

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 8

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПОРУШЕННІ СИМЕТРІЇ У ТРИФАЗНІЙ МЕРЕЖІ

1. Загальні відомості

У системі електропостачання за трифазного КЗ усі фази мережі – в однакових умовах. Вектори періодичних складових струмів та напруг фаз відповідно рівні за значенням модуля і зміщені у просторі на 120° , утворюючи зрівноважені системи. Тому еквівалентну схему заміщення короткозамкненого трифазного контура подають в однолінійному зображенні й розраховують лише одну з фаз.

Через появу пошкоджень (несиметричні КЗ, обриви або несиметричне навантаження фаз) модулі фазних струмів і напруг, а також кути їх взаємного зміщення стають різними за значеннями. Вектори фазних струмів та напруг утворюють несиметричні і загалом незрівноважені системи. Розрахунки при цьому слід здійснювати із складанням схем заміщення для всіх трьох фаз з урахуванням взаємоіндукції між ними. Кількість необхідних для їх опису рівнянь значно зростає, трудомісткість та обсяг обчислень (навіть за умови простої схеми СЕП) збільшуються.

Розглянемо перехідні процеси, зумовлені одноразовою несиметрією, тобто виникненням несиметричного пошкодження лише в одному місці мережі електричної системи, у той час як загалом вона залишається симетричною. Така одноразова несиметрія може бути поперечною (будь-який вид несиметричних КЗ) чи поздовжньою (розрив однієї або двох фаз чи неоднаковий опір навантаження фаз трифазної мережі).

Аналіз перехідних процесів при несиметричних пошкодженнях істотно утруднений тим, що у мережах з синхронними машинами в останніх утворюється пульсуюче магнітне поле ротора, яке викликає, як показано далі, повний спектр вищих гармонік. Перехід від фазних змінних до змінних у координатах d q , при цьому не звільняє диференціальні рівняння опису таких процесів від періодичних коефіцієнтів. Для стаціонарних умов переважно визначають лише основні гармоніки шуканих величин. Саме за такого

обмеження можливе застосування методу симетричних складових для мереж з синхронними машинами. Розрахунки роблять для трьох однолінійних взаємно незалежних схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей, до яких еквівалентують синхронні машини з відповідними параметрами.

2. Створення синхронним генератором вищих гармонік

На рис. 61,а подана модель конструкції явнополюсного синхронного генератора без демпферної обмотки. Припустимо, що на неробочому ходу генератора, нейтраль статорної обмотки якого заземлена, сталося коротке замикання однієї з фаз на землю. По колу цієї фази в статорній обмотці перебігає струм КЗ, в якого кутова частота дорівнює синхронній частоті обертання ротора $\omega = \omega_p$. Утворений струмом пульсуючий з частотою магнітний потік $\Phi_a(\omega_c)$ ((рис. 1,б) залишається у просторі в одному положенні. Для аналізу впливу цього потоку на ротор розкладемо його на дві складові (рис. 1,в), що обертаються назустріч одна одній з синхронною кутовою частотою $\pm\omega$ (знак «+» відповідає обертанню проти руху годинникової стрілки, а «-» – за ним). Складова потоку $\Phi_{a1}(\omega_c)$, що обертається разом з ротором, взаємодіє з потоком обмотки збудження Φ_f як звичайний потік реакції статора у нормальному режимі роботи. Складова потоку $\Phi_{a2}(\omega_c)$, що обертається назустріч роторові, перетне провідники його обмотки з подвоєною кутовою частотою $\omega_c + \omega_p = 2\omega_c$. В обмотці ротора буде наведена е.р.с. подвійної частоти, під дією якої перебігатиме струм тієї ж частоти. Він створить пульсуючий з частотою $2\omega_c$ магнітний потік ротора Φ_p (рис. 1,в), який разом з ротором обертатиметься у просторі. Цей потік можна подати також у вигляді двох складових, що обертаються у протилежних напрямках з кутовою частотою $\pm 2\omega_c$ (рис. 1,г). Складова потоку Φ_{p2} спрямована назустріч обертанню ротора і має відносно статора частоту обертання $-2\omega_c + \omega_p = -\omega_c$, тобто прагне компенсувати потік статора $\Phi_{a1}(\omega_c)$. Інша складова потоку ротора Φ_{p1} обертається відносно статора з кутовою частотою $\omega_p + 2\omega_c = +3\omega_c$ й наводить у пошкодженій фазі обмотки статора е.р.с., яка формує струм потроєної частоти $3\omega_c$. Цей струм утворює пульсуючий з частотою $3\omega_c$ магнітний потік статора $\Phi_a(3\omega_c)$ (рис. 1,г), який знову можна розкласти на дві складові потоку $\Phi_{a1}(3\omega_c)$ та $\Phi_{a2}(3\omega_c)$, що обертаються у протилежних напрямках відносно статора з відповідною кутовою частотою $\pm 3\omega_c$.

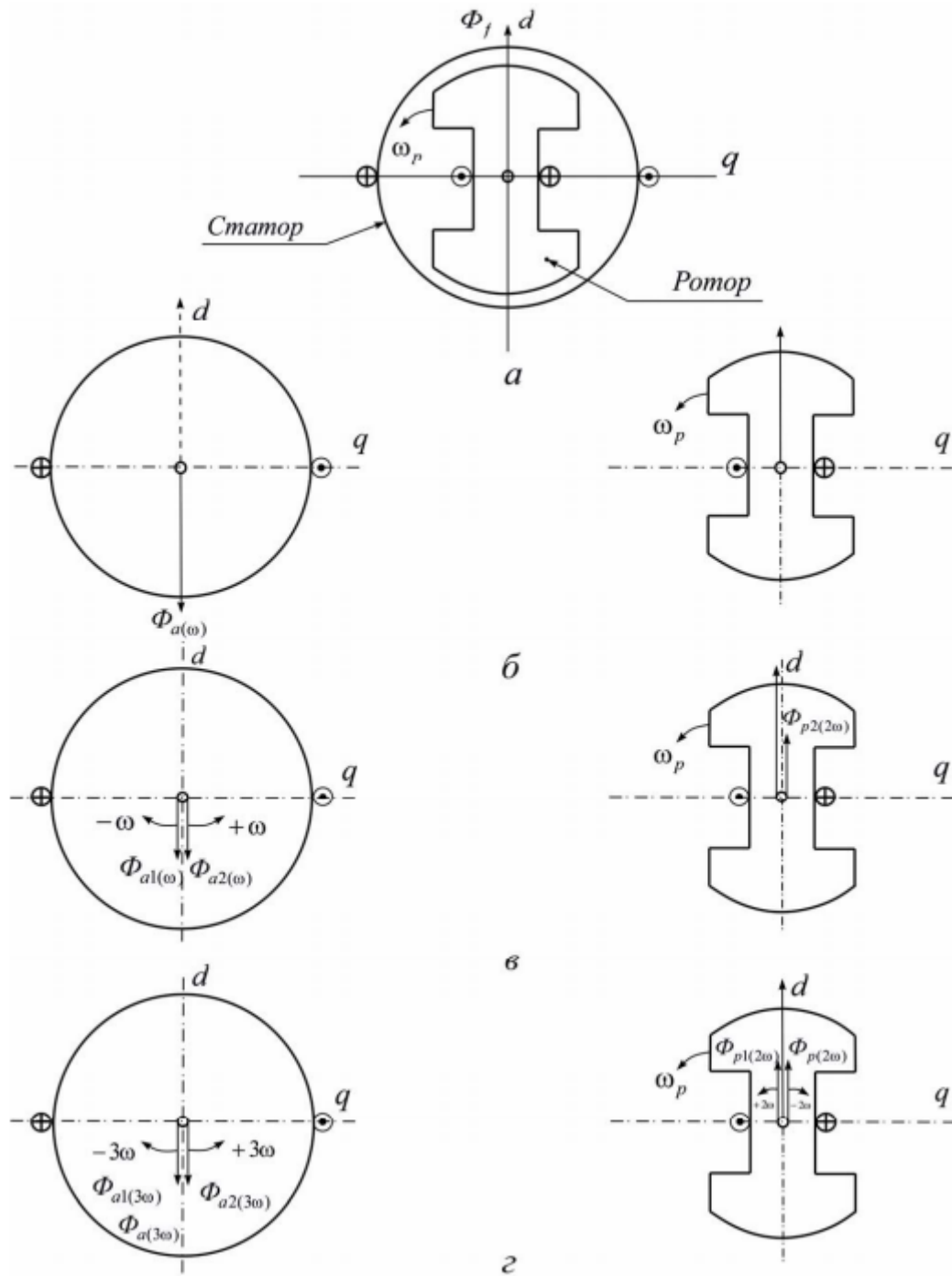


Рис. 1. Пояснювальні схеми до утворення пульсуючого потоку в явнополюсному генераторі при однофазному КЗ: а – модель конструкції генератора; б, в, г – схеми послідовного розвитку явища

Якщо подібні міркування продовжити, дійдемо висновку, що кожна непарна гармоніка однофазного струму КЗ в обмотці статора викликає чергову парну гармоніку струму в обмотці ротора, а кожна парна в обмотці ротора – непарну гармоніку струму в обмотці статора.

Аналогічно можна встановити, що струм незмінного напрямку та парні гармоніки струму в обмотці статора створюють основну та непарні гармоніки струму в обмотці ротора і навпаки.

Отже, в обмотці статора генератора сформується увесь спектр вищих гармонік струму. При відсутності ємності у колі обмотки статора амплітуди гармонік струму із зростанням їх порядкового номера зменшуються. Ця теоретично нескінченна низка гармонік струму виникає тому, що за несиметричного КЗ утворюється не обертове магнітне поле, а пульсуюче.

Електромагнітний вплив демпферних обмоток такий же, як і обмоток збудження. Поперечна демпферна обмотка та обмотки, розташовані вздовж осі ротора синхронної машини, зміщені у просторі на 90 ел. град. Кожна з цих обмоток створює свій пульсуючий потік. Ці потоки у просторі зміщені на 90°, а у часі – на чверть періоду. Внаслідок їх спільної взаємодії утворюється обертове колове поле, яке відносно магнітного потоку статора, що викликав його, залишається нерухомим і спрямованим назустріч. Отже, коли ротор симетричний у поперечній та поздовжній осях, пульсуюче магнітне поле відсутнє. Насправді ж ротор синхронної машини не має такої симетрії. Тому за будь-якого виду несиметричного навантаження в її обмотках виникають вищі гармоніки струмів, амплітуда яких тим вища, чим більша несиметрія конструкції ротора. Тому у гідрогенераторів присутність вищих гармонік струму помітна, а в турбогенераторів практично не відчувається.

3. Метод симетричних складових

Цей метод дає можливість подати будь-яку несиметричну систему з трьох векторів у вигляді складових симетричних систем векторів: прямої, зворотної та нульової послідовностей. У кожній з систем векторів окремих послідовностей явища у фазах подібні, що дозволяє користуватися однолінійними схемами заміщення для кожної послідовності та розраховувати одну з фаз. Вибирається фаза (так звана особлива), у відмітних від двох інших умовах.

Основні положення методу.

- Один з трьох векторів симетричної системи можна виразити однойменним вектором іншої фази з використанням оператора повороту

a (передається комплексним числом $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$) і таких співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ} \\ a^3 &= e^{j360^\circ} = 1 \\ a^4 &= a \\ a^2 + a + 1 &= 0 \\ a^2 - a &= \sqrt{3} e^{-j90^\circ} = -j\sqrt{3} \\ a - a^2 &= j\sqrt{3} \\ 1 - a &= \sqrt{3} e^{-j30^\circ} = 1\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 - a^2 &= \sqrt{3} e^{j30^\circ} = 1\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

У симетричній трифазній системі векторів (рис. 2) кожен з них можна подати:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= a\dot{N}_B = a^2\dot{N}_C \\ \dot{N}_B &= a\dot{N}_C = a^2\dot{N}_A \\ \dot{N}_C &= a\dot{N}_A = a^2\dot{N}_B \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

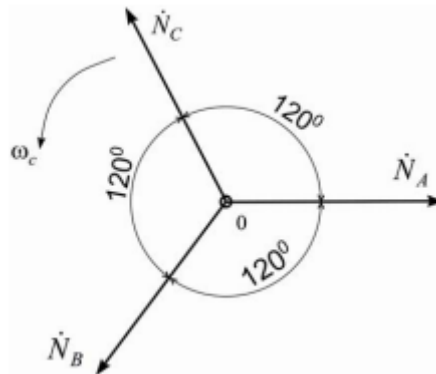


Рис. 2. Симетрична трифазна система фазних векторів параметра режиму

Множення вектора на оператор a означає його поворот на 120° у позитивному напрямку (проти руху годинникової стрілки). Множення на a^2 відповідає повороту на 240° у тому ж напрямку або на 120° – у протилежному

- Несиметричну систему з трьох векторів можна розкласти на складові:

- прямої послідовності (індекс 1) – з трьох рівних за модулем векторів, що зсунуті відносно один одного на 120° та чергуються, як і в основній симетричній системі (рис. 3,а);

- зворотної послідовності (індекс 2) – також з трьох рівних за модулем векторів, зсунутих відносно один одного на 120° . Чергування цих векторів протилежне основній симетричній системі (рис. 3,б). Оскільки сума векторів прямої (зворотної) послідовності дорівнює нулю, ці системи векторів сприймають як зрівноважені:

$$\dot{N}_{A1} + \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{C1} = \dot{N}_{A1}(1 + a^2 + a) = 0;$$

$$\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{C2} = \dot{N}_{A2}(1 + a + a^2) = 0;$$

- нульової послідовності – з трьома рівними за модулем векторами, що збігаються і за напрямком (рис. 3,в) та позначаються індексом 0. Система векторів цієї послідовності симетрична, але незрівноважена:

$$\dot{N}_{A0} + \dot{N}_{B0} + \dot{N}_{C0} = 3\dot{N}_{A0} \neq 0.$$

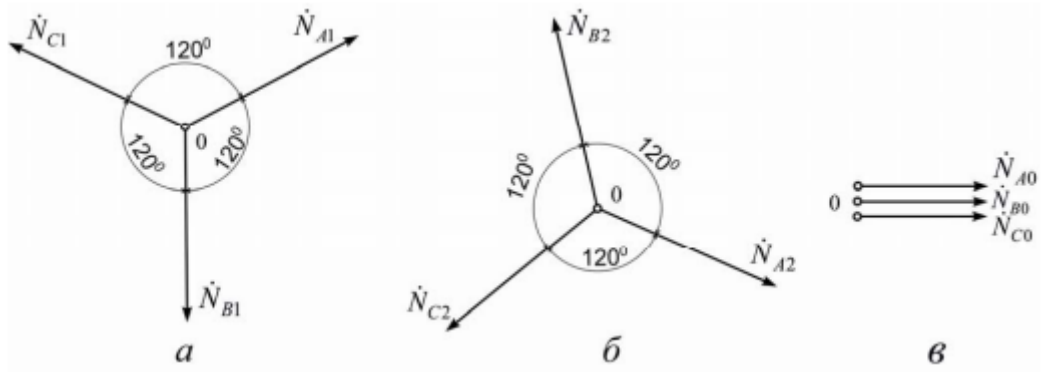


Рис. 3. Складові симетричні системи фазних векторів послідовностей: *a* – прямої; *б* – зворотної; *в* – нульової

За складовими (векторами прямої, зворотної та нульової послідовностей) можна відновити первинну несиметричну систему векторів:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \\ \dot{N}_B &= \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{B0} \\ \dot{N}_C &= \dot{N}_{C1} + \dot{N}_{C2} + \dot{N}_{C0} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Якщо за особливу взяти фазу А, то з урахуванням (2) та рис. 3 систему рівнянь (3) запишемо через симетричні складові вектора особливої фази:

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_A &= \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \\ \dot{N}_B &= a^2 \dot{N}_{A1} + a \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \\ \dot{N}_C &= a \dot{N}_{A1} + a^2 \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

- Рівняння (4) дають змогу виділити з несиметричної системи векторів їх симетричні складові, для чого слід скласти всі рівняння, попередньо вирівнявши коефіцієнти при шуканій складовій (табл. 1). Наприклад, щоб виділити складову (вектор прямої послідовності), достатньо рівняння (4) помножити на коефіцієнти 1, *a*, *a*² відповідно, а потім скласти.

Таблиця 1

Коефіцієнти для виділення симетричних складових

Рівняння несиметричної системи векторів	Послідовність		
	пряма	зворотна	нульова
$\dot{N}_A = \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	1	1	1
$\dot{N}_B = a^2 \dot{N}_{A1} + a \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	<i>a</i> ²	<i>a</i>	1
$\dot{N}_C = a \dot{N}_{A1} + a^2 \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0}$	<i>a</i>	<i>a</i> ²	1

Складові вектори N_{A1}, N_{A2}, N_{A0} отримаємо через фазні N_A, N_B, N_C :

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a\dot{N}_B + a^2\dot{N}_C) \\ \dot{N}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a^2\dot{N}_B + a\dot{N}_C) \\ \dot{N}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Це формули розкладання несиметричної системи векторів N_A, N_B, N_C на три симетричні складові векторів особливої фази N_{A1}, N_{A2}, N_{A0} .

На рис. 4,а графічно визначені складові N_{A1}, N_{A2}, N_{A0} системи векторів N_A, N_B, N_C (5), а на рис. 4,б за знайденими складовими (3) знову отримані первинні фазні вектори N_A, N_B, N_C .

Рівняння (4) та (5) можна подати як матрицю:

$$\vec{N} = S \cdot \vec{N}_{AS}; \quad \vec{N}_{AS} = S^{-1} \cdot \vec{N}, \quad (6)$$

де $\vec{N} = |\dot{N}_A \quad \dot{N}_B \quad \dot{N}_C|^T$; $\vec{N}_{AS} = |\dot{N}_{A1} \quad \dot{N}_{A2} \quad \dot{N}_{A0}|^T$; T – знак транспонування вектора; S – матриця перетворення симетричних координат на фазні

$$S = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix}; \quad S^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{vmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

У наведених вище виразах N може означати також вектори струму або напруги.

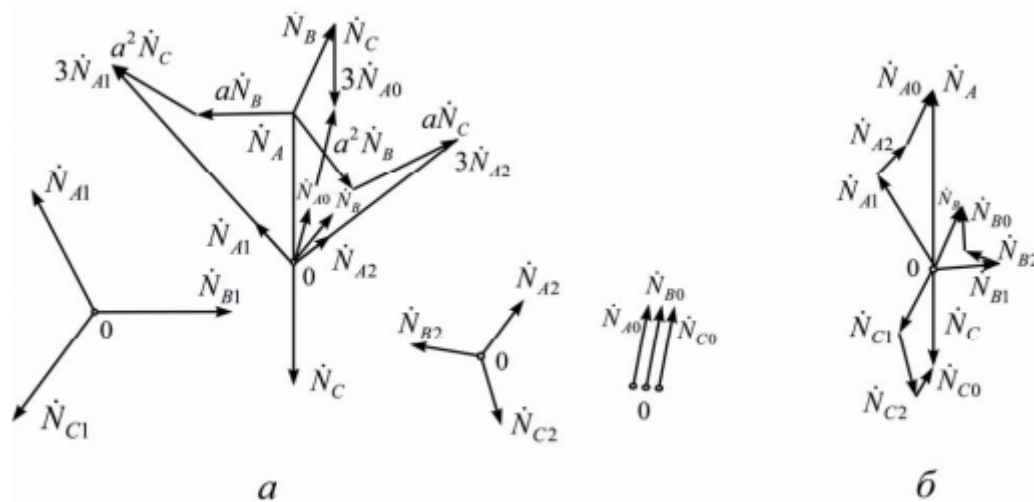


Рис. 4. Розкладання несиметричної трифазної системи векторів параметра режиму: а – симетричні складові; б – отримання початкової несиметричної системи фазних векторів

4. Співвідношення між симетричними складовими векторів струмів та напруг

Метод симетричних складових придатний тоді, якщо елементи СЕП пофазно симетричні. За незалежності схем заміщення окремих послідовностей симетричні складові струмів зв'язані з симетричними складовими напруг тільки однойменних послідовностей за законом Ома. Тобто якщо будь-який елемент кола пофазно симетричний і має (наприклад для особливої фази A) відносно симетричних складових струмів прямої I_{A1} , зворотної I_{A2} та нульової I_{A0} послідовностей опори прямої Z_1 , зворотної Z_2 та нульової Z_0 послідовностей, то симетричні складові спаду напруги у цьому елементі зв'язані з симетричними складовими струмів лише однойменною послідовністю:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{A1} &= Z_1 \dot{I}_{A1} \\ \Delta \dot{U}_{A2} &= Z_2 \dot{I}_{A2} \\ \Delta \dot{U}_{A0} &= Z_0 \dot{I}_{A0} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Певні труднощі виникають у зв'язку з наявністю в СЕП синхронних машин. Як показано у, при несиметричному КЗ у мережі з синхронним генератором, ротор якого несиметричний, формується повний спектр вищих гармонік струму. Струми прямої та зворотної послідовностей різних частот виявляються взаємозв'язаними, що ускладнює використання методу. Для обліку вищих гармонік струму застосовують спеціальні ланцюгові схеми заміщення синхронних машин. Під час практичних розрахунків вищими гармоніками струму здебільшого нехтують, ураховуючи, як правило, тільки основну гармоніку струму та напруги, характеризуючи синхронну машину в схемі зворотної послідовності індуктивним опором x_2 . Припущення про відсутність взаємодії струмів та напруг різних послідовностей дає змогу використовувати метод симетричних складових для кіл з синхронними генераторами та вести розрахунки за трьома однолінійними взаємно незалежними схемами заміщення окремих послідовностей. Напевне, похибка у розрахунках буде найменшою в мережах з турбогенераторами, де вищі гармоніки струму практично відсутні, а у мережах з гідрогенераторами навіть при наявності демпферної обмотки вищі гармоніки струму зумовлюватимуть присутність похибки.

Струми прямої, зворотної та нульової послідовностей створюють магнітні потоки послідовностей, а останні наводять в обмотках статора відповідні е.р.с. Вводити до розрахунків ці е.р.с. недоцільно, оскільки вони пропорційні (при нехтуванні насиченням магнітної системи машини) струмам окремих послідовностей, значення яких ще належить визначити. Тому до схеми заміщення вводять лише відомі е.р.с. або які не залежать від зовнішніх умов кола статора: початкові значення перехідної E' та надперехідної E'' , синхронної E (при відомому струмі збудження i_f), розрахункової E_t для довільного моменту часу за методом спрямлених характеристик, причому при симетричному виконанні статорної обмотки ці е.р.с. – тільки прямої послідовності. Що стосується е.р.с., зумовлених реакцією струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, то їх ураховуємо у вигляді спаду напруги із зворотним знаком на відповідному індуктивному опорі синхронної машини.

Вважаємо також, що встановлені у синхронних машинах пристрої автоматичного регулювання збудження (незалежно від типу) реагують лише на відхилення напруги прямої послідовності та прагнуть підтримати рівною номінальній для кожної машини.

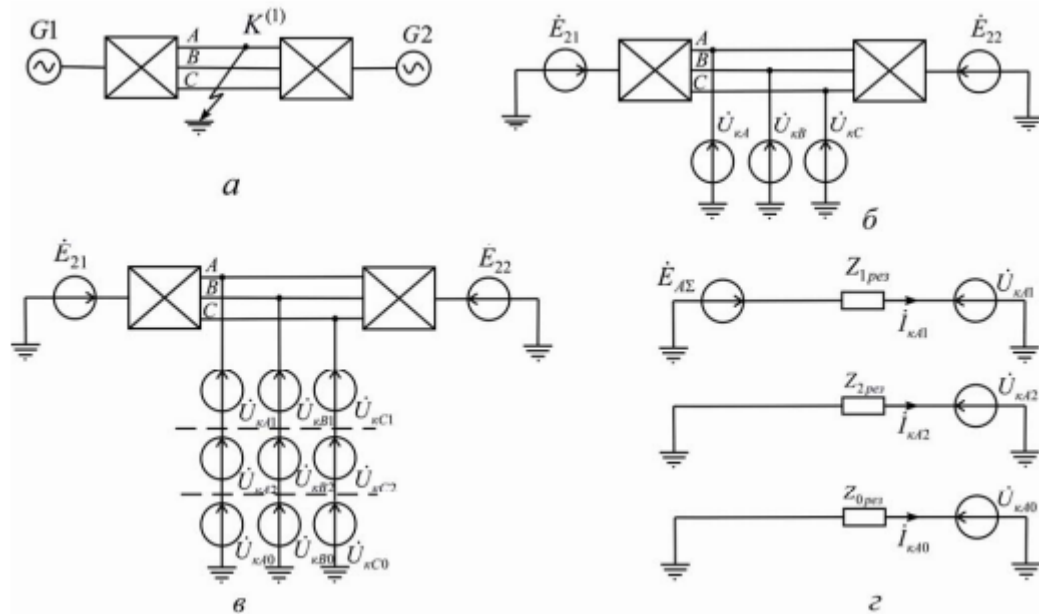


Рис. 5. Розгляд однофазного КЗ у трифазній мережі з використанням симетричних складових векторів фазних параметрів режиму: а – розрахункова схема; б – несиметрична система векторів напруги в місці КЗ; в – розкладання на три складові симетричні системи; г – схеми заміщення для прямої, зворотної та нульової послідовності

На рис. 5,а – загальний вигляд схеми електричної системи, де на лінії електропередачі у точці (1) К виникло однофазне КЗ. Струм КЗ перебігає в елементах схеми під дією е.р.с. генераторів. У місці КЗ утворюється несиметрична система напруг (рис. 5,б), яку можна розкласти на симетричні системи прямої, зворотної та нульової послідовностей (рис. 5,в). Виділивши несиметричні складові напруг особливої фази А, отримуємо окремі еквівалентні схеми заміщення для зазначених послідовностей (рис. 5,г). Для кожної з цих схем (за другим законом Кірхгофа) у загальному вигляді

$$\vec{U}_{KAS} = \vec{E}_{A\Sigma S} - \underline{Z}_{S\text{pez}} \vec{I}_{KAS} = 1; 2; 0. \quad (9)$$

Система рівнянь (9) записана для особливої фази А. Якщо при визначенні значень струмів КЗ у мережах напругою понад 1 кВ активними опорами елементів знехтуємо, рівняння (9) подамо розгорнено:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{KA1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - jx_{1\text{pez}} \dot{I}_{KA1} \\ \dot{U}_{KA2} &= -jx_{2\text{pez}} \dot{I}_{KA2} \\ \dot{U}_{KA0} &= -jx_{0\text{pez}} \dot{I}_{KA0} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Логічний результат з (10): при обраному способі врахування е.р.с., обумовлених реакцією струмів окремих послідовностей, утворення струмів зворотної чи нульової послідовностей можна пов'язати з появою у місці КЗ напруги зворотної чи нульової послідовностей. При поздовжній несиметрії, викликаній обривами та змінами значень опору фаз, основні рівняння для кожної послідовності такі ж, тільки замість U_{KA1} , U_{KA2} , U_{KA0} слід ввести різницю фазних напруг відповідних послідовностей по кінцях місцевої

несиметрії, а опір $\underline{Z}_{1рез}$, $\underline{Z}_{2рез}$, $\underline{Z}_{0рез}$ повинен являти собою результуючий опір схеми заміщення відповідних послідовностей відносно місця поздовжньої несиметрії