

Змістовий модуль 5. Трифазні електричні кола.

Тема № 5. Трифазні електричні кола.

План лекції

1. Принцип побудови трифазної системи.
2. Трипровідна та чотирипровідна схеми з'єднання трифазної системи «зіркою».
3. З'єднання трифазної системи «трикутником».
4. Потужність трифазної системи.

1. Принцип побудови трифазної системи

Об'єднання в одній лінії електропередачі декількох ланцюгів змінного струму з незалежними джерелами електроенергії називається *багатофазною системою*. Найбільше поширення одержала *трифазна система*, яка була винайдена й розроблена у всіх деталях, включаючи генератор трифазного змінного струму, трифазний трансформатор і асинхронний двигун, М. О. Доливо-Добровольским в 1889-1891 рр. Завдяки своїм перевагам винахід привернув увагу інженерів і промисловців усього світу; трифазна система швидко зайняла провідне положення у світовій електротехніці й зберігає його дотепер.

Трифазною системою змінного струму називається сукупність трьох однофазних змінних ЕРС (струмів) однакової частоти й амплітуди, зрушених одна відносно іншої по фазі на $1/3$ періоду (120°). Кожна з ЕРС (струмів) перебуває у своїй фазі періодичного процесу, тому часто називається просто «фазою». Також «фазами» називають провідники – носії цих струмів.

Причини широкого розповсюдження трифазних систем:

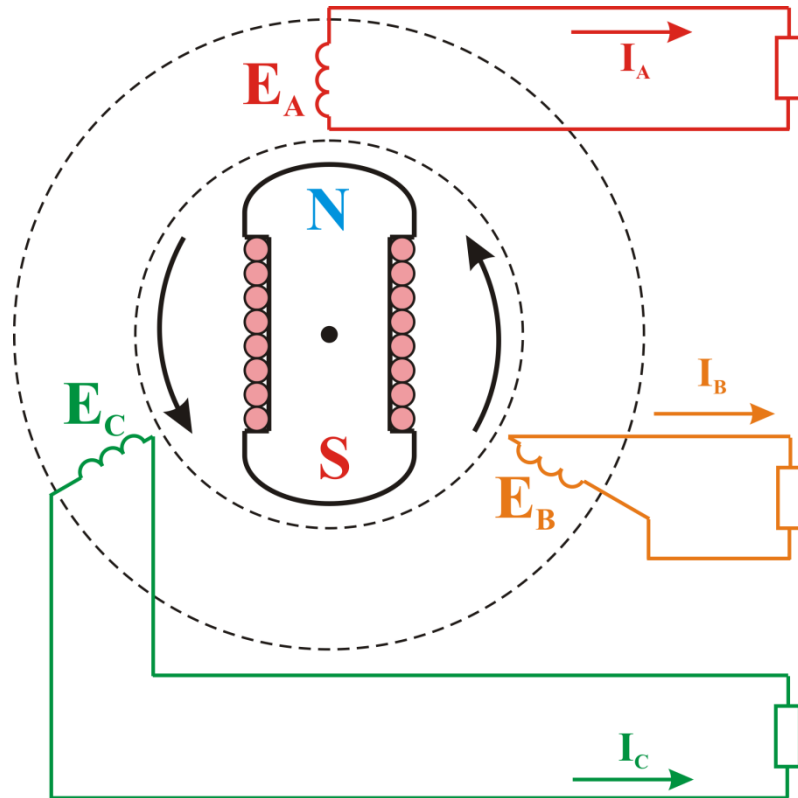
1. Значна економія металу проводів порівняно з трьома однофазними лініями.
2. Низькі вартість, маса і висока економічність трифазного генератора порівняно з трьома однофазними.
3. Можливість отримання обертового магнітного поля трьома нерухомими котушками.

Для того щоб з'ясувати, як одержують трифазний змінний струм, коротко розглянемо устрій трифазного генератора (більш докладно воно буде розглянуто нижче у темі 9.2). Трифазний генератор складається із трьох однакових ізольованих друг від друга обмоток, розташованих на статорі й рознесених у просторі на 120° . У центрі статора обертається електромагніт (мал. 1).

При цьому форма магніту така, що магнітний потік, що пронизує кожну котушку, змінюється по косінусоїдальному закону.

Через те, що котушка В зміщена відносно котушки А на 120° , то така сама ЕРС, яка створюється у котушці А в момент часу t , в котушці В створюватиметься тоді, коли вона повернеться на 120° і займе місце котушки А. Тобто ЕРС у фазі В відстає від ЕРС у фазі А на 120° .

З тієї ж причини, ЕРС у фазі С відстає від ЕРС у фазі А на 240° .



Мал. 1. Принцип одержання трифазної ЕРС

Отже, за законом електромагнітної індукції в котушках будуть індуковані ЕРС рівної амплітуди й частоти, що відрізняються одна від одної по фазі на 120° :

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (1)$$

Ці три ЕРС можна зобразити на часовій (мал. 2) і векторній (мал. 3) діаграмах.

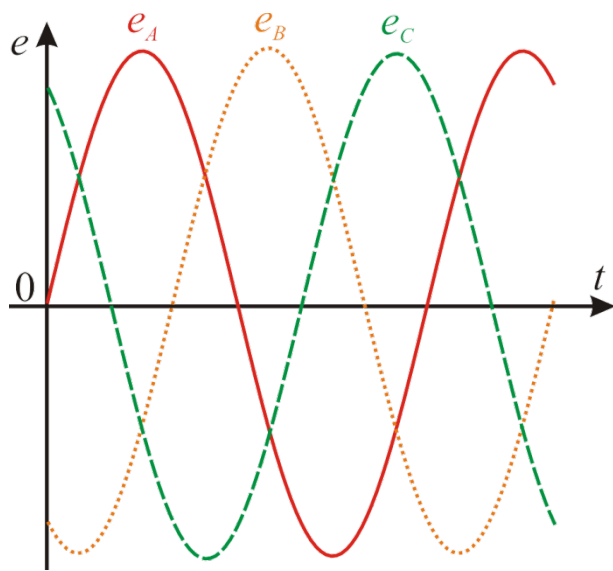
Як видно з векторної діаграми, сума цих ЕРС дорівнює нулю.

Якщо в трифазній системі діють електрорушійні сили, рівні по величині й зрушені по фазі на 120° , а повні опори навантажень усіх трьох фаз як по

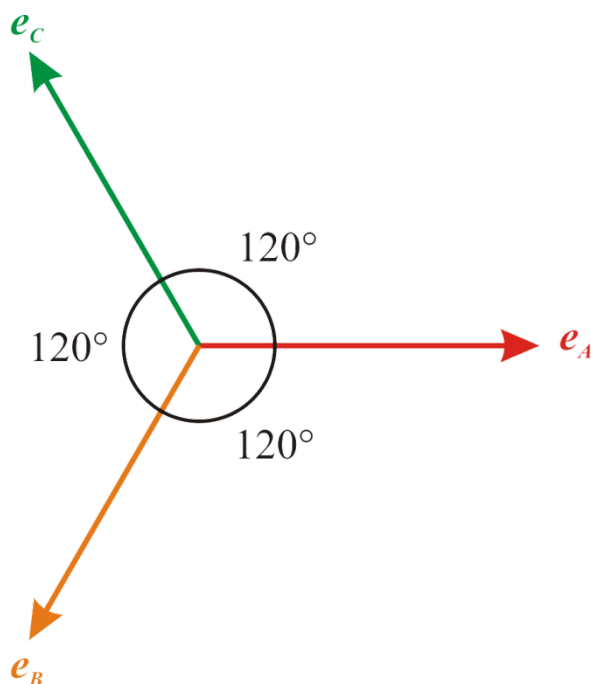
величині, так і по характеру (по величині й знаку фазового зрушення) однакові, то режим у ній називається **симетричним**. Невиконання однієї із цих умов або обох є причиною **несиметричного** режиму.

Щоб утворювати із цих незалежних однофазних систем єдину трифазну, необхідно певним чином електрично з'єднати окремі обмотки.

Існують два основні способи з'єднання: **зіркою** й **трикутником**.



Мал. 2. Часова діаграма трифазної ЕРС



Мал. 3. Векторна діаграма трифазної ЕРС

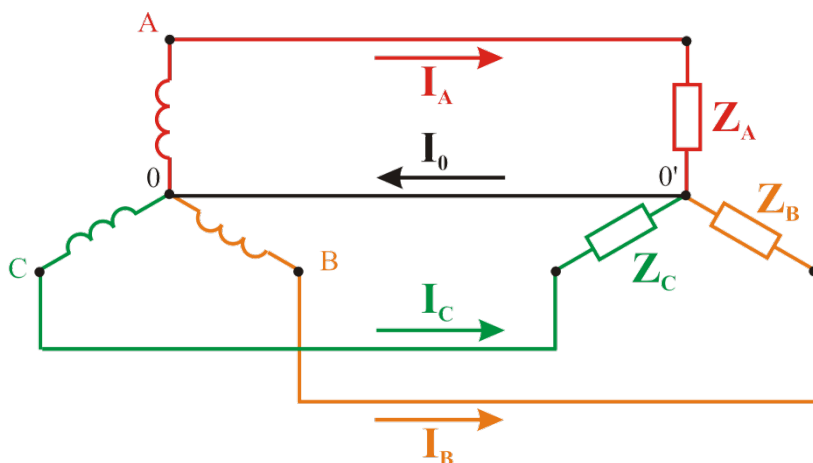
2. Трипровідна та чотирипровідна схеми з'єднання трифазної системи «зіркою».

Окремі фази трифазної системи прийнято позначати латинськими буквами А, В і С. Цими ж буквами позначають початки обмоток генератора. Кінці обмоток позначають буквами Х, Y і Z.

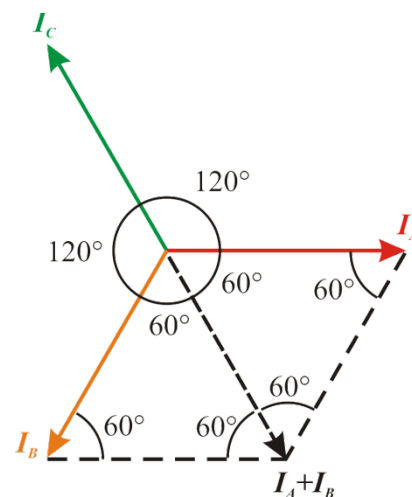
Умовимося, що позитивно спрямований струм виходить із обмотки генератора через її початок і входить у неї через її кінець (див. мал. 1). Якщо всі кінці обмоток генератора з'єднати в одній точці O , а до їхніх початків приєднати проводи, що йдуть до приймачів електричної енергії (у яких кінці також з'єднані в загальній точці O'), то ми одержимо з'єднання зіркою (мал. 4, б).

Проводи, що з'єднують початки обмоток генератора із приймачами електроенергії, називаються **лінійними**.

У ланцюгах трифазного струму незалежно від способу з'єднання розрізняють два типи напруг - лінійні U_L й фазні U_ϕ - і два типи струмів - лінійні I_L й фазні I_ϕ . Напруга між двома лінійними проводами називається **лінійною**, а між лінійним і нульовим проводом - **фазною**. Струми, що протікають у лінійних проводах, називаються **лінійними**, а в навантаженнях фаз - **фазними**.



Мал. 4. Чотирипровідна трифазна схема з'єднання зіркою



Мал. 5. Векторна діаграма струмів

Ми бачимо, що контури, по яких замикаються фазні струми, при такому з'єднанні не зміняться в порівнянні з мал. 1. Отже, по загальному зворотному проводу буде протікати струм, що дорівнює сумі струмів трьох фаз:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C \quad (2)$$

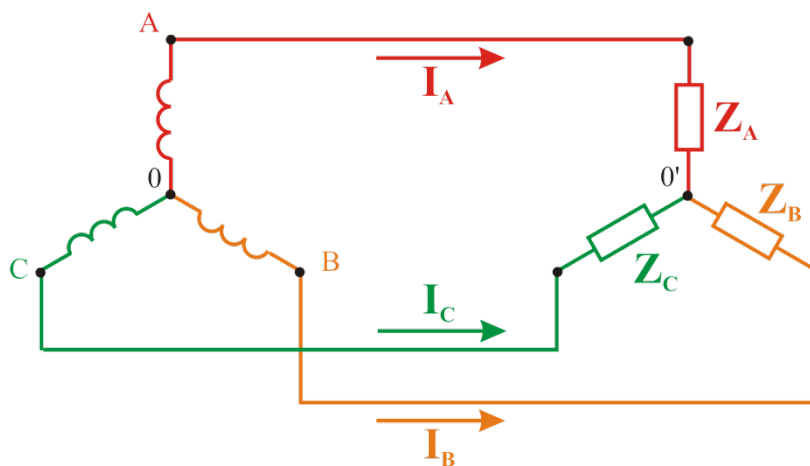
Якщо всі три фази мають однакові навантаження, то фазні струми будуть рівні по модулю, відрізняючись друг від друга по фазі на 120° :

$$\begin{aligned} I_A &= I_m \sin \omega t \\ I_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ I_C &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

Для того щоб знайти значення струму в проводі OO' , потрібно скласти струми (3). Але набагато простіше це можна зробити за допомогою векторної діаграми (мал. 5). У результаті ми одержимо, що при симетричній навантаженні струм у загальному проводі дорівнює нулю, тому провід OO' називається **нульовим**. Точка з'єднання кінців обмоток генератора або кінців

навантажень називається **нульовою**. Система трифазного струму з нульовим проводом називається **чотирипровідною**. З'єднання зіркою з нульовим проводом умовно позначають Y_0 або Y_n , без нульового проводу - Y .

На перший погляд може здатися, що оскільки в нульовім проводі струм дорівнює нулю, те цей провід можна зовсім забрати, залишивши тільки три лінійні проводи. Однак це не завжди можливо. Струм у нульовому проводі дорівнює нулю при цілком симетричному навантаженні. Трифазна схема, з'єднана «зіркою» без нульового проводу, називається трипровідною (мал. 6).



Мал. 6. Трипровідна трифазна схема з'єднання зіркою

Якщо навантаження несиметричне ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$), то й струми будуть різними: $I_A \neq I_B \neq I_C$. З мал. 5 очевидно, що $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = \vec{I}_0 \neq 0$. Отже, при наявності нульового проводу через рівність потенціалів точок O та O' фазні напруги залишаються незмінними незалежно від симетрії навантаження; але при несиметричному навантаженні по нульовому проводу буде протікати деякий струм $\vec{I}_0 \neq 0$.

У випадку несиметричного навантаження і відсутності нульового проводу струми I_A , I_B , I_C мають змінитися так, щоб на виконання першого закону Кірхгофа їх векторна сума дорівнювала нулю. Але при фіксованих опорах навантаження струми можуть змінитися тільки за рахунок фазних напруг. Через те обрив нульового проводу призведе до **перерозподілу фазних напруг**, у результаті чого деякі з них стануть вище номінального (що неприпустимо), а деякі - нижче.

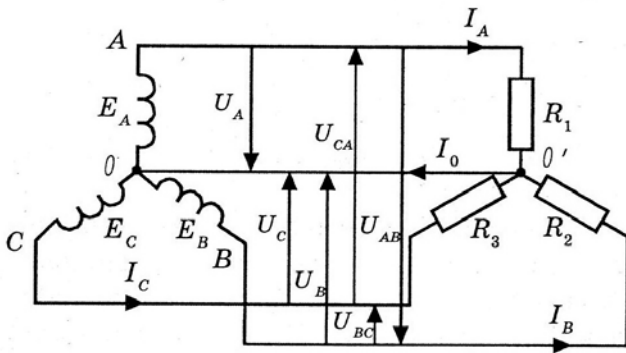
Отже, у ланцюгах із симетричними навантаженнями нульове провід не потрібний. Такими є, наприклад, електродвигуни. **Нульовий провід у чотирипровідній схемі призначений для забезпечення симетрії фазних напруг при несиметричному** (наприклад, освітлювальному) **навантаженні**.

Надалі для позначення лінійних напруг будемо користуватися подвійними індексами, а фазних - одинарними (мал. 7).

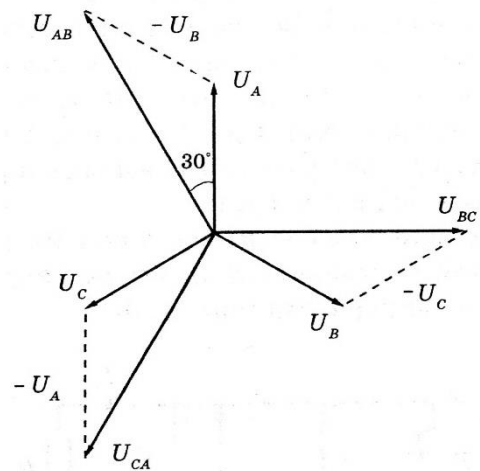
При з'єднанні зіркою лінійний струм збігається з фазним, тобто $I_L = I_\phi$. Як видно з мал. 1, лінійні напруги при з'єднанні зіркою є векторними різницями відповідних фазних напруг:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\ \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A.\end{aligned}\quad (4)$$

Побудуємо векторну діаграму лінійних і фазних напруг при з'єднанні зіркою (мал. 8).



Мал. 7. Фазні й лінійні напруги й струми в з'єднанні зіркою



Мал. 8. Векторна діаграма фазних і лінійних напруг

Спочатку побудуємо три вектори фазних напруг: \vec{U}_A , \vec{U}_B і \vec{U}_C , розташовані відносно один одного під кутом 120° , а потім, користуючись співвідношеннями (4), - вектори лінійних напруг. Для побудови вектора лінійної напруги \vec{U}_{AB} потрібно з вектора \vec{U}_A відняти вектор \vec{U}_B , тобто додати до вектора \vec{U}_A вектор $(-\vec{U}_B)$. Таким же способом будуються й інші вектори лінійних напруг. Ми бачимо, що лінійні напруги також утворюють симетричну трипроменеву зірку, повернену щодо зірки фазних напруг на кут 30° проти годинникової стрілки.

Для знаходження співвідношення між модулями лінійних і фазних напруг розглянемо тупокутний трикутник з кутом 120° при вершині, утворений векторами \vec{U}_A , $(-\vec{U}_B)$ і \vec{U}_{AB} . Вилучимо перпендикуляр з вершини тупого кута

цього трикутника на протилежну сторону й знайдемо, що $\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ$.

Отже,

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi. \quad (5)$$

Таким чином, у трифазній системі, з'єднаною зіркою, лінійні напруги більше фазних у $\sqrt{3}$ разу. Наприклад, якщо лінійна напруга рівна 220 В, те фазна буде в $\sqrt{3}$ разу менше й рівно 127 В. Якщо ж фазна напруга рівна 220 В, то лінійна буде в $\sqrt{3}$ разу більше - 380 В. В Україні й у більшості інших країн напруги 127, 220 і 380 В прийняті стандартними для приймачів низької напруги. При з'єднанні зіркою з нульовим проводом існують дві системи напруг - 220/127 В и 380/220 В. Наявність двох напруг (лінійної й фазної) є перевагою чотирипровідної лінії.

Якщо при з'єднанні зіркою з нульовим проводом навантаження стає нерівномірним, то співвідношення (5) можна вважати практично слушним. Слід тільки пам'ятати, що в цьому випадку в нульовім проведенні з'являється струм. Це приводить до незначного спадання напруги на нульовім проводі, яким звичайно можна зневажити. Тому можна вважати, що між нульовою точкою генератора й нульовою точкою приймача різниця потенціалів відсутня.

З'єднання зіркою без нульового проводу застосовують при підключенні обмоток трифазних двигунів, з нульовим проводом - при електрифікації житлових будинків. В останньому випадку він необхідний, оскільки в житловому будинку практично неможливо добитися симетрії навантажень. При цьому до будинків підводять три фази й нульовий провід, а усередині кожного будинку прагнуть приблизно однаково завантажити кожен з фаз, щоб загальне навантаження було більш-менш симетричним. До кожної квартири підводять нульовий провід й одну з фаз. Установка запобіжників у нульовім проводі на розподільних щитах категорично заборонена, тому що при перегорянні фазні напруги можуть стати нерівними, що приводить до перевищення номінальної напруги в деяких фазах і виходу з ладу освітлювальних і побутових приладів.

3. З'єднання трифазної системи «трикутником»

Якщо обмотки генератора трифазного струму з'єднати так, що кінець першої обмотки з'єднується з початком другої, кінець другої з початком третьої, кінець третьої з початком першої, а до загальних точок підключити лінійні проводи, то одержимо *з'єднання трикутником* (мал. 9).

Гаданого короткого замикання в обмотках генератора не відбудеться, тому що сума миттєвих значень ЕРС у них дорівнює нулю:

$$\vec{e}_{AB} + \vec{e}_{BC} + \vec{e}_{CA} = 0 \quad (6)$$

у чому легко переконатися, побудувавши векторну діаграму.

На мал. 9 три приймачі струму z_{AB}, z_{BC}, z_{CA} також включені трикутником. На відміну від з'єднання зіркою, де в більшості випадків застосовується чотирипровідна система, тут використовуються три проводи.

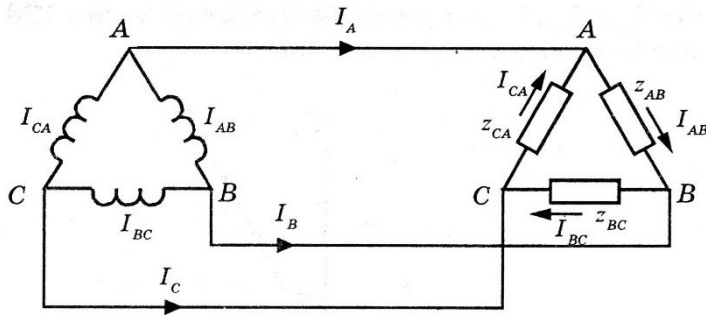
При з'єднанні трикутником існують тільки лінійні напруги (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), оскільки нульовий провід відсутній, але з'являються фазні (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}) і лінійні (I_A, I_B, I_C) струми. Співвідношення між лінійними й фазними струмами легко можуть бути отримані, якщо для кожної вузлової точки споживача застосувати перше правило Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \vec{I}_A &= \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (7)$$

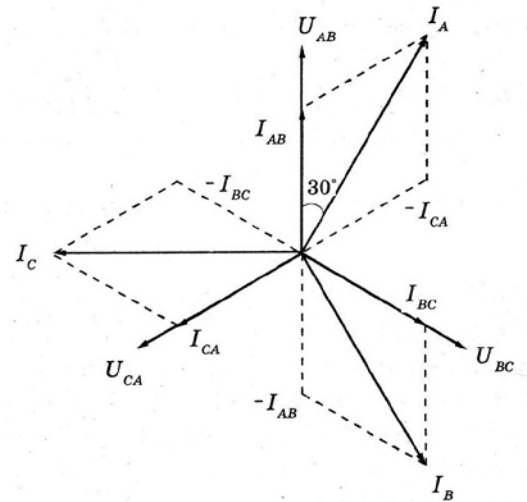
Із цих співвідношень видно, що кожний з лінійних струмів дорівнює геометричній різниці двох фазних струмів. Крім того, почленне додавання цих рівностей показує, що геометрична сума лінійних струмів дорівнює нулю:

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0 \quad (8)$$

Для побудови векторної діаграми в якості вихідних оберемо три вектори лінійних напруг ($\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{BC}, \vec{U}_{CA}$), розташованих під кутом 120° відносно один одного (мал. 10).



Мал. 9. Фазні й лінійні напруги та струми в з'єднанні трикутником



Мал. 10. Векторна діаграма фазних і лінійних струмів

При симетричній навантаженні вектори фазних струмів \vec{I}_{AB} , \vec{I}_{BC} , \vec{I}_{CA} зрушені по фазі щодо відповідних напруг на кут φ , величина якого залежить від характеру навантаження.

Тепер, користуючись співвідношеннями (7), побудуємо на цій же діаграмі вектори лінійних струмів. Для того щоб побудувати вектор лінійного струму \vec{I}_A , потрібно до вектора фазного струму \vec{I}_{AB} додати вектор $(-\vec{I}_{CA})$, тобто вектор, рівний по довжині \vec{I}_{CA} , але протилежний по напрямку. Так само будуються інші вектори лінійних струмів.

Для знаходження співвідношення між модулями лінійних і фазних струмів розглянемо тупокутний трикутник з кутом 120° , утворений векторами \vec{I}_A , $(-\vec{I}_{CA})$ і \vec{I}_{AB} . Вилучимо перпендикуляр з вершини тупого кута цього трикутника на протилежну сторону й знайдемо, що $\frac{I_A}{2} = I_{AB} \cos 30^\circ$. Отже, $I_L = \sqrt{3}I_\phi$. Таким чином, у **трифазній системі, з'єднаній трикутником, лінійні струми більше фазних у $\sqrt{3}$ разу, а фазні напруги збігаються з лінійними.**

4. Потужність трифазної системи

Активною потужністю трифазної системи називають суму активних потужностей її окремих фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C$$

При симетричній навантаженні потужності окремих фаз рівні між собою, а загальна потужність визначається як

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi \quad (9)$$

На практиці потужність трифазної системи частіше виражають через лінійні, а не через фазні струми й напруги. При з'єднанні зіркою $U_{\phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$ й

$I_{\phi} = I_{\text{Л}}$, трикутником $U_{\phi} = U_{\text{Л}}$ і $I_{\phi} = \frac{I_{\text{Л}}}{\sqrt{3}}$. В обох випадках, заміняючи фазні

величини лінійними, ми одержимо те саме вираження для потужності трифазної системи при симетричній навантаженні:

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}I_{\text{Л}}U_{\text{Л}} \cos \varphi \quad (10)$$

Для трифазної системи також слушні наступні співвідношення для повної, активної й реактивної потужностей, відповідно:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}}; \\ P &= \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \cos \varphi; \\ Q &= \sqrt{3}U_{\text{Л}}I_{\text{Л}} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (11)$$

Коефіцієнт потужності симетричному трифазному ланцюгу знаходять як відношення активної й повної потужностей: $\cos \varphi = \frac{P}{S}$.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення трифазної системи змінного струму.
2. Яке з'єднання називається з'єднанням зіркою?
3. Як будується векторна діаграма для струмів при з'єднанні зіркою?
4. У якому випадку відсутній струм у нульовім проводі?
5. Яка роль нульового провідника у трифазній системі, з'єднаній зіркою?
6. Як будується векторна діаграма для напруг при з'єднанні зіркою?
7. Яке з'єднання називається з'єднанням трикутником?
8. Як будується векторна діаграма для струмів і напруг при з'єднанні трикутником?
9. Який зв'язок між лінійними й фазними напругами при з'єднанні зіркою?

10. Який зв'язок між лінійними й фазними струмами при з'єднанні трикутником?
11. Порядок вибору схеми з'єднань освітлювального та силового навантажень при увімкненні у трифазну мережу.
12. Як обраховуються активна, реактивна та повна потужності трифазної системи?

Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 6.1 – 6.7 (с. 164 – 182).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§5.1 – 5.4 (с. 121 – 139).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 6, §§ 6.1 – 6.4 (с. 126 – 137).