

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, -
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ”

_____ 2021 р

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Модернізація захисту генераторів електричних станцій

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕЛКЗ-17
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

та електромеханіка»

_____ Сорочак Дмитро Леонідович

(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник ст. викл. каф. Нємцев Е. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент к. т. н, зав. каф. ЕМ Калиниченко В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ Любименко О. М.

(підпис)

_____ 02.06.2021

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

_____ (підпис)

_____ 02.06.2021

(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Сорочак Дмитро Леонідович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація захисту генераторів електричних станцій

керівник роботи ст. викл. каф. Нємцев Е. М.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи червні року.

3. Вихідні дані до роботи: _____

оперативна схема ділянки мережі

дані ліній електропередачі

дані силових трансформаторів

дані споживачів

дані генераторів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Основи теорії перехідних процесів СМ

2. Математичне моделювання перехідних процесів в електричних машинах

3. Розрахунок захисту синхронного генератора

4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання Прийняв
Розділи 1 – 3	Нємцев Е. М.		
Розділ 4	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	03.05.21 – 12.05.21	
2.	Розділ 2	13.05.21 – 23.05.21	
3.	Розділ 3	24.05.21 – 27.05.21	
4.	Розділ 4	28.05.21 – 31.05.21	
5.			
6.			

Студент

Сорочак Д. Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Нємцев Е. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Сорочак Дмитро Леонідович. Модернізація захисту генераторів електричних станцій / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі розглянуті основи теорії перехідних процесів в синхронних машинах. Розглянуті їх диференційні рівняння.

У другому розділі показані етапи розрахунку перехідних процесів в залежності від типу машини та її конструктивного виконання.

У третьому розділі показаний розрахунок електромеханічних перехідних процесів.

Четвертий розділ присвячений розділу охорони праці.

Ключові слова: перехідні процеси, синхронні машини, диференційні рівняння, електромеханічні процеси, охорона праці.

ЗМІСТ

Вступ	6
Розділ 1. Основи теорії перехідних процесів СМ	7
Розділ 2. Математичне моделювання перехідних процесів в електричних машинах	27
Розділ 3. Розрахунок захисту синхронного генератора	42
Розділ 4. Охорона праці	49
Висновки	53
Список використаної літератури	54

ВСТУП

Система електропостачання включає багато різних елементів. Головний елемент – це генератор, та його система захисту.

Перехідний процес в електричних генераторах – це процес, при якому порушується робота синхронного генератора і змінюються результуючі параметри. Вивчення цього процесу є важливим. Задачею вивчення є дослідження взаємозв'язків між різними потужностями та моментами генератора. В цьому процесі кут потужності є важливим параметром, так як відображає перетворення енергії в генераторі. Зміна кута потужності призведе до зміни активної та реактивної потужності генерації. Діаграма робочої потужності генератора відображає залежність між активною та реактивною потужністю генератора за умови номінальної напруги і температури охолоджуючого середовища.

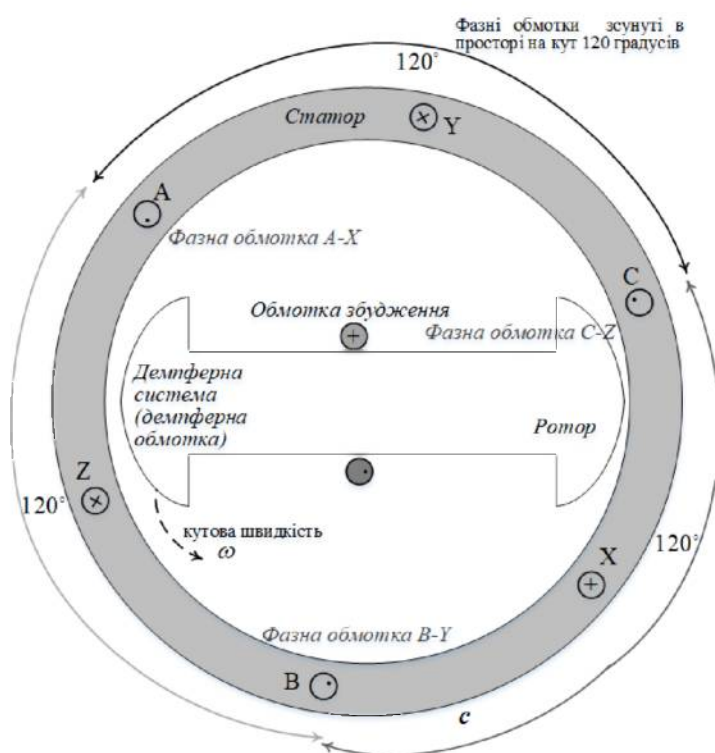
Найбільшу увагу приділяють дослідженню стаціонарних та динамічних моделей синхронних генераторів. Всі дослідження націлені на визначення виду процесів, що протікають в найбільш відповідальному елементі енергетичної системи – генераторі. Тобто це має велике практичне значення, дозволяє правильно розуміти ці процеси, і зауважимо, що дозволяє передбачати характер можливих аварій, швидко прибрати їх наслідки.

Метою даної роботи є дослідження перехідних процесів в електричних машинах, та розробка заходів щодо захисту від аварійних струмів.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ СМ

Розглянемо спочатку основи фундаментальної теорії електричних машин.

На початкових етапах дослідження складні процеси в ЕМ намагаються розглянути наближено. Для цього пропонують відмовитися від складних факторів, які не значно впливають на точність результатів, але нехтуваннями якими дозволяє вивчити процеси: по-перше, спрощується магнітна система; ідеалізується система обмоток, демпферна система, та система напруг.



Для застосування цієї теорії приймають лінійні залежності між величинами:

$$i_a, i_b, i_c, i_f$$

$$\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_f$$

$$a, b, c, f$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c + M_{af} \cdot i_f \\ \psi_b &= M_{ba} \cdot i_a + L_b \cdot i_b + M_{bc} \cdot i_c + M_{bf} \cdot i_f \\ \psi_c &= M_{ca} \cdot i_a + M_{cb} \cdot i_b + L_c \cdot i_c + M_{cf} \cdot i_f \\ \psi_f &= M_{fa} \cdot i_a + M_{fb} \cdot i_b + M_{fc} \cdot i_c + L_f \cdot i_f \end{aligned} \right\}$$

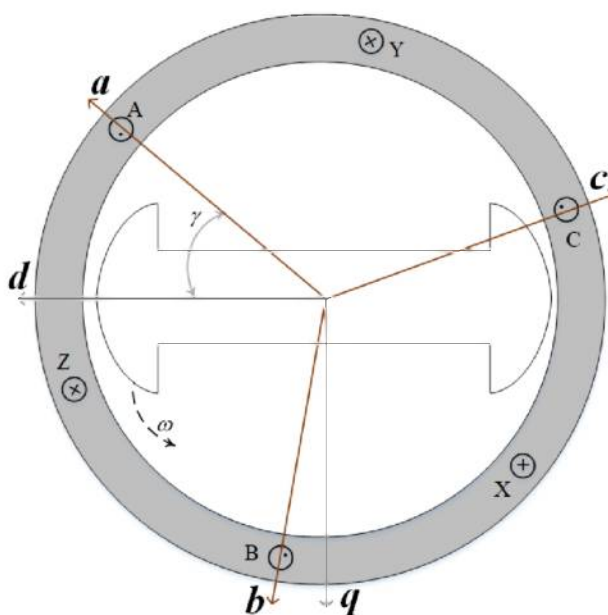
Залежності між величинами визначаються коефіцієнтами, які, в свою чергу, залежать від конструкції електричних машин

$$L_a, L_b, L_c$$

$$M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$$

Неважно бачити, що власна індуктивність є функцією положення ротора

γ



$$L_a = l_0 + l_2 \cos(2\gamma) + l_4 \cos(4\gamma) + \dots$$

Симетрія обмоток впливає на те, що їх функції будуть відрізнятися лише на кут зміщення фаз

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma) + l_4 \cos(4\gamma) + \dots \\ L_b &= l_0 + l_2 \cos\left(2\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right]\right) + l_4 \cos\left(4\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right]\right) + \dots \\ L_c &= l_0 + l_2 \cos\left(2\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right]\right) + l_4 \cos\left(4\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right]\right) + \dots \end{aligned} \right\}$$

Аналогічно можна довести, що для подальших розрахунків достатньо враховувати тільки перші дві складові

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_0 + l_2 \cos(2\gamma) \\ L_b &= l_0 + l_2 \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_c &= l_0 + l_2 \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Іншим способом спрощення рівнянь перехід до поздовжньої та перпендикулярної до неї поперечної осі

$$\left. \begin{aligned} l_d &= l_0 + l_2 \\ l_q &= l_0 - l_2 \end{aligned} \right\}$$

Далі покладаємо

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_d \cdot \cos^2(\gamma) + l_q \cdot \sin^2(\gamma) \\ L_b &= l_d \cdot \cos^2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + l_q \cdot \sin^2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_c &= l_d \cdot \cos^2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + l_q \cdot \sin^2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Виявляється, що за таким же алгоритмом можна визначити взаємну індуктивність:

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= m_0 + m_2 \cos(2\gamma') + m_4 \cos(4\gamma') + \dots \\ \gamma' &= \gamma - 0,5 \cdot \frac{2\pi}{3} \end{aligned} \right\}$$

Тоді її функція буде мати вигляд:

$$M_{ab} = m_0 + m_2 \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right)$$

І вона таким же способом спрощується

$$\left. \begin{aligned} m_d &= m_0 - \frac{1}{2} m_2 \\ m_q &= m_0 + \frac{1}{2} m_2 \\ M_{ab} &= \frac{m_d + m_q}{2} - (m_d - m_q) \cdot \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Розв'язком є :

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= -2 \left[m_d \cdot \cos \gamma \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + m_q \cdot \sin \gamma \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ M_{bc} &= -2 \left[m_d \cdot \cos\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \cos\left(\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + m_q \cdot \sin\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \sin\left(\left[\gamma - \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ M_{ac} &= -2 \left[m_d \cdot \cos\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \cos\left(\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + m_q \cdot \sin\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] \cdot \sin\left(\left[\gamma + \frac{2\pi}{3}\right] - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \right\}$$

Положення обмотки збудження визначається положенням ротора, тому її параметри визначаються з урахуванням періоду 2π :

$$M_{af} = M_{fa}, M_{bf} = M_{fb}, M_{cf} = M_{fc}$$

Її складові визначаються за виразом

$$M_{af} = m_1 \cos(\gamma) + m_3 \cos(3\gamma) + \dots$$

Для вище перерахованих спрощень рівняння напруги має вигляд

$$u_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_f \frac{dM_{af}}{dt} = i_f \cdot \gamma \cdot (m_1 \cdot \sin(\gamma) + 3m_3 \cdot \sin(3\gamma) + \dots)$$

В це рівняння можна підставити спрощенні вирази

$$\left. \begin{aligned} M_{af} &= m_1 \cos(\gamma) \\ M_{bf} &= m_1 \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf} &= m_1 \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

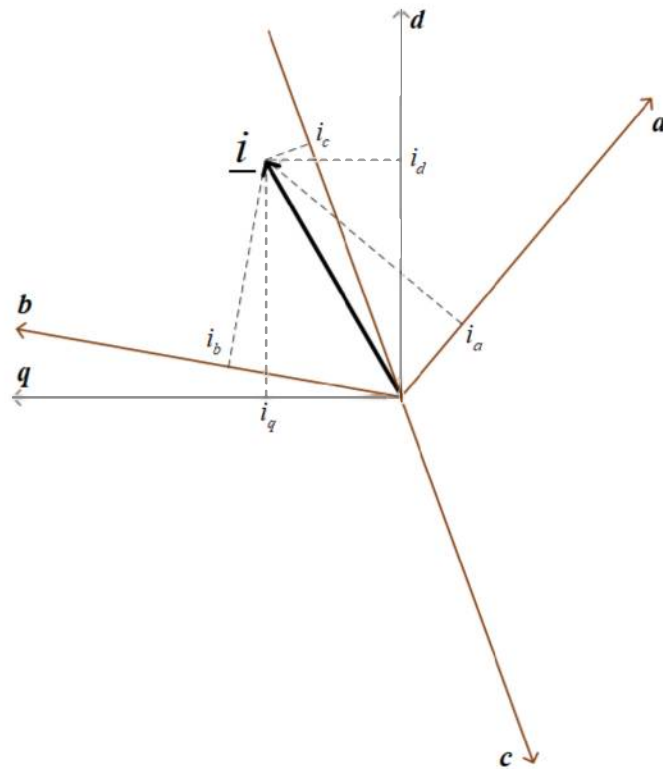
Будемо вважати, що

$$i_a = i_b = i_c$$

тому

$$\begin{aligned}
\Psi_a &= i \cdot (L_a + M_{ab} + M_{ac}) = \\
&= i \cdot \left(l_d \cdot \cos^2(\gamma) + l_q \cdot \sin^2(\gamma) - 2 \cdot \left[m_d \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + m_q \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + m_d \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + m_q \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right) = \\
&= i \cdot \left[(l_d + 2m_d) \cdot \cos^2(\gamma) + (l_d + 2m_d) \cdot \sin^2(\gamma) \right]
\end{aligned}$$

Для точного формулювання результату використовуємо перетворення



$$\left. \begin{aligned}
i_0 &= \frac{1}{3} \cdot (i_a + i_b + i_c) \\
i_d &= \frac{2}{3} \cdot \left(i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\
i_q &= \frac{2}{3} \cdot \left(i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right)
\end{aligned} \right\}$$

Покажемо, що його обернений вид:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_0 + i_d \cdot \cos(\gamma) + i_q \cdot \sin(\gamma) \\ i_b &= i_0 + i_d \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c &= i_0 + i_d \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Зауважимо, що для умови

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

є справедливим:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i \cdot \cos(\alpha) \\ i_b &= i \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c &= i \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

і

$$\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) = 0$$

Доведемо, що

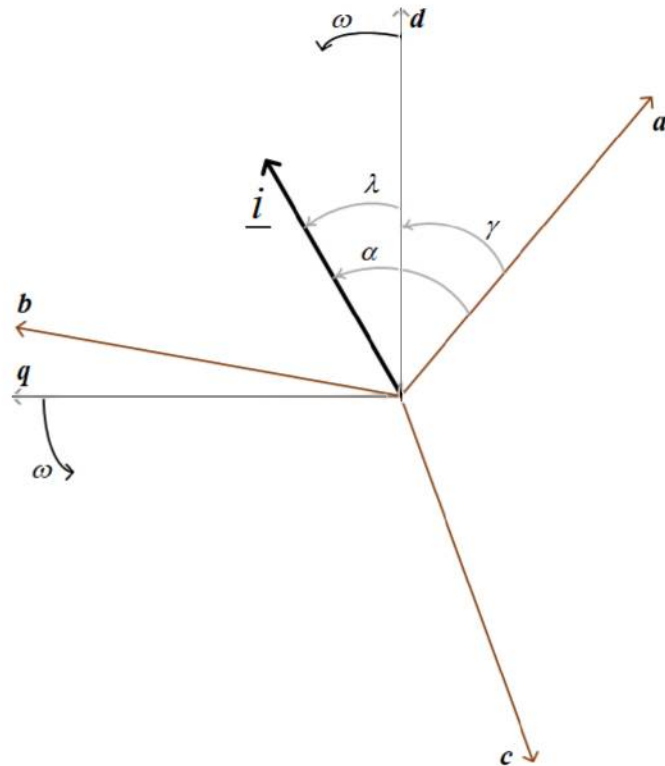
$$\begin{aligned} i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 &= \left[i \cdot \cos(\alpha)\right]^2 + \left[i \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right]^2 + \left[i \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)\right]^2 = \\ &= i^2 \cdot \left[\cos^2(\alpha) + \cos^2\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos^2\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \frac{3}{2} \cdot i^2 \end{aligned}$$

Зрозуміло, що

$$i = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}$$

$$\cos \alpha = \frac{i_a}{\sqrt{\frac{2}{3} \cdot (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}}$$

Всі ці перетворення відповідають графічній залежності



Доведемо, що при

$$\lambda = \alpha - \gamma$$

$$\begin{aligned} i \cdot \cos(\lambda) &= i \cdot \cos(\alpha - \gamma) = \\ &= \frac{2}{3} \cdot i \cdot \left[\cos(\gamma) \cdot \cos(\alpha) + \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_d \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-i \cdot \sin(\lambda) &= i \cdot \sin(\gamma - \alpha) = \\
&= \frac{2}{3} \cdot i \cdot \left[\sin(\gamma) \cdot \cos(\alpha) + \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\
&\quad \left. + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\
&= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_q
\end{aligned}$$

Сформулюємо перетворення, але обернені

$$\begin{aligned}
i_a &= i \cdot \cos(\alpha) = i \cdot \cos(\gamma + \lambda) = \\
&= i \cdot (\cos(\gamma) \cdot \cos(\lambda) - \sin(\gamma) \cdot \sin(\lambda)) = \\
&= i_d \cdot \cos(\gamma) + i_q \cdot \sin(\gamma)
\end{aligned}$$

$$i_b = i \cdot \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c = i \cdot \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Зауважимо, що для умови

$$\underline{i}_a + \underline{i}_b + \underline{i}_c \neq 0$$

$$i_0 = \frac{1}{3} \cdot (i_a + i_b + i_c)$$

Важливо підкреслити, що нові значення струмів

$$i'_a = i_a - i_0$$

$$i'_b = i_b - i_0$$

$$i'_c = i_c - i_0$$

при яких забезпечується нова умова

$$i'_a + i'_b + i'_c = 0$$

Цими формулами можна скористатися при несиметричних КЗ чи при несиметричному навантаженні

$$\begin{aligned} i' \cdot \cos(\lambda') &= i' \cdot \cos(\gamma - \alpha') = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i'_a \cdot \cos(\gamma) + i'_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i'_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_d \\ -i' \cdot \sin(\lambda') &= i' \cdot \sin(\gamma - \alpha') = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i'_a \cdot \sin(\gamma) + i'_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i'_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left[i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = i_q \end{aligned}$$

Тобто при будь-яких умовах за струмом, маємо

$$i_a = i_0 + i' \cdot \cos(\gamma + \lambda)$$

$$i_b = i_0 + i' \cdot \cos\left(\gamma + \lambda - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c = i_0 + i' \cdot \cos\left(\gamma + \lambda + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

$$i' = \frac{2}{3} \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 - i_a \cdot i_b - i_b \cdot i_c - i_c \cdot i_a} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

$$\lambda = -\arctg \frac{i_a \cdot \sin(\gamma) + i_b \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)}{i_a \cdot \cos(\gamma) + i_b \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right)} = -\arctg \frac{i_q}{i_d}$$

Всі перераховані перетворення націлені на визначення виду процесів, що протікають в найбільш відповідальному елементі енергетичної системи – генераторі.

Тобто це має велике практичне значення, дозволяє правильно розуміти ці процеси, і зауважимо, що дозволяє передбачати характер можливих аварій, швидко прибрати їх наслідки.

У відповідності з попередніми розрахунками визначимо потокозчеплення в роторній системі координат:

$$\begin{aligned}
 \psi_a &= \psi_{as} + \psi_{af} = L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c + M_{af} \cdot i_f \\
 \psi_{as} &= L_a \cdot i_a + M_{ab} \cdot i_b + M_{ac} \cdot i_c = \\
 &= (l_d \cdot \cos^2 \gamma + l_q \cdot \sin^2 \gamma) \cdot (i_0 + i_d \cdot \cos \gamma + i_q \cdot \sin \gamma) - \\
 &- 2 \cdot \left[m_d \cdot \cos \gamma \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + m_q \cdot \sin \gamma \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot \\
 &\cdot \left[i_0 + i_d \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right] - \\
 &- 2 \cdot \left[m_d \cdot \cos \gamma \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + m_q \cdot \sin \gamma \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot \\
 &\cdot \left[i_0 + i_d \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Наступний напрям перетворення – це групування за струмами:

$$\begin{aligned}
\psi_{as} = & i_0 \cdot \left[(l_d + 2 \cdot m_d) \cdot \cos^2 \gamma + (l_q + 2 \cdot m_q) \cdot \sin^2 \gamma \right] + \\
& + i_d \cdot \cos \gamma \cdot \left[l_d \cdot \cos^2 \gamma - 2 \cdot m_d \cdot \left(\cos^2 \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos^2 \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] + \\
& + i_d \cdot \sin \gamma \cdot \left[l_q \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma - 2 \cdot m_q \cdot \left(\sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] + \\
& + i_q \cdot \cos \gamma \cdot \left[l_d \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma - 2 \cdot m_d \cdot \left(\sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] + \\
& + i_q \cdot \sin \gamma \cdot \left[l_q \cdot \sin^2 \gamma - 2 \cdot m_q \cdot \left(\sin^2 \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin^2 \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right]
\end{aligned}$$

На цьому перетворення не вичерпуються:

$$\begin{aligned}
\psi_{as} = & i_0 \cdot \left[(l_d + 2 \cdot m_d) \cdot \cos^2 \gamma + (l_q + 2 \cdot m_q) \cdot \sin^2 \gamma \right] + \\
& + i_d \cdot \cos \gamma \cdot \left[l_d - m_d - \sin^2 \gamma \cdot \left((l_d + 2 \cdot m_d) - (l_q + 2 \cdot m_q) \right) \right] + \\
& + i_q \cdot \sin \gamma \cdot \left[l_q - m_q + \cos^2 \gamma \cdot \left((l_d + 2 \cdot m_d) - (l_q + 2 \cdot m_q) \right) \right]
\end{aligned}$$

Дійсно, якщо індуктивності складають:

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= l_d + 2 \cdot m_d = l_q + 2 \cdot m_q \\ L_d &= l_d - m_d \\ L_q &= l_q - m_q \end{aligned} \right\}$$

то визначення потокозчеплення виконується в наступному напрямку

$$\left. \begin{aligned} \psi_{as} &= L_0 \cdot i_0 + L_d \cdot i_d \cdot \cos \gamma + L_q \cdot i_q \cdot \sin \gamma \\ \psi_{bs} &= L_0 \cdot i_0 + L_d \cdot i_d \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + L_q \cdot i_q \cdot \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_{cs} &= L_0 \cdot i_0 + L_d \cdot i_d \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + L_q \cdot i_q \cdot \sin \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\}$$

За умови, що

$$i_a = i_b = i_c = 0$$

$$i_f = \text{const}$$

фазні значення

$$\psi_a = M_{af} \cdot i_f \cdot \cos(\gamma)$$

$$\psi_b = M_{bf} \cdot i_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\psi_c = M_{cf} \cdot i_f \cdot \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\psi_f = L_f \cdot i_f$$

Для напруги буде дійсним:

$$u_a = -\frac{d\psi_a}{dt} = u_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$u_b = -\frac{d\psi_b}{dt} = u_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$u_c = -\frac{d\psi_c}{dt} = u_f \cdot \cos \left(\gamma - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$u_f = \omega \cdot L_f \cdot i_f$$

На практиці це не завжди так, але в теорії приймають, що

$$\lambda = -\frac{\pi}{2}$$

І знову повертаємося до несиметричних режимів. Як вище вже згадувалося вони є частим явищем при експлуатації електричних мереж.

Їх згідно з теорією розкладають на три симетричні режими.

Спочатку утворюють систему з прямим чергуванням фаз

$$\begin{aligned} i_{a1} &= i \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ i_{b1} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{c1} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

швидкість яких складає:

$$\lambda = \omega t + \varphi - \gamma$$

Нехай осі $0d$ і $0a$ співпадають, тоді

$$\gamma = \omega t$$

Зрозуміло, що тоді проекції будуть визначатися наступним чином:

$$\begin{aligned} i_d &= i \cdot \cos(\varphi) \\ i_q &= -i \cdot \sin(\varphi) \end{aligned}$$

Варто зауважити, що є й окремі випадки:

$$\left. \begin{array}{l} \varphi = 0 \\ i_d = i, i_q = 0 \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \varphi = -\frac{\pi}{2} \\ i_d = 0, i_q = i \end{array} \right\}$$

Важливою і складною задачею є визначення фазних напруг:

$$\left. \begin{array}{l} u_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) \cdot \sin(\gamma) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \cdot \cos(\gamma) \\ u_b = -\frac{d\Psi_b}{dt} = \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c = -\frac{d\Psi_c}{dt} = \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_f \cdot i_f) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right\}$$

З властивостей взаємного розташування осей

$$\begin{aligned} u_d &= \omega \cdot L_d \cdot i_d \\ u_q &= \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ u_f &= \omega \cdot L_f \cdot i_f \end{aligned}$$

безпосередньо отримуємо напруги

$$\left. \begin{array}{l} u_a = (u_f + u_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right) - u_q \cdot \cos(\gamma) \\ u_b = (u_f + u_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) - u_q \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c = (u_f + u_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) - u_q \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right\}$$

Далі утворюють систему з оберненим чергуванням фаз

$$\begin{aligned}i_{a2} &= i \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\i_{b2} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \\i_{c2} &= i \cdot \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

Більш точні значення струмів будуть складати

$$\left. \begin{aligned}i_0 &= 0 \\i_d &= i \cdot \cos(2\gamma + \varphi) = i \cdot \cos(2\omega t + \varphi) \\i_q &= i \cdot \sin(2\gamma + \varphi) = i \cdot \sin(2\omega t + \varphi)\end{aligned} \right\}$$

За певних умов визначаються кут між узагальненим вектором та відповідно осями d і a :

$$\begin{aligned}tg(\lambda) &= -\frac{i_q}{i_d} = -tg(2\gamma + \varphi) \\ \lambda &= -(2\gamma + \varphi) \\ \underbrace{\lambda + \gamma}_{\alpha} &= -\gamma - \varphi \\ \alpha &= -(\gamma + \varphi) = -(\omega t + \varphi)\end{aligned}$$

Рух цих векторів по відношенню до обмоток статора протилежний з одинарною швидкістю ω , а для роторних контурів, звісно ж, з подвоєною швидкістю, і так само в протилежну сторону.

За таких умов,

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= 0 \\ i_d &= i \cdot \cos(2\gamma + \varphi) \\ i_q &= i \cdot \sin(2\gamma + \varphi) \end{aligned} \right\}$$

а похідні

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -2 \cdot \omega \cdot i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= 2 \cdot \omega \cdot i_d \end{aligned} \right\}$$

Легко бачити, що

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -\omega \cdot i_q \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos(\gamma) + \omega \cdot i_d \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos(\gamma) - \\ &\quad - M_d \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot \cos(\gamma) + M_d \cdot i_f \cdot \omega \cdot \sin(\gamma) \\ u_b &= -\omega \cdot i_q \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + \omega \cdot i_d \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - \\ &\quad - M_d \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + M_d \cdot i_f \cdot \omega \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= -\omega \cdot i_q \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \omega \cdot i_d \cdot (L_q - 2L_d) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - \\ &\quad - M_d \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + M_d \cdot i_f \cdot \omega \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Якщо підставити значення у відповідності з формулами

$$\begin{aligned} i_f &= -\frac{3}{2} \cdot \frac{M_d}{L_f} \cdot i_d \\ \frac{di_f}{dt} &= 3 \cdot \omega \cdot \frac{M_d}{L_f} \cdot i_q \end{aligned}$$

то отримуємо

$$\begin{aligned}
u_a = & -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(2\gamma + \varphi) + \\
& + \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(2\gamma + \varphi) \\
u_b = & -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right) \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) + \\
& + \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) \\
u_c = & -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right) \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right) + \\
& + \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right)
\end{aligned}$$

Тепер маємо

$$\begin{aligned}
u_a = & -2\omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\frac{L_q}{2L_d} - \underbrace{\left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right)}_{\frac{L_d}{L_d}} \right) \cdot \underbrace{\cos(\gamma) \cdot \sin(2\gamma + \varphi)}_{0,5[\sin(2\gamma + \varphi - \gamma) + \sin(2\gamma + \varphi + \gamma)]} + \\
& + \omega \cdot L_d \cdot i \cdot \left(\underbrace{\left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right)}_{\frac{L_d}{L_d}} - \frac{2L_q}{L_d} \right) \cdot \underbrace{\sin(\gamma) \cdot \cos(2\gamma + \varphi)}_{0,5[\sin(\gamma - 2\gamma - \varphi) + \sin(\gamma + 2\gamma + \varphi)]} =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\omega \cdot i \cdot \left(\frac{1}{2} L_q - L'_d \right) \cdot [\sin(\gamma + \varphi) + \sin(3\gamma + \varphi)] + \\
&+ \omega \cdot i \cdot \frac{1}{2} (L'_d - 2L_q) \cdot [\sin(-\gamma - \varphi) + \sin(3\gamma + \varphi)] = \\
&= \omega \cdot i \cdot \left[-\frac{1}{2} L_q + L'_d - \frac{1}{2} (L'_d - 2L_q) \right] \cdot \sin(\gamma + \varphi) + \\
&+ \omega \cdot i \cdot \left[-\frac{1}{2} L_q + L'_d + \frac{1}{2} (L'_d - 2L_q) \right] \cdot \sin(3\gamma + \varphi) = \\
&= \omega \cdot i \cdot \left[-\frac{1}{2} L_q + L'_d - \frac{L'_d}{2} + L_q \right] \cdot \sin(\gamma + \varphi) + \\
&+ \omega \cdot i \cdot \left[\frac{3}{2} L'_d - \frac{3}{2} L_q \right] \cdot \sin(3\gamma + \varphi) = \\
&= \omega \cdot i \cdot \frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \sin(\gamma + \varphi) + \omega \cdot i \cdot \frac{3}{2} [L'_d - L_q] \cdot \sin(3\gamma + \varphi) = \\
&= \omega \cdot i \cdot \left[\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \cos\left(\gamma + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \cos\left(3\gamma + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

Звідки й випливають залежності для інших фаз

$$\begin{aligned}
u_b &= \omega \cdot i \cdot \left[\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \cos\left(\gamma + \varphi - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{2}\right) + \frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \cos\left(3\gamma + \varphi + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{2}\right) \right] \\
u_c &= \omega \cdot i \cdot \left[\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \cos\left(\gamma + \varphi - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{2}\right) + \frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \cos\left(3\gamma + \varphi + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{2}\right) \right]
\end{aligned}$$

Виконані дослідження показують, що дві складові оберненої послідовності визначаються індуктивностями обмоток і та що обертається з одинарною швидкістю в протилежний напрямок визначається

$$\frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \omega \cdot i$$

а інша обертається з потроєною швидкістю в прямому напрямку та визначається

$$\frac{3}{2} [L_q - L'_d] \cdot \omega \cdot i$$

Аналіз показує, що без другої складової ми маємо

$$x_2 = \frac{1}{2} [L'_d + L_q] \cdot \omega = \frac{1}{2} [x'_d + x_q]$$

А в перехідному режимі:

$$x'_d = \omega \cdot L_d \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{M_d^2}{L_d \cdot L_f} \right)$$

Будемо вважати, що отриманих даних достатньо для визначення характеру перехідних процесів в електричних машинах. Але винятком є багатоконтурність електричних машин. Це потребує додаткових досліджень.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ

Якщо врахувати співвідношення для напруги, то

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u \cdot \cos(\omega t) = u \cdot \cos\left(\gamma - \theta - \frac{\pi}{2}\right) = u \cdot \sin(\gamma - \theta) \\ u_b &= u \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \cos\left(\gamma - \theta - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \sin\left(\gamma - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= u \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \cos\left(\gamma - \theta - \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) = u \cdot \sin\left(\gamma - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}$$

Безпосередньо в момент КЗ

$$t = 0$$

$$\angle d, a = \gamma_0$$

$$\angle q, a = \gamma_0 - \frac{\pi}{2} = \theta$$

В наступний момент часу

$$t \neq 0$$

$$\gamma = \gamma_0 + \omega t = \omega t + \theta + \frac{\pi}{2}$$

Для напруги повинні виконуватися рівняння

$$u_k + \frac{d\Psi_k}{dt} + r i_k = 0$$

$$k = a, b, c$$

На початок рішення буде наступним:

$$\left. \begin{aligned} A \cdot \sin(\gamma) - B \cdot \cos(\gamma) &= 0 \\ A \cdot \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) - B \cdot \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) &= 0 \\ A \cdot \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) - B \cdot \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

В цю систему входять значення:

$$\left. \begin{aligned} A &= \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot L_f \cdot i_f - r \cdot i_q - u \cdot \cos(\theta) = 0 \\ B &= \omega \cdot L_q \cdot i_q + r \cdot i_d - u \cdot \sin(\theta) = 0 \end{aligned} \right\}$$

З використанням цих коефіцієнтів визначаємо

$$\left. \begin{aligned} x_d \cdot i_d - r \cdot i_q &= u \cdot \cos(\theta) - u_f \\ x_q \cdot i_q + r \cdot i_d &= u \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \right\}$$

Скориставшись ними визначаємо початкові значення струмів:

$$\left. \begin{aligned} i_q &= \frac{(u - u \cdot \sin \theta) \cdot r + x_d \cdot u \cdot \sin \theta}{x_d \cdot x_q + r^2} \\ i_d &= -\frac{(u - u \cdot \cos \theta) \cdot x_q - r \cdot u \cdot \sin \theta}{x_d \cdot x_q + r^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\underline{i} = i_q \cdot \underline{q} + i_d \cdot \underline{d}$$

Без особливих труднощів отримуємо:

$$\begin{aligned}
& (u_d \cdot \cos(\gamma) + u_q \cdot \sin(\gamma) + u_0) + \\
& + \frac{d(\Psi_d \cdot \cos(\gamma) + \Psi_q \cdot \sin(\gamma) + \Psi_0)}{dt} + \\
& + r \cdot (i_d \cdot \cos(\gamma) + i_q \cdot \sin(\gamma) + i_0) = 0
\end{aligned}$$

Перенесення значень у відповідності з тригонометричними функціями дозволяє отримати вираз:

$$\begin{aligned}
& \left[u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_d \right] \cdot \cos(\gamma) + \\
& + \left[u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_q \right] \cdot \sin(\gamma) + \\
& + \left[u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + r \cdot i_0 \right] = 0
\end{aligned}$$

Таким чином можна прийти до співвідношень, якщо статорні обмотки

$$\left. \begin{aligned}
u_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_d &= 0 \\
u_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} + r \cdot i_q &= 0 \\
u_0 + \frac{d\Psi_0}{dt} + r \cdot i_0 &= 0
\end{aligned} \right\}$$

А якщо розглядаємо роторні обмотки, то дістаємо залежності

$$u_f - \frac{d\Psi_f}{dt} - r \cdot i_f = 0$$

$$\frac{d\Psi_{D_i}}{dt} + r \cdot i_{D_i} = 0$$

$$i = 1, 2 \dots n$$

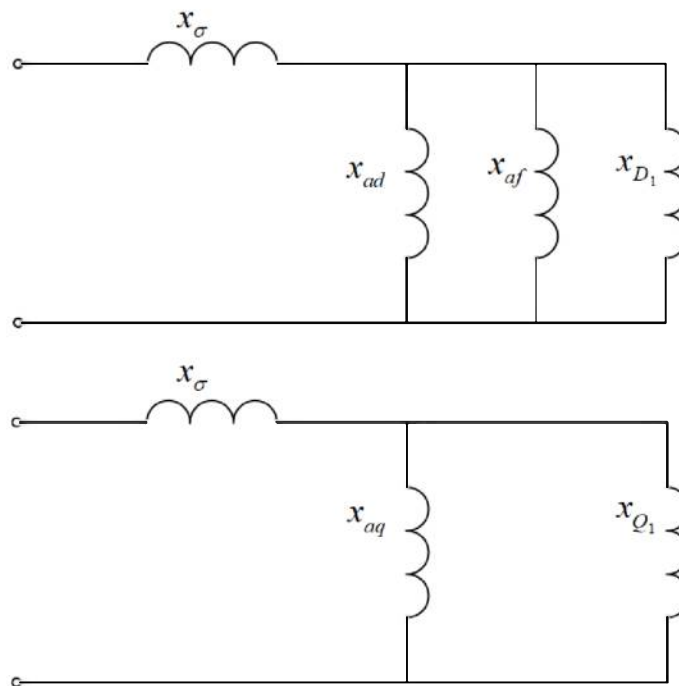
$$\frac{d\Psi_{Q_j}}{dt} + r \cdot i_{Q_j} = 0$$

$$j = 1, 2 \dots m$$

І ось, так звана система рівнянь Парка – Горєва

$$\left. \begin{aligned}
 u_d &= -\frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt} - r \cdot i_d \\
 u_q &= -\frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt} - r \cdot i_q \\
 u_0 &= -\frac{d\Psi_0}{dt} - r \cdot i_0 \\
 u_f &= \frac{d\Psi_f}{dt} + r \cdot i_f \\
 0 &= \frac{d\Psi_{D_i}}{dt} + r \cdot i_{D_i} \\
 i &= 1, 2 \dots n \\
 0 &= \frac{d\Psi_{Q_j}}{dt} + r \cdot i_{Q_j} \\
 j &= 1, 2 \dots m
 \end{aligned} \right\}$$

Якщо прийняти, схема для дослідження має вигляд



то вирази для потокозчеплень наглядно визначаються:

$$\left. \begin{aligned}
 \Psi_d &= x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \\
 \Psi_q &= x_q \cdot i_q + \sum_{j=1}^m x_{aq} \cdot i_{Q_j} \\
 \Psi_f &= x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Psi_{D_i} &= x_{ad} \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + x_{D_i} \cdot i_{D_i} + \sum_{i=1}^{n-1} x_{ad} \cdot i_{D_i} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Psi_{Q_j} &= x_{aq} \cdot i_q + x_{Q_i} \cdot i_{Q_i} + \sum_{i=1}^{m-1} x_{aq} \cdot i_{Q_i} \\
 \Psi_0 &= x_0 \cdot i_0
 \end{aligned} \right\}$$

Кожне потокозчеплення відповідає за свою ЕРС:

$$u_d = - \underbrace{\frac{d\Psi_d}{dt}}_{\text{ЕРС трансформації}} - \underbrace{\Psi_q \cdot \frac{d\gamma}{dt}}_{\text{ЕРС обертання}} - r \cdot i_d$$

$$u_q = - \underbrace{\frac{d\Psi_q}{dt}}_{\text{ЕРС трансформації}} + \underbrace{\Psi_d \cdot \frac{d\gamma}{dt}}_{\text{ЕРС обертання}} - r \cdot i_q$$

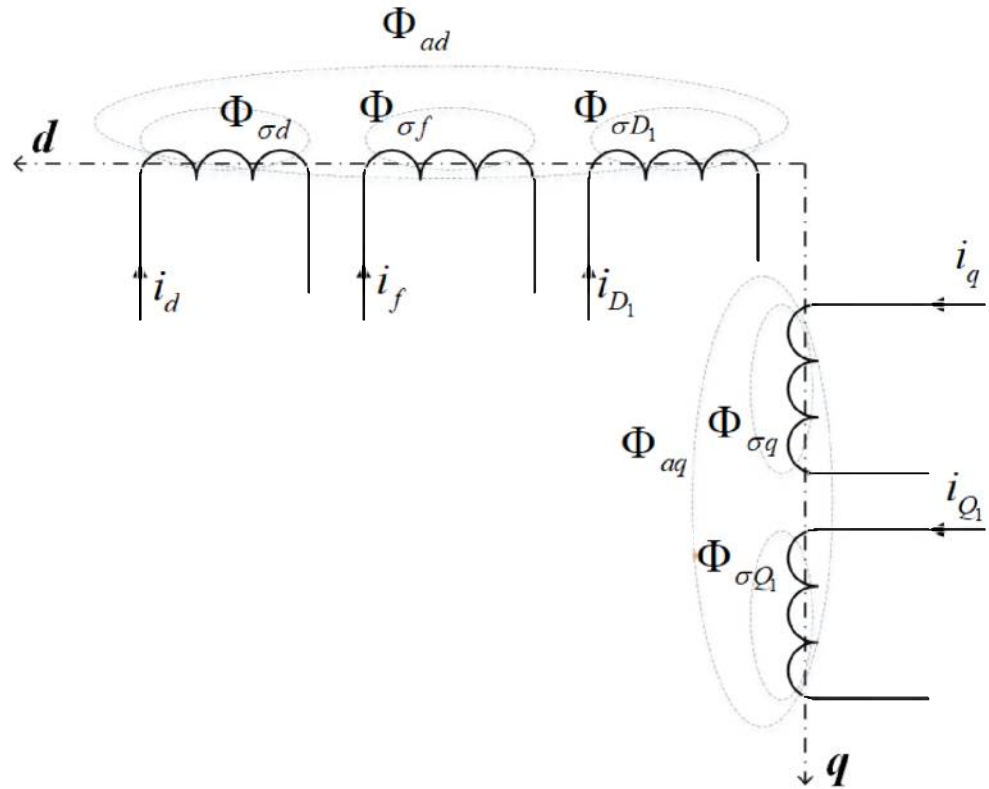
В сталому режимі відсутня.

В перехідному режимі виникає при зміні струму і відповідно при зміні потокозчеплення.

Виникають при переміщенні магнітного потоку, викликаного обертанням ротора: $\frac{d\gamma}{dt} = \omega_c$

При синхронній швидкості обертання ротора у в.о.: $\frac{d\gamma}{dt} = 1$

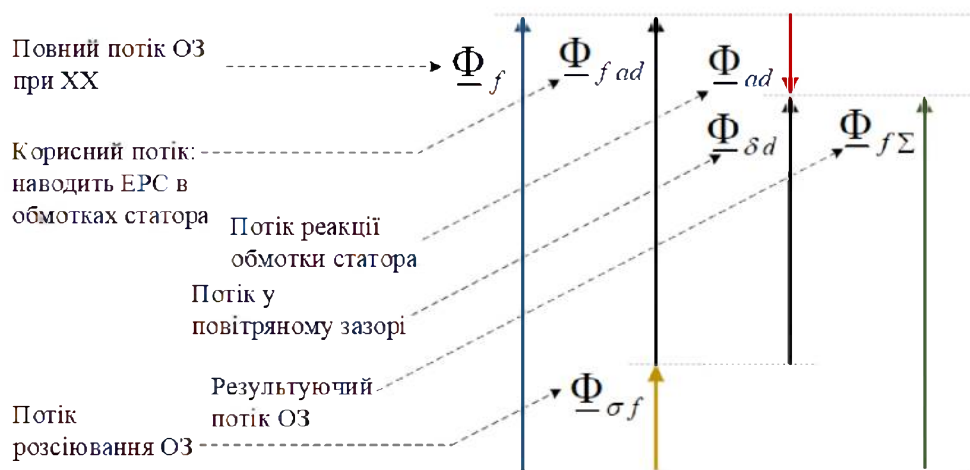
Таким чином ми можемо прийти до інтерпретації в графічному вигляді



Отже справді:

- в ортогональних осях потоки взаємно не взаємодіють.
- потоки взаємодіють вздовж своєї осі.
- кожен струм створює потік розсіювання.

Визначимо потоки для нормального режиму



Згідно з наведеною картиною потоків потужності отримуємо суми чи різниці геометричні:

$$\underline{\Phi}_f = \underline{\Phi}_{fad} + \underline{\Phi}_{\sigma f}$$

$$\underline{\Phi}_{fad} = \underline{\Phi}_{\delta d} - \underline{\Phi}_{ad}$$

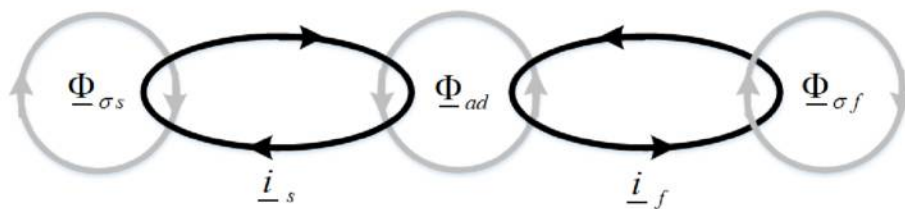
$$\underline{\Phi}_{f\Sigma} = \underline{\Phi}_{\sigma f} + \underline{\Phi}_{\delta d}$$

Розглянемо зміну потоків при порушенні нормального режиму:

$$\underline{i} \Rightarrow \underline{\Phi} = f(\underline{i}) \Rightarrow \underline{e} = f'(\underline{\Phi})$$

$$\underline{e} = -\Delta U(\underline{i})$$

магнітний зв'язок між обмотками статора і ротора



раптова зміна струму в одній з обмоток – в іншій наводиться струм, який прагне підтримати потокозчеплення даної обмотки незмінним

Будь-яке порушення – це, звісно ж, зміна струму, а ця зміна призводить до зміни магнітного потоку.

Справді

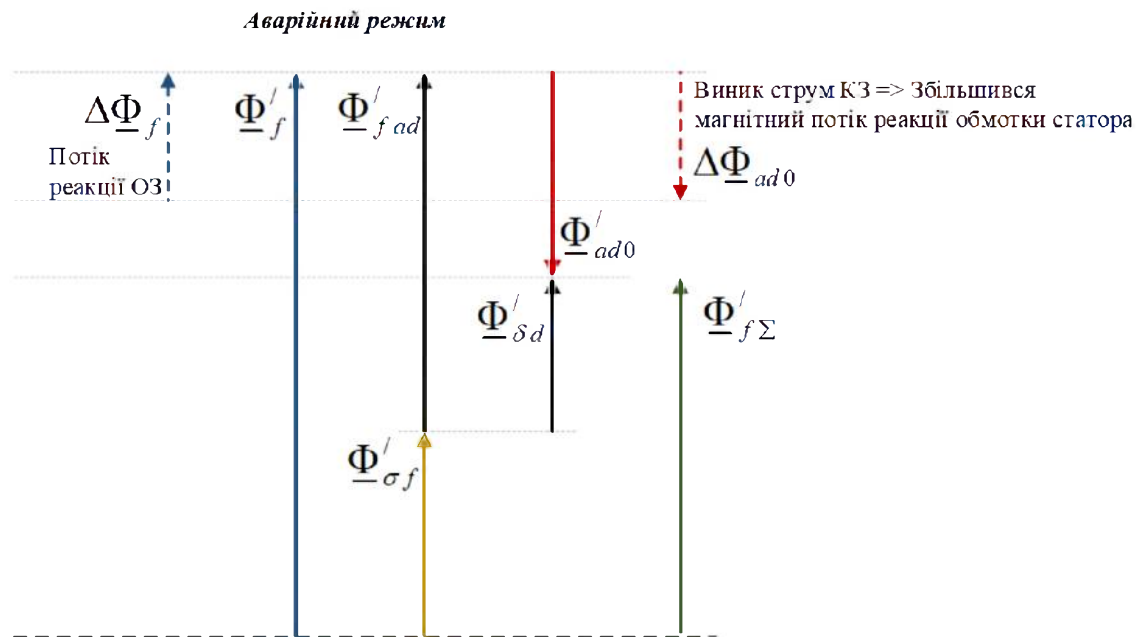
$$\underline{\Phi}'_{ad} = \underline{\Phi}_{ad} + \Delta \underline{\Phi}_{ad}$$

Аналогічно для обмотки збудження

$$\Delta \underline{\Phi}_f + \Delta \underline{\Phi}_{ad} = 0$$

$$\Delta I_d \cdot x_{ad} + \Delta I_f \cdot (x_{\sigma f} + x_{ad}) = 0$$

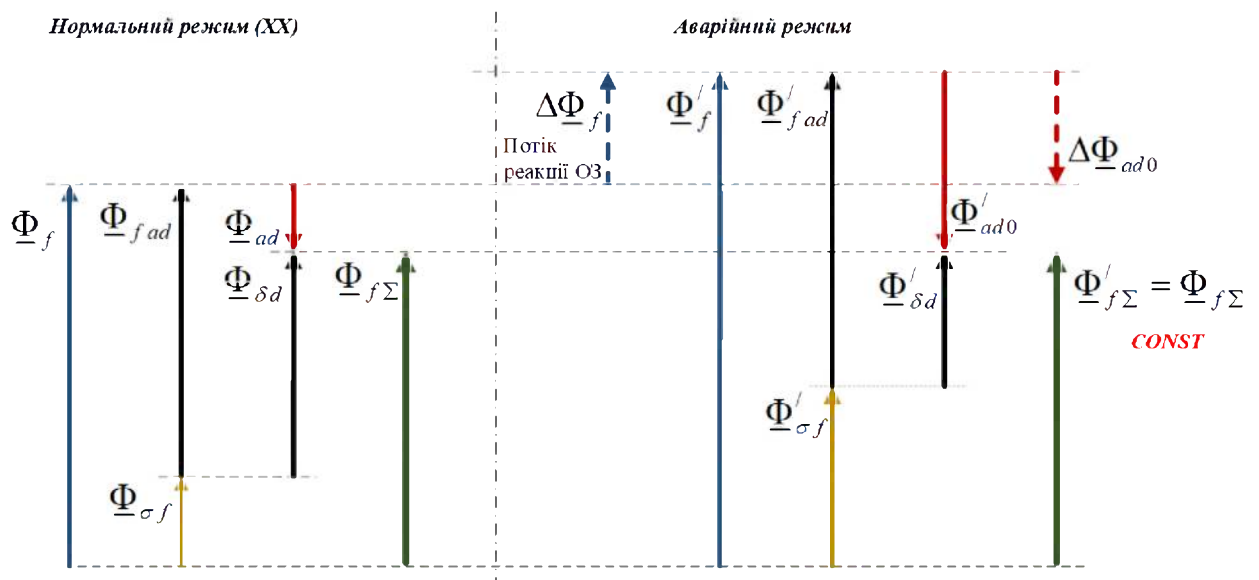
Отже діаграма потоків для аварійного режиму



Зрозуміло, що дає змогу визначити коефіцієнт розсіювання

$$\sigma_f = \frac{\Phi_{\sigma f}}{\Phi_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_f} = \frac{x_{\sigma f}}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \text{const}$$

Пояснення цих процесів з фізичної точки зору краще пояснити за допомогою діаграми потужності



З цієї векторної діаграми очевидно

$$\begin{aligned}\Psi'_d &= (1 - \sigma_f) \cdot \Psi'_{f\Sigma} \\ \underline{\Psi}'_d &= (1 - \sigma_f) \cdot (x_f + x_{ad}) = \\ &= \underline{I}_f \cdot x_{ad} + \underline{I}_d \cdot x_{ad} + \underline{I}_d \cdot \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}}\end{aligned}$$

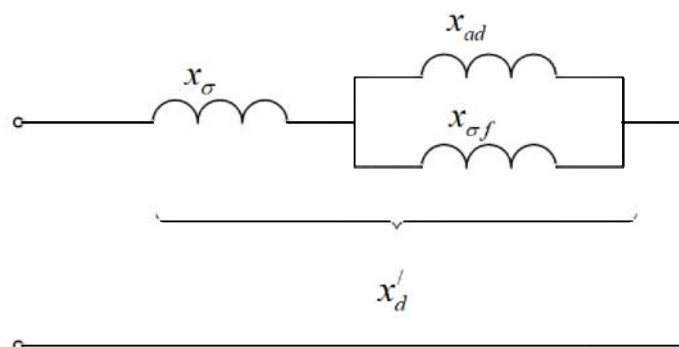
Знання потоків дозволяє визначити електрорушійні сили

$$\begin{aligned}E'_q &= E_q - j I_d \cdot \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} = \\ &= U_q + j I_d \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}} \right) = U_q + j I_d \cdot x'_d \\ E_q &= E'_q + j I_d \cdot (x_d - x'_d)\end{aligned}$$

за значенням поздовжнього перехідного опору

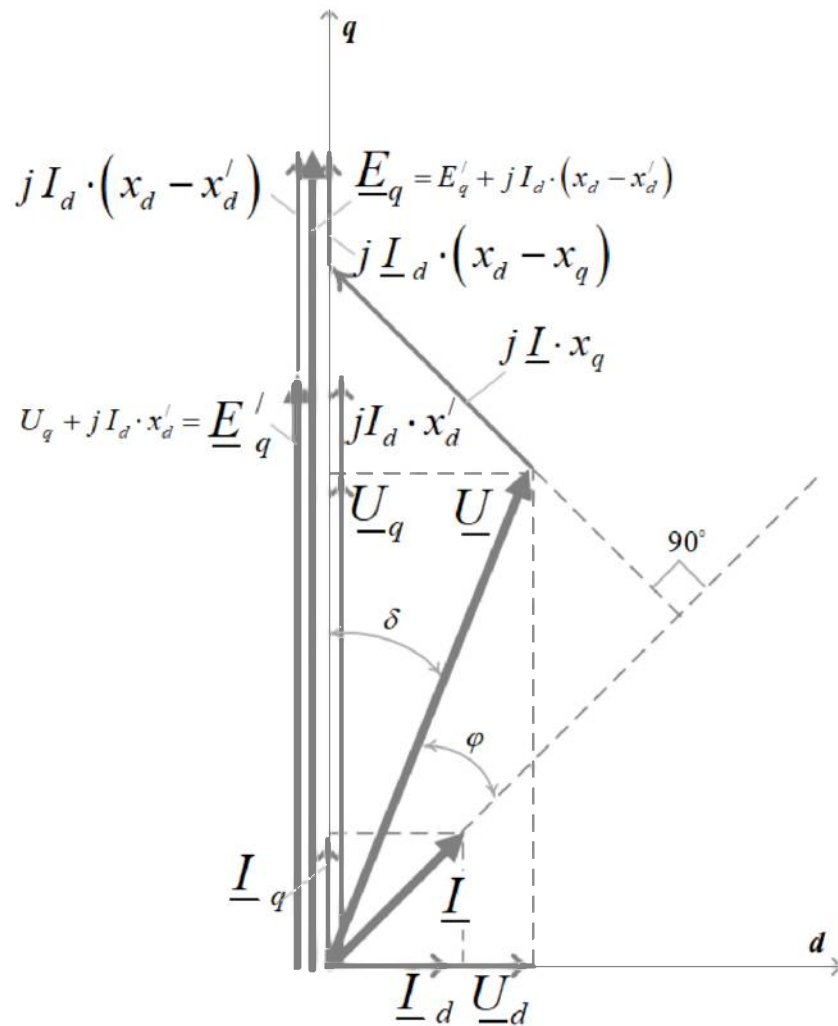
$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma f} + x_{ad}}$$

Цей опір відповідає схемі



$$x'_d = x_\sigma + \frac{x_{\sigma f} \cdot x_{ad}}{x_{\sigma f} + x_{ad}}$$

Векторна діаграма для СМ без ДО дозволяє візуально пояснити зв'язок між напругами та ЕРС



Далі визначається струм:

$$E'_d = 0, \quad x'_q = x_q$$

$$I_d = \frac{E'_q}{x_d + x_{\text{зобн}}}$$

Приходимо до висновку, що наявність демпферної системи спонукає виникнення нової складової в балансі струму

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_f \cdot (x_{\sigma f} + x_{ad}) + \Delta I_{D1} \cdot x_{ad} + \Delta I_d \cdot x_{ad} &= 0 \\ \Delta I_f \cdot x_{ad} + \Delta I_{D1} \cdot (x_{\sigma D1} + x_{ad}) + \Delta I_d \cdot x_{ad} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Рішення очевидно

$$\Delta I_f \cdot x_{\sigma f} = \Delta I_{D1} \cdot x_{\sigma D1}$$

$$\Delta I_f = \frac{\Delta I_{D1} \cdot x_{\sigma D1}}{x_{\sigma f}}$$

$$\Delta I_{D1} = \frac{\Delta I_f \cdot x_{\sigma f}}{x_{\sigma D1}}$$

Вплив демпферної обмотки визначається

$$\Delta I_{fD1} \cdot (x_{\sigma fD1} + x_{ad}) = (\Delta I_f + \Delta I_{D1}) \cdot (x_{\sigma fD1} + x_{ad}) = -\Delta I_d \cdot x_{ad}$$

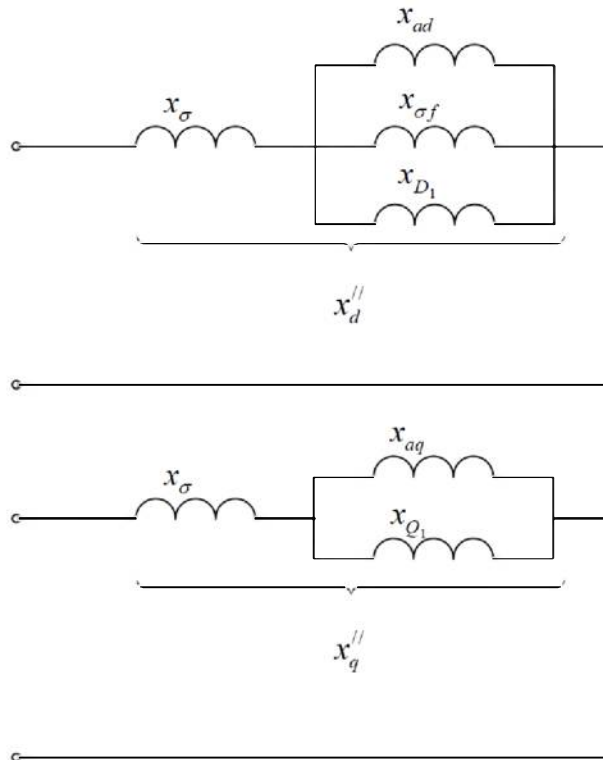
$$x_{\sigma fD1} = \frac{x_{\sigma f} \cdot x_{\sigma D1}}{x_{\sigma f} + x_{\sigma D1}}$$

Ця обмотка змінює вхідний опір електричної машини

$$x_d^{//} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{\sigma fD1} + x_{ad}} = x_{\sigma} + \frac{x_{\sigma fD1} \cdot x_{ad}}{x_{\sigma fD1} + x_{ad}} = x_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma D1}}}$$

$$x_q^{//} = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{\sigma Q1}} = x_{\sigma} + \frac{x_{\sigma Q1}}{x_{\sigma Q1} + x_{aq}}$$

Прийнято для СМ з ДО



Зрозуміло, що вхідна ЕРС

$$\underline{E}_d'' = \underline{U}_d + j \underline{I}_q x_q''$$

$$\underline{E}_q'' = \underline{U}_q + j \underline{I}_d x_d''$$

Векторна діаграма для СМ з ДО дозволяє візуально пояснити зв'язок між напругами та ЕРС

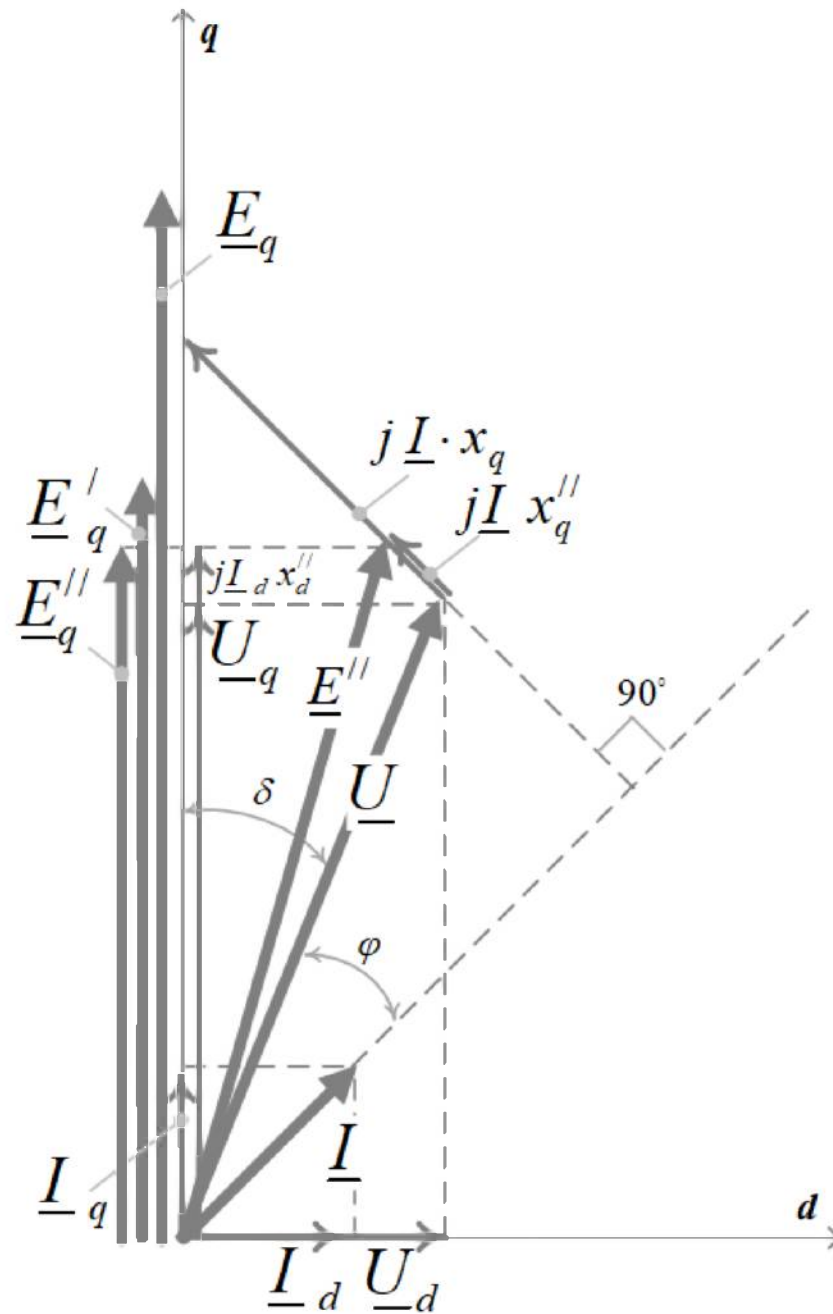


Рисунок 2.23 – Векторна діаграма СМ з ДО

Текст програми для розрахунку ПП в СМ

$$\Phi_1 := \begin{cases} \text{atan}\left(\frac{Q_R}{P_R}\right) & \text{if } P_R > 0.0001 \\ \frac{314 \cdot 159}{2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad P_H := S_G \cdot \cos(\Phi_1)$$

$$\Psi := \text{atan}\left(\frac{\frac{P_R}{P_H} \cdot X_q + U_H \cdot \sin(\Phi_1)}{U_H \cdot \cos(\Phi_1)}\right)$$

$$\delta := \Psi - \Phi_1$$

$$U_q := U_H \cdot \cos(\delta)$$

$$I_q := \frac{P_R}{P_H} \cdot \cos(\Psi) \quad I_d := -\frac{P_R}{P_H} \cdot \sin(\Psi)$$

$$Y := U_q + R_d \cdot I_q$$

$$I_f := \frac{Y - I_d \cdot X_d}{X_{ad}}$$

$$E_f := I_f \cdot R_f$$

$$I_d := \frac{X_q \cdot (U_H \cdot \cos(\delta) - X_{ad} \cdot I_f) + U_H \cdot R_d \cdot \sin(\delta)}{X_q \cdot X_d + R_d \cdot R_q}$$

$$I_q := \frac{R_d \cdot (U_H \cdot \cos(\delta) - X_{ad} \cdot I_f) - U_H \cdot X_d \cdot \sin(\delta)}{X_q \cdot X_d + R_d \cdot R_q}$$

$$M_T := I_q \cdot [I_d \cdot (X_q - X_d) - I_f \cdot X_{ad}]$$

$$S := 0$$

$$\Psi_d := X_d \cdot I_d + X_{ad} \cdot I_f$$

$$\Psi_f := X_{of} \cdot I_f + X_{ad} \cdot (I_f + I_d)$$

$$\Psi_{kd_i} := X_{ad} \cdot (I_f + I_d)$$

$$\Psi_q := X_q \cdot I_q$$

$$\Psi_{kq_j} := X_{aq} \cdot I_q$$

$$Y_0 := \Psi_d$$

$$Y_1 := \Psi_f$$

$$Y_2 := \Psi_{kd_1}$$

$$Y_3 := \Psi_{kd_2}$$

$$Y_4 := \Psi_q$$

$$Y_5 := \Psi_{kq_1}$$

$$Y_6 := \Psi_{kq_2}$$

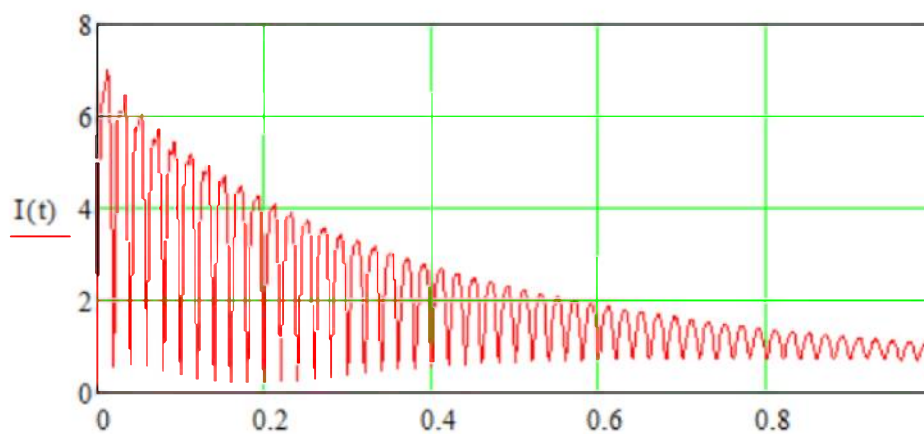
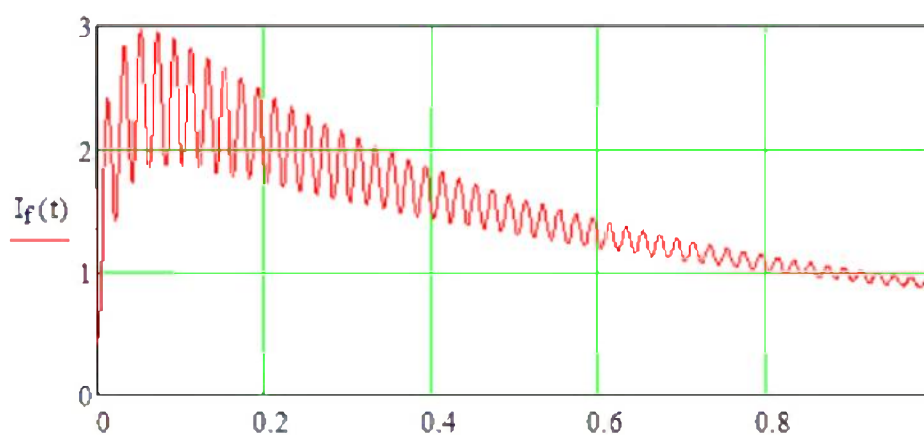
$$Y_7 := S$$

$$Y_8 := \delta$$

$$Y := Y^{(0)} \quad U_H := 0 \quad M_T := 0$$

$$D(t, Y) := \begin{bmatrix} Y_4 \cdot (1 + Y_7) - R_d \cdot i_d(Y) + U_H \cdot \sin(Y_8) \\ U_f - i_f(Y) \cdot R_f \\ -i_{D1}(Y) \cdot R_{kd1} \\ -i_{D2}(Y) \cdot R_{kd2} \\ -Y_0 \cdot (1 + Y_7) - R_d \cdot i_q(Y) + U_H \cdot \cos(Y_8) \\ -i_{Q1}(Y) \cdot R_{kq1} \\ -i_{Q2}(Y) \cdot R_{kq2} \\ \frac{1}{T_j} \cdot [M_T + (Y_0 \cdot i_q(Y) - Y_4 \cdot i_d(Y))] \\ Y_7 \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(Y, 0, \pi \cdot 100, 1000, D) \quad t := 0..1000 \quad k := \frac{1}{10 \cdot 100}$$



РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЗАХИСТУ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Розглянемо випадок практичних розрахунків струмів КЗ, коли:

$$x_d'' < x_d' < x_d$$

$$x_d'' < x_q''$$

Якщо стоїть задача визначення струму для СМ без ДО, то

$$I_{d(0)}' = \frac{E_{q(0)}'}{x_d' + x_{\text{ЗОВН}}} \quad I_{q(0)}' = 0$$

А для СМ з ДО:

$$I_{d(0)}'' = \frac{E_{q(0)}''}{x_d'' + x_{\text{ЗОВН}}}$$

$$I_{q(0)}'' = \frac{E_{d(0)}''}{x_q'' + x_{\text{ЗОВН}}}$$

$$I_{(0)}'' = \sqrt{(I_{d(0)}'')^2 + (I_{q(0)}'')^2}$$

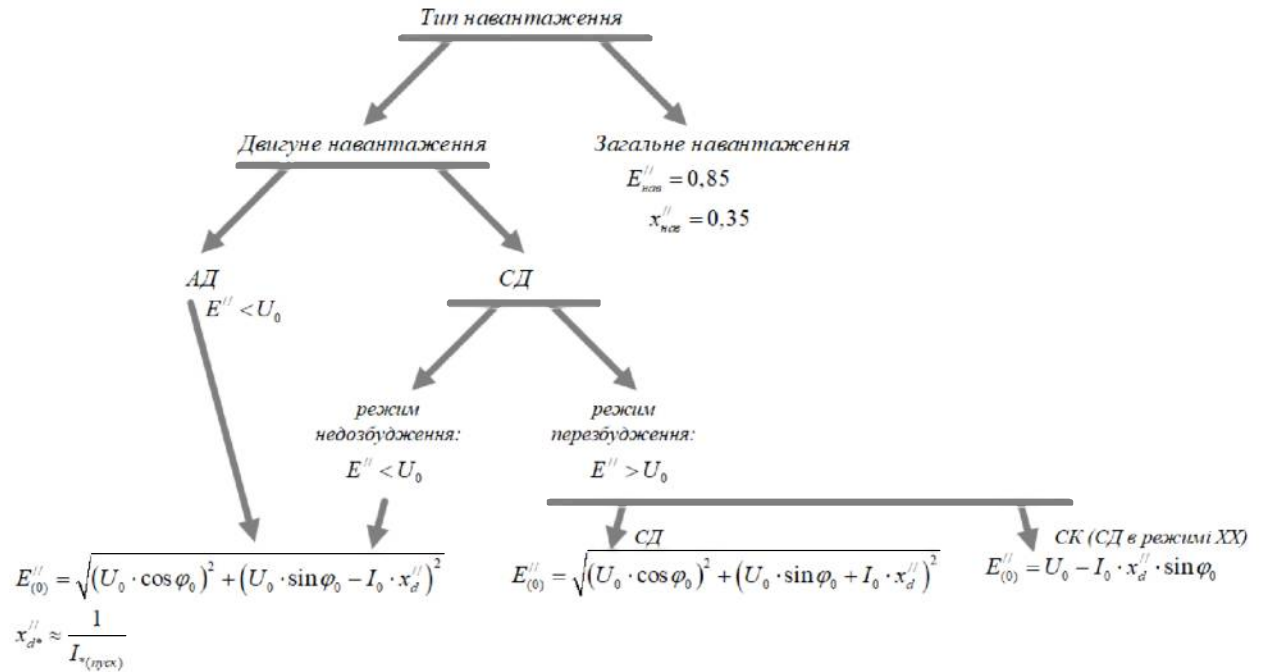
$$E'' = \sqrt{(E_d'')^2 + (E_q'')^2}$$

$$E_{\approx}'' = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi)^2 + (U \cdot \sin \varphi + I \cdot x_d'')^2}$$

Міркуємо таким чином

$$I_{(0)}'' = \frac{E_{\approx}''}{x_d'' + x_{\text{ЗОВН}}}$$

Для навантаження:



Наступні етапи розрахунків:

$$I''_{\text{пер}(0)i} = \sum_{i=1}^n \frac{E''_{(0)i}}{x''_i}$$

$$i''_{\text{анер}(0)i} = \sqrt{2} \cdot I''_{\text{пер}(0)i}$$

$$I''_{\text{пер}(t)i} = \gamma \cdot I''_{\text{пер}(0)i}$$

$$i''_{\text{анер}(t)i} = i''_{\text{анер}(0)i} \cdot e^{-t/T_{\text{анер}i}} = \sqrt{2} \cdot I''_{\text{пер}(0)i} \cdot e^{-t/T_{\text{анер}i}}$$

$$i_{\gamma\partial i} = \sqrt{2} \cdot I''_{\text{пер}(0)i} \cdot k_{\gamma\partial} = \sqrt{2} \cdot I''_{\text{пер}(0)i} \cdot \left(1 + e^{-0,01/T_{\text{анер}i}}\right)$$

В Mathcad програма розрахунку електромеханічних перехідних процесів має місце

$$U_{B.2} := \frac{U_{B.3}}{\frac{U_{H.HOM.T2}}{U_{B.HOM.T2}}} = \frac{115}{\frac{115}{229}} = 229 \text{ кВ}$$

$$U_{B.1} := \frac{U_{B.2}}{\frac{U_{B.HOM.T1}}{U_{H.HOM.T1}}} = \frac{229}{\frac{240}{20}} = 19.083 \text{ кВ}$$

$$X_d := X_{d.HOM} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM.G1}} \cdot \left(\frac{U_{HOM.G1}}{U_{B.1}} \right)^2 = 2.18 \cdot \frac{235}{235} \cdot \left(\frac{20}{19.083} \right)^2 = 2.395$$

$$X_q := X_{q.HOM} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM.G1}} \cdot \left(\frac{U_{HOM.G1}}{U_{B.1}} \right)^2 = 1.50 \cdot \frac{235}{235} \cdot \left(\frac{20}{19.083} \right)^2 = 1.648$$

$$X'_d := X'_{d.HOM} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM.G1}} \cdot \left(\frac{U_{HOM.G1}}{U_{B.1}} \right)^2 = 0.29 \cdot \frac{235}{235} \cdot \left(\frac{20}{19.083} \right)^2 = 0.319$$

$$X_{T1} := \frac{U_{K.T1}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM.T1}} \cdot \left(\frac{U_{B.HOM.T1}}{U_{B.2}} \right)^2 = \frac{11.4}{100} \cdot \frac{235}{250} \cdot \left(\frac{240}{229} \right)^2 = 0.118$$

$$X_{T2} := \frac{U_{K.T2}}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{HOM.T2}} \cdot \left(\frac{U_{B.HOM.T2}}{U_{B.2}} \right)^2 = \frac{11.7}{100} \cdot \frac{235}{250} \cdot \left(\frac{229}{229} \right)^2 = 0.11$$

$$X_{BЛ} := \frac{1}{2} \cdot X_0 \cdot L_{BЛ} \cdot \frac{S_B}{U_{B.2}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0.4 \cdot 95 \cdot \frac{235}{229^2} = 0.085$$

$$X_{BH} := X_{T1} + X_{BЛ} + X_{T2} = 0.118 + 0.085 + 0.110 = 0.313$$

$$X_{d_} := X_d + X_{BH} = 2.395 + 0.313 = 2.708$$

$$E_{q.HЯ} := \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X_{d_}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{d_}}{U_c} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0.433 \cdot 2.708}{1} \right)^2 + \left(\frac{0.894 \cdot 2.708}{1} \right)^2} = 3.253$$

$$\delta_0 := \text{atan} \left[\frac{(P_0 \cdot X_{d_})}{(U_c^2 + Q_0 \cdot X_{d_})} \right] = \text{atan} \left(\frac{0.894 \cdot 2.708}{1^2 + 0.433 \cdot 2.708} \right) = 48.1 \text{ градусів}$$

$$P_{ПР.HЯ} := \frac{E_{q.HЯ} \cdot U_c}{X_{d_}} = \frac{3.253 \cdot 1}{2.708} = 1.201$$

$$K_{P.HЯ} := \frac{P_{ПР.HЯ} - P_0}{P_0} \cdot 100 = \frac{1.201 - 0.894}{0.894} \cdot 100 = 34.3 \%$$

$$X_{q_} := X_q + X_{BH} = 1.648 + 0.313 = 1.961$$

$$E_Q := \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X_{q_}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{q_}}{U_c} \right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0.433 \cdot 1.961}{1} \right)^2 + \left(\frac{0.894 \cdot 1.961}{1} \right)^2} = 2.548$$

$$\delta_0 := \text{atan} \left[\frac{(P_0 \cdot X_{q_})}{(U_c^2 + Q_0 \cdot X_{q_})} \right] = \text{atan} \left(\frac{0.894 \cdot 1.961}{1^2 + 0.433 \cdot 1.961} \right) = 43.5$$

$$E_{q.Я} := E_{q.HЯ} \cdot \cos(\delta - \delta_0) = 3.253 \cdot \cos(48.1 - 43.5) = 3.240$$

$$\delta_{\Gamma\Gamma} := \arccos(\delta_1) \quad \delta_{\Gamma\Gamma} = 83.4$$

$$\begin{aligned} P_{\Gamma\Gamma\text{Я}} &:= \frac{E_q \cdot \text{Я} \cdot U_c}{X_{d_}} \cdot \sin(\delta_{\Gamma\Gamma}) + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{X_{d_} - X_{q_}}{X_{d_} \cdot X_{q_}} \cdot \sin(2 \cdot \delta_{\Gamma\Gamma}) = \\ &= \frac{3.240 \cdot 1}{2.708} \cdot \sin(\delta_{\Gamma\Gamma}) + \frac{1^2}{2} \cdot \frac{2.708 - 1.961}{2.708 \cdot 1.961} \cdot \sin(2 \cdot \delta_{\Gamma\Gamma}) = 1.205 \end{aligned}$$

$$K_{P\text{Я}} := \frac{P_{\Gamma\Gamma\text{Я}} - P_0}{P_0} \cdot 100 = \frac{1.205 - 0.894}{0.894} \cdot 100 = 34.8 \quad \%$$

$$X'_{d_} := X'_{d'} + X_{BH} = 0.319 + 0.313 = 0.632$$

$$E' := \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X'_{d_}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X'_{d_}}{U_c}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0.433 \cdot 0.632}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.894 \cdot 0.632}{1}\right)^2} = 1.393$$

$$\delta' := \arctan\left[\frac{(P_0 \cdot X'_{d_})}{(U_c^2 + Q_0 \cdot X'_{d_})}\right] = \arctan\left(\frac{0.894 \cdot 0.632}{1^2 + 0.433 \cdot 0.632}\right) = 23.9$$

$$E'_q := E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta') = 1.393 \cdot \cos(43.5 - 23.9) = 1.312$$

$$\begin{aligned} \delta_{\Gamma\Gamma_AP3_н.т.} &:= \arccos(\delta_{1_AP3_н.т.}) \\ \delta_{\Gamma\Gamma_AP3_н.т.} &= 111.9 \end{aligned}$$

$$P_{\Gamma\Gamma_Eq} := \frac{E'_q \cdot U_c}{X'_{d_}} \cdot \sin(\delta_{\Gamma\Gamma_AP3_н.т.}) + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{X'_{d_} - X_{q_}}{X'_{d_} \cdot X_{q_}} \cdot \sin(2 \cdot \delta_{\Gamma\Gamma_AP3_н.т.}) =$$

$$= \frac{1.312 \cdot 1}{0.632} \cdot \sin(\delta_{\Gamma\Gamma_AP3_н.т.}) + \frac{1^2}{2} \cdot \frac{0.632 - 1.961}{0.632 \cdot 1.961} \cdot \sin(2 \cdot \delta_{\Gamma\Gamma_AP3_н.т.}) = 2.297$$

$$K_{P_Eq} := \frac{P_{\Gamma\Gamma_Eq} - P_0}{P_0} \cdot 100 = \frac{2.297 - 0.894}{0.894} \cdot 100 = 156.9 \quad \%$$

$$U_G := \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_0 \cdot X_{BH}}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot X_{BH}}{U_c}\right)^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{0.433 \cdot 0.313}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.894 \cdot 0.313}{1}\right)^2} = 1.169$$

$$\delta_c := \arctan\left[\frac{(P_0 \cdot X_{BH})}{(U_c^2 + Q_0 \cdot X_{BH})}\right] = \arctan\left(\frac{0.894 \cdot 0.313}{1^2 + 0.433 \cdot 0.313}\right) = 13.8 \quad +$$

$$U_{qG} := U_G \cdot \cos(\delta_0 - \delta_c) = 1.169 \cdot \cos(43.5 - 13.8) = 1.016$$

$$\delta_{\text{ПР_АПЗ_с.д.}} := \arccos(\delta_{1_АПЗ_с.д.}) \quad \delta_{\text{ПР_АПЗ_с.д.}} = 117.8$$

$$\begin{aligned} P_{\text{Ug}} &:= \frac{U_{qG} \cdot U_c}{X_{\text{BH}}} \cdot \sin(\delta_{\text{ПР_АПЗ_с.д.}}) + \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{-X_q}{X_{\text{BH}} \cdot X_{qL}} \cdot \sin(2 \cdot \delta_{\text{ПР_АПЗ_с.д.}}) = \\ &= \frac{1.016 \cdot 1}{0.313} \cdot \sin(117.8) + \frac{1^2}{2} \cdot \frac{-1.648}{0.313 \cdot 1.961} \cdot \sin(2 \cdot 117.8) = 3.979 \end{aligned}$$

$$K_{\text{P.Ug}} := \frac{P_{\text{Ug}} - P_0}{P_0} \cdot 100 = \frac{3.979 - 0.894}{0.894} \cdot 100 = 345.1 \quad \%$$

А от для сталого режиму

$$\left. \begin{array}{l} i_q, i_d, i_f = \text{const} \\ i_{D_i}, i_{Q_j}, i_0 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d\Psi}{dt} = 0$$

Зазначимо, що система рівнянь стане:

$$\left. \begin{array}{l} u_d = -\Psi_q - r \cdot i_d \\ u_q = \Psi_d - r \cdot i_q \\ u_f = r \cdot i_f \end{array} \right\}$$

Зауважимо, що потокозчеплення

$$\left. \begin{array}{l} \Psi_d = x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \approx x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f \\ \Psi_q = x_q \cdot i_q + \sum_{j=1}^m x_{aq} \cdot i_{Q_j} \approx x_q \cdot i_q \\ \Psi_f = x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f + \sum_{i=1}^n x_{ad} \cdot i_{D_i} \approx x_{ad} \cdot i_d + x_f \cdot i_f \end{array} \right\}$$

Важливо підкреслити, що система рівнянь прийме вид

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\Psi_q - r \cdot i_d = -x_q \cdot i_q - r \cdot i_d \\ u_q &= \Psi_d - r \cdot i_q = x_d \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_f - r \cdot i_q \\ u_f &= r \cdot i_f \end{aligned} \right\}$$

З урахуванням напрямку осей

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}_d &= -x_q \cdot \underline{i}_q - r \cdot \underline{i}_d \\ \underline{u}_q &= -x_d \cdot \underline{i}_d + \underbrace{x_{ad} \cdot \underline{i}_f}_{\underline{E}_q} - r \cdot \underline{i}_q \\ \underline{u}_f &= r \cdot \underline{i}_f \end{aligned} \right\}$$

Зрозуміло, що струм збудження $\underline{i}_f$ обумовлює наступну ЕРС

$$\underline{E}_q = \underline{u}_q + x_d \cdot \underline{i}_d + r \cdot \underline{i}_q$$

Покажемо, що рішенням отримується шляхом виконання наступних перетворень:

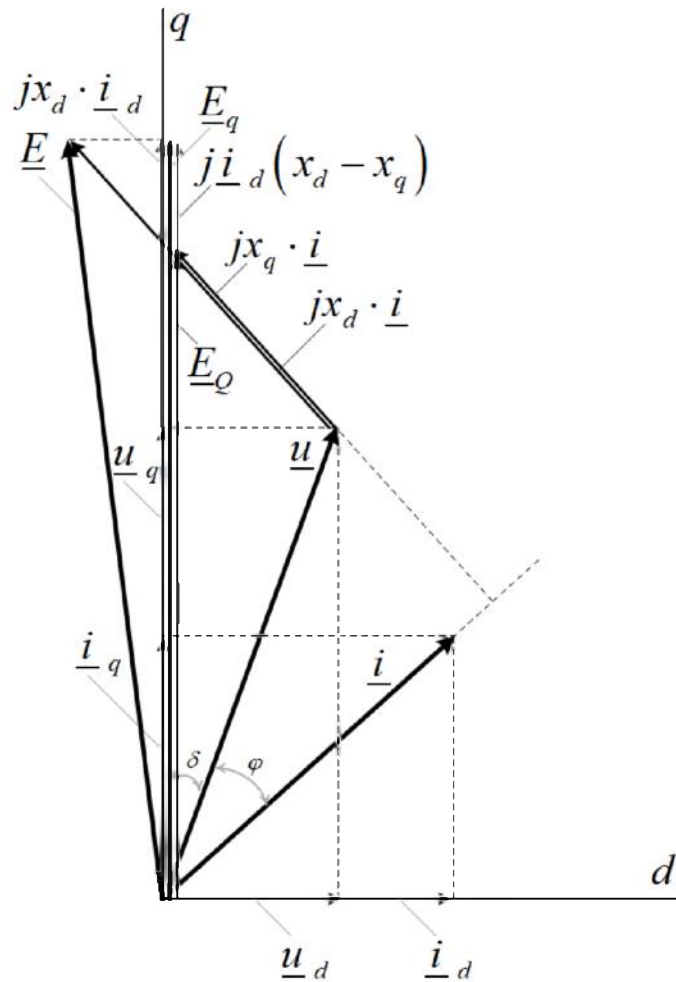
$$\underline{u}_d + j\underline{u}_q = -x_q \cdot \underline{i}_q - r \cdot \underline{i}_d + j(-x_d \cdot \underline{i}_d + \underline{E}_q - r \cdot \underline{i}_q)$$

$$\underline{u} = j\underline{E}_q - r \cdot (\underline{i}_d + j \underline{i}_q) - x_q \cdot \underline{i}_q - jx_d \cdot \underline{i}_d$$

$$\underline{u} = j\underline{E}_q - r \cdot \underline{i} - x_q \cdot \underline{i}_q - jx_d \cdot \underline{i}_d$$

$$j\underline{E}_q = \underline{u} + \underbrace{r \cdot \underline{i} + x_q \cdot \underline{i}_q}_{\underline{E}_Q} + jx_d \cdot \underline{i}_d$$

Отже ВД буде мати вид



З ВД справді

$$\left. \begin{aligned} x_d \neq x_q &\Rightarrow \underline{E}_q = \underline{E}_Q + j\underline{i}(x_d - x_q) \\ x_d = x_q &\Rightarrow \underline{E}_q = \underline{E}_Q \end{aligned} \right\}$$

Отже задача визначення параметрів СМ розглянута.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

У розділі розглянуті системи засобів і заходів безпечної експлуатації електроустановок. Безпечна експлуатація електроустановок забезпечується: конструкцією електроустановок; технічними способами та засобами захисту; організаційними та технічними заходами, класифікація яких представлена на рис. 4.1.

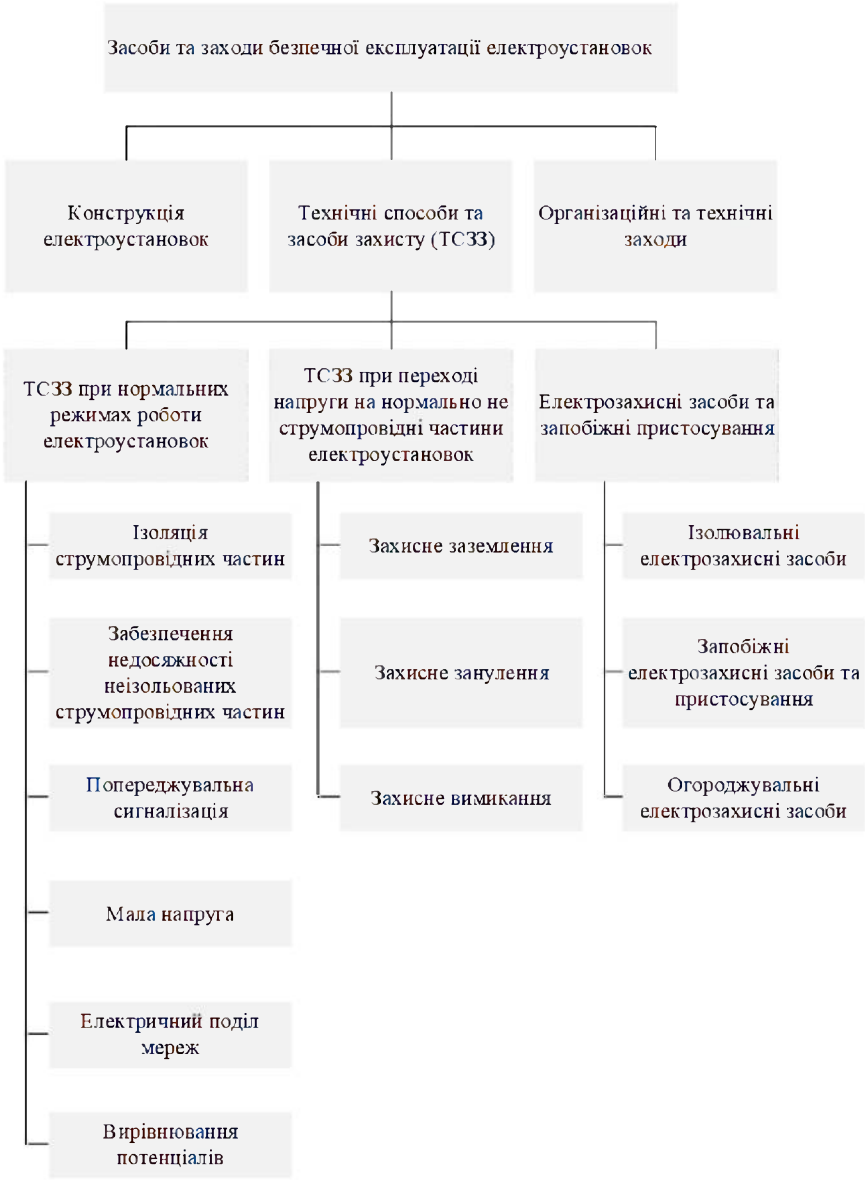


Рисунок 4.1 – Класифікація засобів та заходів безпечної експлуатації електроустановок

Роздивимося технічні способи та засоби захисту при нормальних режимах роботи електроустановок.

По-перше, ізоляція струмопровідних частин забезпечується шляхом покриття їх шаром діелектрика для захисту людини від випадкового доторкання до частин електроустановок, через які проходить струм. Розрізняють робочу, додаткову, подвійну та посилену ізоляцію. Робочою називається ізоляція струмопровідних частин електроустановки, яка забезпечує її нормальну роботу та захист від ураження струмом. Додатковою називається ізоляція, яка застосовується додатково до робочої і у випадку її пошкодження забезпечує захист людини від ураження струмом. Подвійною називається ізоляція, яка складається з робочої та додаткової. Посиленою називається покращена робоча ізоляція. Механічні пошкодження, волога, перегрівання, хімічні впливи зменшують захисні властивості ізоляції. Навіть у нормальних умовах ізоляція поступово втрачає свої початкові властивості, «старіє». Тому необхідно систематично проводити профілактичні огляди та випробовування ізоляції. У приміщеннях з підвищеною небезпекою та в особливо небезпечних, відповідно не рідше одного разу в два роки та в півріччя, перевіряють шляхом вимірювання відповідність опору ізоляції до норм. Для електромереж напругою до 1000 В опір ізоляції струмопровідних частин повинен бути не меншим ніж 0,5 МОм.

Забезпечення недосяжності неізольованих струмопровідних частин передбачає застосування захисних огорож, блокувальних пристроїв та розташування неізольованих струмопровідних частин на недосяжній висоті чи в недосяжному місці. Захисні огорожі можуть бути суцільними та сітчастими. Блокувальні пристрої за принципом дії поділяються на механічні, електричні та електронні. Вони забезпечують зняття напруги із струмопровідних частин при відкриванні огорожі та спробі проникнути в небезпечну зону.

Розташування неізолюваних струмопровідних частин на недосяжній висоті чи у недосяжному місці забезпечує безпеку без захисних огорож та блокувальних пристроїв. Вибираючи необхідну висоту підвісу проводів під напругою враховують можливість випадкового доторкання до них довгих струмопровідних елементів, інструменту чи транспорту.

Попереджувальна сигналізація є пасивним засобом захисту, який не усуває небезпеки ураження, а лише інформує про її наявність. Така сигналізація може бути світловою та звуковою

Мала напруга застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. До малих напруг належать номінальні напруги, що не перевищують 42 В. При таких напругах струм, що може пройти через тіло людини є дуже малим і вважається відносно безпечним. Однак, гарантувати абсолютної безпеки неможливо, тому поряд з малою напругою використовують й інші способи та засоби захисту. Отже, застосування малих напруг суттєво зменшує небезпеку ураження електричним струмом, однак при цьому зростає значення робочого струму, а відтак і площа поперечного перерізу, що в свою чергу збільшує витрати кольорових металів (міді, алюмінію). Крім того, при малих напругах істотно зростають втрати електроенергії в мережі, що обмежує її протяжність. У силу вищеназваних обставин малі напруги мають обмежене використання.

Вирівнювання потенціалів є способом зниження напруги доторкання та кроку між точками електричного кола, до яких можливе одночасне доторкання людини, або на яких вона може одночасно стояти. Вирівнювання потенціалів досягається шляхом штучного підвищення потенціалу опорної поверхні ніг до рівня потенціалу струмопровідної частини, а також при контурному заземленні.

Вертикальні заземлювачі в контурному заземленні розміщуються як по контуру, так і всередині зони захисту і з'єднуються сталевими полосами.

При замиканні струмопровідних частин на корпус, що приєднаний до такого контурного заземлення ділянки землі всередині контуру набувають високих потенціалів, які наближаються до потенціалу заземлювачів. Завдяки цьому максимальні напруги доторкання та кроку знижуються до допустимих значень.

Електричний поділ мережі передбачає поділ електромережі на окремі, електрично не з'єднані між собою, ділянки за допомогою роздільних трансформаторів з коефіцієнтом трансформації 1:1. Якщо єдину, сильно розгалужену мережу з великою ємністю та малим опором ізоляції, поділити на низку невеликих мереж такої ж напруги, які мають незначну ємність та високий опір ізоляції, то при цьому різко зменшується небезпека ураження людини струмом.

ВИСНОВКИ

Система електропостачання включає багато різних елементів. Головний елемент – це генератор, та його система захисту.

Перехідний процес в електричних генераторах – це процес, при якому порушується робота синхронного генератора і змінюються результуючі параметри. Вивчення цього процесу є важливим. Задачею вивчення є дослідження взаємозв'язків між різними потужностями та моментами генератора. В цьому процесі кут потужності є важливим параметром, так як відображає перетворення енергії в генераторі. Зміна кута потужності призведе до зміни активної та реактивної потужності генерації. Діаграма робочої потужності генератора відображає залежність між активною та реактивною потужністю генератора за умови номінальної напруги і температури охолоджуючого середовища.

Найбільшу увагу приділяють дослідженню стаціонарних та динамічних моделей синхронних генераторів. Всі дослідження націлені на визначення виду процесів, що протікають в найбільш відповідальному елементі енергетичної системи – генераторі. Тобто це має велике практичне значення, дозволяє правильно розуміти ці процеси, і зауважимо, що дозволяє передбачати характер можливих аварій, швидко прибрати їх наслідки.

Були розглянуті основи теорії перехідних процесів в синхронних машинах. Розглянуті їх диференційні рівняння. Показані етапи розрахунку перехідних процесів в залежності від типу машини та її конструктивного виконання. Показаний розрахунок електромеханічних перехідних процесів. Отже поставлена мета роботи була виконана.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Khan A. J. Verification of short circuit test results of salient poles synchronous generator / A. J. Khan, A. Khattak // International journal of science and research. 2016. – v. 5, iss. 1, pp. 1901 – 1906.
2. Li J. Design and application of modern synchronous generator excitation systems. 2019.
3. K. Lin. Control strategy for inverter parallel and parallel with synchronous generator based on virtual synchronous generator theory / K. Lin, F. Xiao, G. Jie, C. Hou, R. Wang // 36th Chinese Control Conference. 2017.
4. Abuagreb M. Evaluation of virtual synchronous generator compared to synchronous generator / M. Abuagreb, B. Ajao, H. Herbert, B. K. Johnson // IEEE Power & energy society innovative smart grid technologies conference (ISGT). 2020.
5. Zhang K. Left-inversion soft-sensor of synchronous generator / K. Zhang, X. Dai, C. Huang // International transactions on electrical energy systems. 2013. – v. 23, iss. 1, pp. 48-61.
6. Fan L. Synchronous generator models. 2017.
7. Li W. Digital generator control unit design for a variable frequency synchronous Generator in MEA / W. Li, Y. Yang, X. Zhang // Energies. 2018. – v. 11 iss. 1, p. 96.
8. Ling Y. Flexible generator: synchronous generator enhanced by energy storage system / Y. Ling, J. Xiang, Y. Li / Chinese automation congress (CAC). 2019.
9. Okoro O. I. Simulating a wind energy synchronous generator with skin-effect / O. I. Okoro, E. Chikuni // AFRICON. 2007.
10. Gozdowiak A. Faulty synchronization of salient pole synchronous hydro generator / A. Gozdowiak // Energies. 2020. – v. 13, iss. 20 p. 5491.