

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 4

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ

1. Коротке замикання в радіальній мережі

Для з'ясування змін струму при трифазному КЗ спочатку розглянемо найпростішу радіальну мережу (без трансформаторних зв'язків), яка живиться від джерела з незмінною напругою. Таке джерело називають джерелом необмеженої потужності; його граничне значення потужності теоретично не залежить від впливу зовнішніх умов (змін навантаження, кількості ввімкнених споживачів тощо). Практично це можливо при живленні СЕП від потужних ЕЕС і якщо КЗ виникає в малопотужних електроустановках або віддалених мережах.

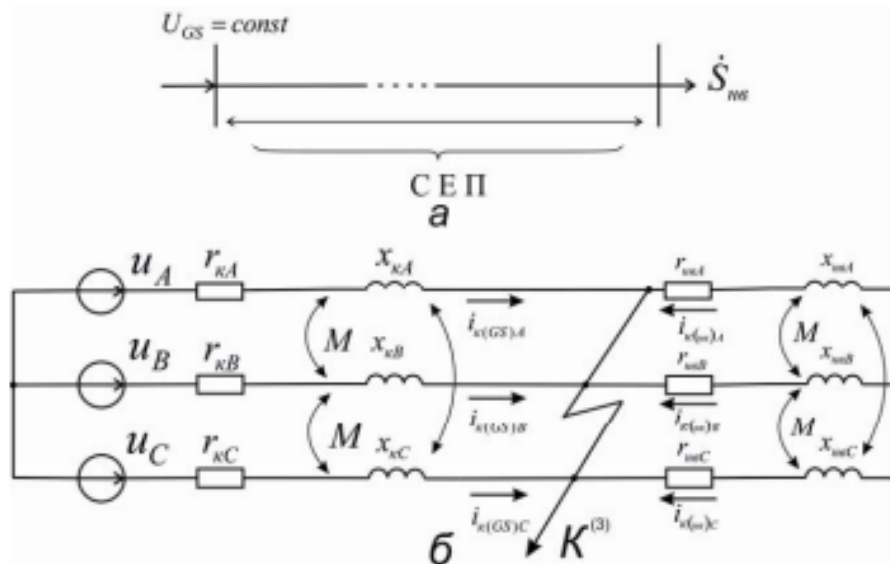


Рис. 1. Еквівалентне уявлення найпростішої електричної мережі: *а* – розрахункова схема; *б* – трифазна схема заміщення при трифазному КЗ

На рис. 1 зображено радіальну мережу, в якій раптово сталося трифазне КЗ та її трифазну схему заміщення із зосередженими опорами мережі і навантаження. Мережа живиться від джерела необмеженої потужності з фазними напругами $U_{\max A}$, $U_{\max B}$, $U_{\max C}$. До виникнення КЗ у мережі перебігають струми, миттєві значення яких i_A , i_B , i_C обумовлені напругою мережі та

визначаються проекціями обертових векторів струму $I_{нв \max A}$, $I_{нв \max B}$, $I_{нв \max C}$ на вісь часу $t - t$ (на рис. 4.2 – проекції лише для фази A).

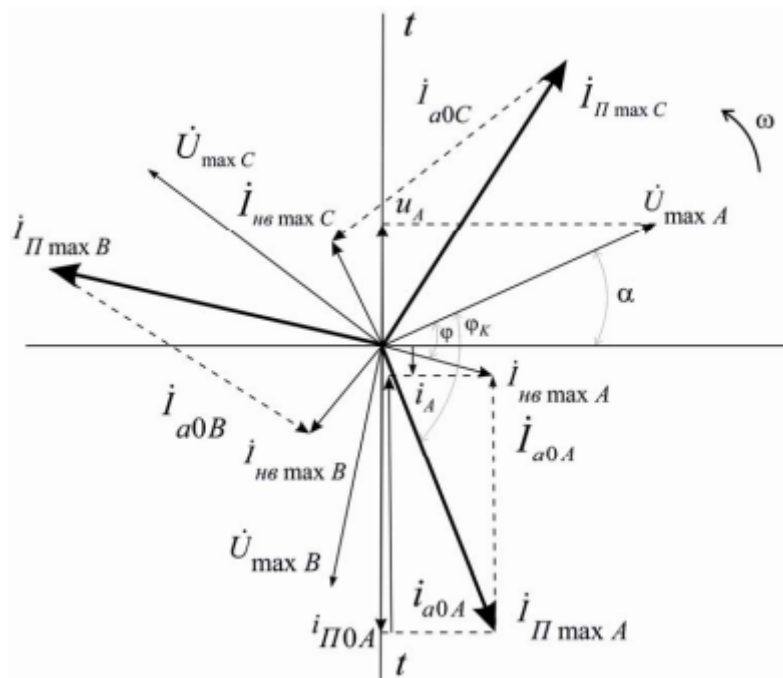


Рис. 2. Векторна діаграма струмів фаз у початковий момент часу виникнення трифазного КЗ для ділянки мережі з джерелом живлення

У момент виникнення КЗ мережа практично розпадається на дві частини: права шунтується від джерела точкою КЗ і залишається без зовнішнього живлення, а ліва продовжує жити від джерела необмеженої потужності з незмінною напругою.

Струм в зашунтованій частині мережі перебігає доти, поки запас елек-ромагнітної енергії перетвориться на тепло в опорах елементів.

Для будь-якої фази можна записати рівняння, наприклад для фази A

$$u_A = i_A r_{нвA} + L_{нвA} di_A / dt + M di_B / dt + M di_C / dt,$$

яке з урахуванням умов

$$\begin{aligned} u_A &= 0; \\ i_A &= -(i_B + i_C); \\ L_{нв} &= L_{нвA} - M; \quad r_{нвA} = r_{нвB} = r_{нвC} = r_{нв} \end{aligned}$$

перетвориться на рівняння універсального виду для кожної фази

$$i_{к нв} \bar{r}_{нв} + L_{нв} di_{к нв} / dt = 0. \quad (1)$$

Розв'язок рівняння відносно струму

$$i_{к нв} = i_{а0} \exp(-t / T_{а нв}), \quad (2)$$

який є вільним струмом і затухає за експонентним законом з постійною часу

$$T_{а нв} = x_{нв} / (\omega r_{нв}). \quad (3)$$

Початкові значення вільного струму в фазах A , B , C зашунтованої ділянки мережі дорівнюють їх попереднім миттєвим значенням, оскільки з наявністю

індуктивності в контурі раптової зміни струму не може статися. Незважаючи на те, що вільні струми в фазах затухають з однаковою постійною часу, їх початкове значення різне. Це визначається кутом зсуву між фазними струмами. Якщо, наприклад, у момент КЗ попередній струм в одній із фаз проходив через нуль, то вільний струм у такій фазі відсутній, а в інших двох вільні струми будуть однаковими, але протилежного спрямування.

На ділянці СЕП з системним джерелом живлення при КЗ (рис. 1) виникає, окрім вільного струму, новий вимушений струм, обумовлений напругою джерела. У зв'язку зі зменшенням внаслідок КЗ результуючого опору мережі порівняно з опором попереднього режиму нові вимушені струми $I_{I\max A}$, $I_{I\max B}$, $I_{I\max C}$ більші струмів попереднього режиму та різняться один від одного зсувом за фазою (рис.2). Рівняння напруг для будь-якої фази короткозамкненої ділянки мережі

$$u = i_{kGS} r_k + L_k di_{kGS} / dt, \quad (4)$$

де $L_k = L_{kA} - M$ – результуюча індуктивність фази (з урахуванням впливу двох інших фаз).

Розв'язок рівняння (4) має вигляд $i_{kGS} = i_{II GS} + i_{aGS}$ чи розгорнено

$$i_{kGS} = (U_{max} / Z_k) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{a0} \exp(-t / T_{aGS}), \quad (5)$$

де Z_k – повний опір кола КЗ; φ_k – кут зсуву струму відносно напруги в цьому колі; $T_{aGS} = x_k / (\omega r_k)$ – постійна часу кола КЗ; α – фаза ввімкнення КЗ.

Із рівняння (5) виходить, що перший член правої частини являє собою вимушену (періодичну) складову струму $i_{II GS} \equiv i_{II}$ з постійною амплітудою $I_{I\max} = U_{max} / Z_k$ а другий член – вільну (аперіодичну) складову струму $i_{aGS} = i_{at}$, затухаючу за експонентою з постійною часу $T_{aGS} = T_{ak}$.

За першим законом комутації початкове значення повного струму КЗ дорівнює значенню струму попереднього режиму в момент виникнення КЗ та складається (рис. 2) із складових (періодичної та аперіодичної):

$$i_{k0} = i_{нв0} = i_{II0} + i_{a0}, \quad (6)$$

звідки

$$i_{a0} = i_{k0} - i_{II0} = I_{нв\max} \sin(\alpha - \varphi) - I_{II\max} \sin(\alpha - \varphi_k). \quad (7)$$

Ураховуючи, що миттєві значення струмів i_{II0} і i_{k0} – проекції векторів $I_{II\max}$ та $I_{нв\max}$ на вісь часу, i_{a0} є проекцією вектора аперіодичної складової струму $(I_{нв\max} - I_{II\max})$ на ту саму вісь (рис. 2). Залежно від фази ввімкнення (кут між напругою U_{maxA} та горизонталлю) початковий аперіодичний струм i_{a0} може змінюватися від найбільшого значення, коли вектор $(I_{нв\max} - I_{II\max})$ буде паралельним осі $t - t$, до нуля при перпендикулярному розташуванні цього вектора відносно осі часу.

На рис. 3 подані залежності зміни у часі струму та його складових у фазах короткозамкненої ділянки мережі при трифазному КЗ. Чим більше

значення аперіодичної складової струму КЗ, тим сильніше зміщення кривої струму відносно осі часу.

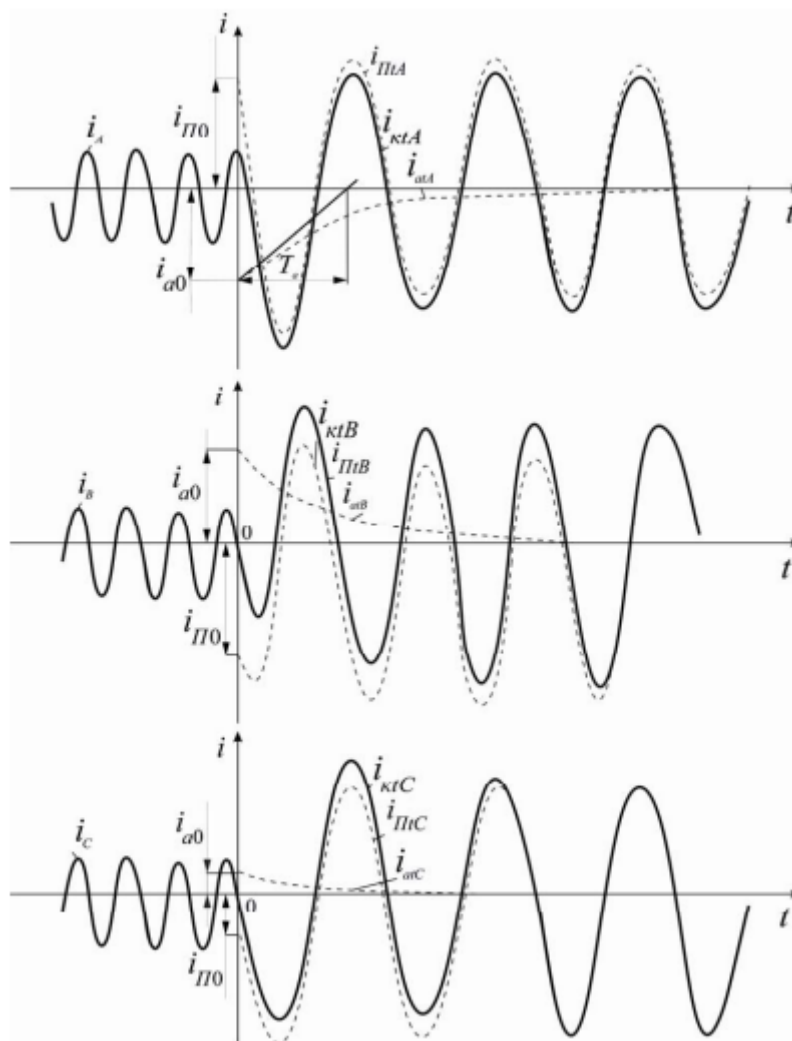


Рис. 3. Залежності зміни у часі повного струму та його складових у фазах А, В, С при трифазному КЗ у найпростішій електричній мережі

Таким чином, в обох частинах СЕП визначені струми, які становлять складові повного струму в місці КЗ:

$$i_{\kappa t} = i_{\kappa GS} + i_{\kappa нв} \quad (8)$$

або

$$i_{\kappa t} = I_{\Pi \max} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_{\kappa}) + i_{\alpha GS 0} \times \exp(-t / T_{\alpha GS}) + i_{\alpha нв 0} \exp(-t / T_{\alpha нв}). \quad (9)$$

У розрахунках, зорієнтованих на вибір та перевірку елементів СЕП за умовами роботи в перехідних режимах з КЗ, визначають найбільший струм, який перебігає встановленим електроустаткуванням. Тоді за те значення, яке необхідно врахувати, беруть найбільше з складових рівняння (8). Здебільшого це буде струм, що перебігає від джерела ЕЕС (індекси належності до ділянок СЕП "GS", "нв" надалі випускаємо).

Розглянутий математичний опис процесу струму перехідного режиму в обох частинах СЕП відносно точки КЗ свідчить про його ідентичність для всіх трьох фаз трифазної мережі. Це підтверджує достатність розгляду при трифазних КЗ схем заміщення для однієї фази.

Для перехідного режиму, що виникає внаслідок КЗ, звичайно знаходять граничні значення його показників. Траєкторію зміни аперіодичної складової струму можна сприйняти як криволінійну вісь симетрії кривої повного струму КЗ. Через аперіодичну складову повний струм змінюється за законом, який відрізняється від синусоїдального. Найбільше значення аперіодичної складової струму КЗ залежить не лише від фази ввімкнення α , але й від струму навантаження мережі в попередньому режимі. Якщо струм навантаження в момент КЗ проходить через нульове значення $i_{нв0} = 0$, то аперіодична складова в початковий час перехідного процесу i_{a0} дорівнює амплітуді періодичної складової $I_{II \max}$ (у цей час вона проходить через своє додатне чи від'ємне найбільше значення, рис. 4).

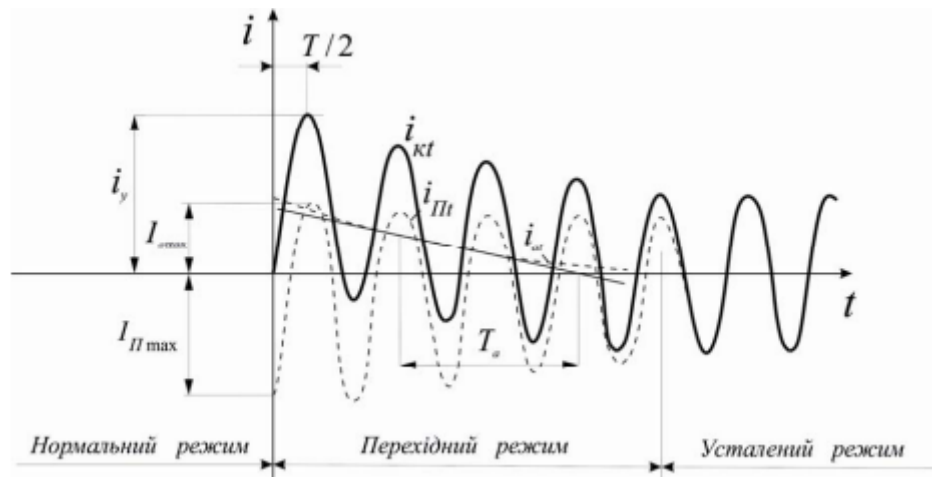


Рис. 4. Зміни у часі струму КЗ та його складових при найбільшому початковому значенні аперіодичної складової

Якщо з виразу (7) до рівняння (5) підставити значення i_{a0} за умови, що значення струму навантаження $I_{нв \max} \sin(\alpha - \varphi) = 0$, тоді повний струм КЗ стане функцією незалежних змінних: часу t та фази ввімкнення. Спільний розв'язок виразів часткових похідних рівняння (7)

$$\begin{cases} \frac{\partial i_{kt}}{\partial t} = \omega \cos(\omega t + \alpha - \varphi_k) + \\ + (1/T_a) \sin(\alpha - \varphi_k) \exp(-t/T_a) = 0; \\ \frac{\partial i_{kt}}{\partial \alpha} = \cos(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \\ - \cos(\alpha - \varphi_k) \exp(-t/T_a) = 0 \end{cases}$$

дає можливість визначити умову, коли відбувається максимум повного миттєвого струму КЗ

$$\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_k) = -\omega T_a = -x_k / r_k = \operatorname{tg}(-\varphi_k).$$

Це справедливо при $\alpha=0$ (у момент виникнення КЗ зміна напруги джерела проходить через нульове значення).

У колах з переважним індуктивним опором $\varphi_k \rightarrow 90^\circ$. Тому умови виникнення найбільших значень аперіодичної складової та миттєвого значення повного струму практично збігаються. При розрахунках струмів КЗ максимальний миттєвий повний струм визначають за найбільшого значення аперіодичної складової (рис. 4) і вважають, що він відбувається приблизно через півперіоду ($t = 0,01$ с при $f = 50$ Гц) після замикання.

Перше найбільше миттєве значення повного струму КЗ у фазах називають ударним струмом короткого замикання:

$$i_y = I_{\Pi \max} + i_{at=0,01}.$$

Ураховуючи, що i_y має найбільше значення за умови $I_{\Pi \max} = I_{a \max}$, а $i_{at=0,01} = I_{a \max} \exp(-0,01 / T_a)$, вираз (9) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} i_y &= I_{\Pi \max} + I_{\Pi \max} \exp(-0,01 / T_a) = \\ &= I_{\Pi \max} [1 + \exp(-0,01 / T_a)] = \kappa_y I_{\Pi \max}, \end{aligned} \quad (10)$$

де

$$\kappa_y = 1 + \exp(-0,01 / T_a). \quad (11)$$

Параметр κ_y називають ударним коефіцієнтом, який характеризує перевищення ударного струму над амплітудою періодичної складової. Його значення – у межах $1 < \kappa_y < 2$, що відповідає граничним значенням постійної часу T_a $[0; \infty]$.

Залежність ударного коефіцієнта від постійної часу T_a або відношення x_k / r_k зображено на рис. 5. За час, який дорівнює $3T_a$, аперіодична складова струму КЗ практично затухає (менше 5 % від її початкового значення).

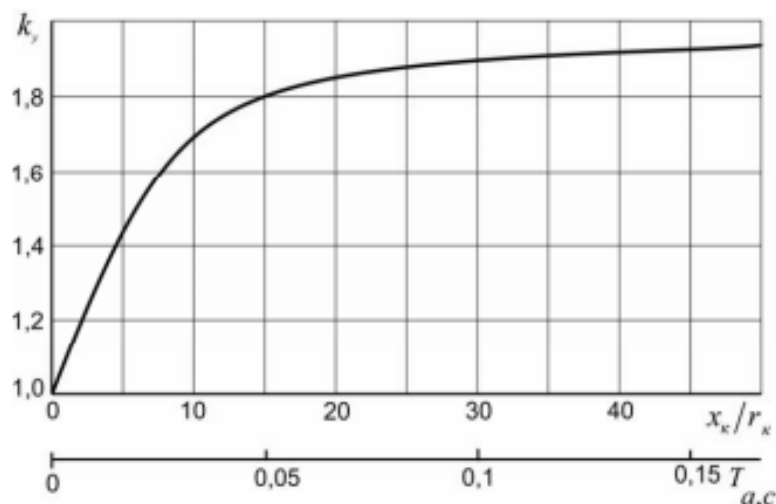


Рис. 5. Залежність ударного коефіцієнта від відношення складових повного результуючого опору мережі або її постійної часу

У розгалужених мережах точне визначення постійних часу потребує значних обчислень. При наявності в мережі кількох контурів результуюча аперіодична складова струму КЗ дорівнює сумі їх аперіодичних струмів. Вільний струм в будь-якій вітці такої схеми можна визначити шляхом розкладання струму КЗ, вираженого в операторній формі. Якщо зображення струму КЗ в операторній формі має вигляд

$$I_{кт}(\bar{p}) = F_1(p) / [\bar{p}F_2'(p)], \quad (12)$$

то відповідно до формули розкладу Лапласа

$$i_{кт} = \lambda^{-1} \left\{ F_1(0) / F_2(0) + \sum_{\kappa=1}^n [F_1(p_\kappa) / p_\kappa F_2'(p_\kappa)] \exp(p_\kappa t) \right\} = \\ = i_{пт} + i_{ат} = i_{пт} + \sum_{\kappa=1}^n i_{a0} \exp(-t / T_{ак}). \quad (13)$$

Звідси аперіодична складова струму КЗ

$$i_{ат} = i_{a01} \exp(-t / T_{a1}) + i_{a02} \exp(-t / T_{a2}) + \dots + i_{a0\kappa} \exp(-t / T_{ак}),$$

де $T = -1/p_1; T = -1/p_2; \dots; T = -1/p_\kappa$ – постійні часу часткових аперіодичних струмів; $p_1, p_2, \dots, p_\kappa$ – корені характеристичного рівняння

Початкові значення часткових аперіодичних струмів $i_{a01}, i_{a02}, \dots, i_{a0\kappa}$ та їх постійних часу – функції змінних струмів усіх елементів схеми.

Оскільки такий спосіб визначення постійних часу навіть для порівняно нескладної схеми викликає значні ускладнення, користуються наближеним вирішенням. Припускають, що аперіодична складова струму КЗ затухає (за експонентним законом) з еквівалентною постійною часу:

$$T_{а ек} \approx x_{к ек} / (\omega r_{к ек}), \quad (14)$$

де $x_{к ек}$ – результуючий індуктивний опір схеми відносно точки КЗ, обчислений за умови, що всі активні опори дорівнюють нулю; $r_{к ек}$ – результуючий активний опір, обчислений для всіх індуктивних опорів, якщо $x = 0$.

При такому визначенні $T_{а ек}$ спостерігається еквівалентність кількості електрики в дійсних та зведених умовах. Таким чином, аперіодичний струм КЗ складної схеми подається однією еквівалентною експонентою

$$i_{ат} = i_{ат0} \exp(-t / T_{а ек}). \quad (15)$$

Співвідношення індуктивних та активних складових опорів для елементів електричної мережі мають такі значення:

Елемент	Відношення x/r
Турбогенератори	15 – 150
Гідрогенератори	40 – 90
Трансформатори	7 – 50
Реактори 6-10 кВ	15 – 80
Повітряні лінії	2 – 8
Кабельні лінії 6-10 кВ	0,2 – 0,8
Узагальнене навантаження	2,5

Наведені відношення x/r використовують для оцінки еквівалентних постійних часу затухання аперіодичної складової при розрахунках струму КЗ у СЕП. Орієнтовно для наближених розрахунків можна брати значення відношення x/r , ударного коефіцієнта κ_y та постійної часу T_a характерних віток СЕП з табл.1. Для визначення діючого значення повного струму КЗ та його складових необхідно знати закономірності їх змін у часі. Розрахунок їх діючого значення досить утруднений, оскільки напруга джерела загалом може змінюватися за амплітудою (джерело обмеженої потужності), а повний струм та його періодична складова являють собою складні функції часу (несинусоїдальні).

Таблиця 1

Середні значення параметрів (x/r , κ_y , T_a) для характерних відгалужень

Мережа або місце КЗ	x/r	κ_y	T_a
Мережа генератор-трансформатор	30-50	1,9-1,95	0,1-0,2
Мережа живлення асинхронного двигуна	6,3	1,6	0,02
КЗ за лінійним реактором на електростанції	30	1,9	0,1
КЗ за лінійним реактором на підстанції	18-20	1,85	0,06
КЗ за кабельною лінією 6-10 кВ	3	1,4	0,01
КЗ за трансформатором потужністю 1000 кВ-А	6,3	1,6	0,02
КЗ на приєднанні первинної напруги підстанції	15	1,8	0,5
КЗ на приєднанні вторинної напруги підстанції	20	1,85	0,06

Діюче значення повного струму КЗ у довільний момент часу t перехідного процесу визначають як середньоквадратичне значення струму за період T , в середині якого міститься даний момент часу. При цьому припускають, що протягом періоду T амплітуда періодичної та аперіодичної складових не змінюється, дорівнюючи їх значенням у час t , що розглядається на рис. 6. Амплітуду періодичної складової визначають за обвідною кривою в середині періоду T , а її діюче значення в цей момент часу $I_{II} = I_{II \max} / \sqrt{2}$. Діюче значення аперіодичної складової струму дорівнює її миттєвому значенню в середині періоду $I_{at} = i_{at}$.

Діюче значення повного струму КЗ для будь-якого моменту часу

$$I_{kt} = \sqrt{I_{II}^2 + I_{at}^2}, \quad (16)$$

яке відповідає виразу для визначення діючого значення несинусоїдального струму.

Діюче значення ударного струму КЗ I_y , за яким вибирають та перевіряють електричні апарати, припадає на перший період перехідного процесу. Воно визначається з припущенням, що аперіодична складова протягом періоду дорівнює її миттєвому значенню при $t = 0,01$ с, а періодична складова – своєму амплітудному значенню. За цієї умови

$$I_y = \sqrt{I_{II}^2 + i_{at=0,01}^2} = \sqrt{I_{II}^2 + [I_{a \max} \exp(-0,01 / T_a)]^2}. \quad (17)$$

При $I_{a \max} = I_{II \max} = \sqrt{2}I_{II}$ і враховуючи, що $\exp(-0,01 / T_a) = (\kappa_y - 1)$, вираз (17) подамо у вигляді

$$I_y = I_{II} \sqrt{1 + 2(\kappa_y - 2)^2}.$$

При значеннях ударного коефіцієнта $1 < \kappa_y < 2$ відношення I_y / I_{II} перебуває в межах $1 < I_y / I_{II} < \sqrt{3}$, а відношення i / I_y має найбільше значення $\sqrt{3}$ при $\kappa_y = 1,5$.

2. Коротке замикання на затискачах генератора

Раптове трифазне КЗ на затискачах генератора – причина найбільш небезпечного аварійного режиму. Результуючий опір, утворений короткозамкненим колом, стає при цьому рівним лише внутрішньому опоріві генератора, а перехідний процес супроводжується максимальними змінами напруги та струму. Процес викликає також появу аперіодичного струму, який накладається на періодичний струм від джерела живлення. Співвідношення для їх розрахунку залишаються попередніми. Залежності зміни струму та його складових в одній з фаз мережі при трифазному КЗ на затискачах генератора без пристрою АРЗ – на рис. 7.

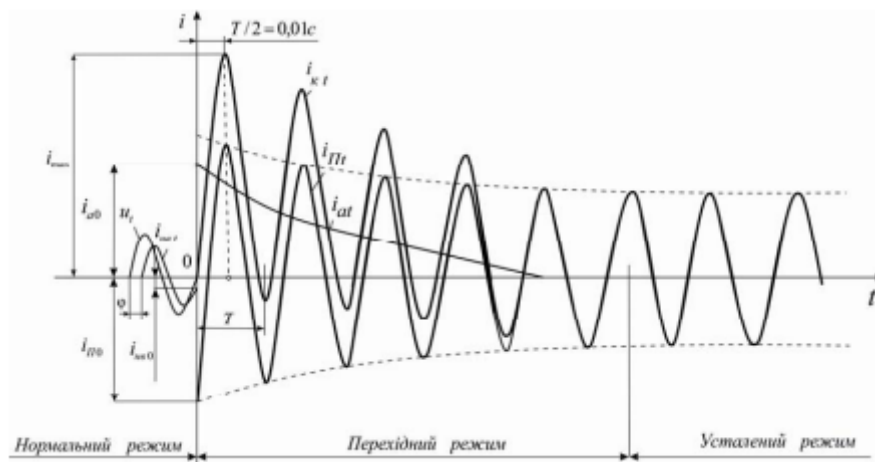


Рис. 7. Зміни у часі струму фази та його складових для генератора без пристрою АРЗ при трифазному КЗ на затискачах

До початку КЗ генератор працює в нормальному режимі, при якому в колі навантаження протікає струм $i_{нв}$. У момент часу $t = 0$, коли струм навантаження має значення $i_{нв0}$, виникло КЗ. У результаті – настав перехідний режим, який характеризується збільшенням значення струму.

Струм навантаження та періодичну складову струму КЗ у початковий момент часу можна визначити з векторної діаграми за виразами (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} i_{нв0} &= I_{нв \max} \sin(\alpha - \varphi) \\ i_{П0} &= I_{II \max} \sin(\alpha - \varphi_k) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

При КЗ на затискачах генератора або поблизу розташованих від нього точках мережі результуючий опір кола КЗ – практично індуктивний.

До того ж кут φ_k близький до 90° та завжди більший. Оскільки генератор в даному випадку – джерело обмеженої потужності і працює без пристрою АРЗ, напруга на його затискачах, а, як наслідок, і періодична складова струму КЗ в перехідному режимі (порівняно з їх початковими значеннями) зменшуються. Це пояснюється тим, що у міру затухання вільних струмів, наведених у початковий момент часу, в обмотці збудження, демпферних обмотках та в масиві ротора потік реакції статора при незмінному струмі збудження послаблює результуючий магнітний потік у повітряному зазорі генератора.

Періодична складова струму КЗ, якщо напруга джерела в ході перехідного процесу не змінюється (джерело необмеженої потужності), залишається незмінною за амплітудою. На рис.7 періодична складова струму КЗ під час перехідного режиму при відсутності пристрою АРЗ зображена синусоїдальною зі спадною амплітудою. Тривалість перехідного процесу при частоті струму $f = 50$ Гц, наявності активних опорів короткозамкненого кола дорівнює $0,1 \dots 0,2$ с (середнє значення постійної затухання аперіодичної складової $T_a = 0,05$ с, її згасання $t \approx 0,15$ с).

Ураховуючи швидке затухання аперіодичної складової, повний струм КЗ для часу $t \geq 0,15$ с можна вважати практично рівним періодичній складовій. Після перебігу перехідного процесу настає усталений режим. Миттєве та діюче значення усталеного струму КЗ позначені відповідно через i_∞ і I_∞ . Початковий струм КЗ більший усталеного значення струму ($I_{п0} > I_\infty$).

Для підтримки на затискачах генератора напруги сталою або змінною в допустимих межах при зміні режимів роботи СЕП сучасні генератори обладнують пристроями АРЗ. Якщо КЗ виникає на затискачах генератора з пристроєм АРЗ, то дія АРЗ суттєво впливає на характер перехідного процесу струму. Залежності змін у часі струму та його складових при КЗ на затискачах генератора з АРЗ наведені на рис. 8. У початковий момент часу виникнення КЗ з урахуванням інерції магнітних потоків, зчеплених з обмотками генератора, пристрій АРЗ на перехідний процес струму практично не впливає. З часом, однак, коли пристрій АРЗ діє, струм збудження і пов'язані з ним складові е.р.с. та струмів статора і демпферних обмоток збільшуються. Процес проходить досить повільно, оскільки в основному змінюються е.р.с. генератора та обумовлена нею періодична складова струму статора.

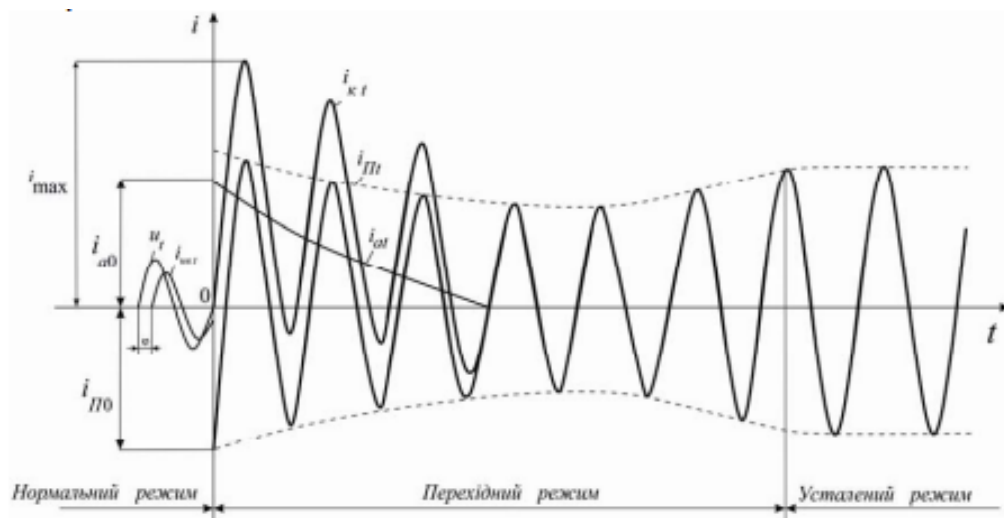


Рис. 8. Зміни у часі струму фази та його складових для генератора з АРЗ при трифазному КЗ на затискачах

Як бачимо з рис.8, при КЗ на затискачах генератора з пристроєм АРЗ на початку перехідного режиму струм змінюється так само, як і в генераторах без АРЗ. Цей інтервал часу визначається тривалістю зниження напруги до значення, при якому запускається пристрій АРЗ, та власним часом дії АРЗ. Після вступу в дію АРЗ напруга на затискачах генератора та періодична складова струму КЗ починає зростати і досягає встановлених значень, відповідних граничному струму збудження.

Оскільки дія АРЗ виявляється через кілька періодів від часу виникнення КЗ, початкові значення періодичної та аперіодичної складових, а також ударний струм КЗ у перехідному режимі будуть такими ж, як і при відсутності АРЗ. Таким чином, затухання вільних струмів в обмотці статора та обмотки збудження, що виникли при раптовому КЗ, якоюсь мірою компенсуються збільшенням струму КЗ за рахунок дії АРЗ. Залежно від співвідношення між значеннями цих струмів та характеру їх змін у часі обвідна крива струму КЗ має різну форму. При цьому аперіодична складова i_{at} зберігається практично такою ж, як і при відсутності пристрою АРЗ. Періодична складова i_{pt} залежно від співвідношення між початковим та усталеним значеннями струму КЗ при граничному струмі збудження може затухати, зростати або ж залишатися незмінною, як на рис. 9. Якщо під дією пристрою АРЗ напруга генератора досягає номінального або ж гранично допустимого значення, то струм КЗ у подальшому – сталий.

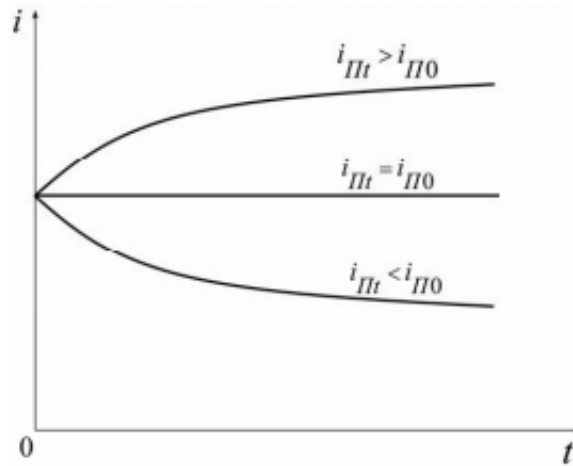


Рис. 9. Зміни у часі періодичної складової струму КЗ для генератора з АРЗ при різних значеннях граничного струму збудження та постійній часу обмотки збудження $T_e = 0$

Зміни в перехідному режимі діючого значення періодичної складової струму в обмотці статора та аперіодичних складових струмів в обмотці збудження і поздовжній демпферній обмотці ротора при КЗ на затискачах генератора – на рис. 10 (а, б, в відповідно). При відсутності пристрою АРЗ тут зміни струмів позначені штриховими кривими, а з урахуванням дії АРЗ – суцільними. З рисунка видно, що в обмотках статора та збудження внаслідок дії АРЗ значення струмів поступово збільшується, а в поздовжній демпферній обмотці струм зменшується, оскільки нарощення складової струму в цій обмотці від дії АРЗ протилежне її вільному струмові. При досягненні меж дії АРЗ струми в обмотках генератора набувають своїх кінцевих усталених значень.

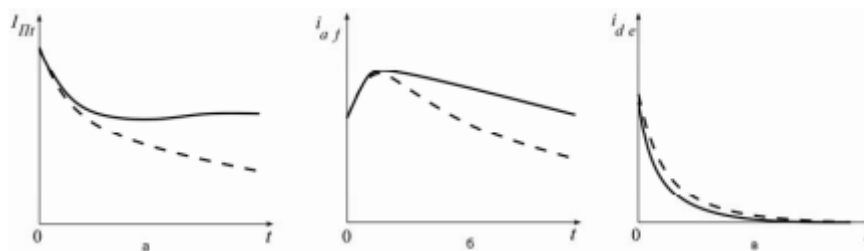


Рис. 10. Вплив АРЗ при КЗ на затискачах генератора на зміни струмів в обмотках: а –статорній; б –збудження; в – поздовжній демпферній

3. Коротке замикання у віддалених точках системи електропостачання

При виникненні КЗ у живильній чи розподільній мережі СЕП струми КЗ значно менші порівняно з тими, що з'являються при КЗ на затискачах генератора. Результуючий опір кола КЗ тут зростає, тому вплив збурення режиму у вигляді КЗ на роботу генератора протягом перехідного режиму

зменшується. Скорочення тривалості перехідного процесу, яке залежить від електричної віддаленості точки КЗ, буде тим меншим, чим віддаленіша точка КЗ від джерела живлення. При КЗ в електрично віддалених точках СЕП періодична складова у перехідному режимі практично не змінюється за амплітудою (рис. 11). У цьому разі зміну е.р.с. генератора не враховують і напругу на його затискачах вважають сталою та рівною номінальному значенню. Струм КЗ значно перевищує номінальний і для елементів СЕП небезпечний.

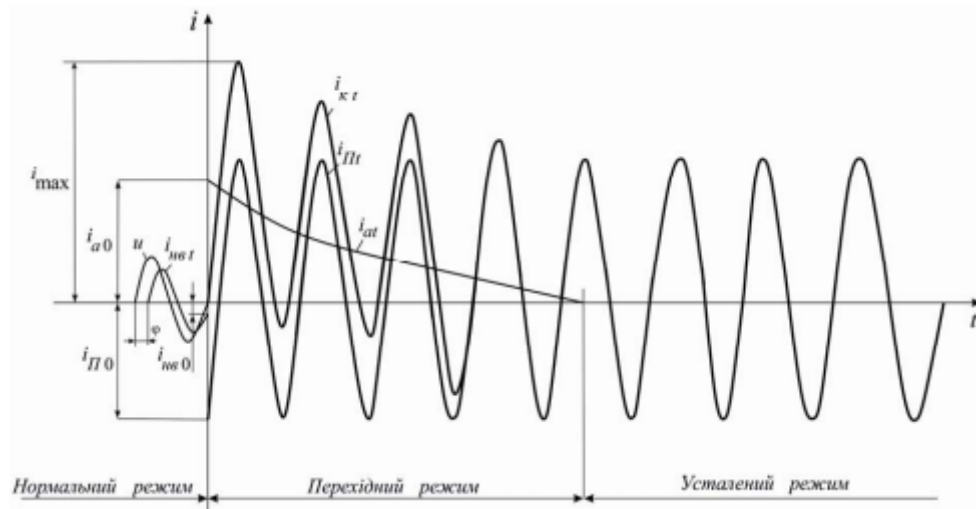


Рис. 11. Зміни у часі струму та його складових при КЗ у віддаленій точці системи електропостачання

Таким чином, при КЗ в електрично віддалених точках СЕП беруть до уваги, що періодична складова струму не змінюється з початкового моменту часу виникнення КЗ і в точці КЗ має значення

$$I_{П0} = I_{П\infty} = I_{\infty}. \quad (19)$$

Аперіодична складова струму виникає при будь-якому віддаленні точки КЗ від джерела і затухає тим скоріше, чим більше значення активної складової опору короткозамкненого кола.

Значення зовнішнього опору кола ввімкнення генератора $x_{зш}$, за яким при КЗ початкове значення періодичної складової струму КЗ $I_{П0}$ та усталений струм I_{∞} однакові, можна знайти, враховуючи відповідні е.р.с. та опори, з рівняння

$$E_q'' / (x_d'' + x_{зш}) = E_q / (x_d + x_{зш}), \quad (20)$$

де E_q'' і E_q – е.р.с. генератора в початковий момент часу виникнення КЗ в усталеному режимі.

З (20) маємо:

$$x_{зш} = (E_q'' x_d - E_q x_d'') / (E_q - E_q'').$$

З побудованих залежностей відношення $I_{П0} / I_{\infty}$ від зовнішнього опору $x_{зш}$ (рис. 12), можна встановити, що з відсутністю регулювання напруги (крива 1) це відношення завжди більше одиниці і гранично спрямоване до неї. У

випадках регулювання напруги за допомогою пристрою АРЗ генератора (крива 2) відношення $I_{\Pi 0}/I_{\infty}$ спочатку зменшується до мінімального значення (0,6...0,8), а потім зростає, також гранично наближаючись до одиниці.

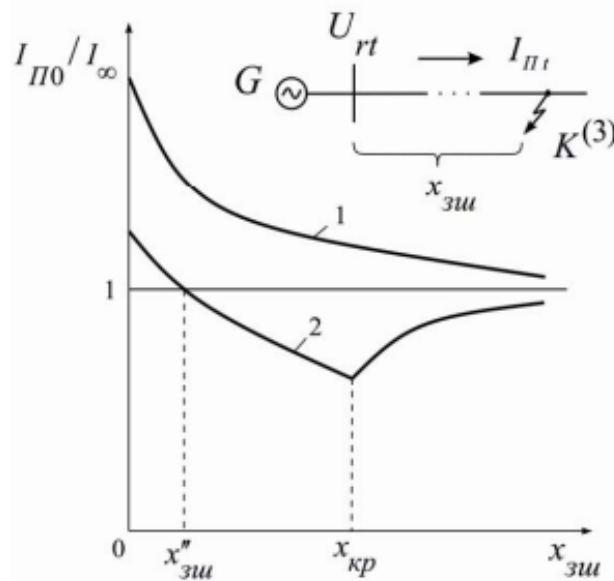


Рис. 12. Залежності відношення струмів $I_{\Pi 0}/I_{\infty}$ від електричної віддаленості місця КЗ та наявності пристрою АРЗ на генераторі: 1 – без АРЗ; 2 – з АРЗ

Значення зовнішнього опору короткозамкненого кола генератора, коли відношення $I_{\Pi 0}/I_{\infty}$ в СЕП з регулюванням напруги збільшується, називають критичним (позначають $x_{кр}$). Значення $x_{кр}$ залежить від параметрів синхронної машини та попереднього режиму роботи.

На рис. 13 показані залежності діючих значень періодичної складової струму статора і напруги генератора від часу при ввімкненому (суцільні лінії) та вимкненому (штрихові лінії) пристрої АРЗ та віддаленостях КЗ, що характеризуються значеннями зовнішнього опору короткозамкненого кола $x_{zsh} = 0$, $x_{zsh} = x_p$, $x_{zsh} > x_p$.

Порівняння отриманих кривих свідчить, що при малій електричній віддаленості КЗ крива струму генератора через дію АРЗ більш похила і зберігає характер спадної. При збільшенні значень x_{zsh} крива струму спочатку знижується до деякого мінімального значення, а потім зростає, досягаючи кінцевого усталеного значення струму, яке не може перевищити початкове значення струму КЗ.

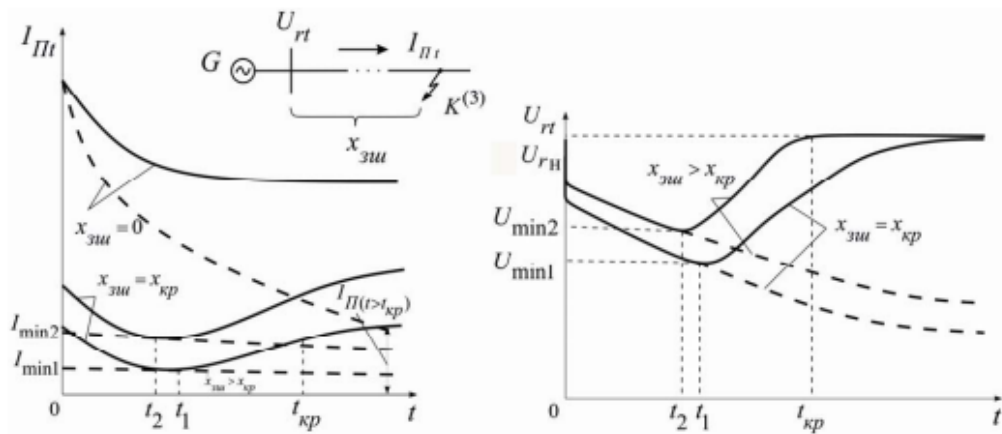


Рис. 13. Вплив АРЗ на зміну струму і напруги при різній електричній віддаленості місця КЗ ($x_{зи}$)

При $x_{зи} > x_{кр}$ напруга генератора досягає номінального значення при $t = t_{кр}$ й надалі залишається сталою. Струм КЗ для $t \geq t_{кр}$ також незмінний визначається за виразом:

$$I_{Пт} = U_{Гн} / x_{зи}. \quad (21)$$

Критичним часом $t_{кр}$ називають тривалість підвищення напруги генератора до номінального значення під дією АРЗ. Цей час зменшується із зростанням електричного віддалення КЗ, досягаючи граничного $t = 0$.