МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Збірник завдань та методичні вказівки
по курсу “Перехідні процеси в електроенергетиці ” для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

КРОПИВНИЦЬКИЙ
2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Збірник завдань та методичні вказівки
по курсу “Перехідні процеси в електроенергетиці ” для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

Ухвалено на засіданні кафедри
електротехнічних систем та
енергетичного менеджменту
Протокол № 4 від 17.10.2018 р.

КРОПИВНИЦЬКИЙ
2018

Збірник завдань та методичні вказівки по курсу “Перехідні процеси в електроенергетиці ” для студентів спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Укл.: І.О. Переверзєв, І.В. Савеленко – Кропивницький: ЦНТУ, 2018 – 117 с.

Укладачі: І.О. Переверзєв– доцент, кандидат технічних наук
І.В. Савеленко – ст. викл., кандидат технічних наук

ТЕМА 1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1. Зміст

Основні визначення і поняття. Види електромеханічних перехідних процесів. Основні допущення, які приймають при аналізі. Схеми заміщення основних елементів. Структурні схеми системи. Характеристики режимів електричної системи і задачі розрахунків перехідних електромеханічних характеристик. Математичні методи дослідження перехідних електромеханічних процесів і аналіз режимів електричних систем.[1, розділ 11].

1.2. Загальні рекомендації

Методика вивчення електромеханічних перехідних процесів обумовлюється характером зовнішніх збурень, в результаті винекнення яких ці процеси протікають.В [1] запропонована наступна класифікація електромеханічних перехідних процесів:

перша група — перехідні процеси при малих відхиленнях потужності і невеликій зміні швидкості обертання роторів електричних машин; дослідження перехідних процесів цієї групи дозволяє судити про стійкість при малих збуреннях, тобто про статичну стійкість електричних систем і вузлів навантаження;

друга група — перехідні процеси при великих змінах потужності і невеликих змінах швидкості; дослідження перехідних процесів другої групи дозволяє вирішити питання про те, чи буде стійка система при якому-небудь великому збуренні, наприклад при короткому замиканні, тобто про динамічну стійкість;

третя група — перехідні процеси при великих відхиленнях потужності і великих змінах швидкості; дослідження цих перехідних

процесів дозволяє дізнатись, чи буде відновлена синхронна робота після випадіння із синхронізму і короткочасного асинхронного ходу окремої електростанції або частини електричної системи, тобто судити про результуючу стійкість.

На стійкість системи впливають постійні інерції генераторів станцій, зміна частоти в системі і перехідні електромеханічні процеси в генераторах. Врахування цих факторів, дещо дозволяє розширити можливості забезпечення стійкості, але ускладнює її аналітичне дослідження. В зв'язку з тим, що вплив цих уточнень незначний, то практично можна виконувати розрахунки спрощеними методами.

1.3. Рівняння руху роторів електричних машин і форми його запису

Незалежно від виду досліджуваних електромеханічних перехідних процесів в систему рівнянь, які їх описують в тому чи іншому вигляді входять рівняння руху роторів і рівняння електромагнітної потужності електричних машин.

Для синхронних машин рівняння електромагнітної потужності визначають так звані кутові характеристики, для асинхронних двигунів — механічні характеристики.

Ряд вельми важливих положень теорії стійкості електричних систем і вузлів навантаження отримані на основі співвідношень, які витікають з векторних діаграм синхронних генераторів.

В загальному вигляді рівняння руху ротора любої електричної машини можна записати так:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = M_Г - M_O \qquad (1.1)$$

де ω — кутова швидкість ротора; T_j — момент інерції;

$M_Г$ — обертаючий момент генератора; $M_О$ — гальмівний момент опору.

При дослідженні електромеханічних перехідних процесів рівняння , як правило, записуються в системі відносних одиниць. За базисний час t_δ приймають час, протягом якого ротор, який обертається з синхронною швидкістю ω_o, повернеться на 1 рад. За базисне значення швидкості приймають синхронну швидкість. В цьому випадку при розглядуванні задач статичної стійкості, тобто при вивченні перехідних процесів, які протікають при невеликих змінах швидкості, можна (з достатньою для інженерних задач точністю) вважати, що $P_* = M_*$.

В задачах дослідження стійкості найбільше застосування отримали наступні форми запису рівняння руху синхронних генераторів:

Вид запису рівняння	Одиниця величини			
	δ	t	T_j	$P_{ел}, P_T$
$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_{EЛ}$ (1.2)	Рад	С	с	відн.од.
$\frac{T_j}{360 \cdot f_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_{EЛ}$ (1.3)	ел.град	С	с	відн.од.
$\frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_{EЛ}$ (1.4)	Рад	С	с	відн.од.

В рівняннях (1.2) — (1.4) **δ** — кут між ЕРС генератора і деякою віссю, яка обертається з синхронною швидкістю і прийнята за вісь відліку кутів; **t** — час; P_T — потужність парової або гідравлічної турбіни; $P_{ЕЛ}$ — активна потужність, яка видається генератором.

Для синхронних двигунів в правій частині рівнянь (1.2) — (1.4) буде вираз $(P_{ЕЛ} - P_{ГАЛЬМ})$, де $P_{ЕЛ}$ — електрична потужність, яка споживається двигуном з мережі; $P_{ГАЛЬМ}$ — потужність, яка визначається гальмівним момнентом привідного механізму.

Рівняння (1.2) найчастіше використовується в розрахунках статичної стійкості без урахування АРЗ і в дослідженнях динамічної стійкості за допомогою метода площин, рівняння (1.3) — при розрахунках динамічної стійкості різними методами числового інтегрування диференційних рівнянь, рівняння (1.4) — при аналізі статичної стійкості з урахуванням АРЗ.

В якості змінних, що характеризують рух ротора асинхронних двигунів, розглядаються або кутова швидкість **ω**, або ковзання **s**. Рівняння руху при цьому мають наступний вигляд, в.о.:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = P_{ЕЛ} - P_{ГАЛЬМ} \qquad (1.5)$$

$$-T_j \frac{ds}{dt} = P_{ЕЛ} - P_{ГАЛЬМ} \qquad (1.6)$$

Перехід від одних форм запису рівнянь руху до інших здійснюється на основі наступних співвідношень:

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad ; \quad s_* = 1 - \omega_*; \quad t_{(рад)} = \omega_0 \cdot t_{(с)};$$

$$\delta_{(рад)} = \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot \delta_{(ЕЛ.ГРАД.)}; \quad \omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$$

Слід мати на увазі, що рівняння (1.2) — (1.4) є спрощеними. В лівій частині цих рівнянь відсутній вираз $P\Big/(1 + \frac{d\omega}{dt}\frac{1}{\omega_o})$, який показує вплив зміни частоти обертання на електромеханічні перехідні процеси. Запис рівнянь в спрощеній формі задовільняє основним інженерним

задачам. Але при більш детальному дослідженні процесів порушення стійкості необхідно контролювати ковзання і при $\left|\frac{d\delta \cdot 100}{dt \cdot \omega_o}\right|$>(1,5...3)% уточнити розрахунки.

1.4.Кутові характеристики синхронних генераторів

Під кутовою характеристикою одиночного синхронного генератора, що працює через деяку зовнішню схему (рис 1.1) на шини незмінної напруги, розуміють залежність $P_{ЕЛ} = f(\delta)$.

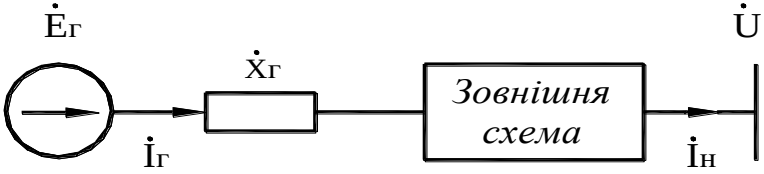


Рис. 1.1 Схема одиночного синхронного генератора

Якщо синхронний генератор представлений в схемі заміщення ковим опором $\overset{\circ}{X}_{Г}$ і еквівалентною ЕРС $\overset{\circ}{E}_{Г}$, вираз, для його кутової характеристики буде мати наступний вигляд:

$$P_{Г} = \frac{E_{Г}}{Z_{11}} \cdot \sin \alpha_{11} + \frac{E_{Г} \cdot U}{Z_{12}} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}),$$

де $E_{Г}$,U — модуль відповідно векторів ЕРС і напруги приймаючої системи; Z_{11}, Z_{12} — модуль відповідно власного і взаємного (між ЕРС генератора і напругою приймаючої системи) опору; α_{11}, α_{12} — кути, що характеризують відповідні опорів;

$$\alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - arctg\frac{X_{11}}{R_{11}};\ \alpha_{12} = \frac{\pi}{2} - arctg\frac{X_{12}}{R_{12}}$$

Опори Z_{11}, Z_{12} визначаються за схемою заміщення, яка складена з урахуванням активних опорів її елементів, методом одиничного струму. Для цього в даній схемі необхідно прийняти $\overset{\circ}{U} = 0;\ \overset{\circ}{I}_H = 1$. Послідовно розрахувавши режим схеми з визначенням в підсумку $\overset{\circ}{E}_Г$ та $\overset{\circ}{I}_H$, знайдемо :

$$Z_{11} = \frac{\overset{\circ}{E}_Г}{\overset{\circ}{I}_Г};\ \psi_{11} = arctg\frac{X_{11}}{R_{11}};\ \alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - \psi_{11};$$

$$Z_{12} = \frac{\overset{\circ}{E}_Г}{\overset{\circ}{I}_Г};\ \psi_{12} = arctg\frac{X_{12}}{R_{12}};\ \alpha_{12} = \frac{\pi}{2} - \psi_{12};$$

Якщо схема заміщення системи приводиться до Т-подібної (рис.1.2), власні і взаємні опори можна визначити за наступними виразами:

$$\overset{\circ}{Z}_{11} = \overset{\circ}{Z}_1 + \frac{\overset{\circ}{Z}_2 \cdot \overset{\circ}{Z}_3}{\overset{\circ}{Z}_2 + \overset{\circ}{Z}_3};\ \overset{\circ}{Z}_{12} = \overset{\circ}{Z}_1 + \overset{\circ}{Z}_2 + \frac{\overset{\circ}{Z}_1 \cdot \overset{\circ}{Z}_2}{\overset{\circ}{Z}_3}.$$

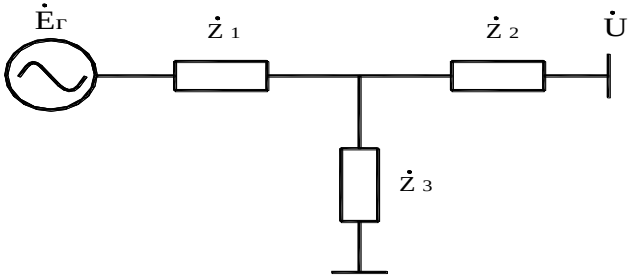


Рис.1.2 Схема заміщення

Якщо схема зв'язку між генератором і приймаючою системою складається лише із реактивних опорів, то $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 0$ і кутова

характеристика має наступний вигляд: $P_{ЕЛ} = \frac{E_Г \cdot U}{X_{12}} \cdot \sin \delta$, де X_{12} визначається, як і раніше, методом одиничного струму.

Частинним є виапдок, коли зв'язок між генератором і приймачем еквівалентується одиничним результуючим опором Z. Тоді:

$$\overset{\circ}{Z}_1 = \overset{\circ}{Z}_{12} = \overset{\circ}{Z}\ ;\ \alpha_{11} = \alpha_{12} = \frac{\pi}{2} - arctg\frac{X}{R};$$

і кутова характеристика має наступний вигляд:

$$P_{ЕЛ} = \frac{E_Г}{Z} \cdot \sin \alpha + \frac{E_Г \cdot U}{Z} \cdot \sin(\delta - \alpha).$$

Якщо в цьому випадку зв'язок здійснюється лише індуктивним опором, то $\alpha = 0$ і

$$P_{ЕЛ} = \frac{E_Г \cdot U}{X} \cdot \sin \delta \qquad (1.7)$$

Якщо при аналізі електромеханічних перехідних процесів необхідно врахувати явнополюсність синхронного генератора, для схеми, показаної на рис. 1.3, кутова характеристика має вигляд

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{ЗОВН}\ ;\ X_{q\Sigma} = X_q + X_{ЗОВН};$$

$$P_{ЕЛ} = \frac{E_q}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta. \qquad (1.8)$$

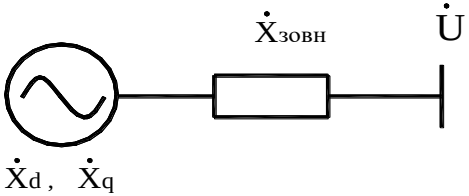


Рис. 1.3 Схема заміщення явнополюсної синхронної машини

Кутова характеристика, що відповідає виразу (1.8), показана на рис. 1.4.

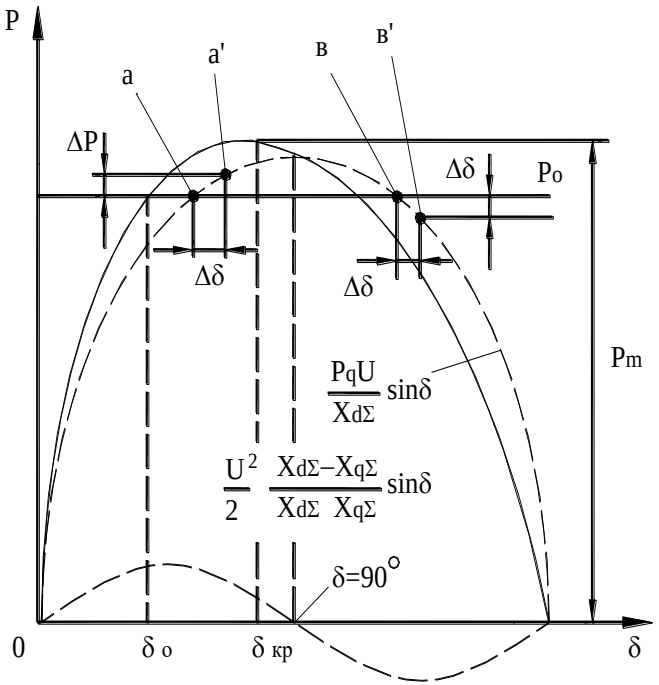


Рис. 1.4. Кутова характеристика явнополюсного синхронного генератора

З метою спрощення розрахунків можна явнополюсну машину замінити неявнополюсною з ЕРС E_0 і однаковими опорами X_q по обом осям. В цьому випадку кутова характеристика

$$P_{ЕЛ} = \frac{E_q \cdot U}{X_{q\Sigma}} \cdot \sin \delta \qquad (1.9)$$

Питання для самоперевірки

1. Які елементи електричної системи необхідно враховувати при аналізі стійкості?

2. Фактори, які впливають на передачу активної потужності.

3. Що розуміють під статичною, динамічною і результуючою стійкістю?

4. Які параметри відносяться до параметрів режиму і параметрів системи?

5. Що розуміють під статичними і динамічними характеристиками?

6. Якими схемами заміщення можуть бути представлені лінія електропередачі, синхронний генератор. Трансформатор, асинхронний двигун?

ТЕМА 2. СТАТИЧНА СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ.

2.1 Зміст

Дослідження статичної стійкості найпростішої нерегульованої і регульованої системи методом малих коливань. Ідеальна, внутрішня і дійсна межа потужності, що передається. Врахування автоматичного регулювання збудження пропорційного типу і сильної дії при розрахунках статичної стійкості. Поняття про комплексне та кібернетичне регулювання в електричних системах і системах електропостачання. [1, розділ 11,12; 2, розділ 9;3, розділ 2].

2.2 Загальні рекомендації

Найбільш загальним методом дослідження статичної стійкості є метод малих коливань, який полягає в аналізі коренів характеристичного рівняння, яке отримане з ліанеризованого рівняння перехідного процесу в елементах системи. На основі методу малих коливань показано, що автоматичні регулятори збудження пропорційного типу забезпечують

межу потужності, що передається, і яка визначається постійністю ЕРС генераторів за перехідним опором.

Якщо потужність приймаючої системи співрозмірна з потужністю електропередачі, напруга на шинах навантаження не залишається постійною при зміні режиму роботи. В цих умовах розраховується дійсна межа потужності, що передається. Слід звернути увагу на фізичний зміст ідеальної, внутрішньої і дійсної межі потужності, що передається, проаналізувати вплив на них регуляторів збудження.

2.2 Поняття про статичну стійкість

Під статичною стійкістю електричної системи у відповідності з приведеним загальним визначенням стійкості розуміють здатність системи самовільно відновлювати вихідний режим після малого збурення. Щоб судити про статичну стійкість системи, потрібно дослідити характер перехідного процесу, який виникає в системі при малому збуренні.

Розглянемо найпростішу схему електропередачі (рис.2.1, а - принципова схема; схема заміщення: 2.1, б — повна; 2.1, в — еквівалентна;

$X_{d\Sigma} = X_d + X_{T1} + 0.5 \cdot X_{Л} + X_{T2}$) в якій неявнополюсний генератор ($X_{Г} = X_d$) працює через трансформатор і лінію на шини постійної напруги, тобто на шини системи, потужність якої значно більша в порівнянні з потужністю заданої електропередачі, що напругу на її шинах можна вважати незмінною по величині і фазі при будь-яких режимах роботи електропередачі.

Досліджувати характер перехідного процесу зручно за допомогою кутової характеристики, яка для даного випадку визначається рівнянням (1.7).

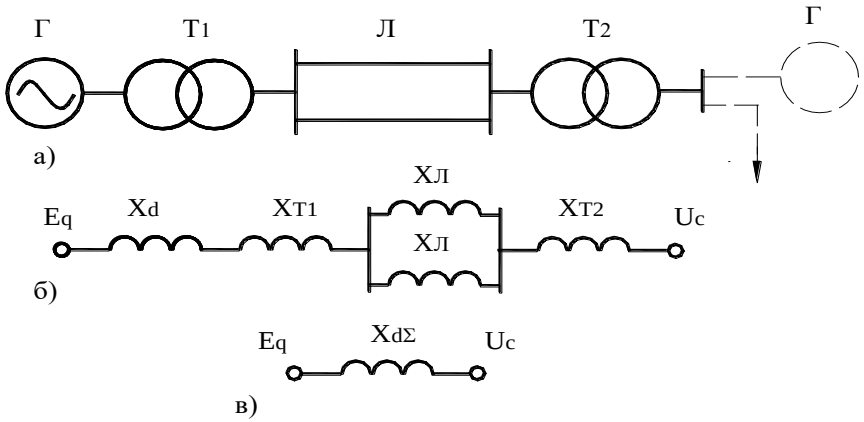


Рис. 2.1 Принципова схема електропередачі

З (1.7) слідує, що для передачі потужності через індуктивний опір необхідно, щоб ЕРС генератора випереджала напругу приймаючої системи. Залежність потужності від кута має синусоїдальний характер (див. рис. 1.4). Найбільша потужність, яка може бути передана при постійній напрузі на шинах приймаючої системи, називається ідеальною межею потужності. В даному випадку при постійній синхронній ЕРС E_q генератора, тобто при відсутності автоматичного регулювання збудження генераторів, ідеальна межа

$$P_{MAX.ІД} = \frac{E_q \cdot U_C}{X_{d\Sigma}}$$

У будь-якому усталеному режимі повинна бути рівновага між потужністю первинного двигуна і генератора. Така рівновага можлива лише при потужності турбіни, яка менша за граничну. При цьому кожному значенню потужності P_0 турбіни відповідають дві точки рівноваги на кутовій характеристиці потужності генератора і, відповідно,

два значення кута δ_a і $\delta_в$ (див. рис.1.4.). Але стійкий режим роботи можливий лише в точці **а**. Режим в точці **в** не стійкий і тривало існувати не може. Показати це можна, розглянувши рух ротора генератора при невеликому відхиленні від точок рівноваги.

Припустимо, що внаслідок невеликого збурення кут генератора δ_a збільшився на $\Delta\delta$. Цьому відповідає перехід робочої точки на кутову характеристику з a в a' і збільшення потужності генератора на ΔP, тобто позитивному приросту кута відповідає позитивний приріст потужності. Приймаючи постійною потужність турбіни (зміна швидкості внаслідок малих змін кута незначна), можна бачити, що в результаті зміни потужності генератора рівновага моментів турбіни і генератора порушена і на валу машини виникає гальмівний момент, так як потужність генератора більша за потужність турбіни.

Під впливом гальмівного моменту рух ротора починає сповільнюватись, що зумовлює переміщення зв'язаного з ротором вектора ЕРС E_q генератора в сторону зменшення кута. В результаті зменшення кута знову відновлюється вихідний режим роботи в точці **а**, тому цей режим повинен бути визнаний стійким.

В точці **в** позитивний приріст кута $\Delta\delta$ супроводжується не позитивною, а негативною зміною потужності ΔP генератора, яка викликає появу прискорюючого моменту; під його впливом кут δ зростає. З ростом кута потужність генератора продовжує падати, що зумовлює подальше збільшення кута, і т.д. Процес протікає динамічно, і генератор випадає із синхронізму, тобто режим роботи в точці **в** статично не стійкий.

Сказане про точку **а** справедливо для будь-якої точки на зростаючій частині кутової характеристики, тобто режим на цій частині

стійкий. Навпаки, режим у всіх точках спадаючої частини кутової характеристики не стійкий. Звідси витікає наступний критерій статично стійкості системи: статична стійкість системи забезпечується, якщо прирости кута і потужності генератора мають однаковий знак, тобто $\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0$ або, переходячи до границі,

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \qquad (2.1)$$

Похідну $\frac{dP}{d\delta}$ прийнято називати синхронізуючою потужністю.

Додатній знак синхронізуючої потужності є критерієм статичної стійкості.

За відсутності автоматичного регулювання збудження згідно (1.6) синхронізуюча потужність

$$\left(\frac{dP}{d\delta}\right)_{Eq=const} = S_{Eq} = \frac{E_q \cdot U}{X_d} \cdot \cos\delta .$$

Вона позитивна (при чисто індуктивному зв'язку з системою) при кутах, менших за 90^0 (див. рис. 1.4). В цій зоні можливі стійкі стаціонарні режими роботи системи.

Якщо на генераторах передаючої станції встановлені АРЗ, то ЕРС генераторів при збільшенні потужності, що передається і пов'язане з цим збільшення кута не залишається постійною, а зростає (рис. 2.2). Це відповідає переходу з кутової характеристики, побудованої при постійній E_{q1}, на характеристику при постійній E_{q2}, де $E_{q2} > E_{q1}$, і т.д. (рис. 2.3).

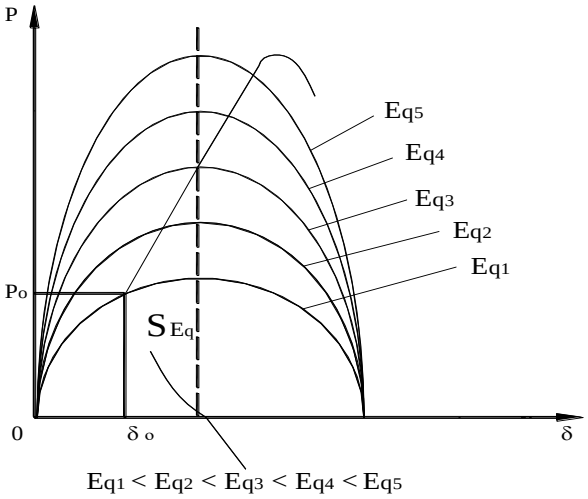


Рис. 2.2

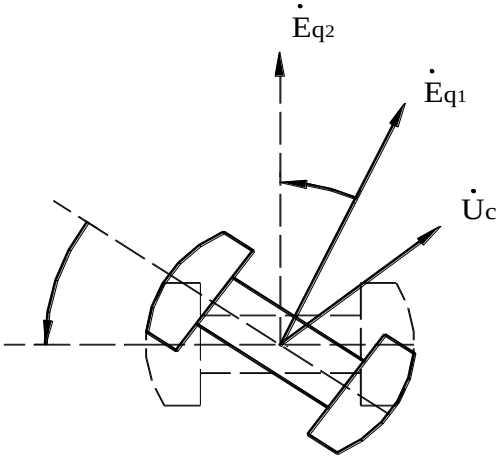


Рис. 2.3

В результаті для генераторів, які мають АРЗ, отримуємо кутову характеристику, максимум якої, по — перше, значно перевищує граничну

потужність при постійній ЕРС E_q вихідного режиму і, по — друге, зсунутий вправо в зону, де синхронізуюча потужність S_{Eq} від'ємна.

Область за кутом 90^0, тобто при S_{Eq}<0, називається зоною штучної стійкості. Стійка робота в зоні штучної стійкості неможлива без автоматичного регулювання збудження, так як в ній порушується критерій стійкості, отриманий для нерегульованого генератора.

Автоматичне регулювання збудження значно підвищує межу потужності, що передається, але при неправильному налаштуванні може привести до порушення стійкості і при кутах, менших 90^0, тобто в зоні, де система без АРЗ стійка.

Таким чином, стійкість електричних систем, генератори яких мають АРЗ, повинна обов'язково досліджуватись з урахуванням його дії. При цьому елементи електричної системи (генератори з їх системами збудження, лінії електропередачі і навантаження) розглядуються як єдиний об'єкт, стійкість якого повинна бути забезпечена.

Визначення межі потужності, що передається в багатомашинних системах по практичному критерію

Для визначення межі потужності, що передається в практичних розрахунках користуються критерієм $\frac{dP}{d\delta} < 0$. Щоб показати справедливість цього критерію для складних систем, розглянемо стійкість системи, яка складається з двох станцій співрозмірної потужності [рис. 2.10(а)].

Представляючи станції постійними ЕРС і опорами, які відповідають встановленим на цих станціях типам регуляторів збудження, і заміщуючи навантаження постійним опором

$$\overset{\circ}{Z}_H = \frac{U_H^2}{\hat{S}_H} = \frac{U_H^2}{S \cdot (\cos\varphi - j\sin\varphi)} = \frac{U_H^2}{S} \cdot (\cos\varphi + j\sin\varphi)\ , \quad (2.2)$$

складемо схему заміщення системи [рис. 3.10(б)].

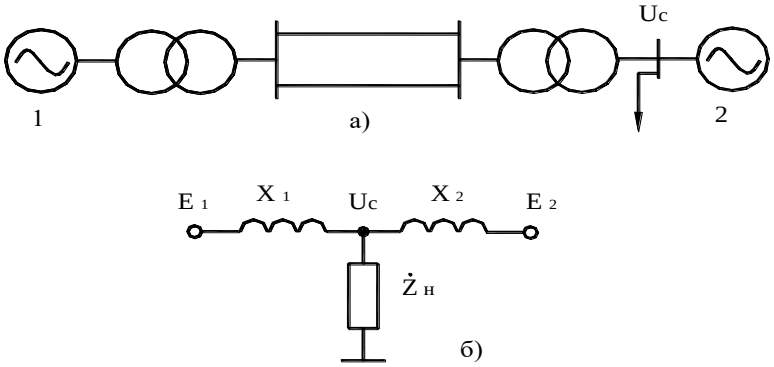


Рис. 2.10. Схема заміщення багатомашинної системи

Для даної системи можна записати наступні рівняння:

$$T_{j1} \cdot \frac{d^2\Delta\delta_1}{dt^2} = -\Delta P_1\,; \quad (2.3)$$

$$T_{j2} \cdot \frac{d^2\Delta\delta_2}{dt^2} = -\Delta P_2\,;$$

де δ_1 і δ_2 — кути ЕРС відповідних станцій, відраховані від вісі, яка синхронно обертається (рис.2.11).

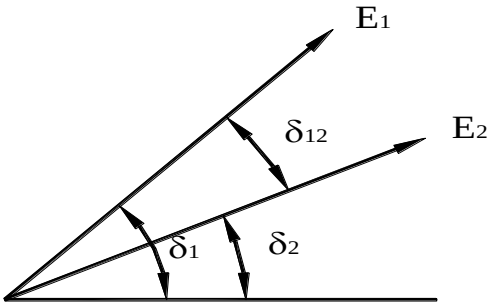


Рис.2.11 Векторна діаграма ЕРС генеруючих станцій

Щоб перейти до відносного кута зсуву по фазі між ЕРС станцій, поділимо кожне з рівнянь (2.3) на свою постійну інерції і віднімемо поелементно від першого рівняння друге. Виконавши вказані дії, отримаємо:

$$\frac{d^2\Delta\delta_{12}}{dt^2} + \frac{\Delta P_1}{T_{j1}} - \frac{\Delta P_2}{T_{j2}} = 0, \qquad (2.4)$$

де, $\Delta\delta_{12} = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_2$.

Прирости потужностей кожної із станцій за умови постійності їх ЕРС є функцією лише відносного кута:

$$\Delta P_1 = \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \cdot \Delta\delta_{12}; \;\; \Delta P_2 = \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \cdot \Delta\delta_{12}. \qquad (2.5)$$

Вирази потужності кожної із станцій можна представити у вигляді:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin\alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cdot \sin(\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin\alpha_{22} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cdot \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}). \qquad (2.6)$$

Диференціюючи ці вирази відносно кута δ_{12}, знаходимо:

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} = \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} = -\frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}). \qquad (2.7)$$

Виражаючи прирости потужностей в (2.4) через частинні похідні, отримаємо рівняння перехідного процесу при малих збуреннях в даній системі:

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt}+(\frac{1}{T_{j1}}\cdot\frac{\partial P_1}{\partial\delta_{12}}-\frac{1}{T_{j2}}\cdot\frac{\partial P_2}{\partial\delta_{12}})\cdot\Delta\delta_{12}=0. \quad (2.8)$$

Йому відповідає характеристичне рівняння другого порядку

$$p^2+a=0, \quad (2.9)$$

де, $a=\frac{1}{T_{j1}}\cdot\frac{\partial P_1}{\partial\delta_{12}}-\frac{1}{T_{j2}}\cdot\frac{\partial P_2}{\partial\delta_{12}}$.

Критерієм стійкості в даному випадку служить позитивний знак вільного члена, тобто:

$$a=\frac{1}{T_{j1}}\cdot\frac{\partial P_1}{\partial\delta_{12}}-\frac{1}{T_{j2}}\cdot\frac{\partial P_2}{\partial\delta_{12}}>0. \quad (2.10)$$

Характеристики потужності і межа стійкості обох генераторних станцій показані на рис.2.12. Характеристика P_1 являє собою синусоїдальну функцію кута δ_{12}, що піднята на $\frac{E_1^2}{Z_{11}}\sin\alpha_{11}$ і зсунута на кут α_{12}.

Кут α_{12} при паралельному включенні активного опору (а саме так включається опір, що замінює навантаження) завжди від'ємний. Тому характеристика P_1 зсунута вліво.

Характеристика P_2 теж піднята на $\frac{E_2^2}{Z_{22}}\sin\alpha_{22}$ і зсунута на кут α_{12},але на відміну від P_1 вона ще і перевернута, так як член, пропорційний $\sin\alpha$, від'ємний. Максимум характеристики P_2 зсунутий відносно мінімуму характеристики P_1 на кут, рівний $2\alpha_{12}$.

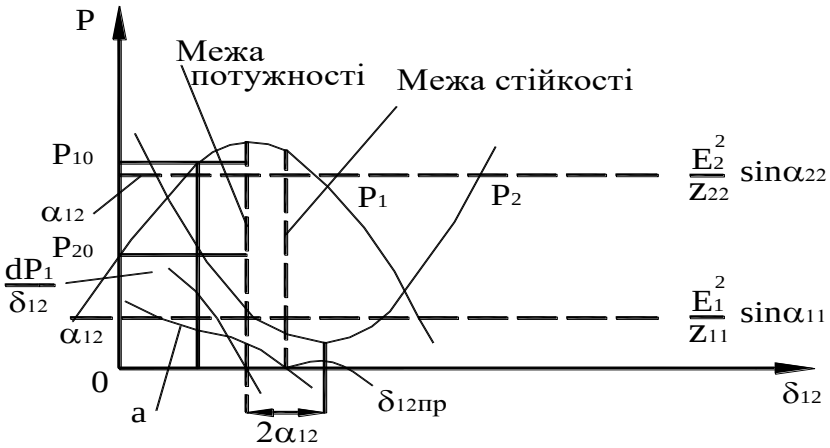


Рис. 2.12 Характеристики потужності і межі стійкості обох генераторних станцій

Максимум характеристики P_1 є дійсною межею потужності, тобто найбільшою потужністю, яку можна передати від станції в систему співрозмірної потужності. Згідно (2.6) дійсна межа потужності

$$P_{1MAX} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}}. \qquad (2.11)$$

Але режим, що відповідає межі потужності, не співпадає з межею стійкості. Стійкість порушується лише тоді, коли перестає задовольнятися критерій стійкості (2.10) . Межа стійкості знаходиться в місці перетину характеристики (2.10) з віссю абсцис, тобто при $a = 0$.

В точці максимуму характеристики потужності першої станції перший член критерія стійкості рівний нулю, а другий від'ємний, значить, критерій стійкості виконаний і система стійка.

Оскільки метою практичних розрахунків звичайно є визначення саме межі потужності, що передається, а не межі стійкості, то можна опустити другий член критерія стійкості і, залишивши лише перший член, використовувати критерій у вигляді

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} > 0 \qquad (2.12)$$

Користуючись цим критерієм, можна визначити дійсну межу потужності. Межа стійкості буде при куті дещо більшому, ніж кут, при якому порушується практичний критерій (2.12) .

Таким чином, система в режимі, граничному по потужності, буде володіти іще деяким запасом стійкості по куту. Це значить, що в режимі передачі максимальної потужності мале збурення, яке навіть викликає деяке збільшення кута, але не більше $\delta_{12ГРАН}$, не викличе порушення стійкості.

По практичному критерію $\frac{dP}{d\delta} > 0$ можна визначити межу потужності, що передається в системах, які містять дві і більше станцій. Але при побудові характеристики потужності станції, стійкість якої перевіряється, виникає питання про характер зміни кутів ЕРС і, значить, потужностей усіх інших станцій.

Для того, щоб зробити задачу визначення меж потужностей, що передається однозначною, в практиці використовуються наступні передумови:

- припускається постійність кутів усіх генераторних станцій, окрім даної;
- припускається постійність потужностей усіх станцій, окрім двох.

Першою передумовою доцільно користуватись при розрахунках стійкості в системах, по типу близьких до зображеної на рис. 2.13(а) другою — на рис.2.13(б).

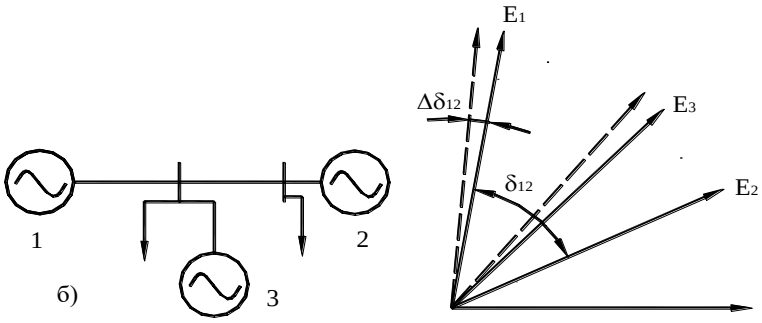


Рис. 2.13 а

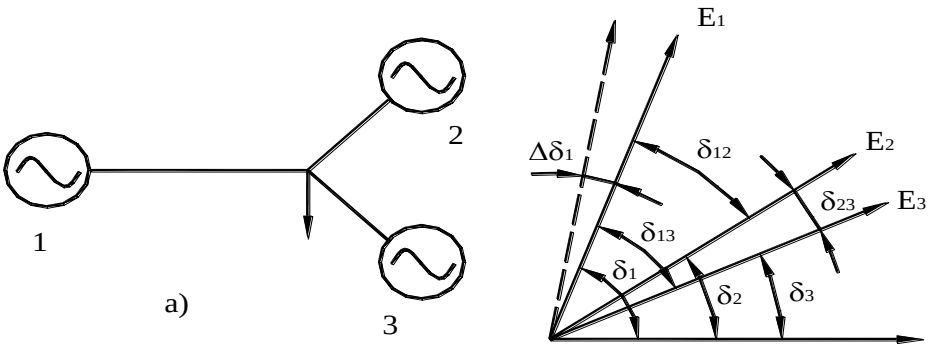


Рис. 2.13 б

В системі a характеристики потужності любої із станцій, наприклад 1, обчислюються по формулах:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \cdot \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 \cdot E_3}{Z_{13}} \cdot \sin(\delta_{13} - \alpha_{13}) \text{ ; (2.13)}$$

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_2 \cdot E_1}{Z_{21}} \cdot \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_2 \cdot E_3}{Z_{23}} \cdot \sin(\delta_{23} - \alpha_{23}) \text{ ; (2.14)}$$

$$P_3 = \frac{E_3^2}{Z_{33}} \sin \alpha_{33} + \frac{E_3 \cdot E_1}{Z_{31}} \cdot \sin(\delta_{31} - \alpha_{31}) + \frac{E_3 \cdot E_2}{Z_{32}} \cdot \sin(\delta_{32} - \alpha_{32}) \text{ ; (2.15)}$$

за умови $\delta_{23} = \delta_{23\cdot 0} = const$.

Підставляючи в (2.13) $\delta_{13} = \delta_{12} - \delta_{23\cdot 0}$, отримуємо

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \cdot \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 \cdot E_3}{Z_{13}} \cdot \sin(\delta_{12} - \delta_{23} - \alpha_{13}). \quad (2.16)$$

Максимум цієї характеристики і є дійсна межа потужності першої станції. Аналогічно можна знайти межі потужностей інших станцій.

Даний метод полягає в протиставленні однієї із станцій усім іншим станціям системи як єдиному цілому, змушує характеризувати цей метод як метод двох генераторних станцій. Постійність кутів усіх станцій, окрім однієї, дозволяє замінити ці станції еквівалентною шляхом звичайних перетворень. Саме так доцільно чинити, якщо потрібно визначити межу потужності лише однієї із станцій системи.

В системі б дійсну межу потужності першої станції доцільно визначати, використовуючи другу передумову, тобто перерозподіляючи навантаження між станціями 1 і 3 при постійній потужності проміжної станції 2.

Щоб побудувати характеристику потужності першої станції згідно (2.13), потрібно попередньо знайти залежність між кутами δ_{12} і δ_{13}, яка відповідає постійній потужності другої станції.

Розв'язуючи (2.14) відносно δ_{12} за умови $P_2 = P_{2\cdot 0} = const$, знаходимо:

$$\delta_{12} = \arcsin \frac{Z_{12}}{E_1 \cdot E_2} \cdot \left[\frac{E_2^2}{Z_{22}} \cdot \sin \alpha_{22} + \frac{E_2 \cdot E_3}{Z_{23}} \cdot \sin(\delta_{23} - \alpha_{23}) - P_{2\cdot 0} \right] - \alpha_{12}.$$

Побудувавши залежність $\delta_{12} = f(\delta_{23})$, можна обчислити $\delta_{13} = f(\delta_{12})$, так як $\delta_{13} = \delta_{12} + \delta_{23}$.

Знаючи закон зміни δ_{12} в функції δ_{13}, можна по рівнянню (2.13) побудувати характеристику потужності і визначити дійсну межу.

Вплив проміжної станції на межу передаваємої потужності від станції 1 залежить від регулюючого ефекту цієї станції, яка в більшій чи меншій степені підтримує напругу у вузловій точці системи.

2.6. **Приклад розрахунку дійсної межі потужності**

Для системи, зображеної на рис. 2.10, потрібно визначити дійсну межу потужності. Отриманий результат порівняти з ідеальною межею потужності.

Параметри схеми наступні:

1) приймаюча система: $S_{НОМ} = 1600\ \ МВ \cdot А;\ \ X_C = 80\,\%;$ $P_{НОМ} = 1800\ \ МВт;\ \ \cos\varphi_H = 0{,}9;$

2) генератор: $P_{НОМ} = 400\ \ МВт;\qquad \cos\varphi_H = 0{,}85;$ $X_d = 160\,\%;\ X'_d = 18\,\%;\ U_H = 10{,}5\ \ кВ;$

3) трансформатор Т-$S_{\text{ТР}} = 480\ \ МВ \cdot А;\ \ U_1 = 10{,}5\ \ кВ;$ $U_2 = 242\ \ кВ;\ X_T = 14\,\%;$

4) трансформатор Т-2: $S_{\text{ТР}} = 480\ \ МВ \cdot А;\ \ U_1 = 220\ \ кВ;$ $U_2 = 121\ \ кВ;\ X_T = 14\,\%;$

5) лінія електропередачі: $\ell = 180\ \ км;\ X_0 = 0{,}42\ \ Ом/км$ (на один ланцюг).

Схема заміщення системи, що досліджується показана на рис.2.10,б.

Навантаження введене в неї постійним опором.

Визначимо параметри схеми заміщення і параметри вихідного режиму у відносних одиницях.

Приймаємо наступні базисні умови: $S_{баз} = 360\ \ МВ \cdot А$; $U_{баз} = 209\ \ кВ$ (за базисну потужність прийнята потужність, яка рівна передаваємій; за базисну напругу — напруга приймаючої системи, приведена до сторони лінії).

Визначимо значення опорів, в.о.:

$$X_d = \frac{X_{а}\,\%}{100}\frac{S_{баз}}{S_{НОМ}}\frac{U^2_{НОМ}}{U_{баз}}K^2_{Т1} = \frac{161}{100}\cdot\frac{360}{472}\cdot\left(\frac{10{,}5}{209}\right)^2\cdot\left(\frac{242}{10{,}5}\right)^2 = 1{,}645;$$

$$X'_d = \frac{18}{100}\cdot\frac{360}{472}\cdot\left(\frac{10{,}5}{209}\right)^2\cdot\left(\frac{242}{10{,}5}\right)^2 = 0{,}183;$$

$$X_{Т1} = \frac{X_{Т1}\,\%}{100}\cdot\frac{S_{баз}}{S_{НОМ}}\cdot\left(\frac{U_{НОМ}}{U_{баз}}\right)^2 = \frac{14}{100}\cdot\frac{360}{480}\cdot\left(\frac{242}{209}\right)^2 = 0{,}142;$$

$$X_{Т2} = \frac{14}{100}\cdot\frac{360}{480}\cdot\left(\frac{220}{209}\right)^2 = 0{,}117;$$

$$\frac{X_{Л}}{2} = \frac{X_0\cdot\ell}{2}\cdot\frac{S_{баз}}{U^2_{баз}} = \frac{0{,}42\cdot 180}{2}\cdot\frac{360}{209^2} = 0{,}312.$$

Сумарний реактивний опір:

$$X_{зовн} = X_{Т1} + \frac{X_{Л}}{2} + X_{Т2} = 0{,}142 + 0{,}312 + 0{,}117 = 0{,}571;$$

$$X_d = X_d + X_{ЗОВН} = 1{,}645 + 0{,}571 = 2{,}216;$$

$$X'_d = X'_d + X_{ЗОВН} = 0{,}183 + 0{,}571 = 0{,}754.$$

Еквівалентний опір системи:

$$X_2 = \frac{X_C\,\%}{100}\cdot\frac{S_{баз}}{S_{НОМ}} = \frac{80}{100}\cdot\frac{360}{1600} = 0{,}180.$$

Потужність, яка споживається навантаженням,

$$P_{*H} = \frac{P_H}{S_{баз}} = \frac{1800}{360} = 5{,}00;$$

$$S_H = \frac{P_H}{\cos\varphi_H} = \frac{5}{0{,}9} = 5{,}55;$$

$$Q_H = P_H \cdot tg\varphi_H = 5 \cdot 0{,}483 = 2{,}41.$$

Опір навантаження:

$$Z_H = \frac{U_C^2}{S_H} \cdot (\cos\varphi_H + j \cdot \sin\varphi_H) = \frac{1}{5{,}55} \cdot (0{,}9 + j \cdot 0{,}435) = 0{,}162 + j \cdot 0{,}078.$$

Потужність, яка видається станціями приймаючої системи,

$$P_C = P_H - P_0 = 5{,}00 - 1{,}00 = 4{,}00;$$

$$Q_C = Q_H - Q_0 = 2{,}41 - 0{,}12 = 2{,}29.$$

Фіктивна ЕРС передаючої станції

$$E' = \sqrt{\left(U_C + \frac{Q_0 \cdot X'_d}{U_C}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X'_d}{U_C}\right)^2} = \sqrt{(1 + 0{,}12 \cdot 0{,}754)^2 + 0{,}754^2} = 1{,}33.$$

Еквівалентна ЕРС генераторів приймаючої системи

$$E_{C\ EKB} = \sqrt{\left(U_C + \frac{Q_C \cdot X_2}{U_C}\right)^2 + \left(\frac{P_C \cdot X_2}{U_C}\right)^2} = \sqrt{(1 + 2{,}29 \cdot 0{,}18)^2 + (4 \cdot 0{,}18)^2} = 1{,}59.$$

Власні і взаємні опори

$$\overset{\circ}{Z}_{11} = j \cdot X'_d + j \cdot \frac{X_2 \cdot Z_H}{j \cdot X_2 + Z_H} = 0{,}754 + \frac{j \cdot 0{,}180 \cdot (0{,}162 + j \cdot 0{,}078)}{j \cdot 0{,}180 + 0{,}162 + j \cdot 0{,}078} = 0{,}057 + j \cdot 0{,}844$$

або $Z_{11} = 0{,}845$ і $\alpha_{11} = 3{,}9^O$;

$$\overset{\circ}{Z}_{11} = jX'_d + jX_2 + \frac{jX'_d + jX_2}{Z_H} = j0{,}754 + j0{,}180 + \frac{j0{,}754 + j0{,}180}{j0{,}162 + j0{,}078} = -0{,}680 + j1{,}261$$

або $Z_{12} = 1{,}43$ і $\alpha_{12} = -28{,}4^O$.

Дійсну межу потужності знайдемо, підставивши отримані значення опорів і ЕРС в (2.11.):

$$P_{MAX\ 0} = \frac{(E')^2}{Z_{11}} \cdot \sin\alpha_{11} + \frac{E' \cdot E_{C\ EKB}}{Z_{12}} = \frac{1{,}33^2}{0{,}845} \cdot 0{,}068 + \frac{1{,}33 \cdot 1{,}59}{1{,}43} = 1{,}62.$$

Отримана дійсна межа потужності дещо менша ідеального:

$$P_{MAX\ IДЕАЛЬН} = \frac{E' \cdot U_C}{X'_d} = \frac{1{,}33}{0{,}754} = 1{,}76.$$

Запаси стійкості для дійсної межі

$$K = \frac{P_{MAX\ IДЕАЛЬН} - P_0}{P_0} = \frac{1{,}62 - 1}{1} \cdot 100 = 62\%;$$

для ідеальної межі

$$K = \frac{P_{MAX\ IДЕАЛЬН} - P_0}{P_0} = \frac{1{,}76 - 1}{1} \cdot 100 = 76\%$$

Таким чином, заміна шин постійної напруги приймаючою системою співрозмірної потужності приводить до зниження запасу стійкості в даному випадку на 14%.

Характеристика потужності передавальної станції при роботі на приймаючу систему співрозмірної потужності показана на рис. 2.14. Вона піднята вгору на $\left(\frac{E'}{Z_{11}}\right) \cdot \sin\alpha = 0{,}14$ і зсунута вліво на кут $28{,}4^O$.

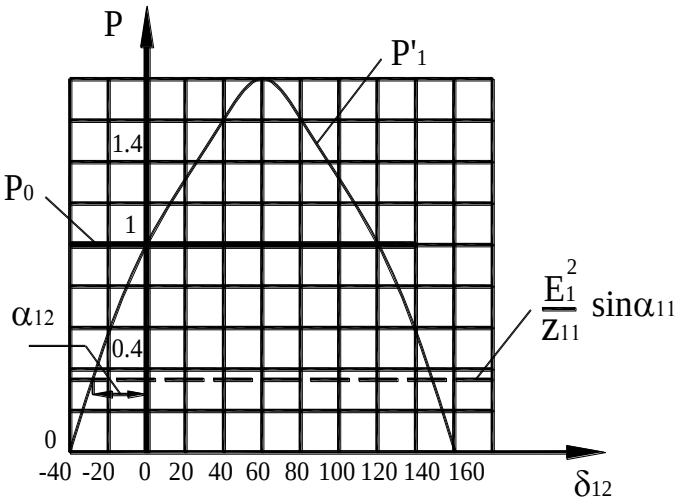


Рис. 2.14

2.7. **Метод малих коливань**

В розглянутих прикладах для оцінки статичної стійкості використовували практичний критерій $\frac{dP}{d\delta} > 0$. Існує ряд інших практичних критеріїв [1], які можна використати для оцінки статичної стійкості відносно нескладних систем і вузлів навантаження при певних припущеннях. Але застосування практичних критеріїв для дослідження складних систем вельми ускладнене.

Найбільш загальним і точним методом дослідження статичної стійкості електричних систем, що дозволяє відобразити вплив пристроїв автоматичного регулювання, є метод малих коливань.

Метод малих коливань дозволяє судити про характер перехідного процесу, викликаного збуренням вихідного режиму, якщо при цьому відхилення потужності і швидкості незначні.

Метод малих коливань заснований на дослідженні рівняння перехідного процесу в розрахунковій системі. При цьому досліджуються не самі рівняння, а їх лінійне наближення або, інакше, лінеаризовані рівняння перехідного процесу.

Можливість дослідження статичної стійкості по лінеаризованим рівнянням показав А.М.Ляпунов, який довів, що система стійка в малому, якщо стійке її лінійне наближення.

Щоб отримати рівняння лінійного наближення або лінеаризувати нелінійне диференційне рівняння перехідного процесу, потрібно:

1) припустити, що відхилення незалежних змінних (параметрів режима $\delta; E; I$ і т.д.) малі;

2) всі нелінійні функції, що входять в рівняння, розкласти в ряди Тейлора в околах заданих значень параметрів вихідного режиму:

$$f(\delta;E;...) = f(\delta_0;E_0;...) + \frac{\partial f(\delta;E;...)}{\partial \delta}\Delta\delta + \frac{\partial f(\delta;E;...)}{\partial E}\Delta E +$$

$$+ \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 f(\delta;E;...)}{\partial \delta^2}(\Delta\delta)^2 + \frac{1}{2!}\frac{\partial^2 f(\delta;E;...)}{\partial E^2}(\Delta E)^2 + ...;$$

3) в розкладеннях залишити лише члени, що містять відхилення в першій степені;

4) з отриманих рівнянь виключити рівняння рівноваги.

В отриманій після лінеаризації лінійній системі рівнянь, які описують перехідний процес в даній електричній системі, характер перехідного процесу уже не залежить від збурення і визначається лише коренями характеристичного рівняння, яким є головний визначник системи рівнянь.Перехідний процес затухає, тобто система статично стійка, якщо всі дійсні корені і всі дійсні частини комплексних коренів від'ємні, тобто всі корені розміщені зліва від уявної осі комплексної площини (рис.2.15, а — для стійкої системи; рис.2.15, б — для нестійкої системи).

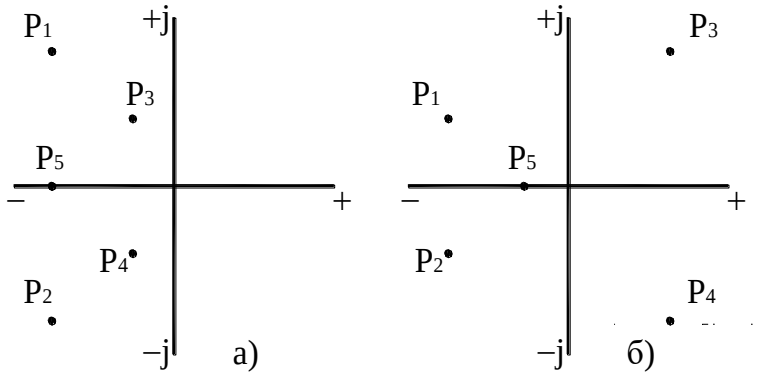


Рис. 2.15

Визначення коренів характеристичного рівняння без застосування спеціальних машин (коренешукачі і т.п.) ускладнене, так як порядок характеристичного рівняння звичайно високий. Тому використовуються методи, що дозволяють, не визначаючи коренів характеристичного рівняння, судити про їх розміщення на комплексній площині. Це критерії Гурвіца, Рауса, Михайлова, метод виділення областей стійкості в площині одного або двох параметрів (D — розбиття) і т.д.

При дослідженні стійкості електричних систем знайшли застосування критерій Гурвіца (для рівнянь не вище п’ятого порядку) і метод D — розбиття (для рівнянь п’ятого і більш високих порядків).

Критерій Гурвіца.

Згідно критерія Гурвіца для того щоб всі корені рівняння:

$$A_0 p^n + A_1 p^{n-1} + ... + A_{n-1} p + A_n = 0$$

мали від’ємні дійсні частини, необхідно і достатньо, щоб визначник Гурвіца

$$\Delta n = \begin{vmatrix} A_1 & A_4 & A_5 & . & . & . \\ A_0 & A_2 & A_4 & . & . & . \\ 0 & A_1 & A_3 & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & A_{n-1} & 0 \\ . & . & . & . & A_{n-2} & A_n \end{vmatrix}$$

і всі його діагональні мінори були додатні:

$$\Delta_1 = A_1;\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 \\ A_2 & A_4 \end{vmatrix};\ \Delta_3 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 & A_5 \\ A_0 & A_2 & A_4 \\ 0 & A_1 & A_3 \end{vmatrix}$$

При цьому припускається, що рівняння приведене до такого виду, що його вільний член A_n додатній.

Із критерія Гурвіца витікає, що необхідною, але не достатньою стійкості є додатність усіх членів характеристичного рівняння.

Для складання визначника Гурвіца рекомендується наступний порядок:

а) виписати на головній діагоналі всі члени рівняння від A_1 до A_n в порядку зростання індексів;

б) доповнити стовбці вгору від діагоналі членами з послідовно зростаючими індексами;

в) доповнити стовбці вниз від діагоналі членами з послідовно спадаючими індексами;

г) на місце членів, індекси яких більші ***n*** або менші нуля, поставити нулі.

У відповідності з критерієм Гурвіца для рівняння третього порядку

$A_0 p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + A_3 = 0$ умови стійкості будуть: $A_0 > 0$; $A_1 > 0$; $A_2 > 0$; $A_3 > 0$; $A_1 A_2 - A_0 A_3 > 0$, а для рівняння четвертого порядку:

$$A_0 p^4 + A_1 p^3 + A_2 p^2 + A_3 p + A_4 = 0\,;\ A_0 > 0;\ A_1 > 0;\ A_2 > 0;$$

$$A_3 > 0;\ A_4 > 0; \qquad A_1 A_2 A_3 - A_1^2 A_4 - A_0 A_3^2 > 0.$$

Метод D — розбиття.

Метод D — розбиття дозволяє в площині двох коефіцієнтів, які лінійно входять в члени характеристичного рівняння, виділити „область стійкості", тобто область значення коефіцієнтів всередині якої забезпечують стійкість системи.

Нехай характеристичне рівняння представлене у вигляді

$$K_n'' \cdot Q(p) + K_n' \cdot N(p) + R(p) = 0\,;$$

де K_n'' і K_n' — коефіцієнти в площині яких потрібно побудувати область стійкості; $Q(p); N(p); R(p)$ — поліноми від p.

Підставивши $p = j\omega$ і прирівнявши до нуля окремо дійсну і уявну частини, отримаємо два рівняння наступного виду:

$$K_n'' \cdot Q_1(\omega) + K_n' \cdot N_1(\omega) + R_1(\omega) = 0\,; \qquad (2.17)$$

$$K_n'' \cdot Q_2(\omega) + K_n' \cdot N_2(\omega) + R_2(\omega) = 0\,; \qquad (2.18)$$

Тут $Q_1(\omega), N_1(\omega), R_1(\omega)$ — дійсні частини, а $Q_2(\omega), N_2(\omega), R_2(\omega)$ — уявні частини поліномів $Q(\omega), N(\omega), R(\omega)$.

З рівнянь (2.17) і (2.18) можна обчислити K_n'' і K_n' для кожного значення ω:

$$K_n'' = \frac{\Delta K''}{\Delta}; \quad K_n' = \frac{\Delta K'}{\Delta}. \qquad (2.19)$$

Вирази (2.19) визначають в параметричному вигляді границю D — розбиття в площині K_n'', K_n' (рис.2.16).

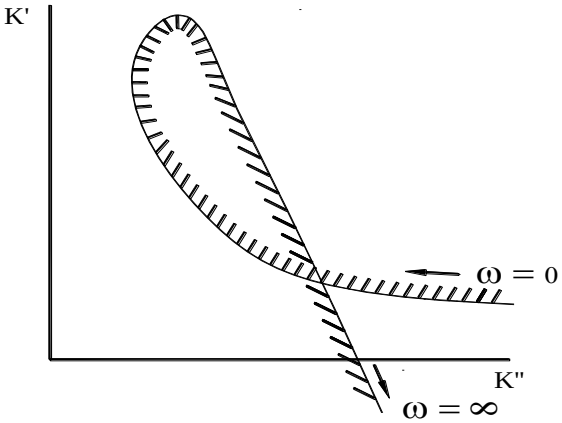


Рис. 2.16

Границя штрихується. Напрямок штриховки визначається знаком головного визначника. Головний визначник системи

$$\Delta = \begin{vmatrix} Q_1(\omega) & N_1(\omega) \\ Q_2(\omega) & N_2(\omega) \end{vmatrix}$$

складається так, щоб в першому стовбці знаходились коефіцієнти при тому параметрі, який відкладається по горизонтальній осі. В даному випадку прийнято, що K_n' відкладається по вертикальній осі, а K_n'' по горизонтальній. При зростанні ω від $-\infty$ до $+\infty$ границя D — розбиття штрихується зліва, якщо головний визначник Δ >0, і справа, якщо Δ <0.

В області, в сторону якої направлені штрихи, число коренів з від'ємною дійсною частиною на одиницю більше, ніж в суміжній області, так як перетину границі області відповідає перехід кореня через уявну вісь.

Якщо межі D — розбиття при від'ємних і додатніх значеннях ω співпадають і при $\omega = 0$ головний визначник змінює свій знак, границя штрихується двічі з однієї і тієї ж сторони. В цьому випадку зі сторони штриховки коренів, що лежать зліва від уявної вісі, на два більше, ніж в області по іншу, незаштриховану сторону кривої.

Проходячи через границю D — розбиття і користуючись вказаним правилом, можна знайти область, в якій знаходиться найбільше число коренів з від'ємною дійсною частиною. Щоб впевнитися, що дана область дійсно є областю стійкості, потрібно, підставивши в характеристичне рівняння значення коефіцієнтів, що взяті з цієї області та провести перевірку по будь-якому із відомих критеріїв стійкості. Якщо система при вибраних значеннях коефіцієнтів стійка, вона стійка і при будь-яких інших значеннях коефіцієнтів в середині даної області, тобто ця область дійсно є областю стійкості.

2.8. **Питання для самоперевірки**

1. Сутність метода малих коливань.
2. Необхідна і достатня умова статичної стійкості.
3. Що називається ідеальною, внутрішньою і дійсною межею передаваємої потужності?
4. Який вплив здійснює регулювання збудження на статичну стійкість системи?
5. Як вплияє навантаження на статичну стійкість системи?

2.9. Приклад розрахунку меж статичної стійкості одиничного генератора, працюючого через зовнішню схему на шини безмежної потужності

Задача. Розрахувати ідеальну вуглову характеристику і ідеальну межу потужності для схеми (рис. 2.4) .Розглянемо вплив АРЗ ($K = 5.76$), що забезпечує $U_Г = f = const$, на характер і максимум вуглової характеристики.

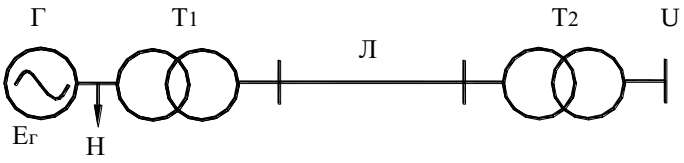


Рис. 2.4

Параметри елементів схеми:

1) генератор Г: $P_H = 100\ MBm;\quad \cos\varphi_H = 0{,}85;$ $X_d = X_q = 1.20;\ U_H = 10\ кВ;$

2) трансформатор Т-1: $S_H = 120\ MB \cdot A;$ $U_1 / U_2 = 10 / 220\ кВ;\ U_K = 12\ \%;$

трансформатор Т-2: $S_H = 120\ MB \cdot A;$ $U_1 / U_2 = 220 / 500\ кВ;\ U_K = 12\ \%;$

3) навантаження Н: $P_H = 8\ MBm;\quad \cos\varphi_H = 0{,}8;$ $U_H = 10\ кВ;$

4) лінія Л: $U_H = 220\ кВ;\ X_0 = 0{,}4\ Ом/км;\ \ell = 50\ км;$

5) приймаюча система: $U_H = 500\ \ кВ;\ X = 0\ ;\ S_H = \infty\ .$

Розв'язок. Схема заміщення зображена на рис. 2.5. Параметри елементів у відносних одиницях (за базис прийняти $S_{баз} = 100\ \ МВ \cdot А;$ $U_{баз} = U_{СР}$) ;

$$X_Г = X_d \frac{S_б}{S_H} \cos\varphi_H = 1.2 \cdot \frac{100 \cdot 0.85}{100} = 1{,}020\ ;$$

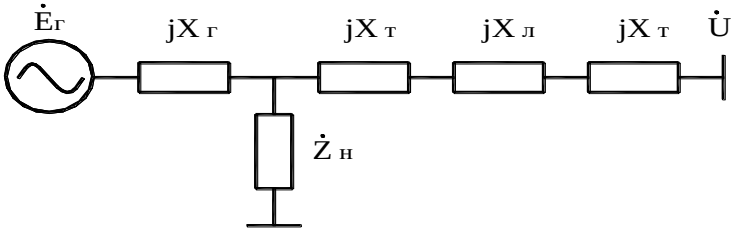


Рис. 2.5 Схема заміщення

$$X_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_б}{S_H} = \frac{12 \cdot 100}{100 \cdot 120} = 0{,}100\ ;$$

$$X_Л = X_0 \cdot \ell_0 \cdot \frac{S_{баз}}{U_{СР}^2} = 0{,}40 \cdot 50 \cdot \frac{100}{230^2} = 0{,}038\ ;$$

$$\overset{\circ}{Z}_H = \frac{S_б}{\hat{S}_H} = \frac{100}{8 \cdot (1.000 - j0.750)} = 8.000 + j6.000\ .$$

Спрощена схема (рис.2.6): $X_{ВН} = 2 \cdot 0.100 + 0.038 = 0.238\ .$

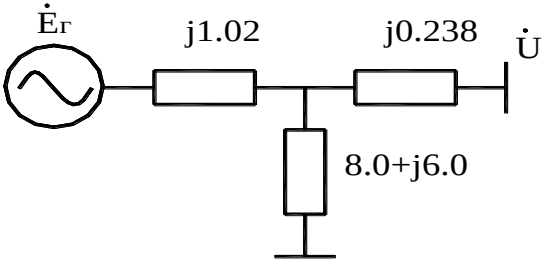


Рис. 2.6 Спрощена схема

I . Генератор не має АРЗ . Власний і взаємний опори:

$$\overset{\circ}{Z}_{11} = j1.020 + \frac{j0.238 \cdot (8.0 - j6.0)}{j0.238 + (8.0 - j6.0)} = 0.0044 + j6.255 \ ;$$

$$\overset{\circ}{Z}_{11} = 1.255 \ .$$

$$\overset{\circ}{Z}_{12} = j1.020 + j0.238 + \frac{j1.020 \cdot j0.238}{8.0 + j6.0} = -0.0194 + j1.262 \ ;$$

$$\overset{\circ}{Z}_{12} = 1.262 \ .$$

$$\alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - arctg \frac{1.255}{0.0044} = 0^0 12' \ ;$$

$$\alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - arctg \frac{1.262}{-0.0194} = 0^0 53' \ .$$

Кути втрат настільки малі , що не справляють помітного впливу на кутову характеристику (рис. 2.7) . Практично можна вважати:

Для $E = 1$ кутова характеристика $P_{\Gamma} = \frac{1 \cdot 1}{1.262} \sin \delta = 0.791 \sin \delta$.

Ідеальна межа потужності $P_m = 0.791$ при $\delta_m = 90^0$. В іменованих одиницях $P_m = 0.791 \cdot 100 = 79.1 \ MBm$.

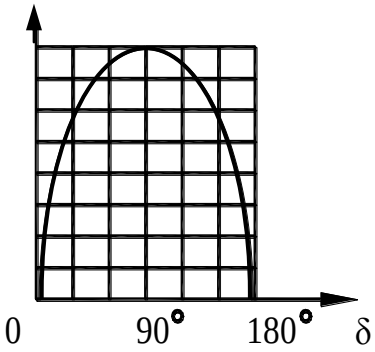


Рис. 2.7

2. Генератор має АРЗ $(U_Г = 1 = const)$.

$$U_Г = 1 + j0.238 + (P_H - jQ_H) = (1 + 0.238Q_H) + j0.238P_H \ ;$$

За умовами $U_Г = 1 + (1 + 0.238Q_H)^2 + (0.238P_H)^2 = 1$;

$$Q_H = \frac{1 \pm \sqrt{1 - (0.238P_H)^2}}{0.238} \ .$$

Для конкретних значень передаваємої (приймаючому кінцю) активної потужності передаваєма в приймаючу систему реактивна потужність:

$P_H = 0$	$Q_{H1} = 0$	$Q_{H2} = -8.400$
$P_H = 0.5$	$Q_{H1} = -0.029$	$Q_{H2} = -8.370$
$P_H = 1.0$	$Q_{H1} = -0.126$	$Q_{H2} = -8.270$
$P_H = 2.0$	$Q_{H1} = -0.505$	$Q_{H2} = -7.570$
$P_H = 3.0$	$Q_{H1} = -1.260$	$Q_{H2} = -7.150$
$P_H = 4.0$	$Q_{H1} = -2.900$	$Q_{H2} = -5.500$
$P_H = 4.2$	$Q_{H1} = -4.200$	$Q_{H2} = -4.200$

1) $P_H = 0$; $Q_H = 0$; $I_H = 0$; $\dot{U}_Г = 1\angle 0^0$;

$$I_З = \frac{1}{8 + j6} = 0.08 - j0.06 \ ;$$

$$\dot{I}_Г = 0 + (0.08 - j0.06) = 0.08 - j0.06 \ ;$$

$$\dot{E}_Г = 1 + jX \cdot 1.020 \cdot (0.08 - j0.06) = 1.061 +$$

$$+ j0.082 = 1.63\angle 4^0 24' \ ;$$

$$\dot{S}_Г = (1.061 + j0.082) \cdot (0.08 + j0.06) = 0.08 - j0.07 \ .$$

2) $P_H = 0.5$; $Q_H = -0.029$; $\dot{I}_H = 0.5 + j0.029$;

$$\dot{U}_Г = 1 + j0.238 \cdot (0.5 + j0.029) =$$

$$= 0.993 + j0.119 = 1\angle 6^0 50' \ ; \ \dot{I}_З = \frac{0.993 + j0.119}{8 + j6} = 0.086 - j0.5 \ ;$$

$$\dot{I}_Г = (0.5 + j0.29) + (0.086 - j0.05) = 0.586 - j0.021 \ ;$$

$$\dot{E}_Г = (0.993 + j0.119) + j1.02 \cdot (0.586 -$$

$$- j0.021) = 1.014 + j0.715 = 1.24\angle 35^0 00' \ ;$$

$$\dot{S}_Г = (1.014 + j0.715) \cdot (0.586 + j0.021) = 0.58 + j0.44 \ .$$

3) $P_H = 1.000$; $Q_H = -0.126$; $\dot{I}_H = 1.000 + j0.126$; $\dot{U}_Г =$

$$= 1 + j0.238 \cdot (1.000 + j0.126) = 0.970 + j0.238 = 1.000\angle 13^0 50' \ ;$$

$$\dot{I}_З = \frac{0.970 + j0.238}{8 + j6} = 0.092 - j0.039 \ ;$$

$$\dot{I}_Г = (1.000 + j0.126) + (0.092 - j0.039) = 1.092 + j0.087 \ ;$$

$$\dot{E}_Г = (0.970 + j0.238) + j1.020 \cdot (1.092 + j0.087) = 0.882 + j1.350 =$$

$$= 1.615\angle 57^0 00' \ ; \ \dot{S}_Г = (0.882 + j1.350) \cdot (1.092 - j0.087) =$$

$$= 1.080 + j1.398 \ .$$

4) $P_H = 2.000$; $Q_H = -0.505$; $\dot{I}_H = 2.000 + j0.505$; $\dot{U}_\Gamma =$

$1 + j0.238 \cdot (2.000 + j0.505) = 0.880 + j0.476 = 1.000 \angle 28^0 20'$;

$\dot{I}_3 = \dfrac{0.880 + j0.476}{8 + j6} = 0.099 - j0.015$;

$\dot{I}_\Gamma = (2.000 + j0.505) + (0.099 - j0.015) = 2.099 + j0.490$;

$\dot{E}_\Gamma = (0.880 + j0.476) + j1.020 \cdot (2.099 + j0.490) =$

$= 0.380 + j2.616 = 2.640 \angle 81^0 45'$;

$\dot{S}_\Gamma = (0.380 + j2.616) \cdot (2.099 - j0.490) = 2.080 + j5.324$.

5) $P_H = 3.000$; $Q_H = -1.260$; $\dot{I}_H = 3.0 + j1.260$;

$\dot{U}_\Gamma = 1 + j0.238 \cdot (3.000 + j1.260) = 0.700 + j0.714 = 1.000 \angle 45^0 30'$;

$\dot{I}_3 = \dfrac{0.700 + j0.714}{8 + j6} = 0.099 + j0.015$;

$\dot{I}_\Gamma = (3.000 + j1.260) + (0.099 + j0.015) = 3.099 + j1.275$;

$\dot{E}_\Gamma = (0.700 + j0.714) + j1.020 \cdot (3.099 + j1.275) = 0.600 + j3.874 =$

$= 3.920 \angle 98^0 50'$;

$\dot{S}_\Gamma = (-0.600 + j3.874) \cdot (3.099 - j1.275) = 3.080 + j12.764$.

6) $P_H = 4.000$; $Q_H = -2.900$; $\dot{I}_H = 4.000 + j2.900$;

$\dot{U}_\Gamma = 1 + j0.238 \cdot (4.000 + j2.900) = 0.310 + j0.950 = 1.000 \angle 72^0 00'$;

$\dot{I}_3 = \dfrac{0.310 + j0.950}{8 + j6} = 0.082 + j0.057$;

$\dot{I}_\Gamma = (4.000 + j2.900) + (0.082 + j0.057) = 4.082 + j2.957$;

$\dot{E}_\Gamma = (0.310 + j0.950) + j1.020 \cdot (4.0821 + j2.957) = -2.700 + j5.110 =$

$5.760 \angle 118^0 00'$;

$\dot{S}_\Gamma = (-2.700 + j5.110) \cdot (4.082 - j2.957) = 4.080 + j28.820$.

7) $P_H = 4.200$; $Q_H = -4.200$; $\dot{I}_H = 4.200 + j4.200$;

$\dot{U}_\Gamma = 1 + j0.238 \cdot (4.200 + j4.200) = +j1.000 \angle 90^0 00'$;

$\dot{I}_3 = \dfrac{1.000}{8 + j6} = 0.060 + j0.080$;

$\dot{I}_\Gamma = (4.200 + j4.200) + (0.060 + j0.080) = 4.260 + j4.280$;

$\dot{E}_\Gamma = j1.000 + j1.020 \cdot (4.260 + j4.280) = -4.360 + j5.340 =$

$= 6.880 \angle 129^0 10'$;

$\dot{S}_\Gamma = (-4.360 + j5.340) \cdot (4.260 - j4.280) = 4.280 + j41.400$.

8) $P_H = 4.000$; $Q_H = -5.500$; $\dot{I}_H = 4.000 + j5.500$;

$\dot{U}_\Gamma = 1 + j0.238 \cdot (4.000 + j5.500) = -0{,}310 + j0{,}950 = 1{,}000 \angle 108^0 05'$;

$\dot{I}_3 = \dfrac{-0{,}310 + j0.950}{8 + j6} = 0.032 + j0.095$;

$\dot{I}_\Gamma = (4.000 + j5.500) + (0.032 + j0.095) = 4.032 + j5.595$;

$\dot{E}_\Gamma = (-0.310 + j0.950) + j1.020 \cdot (4.032 + j5.595) =$

$= -6.000 + j5.050 = 7.830 \angle 140^0 00'$;

$\dot{S}_\Gamma = (-6.000 + j5.050) \cdot (4.032 - j5.595) = 4.080 + j54.000$.

9) $P_H = 3.000$; $Q_H = -7.150$; $\dot{I}_H = 3.000 + j7.150$;

$\dot{U}_\Gamma = 1 + j0.238 \cdot (3.000 + j7.150) = -0.700 + j0.714 = 1.000 \angle 135^0 30'$;

$\dot{I}_3 = \dfrac{-0.700 + j0.714}{8 + j6} = -0.015 + j0.099$;

$\dot{I}_\Gamma = (3.000 + j7.150) + (-0.015 + j0.099) = 2.985 + j7.249$;

$\dot{E}_\Gamma = (-0.700 + j0.714) + j1.020 \cdot (2.985 + j7.249) =$

$= -8.070 + j3.754 = 8.900 \angle 155^0 00'$;

$\dot{S}_\Gamma = (-8.070 + j3.754) \cdot (2.985 - j7.249) = 3.080 + j59.7$.

10) $P_H = 1.000$; $Q_H = -8.270$; $\dot{I}_H = 1.000 + j8.270$;

$\dot{U}_Г = 1 + j0.238 \cdot (1.000 + j8.270) =$

$= -0.970 + j0.238$; $\dot{I}_З = \dfrac{-0.970 + j0.238}{8 + j6} = -0.063 + j0.077$;

$\dot{I}_Г = (1.000 + j8.270) + (-0.063 + j0.077) = 0.937 + j8.347$;

$\dot{E}_Г = (-0.970 + j0.238) + j1.020 \cdot$

$\cdot (0.937 + j8.347) = -9.470 + j1.193 = 9.550 \angle 72^0 50'$;

$\dot{S}_Г = (-9.470 + j1.193) \cdot (0.937 - j8.347) = 1.080 + j80.1$.

11) $P_H = 0$; $Q_H = -8.400$; $\dot{I}_H = +j8.400$;

$\dot{U}_Г = 1 + j0.238 \cdot j8.400) =$

$= -1.000 = 1.000 \angle 180^0 00'$; $\dot{I}_З = \dfrac{-1.000}{8 + j6} = -0.080 + j0.060$;

$\dot{I}_Г = j8.400 + (-0.080 + j0.060) = -0.080 + j8.460$;

$\dot{E}_Г = -1.000 + j1.020 \cdot (0.080 + j8.460) = -9.610 - j0.0815 =$

$= 9.610 \angle 180^0 44'$;

$\dot{S}_Г = (-9.610 - j0.0815) \cdot (-0.080 - j8.460) = 0.080 + j81.2$.

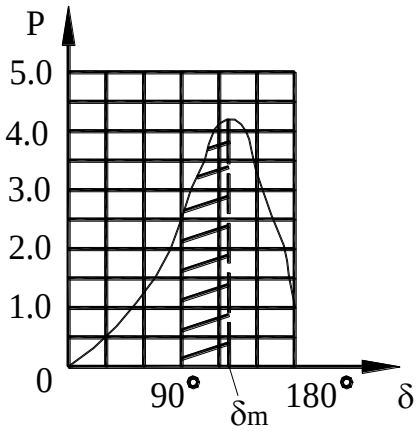


Рис. 2.8

Кутова характеристика з урахуванням АРЗ зображена на рис. 2.8. Заштрихована ділянка – ділянка штучної стійкості . Максимум кутової характеристики

$$P_m = P_{C.H.} + \frac{UU_Г}{Z_{BH}} = 0.080 + \frac{1 \cdot 1}{0.238} = 4.280 \ ;$$

$$\delta_m = 129^0 10' \ .$$

З урахуванням межі збудження $(K = 5.76)$ ця характеристика має вид (рис. 2.9) , висхідна частина якої до $\delta = 118^0 00'$ йде згідно обчисленої кривої , а низхідна визначається як

$$P = \frac{E_{ПР}^2}{Z_{11}} sin\,\alpha_{11} + \frac{E_{ПР}U}{Z_{12}} sin(\,\delta - \alpha_{12}\,) =$$

$$= \frac{5.76^2}{1.255} sin\,0^0 12' + \frac{5.76 \cdot 1}{1.262} sin(\,\delta + 0^0 53'\,) \ .$$

Згідно цієї кутової характеристики реальна межа стійкості $P_m = 4.08$, чи $P_m = 408 \ MBm$. Вона спостерігається при $\delta = 118^0$.

ТЕМА 3. ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Зміст

Поняття динамічної стійкості, методи аналізу, основні припущення. Умова порушення динамічної стійкості.

Спрощенні методи визначення динамічної стійкості. Метод площин.

Метод послідовних інтервалів.

Оцінка динамічної стійкості складної системи [1. гл.11,12; 2. гл 13 16].

3.2 Загальні рекомендації

При аналізі стійкості складної системи необхідно звернути увагу на можливість розділення її на підсистеми. Основним методом розрахунків

стійкості складних систем являється метод послідовних інтервалів. Необхідно ознайомитись з алгоритмом розрахунків стійкості і розглянути можливість його використання. Важливим являється питання впливу різних факторів на стійкість складної системи.

3.3 Поняття динамічної стійкості електричних систем

Електрична система динамічно стійка, якщо при будь-якому великому обуренні синхронна робота усіх станцій системи зберігається.

Найбільш часто зустрічається і в той час є тяжким видом обурення коротке замикання з відключенням пошкоджених елементів системи.

Розглянемо перехідний процес, викликаний коротким замиканням однієї із ланцюгів ліній електропередач (рис.3.1) і наступним відключенням пошкодженого ланцюга.

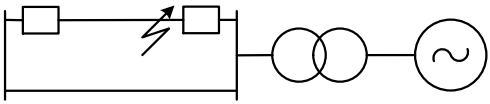


Рис. 3.1

Розглядати зручно з допомогою характеристик потужності для нормального, аварійного (короткого замикання) і післяаварійного (відключення ланцюга) режимів.

Потужність, яка віддається генератором під час перехідного процесу, приблизно може бути найдена виходячи із постійності поперечної перехідної ЕРС $E_q^{'}$.

Умова постійності ЕРС $E_q^{'}$ відповідає припущенню про постійність потокозчеплення обмотки збудження генератора. В дійсності потокозчеплення обмотки збудження залишається незмінним лише в момент виникнення короткого замикання або якого-небудь іншого різкого змінення режиму. Швидкість зміни потокозчеплення визначається постійною часу ланцюга збудження генератора при замкненому у зовнішню мережу ланцюга статора. Ця постійна часу звичайно більше 2-3 с. При малій тривалості короткого замикання (0,1-0,3с.) зміною потокозчеплення можна знехтувати і вважати ЕРС $E_q^{'}$ або приблизно рівну їй фіктивну ЕРС E' незмінною як під час короткого замикання, так і в деякий час після його відключення.

Через те що вираження потужності через поперечну перехідну ЕРС E'_q отримується порівняно складним, при приблизних розрахунках

стійкості замість постійності поперечної перехідної ЕРС звичайно вважають постійною фіктивною ЕДС E' по перехідному опору X_d'.

Таким чином, при приблизних розрахунках динамічної стійкості генератори можуть заміщуватись перехідним опором X'_d і постійною ЕДС E' за ним.

Схеми заміщення електропередачі для нормального і післяаварійного режимів показані на рис.3.2. Відповідні їм характеристики потужності для нормального режиму: $P_1 = \dfrac{E'U_c}{X_I}\sin\delta$,

де $X_1 = X_d' + X_{T1} + \dfrac{X_\Lambda}{2} + X_{T2}$; δ-кут між E' і U_c

і для післяаварійного: $P_{III} = \dfrac{E'U_c}{X_{III}}\sin\delta$

де $X_{III} = X'_d + X_{T1} + X_\Lambda + X_{T2}$

Схему заміщення для режиму короткого замикання отримаємо, включаючи в точку короткого замикання шунт короткого замикання (рис.3.2а). Опір шунта залежить від виду короткого замикання:

$X_к=X_0+X_2$ для однофазного короткого замикання на землю;
$X_к=X_2$ для двофазного короткого замикання;
$X_к=X_0//X_2$ для двофазного короткого замикання на землю;
$X_к=0$ для трифазного короткого замикання.

Тут X_0 і X_2 – сумарні опори схем нульової і зворотної послідовностей відносно точки короткого замикання.

Схеми заміщення нормального, післяаварійного режиму і при короткому замиканні і її перетворенні відповідно показані на рис. 3.2,а,б,в.

Схема заміщення для аварійного режиму із зірки може бути перетворена в трикутник (рис.3.2,б), сторони якого будуть представлені наступними опорами:

$$X_E = X_a + X_k + \frac{X_a X_k}{X_в}$$

$$X_U = X_в + X_k + \frac{X_в X_k}{X_a}$$

$$X_{E_U} = X_a + X_в + \frac{X_a X_в}{X_k}$$

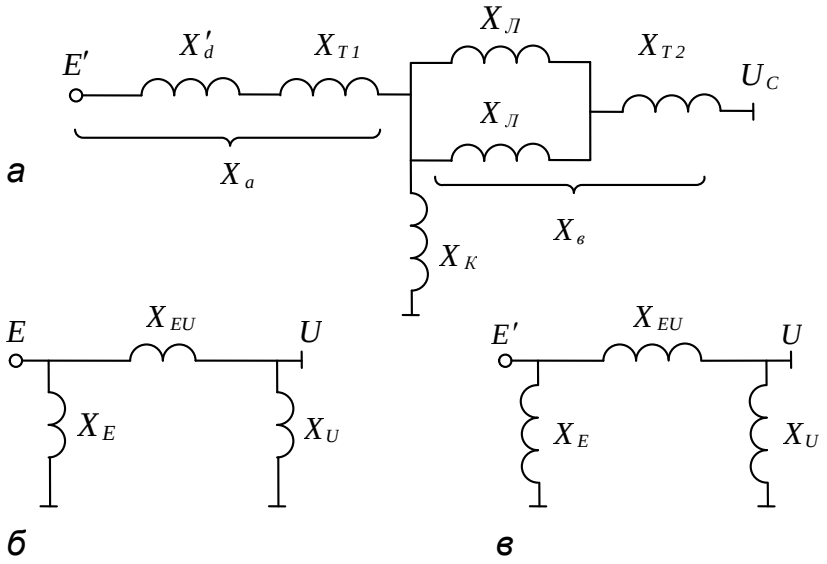


Рис. 3.2

Опори X_E і X_U, підключені безпосередньо до ЕРС E' і напруги U_c, не впливають на активну потужність генератора в аварійному режимі і можуть бути вилучені.

Весь потік активної потужності генератора направляється через опір X_{E_u}, поєднує ЕРС E' генератора з напругою U_c приймальної системи (рис.3.2,в). В цих умовах характеристика потужності генератора $P_{II} = \dfrac{E'U_c}{X_{E_u}} \sin\delta$. Амплітуда характеристики потужності для аварійного режиму залежить від опору X_{E_u}. Цей опір є взаємним опором між ЕРС генератора і напругою системи. В свою чергу, взаємний опір залежить від опору шунта короткого замикання. Зменшення опору шунта, призводить до збільшення взаємного опору і, відповідно, до зниження амплітуди характеристики потужності.

Найбільш тяжким видом короткого замикання є трифазне. При трифазному замиканні, наприклад на початку лінії, взаємний опір нескінченно великий й амплітуда характеристики потужності дорівнює нулю. Найлегшим видом короткого замикання є однофазне, тому що йому відповідає самий великий опір шунта короткого замикання.

Характеристики потужності для нормального, аварійного і післяаварійного режимів показані на рис.3.3. Віддаюча генератором потужність і кут між ЕРС E' і напругою U_c в нормальному режимі позначенні відповідно P_0 і δ_0.

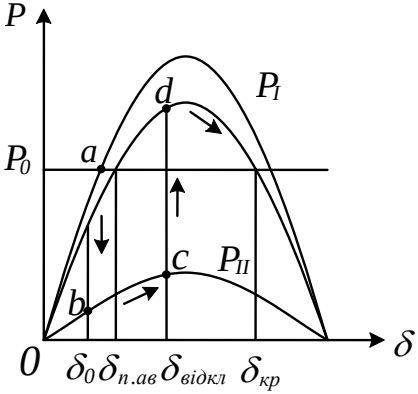


Рис. 3.3

В момент, відповідний початку короткого замикання, в зв'язку із зміною параметрів схеми відбувається перехід із точки *а* характеристики нормального режиму в точку *в* характеристики аварійного режиму, так як в наслідок інерції ротора генератора кут δ миттєво змінитися не може. В результаті на валу генератора виникає деякий надлишковий прискорюючий момент, обумовлений різністю потужностей первинного двигуна, рівний $P_{0,}$ і електромагнітною потужністю генератора.

Під впливом цього моменту ротор генератора почне переміщатися відносно вектора напруги приймальної системи (кут δ буде збільшуватися). Цьому переміщенню відповідає рух робочої точки по характеристиці аварійного режиму із *в* по напрямку до *с*.

Якщо при якому–небудь значення кута $\delta_{відкл}$ пройде відключення пошкодженої мережі ліній електропередач, то в цей момент виникне перехід із точки *с* – характеристики аварійного режиму в точку *d* - характеристики післяаварійного режиму. Потужність первинного двигуна генератора під час переходу процесу внаслідок інерціальності системи регулювання швидкості турбіни залишиться незмінною і рівною $P_{0.}$

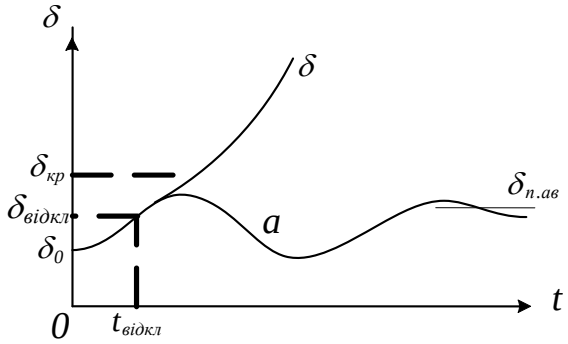


Рис. 3.4

Після відключення короткого замикання електромагнітна потужність генератора більше механічної потужності турбіни і на його валу з'явиться гальмівний момент. Незважаючи на це ротор генератора буде ще деякий час рухатися в сторону збільшення кута δ, доки не використається накопичена ним на шляху від δ_0 до $\delta_{відкл}$ кінетична енергія. В цей період генератор покриває надлишок віддаючої їм електромагнітної потужності за рахунок кінетичної енергії, накопиченої ним в період прискорення.

Якщо вся кінетична енергія буде використана до досягнення ротором генератора кута $\delta_{кр}$, під дією надлишкового гальмівного моменту ротор почне переміщуватись в зворотному напрямку по характеристиці потужності післяаварійного режиму і після декількох коливань перейде в новий установлений режим з кутом $\delta_{п\ ав.}$. Якщо ротор пройде кут $\delta_{кр}$, надлишковий момент знову стане прискорюючим. Із збільшенням кута прискорюючий момент буде прогресивно збільшуватися і генератор випаде із синхронізму. Таким чином, в першому випадку систему слід визнати динамічно стійкою, в другому випадку – нестійкою. Характер зміни кута в часі показаний на рис.3.4,а. – система стійка, рис.3.4,б.- система нестійка.

3.4 Використання методу площин для аналізу динамічної стійкості простих систем

Метод площин зручний для аналізу динамічної стійкості системи виду генератор – зовнішня схема – ШНП при разових різких змінах в схемі або в режимі. На рис.3.5. показаний приклад аналізу динамічної стійкості схеми при аварії виду доаварійного режиму – аварія.

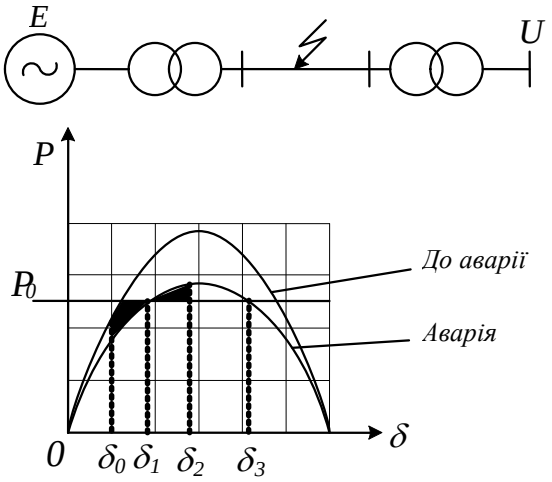


Рис. 3.5

Тут майданчик прискорення

$$S_{уск} = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_0 - P_r) d\delta$$

площадка гальмування

$$S_{тор} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_r - P_0) d\delta$$

можлива площадка гальмування

$$S_{в.тор} = \int_{\delta_1}^{\delta_3} (P_r - P_0) d\delta$$

Генератор динамічно стійкий, якщо можлива площадка гальмування більша площадки прискорення.

Якщо всієї можливої площадки гальмування не вистачає для компенсації площадки прискорення або якщо площадка гальмування відсутня (максимум аварійної кутової характеристики лежить нижче прямої $P_{0,}$ характеризуючої потужність, віддаючу генератору турбіною), генератор динамічно нестійкий.

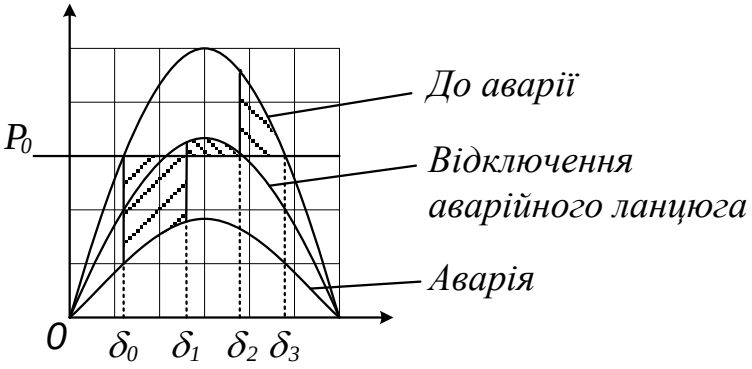


Рис. 3.6

Метод площ використовується для аналізу динамічної стійкості і при складному ході аварії, якщо раніше відомо, при яких значеннях кутів δ здійснюється той або інший перехід. В цьому випадку висновок про стійкість або нестійкість робиться на основі порівняння результуючих площадок прискорення і гальмування. На рис.3.6 продемонстровано на

прикладі перехідного процесу виду доаварійний режим $\xrightarrow{\delta_0}$ коротке замикання одного ланцюга 2-ланцюгової лінії $\xrightarrow{\delta_1}$ відключення аварійного ланцюга $\xrightarrow{\delta 2}$ успішне АПВ.

3.5 Приклад розрахунку динамічної стійкості методом площ

Задача. Знайти чи стійкий динамічний генератор (рис.3.7.) при виникненні в точці *К* металічного однофазного короткого замикання.

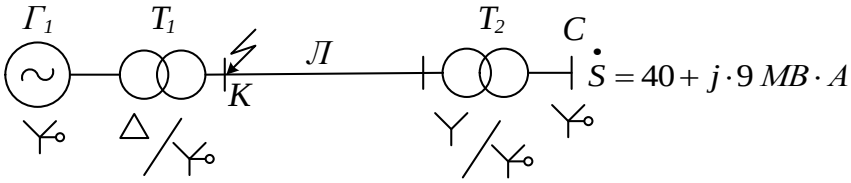


Рис. 3.7

Параметри елементів схеми:

1) Генератор Г-1 $S_н$=50МВ·А; $U_н$=10кВ; $X_d=X_q$=1.80; $X_d^{//}$=0.25; $X_d^{/}$=0.30; АРЗ відсутнє; з'єднання обмоток Y^0; T_j=9 с.

2) Трансформатор Т-1: $S_н$=60МВ·А U_1/U_2=10/110кВ; U_k=12%; конструкція 3-однофазних; з'єднання обмоток (НН-ВН) Δ / Y^0;

трансформатор Т-2: $S_н$=60МВ·А U_1/U_2=110/330кВ; U_k=12%; конструкція 3-фазних 5-стержневий; з'єднання обмоток (110-330кВ) Y / Y^0;

3) Система С: $S_н=\infty$; $X=0$; з'єднання Y^0.

4) Лінія Л-1: $U_н$=110кВ; X_0= 0,40 Ом/км; l=66 км.

Розв'язання: Базис $S_б$=100МВ·А. доаварійна схема (рис.3.8.):

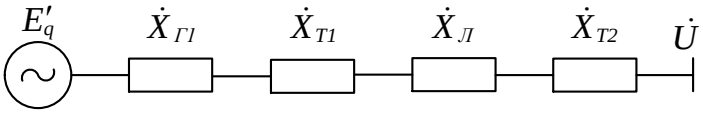


Рис. 3.8

Параметри її елементів:

1) Генератор Г-1 (при розрахунках динамічної стійкості заміщується перехідними параметрами): $X_{Г1} = X'_d \frac{S_\delta}{S_н} = 0.30 \cdot \frac{100}{50} = 0.60;$

$$T_j = 9\frac{S_\delta}{S_н} = 9\frac{50}{100} = 4.5c.$$

2) Трансформатори Т-1, Т-2: $X_T = \frac{U_k\%S_\delta}{100S_н} = \frac{12.0}{100} \cdot \frac{100}{60} = 0.20;$

3) Лінія Л-1: $X_Л = X_0 l_0 \frac{S_\delta}{U_{ср}^2} = 0.40 \cdot 66 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.20.$

Повний опір доаварійної схеми

$$X_\Sigma = X_{Г1} + 2X_{Т1} + X_Л = 0.60 + 2 \cdot 0.20 + 0.20 = 1.200$$

ЕРС генератора в схемі заміщення

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 X_2}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_2}{U_c}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(1 + 0.09 \cdot 1.2)^2 + (0.4 \cdot 1.2)^2} = 1.21$$

$$\delta_0 = arcsin\frac{P_0}{P_r} = arcsin\frac{0.4}{1.01} = 23.33$$

Доаварійна кутова характеристика

$$P_r = \frac{E_q' U}{X_\Sigma} sin\,\delta = \frac{1.210 \cdot 1.000}{1.200} sin\,\delta = 1.010\,sin\,\delta$$

В аварійному режимі – схема прямої послідовності (рис.3.9)

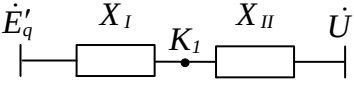


Рис. 3.9

$$\dot{X}_I = \dot{X}_{Г1} + \dot{X}_{Т1} = j0.60 + j0.20 = j0.80$$

$$\dot{X}_{II} = \dot{X}_Л + \dot{X}_{Т1} = j0.20 + j0.20 = j0.40$$

Схема зворотної послідовності (рис.3.10.):

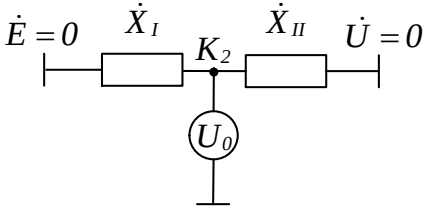


Рис. 3.10

$$\dot{X}_{2\Sigma} = \dot{X}_I \;//\; \dot{X}_{II} = j\frac{0.75 \cdot 0.40}{0.75 + 0.40} = j0.260$$

Схема нульової послідовності (рис.3.11.) має тільки підвищуючий трансформатор, так як в сторону понижаючого трансформатора струм нульової послідовності текти не може (зі сторони КЗ нема заземленої нейтралі). Таким чином,

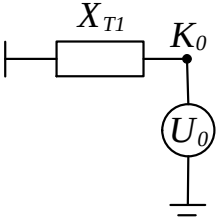


Рис. 3.11

$$\dot{X}_{0\Sigma} = jX_{T1} = j \cdot 0.20$$

опір шунта для однофазного КЗ

$$\dot{Z}_ш = \dot{Z}_{2\Sigma} + \dot{Z}_{0\Sigma} = j \cdot 0.260 + j \cdot 0.200 = j \cdot 0.460.$$

Схема для розрахунків аварійної кутової характеристики (рис.3.12.):

$$X_{12} = X_I + X_{II} + \frac{X_I X_{II}}{X_ш} = 0.80 + 0.40 + \frac{0.80 \cdot 0.40}{0.460} = 1.895$$

Аварійна кутова характеристика

$$P_{Гавар} = \frac{E'_q U}{X_{12}} \sin\delta =$$

$$= \frac{1.210 \cdot 1.000}{1.895} \sin\delta = 0.638 \sin\delta$$

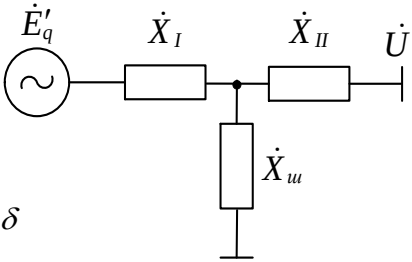


Рис. 3.12

Побудувавши доаварійну і аварійну кутові характеристики, знайдемо площадку прискорення і можливу площадку гальмування (рис. 3.13.). Генератор стійкий, так як використовує тільки частину можливої площадки гальмування. В результаті перехідного процесу він (після того, як хитання кутів затухнуть) залишиться працювати на аварійній кутовій характеристиці з кутом:

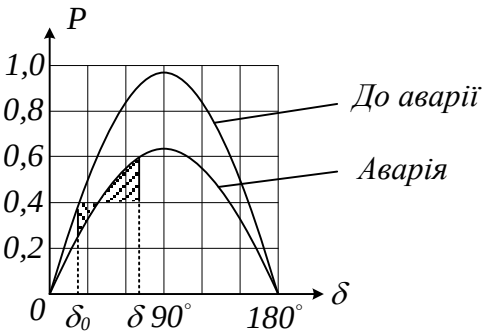


Рис. 3.13

$$\delta = \arcsin\frac{P_0}{P_{Гавар}} = \arcsin\frac{0.400}{0.638} = 38^\circ 50'.$$

3.6 Використання методу послідовних інтервалів для аналізу динамічної стійкості простих систем

Метод послідовних інтервалів використовується для аналізу динамічної стійкості при будь-якому ході аварії, коли динамічні переходи відомі тільки як функція часу. Він складається в приблизному рішенні в кінцевих приростах нелінійного диференціального рівняння хитання машини:

$$T_j = \frac{d^2\delta}{dt} = P_0 - P_Г$$

Стосовно до системи генератор – зовнішня схема – ШНП порядок розрахунків наступний:

1) Для заданої системи складають доаварійну схему заміщення. Знаходять її параметри в відносних одиницях. Розраховують доаварійну кутову характеристику.

2) Для всіх аварійних складових схеми знаходять опір шунтів. З їх урахуванням знаходять значення результуючих параметрів і розраховують аварійні кутові характеристики.

3) Аналогічно розглядають кутові характеристики також для других змін в схемі, передбачених ходом аварії.

4) Розбивають час на інтервали Δt (звичайно $\Delta t=0.05+0.20c$.). Знаходять постійну інтегрування $K = \frac{360\, f}{T_j}(\Delta t)^2$ де f - частота системи, *Гц*; T_j- постійна інерції генератора, *с*; Δt - інтервал часу, *с*;

5) Для першого моменту часу аварії знаходять небаланс потужності $\Delta P_{(0)}$ на валу генератора. Знаходять приріст кута на першому інтервалі:

$$\Delta\delta_{(1)} = K\frac{\Delta P_0}{2}$$

і значення кута в його кінці:

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta\delta_{(1)}$$

1)З урахування $\delta_{(1)}$ знаходять небаланс потужності $\Delta P_{(1)}$ на валу генератора в кінці першого (початку другого) інтервалу часу.

Находять приріст кута на другому інтервалі:

$$\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + K\Delta P_{(1)}$$

і кут в кінці другого інтервалу

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)}.$$

На всіх наступних інтервалах приріст кута знаходиться по формулі

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K\ \Delta P_{(n-1)} \qquad (3.1)$$

до наступної різкої зміни режиму. На першому інтервалі після такої зміни (рис.3.14,*а* - збільшення потужності; рис.3.14,*б* - зменшення потужності) приріст кута знаходиться по формулі:

$$\Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + K\frac{\Delta P'_{(n-1)} + \Delta P''_{(n-1)}}{2},$$

де $\Delta P'_{(n-1)}$ - надлишок потужності на валу генератора, що визначається кутовою характеристикою, з якої відбувається перехід;

$\Delta P''_{(n-1)}$ - те саме, на яку відбувається перехід.

Потім знову використовується формула (3.1) до наступної різкої зміни стану схеми. Розраховують до тих пір, поки не будуть отримані вичерпні відомості про стійкість або нестійкість генератора.

Інколи в процесі розрахунків перехідного процесу виявляється доцільним змінювати розрахунковий інтервал Δt. Наприклад, на тих

етапах процесу, де відбуваються різкі зміни яких-небудь параметрів режиму, доцільно вибрати менший інтервал; там, де зміни мають заздалегідь монотонний характер, доцільно перейти на більший інтервал.

Значення потужності P і ΔP, фігуруючі в методі послідовних інтервалів, визначаються у відповідності зі схемою заміщення системи що розглядається і припущеннями відносно протікання перехідних процесів.

При спрощеному підході, коли ні електромагнітні перехідні процеси, ні дія регуляторів збудження не враховуються, потужність розраховується при $E_q' = const$.

Для генератора без АРЗ ознакою стійкості є початок (в післяаварійному режимі) зменшення кута. Якщо кут постійно

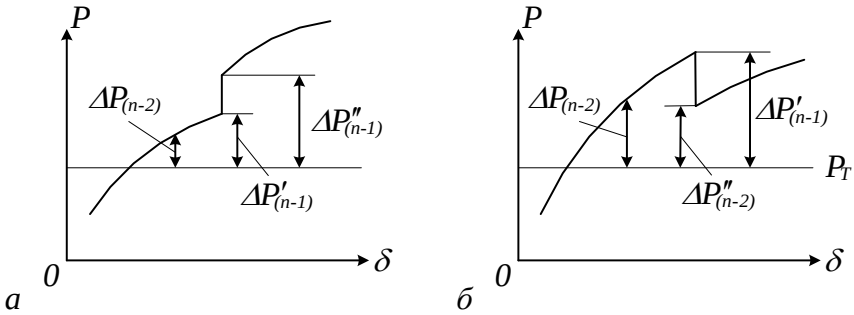


Рис. 3.14

збільшується, це каже про нестійкість генератора.

3.7 Приклад розрахунку динамічної стійкості простої системи методом послідовних інтервалів

Задача: Для схеми що розглядається (див. рис.3.7.) визначити чи стійкий динамічний генератор при ході аварії: доаварійний режим → двофазне коротке замикання на землю тривалістю 0.10с.→ відключення аварійної лінії на 0,25 с. → успішне АПВ.

Доаварійна схема заміщення відповідає рис.3.8. для неї

$$X_I = 1.200; E_q' = 1.210; \delta_{(0)} = 23^\circ 20'; P_0 = 0.400.$$

Схема прямої послідовності відповідає рис.3.9. для неї

$$\dot{X}_I = j \cdot 0.80; X_{II} = j \cdot 0.40.$$

Схема зворотної послідовності відповідає рис.3.10. для неї $X_{2\Sigma} = j \cdot 0.260$.

Схема нульової послідовності відповідає рис.3.11. для неї

$$\dot{X}_{0\Sigma} = j \cdot 0.200.$$

Опір шунта для двофазного на землю КЗ:

$$\dot{X}_{ш} = \frac{\dot{X}_{2\Sigma} \cdot \dot{X}_{0\Sigma}}{\dot{X}_{2\Sigma} + \dot{X}_{0\Sigma}} = j \frac{0.260 \cdot 0.200}{0.260 + 0.200} = j \cdot 0.113.$$

Схема для розрахунку кутової характеристики при двофазному на землю КЗ відповідає рис.3.12. Тоді

$$X_{12} = X_I + X_{II} + \frac{X_I \cdot X_{II}}{X_{III}} = 0.80 + 0.40 + \frac{0.80 \cdot 0.40}{0.113} = 4.03$$

і кутова характеристика має вид

$$P_Г = \frac{E_q' U}{X_{12}} \sin\delta = \frac{1.210 \cdot 1.000}{4.030} \sin\delta = 0.300 \cdot \sin\delta .$$

Для випадку відключення аварійної лінії кутова характеристика відсутня ($P_Г=0$), так як при цьому переривається зв'язок між передаючим генератором і приймачем. Приймемо за основу інтервал $\Delta t=0{,}05c$. Тоді постійна інтегрування

$$K = \frac{360}{T_j} f(\Delta t)^2 = \frac{360 \cdot 50}{4.5} (0.05)^2 = 10.$$

Розрахунок перехідного процесу

1. Перший інтервал (після настання КЗ):

$$\Delta P_{(0)} = 0.400 - 0.300 \cdot 23^\circ 20' = 0.281;$$
$$\Delta\delta_{(1)} = 10 \cdot 0.5 \cdot 0.281 = 1^\circ 24';$$
$$\delta_{(1)} = 23^\circ 20' + 1^\circ 24' = 24^\circ 44'.$$

2. Другий інтервал (продовжується режим КЗ):

$$\Delta P_{(1)} = 0.400 - 0.300 \cdot 24^\circ 44' = 0.274;$$
$$\Delta\delta_{(2)} = 1^\circ 24' + 10 \cdot 0{,}27 = 4^\circ 08';$$
$$\delta_{(2)} = 24^\circ 44' + 4^\circ 08' = 28^\circ 52'.$$

3. Третій інтервал (перший інтервал після відключення аварійної лінії):

$$\Delta P'_{(2)} = 0.400 - 0.302 \cdot 28^\circ 52' = 0.255;$$
$$\Delta P''_{(2)} = 0.400 - 0 = 0.400;$$
$$\Delta\delta_{(3)} = 4^\circ 08' + 10 \cdot 0.5(0.255 + 0.400) = 7^\circ 25';$$
$$\delta_{(3)} = 28^\circ 52' + 7^\circ 25' = 36^\circ 17'.$$

4. Четвертий інтервал (продовження режиму відключення лінії):

$$\Delta P_{(3)} = 0.400 - 0 = 0.400;$$
$$\Delta\delta_{(4)} = 7^\circ 25' + 10 \cdot 0{,}400 = 11^\circ 25';$$
$$\delta_{(4)} = 36^\circ 17' + 11^\circ 25' = 47^\circ 42'.$$

5. П’ятий інтервал (продовжується інтервал відключення лінії):

$$\Delta P_{(4)} = 0.400 - 0 = 0.400;$$
$$\Delta\delta_{(5)} = 11^\circ 25' + 10 \cdot 0.400 = 15^\circ 25';$$
$$\delta_{(5)} = 47^\circ 42' + 15^\circ 25' = 63^\circ 07'.$$

6. Шостий інтервал (продовжується режим відключення лінії):

$$\Delta P_{(5)} = 0.400 - 0 = 0.400;$$
$$\Delta\delta_{(6)} = 15^\circ 25' + 10 \cdot 0.400 = 19^\circ 25';$$
$$\delta_{(6)} = 63^\circ 07' + 19^\circ 25' = 82^\circ 32'.$$

7. Сьомий інтервал (продовжується режим відключення лінії):

$$\Delta P_{(6)} = 0.400 - 0 = 0.400;$$
$$\Delta\delta_{(7)} = 19^\circ 25' + 10 \cdot 0.400 = 23^\circ 25';$$
$$\delta_{(7)} = 82^\circ 32' + 23^\circ 25' = 105^\circ 57'.$$

8. Восьмий інтервал (перший інтервал після успішного АПВ):

$$\Delta P'_{(7)} = 0.400 - 0 = 0.400;$$
$$\Delta P''_{(7)} = 0.400 - 1.010 \cdot 105^\circ 57' = -0.570;$$
$$\Delta\delta_{(8)} = 23^\circ 25' + 10 \cdot 0.5(0.400 - 0.570) = 23^\circ 24';$$
$$\delta_{(8)} = 105^\circ 57' + 22^\circ 34' = 128^\circ 31'.$$

9. Дев’яти інтервал:

$$\Delta P_{(8)} = 0.400 - 1.010 \cdot 128^\circ 31' = -0.390;$$
$$\Delta\delta_{(9)} = 22^\circ 34' - 10 \cdot 0.390 = 18^\circ 40';$$
$$\delta_{(9)} = 128^\circ 31' + 18^\circ 40' = 137^\circ 11'.$$

10. Десятий інтервал:

$$\Delta P_{(9)} = 0.400 - 1.010 \sin 137^\circ 11' = -0.286;$$
$$\Delta\delta_{(10)} = 18^\circ 40' - 10 \cdot 0{,}86 = 15^\circ 48';$$
$$\delta_{(10)} = 137^\circ 11' + 15^\circ 48' = 152^\circ 59'.$$

11. Одинадцятий інтервал:

$$\Delta P_{(10)} = 0.400 - 1.010 \sin 137^\circ 11' = -0.059;$$
$$\Delta\delta_{(11)} = 14^\circ 48' + 10 \cdot 0{,}059 = 15^\circ 13';$$
$$\delta_{(11)} = 159^\circ 59' + 15^\circ 13' = 175^\circ 12'.$$

12. Дванадцятий інтервал:

$$\Delta P_{(11)} = 0.400 - 1.010 \sin 152^\circ 59' = 0.321;$$
$$\Delta\delta_{(12)} = 15^\circ 13' + 10 \cdot 0.321 = 18^\circ 26';$$
$$\delta_{(12)} = 175^\circ 12' + 18^\circ 26' = 193^\circ 38'.$$

Генератор нестійкий, так як кут безмежно зростає в часі (рис.3.15). На рис.3.16 це додатково показується за допомогою площадок

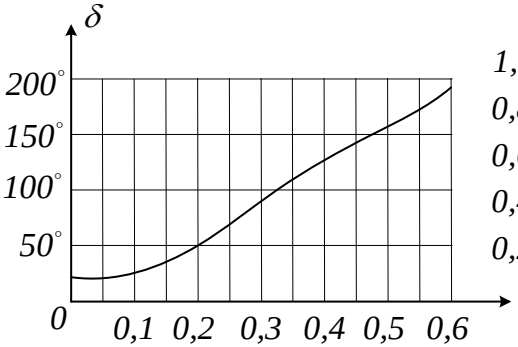


Рис. 3.15

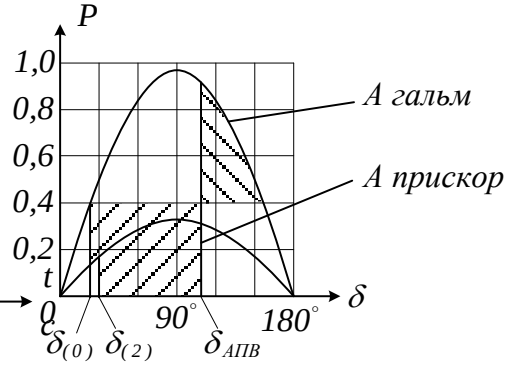


Рис. 3.16

прискорення і гальмування, побудованих на основі результатів розрахунків.

3.8 Розрахунок динамічної стійкості багатомашинних систем

Порядок розрахунку методом послідовних інтервалів.

1. Для даної системи складають доаварійну схему заміщення. Визначають її параметри в відносних одиницях. Із електричного розрахунку доаварійного стану знаходять ЕРС всіх генераторів і кут між ними. Розраховують особисті і загальні опори і кути їх втрат.

2. Для всіх аварійних станів схеми визначають схеми зворотньої і нульової послідовності. Приводять їх до простого виду, з'єднують результуючі опори в співвідношенні з правилом еквівалентності прямої послідовності і знаходять опір шунтів. З урахуванням шунтів, що підключаються в точці КЗ, знаходять аварійні значення власних і взаємних опорів і їх кутів втрат, вираховують аварійні кутові характеристики.

3. Аналогічно розраховують також для інших змін в схемі, передбачених ходом аварії.

4. Розбиваємо час на інтервали Δt. Знаходять постійну інтегрування:

$$K_1 = \frac{360 \cdot f}{T_{j_1}} (\Delta t)^2;$$

$$K_1 = \frac{360 \cdot f}{T_{j_2}} (\Delta t)^2;$$

……

$$K_1 = \frac{360 \cdot f}{T_{j_n}} (\Delta t)^2.$$

5. Визначають потужності генераторів системи в перший момент аварії і небаланси потужності $\Delta P_{1(0)}$, $\Delta P_{2(0)}$,... ,$\Delta P_{n(0)}$, на їх валах. Вирахуємо кутове переміщення в першому інтервалі часу:

$$\Delta\delta_{1(1)} = K_1 \frac{\Delta P_{1(0)}}{2};$$

$$\Delta\delta_{2(1)} = K_2 \frac{\Delta P_{2(0)}}{2};$$

.....

$$\Delta\delta_{n(1)} = K_n \frac{\Delta P_{n(0)}}{2}.$$

Знаходять значення кута в кінці першого інтервалу:

$$\delta_{1(1)} = \delta_{1(0)} + \Delta\delta_{1(1)};$$

$$\delta_{2(1)} = \delta_{2(0)} + \Delta\delta_{2(1)};$$

.....

$$\delta_{n(1)} = \delta_{n(0)} + \Delta\delta_{n(1)}.$$

Визначають значення взаємних кутів в кінці першого інтервалу:

$$\delta_{12(1)} = \delta_{1(1)} - \delta_{2(1)};$$

$$\delta_{13(1)} = \delta_{1(1)} - \delta_{3(1)};$$

.....

6. Знаходять потужності генераторів системи в кінці першого (початку другого) інтервалу часу і небаланси потужності $\Delta P_{1(1)}$, $\Delta P_{2(1)}$,... ,$\Delta P_{n(1)}$, на їх валах. Знаходять кутове переміщення в другому інтервалі часу:

$$\Delta\delta_{1(2)} = \Delta\delta_{1(1)} + K_1\Delta P_{1(1)};$$

$$\Delta\delta_{2(2)} = \Delta\delta_{2(1)} + K_2\Delta P_{2(1)};$$

.....

$$\Delta\delta_{n(2)} = \Delta\delta_{n(1)} + K_n\Delta P_{n(1)}.$$

Знаходять значення кута в кінці другого інтервалу:

$$\delta_{1(2)} = \delta_{1(1)} + \Delta\delta_{1(2)};$$

$$\delta_{2(2)} = \delta_{2(1)} + \Delta\delta_{2(2)};$$

.....

$$\delta_{n(2)} = \delta_{n(1)} + \Delta\delta_{n(2)}.$$

Визначають значення взаємних кутів в кінці другого інтервалу:

$$\delta_{12(2)} = \delta_{1(2)} - \delta_{2(2)};$$

$$\delta_{13(2)} = \delta_{1(2)} - \delta_{3(2)};$$

.....

На всіх наступних інтервалах приріст кута знаходиться по формулам:

$$\begin{aligned}
&\Delta\delta_{1(m)} = \Delta\delta_{1(m-1)} + K_1 \Delta P_{1(m-1)};\\
&\Delta\delta_{2(m)} = \Delta\delta_{2(m-1)} + K_2 \Delta P_{2(m-1)};\\
&.....\\
&\Delta\delta_{n(m)} = \Delta\delta_{n(m-1)} + K_2 \Delta P_{n(m-1)}.
\end{aligned} \qquad (3.2)$$

впритул до нової різкої зміни режиму. На першому інтервалі після такої зміни (відключення пошкодженого ланцюга, форсування генератора, перехід КЗ із одного виду в другий і т.д.) приріст кутів знаходять по формулам:

$$\begin{aligned}
&\Delta\delta_{1(m)} = \Delta\delta_{1(m-1)} + K_1 \frac{\Delta P_{1(m-1)} + \Delta P''_{1(m-1)}}{2};\\
&\Delta\delta_{2(m)} = \Delta\delta_{2(m-1)} + K_2 \frac{\Delta P'_{2(m-1)} + \Delta P''_{2(m-1)}}{2};\\
&.....\\
&\Delta\delta_{n(m)} = \Delta\delta_{n(m-1)} + K_n \frac{\Delta P'_{n(m-1)} + \Delta P''_{n(m-1)}}{2}.
\end{aligned}$$

Тут $\Delta P'$ і $\Delta P''$ - небаланси потужності, що розраховуються кутовою характеристикою, з якої відбувається перехід, і кутової характеристики, на яку відбувається перехід.

На наступних інтервалах розраховують приріст кутів по формулам (3.2), впритул до наступної різкої зміни режиму. Розрахунок ведуть до тих пір, поки не виявлять інформації, достатньої для визначення стійкості або не стійкості системи. Якщо для всіх взаємних кутів системи виявились цикли не затухаючі в часі биття, система стійка. Якщо всі або групи взаємних кутів постійно збільшуються в часі, система динамічно нестійка.

3.9 Приклад розрахунку динамічної стійкості багатомашинної системи

Задача. Прослідити за 0,7 с. перехідний процес системи (рис.3.17.) при ході аварії доаварійний режим → трифазне коротке замикання на затискачах навантаження → відключення навантаження разом з джерелом КЗ через 0,2 с. генератори системи не мають АРЗ.

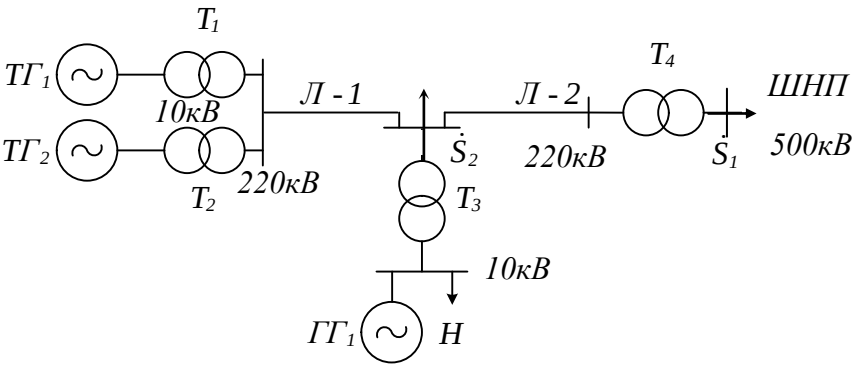


Рис. 3.17

Параметри елементів схеми:

1) генератори ТГ-1, 2: $P_н$=*50 МВт; cosφ$_н$=0,80; U$_н$=10 кВ; T$_j$=4с.; X$_d$=1,60; X''$_d$=0,30*;

ГГ-1; *P$_н$=200 МВт; cosφ$_н$=0,85; U$_н$=10 кВ; T$_j$=6,8с.; X$_d$=0,30;X$_q$=0,60 X'$_d$=0,20*;

2) приймальна система: *S$_н$=~; X=0; U$_н$=500кВ; T$_j$=~;*

3) трансформатори Т-1, Т-2: *S$_н$=80 МВ·А; U$_1$/U$_2$=10/220 кВ; U$_к$=10%;*

трансформатор Т-3: *S$_н$=100 МВ·А; U$_1$/U$_2$=10/220 кВ; U$_к$=10,5%;*

трансформатор Т-4: *S$_н$=200 МВ·А; U$_1$/U$_2$=220/500 кВ; U$_к$=11,5%;*

4) навантаження Н-1: *P$_н$=100 МВт; cosφ$_н$=0,80; U$_н$=10 кВ*;

5)лінія Л-1: *U$_н$=220 кВ; X$_0$=0,41 Ом/км; l=40км;* лінія Л-2: *U$_н$=220 кВ; X$_0$=0,41 Ом/км; l=60км;*

Розв'язання : Еквівалентна схема заміщення (S_δ=100 МВ·А і U_δ=$U_{ср}$):

1) генератори ТГ-1,2: без урахування нерівності параметрів по вісям:

$$X_{Г1} = X''_d \frac{S_\delta}{P_н} \cos\varphi_н = 0{,}30 \cdot \frac{100}{50} \cdot 0{,}80 = 0{,}480;$$

2) генератор ГГ-1: оскільки в ньому не має АРЗ, правильніше замінити його опором по поперечній осі:

$$X_{Г2} = X''_d \frac{S_\delta}{P_н} \cos\varphi_н = 0{,}2 \cdot \frac{100}{200} \cdot 0{,}85 = 0{,}085;$$

3) трансформатори Т-1,2:

$$X_{Т1} = \frac{U_к}{100} \frac{S_\delta}{S_н} \cos\varphi_н = \frac{10.0}{100} \cdot \frac{100}{80} = 0{,}125;$$

4)трансформатор Т-3:

$$X_{Т2} = \frac{U_к}{100} \frac{S_\delta}{S_н} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{100}{100} = 0{,}105;$$

5)трансформатор Т-4:

$$X_{Т3} = \frac{U_к}{100} \frac{S_\delta}{S_н} = \frac{11.5}{100} \cdot \frac{100}{200} = 0{,}058;$$

6)навантаження Н-1:

$$\dot{Z}_н = \frac{S_\delta}{\overset{\Lambda}{S}_н} = \frac{S_\delta}{P_н(1 - jtg\varphi_н)} = \frac{100}{100(1 - j \cdot 0.750)} = 0.640 + j \cdot 0.480$$

2)лінія Л-1: ємнісною провідністю на землю нехтуємо:

$$X_{Л1} = X_0 \, l \frac{S_\delta}{U^2_{ср}} = 0.41 \cdot 40 \cdot \frac{100}{230^2} = 0.031;$$

3)лінія Л-2: ємнісною провідністю на землю нехтуємо:

$$X_{Л2} = X_0 \, l \frac{S_\delta}{U^2_{ср}} = 0.41 \cdot 60 \cdot \frac{100}{230^2} = 0.046.$$

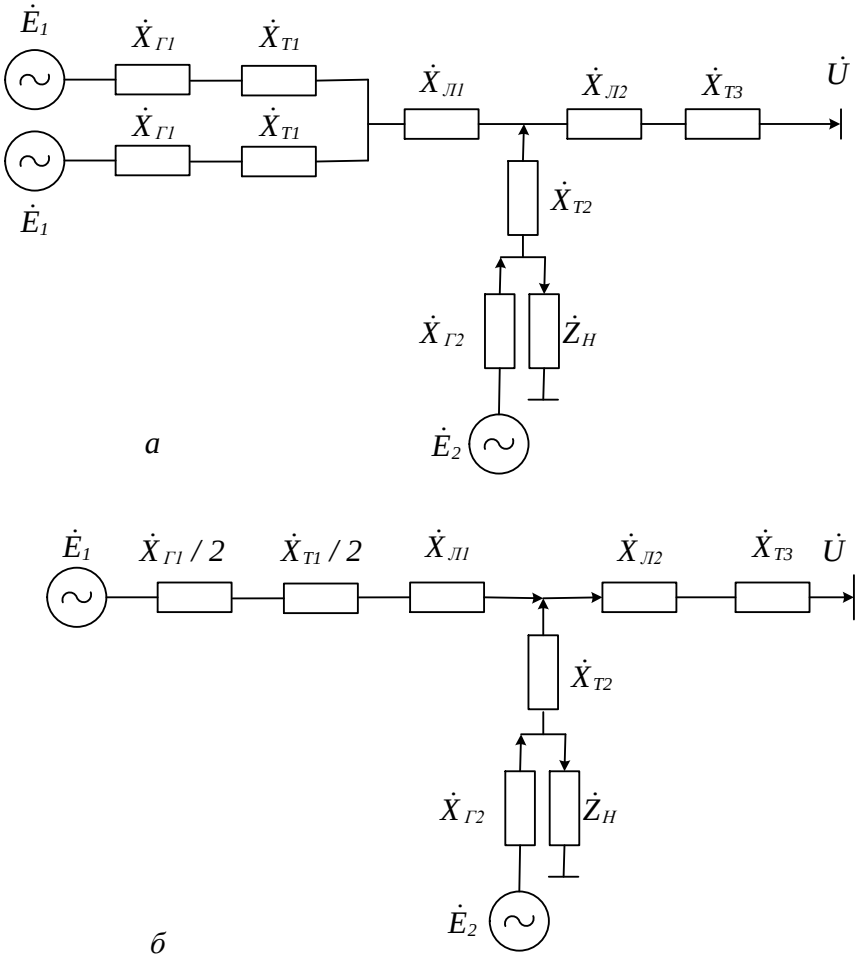


Рис. 3.18

Оскільки генератори ТГ-1 і ТГ-2 мають однакові параметри і працюють в однакових режимах (рис.3.18,а.), їх можна еквівалентувати одним генератором, схема спрощується (рис.3.18,б).

$$\dot{X}_1 = j\frac{X_{Г1} + X_{Т2}}{2} + jX_{Л1} =$$

$$= j \cdot \frac{0.480 + 0.125}{2} + j \cdot 0.031 = j \cdot 0.334;$$

$$\dot{X}_2 = jX_{Л2} + jX_{Т3} = j \cdot 0.046 + j \cdot 0.058 = j \cdot 0.104$$

$$\dot{X}_3 = j \cdot X_{Т2} = j \cdot 0.105$$

$$\dot{X}_4 = j \cdot X_{Г2} = j \cdot 0.085$$

$$Z_5 = Z_н = 0.640 + j \cdot 0.480$$

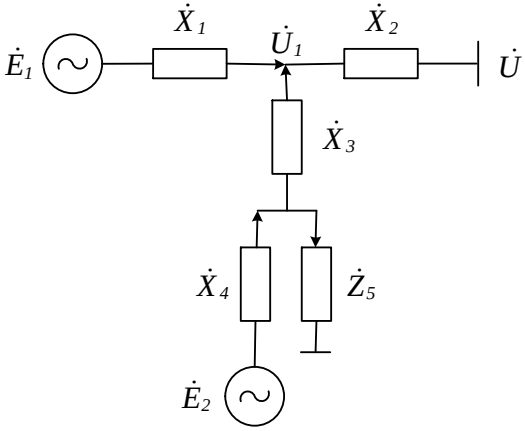


Рис. 3.19

Подальші спрощення схеми (рис.3.19):

Проводиться електричний розрахунок досліджуваного режиму. Напруга ШНП *U=1* (прийнято за вісь відрахунку). Задана потужність, яка отримується із лінії (див.рис.3.17):

$$\dot{S}_1 = \frac{S_1}{S_\delta} = \frac{180 + j \cdot 0}{100} = 1.80 + j \cdot 0.$$

Тоді $$I_2 = \overset{\Lambda}{S}_1 / \overset{\Lambda}{U} = 1.800;$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U} + \dot{X}_2 \dot{I} = 1 + j \cdot 0.104 \cdot 1.800 = 1 + j \cdot 0.187.$$

Задана потужність, отримується із проміжної системи (рис.3.17.):

$$\dot{S}_2 = \frac{80 + j \cdot 13}{100} = 0.800 + j \cdot 0.130.$$

Тоді

$$I_3 = \frac{\hat{S}_2}{\hat{U}} = \frac{0.800 - j \cdot 0.130}{1.000 - j \cdot 0.187} = 0.795 + j \cdot 0.019;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{X}_3 \dot{I}_3 = (1 + j \cdot 0.187) + j \cdot 0.105(0.795 + j \cdot 0.019) =$$
$$= 0.998 + j \cdot 0.270;$$

$$\dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_5} = \frac{0.998 + j \cdot 0.270}{0.640 + j \cdot 0.480} = 1.200 - j \cdot 0.478;$$

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 + \dot{I}_5 = (0.795 + j0.019) + (1.200 - j0.478) = 1.995 - j0.459;$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{X}_4 \dot{I}_4 = (0.998 + j \cdot 0.127) + j \cdot 0.085(1.995 - j \cdot 0.459) =$$
$$= 1.037 + j \cdot 0.44 = 1.126 \angle 23^0 00';$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = (1.80 - (0.795 + j \cdot 0.019) = 1.005 - j \cdot 0.019;$$

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{X}_1 \dot{I}_1 = (1 + j \cdot 0.187) + j \cdot 0.334(1.005 - j \cdot 0.019) =$$
$$= 1.006 + j \cdot 0.523 = 1.135 \angle 27^0 20';$$

Отже, $E_1=1{,}135$; $E_2=1{,}126$; $U=1.000$; $\delta_{13} = 27^0 20'$; $\delta_{23}=23^\circ 00'$; $\delta_{12} = \delta_{13} - \delta_{23} = 4^\circ 20'$ (цифрою 3 позначено ШНП).

1. Розрахунок власних і взаємних опорів для схеми заміщення на рис.3.19:

а)

$$\dot{E}_1 \neq 0; \dot{U} = 0; \dot{E}_2 = 0; \dot{I}_2 = 1; \dot{U}_1 = \dot{X}_2 \dot{I}_2 = j \cdot 0.104 \cdot 1 = j \cdot 0.104$$

$$\dot{Z}_э = \dot{X}_3 + \frac{\dot{X}_4 \dot{Z}_5}{\dot{X}_4 + \dot{Z}_5} = j \cdot 0.105 + \frac{j \cdot 0.085(0.640 + j \cdot 0.480)}{j \cdot 0.085 + (0.640 + j \cdot 0.480)} =$$

$$= 0.006 + j \cdot 0.184$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_1}{Z_э} = \frac{j \cdot 0.104}{0.006 + j \cdot 0.184} = 0.563 + j \cdot 0.020;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - X_3 I_3 = j \cdot 0.104 - j \cdot 0.105(0.563. + j \cdot 0.020) =$$

$$= 0.002 + j \cdot 0.044;$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{X}_4} = \frac{0.002 + j \cdot 0.044}{0.085} = 0.526 - j \cdot 0.024;$$

$$\dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{X}_5} = \frac{0.002 + j \cdot 0.044}{0.640 + j \cdot 0.480} = 0.037 + j \cdot 0.044;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 1.000 + (0.563 + j \cdot 0.020) = 0.563 + j \cdot 0.020;$$

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{X}_1 \dot{I}_1 = j \cdot 0.104 - j \cdot 0.334(1.563. + j \cdot 0.020) =$$

$$= -0.007 + j \cdot 0.625;$$

$$\dot{Z}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-0.007 + j \cdot 0.625}{1.563 + j \cdot 0.020} = 0.001 + j \cdot 0.398;$$

$$\dot{Z}_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-0.007 + j \cdot 0.625}{0.526 - j \cdot 0.024} = -0.066 + j \cdot 1.190;$$

$$\dot{Z}_{13} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_2} = \frac{-0.007 + j \cdot 0.625}{1.000} = 0.007 + j \cdot 0.625;$$

б)

$$\dot{E}_1 = 0; \dot{U} = 0; \dot{E}_2 \neq 0; \dot{I}_2 = 1; \dot{U} = \dot{X}_2 \dot{I}_2 = j \cdot 0.104 \cdot 1 = j \cdot 0.104$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{X_1} = \frac{j \cdot 0.104}{j \cdot 0.334} = 0.311;$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0.311 + 1.000 = 1.311;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{X}_3 \dot{I}_3 = j \cdot 0.104 - j \cdot 0.105 \cdot 1.311 = j \cdot 0.242;$$

$$\dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_5} = \frac{j \cdot 0.242}{0.640 + j \cdot 0.480} = 0.183 + j \cdot 0.242;$$

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_3 + \dot{I}_5 = 1.311 + (0.183 + j \cdot 0.242) = 1.494 + j \cdot 0.242;$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{X}_4 I_4 = j \cdot 0.242 + j \cdot 0.085(1.494 + j \cdot 0.242) =$$
$$= -0.021 + j \cdot 0.369;$$

$$\dot{Z}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_1} = \frac{-0.021 + j \cdot 0.369}{0.311} = -0.066 + j \cdot 1.190;$$

$$\dot{Z}_{22} = \frac{E_2}{\dot{I}_4} = \frac{-0.021 + j \cdot 0.369}{1.494 + j \cdot 0.242} = 0.025 + j \cdot 0.243;$$

$$\dot{Z}_{23} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = \frac{-0.021 + j \cdot 0.369}{1.000} = -0.021 + j \cdot 0.369;$$

Таким чином в доаварійному режимі

$Z_{11}=0.398$ $\alpha_{11}=0°07'$

$Z_{12}=1.190$ $\alpha_{12}= -3°12'$

$Z_{13}=0.625$ $\alpha_{13}= -0°37'$

$Z_{22}=0.243$ $\alpha_{22}=6°00'$

$Z_{23}=0.369$ $\alpha_{23}= -3°12'$

Кутові характеристики генераторів в аварійному режимі:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}}\sin\alpha_{11} + \frac{E_1E_2}{Z_{12}}\sin\left(\delta_{12}-\alpha_{12}\right) + \frac{E_1U}{Z_{13}}\sin\left(\delta_{13}-\alpha_{13}\right) =$$

$$= \frac{1.135^2}{0.398}\sin 0^\circ 07' + \frac{1.135\cdot 1.126}{1.190}\sin\left(\delta_{12}+3^\circ 12'\right) +$$

$$+ \frac{1.135\cdot 1.000}{0.625}\sin\left(\delta_{13}+0^\circ 37'\right) =$$

$$= 0.007 + 1.075\cdot\sin\left(\delta_{12}+3^\circ 12'\right) + 1.820\sin\left(\delta_{13}+0^\circ 37'\right);$$

$$P_2 = \frac{E_2E_1}{Z_{21}}\sin\left(\delta_{21}-\alpha_{21}\right) + \frac{E_2^2}{Z_{22}}\sin\alpha_{22} + \frac{E_2U}{Z_{23}}\sin\left(\delta_{23}-\alpha_{23}\right) =$$

$$= \frac{1.126\cdot 1.135}{1.190}\sin\left(\delta_{21}+3^\circ 12'\right) + \frac{1.126^2}{0.243}\sin 6^\circ 00' +$$

$$+ \frac{1.126\cdot 1.000}{0.369}\sin\left(\delta_{23}+3^\circ 12'\right) =$$

$$= 1.075\cdot\sin\left(\delta_{21}+3^\circ 12'\right) + 0.540 + 3.050\cdot\sin\left(\delta_{23}+3^\circ 12'\right).$$

Для досліджуваного початкового режиму *($\delta_{12}=4°20'$; $\delta_{13}=27°20'$; $\delta_{23}=23°00'$;)*

$P_1=0{,}007+1{,}075\cdot\sin 7°32'+1.820\cdot\sin 27°57'=1.000$;

$P_2= -1{,}075\cdot\sin 1°08'+0{,}540+3.050\cdot\sin 26°21'=1.868$, що співпадає з даними електричного розрахунку:

$P_1=Re[(1{,}006+j\cdot 0.523)(1.005+ j\cdot 0.019)]=1.000$;

$P_2=Re[(1{,}037+j\cdot 0.440)(1.995+ j\cdot 0.459)]=1.868$.

2. Схема заміщення для аварійного режиму (трифазне КЗ на затискачах навантаження) показано на рис.3.20.

Розрахунок власних і загальних опорів для неї:

а)

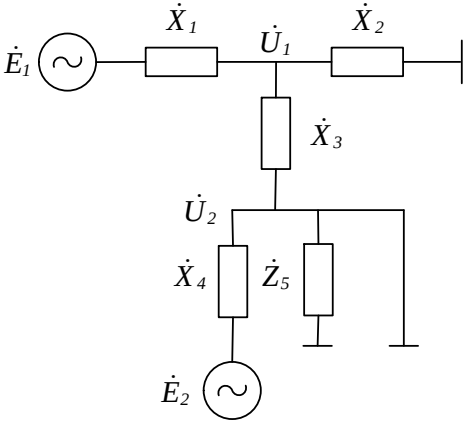


Рис. 3.20

$$\dot{E}_1 \neq 0; U = 0;$$

$$\dot{E}_2 = 0; I_2 = 1;$$

$$\dot{U}_1 = \dot{X}_2 \dot{I}_2 = j \cdot 0.104 \cdot 1.000 = j \cdot 0.104$$

$$\dot{Z}_э = \dot{X}_э = j \cdot 0.105;$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{X}_3} = \frac{j \cdot 0.104}{j \cdot 0.105} = 0.990; \dot{I}_4 = 0; \dot{I}_5 = 0;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 1.000 + 0.990 = 1.990$$

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{X}_1 \dot{I}_1 = j \cdot 0.104 + j \cdot 0.334 \cdot 1.990 = j \cdot 0.769;$$

$$\dot{Z}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} = \frac{j \cdot 0.769}{j \cdot 1.990} = j \cdot 0.387; \alpha_{11} = 0;$$

$$\dot{Z}_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_4} = \frac{j \cdot 0.769}{0} = j \cdot \infty;$$

$$\alpha_{12} = 0; \dot{Z}_{13} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_2} = \frac{j \cdot 0.769}{1} = j \cdot 0.769; \alpha_{13} = 0;$$

б) $\dot{E}_{13} = 0; \dot{E}_2 \neq 0; U = 0.$

не показуючи розрахунків, отримуємо:

$Z_{22}=X_4=j \cdot 0.085;$	$\alpha_{22}=0;$
$Z_{21}=j \cdot \infty;$	$\alpha_{21}=0;$
$Z_{23}= j \infty;$	$\alpha_{23}=0.$

Відповідно аварійні кутові характеристики генераторів:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 U}{Z_{13}} \sin(\delta_{13} - \alpha_{13}) =$$

$$= \frac{1.135 \cdot 1{,}000}{0.769} \sin \delta_{13} = 1{,}478 \sin \delta_{13}$$

$$P_2 = \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) + \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_2 U}{Z_{23}} \sin(\delta_{23} - \alpha_{23}) = 0$$

3. Схема заміщення для післяаварійного режиму (навантаження відключене разом з КЗ) показана на рис.3.21. Тут

$$\dot{X}_6 = \dot{X}_3 + \dot{X}_4 = j \cdot 0.105 + j \cdot 0.085 = j \cdot 0.190.$$

Розрахунок власних і загальних опорів для неї:

а) $\dot{E}_1 \neq 0; \dot{E}_2 = 0; \dot{U} = 0; \dot{I}_2 = 1;$

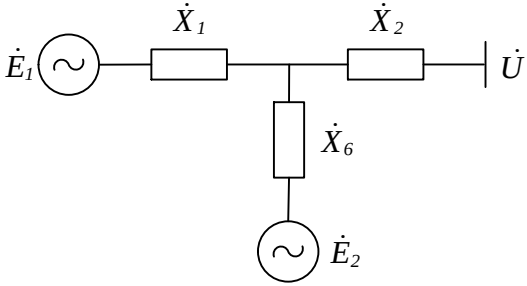


Рис. 3.21

$$\dot{U}_1 = \dot{X}_2 \dot{I}_2 = j \cdot 0.104 \cdot 1 = j \cdot 0.104;$$
$$\dot{I}_6 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{X}_6} = \frac{j \cdot 0.104}{j \cdot 0.190} = 0.547;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_6 = 1.000 + 0.547 = 1.547;$$
$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{X}_1 \dot{I}_1 = j \cdot 0.104 + j \cdot 0.334 \cdot 1.547 = j \cdot 0.620;$$
$$\dot{Z}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} = \frac{j \cdot 0.620}{1.547} = j \cdot 0.401; \alpha_{11} = 0;$$
$$\dot{Z}_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_6} = \frac{j \cdot 0.620}{0.547} = j \cdot 1.135; \alpha_{21} = 0;$$
$$\dot{Z}_{13} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_2} = \frac{j \cdot 0.620}{1.000} = j \cdot 0.60; \alpha_{13} = 0;$$

б)

$$\dot{E}_1 = 0; \dot{U} = 0; \dot{E}_2 \neq 0; \dot{I}_2 = 1; \dot{U}_1 = \dot{X}_2 \dot{I}_2 = j \cdot 0.104 \cdot 1 = j \cdot 0.104$$

$$\dot{I}_1 = \frac{U_1}{\dot{X}_1} = \frac{j \cdot 0.104}{j \cdot 0.334} = 0.312;$$
$$\dot{I}_6 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0.312 + 1.000 = 1.312;$$
$$\dot{E}_2 = \dot{X}_6 \dot{I}_6 = j \cdot 0.104 + j \cdot 0.190 \cdot 1.312 = j \cdot 0.353;$$
$$\dot{Z}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = \frac{j \cdot 0.353}{0.312} = j \cdot 1.135; \alpha_{21} = 0;$$
$$\dot{Z}_{22} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_6} = \frac{j \cdot 0.353}{1.312} = j \cdot 0.269; \alpha_{22} = 0;$$
$$\dot{Z}_{23} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = \frac{j \cdot 0.353}{1.000} = j \cdot 0.353; \alpha_{23} = 0;$$

Відповідно кутові характеристики генераторів для післяаварійного режиму:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 U}{Z_{13}} \sin(\delta_{13} - \alpha_{13}) =$$
$$= \frac{1.135 \cdot 1{,}126}{1{,}135} \sin \delta_{12} + \frac{1.135 \cdot 1{,}0}{0{,}62} \sin \delta_{13} = 1{,}126 \sin \delta_{12} + 1{,}83 \sin \delta_{13};$$

$$P_2 = \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) + \frac{E_2{}^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_2 U}{Z_{23}} \sin(\delta_{23} - \alpha_{23}) =$$
$$= \frac{1.135 \cdot 1{,}126}{1{,}135} \sin \delta_u + \frac{1{,}126 \cdot 1.0}{0.353} \sin \delta_{23} = 1{,}126 \sin \delta_u + 316 \sin \delta_{23}.$$

4. Постійні інерції генераторів – в перерахунку на базис:

$$T_{j1} = 4 \frac{P_н}{S_\delta \cos \varphi_н} = \frac{4 \cdot 100}{100 \cdot 0.80} = 5c.$$
$$T_{j2} = 6.8 \frac{P_н}{S_\delta \cos \varphi_н} = \frac{0.8 \cdot 20}{100 \cdot 0.85} = 16c.$$

Тоді для вибраного інтервалу часу $\Delta t=0,1c$. з постійним інтегруванням:

$$K_1 = \frac{360\,f}{T_{j1}}(\Delta t)^2 = \frac{360\cdot 50\cdot (0.1)^2}{5} = 36;$$

$$K_2 = \frac{360\,f}{T_{j2}}(\Delta t)^2 = \frac{360\cdot 50\cdot (0.1)^2}{16} = 11.25;$$

5. За синхронну вісь прийнятий вектор ШНП ($\dot{U} = 1$). Тоді

$$\delta_1 = \delta_{13};\ \ \delta_2 = \delta_{23}.$$

6. **Перший інтервал часу** (КЗ на шинах навантаження):

потужності генераторів до аварії $P_1=1.000;\ P_2=1.868$;

потужності генераторів в перший момент аварії $P_1=1.478\cdot sin27°20'=0.677;\ P_2=0;$

небаланси потужності на валу генераторів $\Delta P_{1(0)}=1-0.677=0.323;\ \Delta P_{2(0)}=1.868-0=1.868$;

прирости на першому інтервалі $\Delta\delta_{1(1)}=0.5\cdot 36\cdot 0.323=5°49';\ \Delta\delta_{2(1)}=0.5\cdot 11.25\cdot 1.868=10°33'$;

значення кутів в кінці першого інтервалу: $\Delta\delta_{1(1)}=27°20'+5°49'=33°09'$;

$\Delta\delta_{2(1)}=23°00'+10°33'=33°33'$;

взаємні кути в кінці першого інтервалу: $\Delta\delta_{13(1)}=33°09';\ \Delta\delta_{23(1)}=33°33'$;

$\Delta\delta_{12(1)}=33°09'-33°33'=-0°24'$;

Другий інтервал часу (продовження режиму КЗ):

$P_1=1.478\cdot sin33°09'=0.808;\ P_2=0;\ \Delta P_{1(1)}=1-0.808=0.192;$

$\Delta P_{2(1)}=1.8686-0=1.868;$

$\Delta\delta_{1(2)}=5°49'+36\cdot 0.192=12°43';\ \Delta\delta_{2(2)}=10°33'+11.25\cdot 1.868=31°33';$

$\delta_{2(2)}=33°33'+31°33'=65°06';\ \delta_{13(2)}=45°52';\ \delta_{23(2)}=65°06';\ \delta_{12(2)}=45°52'-65°06'=-19°14'$;

Третій інтервал (відключене аварійне навантаження):

$P'_1=1.478\cdot sin45°52'=1.062;\ P'_2=0;\ \Delta P'_{1(2)}=1-1.062=-0.062;$

$\Delta P_{2(2)}=1.868-0=1.868;$

$P''_1=1.126\cdot sin(-19°14')+1.830\cdot sin45°52'=0.944;$

$P''_2=1.126\cdot sin(19°14'+3.190\cdot sin65°06')=3.260;\ \Delta P''_{1(2)}=1,000-0,944=0,056;\ \Delta P_{2(2)}=1.868-3,260=-1.392;$

$\Delta\delta_{1(3)}$= 12°43′+36·(-0.062+0,056)/2=12°37′; $\Delta\delta_{2(3)}$= 31°33′+11.25·(1.868-1,392)/2=34°14′;
$\delta_{1(3)}$=45°52′+12°37′=58°29′; $\delta_{2(3)}$=65°06′+37°14′=99°20′; $\delta_{13(3)}$=58°29′; $\delta_{23(3)}$=99°20′;
$\delta_{12(3)}$=58°29′-99°20′=40°51′;

Четвертий інтервал:

P_1=1.126·sin(-40°51′)+ 1.830·sin58°29′=0.815; P_2=1.126·sin40°51′+ 3.190·sin99°20′=3.905; $\Delta P_{1(3)}$=1-0.815=0.185; $\Delta P_{2(3)}$=1.8686 -3,905= -2.037;
$\Delta\delta_{1(4)}$= 12°37′+36·0.185=19°16′; $\Delta\delta_{2(4)}$= 34°14′-11.25·2.037=11°20′;
$\delta_{1(4)}$=58°29′+19°16′=77°45′; $\delta_{2(4)}$=99°20′+11°20′=110°40′; $\delta_{13(4)}$=77°45′; $\delta_{23(4)}$=110°40′
$\delta_{12(14)}$=77°45′-110°40′= -32°55′.

П'ятий інтервал:

P_1=1.126·sin(-32°55′)+ 1.830·sin77°45′=1.174; P_2=1.126·sin32°55′+ 3.190·sin110°40′=3,590; $\Delta P_{1(4)}$=1-1.174= -0.174; $\Delta P_{2(4)}$=1.868-3,590= -1.722;
$\Delta\delta_{1(5)}$= 19°16′·36·0.174=13°00′; $\Delta\delta_{2(5)}$= 11°20′-11.25·1.722= -8°00′;
$\delta_{1(5)}$=77°45′+13°00′=90°45′; $\delta_{2(5)}$=110°40′-8°00′=102°40′; $\delta_{13(5)}$=90°45′; $\delta_{23(5)}$=102°40′
$\delta_{12(5)}$=90°45′-102°40′= -11°55′.

Шостий інтервал:

P_1=1.126·sin(-11°55′)+ 1.830·sin90°45′=1.597; P_2=1.126·sin11°55′+ 3.190·sin102°40′=3,343; $\Delta P_{1(5)}$=1-1.597= -0.597; $\Delta P_{2(5)}$=1.868-3,343= -1.475;
$\Delta\delta_{1(6)}$= 13°00′-36·0.597= -8°30′; $\Delta\delta_{2(6)}$= -8°30′-11.25·1.475= -24°30′;
$\delta_{1(6)}$=90°45′-8°30′=82°15′; $\delta_{2(6)}$=102°40′-24°36′=78°04′; $\delta_{13(6)}$=82°15′; $\delta_{23(6)}$=78°04′
$\delta_{12(6)}$=82°15′-78°04′=4°11′.

Сьомий інтервал:

P_1=1.126·sin4°11′+ 1.830·sin82°15′=1.897; P_2=1.126·sin(-4°11′)+ 3.190·sin78°04′=3.073;
$\Delta P_{1(6)}$=1-1.897=-0.897; $\Delta P_{2(6)}$=1.868-3,073= -1.205;
$\Delta\delta_{1(7)}$= -8°30-·36·0.897=-40°48′; $\Delta\delta_{2(7)}$= -24°36′-11.25·1.205= -38°09′;
$\delta_{1(7)}$=82°15′-40°48′=41°27′; $\delta_{2(7)}$=78°04′-38°09′=39°55′; $\delta_{13(7)}$=41°27′; $\delta_{23(7)}$=39°55′
$\delta_{12(7)}$=41°27′-39°55′=1°32′.

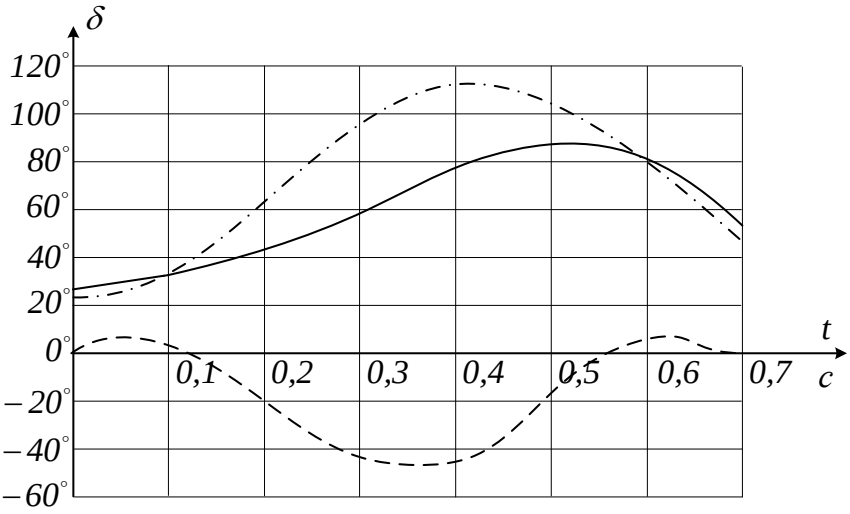


Рис. 3.22

Перехідний процес за 7секунд після початку аварії показаний на рис. 3.22.

Попередній аналіз дозволяє зробити висновок про стійкість системи.

3.10 Питання для самоконтролю

1. Які припущення покладенні в основу спрощених методів оцінки динамічної стійкості СЕС?
2. Як знаходиться максимальний кут і час відключення КЗ?
3. Як оцінюється динамічна стійкість СЕС по зміні кута δ в часі?
4. Як перевірити динамічну стійкість СЕС при відновленні вихідного режиму шляхом АВП?

ТЕМА 4. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ В СЕП ПРИ МАЛИХ ЗМІНАХ РЕЖИМУ

4.1 Зміст

Розрахунок стійкості асинхронних і синхронних двигунів. Врахування впливу електричної мережі на стійкість. Вплив компенсації реактивної потужності на стійкість вузла навантаження. Використання статичних характеристик при розрахунках стійкості кута комплексного навантаження. [1, гл.14].

4.2 Загальні рекомендації

Визначення умов стійкості електричного навантаження енергосистем - один із необхідних етапів загального аналізу стійкості, який виконується при виборі структури енергосистеми. Такі дослідження виконуються як на різних етапах проектування енергосистеми, так і при їх експлуатації – головним чином для уточнення області допустимих режимів.

Розрахунки стійкості навантаження необхідні також при проектуванні промислових підприємств для розробки заходів, що забезпечують безперервність технологічних процесів в різних режимах роботи енергосистеми і при різних обуреннях.

В енергосистемах можливий випадок, коли порушення стійкості генераторів не призводить до порушення роботи електроприймачів, наприклад, при асинхронному режимі двох частин енергосистеми зі слабким зв'язком між ними і без короткочасних відборах потужності. Але можливі і такі системні аварії, при яких порушується нормальна робота і генератора, і великих мас електроприймачів, при чому в таких випадках процеси порушення стійкості генераторів і електроприймачів виявляються взаємозв'язаними. На кінець, можливі випадки порушення стійкості вузлів навантаження при збереженні стійкої роботи генераторів системи.

Тому забезпечення стійкості окремих двигунів і комплексних вузлів навантаження також важливе, і частково в відношенні розробки проти аварійних заходів, як і забезпечення стійкості паралельної роботи генераторів.

4.3 Стійкість асинхронного двигуна

Розглянемо умови стійкості асинхронного двигуна, який є найбільш широко використовуємим типом електричного навантаження.

Для агрегату, який складається разом із асинхронного двигуна і механізму який приводить його в обертання, може бути записано рівняння перехідного процесу. (1.4).

Момент двигуна при постійній частоті приведеної до двигуна напруги рівний (в відносних одиницях) потужності, що передається зі статора на ротор двигуна.

В свою чергу ця потужність може бути легко знайдена із спрощеної схеми заміщення асинхронного двигуна (де X_s- опір розсіяння статора і ротора; X_μ–опір шунта намагнічення;

S-ковзання; *R*- опір ротора при *S=1*), показано на рис.4.1:

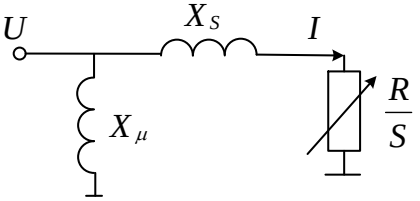


Рис. 4.1

$$P = 3I^2 \frac{R}{S} = \frac{U^2}{X_S^2 + \left(\frac{R}{S}\right)^2} \frac{R}{S} = \frac{U^2 RS}{X_S^2 S^2 + R^2} \quad (4.1)$$

Із отриманого виразу видно, що потужність двигуна при постійності підведеної до нього напруги є функцією одного лише ковзання. Гальмівний момент механізму, приведеного в рух двигуна, в більшості випадків залежить від ковзання.

З урахуванням цього рівняння руху агрегату (2.4) для малих відхиленнях буде мати вид

$$T_j PS + (\frac{\partial P}{\partial S} - \frac{\partial M_{гальм}}{ds})S = 0.$$

Звідси критерії стійкості асинхронного двигуна

$$\frac{\partial P}{\partial S} - \frac{\partial M_{гальм}}{\partial S} > 0$$

Звичайно приходиться досліджувати стійкість не окремих двигунів, а еквівалентного, який замінює багато самих різних двигунів навантаження електричної системи. Так як знаходження характеристики гальмівного моменту такого еквівалентного двигуна складне, вважають його постійним, тобто $\frac{\partial M_{торм}}{\partial S} = 0$. При цьому критерій стійкості асинхронних двигунів приймає вид

$$\frac{\partial P}{\partial S} > 0 \qquad (4.2)$$

Зв'язана з цим неточність складає деякий додатковий запас стійкості.

Характеристика асинхронного двигуна *P=f(S)* показана на рис.4.2.(P_0 - навантаження двигуна). Стійка робота можлива тільки на висхідній частині характеристики.

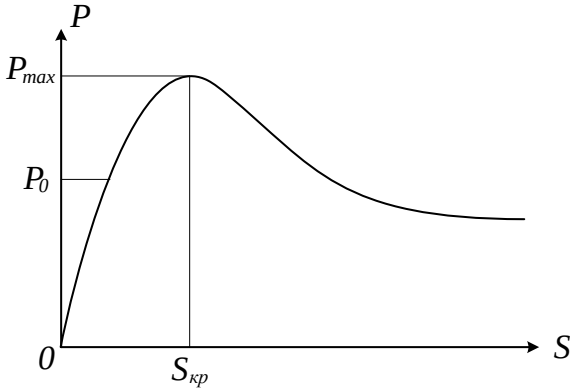


Рис. 4.2

Ковзання, що відповідає максимуму характеристики двигуна, називається критичним. Прирівнюючи похідну $\frac{\partial P}{\partial S} = U^2 R \frac{R^2 - X_S^2 S^2}{(R^2 + X_S^2 S^2)^2}$ до нуля, знайдемо $S_{кр} = \frac{R}{X_S}$. Підставляючи $S_{кр}$ в вираз (4.1), отримаємо максимум потужності двигуна або так званий опрокидуючий момент:

$$P_{max} = \frac{U^2}{2X_S} \qquad (4.3)$$

Опрокидуючий момент пропорційний квадрату напруги і, різко зменшується при його зниженні. Напруга, при якій опрокидуючий момент стає рівним навантаженню двигуна, називається критичною. Із (4.3)

$$U_{kp} = \sqrt{P_0 2X_S} \tag{4.4}$$

При напрузі меншій критичної двигун опрокидується. Критична напруга служить показником степені стійкості двигуна. Чим вище $U_{кр}$, тим менш стійкий двигун.

При живленні двигуна від шин постійної напруги максимальна потужність приблизно вдвічі перевищує номінальну потужність двигуна, що забезпечує більше ніж достатній запас стійкості.

Критична напруга і запас стійкості двигуна помітно залежить від завантаження двигуна

$$m = \frac{P_0}{P_н};$$

$$U_{кр} = \sqrt{2mP_н X_S} \tag{4.5}$$

Від електричної віддаленості двигуна від точки системи, напругу в якій можна вважати постійною, т.д. від шин постійної напруги (рис.4.3.):

$$U_{C_{кр}} = \sqrt{2P_0(X_S + X_{вн})} \tag{4.6}$$

І, на кінець, від ємності, приєднаної на виходах двигуна для компенсації реактивної потужності (рис.4.4, де: *а* – схема асинхронного двигуна і *б* - еквівалентна при наявності зовнішнього опору і включення конденсаторів на виходах двигуна)

$$X_{екв} = \frac{X_{вн}X_c}{X_c - X_{вн}}; U_{екв} = U_c \frac{X_c}{X_c - X_{вн}}$$

$$U_{екв.кр} = \sqrt{2P_0(X_S + X_{екв})} \tag{4.7}$$

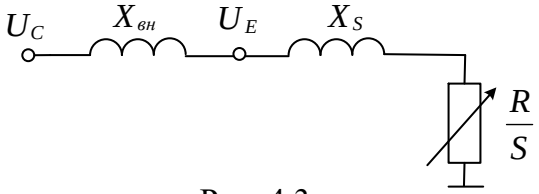


Рис. 4.3

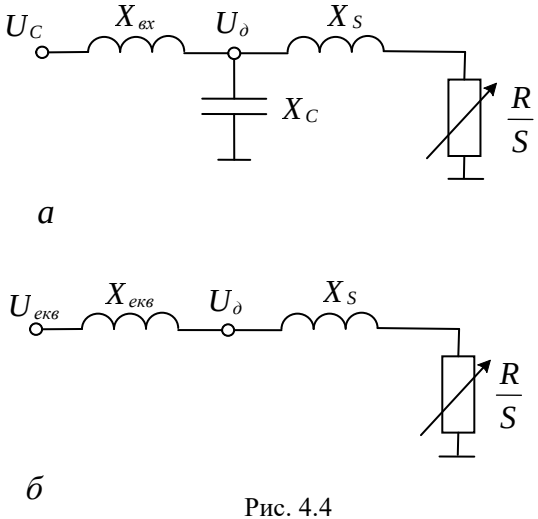


Рис. 4.4

Із (4.5)-(4.7) слідує, що збільшення завантаження двигуна, електричної віддаленості від шин постійної напруги і степені компенсації реактивної потужності конденсаторами приводять до зниження стійкості асинхронного двигуна. Ці всі вказані факти складають реальні умови для порушення стійкості асинхронних двигунів. Тому при виборі засобу компенсації реактивної потужності віддалених вузлів навантаження стійкість потрібно обов'язково перевіряти.

4.4 Приклад розрахунку вузла навантаження, який складаються із асинхронних двигунів

Від шин потужної системи (U_c=*const*) по лінії напруги 35 КВ живиться навантаження, складена в основному із асинхронних двигунів. Схема живлення і всі необхідні параметри показані на рис.4.5.

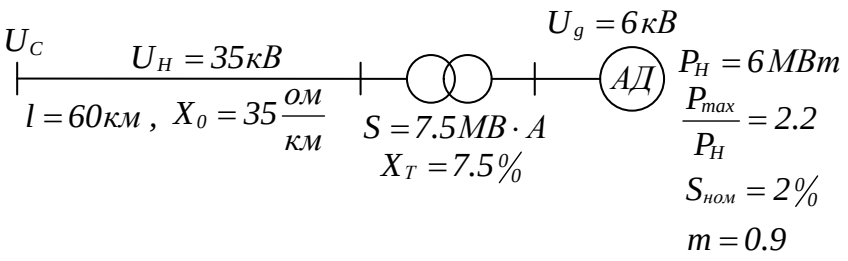


Рис. 4.5

Потрібно знайти критичну напругу системи, при якому відбудеться опрокидування двигуна для двох випадків:

а) без компенсації реактивної потужності, споживаючої двигуном;

б) при її повній компенсації статичними конденсаторами.

Розрахуємо у відносних одиницях. В якості базисних умов приймаємо наступне: $S_\delta=6$ *МВ·А;* $U_\delta=6$*кВ*.

Знайти параметри системи до схеми заміщення (рис.4.3.):

$$X_л = X_0 l \frac{S_\delta}{U_\delta^2} = 0.39 \cdot 60 \frac{6}{35^2} = 0.115$$

$$X_T = \frac{X_T\%}{100} \frac{S_\delta}{S_T} = \frac{7.5}{100} \cdot \frac{6}{7.5} = 0.05$$

$$X_{вн} = X_Л + X_T = 0.115 + 0.060 = 0.175$$

Опір розсіювання двигуна найдемо із формули (4.3):

$$X_Л = \frac{U_н^2}{2P_{max}} = \frac{1}{2 \cdot 2.2} = 0.227$$

Опір *R* ротора найдемо, розв'язавши квадратне рівняння $\left(\frac{R}{S}\right)^2 - \frac{R}{S} + X_S^2 = 0$ отримане із (4.1) при *P=1* і *U=1* тоді *R/S=0.95 і R=0.019*.

а) при відсутності компенсації критичної напруги

$$U_{с.кр} = \sqrt{m2P_н(X_S + X_{вн})} = \sqrt{0.9 \cdot 2(0.227 + 0.175)} = 0.851$$

Для знаходження коефіцієнта запасу необхідно знайти напругу системи в даному режимі.

При $P_0=mP_н=0,9$ і

$$Q_0 = \frac{P_0}{\frac{R}{S}} X_S = \frac{0.9}{0.95} 0.227 = 0.215$$

(при знаходженні Q_0 прийнято, що двигун працює з ковзанням, рівним номінальному);

$$U_{C_0} = \sqrt{(U + \frac{Q_0 X_{вн}}{U})^2 + (\frac{P_0 X_{вн}}{U})^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1 + 0.215 \cdot 0.175\right)^2 + \left(0.9 \cdot 0.175\right)^2} = 1.048$$

Таким чином, стійкість двигуна порушується при зниженні напруги на шинах системи з 1,048 до 0,851, т.б. на 0,197, або на ~ 19%.

Найдемо напругу на затискачах двигунів в момент їх опрокидування. Для цього знайдемо потік реактивної потужності на початку лінії (у шин системи) при ковзанні двигунів, рівному критичному:

$$Q = \frac{U_{c.kp}^2}{\left(X_S + X_{вн}\right)^2 + \left(\frac{R}{S}\right)^2} \left(X_S + X_{вн}\right)$$

Враховуючи, що в режимі (4.2) $X_S + X_{вн} = R/S_{kp}$ отримаємо $Q = P$.

Так як активна потужність, використана двигуном, прийнята постійною, не залежить від ковзання, в режимі що відповідає напрузі системи $U_{с.кр}$;

$$Q = P_{0.}$$

Знаючи потоки активної і реактивної потужностей на початку лінії, можна найти напругу на затискачах двигуна, при якому відбулося опрокидування:

$$U_{дв.кр.} = \sqrt{\left(U_{с.кр.} - \frac{P_0 X_{вн.}}{U_{с.кр.}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_{вн.}}{U_{с.кр.}}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(0.851 - \frac{0.9 \cdot 0.175}{0.851}\right)^2 + \left(\frac{0.9 \cdot 0.175}{0.851}\right)^2} = 0.685.$$

Таким чином, опрокидування двигунів пройде при напрузі 0.685, тобто на 31.5% нижче номінального. Якщо б двигуни працювали безпосередньо від шин постійної напруги, їх опрокидування пройшло б при $U_{дв.кр.} = \sqrt{2 P_0 X_S} = \sqrt{2 \cdot 0.9 \cdot 0.227} = 0.64$, тобто при напрузі на 4,5% менше найденого, при роботі двигунів через електропередачу.

б) при повній компенсації реактивної потужності двигунів потужність статичних конденсаторів $Q_k = Q_0 = 0.215$.

опір гілок конденсаторів (див. рис.4.4)

$$X_c = \frac{U^2}{Q_k} = \frac{1}{0.215} = 4.65.$$

Еквівалентний опір

$$X_{екв} = \frac{X_{вн} \cdot X_c}{X_c - X_{вн}} = \frac{0.175 \cdot 4.65}{4.65 - 0.175} = 0.182.$$

Еквівалентна критична напруга

$$U_{кр.екв} = \sqrt{P_0 2\left(X_S + X_{екв.}\right)} = \sqrt{0.9\left(0.227 + 0.182\right)} = 0.860.$$

Критична напруга

$$U_{кр} = U_{кр.екв} \frac{X_c - X_{вн}}{X_c} = \frac{4.65 - 0.175}{4.65} = 0.829.$$

Напруга системи в вихідному режимі

$$U_{C_0} = \sqrt{U^2 + \left(P_0 X_{вн}\right)^2} = \sqrt{1^2 + \left(0.9 \cdot 0.175\right)^2} = 1.012.$$

Таким чином, компенсація реактивної потужності двигуна статичними конденсаторами призводить до збільшення напруги системи, при якому проходить опрокидування двигунів.

В розглянутому випадку це збільшення незначне, так як зовнішній опір малий в порівнянні з опором батарей конденсаторів.

4.5 Стійкість синхронного двигуна

Синхронний двигун у випадку, якщо гальмівний момент на його валу перевищуватиме максимум електромагнітного моменту, може випасти із синхронізму і загальмувати.

Електромагнітний момент при малих змінах швидкості рівний електромагнітній потужності. Характеристика потужності синхронного двигуна має такий же вид, як і генератора:

$$P = \frac{E_q U_c}{X_d} \sin \delta.$$

На відміну від генератора, тут вектор напруги U_c випереджає вектор ЕРС E_q, кут δ від'ємний; якщо прийняти те ж, що і для генератора, напрямок потужності від E_q і U_c, потужність стане від'ємною.

Максимум характеристики потужності

$$P_{\max} = \frac{E_q U_c}{X_d}.$$

При зниженні напруги системи він зменшується. Критична напруга, при якій двигун випадає із синхронізму, знаходиться рівністю P_{max} і P_0. Звідси

$$U_{кр} = \frac{P_0 X_d}{E_q} \tag{4.8}$$

Таким чином, критична напруга синхронного двигуна залежить від завантаження $(P=mP_н)$, зовнішнього опору до точки системи, в якій напругу можна вважати постійною $(X_d=X_d+X_{вн})$, і ЕРС двигуна.

Збільшення навантаження, а також зовнішні опори приводять до збільшення $U_{кр}$, тобто погіршує умови стійкості. Збільшення ЕРС, навпаки, покращує стійкість. Тому для підвищення стійкості двигуна краще зменшити його *cosφ* (вважаємо, що двигун працює з випереджуючим *cosφ*).

При наявності на двигуні автоматичного регулювання збудження пропорційного типу двигун по аналогії з генератором можна заміщувати перехідним опором X'_d і постійною ЕРС E' за ним. При цьому

$$U_{кр} = \frac{P_0 X'_d}{E} \tag{4.9}$$

завжди менше критичної напруги при відсутності АРЗ, так як перехідний опір значно менший синхронного.

4.6 Приклад розрахунку статичної стійкості синхронного двигуна

Для розрахункової схеми і схеми заміщення, показаної на рис.4.6, знайти критичну напругу і коефіцієнти запасу статичної стійкості синхронного двигуна без урахування і з урахуванням АРЗ.

Параметри елементів схеми:

1) трансформатор: $S_н=16МВ·А;\ U_В=115кВ;\ U_н=10,5\ кВ;\ U_к=11\%;$

2) кабельна лінія: $l=0,4км;\ X_0=0,075Ом/км;\ r_0=0,129\ Ом/км$;

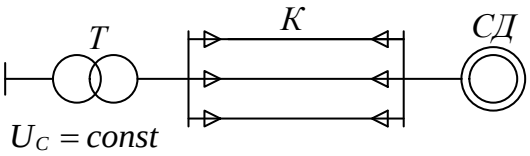


Рис. 4.6

3) синхронний двигун: $P_н$=12МВт; $cos\varphi$=0,86; X_d=0,85; X'_d=0,25; m=0,9;

4) система: $S''_к$=200МВ·А; U_{C*}=1,0 в.о.=const;

1. Знайти параметри схеми заміщення.

Приймаємо $S_\delta = \frac{P_н}{cos\varphi_н} = \frac{12}{0.86} = 14МВ \cdot А$

$$X_T = \frac{U_k\%}{100}\frac{S_\delta}{S_н} = \frac{11}{100}\cdot\frac{14}{16} = 0{,}096;$$

$$X_к = \frac{1}{3}X_0 l\frac{S_\delta}{U_н^2} = \frac{1}{3}\cdot 0{,}075\cdot 0{,}4\frac{14}{10{,}5^2} = 1{,}27\cdot 10^{-3}$$

$$r_к = \frac{1}{3}r_0 l\frac{S_\delta}{U_н^2} = \frac{1}{3}\cdot 0.129\cdot 0.4\frac{14}{10.5^2} = 2.18\cdot 10^{-3}$$

$$X_c = \frac{S_\delta}{S_k''} = \frac{14}{100} = 0.07$$

$$X_{вн} = X_c + X_T + X_к = 0{,}07 + 0{,}096 + 1{,}27\cdot 10^{-3} = 0{,}167;$$

$$r_{вн} = r_k = 2.18\cdot 10^{-3}$$

Так як $X_{вн} >> r_{вн}$, розраховуємо режим без урахування активного опору.

2. Знайдемо активну і реактивну потужність двигуна:

$$P_{дв} = \frac{mP_н}{S_\delta} = \frac{0.9\cdot 12}{14} = 0.77,$$

Де m=0.9 – коефіцієнт завантаження СД.

Реактивна потужність, яка віддається двигуном, знаходиться із умови повного використання СД по струму:

$$Q_{дв} = \sqrt{S_{дв}^2 - P_{дв}^2} = \sqrt{1.0^2 - 0.77^2} = 0.64.$$

3. Знаючи напругу системи і потужність двигуна, можна знайти напругу двигуна в нормальному режимі:

$$U_c = \sqrt{(U_{дв} + \frac{Q_q X_{вн}}{U_{дв}})^2 + (\frac{P_{дв} X_{вн}}{U_{дв}})^2}$$

Із цієї формули після перетворення отримаємо

$$U_{дв} = \sqrt{Q_{дв}X_{вн} + \frac{U_c^{\,2}}{2} + \sqrt{U_c^2 Q_{дв}X_{вн} + \frac{U_c^4}{4} - P_{дв}^2 X_{вн}^2}} =$$

$$\sqrt{0.64 \cdot 0.167 + \frac{1^{\,2}}{2} + \sqrt{1^2 \cdot 0.64 \cdot 0.167 + \frac{1^{\,2}}{4} - 0.77^2 \cdot 0.167^2}} = 1.091$$

4. Поперечна ЕРС двигуна без АРЗ

$$E_{дв} = \sqrt{\left(U_{дв} + \frac{Q_{дв}X_d}{U_{дв}}\right)^2 + \left(\frac{P_{дв}X_d}{U_{дв}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1.091 + \frac{0.64 \cdot 0.85}{1.091}\right)^2 + \left(\frac{0.77 \cdot 0.85}{1.091}\right)^2} = 1.7$$

5. Значення критичної напруги системи знаходиться по (4.8) при умові, що $P_{max} = P_{дв} = 0.77$:

6.

$$U_{с.кр} = \frac{P_{дв}X_{d\Sigma}}{E_q} = \frac{0.77 \cdot 1.017}{1.7} = 0.46\ ,$$

де $X_{d\Sigma} = X_{вн} + X_d = 0{,}167 + 0{,}85 = 1{,}017$.

7. Знаючи $U_{с.кр}$ і E_q, можна знайти реактивну потужність, споживаючу двигуном із системи при опрокидуванні двигуна:

8.

$$E_q = \sqrt{(U_{с.кр} - \frac{Q_c X_{d\Sigma}}{U_{с.кр}})^2 + (\frac{P_c X_{d\Sigma}}{U_{с.кр}})^2}\ ,$$

Звідси отримаємо:

$$Q_c = \frac{U_{с.кр}^2 + \sqrt{U_{с.кр}^4 + U_{с.кр}^2 E_q^2 - P_c^2 X^{\,2}{}_{d\Sigma}}}{X_{d\Sigma}} =$$

$$\frac{0.46^{\,2} + \sqrt{0.46^{\,4} + 0.46^{\,2} \cdot 1.7^{\,2} - 0.77^{\,2} \cdot 1.017^{\,2}}}{1.017} = 0.412$$

9. Знаходимо критичну напругу двигуна:

$$U_{g.кр} = \sqrt{\left(U_{с.кр} - \frac{Q_{с.кр} X_{вн}}{U_{с.кр}}\right)^2 + \left(\frac{P_с X_{вн}}{U_{с.кр}}\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(0{,}46 - \frac{0.412 \cdot 0.167}{0.46}\right)^2 + \left(\frac{0.77 \cdot 0.167}{0.46}\right)^2} = 0.418$$

10. Перехідна ЕРС двигуна з АРЗ

$$E'_g = \sqrt{\left(U_g + \frac{Q_g X'_d}{U_g}\right)^2 + \left(\frac{P_g X'_d}{U_g}\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(1.091 + \frac{0.64 \cdot 0.25}{1.091}\right)^2 + \left(\frac{0.77 \cdot 0.25}{1.091}\right)^2} = 1.25$$

11. Знайдемо критичну напругу системи при наявності у двигуна АРЗ пропорційної дії (див.(4.9):

12.

$$U_{с.кр} = \frac{P_g X'_{d\Sigma}}{E'_g} = \frac{0.77 \cdot 0.417}{1.25} = 0.256 \ ,$$

де $X'_{d\Sigma} = X_{вн} + X'_d = 0{,}167 + 0{,}25 = 0{,}417$

13. Коефіцієнт запасу статичної стійкості синхронного двигуна:

без АРЗ $$K_з = \frac{U_с - U_{с.кр}}{U_с} = \frac{1 - 0.46}{1} = 0.54$$

з АРЗ $$K_з = \frac{U_с - U_{с.кр}}{U_с} = \frac{1 - 0.256}{1} = 0.743$$

Таким чином, в наявності АРЗ підвищується статична стійкість синхронного двигуна на 20.3%.

4.7 Практичні критерії стійкості комплексних вузлів навантаження

Використовуючи критерії стійкості навантаження $\frac{dP}{dS} > 0$ і $\frac{dP}{d\delta} > 0$ можуть бути використані для вузлів навантаження, складених відповідно із одних асинхронних або синхронних двигунів. Судити про стійкість промислових вузлів навантаження що складають як асинхронні і синхронні двигуни, так і інші види споживачів, по цим критеріям не можна. Тому був розроблений цілий ряд практичних критеріїв стійкості комплексних навантажень, що використовують статичні характеристики навантаження: $P_н=f(U_н)$ і $Q_н=f(U)$.

Одним із таких критеріїв, що потребує найменших затрат часу для дослідження стійкості комплексних навантажень і тому найбільш поширеним є критерій $\frac{dE}{dU} > 0$.

Статичні характеристики навантажень, до складу яких входять асинхронні двигуни, показані на рис.4.7. Активна потужність при зниженні напруги зменшується але не значно. Реактивна потужність з початку зменшується, а потім починає збільшуватись. Збільшення використаної реактивної потужності обумовлено збільшуючимся зі зниженням напруги ковзанням асинхронних двигунів. Точка *а* при $\frac{dQ}{dU} = \infty$ відповідає моменту опрокидування асинхронних двигунів, якщо вузол навантаження живиться безпосередньо від шин постійного навантаження. Гілка характеристики *Q*, показана пунктиром, відповідає режимам роботи асинхронних двигунів на нестійкій частині їх характеристики $P=f(S)$.

Звідси слідує, що $\frac{dU}{dQ_н} = \infty$ є вторинним признаком нестійкого навантаження, що включає асинхронні двигуни. Якщо вузол навантаження віддалений від шини постійної напруги деяким опором (рис.4.8.), другим признаком стійкості навантаження буде $\frac{dQ}{dE} = \infty$. На цьому оснований практичний критерій навантаження.

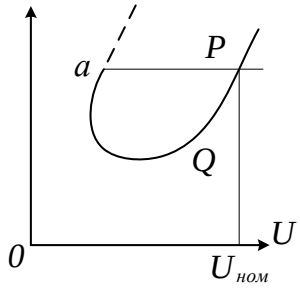


Рис. 4.7

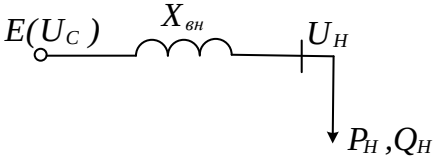


Рис. 4.8

Зв'язок між U і E приблизно може бути представлений у вигляді

$$U = E - \frac{QX_{вн}}{E}.$$

Продиференціювавши отримаємо:

$$\frac{dU}{dE} = 1 - \frac{\frac{dQ}{dE} \cdot E \cdot X_{вн} - Q \cdot X_{вн}}{E^2},$$

звідки при $\frac{dQ}{dE} = \infty$ маємо $\frac{dU}{dE} = -\infty$ або $\frac{dE}{dU} = 0$, звідси слідує рівність нулю похідної $\frac{dE}{dU}$ відповідає моменту опрокидування асинхронних двигунів.

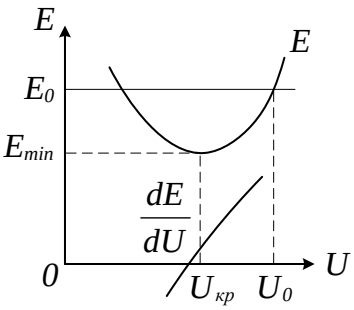


Рис. 4.9

При дослідженні стійкості по практичному критерію $\frac{dE}{dU} > 0$, задаючи різними значеннями напруги навантаження ($U_{ном}$ і менше), знаходять по статичним характеристикам активної і реактивної потужності навантаження і підраховують ЕРС системи. Мінімум характеристики $E=f(U)$ (залежність ЕРС від напруги) (рис.4.9.) дає значення критичних ЕРС системи і напруги навантаження при яких опрокидуються асинхронні двигуни.

В залежності від зовнішнього опору критична напруга може бути як зліва так і з права від точки $\frac{dQ_н}{dU}=0$. Критична напруга збільшується з ростом зовнішнього опору.

4.8. Приклад розрахунку стійкості комплексного вузла навантаження

Електрична система представлена схемою заміщення що складає одну еквівалентну станцію і комплексне навантаження, складену із асинхронних двигунів (60%) і освітлювального навантаження (40%) (рис.4.10). При напрузі на шинах навантаження, рівній номінальній, активна потужність навантаження $P_{н(0)}=0.9$; реактивна потужність $Q_{н(0)}=0.7$. Реактивний опір системи $X_c=0.8$.

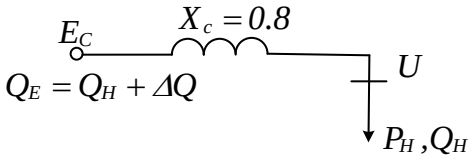


Рис. 4.10

Потрібно: перевірити стійкість вказаної системи побудувавши залежність $E_c=f(U)$ і $Q_E=f(E_E)$ і скориставшись критеріями стійкості комплексного навантаження $\frac{dE_E}{dU}$; $\frac{dQ_E}{dU}$

Статичні характеристики комплексного навантаження приведена в таблиці 4.1. і показана на рис.4.11.

Таблиця 4.1.

U_*	P_*	Q_*	U_*	P_*	Q_*
1.0	1.0	1.0	0.8	0.893	0.844
0.9	0.941	0.885	0.7	0.855	0.88

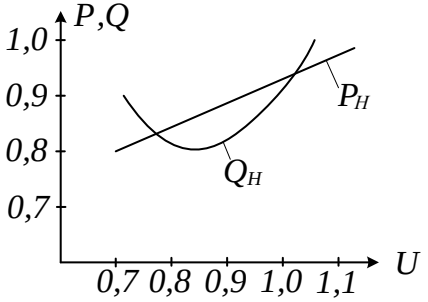


Рис. 4.11

Рішення: для системи заміщення показаний на рис.4.10 запишемо вираз для E_E і Q_E:

$$E_E = U + \frac{Q_н X_c}{U} + j\frac{P_н X_c}{U}$$

або

$$E_E = \sqrt{\left(U + \frac{Q_н X_c}{U}\right)^2 + \left(\frac{P_н X_c}{U}\right)^2}\ .$$

Реактивна потужність що видається еквівалентною станцією,

$$Q_E = Q_н + \Delta Q = Q_н + \frac{P^2{}_н + Q_н^2}{U^2} X_c\,,$$

де $P_н = P_к \cdot 0{,}9$ і $Q_н = Q_к \cdot 0.7$ - відповідні різним напругам на шинах активної і реактивної потужності навантаження.

Використовуючи таблицю 4.1. і приведеними рівняннями, можна знайти E_E і Q_E в залежності від U. Результати розрахунків приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

U	1.0	0.95	0.90	0.80	0.75	0.75
$P_н = P_* \cdot 0.9$	0.9	0.874	0.848	0.804	0.785	0.77
$Q_н = Q_* \cdot 0.7$	0.7	0.653	0.62	0.591	0.596	0.616
$Q_н X_c / U$	0.56	0.55	0.551	0.591	0.635	0.704
$U + Q_н X_c / U$	1.56	1.50	1.451	1.391	1.385	1.404
$P_н X_c / U$	0.72	0.736	0.755	0.804	0.838	0.88
E_E	1,72	1,67	1,634	1,61	1,62	1,66
$P_н^2 + Q_н^2$	1,3	1,188	1,104	0,997	0,972	0,97
$\frac{P_н^2 + Q_н^2}{U} X_c$	1,04	1,05	1,09	1,25	1,382	1,588
$Q_E = Q_н + \Delta Q$	1,74	1,703	1,71	1,841	1,98	2,204

На рис.4.12. і 4.13. побудовані залежності $E_E=f(U)$ і $Q_E=f(E_э)$ і знайдено критичне значення $E_0=1.61$.

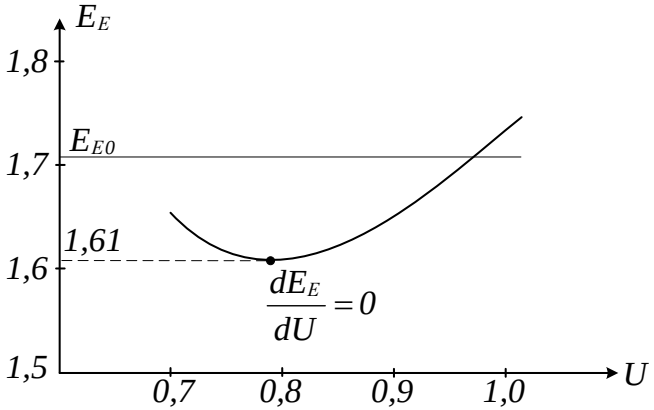


Рис. 4.12

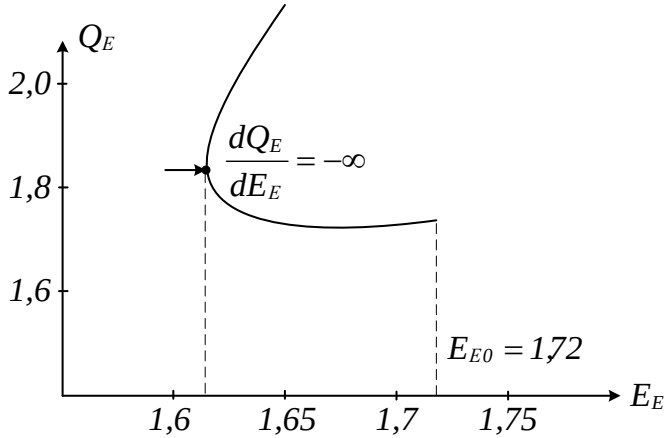


Рис. 4.13

4.9 Питання для самоперевірки.

1. Що називається регулюючим ефектом навантаження?
2. Що розуміється під вторинними признаками стійкості навантаження? Чим викликана необхідність їх використання?
3. Що таке лавина напруги і причина її виникнення?

4. Як представляється асинхронний двигун спрощеною схемою заміщення?

5. Як впливає компенсація реактивної потужності на стійкість вузла навантаження?

6. Причини «опрокидування» асинхронних двигунів навантаження.

7. Як впливає відхилення напруги на стійкість двигунів навантаження?

ТЕМА 5. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВЕЛИКИХ ЗБУДЖЕННЯХ

5.1 Зміст

Характеристика великих збуджень у вузлах навантаження СЕС. Накид навантаження на синхронний двигун. Допустимий час накиду навантаження на синхронний двигун.

Поведінка асинхронного навантаження при великих збудженнях СЕС. Накид навантаження на асинхронний двигун. Вплив товчкоподібного навантаження на роботу СЕС.

ПП у вузлах навантаження при запуску двигунів. Запуск синхронних двигунів, самозапуск двигунів. Запуск асинхронних двигунів. [1, гл.15]

5.2 Загальні рекомендації

При вивченні даної теми потрібно добре засвоїти методи розрахунків стійкості вузлів навантажень, звернути увагу на фактори, забезпечуючі стійкість роботи синхронних та асинхронних двигунів, комплексного навантаження.

При дослідженні стійкості двигунів практичне значення має знаходження часу за який допустиме пониження напруги живлення або збільшення моменту опору.

5.3 Запуск і вибіг двигунів

При установленому режимі момент обертання двигуна урівноважений моментом опору механізму. Якщо ця рівновага порушується, швидкість агрегату змінюється під впливом надлишку моменту.

При аналізі процесу запуску двигунів знаходиться залежність швидкості або ковзання від часу. Для цього використовується загальне

рівняння руху. Перетворивши формулу (1.4) і виразивши відносну кутову швидкість через ковзання, отримаємо:

$$m_{из} = -T_j \frac{ds}{dt}$$

Це рівняння дозволяє знайти час *t*, відповідний зміні ковзання від S_1 до S_2:

$$t = -T_j \int_{S_1}^{S_2} \frac{ds}{m_{из}} \qquad (5.1)$$

Рівняння (5.1) в загальному вигляді не розв'язується, так як $m_{из}=f(sU)$. Однак у випадку відносно простого математичного виразу надлишкового моменту в функції ковзання час розгону можна знайти аналітично.

Наприклад, якщо момент обертання двигуна $m = \frac{2в}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S}}$, де в загальному випадку $в = в_н \frac{K_u^2}{K_f^2}$ і момент опору $m_c=const$, час розгону від S_1 до S_2 по (5.1)

$$t_p = \frac{T_y}{m_c}\left[\frac{в_c}{\sqrt{в_c^2 - 1}}\left(S_\phi \ln\frac{S_\phi - S_2}{S_\phi - S_1} + S_y \ln\frac{S_1 - S_y}{S_2 - S_y}\right) - \Delta S\right], \qquad (5.2)$$

де $в_н$ – кратність максимального моменту при номінальній частоті та напрузі; K_u – кратність напруги на двигуні; K_f - кратність частоти; S_k - критичне ковзання;

$$в_c = \frac{в}{m_c}; \qquad S_\phi = S_k\left(в_c + \sqrt{в_c^2 - 1}\right);$$

$$S_y = \frac{S_k}{в_c + \sqrt{в_c^2 - 1}}; \qquad \Delta S = S_1 - S_2;$$

При розгоні без навантаження на валу, тобто при $m_c=0$, час розгону

$$t_p = \frac{T_j}{в_н}\left(\frac{1 - S^2}{4S_k} + \frac{S_k}{2} \ln\frac{1}{S}\right), \qquad (5.3)$$

Повний час пуску двигуна при розгоні від $S_1=1.0$ до $S_2=S_y$ по (5.2) буде $t_p=\infty$. Це означає, що частота обертання двигуна асимптотично наближається до установленої.

5.4 Приклад розрахунків часу розгону асинхронного двигуна

Знайти час розгону двигуна, який має $в_н=3,0$; $S_k=0.2$; $m_c=0.8$; $T_j=50$, при номінальній напрузі і при пониженні напруги на 10%.

Розв'язання:

1. Повний час пуску асинхронного двигуна до *Sy* знаходимо по (5.2), де

$$в_c = \frac{в}{m_c} = \frac{3}{0.8} = 3.75;$$

$$S_\phi = S_k\left(в_c + \sqrt{в_c^2 - 1}\right) = 0{,}2\left(3{,}75 + \sqrt{3{,}75^2 - 1}\right) = 1{,}473;$$

$$S_y = \frac{S_k}{в_c + \sqrt{в_c^2 - 1}} = \frac{0{,}2}{3{,}75 + \sqrt{3{,}75^2 - 1}} = 0{,}0272;$$

$$\Delta S = S - S_y = 1 - 0.0272 = 0.9728;$$

Підставивши отримані значення в (5.4), отримуємо час пуску при номінальній напрузі:

$$t_n = \frac{5}{0.8}\left[\frac{3.75}{\sqrt{3.75^2 - 1}}(1.473 \ln\frac{1.473 - 0.0272 - 0.01}{1.473 - 1} + \right.$$

$$\left. + 0.0272 \ln 100(1 - 0.0272)) - 0.9728\right] = 51c.$$

2. При зниженні напруги на 10% $K_u=0.7$.

Для практичного розрахунку часу пуску з достатньою точністю можна прийняти $S_2=S_y+0.01$, тоді

$$t_n = \frac{T_j}{m_c}\left[\frac{в_c}{\sqrt{в_c^2 - 1}} S_\phi \ln\frac{S_\phi - S_y - 0.01}{S_\phi - 1} + S_y \ln 100(1 - S_y)) - \Delta S\right], \quad (5.4)$$

В випадку вибігу двигуна від S_1 до S_2

$$t_в = \frac{T_j}{m_c}\left[S_2 - S_1 + в_c S_k\left(\ln\frac{S_2^2 2в_c S_k S_2 + S_k^2}{S_1^2 - 2в_c S_k S_1 + S_k}, + \frac{2в_c(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sqrt{1 - в_c^2}}\right)\right] \quad (5.5)$$

де $\varphi_1 = arctg\dfrac{\dfrac{S_1}{S_k} - в_c}{\sqrt{1 - в_c^2}}$; $\varphi_2 = arctg\dfrac{\dfrac{S_2}{S_k} - в_c}{\sqrt{1 - в_c^2}}$.

Час повного вибігу від S_y до $S=1,0$ при відключенні одиночного двигуна з мережі

$$t_в = \frac{T_j}{m_c}(S - S_y) \qquad (5.6).$$

Із (5.6) отримуємо ковзання двигуна в будь-який момент часу:

$$S = m_c \frac{t}{T_j} + S_y \qquad (5.7).$$

Тоді $в_c = \frac{вK_u^2}{m_c} = \frac{3 \cdot 0.9^2}{0.8} = 3.038;$

$$S_ф = 0.2(3.038 + \sqrt{3.038^2 - 1}) = 1.18;$$

$$S_y = \frac{0.2}{3.038 + \sqrt{3.038^2 - 1}} = 0.0338;$$

$$\Delta S = 1 - 0.0338 = 0.9662.$$

Повний час пуску при зниженні напруги 10%.

$$t_n = \frac{5}{0.8}\left[\frac{3.038}{\sqrt{3.038^2 - 1}}\left(1.18 \ln \frac{1.18 - 0.0338 - 0.01}{1.18} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + 0.0338 \ln 100(1 - 0.338)\right) - 0.9662\right] \cong 9c.$$

Таким чином, пониження напруги на 10% майже в двічі збільшує час пуску асинхронного двигуна, який працює з коефіцієнтом завантаження 0,9.

5.5 Приклад розрахунку одиночного вибігу асинхронного двигуна.

Знайти час повного вибігу асинхронного двигуна від попередньої установленої швидкості до повної зупинки при навантаженні на вал $m_c=0.9$, $в_н=3.0$, $S_k=0.2$, $T_j=5$ с. для двох випадків: при зниженні напруги в мережі на 50% і при відключенні двигуна від мережі.

Розв'язання:

1. Час вибігу при зниженні напруги в мережі на 50% знаходиться по (5.5).

При $в_c = \frac{3{,}0 \cdot 0{,}5^2}{0{,}9} = 0{,}833$

для ковзання $S_2=1.0$

$$S_2^2 - 2в_c S_k S_2 + S_k^2 = 1.0^2 - 2 \cdot 0.833 \cdot 0.2 \cdot 1.0 + 0.2^2 = 0.707;$$

для ковзання $S_1 = S_2 = \dfrac{0.2}{3.333 + \sqrt{3.333^2 - 1}} = 0.0307$;

$$S_1^2 - 2в_c S_k S_1 + S_k^2 = 0.0307^2 - 2 \cdot 0.833 \cdot 0.2 \cdot 0.0307 + 0.2^2 = 0.0307$$

;

$$\varphi_2 = arctg \frac{\frac{S_2}{S_k} - в_c}{\sqrt{1 - в_c^2}} = arctg \frac{\frac{1}{0.2} - 0.833}{\sqrt{1 - 0.833}} = 1.44 рад;$$

$$\varphi_1 = arctg \frac{\frac{S_1}{S_k} - в_c}{\sqrt{1 - в_c^2}} = arctg \frac{\frac{0{,}0307}{0.2} - 0.833}{\sqrt{1 - 0.833^2}} = -0{,}887 рад;$$

По формулі (5.5) час вибігу при зниженні напруги на 50%

$$t_в = \frac{5}{0.9}\left[1 - 0.0307 + 0.833 \cdot 0.2 / l\,n \frac{0.707}{0.0307} + \frac{2 \cdot 0.833\,(1.44 + 0.887)}{\sqrt{1 - 0.833^2}}\right]$$

$$t_в = 14.78c$$

2. Час вибігу асинхронного двигуна при відключенні його від мережі *(K_u=0)* знаходимо по (5.6):

$$t_d = \frac{5}{0.9}(1 - 0.0307) = 5.4c.$$

При більш складних залежностях обертаючого моменту двигуна і моменту опору механізму від ковзання часу розгону і вибігу знаходиться графоаналітично (рис.5.1). Для цього побудуємо криву *1* моменту двигуна в відносних одиницях при заданій напрузі і кривої моменту опору *2* в залежності від ковзання. Потім знаходимо надлишковий момент, рівний залежності між моментом двигуна і моментом опору, і розбиває криву надлишкового моменту *3* на ряд відрізків, надлишковий момент для кожного із них залишається постійним і рівний середньому значенню $m_{из}$ на даному інтервалі.

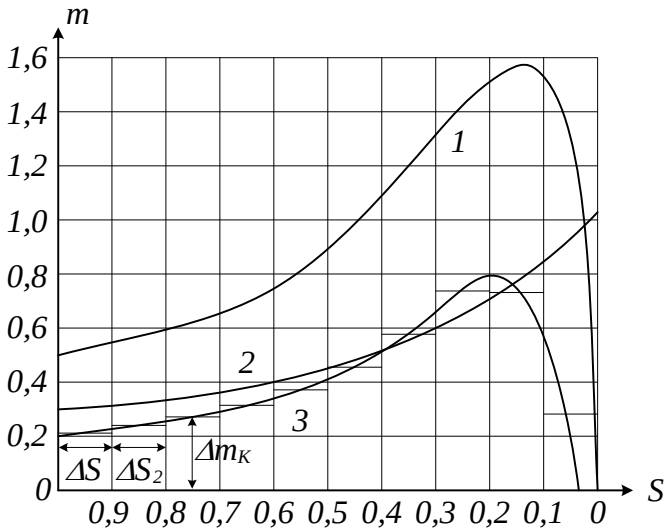


Рис. 5.1

Час розгону або вибігу знаходиться по формулі

$t = -T_j \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta S_i}{m_{u\,s\,i}}$ (5.8) що є приблизним виразом для (рис.5.1).

При розгоні ΔS від'ємне, а $m_{из}$ додатне. При вибігу ΔS додатне, $m_{из}$ від'ємне.

5.6 Приклад розрахунку пуску електродвигуна графоаналітичним методом

Знайти час пуску синхронного компенсатора $S_н$=7500кВ·А; $n_н$=750об/хв. від розгінного двигуна 500кВт. Крива обертального моменту двигуна M_g та $M_{из}$ показана на рис. 5.2. Статичний момент опору визначається тільки втратами на вентиляцію і тертя в підшипниках і складає приблизно 50кВт. Момент опору не залежить від швидкості. Крива залишкового моменту показана на рис.5.2. час запуску знаходимо графоаналітично по (5.8):

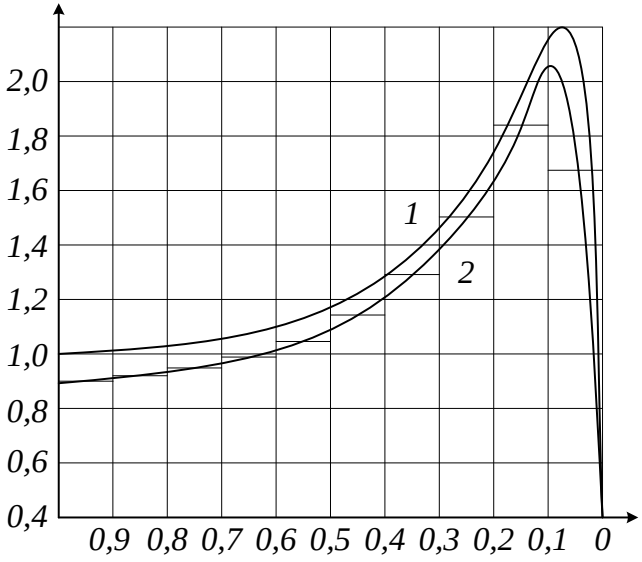


Рис. 5.2

$$t = T_j\left[\ \frac{0.1}{0.9}+\frac{0.1}{0.92}+\frac{0.1}{0.96}+\frac{0.1}{1.03}+\frac{0.1}{1.05}+\frac{0.1}{1.14}+\right.$$

$$\left.+\frac{0.1}{1.29}+\frac{0.1}{1.5}+\frac{0.1}{1.86}+\frac{0.1}{1.6}\ \right]=0.865T_j$$

Механічна стала T_j віднесена до потужності двигуна,

$$T_j=\frac{(GD_{ck}^2+GD_{Д1}^2+GD_в^2)n_н^2}{364P_{он}}=\frac{(9{,}5+0{,}3+0{,}2)750^2}{364\cdot 50}=31c.$$

де $GD_{ck}^2, GD_Д^2, GD_g^2$ - маховий момент відповідно компенсатора, двигуна, збуджувача, $Тм^2$.

Час пуску

$$t_n=0.865\cdot 31=27c.$$

5.7 Самозапуск асинхронних двигунів

Самозапуском називають процес відновлення нормальної роботи двигуна після його короткочасного порушення, викликаного зникненням живлення або коротким замиканням. Що призводить до короткочасного пониження або до зникнення напруги на шинах навантаження. Практична задача самозапуску складається в тому, щоб не допустити масового відключення електродвигунів і забезпечити безперебійну роботу споживачів.

Самозапуск на відміну від запуску двигуна характеризується: одночасним запуском цілої групи електродвигунів; обертанням з деякою швидкістю в момент початку самозапуску частини двигунів або всіх двигунів; самозапуск, як правило, під навантаженням.

Самозапуск можна вважати забезпеченим, якщо при пониженній напрузі надлишковий момент електродвигунів достатній для доведення механізмів до нормальної швидкості і якщо за цей час нагрів обмоток електродвигунів не досяг значення, перевищуючого допустиме.

Для знаходження можливості самозапуску необхідно мати дані про зміну моменту опору механізму, обертаючого моменту двигуна і їх опір (чи умовної кратності струму K_g) в залежності від ковзання, а також знати механічну сталу T_j кожного агрегату.

Довготривалість процесу самозапуску і забезпечення успішного самозапуску двигуна розраховується в наступному порядку.

4) Знаючи тривалість короткого замикання в мережі і напруги на двигунах під час короткого замикання або тривалості перерви живлення при відхиленні секції з групою двигунів. По кривим вибігу (групового або одиничного) або по формулі (5.7) знаходимо ковзання в момент включення $S_в$ і опір двигунів (чи значення K_g). По опору окремих двигунів знаходиться еквівалентний опір всіх двигунів.
5) Знаючи напругу і опір джерела живлення, знаходимо відновлюючу напругу на двигунах в момент відключення короткого замикання або повторного включення мережі. Якщо обертальний момент двигуна при цьому навантаженні більший, чим момент опору приведеного ним механізму, самозапуск можливий.
6) Якщо відновлюючої напруги не достатньо для забезпечення самозапуску всіх двигунів, необхідно розраховувати при відключенні невідповідальних двигунів або розглянути можливість каскадного самозапуску.

7) По надлишкових моментах або по відповідній напрузі на шинах і значенням механічних сталих часу окремих агрегатів знаходять їх час розгону.
8) Розраховують перевищення температури за час самозапуску по діючому струму двигуна і порівнюють з допустимим перевищенням температури при короткочасних перевантаженнях.

5.8 Приклад розрахунку само запуску асинхронних двигунів

До трансформатора *7500кВ·А, U_k=10% 10.5/33кВ* підключені вісім асинхронних двигунів *985об/хв., 750 кВт, 3 кВ, 173А*.. Кратність початкового пускового струму *6,2*, номінальне ковзання 1,5%. Двигун приводить в рух механізм з постійним моментом опору, рівним номінальному моменту двигуна. Механічна стала часу агрегату *4 с*. Знайти потужність не відключених двигунів за умовою самозапуску в залежності від часу короткого замикання.

Розв'язання:

1. Знаходимо ковзання до моменту відключення короткого замикання:

$$S = m_c \frac{t_{кз}}{T_j} + S_y = 1.0 \frac{0.7}{4} + 0.015 = 0.19 .$$

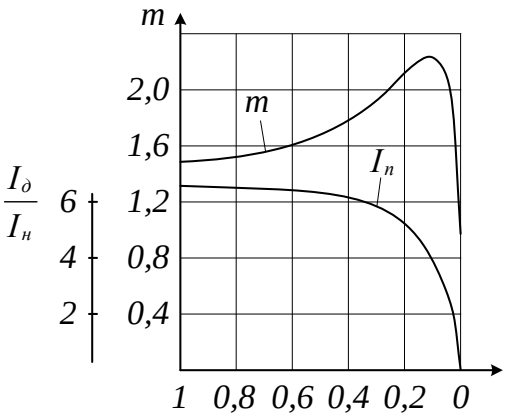


Рис. 5.3

При *S=0.19* кратність струму $K_д$=*5.1*. Зміна моменту і пускового струму в залежності від ковзання (рис.5.3).

2. Умовна пускова потужність, віднесена до потужності трансформатора,

$$S_{n}^{*} = \frac{n\sqrt{3}U_{g.н.}I_{g.н.}K_g}{S_{T.н}}\left(\frac{U_{T.н.}}{U_{g.н}}\right)^2 = \frac{8\sqrt{3}3\cdot 175\cdot 5.1}{7500}\left(\frac{3.3}{3}\right)^2 = 5.9$$

Опір двигуна, приведено до базисних умов, $X_g = \frac{1}{S_{n}^{*}} = \frac{1}{5.9} = 0.17$

3. Кінцева напруга на двигунах:

$$K_u = \frac{U_g}{U_{g.н}}\frac{X_g}{X_{вн}+X_g}\left(\frac{U_{Tн}}{U_g}\right) = \frac{0.17}{0.1+0.17}\left(\frac{3.3}{3}\right) = 0.693\,.$$

3. При напрузі $U_н=0{,}693$ і ковзанні $S=0.19$ момент обертання

$$m = m_н K_u^2 = 2.11\cdot 0.693^2 = 1.02,$$

де $m_н$ - (рис.5.3) при $S=0.19$.

Так як $m<1.1m_c$, частину двигунів необхідно відключити. Для успішного самозапуску необхідна умова $m\geq 1.1m_c$. Із цієї умови можна знайти необхідну кінцеву напругу на двигунах

$$K_u = \sqrt{\frac{m}{m_н}} = \sqrt{\frac{1.1}{2.11}} = 0.725.$$

5. Із рівняння $K_u = \frac{1}{1+S_{n*}X_{вн*}}$ і $S_{n}^{*} = \frac{n\sqrt{3}U_{g.н.}I_{g.н}K_g}{S_{T.н}}\left(\frac{U_{T.н}}{U_{g.н}}\right)^2$

знаходимо число двигунів, які залишилися в роботі по умовах самозапуску:

$$n = \frac{S_{T.н}\left(1-\frac{U_{g.н.}K_u}{U_{T.н.}}\right)}{\sqrt{3}U_{T,н}I_{g.н.}X_{вн*}K_gK_u} = \frac{7500\left(1-\frac{3.0\cdot 0.725}{3.3}\right)}{\sqrt{3}\cdot 3.3\cdot 173\cdot 0.1\cdot 5.1\cdot 0.725} = 7$$

Таким чином, для успішного самозапуску один двигун повинен бути відключений.

6. Час розгону до нормальної швидкості по формулі (5.3)

$$t_p = \frac{4}{1}\left[\frac{2.2}{\sqrt{2.2^2-1}}\left(0.499\ln\frac{0.499-0.015-0.01}{0.499-0.19}\right)+\right.$$

$$\left.+\left(0.015\ln\frac{0.19-0.015}{0.025-0.015}\right)-(0.19-0.025)\right] = 0.4c,$$

де $в_c = \frac{2,2}{1} = 2,2;\ в_н = 2,2$ (по (рис.6.3)), $S_k = 0.12$ (по (рис.5.3));

$$S_\phi = 0.12(2.2 + V2.2^2 - 1) = 0.499.$$

7. Додатковий нагрів обмотки статора за час розгону

$$\Delta\tau = \tau - \tau_н = \frac{dS_н^{\ 2}}{150}(K_g^2 - 1)t_p = \frac{5^2}{150}(3.53^2 - 1)\cdot 0.4 = 0.76°C,$$

де $jS_н = 5\ A/мм^2$ - номінальна щільність струму; K_{gu} - дійсна кратність струму;

$$K_{gu} = K_g K_u = 5.1 \cdot 0.693 = 3.53.$$

Таким чином, по умовам нагріву самозапуск можливий.

5.9 Питання для самоконтролю

1. Які основні причини виникнення різких змін режимів у вузлах навантаження ?
2. Як визначається допустимий час накидання навантаження на синхронний двигун ?
3. Що таке самозапуск електричного двигуна і з якою метою він передбачається ?
4. В чому полягає розрахунок самозапуску синхронного та асинхронного двигунів ?

ТЕМА 6

Збільшення стійкості СЕС

6.1 Зміст

Поняття надійності та живучості. Застосування АВР синхронних машин. Автоматичне розвантаження по частоті.

Аварійне розвантаження турбогенератора.

Збільшення реактивної потужності в енергосистемах. Збільшення швидкості відключення КЗ. Автоматичне повторне включення. Зміна параметрів системи [1, гл. 16]

6.2 Загальні рекомендації

По впливу на показники СЕС розрізнюють заходи по підвищенню стійкості направлені на зміну параметрів режиму, і заходи, направлені на

зміну параметрів СЕС, а по впливу на стійкість – заходи, направлені на підвищення статичної стійкості, і заходи по забезпеченню динамічної стійкості.

При розгляданні всіх заходів необхідно враховувати можливість автоматичного управління і регулювання, що дозволяє в ряді випадків з мінімальними витратами добиватись бажаного підвищення стійкості і надійності енергосистем.

6.3 Питання для самоконтролю

1.Як впливає тривалість короткого замикання на динамічну стійкість ?

2.Як впливає час відключення і вид короткого замикання на динамічну стійкість ?

3.Сутність заходів режимного характеру, направлених на покращення стійкості системи ?

4.Як впливає АРВ на статичну та динамічну стійкості СЕС ?

Додаток 1

ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

При виконанні індивідуального завдання необхідно дотримуватися слідуючі умови:

1. Завдання повинне бути виконане у відповідності знормами ЕКСД та ДЕСТ.
2. Однотипні розрахунки повинні зводитися до таблиці.
3. В процесі виконання наохідно робити посилання на літературу.

Для заданої схеми на рисунку Д.1 виконати аналіз динамічної стійкості, використовуючи метод послідовних інтервалів.

За данимим розрахунків необхідно:

- побудувати необхідну ділянку прискорення та гальмування;
- побудувати графік залежності $\delta = f(t)$;
- зробити висновки за результатами роботи.

Дані по варіантам приведені в таблицях Д1,Д2[а], Д2[б].

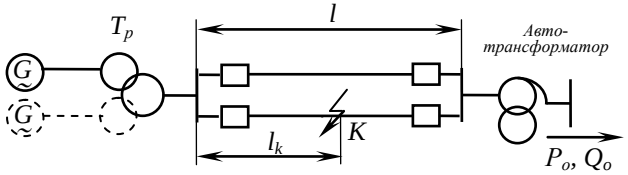


Рисунок Д.1. Вихідна схема до задачі.

Вихідну схему та схему заміщення відображати у відповідності з заданими варіантами:

- при 2-х генераторах рисують 2 генератора та використовується трансформатор з розгалудженою обмоткою;
- при наявності одного ланцюга, необхідно зображувати одноланцюгова лінія.

Короткі методичні вказівки

1. Намалювати вихідну схему заміщення і розрахувати її параметри у відносних базисних одиницях. Постійна інерції у відносних базисних одиницях визначаємо [1].

$$T_{j*(б)} = T_j \frac{S_H}{S_б} \tag{1}$$

де S_H – номінальна потужність генератора.

2. Для нормального (вихідного) режиму визначити:

а) еквівалентний опір схеми між шинами генератора та шинами бескінечної потужності (системи) x'_{CI} [1, 2].

б) перехідну ЕРС у відносних базисних одиницях визначаємо за виразом:

$$E_q = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_o x'_{C_I}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_o x'_{C_I}}{U_c}\right)^2} \qquad (2)$$

в) максимум активної потужності, що передається в систему:

$$P_{\max_I} = \frac{E'_q U_c}{x'_{C_I}} \qquad (3)$$

г) кут δ_o [1, 2].

3. Визначити максимум активної потужності, що передається в систему для аварійного режиму $P_{\max_{II}}$ по (3), підставляємо вместо x'_{C_I} значення $x'_{C_{II}}$.

$x'_{C_{II}}$ - еквівалентний опір в аварійному режимі між шинами генератора і шинами системи. Визначення $x'_{C_{II}}$ залежить від виду порушення режиму (типу пошкодження) [1, 2]. У випадку обриву одного ланцюга аварійний режим співпадає з післяаварійним режимом (потужність передається по одному ланцюгу).

4. Для післяаварійного режиму максимум активної потужності, що передається в систему $P_{\max_{III}}$ визначається по (3), за допомогою попередньо визначеного еквівалентного опору $x'_{C_{III}}$.

5. Прийняти тривалість інтервалу $\Delta t = 0{,}04 \div 0{,}06$ с і виконати розрахунки у відповідності з методом послідовних інтервалів [1, 2]. Однотипні розрахунки звести до таблиці.

6. Визначити $\delta_{кр}$ і виконати відповідні висновки про стійкість системи.

7. Побудувати графіки згідно завдання.

Таблиця Д.1

Варіант №	Генератор				Трансформатор			Автотрансформатор					Кількість генераторів
	$S_н$, мВА	X_{d*}, ум.од.	$U_н$, кВ	Tj, с	$S_н$, мВА	U_1 / U_2, кВ	$U_к$, %	$S_н$, мВА	$U_В / U_С / U_Н$	$U_{Вн}$, %	$U_{ВС}$, %	$U_{СН}$, %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	15	0,174	6,3	2	32	115/6.3 - 6.3	10.5	32	230/121/6.6	34	11	21	2
2	15	0,2	10,5	2	32	115/10,5 – 10,5	11	32	230/121/11	34	11	21	2
3	37,5	0,14	6,3	2,5	80	115/6.3 - 6.3	10,5	100	230/121/6.6	31	11	19	2
4	37,5	0,15	10,5	2,5	40	115/10,5	10,4	63	230/121/11	35	11	22	1
5	68,7	0,26	11,5	2,8	80	115/10,5	10,5	83	330/115/6.6	32	10	21,5	1
6	75	0,28	6,3	3,0	80	115/6,3	10,5	83	330/115/11	32	10	21,5	1
7	75	0,22	10,5	3,0	80	115/10,5	10,5	83	330/115/6.6	32	10	21,5	1
8	78,8	0,28	6,3	3,0	80	115/6,3	10,5	83	230/115/6.6	32	10	21,5	1
9	78,8	0,22	10,5	3,0	160	115/11 – 11	9	160	230/115/6.6	31	11	20	2
10	118	0,26	6,3	3,5	125	115/10,5	10	125	230/121/11	31	11	19	1
11	118	0,25	15,8	3,5	250	242/15,7-15,7	11	267	500/230/11	23	8,5	12,5	2
12	125	0,278	10,5	3,5	125	115/10,5	10,5	125	230/121/11	31	11	19	1
13	176	0,3	18	4,0	200	121/18	10,5	200	230/121/11	32	11	20	1
14	176	0,3	18	3,5	200	121/18	10,5	200	230/121/11	31	11	19	1
15	235	0,3	16	5,0	250	121/16	10,5	250	230/121/11	32	11	20	1
16	353	0,3	20	6,0	400	347/20	11	417	500/330/11	23	8,5	12,5	1
17	15	0,18	6,3	2	32	115/6.3 - 6.3	10,5	32	230/121/6.6	34	11	21	2

Продовження таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
18	15	0,2	10,5	2	32	115/10,5 – 10,5	11	32	230/121/11	34	11	21	2
19	37,5	0,14	6,3	2,5	80	115/6.3 - 6.3	10,5	100	230/121/6.6	36	11	19	2
20	37,5	0,15	10,5	2,5	40	115/10,5	10	63	230/121/11	35	11	22	1
21	64	0,26	11,5	2,8	80	115/10,5	10,5	83	330/115/6,6	32	10	21,5	1
22	75	0,28	6,3	3,0	80	115/6,3-6,3	10,5	83	330/115/11	32	10	21,5	2
23	75	0,22	10,5	3,0	80	115/10,5	10,5	83	330/115/6,6	32	10	21	1
24	79	0,28	6,3	3,0	80	115/6,3	10,5	83	330/115/6,6	34	10	21,5	1
25	15	0,7	6,3	2,5	40	115/6,3	11	63	230/121/11	35	11	22	1
26	15	0,2	10,5	2	32	115/10,5-10,5	11	32	230/121/11	31	11	19	2
27	125	0,28	10,5	3,5	125	115/10,5	10,2	125	230/121/11	32	11	20	1

Таблиця Д.2[a]

№ варіант	Лінія				Вид пошкодження	Система		Тривалість збудження, с	Час безструмової паузи АПВ, с	Потужність, що видається в систему	
	Довжина L, км	Відстань L_K, км	Кількість ланцюгів	X_O Ом/км		U_O, кВ	S, мВА			мВт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	300	150	2	0,41	К3	205	8	0,15	0,2	$P_O = 0,6\ S_{ном.\ генератора}$	$Cos\ \varphi = 0.8$
2	270	270	2	0,42	$К^3$	210		0,12	0,22		
3	250	250	2	0,4	$К^3$	210		0,13	0,24		
4	70	70	2	0,4	$К^2$	215		0,2	0,2		
5	85	50	2	0,41	$К^1$	305		0,22	0,16		
6	90	-	2	0,42	ОБРИВ 1-ГО ЛАНЦЮГА	311		-	-		
7	63	30	1	0,38	$К^3$	310		0,15	0,12		
8	250	100	1	0,4	$К^2$	312		0,27	0,12		
9	300	300	1	0,42	$К^3$	220		0,2	0,18		
10	210	205	1	0,4	$К^{1,1}$	215		0,14	0,16		
11	240	120	2	0,43	$К^3$	490		0,16	0,12		
12	160	90	2	0,41	$К^2$	210		0,2	0,22		
13	100	40	1	0,4	$К^1$	215		0,18	0,24		
14	210	0	2	0,42	$К^3$	220		0,15	0,12		
15	190	90	2	0,4	$К^2$	210		0,22	0,18		
16	110	110	1	0,4	$К^1$	492		0,16	0,21		

Продовження таблиці Д.2[a]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	90	30	2	0,42	$К^{2}$	220	8	0,2	0,12	$P_О = 0,6\ S_{ном.\ генератора}$	Cos φ = 0.8
18	140	140	1	0,4	$К^{1}$	217		0,22	0,2		
19	280	200	1	0,4	$К^{1,1}$	215		0,18	0,11		
20	110	-	2	0,42	ОБРИВ 1-ГО ЛАНЦЮГА	225		-	-		
21	110	55	2	0,41	$К^{3}$	315		0,2	0,24		
22	80	40	1	0,4	$К^{2}$	320		0,18	0,14		
23	70	20	2	0,43	$К^{1,1}$	319		0,19	0,22		
24	275	-	2	0,4	ОБРИВ 1-ГО ЛАНЦЮГА	310		-	-		
25	100	0	2	0,45	$К^{2}$	210		0,2	0,2		
26	200	200	2	0,42	$К^{3}$	210		0,1	0,28		
27	300	100	2	0,38	$К^{1}$	215		0,28	0,2		

Таблиця Д.2[Б]

№ варіант	Лінія				Вид пошкодження	Система		Тривалість збудження, с	Час безструмової паузи АПВ, с	Потужність, що видається в систему	
	Довжина L, км	Відстань $L_К$, км	Кількість ланцюгів	$X_О$ Ом/км		$U_О$, кВ	S, мВА			мВт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	70	70	2	0,4	К3	205	8	0,1	0,1	$P_О = 0,7\ S_{ном.\ генератора}$	$Cos\ \varphi = 0.85$
2	85	0	2	0,41	$К^1$	210		0,2	0,15		
3	90	-	2	0,42	ОБРИВ 1-ГО ЛАНЦЮГА	220		-	-		
4	64	32	1	0,39	$К^2$	215		0,15	0,2		
5	250	100	1	0,4	$К^1$	305		0,2	0,18		
6	300	300	1	0,42	$К^3$	311		0,1	0,12		
7	200	50	1	0,4	$К^{1,1}$	310		0,14	0,16		
8	280	140	2	0,43	$К^3$	312		0,1	0,2		
9	180	140	2	0,4	$К^2$	220		0,2	0,15		
10	100	50	1	0,4	$К^1$	215		0,18	0,22		
11	210	0	2	0,42	$К^3$	490		0,1	0,15		
12	190	90	2	0,43	$К^2$	210		0,22	0,18		
13	110	110	1	0,4	$К^1$	215		0,16	0,21		
14	95	30	2	0,4	$К^3$	220		0,11	0,2		
15	80	-	2	0,42	ОБРИВ 1-ГО ЛАНЦЮГА	210		-	-		
16	290	200	1	0,4	$К^{1,1}$	492		0,11	0,25		

Продовження таблиця Д.2Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	110	50	2	0,42	К^{3}	220	8	0,1	0,22	$P_O = 0,7\ S_{ном.\ генератора}$	$\cos\varphi = 0.85$
18	95	45	2	0,41	К^{1}	217		0,2	0,12		
19	80	40	1	0,4	К^{2}	215		0,18	0,18		
20	70	20	2	0,43	К^{1,1}	225		0,19	0,21		
21	75	-	2	0,4	ОБРИВ 1-ГО ЛАНЦЮГА	315		-	-		
22	100	0	2	0,45	К^{2}	320		0,2	0,2		
23	200	200	2	0,42	К^{3}	319		0,1	0,154		
24	300	100	2	0,38	К^{1}	310		0,25	0,2		
25	150	0	2	0,4	К^{3}	210		0,15	0,15		
26	220	100	2	0,41	К^{3}	210		0,09	0,2		
27	270	270	2	0,42	К^{3}	215		0,1	0,23		

Список літератури

1. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г., Несен Л.И., Рыбалко А.Я., Прокопенко В.В. Переходные процессы в системах электроснабжнения. – Киев: Вища школа, 1989.

2. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів / Г.Г.Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І Несен – Дніпропетровськ: НГУ, 2002 – 597 с.

3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964.

4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979.

5. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1985.

6. Ульянов С.А. Сборник задач по электромагнитным переходным процессам в электрических системах.- М.: Энергия, 1968.

7. Электроэнергетические системы в примерах иллюстрациях: Учебное пособие для вузов. Ю.Н. Астахов и др., под редакцией В.А. Веникова. – М.: Энергоатомиздат.