

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
за курсом "Електромагнітні перехідні процеси"

для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Харків
НТУ «ХП»
2021

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт за курсом "Електромагнітні перехідні процеси" для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / склад. Рудевіч Н.В. – Х. : НТУ «ХПІ», 2021. – 59с.

Укладачі: Н.В. Рудевіч

Рецензент

Кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем

ВСТУП

Мета лабораторних робіт - поглиблення та закріплення знань за курсом «Електромагнітні перехідні процеси в електричних системах» і освоєння методики дослідження перехідних процесів в електричних системах за допомогою віртуальних комп'ютерних моделей.

Сучасні комп'ютерні технології, в основі яких лежать прикладні пакети, дають можливість більш глибокого вивчення питань, пов'язаних з процесами в електричних системах. Вони дозволяють якісно змінити і істотно поліпшити технологію вивчення, перевести її в віртуальну реальність, здійснити в цій віртуальній дійсності необхідні дослідження з отриманням кількісних результатів.

В якості лабораторії виступає віртуальна комп'ютерна лабораторія, тобто лабораторні роботи представлені не фізичними пристроями, а віртуальними комп'ютерними моделями. Інструментом дослідження перехідних процесів в електричних системах є програма Matlab. Основними пакетами розширення, які використовуються при дослідженні електромагнітних перехідних процесів в електричних системах, є Simulink і SimPowerSystems.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОСТОМУ ТРИФАЗНОМУ КОЛІ З ДЖЕРЕЛОМ НЕЗМІННОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: визначення характеру зміни струму трифазного короткого замикання (КЗ) і його складових в залежності від моменту КЗ і співвідношення активних і реактивних опорів кола.

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію перехідних процесів при коротких замиканнях в радіальній мережі без трансформаторних зв'язків.

Рекомендована література [1, 2].

2. Вивчити основні відомості про роботу в середовищі Simulink.

Рекомендована література [3].

3. Ознайомитися зі структурною схемою комп'ютерної моделі для дослідження перехідних процесів в простому трифазному нерозгалуженому ланцюзі з джерелом незмінної напруги (рис. 1.3).

Короткі пояснення до роботи

У лабораторній роботі досліджується просте симетричне трифазне коло з активно-індуктивним опором кола короткого замикання (рис. 1.1), що характерно для більшості реальних електричних мереж. Коло живиться від джерела, у якого в нормальному режимі роботи і при КЗ на виводах зберігається симетрична і незмінна за значенням трифазна система напруг.

Зміна режиму в ланцюзі, що містить джерело живлення, при наявності індуктивності супроводжується перехідним процесом. Рівняння, що описує цей процес має вигляд

$$u = ir_{\kappa} + L_{\kappa} \frac{di}{dt},$$

де u та i - відповідно миттєві значення напруги і струму фази, що розглядається.

Рішення цього рівняння дає вираз для миттєвого значення струму в будь-який момент часу t від початку КЗ

$$i_{kt} = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \phi_k) + i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}},$$

де U_m - амплітудне значення фазної напруги джерела;

Z_k - модуль повного опору кола КЗ, $Z_k = \sqrt{r_k^2 + (\omega L_k)^2}$;

α - фазовий кут напруги джерела в момент $t=0$;

ϕ_k - кут зсуву струму в ланцюзі КЗ щодо напруги джерела тієї ж

фази, $\phi_k = \arctg \frac{\omega L_k}{r_k}$;

ω - кутова частота, $\omega = 2\pi f$;

T_a - постійна часу кола КЗ, $T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}$.

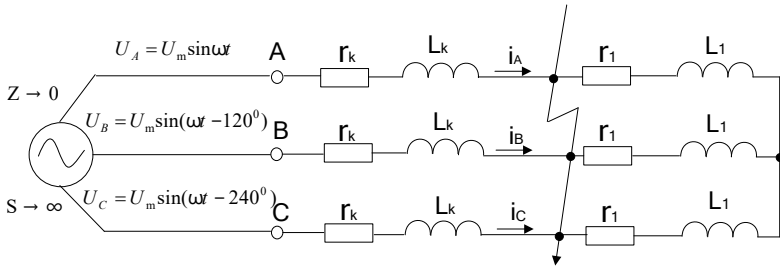


Рис. 1.1. Трифазний симетричний ланцюг, що живиться від шин незмінної синусоїдної напруги

Повний струм КЗ складається з двох складових:

- вимушеної, зумовленої дією напруги джерела;
- вільної, обумовленої зміною запасу енергії магнітного поля в індуктивності L_k .

Вимушена складова струму КЗ має періодичний характер з частотою, що дорівнює частоті напруги джерела. Називають цю складову зазвичай періодичною складовою струму КЗ

$$i_{nt} = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \phi_k) = I_{mn} \sin(\omega t + \alpha - \phi_k),$$

де I_{mn} – амплітудне значення періодичної складової струму.

Вільна складова струму КЗ

$$i_{at} = i_{ao} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

має аперіодичний характер зміни, на підставі чого цю складову називають аперіодичною складовою струму КЗ. Значення струму i_{ao} буде максимальним в разі, якщо напруга в момент виникнення КЗ проходить через нульове значення ($\alpha = 0$), струм в колі до КЗ був відсутній ($i_{(0)} = 0$) і характер ланцюга КЗ індуктивний ($\phi_k \approx 90^\circ$). Крива зміни струму, за умови максимального значення аперіодичної складової струму, показана на рис. 1.2.

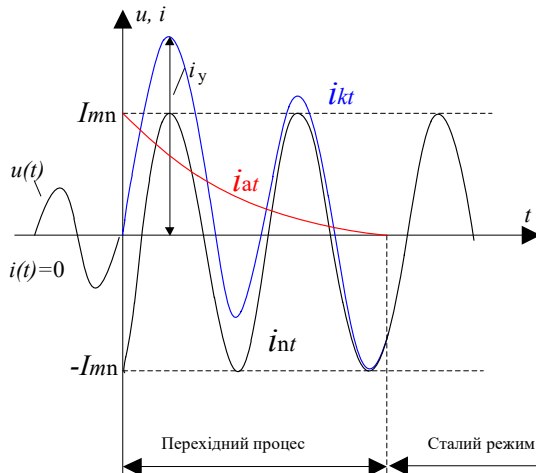


Рис. 1.2. Зміна струму КЗ в колі, що живиться від шин незмінної напруги при максимальному значенні аперіодичної складової

Перехідний процес закінчується після загасання аперіодичної складової струму і далі повний струм КЗ дорівнює його періодичної складової, незмінної за амплітудою.

Максимальна миттєве значення повного струму настає зазвичай через 0,01 с після виникнення КЗ. Воно називається ударним струмом і позначається i_y .

$$i_y = \sqrt{2} k_y I_{\text{но}},$$

де k_y – ударний коефіцієнт, $k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$.

Дослідження проводиться на комп'ютерній моделі простого трифазного нерозгалуженого кола з джерелом незмінної напруги, структурна схема якого представлена на рис. 1.3.

На виході другого елемента моделюється миттєве значення синусоїдної напруги частотою 50 Гц і постійної амплітуди, яка задається в елементі 1. На виході тринадцятого елемента моделюється миттєве значення повного струму КЗ. За допомогою елементів 17-22 моделюється періодична складова струму КЗ, яка відстає від напруги на кут, який визначається співвідношенням активного і індуктивного опорів кола КЗ. Ці опори задаються параметрами 17 і 23 елементів. На 4 елементі моделюється початкова фаза напруги. Аперіодична складова струму КЗ виходить як різниця повного струму КЗ і його періодичної складової на виході суматора 13. У перемикачі (елемент 8) задається час КЗ. На осцилограф (елемент 3) виводяться зміна напруги, повного струму КЗ і його складових: періодичної і аперіодичної.

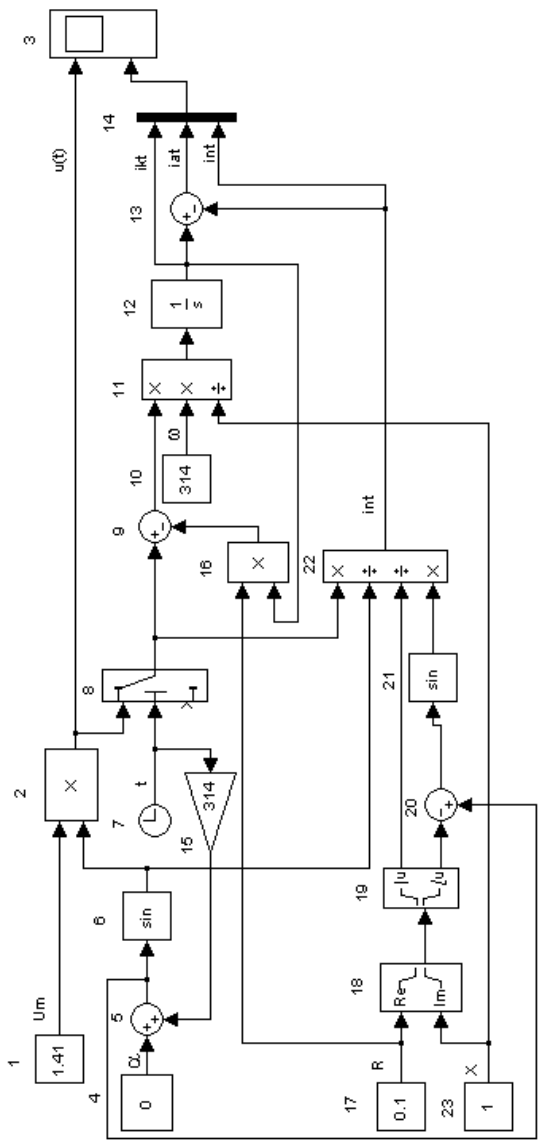


Рис. 1.3. Структурна схема комп'ютерної моделі простого трифазного нерозгалуженого кола з джерелом незмінної напруги

Порядок выполнения работы

1. Ознайомитися з комп'ютерною моделлю простого трифазного нерозгалуженого кола з джерелом незмінної напруги (рис.1.3). Задати необхідні параметри. Встановити інтервал моделювання від 0 до 0,08 - 0,12 с.

2. Змодельовати трифазне КЗ через 0,02 с роботи джерела напруги в режимі холостого ходу і зняти осцилограми напруги, повного струму короткого замикання його складових для фаз: А, В і С.

Для виконання цього досвіду необхідно в перемикачі задати час рівний 0,02 с, поставити по черзі фазу напруги в момент КЗ: 0, - $2\pi/3$ і $2\pi/3$.

3. З'ясувати вплив на характер струму КЗ і його складових, моменту часу настання КЗ, знявши осцилограми струмів для наступних випадків:

- коротке замикання відбувається в момент часу, коли напруга проходить через нуль, зростаючи;
- коротке замикання відбувається в момент часу, коли напруга проходить через нуль, убуюючи;
- коротке замикання відбувається в момент часу, коли напруга максимальна;
- коротке замикання відбувається в момент часу, коли напруга мінімальна.

Дослідження провести для фази А, задаючи по черзі в перемикачі час рівний: 0,02; 0,01; 0,005 і 0,015 с.

4. З'ясувати вплив на характер струму КЗ і його складові, співвідношення активного і реактивного опорів кола КЗ, знявши осцилограми для наступних випадків:

- активний опір менше реактивного в 10 разів;
- активний опір менше реактивного в 100 разів;
- активний опір менше реактивного в 1000 разів (індуктивне коло);
- активний опір більше реактивного в 100 разів (практично активне коло).

Дослідження провести для фази А, змінюючи відповідним чином співвідношення активного і реактивного опорів.

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Структурна схема комп'ютерної моделі і її короткий опис.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Як змінюються повний струм і його складові при трифазному КЗ в ланцюгах з джерелом нескінченної потужності?
2. Причина виникнення аперіодичної складової струму КЗ.
3. В яких межах змінюється постійна часу загасання аперіодичної складової струму КЗ?
4. За яких умов аперіодична складова струму КЗ буде максимальною?
5. Причина загасання аперіодичної складової струму КЗ.
6. Від чого залежить інтенсивність загасання аперіодичної складової струму КЗ?
7. Яка тривалість загасання аперіодичної складової струму КЗ і від чого вона залежить?
8. У яких ланцюгах постійна часу загасання аперіодичної складової струму КЗ буде максимальною, а в яких мінімальною?
9. У яких ланцюгах аперіодична складова може не затухати і чому?
10. У який момент часу після початку КЗ виникає найбільший струм?
11. Який струм КЗ називається ударним і за яких умов він буде максимальним?
12. Від яких параметрів залежить ударний коефіцієнт і в яких межах він змінюється?
13. У яких ланцюгах ударний коефіцієнт буде максимальним, в яких мінімальним?
14. Коли настає сталий режим при КЗ в колах з джерелом незмінної напруги?

15. Як за осцилограмою аперіодичної складової струму визначити постійну часу її загасання?

16. Що розуміють під джерелом незмінної напруги?

ЛОБОРОТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОСТОМУ ТРИФАЗНОМУ КОЛІ ЯКИЙ ЖИВИТЬСЯ ВІД ГЕНЕРАТОРА ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ (БЕЗ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ЗБУДЖЕННЯ), ПРИ СИМЕТРИЧНОМУ КЗ

Мета роботи: визначення характеру зміни струму трифазного короткого замикання і його складових в залежності від віддаленості крапки КЗ від генератора, значення величини постійної часу обмотки збудження T_f і демпферного обмотки T_d .

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію перехідних процесів при коротких замиканнях в радіальній мережі з генераторами обмеженої потужності.

Рекомендована література [1, 2].

2. Вивчити основні відомості про роботу в середовищі SimPowerSystem [4].

3. Ознайомитися з віртуальною моделлю простого трифазного нерозгалуженого кола з генератором обмеженої потужності без автоматичського регулятора збудження, створеної в пакеті SimPowerSystem програми Matlab 7.4 (рис. 2.3).

Короткі пояснення до роботи

У лабораторній роботі досліджується просте симетричне трифазне коло з двостороннім живленням. З одного боку генератор обмеженої потужності без автоматичного регулятора збудження (АРЗ), а з іншого боку система незмінної напруги.

На рис. 2.1 показаний генератор без АРЗ, що працює через простий трифазний ланцюг на систему незмінної напруги. В даному випадку інтерес представляє характер зміни струму трифазного короткого замикання з боку генератора i_{kG} .

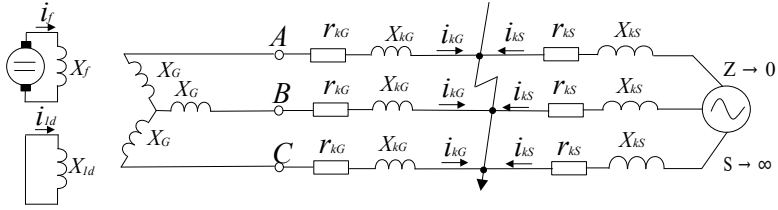


Рис. 2.1. Трифазне симетричне коло, що живиться від синхронного генератора без АРЗ і системи незмінної напруги

На рис. 2.2 а наведена крива зміни повного струму КЗ і його складових в одній фазі кола, що живиться від генератора без АРЗ. Момент виникнення КЗ відповідає випадку, коли аперіодична складова струму і повний струм досягають максимального значення.

На холостому ході, під дією струму ротора, в машині наводиться магнітний потік збудження. У момент виникнення КЗ в статорі генератора з'являється струм. Періодична складова струму відстає від напруги на виводах генератора на кут, який визначається параметрами ланцюга КЗ. Протікаючи по обмоткам генератора струм створює магнітний потік реакції статора Φ_{ad} , який буде направлений зустрічно потоку збудження Φ_d . Потік Φ_{ad} має дві складові, обумовлені періодичною і аперіодичною складовими струму КЗ.

На шляху потоку Φ_{ad} знаходяться два провідних контури: короткозамкнений контур демпферного обмотки (тільки у гідрогенераторів) і замкнений на збудник контур обмотки збудження.

Контури демпферного обмотки і обмотки збудження мають індуктивність, в якій під дією Φ_{ad} наводяться електрорушійні сили і виникають вільні струми $i_{св.1d}$ та $i_{св.f}$ відповідно і. Вільні струми будуть мати також дві складові: періодичну, обумовлену аперіодичною складовою потоку Φ_{ad} і аперіодичну, обумовлену періодичною складовою потоку Φ_{ad} В

результаті струми $i_{cb.1d}$ і $i_{cb.f}$ мають періодично згасаючий характер (рис. 2.2 б, в)

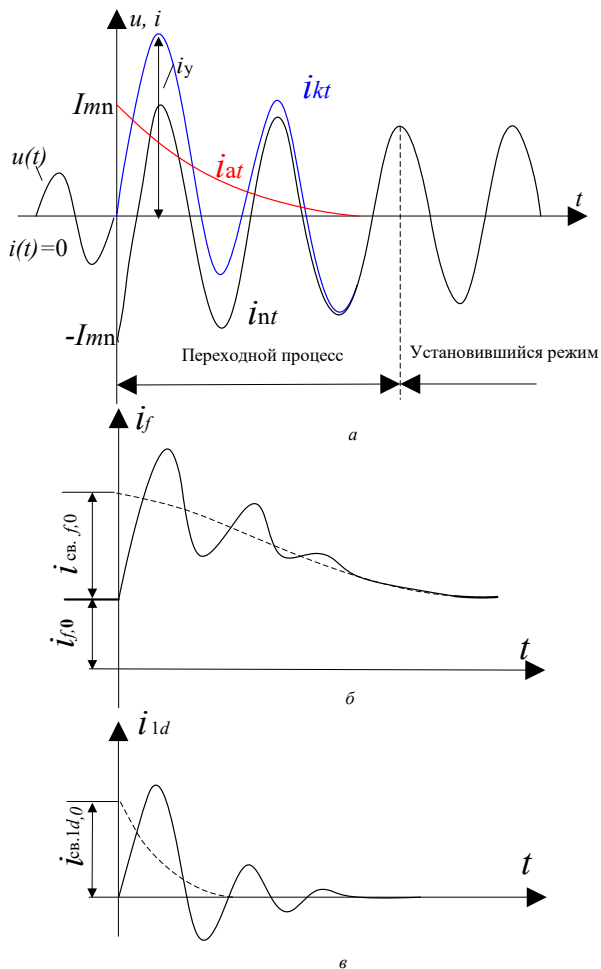


Рис. 2.2. Зміни струмів при КЗ (генератор без АРЗ): а - повного струму і його складових, б - струму в обмотці збудження; в - струму в демпферній обмотці

Загасання вільних струмів залежить від постійної часу, рівний відношенню індуктивності контуру його активного опору. Вільним струмів відповідають вільні магнітні потоки обмоток: демпферного $\Phi_{cb.1d}$ і збудження $\Phi_{cb.f}$.

Так як магнітний потік ротора не може змінюватися стрибком, то для моменту часу $t = 0$ має виконуватися умова $\Phi_{ad} = \Phi_{cb.1d} + \Phi_{cb.f}$

Таким чином, в початковий момент КЗ в повітряному проміжку генератора діє результуючий магнітний потік $\Phi_{рез}$ рівний Φ_d , тобто

$$\Phi_{рез} = \Phi_d + \Phi_{cb.1d} + \Phi_{cb.f} - \Phi_{ad} = \Phi_d.$$

З плином часу відбувається загасання вільних струмів в демпферній обмотці і обмотці збудження з одночасним зменшенням відповідних магнітних потоків $\Phi_{cb.1d}$ і $\Phi_{cb.f}$, причому першим затухає магнітний потік в колі демпферної обмотки. У колі обмотки збудження, що має мале активний опір, вільний струм затухає повільніше.

Вільні магнітні потоки вже не можуть компенсувати розмагнічувальну дію потоку реакції статора, внаслідок чого відбувається зменшення потоку $\Phi_{рез}$, а, отже, і електрорушійної сили генератора. Це зменшення призводить до того, що періодична складова струму КЗ також зменшується.

Після затухання вільних струмів в демпферного обмотці і в обмотці збудження настає сталий режим для періодичної з-складової струму статора. Результуючий магнітний потік при цьому дорівнює $\Phi_{рез} = \Phi_d - \Phi_{ad}$, тобто розмагнічувальна дія потоку статора максимальна. Слід, правда, врахувати, що магнітний потік Φ_{ad} дещо зменшується в порівнянні з по-

чатковим моментом внаслідок зменшення періодичної складової струму КЗ.

Таким чином, при відсутності у генератора АРЗ сталі значення періодичної складової струму КЗ виявляється менше його початкового значення.

Аперіодична складова струму КЗ загасає по експоненті з-постійною часу $T_a = \frac{x_{kG} + x_G}{\omega(r_{kG} + r_G)}$ (приймається $r_G = 0$).

В роботі дослідження перехідних процесів в простому трифазному нерозгалуженому колі, що живиться від генератора обмеженої потужності без автоматичного регулятора збудження і системи незмінної напруги проводиться на віртуальній моделі, створеній в пакеті SimPowerSystems програми Matlab 7.4 (рис. 2.3).

Вихідними даними для моделі є значення параметрів блоків генератора (Generator), трансформатора (Transformer), лінії електропередачі (Line), системи (System), які вводяться в їх вікнах налаштування. Для виклику вікна налаштування будь-якого блоку необхідно два рази клікнути по зображенню блоку і ввести його параметри. Значення параметрів блоку генератора і трансформатора в моделі задаються такими, як представлені на рис. 2.4 (а, б) [5].

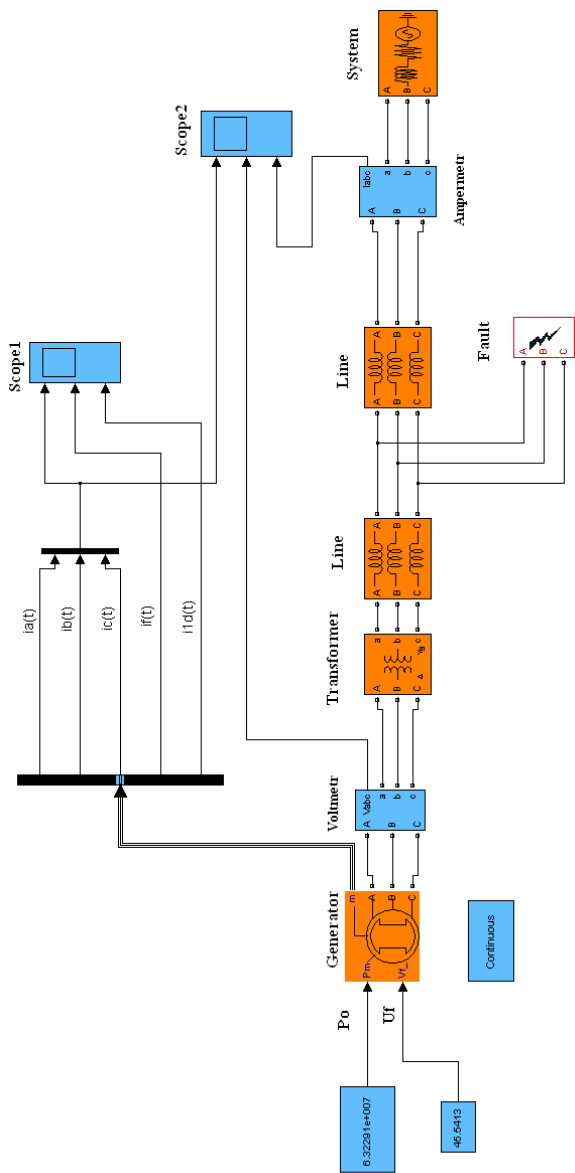
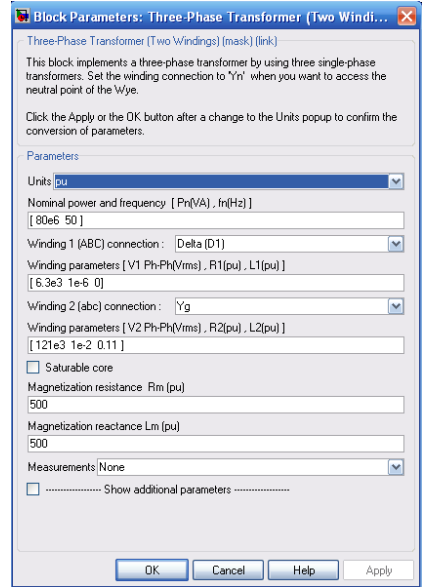
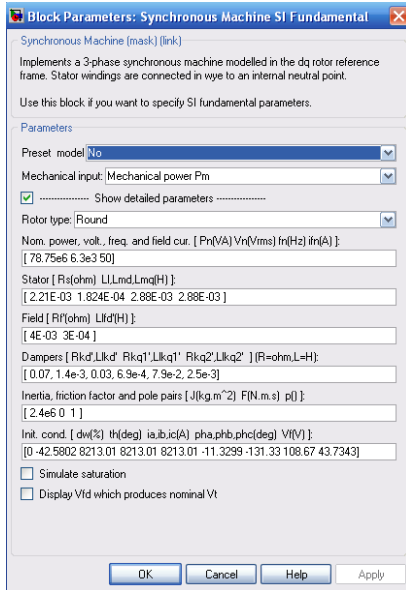


Рис. 2.3. Віртуальна модель простого кола, що живиться від генератора обмеженої потужності без регулятора збудження і системи незмінної напруги



a

Рис. 2.4. Вікна налаштування блоків: *a* – генератора, *b* – трансформатора

Значення параметрів блоку лінії електропередач в моделі задаються такими, як представлені на рис. 2.5.

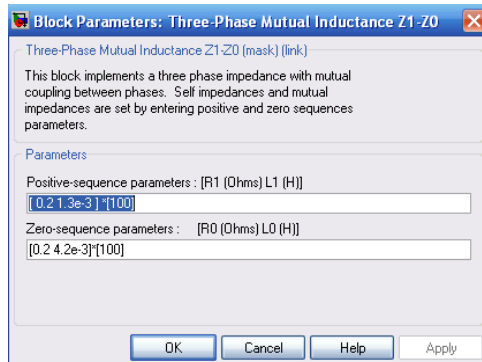


Рис. 2.5. Вікно налаштування блоку лінії електропередач

Значення параметрів блоку системи в моделі задаються такими, як представлені на рис. 2.6.

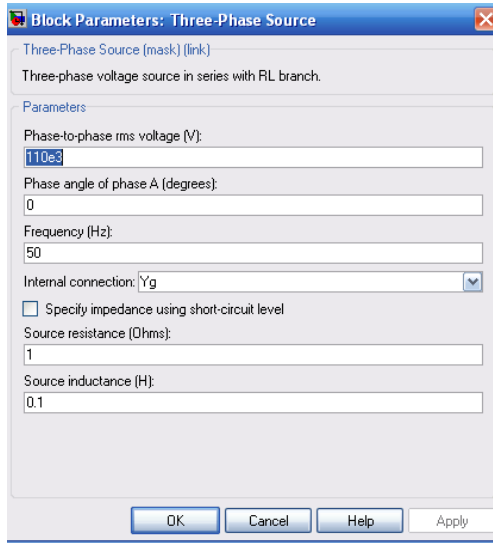


Рис. 2.6. Вікно налаштування блоку система

Блок налаштування (Continuous) дозволяє встановлювати величину потужності, що видає генератор, режим системи, що передував збудженню, при цьому потужність турбіни P_0 і напруга збудження U_f визначаються автоматично. Для налаштування блоку необхідно клікнути по його зображенню і встановити метод інтегрування «Continuous». Потім клікнути функцію «Initial States Settings» і активізувати значок «To steady state» (усталеною) після чого клікнути «Apply» і «Ok» для його збереження. Далі клікнути функцію «Load Flow and Machine Initialization» (завдання параметрів роботи генератора) і задати параметри такими, як представлені на рис. 2.7.

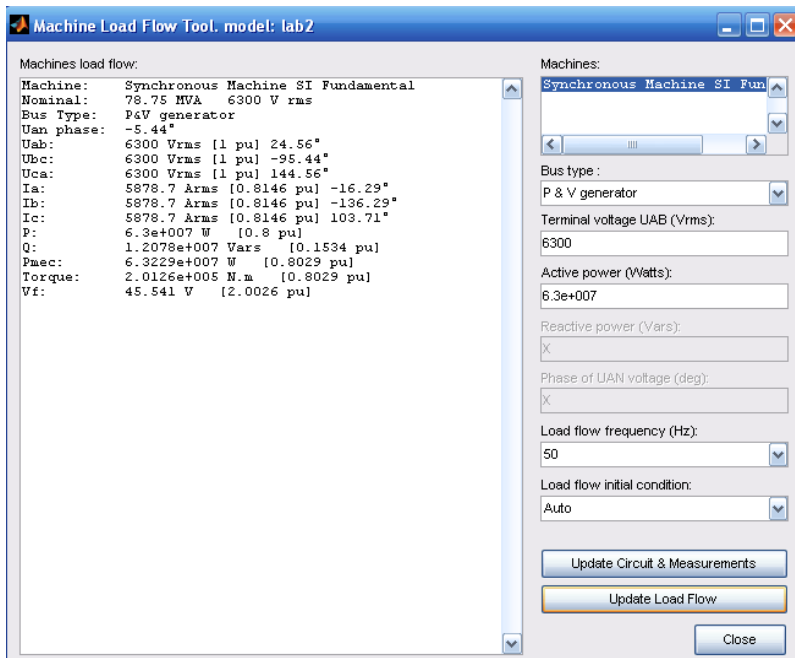


Рис. 2.7. Вікно налаштування параметрів роботи синхронного генератора

Коротке замикання моделюється за допомогою блоку імітатора КЗ (Fault), в якому задаються фази, що замкнулися, час замикання (усунення замикання).

На перший осцилограф (Score 1) виводяться зміна струмів всіх фаз генератора $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, а також зміна струму в обмотці збудження $i_f(t)$ і демпферній обмотці $i_{ld}(t)$. На другий осцилограф (Score 2) виводяться зміна струмів всіх фаз генератора, лінійних напруг всіх фаз генератора і струмів всіх фаз, що протікають в лінії з боку системи незмінної напруги

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з віртуальною моделлю простого трифазного нерозгалуженого кола, що живиться від генератора обмеженої потужності без регулятора збудження і системи незмінної напруги (рис. 2.3). Задати параметри генератора, трансформатора, лінії, системи. Задати значення активної потужності, що видається генератором, а також режим роботи системи.

2. Змоделювати трифазне коротке замикання на шинах генератора, на шинах трансформатора, посередині лінії електропередач, на шинах системи. Час моделювання встановити 0,7 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

3. Змоделювати трифазне коротке замикання посередині лінії електропередач при збільшенні (зменшенні) значення постійної часу обмотки збудження T_f в два рази, шляхом зміни активного опору обмотки збудження. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$.

4. Змоделювати трифазне коротке замикання посередині лінії електропередач при збільшенні (зменшенні) значення постійної часу демпферної обмотки T_{1d} в два рази, шляхом зміни активного опору демпферної обмотки. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$.

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Віртуальна модель і її короткий опис.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Як змінюються повний струм і його складові при трифазному КЗ на виводах генератора без АРЗ?
2. Чому відбуватися зміна періодичної складової струму КЗ при короткому замиканні на шинах генератора?
3. Як впливає віддаленість КЗ на величину струму КЗ і характер протікання перехідного процесу?
4. Коли настає сталий режим при КЗ в колах з генератором обмеженої потужності без АРЗ?
5. Причина загасання періодичної складової струму КЗ.
6. Чому в початковий момент КЗ не позначається дія потоку реакції статора?
7. На що впливає постійна часу обмотки збудження T_f ?
8. На що впливає постійна часу демпферної обмотки T_{fd} ?
9. Коли дія потоку реакції статора буде максимальним?
10. Чому згасають аперіодичні складові вільних струмів в обмотці збудження і демпферній обмотці?
11. Чому дорівнює значення струмів в обмотці збудження і демпферній обмотці в сталому режимі?
12. Коли загасають періодичні складові вільних струмів в обмотці збудження і демпферній обмотці?

ЛОБОРАТОРНА РОБОТА 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОСТОМУ ТРИФАЗНОМУ КОЛІ, ЯКИЙ ЖИВИТЬСЯ ВІД ГЕНЕРАТОРА ОБМЕЖЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ (ЗА НАЯВНОСТІ АРЗ), ПРИ СИМЕТРИЧНОМУ КЗ

Мета роботи: визначення характеру зміни струму трифазного короткого замикання і його складових в залежності від віддаленості крапки КЗ від генератора і значення параметрів АРЗ.

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію перехідних процесів при симетричних коротких замиканнях в радіальній мережі з генераторами обмеженої потужності.

Рекомендована література [1, 2].

2. Вивчити основні відомості про роботу в середовищі SimPowerSystem [4].

3. Ознайомитися з віртуальною моделлю простого трифазного нерозгалуженого кола з генератором обмеженої потужності при наявності АРЗ, створеної в пакеті SimPowerSystem програми Matlab 7.4 (рис. 3.3).

Короткі пояснення до роботи

У лабораторній роботі досліджується проста симетричне трифазне нерозгалужене коло з двостороннім живленням. З одного боку генератор обмеженою потужності з АРЗ, а з іншого боку система нескінченної потужності. На відміну від попередньої лабораторної роботи в даній роботі розглядаються короткі замикання при наявності у генератора регулятора збудження (рис. 3. 1). В цьому випадку зниження напруги при КЗ компенсується збільшенням струму збудження, в найпростішому випадку за рахунок зміни опору регулювального резистора r_r в ланцюзі обмотки збудження. При зниженні напруги на шинах генератора нижче $0,85 U_n$ спра-

цьовує форсування збудження, що забезпечує наростання збудження генератора до граничного значення ($r_p = 0$).

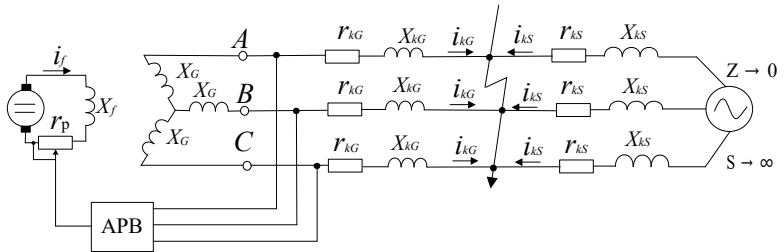


Рис. 3.1. Трифазне симетричне коло, що живиться від синхронного генератора з АРЗ і системи незмінної напруги

Таким чином, робота АРЗ при КЗ призводить до збільшення магнітного потоку Φ_d і $\Phi_{\text{рез}}$, а, отже, до збільшення електрорушійної сили генератора і струму КЗ (рис. 3.2).

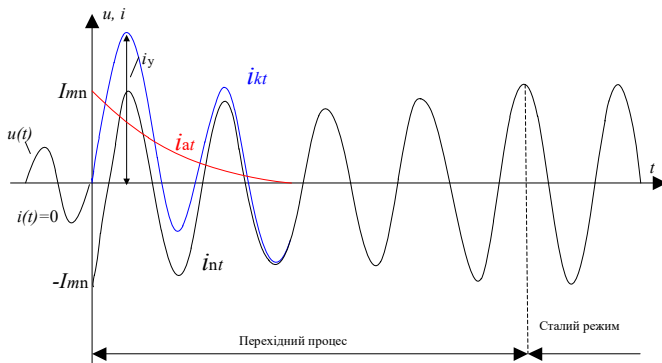


Рис. 3.2. Криві зміни струму КЗ синхронного генератора при наявності АРЗ

Всі АРЗ діють з невеликим запізненням, оскільки містять елементи, що мають індуктивність. Крім того, значна індуктивність обмотки збудження генератора призводить до затримки збільшення струму ротора. В результаті цього дія АРЗ починає проявлятися тільки через деякий час після виникнення КЗ. Основними характеристиками регулятора є постійна часу T_p , що впливає на час запізнювання, і коефіцієнт посилення K , що впливає на інтенсивність наростання струму збудження. Зі сказаного можна зробити висновок, що АРЗ не впливає на струм КЗ в перші періоди короткого замикання. Початкові значення періодичної і аперіодичної складових струму, процес загасання останньої, а отже, і ударний струм залишаються, такими ж, як і в розглянутому вище випадку роботи генератора без АРЗ.

Глибина зниження напруги на виводах генератора при КЗ, а, відповідно, і реакція системи регулювання залежать від електричної віддаленості місця пошкодження від генератора.

Після закінчення перехідного процесу в залежності від опору кола КЗ генератор буде працювати в одному з двох режимів:

- режим номінальної напруги, коли регулятор збудження зможе підняти напругу на шинах генератора до номінальної;
- режим граничного збудження, коли струм в обмотці збудження досягне граничного значення, а напруга на шинах генератора залишиться менше номінальної.

Опір кола КЗ, при якому генератор одночасно буде працювати в двох режимах, називається критичним $X_{кр}$. Цей опір для кожного генератора можна розрахувати за його паспортним даним за формулою

$$X_{кр} = X_d \frac{U_n}{E_{qnp} - U_n},$$

де X_d – опір генератора за проковою віссю;

E_{qnp} – гранична електрорушійна сила за поперечною віссю,

U_n – номінальна напруга генератора.

Цьому критичного опору відповідає критичний струм, що дорівнює

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_{\text{н}}}{X_{\text{кр}}}.$$

Порівнявши критичний опір генератора з опором кола КЗ можна визначити режим, в якому буде працювати генератор при КЗ за цим опором: $X_{\text{кз}} \geq X_{\text{кр}}$ - режим номінальної напруги; $X_{\text{кз}} \leq X_{\text{кр}}$ - режим граничного збудження.

В роботі дослідження перехідних процесів в простому трифазному нерозгалуженому колі, що живиться від генератора обмеженої потужності з АРЗ і системи незмінної напруги проводиться на віртуальній моделі, створеній в пакеті SimPowerSystems програми Matlab 7.4 (рис. 3.3).

Вихідними даними для моделі є значення параметрів блоків трансформатора (Transformer), лінії електропередач (Line), системи (System), наведені в роботі 2, генератора (Generator) і системи збудження генератора (Excitation System). Значення параметрів блоку генератора і його системи збудження в моделі задаються такими, як представлені на рис.3.4 (а, б) [5].

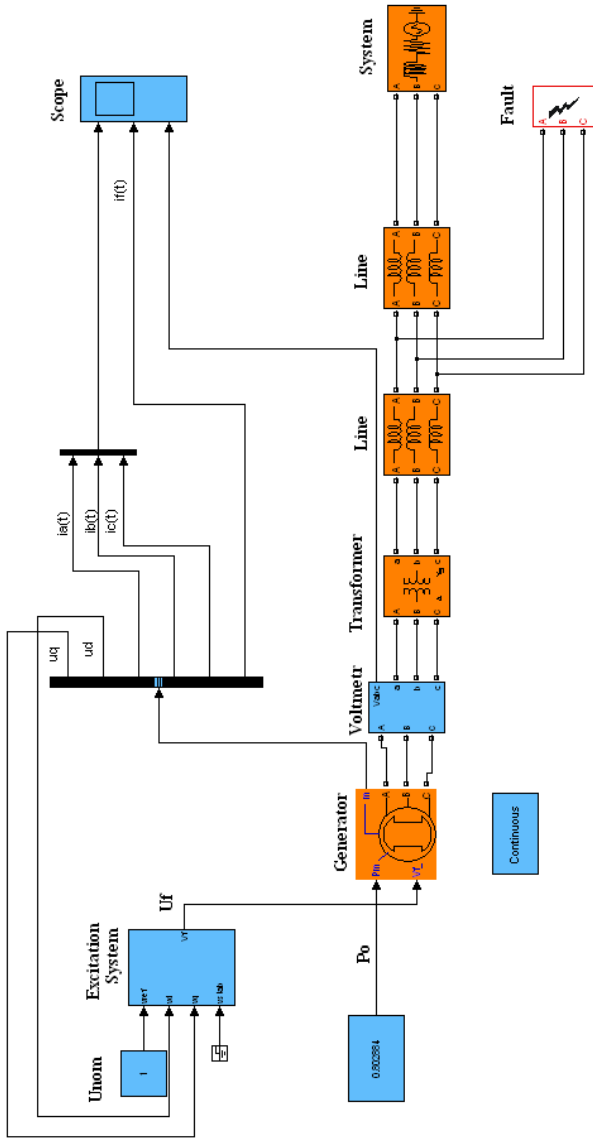
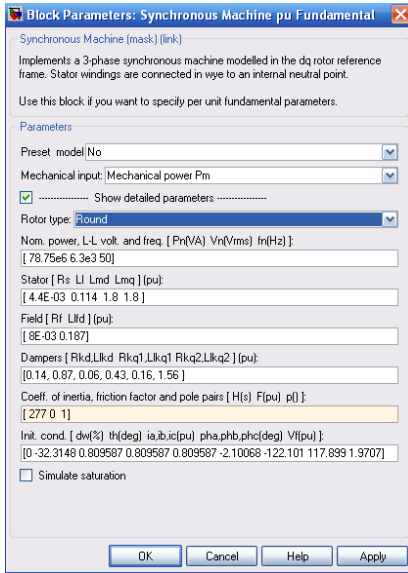
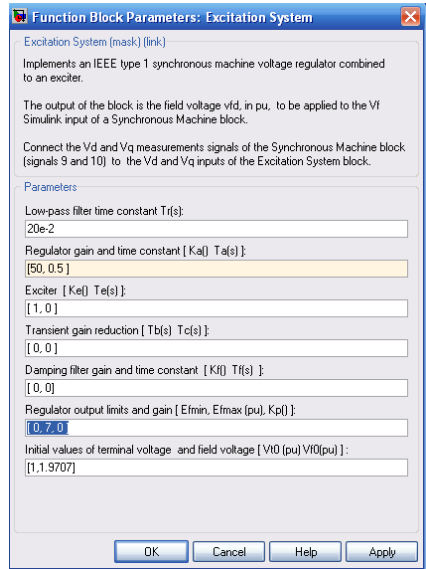


Рис. 3.3. Віртуальна модель простого кола, що живиться від генератора обмеженої потужності з АРЗ і від системи незмінної потужності.



a



б

Рис. 3.4. Вікна налаштування блоків: *a* – генератора, *б* – системи збудження генератора

На осцилограф (Scope) виводяться зміна струмів всіх фаз генератора $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, струму в обмотці збудження $i_f(t)$ і лінійні напруги на шинах генератора $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з віртуальною моделлю простого трифазного нерозгалуженого кола, що живиться від генератора обмеженої потужності з АРЗ і системи незмінної напруги (рис. 3.3). Задати параметри генератора і його системи збудження, трансформатора, лінії, системи. Задати активну потужність, що видається генератором, а також режим роботи системи.

2. Змодельовати трифазне коротке замикання на шинах генератора, на шинах трансформатора, посередині лінії електропередач, на шинах системи. Час моделювання встановити 1 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

3. Змодельовати трифазне коротке замикання посередині чи-ванні електропередач при значенні постійної часу регулятора $T_p = 0,25; 0,5; 1$ с. Час моделювання встановити 1 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

4. Змодельовати трифазне коротке замикання посередині лінії електропередач при значенні коефіцієнта посилення регулятора $K_p = 25, 50, 100$ при незмінному значенні постійної часу регулятора $T_p = 0,5$ с. Час моделювання встановити 1 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Віртуальна модель і її короткий опис.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

Контрольні запитання

1. Як змінюються повний струм і його складові при трифазному КЗ на шинах генератора з АРЗ?
2. Коли настає сталий режим при КЗ в ланцюгах з генератором обмеженої потужності з АРЗ?
3. Чому сталий струм КЗ у генератора з АРЗ більше ніж у генератора без АРЗ?

4. Чому в початковий момент КЗ не позначається дію регуляторів збудження?
5. Що таке критичний опір при розрахунку сталого струму КЗ?
6. Що таке критичний струм генератора?
7. У яких режимах може працювати генератор при сталому струмі КЗ?
8. Як змінюється напруга на шинах генератора і струм в обмотці збудження при КЗ за опором більше критичного?
9. Як змінюється напруга на шинах генератора і струм в обмотці збудження при КЗ за опором менше критичного?
10. Як впливає коефіцієнт посилення і постійна часу АРЗ на характер протікання перехідного процесу?
11. Коли АРЗ припиняє роботу при КЗ?
12. У якому випадку спрацьовує форсування збудження?

ЛОБОРАТОРНА РОБОТА 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОСТОМУ ТРИФАЗНОМУ КОЛІ, ЩО ЖИВИТЬСЯ ВІД ДЖЕРЕЛА НЕЗМІННОЇ НАПРУГИ, ЗА НЕСИМЕТРИЧНОГО КЗ

Мета роботи:

1. Визначення характеру зміни струму короткого замикання в кожній фазі трифазного кола в залежності від виду несиметричного короткого замикання.
2. Визначення гармонійного спектру сигналу струму короткого замикання в кожній фазі трифазного кола і струму збудження генератора в залежності від виду несиметричного короткого замикання.

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію перехідних процесів при несиметричних КЗ в радіальній мережі.

Рекомендована література [6].

2. Вивчити теорію утворення вищих гармонік в мережі при несиметричних КЗ.

Рекомендована література [6].

3. Ознайомитися з віртуальною моделлю для дослідження перехідних процесів в простому трифазному колі, що живиться від джерела незмінної напруги, при несиметричних КЗ, створеної в пакеті SimPowerSystem програми Matlab 7.4 (рис. 4.2).

Короткі пояснення до роботи

В роботі досліджується просте трифазне нерозгалужене коло з двостороннім живленням. З одного боку генератор обмеженої потужності без АРЗ, а з іншого боку система незмінної напруги.

До основних несиметричних видів КЗ в трифазному колі відносяться: однофазне КЗ, двофазне КЗ, двофазне КЗ на землю.

При несиметричному КЗ в фазах протікають несиметричні струми, в тому числі в обмотках генератора. В цьому випадку утворюється пульсуюче магнітне поле ротора, яке в загальному випадку викликає повний спектр вищих гармонік.

Так, наприклад, при короткому замиканні фази А в колі, що живиться від генератора з явно вираженими полюсами і не має демпферних обмоток, по обмотці статора фази А протікає струм синхронної частоти. Цей струм утворює пульсуючий магнітний потік, який нерухомий в просторі (за умови, що до КЗ коло працювало на холостому ході) (рис. 4.1).

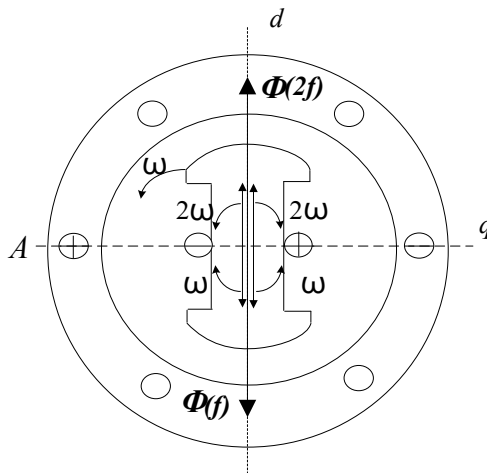


Рис. 4.1. До утворення вищих гармонік при однофазному КЗ в колі, що живиться від генератора без демпферних обмоток

Для аналізу процесу можна розкласти цей потік на два магнітні потоки, що обертаються в різні боки з синхронною частотою. Потік, що обертається в ту ж саму сторону що і ротор, буде нерухомий щодо обмотки збудження і ніяких електрорушійних сил наводити не буде, а потік, що рухається у зворотний бік по відношенню до ротора, має подвійну синхронну швидкість щодо обмотки збудження 2ω і буде наводить в ній електрорушійну силу подвійної частоти. Обумовлений цією електрорушійною силою струм подвійної частоти створює пульсуючий магнітний по-

тік ротора подвійний частоти. Розкладання цього потоку на два потоки, що обертаються в протилежні сторони з кутовою швидкістю 2ω щодо ротора, показує, що один з них обертається по відношенню до статора з кутовою частотою $-2\omega + \omega = -\omega$ в сторону, протилежну обертанню ротора і прагне компенсувати магнітний потік, що викликав пульсуючий з частотою 2ω . Інший потік обертається щодо статора зі швидкістю $2\omega + \omega = 3\omega$ в сторону обертання ротора. Цей потік наводить у статорі електрорушійну силу потрібної частоти. Таким чином, в обмотці статора наводиться повний спектр непарних гармонік, а в обмотці ротора - парних гармонік. Це справедливо в разі якщо струм КЗ містить тільки періодичну складову, що характерно для сталого режиму КЗ. Наявність аперіодичної складової в струмі КЗ (що має місце в перехідному процесі КЗ) призводить до появи повного спектра непарних гармонік в обмотці ротора, а в обмотці статора - парних гармонік. При відсутності ємності в ланцюзі амплітуди гармонік з ростом їх порядкового номера зменшуються.

Наявність демпферної обмотки в поперечній осі зменшує електричну несиметрію ротора і прояв вищих гармонік в такому випадку менш інтенсивніше. Це пояснюється тим, що відтворений демпферною обмоткою електромагнітний ефект від переміщення щодо неї магнітного поля такий же, як обмотки збудження. У розглянутих умовах демпферна обмотка і обмотка збудження створюють пульсуючі потоки, які відносно одного у часі зрушені на чверть періоду, так як обмотки зрушені в просторі на 90° . Спільна дія цих потоків утворює круговий поле, що обертається, і яке по відношенню до магнітного потоку статора, що викликав його, залишається нерухомим і спрямованим назустріч. Таким чином, коли ротор симетричний в обох осях пульсуюче магнітне поле статора не створює вищих гармонік.

Також місце КЗ може бути джерелом вищих гармонік. Це має місце в разі КЗ через перехідний опір, що як правило, носить нелінійний характер (залежить від напруги). Наявність опору дуги також породжує вищі гармоніки (300-500 Гц).

В роботі дослідження перехідних процесів в простому трифазному колі, що живиться від джерела обмеженої потужності, при несиметрично-

му КЗ проводиться на віртуальній моделі, створеній в пакеті SimPowerSystems програми Matlab 7.4 (рис. 4.2).

Вихідними даними для моделі є значення параметрів блоків генератора (Generator) (наведені в роботі 3), трансформатора (Transformer), лінії електропередач (Line), системи (System) (наведені в роботах 2).

Функція «FFT Tools» (відображення гармонійного спектру сигналу) блоку настройки (Continuous) дозволяє досліджувати гармонійний спектр сигналів, виведених на осцилограф (Scope). Всі осцилографи, що знаходяться в моделі відображаються в структурі доступних сигналів (Structure Available Signals). Відповідно до обраного осцилографа в рядку Input відображаються всі сигнали, які надходять на вхід цього осцилографа, далі наводиться їх порядковий номер (Signal number). Якщо ввімкнути функцію "Display selected signal" на верхньому графіку з'явиться зміна обраного сигналу в часі, при цьому часовий інтервал буде відповідати часовому інтервалу моделювання, який був встановлений в параметрах моделювання (configuration parameters). Якщо ввімкнути функцію значка "Display FFT Window" на верхньому графіку з'явиться зміна вибраного сигналу в часі на будь-якому часовому інтервалі, який може бути заданий в межах всього інтервалу моделювання. При виборі тимчасового інтервалу задається час відліку (Start time), кількість періодів сигналу (Number cycles) і частота (Fundamental frequency). На нижньому графіку вікна відображення гармонійного аналізу сигналів наводиться безпосередньо гармонійний спектр вибраного сигналу у вигляді діаграми, при цьому задається масштаб шкали по осі частоти - герци (Hertz) або номер гармоніки (Harmonic order), масштаб шкали по осі амплітуди - відносні одиниці при номінальних умовах (основна частота) (% Relative Fundamental) або відносні одиниці при деяких базисних умовах (Relative specified space value).

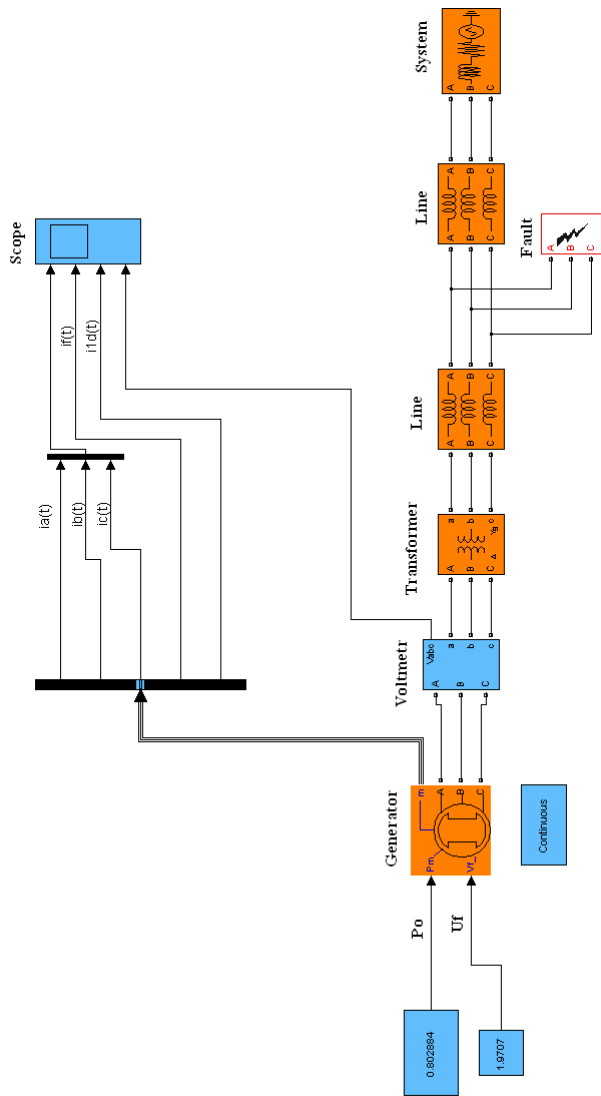


Рис. 4.2. Віртуальна модель простого кола, що живиться від генератора обмеженої потужності без АРЗ і системи незмінної напруги

Гармонійний спектр сигналу можна також отримати у вигляді таблиці шляхом зміни стилю відображення (Display style) з "Bar" на "List". Для виконання лабораторної необхідно функції «FFT Tools» задати параметри такими, як представлені на рис. 4.3.

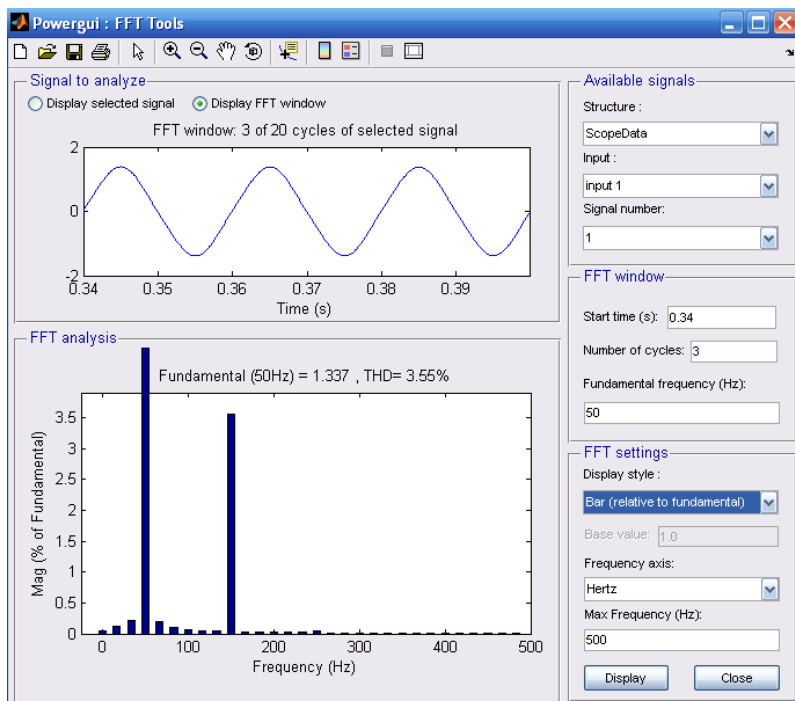


Рис. 4.3. Вікно налаштування і відображення гармонійного спектру сигналу функції «FFT Tools»

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з віртуальною моделлю простого трифазного нерозгалуженого кола, що живиться від генератора обмеженої потужності без регулятора збудження і системи незмінної напруги (рис. 4.2). Задати па-

раметри генератора, трансформатора, лінії, системи. Задати активну потужність видається генератором, а також режим системи.

2. Змоделювати черзі однофазне, двофазне, двофазне на землю коротке замикання посередині лінії електропередач. Час моделювання встановити 0,4 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

3. Змоделювати однофазне коротке замикання посередині лінії електропередач. Час моделювання встановити 0,4 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати гармонійний спектр сигналів в перехідному і сталому режимах $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

4. Змоделювати двофазне коротке замикання посередині лінії електропередач. Час моделювання встановити 0,4 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати гармонійний спектр сигналів в перехідному і сталому режимах $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

5. Змоделювати двофазне коротке замикання на землю посередині лінії електропередач. Час моделювання встановити 0,4 с, час короткого замикання 0,1 с. Отримати гармонійний спектр сигналів в перехідному і усталеному режимах $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Віртуальна модель і її короткий опис.
3. Осцилограми зміни параметрів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.
4. Гармонійний спектр сигналів $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$, $i_{1d}(t)$, $u_{ab}(t)$, $u_{bc}(t)$, $u_{ac}(t)$.
5. Аналіз отриманих результатів.
6. Висновки.

Контрольні питання

1. Які види КЗ відносяться до несиметричних і чому?
2. Що розуміється під вищими гармоніками сигналу?
3. Поясніть фізику появи вищих гармонік струму в обмотці збудження генератора при несиметричних КЗ в колі статора.
4. Поясніть фізику появи вищих гармонік в струмі обмотки статора при несиметричних КЗ в колі статора.
5. Назвіть причини виникнення вищих гармонік в струмі КЗ?
6. Які гармоніки відносяться до парних, а які до непарних?
7. Які гармоніки в струмі обмотки статора і ротора викликає аперіодична складова струму короткого замикання?
8. Які гармоніки в струмі обмотки статора і ротора викликає періодична складова струму короткого замикання?
9. Як довго в струмах обмотки статора при однофазному КЗ існують парні гармоніки?
10. Як довго в струмах обмотки ротора при однофазному КЗ існують непарні гармоніки?
11. Як впливає на появу вищих гармонік наявність демпферних обмоток у генератора?

ЛОБОРАТОРНА РОБОТА 5

ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ І СТРУМІВ ПРИ ПОПЕРЕЧНІЙ НЕСИМЕТРІЇ

Мета роботи: експериментальне визначення на віртуальній моделі залежності між симетричними складовими напруг і струмів при поперечній несиметрії.

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію несиметричних режимів при КЗ. Вивчити метод симетричних складових.

Рекомендована література [2, 7].

2. Ознайомитися з віртуальною моделлю для дослідження симетричних складових напруг і струмів при поперечній несиметрії, створеної в пакеті SimPowerSystem програми Matlab 7.4 (рис. 5.2).

Короткі пояснення до роботи

В роботі досліджується залежність між симетричними складовими напруг і струмів при різних видах несиметричних КЗ. Будь-який вид несиметричного КЗ зумовлює появу в трифазній системі поперечної несиметрії. Для дослідження несиметричних режимів використовують метод симетричних складових (МСС). МСС полягає в наступному: будь-яку несиметричну систему трьох векторів можна представити як суму трьох симетричних систем прямої, зворотної і нульової послідовностей (рис. 5.1).

Пряма послідовність являє собою систему 3-х векторів рівних по модулю і зсунутих відносно один одного на 120° , з чергуванням фаз АВС, позначається ця система 1.

Зворотня послідовність - така ж послідовність як і пряма, але з іншим чергуванням фаз АСВ і позначається 2.

Нульова послідовність - система з трьох однакових векторів, які співпадають по фазі, позначається 0.

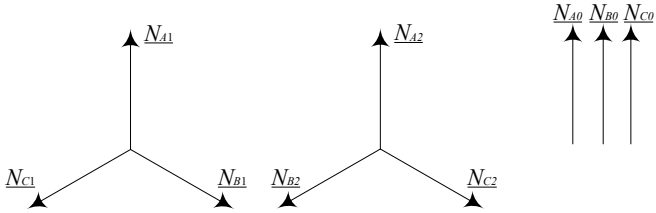


Рис. 5.1. Три симетричні системи: прямої, зворотної та нульової послідовностей

Особливістю прямої і зворотної послідовностей є те, що кожен вектор можна виразити через інший вектор за допомогою оператора повороту

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}.$$

Множення будь-якого вектора на оператор a повертає цей вектор на 120° в позитивному напрямку (проти годинникової стрілки).

За відомим симетричним складовим можна знайти фазні величини користуючись наступними співвідношеннями

$$\begin{cases} \underline{N}_A = \underline{N}_{A1} + \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0} \\ \underline{N}_B = \underline{N}_{B1} + \underline{N}_{B2} + \underline{N}_{B0} \\ \underline{N}_C = \underline{N}_{C1} + \underline{N}_{C2} + \underline{N}_{C0} \end{cases} \quad (1)$$

Зазвичай при несиметричному КЗ розрахунок ведуть щодо особливої фази, за яку приймають фазу, процеси в якій відрізняються від інших фаз. За особливу фазу приймають фазу А.

Систему (1) можна переписати

$$\begin{cases} \underline{N}_A = \underline{N}_{A1} + \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0} \\ \underline{N}_B = a^2 \underline{N}_{A1} + a \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0} \\ \underline{N}_C = a \underline{N}_{A1} + a^2 \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0} \end{cases} \quad (2)$$

Вирішивши систему рівнянь (2) щодо невідомих симетричних складових особливої фази, отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \underline{N}_{A0} = \frac{1}{3}(\underline{N}_A + \underline{N}_B + \underline{N}_C) \\ \underline{N}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{N}_A + a\underline{N}_B + a^2\underline{N}_C) . \\ \underline{N}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{N}_A + a^2\underline{N}_B + a\underline{N}_C) \end{cases} \quad (3)$$

Основні допущення при використанні методу симетричних складових:

1. Вважають, що струми і напруги різних послідовностей не впливають один на одну.
2. Вважають, що кожен елемент системи робить свій специфічний опір струмів різної послідовності.
3. Вважають, що струм кожної послідовності створює своє падіння напруги на відповідному опорі

$$\begin{cases} \underline{\Delta U}_{A1} = j\underline{I}_{A1}X_{A1} \\ \underline{\Delta U}_{A2} = j\underline{I}_{A2}X_{A2} . \\ \underline{\Delta U}_{A0} = j\underline{I}_{A0}X_{A0} \end{cases}$$

4. Вважають, що при несиметричному КЗ діє тільки електрорушійна сила прямої послідовності, а в кінці несиметрії напруги різних послідовностей. За своїм виконання генератори виконуються симетричними, тому вони створюють тільки електрорушійну силу прямої послідовності.

У припущенні, що окремі складові діють незалежно одна від одної дозволяє складати окремі схеми заміщення для кожної послідовності, з яких можна записати

$$\begin{cases} \underline{U}_{A1} = \underline{E}_{1\text{pez}} - j\underline{I}_{A1}X_{1\text{pez}} \\ \underline{U}_{A2} = 0 - j\underline{I}_{A2}X_{2\text{pez}} , \\ \underline{U}_{A0} = 0 - j\underline{I}_{A0}X_{0\text{pez}} \end{cases} \quad (4)$$

де $E_{1\text{рез}}$ – результуюча електрорушійна сила схеми заміщення прямої послідовності, $X_{1\text{рез}}$, $X_{2\text{рез}}$, $X_{0\text{рез}}$ – результуючі опори відповідно схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Для отримання залежностей між симетричними складовими напруг і струмів при поперечній несиметрії розрахунок проводять відповідно для кожного виду несиметричного КЗ, використовуючи відповідні граничні умови. При цьому беруть, що фаза А знаходиться в умовах, відмінних від умов двох інших фаз.

Так, при однофазному короткому замиканні на землю граничними умовами є $\underline{I}_C^{(1)} = 0$, $\underline{I}_B^{(1)} = 0$, $\underline{U}_A^{(1)} = 0$. З огляду на це, використовуючи метод симетричних складових, можна записати співвідношення, що дають залежність між симетричними складовими напружень і струмів особливої фази:

$$\underline{I}_{A1} = \underline{I}_{A2} = \underline{I}_{A0}, \quad \underline{U}_{A1} = -(\underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}).$$

При двофазному короткому замиканні граничними умовами є $\underline{I}_C^{(2)} = -\underline{I}_B^{(2)}$, $\underline{I}_A^{(2)} = 0$, $\underline{U}_C^{(2)} = \underline{U}_B^{(2)}$. Залежність між симетричними складовими напруг і струмів особливої фази характеризується наступними співвідношеннями:

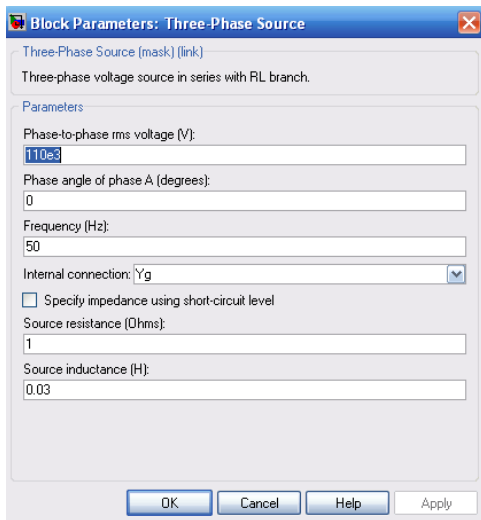
$$\underline{I}_{A1} = -\underline{I}_{A2}, \quad \underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2}.$$

При двофазному короткому замиканні на землю граничними умовами є $\underline{U}_C^{(1,1)} = \underline{U}_B^{(1,1)} = 0$, $\underline{I}_A^{(1)} = 0$. Симетричні складовими напруг і струмів особливої фази пов'язані такими співвідношеннями:

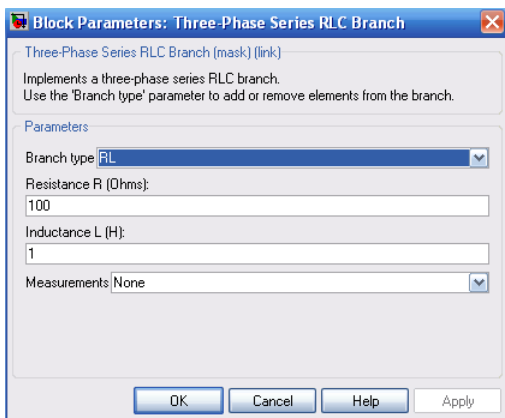
$$\underline{I}_{A1} = -(\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}), \quad \underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A2} = \underline{U}_{A0}.$$

В роботі дослідження симетричних складових напруг і струмів при різних видах несиметричних КЗ проводиться на віртуальній моделі «система - навантаження», створеної в пакеті SimPowerSystems програми Matlab 7.4 (рис. 5.2).

Вихідними даними для моделі є значення параметрів блоків системи (System) і навантаження (Load), які задаються такими, як представлені на рис. 5.3.



a



б

Рис. 5.3. Вікна налаштування блоків: *a* – системи; *б* – навантаження

На перший осцилограф (Score 1) виводяться зміна напруги $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ і струму $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$. На другий осцилограф (Score 2) виводяться симетричні складові напруги особливої фази u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} . На третій осцилограф (Score 3) виводяться симетричні складові струму особливої фази i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з віртуальною моделлю «система - навантаження» (рис. 5.2). Задати параметри блоків системи і навантаження. Задати положення вимикача «відключений» (open).

2. Змоделювати однофазне коротке замикання. Час моделювання встановити 0,2 с, час короткого замикання 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

3. Змоделювати двофазне коротке замикання. Час моделювання встановити 0,2 с, час короткого замикання 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

4. Змоделювати двофазне коротке замикання на землю. Час моделювання встановити 0,2 с, час короткого замикання 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Віртуальна модель і її короткий опис.
3. Осцилограми зміни параметрів $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .
4. Аналіз отриманих результатів.

5. Висновки.

Контрольні питання

1. Що таке поперечна несиметрія?
2. У чому суть методу симетричних складових?
3. Які основні припущення при використанні методу симетричних складових?
4. Що являє собою система трьох векторів прямої послідовності?
5. Що являє собою система трьох векторів зворотної послідовності?
6. Що являє собою система трьох векторів нульової послідовності?
7. Чому дорівнює оператор повороту?
8. Що станеться з вектором, якщо його помножити на оператор пово-рота?
9. Що називається особливою фазою?
10. Як розкласти несиметричну систему трьох векторів на сім-метричні складові?
11. Назвіть граничні умови і залежність між симетричними складо-вими струмів і напруг особливої фази при однофазному КЗ.
12. Назвіть граничні умови і залежність між симетричними складо-вими струмів і напруг особливої фази при двофазному КЗ.
13. Назвіть граничні умови і залежність між симетричними складо-вими струмів і напруг особливої фази при двофазному КЗ на землю.

ЛОБОРАТОРНА РОБОТА 6

ДОСЛІДЖЕННЯ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НАПРУГ І СТРУМІВ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ НЕСИМЕТРІЇ

Мета роботи: експериментальне визначення на віртуальній моделі залежності між симетричними складовими напруг і струмів при поздовжній несиметрії.

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію несиметричних режимів при розривах фаз.
Рекомендована література [2, 6]
2. Ознайомитися з віртуальною моделлю для дослідження симетричних складових напруг і струмів при поздовжній несиметрії, створеної в пакеті SimPowerSystem програми Matlab 7.4 (рис. 6.2).

Короткі пояснення до роботи

В роботі досліджується залежність між симетричними складовими напруг і струмів при різних видах розривів фаз. Будь-який вид розриву призводить до появи в трифазній системі поздовжньої несиметрії. Для дослідження несиметричних режимів, пов'язаних з розривом фаз, також використовують метод симетричних складових. Основні відомості про метод симетричних складових наведені в роботі 5.

Для отримання залежностей між симетричними складовими напружень і струмів при поздовжньої несиметрії розрахунок проводять для кожного виду розриву, використовуючи відповідні граничні умови. При цьому також приймають, що фаза А знаходиться в умовах, відмінних від умов двох інших фаз.

Початкова схема при розриві однієї і двох фаз представлені на рис. 6.1

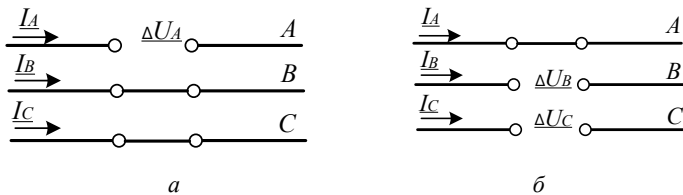


Рис. 6.1. Початкова схема при розриві фаз: *a* – однієї; *б* – двох

Основні рівняння падінь напруги в схемах кожної послідовності, складені для симетричної частини системи мають вигляд

$$\begin{cases} \underline{\Delta U}_{A1} = \underline{E}_{1\text{pez}} - j\underline{I}_{A1}X_{1\text{pez}} \\ \underline{\Delta U}_{A2} = 0 - j\underline{I}_{A2}X_{2\text{pez}} \\ \underline{\Delta U}_{A0} = 0 - j\underline{I}_{A0}X_{0\text{pez}} \end{cases} .$$

Розрив однієї фази характеризується наступними граничними умовами:

$$\underline{\Delta U}_C = \underline{\Delta U}_B = 0, \quad \underline{I}_A = 0.$$

Ці умови аналогічні умовам двофазного короткого замикання на землю, причому дана аналогія присутня і в розрахункових виразах. З огляду на це, використовуючи метод симетричних складових, можна записати співвідношення, що дають залежність між симетричними складовими напруг і струмів особливої фази:

$$\underline{I}_{A1} = -(\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}), \quad \underline{\Delta U}_{A1} = \underline{\Delta U}_{A2} = \underline{\Delta U}_{A0}.$$

При розриві двох фаз граничні умови мають такий вигляд: $\underline{I}_C = 0$, $\underline{I}_B = 0$, $\underline{\Delta U}_A = 0$. Ці умови аналогічні умовам однофазного КЗ. Залежність між симетричними складовими напруг і струмів особливої фази характеризується наступними співвідношеннями:

$$\underline{I}_{A1} = \underline{I}_{A2} = \underline{I}_{A0}, \quad \underline{\Delta U}_{A1} = -(\underline{\Delta U}_{A2} + \underline{\Delta U}_{A0}).$$

В роботі дослідження симетричних складових напруг і струмів при різних видах розривів фаз проводиться на віртуальній моделі «система -

Вихідними даними для моделі є значення параметрів блоків системи (System) і навантаження (Load), які задаються такими, як в роботі 5.

На перший осцилограф (Score 1) виводяться зміна напруги на вимикачі $\Delta u_a(t)$, $\Delta u_b(t)$, $\Delta u_c(t)$ і струму що протікає через вимикач $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$. На другий осцилограф (Score 2) виводяться симетричні складові напруги особливої фази в місці несиметрії Δu_{A1} , Δu_{A2} , Δu_{A0} . На третій осцилограф (Score 3) виводяться симетричні складові струму особливої фази i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з віртуальною моделлю «система - навантаження» (рис. 6.2). Задати параметри блоків системи і навантаження. Задати положення вимикач-теля «включений» (close).

2. Змоделювати розрив однієї фази. Час моделювання встановити 0,2 с, час обриву 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $\Delta u_a(t)$, $\Delta u_b(t)$, $\Delta u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, Δu_{A1} , Δu_{A2} , Δu_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

3. Змоделювати обрив двох фаз. Час моделювання встановити 0,2 с, час обриву 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів $\Delta u_a(t)$, $\Delta u_b(t)$, $\Delta u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, Δu_{A1} , Δu_{A2} , Δu_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Віртуальна модель і її короткий опис.
3. Осцилограми зміни параметрів $\Delta u_a(t)$, $\Delta u_b(t)$, $\Delta u_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, Δu_{A1} , Δu_{A2} , Δu_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Що таке поздовжня несиметрія?
2. Якими граничними умовами характеризується розрив однієї фази?
3. Яка залежність між симетричними складовими напруг особливої фази при розриві однієї фази?
4. Яка залежність між симетричними складовими струмів особливої фази при розриві однієї фази?
5. Якими граничними умовами характеризується розрив двох фаз?
6. Яка залежність між симетричними складовими напруг особливої фази при розриві двох фаз?
7. Якому виду короткого замикання аналогічні співвідношення між симетричними складовими струмів і напруг особливої фази при розриві однієї фази?
8. Якому виду короткого замикання аналогічні співвідношення між симетричними складовими струмів і напруг особливої фази при розриві двох фаз?
9. Який вигляд має комплексна схема заміщення при обриві однієї фази?
10. Який вигляд має комплексна схема заміщення при обриві двох фаз?
11. Який вигляд має векторна діаграма струмів в місці розриву фази і векторна діаграма напруг по кінцях розриву?
12. Який вигляд має векторна діаграма струмів в місці розриву двох фаз і векторна діаграма напруг по кінцях розриву?

ЛОБОРАТОРНА РОБОТА 7

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ СТРУМІВ І НАПРУГ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ КЗ

Мета роботи: експериментальне визначення на віртуальній моделі розподілу симетричних складових струмів і напруги при несиметричних КЗ.

Вказівки з підготовки до роботи

1. Вивчити теорію розподілу симетричних складових струмів і напруг при несиметричному КЗ.

Рекомендована література [6].

2. Ознайомитися з віртуальною моделлю для дослідження розподілу симетричних складових струмів і напруг при несиметричних КЗ, створеної в пакеті SimPowerSystem програми Matlab 7.4 (рис. 7.3).

Короткі пояснення до роботи

В роботі досліджується розподіл симетричних складових струмів і напруг при несиметричному КЗ в простому нерозгалуженому трифазному колі, що живиться від джерела незмінної напруги (рис. 7.1)

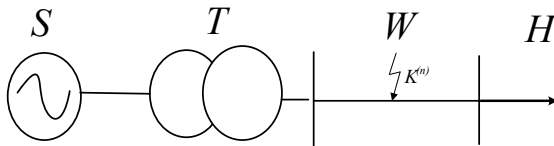


Рис. 7.1. Просте нерозгалужене трифазне коло

При знаходженні розподілу струмів і напруг різних послідовностей при несиметричному КЗ необхідно враховувати наступні правила:

1. Напряга прямої послідовності в міру віддалення від крапки короткого замикання і наближення до джерела електрорушійної сили збільшується.

2. Напряга зворотної та нульової послідовності в міру віддалення від крапки КЗ зменшується.

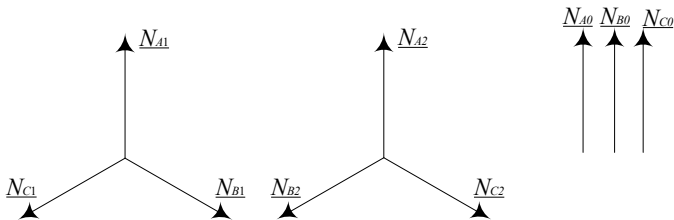
3. Струми і напруги прямої послідовності при переході через трансформатор повертаються в позитивному напрямку на кут відповідний групі з'єднання обмоток силового трансформатора (за позитивний напрямок приймають поворот проти годинникової стрілки).

4. Струми і напруги зворотної послідовності при переході через трансформатор повертаються на аналогічний кут за ходом годинникової стрілки.

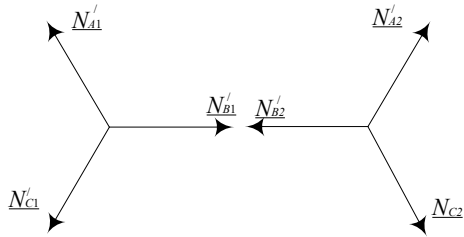
5. Струми і напруги нульової послідовності не виходять за обмотку трансформатора, що з'єднана в трикутник.

Найбільш поширена група з'єднання обмоток силового трансформатора $Y/\Delta - 11$. При такій групі з'єднання при переході симетричних складових струму і напруги з боку Y на сторону Δ , симетричні складові струму і напруги прямої послідовності зміщуються на 30° проти годинникової стрілки, тобто в позитивному напрямку, а напруга і струми зворотної послідовності - на 30° за годинниковою стрілкою (рис. 7.2).

При переході через трансформатор в зворотному напрямку кутові зміщення симетричних складових змінюють свій знак на протилежний.



a



б

Рис. 7.2. Векторна діаграма симетричних складових: а - з боку обмотки трансформатора Y ; б - з боку обмотки трансформатора Δ

В роботі дослідження розподілу симетричних складових напруг і струмів при несиметричних КЗ проводиться на віртуальній моделі простого нерозгалуженого трифазного кола, що живиться від системи незмінної напруги, створеної в пакеті SimPowerSystems прог-Рамі Matlab 7.4 (рис. 7.3).

Вихідними даними для моделі є значення параметрів блоків системи (System) і навантаження (Load), наведені в роботі 5; лінії електропередач (Line), наведені в роботі 2, а також значення параметрів блоку трансформатора (Transformer), представлені на рис. 7.4.

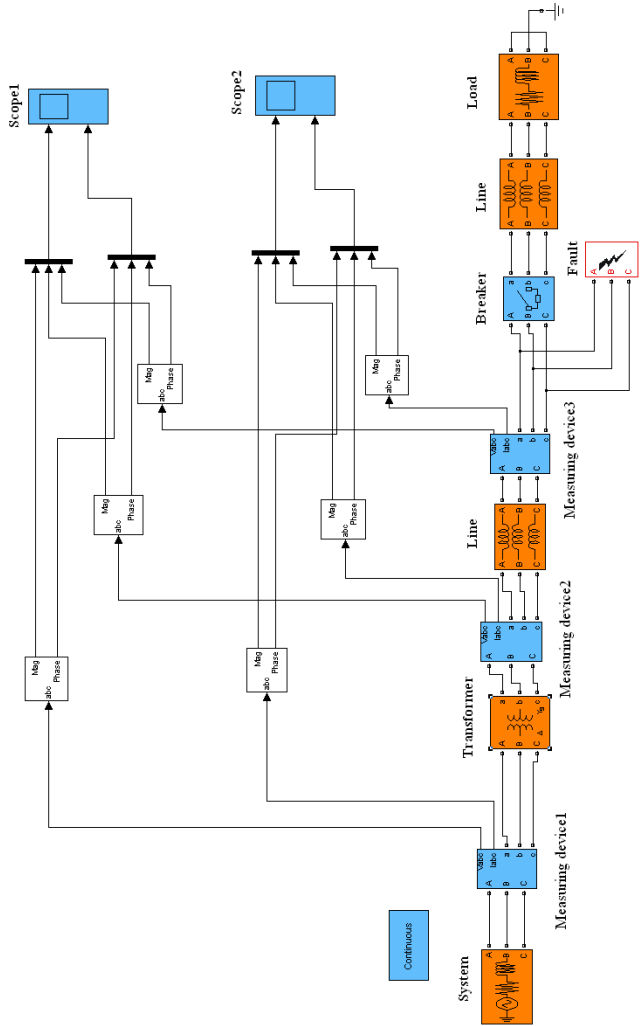


Рис. 7.3 – Віртуальна модель простого нерозгалуженого трифазного кола, що живиться від системи незмінної напруги

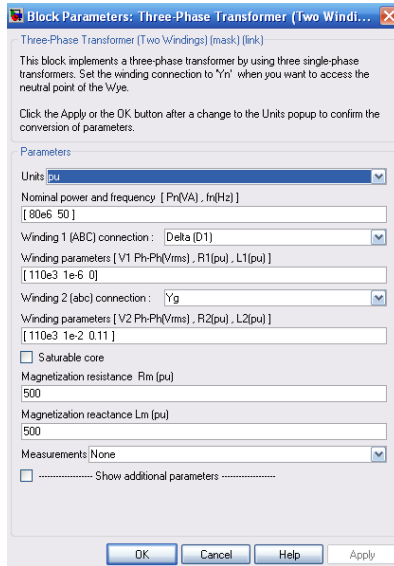


Рис. 7.4. Вікно налаштування блоку трансформатора

Вимірювання фазних струмів і напруг здійснюється за допомогою вимірювальних пристроїв (Measuring device).

На перший осцилограф (Score 1) виводяться зміна амплітуди і фазового зсуву симетричних складових напруги в кінці короткого замикання, на шинах трансформатора і на шинах системи. На другий осцилограф (Score 2) виводяться зміна амплітуди і фазового зсуву симетричних складових струму КЗ в кінці КЗ, в первинній та вторинній обмотках трансформатора.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з віртуальною моделлю простого нерозгалуженого трифазного кола, що живиться від системи незмінної напруги (рис. 7.3). Задати параметри блоків системи, трансформатора, лінії електропередач, навантаження. Задати положення вимикача «відключений» (open).

2. Змоделювати однофазне коротке замикання фази А при заданій схемі з'єднання обмоток трансформатора. Час моделювання встановити 0,2 с, час короткого замикання 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} в різних вузлах кола і i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} в різних елементах кола.

3. Змоделювати однофазне коротке замикання фази А при схемі з'єднання обмоток трансформатора «зірка з заземленою нейтраллю / зірка з заземленою нейтраллю». Час моделювання встановити 0,2 с, час короткого замикання 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} в різних вузлах кола і i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} в різних елементах кола.

4. Змоделювати однофазне коротке замикання фази А при схемі з'єднання обмоток трансформатора «зірка / зірка з заземленою нейтраллю». Час моделювання встановити 0,2 с, час короткого за-замикання 0,02 с. Отримати осцилограми зміни параметрів u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} в різних вузлах кола і i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} в різних елементах кола.

Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Віртуальна модель і її короткий опис.
3. Осцилограми зміни параметрів u_{A1} , u_{A2} , u_{A0} , i_{A1} , i_{A2} , i_{A0} .
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Як зміниться напруга прямої послідовності в міру віддалення від крапки короткого замикання?
2. Як зміниться напруга зворотної та нульової послідовностей в міру віддалення від крапки короткого замикання?
3. Що відбувається з струмами і напругами прямої послідовності при переході через трансформатор?

4. Що відбувається з струмами і напругами зворотної послідовності при переході через трансформатор?
5. Назвіть особливості трансформації струмів і напруг нульової послідовності.
6. На який кут повертаються струми і напруги прямої і зворотної послідовностей при переході через трансформатор з групою з'єднання обмоток $Y/\Delta - 11$?
7. Який вид має векторна діаграма струмів і напруг при однофазному КЗ в залежності від віддаленості від крапки КЗ, схеми і групи з'єднання обмоток трансформатора?
8. Який вид має векторна діаграма струмів і напруг при двофазному КЗ в залежності від віддаленості від крапки КЗ, схеми і групи з'єднання обмоток трансформатора?
9. Який вигляд має векторна діаграма струмів і напруг при двофазному КЗ на землю в залежності від віддаленості від крапки КЗ, схеми і групи з'єднання обмоток трансформатора?
10. Чому при видаленні від крапки КЗ напруга прямої послідовності збільшується, а зворотної та нульової зменшується?
11. В якому вузлі щодо крапки КЗ буде найбільше спотворення векторної діаграми напруги?
12. Як змінюється спотворення векторної діаграми напруги в міру наближення до генератора?