

Міністерство освіти й науки України  
ДВНЗ Донецький національний технічний університет

кафедра «Електричної інженерії»

Методичні вказівки, щодо виконання курсового проекту з дисципліни  
«Електромагнітні перехідні процеси»

галузь знань 14 Електрична інженерія  
спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Укладач: доц., зав. каф. ЕлІн, к.т.н. Колларов О.Ю.  
ас. кафедри ЕлІН Остренко Д.О.

Покровськ – 2021

Методичні вказівки до вивчення та виконання завдання курсового проекту з дисципліни «Електромагнітні перехідні процеси» для студентів 4 курсу денної та заочної форми навчання та студентам 3 курсу прискореної форми навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

## ЗМІСТ

ВСТУП.	4
1.ПОЧАТКОВІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ	5
2.РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВИХІДНОГО УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ СИСТЕМИ.	12
2.1 Визначення параметрів схеми заміщення.	12
3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ.	16
4. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАПАСУ ГЕНЕРАТОРІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ АРЗ.	23
4.1 Визначення власних і взаємних провідностей та кутів втрат для генератора з АРЗ пропорційної дії.	23
4.2 Визначення власних і взаємних провідностей та кутів втрат для нерегульованого генератора.	26
4.3 Визначення власних і взаємних провідностей і кутів втрат для генератора з АРЗ сильної дії.	27
5. РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЧАСУ ВІДКЛЮЧЕННЯ ПІД ЧАС АВАРІЙНОГО ПРОЦЕСУ В КІНЦІ ЛЕП.	29
5.1 Розрахунок параметрів нормального режиму роботи..	29
5.2 Визначення параметрів аварійного режиму роботи енергосистеми.	30
5.3 Визначення параметрів післяаварійного режиму роботи системи.	34
5.4 Визначення параметрів відключення при двофазному короткому замиканні на землю в кінці ЛЕП.	35
Список використаних джерел.	38

## Вступ

Перехідні процеси виникають в електричних системах, як під час нормальної експлуатації у моменти включення та відключення навантажень, окремих ланцюгів, джерел живлення, виконання випробувань та інших, так і в аварійних умовах, це, наприклад, може бути – обрив ланцюга навантаження або окремої її фази, випадання машини із синхронізму, коротке замикання, і тому подібні явища.

Коли в енергосистемі відбувається будь-який перехідний процес, то й розпочинається в тій чи іншій мірі зміна електромагнітного стану елементів системи, до цього також можна віднести порушення балансу між моментом на валу кожної машини, який обертається та електромагнітним моментом.

В результаті цього процесу змінюються відповідно значення швидкості обертання електричних машин, тобто деякі з них переходять у гальмування, в той час, як інші – знаходяться в прискоренні. Цей стан зберігається до тих пір, поки регулюючі пристрої не відновлять нормальний стан, якщо це взагалі можна здійснити при нових, змінених умовах.

Даний курсовий проект повинен закріпити теоретичний та практичний матеріал набутий студентом під час опанування дисципліни «Електромагнітні перехідні процеси». Також ставиться за мету провести виконавцем роботи розгляд методів розрахунку параметрів електричної мережі під час нормальних та аварійних електромеханічних перехідних процесах, які виникають при змінах стану енергосистеми.

## 1. ПОЧАТКОВІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ.

Електрична станція має зв'язок з шинами нескінченної потужності за допомогою лінії електропередачі з двома ланками та автотрансформатором. У цьому зв'язку є проміжний відбір потужності для районного енергопостачання. Схема досліджуваної системи представлена на рис. 1.

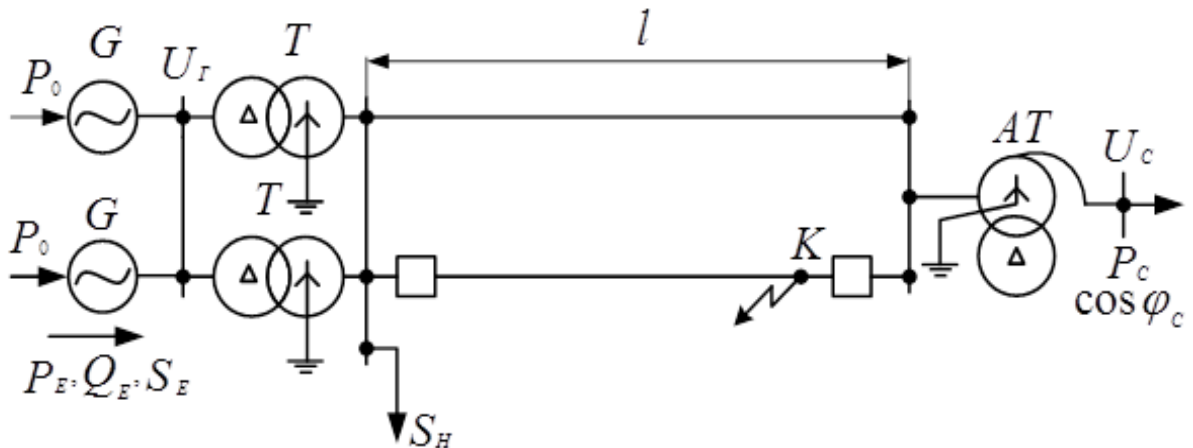


Рисунок 1 – Принципова схема енергосистеми

Початкові дані електричних елементів енергосистеми для розрахунку, для обраних варіантів, наведені в таблиці 1.1-1.4.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики елементів (генератори)

Назва елементу	Генератор						
Параметр	$P_{cm}$ [MBm]	$\cos \phi$	$U_{Hном}$ [кВ]	$x_d$ [в.о.]	$x'_d$ [в.о.]	$x_2$ [в.о.]	$GD_G^2$
№ варіанту							
1	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
2	60	0.8	15.75	1.7	0.32	0.26	11.5
3	100	0.8	18	2.78	0.375	0.29	17

4	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
5	160	0.85	18	2.78	0.375	0.29	17
6	200	0.85	20	3.8	0.41	0.335	25
7	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
8	60	0.8	15.75	1.7	0.32	0.26	11.5
9	100	0.8	18	2.78	0.375	0.29	17
10	320	0.85	20	4.2	0.46	0.375	31
11	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
12	160	0.85	18	2.78	0.375	0.29	17
13	100	0.8	18	2.78	0.375	0.29	17
14	60	0.8	15.75	1.7	0.32	0.26	11.5
15	160	0.85	18	2.78	0.375	0.29	17
16	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
17	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
18	60	0.8	15.75	1.7	0.32	0.26	11.5
19	200	0.85	20	3.8	0.41	0.335	25
20	100	0.8	18	2.78	0.375	0.29	17
21	160	0.85	18	2.78	0.375	0.29	17
22	200	0.85	20	3.8	0.41	0.335	25
23	63	0.8	18	2.4	0.34	0.275	13
24	60	0.8	15.75	1.7	0.32	0.26	11.5
25	320	0.85	20	4.2	0.46	0.375	31

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики елементів (трансформатори)

Назва елементу	Трансформатор					
Параметр № варіанту	$S_{ном}$ [MBA]	$U_{Вном}$ [кВ]	$U_{Нном}$ [кВ]	$U_k$ [%]	$\Delta P_X$ [кВт]	$\Delta Q_X$ [кВар]
1	80	242	18	11	105	480
2	40	121	15.75	10,5	70	430
3	80	242	18	11	105	480
4	80	242	18	11	105	480
5	80	242	18	11	105	480
6	100	242	20	11	120	500
7	80	242	18	11	105	480
8	40	121	15.75	10,5	90	450
9	80	242	18	11	105	480
10	100	242	20	11	120	500
11	80	242	18	11	105	480
12	100	242	20	11	120	500
13	80	242	18	11	105	480
14	40	121	15.75	10,5	90	450
15	80	242	18	11	105	480
16	40	121	15.75	10,5	90	450
17	80	242	18	11	105	480
18	40	121	15.75	10,5	90	450
19	100	242	20	11	120	500
20	80	242	18	11	105	480
21	80	242	18	11	105	480
22	100	242	20	11	120	500

23	80	242	18	11	105	480
24	40	121	15.75	10,5	90	450
25	100	242	20	11	120	500

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики елементів (автотрансформатори)

Назва елементу	Автотрансформатор							
Параметр № варіанту	$U_{ВНОМ}$ [кВ]	$U_{СНОМ}$ [кВ]	$U_{ННОМ}$ [кВ]	$U_{Кв-с}$ [%]	$U_{Кв-н}$ [%]	$U_{Кс-н}$ [%]	$\Delta P_X$ [кВт]	$\Delta Q_X$ [кВар]
1	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
2	230	121	10,5	11	35	22	70	1850
3	500	230	10,5	11	35	22	110	2050
4	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
5	500	230	10,5	11	35	22	110	2050
6	500	230	10,5	11	35	22	110	2050
7	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
8	330	115	10,5	10	35	24	95	2050
9	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
10	500	230	10,5	11	35	22	110	2050
11	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
12	500	230	10,5	11	35	22	110	2050



13	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
14	330	115	10,5	10	35	24	95	2050
15	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
16	230	121	10,5	11	35	22	105	2200
17	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
18	230	121	10,5	11	35	22	105	2200
19	500	230	10,5	11	35	22	110	2050
20	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
21	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
22	500	230	10,5	11	35	22	110	2050
23	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	230	10,5	11	35	21.5	100	1950
24	230	121	10,5	11	35	22	105	2200
25	500	230	10,5	11	35	22	110	2050

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики елементів (лінія електропередач)

Назва елементу	Лінія електропередач		
Параметр № варіанту	Тип проводу	Довжина, км	$U_{ном}$ [кВ]
1	АС 300/39	70	220
2	АС 240/32	95	110

3	AC 300/39	60	220
4	AC 300/39	140	220
5	AC 300/39	125	220
6	AC 300/39	88	220
7	AC 300/39	150	220
8	AC 240/32	95	110
9	AC 300/39	175	220
10	AC 300/39	110	220
11	AC 300/39	120	220
12	AC 300/39	100	220
13	AC 300/39	105	220
14	AC 240/32	90	110
15	AC 300/39	107	220
16	AC 240/32	130	110
17	AC 300/39	55	220
18	AC 240/32	80	110
19	AC 300/39	170	220
20	AC 300/39	75	220
21	AC 300/39	165	220
22	AC 300/39	82	220
23	AC 300/39	85	220
24	AC 240/32	92	110
25	AC 300/39	190	220

Навантаження має наступні вихідні значення:

$$\begin{aligned}
 S_{нав} &= 0,25 \cdot S_E \\
 P_{нав} &= S_{нав} \cdot \cos \phi_{ст.} \\
 Q_{нав} &= S_{нав} \cdot \sin \phi_{ст.}
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Розрахунок початкових параметрів елементів електричної мережі:

- для генератора виконується розрахунок номінально значення повної потужності самого приладу, а також номінального значення станції, де ці генератори встановлені, тому слід звернути увагу, що під час розрахунку потужності станції треба взяти до уваги кількість генераторів у цій частині і тоді ці вирази будуть виглядати наступним чином:

$$\begin{aligned} S_{ст.ном} &= \frac{P_{ст.}}{\cos \phi} = \frac{2 \cdot P}{\cos \phi} \\ S_E &= 0,8 \cdot S_{ст.ном.} \\ S_{ном} &= \frac{P}{\cos \phi} \end{aligned} \quad (1.2)$$

- для лінії електропередач:

значення питомого активного та реактивного опору –  $x_0$ ,  $r_0$  можливо знайти за типом проводу у даних каталогу.

**Примітка** – якщо не вдається знайти каталог з необхідними даними лінії, то варто прийняти, що:

$$\begin{aligned} x_0 &= 0.4 \text{ Ом/км} \\ r_0 &= 0.06 \text{ Ом/км}; \end{aligned}$$

## 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВИХІДНОГО УСТАЛЕНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ СИСТЕМИ.

### 2.1 Визначення параметрів схеми заміщення.

Розрахунок виконується у відносних одиницях, з приведенням до одного ступеня напруги з використанням дійсних коефіцієнтів трансформації. Як відомо за базисну потужність можна приймати величини, що є кратними значенню «10» - 10, 100, 1000 МВА, або за базисну приймають номінальну потужність станції, що виражається через:

$$S_{\bar{o}} = S_{cm} \quad (2.1)$$

За основну ступінь напруги прийнято значення напруги на шинах системи:

$$U_{\bar{o}(осн)} = U_C \quad (2.2)$$

Тоді базисні напруги інших ступенів напруги визначаються за виразом:

$$U_{\bar{o}N} = \frac{1}{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k} \cdot U_{\bar{o}.осн} \quad (2.3)$$

де  $n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot n_k$  — значення добутку коефіцієнтів трансформації трансформаторів, що пов'язує ступінь напруги, параметри якої підлягають приведенню з основною ступеню напруги.

Реактивні опори генераторів наведені до базисних умов.

Синхронне опір по осі d:

$$x_{d2} = x_{*d2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{2.ном} \cdot n_{ген}} \cdot \left( \frac{U_{2.ном}}{U_{\bar{\sigma}(18)}} \right)^2 \quad (2.4)$$

Значення перехідного опору:

$$x'_{d2} = x'_{*d2} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{2.ном} \cdot n_{ген}} \cdot \left( \frac{U_{2.ном}}{U_{\bar{\sigma}(18)}} \right)^2 \quad (2.5)$$

Реактивний опір трансформатора Т:

$$x_T = \frac{U_K}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном} \cdot n_{тр}} \cdot \frac{U_{ном}^2}{U_{\bar{\sigma}}^2}; \quad (2.6)$$

Для визначення реактивних опорів автотрансформатора потрібно розрахувати значення напруги короткого замикання для кожної обмотки за виразами:

$$\begin{aligned} U_{kAT\bar{\sigma}} &= 0,5(U_{\kappa B-C} + U_{\kappa B-H} - U_{\kappa C-H}) \\ U_{kATc} &= 0,5(U_{\kappa B-C} + U_{\kappa C-H} - U_{\kappa B-H}) \\ x_{ATн} &= \frac{U_{kATн}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{AT(ном)} \cdot 3} \cdot \frac{U_{Вном}^2}{U_{\bar{\sigma}(осн)}^2}; \end{aligned} \quad (2.7)$$

Після цього можливо розрахувати значення реактивного опору з (2.6), підставивши значення з (2.7).

**Примітка** - Якщо значення напруга короткого замикання обмотки середньої напруги буде негативним значенням, то реактивний опір цієї обмотки приймається рівним нулю.

Значення реактивного опору лінії W розраховується за виразом (2.8).

$$x_L = \frac{x_{10} \cdot l}{n_{\text{ланок}}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}; \quad (2.8)$$

Значення активного опору ліній W можливо знайти за виразом (2.9).

$$r_L = \frac{r_{10} \cdot l}{n_{\text{ланок}}} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}}^2}; \quad (2.9)$$

**Примітка** - Якщо під час розрахунку виконується умова  $r_L < 0,3 \cdot x_L$ , то активні опори ЛЕП в схемі заміщення можна не враховувати.

Потужність проміжного відбору в відносних одиницях визначається за виразом (2.10).

$$\begin{aligned} P_{Hав(\bar{\sigma})} &= \frac{P_{Hав}}{S_{\bar{\sigma}}} \\ Q_{Hав^*(\bar{\sigma})} &= \frac{Q_{Hав}}{S_{\bar{\sigma}}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Потужність станції у відносних одиницях можливо знайти за виразом (2.11).

$$\begin{aligned} P_{*E(\bar{o})} &= \frac{P_E}{S_{\bar{o}}} \\ Q_{*E(\bar{o})} &= \frac{Q_E}{S_{\bar{o}}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Отже, після виконання розрахунків варто скласти схему заміщення мережі, з позначенням на неї розрахованих, в даному пункті, значень.

### 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ.

Схему заміщення електричної мережі можливо перетворити в зручний для розрахунків вигляд.

Наприклад, послідовно з'єднані опори можна перетворити на еквівалентний за виразом (3.1).

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 + \dots + x_n. \quad (3.1)$$

$$\Delta Q_T = \frac{P_E^2 + Q_E^2}{U_{*L_{ном}}^2} X_T \quad (3.2)$$

де: -  $U_{*L_{ном}}$  – відносне значення приведеної напруги можливо знайти за виразом (3.3)

$$U_{*L_{ном}} = \frac{U_{L_{ном.}}}{U_{L(б)}} \quad (3.3)$$

Тоді потужність, яка надходить до точки навантаження розраховується за виразом (3.4).

$$S_2 = S_E - \Delta Q_T \quad (3.4)$$



Пошук потужності на початку лінії відбувається за допомогою виразу (3.5).

$$S_{\text{Л}}^{\text{П}} = S_2 - S_{\text{Н}} + j \frac{Q_{\text{С}}}{2} \quad (3.5)$$

де  $j \frac{Q_{\text{С}}}{2}$  - зарядна потужність ЛЕП, для спрощення розрахунків **ця величина в даній роботі не враховується.**

Тоді втрати реактивної потужності на ділянці від місця прикладання навантаження до системи розраховуються:

$$\Delta Q_{X\Sigma} = \frac{P_{\text{Л}}^{\text{П}2} + Q_{\text{Л}}^{\text{П}2}}{U_*^2 L_{\text{НОМ}}} \cdot X_{\Sigma} \quad (3.6)$$

Потужність, яка видається в систему може бути знайдена за (3.7).

$$S_{\text{С}} = S_{\text{Л}}^{\text{П}} - \Delta Q_{X\Sigma} \quad (3.7)$$

Після цього за (3.8) визначається напруга в вузлових точках в сторону генератора:

$$U_2 = \sqrt{\left( \frac{P_{\text{С}} \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{С}}} \right)^2 + \left( U_{\text{С}} + \frac{Q_{\text{С}} \cdot x_{\Sigma}}{U_{\text{С}}} \right)^2} \quad (3.8)$$

Значення кута повороту вектора напруги в точці підключення до системи:

$$\delta_{U_c \wedge U_2} = \arctg \frac{P_C \cdot x_\Sigma}{U_C^2 + Q_C \cdot x_\Sigma} \quad (3.9)$$

Після розрахунку значення  $U_2$  визначається опір навантаження:

$$Z_{HG} = \frac{U_2^2}{\sqrt{P_{HG}^2 + Q_{HG}^2}} \cdot (\cos \phi_{HG} + j \sin \phi_{HG}) \quad (3.10)$$

Також визначається напруга на затискачах генератора:

$$U_\Gamma = \sqrt{\left(\frac{P_2 \cdot X_T}{U_2}\right)^2 + \left(U_2 + \frac{Q_2 \cdot X_T}{U_2}\right)^2} \quad (3.11)$$

Значення кута повороту вектора напруги в трансформаторі розраховується з виразу (3.12).

$$\delta_{U_2 \wedge U_\Gamma} = \arctg \frac{P_2 \cdot x_T}{U_2^2 + Q_2 \cdot x_T} \quad (3.12)$$

Синхронна ЕРС генератора визначається з виразом (3.13).

$$E_q = \sqrt{\left(U_\Gamma + \frac{Q_E \cdot x_d}{U_\Gamma}\right)^2 + \left(\frac{P_E \cdot x_d}{U_\Gamma}\right)^2} \quad (3.13)$$

Тоді внутрішній кут генератора визначається з виразом (3.14).

$$\delta_{U_\Gamma \wedge E_q} = \delta_\Gamma = \delta_0 = \arctg \frac{P_E \cdot x_d}{U_\Gamma^2 + Q_E \cdot x_d} \quad (3.14)$$

Кут зовнішній мережі (кут між напругою на шинах генераторів і системи):

$$\delta_{U_c \wedge U_\Gamma} = \delta_{U_\Gamma \wedge E_q} + \delta_{U_c \wedge U_2} \quad (3.15)$$

Повний кут електропередачі (кут між синхронною ЕРС генератора та напругою на шинах системи):

$$\delta_0 = \delta_\Gamma + \delta_{OC} \quad (3.16)$$

Тоді перехідна ЕРС генератора визначається за виразом (3.17).

$$E' = \sqrt{\left(\frac{P_E \cdot x'_d}{U_\Gamma}\right)^2 + \left(U_\Gamma + \frac{Q_E \cdot x'_d}{U_\Gamma}\right)^2} \quad (3.17)$$

Розрахунок перехідного кута генератора відбувається за виразом (3.18).

$$\delta_{U_{\Gamma} \wedge E'} = \delta'_{\Gamma} = \arctg \frac{P_E \cdot x'_d}{Q_E \cdot x'_d + U_{\Gamma}^2} \quad (3.18)$$

Сумарний перехідний кут:

$$\delta'_0 = \delta'_{\Gamma} + \delta_{OC} \quad (3.19)$$

Поперечна складова напруги на шинах генераторів розраховується за виразом (3.20).

$$U_{\Gamma q} = U_{\Gamma} \cdot \cos \delta_{\Gamma} \quad (3.20)$$

Тоді поздовжня складова напруги на шинах генераторів визначається за виразом (3.21).

$$U_{\Gamma d} = U_{\Gamma} \cdot \sin \delta_{\Gamma} \quad (3.21)$$

Поперечна складова перехідної ЕРС:

$$E'_q = E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta'_0) \quad (3.22)$$

В свою чергу поздовжня та поперечні складові струму статора генераторів визначається за виразом (3.23).

$$\begin{aligned} I_{\Gamma d} &= \frac{E_q - U_{\Gamma q}}{x_{d2}} \\ I_{\Gamma q} &= \frac{U_{\Gamma d}}{x_{d2}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Повний струм статора генераторів:

$$I_{\Gamma} = \sqrt{I_{\Gamma d}^2 + I_{\Gamma q}^2} \quad (3.24)$$

Активна потужність, яка видається генераторами (розрахунок для перевірки):

$$P_E = E_q \cdot I_q \quad (3.25)$$

За даними, отриманим при розрахунках будується векторна діаграма системи, яка представлена на рисунку 3.1.

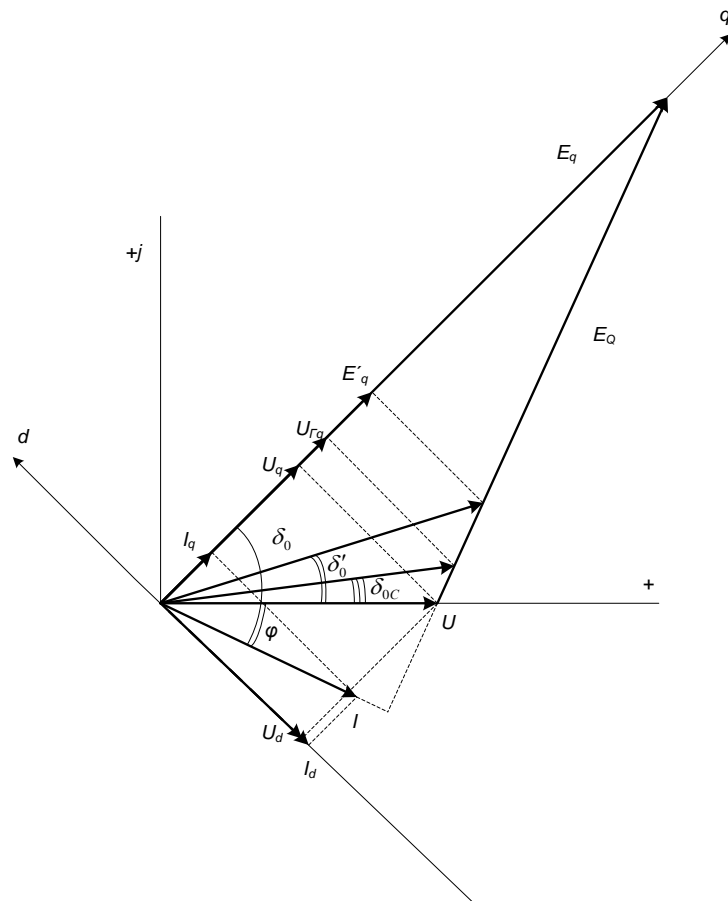


Рисунок 3.1 – Приклад створення векторної діаграма системи побудованої за розрахунковими значенням

#### 4. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАПАСУ ГЕНЕРАТОРІВ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ АРЗ.

Взагалі, для розрахунку статичної стійкості ЕС при різних типах автоматичного регулювання збудження (АРЗ), необхідно виконати:

- Визначення власних і взаємних провідностей та кутів втрат для нерегульованого генератора.
- Визначення власних і взаємних провідностей та кутів втрат для генератора з АРЗ пропорційної дії.
- Визначення власних і взаємних провідностей, а також кутів втрат для генератора з АРЗ сильної дії.

За розрахунками всі три визначення схожі між собою, тож для спрощення, в методичних вказівках буде розглянуто визначення власних та взаємних провідностей та кутів втрат для генератора з АРЗ пропорційної дії, інші два методи виконуються за аналогією, проте з невеликою різницею у схемах заміщення, що буде розглянуто нижче.

4.1 Визначення власних і взаємних провідностей та кутів втрат для генератора з АРЗ пропорційної дії.

При виконанні розрахунку генераторів з АРЗ пропорційної дії вводяться в схему заміщення перехідний реактивний опір та перехідна ЕРС, яка включена за цим опором. Отже тоді схема заміщення такої система буде мати вигляд рис. 4.1.

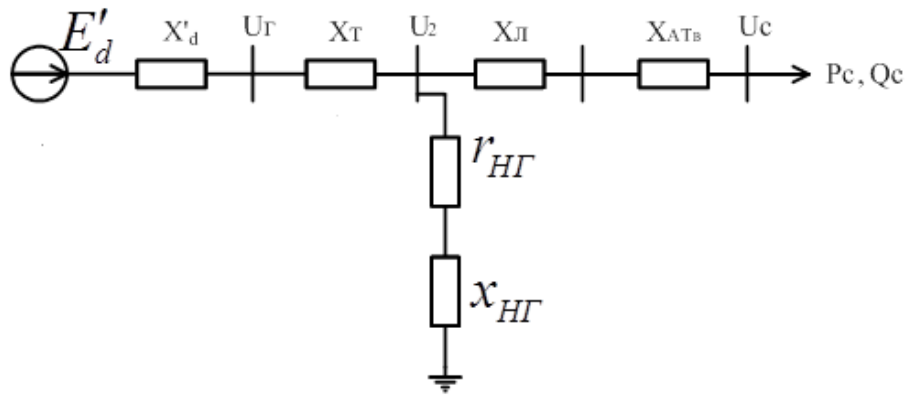


Рисунок 4.1 – Схема заміщення

Тоді виконавши перетворення схему рис. 4.1 можливо перетворити на схему рис. 4.2

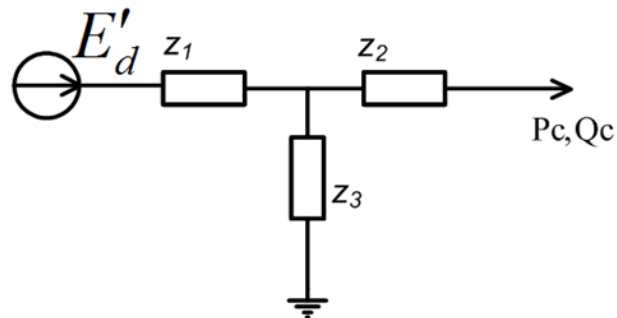


Рисунок 4.2 - Змінена схема заміщення

Після перетворення можна розрахувати власний опір системи за виразом (4.1).

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \quad (4.1)$$

Також розраховується і взаємний опір системи:

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3} \quad (4.2)$$



Тоді розрахунок власної та взаємної провідності, враховуючи вирази (4.1-4.2), буде мати вигляд (4.3).

$$\begin{aligned}\dot{Y}_{11} &= \frac{1}{\dot{Z}_{11}} = \dots = y_{11} \cdot e^{-j\psi_{11}} \\ \dot{Y}_{12} &= \frac{1}{\dot{Z}_{12}} = \dots = y_{12} \cdot e^{-j\psi_{12}}\end{aligned}\quad (4.3)$$

Тоді отримавши числові значення виразу (4.3) можливо знайти власний та взаємний кути втрат:

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= 90 - \psi_{11} \\ \alpha_{12} &= 90 - \psi_{12}\end{aligned}\quad (4.4)$$

Активна потужність, яка видається генератором з АРЗ пропорційного дії можливо розрахувати за наступним виразом:

$$P_{E'} = E'^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E' \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta' - \alpha_{12}); \quad (4.5)$$

З розгляду виразу (4.5) стає зрозумілим, що граничної потужності генератори досягнуть при куті  $\delta'_{zp} = \delta' + \alpha_{12}$ , тобто коли  $\sin(\delta' - \alpha_{12})$  буде дорівнювати 1. Тоді гранична потужність генераторів визначається, коли  $\delta'$  приймає значення  $\delta'_{zp}$ . А змінюючи кут  $\delta'$  від 0 до  $180^\circ$  будемо залежність активної потужності видається генератором з АРЗ пропорційного дії від кута (приклад зображено на рис. 4.3).

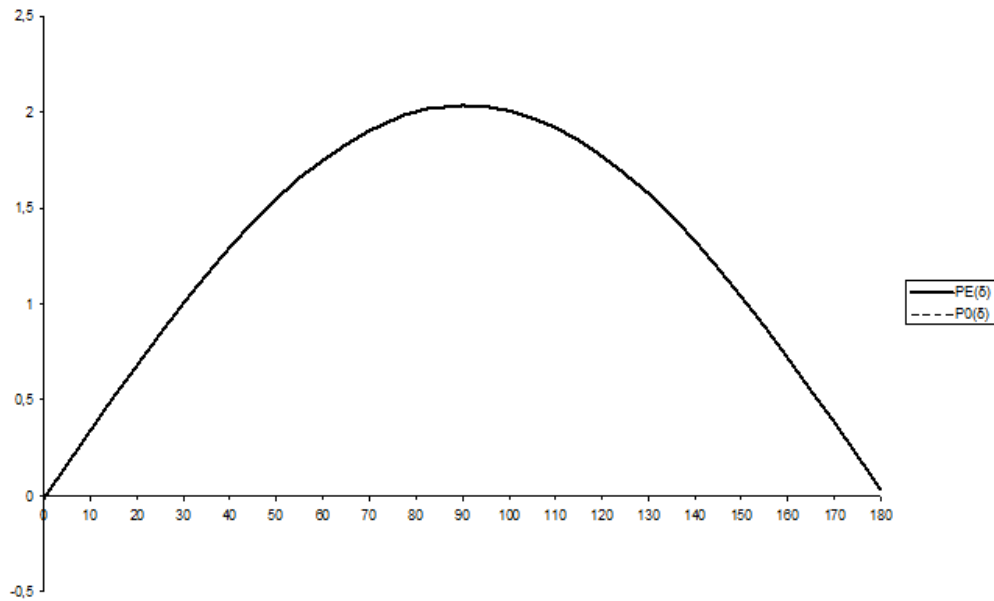


Рисунок 4.3 – Приклад побудови залежності активної потужності, яка видається генератором з АРЗ пропорційного дії від кута  $\delta$

Коефіцієнт запасу статичної стійкості системи визначається за виразом (4.6).

$$K_3 = \frac{P_{\text{ПР}} - P_0}{P_0} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

де: -  $P_{\text{ПР}}$  – значення граничної потужності генератору.

4.2 Визначення власних і взаємних провідностей та кутів втрат для нерегульованого генератора.

Під час розрахунку генераторів з нерегульованим збудженням у схему заміщення вводяться синхронний реактивний опір та синхронна ЕРС, включеної за цим опором, що зображено на рис. 4.4.

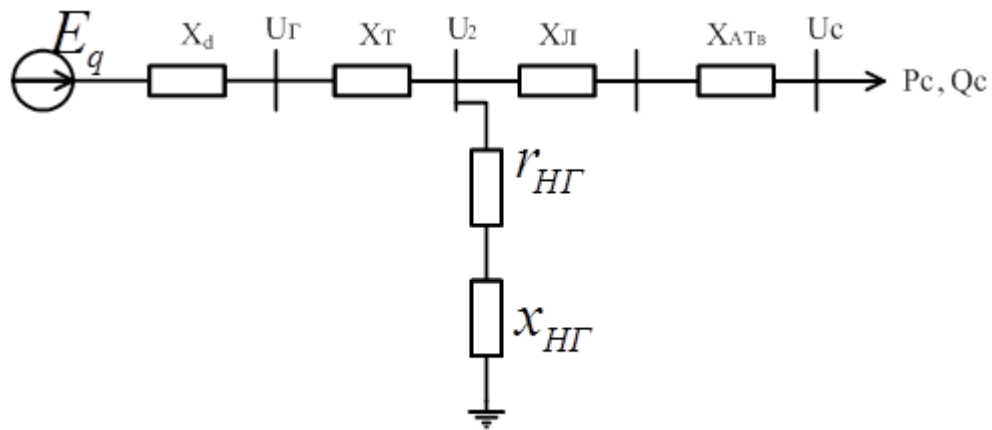


Рисунок 4.4 – Схема заміщення при досліджуваному методі

Далі розрахунок відбувається за ідентичними пунктами четвертого розділу для першого способу.

Різниця полягає в тому, що для цього способу варто побудувати залежності, як активної, так реактивної потужності, що видається генератором без АРЗ від кута  $\delta$ .

Тоді активну та реактивну потужності можливо знайти за допомогою виразу (4.7). Відповідно для побудови вище зазначених залежностей, необхідно змінювати кут  $\delta$  від 0 до 180.

$$\begin{aligned} P_{Eq} &= E_q^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E_q \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) \\ Q_{Eq} &= E_q^2 \cdot y_{11} \cdot \cos \alpha_{11} - E_q \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \cos(\delta - \alpha_{12}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

4.3 Визначення власних і взаємних провідностей і кутів втрат для генератора з АРЗ сильної дії.

Під час розрахунку генераторів з АРЗ сильної дії, значення ЕРС генератора приймається рівної напрузі на шинах генератора, а реактивний

опір генератора дорівнює нулю. Тоді схема заміщення при дослідженні цього методу буде мати вигляд рис. 4.5

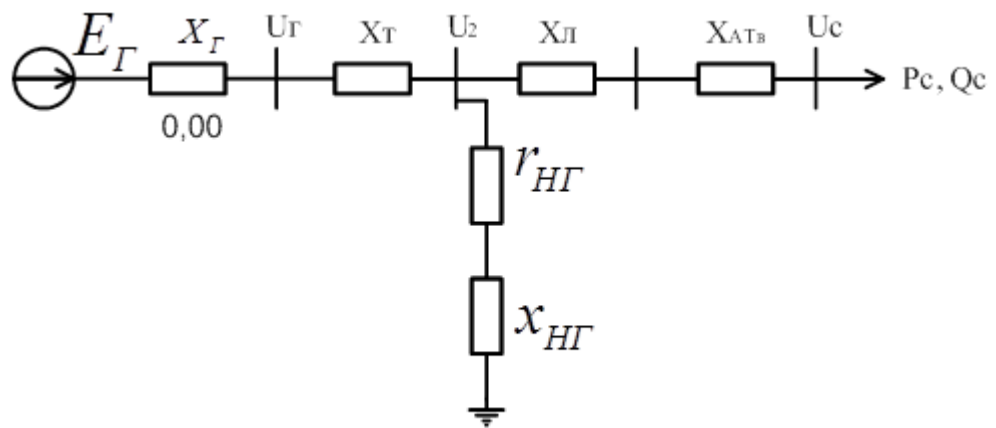


Рисунок 4.5 – Схема заміщення при досліджуваному методі

Для цього методу, як і для першого, реактивну складову вже шукати немає потреби. Тоді активна потужність, що видається генератором з АРЗ сильної дії буде мати вигляд (4.8).

$$P_{U_2} = U_G^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + U_G \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) \quad (4.7)$$

## 5. РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ГЕНЕРАТОРІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЧАСУ ВІДКЛЮЧЕННЯ ПІД ЧАС АВАРІЙНОГО ПРОЦЕСУ В КІНЦІ ЛЕП.

Для початку необхідно визначити параметри нормального режиму роботи системи, а потім переходити до розрахунків аварійного.

### 5.1 Розрахунок параметрів нормального режиму роботи.

Параметри нормального режиму були визначені в попередньому розділі. У даній роботі потужність усіх елементів електричної мережі, яка видається генераторами в систему, врівноважена потужністю турбін.

Схема заміщення системи в нормальному режимі роботи представлена на рис. 5.1.

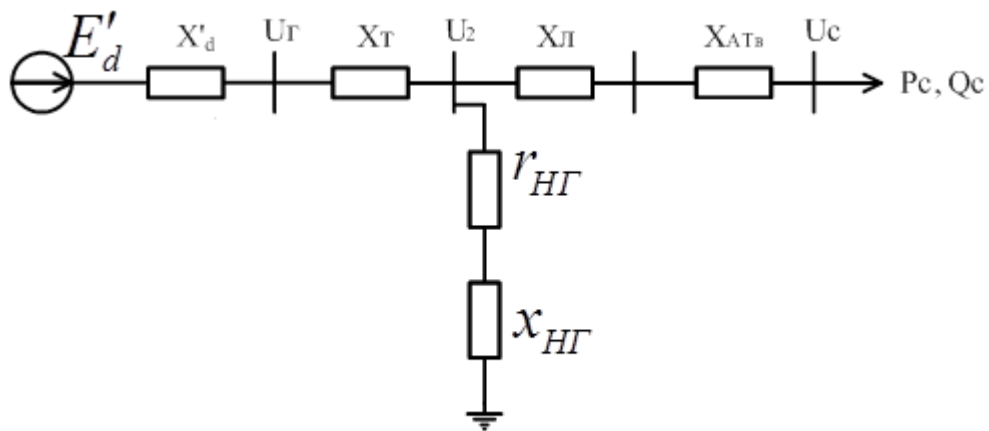


Рисунок 5.1 - Схема заміщення у нормальному режимі

Тоді характеристика потужності генераторів для нормального режиму буде визначатися за виразом (5.1):

$$P_{E'}^{HP} = E'^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E' \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta' - \alpha_{12}) \quad (5.1)$$

Після цього будується залежність активної потужності, яка видається генератором з АРЗ пропорційно дії від кута  $\delta$  від 0 до 180.

## 5.2 Визначення параметрів аварійного режиму роботи енергосистеми.

В якості аварійного режиму розглядається двофазне коротке замикання на землю в кінці одного з ланцюгів лінії W та скиданням генераторами переданої потужності. Схема заміщення для розрахунку при аварійному режиму зображено на рис. 5.2.

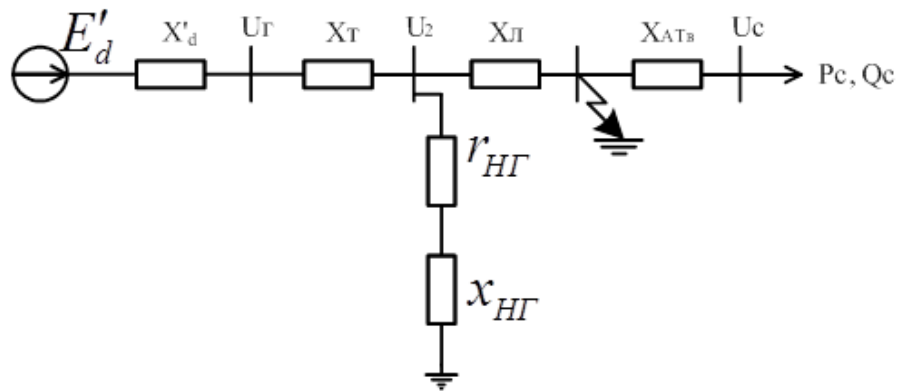


Рисунок 5.2 – Схема заміщення при аварійному режимі, прямої послідовності

Коротке замикання можливо представити у вигляді додаткового опору включеного в точці КЗ. У разі двофазного КЗ на землю необхідно скласти та розрахувати схеми заміщення зворотної та нульової послідовності.

Тоді опір зворотної послідовності генератора у відносних одиницях приведені до базисних умов визначається за виразом:

$$x_{2G} = x_{*2G} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_G \cdot n_G} \cdot \left( \frac{U_{ном}}{U_{\delta(н)}} \right)^2 \quad (5.2)$$

Опір зворотної послідовності навантаження розраховується за виразом:

$$z_{2HG} = 0,35 \cdot z_{HG} \quad (5.3)$$

Значення інших елементів у схемі заміщення зворотної послідовності дорівнюють значенням з аналогічної схеми прямої послідовності.

Схема заміщення зворотної послідовності представлена на рис. 5.3

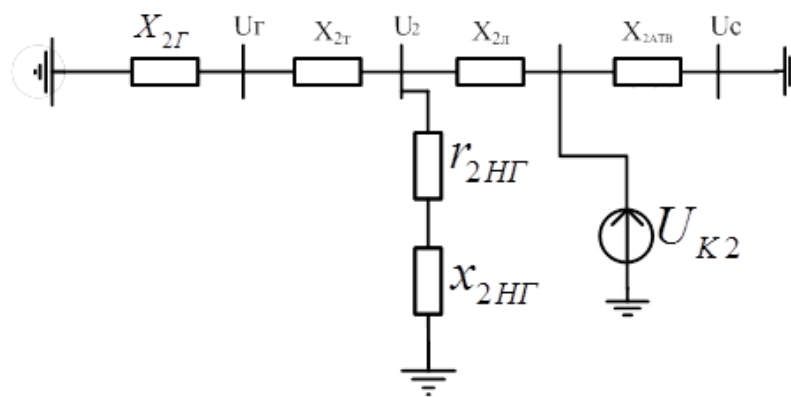


Рисунок 5.3 – Схема заміщення зворотної послідовності

Тоді для розрахунків опір нульової послідовності ліній приймається рівним 5 від опору прямої послідовності, що відображає вираз (5.4)

$$x_{0W} = 5 \cdot x_{1W} \quad (5.4)$$

Значення реактивного опору нижчої обмотки автотрансформатора визначається за:

$$x_{ATн} = \frac{U_{kATн}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{AT(осн)}} \cdot 3 \cdot \frac{U_{Вном}^2}{U_{\delta(осн)}^2} \quad (5.5)$$

$$U_{kATн} = 0,5(U_{кВ-H} + U_{кС-H} - U_{кВ-С})$$

Тоді схема заміщення нульової послідовності зображена на рис. 5.4

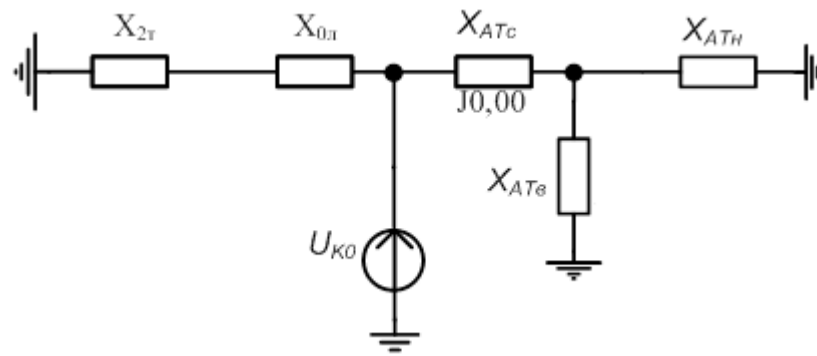


Рисунок 5.4 - Схема заміщення нульової послідовності

Під час двофазного короткого замикання на землю величина додаткового опору визначається за формулою:

$$\Delta z = \frac{z_0 \cdot z_2}{z_0 + z_2} \quad (5.6)$$

Якщо при розрахунку у виразі (5,6) активна складова додаткового опору значно менша за реактивну та близька до нульового значення, то нею можна знехтувати, тоді додатковий опір буде визначатися тільки реактивною складовою.

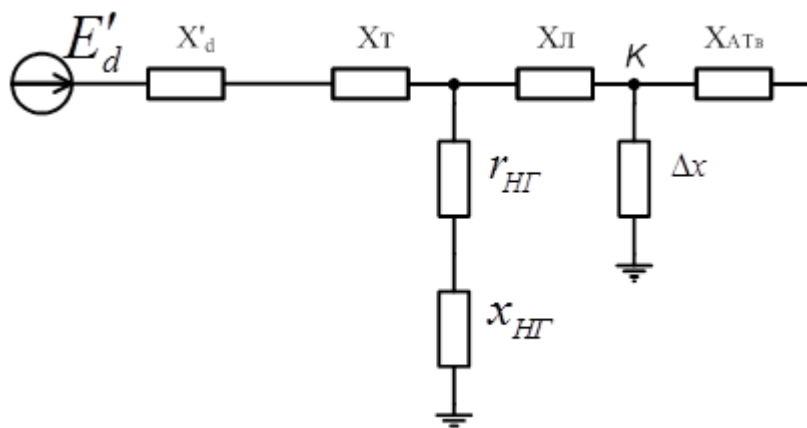


Рисунок 5.5 - Схема заміщення системи в аварійному режимі роботи

Схему заміщення (рис. 5.5) можна дещо спростити, наприклад:



$$x_4 = x'_d + x_T \quad (5.7)$$

А потім виконати перетворення «трикутника» у «зірку»:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{z_W \cdot z_H}{z_W + z_H + \Delta z} \\ Z_2 = \frac{z_W \cdot \Delta z}{z_W + z_H + \Delta z} \\ Z_3 = \frac{z_H \cdot \Delta z}{z_W + z_H + \Delta z} \end{cases} \quad (5.8)$$

Після цього можна виконати перетворення до вигляду схеми заміщення рис. 5.6

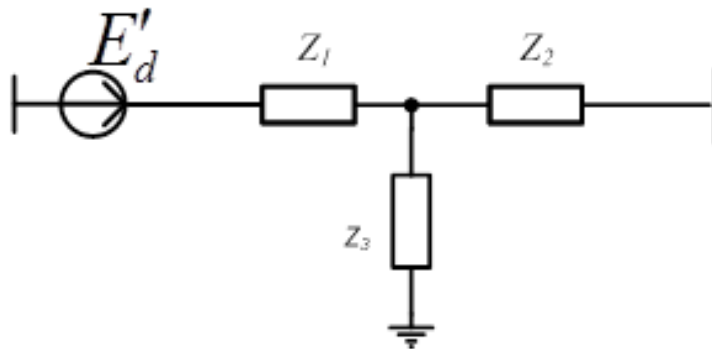


Рисунок 5.6 – - Результуюча схема заміщення системи в аварійному режимі роботи

Після цього розрахунок зводиться до встановлення параметрів за аналогією з попереднім розділом, а саме – знаходження власного опору системи:

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \quad (5.9)$$

– Взаємного опору системи:

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3} \quad (5.10)$$

Розрахунок власної та взаємної провідності:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{11} &= \frac{1}{\dot{Z}_{11}} = \dots = y_{11} \cdot e^{-j\psi_{11}} \\ \dot{Y}_{12} &= \frac{1}{\dot{Z}_{12}} = \dots = y_{12} \cdot e^{-j\psi_{12}} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Розрахунок власної та взаємного кутів втрат:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= 90 - \psi_{11} \\ \alpha_{12} &= 90 - \psi_{12} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Активна потужність, яка видається генератором в аварійному режимі:

$$P_{E'}^{AP} = E'^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E' \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta' - \alpha_{12}) \quad (5.13)$$

Рекомендації, щодо побудови залежності активної потужності, яка видається генератором в аварійному режимі від кута  $\delta'$  залишаються незмінними з четвертого пункту.

5.3 Визначення параметрів післяаварійного режиму роботи системи.

Після локалізації короткого замикання відключений один ланцюг лінії W. Тоді схема заміщення системи в післяаварійний режимі роботи буде мати вигляд (рис. 5.7).

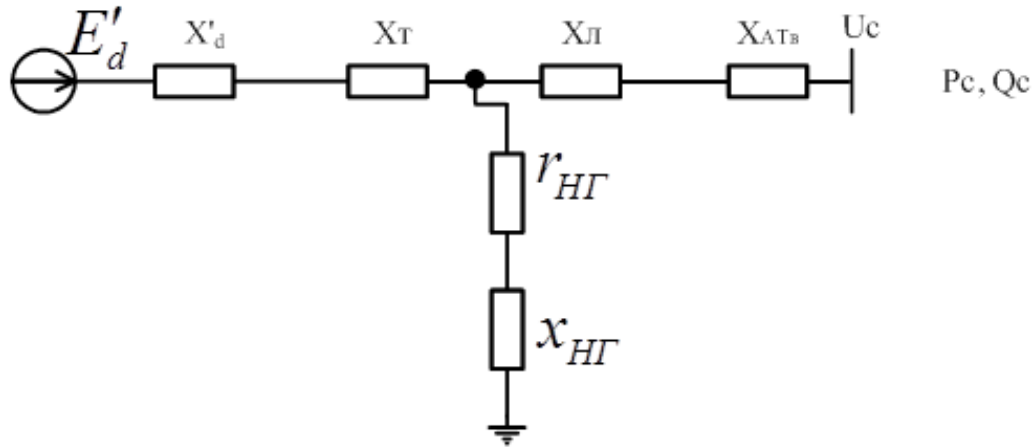


Рисунок 5.7 - Схема заміщення системи в післяаварійний режим роботи

Після цього схему знову можна спрости залишивши тільки власні опори елементів. Формули для розрахунку в після аварійному режимі залишаються згідно з (5.9-5.12).

Активна потужність, яка видається генератором у після аварійному режимі розраховується згідно з виразом (5.14).

$$P_{E'}^{IIAP} = E'^2 \cdot y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E' \cdot U_C \cdot y_{12} \cdot \sin(\delta' - \alpha_{12}) \quad (5.14)$$

5.4 Визначення параметрів відключення при двофазному короткому замиканні на землю в кінці ЛЕП.

Останній етап розрахунку зводиться до визначення параметрів спрацювання захисту під час аварійних режимах роботи системи.

Граничний кут відключення:

$$\cos \delta'_{відкл.зр.} = \frac{P_0 \cdot (\delta'_{кр} - \delta'_0) \cdot \frac{\pi}{180} - P_{\max}^{AP} \cdot \cos \delta'_0 + P_{\max}^{ПAP} \cdot \cos \delta'_{кр}}{P_{\max}^{ПAP} - P_{\max}^{AP}} \quad (5.15)$$

$$\delta'_{кр} = 180 - \arcsin \frac{P_0}{P_{\max}^{ПAP}} \quad (5.16)$$

Сумарний маховий момент генератора та турбіни:

$$GD_{\Sigma}^2 = GD_{\Gamma}^2 + GD_T^2 = 1.5 \cdot GD_{\Gamma} \quad (5.17)$$

Значення постійної інерції, в секундах, розраховується за:

$$T_J = \frac{2,74 \cdot GD_{\Sigma}^2 \cdot n^2}{1000 \cdot P_{ном}} \cdot 10^{-3} \quad (5.18)$$

де  $n$  - номінальна частота обертання ротора.

Постійна інерції еквівалентного агрегату при базисних умовах розраховується:

$$T_{JE} = T_J \cdot \frac{P_{ном} \cdot n_{ген}}{S_{\sigma}} \quad (5.19)$$

де  $n_{ген}$  - кількість агрегатів, в даному випадку 2.

За результатами проведеної роботи – розрахунку параметрів режимів роботи системи, побудови залежностей, схем заміщення ті інше, пропонується скласти висновок у якому зробити порівняння різних режимів енергосистеми та надати їх якісну оцінку.

## Список використаних джерел

- [1] Міркевич Г.Н., Букович Н.В. “Розрахунок струмів короткого замикання”. м. Київ, 1991. — 221 с.
- [2] Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Нессен Л.І., «Перехідні процеси в системах електропостачання»: Підручник для вузів. 2-е видання, доповнено, за ред. Академіка НАН України Півняка Г.Г. — м. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. — 597 с.
- [3] Півняк Г.Г., Кігель Г.А., Волотковська Н.С., Коротун А.В. «Розрахунки електричних мереж систем електропостачання.» — м.Київ: ІЗМИ, 1998. —136 с.
- [4] Zhezhelenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu. L., «Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. — 2 nd edition. — D.: National Mining University. — 2013. — 239 p.
- [5] Півняк Г.Г., Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А., Несен Л.І., за ред. Півняка Г.Г. ; «Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ» М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. — 5-те вид., доопрац. та допов. — Дніпро : НГУ, 2016. — 600 с.
- [6] М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець. Перехідні процеси в системах електропостачання: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] — м. Харків: ТОВ «В справі», 2016. — 260 с. — Бібліогр.: с. 254.