.$$

Потужність навантаження:

$$P_H^* = \frac{P_H}{S_6} = \frac{70}{1000} = 0,07;$$

$$Q_H^* = \frac{Q_H}{S_6} = \frac{39,9}{1000} = 0,04,$$

де $Q_H = P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi_H = 70 \cdot 0,57 = 39,9$ МВАр.

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2} = \sqrt{70^2 + 39,9^2} = 80,57 \text{ МВА};$$

$$S_H^* = \frac{S_H}{S_6} = \frac{80,57}{1000} = 0,081.$$

Опір навантаження:

$$Z_H^* = \frac{U_{c*}^2 (\cos \varphi_H + j \sin \varphi_H)}{S_H^*} = \frac{1 \cdot (\cos 29,68^\circ + j \sin 29,68^\circ)}{0,081} = 10,73 + j6,11.$$

Передана станцією Ст2 потужність:

$$S_2^* = S_H^* - S_0^* = 0,07 + j0,04 - 0,05 - j0,027 = 0,02 + j0,013.$$

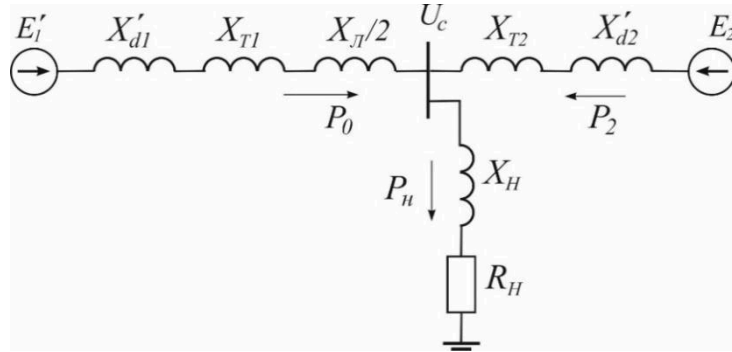


Рис.3.2 Схема заміщення досліджуваної системи

Перехідна ЕРС генератора станції Ст1

$$E_{1*}' = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{01*} X_{d1\Sigma}'^*}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{01*} X_{d1\Sigma}'^*}{U_{c*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,027 \cdot 4,09}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,05 \cdot 4,09}{1} \right)^2} = 1,13,$$

$$\text{де } X_{d1\Sigma}'^* = X_{d1}'^* + X_{T1}'^* + X_{L*}'/2 = 1,6 + 0,84 + 1,65 = 4,09.$$

Перехідна ЕРС генератора станції Ст2

$$E_{2*}' = \sqrt{\left(U_{c*} + \frac{Q_{02*} X_{d2\Sigma}'^*}{U_{c*}} \right)^2 + \left(\frac{P_{2*} X_{d2\Sigma}'^*}{U_{c*}} \right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,027 \cdot 5,09}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,05 \cdot 5,09}{1} \right)^2} = 1,17,$$

$$\text{де } X_{d2\Sigma}'^* = X_{d2}'^* + X_{T2}'^* = 3,8 + 1,31 = 5,11.$$

Для визначення власної провідності станції Ст1 складемо схему заміщення (рис. 3.2), дорівнявши ЕРС станції Ст2 нулю, і перетворимо її до виду, показаного на рис. 3.3

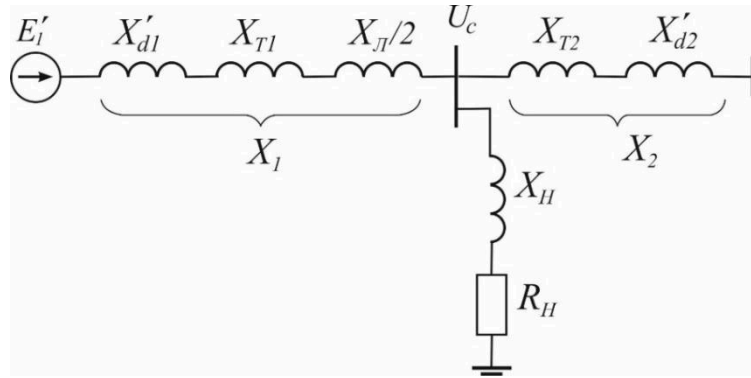


Рис. 3.3 Схема заміщення досліджуваної системи для визначення власної провідності станції Ст1

Власний опір станції Ст1

$$\begin{aligned}
 Z_{-11} &= R_{11} + jX_{11} = jX'_{d1\Sigma} + \frac{jX'_{d2\Sigma}(R_H + jX_H)}{jX'_{d2\Sigma} + R_H + jX_H} = \\
 &= j4,09 + \frac{j5,11 \cdot (10,73 + j6,11)}{j5,11 + 10,73 + j6,11} = j4,09 + \frac{-31,22 + j54,83}{10,73 + j11,22} = \\
 &= j4,09 + \frac{63,1e^{j119,65^\circ}}{15,53e^{j46,28^\circ}} = j4,09 + 4,06e^{j73,37^\circ} = \\
 &= j4,09 + 1,16 + j3,89 = 1,16 + j7,98 = \\
 &= \sqrt{1,16^2 + 7,98^2} e^{j \arctg \frac{7,98}{1,16}} = 8,06e^{j81,74^\circ} \text{ Ом} = Z_{11} e^{j\Psi_{11}},
 \end{aligned}$$

де $\Psi_{11} = 81,74^\circ$ - кут зсуву ланцюга навантаження;

Додатковий кут

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \Psi_{11} = 90^\circ - 81,74^\circ = 8,26^\circ.$$

Модуль власної провідності

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{11}} = \frac{1}{8,06} = 0,12 \text{ См.}$$

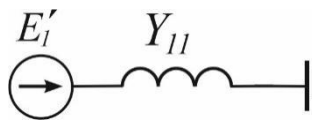


Рис. 3.4. Перетворена схема заміщення

Для визначення взаємної провідності станцій Ст1 і Ст2 складемо схему заміщення, замінивши “зірку” з опорами областей X_1, X_2, Z_H (рис. 3.3) еквівалентним “трикутником” з опорами гілок Z_{12}, Z_{13}, Z_{23} (рис. 3.5).

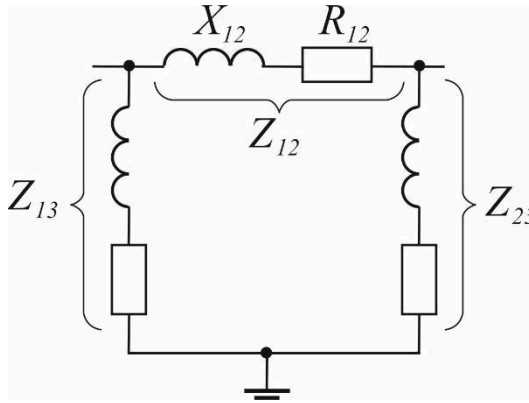


Рис. 3.5. Схема заміщення для визначення взаємної провідності станції Ст1

Визначаємо взаємний опір станцій Ст1 і Ст2

$$\begin{aligned}
 Z_{12} &= R_{12} + jX_{12} = jX'_{d1\Sigma^*} + jX'_{d2\Sigma^*} + \frac{jX'_{d1\Sigma^*} \cdot jX'_{d2\Sigma^*}}{R_H + jX_H} = \\
 &= j4,09 + j5,11 + \frac{j4,09 \cdot j5,11}{10,73 + j6,11} = j9,2 - \frac{20,9}{10,73 + j6,11} = \\
 &= j9,2 + j0,81 - 1,43 = -1,43 + j10,01 = 10,12e^{j81,87^\circ} \text{ Ом},
 \end{aligned}$$

де кут зсуву ланцюгу навантаження

$$\Psi_{12} = \arctg \frac{X_{12}}{R_{12}} = \arctg \frac{10,01}{1,43} = 81,87^\circ.$$

Додатковий кут

$$\alpha_{12} = 90^\circ - \Psi_{12} = 90^\circ - 81,87^\circ = 8,13^\circ.$$

Модуль взаємної провідності

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{1}{10,12} = 0,1 \text{ См.}$$

Межа переданої потужності

$$\begin{aligned}
 P_{np} &= \left(E'_{1*}\right)^2 \cdot Y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E'_{1*} \cdot E'_{2*} \cdot Y_{12} = \\
 &= 1,13^2 \cdot 0,12 \cdot \sin 8,26^\circ + 1,13 \cdot 1,17 \cdot 0,1 = 0,022 + 0,12 = 0,122
 \end{aligned}$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості системи

$$K_3 = \frac{P_{np} - P_{0*}}{P_{0*}} = \frac{0,122 - 0,05}{0,05} = 1,44,$$

або $K_3 = 144\%$.

Висновок: дійсна межа потужності менше ідеальної.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4

Тема: Дослідження статичної стійкості комплексного навантаження

Завдання

Електрична система містить станцію С і комплексне навантаження КН (рис. 4.1). Статичні характеристики комплексного навантаження $P_* = (U_*)$ дані в табл. 11.1. Опір зв'язку $X_c = 0,8$. Активна $P_{н0}$ і реактивна $Q_{н0}$ потужності навантаження при напрузі на шинах навантаження, рівному номінальному: $P_{н0} = 0,9$; $Q_{н0} = 0,7$. Коефіцієнт потужності навантаження $tg_{н} = 0,89$.

Потрібно визначити коефіцієнт запасу статичної стійкості комплексного навантаження по напрузі у двох випадках:

- а) у вузлу навантаження відсутні батареї конденсаторів БК;
- б) у вузлу навантаження є батареї конденсаторів БК, що здійснюють компенсацію реактивної потужності до $tg_e = 0,35$.

Для оцінки статичної стійкості КН використовувати практичні критерії $\partial E_e / \partial U$ і $\partial Q_e / \partial E_e$, де E_e - ЕРС еквівалентного генератора станції; U - напруга на шинах навантаження; Q_e - реактивна потужність, видавана еквівалентним генератором.

Таблиця 4.1. Статичні характеристики КН

U_* , в.о.	P_* , в.о.	Q_* , в.о.	U_* , в.о.	P_* , в.о.	Q_* , в.о.
1,0	1,0	1,0	0,8	0,89	0,84
0,9	0,94	0,89	0,7	0,85	0,88

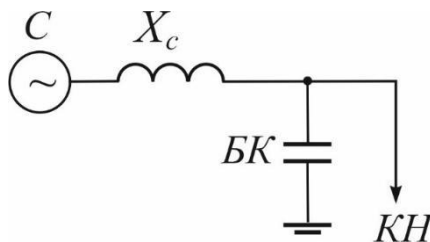


Рис. 4.1. Схема досліджуваної системи

Рішення

а) У вузлу навантаження відсутні батареї конденсаторів БК.

Задаємося напругою на шинах вузла навантаження $U_{1*} = U_{н} = 1$.

Значення активної й реактивної потужності, споживаним навантаженням при заданій напрузі на шинах навантаження, рівні відповідно

$$P_{н1} = P_{н0} \cdot P_* = 0,9 \cdot 1 = 0,9,$$

$$\text{і } Q_{н1} = Q_{н0} \cdot Q_* = 0,7 \cdot 1 = 0,7.$$

Значення ЕРС еквівалентного генератора

$$E_{e1} = \sqrt{\left(U_{1*} + \frac{Q_{н1} \cdot X_c}{U_{1*}}\right)^2 + \left(\frac{P_{н1} \cdot X_c}{U_{1*}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + \frac{0,7 \cdot 0,8}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,9 \cdot 0,8}{1}\right)^2} = 1,72.$$

Втрати реактивної потужності в ланцюзі зв'язку

$$\Delta Q_1 = \frac{(P_{н1}^2 + Q_{н1}^2) X_c}{U_{1*}^2} = \frac{(0,9^2 + 0,7^2) \cdot 0,8}{1} = 1,04$$

Реактивна потужність, видавана еквівалентним генератором,

$$Q_{e1} = Q_{н1} + \Delta Q_1 = 0,7 + 1,04 = 1,74.$$

Результати розрахунків для інших заданих значень напруги:

$$\text{при } U_* = 0,9 \quad E_e = 1,67; \quad Q_{e1} = 1,703;$$

$$\text{при } U_* = 0,8 \quad E_e = 1,616; \quad Q_{e1} = 1,84;$$

$$\text{при } U_* = 0,7 \quad E_e = 1,66; \quad Q_{e1} = 2,2.$$

За результатами розрахунків будемо залежності $E_e = (U_*)$ і

$Q_{e1} = (E_e)$ (рис. 4.2 і 4.3, крива 1) і по них за допомогою практичних критеріїв $\partial E_e / \partial U$ і $\partial Q_e / \partial E_e$ визначимо критичну напругу на шинах навантаження $U_{кр1} = 0,8$ і критичну ЕРС $E_{кр1} = 1,62$, при яких відбувається порушення стійкості навантаження, а також коефіцієнт запасу стійкості.

Коефіцієнт запасу статичної стійкості КН по напрузі

$$K_3 = \frac{U_n - U_{кр1}}{U_n} = \frac{1 - 0,8}{1} = 0,2,$$

або $K_3 = 20\%$.

б) У вузлу навантаження є батареї конденсаторів БК.

Потужність БК, яку необхідно встановити у вузлу навантаження, щоб коефіцієнт $\text{tg}\varphi_e = 0,35$,

$$Q_{\text{БК}} = P_{\text{н0}}(\text{tg}\varphi_{\text{н}} - \text{tg}\varphi_e) = 0,9 \cdot (0,8 - 0,35) = 0,405.$$

Опір БК

$$X_{\text{БК}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Q_{\text{БК}}} = \frac{1^2}{0,405} = 2,47.$$

Задаємося напругою на шинах вузла навантаження

$$U_{1*} = U_{\text{н}} = 1$$

Значення активної й реактивної потужності, споживаним навантаженням при заданій напрузі на шинах навантаження,

$$\begin{aligned} P_{\text{н1}} &= P_{\text{н0}} \cdot P_* = 0,9 \cdot 1 = 0,9, \\ \text{і} \quad Q_{\text{н1}} &= Q_{\text{н0}} \cdot Q_* = 0,7 \cdot 1 = 0,7. \end{aligned}$$

Реактивна потужність, видавана БК,

$$Q_{\text{БК}} = \frac{U_1^2}{X_{\text{БК}}} = \frac{1^2}{2,47} = 0,405.$$

Реактивна потужність, що надходить у вузол навантаження,

$$Q_1 = Q_{\text{н1}} - Q_{\text{БК}} = 0,7 - 0,405 = 0,295.$$

Значення ЕРС еквівалентного генератора

$$\begin{aligned} E_{e1} &= \sqrt{\left(U_{1*} + \frac{Q_1 \cdot X_c}{U_{1*}}\right)^2 + \left(\frac{P_{\text{н1}} \cdot X_c}{U_{1*}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,295 \cdot 0,8}{1}\right)^2 + \left(\frac{0,9 \cdot 0,8}{1}\right)^2} = 1,43. \end{aligned}$$

Втрати реактивної потужності в ланцюзі зв'язку

$$\Delta Q_1 = \frac{(P_{\text{н1}}^2 + Q_1^2)X_c}{U_{1*}^2} = \frac{(0,9^2 + 0,295^2) \cdot 0,8}{1} = 0,72$$

Еквівалентна реактивна потужність

$$Q_{e1} = Q_1 + \Delta Q_1 = 0,295 + 0,72 = 1,02.$$

Результати розрахунків для інших заданих значень напруги на шинах навантаження представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Результати розрахунків параметрів системи із БК

U_*	q	E_e	Q	Q_e
1	0,295	1,43	0,72	1,12
0,9	0,296	1,32	0,79	1,09
0,8	0,328	1,38	0,93	1,26
0,7	0,418	1,47	1,24	1,66

За отриманими результатами розрахунків будуємо залежності $E_e = (U_*)$ і $Q_e = (E_e)$ (рис. 4.2 і 4.3, крива 2) і по них за допомогою практичних критеріїв $\partial E_e / \partial U$ і $\partial Q_e / \partial E_e$ визначимо критичну напругу $U_{кр2} = 0,9$ і критичну ЕРС $E_{кр2} = 1,32$, а також коефіцієнт запасу K_3 :

$$K_3 = \frac{U_H - U_{кр2}}{U_H} = \frac{1 - 0,9}{1} = 0,1,$$

або $K_3 = 10\%$.

Висновок: наявність батареї конденсаторів БК у вузлу навантаження погіршує статичну стійкість вузла.

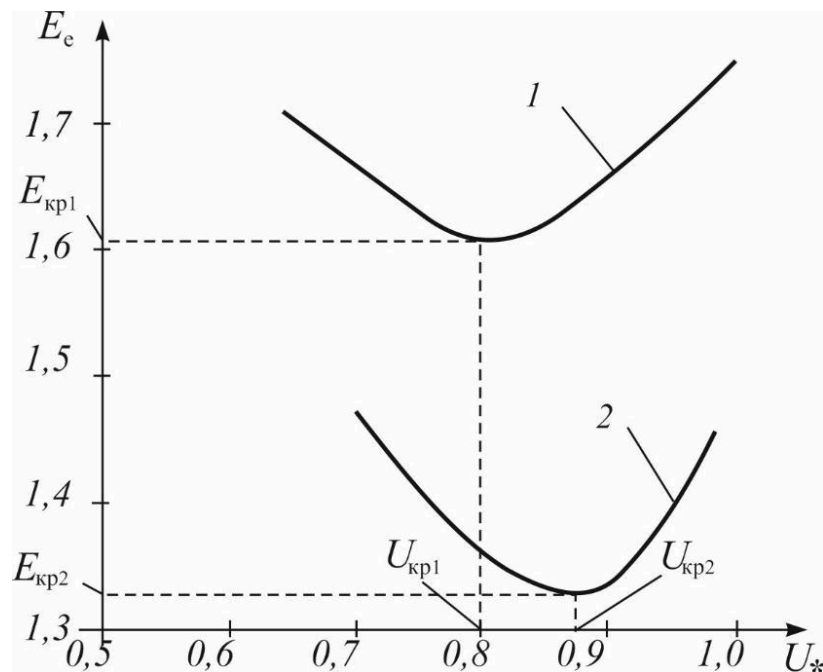


Рис. 4.2 Залежності $E_e = (U_*)$

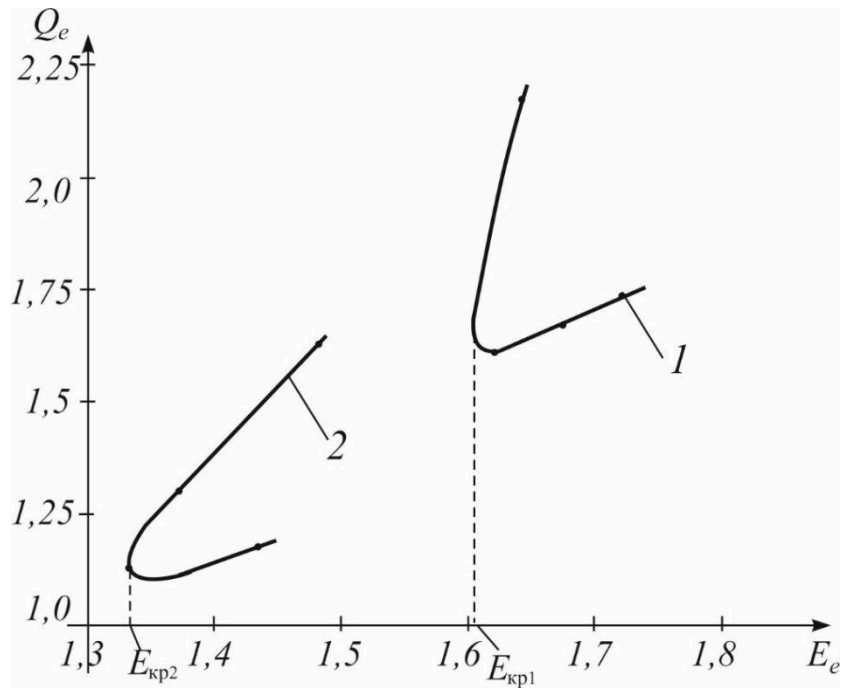


Рис. 4.3 Залежності $Q_e = (E_e)$

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №5

Тема: Дослідження динамічної стійкості. Двофазне коротке замикання на землю

Завдання

Знайти граничний кут відключення короткого замикання $\delta_{\text{від.гр.}}$ для двох випадків: а) на лінії Л у точці К виникало двофазне коротке замикання на землю (рис. 5.1); б) на лінії Л у точці К виникало трифазне коротке замикання (рис. 5.1). При визначенні граничного часу відключення $t_{\text{гр}}$ не враховувати електромагнітні перехідні процеси в обмотці збудження генератора й дії АРВ.

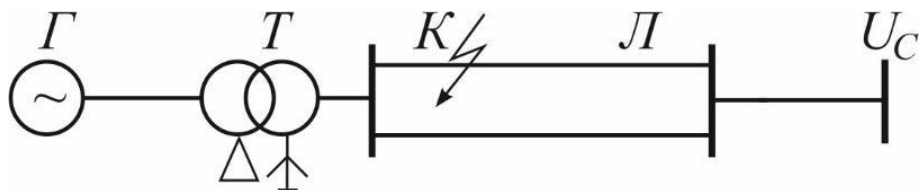


Рис. 5.1. Схема досліджуваної електричної системи

Початкові дані:

генератор Г: $S_H = 250 \text{ МВА}$; $U_H = 10,5 \text{ кВ}$; $X_{d1} = 1,8 \text{ Ом}$;
 $\cos \varphi = 0,8$; $X'_d = 0,28 \text{ Ом}$; $X_{2Г} = 0,23 \text{ Ом}$, постійна інерції $T_{jГ} = 11 \text{ с}$,
постійна обмотки збудження $T_{d0} = 6,5 \text{ с}$, постійна часу регулятора $T_e = 1 \text{ с}$.

трансформатор Т: $S_H = 250 \text{ МВА}$, $U_{ВН} = 220 \text{ кВ}$, $U_{НН} = 10,5 \text{ кВ}$,
напруга КЗ $U_K = 11 \%$;

лінія Л: довжина $l = 240 \text{ км}$, опір прямої послідовності
 $X_1 = 0,45 \text{ Ом/км}$, нульової послідовності $X_0 = 3X_1$, напруга системи
 $U_c = 230 \text{ кВ}$;

режим: передана потужність $P_0 = 200 \text{ МВт}$, $\cos = 0,85$.

Рішення

Розрахунки елементів проводимо в системі відносних одиниць.
Прийmemo $S_6 = 1000 \text{ МВА}$ і базисні напруги рівними середнім номінальним
 $U_{\text{ср.ном}}$. Опори елементів схеми заміщення (рис. 5.2):

генератора:

$$X_{d*} = X_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 1,8 \cdot \frac{1000}{250} = 7,2;$$
$$X'_{d*} = X'_d \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,28 \cdot \frac{1000}{250} = 1,12;$$
$$X_{2*} = X_{2Г} \cdot \frac{S_6}{S_H} = 0,23 \cdot \frac{1000}{250} = 0,92.$$

трансформатора Т:

$$X_{T*} = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,44.$$

лінії Л:

$$\text{прямої послідовності } X_{л1*} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = 0,45 \cdot 240 \cdot \frac{1000}{230^2} = 2,04.$$

Нульової

$$X_{л0*} = 3X_{л1*} = 3 \cdot 2,04 = 6,12.$$

Постійна інерції

$$T_{j*} = X_{2Г} \cdot \frac{S_H}{S_6} = 11 \cdot \frac{250}{1000} = 2,75 \text{ с}.$$

Передана потужність:

$$P_{0*} = \frac{P_0}{S_6} = \frac{200}{1000} = 0,2;$$

$$Q_{0*} = \frac{Q_0}{S_6} = \frac{124}{1000} = 0,124,$$

$$\text{де } Q_0 = P_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 = 200 \cdot 0,62 = 124 \text{ МВАр.}$$

Напруга системи

$$U_{C*} = \frac{U_c}{U_{\text{ср.ном.}}} = \frac{230}{230} = 1.$$

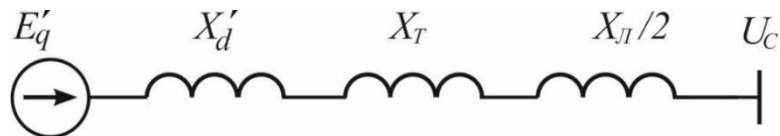


Рис. 5.2. Схема заміщення досліджуваної системи для нормального режиму

а) **Двофазне коротке замикання на землю в точці К.**

Власна реактивність системи для нормального режиму (рис.5.2)

$$X_{11}^I = X_{d*}' = X_{d*}' + X_{T*}' + 0,5X_{L*}' = 1,12 + 0,44 + 1,07 = 2,63;$$

$$X_{d*} = X_{d*}' + X_{T*}' + 0,5X_{L*}' = 7,2 + 0,44 + 1,07 = 8,71.$$

Власна провідність системи для нормального режиму

$$Y_{11}^I = \frac{1}{X_{11}^I} = \frac{1}{2,63} = 0,38.$$

Взаємна провідність системи для радіальної галузей дорівнює власній провідності, тому $Y_{12}^I = Y_{11}^I = 0,38$.

Перехідна ЕРС генератора

$$\begin{aligned} E_*' &= \sqrt{\left(U_{C*}' + \frac{Q_{0*}' X_{d*}'}{U_{C*}'} \right)^2 + \left(\frac{P_{0*}' X_{d*}'}{U_{C*}'} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,124 \cdot 2,63}{1} \right)^2 + \left(\frac{0,2 \cdot 2,63}{1} \right)^2} = 1,43. \end{aligned}$$

Початкові кути:

$$\delta_0' = \arctg \frac{P_{0*}' X_{d*}'}{U_{C*}'^2 + Q_{0*}' X_{d*}'} = \arctg \frac{0,2 \cdot 2,63}{1 + 0,124 \cdot 2,63} = 21,6^\circ.$$

$$\delta_0^I = \arctg \frac{P_{0*}' X_{d*}'}{U_{C*}'^2 + Q_{0*}' X_{d*}'} = \arctg \frac{0,2 \cdot 8,71}{1 + 0,124 \cdot 8,71} = 41,2^\circ.$$

Поперечна складова перехідний ЕРС

$$E'_{q^*} = E'_* \cos(\delta_0^I - \delta_0^I) = 1,43 \cos(41,2^\circ - 21,6^\circ) = 1,35.$$

Межа переданої потужності в нормальному режимі

$$P_m^I = E'_{q^*} U_c Y_{12}^I = 1,35 \cdot 1 \cdot 0,38 = 0,51.$$

Розглянемо післяаварійний режим системи, коли одна лінія відключена (рис. 5.3).

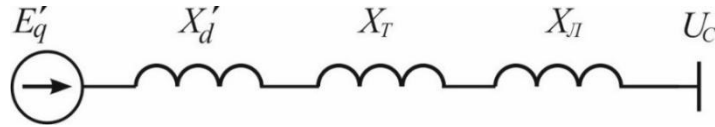


Рис. 5.3. Схема заміщення досліджуваної системи для післяаварійного режиму

Власна реактивність системи для післяаварійного режиму

$$X_{11}^{II} = X'_{d^*} = X'_{d^*} + X_{T^*} + X_{L^*} = 1,12 + 0,44 + 2,04 = 3,7;$$

Власна провідність

$$Y_{11}^{II} = \frac{1}{X_{11}^{II}} = \frac{1}{3,7} = 0,27.$$

Взаємна провідність $Y_{12}^{II} = Y_{11}^{II} = 0,27.$

Межа переданої потужності в післяаварійному режимі

$$P_m^{II} = E'_{q^*} U_c Y_{12}^{II} = 1,35 \cdot 1 \cdot 0,27 = 0,365.$$

Розглянемо аварійний режим (рис. 4.4).

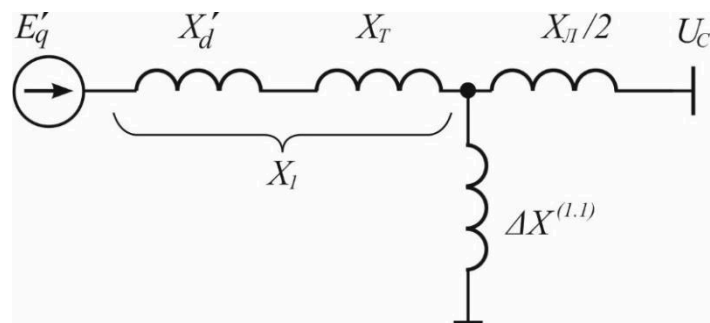


Рис. 5.4. Схема заміщення досліджуваної системи для аварійного режиму

Опір зворотної послідовності (рис. 5.5)

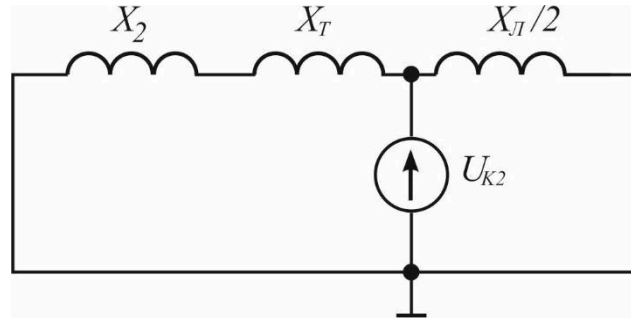


Рис. 5.5. Схема заміщення зворотної послідовності

$$X_{2*} = \frac{(X_{2*} + X_{T*}) \cdot 0,5X_{L*}}{X_{2*} + X_{T*} + 0,5X_{L*}} = \frac{(0,92 + 0,44) \cdot 1,07}{0,92 + 0,44 + 1,07} = 0,392.$$

Опір нульової послідовності (рис. 5.6)

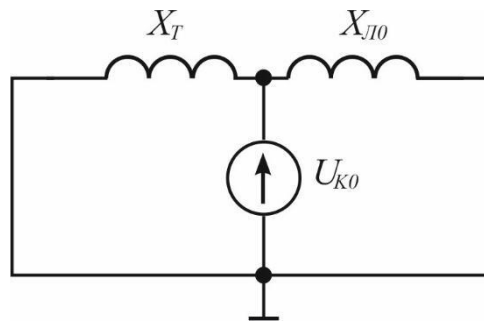


Рис. 5.6. Схема заміщення нульової послідовності

$$X_{0*} = \frac{X_{T*} \cdot 0,5X_{L*}}{X_{T*} + 0,5X_{L*}} = \frac{0,44 \cdot 1,07}{0,44 + 1,07} = 0,38.$$

Додатковий опір

$$\Delta X^{(1,1)} = \frac{X_{2*} \cdot X_{0*}}{X_{2*} + X_{0*}} = \frac{0,392 \cdot 0,38}{0,392 + 0,38} = 0,19.$$

Для визначення взаємної реактивності для аварійного режиму складемо схему заміщення, замінивши “зірку” з опоромі галузей X_1 , $X_L/2$ і $X^{(1,1)}$ (рис. 5.4) в еквівалентний “трикутник” з опоромі галузей Z_{12} , Z_{13} , Z_{23} (рис. 5.7).

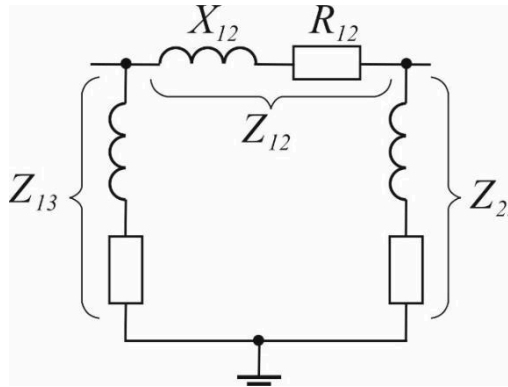


Рис. 5.7. Схема заміщення для визначення взаємної провідності

Взаємна реактивність для аварійного режиму

$$X_{12}^{III} = X_{d^*}' + X_{T^*} + 0,5X_{L^*} + \frac{(X_{d^*}' + X_{T^*}) \cdot 0,5X_{L^*}}{\Delta X^{(1.1)}} =$$

$$= 1,12 + 0,44 + 1,07 + \frac{1,56 \cdot 1,07}{0,19} = 11,41.$$

Взаємна провідність для аварійного режиму

$$Y_{12}^{III} = \frac{1}{X_{12}^{III}} = \frac{1}{11,41} = 0,09.$$

Межа переданої потужності в аварійному режимі

$$P_m^{III} = E_{q^*}' U_c^* Y_{12}^{III} = 1,35 \cdot 1 \cdot 0,09 = 0,122.$$

З умови рівності майданчиків прискорення $F_{\text{приск}}$ і можливого гальмування $F_{\text{м.гальм}}$ (рис. 5.8) визначається граничний кут відключення короткого замикання $\delta_{\text{від.гр}}$ по формулі

$$\cos \delta_{\text{від.гр}} = \frac{P_{0^*} \cos(\delta_{kp} - \delta_0) \frac{\pi}{180^0} + P_m^{II} \cos \delta_{kp} - P_m^{III} \cos \delta_0}{P_m^{II} - P_m^{III}} =$$

$$= \frac{0,2 \cdot (146,8^0 - 21,6^0) \cdot \frac{3,14}{180^0} + 0,365 \cos 146,8^0 - 0,122 \cos 21,6^0}{0,365 - 0,122} = 0,026,$$

де критичний кут

$$\delta_{kp} = 180^0 - \arcsin \frac{P_{0^*}}{P_m^{II}} = 180^0 - \arcsin \frac{0,2}{0,365} = 146,8^0.$$

Граничний кут відключення

$$\delta_{\text{від.гр}} = \arccos 0,026 = 88,51^0.$$

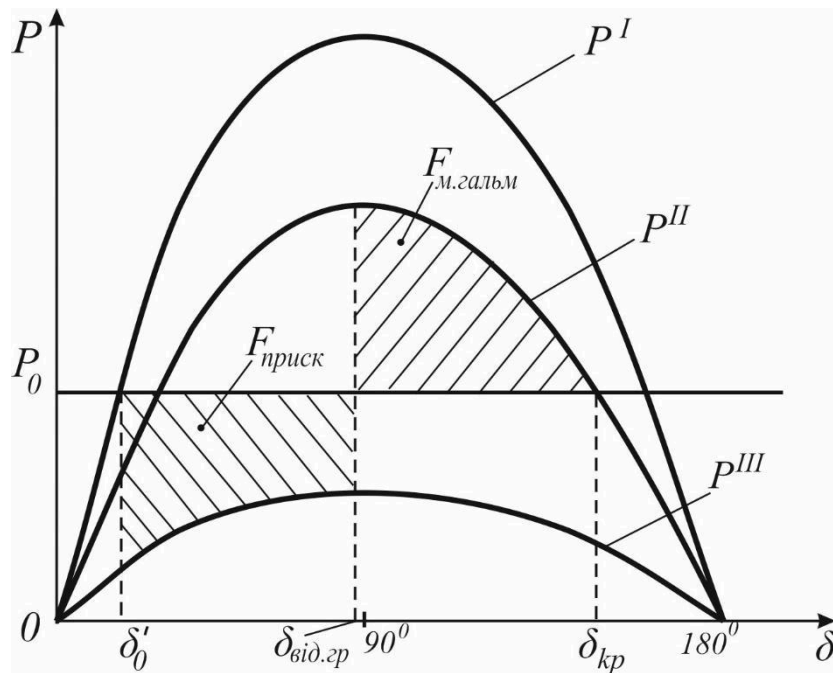


Рис. 5.8 Характеристика системи при КЗ

б) Трифазне коротке замикання в точці К.

Межа переданої потужності в аварійному режимі $P_m^{III} = 0$, підставимо значення цієї потужності у формулу граничного кута відключення. Одержимо

$$\begin{aligned} \cos \delta_{\text{від.гр}} &= \frac{P_0 \cos(\delta_{кр} - \delta'_0) \frac{\pi}{180^\circ} + P_m^{II} \cos \delta_{кр}}{P_m^{II}} = \\ &= \frac{0,2 \cdot (146,8^\circ - 21,6^\circ) \cdot \frac{3,14}{180^\circ} + 0,365 \cos 146,8^\circ}{0,365} = 0,298, \end{aligned}$$

Граничний кут відключення

$$\delta_{\text{від.гр}} = \arccos 0,298 = 72,7^\circ.$$

Висновок: граничний кут відключення при трифазному КЗ менше, чим граничний кут відключення при двофазному КЗ у тій же точці.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №6

Тема: *Метод послідовних інтервалів*

Завдання

У системі (рис. 6.1) відбувається двофазне коротке замикання на початку лінії.

Початкові дані:

перехідна ЕРС $E'_q = 1,4$; кут навантаження $\delta'_0 = 34^\circ$; кут $\delta'_0 = 34^\circ$; передана активна потужність $P_{0*} = 1,0$; передана реактивна потужність $Q_{0*} = 0,2$; постійна інерції $T_{j\Gamma} = 4$ с; власна провідність Y_{11} рівна взаємній Y_{12} провідності для нормального й післяаварійного режимів $Y_{12}^I = Y_{11}^I = 1,28$; $Y_{12}^{II} = Y_{11}^{II} = 0,98$; взаємна провідність для аварійного режиму $Y_{11}^{III} = 0,63$; додаткові кути для всіх режимів дорівнюють нулю; напруга системи $U_{C*} = 1,0$.

Потрібно розрахувати динамічний перехід і знайти максимальний кут хитань δ'_m . Побудувати кутові характеристики $P = \varphi_1(\delta)$ і залежність

$\delta' = \varphi(t)$. Тривалість КЗ - 0,1 с, потім - відключення КЗ, через 0,15 с - успішне АПВ. Розрахунки провести спрощено, прийнявши перехідну ЕРС E'_q незмінною.



Рис. 6.1. Схема досліджуваної система

Рішення

Передана потужність у нормальному режимі

$$P^I = E'_q U_{C*} Y_{12}^I \sin \delta' = 1,4 \cdot 1 \cdot 1,28 \cdot \sin \delta' = 1,792 \sin \delta'.$$

Передана потужність у післяаварійному режимі

$$P^{II} = E'_q U_{C*} Y_{12}^{II} \sin \delta' = 1,4 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot \sin \delta' = 1,372 \sin \delta'.$$

Передана потужність в аварійному режимі

$$P^{III} = E'_q U_{C*} Y_{12}^{III} \sin \delta' = 1,4 \cdot 1 \cdot 0,63 \cdot \sin \delta' = 0,88 \sin \delta'.$$

Величину розрахункового інтервалу прийmemo $\Delta t = 0,05$ с.

Коефіцієнт

$$K = \frac{360f\Delta t^2}{T_{jr}} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,5^2}{4} = 11,25.$$

Порядок розрахунків першого інтервалу

$t = 0 \div 0,05$ с (аварійний режим).

Електрична потужність, що віддається генератором у перший момент після виникнення КЗ

$$P_{(0)} = P_m^{III} \sin \delta'_0 = 0,88 \cdot \sin 34^\circ = 0,484.$$

Надлишок потужності, що діє протягом першого інтервалу часу

$$\Delta P_{(0)} = P_0 - P_{(0)} = 1 - 0,484 = 0,516.$$

Збільшення кута за перший інтервал

$$\Delta \delta'_{(1)} = \frac{K \Delta P_{(0)}}{2} = \frac{11,25 \cdot 0,516}{2} = 2,9^\circ.$$

Кут наприкінці першого або на початку другого інтервалу часу

$$\delta'_{(1)} = \delta'_0 + \Delta \delta'_{(1)} = 34^\circ + 2,9^\circ = 36,9^\circ.$$

Порядок розрахунків другого інтервалу

$t = 0,05 \div 0,1$ с (продовження аварійного режиму).

Потужність, що віддається генератором на початку другого інтервалу

$$P_{(1)} = P_m^{III} \sin \delta'_{(1)} = 0,88 \cdot \sin 36,9^\circ = 0,53.$$

Надлишок потужності, що діє протягом другого інтервалу часу

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_{(1)} = 1 - 0,53 = 0,47.$$

Збільшення кута

$$\Delta \delta'_{(2)} = \Delta \delta'_{(1)} + K \Delta P_{(1)} = 2,9^\circ + 11,25 \cdot 0,47 = 8,19^\circ.$$

Кут наприкінці другого або на початку третього інтервалу часу

$$\delta'_{(2)} = \delta'_{(1)} + \Delta \delta'_{(2)} = 36,9^\circ + 8,19^\circ = 45,09^\circ.$$

Порядок розрахунків третього інтервалу

$t = 0,1 \div 0,15$ с (післяаварійний режим).

Потужність, що віддається генератором на початку третього інтервалу,

$$P_{(2)} = P_{(2)}^I + P_{(2)}^{II} = 0,5 \left(P_m^{III} \sin \delta'_{(2)} + P_m^{II} \sin \delta'_{(2)} \right) = \\ = 0,5 \cdot (0,88 \cdot \sin 45,09^\circ + 1,37 \sin 45,09^\circ) = 1,57.$$

Надлишок потужності, що діє протягом третього інтервалу часу

$$\Delta P_{(2)} = P_0 - P_{(2)} = 1 - 1,57 = -0,57.$$

Збільшення кута

$$\Delta \delta'_{(3)} = \Delta \delta'_{(2)} + K \Delta P_{(2)} = 8,19^\circ - 11,25 \cdot 0,57 = 1,78^\circ.$$

Кут наприкінці третього або на початку четвертого інтервалу часу

$$\delta'_{(3)} = \delta'_{(2)} + \Delta \delta'_{(3)} = 45,09^\circ + 1,78^\circ = 46,87^\circ$$

Порядок розрахунків четвертого інтервалу

$t = 0,15 \div 0,2$ с (продовження післяаварійного режиму).

Потужність, що віддається генератором на початку четвертого інтервалу

$$P_{(3)} = P_m^{II} \sin \delta'_{(3)} = 1,37 \cdot \sin 46,87^\circ = 1,0.$$

Надлишок потужності, що діє протягом четвертого інтервалу часу

$$\Delta P_{(3)} = P_0 - P_{(3)} = 1,0 - 1,0 = 0.$$

Збільшення кута

$$\Delta \delta'_{(4)} = \Delta \delta'_{(3)} + K \Delta P_{(3)} = 1,78^\circ + 11,25 \cdot 0 = 1,78^\circ.$$

Кут наприкінці четвертого або на початку п'ятого інтервалу часу

$$\delta'_{(4)} = \delta'_{(3)} + \Delta \delta'_{(4)} = 46,87^\circ + 1,78^\circ = 48,65^\circ$$

Порядок розрахунків п'ятого інтервалу

$t = 0,2 \div 0,25$ с (продовження післяаварійного режиму).

Потужність, що віддається генератором на початку п'ятого інтервалу

$$P_{(4)} = P_m^{II} \sin \delta'_{(4)} = 1,37 \cdot \sin 48,65^\circ = 1,03.$$

Надлишок потужності, що діє протягом п'ятого інтервалу

$$\Delta P_{(4)} = P_0 - P_{(4)} = 1,0 - 1,03 = -0,03.$$

Збільшення кута

$$\Delta\delta'_{(5)} = \Delta\delta'_{(4)} + K\Delta P_{(4)} = 1,78^0 - 11,25 \cdot 0,03 = 1,44^0.$$

Кут наприкінці п'ятого або на початку шостого інтервалу часу

$$\delta'_{(5)} = \delta'_{(4)} + \Delta\delta'_{(5)} = 48,65^0 + 1,44^0 = 50,09^0$$

Порядок розрахунків шостого інтервалу

$t = 0,25 \div 0,3$ с (успішне АПВ).

Потужність, що віддається генератором на початку шостого інтервалу

$$P_{(5)}^I = P_m^I \sin\delta'_{(5)} = 1,79 \cdot \sin 50,09^0 = 1,37.$$

$$P_{(5)}^{II} = P_m^{II} \sin\delta'_{(5)} = 1,37 \cdot \sin 50,09^0 = 1,05.$$

$$P_{(5)} = 0,5 \cdot (P_{(5)}^I + P_{(5)}^{II}) = 0,5 \cdot (1,37 + 1,05) = 1,21.$$

Надлишок потужності, що діє протягом шостого інтервалу

$$\Delta P_{(5)} = P_0 - P_{(5)} = 1,0 - 1,21 = -0,21.$$

Збільшення кута

$$\Delta\delta'_{(6)} = \Delta\delta'_{(5)} + K\Delta P_{(5)} = 1,44^0 - 11,25 \cdot 0,21 = -0,92^0.$$

Кут наприкінці шостого або на початку сьомого інтервалу часу

$$\delta'_{(6)} = \delta'_{(5)} + \Delta\delta'_{(6)} = 50,09^0 - 0,92^0 = 49,17^0$$

Висновок: кут почав зменшуватися, значить система динамічно стійка.

Таким чином, максимальний кут хитань $\delta'_m = 50,09^0$.

За результатами розрахунків побудована залежність $\delta' = \varphi(t)$ (рис. 6.2) і кутові характеристики $P = \varphi_1(\delta)$ (рис. 6.3).

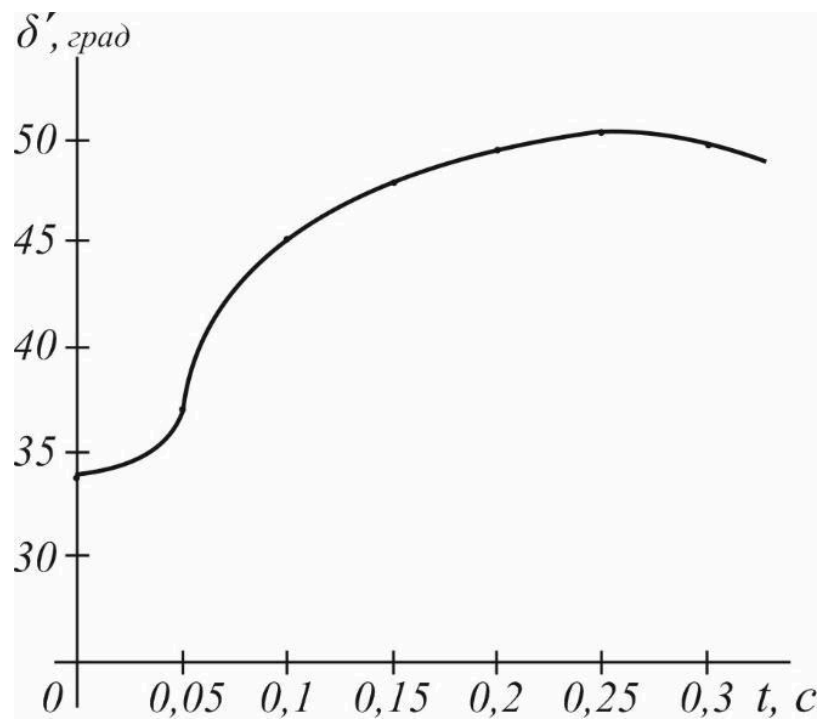


Рис. 6.2. Залежність $\delta' = \phi(t)$

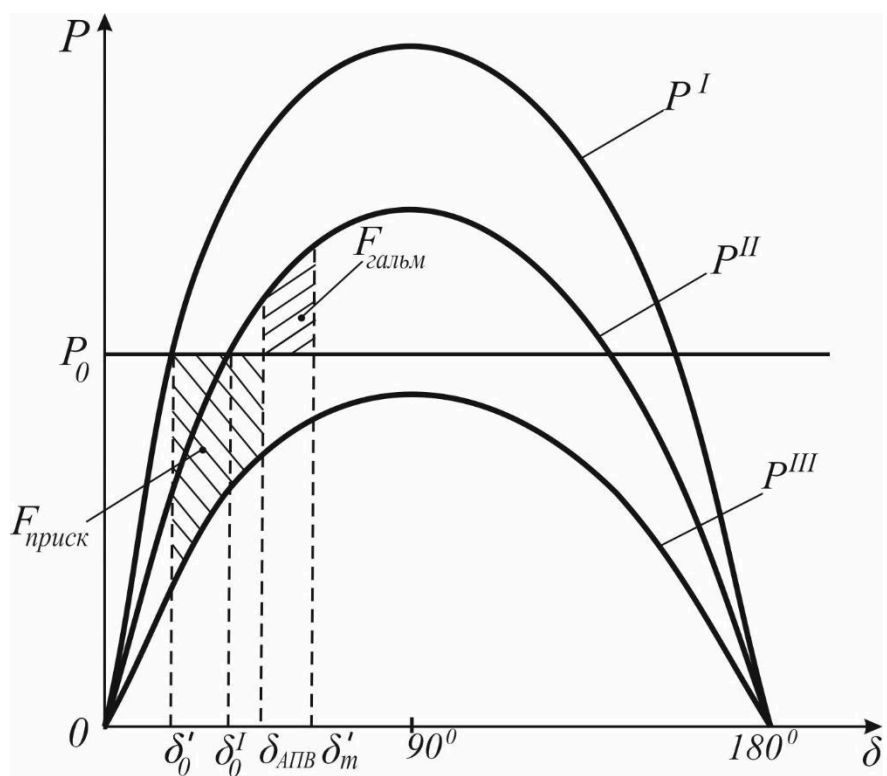


Рис. 6.3 Кутіві характеристики потужності

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №7

Тема: Статична стійкість у вузлах навантаження. Стійкість
одиначного асинхронного електродвигуна

Завдання

Асинхронний двигун АД підключений до шин незмінної напруги U (рис. 7.1). Параметри АД в відносних одиницях: опір розсіювання $X_s = 0,25$; опір намагнічування $X_\mu = 4,1$; активний опір $R_2 = 0,012$; споживана потужність $P_0 = 1$ при напрузі $U=1$ і $\cos\varphi = 0,89$.

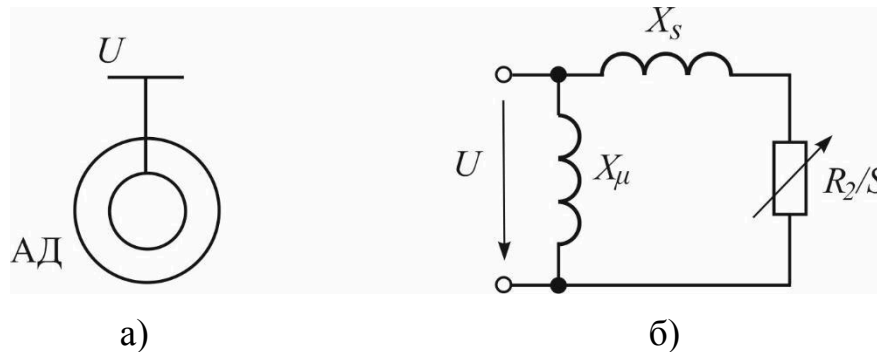


Рис.7.1. Досліджувана схема (а); схема заміщення (б)

Потрібно визначити коефіцієнти запасу статичної стійкості асинхронного двигуна АД по ковзанню, напрузі й потужності, побудувати характеристику потужності двигуна.

Рішення

Критичне ковзання АД

$$S_{kp} = \frac{R_2}{X_s} = \frac{0,012}{0,25} = 0,048 = 4,8\%.$$

Максимальна потужність

$$P_m = \frac{U^2}{2X_s} = \frac{1^2}{0,5} = 2.$$

Критична напруга

$$U_{kp} = \sqrt{2P_0 X_s} = \sqrt{2 \cdot 1 \cdot 0,25} = 0,707.$$

Потужність, що намагнічує

$$Q_\mu = \frac{U^2}{X_\mu} = \frac{1^2}{4,1} = 0,243.$$

Потужність розсіювання

$$Q_s = \frac{U^2 S^2 X_s}{R_2^2 + (X_s S)^2} = \frac{1^2 \cdot 0,0125^2 \cdot 0,25}{0,012^2 + (0,25 \cdot 0,0125)^2} = 0,253.$$

Споживана АД реактивна потужність

$$Q = Q_\mu + Q_s = 0,243 + 0,253 = 0,496.$$

Робоче ковзання АД визначаємо зі співвідношення

$$P_0 = \frac{U^2 R_2 S_0}{R_2^2 + X_s^2 S_0^2},$$

або

$$1 = \frac{1^2 \cdot 0,012 \cdot S_0}{0,012^2 + 0,25^2 \cdot S_0^2}.$$

Після перетворення отримаємо

$$S_0^2 - 0,192 \cdot S_0 + 0,0023 = 0$$

Розв'яжемо квадратне рівняння щодо ковзання S_0 .

Одержимо корні

$$S_{01,2} = \frac{0,192 \pm 0,167}{2};$$

$$S_{01} = 0,0125 (1,25\%) \quad \text{і} \quad S_{02} = 0,179 (17,9\%).$$

Ковзання S_{02} відповідає роботі АД на нестійкій частині моментної характеристики (рис. 7.2) і тому враховуємо S_{01} .

Коефіцієнт запасу статичної стійкості АД по ковзанню

$$K_{3S} = \frac{S_{kp} - S_{01}}{S_{01}} = \frac{4,8 - 1,25}{1,25} = 2,84 (284\%).$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості АД по напрузі

$$K_{3U} = \frac{U_0 - U_{kp}}{U_0} = \frac{1 - 0,707}{1} = 0,293 (29,3\%).$$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості АД по потужності

$$K_{3P} = \frac{P_m - P_0}{P_0} = \frac{2 - 1}{1} = 1 (100\%).$$

По результатам розрахунків побудована характеристика потужності двигуна (рис. 7.2) у функції ковзання S .

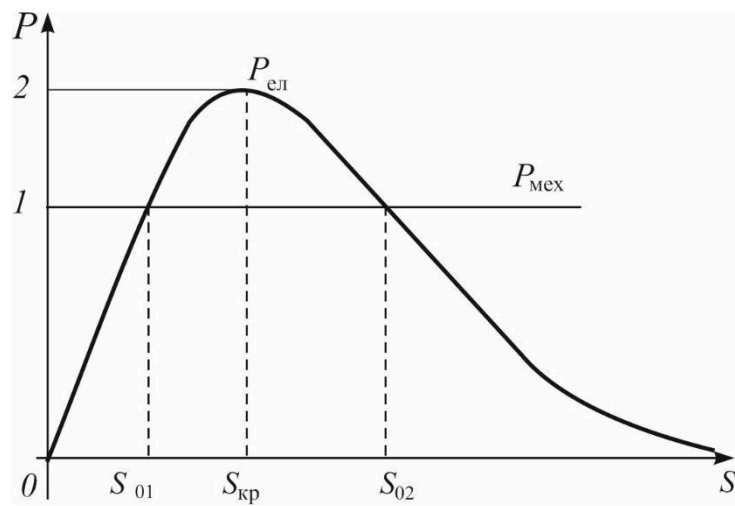


Рис. 7.2. Залежність спожитої потужності АД від ковзання

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен / За ред. Г.Г. Півняка.- Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000.- 597 с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1985. — 536 с.
3. Гуревич О. Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А. А. Окин. — М.: Энерго-атомиздат, 1990. — 390 с.
4. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. — М.: Энергия, 1979. — 455 с.
5. Шабад В. К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В. К. Шабад. - М. : Издательский центр «Академия», 2013. - 192 с.
6. Гамазин СИ., Ставцев В. А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой.- М.: Изд-во МЭИ , 1997.-424 с.
7. Калентионик Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е.В. Калентионик. — Минск: Техноперспектива, 2008. — 375 с.

