

ВСТУП

Перехідні процеси виникають в електроенергетичній системі як при нормальній експлуатації (комутації високовольтного обладнання) так і в аварійних умовах (обриви електричних кіл, короткі замикання, асинхронні режими, тощо). Дослідження перехідних процесів необхідне для розуміння причин їх виникнення, фізичної сутності і складання їхнього математичного опису. Формалізований опис та математичне моделювання перехідних процесів використовуються для їхнього аналізу та розрахунків з метою передбачення наслідків аварійних режимів і, за можливістю, для запобігання виникненню таких режимів.

Будь-який перехідний процес в енергосистемі визначається сукупністю електричних, магнітних та механічних змін, які взаємопов'язані між собою. В залежності від своєї тривалості перехідні процеси в електричній частині енергосистеми поділяються на електромагнітні та електромеханічні. Електромагнітні процеси є більш швидкоплинними і при їхньому аналізі розглядаються лише електромагнітні зміни у мережі. Після загасання електромагнітних процесів у енергосистемі починають проявлятися електромеханічні процеси, які пов'язані зі зміною швидкості обертання роторів електричних машин. Таким чином, при дослідженні режимів короткого замикання в енергосистемі потрібен аналіз електромагнітних перехідних процесів, а при дослідженні статичної та динамічної стійкості енергосистеми – аналіз електромеханічних перехідних процесів.

Даний науково-методичний посібник поєднує в собі основні теоретичні положення щодо електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів в енергосистемах, приклади розв'язання задач з обох цих дисциплін, а також містить завдання до розрахунково-графічних робіт з розрахунків струмів короткого замикання та дослідження стійкості енергосистеми. Посібник призначений для лекційних, практичних та самостійних занять студентів напряму «Гідроенергетика» денної та заочної форм навчання і також може бути корисним для студентів інших спеціальностей електротехнічного та електромеханічного напрямків.

1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

1.1 Загальні відомості про перехідні процеси

1.1.1 Поняття про електроенергетичну систему та її режими

Електроенергетична система (ЕЕС) – це сукупність взаємопов’язаних електростанцій, підстанцій, ліній електропередачі, електричних мереж, об’єднаних процесами виробництва, перетворення, передачі та розподілу електричної енергії.

Об’єднана ЕЕС – це ЕЕС, утворена внаслідок об’єднання декількох енергосистем, які мають самостійне адміністративне управління та спільне диспетчерське управління.

Робота ЕЕС характеризується її режимом. *Режим* – це стан ЕЕС, що визначається сукупністю умов та параметрів в певний момент часу або на інтервалі часу. Класифікацію режимів ЕЕС представлено на рис.1.

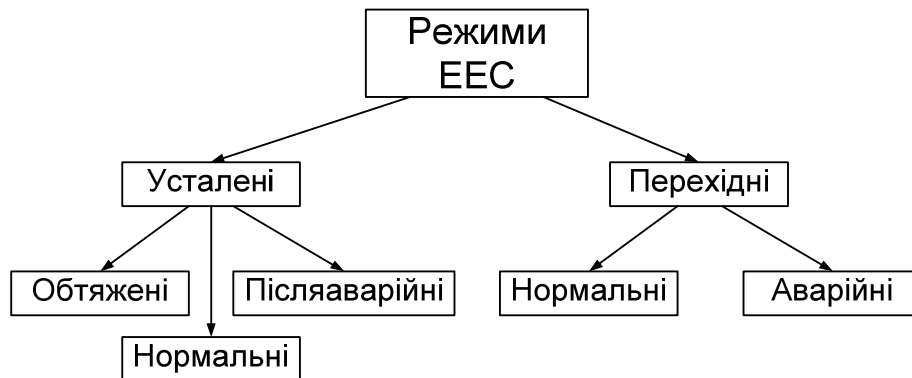


Рис.1 Класифікація режимів ЕЕС

Режими ЕЕС бувають усталеними та перехідними. Усталений режим спостерігається при практично незмінних параметрах системи. Усталені режими бувають нормальними, обтяженими та післяаварійними.

Нормальний усталений режим характеризується тим, що всі параметри ЕЕС (частота, перетоки потужностей, напруги у вузлах) підтримуються на рівні, що визначається нормативними документами.

Обтяжений усталений режим характеризується тим, що деякі параметри ЕЕС вийшли за нормативні значення, але ще не досягли значень за яких спрацьовують пристрої релейного захисту або автоматики.

Післяаварійний усталений режим – це режим ЕЕС після ліквідації аварії.

Перехідний режим виникає при переході ЕЕС з одного усталеного режиму в інший. Перехідні режими бувають нормальними та аварійними.

Нормальний перехідний режим виникає при здійсненні комутацій в ЕЕС, а аварійний є наслідком виникнення аварії в ЕЕС.

Перехідними процесами називаються процеси, що відбуваються в ЕЕС під час перехідних режимів.

1.1.2 Класифікація перехідних процесів в електроенергетичній системі

Дослідження перехідних процесів необхідне для розуміння причин їх виникнення та фізичної сутності, для розроблення методів їх розрахунків і аналізу, а також для того щоб передбачати та, по можливості, запобігати аваріям та їхнім наслідкам. При переході від одного режиму до іншого змінюється електромагнітний стан елементів ЕЕС та порушується баланс між механічним та електромагнітним моментами на валах генераторів та двигунів. Таким чином, перехідний процес характеризується сукупністю електромагнітних та механічних змін в системі, які взаємопов'язані між собою. Тривалість перехідних процесів визначається сталими часу, які характеризують швидкість зміни параметрів під час переходу від одного усталеного режиму до іншого. За тривалістю перехідні процеси в ЕЕС поділяються на:

- тепло- або гідромеханічні;
- електромеханічні;
- електромагнітні.

Найбільш швидкоплинними серед цих перехідних процесів є електромагнітні перехідні процеси, сталі часу яких складають 0,1...0,2 секунди. Під час електромагнітних перехідних процесів розглядаються лише електромагнітні зміни у мережі, механічними процесами можна знехтувати внаслідок великої інерційності генераторів.

Сталі часу інерції роторів турбо- та гідрогенераторів складають 5...10 секунд та визначають тривалість електромеханічних перехідних процесів. Під час електромеханічних перехідних процесів проявляються механічні властивості ЕЕС, та змінюються її механічні параметри. При дослідженні електромеханічних перехідних процесів можна знехтувати процесами, що відбуваються в технологічних схемах електричних станцій, оскільки тепло- та гідромеханічне обладнання станцій є ще більш інерційним.

Механічні процеси в технологічних частинах станцій є найповільнішими серед розглядуваних процесів. Сталі часу парогенераторів АЕС та котлів ТЕС складають 60...240 секунд, а сталі часу водоводів ГЕС 20...100 секунд.

1.1.3 Види пошкоджень в електроенергетичній системі

Причинами аварійних електромагнітних процесів в ЕЕС є пошкодження обладнання. Найбільш поширеними пошкодженнями в ЕЕС є:

- обриви;
- короткі замикання;
- прості замикання.

Обрив – це пошкодження цілісності однієї або декількох фаз без замикання їх на землю або між собою (рис.2,а).

Коротке замикання – це пошкодження цілісності однієї або декількох фаз, яке супроводжується їхнім замиканням на землю та/або між собою і

супроводжується різким зростанням струму в пошкодженому обладнанні (рис.2,б)

Просте замикання – це замикання на землю однієї фази у трифазній мережі з ізолюваною нейтраллю, яке не супроводжується зростанням струму в пошкодженому обладнанні (рис.2,в).

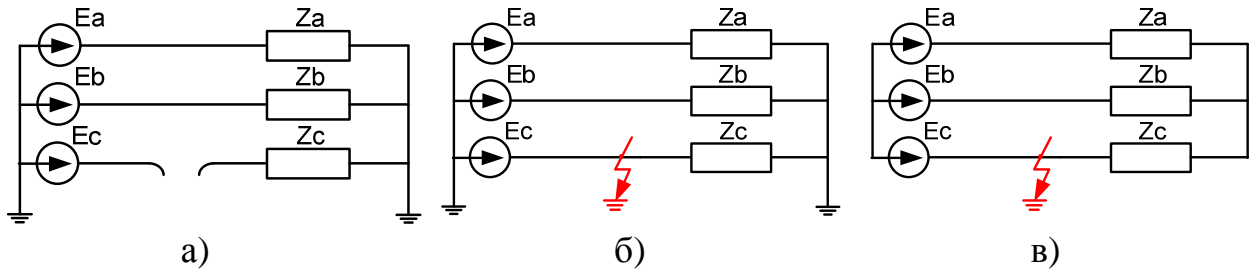


Рис.2 Види пошкоджень в трифазній мережі (а – обрив фази; б – коротке замикання фази на землю, в – просте замикання фази на землю)

Перехідні процеси часто супроводжуються виникненням несиметрії в трифазній електричній системі. Несиметричні режими поділяються на два великих підкласи:

- повздовжна несиметрія;
- поперечна несиметрія.

Повздовжна несиметрія трифазної системи характеризується нерівністю опорів в фазах (рис.3). Прикладом повздовжньої несиметрії є обрив фази.

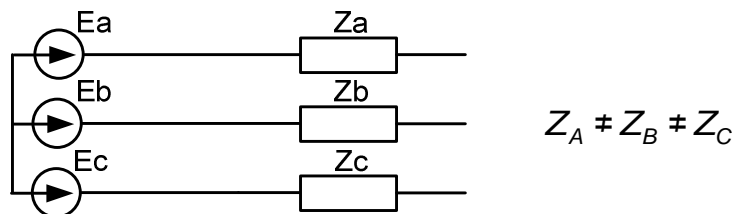


Рис.3 Повздовжна несиметрія трифазної системи

Поперечна несиметрія трифазної системи характеризується нерівністю опорів між фазами та землею (рис.4). Прикладом поперечної несиметрії є короткі та прості замикання фази на землю.

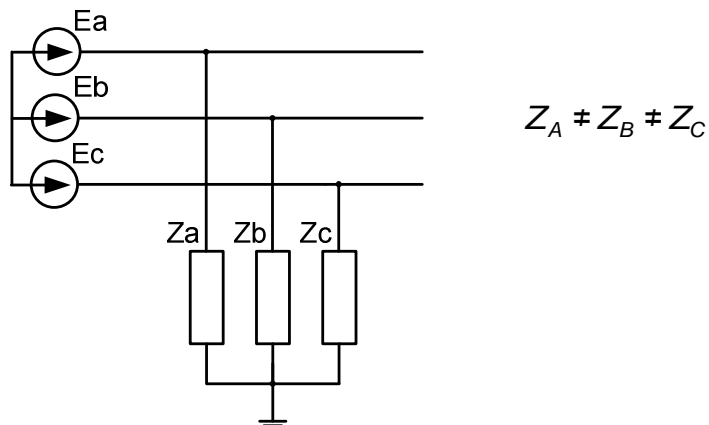


Рис.4 Поперечна несиметрія трифазної системи

Види коротких замикань (КЗ) в трифазній системі.

Трифазне КЗ – це КЗ за якого відбувається поєднання між собою всіх трьох фаз в одному місці системи (рис.5,а).

Двофазне КЗ – це КЗ за якого відбувається поєднання двох фаз між собою (рис.5,б).

Двофазне КЗ на землю – це КЗ, яке відбувається лише в трифазній системі із заземленою нейтраллю внаслідок поєднання двох фаз з землею в одній точці (рис.5,в).

Однофазне КЗ – це КЗ, яке відбувається лише в трифазній системі із заземленою нейтраллю внаслідок поєднання однієї фази з землею (рис.5,г).

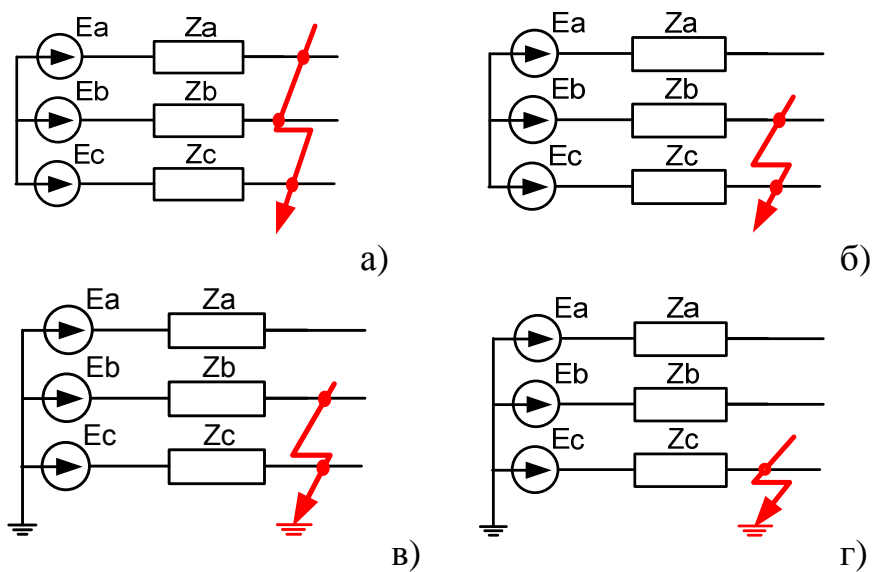


Рис.5 Види КЗ

(а – трифазне, б – двофазне, в – двофазне на землю, г – однофазне)

Причини та наслідки виникнення КЗ. КЗ є наслідком пошкодження ізоляції, яке може бути спричинене старінням ізоляції, її механічним пошкодженням або перенапругами. КЗ призводить до таких наслідків:

- перегрівання та розплавлення струмопровідних частин обладнання внаслідок протікання струму КЗ, який в багато разів перевищує номінальний;
- зростання механічних зусиль в електрообладнанні внаслідок протікання струму КЗ, яке може призвести до його механічного порушення;
- зниження напруги на шинах споживачів при КЗ, що є особливо небезпечним для асинхронних двигунів;
- при затримці відключення КЗ більше припустимої можливою стає втрата стійкості електроенергетичної системи.

1.2 Основні відомості щодо розрахунків електромагнітних перехідних процесів

1.2.1 Призначення та основні припущення при аналізі електромагнітних перехідних процесів

Призначенням аналізу електромагнітних перехідних процесів є розрахунки струмів КЗ. Розрахунки струмів КЗ необхідні для вибору силового та комутаційного обладнання енергосистеми, вибору пристроїв релейного захисту та їхніх уставок та дослідження поведінки споживачів при КЗ.

Аналіз електромагнітних перехідних процесів з урахуванням всіх існуючих умов та факторів представляє собою дуже складну задачу. Тому, для проведення аналізу електромагнітних перехідних процесів роблять наступні припущення:

1) нехтування насиченням магнітних систем. Це припущення призводить до лінійності електричних кіл, в яких можна використовувати метод накладання.

2) неврахування струмів намагнічування трансформаторів та автотрансформаторів. Це припущення справедливе для всіх випадків, за виключенням випадку коли в заступній схемі нульової послідовності є трифазний тристремневий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – зірка з нулем».

3) нехтування несиметрією трифазної системи. Це припущення справедливе для всіх випадків окрім обриву фази.

4) нехтування ємнісними провідностями елементів системи. Це припущення справедливе для всіх випадків окрім трьох:

- у схемі мережі є установки повздовжньої ємнісної компенсації;
- у схемі мережі є ЛЕП напругою 330 кВ і вище;
- розглядається просте замикання на землю.

5) наближене врахування навантаження. Навантаження представляється постійним опором.

6) нехтування активними опорами елементів системи, окрім трьох випадків:

- аналіз перехідних процесів в мережах напругою до 1 кВ;
- визначення аперіодичної складової струму КЗ, оскільки $i_a = I \cdot e^{-\frac{t}{T}}$, а постійна часу загасання аперіодичної складової струму КЗ визначається як $T = L/R$;
- в заступну схему вноситься навантаження.

7) неврахування хитань генераторів внаслідок великої інерційності роторів генераторів. Припущення справедливе при аналізі процесів на інтервалі часу до 0,2 с.

1.2.2 Складання заступної схеми електроенергетичної системи

За наявності у схемі ЕЕС трансформаторів та/або автотрансформаторів (рис.6) для спрощення аналізу та розрахунків її доцільно перетворити та представити заступною схемою, тобто замінити всі магнітні зв'язки електричними. Таким чином, заступна схема представляє собою одне еквівалентне електрично зв'язане коло.

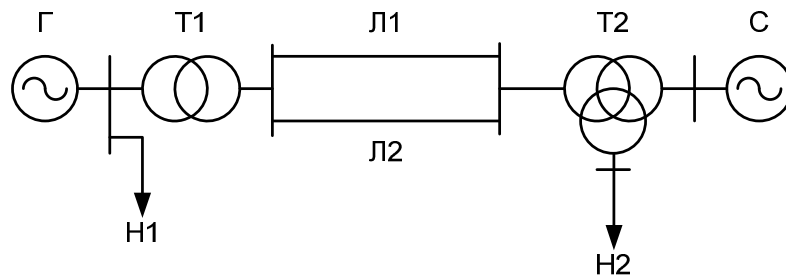


Рис.6 Схема ЕЕС (Г – генератор, Т1, Т2 – трансформатори, Л1, Л2 – лінії електропередачі, Н1, Н2 – навантаження, С – еквівалентна енергосистема)

Складання заступної схеми зводиться до приведення параметрів елементів та ЕРС різних рівнів напруги до якого-небудь одного рівня, обраного за основний (базисний). При цьому, кожний елемент заступної схеми треба представити певним багатополісником та визначити його параметри.

Параметри елементів ЕЕС можуть бути представлені в іменованих або у відносних одиницях. Відносне значення деякого параметра є відношення значення даного параметра до однойменного параметра обраного в якості базисного.

Параметри заступних схем елементів ЕЕС та їхнє визначення.

Генератор. Основними параметрами генератора є: номінальна активна потужність P_H , номінальна напруга обмотки статора U_H , номінальний струм статора I_H , номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_H$, синхронний опір по повздовжній вісі X_d , синхронний опір по поперечній вісі X_q , перехідний опір по повздовжній вісі X'_d , надперехідний опір по повздовжній вісі X''_d , надперехідний опір по поперечній вісі X''_q .

Електрична схема генератора та його заступна схема приведені на рис.7.



Рис.7 Електрична (а) та заступна (б) схеми синхронного генератора

В початковий момент КЗ синхронний генератор описується надперехідними опором та надперехідною ЕРС. В усталеному режимі генератор описується синхронним опором та синхронною ЕРС, таким чином в усталеному режимі опір генератора дорівнює:

$$X_r = X_d, \quad (1)$$

а в початковий момент КЗ опір генератора дорівнює:

$$X_r = X_d'' \quad (2)$$

Для визначення ЕРС генератора необхідно звернутись до його векторної діаграми (рис.8).

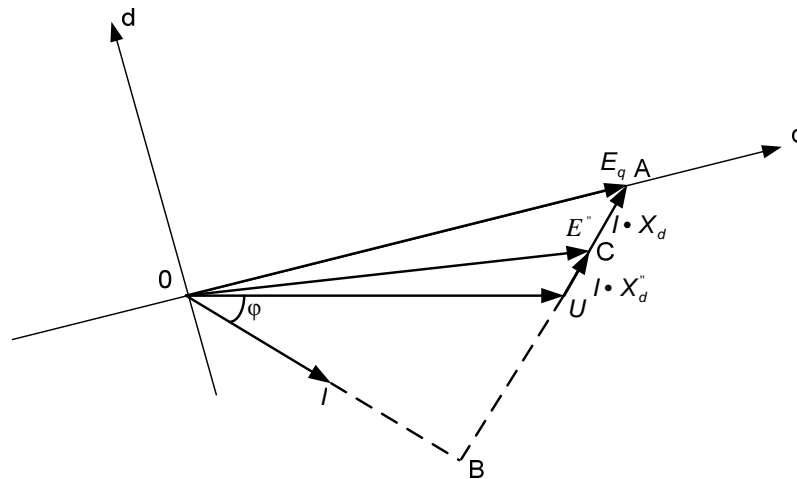


Рис.8 Векторна діаграма синхронного генератора

На рис.8 U – це вектор напруги генератора, I – вектор струму генератора, φ – кут між векторами напруги та струму, $I \cdot X_d$ – вектор падіння напруги на синхронному опорі генератора, $I \cdot X_d''$ – вектор падіння напруги на надперехідному опорі генератора, E_q – вектор синхронної ЕРС генератора, який є сумою вектора напруги генератора та падіння напруги на його синхронному опорі, E'' – вектор надперехідної ЕРС генератора, який є сумою вектора напруги генератора та падіння напруги на його надперехідному опорі. Згідно з векторною діаграмою, синхронна ЕРС генератора визначається з трикутника OAB:

$$E_q = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot \sin \varphi + I \cdot X_d)^2} \quad (3)$$

Надперехідна ЕРС визначається генератора з трикутника OCB:

$$E'' = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot \sin \varphi + I \cdot X_d'')^2} \quad (4)$$

В усталеному режимі ЕРС генератора дорівнює його синхронній ЕРС:

$$E_r = E_q, \quad (5)$$

а в початковий момент КЗ ЕРС генератора дорівнює його надперехідній ЕРС:

$$E_r = E'' \quad (6)$$

Трансформатор. Основними параметрами трансформатора є: номінальна повна потужність S_H , номінальна напруга обмотки високої напруги U_{BH} , номінальна напруга обмотки низької напруги U_{HH} , напруга КЗ $U_{КЗ}^{\%}$.

Електрична схема трансформатора та його заступна схема приведені на рис.9.

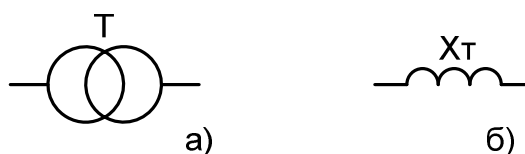


Рис.9 Електрична (а) та заступна (б) схеми трансформатора

Оскільки трансформатор є статичним пристроєм, його опір залишається незмінним як в усталеному так і в перехідному режимі ЕЕС і визначається наступним чином:

$$X_T = \frac{u_{K3}^{\%}}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H} \quad (7)$$

Триобмотковий трансформатор. Основними параметрами триобмоткового трансформатора є: номінальна повна потужність S_H , номінальна напруга обмотки високої напруги U_{BH} , номінальна напруга обмотки середньої напруги U_{CH} , номінальна напруга обмотки низької напруги U_{HH} , напруга КЗ обмоток ВН-НН $u_{K3-BH}^{\%}$, напруга КЗ обмоток ВН-СН $u_{K3-BC}^{\%}$, напруга КЗ обмоток СН-НН $u_{K3-CH}^{\%}$. Таким чином, напруга КЗ для триобмоткового трансформатора задається для кожної пари обмоток при розімкненій третій. Електрична схема триобмоткового трансформатора та його заступна схема приведені на рис.10.

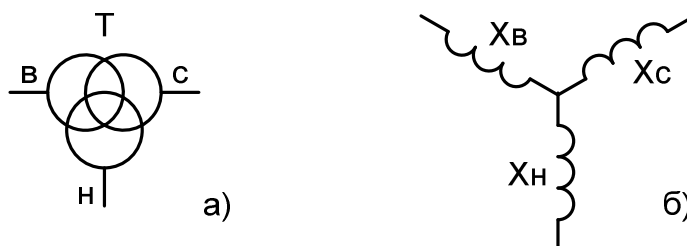


Рис.10 Електрична (а) та заступна (б) схеми триобмоткового трансформатора

Заступною схемою триобмоткового трансформатора є трипроменева зірка, для визначення опорів якої необхідно визначити напруги КЗ кожної обмотки трансформатора окремо:

$$u_{K3-B}^{\%} = \frac{u_{K3-BH}^{\%} + u_{K3-BC}^{\%} - u_{K3-CH}^{\%}}{2} \quad (8)$$

$$u_{K3-C}^{\%} = \frac{u_{K3-CH}^{\%} + u_{K3-BC}^{\%} - u_{K3-BH}^{\%}}{2} \quad (9)$$

$$u_{K3-H}^{\%} = \frac{u_{K3-BH}^{\%} + u_{K3-CH}^{\%} - u_{K3-BC}^{\%}}{2} \quad (10)$$

Опори заступної схеми триобмоткового трансформатора складають:

$$X_B = \frac{u_{K3-B}^{\%}}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H} \quad (11)$$

$$X_C = \frac{u_{K3-C}^{\%}}{100} \cdot \frac{U_{CH}^2}{S_H}; \quad (12)$$

$$X_H = \frac{u_{K3-H}^{\%}}{100} \cdot \frac{U_{HH}^2}{S_H}. \quad (13)$$

Автотрансформатор. Автотрансформатор може мати дві обмотки, які мають електричний зв'язок (рис.11,а), або три обмотки, дві з яких мають електричний зв'язок, а третя є додатковою (рис.11,б).

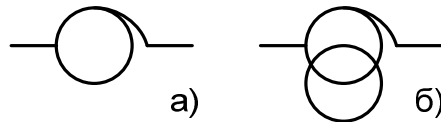


Рис.11 Електрична схема автотрансформатора з двома обмотками (а) та трьома обмотками (б)

В першому випадку заступна схема автотрансформатора аналогічна заступній схемі двохобмоткового трансформатора (рис.9,б), а опір визначається за виразом (7). В другому випадку заступна схема автотрансформатора аналогічна заступній схемі триобмоткового трансформатора (рис.10,б), а опори трипроменевої зірки визначаються за виразами (11)-(13).

Реактор. Реактор призначений для обмеження струмів КЗ в ЕЕС. Основними параметрами реактора є: номінальна напруга U_H , номінальний струм I_H , індуктивний опір (у відсотках) $X_P^{\%}$. Електрична схема реактора та його заступна схема приведені на рис.12.

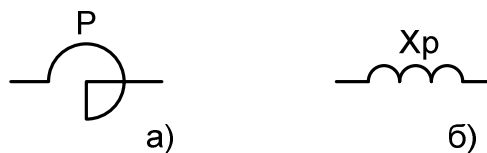


Рис.12 Електрична (а) та заступна (б) схеми реактора

Опір реактора визначається наступним чином:

$$X_P = \frac{X_P^{\%}}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}I_H}. \quad (14)$$

Лінія електропередачі. Основними параметрами лінії електропередачі є: номінальна напруга U_H , довжина L , питомий індуктивний опір (Ом/км) X_0 . Електрична схема лінії електропередачі та її заступна схема приведені на рис.13.

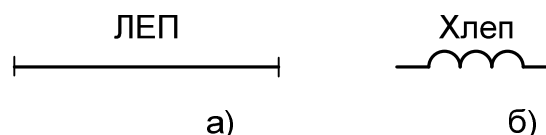


Рис.13 Електрична (а) та заступна (б) схеми лінії електропередачі

Опір лінії електропередачі визначається наступним чином:

$$X_{\text{лел}} = X_0 \cdot L. \quad (15)$$

Здвоєний реактор. Застосування струмообмежувальних реакторів має дві особливості: величина опору реактору має бути якомога більшою для кращого обмеження струмів КЗ, в той же час ця величина має бути якомога меншою для мінімізації падіння напруги на реакторі в нормальному режимі роботи ЕЕС. У звичайному реакторі поєднати ці дві особливості неможливо, для цього використовують здвоєний реактор, який представляє собою котушку індуктивності із середнім виводом. Електрична схема здвоєного реактора та його заступна схема приведені на рис.14.

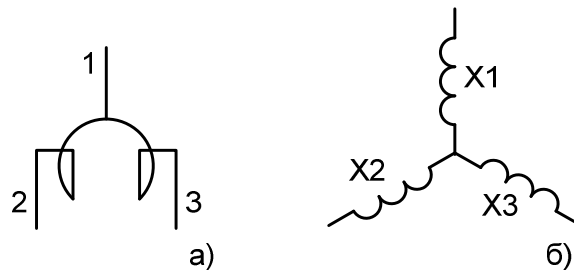


Рис.14 Електрична (а) та заступна (б) схеми здвоєного реактора

Здвоєний реактор характеризується наступними параметрами: номінальна напруга U_H , номінальний струм I_H , індуктивний опір напівобмотки (у відсотках) $X_p\%$ та коефіцієнт взаємоіндукції m . Останній параметр характеризує магнітний зв'язок між напівобмотками реактора та дорівнює:

$$m = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} = \frac{M}{L}, \quad (16)$$

де M - взаємна індуктивність напівобмоток реактора, L_1, L_2 - власні індуктивності напівобмоток реактора, оскільки напівобмотки реактора однакові, то $L_1 = L_2 = L$.

Здвоєний реактор можна представити як два звичайні реактори, які мають магнітний зв'язок (рис.15).

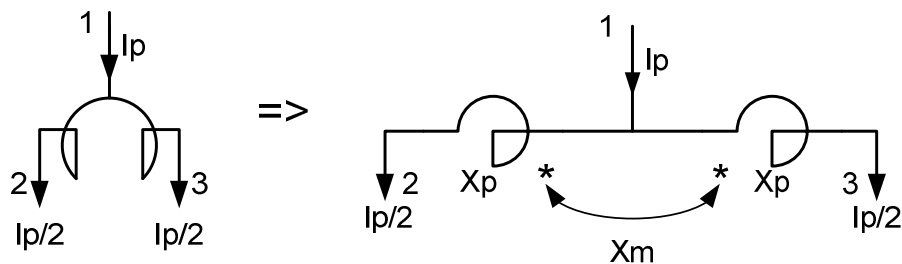


Рис.15 Еквівалентна електрична схема здвоєного реактора

В цьому випадку опори між точками 1-2, 2-3 та 1-3 складають:

$$X_{12} = X_{13} = X_p, \quad (17)$$

$$X_{23} = 2X_p + 2X_M = 2X_p + 2X_p m = 2X_p(1 + m), \quad (18)$$

де X_p - опір напівобмотки реактора, який визначається за (14).

Тоді опори еквівалентної заступної схеми (рис.14,б) визначаються як:

$$X_1 = \frac{X_{12} + X_{13} - X_{23}}{2} = -X_p \cdot m, \quad (19)$$

$$X_2 = \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2} = X_p \cdot (1 + m), \quad (20)$$

$$X_3 = \frac{X_{13} + X_{23} - X_{12}}{2} = X_p \cdot (1 + m). \quad (21)$$

Трансформатор з розщепленою обмоткою. Це багатообмоткові трансформатори у яких дві чи більше обмоток розраховані на однакові потужності і в сумі складають повну потужність трансформатора. Найбільш поширеними є трансформатори у яких обмотка низької напруги розщеплена на дві напівобмотки. Електрична та заступна схеми такого трансформатора приведені на рис.16.

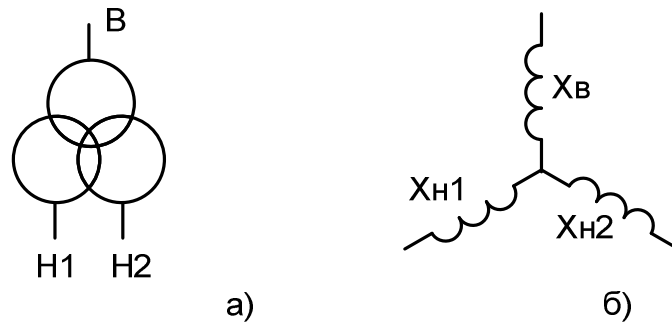


Рис.16 Електрична (а) та заступна (б) схеми трансформатора з розщепленою обмоткою

Основними параметрами трансформатора з розщепленою обмоткою є: номінальна повна потужність S_H , номінальна напруга обмотки високої напруги U_{BH} , номінальна напруга обмоток низької напруги U_{HH} , напруга КЗ обмоток ВН-НН $u_{K3-BH}^{\%}$, напруга КЗ обмоток НН-НН $u_{K3-HH}^{\%}$.

Трансформатор з розщепленою обмоткою НН подібний до триобмоткового трансформатора, але оскільки дві його напівобмотки однакові, то їхні напруги КЗ та опори у заступній схемі також однакові:

$$u_{K3-B}^{\%} = \frac{2 \cdot u_{K3-BH}^{\%} - u_{K3-HH}^{\%}}{2}; \quad (22)$$

$$u_{K3-H1}^{\%} = u_{K3-H2}^{\%} = u_{K3-H}^{\%} = \frac{u_{K3-HH}^{\%}}{2}, \quad (23)$$

$$X_B = \frac{u_{K3-B}^{\%}}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H}; \quad (24)$$

$$X_{H1} = X_{H2} = \frac{u_{K3-H}^{\%}}{100} \cdot \frac{U_{HH}^2}{S_H}. \quad (25)$$

Еквівалентна енергосистема (еквівалентний генератор). ЕЕС представляє собою дуже велику, складну та сильно розгалужену мережу. Тому, зазвичай, при аналізі перехідних процесів розглядається лише частина ЕЕС у якій відбулося збурення (електростанція, підстанція, вузол навантаження, тощо), а інші частини ЕЕС представляються еквівалентними генераторами в місцях підключення розглядуваної частини ЕЕС. Основними параметрами еквівалентної енергосистеми є: номінальна повна потужність КЗ в місці підключення $S_{КЗ}$ та номінальна напруга U_H .

Електрична схема еквівалентної енергосистеми та її заступна схема приведені на рис.17.



Рис.17 Електрична (а) та заступна (б) схеми еквівалентної енергосистеми

Опір еквівалентної енергосистеми визначається наступним чином:

$$X_c = \frac{U_H^2}{S_{КЗ}}. \quad (26)$$

Визначення ЕРС еквівалентної енергосистеми є дуже складною задачею, розв'язок якої залежить від режиму всієї ЕЕС, тому в розрахунках наближено приймають:

$$E_c = 1,1 \cdot U_H. \quad (27)$$

Навантаження. В спрощеному виді навантаження вноситься до заступної схеми опором, величина якого не залежить від режиму (див. припущення при аналізі перехідних процесів №5). При цьому, слід пам'ятати, що припущення при аналізі перехідних процесів №6 на навантаження не поширюється – в заступну схему воно вноситься повним опором. Основними параметрами навантаження є: активна потужність споживання $P_{НАВ}$, реактивна потужність споживання $Q_{НАВ}$ та номінальна напруга U_H .

Електричні схема навантаження та його заступна схема приведені на рис.18.

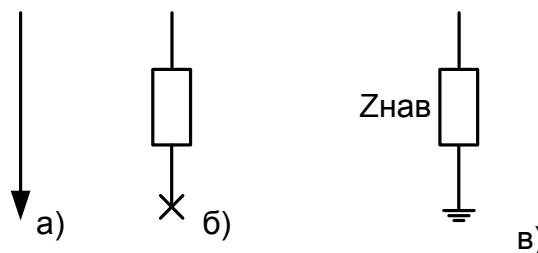


Рис.18 Електричні (а, б) та заступна (в) схеми навантаження

Опір навантаження є комплексною величиною та визначається наступним чином:

$$R_{HAB} = \frac{U_H^2}{P_{HAB}}, \quad (28)$$

$$X_{HAB} = \frac{U_H^2}{Q_{HAB}}, \quad (29)$$

$$\dot{Z}_{HAB} = R_{HAB} + j \cdot X_{HAB}. \quad (30)$$

Таким чином, на основі отриманих заступних схем елементів ЕЕС, можна скласти заступну схему мережі з рис.6.

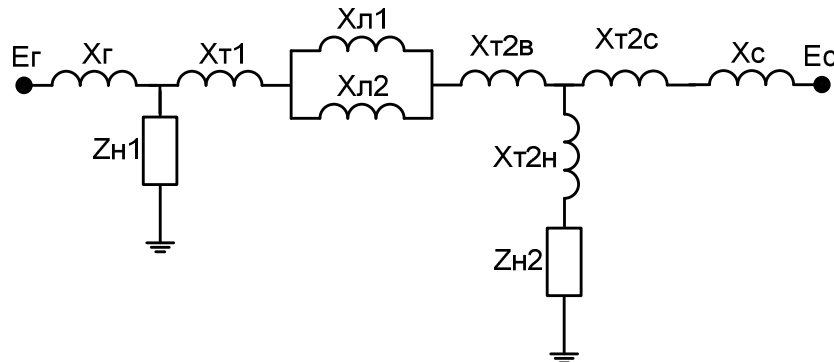


Рис.19 Заступна схема мережі з рис.6

1.2.3 Приведення параметрів енергосистеми до однієї напруги

При складанні заступної схеми ЕЕС магнітні зв'язки замінюються електричними. Щоб зробити це необхідно привести всі параметри заступної схеми ЕЕС до одного рівня напруги. Ступінь напруги до якої будуть приведені параметри називається базисною. Приведення відбувається з використанням коефіцієнтів трансформації трансформаторів, які є в схемі ЕЕС. Нехай потрібно привести параметри трансформатора Т (рис.20) до напруги U_2 , яка в цьому випадку є базисною.

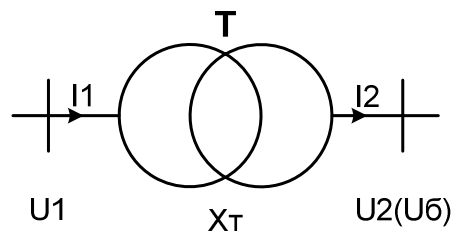


Рис.20 Приведення параметрів трансформатора до однієї ступіні напруги

Коефіцієнт трансформації трансформатора за такого приведення дорівнює $K = U_2/U_1$. При цьому приведені параметри трансформатора будуть дорівнювати:

$$\bar{U}_1 = K \cdot U_1, \quad (31)$$

$$\bar{E}_1 = K \cdot E_1, \quad (32)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{K} \cdot I_1, \quad (33)$$

$$X_T = K^2 \cdot X_{T1} \quad (34)$$

У більш складній схемі, коли є декілька ступіней трансформації (рис.21), загальний коефіцієнт трансформації визначається як добуток коефіцієнтів трансформації всіх трансформаторів на шляху від ступіні що приводиться до базисної $K = \frac{U_2}{U_1} \cdot \dots \cdot \frac{U_{n+1}}{U_n} = K_1 \cdot \dots \cdot K_n$.

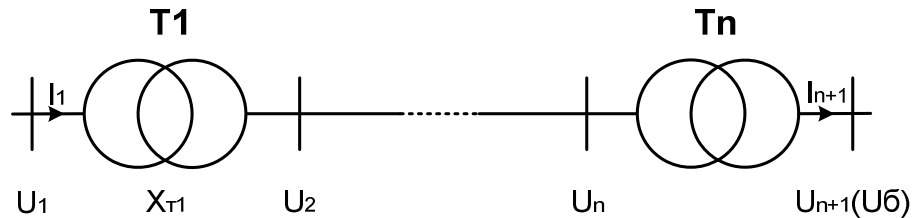


Рис.21 Приведення параметрів до однієї ступіні напруги за наявності декількох ступіней трансформації

В цьому випадку приведені параметри трансформатора T1 будуть дорівнювати:

$$\bar{U}_1 = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot U_1, \quad (35)$$

$$\bar{E}_1 = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot E_1, \quad (36)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{K_1 \cdot \dots \cdot K_n} \cdot I_1, \quad (37)$$

$$\bar{X}_{T1} = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot X_{T1}. \quad (38)$$

Також, слід мати на увазі, що при приведенні параметрів мережі до одного рівня напруги коефіцієнт трансформації завжди береться як відношення напруги ступіні *куди* приводяться параметри до напруги ступіні *звідки* він приводиться.

1.2.4 Система відносних одиниць

Всі приведені вище розрахунки параметрів заступної схеми мережі та приведення параметрів виконані в іменованих одиницях, тобто напруги та ЕРС визначаються у Вольтах [В], струми – в Амперах [А], а опори – в Омах [Ом]. В багатьох випадках для виконання розрахунків зручним є перехід від іменованих одиниць до відносних [в.о.], тобто коли всі перераховані вище параметри є безрозмірними величинами.

Відносне значення параметра є відношення значення даного параметра до однойменного параметра обраного в якості базисної величини. В якості базисних величин приймають базисну напругу U_B та базисну повну потужність S_B . Базисний струм визначається як $I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}$, а базисний опір –

$$X_B = \frac{U_B^2}{S_B}.$$

Після визначення всіх базисних величин, переведення параметрів з іменованих одиниць до відносних відбувається наступним чином:

$$U^* = \frac{U}{U_B}, \quad (39)$$

$$E^* = \frac{E}{U_B}, \quad (40)$$

$$I^* = \frac{I}{I_B}, \quad (41)$$

$$X^* = \frac{X}{X_B}. \quad (42)$$

Для розрахунку перехідних процесів у електричній мережі всі її параметри мають бути в одній системі одиниць та приведені до однієї ступіні напруги. Формули приведення параметрів системи до однієї ступіні напруги представлені в табл.1.

Таблиця 1. Приведення параметрів системи до однієї ступіні напруги

Вихідні параметри / Приведені параметри	Іменовані одиниці	Відносні одиниці
Іменовані одиниці	$\bar{U} = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot U$ $\bar{I} = \frac{1}{K_1 \cdot \dots \cdot K_n} \cdot I$ $\bar{X} = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot X$	$\bar{U} = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot U^* \cdot U_H$ $\bar{I} = \frac{1}{K_1 \cdot \dots \cdot K_n} \cdot I^* \cdot I_H$ $\bar{X} = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot X^* \cdot X_H$
Відносні одиниці	$\bar{U}^* = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot \frac{U}{U_B}$ $\bar{I}^* = \frac{1}{K_1 \cdot \dots \cdot K_n} \cdot \frac{I}{I_B}$ $\bar{X}^* = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot \frac{X}{X_B}$	$\bar{U}^* = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n) \cdot U^* \cdot \frac{U_H}{U_B}$ $\bar{I}^* = \frac{1}{K_1 \cdot \dots \cdot K_n} \cdot I^* \cdot \frac{I_H}{I_B}$ $\bar{X}^* = (K_1 \cdot \dots \cdot K_n)^2 \cdot X^* \cdot \frac{X_H}{X_B}$

Вибір базисних величин. Вибір базисних величин не впливає на остаточний результат розрахунку, тому обирати їх можна будь-якими, але для зручності розрахунків доцільно притримуватись наступних рекомендацій:

- базисну потужність S_B доцільно обирати або порядковим числом (1, 10, 100, 1000 [МВА] і т.д.) або приймати рівною номінальній повній потужності одного з генераторів розглядуваної мережі;
- в якості базисної напруги U_B зручно приймати напругу тієї ступіні, на якій розглядається КЗ.

1.2.5 Перетворення заступної схеми електроенергетичної системи

Метод еквівалентного перетворення. Для розрахунків струмів КЗ в схемі ЕЕС треба спростити заступну схему ЕЕС до найпростішої однопроменевої еквівалентної схеми (рис.22).

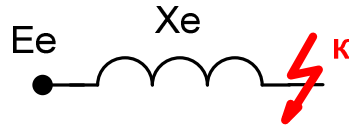


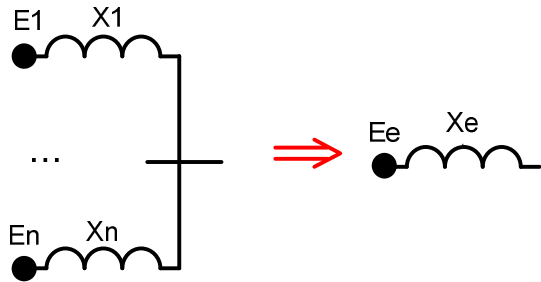
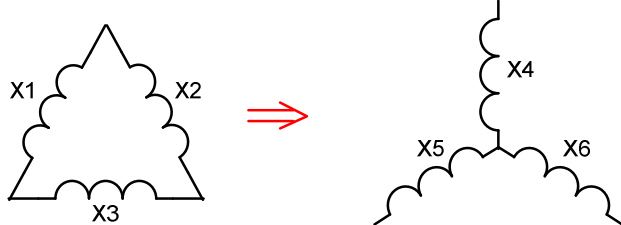
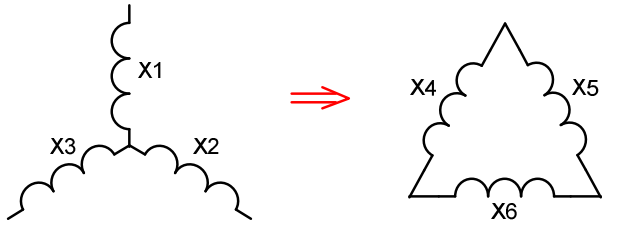
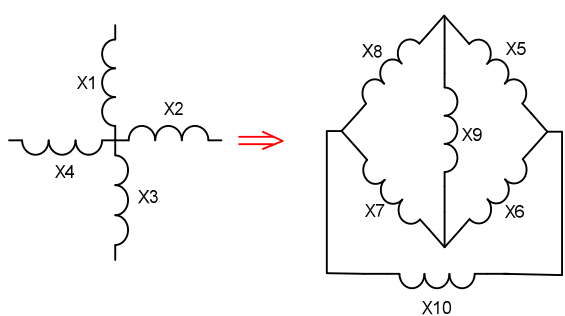
Рис.22 Однопроменева еквівалентна заступна схема

Для спрощення заступної схеми до однопроменевої еквівалентної використовується метод еквівалентного перетворення. Схеми та формули еквівалентних перетворень заступних схем ЕЕС приведені в табл.2.

Таблиця 2. Схеми та формули еквівалентних перетворень заступних схем

З'єднання елементів	Еквівалентне перетворення ділянки схеми	Розрахункова формула
Послідовне з'єднання двох елементів		$X_e = X_1 + X_2$
Послідовне з'єднання n елементів		$X_e = X_1 + \dots + X_n$
Паралельне з'єднання двох елементів		$X_e = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$
Паралельне з'єднання n елементів		$X_e = \left(\frac{1}{X_1} + \dots + \frac{1}{X_n} \right)^{-1}$
Паралельне з'єднання двох елементів з ЕРС		Якщо $E_1 = E_2$, то $E_e = E_1 = E_2$, $X_e = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$
		Якщо $E_1 \neq E_2$, то $E_e = \frac{E_1/X_1 + E_2/X_2}{1/X_1 + 1/X_2}$, $X_e = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$

Продовження табл.2

<p>Паралельне з'єднання n елементів з ЕРС</p>		<p>Якщо $E_1 = \dots = E_n$, то $E_e = E_1 = \dots = E_n$, $X_e = \left(\frac{1}{X_1} + \dots + \frac{1}{X_n} \right)^{-1}$</p> <p>Якщо $E_1 \neq \dots \neq E_n$, то $E_e = \frac{E_1/X_1 + \dots + E_n/X_n}{1/X_1 + \dots + 1/X_n}$, $X_e = \left(\frac{1}{X_1} + \dots + \frac{1}{X_n} \right)^{-1}$</p>
<p>Перетворення «трикутника» в трипроменеву «зірку»</p>		$X_4 = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2 + X_3}$ $X_5 = \frac{X_1 \cdot X_3}{X_1 + X_2 + X_3}$ $X_6 = \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1 + X_2 + X_3}$
<p>Перетворення трипроменевої «зірки» в «трикутник»</p>		$X_4 = X_1 + X_3 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}$ $X_5 = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$ $X_6 = X_2 + X_3 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1}$
<p>Перетворення багатопроемневої зірки в багатокутник з діагоналями</p>	<p>Загальна формула для n-променевої зірки:</p> $X_{ij} = X_i \cdot X_j \cdot \left(\frac{1}{X_1} + \dots + \frac{1}{X_i} + \dots + \frac{1}{X_j} + \dots + \frac{1}{X_n} \right)$ <p>де i, j – будь-які дві вершини утвореного n-кутника</p>	
	<p>На прикладі чотирипроменевої зірки:</p> 	$X_6 = X_2 \cdot X_3 \cdot \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4} \right)$ $X_7 = X_3 \cdot X_4 \cdot \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4} \right)$ $X_8 = X_1 \cdot X_4 \cdot \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4} \right)$ $X_9 = X_1 \cdot X_3 \cdot \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4} \right)$ $X_{10} = X_2 \cdot X_4 \cdot \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4} \right)$

В результаті еквівалентних перетворень за розглянутими в табл.2 схемами заступну схему ЕЕС будь-якої складності можна спростити до

однопроменевої еквівалентної (див. рис.22). Струм, що протікає в однопроменевій еквівалентній схемі, представляє собою вузловий струм КЗ в місці його виникнення і визначається за законом Ома:

$$I_K = \frac{E_e}{X_e}. \quad (43)$$

Після визначення вузлового струму в місці КЗ необхідно розрахувати значення струмів, що протікають при КЗ у всіх гілках схеми. Для цього необхідно визначити коефіцієнти струморозподілу. Коефіцієнт струморозподілу показує яку частину складає струм у гілці m від вузлового струму КЗ:

$$C_m = \frac{I_m}{I_K}. \quad (44)$$

Якщо в електричній схемі не враховано активні опори елементів, коефіцієнти струморозподілу будуть дійсними величинами, у випадку коли в схемі є активні опори, коефіцієнти струморозподілу будуть комплексними.

Коефіцієнти струморозподілу визначаються шляхом зворотного «розгортання» схеми від еквівалентної до вихідної. На кожному етапі зворотного перетворення коефіцієнти струморозподілу визначаються згідно з наступними принципами:

1) коефіцієнти струморозподілу послідовно з'єднаних ділянок мережі є рівними між собою та рівними еквівалентному коефіцієнту (рис.23).

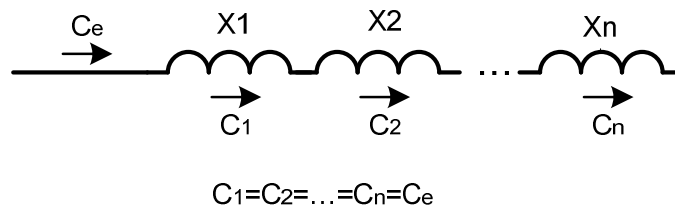


Рис.23 Коефіцієнти струморозподілу послідовно з'єднаних елементів

2) коефіцієнти струморозподілу паралельно з'єднаних гілок визначаються згідно з правилом «чужого плеча», їхня сума повинна дорівнювати еквівалентному коефіцієнту (рис.24).

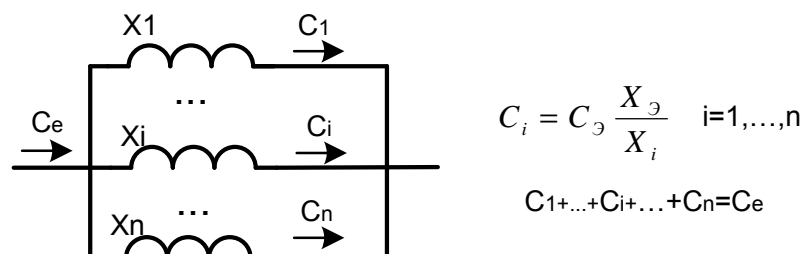
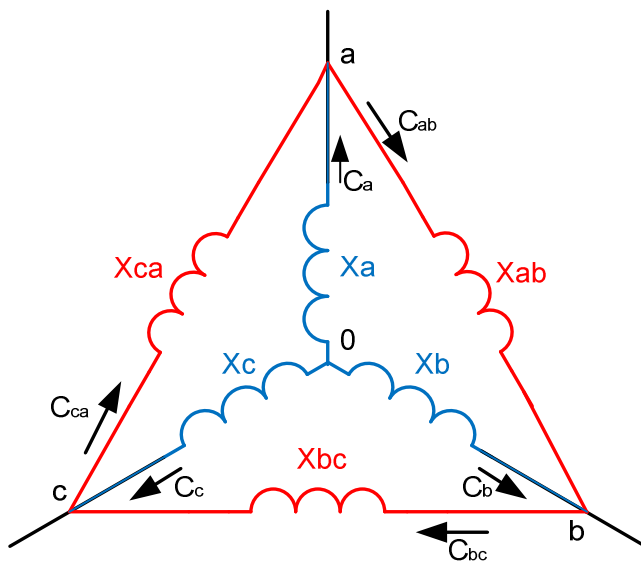


Рис.24 Коефіцієнти струморозподілу паралельно з'єднаних елементів

3) коефіцієнти струморозподілу «трикутника» за відомих коефіцієнтів струморозподілу еквівалентної «зірки» визначаються за 2-м законом Кірхгофа (рис.25). Слід зазначити, що приведені вирази для C_{ab} , C_{bc} та C_{ca} справедливі лише для вказаного на рисунку напрямку коефіцієнтів струморозподілу «зірки»

та «трикутника». Тому, для кожного випадку треба окремо скласти рівняння за другим законом Кірхгофа для умовних контурів $ab0$, $bc0$ та $ca0$.



$$U_{ab}^* = C_{ab} X_{ab} = -C_a X_a + C_b X_b$$

$$C_{ab} = (-C_a X_a + C_b X_b) / X_{ab}$$

$$U_{bc}^* = C_{bc} X_{bc} = -C_b X_b + C_c X_c$$

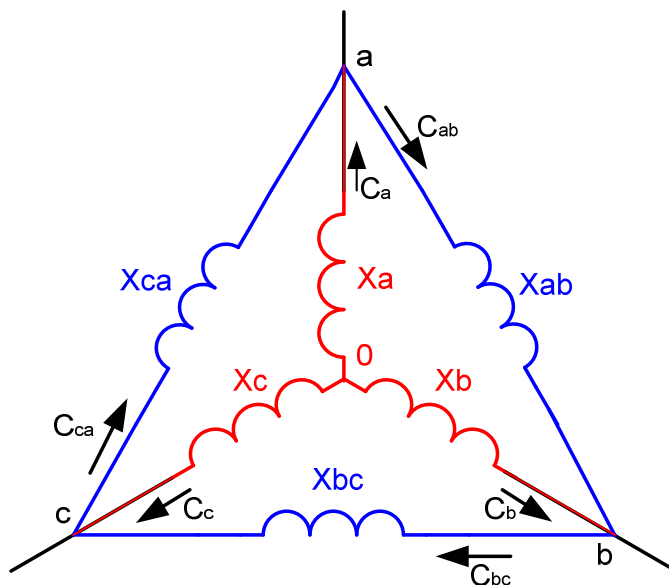
$$C_{bc} = (-C_b X_b + C_c X_c) / X_{bc}$$

$$U_{ca}^* = C_{ca} X_{ca} = -C_c X_c + C_a X_a$$

$$C_{ca} = (-C_c X_c + C_a X_a) / X_{ca}$$

Рис.25 Коефіцієнти струморозподілу «трикутника» за відомих коефіцієнтів струморозподілу еквівалентної «зірки»

4) коефіцієнти струморозподілу «зірки» за відомих коефіцієнтів струморозподілу еквівалентного «трикутника» визначаються за 1-м законом Кірхгофа (рис.26). Слід зазначити, що приведені вирази для C_a , C_b та C_c справедливі лише для вказаного на рисунку напрямку коефіцієнтів струморозподілу «зірки» та «трикутника». Тому, для кожного випадку треба окремо скласти рівняння за першим законом Кірхгофа для умовних вузлів a , b та c .



$$C_a = C_{ab} - C_{ca}$$

$$C_b = C_{bc} - C_{cb}$$

$$C_c = C_{ca} - C_{cb}$$

Рис.26 Коефіцієнти струморозподілу «зірки» за відомих коефіцієнтів струморозподілу еквівалентного «трикутника»

Метод накладання. Принцип методу накладання полягає в тому, що умови трифазного КЗ не зміняться, якщо в точку КЗ підключити дві рівні за величиною, але протилежні за напрямком ЕРС (рис.27).

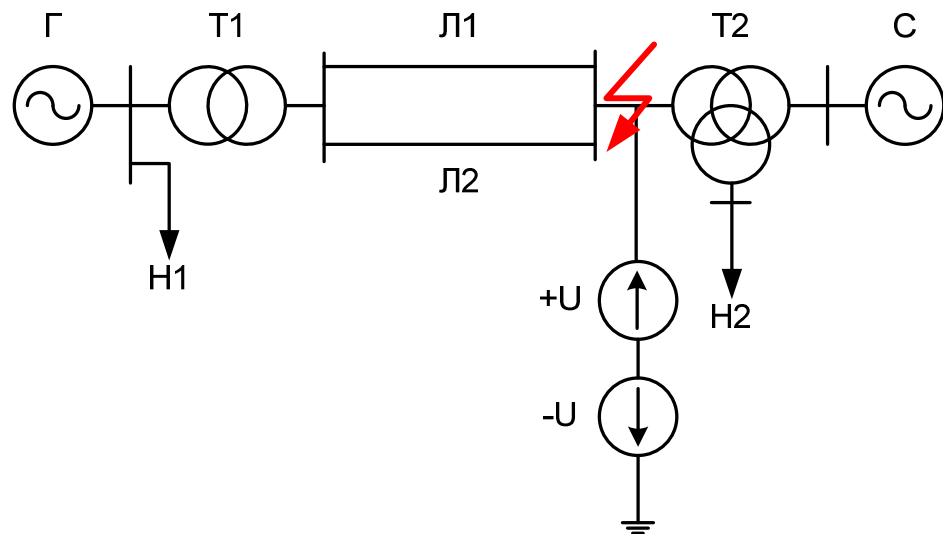


Рис.27 Підключення двох ЕРС в місці КЗ

В якості величини ЕРС обирається величина напруги, яка була в точці КЗ до його виникнення (доаварійний режим). Після введення до схеми цих двох ЕРС, схема розділяється на дві:

- 1) у першій схемі залишається ЕРС всіх генераторів та ЕРС $+U$ (рис.28,а) – це схема нормального режиму;
- 2) у другій схемі ЕРС генераторів дорівнюють нулю і діє тільки ЕРС $-U$ (рис.28,б) – це схема аварійного режиму.

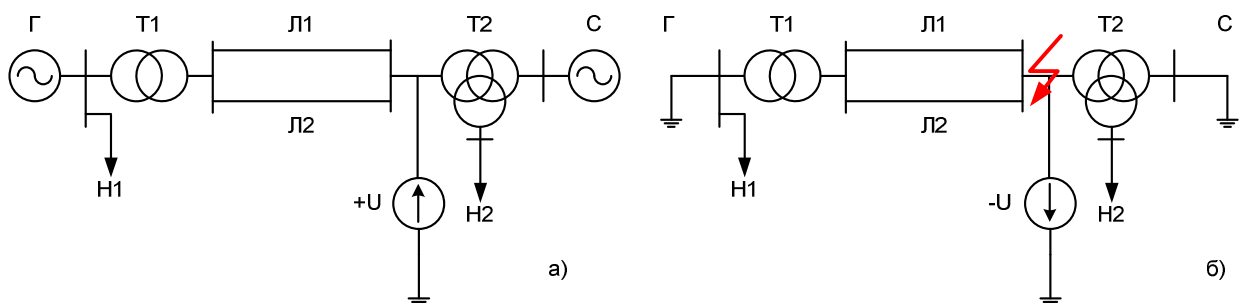


Рис.28 Розділення початкової схеми на дві за методом накладання

Доаварійний режим схеми з рис.28,а, зазвичай, відомий. Аварійний режим (рис.28,б) невідомий і його необхідно розрахувати (наприклад, методом еквівалентного перетворення), але його розрахунок є простішим за розрахунок вихідної схеми (рис.27) через наявність лише однієї ЕРС. Реальні струми КЗ визначаються накладанням відомих струмів доаварійного режиму і розрахованих струмів аварійного режиму один на одного.

1.3 Електромагнітні перехідні процеси при збереженні симетрії трифазної системи

1.3.1 Трифазне КЗ в нерозгалуженому колі

Симетричне трифазне коло з активними і індуктивними опорами без трансформаторних зв'язків представляє собою найпростіше нерозгалужене коло. Перехідний процес у такому колі досліджується за умови, що воно живиться від джерела нескінченної потужності. Внутрішній опір такого джерела дорівнює нулю, напруга та частота на його шинах незмінні в будь-якому режимі роботи приєднаного електричного кола. Нерозгалужене трифазне коло, що живиться від джерела нескінченної потужності, представлено на рис.29.

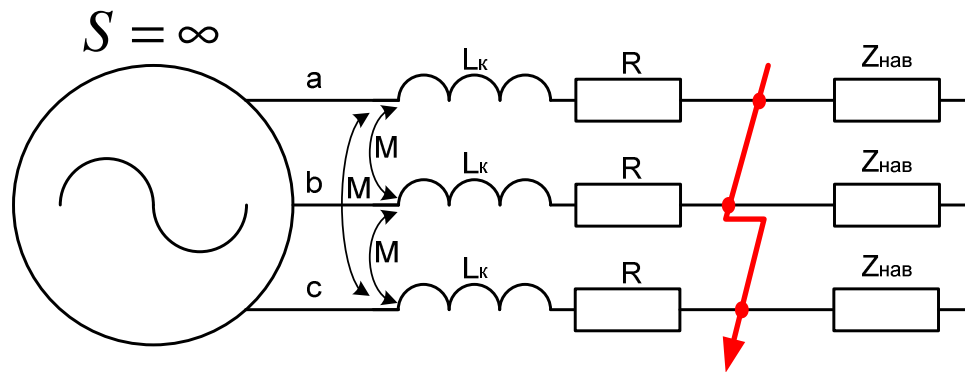


Рис.29 КЗ в трифазному нерозгалуженому колі

Рівняння рівноваги напруги для фази «А» складає:

$$u_a = R \cdot i_a + L_k \cdot \frac{di_a}{dt} + M \cdot \frac{di_b}{dt} + M \cdot \frac{di_c}{dt}. \quad (45)$$

Оскільки розглядається трифазне КЗ, то виконується наступна умова:

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (46)$$

З виразів (45), (46) отримуємо:

$$u_a = R \cdot i_a + (L_k - M) \cdot \frac{di_a}{dt} = R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt}. \quad (47)$$

Вираз (47) представляє собою звичайне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами. Розв'язок такого рівняння містить вимушену (періодичну) та вільну (аперіодичну) складові:

$$i_k = i_{вл} + i_{вим}. \quad (48)$$

Визначення періодичної складової. Вважаючи, що напруга u_a змінюється за синусоїдальним законом, записується вираз для її амплітуди, яка є комплексною величиною що залежить від кута включення α :

$$u_a = U_M \sin(\omega t + \alpha) \rightarrow U_M \cdot e^{j(\omega t + \alpha)} = U_M \cdot e^{j\alpha} \cdot e^{j\omega t} = \dot{U}_M \cdot e^{j\omega t} \rightarrow \dot{U}_M = U_M \cdot e^{j\alpha}. \quad (49)$$

Комплексний опір фази «А» від джерела до місця КЗ складає:

$$\dot{Z}_K = R + j\omega L = Z_K \cdot e^{j\varphi_K}. \quad (50)$$

Тоді комплекс амплітуди струму складає:

$$i_{MK} = \frac{\dot{U}_M}{\dot{Z}_K} = \frac{U_M \cdot e^{j\alpha}}{Z_K \cdot e^{j\varphi_K}} = I_{MK} \cdot e^{j(\alpha - \varphi_K)}. \quad (51)$$

Вимушена складова струму КЗ дорівнює:

$$I_{MK} \cdot e^{j(\alpha - \varphi_K)} \rightarrow i_{ВИМ} = I_{MK} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K). \quad (52)$$

Визначення аперіодичної складової. Вільна складова розв'язку рівняння (47) має наступний вигляд:

$$i_{ВИЛ} = C \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (53)$$

де $T_a = L/R$ - стала часу короткозамкненого кола, C - коефіцієнт, який необхідно визначити.

Для визначення коефіцієнту C треба розглянути вираз (48) в момент часу $t = 0$, з урахуванням того, що в початковий момент часу струм у колі з індуктивністю стрибком змінитись не може:

$$i_K(0) = i_{ВИЛ}(0) + i_{ВИМ}(0). \quad (54)$$

$$\begin{aligned} I_{MH} \sin(\omega \cdot 0 + \alpha - \varphi_H) &= I_{MK} \sin(\omega \cdot 0 + \alpha - \varphi_K) + C \cdot e^{-\frac{0}{T_a}} \rightarrow \\ &\rightarrow I_{MH} \sin(\alpha - \varphi_H) = I_{MK} \sin(\alpha - \varphi_K) + C \rightarrow \\ &\rightarrow C = I_{MH} \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{MK} \sin(\alpha - \varphi_K), \end{aligned} \quad (55)$$

де I_{MH} - амплітуди струму доаварійного (нормального) режиму,
 $\varphi_H = \arctg \frac{\omega(L + L_H)}{R + R_H}$ - кут навантаження доаварійного (нормального) режиму.

Таким чином струм КЗ, що протікає у фазі «А», описується виразом:

$$i_K = I_{MK} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) + [I_{MH} \sin(\alpha - \varphi_H) - I_{MK} \sin(\alpha - \varphi_K)] \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (56)$$

Струми КЗ у фазах «В» та «С» описуються аналогічним виразом але з іншим значенням кута включення: для фази «В» кут включення складає $\alpha - 120^\circ$, для фази «С» кут включення складає $\alpha + 120^\circ$.

1.3.2 Ударний струм КЗ та діюче значення струму КЗ

Максимальний ударний струм КЗ залежить від часу, попереднього режиму та кута включення α . Оскільки струм КЗ в багато разів перевищує струм нормального режиму, вважається що до КЗ коло було ненавантажене, тобто $I_{MH} \sin(\alpha - \varphi_H) = 0$. Тоді вираз (56) запишеться так:

$$i = I_{MK} \cdot (\sin(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}). \quad (57)$$

Для визначення максимуму необхідно визначити часткові похідні по змінним t та α і прирівняти їх до нуля:

$$\frac{\partial i}{\partial t} = I_{MK} \cdot (\omega \cdot \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K) + \frac{1}{T_a} \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}) = 0, \quad (58)$$

$$\frac{\partial i}{\partial \alpha} = I_{MK} \cdot (\cos(\omega t + \alpha - \varphi_K) - \cos(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}) = 0. \quad (59)$$

Другі складові рівнянь (58) та (59) переносяться в праву частину, після чого вираз (58) ділиться на вираз (59):

$$\frac{I_{MK} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K)}{I_{MK} \cdot \cos(\omega t + \alpha - \varphi_K)} = \frac{-I_{MK} \cdot \frac{1}{T_a} \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}}{I_{MK} \cos(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}} \rightarrow \quad (60)$$

$$\omega = -\frac{1}{T_a} \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_K) \rightarrow \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_K) = -\omega \cdot T_a = -\omega \cdot \frac{L}{R} = -\frac{X}{R} = \operatorname{tg}(-\varphi_K).$$

З останнього виразу очевидно, що $\alpha = 0$, тобто струм має максимальне значення при проходженні напруги через нуль в момент виникнення КЗ. З урахуванням цього, вираз (57) переписується наступним чином:

$$i = I_{MK} \cdot (\sin(\omega t - \varphi_K) + \sin \varphi_K \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}) = 0. \quad (61)$$

З виразу (61) очевидно, що максимальне значення струму буде при $\sin(\omega t - \varphi_K) = 1$, тобто при $\omega t - \varphi_K = \frac{\pi}{2}$. Виходячи з цього отримуємо:

$$t = \frac{\varphi_K + \pi/2}{\omega} = \frac{\varphi_K + \pi/2}{2\pi f} = 0,01 \frac{\varphi_K + \pi/2}{\pi}. \quad (62)$$

В короткозамкненому колі $\omega L \gg R$, тобто $\varphi_K \rightarrow 90^\circ$, таким чином можна записати:

$$t \approx 0,01 \frac{\pi/2 + \pi/2}{\pi} = 0,01 \text{ с}. \quad (63)$$

Максимальний ударний струм КЗ буде в момент часу $t = 0,01 \text{ с}$ від моменту виникнення КЗ. З урахуванням того, що $t = 0,01 \text{ с}$ та $\varphi_K \rightarrow 90^\circ$ вираз (61) приймає вигляд:

$$i_{y\partial} = I_{MK} \cdot (1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}). \quad (64)$$

Таким чином, величина максимального ударного струму КЗ залежить від амплітуди періодичної складової струму КЗ I_{MK} та сталої часу T_a короткозамкненого кола. Величина $(1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}})$ називається ударним коефіцієнтом $K_{y\partial}$ та, в залежності від співвідношення параметрів R та L , у реальних схемах ЕЕС дорівнює 1,8..1,9.

Графік струму КЗ, яке виникло в момент переходу напруги через нуль, представлений на рис.30.

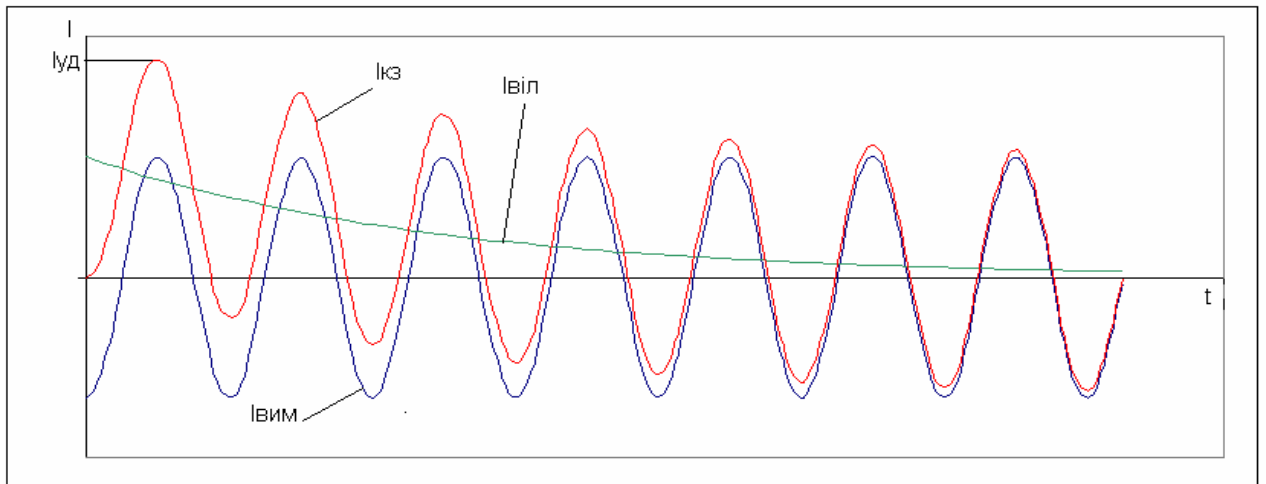


Рис.30 Графік струму КЗ

Діюче значення періодичної складової струму КЗ визначається як середньоквадратичне значення періодичної складової за один період:

$$\begin{aligned}
 I_{\pi} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_{MK} \cdot \sin(\omega t - \varphi_K)]^2 \cdot dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_{MK} \cdot \cos \omega t]^2 \cdot dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} I_{MK}^2 \int_0^T \cos^2 \omega t \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} I_{MK}^2 \frac{1}{2\omega} (\omega t + \sin \omega t \cdot \cos \omega t) \Big|_0^T} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} I_{MK}^2 \left[\frac{1}{2\omega} (\omega T + \sin \omega T \cdot \cos \omega T) - \frac{1}{2\omega} (\omega \cdot 0 + \sin \omega 0 \cdot \cos \omega 0) \right]} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} I_{MK}^2 \frac{1}{2\omega} \omega T} = \frac{I_{MK}}{\sqrt{2}}.
 \end{aligned} \tag{65}$$

Таким чином, діюче значення періодичної складової струму КЗ менше за амплітуду періодичної складової струму в $\sqrt{2}$ разів. В цьому випадку вираз для ударного струму КЗ (64) можна записати наступним чином:

$$i_{y\partial} = I_{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}). \tag{66}$$

1.3.3 Усталений режим КЗ

В попередніх випадках при аналізі трифазного КЗ розглядалось коло, приєднане до джерела нескінченної потужності. При цьому перехідний процес характеризувався тільки зміною вільної складової. Періодична складова була незмінною. Якщо розглядати в якості джерела реальний генератор, який має внутрішній опір та певну потужність, то на протязі перехідного процесу змінюється не тільки вільна складова струму, а й вимушена внаслідок того що змінюється потік повздовжньої реакції статора та працює автоматичний регулятор збудження (АРЗ). При цьому під усталеним режимом КЗ розуміється режим за якого практично загасли всі вільні складові і припинило свою дію АРЗ. Такий режим настає через декілька секунд після виникнення КЗ та характеризується величиною відношення короткого замикання (ОКЗ) яке

є відношенням усталеного струму КЗ при номінальному струмі збудження генератора до номінального струму генератора:

$$OKЗ = \frac{I_{\infty}(i_{f-NOM})}{I_H} \quad (67)$$

Реальні генератори в ЕЕС оздоблені пристроями АРЗ. При зниженні напруги на шинах генератора внаслідок КЗ АРЗ намагається її підвищити шляхом збільшення струму збудження генератора. При зростанні струму збудження генератора зростає ЕРС генератора і, як наслідок, зростає напруга статора. По мірі наближення точки КЗ до генератора для компенсації напруги вимагається все більший струм збудження, але реальні системи збудження мають обмеження максимального струму збудження:

$$I_{f-MAX} = (1,8...2,0) \cdot i_f \quad (68)$$

На рис.31 представлено зміну напруги генератора та струму збудження в залежності від величини зовнішнього опору $X_{ЗОВН}$ (опір між місцем КЗ та генератором) в усталеному режимі КЗ.

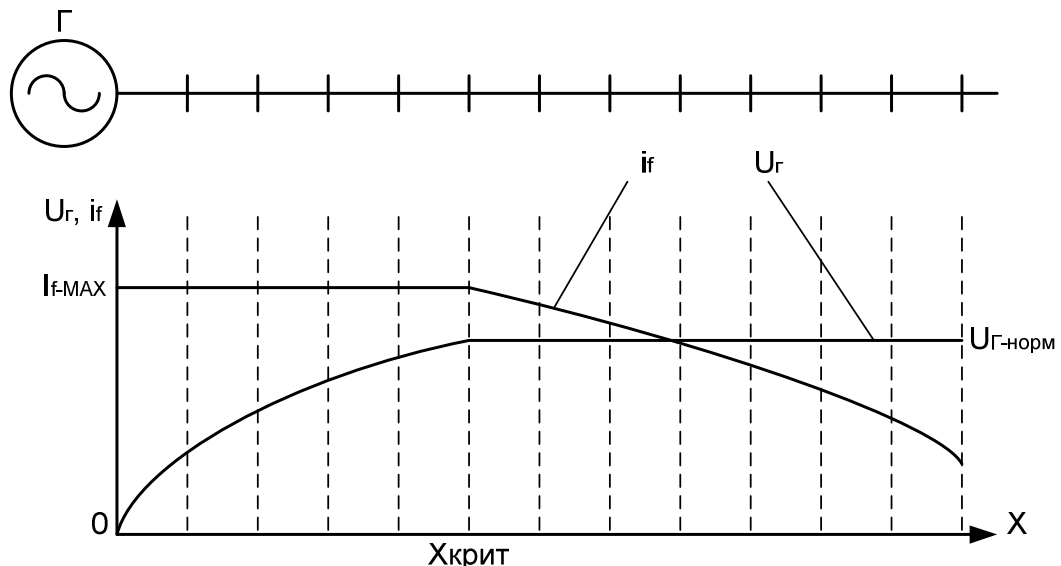


Рис.31 Зміна напруги генератора та струму збудження генератора в залежності від зовнішнього опору

З рис.31 видно, що при великих значеннях зовнішнього опору $X_{ЗОВН}$ АРЗ генератора спроможний підняти напругу генератора до номінальної, а за малих, враховуючи обмеження (68), – ні. Значення зовнішнього опору, за якого відбувається перехід від усталеного аварійного режиму зі збереженням номінальної напруги генератора до усталеного аварійного режиму з максимальним збудженням, називається критичним $X_{КРИТ}$. При цьому справедливі такі співвідношення:

- 1) режим максимального (граничного) збудження: $i_f = I_{f-MAX}$, $U_G < U_{НОРМ}$, $X_{ЗОВН} < X_{КРИТ}$;
- 2) режим нормальної напруги: $i_f < I_{f-MAX}$, $U_G = U_{НОРМ}$, $X_{ЗОВН} > X_{КРИТ}$;
- 3) критичний режим: $i_f = I_{f-MAX}$, $U_G = U_{НОРМ}$, $X_{ЗОВН} = X_{КРИТ}$.

При розрахунку усталеного режиму КЗ в ЕЕС генератори, що знаходяться в режимі максимального збудження, вносяться до заступної схеми своїм внутрішнім синхронним опором X_d та синхронною ЕРС в режимі форсування $E_q^{форс} = (1,8...2,0)E_q$. У генераторів, що знаходяться в режимі нормальної напруги, до заступної схеми вносяться лише їхні вузли приєднання до ЕЕС з відомою напругою $U_{НОРМ}$. Ті генератори, що знаходяться у критичному режимі, до заступної схеми можна вносити обома способами.

1.3.4 Початковий момент КЗ, перехідні та надперехідні параметри синхронного генератора

При розгляданні початкового моменту КЗ робляться наступні припущення:

1) зміною індуктивностей генератора, що спричинені обертанням ротора, можна знехтувати і розглядати синхронний генератор як трансформатор з повітряним зазором;

2) аналіз початкового моменту КЗ виконується на основі незмінного результуючого потокозчеплення обмотки збудження в момент КЗ.

Перехідні ЕРС та опори синхронного генератора без демпферних обмоток. На рис.32 представлено баланси магнітних потоків синхронного генератора за позадвжньою віссю в доаварійному режимі (а) та в момент виникнення трифазного КЗ (б) та магнітні потоки в генераторі при його представленні як трансформатора з повітряним зазором (в).

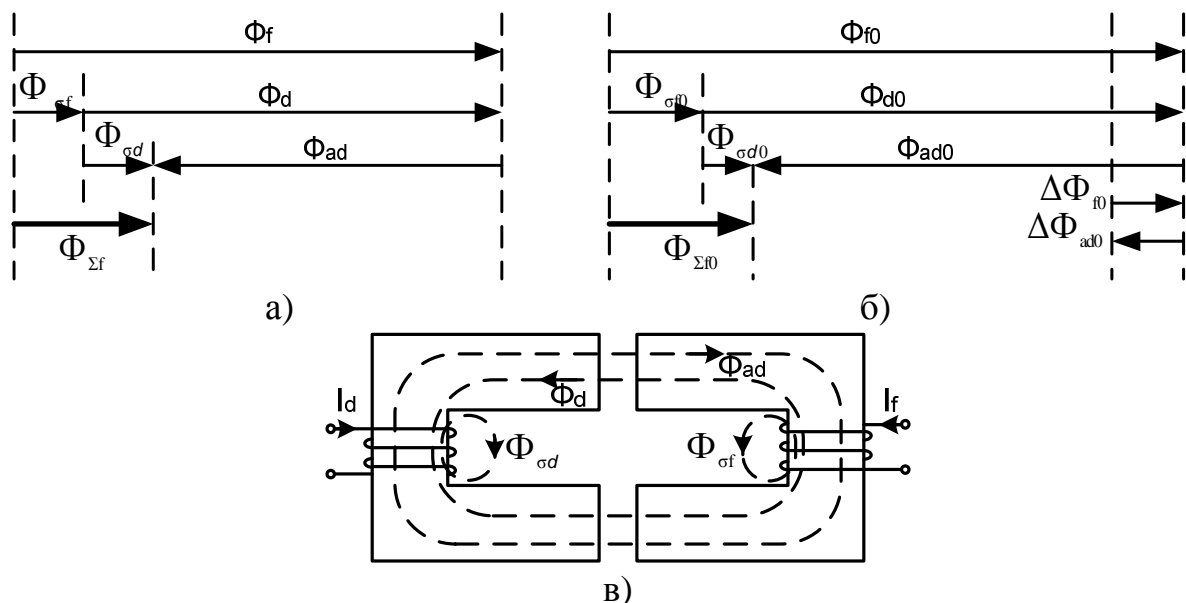


Рис.32 Магнітні потоки синхронного генератора та їхні баланси

Потік Φ_f - це потік, що створений обмоткою збудження. Він складається з корисного потоку Φ_d , який замикається через обмотку статора та потоку розсіювання $\Phi_{\sigma f}$. Корисний потік Φ_d , в свою чергу, також складається з двох потоків: потоку розсіювання статора $\Phi_{\sigma d}$ та потоку реакції статора Φ_{ad} .

Різниця потоку обмотки збудження та потоку реакції статора складає результуючий магнітний потік $\Phi_{\Sigma f}$, який, згідно з законом Ленца про незмінність результуючого потокозчеплення в момент початку перехідного процесу, залишається незмінним, тобто $\Phi_{\Sigma f} = \Phi_{\Sigma f 0}$. Всі інші потоки в момент часу $t = 0$ (момент КЗ) збільшуються внаслідок збільшення струмів при КЗ.

Синхронна ЕРС генератора E_q створюється потоком Φ_d , оскільки $\Phi_d \neq \Phi_{d0}$, для розрахунку струму КЗ в початковий момент часу використання синхронної ЕРС E_q неможливе. Як наслідок, для визначення струму КЗ в початковий момент КЗ необхідно застосувати результуючий магнітний потік $\Phi_{\Sigma f}$, який є відомим з доаварійного режиму.

Відомо, що синхронна ЕРС зв'язана з потоком, що її створив, наступним виразом:

$$E_q = \omega \cdot W \cdot \Phi_d = \omega \cdot W \cdot \Phi_f \cdot (1 - \sigma_f), \quad (69)$$

де W - число витків обмотки статора, ω - кутова частота обертання ротора, σ_f - коефіцієнт розсіювання магнітного потоку.

За аналогією можна записати вираз для перехідної ЕРС генератора в момент часу $t = 0$:

$$E'_q = \omega \cdot W \cdot \Phi_{\Sigma f} \cdot (1 - \sigma_f). \quad (70)$$

Ця величина в початковий момент КЗ залишається незмінною. Для того щоб використати її для розрахунку струму КЗ необхідно перейти від її виразу в магнітних параметрах (70) до її виразу в електричних:

$$\begin{aligned} E'_q &= \omega \cdot W \cdot \Phi_{\Sigma f} \cdot (1 - \sigma_f) = \omega \cdot W \cdot (\Phi_f - \Phi_{ad}) \cdot (1 - \sigma_f) = \\ &= \left(1 - \frac{X_{\sigma f}}{X_{\sigma f} + X_{ad}}\right) \cdot [(X_{\sigma f} + X_{ad}) \cdot I_f - X_{ad} \cdot I_d] = \\ &= \frac{X_{ad}}{X_f} \cdot [X_f \cdot I_f - X_{ad} \cdot I_d] = X_{ad} \cdot I_f - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \cdot I_d = \\ &= E_q - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \cdot I_d = U_q + X_d \cdot I_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \cdot I_d = U_q + \left(X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}\right) \cdot I_d = \\ &= U_q + X'_d \cdot I_d. \end{aligned} \quad (71)$$

Величина X'_d називається перехідним опором генератора. Визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} X'_d &= X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} = X_{\sigma} + X_{ad} - \frac{X_{ad}^2}{X_{\sigma f} + X_{ad}} = \\ &= X_{\sigma} + \frac{X_{ad}^2 + X_{ad} \cdot X_{\sigma f} - X_{ad}^2}{X_{\sigma f} + X_{ad}} = X_{\sigma} + \frac{X_{ad} \cdot X_{\sigma f}}{X_{\sigma f} + X_{ad}}, \end{aligned} \quad (72)$$

де X_{σ} - індуктивний опір розсіювання обмотки статора, $X_{\sigma f}$ - індуктивний опір розсіювання обмотки збудження, X_{ad} - індуктивний опір реакції обмотки статора. Заступна схема генератора в початковий момент КЗ представлена на рис.33.

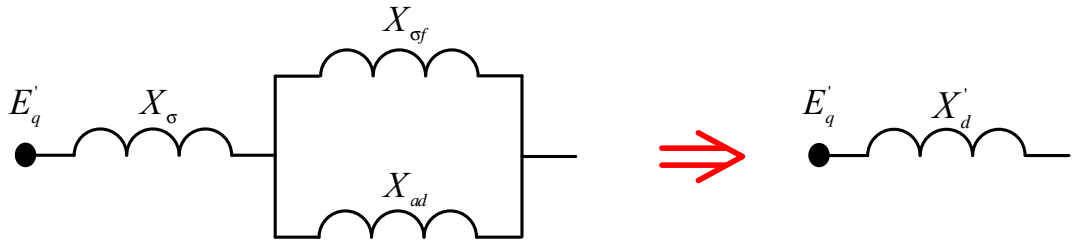


Рис.33 Заступна схема генератора в початковий момент КЗ

Величина X'_d є паспортною величиною синхронного генератора, величина E'_q визначається з доаварійного режиму за виразом:

$$E'_q = U_q + I_d \cdot X'_d = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot \sin \varphi + I \cdot X'_d)^2}. \quad (73)$$

Періодична складова струму КЗ в початковий момент часу визначається наступним чином:

$$I_{n,0} = \frac{E'_q}{X'_d + X_{зОВН}}. \quad (74)$$

Оскільки перехідна ЕРС, так само як і синхронна ЕРС, створюється потокозчепленнями обмотки збудження та обмотки статора, то її напрямок збігається з напрямком синхронної ЕРС та поперечної вісі q. Обмотка збудження не створює ЕРС за повздовжньою віссю d, тобто $E'_d = 0$. Як наслідок, $X_{\sigma f}$ - індуктивний опір розсіювання обмотки збудження по повздовжній обмотці дорівнює нескінченності. Таким чином, перехідний опір синхронного генератора за повздовжньою віссю складається опору розсіювання та опору реакції обмотки статора: $X'_q = X_{\sigma} + X_{aq}$.

Надперехідні ЕРС та опори синхронного генератора з демпферними обмотками. Якщо у синхронного генератора на роторі окрім обмотки збудження є ще демпферна обмотка, то при виникненні КЗ в колі статора зростає струм в обмотці статора та потік реакції статора. Це спричиняє зворотну реакцію як з боку обмотки збудження так і з боку демпферної обмотки, причому результуючий магнітний потік, як і у випадку синхронної машини без демпферної обмотки, має залишитись незмінним. Незмінною в початковий момент КЗ також залишається надперехідна ЕРС E'' синхронного генератора, яка має дві складові за повздовжньою (E''_d) та за поперечною вісями (E''_q), оскільки демпферна обмотка має реакцію як за обома вісями:

$$E''_q = \omega \cdot W \cdot (\Phi_f - \Phi_{ad} - \Phi_D); \quad (75)$$

$$E''_d = \omega \cdot W \cdot (-\Phi_{aq} - \Phi_Q). \quad (76)$$

Заступна схема генератора за віссю d має вигляд, представлений на рис.34.

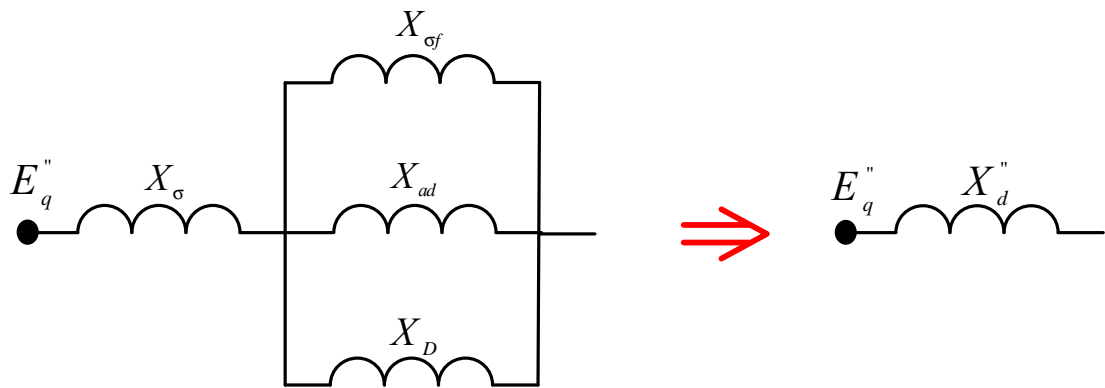


Рис.34 Заступна схема генератора за віссю d в початковий момент КЗ

Надперехідний опір генератора по вісі d дорівнює:

$$X_d'' = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma'}} + \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_D}}. \quad (77)$$

Величина X_d'' є паспортною величиною синхронного генератора, величина E_q'' визначається з доаварійного режиму за виразом:

$$E_q'' = U_q + I_d \cdot X_d. \quad (78)$$

Періодична складова струму КЗ по вісі d в початковий момент часу визначається наступним чином:

$$I_{n,0}^d = \frac{E_q''}{X_d'' + X_{ЗОВН}}. \quad (79)$$

Заступна схема генератора за віссю q має вигляд, представлений на рис.35.

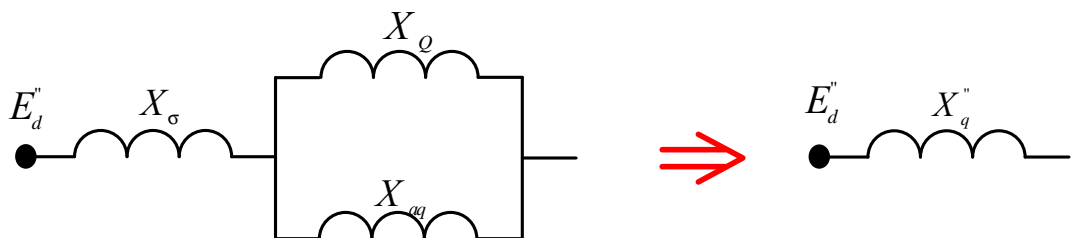


Рис.35 Заступна схема генератора за віссю q в початковий момент КЗ

Надперехідний опір генератора по вісі q дорівнює:

$$X_q'' = X_\sigma + \frac{X_{aq} \cdot X_Q}{X_{aq} + X_Q}. \quad (80)$$

Величина X_q'' є паспортною величиною синхронного генератора, величина E_d'' визначається з доаварійного режиму за виразом:

$$E_d'' = U_d - I_q \cdot X_q. \quad (81)$$

Періодична складова струму КЗ по вісі q в початковий момент часу визначається наступним чином:

$$I_{n,0}^q = \frac{E_d''}{X_q'' + X_{зОВН}}. \quad (82)$$

Повне значення надперехідної ЕРС генератора визначається як:

$$E'' = \sqrt{(E_d'')^2 + (E_q'')^2}, \quad (83)$$

або за виразом (4).

Повне значення періодичної складової струму КЗ в початковий момент часу для генератора з демпферними обмотками визначається як:

$$I_{n,0} = \sqrt{(I_{n,0}^d)^2 + (I_{n,0}^q)^2}. \quad (84)$$

1.3.5 Порівняння індуктивних опорів синхронного генератора

З отриманих вище результатів видно, що між індуктивними опорами синхронного генератора існують співвідношення, що справедливі для будь-якого генератора. Так, співвідношення між індуктивними опорами по повздовжній осі d наступне:

$$X_d > X_d' > X_d''. \quad (85)$$

Співвідношення між індуктивними опорами по поперечній осі q таке:

$$X_q > X_q''. \quad (86)$$

Такі співвідношення між індуктивностями синхронного генератора пояснюються наступним чином. В усталеному режимі магнітний потік, що створений струмом статора, частково замикається по шляхам розсіювання, а основна його частина, проходячи крізь магнітний зазор, вільно замикається по ротору. Таким чином, цей потік йде по шляхам з малим магнітним опором. Індуктивність обмотки статора в цьому випадку велика і характеризується опорами X_d та X_q . Причому, якщо синхронний генератор неявнополюсний (турбогенератор) то $X_d = X_q$, а якщо явнополюсний (гідрогенератор) то $X_d > X_q$. Це пояснюється тим, що неявнополюсний генератор є симетричним у магнітному відношенні по вісям d та q. Явнополюсний генератор має максимальний повітряний зазор між ротором та статором по вісі q і мінімальний – по вісі d. Індуктивність статора також буде максимальною по вісі d та мінімальною по вісі q.

При КЗ в генераторі без демпферних обмоток зростає струм в обмотці статора, що призведе до зростання потоку реакції статора, що в свою чергу спричинить реакцію у відповідь обмотки збудження. В ній з'явиться струм, що створить магнітний потік, який буде напрямлений назустріч потоку реакції статора і частково витискає цей потік з ротора. В цьому випадку магнітний опір потоку зростає, а індуктивність зменшується і вона характеризується величиною X_d' .

При КЗ в генераторі з демпферними обмотками при зростанні потоку реакції обмотки статора у зворотній реакції приймають участь дві обмотки: обмотка збудження та демпферна обмотка. Внаслідок цього ще більша частина магнітного потоку статора витискається з ротора і магнітний опір потоку

зростає. Відповідно, індуктивності обмотки статора в цьому випадку стають ще меншими і характеризуються опорами X_d'' та X_q'' . Причому, якщо синхронний генератор неявнополюсний (турбогенератор) то $X_d'' = X_q''$, а якщо явнополюсний (гідрогенератор) то $X_d'' > X_q''$.

1.3.6 Розрахунок СКЗ за методом розрахункових кривих

Вище були розглянуті такі методи розрахунку струму КЗ як метод еквівалентного перетворення та метод накладання. Ці методи є точними методами розрахунку струмів КЗ. В багатьох випадках задовільні результати дають наближені методи розрахунку струмів КЗ, одним з таких методів є метод розрахункових кривих.

Метод розрахункових кривих ґрунтується на використанні спеціальних кривих, які дають для будь-якого моменту процесу КЗ за будь-якого значення індуктивного розрахункового опору відносно значення періодичної складової струму в місці КЗ. Ці криві представляють собою сімейство залежностей $I_{п,0} = f(X_{РОЗР})|_{t=const}$ (рис.36).

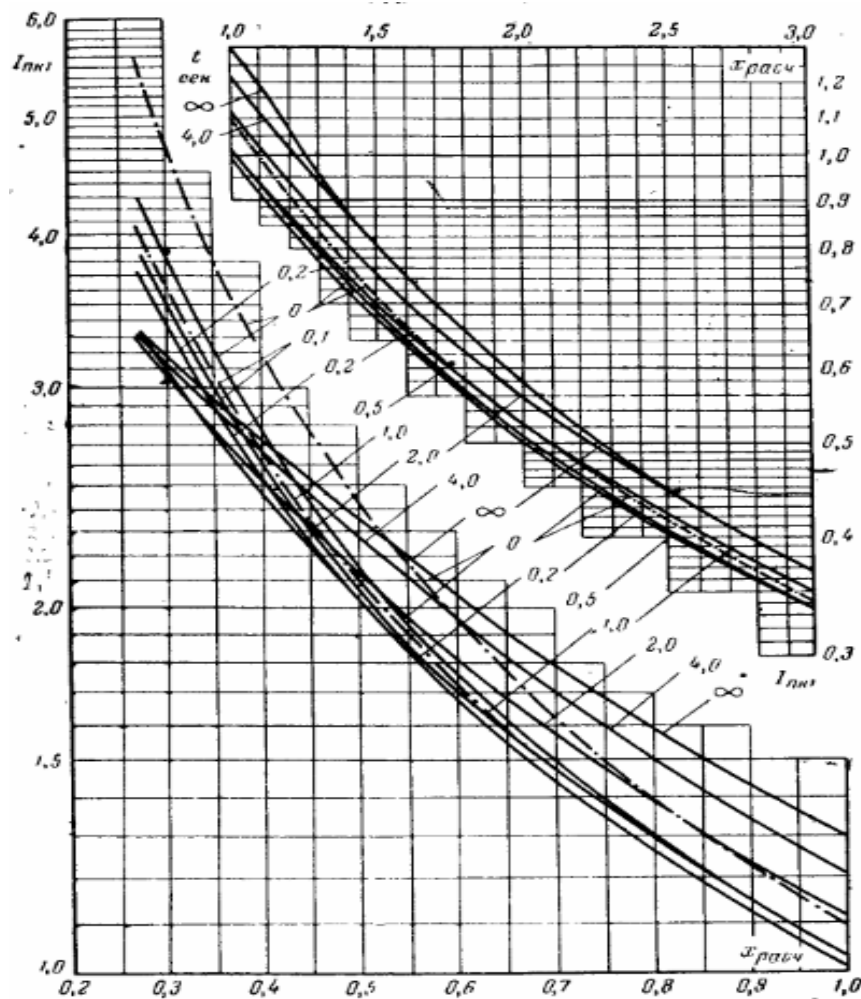


Рис.36 Розрахункові криві для гідрогенераторів (неперервні криві – для генераторів з АРЗ, пунктирні – для генераторів без АРЗ)

Розрахунковий опір визначається як:

$$X_{PO3P} = X_d'' + X_{30BH} \cdot \quad (87)$$

Існують наступні типи розрахункових кривих:

- для турбогенераторів без АРЗ;
- для турбогенераторів з АРЗ;
- для гідрогенераторів без АРЗ;
- для гідрогенераторів з АРЗ.

Перевагою методу розрахункових кривих є те, що немає необхідності визначати ЕРС джерел живлення (турбо- та гідрогенераторів). Достатньо лише визначити індуктивності заступної схеми мережі та провести еквівалентні перетворення. При цьому слід пам'ятати, що не можна об'єднувати в один промінь турбо- та гідрогенератори, а також генератори з АРЗ та без АРЗ оскільки для цих генераторів розрахункові криві різні.

Таким чином, в результаті еквівалентного перетворення схеми для розрахунку в ній струмів КЗ за методом розрахункових кривих буде отримано кілько-променева заступна схема, кількість променів якої (від двох до п'яти) залежить від кількості типів генераторів у схемі та наявності у них АРЗ. Після цього для кожного променя за відповідними розрахунковими кривими визначається струм КЗ (в необхідний момент часу) і виконується зворотне «розгортання» схеми від еквівалентних променів до вихідної.

За наявності у схемі еквівалентної енергосистеми, вона виокремлюється в окремий промінь. Для еквівалентної енергосистеми розрахункові криві не будуються і визначення струму КЗ в промені еквівалентної енергосистеми визначається (для будь-якого моменту часу) за виразом:

$$I_{п,0} = \frac{1,1}{X_{PO3P}} \cdot \quad (88)$$

Всі розрахункові криві побудовані для значень $X_{PO3P} \leq 3$. При $X_{PO3P} > 3$ струми вважаються незагасаючими і в будь-який момент часу дорівнюють:

$$I_{п,0} = \frac{1}{X_{PO3P}} \cdot \quad (89)$$

1.4 Електромагнітні перехідні процеси при порушенні симетрії трифазної системи

1.4.1 Основні положення методу симетричних складових

Вище були розглянуті режими трифазної системи із збереженням симетрії, тобто ЕРС, напруги, струми та опори всіх трьох фаз рівні між собою за абсолютним значенням та зсунуті один відносно одного під кутом 120° . При цьому всі розрахунки можна вести за однією фазою, що й було зроблено. В реальній ЕЕС переважна більшість аварійних режимів супроводжується порушенням симетрії трифазної системи, що виражається в нерівності абсолютних значень електричних параметрів по фазам та/або відмінністю

кутів між фазами від 120° . В такий мережі розрахунок струмів КЗ за однією фазою проводити не можна і він суттєво ускладнюється.

Відомо, що будь-яку несиметричну систему трьох векторів можна однозначно розкласти на три симетричні системи (рис.37): прямої послідовності, зворотної послідовності та нульової послідовності.

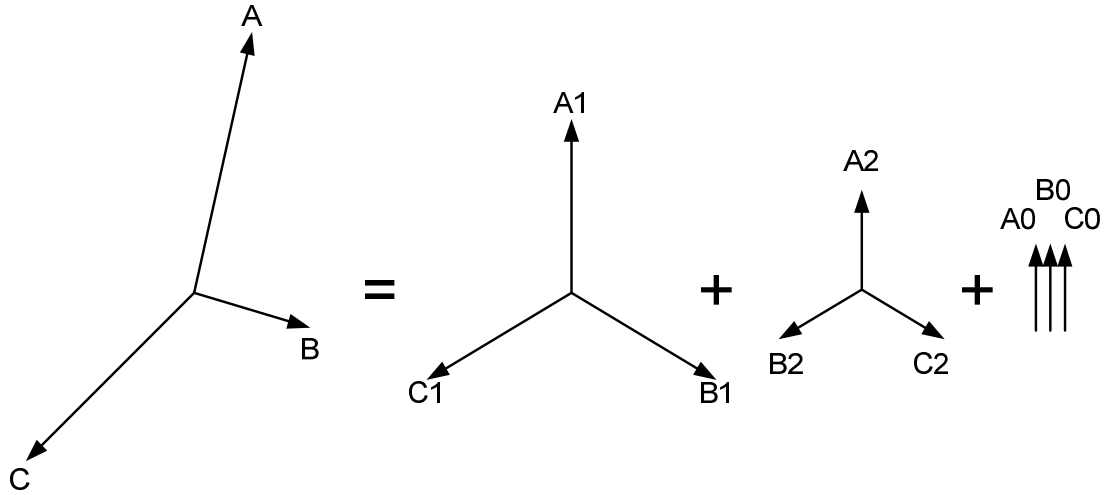


Рис.37 Розкладання несиметричної системи на три симетричні

Система прямої послідовності складається з трьох однакових векторів розташованих під кутом 120° один від одного, порядок чергування фаз такий самий, як і у вихідній системі. Система зворотної послідовності складається з трьох однакових векторів розташованих під кутом 120° один від одного, порядок чергування фаз зворотній по відношенню до вихідної системи. Система нульової послідовності складається з трьох однакових векторів, які співпадають за напрямком. Несиметрична система виражається через симетричні складові наступним чином:

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0; \\ \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0.\end{aligned}\tag{90}$$

Будь-який із векторів трифазної симетричної системи можна представити через інший вектор використовуючи оператор повороту $a = e^{j120}$. При цьому справедливим є таке співвідношення:

$$1 + a + a^2 = 1 + e^{j120} + e^{j240} = 1 + (-0,5 + j0,866) + (-0,5 - j0,866) = 0.\tag{91}$$

Оператор повороту можна використати для того, щоб визначити симетричні складові несиметричного режиму. Для цього треба переписати систему рівнянь (90) з урахуванням оператора повороту:

$$\begin{aligned}\dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{B} &= a^2 \dot{A}_1 + a \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \\ \dot{C} &= a \dot{A}_1 + a^2 \dot{A}_2 + \dot{A}_0.\end{aligned}\tag{92}$$

Якщо скласти всі три рівняння системи (92), то, з урахуванням співвідношення (91), можна отримати вираз для складової нульової послідовності фази А:

$$\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} = 3\dot{A}_0 \rightarrow \dot{A}_0 = \frac{\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}}{3}. \quad (93)$$

Якщо в системі (92) домножити друге рівняння на a , а третє рівняння на a^2 , то можна отримати вираз для складової прямої послідовності фази А:

$$\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C} = 3\dot{A}_1 \rightarrow \dot{A}_1 = \frac{\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}}{3}. \quad (94)$$

Якщо в системі (92) домножити друге рівняння на a^2 , а третє рівняння на a , то можна отримати вираз для складової зворотної послідовності фази А:

$$\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C} = 3\dot{A}_2 \rightarrow \dot{A}_2 = \frac{\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}}{3}. \quad (95)$$

З виразів (93)-(95) можна отримати вирази для складових послідовностей фаз В та С використовуючи оператор повороту:

$$\dot{B}_0 = \dot{C}_0 = \dot{A}_0 = \frac{\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}}{3}; \quad (96)$$

$$\dot{B}_1 = a^2\dot{A}_1 = \frac{a^2\dot{A} + \dot{B} + a\dot{C}}{3}; \quad (97)$$

$$\dot{C}_1 = a\dot{A}_1 = \frac{a\dot{A} + a^2\dot{B} + \dot{C}}{3}; \quad (98)$$

$$\dot{B}_2 = a\dot{A}_2 = \frac{a\dot{A} + \dot{B} + a^2\dot{C}}{3}; \quad (99)$$

$$\dot{C}_2 = a^2\dot{A}_2 = \frac{a^2\dot{A} + a\dot{B} + \dot{C}}{3}. \quad (100)$$

1.4.2 Розкладання несиметричного режиму на три симетричних режими

На рис.38 представлена схема мережі, в якій в точці К виник несиметричний режим.

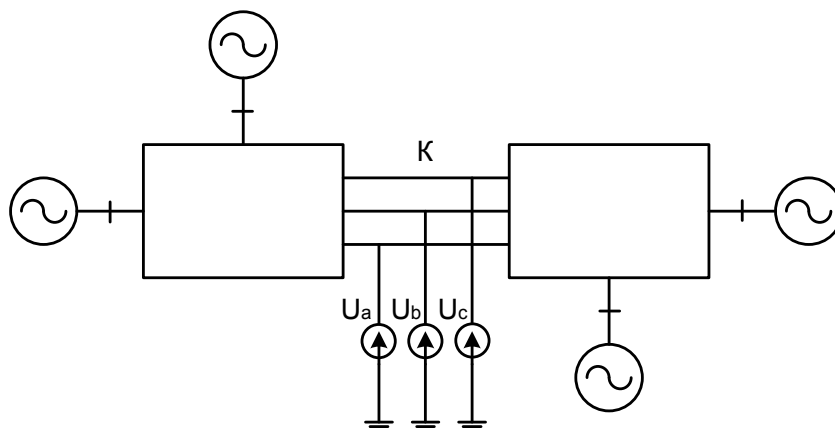


Рис.38 Мережа з несиметричним режимом в точці К

Оскільки режим несиметричний, то трифазна система еквівалентних напруг в точці К також буде несиметричною. Використовуючи метод симетричних складових замість реальних напруг U_A , U_B , U_C в точці К можна підключити їхні симетричні складові (рис.39).

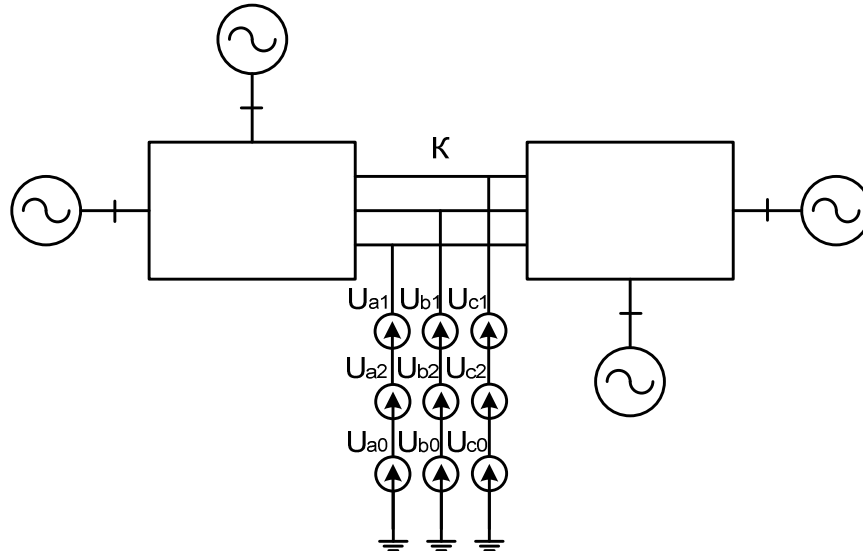


Рис.39 Мережа з несиметричним режимом в точці К, представленим у вигляді симетричних складових

Використовуючи метод накладання, несиметричний режим можна розкласти на три симетричних. Перший режим характеризується напругами, струмами та опорамі прямої послідовності в цьому режимі також діють ЕРС генераторів. Цей режим симетричний, тому його можна розглядати за однією фазою. Рівняння рівноваги напруг при цьому приймає такий вид:

$$E_A = U_{A1} + I_{A1} \cdot Z_{1e}. \quad (101)$$

Другий режим характеризується напругами, струмами та опорамі зворотної послідовності, ЕРС генераторів дорівнюють нулю. Режим також симетричний. Рівняння рівноваги напруг при цьому приймає такий вид:

$$0 = U_{A2} + I_{A2} \cdot Z_{2e}. \quad (102)$$

Третій режим характеризується напругами, струмами та опорамі нульової послідовності, ЕРС генераторів дорівнюють нулю. Режим також симетричний. Рівняння рівноваги напруг при цьому приймає такий вид:

$$0 = U_{A0} + I_{A0} \cdot Z_{0e}. \quad (103)$$

До отриманих рівнянь додаються рівняння розкладання напруг та струмів на складові:

$$U_A = U_{A1} + U_{A2} + U_{A0}; \quad (104)$$

$$U_B = a^2 U_{A1} + a U_{A2} + U_{A0}; \quad (105)$$

$$U_C = a U_{A1} + a^2 U_{A2} + U_{A0}; \quad (106)$$

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}; \quad (107)$$

$$I_B = a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0}; \quad (108)$$

$$I_C = aI_{A1} + a^2I_{A2} + I_{A0}. \quad (109)$$

В результаті отримана система з 9 рівнянь (101)-(109), яка містить 12 невідомих (напруги та струми по фазах і їхні симетричні складові). Відсутні три рівняння в подальшому будуть отримані при аналізі конкретних видів несиметрії.

1.4.3 Заступні схеми прямої та зворотної послідовностей

Заступна схема прямої послідовності при аналізі несиметричних режимів складається аналогічно до заступної схеми симетричного режиму. В заступну схеми елементи вносяться параметрами звичайного режиму (рис.40).

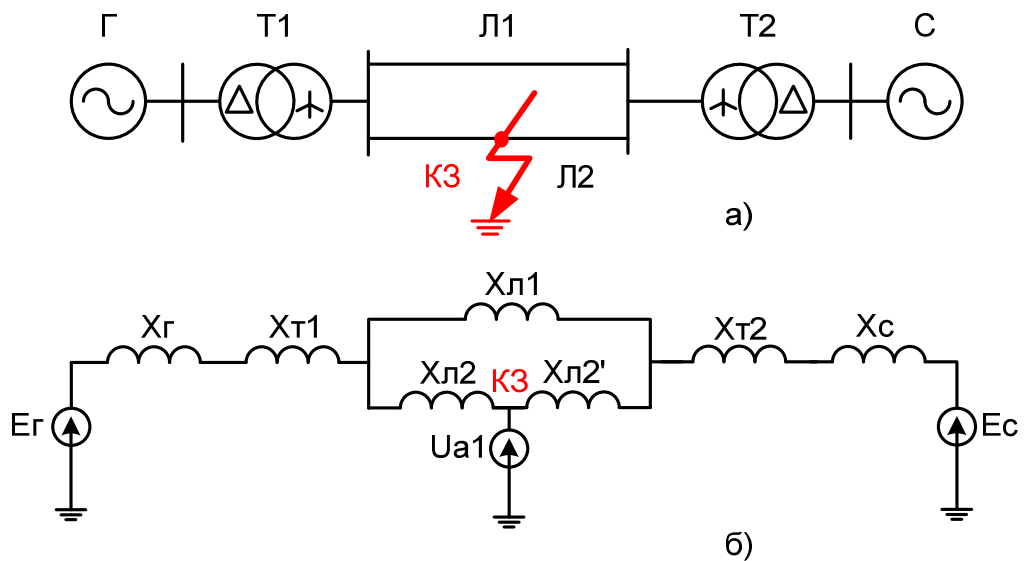


Рис.40 Електрична схема мережі (а) та її заступна схема прямої послідовності (б)

Заступну схему прямої послідовності (рис.40,б) можна спростити та привести до наступного вигляду (рис.41). Початком схеми є ЕРС генераторів, кінцем схеми – точка у якій виникла несиметрія.

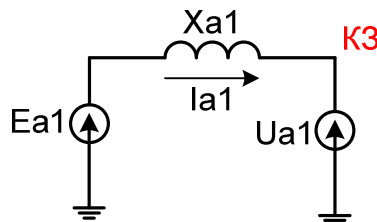


Рис.41 Еквівалентна заступна схема прямої послідовності

Система зворотної послідовності відрізняється від прямої тільки чергуванням фаз, тому струми зворотної послідовності будуть протікати по тим самим елементам, що й струми прямої послідовності. Таким чином, *заступна схема зворотної послідовності* складається з тих самих елементів, що й пряма послідовність, крім того що ЕРС генераторів будуть дорівнювати нулю, а в точці КЗ підключається U_{a2} (рис.42).

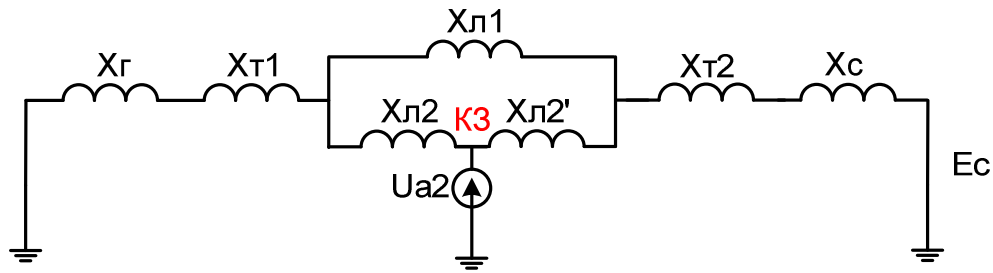


Рис.42 Заступна схема зворотної послідовності

Заступну схему зворотної послідовності (рис.42) можна спростити та привести до наступного вигляду (рис.43). Початком схеми є точки з нульовими потенціалами, кінцем схеми – точка у якій виникла несиметрія.

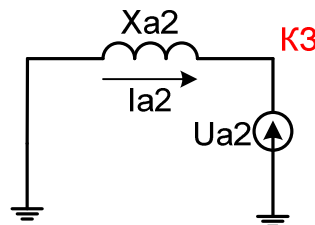


Рис.43 Еквівалентна заступна схема зворотної послідовності

Для всіх елементів мережі, магнітозв'язні кола яких нерухомі один відносно одного, індуктивні опори прямої та зворотної послідовностей однакові, оскільки від зміни чергування фаз взаємоіндукція між фазами не змінюється. Такими елементами є трансформатори, автотрансформатори, лінії, реактори, кабелі. Для них $X_2 = X_1$.

В синхронному генераторі магнітний потік, створений струмами зворотної послідовності, обертається відносно ротора з подвійною синхронною швидкістю і зустрічає на своєму шляху магнітний опір який неперервно змінюється. Тому, до заступної схеми зворотної послідовності синхронний генератор вноситься середнім значенням опору, яке визначається для генераторів без демпферної обмотки як:

$$X_2 = \sqrt{X'_d \cdot X'_q}, \quad (110)$$

а для генераторів з демпферними обмотками як:

$$X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}. \quad (111)$$

1.4.4 Індуктивні опори елементів для струмів нульової послідовності

Система нульової послідовності суттєво відрізняється від прямої та зворотної послідовностей. Оскільки всі три її вектори напрямлені в один бік, опори елементів ЕЕС струмам нульової послідовності суттєво відрізняються від опорів прямої та зворотної послідовностей і залежать не тільки від типу елемента, а ще від ряду факторів таких як режим роботи нейтралі, тощо.

Генератор. Нейтраль генератора заземлена. Струми нульової послідовності створюють три однакових за величиною та напрямком магнітні потоки, але оскільки обмотки статора зсунуті одна по відношенню до одної на кут 120° , то результуючий потік реакції статора $\Phi_{ад}$ дорівнює нулю, як наслідок опір нульової послідовності генератора визначається потоком розсіювання Φ_σ і складає:

$$X_0 = X_\sigma \approx 0,25 X_d'' \quad (112)$$

Нейтраль генератора ізольована. В цьому випадку немає шляху для протікання струмів нульової послідовності і генератор в заступну схему не вноситься. Опір генератора при цьому приймається рівним нескінченості:

$$X_0 = \infty \quad (113)$$

Лінія електропередачі. Опір нульової послідовності ЛЕП залежить від двох факторів: кількості паралельних ЛЕП на одній опорі та наявності блискавкозахисного тросу. Залежність опору від цих факторів пояснюється наявністю потоку взаємоіндукції між проводами ЛЕП який збільшує реактивність ЛЕП. Блискавкозахисний трос навпаки послаблює цей потік взаємоіндукції. Значення опорів нульової послідовності ЛЕП за різних умов представлені в табл.3 як функція від опору прямої послідовності.

Таблиця 3. Опори нульової послідовності ЛЕП

X_0	Одноланцюгова ЛЕП	Дволанцюгова ЛЕП	Кабельна ЛЕП
З тросом	$X_0 = 2 \cdot X_1$	$X_0 = 3 \cdot X_1$	$X_0 = 4 \cdot X_1$
Без тросу	$X_0 = 3,5 \cdot X_1$	$X_0 = 5,5 \cdot X_1$	

Реактор. В реакторах (як одиночних так і здвоєних) немає взаємної індуктивності між фазами, тому їхній опір нульової послідовності дорівнює опору прямої послідовності:

$$X_0 = X_1 \quad (114)$$

Навантаження. Переважну більшість навантаження складають асинхронні двигуни, які працюють з ізольованою нейтраллю. При цьому немає шляху для протікання струмів нульової послідовності і опір навантаження при цьому приймається рівним нескінченості:

$$X_0 = \infty \quad (115)$$

Трансформатор. Трансформатор є найбільш складним елементом з точки зору внесення його в схему нульової послідовності. Опір нульової послідовності трансформатора залежить від схеми з'єднання обмоток, конструкції та режиму роботи нейтралі. Для правильного внесення того чи іншого трансформатора до заступної схеми нульової послідовності слід дотримуватись таких правил:

- 1) якщо обидві обмотки трансформатора обтікаються струмами нульової послідовності то $X_0 = X_1$;

- 2) якщо тільки одна обмотка трансформатора обтікається струмом нульової послідовності, то $X_0 = X_\sigma + X_\mu \approx X_\mu$;
- 3) якщо трансформатор трифазний, то струми нульової послідовності створюють в кожному стрижні однакові за величиною і напрямком потоки, які вимушені замикатись по маслу, баку, повітрю та іншим немагнітним матеріалам. При цьому $X_\mu = (10 \div 20)X_1$;
- 4) якщо трансформатор представляє собою групу з трьох однофазних трансформаторів, то кожний потік замикається по своєму магнітопроводу і $X_\mu = \infty$.

З урахуванням цих правил опори нульової послідовності різних трансформаторів складають:

1) двохобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – трикутник» (рис.44) – вноситься до заступної схеми опором прямої послідовності, оскільки у первинній обмотці струми нульової послідовності протікають в нейтралі, а у вторинній обмотці – замикаються у «трикутнику»;

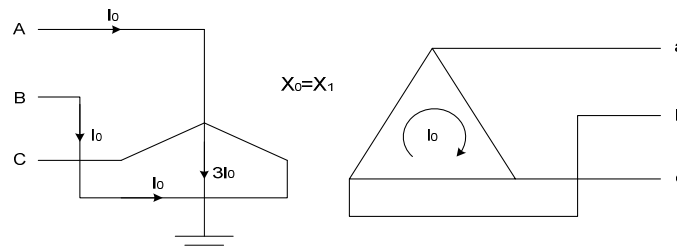


Рис.44 Трансформатор «зірка з нулем – трикутник»

2) двохобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – зірка з нулем» (рис.45).

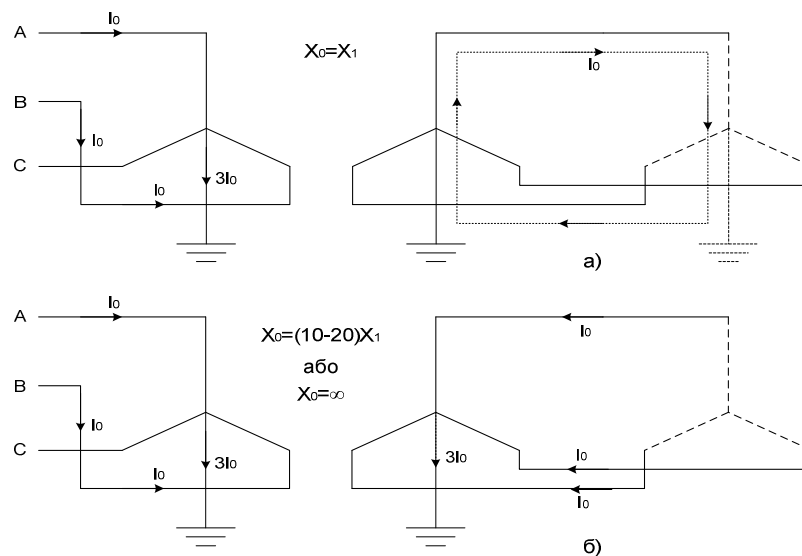


Рис.45 Трансформатор «зірка з нулем – зірка з нулем»

Його опір нульової послідовності залежить від того, який режим роботи в електрично зв'язаній частині мережі за його вторинною обмоткою. У випадку коли на цій ділянці є друга заземлена нейтраль (рис.45,а), опір

нульової послідовності дорівнює опору прямої послідовності. Якщо на цій ділянці немає другої заземленої нейтралі (рис.45,б) то опір трансформатора струмам нульової послідовності дорівнює або нескінченності або $(10 \div 20)X_1$ в залежності від конструктивного виконання трансформатора (див. правила 3, 4).

3) двохобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – зірка» (рис.46).

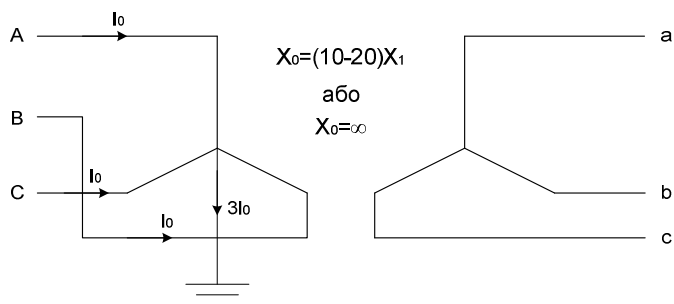


Рис.46 Трансформатор «зірка з нулем – зірка»

Опір нульової послідовності такого трансформатора залежить від конструктивного виконання трансформатора (див. правила 3, 4).

4) двохобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «трикутник – зірка з нулем» (рис.47).

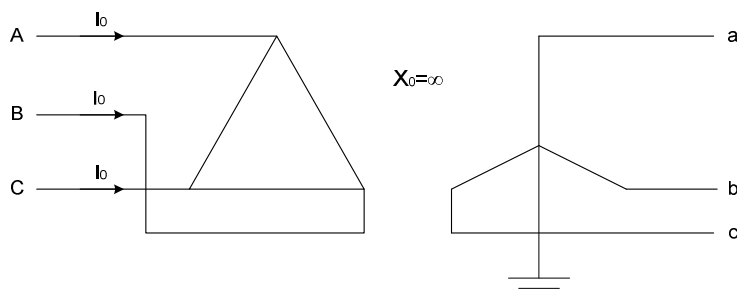


Рис.47 Трансформатор «трикутник – зірка з нулем»

Оскільки трикутник немає землі, то немає й шляху для протікання струмів нульової послідовності, тому опір нульової послідовності такого трансформатора дорівнює нескінченності.

5) двохобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка – зірка з нулем» (рис.48).

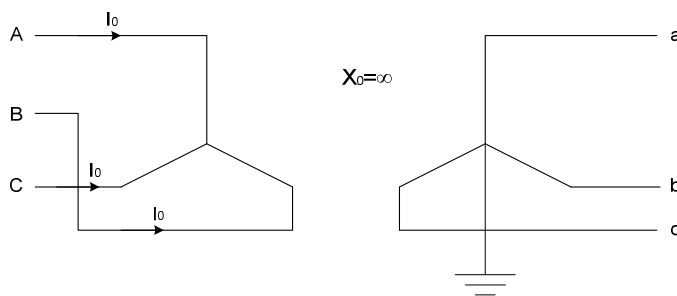


Рис.48 Трансформатор «зірка – зірка з нулем»

Оскільки зірка первинної сторони немає землі, то нема й шляху для протікання струмів нульової послідовності, тому опір нульової послідовності такого трансформатора дорівнює нескінченності.

б) триобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – зірка – трикутник» (рис.49).

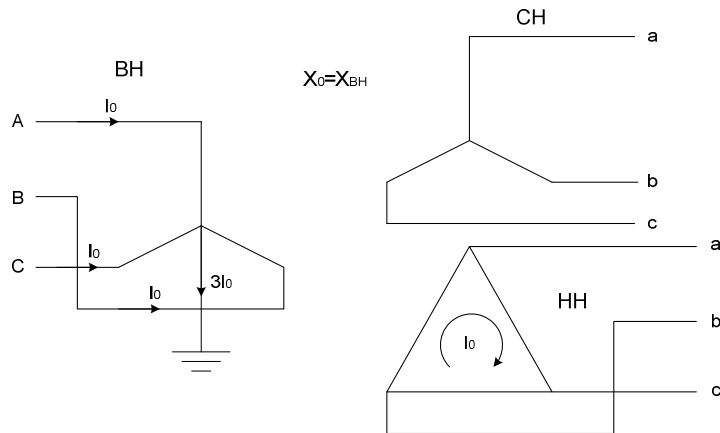


Рис.49 Трансформатор «зірка з нулем – зірка – трикутник»

Оскільки обмотка середньої напруги немає землі, то струми нульової послідовності замкнуться в трикутнику обмотки низької напруги. В цьому випадку триобмотковий трансформатор вироджується у двообмотковий з опором нульової послідовності що дорівнює опором прямої послідовності обмотки високої напруги.

7) триобмотковий трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – зірка з нулем – трикутник» (рис.50).

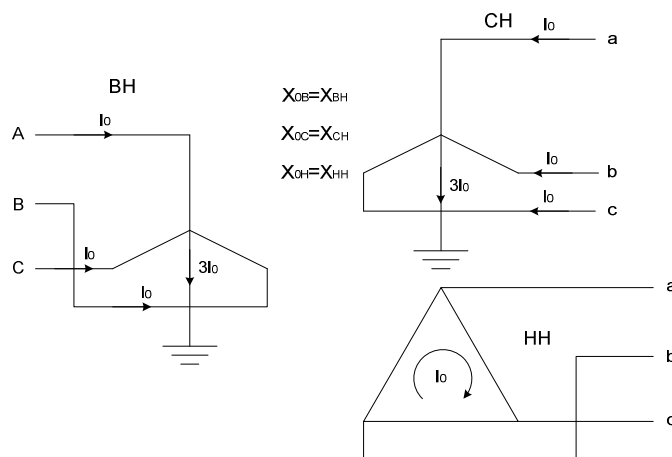


Рис.50 Трансформатор «зірка з нулем – зірка з нулем – трикутник»

Оскільки всі обмотки такого трансформатора обтікаються струмами нульової послідовності, то всі обмотки вносяться до заступної схеми нульової послідовності у вигляді трипроменевої зірки, опори якої дорівнюють опорам прямої послідовності (див. рис.10).

Автотрансформатор. Заступні схеми нульової послідовності автотрансформаторів повністю аналогічні заступним схемам нульової послідовності відповідних трансформаторів.

1.4.5 Заступна схема нульової послідовності

Складання заступної схеми нульової послідовності слід розпочинати від точки де виникла несиметрія. Вважається, що в цій точці прикладена напруга U_0 . Заступна схема нульової послідовності мережі з рис.40,а представлена на рис.51.

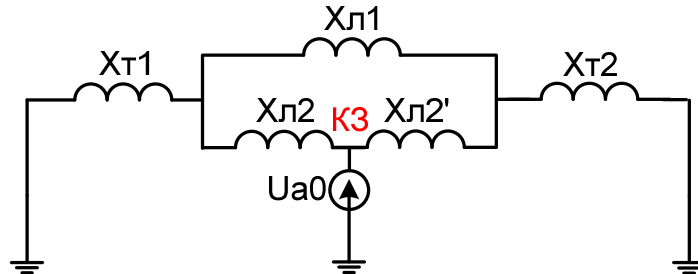


Рис.51 Заступна схема нульової послідовності

Заступну схему нульової послідовності (рис.51) можна спростити та привести до наступного вигляду (рис.52). Початком схеми є точка у якій виникла несиметрія, а кінцями схеми – точки з нульовими потенціалами.

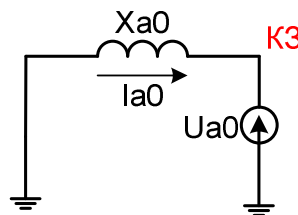


Рис.52 Еквівалентна заступна схема нульової послідовності

1.5 Однократна поперечна несиметрія

1.5.1 Розрахунок струмів трифазного КЗ

Будь-який режим мережі можна описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned}
 E_A &= U_{A1} + I_{A1} \cdot Z_{1e}; \\
 0 &= U_{A2} + I_{A2} \cdot Z_{2e}; \\
 0 &= U_{A0} + I_{A0} \cdot Z_{0e}; \\
 U_A &= U_{A1} + U_{A2} + U_{A0}; \\
 U_B &= a^2 U_{A1} + a U_{A2} + U_{A0}; \\
 U_C &= a U_{A1} + a^2 U_{A2} + U_{A0}; \\
 I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}; \\
 I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0}; \\
 I_C &= a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0}.
 \end{aligned} \tag{116}$$

Ця система містить 12 невідомих у 9 рівняннях. Щоб отримати розв'язок такої системи і визначити струми та напруги аварійного режиму і їхні складові необхідно скласти ще три рівняння, які будуть характеризувати кожний вид пошкодження.

Наслідком методу симетричних складових є правило, що будь-який несиметричний режим можна представити заступною схемою симетричного режиму (тобто прямої послідовності) в якій місце КЗ віддалене від реального на аварійний шунт ΔZ , величина якого визначається видом КЗ, а реальний струм КЗ визначається як добуток отриманого струму КЗ прямої послідовності на множник m , тобто:

$$I_{A1} = \frac{E_A}{Z_{1e} + \Delta Z}; \quad (117)$$

$$I_{n,0} = m \cdot I_{A1}. \quad (118)$$

У випадку трифазного КЗ три фази поєднані з землею в одній точці, тобто їхня напруга дорівнює нулю. З цієї умови складаються недостаючі три рівняння:

$$\begin{aligned} U_A &= 0; \\ U_B &= 0; \\ U_C &= 0. \end{aligned} \quad (119)$$

Система рівнянь (116)+(119) розв'язується наступним чином: складаються рівняння її №№4,5,6:

$$U_A + U_B + U_C = 3U_{A0} = 0 \rightarrow U_{A0} = 0. \quad (120)$$

Потім складаються рівняння №4, рівняння №5 помножене на a і рівняння №6 помножене на a^2 :

$$U_A + aU_B + a^2U_C = 3U_{A1} = 0 \rightarrow U_{A1} = 0. \quad (121)$$

Потім складаються рівняння №4, рівняння №5 помножене на a^2 і рівняння №6 помножене на a :

$$U_A + a^2U_B + aU_C = 3U_{A2} = 0 \rightarrow U_{A2} = 0. \quad (122)$$

Отримані вирази для складових напругі в місці КЗ підставляються в рівняння №№1,2,3, після чого з них визначаються складові струмів КЗ:

$$E_A = 0 + I_{A1} \cdot Z_{1e} \rightarrow I_{n,0} = I_{A1} = \frac{E_A}{Z_{1e}}. \quad (123)$$

Таким чином, для трифазного (симетричного) КЗ аварійний шунт $\Delta Z^{(3)} = 0$, а множник $m^{(3)} = 1$. Комплексна заступна схема при аналізі трифазного КЗ має вигляд, представлений на рис.53.

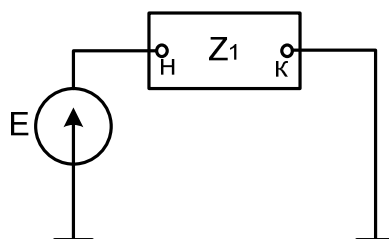


Рис.53 Комплексна заступна схема мережі при трифазному КЗ

1.5.2 Розрахунок струмів двофазного КЗ

У випадку двофазного КЗ дві фази поєднані між собою, третя фаза залишається неушкодженою, а струм в ній приймається рівним нулю. З цих вихідних умов можна скласти такі три рівняння (якщо КЗ між фазами В та С):

$$\begin{aligned} U_B &= U_C; \\ I_A &= 0; \\ I_B + I_C &= 0. \end{aligned} \quad (124)$$

Система рівнянь (116)+(124) розв'язується наступним чином: з рівняння №5, віднімається рівняння №6:

$$U_B - U_C = (a^2 - a)U_{A1} + (a - a^2)U_{A2} = 0 \rightarrow U_{A1} = U_{A2}. \quad (125)$$

Складаються рівняння №7,8,9:

$$I_A + I_B + I_C = 3I_{A0} = 0 \rightarrow I_{A0} = 0. \quad (126)$$

Враховуючи вираз (126), з рівняння №3 видно, що:

$$0 = U_{A0} + 0 \cdot Z_{0e} = U_{A0}. \quad (127)$$

З рівняння №7 можна отримати, що:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = I_{A1} + I_{A2} + 0 = 0 \rightarrow I_{A1} = -I_{A2}. \quad (128)$$

Якщо з рівняння №1 відняти рівняння №2:

$$\begin{aligned} E_A - 0 &= U_{A1} + I_{A1} \cdot Z_{1e} - (U_{A2} + I_{A2} \cdot Z_{2e}) = I_{A1} \cdot Z_{1e} - \\ &- (-I_{A1}) \cdot Z_{2e} = I_{A1} (Z_{1e} + Z_{2e}) \rightarrow I_{A1} = \frac{E_A}{Z_{1e} + Z_{2e}}. \end{aligned} \quad (129)$$

З виразу (129) видно, що аварійний шунт для двофазного КЗ дорівнює еквівалентному опору зворотної послідовності $\Delta Z^{(2)} = Z_{2e}$.

Періодична складова струму двофазного КЗ визначається з рівняння №8:

$$\begin{aligned} I_{n,0} &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} = a^2 I_{A1} + a(-I_{A1}) = I_{A1} (a^2 - a) = \\ &= I_{A1} \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = -j\sqrt{3} I_{A1}. \end{aligned} \quad (130)$$

З виразу (130) видно, що множник $m^{(2)} = \sqrt{3}$. Комплексна заступна схема при аналізі двофазного КЗ має вигляд, представлений на рис.54.

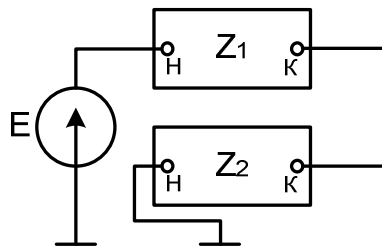


Рис.54 Комплексна заступна схема мережі при двофазному КЗ

1.5.3 Розрахунок струмів однофазного КЗ

У випадку однофазного КЗ одна фаза поєднана з землею, дві інші фази залишаються неушкодженими і струм в них приймається рівним нулю. З цих вихідних умов можна скласти такі три рівняння (якщо КЗ на землю фази А):

$$\begin{aligned} U_A &= 0; \\ I_B &= 0; \\ I_C &= 0. \end{aligned} \quad (131)$$

Система рівнянь (116)+(131) розв'язується наступним чином. З рівняння №8, віднімається рівняння №9:

$$0 = (a^2 - a)I_{a1} + (a - a^2)I_{a2} \rightarrow I_{a1} = I_{a2}. \quad (132)$$

Якщо скласти рівняння №8 та №9, то можна визначити:

$$\begin{aligned} 0 &= (a^2 + a)I_{a1} + (a + a^2)I_{a2} + 2I_{a0} \rightarrow (-1)I_{a1} + (-1)I_{a2} + 2I_{a0} = 0 \rightarrow \\ &\rightarrow I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}. \end{aligned} \quad (133)$$

З рівняння №4 можна отримати:

$$0 = U_{a1} + U_{a2} + U_{a0} \rightarrow U_{a1} = -(U_{a2} + U_{a0}). \quad (134)$$

Якщо скласти рівняння №№1,2,3 та підставити в отримане рівняння вирази (133) та (134), то:

$$\begin{aligned} E_A &= Z_1 I_{a1} + Z_2 I_{a2} + Z_0 I_{a0} + U_{a1} + U_{a2} + U_{a0} = \\ &= Z_1 I_{a1} + Z_2 I_{a1} + Z_0 I_{a0} + 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_0) I_{a1} \rightarrow \\ &\rightarrow I_{a1} = \frac{E_A}{Z_1 + Z_2 + Z_0}. \end{aligned} \quad (135)$$

З виразу (135) видно, що аварійний шунт для однофазного КЗ дорівнює сумі еквівалентних опорів зворотної та нульової послідовностей $\Delta Z^{(1)} = Z_{2e} + Z_{0e}$.

Періодична складова струму однофазного КЗ визначається з рівняння №7:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = I_{A1} + I_{A1} + I_{A1} = 3I_{A1}. \quad (136)$$

З виразу (136) видно, що множник $m^{(1)} = 3$. Комплексна заступна схема при аналізі однофазного КЗ має вигляд, представлений на рис.55.

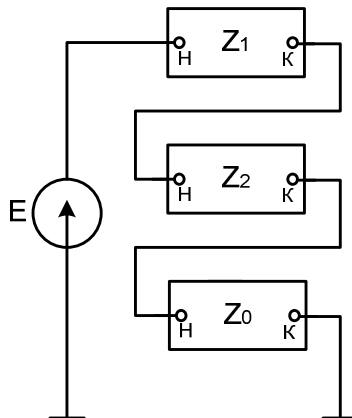


Рис.55 Комплексна заступна схема мережі при однофазному КЗ

1.5.4 Розрахунок струмів двофазного КЗ на землю

У випадку двофазного КЗ на землю дві фази поєднані з землею в одній точці, третя фаза залишається неушкодженою і струм в ній приймається рівним нулю. З цих вихідних умов можна скласти такі три рівняння (якщо КЗ на землю фаз В та С):

$$\begin{aligned} U_B &= 0; \\ U_C &= 0; \\ I_A &= 0. \end{aligned} \quad (137)$$

Система рівнянь (116)+(137) розв'язується наступним чином. З рівняння №5, віднімається рівняння №6:

$$0 = (a^2 - a)U_{a1} + (a - a^2)U_{a2} \rightarrow U_{a1} = U_{a2}. \quad (138)$$

Якщо скласти рівняння №5 та №6 то можна отримати:

$$\begin{aligned} 0 = (a^2 + a)U_{a1} + (a + a^2)U_{a2} + 2U_{a0} \rightarrow (-1)U_{a1} + (-1)U_{a2} + 2U_{a0} = 0 \rightarrow \\ \rightarrow U_{a0} = U_{a1} = U_{a2}. \end{aligned} \quad (139)$$

З рівняння №7 визначається:

$$I_A = 0 = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} \rightarrow I_{A1} = -(I_{A2} + I_{A0}). \quad (140)$$

Якщо виразити складові струму зворотної та нульової послідовності з рівнянь №№2,3 та підставити в (140):

$$\begin{aligned} I_{A1} = -(I_{A2} + I_{A0}) = -\left(-\frac{U_{A2}}{Z_{e2}} - \frac{U_{A0}}{Z_{e0}}\right) = \frac{U_{A2} \cdot Z_{e0} + U_{A0} \cdot Z_{e2}}{Z_{e2} \cdot Z_{e0}} = \\ = \frac{U_{A1} \cdot Z_{e0} + U_{A1} \cdot Z_{e2}}{Z_{e2} \cdot Z_{e0}} = \frac{U_{A1} \cdot (Z_{e0} + Z_{e2})}{Z_{e2} \cdot Z_{e0}} \rightarrow \\ \rightarrow U_{A1} = I_{A1} \frac{Z_{e2} \cdot Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}}. \end{aligned} \quad (141)$$

Підставивши вираз (141) в рівняння №1 можна визначити, що:

$$\begin{aligned} E_A = Z_1 I_{a1} + U_{a1} = I_{a1} Z_1 + I_{a1} \frac{Z_{e2} \cdot Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}} = I_{a1} \left(Z_1 + \frac{Z_{e2} \cdot Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}} \right) \rightarrow \\ \rightarrow I_{a1} = \frac{E_A}{Z_1 + \frac{Z_{e2} \cdot Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}}}. \end{aligned} \quad (142)$$

З виразу (142) видно, що аварійний шунт для двофазного КЗ на землю еквівалентний паралельному з'єднанню еквівалентних опорів зворотної та нульової послідовностей $\Delta Z^{(2,1)} = \frac{Z_{e2} \cdot Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}}$.

Періодична складова струму двофазного КЗ на землю визначається з рівняння №8:

$$\begin{aligned}
 I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0} = a^2 I_{A1} - a I_{A1} \frac{Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}} - I_{A1} \frac{Z_{e2}}{Z_{e2} + Z_{e0}} = \\
 &= I_{A1} \left(a^2 - a \frac{Z_{e0}}{Z_{e2} + Z_{e0}} - \frac{Z_{e2}}{Z_{e2} + Z_{e0}} \right) = \dots = I_{A1} \frac{\sqrt{3}}{Z_{e2} + Z_{e0}} \sqrt{Z_{e2}^2 + Z_{e2} Z_{e0} + Z_{e0}^2}.
 \end{aligned}
 \tag{143}$$

З виразу (143) видно, що множник $m^{(21)} = \frac{\sqrt{3}}{Z_{e2} + Z_{e0}} \sqrt{Z_{e2}^2 + Z_{e2} Z_{e0} + Z_{e0}^2}$,

тобто для кожної схеми його треба визначати окремо, бо він залежить від параметрів заступних схем. Комплексна заступна схема при аналізі однофазного КЗ має вигляд, представлений на рис.56.

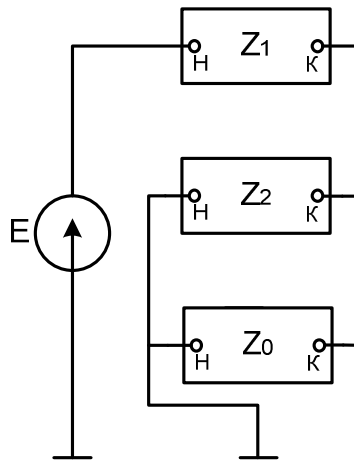


Рис.56 Комплексна заступна схема мережі при двофазному КЗ на землю

1.6 Теоретичні основи електромагнітних перехідних процесів

1.6.1 Математична модель синхронного генератора в фазних координатах

Згідно з законом Ома, ЕРС фаз обмотки статора генератора дорівнює:

$$\begin{aligned}
 e_a &= u_a + R \cdot i_a, \\
 e_b &= u_b + R \cdot i_b, \\
 e_c &= u_c + R \cdot i_c.
 \end{aligned}
 \tag{144}$$

В той же час, за законом Фарадея, ЕРС обмотки є похідною за часом від потокозчеплення обмотки з протилежним знаком:

$$\begin{aligned}
 e_a &= -\frac{d\Psi_a}{dt}, \\
 e_b &= -\frac{d\Psi_b}{dt}, \\
 e_c &= -\frac{d\Psi_c}{dt}.
 \end{aligned}
 \tag{145}$$

З рівнянь (144) та (145) можна виразити напруги фаз обмотки статора та, за аналогією, записати напругу обмотки збудження:

$$\begin{aligned}
 u_a &= -R \cdot i_a - \frac{d\Psi_a}{dt}, \\
 u_b &= -R \cdot i_b - \frac{d\Psi_b}{dt}, \\
 u_c &= -R \cdot i_c - \frac{d\Psi_c}{dt}, \\
 u_f &= -r_f \cdot i_f - \frac{d\Psi_f}{dt}.
 \end{aligned}
 \tag{146}$$

До цих рівнянь необхідно додати рівняння, що зв'язують струми та потокозчеплення обмоток:

$$\begin{aligned}
 \Psi_a &= L_a \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + L_{af} \cdot i_f, \\
 \Psi_b &= L_{ab} \cdot i_a + L_b \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + L_{bf} \cdot i_f, \\
 \Psi_c &= L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_c \cdot i_c + L_{cf} \cdot i_f, \\
 \Psi_f &= L_{fa} \cdot i_a + L_{fb} \cdot i_b + L_{fc} \cdot i_c + L_f \cdot i_f.
 \end{aligned}
 \tag{147}$$

Система рівнянь (146)+(147) і є математичною моделлю синхронного генератора в фазних координатах – тобто моделлю в системі координат, що зв'язана зі статором. Це і є основним недоліком цієї моделі, оскільки ротор синхронного генератора, на якому знаходиться обмотка збудження, обертається відносно системи координат, що прив'язана до статора. При співпадінні вісі ротора з віссю обмотки однієї з фаз (наприклад, А) магнітні силові лінії будуть замикатися по ротору і індуктивність фази L_a , а також взаємна індуктивність L_{af} будуть максимальними. При повороті ротора на 90° магнітний потік буде в основному замикатись через повітря і індуктивність фази L_a , а також взаємна індуктивність L_{af} будуть мінімальними. Таким чином, власні та взаємні індуктивності, що входять в рівняння (147) є періодичними функціями від кута повороту ротора. Як наслідок, модель синхронного генератора (146)+(147) представляє собою систему алгебро-диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Розв'язання такої системи рівнянь представляє собою дуже складну задачу.

1.6.2 Математична модель синхронного генератора в системі координат, яка пов'язана з ротором

Для того, щоб позбавитись від змінних у часі коефіцієнтів у рівняннях синхронного генератора можна перейти в іншу систему координат, яка була б нерухомою відносно ротора. Такою системою координат є система координат d/q (рис.57) в якій вісь d співпадає з ротором, а вісь q йому перпендикулярна.

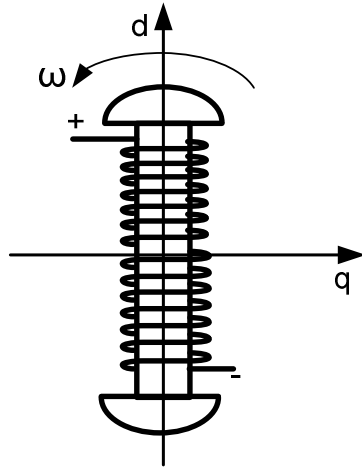


Рис.57 Система координат d/q, що пов'язана з ротором

В цьому випадку ЕРС генератора, приведена до системи координат d/q складається з двох складових трансформаторної ЕРС, що обумовлена зміною потокозчеплення у часі та ЕРС обертання, яка викликана рухом прийнятої системи координат відносно обмотки статора:

$$e_d = -\frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q; \quad (148)$$

$$e_q = -\frac{d\Psi_q}{dt} - \omega \cdot \Psi_d.$$

Згідно з законом Ома, ЕРС генератора в проєкціях на вісі d та q дорівнює:

$$e_d = u_d + R \cdot i_d, \quad (149)$$

$$e_q = u_q + R \cdot i_q.$$

З рівнянь (148) та (149) можна виразити напруги обмотки статора в проєкціях на вісі d та q та, за аналогією, записати рівняння напруги обмотки збудження, пам'ятаючи, що вона обертається в тій же системі d та q, і її ЕРС обертання дорівнює нулю:

$$u_d = -R \cdot i_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q,$$

$$u_q = -R \cdot i_q - \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot \Psi_d,$$

$$u_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}, \quad (150)$$

$$\Psi_d = X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_f,$$

$$\Psi_q = X_q \cdot i_q,$$

$$\Psi_f = X_{ad} \cdot i_d + X_f \cdot i_f.$$

Система рівнянь (150) представляє собою рівняння Парка-Горєва, які описують електромагнітний перехідний процес синхронного генератора без демпферних обмоток в системі координат, пов'язаній з ротором. Перші два

рівняння – це рівняння рівноваги напруги обмоток статора, третє рівняння – це рівняння рівноваги напруги обмотки збудження. Останні три рівняння – це рівняння зв'язку струмів та потокозчеплень синхронного генератора. Заміна індуктивностей на індуктивні опори у цих рівняннях (у порівнянні з виразами (147)) обумовлена переходом до системи координат d/q, яка обертається з частотою ω . Перевагою системи рівнянь Парка-Горєва є те, що обмотка збудження (f) та умовні приведені обмотки статора (d та q) нерухомі по відношенню одна до одної. Як наслідок, всі індуктивності, що входять у рівняння Парка-Горєва є постійними величинами.

1.6.3 Рівняння Парка-Горєва в формі ЕРС

При розгляданні синхронного генератора у складі ЕЕС та проведенні аналізу перехідного процесів використання системи рівнянь Парка-Горєва (150) часто буває незручним через те, що параметри мережі представлені ЕРС, а в системі рівнянь представлені потокозчеплення. Для цього треба перейти від системи рівнянь в формі потокозчеплень до системи рівнянь в формі ЕРС, виразивши потокозчеплення через ЕРС. Система рівнянь Парка-Горєва в формі ЕРС виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{de'_q}{dt} &= \frac{1}{T_{f0}} [-e'_q + (X_d - X'_d)i_d + E_q] \\ \frac{d(e'_q + X'_d \cdot i_d)}{dt} &= -U_d - R \cdot i_d - X_q \cdot i_q, \\ \frac{d(X_q \cdot i_q)}{dt} &= -U_q - R \cdot i_q + e'_q + X'_d \cdot i_d. \end{aligned} \quad (151)$$

Перше рівняння системи (151) – це рівняння перехідного процесу в обмотці збудження, друге – рівняння перехідного процесу в обмотці статора за віссю d, третє – рівняння перехідного процесу в обмотці статора за віссю q.

1.6.4 Фізична інтерпретація процесу КЗ синхронного генератора

Рішенням системи рівнянь Парка-Горєва є вирази для струмів $i_d(t)$, $i_q(t)$ та перехідної ЕРС $e'_q(t)$. Вираз повного струму КЗ, який визначається як $i(t) = \sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}$, має такий вигляд:

$$i(t) = (I_0 + I'_0 \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}}) \sin(\omega t + \varphi) + I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + I_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin(2\omega t + \varphi), \quad (152)$$

де $I_0 \sin(\omega t + \varphi)$ - періодичний струм КЗ; $I'_0 \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ - вільна складова періодичного струму КЗ; $I_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}}$ - аперіодичний струм КЗ; $I_2 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin(2\omega t + \varphi)$ - загасаючий періодичний струм подвійної гармоніки.

Графічне зображення струму статора при КЗ представлено на рис.58-1.

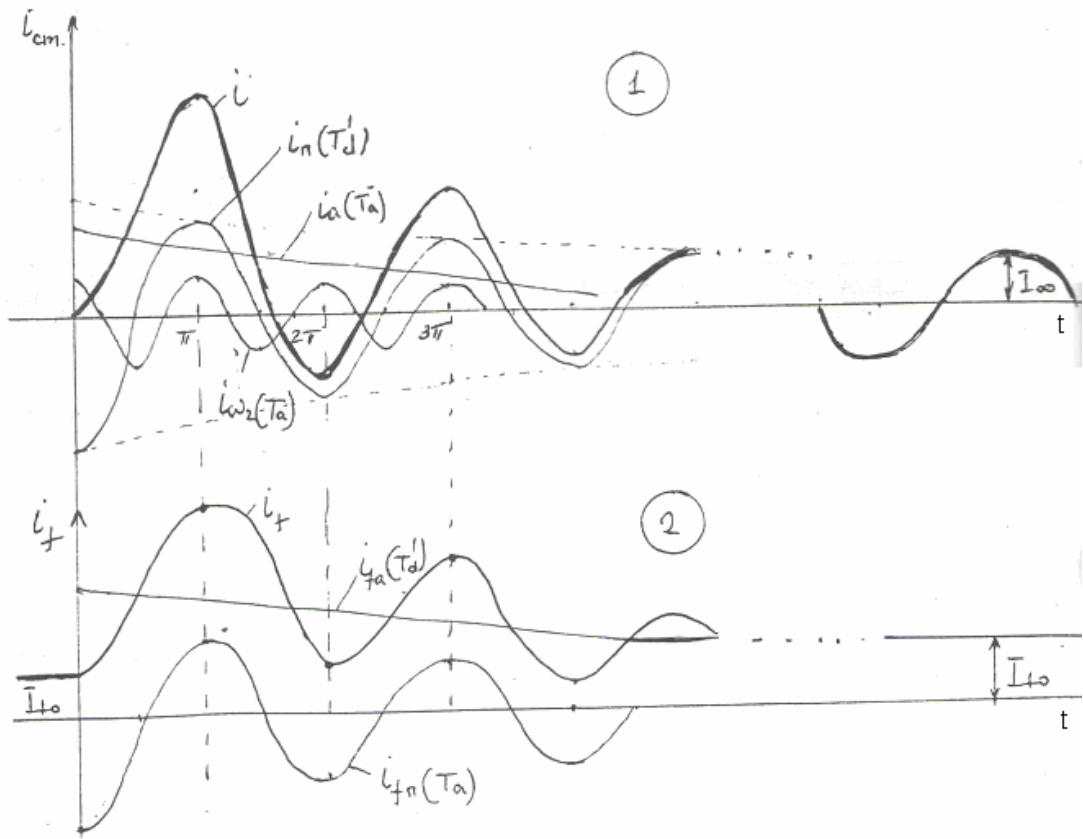


Рис.58 Струми синхронного генератора в перехідному процесі
(1 – струм статора, 2 – струм ротора)

При КЗ в колі статора виникає періодичний та аперіодичний струми КЗ. Оскільки на роторі генератора є ще обмотка збудження, слід розглянути вплив струмів статора на неї та її зворотну реакцію.

Аперіодичний струм статора $i_a(T_a)$ створює нерухомий у просторі магнітний потік. Оскільки обмотка збудження обертається, в ній наводяться ЕРС та струми синхронної частоти (тобто, періодичний струм $i_n(T_a)$), рис.58-2). Цей періодичний струм створює пульсуючий магнітний потік, який можна розкласти на два потоки, один з яких обертається в той самий бік що й ротор, а інший – у бік протилежний обертанню ротора. Перший магнітний потік переміщується відносно статора з подвійною синхронною швидкістю і наводить у статорі струм подвійної частоти $i_{\omega_2}(T_a)$. Другий магнітний потік буде нерухомим відносно обмотки статора і частково буде компенсувати аперіодичну складову струму статора.

Періодичний струм статора $i_n(T_d')$ створює обертове магнітне поле нерухоме відносно ротора, однак, в силу змінення цього струму (і відповідного потоку реакції статора) в обмотці збудження з'явиться ЕРС та додатковий струм, який створить потік що буде намагатись скомпенсувати збільшення потоку реакції статора (тобто, аперіодичний струм $i_{fa}(T_d')$), рис.58-2).

Ці чотири складові формують повний струм статора синхронного генератора при КЗ. Струм ротора при КЗ в обмотці статора також має дві складові – періодичну та аперіодичну.

2 ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

2.1 Основні відомості і поняття про електромеханічні перехідні процеси

2.1.1 Характеристика потужності найпростішої системи

Електромеханічні перехідні процеси це процеси під час яких проявляються механічні властивості ЕЕС та змінюються її механічні параметри. При дослідженні електромеханічних перехідних процесів робиться припущення про те, що закінчились електромагнітні перехідні процеси, а технологічні перехідні процеси ще не розпочались.

Основною характеристикою, яка використовується при аналізі електромеханічних перехідних процесів та їхніх наслідків, є характеристика потужності. Для її побудови необхідно розглянути схему мережі в якій генератор працює через трансформатор та паралельні ЛЕП на шини нескінченної потужності (ШНП – частини ЕЕС, потужність якої по відношенню до потужності генератора може розглядатись як нескінченно велика). Ця схема мережі представляє собою найпростішу систему. Її електрична та заступна схеми представлені на рис.59.

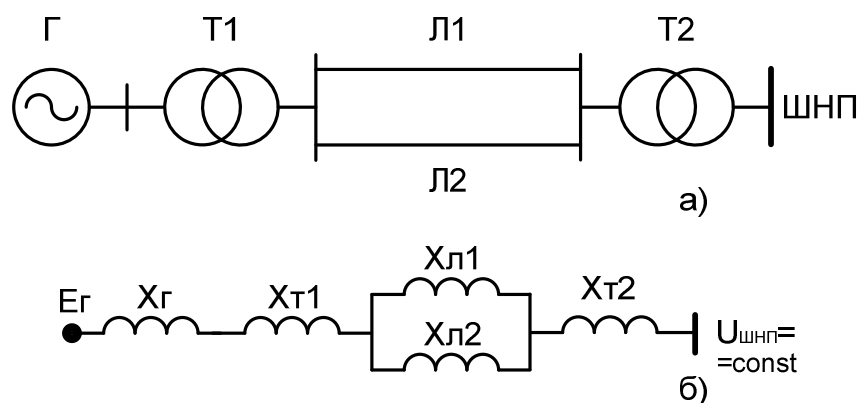


Рис.59 Схема мережі (а) та її заступна схема (б) для визначення характеристики потужності

Еквівалентний індуктивний опір мережі дорівнює (за умови що $X_{Л1} = X_{Л2} = X_{Л}$):

$$X_e = X_g + X_{T1} + \frac{X_L}{2} + X_{T2}. \quad (153)$$

Еквівалентна заступна схема мережі представлена на рис.60.

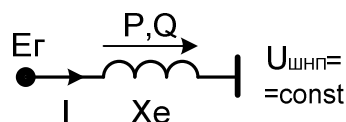


Рис.60 Еквівалентна заступна схема мережі

Для визначення характеристики потужності найпростішої системи необхідно побудувати її векторну діаграму (рис.61).

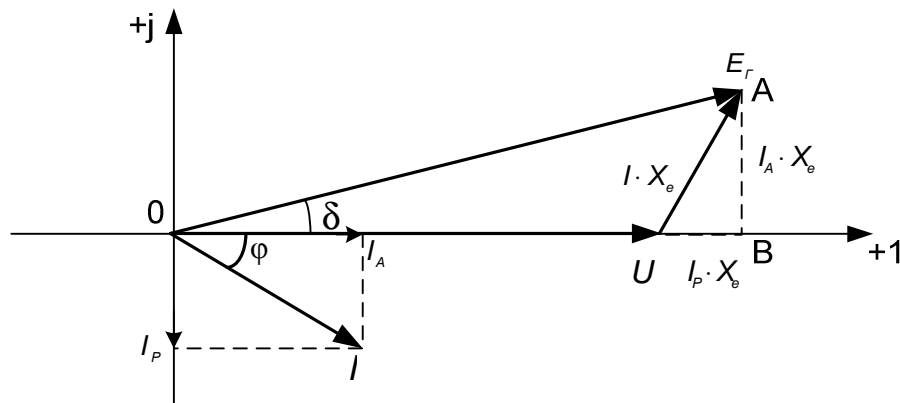


Рис.61 Векторна діаграма синхронного генератора

Активна потужність генератора дорівнює добутку напруги генератора на активну складову його струму:

$$P = U \cdot I_A. \quad (154)$$

За векторною діаграмою з трикутника OAB можна отримати наступне співвідношення:

$$AB = I_A \cdot X_e = E_g \cdot \sin \delta \rightarrow I_A = \frac{E_g}{X_e} \cdot \sin \delta. \quad (155)$$

Співвідношення (155) підставляється в (154). Отримана залежність представляє собою характеристику активної потужності синхронного генератора (або кутову характеристику):

$$P = U \cdot I_A = \frac{E_g \cdot U}{X_e} \cdot \sin \delta, \quad (156)$$

де E_g - ЕРС генератора, U - напруга на шинах нескінченної потужності, X_e - еквівалентний опір схеми, δ - кут навантаження (кут між ЕРС генератора та напругою ШНП).

При незмінних ЕРС генератора та напрузі ШНП зміна потужності що передається може бути викликана тільки відповідною зміною кута δ . Як відомо, зміна потужності, що віддається генератором здійснюється впливом на регулюючі органи турбіни. В усталеному режимі механічна потужність турбіни врівноважується електричною потужністю генератора, який обертається з постійною швидкістю. По мірі відкриття (закриття) регулюючого клапану подання пари або направляючого апарату потужність турбіни зростає (зменшується), порушується баланс обертаючого та гальмівного моментів, що спричиняє прискорення (гальмування) генератора. Оскільки кут δ є електричним параметром, то механічна потужність турбіни не є функцією цього кута ($P_T \neq f(\delta)$) і приймається $P_T(\delta) = const$.

З рівняння (156) видно, що залежність електричної потужності генератора від кута δ має синусоїдальний характер (рис.62). Баланс

електричної та механічної потужностей системи «турбіна-генератор» виглядає наступним чином:

$$P_T = P_r = \frac{E_r \cdot U}{X_e} \cdot \sin \delta. \quad (157)$$

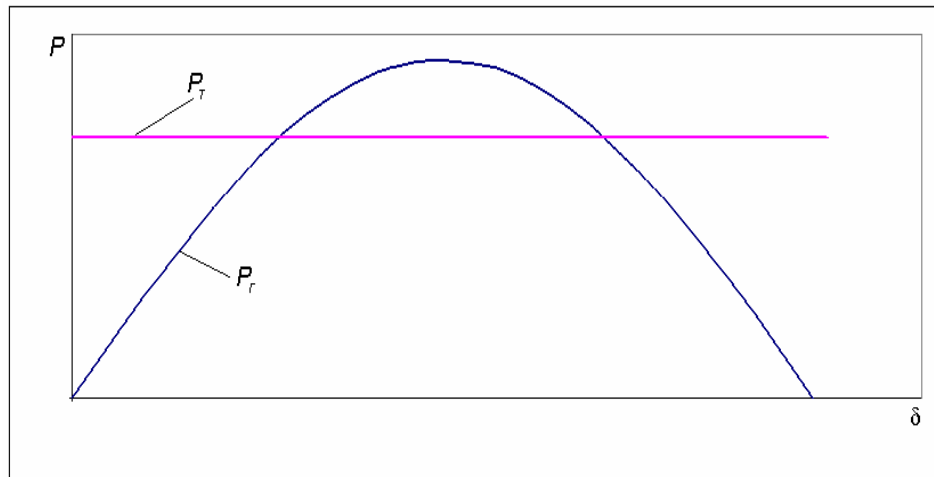


Рис.62 Характеристика потужності найпростішої системи

Максимум електричної потужності генератора за незмінної ЕРС (без дії АРЗ) досягається при $\delta = 90^\circ$ і дорівнює:

$$P_{MAX} = \frac{E_r \cdot U}{X_e}. \quad (158)$$

2.1.2 Поняття статичної стійкості системи

Статична стійкість системи це здатність системи повертатись у вихідний стан після нескінченно малих збурень. Для оцінювання статичної стійкості найпростішої системи необхідно розглянути її характеристику (рис.63).

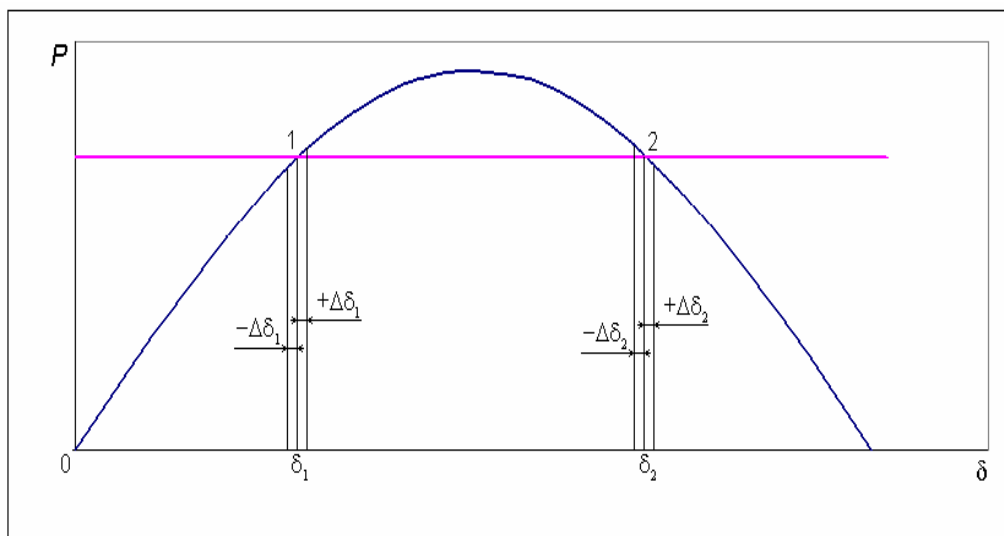


Рис.63 Оцінювання статичної стійкості найпростішої системи

Характеристика потужності генератора має дві точки перетину з характеристикою потужності турбіни (точки 1 та 2). Кут навантаження в робочій точці 1 дорівнює δ_1 , а в точці 2 дорівнює δ_2 . Для оцінювання стійкості роботи системи в точках 1 та 2 треба задати в цих точках нескінченно малий приріст аргументу $\pm \Delta\delta$.

Точка 1. Розглянемо додатній приріст кута навантаження $+\Delta\delta_1$. При цьому робоча точка 1 зміщується вправо $\delta'_1 = \delta_1 + \Delta\delta_1$, а ротор генератора починає розганятись. Також при цьому порушується баланс потужностей – електрична потужність генератора стає більшою за механічну потужність турбіни $P_r > P_T$. Як наслідок, гальмівний момент починає переважати момент розгону, ротор починає гальмувати і система повертається до робочої точки 1.

Розглянемо від'ємний приріст кута навантаження $-\Delta\delta_1$. При цьому робоча точка 1 зміщується вліво $\delta'_1 = \delta_1 - \Delta\delta_1$, а ротор генератора починає гальмувати. Також при цьому порушується баланс потужностей – електрична потужність генератора стає меншою за механічну потужність турбіни $P_r < P_T$. Як наслідок, момент розгону починає переважати гальмівний момент, ротор починає розганятися і система повертається до робочої точки 1. Таким чином, точка 1 є точкою стійкої роботи найпростішої системи.

Точка 2. Розглянемо додатній приріст кута навантаження $+\Delta\delta_2$. При цьому робоча точка 2 зміщується вправо $\delta'_2 = \delta_2 + \Delta\delta_2$, а ротор генератора починає розганятись. Також при цьому порушується баланс потужностей – електрична потужність генератора стає меншою за механічну потужність турбіни $P_r < P_T$. Як наслідок, момент розгону починає переважати гальмівний момент, ротор починає ще більше розганятися і система не повертається до робочої точки 2.

Розглянемо від'ємний приріст кута навантаження $-\Delta\delta_2$. При цьому робоча точка 2 зміщується вліво $\delta'_2 = \delta_2 - \Delta\delta_2$, а ротор генератора починає гальмувати. Також при цьому порушується баланс потужностей – електрична потужність генератора стає більшою за механічну потужність турбіни $P_r > P_T$. Як наслідок, гальмівний момент починає переважати момент розгону, ротор починає гальмувати ще більше і система не повертається до робочої точки 2. Таким чином, точка 2 є точкою нестійкої роботи найпростішої системи.

В загальному випадку можна зробити висновок, що всі точки зростаючої ділянки синусоїди відповідають статично стійким режимам і навпаки – всі точки спадаючої ділянки синусоїди відповідають статично нестійким режимам. Це дозволяє отримати критерій статичної стійкості найпростішої системи:

$$\frac{dP_r}{d\delta} = \frac{E_r \cdot U}{X_e} \cdot \cos \delta > 0. \quad (159)$$

Критичним з точки зору статичної стійкості найпростішої системи є значення кута навантаження 90° за якого досягається максимум характеристики потужності.

Статична стійкість є необхідною умовою існування усталеного режиму роботи системи, але не визначає здатності системи продовжувати роботу за різких порушень режиму, наприклад при КЗ. Для визначення цього необхідний аналіз динамічної стійкості системи.

2.1.3 Поняття динамічної стійкості системи

Якщо при аналізі статичної стійкості доводиться мати справу з нескінченно малими збуреннями робочого режиму системи, то предметом дослідження динамічної стійкості є значні збурення, причому суттєве значення приймають характер та розміри збурення.

Під динамічною стійкістю розуміється здатність системи повертатись у вихідний стан після значного збурення, або у стан близький до вихідного якщо збурення продовжує діяти.

Нехай у схемі найпростішої системи (рис.59,а) відбулось відключення лінії Л2. Електрична та заступна схеми системи для цього випадку представлені на рис.64.

Еквівалентний індуктивний опір мережі дорівнює:

$$X_{e1} = X_r + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2}, \quad (160)$$

причому, отримана величина буде більшою за еквівалентний індуктивний опір нормального режиму (при двох включених ЛЕП). Еквівалентна заступна схема мережі аналогічна схемі, представлений на рис.60.

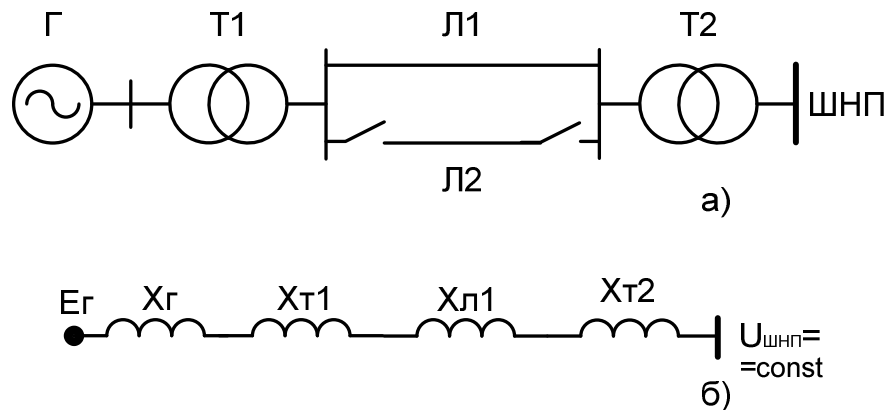


Рис.64 Схема мережі (а) та її заступна схема (б) при відключеній ЛЕП

Оскільки $X_{e1} > X_e$, то за незмінних напруги ШНП та ЕРС генератора максимум електричної потужності генератора буде меншим за максимум нормального режиму:

$$P_{MAX1} = \frac{E_r \cdot U}{X_{e1}} < P_{MAX}, \quad (161)$$

як наслідок, характеристика режиму мережі при відключеній ЛЕП (обтяжений режим) буде нижче за характеристику нормального режиму (рис.65).

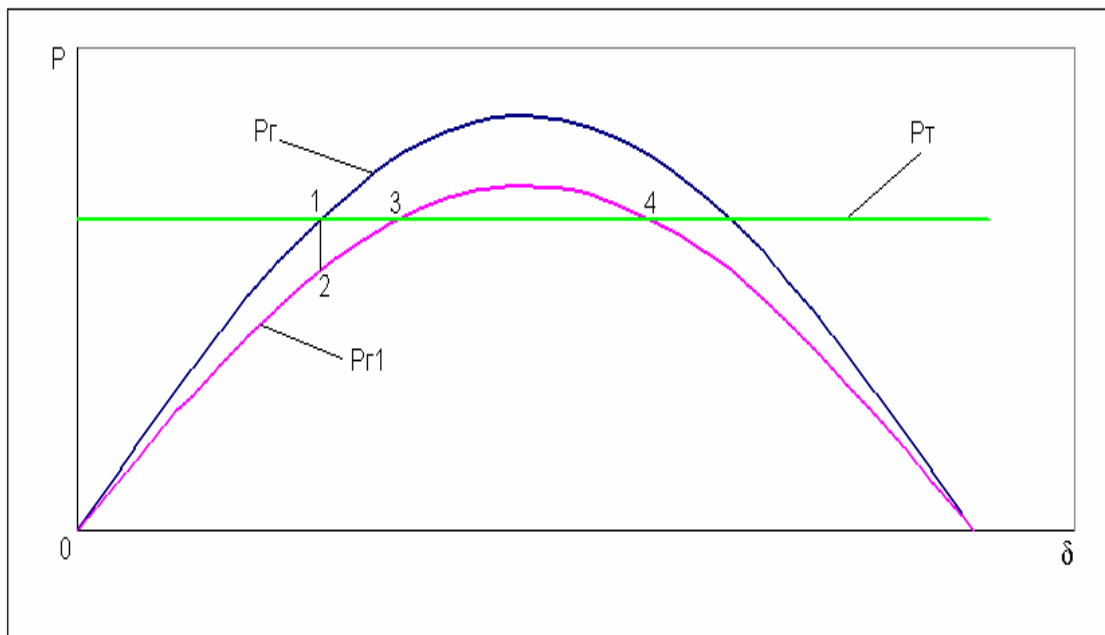


Рис.65 Оцінювання динамічної стійкості найпростішої системи

В нормальному режимі до відключення ЛЕП робочою точкою системи була точка 1. При відключенні ЛЕП відбувся миттєвий перехід з характеристики нормального режиму $P_T(\delta)$ на характеристику обтяженого режиму $P_{G1}(\delta)$, тобто робочою точкою стає точка 2, оскільки кут навантаження стрибком змінитись не може. В цій точці електрична потужність генератора менша за механічну потужність турбіни $P_{G1} < P_T$. Як наслідок, момент розгону починає переважати гальмівний момент, ротор починає розганятися і кут навантаження δ починає зростати. В точці 3 досягається баланс потужностей та рівність моменту розгону та моменту гальмування, але ротор генератора за інерцією проходить точку 3 і кут δ продовжує зростати, але вже не з прискоренням, а з уповільненням, оскільки між точками 3 та 4 гальмівний (електричний) момент переважає момент розгону (механічний). Якщо кут навантаження припинить зростати до точки 4, то починається зворотній процес: кут δ зменшується, оскільки гальмівний момент переважає момент розгону, наближаючись до нової робочої точки 3. Після декількох загасаючих коливань (рис.66,а) система прийде до нового усталеного режиму з робочою точкою 3. Якщо процес в системі розвивається за таким сценарієм, то система є динамічно стійкою.

Розглянемо інший сценарій роботи системи у випадку коли кут навантаження не припинив зростати до точки 4. Якщо кут δ перейде за точку 4, то момент розгону знову стане переважати гальмівний момент і ротор генератора продовжить розганятись, а кут навантаження зростати (рис.66,б) віддаляючись від робочої точки нового режиму 3. В цьому випадку система є динамічно нестійкою.

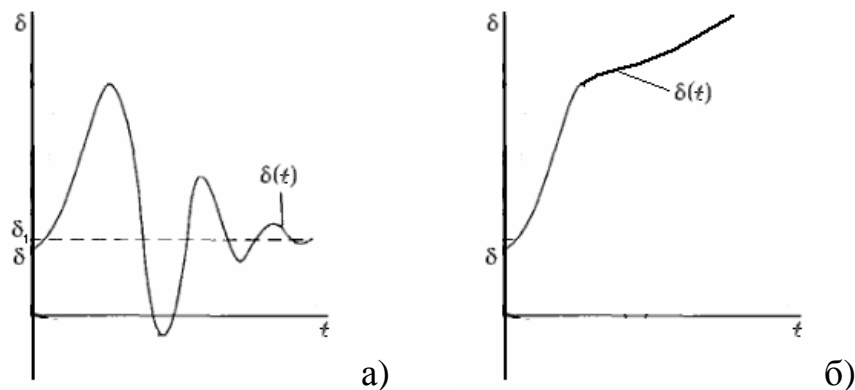


Рис.66 Зміна кута навантаження найпростішої системи в динамічних режимах: (а – в стійкому режимі, б – в нестійкому режимі)

2.1.4 Характеристика потужності двомашинної системи

Вище було розглянуто характеристику потужності найпростішої одномашинної системи при її роботі на ШНП. Однак, у випадку коли приймальна енергосистема та передавальна мають сумірні потужності, приймальну енергосистему не можна представляти як ШНП, а треба моделювати її еквівалентним генератором. Така результуюча система називається двомашинною. Електрична схема такої двомашинної системи з навантажувальним вузлом представлена на рис.67.

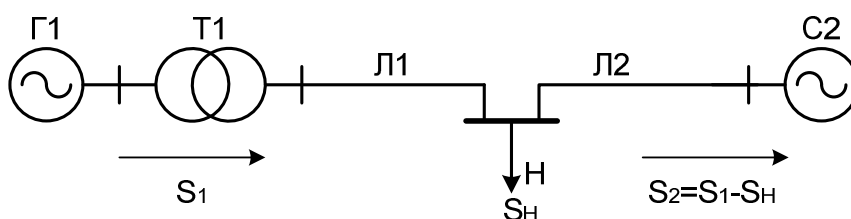


Рис.67 Схема двомашинної системи

В схемі на рис.67 перша система (Г1, Т1, Л1) представляє собою передавальну енергосистему, а друга (С2, Л2) – приймальну. Для визначення характеристики двомашинної системи складається її заступна схема (рис.68).

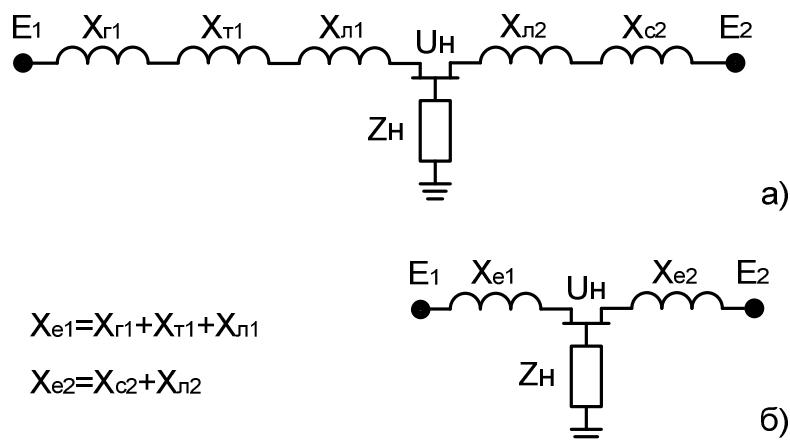


Рис.68 Заступна (а) та еквівалентна заступна (б) схеми двомашинної системи

Суміщена векторна діаграма обох систем (рис.69) будується з урахуванням того, що у другій системи перетік потужності іде від шин навантаження до її еквівалентної ЕРС.

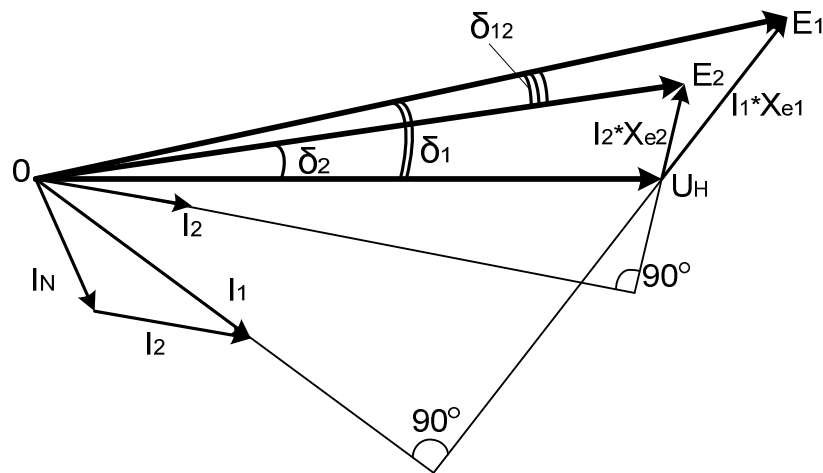


Рис.69 Векторна діаграма двомашинної системи

Оскільки в системі на рис.67 нема ШНП, то кути δ_1 та δ_2 між векторами ЕРС відповідних систем та вектором напруги навантажувального вузла не є характеристикою стійкості двомашинної системи. При дослідженні стійкості двомашинної системи розглядається *взаємний* кут між ЕРС приймальної та передавальної системи δ_{12} . Виходячи з цього, визначається характеристика потужності двомашинної системи. Для цього розраховуються власні та взаємні опори обох систем (в комплексній формі):

$$\dot{Z}_{11} = jX_{e1} + \frac{jX_{e2} \cdot \dot{Z}_H}{jX_{e2} + \dot{Z}_H}; \quad (162)$$

$$\dot{Z}_{22} = jX_{e2} + \frac{jX_{e1} \cdot \dot{Z}_H}{jX_{e1} + \dot{Z}_H}; \quad (163)$$

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = jX_{e1} + jX_{e2} + \frac{jX_{e1} \cdot jX_{e2}}{\dot{Z}_H}. \quad (164)$$

Визначаються кути, що доповнюють кути власних та взаємних опорів до 90° :

$$\dot{Z}_{11} = Z_{11} \cdot e^{j\varphi_{11}} \rightarrow \alpha_{11} = 90 - \varphi_{11}; \quad (165)$$

$$\dot{Z}_{22} = Z_{22} \cdot e^{j\varphi_{22}} \rightarrow \alpha_{22} = 90 - \varphi_{22}; \quad (166)$$

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = Z_{12} \cdot e^{j\varphi_{12}} \rightarrow \alpha_{12} = \alpha_{21} = 90 - \varphi_{12}. \quad (167)$$

Тоді характеристики потужності обох систем запишуться наступним чином:

$$P_1(\delta_{12}) = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (168)$$

$$P_2(\delta_{21}) = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}). \quad (169)$$

Вводяться наступні позначення:

- власна потужність передавальної енергосистеми:

$$P_{11} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11}; \quad (170)$$

- власна потужність приймальної енергосистеми:

$$P_{22} = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22}; \quad (171)$$

- взаємна потужність:

$$P_{12} = P_{21} = \frac{E_1 \cdot E_2}{Z_{12}}. \quad (172)$$

Оскільки для передавальної енергосистеми взаємний кут відраховується від ЕРС E_1 до ЕРС E_2 , а для приймальної – навпаки від ЕРС E_2 до ЕРС E_1 , то справедливим є співвідношення $\delta_{12} = -\delta_{21}$. Враховуючи це, а також позначення (170)-(172), характеристики потужності енергосистем переписуються наступним чином:

$$P_1(\delta_{12}) = P_{11} + P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (173)$$

$$P_2(\delta_{12}) = P_{22} - P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}). \quad (174)$$

Графічна інтерпретація цих характеристик представлена на рис.70. Межа потужності передавальної енергосистеми визначається як:

$$P_{1\max} = P_{11} + P_{12}. \quad (175)$$

Межа потужності приймальної енергосистеми визначається як:

$$P_{2\max} = P_{22} + P_{12}. \quad (176)$$

Сумарна характеристика потужності двомашинної системи $P_\Sigma(\delta_{12})$, яка визначає дійсну межу потужності, записується як:

$$P_\Sigma(\delta_{12}) = P_1(\delta_{12}) + P_2(\delta_{12}). \quad (177)$$

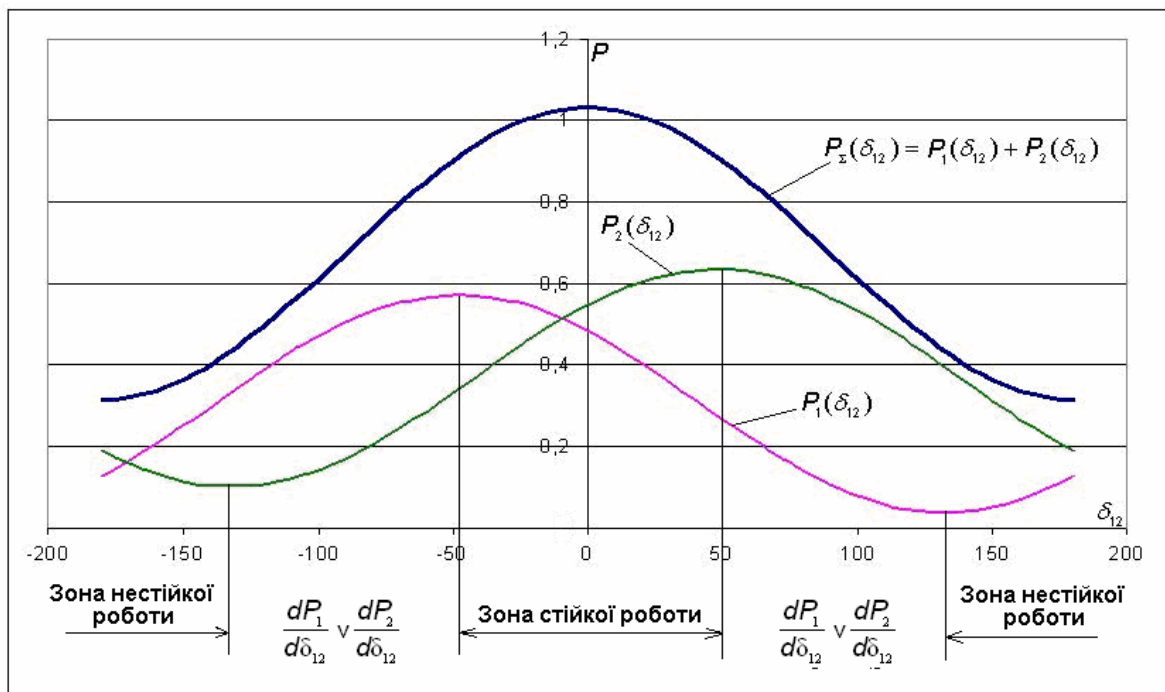


Рис.70 Характеристика потужності двомашинної системи

Для визначення дійсної межі потужності двомашинної системи треба знайти точку екстремуму функції $P_{\Sigma}(\delta_{12})$:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\Sigma}(\delta_{12})}{d\delta_{12}} &= \frac{d(P_1(\delta_{12}) + P_2(\delta_{12}))}{d\delta_{12}} = \frac{dP_1(\delta_{12})}{d\delta_{12}} + \frac{dP_2(\delta_{12})}{d\delta_{12}} = \\ &= \frac{d(P_{11} + P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}))}{d\delta_{12}} + \frac{d(P_{22} - P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}))}{d\delta_{12}} = \\ &= \frac{dP_{11}}{d\delta_{12}} + \frac{d(P_{12} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}))}{d\delta_{12}} + \frac{dP_{22}}{d\delta_{12}} - \frac{d(P_{12} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}))}{d\delta_{12}} = \end{aligned} \quad (178)$$

$$\begin{aligned} P_{12} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) - P_{12} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}) &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}) &= \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}). \end{aligned}$$

Оскільки косинус є парною функцією, отримана рівність буде виконуватись тільки за умови $\delta_{12} = 0$. Підставивши цей результат в (177) отримуємо:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma \text{MAX}} = P_{\Sigma}(0) = P_1(0) + P_2(0) &= P_{11} + P_{12} \sin(0 - \alpha_{12}) + P_{22} - \\ - P_{12} \sin(0 + \alpha_{12}) &= P_{11} + P_{22} - 2 \cdot P_{12} \sin \alpha_{12}. \end{aligned} \quad (179)$$

Це і є дійсна межа потужності двомашинної системи.

Для двомашинної системи важливим є визначення зон стійкої та нестійкої роботи. Розглянемо зону між максимумами характеристик приймальної та передавальної системи (див. рис.70). У цій зоні характеристика передавальної системи спадає, а приймальної – зростає. Таким чином, якщо в цій зоні куту δ_{12} дати нескінченно малий додатній приріст, то генератор приймальної системи почне гальмувати, а генератор передавальної – прискорюватись. Якщо звернутись до векторної діаграми (див. рис.69) то стане зрозумілим, що в цьому випадку вектор ЕРС E_2 почне «доганяти» вектор ЕРС E_1 до тих пір, поки кут δ_{12} не повернеться до вихідного значення. Таким чином, ця зона є зоною стійкої роботи.

Аналогічно можна показати, що зона між двома мінімумами характеристик обох систем, де характеристика передавальної ЕРС зростає, а приймальної спадає, є зоною нестійкої роботи.

В зонах між мінімумом однієї характеристики та максимумом іншої аналіз статичної стійкості є більш складним, так як в них обидві характеристики або зростають або спадають. Стійкість двомашинної системи в цьому випадку буде залежати від швидкості зміни характеристик при прирості кута δ_{12} . Якщо швидкість зміни характеристики приймальної системи буде вищою за швидкість зміни характеристики передавальної системи, то система буде статично стійкою.

На основі сказаного, для цих двох зон двомашинної системи можна визначити критерій статичної стійкості:

$$\frac{dP_1}{d\delta_{12}} < \frac{dP_2}{d\delta_{12}}. \quad (180)$$

Цей критерій також буде справедливим і для перших двох зон. Таким чином, критерій (180) є узагальненим критерієм статичної стійкості двомашинної системи.

2.2 Векторні діаграми та основні співвідношення синхронного генератора

2.2.1 Векторна діаграма та основні співвідношення в системі, що містить неявнополіусний синхронний генератор

Для побудови векторної діаграми неявнополіусного генератора ($X_d = X_q$), що знаходиться у найпростішій системі (див. рис.59,а) необхідно перетворити її заступну схему таким чином, щоб виділити в ній зовнішній по відношенню до генератора опір. Така схема виглядає наступним чином (рис.71).

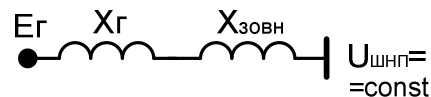


Рис.71 Заступна схема найпростішої системи для побудови векторної діаграми неявнополіусного генератора

Зовнішній опір при цьому дорівнює:

$$X_{\text{зовн}} = X_{T1} + \frac{X_L}{2} + X_{T2}. \quad (181)$$

Еквівалентний синхронний опір системи складає:

$$X_e = X_d + X_{\text{зовн}}. \quad (182)$$

Еквівалентний перехідний опір системи складає:

$$X'_e = X'_d + X_{\text{зовн}}. \quad (183)$$

Якщо необхідно провести аналіз статичної стійкості системи, то генератор вноситься до заступної схеми синхронною ЕРС за віссю q та синхронним опором за віссю d (рис.72,а). Якщо необхідно провести аналіз динамічної стійкості системи, то генератор вноситься до заступної схеми перехідною ЕРС за віссю q та перехідним опором за віссю d (рис.72,б).



Рис.72 Заступна схема найпростішої системи для аналізу статичної (а) та динамічної (б) стійкості

Векторна діаграма неявнополіусного синхронного генератора (рис.73) будується в наступній послідовності:

- 1) відкладається вектор напруги на ШНП U і від нього під кутом φ відкладається вектор струму I ;
- 2) визначається падіння напруги на еквівалентному синхронному опорі $I \cdot X_e$ і відкладається з кінця вектора U під кутом 90° до вектору струму I ;
- 3) початок вектора напруги U з'єднується з кінцем вектора $I \cdot X_e$, отриманий вектор – це синхронна ЕРС E_q , напрям якої визначає напрям поперечної вісі q , кут між векторами U та E_q – це кут δ ;
- 4) перпендикулярно вісі q відкладається вісь d ;
- 5) визначається падіння напруги на еквівалентному перехідному опорі $I \cdot X'_e$ і відкладається з кінця вектора U під кутом 90° до вектору струму I ;
- 6) початок вектора напруги U з'єднується з кінцем вектора $I \cdot X'_e$, отриманий вектор – це перехідна ЕРС E'_q , кут між векторами U та E'_q – це кут δ' ;
- 7) визначається падіння напруги на зовнішньому опорі $I \cdot X_{зовн}$ і відкладається з кінця вектора U під кутом 90° до вектору струму I ;
- 8) початок вектора напруги U з'єднується з кінцем вектора $I \cdot X_{зовн}$, отриманий вектор – це напруга генератора U_r , кут між векторами U та U_r – це кут δ_U .

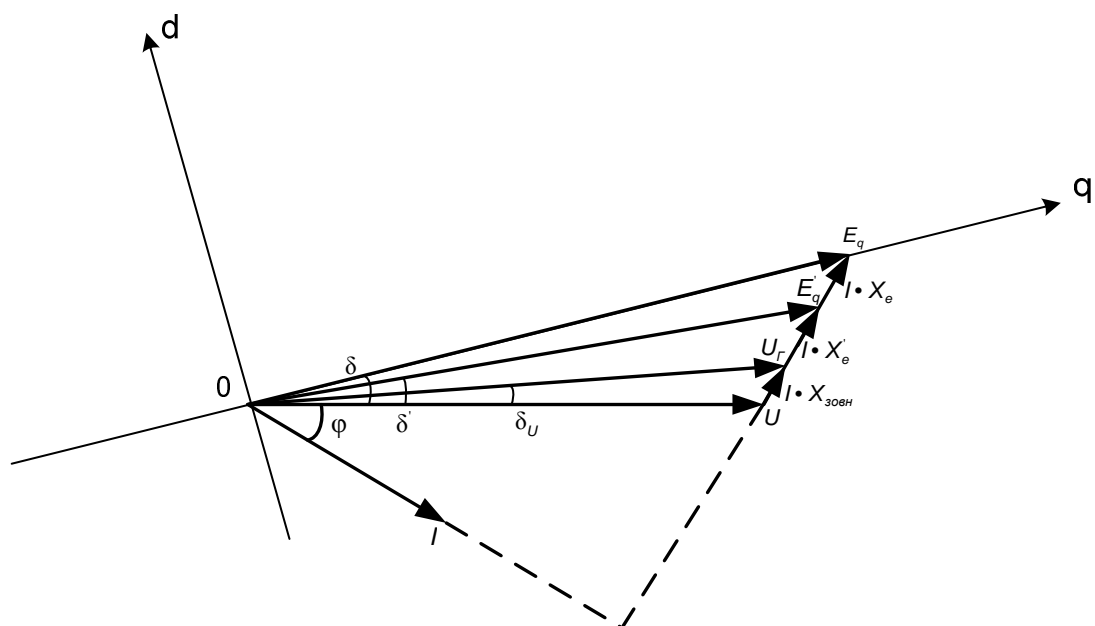


Рис.73 Векторна діаграма неявнополюсного синхронного генератора

З векторної діаграми можна отримати вирази для ЕРС та напруг. Так, синхронна ЕРС генератора дорівнює:

$$E_q = \sqrt{(U + I_p \cdot X_e)^2 + (I_A \cdot X_e)^2} = \sqrt{\left(U + \frac{Q}{U} \cdot X_e\right)^2 + \left(\frac{P}{U} \cdot X_e\right)^2}, \quad (184)$$

де I_A , I_p - активна та реактивна складові струму I ; P , Q - активна та реактивна потужності, що передаються системою.

Кут навантаження δ дорівнює:

$$\delta = \arctg \frac{\frac{P}{U} \cdot X_e}{U + \frac{Q}{U} \cdot X_e}. \quad (185)$$

Перехідна ЕРС генератора складає:

$$E'_q = \sqrt{\left(U + \frac{Q}{U} \cdot X'_e \right)^2 + \left(\frac{P}{U} \cdot X'_e \right)^2}. \quad (186)$$

Кут δ' складає:

$$\delta' = \arctg \frac{\frac{P}{U} \cdot X'_e}{U + \frac{Q}{U} \cdot X'_e}. \quad (187)$$

Напруга генератора визначається таким чином:

$$U_r = \sqrt{\left(U + \frac{Q}{U} \cdot X_{30BH} \right)^2 + \left(\frac{P}{U} \cdot X_{30BH} \right)^2}. \quad (188)$$

Кут δ_U складає:

$$\delta_U = \arctg \frac{\frac{P}{U} \cdot X_{30BH}}{U + \frac{Q}{U} \cdot X_{30BH}}. \quad (189)$$

Вираз для активної потужності неявнополюсного генератора було виведено вище (див.(156)), графік активної потужності див. на рис.62.

Важливим параметром, що кількісно характеризує статичну стійкість системи, є коефіцієнт запасу за статичною стійкістю, який дорівнює:

$$K_{CT} = \frac{P_{MAX} - P_T}{P_T} \cdot 100, \%. \quad (190)$$

В нормальному режимі цей коефіцієнт має бути не менше 20%, а в обтяженому чи післяаварійному – не менше 8%.

2.2.2 Векторна діаграма та основні співвідношення в системі, що містить явнополюсний синхронний генератор

Для побудови векторної діаграми явнополюсного генератора ($X_d > X_q$), що знаходиться у найпростішій системі (див. рис.59), так само як і у випадку неявнополюсного генератора необхідно перетворити її заступну схему таким чином, щоб виділити в ній зовнішній по відношенню до генератора опір. Така схема аналогічна схемі з рис.71. Синхронний генератор при цьому вноситься в заступну схему синхронним опором за поперечною віссю X_q і фіктивною ЕРС E_q (рис.74), яка необхідна щоб визначити напрям вісей d та q , оскільки параметри генератора за віссю d не дорівнюють параметрам генератора за віссю q .

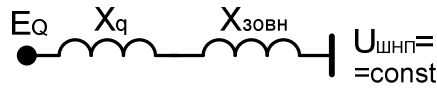


Рис.74 Заступна схема найпростішої системи з явнополусним генератором для побудови векторної діаграми

Векторна діаграма явнополусного синхронного генератора (рис.75) будується в наступній послідовності:

- 1) відкладається вектор напруги на ШНП U і від нього під кутом φ відкладається вектор струму I ;
- 2) визначається падіння напруги на еквівалентному синхронному опорі $I \cdot X_e$, де $X_e = X_q + X_{зовн}$ і відкладається з кінця вектора U під кутом 90° до вектору струму I ;
- 3) початок вектора напруги U з'єднується з кінцем вектора $I \cdot X_e$, отриманий вектор – це фіктивна ЕРС E_Q , напрям якої визначає напрям поперечної вісі q , кут між векторами U та E_Q – це кут δ ;
- 4) перпендикулярно вісі q відкладається вісь d ;
- 5) визначається синхронна ЕРС E_q та відкладається за віссю q ;
- 6) визначається падіння напруги на еквівалентному перехідному опорі $I \cdot X_e'$ і відкладається з кінця вектора U під кутом 90° до вектору струму I ;
- 7) початок вектора напруги U з'єднується з кінцем вектора $I \cdot X_e'$, отриманий вектор – це перехідна ЕРС E_q' , кут між векторами U та E_q' – це кут δ' ;
- 8) визначається падіння напруги на зовнішньому опорі $I \cdot X_{зовн}$ і відкладається з кінця вектора U під кутом 90° до вектору струму I ;
- 9) початок вектора напруги U з'єднується з кінцем вектора $I \cdot X_{зовн}$, отриманий вектор – це напруга генератора U_r , кут між векторами U та U_r – це кут δ_U .

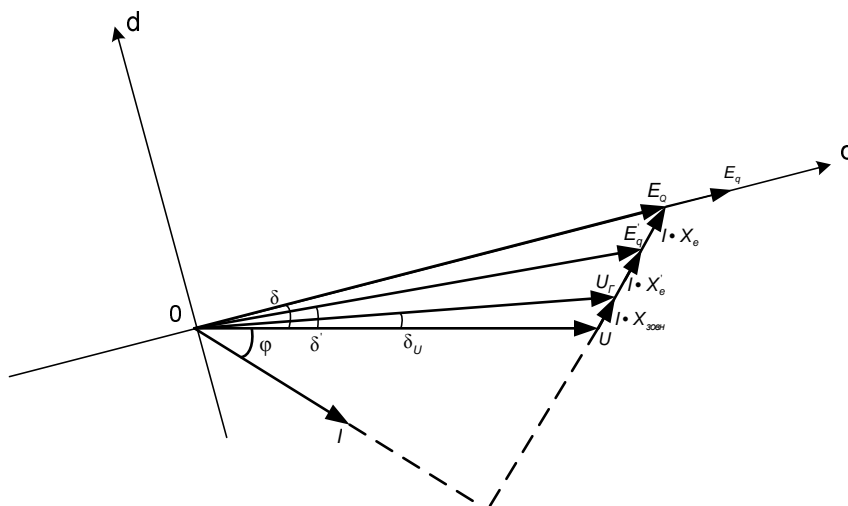


Рис.75 Векторна діаграма явнополусного синхронного генератора

З векторної діаграми можна отримати вирази для ЕРС та напруг. Так, фіктивна ЕРС генератора дорівнює:

$$E_Q = \sqrt{(U + I_P \cdot X_e)^2 + (I_A \cdot X_e)^2} = \sqrt{\left(U + \frac{Q}{U} \cdot X_e\right)^2 + \left(\frac{P}{U} \cdot X_e\right)^2}. \quad (191)$$

Синхронна ЕРС явнополюсного генератора визначається наступним чином:

$$E_q = E_Q + (X_d - X_q) \cdot I \cdot \sin(\varphi + \delta). \quad (192)$$

Кут навантаження δ , перехідна ЕРС E_q , кут δ' , напруга генератора U_r , кут δ_U визначаються так само як у неявнополюсного генератора за виразами (185)–(189).

Для визначення активної потужності явнополюсного генератора, на відміну від неявнополюсного, вираз (156) застосовувати не можна. Це є наслідком того, що синхронна ЕРС E_q визначається синхронним опором за повздовжньою віссю X_d , а для її визначення було використано еквівалентний опір X_e , до складу якого входить синхронний опір за поперечною віссю X_q . Тому, активна потужність явнополюсного генератора визначається з наступного співвідношення:

$$P = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q, \quad (193)$$

де U_d , U_q – проекції вектора напруги ШНП на вісі d та q відповідно, I_d , I_q – проекції вектора струму на вісі d та q відповідно.

Ці проекції виражаються наступним чином:

$$U_d = U \cdot \sin \delta, \quad U_q = U \cdot \cos \delta, \quad (194)$$

$$I_d = \frac{E_q - U_q}{X_d + X_{зовн}} = \frac{E_q - U_q}{X_{d\Sigma}}, \quad I_q = \frac{U_d}{X_{q\Sigma}}. \quad (195)$$

Підставивши вирази (194), (195) в (193) отримуємо:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot \sin \delta \cdot \frac{E_q - U \cdot \cos \delta}{X_{d\Sigma}} + U \cdot \cos \delta \cdot \frac{U \cdot \sin \delta}{X_{q\Sigma}} = \\ &= \frac{E_q \cdot U}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta + U^2 \cdot \left(\frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \cdot \sin \delta \cdot \cos \delta = \\ &= \frac{E_q \cdot U}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \cdot \sin 2\delta = P_{осн} + P_{сп}. \end{aligned} \quad (196)$$

Перша складова виразу активної потужності називається основною потужністю, а друга складова – спотворюючою потужністю, яка змінює характеристику потужності системи, що містить явнополюсний генератор. Ця характеристика представлена на рис.76, з якого видно, що характеристика потужності системи з явнополюсним синхронним генератором досягає свого максимального (критичного) значення при куті $\delta < 90^\circ$. Це викликано наявністю спотворюючою потужності.

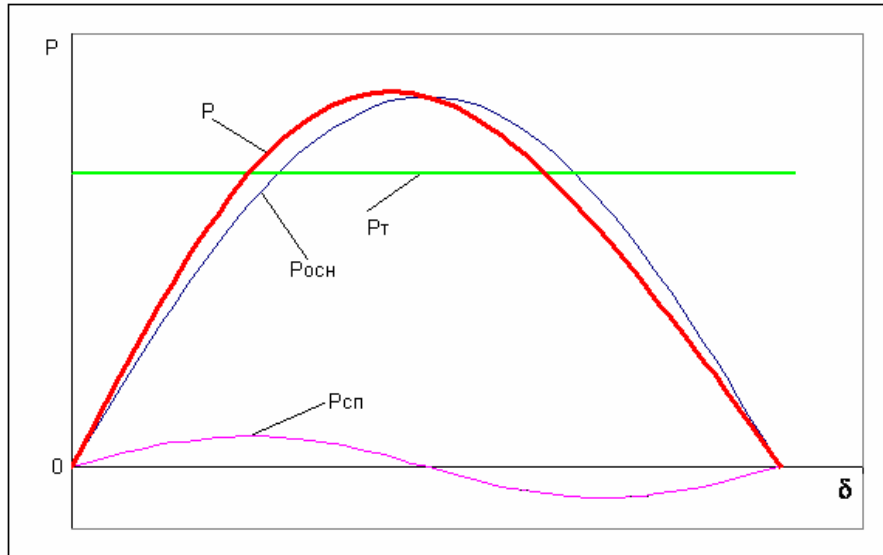


Рис.76 Характеристика потужності найпростішої системи з явнополюсним синхронним генератором

В реальних генераторах максимальне значення основної потужності набагато більше за максимальне значення спотворюючої, тому значення критичного кута, зазвичай знаходиться в діапазоні 85...90°.

2.2.3 Внутрішня межа потужності синхронного генератора з АРЗ

Вище були розглянуті режими найпростішої системи за умови, що синхронна ЕРС генератора в будь-якому режимі залишається незмінною. Якщо синхронна ЕРС $E_q = const$, а кут навантаження δ починає зростати, при цьому знижується напруга генератора U_r (рис.77).

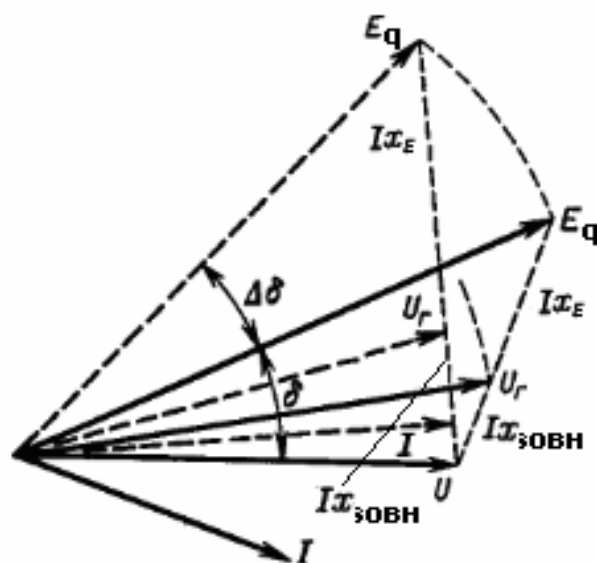


Рис.77 Векторна діаграма зміни напруги генератора при зростанні кута навантаження за умови, що $E_q = const$

Режим роботи синхронного генератора за пониженої напруги є неприпустимим через те, що при цьому відбувається його перевантаження (зростає струм I) та виникає загроза порушення його стійкості.

На теперішній час практично всі синхронні генератори в ЕЕС оснащені пристроями АРЗ, основною задачею яких є підтримка напруги генератора на заданому рівні шляхом регулювання величини струму збудження генератора і, як наслідок, регулювання значення синхронної ЕРС E_q .

АРЗ бувають двох видів: АРЗ пропорційного типу, які підтримують $E_q = const$ та АРЗ сильної дії, які підтримують $U_r = const$. На рис.78 представлено векторну діаграму синхронного генератора з АРЗ сильної дії при збільшенні кута навантаження δ . При зниженні напруги генератора при зростанні кута δ , АРЗ збільшує струм збудження генератора, а з ним і синхронну ЕРС до тих пір, доки не відновиться попереднє значення напруги генератора.

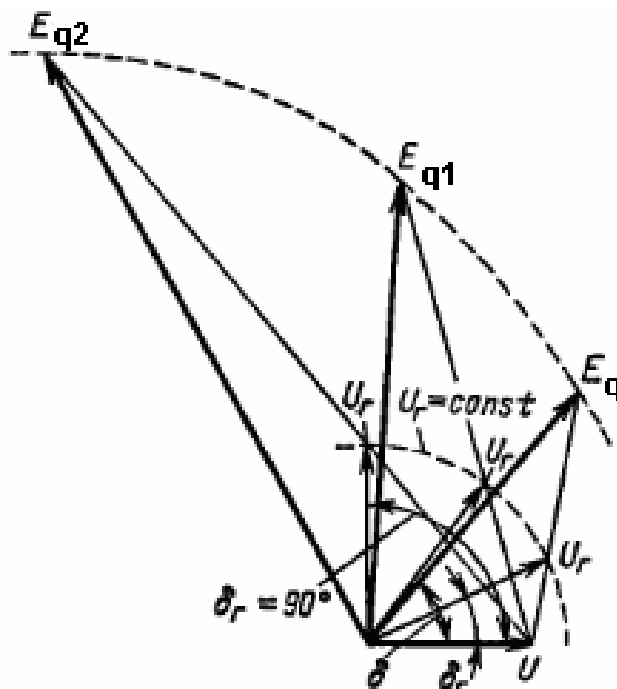


Рис.78 Векторна діаграма найпростішої системи з АРЗ генератора

Таким чином, при дослідженні усталеного режиму роботи генераторів з АРЗ слід виходити з постійності напруги генератора, значення синхронної ЕРС генератора при цьому буде зростати із збільшенням кута навантаження. Характеристика потужності при цьому носить більш складний характер ніж у генераторів без АРЗ (рис.79). Якщо побудувати сімейство синусоїд для різних режимів системи і, як наслідок, різних значень синхронної ЕРС генератора, можна отримати переходячи з однієї синусоїди на іншу зовнішню характеристику потужності системи з АРЗ. Зовнішня характеристика зростає навіть при значеннях кута навантаження $\delta > 90^\circ$, таким чином область стійкої роботи генератора з АРЗ збільшується.

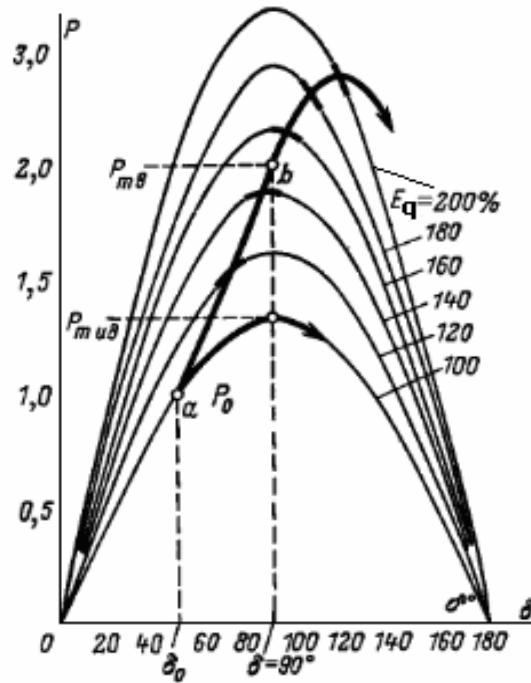


Рис.79 Характеристика потужності генератора з АРЗ

2.3 Динамічна стійкість електричної станції при роботі на шини нескінченної потужності

2.3.1 Дослідження динамічної стійкості системи за методом площ

Розглянемо роботу найпростішої системи (див. рис.59,а). Її еквівалентний опір при аналізі динамічних режимів складає:

$$X_e = X'_d + X_{T1} + \frac{X_{\pi}}{2} + X_{T2}. \quad (197)$$

Характеристика потужності системи для нормального режиму при аналізі динамічних режимів визначається як:

$$P = \frac{E'_q \cdot U}{X_e} \sin \delta. \quad (198)$$

Ця залежність представлена на рис.80, кривою I. Нехай на початку лінії Л2 відбулось несиметричне КЗ. Заступна схема мережі для цього випадку представлена на рис.81,а. В точці КЗ підключено еквівалентний аварійний шунт X_K . Опори схеми аварійного режиму утворюють «зірку». Для забезпечення зв'язку між ЕРС генератора та ШНП необхідно перетворити цю «зірку» на «трикутник» (рис.81,б). Опір «трикутника», що поєднує ЕРС генератора та ШНП в аварійному режимі дорівнює:

$$X_{ae} = X'_d + X_{T1} + \frac{X_{\pi}}{2} + X_{T2} - \frac{(X'_d + X_{T1}) \cdot \left(\frac{X_{\pi}}{2} + X_{T2} \right)}{X_K}. \quad (199)$$

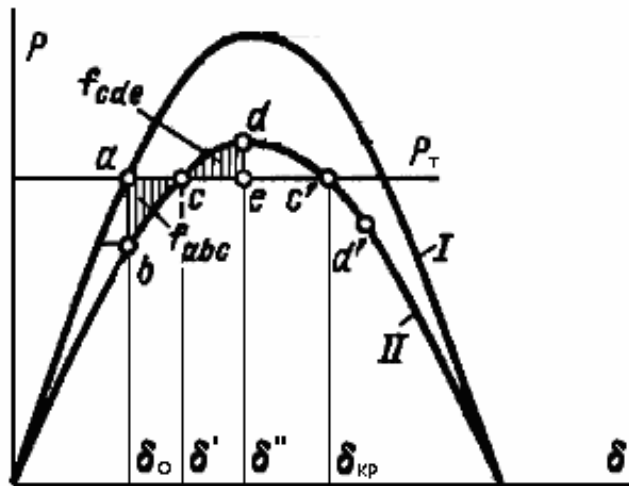


Рис.80 Визначення методу площ при аналізі динамічної стійкості системи

Характеристика потужності в аварійному режимі буде описуватись таким виразом:

$$P_{ae} = \frac{E'_q \cdot U}{X_{ae}} \sin \delta. \quad (200)$$

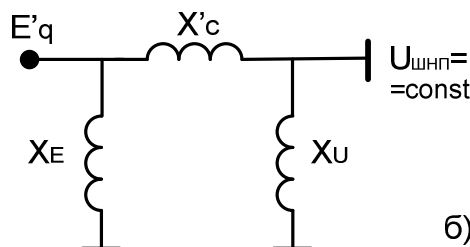
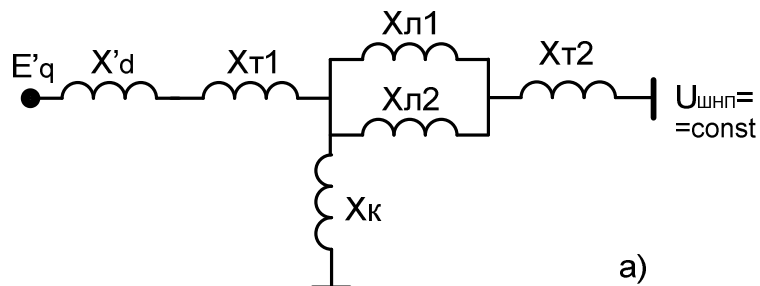


Рис.81 Заступна схема системи при КЗ на початку лінії (а) та схема еквівалентного «трикутника» (б)

Очевидно, що $X_{ae} > X_e$, тому максимум характеристики в аварійному режимі буде меншим ніж максимум характеристики нормального режиму. Ця залежність представлена на рис.80, кривою II.

В нормальному режимі робочою точкою генератора була точка \$a\$. В момент КЗ відбувається зміна індуктивності системи і перехід з однієї характеристики потужності на іншу – в точку \$b\$. В результаті цього на валу генератора виникає надлишковий момент розгону під впливом якого ротор прискорюється та кут навантаження зростає. Цей процес спостерігається до точки \$c\$, у який буде баланс моментів і ротор припинить розганятись. Площа

f_{abc} називається площею розгону і визначається (у відносних одиницях, коли момент дорівнює потужності $M^* = P^*$) наступним чином:

$$f_{abc} = \int_{\delta_0}^{\delta'} \Delta M \cdot d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta'} \Delta P \cdot d\delta. \quad (201)$$

В точці c надлишок потужності (та моменту) дорівнює нулю, ротор за інерцією проходить далі, де рівновага потужностей і моментів знов порушується, але вже переважає гальмівний момент. Ротор починає гальмувати і в деякій точці d відносно переміщення ротора припиниться. Якщо з точки d провести перпендикуляр на характеристику турбіни, можна отримати точку e . Площа фігури cde визначається аналогічно до площі abc :

$$f_{cde} = \int_{\delta'}^{\delta''} (-\Delta M) \cdot d\delta = \int_{\delta'}^{\delta''} (-\Delta P) \cdot d\delta. \quad (202)$$

Згідно із законом збереження енергії, вся надлишкова енергія, накопичена під час розгону, буде віддана під час гальмування, оскільки площі фігур abc та cde пропорційні цим значенням енергії, умова рівноваги системи в динамічному режимі запишеться наступним чином:

$$f_{abc} = f_{cde}. \quad (203)$$

Максимально можлива площа гальмування на рис.80 це площа $f_{cdc'}$. Наслідком (203) є наступний висновок: якщо площа розгону в динамічному режимі системи менша за площу гальмування $f_{abc} < f_{cdc'}$, система буде динамічно стійкою. Якщо площа розгону в динамічному режимі системи більша за площу гальмування $f_{abc} > f_{cdc'}$, система буде динамічно нестійкою. За умови рівності цих площ, система буде на межі стійкості. Динамічну стійкість системи характеризує коефіцієнт запасу динамічної стійкості, який визначається як відношення площі гальмування до площі розгону:

$$K_d = \frac{f_{cdc'}}{f_{abc}}. \quad (204)$$

Система динамічно стійка коли $K_d > 1$.

2.3.2 Поняття граничного розрахункового кута відключення

В реальних аварійних режимах максимум аварійної характеристики потужності, зазвичай, менший за потужність турбіни, тобто площі гальмування немає і система однозначно є динамічно нестійкою. Ефективною мірою для збереження динамічної стійкості системи в такому випадку є відключення пошкодженої ділянки системи. Після відключення пошкодженої лінії Л2 післяаварійна схема прийме вид, представлений вище на рис.64,а, а заступна схема – вид, представлений на рис.64,б. Еквівалентний індуктивний опір післяаварійної схеми визначається наступним чином:

$$X_{n/ae} = X_d' + X_{T1} + X_n + X_{T2}. \quad (205)$$

Цей опір більший за опір нормального режиму X_e , але менший за опір аварійного режиму X_{ae} . Як наслідок, характеристика потужності системи в післяаварійному режимі піде нижче ніж характеристика нормального режиму і

вище ніж характеристика аварійного режиму (характеристика III на рис.82) і описується таким виразом:

$$P_{п/ав} = \frac{E'_q \cdot U}{X_{п/ав}} \sin \delta. \quad (206)$$

В нормальному режимі робочою точкою генератора була точка *a* (характеристика I). В момент КЗ відбувається перехід з характеристики I на характеристику II – в точку *b*. Потужність, що передається, знижується, ротор починає розганятись. В точці *c* надлишок потужності (та моменту) дорівнює нулю, ротор за інерцією проходить далі. Нехай в деякій точці *d* відбувається відключення пошкодженої лінії. При цьому відбувається перехід з характеристики II на характеристику III – в точку *e*. Внаслідок цього, потужність, що віддається генератором, значно підвищується і максимально можлива площа гальмування визначається фігурою *cdefc'*, яка значно більша ніж площа при невідключеному КЗ. Ця площа буде тим більшою, чим раніше відключиться пошкодження, тобто чим меншим є кут відключення $\delta_{отк}$.

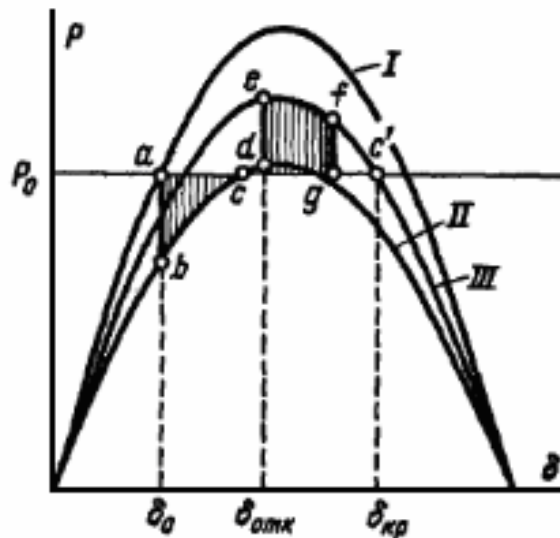


Рис.82 Визначення граничного кута відключення

Для оцінювання динамічної стійкості системи необхідно знати граничний кут відключення, тобто такий кут за якого площа розгону буде дорівнювати площі гальмування: $f_{abc} = f_{cdec'}$. Цей кут визначається аналітичним шляхом:

$$f_{abc} = \int_{\delta_0}^{\delta_{отк}} (P_T - P_{ав-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta; \quad (207)$$

$$f_{cdec'} = \int_{\delta_{отк}}^{\delta_{кр}} (P_T - P_{п/ав-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta. \quad (208)$$

$$f_{abc} + f_{cdec'} = \int_{\delta_0}^{\delta_{отк}} (P_T - P_{ав-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{отк}}^{\delta_{кр}} (P_T - P_{п/ав-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta = 0. \quad (209)$$

При рішенні цього рівняння відносно шуканого кута відключення $\delta_{отк}$ отримується наступний вираз (в радіанах):

$$\delta_{отк} = \arccos \left[\frac{P_T \cdot (\delta_{кр} - \delta_0) + P_{п/ав-МАХ} \cdot \cos \delta_{кр} - P_{ав-МАХ} \cdot \cos \delta_0}{P_{п/ав-МАХ} - P_{ав-МАХ}} \right]. \quad (210)$$

Фізичний сенс кута відключення $\delta_{отк}$ полягає в тому, що якщо відключення пошкодженого елемента системи відбудеться при куті меншому за $\delta_{отк}$, то система залишиться динамічно стійкою оскільки в цьому випадку площа розгону буде меншою за площу гальмування. Якщо відключення відбудеться при куті більшому за $\delta_{отк}$, то система буде динамічно нестійкою, оскільки площа розгону буде більшою за площу гальмування.

Якщо розрахунковий кут відключення $\delta_{отк}$ виявляється більшим за кут $\delta_{кр}$ або меншим за δ_0 , це означає що реально такого кута не існує.

2.3.3 Поняття граничного розрахункового кута АПВ

Якщо в розглядуваній найпростішій системі лінії довгі, а КЗ важке (наприклад, трифазне за якого $X_K = 0$ і $P_{ав-МАХ} = 0$), то відключення пошкодженого елемента системи для збереження її динамічної стійкості може виявитись недостатньо. Оскільки більшість КЗ в системі є нестійкими, то для збереження динамічної стійкості системи або підвищення її запасу рекомендовано через деякий час здійснити автоматичне повторне включення (АПВ) пошкодженого елемента. Це дасть змогу повернутись, в разі самоліквідації КЗ, на характеристику доаварійного режиму (характеристика I на рис.83) і збільшити площу гальмування.

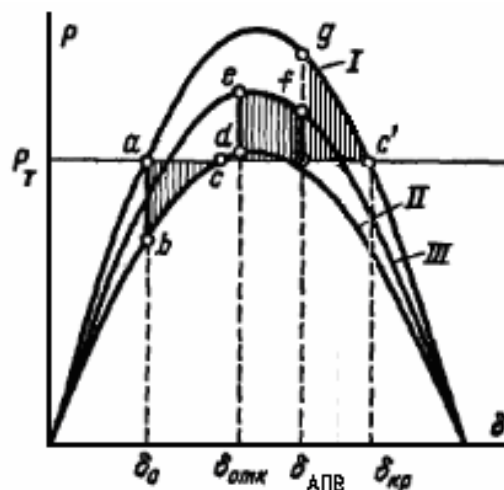


Рис.83 Визначення граничного кута АПВ

В доаварійному режимі робочою точкою генератора була точка a (характеристика I). В момент КЗ відбувається перехід з характеристики I на характеристику II – в точку b . Потужність, що передається, знижується і ротор починає розганятись. В точці c надлишок потужності (та моменту) дорівнює нулю, ротор за інерцією проходить далі. В точці d відбувається відключення пошкодженої лінії. При цьому відбувається перехід з характеристики II на характеристику III – в точку e , як наслідок потужність, що віддається

генератором, значно підвищується і ротор починає гальмувати більш сильно. Нехай в деякій точці f відбувається АПВ пошкодженої лінії. За умови що КЗ було нестійким і встигло самоліквідуватись відбувається перехід з характеристики III на характеристику I – в точку g . Потужність, що віддається генератором, підвищується до свого доаварійного рівня і максимально можлива площа гальмування визначається фігурою $cdefgc'$, площа якої суттєво більша ніж площа тільки при відключенні КЗ. Ця площа буде тим більшою, чим раніше відбудеться АПВ, тобто чим меншим є кут АПВ $\delta_{АПВ}$ (за умови, що фактичний кут відключення пошкодження залишається незмінним $\delta_{отк}^{факт}$). Для оцінювання динамічної стійкості системи необхідно знати граничний кут АПВ, тобто такий кут за якого площа розгону буде дорівнювати площі гальмування: $f_{abc} = f_{cdefgc'}$. Цей кут визначається аналітичним шляхом:

$$f_{abc} = \int_{\delta_0}^{\delta_{отк}^{факт}} (P_T - P_{ae-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta; \quad (211)$$

$$f_{cdefgc'} = \int_{\delta_{отк}^{факт}}^{\delta_{АПВ}} (P_T - P_{п/ae-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{АПВ}}^{\delta_{кр}} (P_T - P_{MAX} \cdot \sin \delta) d\delta. \quad (212)$$

$$f_{abc} + f_{cdefgc'} = \int_{\delta_0}^{\delta_{отк}^{факт}} (P_T - P_{ae-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{отк}^{факт}}^{\delta_{АПВ}} (P_T - P_{п/ae-MAX} \cdot \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{АПВ}}^{\delta_{кр}} (P_T - P_{MAX} \cdot \sin \delta) d\delta = 0. \quad (213)$$

При рішенні цього рівняння відносно шуканого кута АПВ $\delta_{АПВ}$ отримується наступний вираз (в радіанах):

$$\delta_{АПВ} = \arccos \left[\frac{P_T (\pi - 2\delta_0) - (P_{п/ae-MAX} - P_{ae-MAX}) \cos \delta_{отк}^{факт} - (P_{MAX} - P_{ae-MAX}) \cos \delta_0}{P_{MAX} - P_{п/ae-MAX}} \right]. \quad (214)$$

Фізичний сенс кута АПВ $\delta_{АПВ}$ полягає в тому, що якщо повторне включення елемента системи, який було пошкоджено, відбудеться при куті меншому за $\delta_{АПВ}$, то система залишиться динамічно стійкою оскільки в цьому випадку площа розгону буде меншою за площу гальмування. Якщо відключення відбудеться при куті більшому за $\delta_{АПВ}$, то система буде динамічно нестійкою, оскільки площа розгону буде більшою за площу гальмування.

Якщо розрахунковий кут АПВ $\delta_{АПВ}$ виявляється більшим за кут $\delta_{кр}$ або меншим за δ_0 це означає що реально такого кута не існує.

2.3.4 Метод послідовних інтервалів при дослідженні динамічної стійкості системи при несиметричних КЗ

На практиці, для того, щоб висунути певні вимоги до вимикачів, релейного захисту та автоматики щодо швидкості відключення та АПВ необхідно знати не кути $\delta_{отк}$ та $\delta_{АПВ}$, а проміжки часу за які ротор встигає

досягнути цих кутів. Цими проміжками часу є гранично допустимий час відключення $t_{отк}$ та гранично допустимий час АПВ $t_{АПВ}$.

За допомогою методу площ визначити $t_{отк}$ та $t_{АПВ}$ неможливо, для цього необхідно використати інший метод аналізу динамічної стійкості – метод послідовних інтервалів. Метод послідовних інтервалів полягає в розв'язанні диференційного рівняння руху ротора відносно часу t .

Рівняння руху ротора. Диференційне рівняння руху ротора виводиться з другого закону Ньютона для обертального руху:

$$M = J \cdot \varepsilon, \quad (215)$$

де J - момент інерції тіла, що обертається (в даному випадку – механічної системи «ротатор-турбіна»), ε - кутове прискорення, M - обертальний момент.

Відомо, що кутове прискорення є першою похідною від кутової швидкості ω і другою похідною від кута повороту, в якості котрого в генераторі виступає кут навантаження δ . Тоді, рівняння (215) можна записати наступним чином:

$$M = J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (216)$$

Це рівняння містить механічні параметри системи «ротатор-турбіна». Для того, щоб перейти від механічних величин до електричних використовується наступне співвідношення:

$$M_H \cdot \omega_H = P_H. \quad (217)$$

Розділимо вираз (216) на вираз (217):

$$\frac{M}{M_H \cdot \omega_H} = \frac{J}{P_H} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}, \quad (218)$$

та перетворимо його:

$$M^* = \frac{J \cdot \omega_H}{P_H} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (219)$$

Помножимо та розділимо праву частину виразу (219) на номінальну кутову швидкість обертання ротора:

$$M^* = \frac{\omega_H}{\omega_H} \cdot \frac{J \cdot \omega_H}{P_H} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{1}{\omega_H} \cdot \frac{J \cdot \omega_H^2}{P_H} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2}. \quad (220)$$

Добуток моменту інерції на квадрат кутової швидкості, розділений на потужність представляє собою сталу часу інерції системи «ротатор-турбіна»:

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_H^2}{P_H}. \quad (221)$$

З урахуванням виразу (221), а також того, що у відносних одиницях момент дорівнює потужності, отримуємо рівняння руху ротора, яке містить тільки електричні параметри:

$$\frac{T_J}{\omega_H} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P^* = P_T - P_{Г-МАХ} \cdot \sin\delta. \quad (222)$$

За допомогою рівняння руху ротора можна визначити гранично допустимий час відключення $t_{отк}$ та гранично допустимий час АПВ $t_{АПВ}$.

У найпростішому випадку – при трифазному КЗ $P_{Г-MAX} = 0$. В цьому випадку рівняння (222) має такий вигляд:

$$\frac{T_J}{\omega_H} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T. \quad (223)$$

Отримане диференційне рівняння є лінійним диференціальним рівнянням другого порядку і його розв'язок можна отримати аналітичним шляхом двічі його проінтегрувавши за dt :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} \rightarrow \frac{d\delta}{dt} = \int \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} dt = \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} t + C_1. \quad (224)$$

З початкових умов (при $t = 0$) визначається що $C_1 = \frac{d\delta}{dt} = 0$.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} t \rightarrow \delta = \int \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} t \cdot dt = \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} \cdot \frac{t^2}{2} + C_2. \quad (225)$$

З початкових умов (при $t = 0$) визначається що $C_2 = \delta = \delta_0$, таким чином:

$$\delta(t) = \frac{P_T \cdot \omega_H}{T_J} \cdot \frac{t^2}{2} + \delta_0. \quad (226)$$

Підставивши в (226) значення граничного кута відключення $\delta_{отк}$ та граничного кута АПВ $\delta_{АПВ}$ можна визначити гранично допустимий час відключення $t_{отк}$ та гранично допустимий час АПВ $t_{АПВ}$ відповідно.

У випадку несиметричного КЗ $P_{Г-MAX} \neq 0$. В цьому випадку рівняння (222) є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку. Рішення такого рівняння визначається чисельним методом послідовних інтервалів. Для цього весь процес коливання ротора генератора розбивається на ряд невеликих інтервалів Δt і для кожного з цих інтервалів визначається наближене значення приросту кута навантаження $\Delta\delta$ (рис.84).

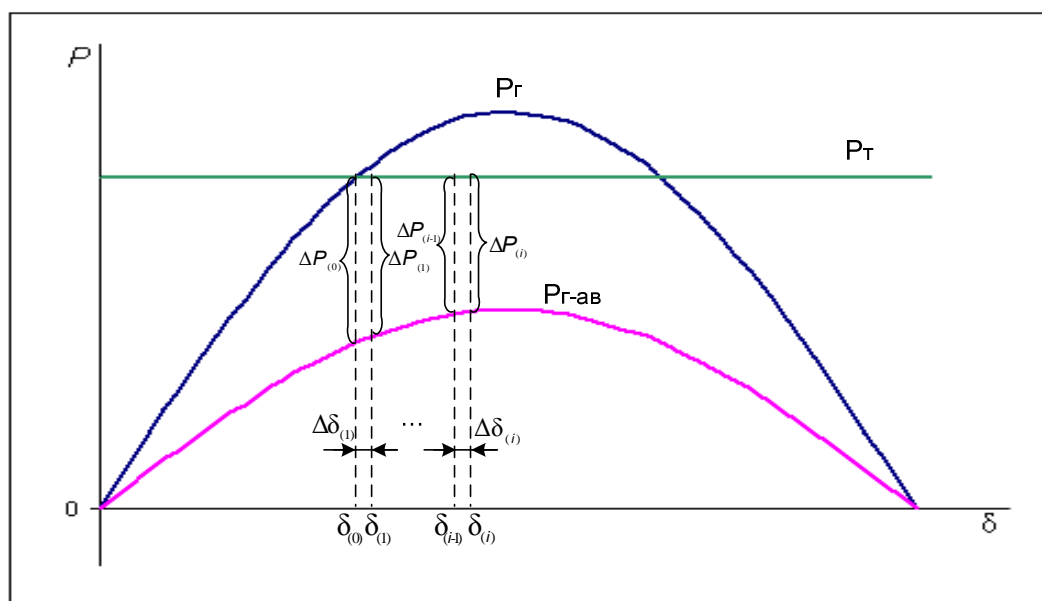


Рис.84 Метод послідовних інтервалів

В момент КЗ потужність, що віддається генераторами, знижується і виникає надлишок потужності $\Delta P_{(0)} = P_T - P_{Г-МАХ} \cdot \sin \delta_{(0)}$. Для достатньо малого інтервалу часу Δt можна припустити, що надлишок потужності на ньому залишиться незмінним, тоді приріст кута навантаження визначається як:

$$\Delta \delta_{(1)} = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P_{(0)} \cdot \Delta t^2}{T_J \cdot 2}. \quad (227)$$

Значення кута навантаження на першому кроці визначається як:

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta \delta_{(1)}. \quad (228)$$

Загальна ітераційна формула для і-того інтервалу виглядає наступним чином:

$$\Delta \delta_{(i)} = \frac{\omega_0 \cdot \Delta P_{(i-1)} \cdot \Delta t^2}{T_J \cdot 2}; \quad (229)$$

$$\delta_{(i)} = \delta_{(i-1)} + \Delta \delta_{(i)}. \quad (230)$$

Якщо на початку деякого k-того інтервалу відбувається відключення КЗ або АПВ то надлишок потужності стрибкоподібно змінюється з величини $\Delta P'_{(k-1)}$ до величини $\Delta P''_{(k-1)}$. При визначенні приросту кута на цьому інтервалі значення надлишку потужності визначається як середнє між цими двома значеннями:

$$\Delta P_{(k-1)} = \frac{\Delta P'_{(k-1)} + \Delta P''_{(k-1)}}{2}. \quad (231)$$

Значення інтервалу Δt рекомендовано брати в межах 0,01...0,05 с.

2.4 Статична стійкість електричної станції при роботі на шини нескінченної потужності

2.4.1 Поняття стійкості системи за Ляпуновим

Нехай деяка система описується наступною системою диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= f_1(y_1, \dots, y_n); \\ \dot{y}_2 &= f_2(y_1, \dots, y_n); \\ &\dots \\ \dot{y}_n &= f_n(y_1, \dots, y_n). \end{aligned} \quad (232)$$

Деякий чітко виражений рух системи, який підлягає дослідженню на стійкість, називається незбуреним рухом. Координати початку незбуреного руху визначаються як $Y = (y_{10}, y_{20}, \dots, y_{n0})$. Якщо дати координатам приріст μ , то змінні y_i , $i = 1, \dots, n$ почнуть змінюватись відповідно до своїх законів руху, виражених системою (232).

В загальному випадку функції f_i , $i = 1, \dots, n$, які визначають праві частини рівнянь системи (232) є нелінійними. Для аналізу стійкості такої системи за

методом Ляпунова ці функції розкладають в ряд Тейлора. Після цього система рівнянь (232) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= a_{11} \cdot y_1 + a_{12} \cdot y_2 + \dots + a_{1n} \cdot y_n + Y_1; \\ \dot{y}_2 &= a_{21} \cdot y_1 + a_{22} \cdot y_2 + \dots + a_{2n} \cdot y_n + Y_2; \\ &\dots \\ \dot{y}_n &= a_{n1} \cdot y_1 + a_{n2} \cdot y_2 + \dots + a_{nn} \cdot y_n + Y_n. \end{aligned} \quad (233)$$

Члени ряду Тейлора з коефіцієнтами a_{ij} є лінійними, всі нелінійні члени в системі (233) позначені як Y_j . Якщо в системі (233) відкинути усі нелінійні члени, то буде отримана так звана система першого наближення:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= a_{11} \cdot y_1 + a_{12} \cdot y_2 + \dots + a_{1n} \cdot y_n; \\ \dot{y}_2 &= a_{21} \cdot y_1 + a_{22} \cdot y_2 + \dots + a_{2n} \cdot y_n; \\ &\dots \\ \dot{y}_n &= a_{n1} \cdot y_1 + a_{n2} \cdot y_2 + \dots + a_{nn} \cdot y_n. \end{aligned} \quad (234)$$

Визначення стійкості руху за Ляпуновим. Нехай існує дві області: ε - область граничних станів системи та δ - область допустимих початкових збурень. Якщо для будь-якого додатного та скільки завгодно малого ε можна знайти таке додатне δ , за якого для всіх збурень y_{0j} , що відповідають умові $\sum y_{0j}^2 \leq \delta$, буде виконуватись нерівність $\sum y_j^2 \leq \varepsilon$, то незбурений рух є стійким, а в протилежному – нестійким.

Якщо рух стійкий, то для квадрату зі стороною ε має існувати квадрат зі стороною δ такий, що будь-який рух, який розпочнеться в межах квадрату зі стороною δ , не вийде за межі квадрату зі стороною ε . Якщо рух нестійкий, то знайдеться хоча б одна траєкторія, яка перетне квадрат зі стороною ε (рис.85).

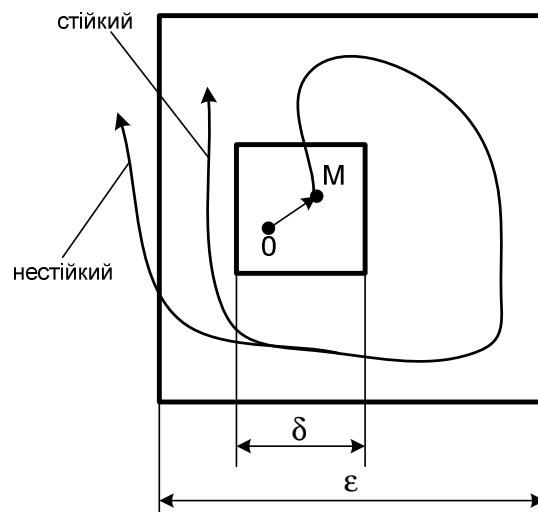


Рис.85 Геометричне представлення стійкості руху за Ляпуновим

Теорема Ляпунова про стійкість руху за системою першого наближення. Якщо всі дійсні частини всіх коренів характеристичного рівняння системи диференціальних рівнянь першого наближення від'ємні, то незбурений рух є

стійким незалежно від нелінійних членів. Якщо серед коренів характеристичного рівняння буде хоча б один з додатною дійсною частиною, то незбурений рух буде нестійким.

Для складання характеристичного рівняння системи першого наближення треба записати систему рівнянь (234) в матричній формі:

$$\dot{Y} = [A] \cdot Y, \quad (235)$$

або в розгорнутому вигляді:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dots \\ \dot{y}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}. \quad (236)$$

Характеристичне рівняння системи (236) має вигляд:

$$\det([A] - \lambda \cdot [E]) = 0, \quad (237)$$

де $[E]$ - одинична матриця.

В розгорнутому вигляді характеристичне рівняння (237) записується наступним чином:

$$\det \begin{bmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{bmatrix} = 0. \quad (238)$$

Знайшовши визначник матриці (238), який представляє собою поліном n -ного порядку відносно λ , та прирівнявши його до нуля визначаються корені характеристичного рівняння $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, за виглядом яких визначається стійкість незбуреного руху.

2.4.2 Дослідження статичної стійкості найпростішої системи за методом Ляпунова

Аналіз статичної стійкості найпростішої системи за методом Ляпунова виконується за допомогою диференційного рівняння руху ротора (222). Це рівняння є диференціальним рівнянням другого порядку, але, враховуюче те, що кутове прискорення ротора є другою похідною від кута навантаження і першою похідною від кутової швидкості, а кутова швидкість в свою чергу є першою похідною від кута навантаження рівняння (222) можна представити у вигляді системи з двох диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= \frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_T - \frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_{\Gamma-MAX} \cdot \sin \delta; \\ \frac{d\delta}{dt} &= s, \end{aligned} \quad (239)$$

де $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ - це ковзання – відносна різниця швидкості обертання поля статора і ротора віднесена до швидкості обертання поля статора.

Перше рівняння системи (239) є нелінійним, його праву частину необхідно розкласти в ряд Тейлора:

$$f(\delta) = f(\delta_0) + \frac{df(\delta)}{dt}(\delta - \delta_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2f(\delta)}{dt^2}(\delta - \delta_0)^2 + \dots \quad (240)$$

Третій та всі наступні члени ряду Тейлора є нелінійними і відкидаються. Після цього права частина рівняння набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} f(\delta) &= f(\delta_0) + \frac{df(\delta)}{dt}(\delta - \delta_0) = \frac{\omega_H}{T_J} \cdot (P_T - P_{\Gamma-MAX} \cdot \sin \delta_0) + \\ &+ \frac{\omega_H}{T_J} \cdot \frac{d(P_T - P_{\Gamma-MAX} \cdot \sin \delta_0)}{dt} \cdot (\delta - \delta_0) = \frac{\omega_H}{T_J} \cdot (P_T - P_{\Gamma-MAX} \cdot \sin \delta_0) - \\ &- \frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_{\Gamma-MAX} \cdot \cos \delta_0 \cdot (\delta - \delta_0) = \frac{\omega_H}{T_J} \cdot (P_T - P_{\Gamma-MAX} \cdot \sin \delta_0) - \\ &- \frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_{\Gamma-MAX} \cdot \cos \delta_0 \cdot \delta + \frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_{\Gamma-MAX} \cdot \cos \delta_0 \cdot \delta_0. \end{aligned} \quad (241)$$

Перша і третя складові не залежать від кута навантаження δ , а значить вважаються нелінійностями і відкидаються. Таким чином, система рівнянь першого наближення набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -\frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_{\Gamma-MAX} \cdot \cos \delta_0 \cdot \delta; \\ \frac{d\delta}{dt} &= s. \end{aligned} \quad (242)$$

При розв'язанні системи (242) будуть отримані незагасаючі коливання, однак оскільки генератор має демпферні контури в першому рівнянні необхідно врахувати демпфування коливань $-D \cdot s$, де D - коефіцієнт демпфування. Також для зручності введено коефіцієнт $C = \frac{\omega_H}{T_J} \cdot P_{\Gamma-MAX} \cdot \cos \delta_0$:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -C \cdot \delta - D \cdot s; \\ \frac{d\delta}{dt} &= s. \end{aligned} \quad (243)$$

В матричному вигляді ця система записується наступним чином:

$$\begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D & -C \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s \\ \delta \end{bmatrix}. \quad (244)$$

Характеристичне рівняння системи (244) має такий вид:

$$\det \begin{bmatrix} -D - \lambda & -C \\ 1 & -\lambda \end{bmatrix} = (-D - \lambda) \cdot (-\lambda) - (-C) \cdot 1 = \lambda^2 + \lambda D + C = 0. \quad (245)$$

Характеристичне рівняння (245) має два корені, які дорівнюють:

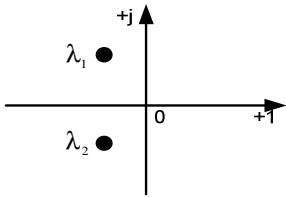
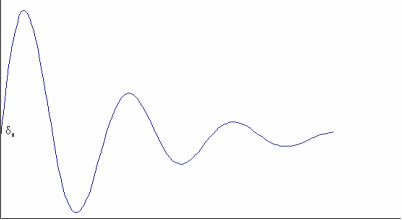
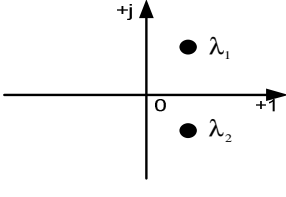
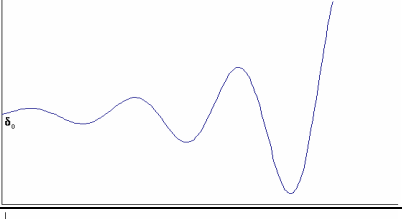
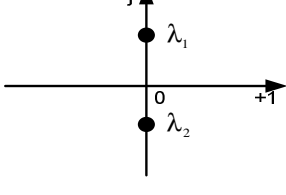
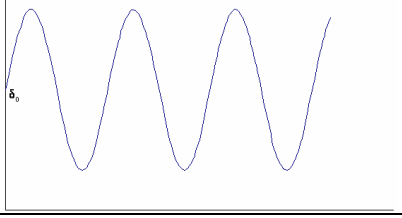
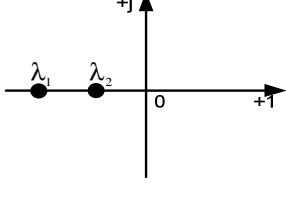
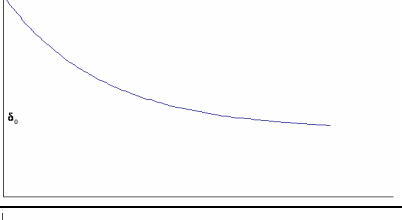
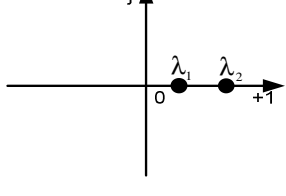
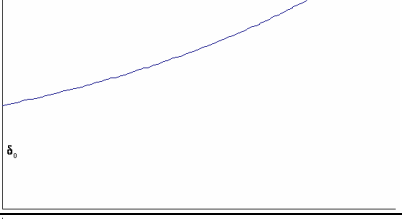
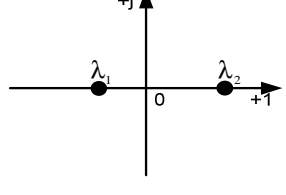
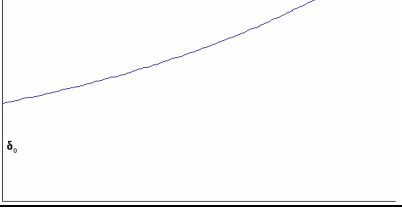
$$\lambda_{1,2} = -\frac{D}{2} \pm \frac{\sqrt{D^2 - 4C}}{2}. \quad (246)$$

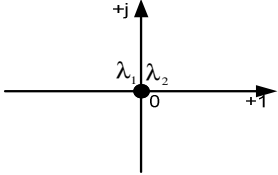
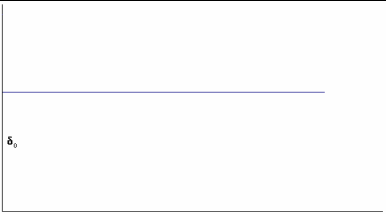
Знаючи корені можна записати рішення диференційного рівняння руху ротора:

$$\delta(t) = \delta_0 + A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (247)$$

Коефіцієнти A_1 та A_2 визначаються з початкових умов, але для визначення характеру процесу їхнє визначення не є необхідним. Характер процесу визначається тільки видом коренів характеристичного рівняння λ_1 та λ_2 (табл.4).

Таблиця 4. Аналіз стійкості найпростішої системи за методом Ляпунова (за видом коренів характеристичного рівняння)

Вид коренів	Положення коренів на комплексній площині	Зміна кута навантаження під час перехідного процесу	Характер процесу
Комплексно-спряжені корені з від'ємною дійсною частиною			Стійкий
Комплексно-спряжені корені з додатною дійсною частиною			Нестійкий
Комплексно-спряжені корені з дійсною частиною рівною нулю			На межі стійкості
Дійсні від'ємні корені			Стійкий
Дійсні додатні корені			Нестійкий
Від'ємний та додатній дійсні корені			Нестійкий

Дійсні нульові корені			На межі стійкості
-----------------------	---	--	-------------------

З результатів, приведених в табл.4, можна зробити наступні висновки:

- 1) якщо корені характеристичного рівняння дійсні, процес буде носити аперіодичний характер;
- 2) якщо корені характеристичного рівняння комплексні, процес буде носити коливальний характер;
- 3) якщо обидва корені мають від'ємну дійсну частину, процес буде стійким;
- 4) якщо хоча б один корінь має додатну дійсну частину, процес буде нестійким;
- 5) якщо дійсні частини обох коренів нульові, процес буде на межі стійкості.

3 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

3.1 Електромагнітні перехідні процеси

Задача №1

У електричній мережі, схема якої представлена на рис.86, надперехідна ЕРС генератора Г1 $\bar{E}_{q1}^{**} = 1,15$ в.о., надперехідний опір генератора Г1 $\bar{X}_{d1}^{**} = 0,18$ в.о., надперехідна ЕРС генератора Г2 $\bar{E}_{q2}^{**} = 1,22$ в.о., надперехідний опір генератора Г2 $\bar{X}_{d2}^{**} = 0,24$ в.о., опір трансформатора Т1 $\bar{X}_{T1}^* = 0,75$ в.о., опір трансформатора Т2 $\bar{X}_{T2}^* = 0,6$ в.о., опір лінії Л1 $\bar{X}_{Л1}^* = 0,2$ в.о., опір лінії Л2 $\bar{X}_{Л2}^* = 0,3$ в.о., опір лінії Л3 $\bar{X}_{Л3}^* = 0,27$ в.о. Базисний струм дорівнює $I_B = 18$ кА.

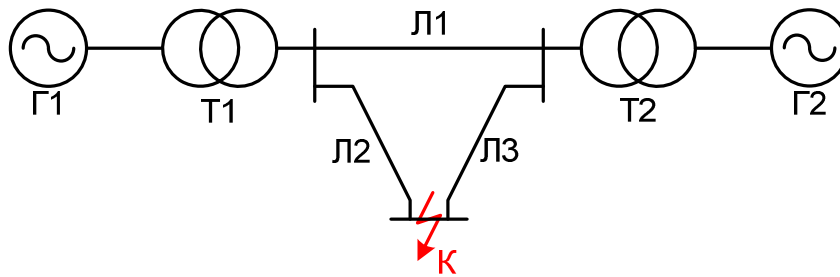


Рис.86 Електрична схема мережі

В точці К відбулось трифазне КЗ. Визначити діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ $I_{п,0}^{(3)}$ (в іменованих одиницях) в початковий момент КЗ ($t = 0$).

Рішення

Складається заступна схема мережі (рис.87) для початкового моменту КЗ ($t = 0$).

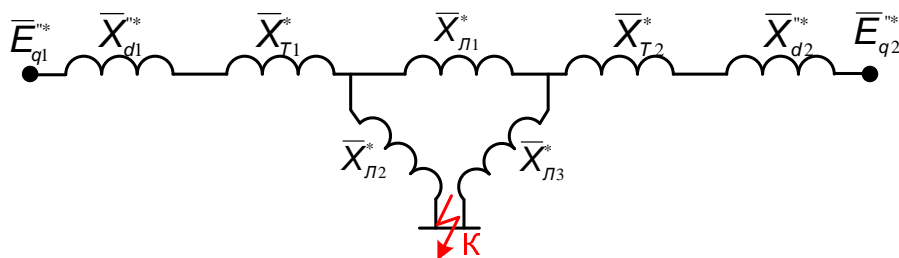


Рис.87 Заступна схема мережі

Задача розв'язується за методом еквівалентного перетворення. Заступна схема з рис.87 спрощується до однопроменевої еквівалентної. Параметри елементів заступної схеми у завданні вже є приведеними до одного рівня напруги. Розрахунок ведеться у відносних одиницях. На першому етапі перетворення трикутник, утворений опорами $\bar{X}_{\pi 1}^*$, $\bar{X}_{\pi 2}^*$, $\bar{X}_{\pi 3}^*$ перетворюється в еквівалентну зірку за формулами з табл.2.

$$\bar{X}_{e1}^* = \frac{\bar{X}_{\pi 1}^* \cdot \bar{X}_{\pi 2}^*}{\bar{X}_{\pi 1}^* + \bar{X}_{\pi 2}^* + \bar{X}_{\pi 3}^*} = \frac{0,2 \cdot 0,3}{0,2 + 0,3 + 0,27} = 0,078 \text{ в.о.}, \quad (248)$$

$$\bar{X}_{e2}^* = \frac{\bar{X}_{\pi 2}^* \cdot \bar{X}_{\pi 3}^*}{\bar{X}_{\pi 1}^* + \bar{X}_{\pi 2}^* + \bar{X}_{\pi 3}^*} = \frac{0,3 \cdot 0,27}{0,2 + 0,3 + 0,27} = 0,105 \text{ в.о.}, \quad (249)$$

$$\bar{X}_{e3}^* = \frac{\bar{X}_{\pi 1}^* \cdot \bar{X}_{\pi 3}^*}{\bar{X}_{\pi 1}^* + \bar{X}_{\pi 2}^* + \bar{X}_{\pi 3}^*} = \frac{0,2 \cdot 0,27}{0,2 + 0,3 + 0,27} = 0,07 \text{ в.о.} \quad (250)$$

Після першого етапу перетворення схема має вигляд, представлений на рис.88.

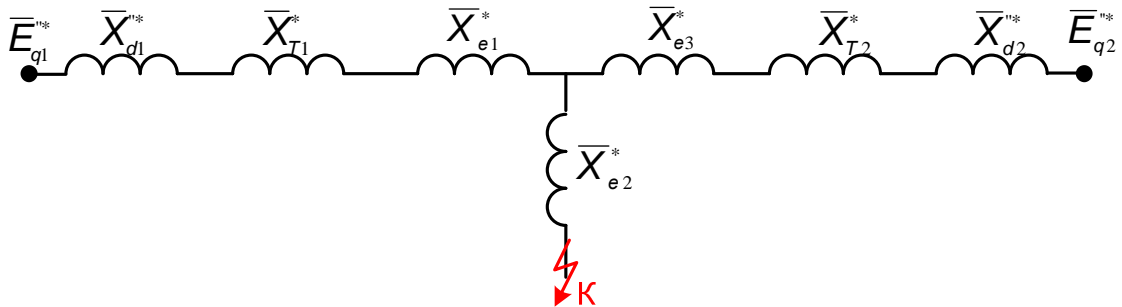


Рис.88 Заступна схема мережі після першого етапу перетворення

На другому етапі перетворення еквівалентуються всі послідовні елементи заступної схеми:

$$\bar{X}_{e4}^* = \bar{X}_{d1}^* + \bar{X}_{T1}^* + \bar{X}_{e1}^* = 0,18 + 0,75 + 0,078 = 1,008 \text{ в.о.}; \quad (251)$$

$$\bar{X}_{e5}^* = \bar{X}_{d2}^* + \bar{X}_{T2}^* + \bar{X}_{e3}^* = 0,24 + 0,6 + 0,07 = 0,91 \text{ в.о.} \quad (252)$$

Заступна схема набуває вигляду, представленого на рис.89.

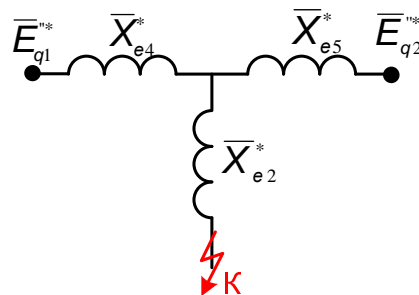


Рис.89 Заступна схема мережі після другого етапу перетворення

На третьому етапі перетворення еквівалентуються паралельні елементи заступної схеми з ЕРС:

$$\bar{E}_e^* = \frac{\frac{\bar{E}_{q1}^{**}}{\bar{X}_{e4}^*} + \frac{\bar{E}_{q2}^{**}}{\bar{X}_{e5}^*}}{\frac{1}{\bar{X}_{e4}^*} + \frac{1}{\bar{X}_{e5}^*}} = \frac{\frac{1,15}{1,008} + \frac{1,22}{0,91}}{\frac{1}{1,008} + \frac{1}{0,91}} = 1,187 \text{ в.о.}; \quad (253)$$

$$\bar{X}_{e6}^* = \left(\frac{1}{\bar{X}_{e4}^*} + \frac{1}{\bar{X}_{e5}^*} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1,008} + \frac{1}{0,91} \right)^{-1} = 0,478 \text{ в.о.} \quad (254)$$

Заступна схема набуває вигляду, представленого на рис.90.

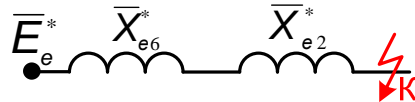


Рис.90 Заступна схема мережі після третього етапу перетворення

На останньому етапі перетворення еквівалентуються послідовні елементи, в результаті чого буде отримана однопроменева еквівалентна заступна схема (рис.91).

$$\bar{X}_e^* = \bar{X}_{e2}^* + \bar{X}_{e6}^* = 0,105 + 0,478 = 0,583 \text{ в.о.} \quad (255)$$

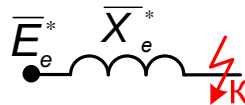


Рис.91 Еквівалентна однопроменева заступна схема мережі

За виразом (43) визначається струм трифазного КЗ (у відносних одиницях), що протікає в еквівалентній однопроменевій заступній схемі:

$$\bar{I}_{п,0}^* = \frac{\bar{E}_e^*}{\bar{X}_e^*} = \frac{1,187}{0,583} = 2,036 \text{ в.о.} \quad (256)$$

Струм трифазного КЗ у точці К в іменованих одиницях визначається як добуток отриманої величини і базисного струму:

$$I_{п,0} = \bar{I}_{п,0}^* \cdot I_B = 2,036 \cdot 18 = 36,65 \text{ кА.} \quad (257)$$

Задача №2

У електричній мережі, схема якої представлена на рис.92, синхронна ЕРС генератора дорівнює $\bar{E}_q^* = 1,8$ в.о., кратність форсування $K_f = 2$, синхронний опір складає $\bar{X}_d^* = 0,6$ в.о. Опір трансформатора дорівнює $\bar{X}_T^* = 0,5$ в.о. Опір ЛЕП $\bar{X}_{л1}^* = \bar{X}_{л2}^* = 0,6$ в.о. Базисний струм дорівнює $I_B = 12$ кА.

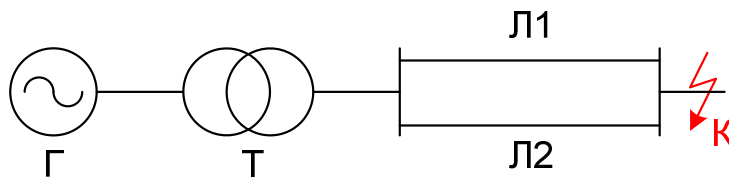


Рис.92 Схема електричної мережі

Визначити діюче значення усталеного струму трифазного КЗ I_{∞} (в іменованих одиницях) за умови, що:

а) величина критичного опору $\bar{X}_{KP}^* = 0,7$;

б) величина критичного опору $\bar{X}_{KP}^* = 0,9$.

Рішення

Для визначення діючого значення усталеного струму трифазного КЗ необхідно визначитись в якому режимі буде працювати генератор в усталеному аварійному режимі: в режимі граничного збудження або в режимі нормальної напруги. Для цього необхідно визначити величину зовнішнього опору мережі між генератором та місцем пошкодження. З цією метою складається заступна схема мережі (рис.93).

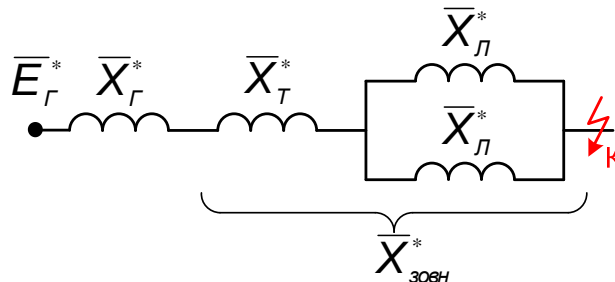


Рис.93 Заступна схема мережі

З заступної схеми видно, що зовнішній опір визначається як:

$$\bar{X}_{\text{зовн}}^* = \bar{X}_T^* + \frac{\bar{X}_L^*}{2} = 0,5 + \frac{0,6}{2} = 0,8 \text{ в.о.} \quad (258)$$

Розглянемо випадок (а): $\bar{X}_{KP}^* = 0,7$, тобто $\bar{X}_{KP}^* < \bar{X}_{\text{зовн}}^*$. Це є режим нормальної напруги генератора, тому до заступної схеми вносяться лише його вузол приєднання до ЕЕС з відомою напругою $\bar{U}_{\text{НОРМ}}^* = 1$. Тоді:

$$\bar{I}_{\infty}^* = \frac{\bar{U}_{\text{НОРМ}}^*}{\bar{X}_{\text{зовн}}^*} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ в.о.} \quad (259)$$

Струм усталеного трифазного КЗ у точці К в іменованих одиницях визначається як добуток отриманої величини і базисного струму:

$$I_{\infty} = \bar{I}_{\infty}^* \cdot I_B = 1,25 \cdot 12 = 15 \text{ кА.} \quad (260)$$

Розглянемо випадок (б): $\bar{X}_{KP}^* = 0,9$, тобто $\bar{X}_{KP}^* > \bar{X}_{\text{зовн}}^*$. Це є режим граничного збудження генератора, тому до заступної схеми генератор

вноситься синхронною ЕРС помноженою на кратність форсування та синхронним опором по вісі d. Тоді:

$$\bar{I}_{\infty}^* = \frac{K_f \cdot \bar{E}_q^*}{\bar{X}_d^* + \bar{X}_{\text{зовн}}^*} = \frac{2 \cdot 1,8}{0,6 + 0,8} = 2,571 \text{ в.о.} \quad (261)$$

Струм усталеного трифазного КЗ у точці К в іменованих одиницях визначається як добуток отриманої величини і базисного струму:

$$I_{\infty} = \bar{I}_{\infty}^* \cdot I_B = 2,571 \cdot 12 = 30,85 \text{ кА.} \quad (262)$$

Задача №3

У електричній схемі, представленій на рис.94, надперехідна ЕРС генератора дорівнює $\bar{E}_q^* = 1,1$ в.о., надперехідні опори генератора складають $\bar{X}_d^* = 0,25$ в.о., $\bar{X}_q^* = 0,15$ в.о. Опір трансформатора дорівнює $\bar{X}_T^* = 0,6$ в.о. Базисний струм дорівнює $I_B = 15$ кА.

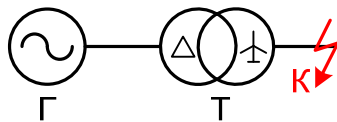


Рис.94 Електрична схема мережі

Визначити діюче значення періодичної складової:

- а) струму двофазного КЗ в точці К $I_{n,0}^{(2)}$ (в іменованих одиницях) в початковий момент часу $t = 0$;
- б) струму однофазного КЗ в точці К $I_{n,0}^{(1)}$ (в іменованих одиницях) в початковий момент часу $t = 0$;
- в) струму двофазного КЗ на землю в точці К $I_{n,0}^{(2\lambda)}$ (в іменованих одиницях) в початковий момент часу $t = 0$.

Рішення

Будь-який несиметричний режим можна представити заступною схемою симетричного режиму в якій місце КЗ віддалене від реального на аварійний шунт ΔZ , величина якого визначається видом КЗ, а реальний струм КЗ визначається як добуток отриманого струму КЗ прямої послідовності на множник m . Таким чином, для рішення задачі необхідно скласти заступні схеми мережі для прямої, зворотної та нульової послідовностей та виконати їхні еквівалентні перетворення.

Заступна схема прямої послідовності представлена на рис.95.

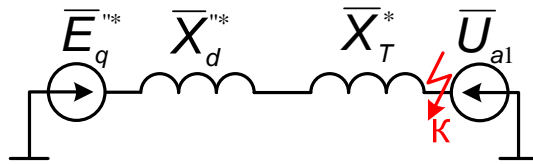


Рис.95 Заступна схема прямої послідовності

Еквівалентний опір прямої послідовності визначається як:

$$\bar{X}_1^* = \bar{X}_d^{**} + \bar{X}_T^* = 0,25 + 0,6 = 0,85 \text{ в.о.} \quad (263)$$

Заступна схема зворотної послідовності подібна до заступної схеми прямої послідовності за виключенням того, що ЕРС зворотної послідовності дорівнює 0, а генератор вноситься до схеми індуктивним опором зворотної послідовності, який визначається як:

$$\bar{X}_{\Gamma 2}^* = \frac{\bar{X}_d^{**} + \bar{X}_q^{**}}{2} = \frac{0,25 + 0,15}{2} = 0,2 \text{ в.о.} \quad (264)$$

Заступна схема зворотної послідовності представлена на рис.96.

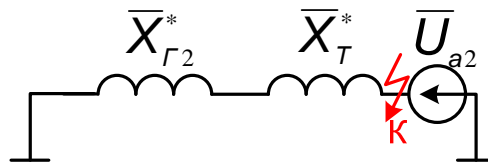


Рис.96 Заступна схема зворотної послідовності

Еквівалентний опір зворотної послідовності визначається як:

$$\bar{X}_2^* = \bar{X}_{\Gamma 2}^* + \bar{X}_T^* = 0,2 + 0,6 = 0,8 \text{ в.о.} \quad (265)$$

Заступна схема нульової послідовності складається починаючи від місця пошкодження. Трансформатор зі з'єднанням обмоток «зірка з нулем – трикутник» вноситься до заступної схеми опором прямої послідовності. Генератор в заступну схему не вноситься, оскільки не обтікається струмами нульової послідовності, які замикаються у «трикутнику» трансформатора. Заступна схема нульової послідовності представлена на рис.97.

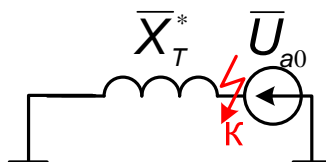


Рис.97 Заступна схема нульової послідовності

Еквівалентний опір нульової послідовності визначається як:

$$\bar{X}_0^* = \bar{X}_T^* = 0,6 \text{ в.о.} \quad (266)$$

Маючи значення еквівалентних опорів прямої, зворотної та нульової послідовностей визначаються:

а) струм двофазного КЗ в початковий момент часу. Аварійний шунт для двофазного КЗ дорівнює $\Delta Z = \bar{X}_2^*$. Періодична складова прямої послідовності струму двофазного КЗ складає:

$$\bar{I}_{A1}^* = \frac{\bar{E}_q^{**}}{\bar{X}_1^* + \bar{X}_2^*} = \frac{1,1}{0,85 + 0,8} = 0,667 \text{ в.о.}; \quad (267)$$

Множник для двофазного КЗ дорівнює $m^{(2)} = \sqrt{3}$. Періодична складова струму двофазного КЗ у відносних одиницях складає:

$$\bar{I}_{n,0}^{*(2)} = m^{(2)} \cdot \bar{I}_{A1}^* = \sqrt{3} \cdot 0,667 = 1,155 \text{ в.о.} \quad (268)$$

Періодична складова струму двофазного КЗ в іменованих одиницях складає:

$$I_{n,0}^{(2)} = \bar{I}_{n,0}^{*(2)} \cdot I_B = 1,155 \cdot 15 = 17,325 \text{ кА.} \quad (269)$$

б) струм однофазного КЗ в початковий момент часу. Аварійний шунт для однофазного КЗ дорівнює $\Delta Z = \bar{X}_2^* + \bar{X}_0^*$. Періодична складова прямої послідовності струму однофазного КЗ складає:

$$\bar{I}_{A1}^* = \frac{\bar{E}_q^{**}}{\bar{X}_1^* + \bar{X}_2^* + \bar{X}_0^*} = \frac{1,1}{0,85 + 0,8 + 0,6} = 0,489 \text{ в.о.} \quad (270)$$

Множник для однофазного КЗ дорівнює $m^{(1)} = 3$. Періодична складова струму однофазного КЗ у відносних одиницях складає:

$$\bar{I}_{n,0}^{*(1)} = m^{(1)} \cdot \bar{I}_{A1}^* = 3 \cdot 0,489 = 1,467 \text{ в.о.} \quad (271)$$

Періодична складова струму однофазного КЗ в іменованих одиницях складає:

$$I_{n,0}^{(1)} = \bar{I}_{n,0}^{*(1)} \cdot I_B = 1,467 \cdot 15 = 22,005 \text{ кА.} \quad (272)$$

в) струм двофазного КЗ на землю в початковий момент часу. Аварійний шунт для двофазного КЗ на землю дорівнює $\Delta Z = \frac{\bar{X}_2^* \cdot \bar{X}_0^*}{\bar{X}_2^* + \bar{X}_0^*}$. Періодична складова прямої послідовності струму однофазного КЗ складає:

$$\bar{I}_{A1}^* = \frac{\bar{E}_q^{**}}{\bar{X}_1^* + \frac{\bar{X}_2^* \cdot \bar{X}_0^*}{\bar{X}_2^* + \bar{X}_0^*}} = \frac{1,1}{0,85 + \frac{0,8 \cdot 0,6}{0,8 + 0,6}} = 0,922 \text{ в.о.} \quad (273)$$

Множник для двофазного КЗ на землю дорівнює:

$$m^{(2L)} = \frac{\sqrt{3}}{\bar{X}_2^* + \bar{X}_0^*} \sqrt{\bar{X}_2^{*2} + \bar{X}_2^* \cdot \bar{X}_0^* + \bar{X}_0^{*2}} = \frac{\sqrt{3}}{0,8 + 0,6} \sqrt{0,8^2 + 0,8 \cdot 0,6 + 0,6^2} = 1,505. \quad (274)$$

Періодична складова струму двофазного КЗ на землю у відносних одиницях складає:

$$\bar{I}_{n,0}^{*(2L)} = m^{(2L)} \cdot \bar{I}_{A1}^* = 1,505 \cdot 0,922 = 1,388 \text{ в.о.} \quad (275)$$

Періодична складова струму двофазного КЗ на землю в іменованих одиницях складає:

$$I_{п,0}^{(2\perp)} = \bar{I}_{п,0}^{*(2\perp)} \cdot I_B = 1,388 \cdot 15 = 20,82 \text{ кА.} \quad (276)$$

3.2 Електромеханічні перехідні процеси

Задача №1

У найпростішій системі, представленій на рис.98, кут між вектором ЕРС E' та вектором напруги U дорівнює $\delta' = 30^\circ$.

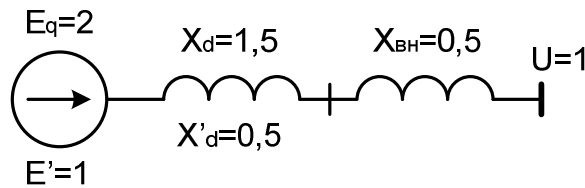


Рис.98 Схема найпростішої системи

Визначити кут навантаження δ .

Рішення

Характеристика потужності найпростішої системи в усталеному режимі записується через синхронні параметри генератора:

$$P = \frac{E_q \cdot U}{X_e} \cdot \sin \delta, \quad (277)$$

де $X_e = X_d + X_{вн}$.

Характеристика потужності найпростішої системи в перехідному режимі записується через перехідні параметри генератора:

$$P' = \frac{E' \cdot U}{X'_e} \cdot \sin \delta', \quad (278)$$

де $X'_e = X'_d + X_{вн}$.

В початковий момент часу перехідного режиму електрична потужність генератора стрибком змінитись не може, тому $P = P'$. Таким чином, можна прирівняти праві частини виразів (277) та (278):

$$\frac{E_q \cdot U}{X_e} \cdot \sin \delta = \frac{E' \cdot U}{X'_e} \cdot \sin \delta'. \quad (279)$$

З виразу (279) можна визначити кут навантаження δ :

$$\begin{aligned} \delta &= \arcsin \left(\frac{E' \cdot X_e}{E_q \cdot X'_e} \cdot \sin \delta' \right) = \arcsin \left(\frac{E' \cdot (X_d + X_{вн})}{E_q \cdot (X'_d + X_{вн})} \cdot \sin \delta' \right) = \\ &= \arcsin \left(\frac{1 \cdot (1,5 + 0,5)}{2 \cdot (0,5 + 0,5)} \cdot \sin 30^\circ \right) = 30^\circ. \end{aligned} \quad (280)$$

Задача №2

У найпростішій системі, представленій на рис.99, кут між вектором напруги генератора U_r та вектором напруги U дорівнює $\delta_U = 30^\circ$, а кут навантаження $\delta = 45^\circ$.

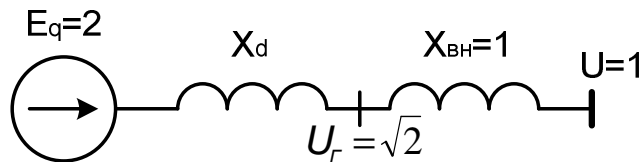


Рис.99 Схема найпростішої системи

Визначити синхронний опір генератора X_d .

Рішення

Характеристика потужності найпростішої системи в усталеному режимі записується за виразом (277) з попередньої задачі. Цю ж характеристику можна виразити і через напругу на шинах генератора:

$$P = \frac{U_r \cdot U}{X_{вн}} \cdot \sin \delta_U. \quad (281)$$

Прирівнявши праві частини виразів (277) та (281) отримуємо:

$$\frac{E_q \cdot U}{X_e} \cdot \sin \delta = \frac{U_r \cdot U}{X_{вн}} \cdot \sin \delta_U, \quad (282)$$

де $X_e = X_d + X_{вн}$.

З виразу (282) визначається синхронний опір генератора:

$$X_e = X_{вн} \cdot \frac{E_q \cdot \sin \delta}{U_r \cdot \sin \delta_U} = 1 \cdot \frac{2 \cdot \sin 45^\circ}{\sqrt{2} \cdot \sin 30^\circ} = 2 \text{ в.о.} \quad (283)$$

$$X_d = X_e - X_{вн} = 2 - 1 = 1 \text{ в.о.} \quad (284)$$

Задача №3

У найпростішій системі, заступну схему якої представлено на рис.100, визначити кут навантаження δ .

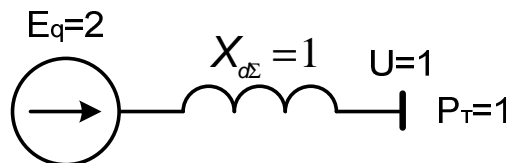


Рис.100 Схема найпростішої системи

Рішення

Згідно з виразом (157), характеристика потужності найпростішої системи має вигляд:

$$P_T = \frac{E_q \cdot U}{X_{d\Sigma}} \cdot \sin \delta. \quad (285)$$

З цього виразу визначається кут навантаження δ :

$$\delta = \arcsin\left(\frac{P_T \cdot X_{d\Sigma}}{E_q \cdot U}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 1}{2 \cdot 1}\right) = 30^\circ. \quad (286)$$

Задача №4

Стала часу інерції генератора, який має одну пару полюсів дорівнює $T_J = 10$ с. Чому буде дорівнювати стала інерції генератора якщо він буде мати дві пари полюсів при інших незмінних параметрах.

Рішення

За виразом (221), стала часу інерції генератора (системи «ротортурбіна») визначається як:

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_H^2}{P_H}. \quad (287)$$

Якби генератор мав дві пари полюсів замість однієї, то номінальна кутова швидкість його обертання ω_H була б вдвічі меншою, оскільки:

$$\omega_H = 2\pi \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (288)$$

де f - частота струму у мережі, p - кількість пар полюсів.

Виходячи з цього можна визначити сталу часу інерції генератора з двома парами полюсів на роторі:

$$T_{J1} = T_{J1} \frac{\omega_{1H}^2}{\omega_H^2} = T_{J1} \left(\frac{\omega_{1H}}{\omega_H}\right)^2 = T_{J1} (0,5)^2 = 10 \cdot 0,25 = 2,5 \text{ с}. \quad (289)$$

Задача №5

У найпростішій системі, представленій на рис.101, в точці К відбулось трифазне КЗ тривалістю $t_{кз} = 0,2$ с. Кут δ' в момент відключення КЗ дорівнював $\delta'_{отк} = 66^\circ$. Визначити сталу часу інерції генератора T_J .

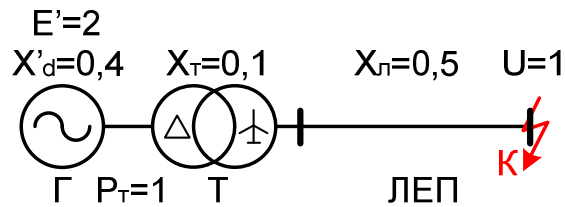


Рис.101 Схема найпростішої системи

Рішення

При трифазному КЗ електромагнітна потужність, що передається $P_{\Gamma-MAX}^{ae} = 0$. Тому, рішення диференційного рівняння руху ротора (222) визначається наступною залежністю:

$$\delta'(t) = \frac{360 \cdot f \cdot P_T}{T_J} \cdot \frac{t^2}{2} + \delta_0' \quad (290)$$

Із залежності (290) можна визначити сталу часу інерції генератора:

$$T_J = \frac{360 \cdot f \cdot P_T}{\delta'(t) - \delta_0'} \cdot \frac{t^2}{2} \quad (291)$$

Частота струму в мережі $f = 50 \text{ Гц}$. Тривалість КЗ, згідно з умовою задачі, $0,2 \text{ с}$. Тому, $t = t_{K3} = 0,2 \text{ с}$, $\delta'(t_{K3}) = \delta'_{отк} = 66^\circ$. Для визначення початкового значення кута δ_0' треба визначити максимальну потужність, що передавалась в доаварійному режимі:

$$P_{\Gamma-MAX} = \frac{E' \cdot U}{X_\Sigma} = \frac{E' \cdot U}{X'_d + X_T + X_L} = \frac{2 \cdot 1}{0,4 + 0,1 + 0,5} = 2 \text{ в.о.} \quad (292)$$

$$\delta_0' = \arcsin\left(\frac{P_T}{P_{\Gamma-MAX}}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{2}\right) = 30^\circ \quad (293)$$

Отримане значення підставляється в (291) та визначається стала часу інерції генератора:

$$T_J = \frac{360 \cdot f \cdot P_T}{\delta'_{отк} - \delta_0'} \cdot \frac{t_{K3}^2}{2} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 1}{66 - 30} \cdot \frac{0,2^2}{2} = 10 \text{ с.} \quad (294)$$

4 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА №1 «РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ»

4.1 Завдання на розрахунково-графічну роботу

1. Скласти заступну схему ЕЕС з рис.102 для розрахунку струмів трифазного КЗ.
2. Обрати базисні величини та визначити параметри заступної схеми ЕЕС для розрахунку струмів трифазного КЗ (у відносних одиницях).
3. Розрахувати струм трифазного КЗ в початковий момент часу ($t=0$ с).
4. Розрахувати максимальний ударний струм трифазного КЗ в момент часу $t=0,01$ с, сталу часу T_a прийняти рівною 0,1 с.
5. Скласти заступні схеми зворотної та нульової послідовностей схеми ЕЕС та визначити їхні параметри.
6. Визначити струми двофазного, однофазного та двофазного КЗ на землю в початковий момент часу ($t=0$ с).

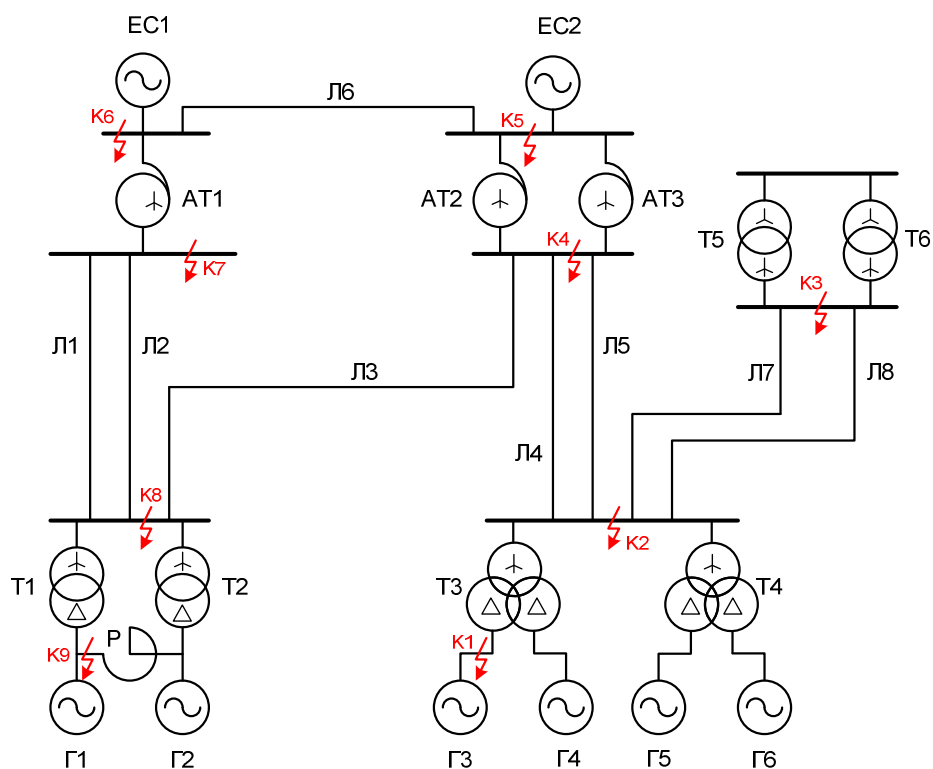


Рис.102 Схема ЕЕС

4.2 Варіанти індивідуальних завдань

Варіант індивідуального завдання задається студенту у вигляді трьох цифр (XXX):

- перша цифра (від 1 до 5) означає номер варіанту за табл.5–8;

- друга цифра (від 1 до 5) означає номер варіанту за табл.9.
- третя цифра (від 1 до 9) означає номер точки КЗ у схемі ЕЕС.

Таблиця 5. Параметри генераторів

№ вар.	Назва генератора	P_H , МВт	U_H , кВ	$\cos\varphi_H$	X_d , В.О.	X''_d , В.О.	X''_q , В.О.
1	Г1, Г2	30	10,5	0,8	2,648	0,153	0,153
	Г3 ÷ Г6	60	13,8	0,8	0,9	0,22	0,184
2	Г1, Г2	60	13,8	0,8	1,691	0,146	0,146
	Г3 ÷ Г6	40	13,8	0,85	0,96	0,25	0,22
3	Г1, Г2	12	6,3	0,8	2,07	0,131	0,131
	Г3 ÷ Г6	45	13,8	0,85	1,09	0,206	0,18
4	Г1, Г2	60	13,8	0,85	1,415	0,177	0,177
	Г3 ÷ Г6	72	13,8	0,8	1,02	0,256	0,208
5	Г1, Г2	6	6,3	0,8	1,651	0,121	0,121
	Г3 ÷ Г6	36	10,5	0,9	0,95	0,195	0,165

Таблиця 6. Параметри трансформаторів та автотрансформаторів

№ вар.	Назва трансформатора	S_H , МВА	U_{BH} , кВ	U_{HH} , кВ	u_K , %
1	T1, T2	40	110	10,5	11
	T5, T6	32	110	35	10,5
	AT1, AT2, AT3	250	330	110	10
2	T1, T2	80	220	13,8	11,6
	T5, T6	63	220	35	10,3
	AT1, AT2, AT3	400	500	220	10,2
3	T1, T2	16	154	6,3	11,2
	T5, T6	25	154	35	10,5
	AT1, AT2, AT3	200	330	154	12
4	T1, T2	80	110	13,8	11
	T5, T6	40	110	35	10,7
	AT1, AT2, AT3	200	330	110	10,4
5	T1, T2	10	110	6,3	9,8
	T5, T6	25	110	35	11
	AT1, AT2, AT3	250	220	110	10,5

Таблиця 7. Параметри трансформаторів з розщепленою обмоткою

№ вар.	Назва трансформатора	S_H , МВА	U_{BH} , кВ	U_{HH} , кВ	$u_{K(B-H)}$, %	$u_{K(H-H)}$, %
1	T3, T4	160	110	13,8-13,8	10,5	15
2	T3, T4	125	220	13,8-13,8	11	16
3	T3, T4	125	154	13,8-13,8	10	16,5
4	T3, T4	200	110	13,8-13,8	10,8	15,6
5	T3, T4	80	110	10,5-10,5	12	16,8

Таблиця 8. Параметри реактора

№ вар.	Назва реактора	U _н , кВ	I _н , А	X _р , %
1	Р	10,5	2150	12
2	Р	13,8	3200	10
3	Р	6,3	1600	10,5
4	Р	13,8	3200	12
5	Р	6,3	1000	11

Таблиця 9. Параметри ЛЕП

№ вар.	Назва ЛЕП	L, км	№ вар.	Назва ЛЕП	L, км	№ вар.	Назва ЛЕП	L, км
1	Л1, Л2	25	2	Л1, Л2	32	3	Л1, Л2	18
	Л3	40		Л3	55		Л3	26
	Л4, Л5	28		Л4, Л5	43		Л4, Л5	11
	Л6	15		Л6	50		Л6	20
	Л7, Л8	22		Л7, Л8	16		Л7, Л8	8
	№ вар.	Назва ЛЕП	L, км	№ вар.	Назва ЛЕП	L, км		
4	Л1, Л2	36	5	Л1, Л2	10			
	Л3	50		Л3	15			
	Л4, Л5	27		Л4, Л5	12			
	Л6	74		Л6	18			
	Л7, Л8	20		Л7, Л8	13			

Параметри еквівалентних ЕЕС (однакові для всіх варіантів)

ЕС1: S_{кз}=1000 МВА;

ЕС2: S_{кз}=1200 МВА.

Додаткові вихідні умови

1. Всі генератори працюють з номінальними параметрами.
2. Всі трансформатори та автотрансформатори трифазні.
3. Підстанція з трансформаторами Т5, Т6 є тупиковою.
4. Питомий опір всіх ЛЕП прийняти рівним 0,4 Ом/км.
5. Режим роботи нейтралі генераторів Г1÷Г6: ізольований.

4.3 Приклад виконання розрахунково-графічної роботи

В якості прикладу приведено розрахунок варіанту № 559 (за табл.5 – табл.9).

4.3.1 Складання заступної схеми ЕЕС для розрахунку струмів трифазного КЗ

Заступна схема ЕЕС для розрахунку струмів трифазного КЗ складається починаючи від джерел живлення (генераторів Г1 ÷ Г6). Вона представлена на рис.103.

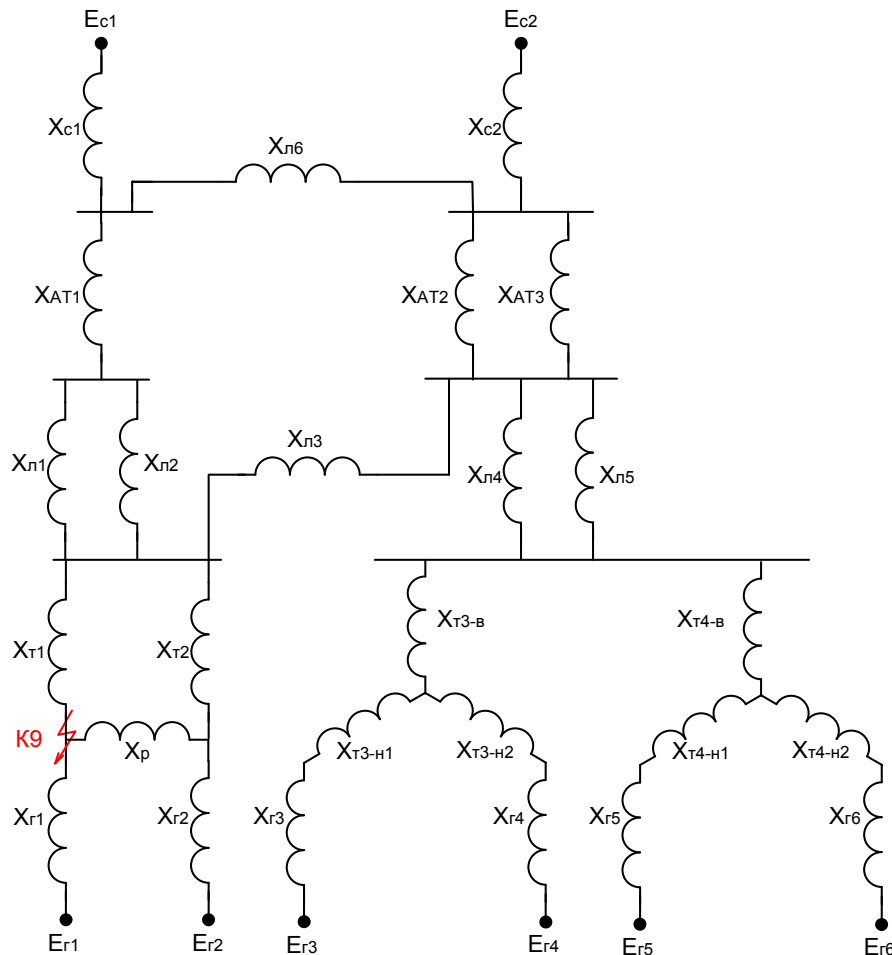


Рис.103 Заступна схема ЕЕС для розрахунку струмів трифазного КЗ

Лінії Л7 та Л8 до заступної схеми не вносяться, оскільки вони живлять тупикову підстанцію і при КЗ в точці К9 струм до місця КЗ по цим лініям протікати не буде.

4.3.2 Визначення параметрів заступної схеми ЕЕС для розрахунку струмів трифазного КЗ

Визначення базисних величин. Розглядається КЗ в точці К9, тобто на шині генератора Г1. Номінальна напруга генератора дорівнює 6,3 кВ. Приймаємо цю величину в якості базисної напруги $U_B = 6,3 \text{ кВ}$. В якості базисної потужності приймаємо довільне ціле число, наприклад $S_B = 100 \text{ МВА}$. Тоді базисний струм та базисний опір складають:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,165 \text{ кА}, \quad (295)$$

$$X_B = \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{6,3^2}{100} = 0,397 \text{ Ом}. \quad (296)$$

Розрахунок параметрів заступної схеми у відносних одиницях з одночасним приведенням до базисних величин.

Генератори.

Оскільки необхідно буде розраховувати струм КЗ в початковий момент часу ($I_{п,0}$) та струм КЗ в усталеному режимі (I_∞), необхідно визначити як надперехідні так і синхронні параметри генераторів.

Турбогенератори Г1, Г2. Синхронний опір в Омх складає:

$$X_d = X_d^* \cdot X_H = X_d^* \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos \varphi_H}{P_H} = 1,651 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{6} = 8,737 \text{ Ом}. \quad (297)$$

Надперехідний опір в Омх складає:

$$X_d'' = X_d''^* \cdot X_H = X_d''^* \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos \varphi_H}{P_H} = 0,121 \cdot \frac{6,3^2 \cdot 0,8}{6} = 0,64 \text{ Ом}. \quad (298)$$

Синхронна ЕРС генератора в кіловольтах, за умови що його режимні параметри дорівнюють номінальним, дорівнює:

$$E_q = \sqrt{(U_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (U_H \cdot \sin \varphi_H + I_H \cdot X_d)^2} = (*), \quad (299)$$

для визначення синхронної ЕРС необхідно розрахувати номінальний струм генератора та $\sin \varphi_H$:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 0,8} = 0,687 \text{ кА}, \quad (300)$$

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6. \quad (301)$$

$$(*) = \sqrt{(6,3 \cdot 0,8)^2 + (6,3 \cdot 0,6 + 0,687 \cdot 8,737)^2} = 11,004 \text{ кВ}. \quad (302)$$

Надперехідна ЕРС генератора в кіловольтах, за умови що його режимні параметри дорівнюють номінальним, дорівнює:

$$\begin{aligned} E_q'' &= \sqrt{(U_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (U_H \cdot \sin \varphi_H + I_H \cdot X_d'')^2} = \\ &= \sqrt{(6,3 \cdot 0,8)^2 + (6,3 \cdot 0,6 + 0,687 \cdot 0,64)^2} = 6,573 \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (303)$$

Переходимо до приведених значень у відносних одиницях:

$$\bar{X}_d^* = \frac{X_d}{X_B} = \frac{8,737}{0,397} = 22,008 \text{ в.о.} \quad (304)$$

$$\bar{X}_d'' = \frac{X_d''}{X_B} = \frac{0,64}{0,397} = 1,612 \text{ в.о.} \quad (305)$$

$$\bar{E}_q = \frac{E_q}{U_B} = \frac{11,004}{6,3} = 1,747 \text{ в.о.} \quad (306)$$

$$\bar{E}_q'' = \frac{E_q''}{U_B} = \frac{6,573}{6,3} = 1,043 \text{ в.о.} \quad (307)$$

Гідрогенератори Г3÷Г6. Синхронний опір в Омах складає:

$$X_d = X_d^* \cdot X_H = X_d^* \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos \varphi_H}{P_H} = 0,95 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 0,9}{36} = 2,618 \text{ Ом}. \quad (308)$$

Надперехідний опір в Омах складає:

$$X_d'' = X_d''^* \cdot X_H = X_d''^* \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos \varphi_H}{P_H} = 0,195 \cdot \frac{10,5^2 \cdot 0,9}{36} = 0,537 \text{ Ом}. \quad (309)$$

Синхронна ЕРС генератора в кіловольтах, за умови що його режимні параметри дорівнюють номінальним, дорівнює:

$$E_q = \sqrt{(U_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (U_H \cdot \sin \varphi_H + I_H \cdot X_d)^2} = (*), \quad (310)$$

для визначення синхронної ЕРС необхідно розрахувати номінальний струм генератора та $\sin \varphi_H$:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{36}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,9} = 2,199 \text{ кА}, \quad (311)$$

$$\sin \varphi_H = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = \sqrt{1 - 0,9^2} = 0,436. \quad (312)$$

$$(*) = \sqrt{(10,5 \cdot 0,9)^2 + (10,5 \cdot 0,436 + 2,199 \cdot 2,618)^2} = 14,004 \text{ кВ}. \quad (313)$$

Надперехідна ЕРС генератора в кіловольтах, за умови що його режимні параметри дорівнюють номінальним, дорівнює:

$$\begin{aligned} E_q'' &= \sqrt{(U_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (U_H \cdot \sin \varphi_H + I_H \cdot X_d'')^2} = \\ &= \sqrt{(10,5 \cdot 0,9)^2 + (10,5 \cdot 0,436 + 2,199 \cdot 0,537)^2} = 11,066 \text{ кВ}. \end{aligned} \quad (314)$$

Переходимо до приведених значень у відносних одиницях:

$$\bar{X}_d^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \frac{X_d}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{10,5} \right)^2 \frac{2,618}{0,397} = 2,374 \text{ в.о.} \quad (315)$$

$$\bar{X}_d''^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \frac{X_d''}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{10,5} \right)^2 \frac{0,537}{0,397} = 0,487 \text{ в.о.} \quad (316)$$

$$\bar{E}_q^* = (K_1 \cdot K_2) \frac{E_q}{U_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{10,5} \right) \frac{14,004}{6,3} = 1,334 \text{ в.о.} \quad (317)$$

$$\bar{E}_q''^* = (K_1 \cdot K_2) \frac{E_q''}{U_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{10,5} \right) \frac{11,066}{6,3} = 1,054 \text{ в.о.} \quad (318)$$

Трансформатори та автотрансформатори.

Трансформатори зв'язку Т1, Т2. Опір в Омах дорівнює:

$$X_T = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H} = \frac{9,8}{100} \cdot \frac{110^2}{10} = 118,58 \text{ Ом}. \quad (319)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_T^* = K^2 \cdot \frac{X_T}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \right)^2 \cdot \frac{118,58}{0,397} = 0,98 \text{ в.о.} \quad (320)$$

Автотрансформатори АТ1, АТ2, АТ3. Опір в Омах дорівнює:

$$X_{AT} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{220^2}{250} = 20,328 \text{ Ом}. \quad (321)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_{AT}^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \cdot \frac{X_{AT}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{220} \right)^2 \cdot \frac{20,328}{0,397} = 0,042 \text{ в.о.} \quad (322)$$

Трансформатори з розщепленими обмотками Т3, Т4. Напруги КЗ кожної обмотки складають:

$$u_{KB} = \frac{2 \cdot u_{K-BH} - u_{K-HH}}{2} = \frac{2 \cdot 12 - 16,8}{2} = 3,6 \%. \quad (323)$$

$$u_{KH} = \frac{u_{K-HH}}{2} = \frac{16,8}{2} = 8,4 \%. \quad (324)$$

Опір в Омах дорівнює:

$$X_{TB} = \frac{u_{KB}}{100} \cdot \frac{U_{BH}^2}{S_H} = \frac{3,6}{100} \cdot \frac{110^2}{80} = 5,445 \text{ Ом}. \quad (325)$$

$$X_{TH} = \frac{u_{KH}}{100} \cdot \frac{U_{HH}^2}{S_H} = \frac{8,4}{100} \cdot \frac{10,5^2}{80} = 0,116 \text{ Ом}. \quad (326)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_{TB}^* = K^2 \cdot \frac{X_{TB}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \right)^2 \cdot \frac{5,445}{0,397} = 0,045 \text{ в.о.} \quad (327)$$

$$\bar{X}_{TH}^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \cdot \frac{X_{TH}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{10,5} \right)^2 \cdot \frac{0,116}{0,397} = 0,105 \text{ в.о.} \quad (328)$$

Реактор.

Опір реактора Р в Омах дорівнює:

$$X_P = \frac{X_P^{\%}}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H} = \frac{11}{100} \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 1} = 0,4 \text{ Ом}. \quad (329)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_P^* = \frac{X_P}{X_B} = \frac{0,4}{0,397} = 1,008 \text{ в.о.} \quad (330)$$

Лінії електропередачі.

Лінії Л1, Л2. Опір в Омах дорівнює:

$$X_{ЛЕП} = X_0 \cdot L = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ Ом}. \quad (331)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_{ЛЕП}^* = K^2 \cdot \frac{X_{ЛЕП}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \right)^2 \cdot \frac{4}{0,397} = 0,033 \text{ в.о.} \quad (332)$$

Лінія Л3. Опір в Омах дорівнює:

$$X_{ЛЕП} = X_0 \cdot L = 0,4 \cdot 15 = 6 \text{ Ом}. \quad (333)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_{ЛЕП}^* = K^2 \cdot \frac{X_{ЛЕП}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \right)^2 \cdot \frac{6}{0,397} = 0,05 \text{ в.о.} \quad (334)$$

Лінії Л4, Л5. Опір в Омах дорівнює:

$$X_{ЛЕП} = X_0 \cdot L = 0,4 \cdot 12 = 4,8 \text{ Ом.} \quad (335)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_{ЛЕП}^* = K^2 \cdot \frac{X_{ЛЕП}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \right)^2 \cdot \frac{4,8}{0,397} = 0,04 \text{ в.о.} \quad (336)$$

Лінія Л6. Опір в Омах дорівнює:

$$X_{ЛЕП} = X_0 \cdot L = 0,4 \cdot 18 = 7,2 \text{ Ом.} \quad (337)$$

Приведений опір у відносних одиницях:

$$\bar{X}_{ЛЕП}^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \cdot \frac{X_{ЛЕП}}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{220} \right)^2 \cdot \frac{7,2}{0,397} = 0,015 \text{ в.о.} \quad (338)$$

Еквівалентні системи.

Еквівалентна система ЕС1. Опір в Омах дорівнює:

$$X_C = \frac{U_H^2}{S_{КЗ}} = \frac{220^2}{1000} = 48,4 \text{ Ом.} \quad (339)$$

ЕРС в кіловольтах складає:

$$E_C = 1,1 \cdot U_H = 1,1 \cdot 220 = 242 \text{ кВ.} \quad (340)$$

Приведені параметри у відносних одиницях:

$$\bar{X}_C^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \cdot \frac{X_C}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{220} \right)^2 \cdot \frac{48,4}{0,397} = 0,1 \text{ в.о.} \quad (341)$$

$$\bar{E}_C^* = (K_1 \cdot K_2) \cdot \frac{E_C}{U_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{220} \right) \cdot \frac{242}{6,3} = 1,1 \text{ в.о.} \quad (342)$$

Еквівалентна система ЕС2. Опір в Омах дорівнює:

$$X_C = \frac{U_H^2}{S_{КЗ}} = \frac{220^2}{1200} = 40,3 \text{ Ом.} \quad (343)$$

ЕРС в кіловольтах складає:

$$E_C = 1,1 \cdot U_H = 1,1 \cdot 220 = 242 \text{ кВ.} \quad (344)$$

Приведені параметри у відносних одиницях:

$$\bar{X}_C^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \cdot \frac{X_C}{X_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{220} \right)^2 \cdot \frac{40,3}{0,397} = 0,083 \text{ в.о.} \quad (345)$$

$$\bar{E}_C^* = (K_1 \cdot K_2) \cdot \frac{E_C}{U_B} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{220} \right) \cdot \frac{242}{6,3} = 1,1 \text{ в.о.} \quad (346)$$

4.3.3 Розрахунок струму трифазного КЗ в початковий момент часу

Вносимо до заступної схеми ЕЕС генератори Г1÷Г6 їхніми надперехідними параметрами та спрощуємо схему методом еквівалентного перетворення.

На першому кроці складуються послідовні елементи:

$$X_{e1} = X_{r3} + X_{T3-H1} = 0,487 + 0,105 = 0,592 \text{ в.о.} \quad (347)$$

$$X_{e2} = X_{r4} + X_{T3-H2} = 0,487 + 0,105 = 0,592 \text{ в.о.} \quad (348)$$

$$X_{e3} = X_{r5} + X_{T4-H1} = 0,487 + 0,105 = 0,592 \text{ в.о.} \quad (349)$$

$$X_{e4} = X_{r6} + X_{T4-H2} = 0,487 + 0,105 = 0,592 \text{ в.о.} \quad (350)$$

На другому кроці складуються паралельні елементи:

$$X_{e5} = \frac{X_{л1} \cdot X_{л2}}{X_{л1} + X_{л2}} = \frac{0,033 \cdot 0,033}{0,033 + 0,033} = 0,017 \text{ в.о.} \quad (351)$$

$$X_{e6} = \frac{X_{л4} \cdot X_{л5}}{X_{л4} + X_{л5}} = \frac{0,04 \cdot 0,04}{0,04 + 0,04} = 0,02 \text{ в.о.} \quad (352)$$

$$X_{e7} = \frac{X_{AT2} \cdot X_{AT3}}{X_{AT2} + X_{AT3}} = \frac{0,042 \cdot 0,042}{0,042 + 0,042} = 0,021 \text{ в.о.} \quad (353)$$

Після двох кроків перетворення заступна схема набуває вигляду (рис.104).

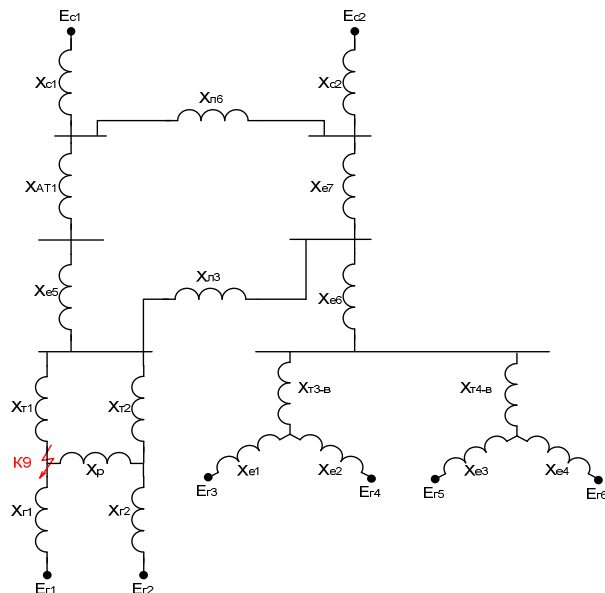


Рис.104 Заступна схема після двох кроків перетворення

На третьому кроці складаються паралельні гілки з ЕРС:

$$E_{e1} = E_{e2} = E_{r3} = E_{r4} = 1,054 \text{ в.о.} \quad (354)$$

$$X_{e8} = \frac{X_{e1} \cdot X_{e2}}{X_{e1} + X_{e2}} = \frac{0,592 \cdot 0,592}{0,592 + 0,592} = 0,296 \text{ в.о.} \quad (355)$$

$$X_{e9} = \frac{X_{e3} \cdot X_{e4}}{X_{e3} + X_{e4}} = \frac{0,592 \cdot 0,592}{0,592 + 0,592} = 0,296 \text{ в.о.} \quad (356)$$

На четвертому кроці перетворення складаються послідовні елементи:

$$X_{e10} = X_{AT1} + X_{e5} = 0,042 + 0,017 = 0,059 \text{ в.о.} \quad (357)$$

$$X_{e11} = X_{e8} + X_{T3B} = 0,296 + 0,045 = 0,341 \text{ в.о.} \quad (358)$$

$$X_{e12} = X_{e9} + X_{T4B} = 0,296 + 0,045 = 0,341 \text{ в.о.} \quad (359)$$

Після третього та четвертого кроків перетворення схема набуває вигляду (рис.105).

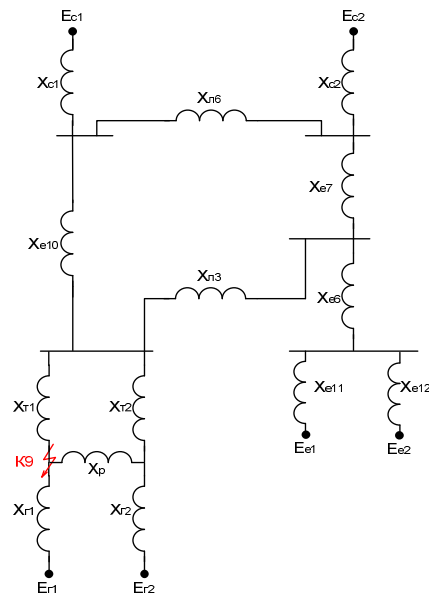


Рис.105 Заступна схема після чотирьох кроків перетворення

На п'ятому кроці перетворення складуються паралельні гілки з ЕРС:

$$E_{e3} = E_{e1} = E_{e2} = 1,054 \text{ в.о.} \quad (360)$$

$$X_{e13} = \frac{X_{e11} \cdot X_{e12}}{X_{e11} + X_{e12}} = \frac{0,341 \cdot 0,341}{0,341 + 0,341} = 0,171 \text{ в.о.} \quad (361)$$

На шостому кроці перетворення складуються послідовні елементи:

$$X_{e14} = X_{e6} + X_{e13} = 0,02 + 0,171 = 0,191 \text{ в.о.} \quad (362)$$

Після п'ятого та шостого кроків перетворення схема набуває вигляду (рис.106).

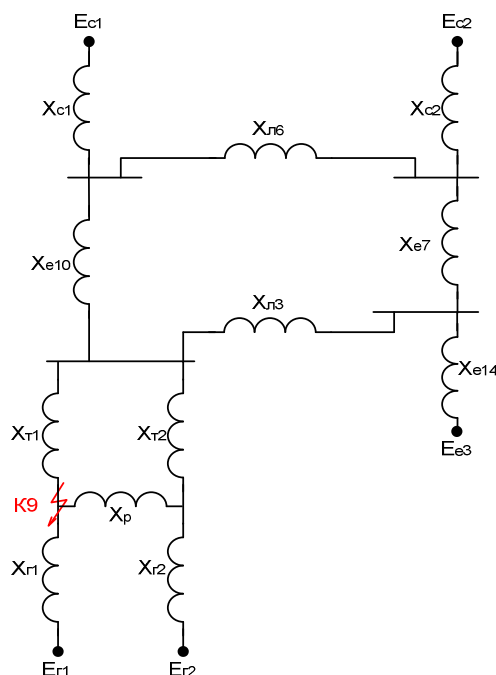


Рис.106 Заступна схема після шести кроків перетворення

На сьомому кроці перетворення трипроменеві «зірки» $X_{C1}, X_{Л6}, X_{e10}$ та $X_{e7}, X_{Л3}, X_{e14}$ перетворюються у еквівалентні «трикутники»:

$$X_{e15} = X_{C1} + X_{e10} + \frac{X_{C1} \cdot X_{e10}}{X_{Л6}} = 0,1 + 0,059 + \frac{0,1 \cdot 0,059}{0,015} = 0,552 \text{ в.о.} \quad (363)$$

$$X_{e16} = X_{C1} + X_{Л6} + \frac{X_{C1} \cdot X_{Л6}}{X_{e10}} = 0,1 + 0,015 + \frac{0,1 \cdot 0,015}{0,059} = 0,14 \text{ в.о.} \quad (364)$$

$$X_{e17} = X_{e10} + X_{Л6} + \frac{X_{e10} \cdot X_{Л6}}{X_{C1}} = 0,059 + 0,015 + \frac{0,059 \cdot 0,015}{0,1} = 0,083 \text{ в.о.} \quad (365)$$

$$X_{e18} = X_{e7} + X_{e14} + \frac{X_{e7} \cdot X_{e14}}{X_{Л3}} = 0,021 + 0,191 + \frac{0,021 \cdot 0,191}{0,05} = 0,292 \text{ в.о.} \quad (366)$$

$$X_{e19} = X_{e7} + X_{Л3} + \frac{X_{e7} \cdot X_{Л3}}{X_{e14}} = 0,021 + 0,05 + \frac{0,021 \cdot 0,05}{0,191} = 0,076 \text{ в.о.} \quad (367)$$

$$X_{e20} = X_{e14} + X_{Л3} + \frac{X_{e14} \cdot X_{Л3}}{X_{e7}} = 0,191 + 0,05 + \frac{0,191 \cdot 0,05}{0,021} = 0,696 \text{ в.о.} \quad (368)$$

Після сьомого кроку схема набуває вигляду (рис.107).

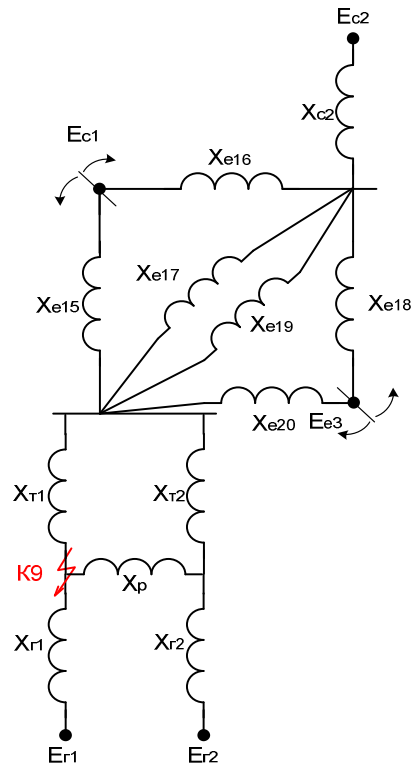


Рис.107 Заступна схема після семи кроків перетворення

На восьмому кроці перетворення складаються паралельні гілки:

$$X_{e21} = \frac{X_{e17} \cdot X_{e19}}{X_{e17} + X_{e19}} = \frac{0,083 \cdot 0,076}{0,083 + 0,076} = 0,04 \text{ в.о.} \quad (369)$$

Схема після восьмого кроку має такий вигляд (рис.108).

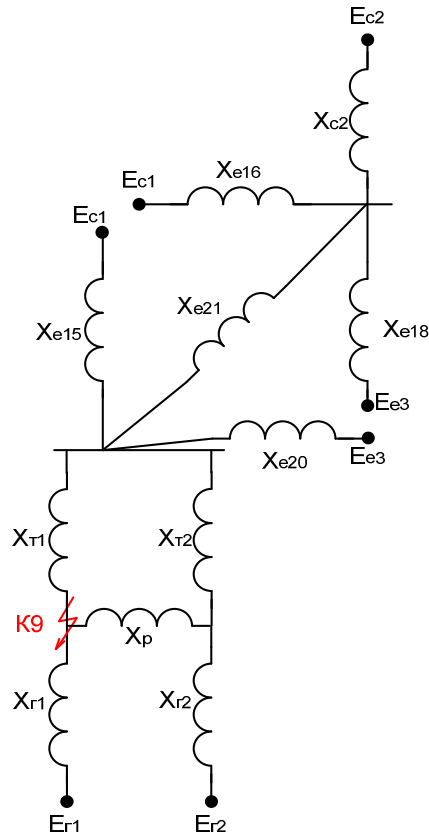


Рис.108 Заступна схема після восьми кроків перетворення

На дев'ятому кроці перетворення складаються паралельні гілки з ЕРС. Для цього гілки X_{e15} та X_{e16} розділяються по ЕРС E_{C1} , а гілки X_{e18} та X_{e20} розділяються по ЕРС E_{e3} (див. рис.107):

$$E_{e4} = \frac{\frac{E_{e3}}{X_{e18}} + \frac{E_{C2}}{X_{C2}} + \frac{E_{C1}}{X_{e16}}}{\frac{1}{X_{e18}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{e16}}} = \frac{\frac{1,054}{0,292} + \frac{1,1}{0,083} + \frac{1,1}{0,14}}{\frac{1}{0,292} + \frac{1}{0,083} + \frac{1}{0,14}} = 1,093 \text{ в.о.} \quad (370)$$

$$X_{e22} = \left(\frac{1}{X_{e18}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{e16}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,292} + \frac{1}{0,083} + \frac{1}{0,14} \right)^{-1} = 0,044 \text{ в.о.} \quad (371)$$

$$E_{e5} = \frac{\frac{E_{e3}}{X_{e20}} + \frac{E_{C1}}{X_{e15}}}{\frac{1}{X_{e20}} + \frac{1}{X_{e15}}} = \frac{\frac{1,054}{0,696} + \frac{1,1}{0,552}}{\frac{1}{0,696} + \frac{1}{0,552}} = 1,079 \text{ в.о.} \quad (372)$$

$$X_{e23} = \left(\frac{1}{X_{e20}} + \frac{1}{X_{e15}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,696} + \frac{1}{0,552} \right)^{-1} = 0,308 \text{ в.о.} \quad (373)$$

Після дев'ятого кроку перетворення схема набуває вигляду (рис.109).

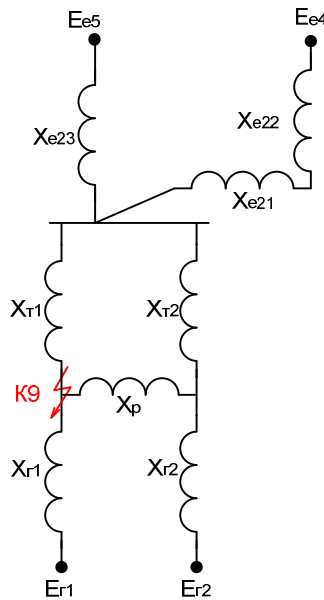


Рис.109 Заступна схема після дев'яти кроків перетворення

На десятому кроці перетворення складаються послідовні елементи X_{e21} та X_{e22} і паралельні гілки з ЕРС E_{e4} та E_{e5} :

$$X_{e24} = X_{e21} + X_{e22} = 0,04 + 0,044 = 0,084 \text{ в.о.} \quad (374)$$

$$E_{e6} = \frac{\frac{E_{e5}}{X_{e23}} + \frac{E_{e4}}{X_{e24}}}{\frac{1}{X_{e23}} + \frac{1}{X_{e24}}} = \frac{\frac{1,079}{0,308} + \frac{1,093}{0,084}}{\frac{1}{0,308} + \frac{1}{0,084}} = 1,09 \text{ в.о.} \quad (375)$$

$$X_{e25} = \left(\frac{1}{X_{e23}} + \frac{1}{X_{e24}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,308} + \frac{1}{0,084} \right)^{-1} = 0,066 \text{ в.о.} \quad (376)$$

Після десятого кроку перетворення схема набуває вигляду (рис.110).

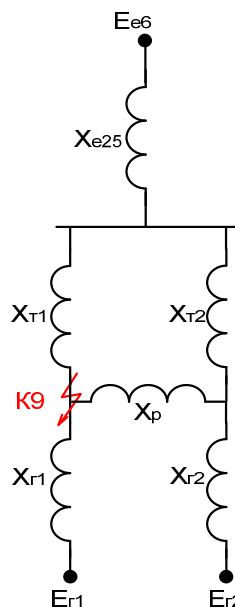


Рис.110 Заступна схема після десяти кроків перетворення

На одинадцятому кроці перетворення «трикутник» X_{T1}, X_{T2}, X_P перетворюється у еквівалентну зірку:

$$X_{e26} = \frac{X_{T1} \cdot X_{T2}}{X_{T1} + X_{T2} + X_P} = \frac{0,98 \cdot 0,98}{0,98 + 0,98 + 1,008} = 0,324 \text{ в.о.} \quad (377)$$

$$X_{e27} = \frac{X_{T1} \cdot X_P}{X_{T1} + X_{T2} + X_P} = \frac{0,98 \cdot 1,008}{0,98 + 0,98 + 1,008} = 0,333 \text{ в.о.} \quad (378)$$

$$X_{e28} = \frac{X_{T2} \cdot X_P}{X_{T1} + X_{T2} + X_P} = \frac{0,98 \cdot 1,008}{0,98 + 0,98 + 1,008} = 0,333 \text{ в.о.} \quad (379)$$

Схема приймає вигляд, представлений на рис.111.

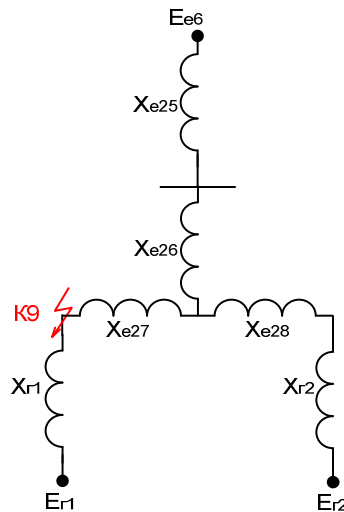


Рис.111 Заступна схема після одинадцяти кроків перетворення

На дванадцятому кроці перетворення складаються послідовні елементи:

$$X_{e29} = X_{e25} + X_{e26} = 0,066 + 0,324 = 0,39 \text{ в.о.} \quad (380)$$

$$X_{e30} = X_{e28} + X_{r2} = 0,333 + 1,612 = 1,945 \text{ в.о.} \quad (381)$$

На тринадцятому кроці перетворення складаються паралельні гілки з ЕРС:

$$E_{e7} = \frac{\frac{E_{e6}}{X_{e29}} + \frac{E_{r2}}{X_{e30}}}{\frac{1}{X_{e29}} + \frac{1}{X_{e30}}} = \frac{\frac{1,09}{0,39} + \frac{1,043}{1,945}}{\frac{1}{0,39} + \frac{1}{1,945}} = 1,082 \text{ в.о.} \quad (382)$$

$$X_{e31} = \left(\frac{1}{X_{e29}} + \frac{1}{X_{e30}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,39} + \frac{1}{1,945} \right)^{-1} = 0,325 \text{ в.о.} \quad (383)$$

На чотирнадцятому кроці перетворення складаються послідовні елементи:

$$X_{e32} = X_{e27} + X_{e31} = 0,333 + 0,325 = 0,658 \text{ в.о.} \quad (384)$$

Після цих двох етапів перетворення схема набуває вигляду (рис.112).

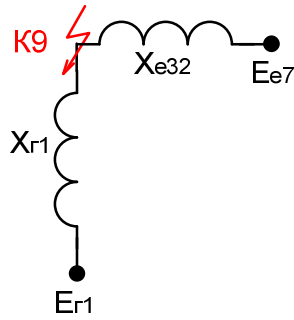


Рис.112 Заступна схема після чотирнадцяти кроків перетворення

На п'ятнадцятому кроці складуються паралельні гілки з ЕРС. В результаті цього отримуємо еквівалентну однопроменеву заступну схему (рис.113):

$$E_e = \frac{\frac{E_{e7}}{X_{e32}} + \frac{E_{r1}}{X_{r1}}}{\frac{1}{X_{e32}} + \frac{1}{X_{r1}}} = \frac{\frac{1,082}{0,658} + \frac{1,043}{1,612}}{\frac{1}{0,658} + \frac{1}{1,612}} = 1,071 \text{ в.о.} \quad (385)$$

$$X_e = \left(\frac{1}{X_{e32}} + \frac{1}{X_{r1}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,658} + \frac{1}{1,612} \right)^{-1} = 0,467 \text{ в.о.} \quad (386)$$

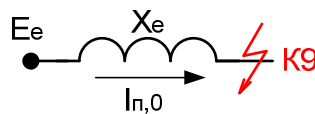


Рис.113 Еквівалентна заступна схема

З отриманої еквівалентної заступної схеми визначається періодична складова струму трифазного КЗ у відносних одиницях, приведена до базисних параметрів:

$$\bar{I}_{n,0}^* = \frac{E_e}{X_e} = \frac{1,071}{0,467} = 2,293 \text{ в.о.} \quad (387)$$

В іменованих одиницях періодична складова струму трифазного КЗ в початковий момент часу складає:

$$I_{n,0} = \bar{I}_{n,0}^* \cdot I_b = 2,293 \cdot 9,165 = 21,015 \text{ кА.} \quad (388)$$

4.3.4 Розрахунок максимального ударного струму трифазного КЗ

Максимальний ударний струм при трифазному КЗ в точці К9 буде в момент часу $t = 0,01 \text{ с}$. Він визначається за виразом:

$$i_{y0} = I_{n,0} \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-\frac{t}{T_a}} \right) = 21,015 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,1}} \right) = 56,441 \text{ кА.} \quad (389)$$

4.3.5 Складання заступних схем зворотної та нульової послідовностей схеми ЕЕС та визначення їхніх параметрів

Заступна схема зворотної послідовності складається аналогічно до заступної схеми прямої послідовності (див. рис.103) за виключенням того, що в ній відсутні ЕРС генераторів та еквівалентних енергосистем, а в місці КЗ підключена ЕРС, яка дорівнює напрузі зворотної послідовності. Заступна схема зворотної послідовності представлена на рис.114.

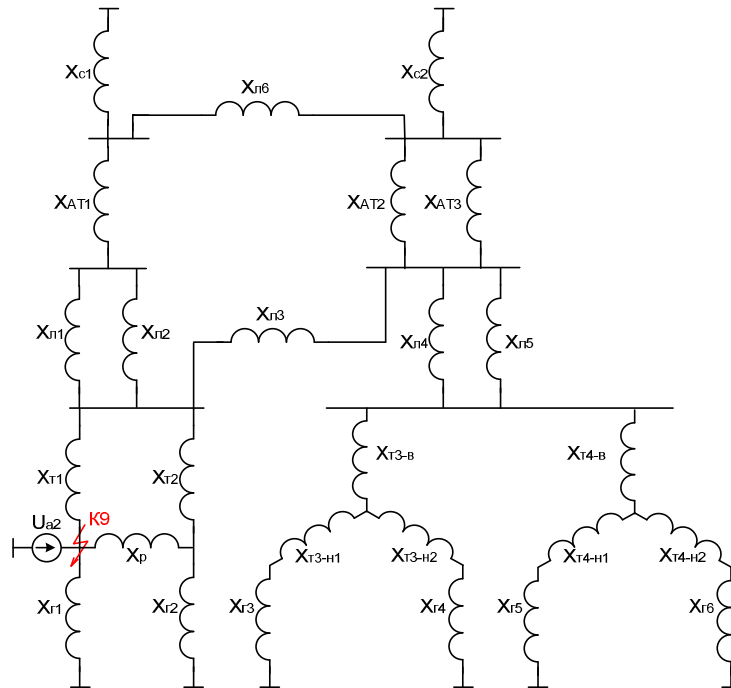


Рис.114 Заступна схема ЕЕС зворотної послідовності

Опори елементів заступної схеми зворотної послідовності дорівнюють опорам елементів прямої послідовності, за виключенням опорів генераторів Г1÷Г6, які визначаються за виразом для опору зворотної послідовності генератора з демпферними обмотками.

Для Г1, Г2:

$$X_{Г1}^* = X_{Г2}^* = \frac{X_d'' + X_q''}{2} = \frac{0,121 + 0,121}{2} = 0,121 \text{ в.о.} \quad (390)$$

Якщо привести до базисних величин:

$$\bar{X}_{Г1}^* = \bar{X}_{Г2}^* = X_{Г1}^* \frac{X_H}{X_6} = 0,121 \cdot \frac{5,292}{0,397} = 1,612 \text{ в.о.} \quad (391)$$

Для Г3÷Г6:

$$X_{Г3}^* = X_{Г4}^* = X_{Г5}^* = X_{Г6}^* = \frac{X_d'' + X_q''}{2} = \frac{0,165 + 0,195}{2} = 0,18 \text{ в.о.} \quad (392)$$

Якщо привести до базисних величин:

$$\bar{X}_{Г3}^* = \bar{X}_{Г4}^* = \bar{X}_{Г5}^* = \bar{X}_{Г6}^* = (K_1 \cdot K_2)^2 \cdot X_{Г3}^* \frac{X_H}{X_6} = \left(\frac{6,3}{110} \cdot \frac{110}{105} \right)^2 \cdot 0,18 \cdot \frac{2,756}{0,397} = 0,45 \text{ в.о.} \quad (393)$$

Для визначення еквівалентного опору зворотної послідовності необхідно спростити схему зворотної послідовності. Спрощення виконується аналогічно до спрощення схеми прямої послідовності з урахуванням того, що паралельні гілки, котрі були з ЕРС у схемі прямої послідовності, складуються як звичайні паралельні гілки.

Перший крок:

$$X_{e1} = X_{Г3} + X_{Т3-Н1} = 0,45 + 0,105 = 0,555 \text{ в.о.} \quad (394)$$

$$X_{e2} = X_{Г4} + X_{Т3-Н2} = 0,45 + 0,105 = 0,555 \text{ в.о.} \quad (395)$$

$$X_{e3} = X_{Г5} + X_{Т4-Н1} = 0,45 + 0,105 = 0,555 \text{ в.о.} \quad (396)$$

$$X_{e4} = X_{Г6} + X_{Т4-Н2} = 0,45 + 0,105 = 0,555 \text{ в.о.} \quad (397)$$

Другий крок:

$$X_{e5} = \frac{X_{Л1} \cdot X_{Л2}}{X_{Л1} + X_{Л2}} = \frac{0,033 \cdot 0,033}{0,033 + 0,033} = 0,017 \text{ в.о.} \quad (398)$$

$$X_{e6} = \frac{X_{Л4} \cdot X_{Л5}}{X_{Л4} + X_{Л5}} = \frac{0,04 \cdot 0,04}{0,04 + 0,04} = 0,02 \text{ в.о.} \quad (399)$$

$$X_{e7} = \frac{X_{АТ2} \cdot X_{АТ3}}{X_{АТ2} + X_{АТ3}} = \frac{0,042 \cdot 0,042}{0,042 + 0,042} = 0,021 \text{ в.о.} \quad (400)$$

Третій крок:

$$X_{e8} = \frac{X_{e1} \cdot X_{e2}}{X_{e1} + X_{e2}} = \frac{0,555 \cdot 0,555}{0,555 + 0,555} = 0,278 \text{ в.о.} \quad (401)$$

$$X_{e9} = \frac{X_{e3} \cdot X_{e4}}{X_{e3} + X_{e4}} = \frac{0,555 \cdot 0,555}{0,555 + 0,555} = 0,278 \text{ в.о.} \quad (402)$$

Четвертий крок:

$$X_{e10} = X_{АТ1} + X_{e5} = 0,042 + 0,017 = 0,059 \text{ в.о.} \quad (403)$$

$$X_{e11} = X_{e8} + X_{Т3В} = 0,278 + 0,045 = 0,323 \text{ в.о.} \quad (404)$$

$$X_{e12} = X_{e9} + X_{Т4В} = 0,278 + 0,045 = 0,323 \text{ в.о.} \quad (405)$$

П'ятий крок:

$$X_{e13} = \frac{X_{e11} \cdot X_{e12}}{X_{e11} + X_{e12}} = \frac{0,323 \cdot 0,323}{0,323 + 0,323} = 0,162 \text{ в.о.} \quad (406)$$

Шостий крок:

$$X_{e14} = X_{e6} + X_{e13} = 0,02 + 0,162 = 0,182 \text{ в.о.} \quad (407)$$

Сьомий крок:

$$X_{e15} = X_{C1} + X_{e10} + \frac{X_{C1} \cdot X_{e10}}{X_{Л6}} = 0,1 + 0,059 + \frac{0,1 \cdot 0,059}{0,015} = 0,552 \text{ в.о.} \quad (408)$$

$$X_{e16} = X_{C1} + X_{Л6} + \frac{X_{C1} \cdot X_{Л6}}{X_{e10}} = 0,1 + 0,015 + \frac{0,1 \cdot 0,015}{0,059} = 0,14 \text{ в.о.} \quad (409)$$

$$X_{e17} = X_{e10} + X_{Л6} + \frac{X_{e10} \cdot X_{Л6}}{X_{C1}} = 0,059 + 0,015 + \frac{0,059 \cdot 0,015}{0,1} = 0,083 \text{ в.о.} \quad (410)$$

$$X_{e18} = X_{e7} + X_{e14} + \frac{X_{e7} \cdot X_{e14}}{X_{л3}} = 0,021 + 0,182 + \frac{0,021 \cdot 0,182}{0,05} = 0,279 \text{ в.о.} \quad (411)$$

$$X_{e19} = X_{e7} + X_{л3} + \frac{X_{e7} \cdot X_{л3}}{X_{e14}} = 0,021 + 0,05 + \frac{0,021 \cdot 0,05}{0,182} = 0,077 \text{ в.о.} \quad (412)$$

$$X_{e20} = X_{e14} + X_{л3} + \frac{X_{e14} \cdot X_{л3}}{X_{e7}} = 0,182 + 0,05 + \frac{0,182 \cdot 0,05}{0,021} = 0,665 \text{ в.о.} \quad (413)$$

Восьмий крок:

$$X_{e21} = \frac{X_{e17} \cdot X_{e19}}{X_{e17} + X_{e19}} = \frac{0,083 \cdot 0,077}{0,083 + 0,077} = 0,04 \text{ в.о.} \quad (414)$$

Дев'ятий крок:

$$X_{e22} = \left(\frac{1}{X_{e18}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{e16}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,279} + \frac{1}{0,083} + \frac{1}{0,14} \right)^{-1} = 0,044 \text{ в.о.} \quad (415)$$

$$X_{e23} = \left(\frac{1}{X_{e20}} + \frac{1}{X_{e15}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,665} + \frac{1}{0,552} \right)^{-1} = 0,302 \text{ в.о.} \quad (416)$$

Десятий крок:

$$X_{e24} = X_{e21} + X_{e22} = 0,04 + 0,044 = 0,084 \text{ в.о.} \quad (417)$$

$$X_{e25} = \left(\frac{1}{X_{e23}} + \frac{1}{X_{e24}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,302} + \frac{1}{0,084} \right)^{-1} = 0,066 \text{ в.о.} \quad (418)$$

Одинадцятий крок:

$$X_{e26} = \frac{X_{T1} \cdot X_{T2}}{X_{T1} + X_{T2} + X_P} = \frac{0,98 \cdot 0,98}{0,98 + 0,98 + 1,008} = 0,324 \text{ в.о.} \quad (419)$$

$$X_{e27} = \frac{X_{T1} \cdot X_P}{X_{T1} + X_{T2} + X_P} = \frac{0,98 \cdot 1,008}{0,98 + 0,98 + 1,008} = 0,333 \text{ в.о.} \quad (420)$$

$$X_{e28} = \frac{X_{T2} \cdot X_P}{X_{T1} + X_{T2} + X_P} = \frac{0,98 \cdot 1,008}{0,98 + 0,98 + 1,008} = 0,333 \text{ в.о.} \quad (421)$$

Дванадцятий крок:

$$X_{e29} = X_{e25} + X_{e26} = 0,066 + 0,324 = 0,39 \text{ в.о.} \quad (422)$$

$$X_{e30} = X_{e28} + X_{Г2} = 0,333 + 1,612 = 1,945 \text{ в.о.} \quad (423)$$

Тринадцятий крок:

$$X_{e31} = \left(\frac{1}{X_{e29}} + \frac{1}{X_{e30}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,39} + \frac{1}{1,945} \right)^{-1} = 0,326 \text{ в.о.} \quad (424)$$

Чотирнадцятий крок:

$$X_{e32} = X_{e27} + X_{e31} = 0,333 + 0,326 = 0,659 \text{ в.о.} \quad (425)$$

П'ятнадцятий крок:

$$X_e = \left(\frac{1}{X_{e32}} + \frac{1}{X_{Г1}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,659} + \frac{1}{1,612} \right)^{-1} = 0,468 \text{ в.о.} \quad (426)$$

Отримана величина є еквівалентним опором заступної схеми зворотної послідовності, тобто $X_2 = 0,468 \text{ в.о.}$

Заступної схеми нульової послідовності при КЗ в точці К9 не буде, оскільки в жодному напрямку від місця пошкодження немає шляху для протікання струмів нульової послідовності, тобто $X_0 = \infty$. Це пояснюється тим, що в точці К9 режим роботи нейтралі мережі ізольований і однофазне КЗ та двофазне КЗ на землю (тобто несиметричні КЗ, які містять складову нульової послідовності) виникнути не можуть.

4.3.6 Розрахунок струму двофазного КЗ в початковий момент часу

Складова струму прямої послідовності для двофазного КЗ дорівнює:

$$I_{A1} = \frac{E_1}{X_1 + \Delta X} = \frac{E_1}{X_1 + X_2} = \frac{1,072}{0,467 + 0,468} = 1,147 \text{ в.о.} \quad (427)$$

Періодичний струм двофазного КЗ в момент часу $t=0$ дорівнює:

$$\bar{I}_{n,0}^* = m^{(2)} \cdot I_{A1} = \sqrt{3} \cdot 1,147 = 1,987 \text{ в.о.} \quad (428)$$

В іменованих одиницях періодичний струм двофазного КЗ в початковий момент часу складає:

$$I_{n,0} = \bar{I}_{n,0}^* \cdot I_{\sigma} = 1,987 \cdot 9,165 = 18,211 \text{ кА.} \quad (429)$$

5 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА №2 «ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ НАЙПРОСТІШОЇ СИСТЕМИ»

5.1 Завдання на розрахунково-графічну роботу

- Для найпростішої системи, представлені на рис.115, визначити межу потужності що передається, побудувати векторну діаграму та характеристику потужності для двох випадків:
 - генератор Г неявнополосний ($X_d = X_q$);
 - генератор Г явнополосний ($X_d \neq X_q$).
- Дослідити динамічну стійкість найпростішої системи при трифазному КЗ в заданій точці системи (для неявнополосного генератора Г $X_d = X_q$).



Рис.115 Схема найпростішої системи

5.2 Варіанти індивідуальних завдань

Варіант індивідуального завдання задається студенту у вигляді трьох цифр (XXX):

- перша цифра (від 1 до 6) означає номер варіанту за табл.10;
- друга цифра (від 1 до 6) означає номер варіанту за табл.11;
- третя цифра (від 1 до 6) означає номер варіанту за табл.12.

Таблиця 10. Параметри генератора

№ вар.	P_H , МВт	U_H , кВ	$\cos\varphi_H$	X_d , в.о.	X_q , в.о.	X'_d , в.о.	T_J , с
1	80	13,8	0,8	0,972	0,569	0,308	8,25
2	100	13,8	0,85	1,026	0,683	0,325	7,92
3	90	13,8	0,8	0,959	0,648	0,299	8,45
4	96	13,8	0,85	1,2	0,821	0,36	9,14
5	72	13,8	0,8	1,12	0,715	0,339	8,9
6	104	13,8	0,85	1,054	0,744	0,38	7,67

Таблиця 11. Параметри трансформаторів Т1, Т2

№ вар.	Трансформатор	S_H , МВА	U_{BH} , кВ	U_{HH} , кВ	U_k , %
1	T1	125	110	13,8	12
	T2	140	330	110	10,5
2	T1	132	154	13,8	11
	T2	140	330	154	12,5
3	T1	125	220	13,8	11,5
	T2	125	500	220	10
4	T1	132	220	13,8	10
	T2	125	750	220	12
5	T1	132	154	13,8	12,5
	T2	132	500	154	10,5
6	T1	140	110	13,8	11
	T2	140	750	110	11,5

Таблиця 12. Параметри ЛЕП Л1, Л2

№ вар.	U_H , кВ	L, км	X_0 , Ом/км
1	У відповідності до U_{BH} тр-ра Т1 та U_{HH} тр-ра Т2	42	0,4
2		58	0,36
3		35	0,42
4		70	0,43
5		26	0,38
6		50	0,39

Додаткові вихідні умови

1. Генератор працює з номінальними параметрами.
2. Точка КЗ при аналізі динамічної стійкості є однаковою для всіх варіантів і знаходиться на початку лінії Л2. Час відключення пошкодженої лінії Л2, який складається з часу спрацювання релейного захисту та часу відключення вимикача складає:
 - а) для варіантів, що закінчуються цифрою 1 або 2: $t_{відкл} = 0,12$ с ;
 - б) для варіантів, що закінчуються цифрою 3 або 4: $t_{відкл} = 0,14$ с ;
 - в) для варіантів, що закінчуються цифрою 5 або 6: $t_{відкл} = 0,16$ с .

5.3 Приклад виконання розрахунково-графічної роботи

В якості прикладу приведено розрахунок варіанту № 666 (за табл.10 – табл.12).

5.3.1 Визначення межі потужності що передається, побудова векторних діаграм та характеристик потужності

Складається заступна схема найпростішої системи (рис.116).

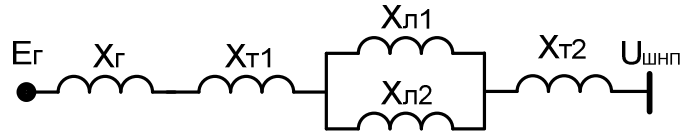


Рис.116 Заступна схема найпростішої системи

Визначаються параметри заступної схеми та приводяться до базисних величин. В якості базисних величин умісно прийняти:

- номінальну напругу на шинах нескінченної потужності. Напруга ШНП дорівнює номінальній напрузі сторони ВН трансформатора Т2:

$$U_B = U_{T2-ВН} = 750 \text{ кВ}; \quad (430)$$

- номінальну повну потужність генератора:

$$S_B = S_{Г-Н} = \frac{P_{Г-Н}}{\cos \varphi_{Г-Н}} = \frac{104}{0,85} = 122,35 \text{ МВА}. \quad (431)$$

Опори елементів заступної схеми приводяться до базисних величин:

- генератор

$$\begin{aligned} \bar{X}_d^* &= (K_{T1} \cdot K_{T2})^2 \cdot X_d^* \cdot \frac{U_{Г-Н}^2}{S_{Г-Н}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \\ &= \left(\frac{110}{13,8} \cdot \frac{750}{110} \right)^2 \cdot 1,054 \cdot \frac{13,8^2}{122,35} \cdot \frac{122,35}{750^2} = 1,054 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (432)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_q^* &= (K_{T1} \cdot K_{T2})^2 \cdot X_q^* \cdot \frac{U_{Г-Н}^2}{S_{Г-Н}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \\ &= \left(\frac{110}{13,8} \cdot \frac{750}{110} \right)^2 \cdot 0,744 \cdot \frac{13,8^2}{122,35} \cdot \frac{122,35}{750^2} = 0,744 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (433)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_d^{**} &= (K_{T1} \cdot K_{T2})^2 \cdot X_d^{**} \cdot \frac{U_{Г-Н}^2}{S_{Г-Н}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \\ &= \left(\frac{110}{13,8} \cdot \frac{750}{110} \right)^2 \cdot 0,38 \cdot \frac{13,8^2}{122,35} \cdot \frac{122,35}{750^2} = 0,38 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (434)$$

- трансформатори

$$\begin{aligned} \bar{X}_{T1}^* &= (K_{T2})^2 \cdot \frac{U_{к-Т1}}{100} \cdot \frac{U_{Т1-ВН}^2}{S_{Т1Н}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \\ &= \left(\frac{750}{110} \right)^2 \cdot \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{140} \cdot \frac{122,35}{750^2} = 0,096 \text{ в.о.} \end{aligned} \quad (435)$$

$$\bar{X}_{T2}^* = \frac{U_{k-T2}}{100} \cdot \frac{U_{T2-BH}^2}{S_{T2H}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{750^2}{140} \cdot \frac{122,35}{750^2} = 0,101 \text{ в.о.} \quad (436)$$

– лінія електропередачі

$$\bar{X}_L^* = (K_{T2})^2 \cdot X_0 \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = \left(\frac{750}{110}\right)^2 \cdot 0,39 \cdot 50 \cdot \frac{122,35}{750^2} = 0,197 \text{ в.о.} \quad (437)$$

Після розрахунку параметрів заступної схеми виконується її еквівалентне перетворення для усталеного режиму. Генератор вноситься до заступної схеми приведеним синхронним опором за віссю d синхронною ЕРС за віссю q, яку необхідно визначити. Еквівалентна заступна схема найпростішої системи представлена на рис.117.



Рис.117 Еквівалентна заступна схема найпростішої системи

Еквівалентний опір дорівнює:

$$\bar{X}_{\alpha\Sigma}^* = \bar{X}_d^* + \bar{X}_{T1}^* + \frac{\bar{X}_L^*}{2} + \bar{X}_{T2}^* = 1,054 + 0,096 + \frac{0,197}{2} + 0,101 = 1,35 \text{ в.о.} \quad (438)$$

Спочатку будується векторна діаграма для випадку неявнополюсного генератора. Приймається що $X_d = X_q = 1,054 \text{ в.о.}$

За виразом (184) визначається синхронна ЕРС неявнополюсного генератора:

$$\bar{E}_q^* = \sqrt{\left(\bar{U}_{\text{шнп}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^*} \cdot \bar{X}_{\alpha\Sigma}^*\right)^2 + \left(\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^*} \cdot \bar{X}_{\alpha\Sigma}^*\right)^2}. \quad (439)$$

Приведена напруга на шинах нескінченної потужності дорівнює:

$$\bar{U}_{\text{шнп}}^* = \frac{U_{\text{шнп}}}{U_B} = \frac{750}{750} = 1. \quad (440)$$

Приведена активна потужність, що передається складає:

$$\bar{P}^* = \frac{P_{Г-Н}}{S_B} = \frac{104}{122,35} = 0,85. \quad (441)$$

Приведена реактивна потужність, що передається складає:

$$\bar{Q}^* = \frac{P_{Г-Н} \cdot \text{tg}\varphi_{Г-Н}}{S_B} = \frac{104 \cdot 0,624}{122,35} = 0,53. \quad (442)$$

Розраховані в (440)-(442) значення підставляються в (439):

$$\bar{E}_q^* = \sqrt{\left(1 + \frac{0,53}{1} \cdot 1,35\right)^2 + \left(\frac{0,85}{1} \cdot 1,35\right)^2} = 2,065 \text{ в.о.}$$

За виразом (185) визначається кут навантаження δ :

$$\delta = \arctg \frac{\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{д}\Sigma}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{д}\Sigma}^*} = \arctg \frac{\frac{0,85}{1} \cdot 1,35}{1 + \frac{0,53}{1} \cdot 1,35} = 33,8^\circ. \quad (443)$$

За виразом (186) визначається перехідна ЕРС неявнополюсного генератора:

$$\bar{E}_q^* = \sqrt{\left(\bar{U}_{\text{ШНП}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{д}\Sigma}^*\right)^2 + \left(\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{д}\Sigma}^*\right)^2}. \quad (444)$$

Перехідний еквівалентний опір дорівнює:

$$\bar{X}_{\text{д}\Sigma}^* = \bar{X}_d^* + \bar{X}_{T1}^* + \frac{\bar{X}_l^*}{2} + \bar{X}_{T2}^* = 0,38 + 0,096 + \frac{0,197}{2} + 0,101 = 0,676 \text{ в.о.} \quad (445)$$

Розраховане значення підставляється в (444):

$$\bar{E}_q^* = \sqrt{\left(1 + \frac{0,53}{1} \cdot 0,676\right)^2 + \left(\frac{0,85}{1} \cdot 0,676\right)^2} = 1,475 \text{ в.о.}$$

За виразом (187) визначається кут δ' :

$$\delta' = \arctg \frac{\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{д}\Sigma}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{д}\Sigma}^*} = \arctg \frac{\frac{0,85}{1} \cdot 0,676}{1 + \frac{0,53}{1} \cdot 0,676} = 23^\circ. \quad (446)$$

За виразом (188) визначається напруга неявнополюсного генератора:

$$\bar{U}_r^* = \sqrt{\left(\bar{U}_{\text{ШНП}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{зовн}}^*\right)^2 + \left(\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{зовн}}^*\right)^2}. \quad (447)$$

Зовнішній опір найпростішої системи складає:

$$\bar{X}_{\text{зовн}}^* = \bar{X}_{T1}^* + \frac{\bar{X}_l^*}{2} + \bar{X}_{T2}^* = 0,096 + \frac{0,197}{2} + 0,101 = 0,296 \text{ в.о.} \quad (448)$$

Розраховане значення підставляється в (447):

$$\bar{U}_r^* = \sqrt{\left(1 + \frac{0,53}{1} \cdot 0,296\right)^2 + \left(\frac{0,85}{1} \cdot 0,296\right)^2} = 1,184 \text{ в.о.}$$

Кут δ_U визначається за виразом (189):

$$\delta_U = \arctg \frac{\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{зовн}}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{ШНП}}^*} \cdot \bar{X}_{\text{зовн}}^*} = \arctg \frac{\frac{0,85}{1} \cdot 0,296}{1 + \frac{0,53}{1} \cdot 0,296} = 12,3^\circ. \quad (449)$$

За отриманими значеннями будується векторна діаграма найпростішої системи з неявнополюсним генератором. Побудована векторна діаграма подібна до векторної діаграми, представленої на рис.73, але має бути побудована в масштабі.

Межа потужності, що передається, визначається як:

$$\bar{P}_{MAX}^* = \frac{\bar{E}_q^* \cdot \bar{U}_{ШНП}^*}{X_{d\Sigma}^*} = \frac{2,065 \cdot 1}{1,35} = 1,53 \text{ в.о.} \quad (450)$$

Коефіцієнт запасу системи за статичною стійкістю визначається як:

$$K_{CT} = \frac{\bar{P}_{MAX}^* - \bar{P}^*}{\bar{P}^*} \cdot 100 = \frac{1,53 - 0,85}{0,85} \cdot 100 = 80 \% . \quad (451)$$

Коефіцієнт запасу за статичною стійкістю є достатнім у нормальному режимі роботи найпростішої системи оскільки перевищує 20%.

Характеристика потужності найпростішої системи описується виразом:

$$\bar{P}^*(\delta) = \bar{P}_{MAX}^* \sin \delta = 1,53 \sin \delta . \quad (452)$$

Отримана залежність (452) будується на інтервалі $\delta \in [0; 180^\circ]$. Розрахункові дані для побудови приведені в табл.13, графік функції представлено на рис.118.

Таблиця 13. Дані для побудови $P(\delta)$

δ	$P(\delta)$	δ	$P(\delta)$	δ	$P(\delta)$
0	0,000	65	1,387	130	1,172
5	0,133	70	1,438	135	1,082
10	0,266	75	1,478	140	0,984
15	0,396	80	1,507	145	0,878
20	0,523	85	1,524	150	0,765
25	0,647	90	1,530	155	0,647
30	0,765	95	1,524	160	0,524
35	0,878	100	1,507	165	0,396
40	0,983	105	1,478	170	0,266
45	1,082	110	1,438	175	0,134
50	1,172	115	1,387	180	0,000
55	1,253	120	1,325		
60	1,325	125	1,253		

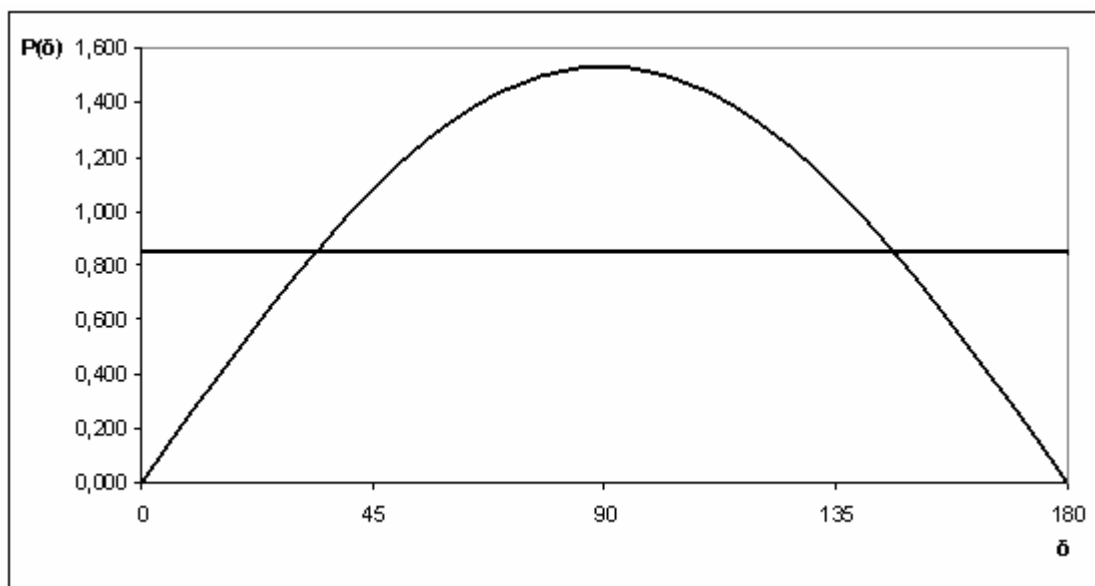


Рис.118 Характеристика потужності найпростішої системи з неявнополюсним генератором

Для побудови векторної діаграми для випадку явнополюсного генератора спочатку визначається фіктивна ЕРС E_Q за виразом (191):

$$\bar{E}_Q^* = \sqrt{\left(\bar{U}_{\text{шнп}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^*} \cdot \bar{X}_{q\Sigma}^*\right)^2 + \left(\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^*} \cdot \bar{X}_{q\Sigma}^*\right)^2}. \quad (453)$$

Еквівалентний фіктивний опір дорівнює:

$$\bar{X}_{q\Sigma}^* = \bar{X}_q^* + \bar{X}_{T1}^* + \frac{\bar{X}_L^*}{2} + \bar{X}_{T2}^* = 0,744 + 0,096 + \frac{0,197}{2} + 0,101 = 1,04 \text{ в.о.} \quad (454)$$

Отримана величина підставляється в (453):

$$\bar{E}_Q^* = \sqrt{\left(1 + \frac{0,53}{1} \cdot 1,04\right)^2 + \left(\frac{0,85}{1} \cdot 1,04\right)^2} = 1,784.$$

Кут навантаження δ у системі з явнополюсним генератором визначається за виразом:

$$\delta = \arctg \frac{\frac{\bar{P}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^*} \cdot \bar{X}_{q\Sigma}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^* + \frac{\bar{Q}^*}{\bar{U}_{\text{шнп}}^*} \cdot \bar{X}_{q\Sigma}^*} = \arctg \frac{0,85 \cdot 1,04}{1 + \frac{0,53}{1} \cdot 1,04} = 29,7^\circ. \quad (455)$$

Синхронна ЕРС явнополюсного генератора визначається за виразом (192). Оскільки генератор працює з номінальними параметрами, то його струм $\bar{I}^* = 1$:

$$\begin{aligned} \bar{E}_q^* &= \bar{E}_Q^* + (\bar{X}_d^* - \bar{X}_q^*) \cdot \bar{I}^* \cdot \sin(\varphi + \delta) = 1,784 + \\ &+ (1,054 - 0,744) \cdot 1 \cdot \sin(31,8 + 29,7) = 2,057. \end{aligned} \quad (456)$$

Перехідна ЕРС E_q' , кут δ' , напруга генератора U_r , кут δ_U визначаються за виразами (185) – (189) і, як наслідок, дорівнюють аналогічним величинам у системі з неявнополюсним генератором.

За отриманими значеннями будується векторна діаграма найпростішої системи з явнополюсним генератором. Побудована векторна діаграма подібна до векторної діаграми, представленої на рис.75, але має бути побудована в масштабі.

Характеристика потужності найпростішої системи описується виразом:

$$\begin{aligned} \bar{P}^*(\delta) &= \frac{\bar{E}_q^* \cdot \bar{U}_{\text{шнп}}^*}{\bar{X}_{d\Sigma}^*} \cdot \sin \delta + \frac{1}{2} \cdot \frac{\bar{U}_{\text{шнп}}^{*2} \cdot (\bar{X}_d^* - \bar{X}_q^*)}{\bar{X}_{d\Sigma}^* \cdot \bar{X}_{q\Sigma}^*} \cdot \sin 2\delta = \frac{2,057 \cdot 1}{1,35} \cdot \sin \delta + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{1^2 \cdot (1,054 - 0,744)}{1,35 \cdot 1,04} \cdot \sin 2\delta = 1,524 \cdot \sin \delta + 0,11 \cdot \sin 2\delta. \end{aligned} \quad (457)$$

Отримана залежність (457) будується на інтервалі $\delta \in [0; 180^\circ]$. Розрахункові дані для побудови приведені в табл.14, графік функції представлено на рис.119.

Таблиця 14. Дані для побудови $P(\delta)$

δ	$P(\delta)$	δ	$P(\delta)$	δ	$P(\delta)$
0	0,000	65	1,465	130	1,059
5	0,152	70	1,503	135	0,968
10	0,302	75	1,527	140	0,871
15	0,449	80	1,538	145	0,771
20	0,592	85	1,537	150	0,667
25	0,728	90	1,524	155	0,560
30	0,857	95	1,499	160	0,451
35	0,977	100	1,463	165	0,340
40	1,088	105	1,417	170	0,227
45	1,188	110	1,361	175	0,114
50	1,276	115	1,297	180	0,000
55	1,352	120	1,225		
60	1,415	125	1,145		

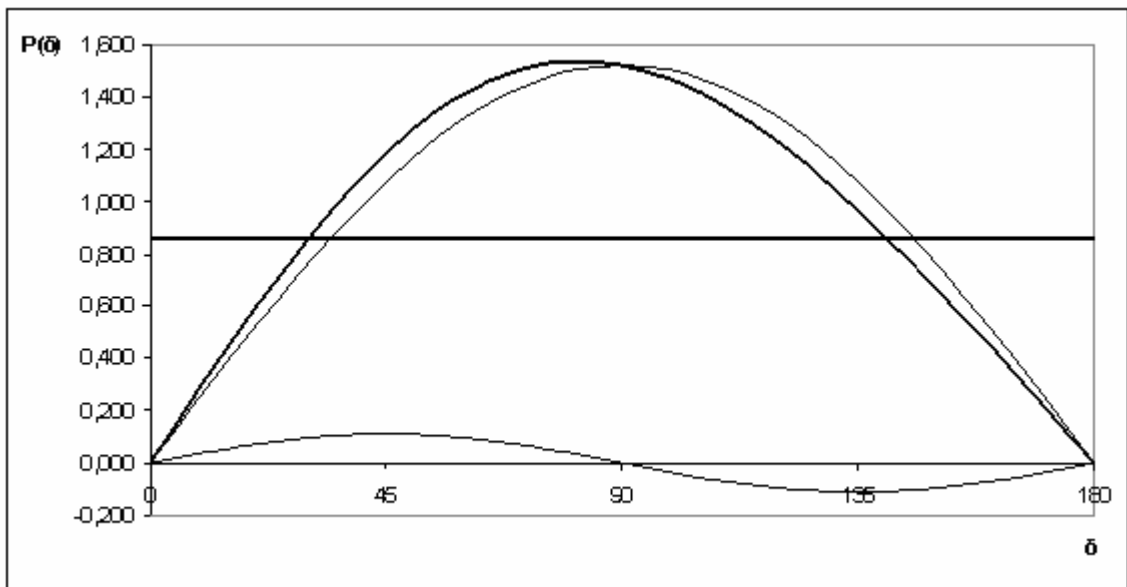


Рис.119 Характеристика потужності найпростішої системи з явнополюсним генератором

Для визначення межі потужності, що передається у системі з явнополюсною синхронною машиною, необхідно визначити критичне значення кута навантаження, яке через нерівність параметрів генератора за повздожньою та поперечною вісями не дорівнює 90° . Це критичне значення є точкою екстремуму функції $\bar{P}^*(\delta)$ (457):

$$\frac{d\bar{P}^*(\delta)}{d\delta} = \frac{d(1,524 \cdot \sin \delta + 0,11 \cdot \sin 2\delta)}{d\delta} = 1,524 \cdot \cos \delta + 2 \cdot 0,11 \cdot \cos 2\delta = \quad (458)$$

$$= 1,524 \cdot \cos \delta + 0,22 \cdot (2 \cos^2 \delta - 1) = 0,44 \cos^2 \delta + 1,524 \cdot \cos \delta - 0,22 = 0.$$

Отримане квадратне рівняння розв'язується відносно $\cos \delta$:

$$\cos \delta = 0,139; \Rightarrow \delta = \delta_{кр} = 82^\circ. \quad (459)$$

Таким чином, максимум характеристики потужності досягається при куті $\delta_{кр} = 82^\circ$. При підстановці отриманого значення кута навантаження в (457) визначається межа потужності, що передається у системі з явнополюсним генератором:

$$\bar{P}_{MAX}^* = 1,524 \cdot \sin 82^\circ + 0,11 \cdot \sin(2 \cdot 82^\circ) = 1,539. \quad (460)$$

Коефіцієнт запасу системи за статичною стійкістю визначається як:

$$K_{CT} = \frac{\bar{P}_{MAX}^* - \bar{P}^*}{\bar{P}^*} \cdot 100 = \frac{1,539 - 0,85}{0,85} \cdot 100 = 81 \%. \quad (461)$$

Коефіцієнт запасу за статичною стійкістю є достатнім у нормальному режимі роботи найпростішої системи оскільки перевищує 20%.

5.3.2 Дослідження динамічної стійкості найпростішої системи при трифазному КЗ

Еквівалентний опір найпростішої системи при аналізі динамічних режимів складає $\bar{X}_{\sigma\Sigma}^* = 0,676$ в.о. Еквівалентна ЕРС найпростішої системи при аналізі динамічних режимів складає $\bar{E}_q^* = 1,475$ в.о. Кут $\delta' = 23^\circ$. Ці величини були розраховані під час виконання першого завдання РГР.

Максимум електромагнітної потужності, що передається системою в доаварійному режимі, складає:

$$\bar{P}_{MAX-\partial/ae}^* = \frac{\bar{E}_q^* \cdot \bar{U}_{ШНП}^*}{\bar{X}_{\sigma\Sigma}^*} = \frac{1,475 \cdot 1}{0,676} = 2,182 \text{ в.о.} \quad (462)$$

При трифазному КЗ максимум електромагнітної потужності, що передається, $\bar{P}_{MAX-ae}^* = 0$. Таким чином, щоб мати можливість зберегти динамічну стійкість системи, пошкоджену лінію Л2 треба як можна швидше відключити та перейти на післяаварійну схему роботи з однією лінією Л1. Післяаварійна схема системи та її заступна схема представлені на рис.120.

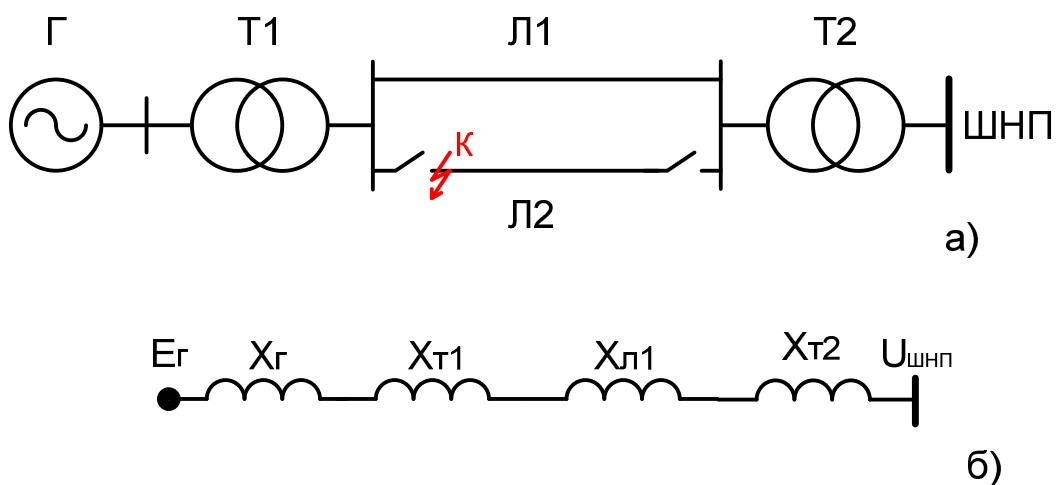


Рис.120 Схема найпростішої системи в післяаварійному режимі (а) та її заступна схема (б)

Еквівалентний опір післяаварійної схеми визначається за виразом (205):

$$\bar{X}_{п/ав}^* = \bar{X}_d^* + \bar{X}_{T1}^* + \bar{X}_л^* + \bar{X}_{T2}^* = 0,38 + 0,096 + 0,197 + 0,101 = 0,774 \text{ в.о.} \quad (463)$$

Максимум електромагнітної потужності, що передається в післяаварійному режимі, визначається як:

$$\bar{P}_{MAX-п/ав}^* = \frac{\bar{E}_q^* \cdot \bar{U}_{ШНП}^*}{\bar{X}_{п/ав}^*} = \frac{1,475 \cdot 1}{0,774} = 1,906. \quad (464)$$

Граничний кут відключення КЗ (значення кута δ за якого площа розгону буде дорівнювати площі гальмування, тобто буде збережена динамічна стійкість найпростішої системи) визначається за виразом:

$$\delta_{ВІДКЛ} = \arccos \left[\frac{\bar{P}^* \cdot \left(\frac{\delta_{п/ав} - \delta'}{57,3} \right) + \bar{P}_{MAX-п/ав}^* \cdot \cos \delta_{п/ав} - \bar{P}_{MAX-ав}^* \cdot \cos \delta'}{\bar{P}_{MAX-п/ав}^* - \bar{P}_{MAX-ав}^*} \right]. \quad (465)$$

Кут $\delta_{п/ав}$ - це значення кута навантаження за якого має місце режим нестійкої рівноваги характеристики турбіни $\bar{P}^* = 0,85$ та характеристики післяаварійного режиму $\bar{P}_{п/ав}^*(\delta) = 1,906 \sin \delta$. Цей кут визначається наступним чином:

$$\delta_{п/ав} = 180 - \arcsin \frac{\bar{P}^*}{\bar{P}_{MAX-п/ав}^*} = 180 - \arcsin \frac{0,85}{1,906} = 153,5^\circ. \quad (466)$$

Отримане значення підставляється в (465) та визначається граничний кут відключення:

$$\delta_{ВІДКЛ} = \arccos \left[\frac{0,85 \cdot \left(\frac{153,5 - 23}{57,3} \right) + 1,906 \cdot \cos 153,5 - 0 \cdot \cos 23}{1,906 - 0} \right] = 83,1^\circ.$$

Отриманий результат означає, що для збереження динамічної стійкості найпростішої системи в після аварійному режимі необхідно, щоб відключення пошкодженої лінії відбулось до моменту часу, коли значення кута δ досягне $83,1^\circ$. Щоб перевірити це, визначається фактичне значення кута відключення δ ($f = 50 \text{ Гц}$ - частота струму в мережі).

$$\delta_{ВІДКЛ-\Phi} = \frac{360 \cdot f \cdot \bar{P}^*}{T_J} \cdot \frac{t_{ВІДКЛ}^2}{2} + \delta' = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,85}{7,67} \cdot \frac{0,16^2}{2} + 23 = 48,5^\circ. \quad (467)$$

Графічне представлення аналізу динамічної стійкості найпростішої системи представлено на рис.121.

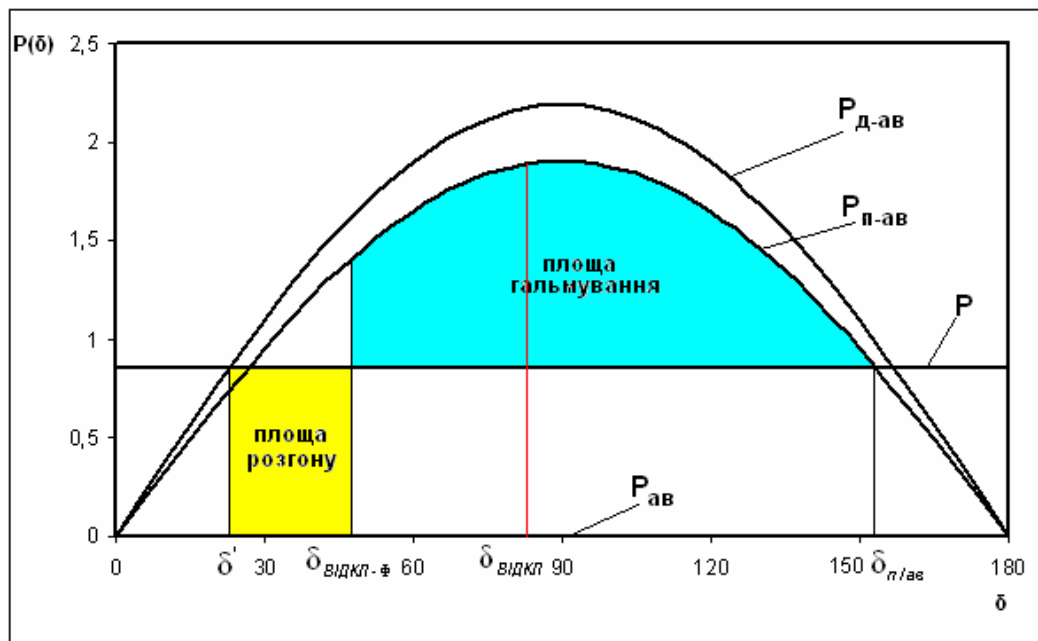


Рис.121 Дослідження найпростішої системи на динамічну стійкість

Фактичний кут відключення менший за граничний. Таким чином, динамічна стійкість системи в післяаварійному режимі зберігається.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
2. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
4. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах. – М.: Мир, 2003. – 284 с.
5. Костерев Н.В. Моделирование и динамика атомных электростанций при возмущениях в энергосистеме. – К.: Вища школа, 1986. – 168 с.
6. Ухов А.С. Релейная защита и автоматика. Методические указания к контрольным работам. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 26 с.