

Перехідні процеси в системах електропостачання

**Лекція 5**

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ**

**1. Початкове значення періодичної складової струму короткого замикання**

Періодичну складову струму в початковий момент часу появи КЗ визначають за принципом збереження первинного результуючого потокозчеплення ротора при раптовому порушенні режиму роботи генератора. Оскільки в момент часу виникнення раптового КЗ потокозчеплення ротора залишається незмінним, наведена в статорі е.р.с. на початку перехідного процесу також не змінюється.

Перехідні е.р.с. та індуктивні опори синхронної машини без демпферних обмоток визначають за виразами:

$$E'_q = E_{qf} x_{ad} / (x_{\sigma f} + x_{ad}) = E_{gf} x_{ad} / x_f; \quad (1)$$

$$x'_d = x_{\sigma} + x_{\sigma f} x_{ad} / (x_{\sigma f} + x_{ad}). \quad (2)$$

Якщо позначити індексами "(0)" і "0" відповідно показники попереднього режиму та для початкового моменту часу появи КЗ, то перехідну е.р.с. і початковий перехідний струм КЗ можна подати:

$$E'_{q0} = E'_{q(0)} = U_{q(0)} + I_{d(0)} x'_d; \quad (3)$$

$$I'_{d0} = E'_{d0} / (x'_d + x_{zu}). \quad (4)$$

Для синхронних генераторів з демпферними контурами надперехідна е.р.с

$$E''_q = (E_{qf} / x_{\sigma f} + E_{q,de} / x_{\sigma de}) / (1 / x_{\sigma} + 1 / x_{\sigma de} + 1 / x_{ad}); \quad (5)$$

надперехідний опір

$$x''_d = x_{\sigma} + x_{ad} \parallel x_{\sigma f} \parallel x_{\sigma de}. \quad (6)$$

За аналогією з (3) та (4) надперехідна е.р.с. та початкове значення надперехідного струму КЗ визначають з виразів:

$$E''_{q0} = E''_{q(0)} = U_{q(0)} + I_{q(0)} x''_d; \quad (7)$$

$$I''_{d0} = E''_{d0} / (x''_d + x_{zu}). \quad (8)$$

Вирази (3) та (7) використовувати для визначення  $E'_{q(0)}$  і  $E''_{q(0)}$  незручно, оскільки при цьому струми та напругу синхронної машини слід розкласти на складові по осях  $d$  і  $q$ . З векторних діаграм неявно- та явнополюсних синхронних машин у попередньому режимі (рис. 1) випливає, що значення

$E'_{q(0)}$  і  $E''_{q(0)}$  з достатньою для практичних розрахунків точністю можна визначити для машин:

без демпферних контурів

$$\tilde{E}'_{q(0)} \approx E'_{(0)} \approx \tilde{U}_{(0)} + I_{(0)} x'_d \sin \varphi_{(0)}; \quad (9)$$

з демпферними контурами

$$E''_{q(0)} \approx E''_{(0)} \approx U_{(0)} + I_{(0)} x''_d \sin \varphi_{(0)}. \quad (10)$$

Середні значення  $x'_d$ ,  $x''_d$  та  $E'_{q(0)}$  і  $E''_{q(0)}$  у відносних одиницях виміру для машин потужністю до 100 МВт при номінальному навантаженні та  $\cos \varphi = 0,8$  до початку перехідного процесу відповідно складають:

турбогенератора – 0,2; 0,13 та 1,12; 1,078;

гідрогенератора – 0,35; 0,25 та 1,15; 1,21.

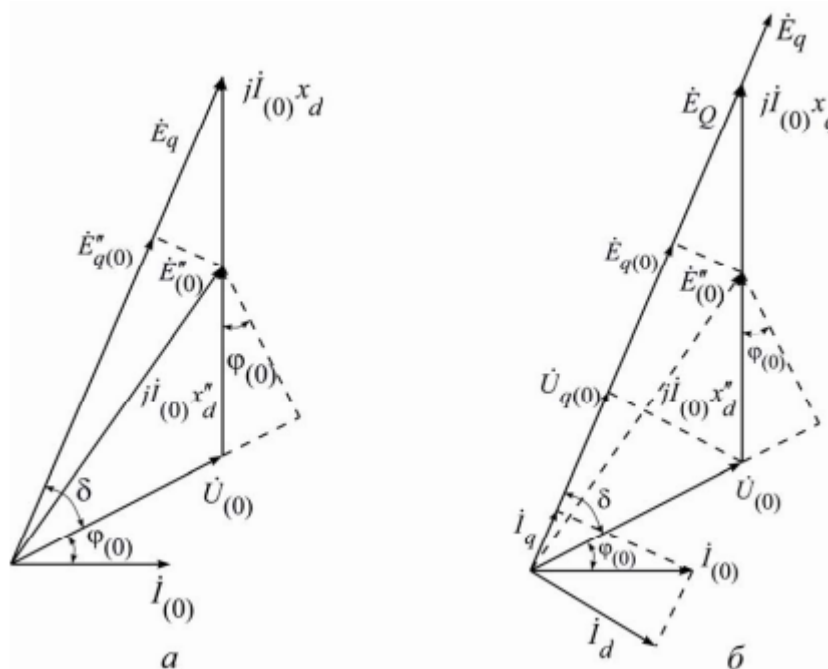


Рис. 1. . Векторні діаграми синхронної машини до початку перехідного процесу: *a* – неявнополусної; *б* – явнополусної

Оскільки перехідна та надперехідна е.р.с. близькі до одиниці, у приблизних розрахунках при будь-яких значеннях навантаження, що передують КЗ, часто беруть  $E'_{*q(0)} = 1$ ,  $E''_{*q(0)} = 1$ , а коли потрібно врахувати навантаження попереднього режиму машини, для визначення е.р.с. використовують вирази (3) та (7).

Початкове значення періодичної складової струму трифазного КЗ визначають за результирующим опором короткозамкненого кола мережі в іменованих  $x_{рез}$  або відносних  $x_{(б)рез}$  одиницях виміру та перехідної е.р.с.  $E'_{(0)}$  з відсутністю у машині демпферних контурів чи надперехідної е.р.с.  $E''_{(0)}$  – за їх наявності.

Якщо короткозамкнене коло мережі живиться від кількох джерел з визначеною еквівалентною е.р.с.  $E''_{\Sigma}$ , а результируючий опір виражено в

іменованих одиницях виміру, то початкове значення періодичної складової струму КЗ

$$I_{П0}^{(3)} = E_{\Sigma}'' / (\sqrt{3}x_{рез}). \quad (11)$$

Якщо е.р.с. та опір брати у відносних одиницях виміру, то

$$I_{П0}^{(3)} = E_{\Sigma}'' I_{\delta} / x_{*\delta рез}, \quad (12)$$

де  $I_{\delta}$  – базисний струм, який відповідає ступеню напруги, де визначається струм КЗ.

У приблизних розрахунках струму КЗ можна скористатися також середніми значеннями показників елементів СЕП (табл. 1).

Таблица 1

**Середні відносні значення  $x''_{*d}$  і  $E''_{*}$  елементів СЕП при нормальних умовах експлуатації**

Елемент СЕП	$x''_{*d}$	$E''_{*}$
Турбогенератор потужністю до 100 МВт	0,125	1,08
Турбогенератор потужністю 100-500 МВт	0,2	1,13
Гідрогенератор з демпферними обмотками	0,2	1,13
Гідрогенератор без демпферних обмоток	0,27	1,18
Синхронний компенсатор	0,2	1,2
Синхронний двигун	0,2	1,1
Асинхронний двигун	0,2	0,9
Узагальнене навантаження	0,35	0,85

При відомому попередньому режимі СЕП для визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ доцільним буде принцип накладання. Відповідно до останнього шуканий струм знаходять шляхом накладання власне аварійного струму на струм попереднього режиму. Дійсний струм отримують як результат накладання низки умовних струмів, кожен з яких відповідає дії однієї або ж кількох е.р.с. при ввімкнених інших елементах схеми.

Із значною кількістю е.р.с. у схемі СЕП визначення початкового значення періодичної складової струму КЗ спрощується, якщо скористатися теоремою про активний двополюсник. Відповідно до теореми струм в точці КЗ можна знайти як суму попереднього струму  $I_{(0)}$ , у вітках схеми та аварійної складової струму  $I_{ав}$  від дії е.р.с., яка дорівнює значенню напруги  $U_{к(0)}$ , прикладеної в цій точці в попередньому режимі.

Аварійна складова струму при зазначеній умові

$$I_{ав} = -U_{к(0)} / x_{*экк}, \quad (13)$$

де  $x_{*экк}$  – вхідний опір схеми з боку КЗ, обчислений за умови, що всі е.р.с. у схемі дорівнюють нулю.

Струм та напруга, що розглядаються в  $j$ -й вітці схеми при КЗ у точці  $K$ , визначаються виразами:

$$I_j = I_{jk} + I_{j(0)}; \quad (14)$$

$$U_j = U_{jk} + U_{j(0)}, \quad (15)$$

де  $I_{jk} = I_{кСjk}$ ;  $c_{jk}$  — коефіцієнт розподілу струму для  $j$ -ї вітки схеми при КЗ у точці  $K$ .

Вплив навантаження мережі на початкове значення періодичної складової струму КЗ залежить від значення залишкової напруги в точці його ввімкнення. Чим далі джерело живлення СЕП від точки КЗ та чим ближче місце ввімкнення навантаження до цієї точки, тим більший вплив навантаження на збільшення струму КЗ. Звичайно, при визначенні струму КЗ ураховують лише ті навантаження чи окремі двигуни, які безпосередньо приєднані до точки КЗ або ж перебувають на невеликій електричній відстані від неї.

При КЗ у мережі після малопотужних трансформаторів, реакторів, довгих кабельних ліній (дають значну електричну віддаленість) на результуючий опір кола КЗ впливає, в основному, опір таких елементів. Можна вважати, що за цих умов живлення точки КЗ здійснюється від джерела необмеженої потужності ( $S_{GS} = \infty$ ;  $x''_{GS} \approx 0$ ;  $E''_{GS} = U_{*GS} = 1 = const$ ). Періодична складова струму КЗ – незатухаюча ( $I_{\Pi 0} = I_{\Pi t}$ ) і в подібних випадках визначається

$$I_{\Pi 0}^{(3)} = I_{\delta} / x_{* \delta \text{ рез}}. \quad (16)$$

Аналогічно знаходять потужність КЗ

$$S_{\kappa 0}^{(3)} = S_{\delta} / x_{* \delta \text{ рез}}. \quad (17)$$

Значення струму та потужності, отримані за (16) та (17), будуть дещо завищеними порівняно з дійсними значеннями, оскільки реально  $x''_{GS} > 0$ .

## 2. Періодична складова струму короткого замикання у довільний момент часу

Зміна струму КЗ обумовлена розмагнічувальною дією реакції статора синхронного генератора, затуханням вільних складових струму та дією пристрою АРЗ. Діюче значення періодичної складової струму основної гармоніки частоти

$$I_{\Pi t} = \sqrt{I_{d \Pi t}^2 + I_{q \Pi t}^2}. \quad (18)$$

У разі виникнення КЗ на затискачах генератора та зв'язаного з ним збільшення струму збудження періодичні складові струму обмотки статора синхронної машини за осями  $d$  та  $q$  у довільний момент часу можна знайти:

$$\begin{aligned} I_{d \Pi t} = & E_{q(0)} / x_d + (E'_{q(0)} / x'_{d de} - E_d / x_d) \exp(-t / T'_d) + (E''_{q(0)} / x''_d - \\ & - E'_{q(0)} / x'_{d de}) \exp(-t / T''_d) + \Delta I_{np} F_d(t) = I_{\infty} + (I' - I_{\infty}) \exp(-t / T_d) + \\ & + (I'' - I') \exp(-t / T''_d) + [(E_{q np} - E_{q(0)}) / x_d] F_d(t); \end{aligned} \quad (19)$$

$$I_{q \Pi t} = (U_{d(0)} / x''_q - U_{d(0)} / x_q) \exp(-t / T''_q). \quad (20)$$

Тут  $I_\infty$ ;  $I'$ ;  $T''$  – періодичні складові усталеного, перехідного та надперехідного струмів КЗ відповідно;

- надперехідні опори за осями  $d$  та  $q$  :

$$x''_{d\ de} = x_d(T'_d / T_{d0}) \approx x_d(T'_f + T'_{de}) / (T_{f0} + T_{de0}) \approx (0,9...1)x_d; \quad (21)$$

$$x''_q = x_q - x''_{aq} / x_{qe}; \quad (22)$$

- постійні часу затухання струмів:

$$T'_d \approx T'_f + T'_{de};$$

$$T''_d \approx \sigma' T'_f + T'_{de} / (T'_f + T'_{de});$$

$$T''_q = T_{qe0}(x''_q / x_q);$$

- постійна часу обмотки збудження при замкненій обмотці статора та розімкненій демпферній обмотці

$$T_f = T_{f0}(x'_q / x_q) = T_{f0}(1 - x''_{ad}) / (x_d x_q);$$

- постійна часу демпферної обмотки при замкненій обмотці статора та розімкненій обмотці збудження

$$T_{de} = T_{de0}(1 - x''_{ad}) / (x_d x_{de});$$

- функція  $F_d(t) = \varphi(T'_d, T''_d, T_e, T_{\sigma de})$ , де  $T_e$  – постійна часу системи збудження, а  $T_{\sigma de} = x_{\sigma de} / r_{de} = (x_{de} - x_{ad}) / r_{de}$ .

Значення параметрів, що входять до виразів для визначення постійних часу, розраховують за формулами:

$$T_{f0} = x_f / r_f;$$

$$T_{de} = x_{de} / r_{de};$$

$$\sigma' = 1 - (x''_{ad})^2 / (x_f x_{ad});$$

$$x'_{ad} = x_\sigma x_{ad} / (x_\sigma + x_{ad}) = x_\sigma x_{ad} / x_d;$$

$$x'_f = x_f - x''_{ad} / x_d = x_{\sigma f} + x'_{ad};$$

$$x'_{de} = x_{de} - x''_{ad} / x_d = x_{\sigma de} + x'_{ad};$$

$$T_{qe0} = x_{qe} / r_{qe}.$$

Повний струм у довільний момент часу містить періодичну і аперіодичну складові та складову подвійної частоти (обумовлена несиметрією ротора та наявністю аперіодичної складової струму статора. Наприклад, для фази  $A$

$$\begin{aligned} i_A = & i_{\Pi A} + i_{aA} + i_{qA} = i_{\Pi A} - (U_{q(0)} \cos \gamma_{(0)} + \\ & + U_{d(0)} \sin \gamma_{(0)}) [(x''_d + x''_q) / (2x''_d x''_q)] \exp(-t / T_a) - \\ & - [U_{q(0)} \cos(2\omega t - \gamma_{(0)}) - U_{d(0)} \sin(2\omega t + \\ & + \gamma_{(0)})] \times [(x''_q - x''_d) / (2x''_d x''_q) \exp(-t / T_a)], \end{aligned} \quad (23)$$

де  $T_a = x_2 / r$ ;  $x_2 = 2x''_d x''_q / (x''_d + x''_q)$  – опір зворотної послідовності.

За виразом (23) робимо висновок: точний розрахунок струмів КЗ у довільний момент часу в складних схемах СЕП, що, крім джерел живлення,

містять потужні навантаження, утруднений. Тому при відсутності потреби у високій точності розрахунків для обчислення струмів КЗ у довільний момент часу користуються наближеними методами розрахунку.

### 3. Струм короткого замикання в усталеному аварійному режимі

В усталеному аварійному режимі всі вільні струми, що з'явилися в момент часу КЗ, у синхронній машині затухають і зміна напруги на її затискачах під дією пристрою АРЗ припиняється.

Параметри короткозамкненого кола мережі в усталеному режимі можна визначити на основі характеристик холостого ходу і короткого замикання синхронної машини, її синхронних опорів у поздовжній та поперечній осях, опору розсіювання статора та граничного струму збудження  $I_{fep}$ .

Синхронний опір у поздовжній осі визначається:

$$x_{*d} = c / \kappa_c, \quad (24)$$

де  $c$  – відносне значення е.р.с. за ненасиченою характеристикою неробочого ходу при  $I_{*f}=1$ ;  $\kappa_c$  – відношення короткого замикання (відносний усталений струм при трифазному КЗ на затискачах генератора до відносного струму збудження, рівного одиниці). У неявнополюсних машин  $x_d \approx x_q$ , а у явнополюсних –  $x_q \approx 0,6x_d$ . При цьому  $c = 1,05 \dots 1,2$ .

Для спрощення розрахунків струмів КЗ криволінійну характеристику неробочого ходу  $E_q = f(I_f)$  спрямляють у точці з координатами  $E_{*q}=1$ ;  $I_{*f}=1$ . Тоді

$$x_{*d} = 1 / \kappa_c; \quad (25)$$

$$E_{*q} = I_{*f}. \quad (26)$$

Струм збудження явнополюсної синхронної машини у відносних одиницях виміру при заданому навантаженні можна знайти з векторної діаграми (рис. 2), урахувавши (26):

$$E_q \approx \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I x_d)^2}. \quad (27)$$

З векторної діаграми:

$$E_q = U_q + I_d x_d = I_d (x_d + x_{zu}) + I_q r_{zu};$$

$$I_q = I_d \operatorname{ctg} \varphi = I_d r_{zu} / (x_{zu} + x_q).$$

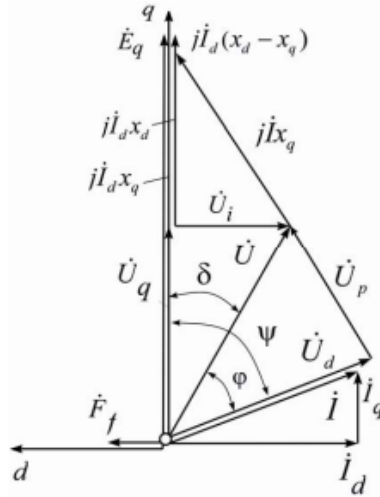


Рис. 2. Векторна діаграма явнополюсної синхронної машини

Після перетворення останніх виразів отримаємо:

$$I_d = E_q (x_q + x_{зш}) / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]; \quad (28)$$

$$I_q = E_q r_{зш} / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]; \quad (29)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = E_q \sqrt{(x_q + x_{зш})^2 + r_{зш}^2} / [(x_d + x_{зш})(x_q + x_{зш}) + r_{зш}^2]. \quad (30)$$

Для неявнополюсних синхронних машин вираз (30) спрощується:

$$I = E_q / \sqrt{(x_d + x_{зш})^2 + r_{зш}^2}. \quad (31)$$

Як свідчать практичні розрахунки струмів КЗ, різниця між струмами явно- та неявнополюсних синхронних машин незначна, а їхні приблизні значення можна визначити за (31).

Залежно від електричної віддаленості точки КЗ в усталеному режимі з КЗ можливі два режими роботи генераторів.

- Режим номінальної напруги, який характеризується співвідношеннями параметрів:

$$\begin{aligned} E_q &\leq E_{q \max}; \\ U_{\Gamma} &= U_{\Gamma \text{н}}; \end{aligned} \quad (32)$$

$$I_{\Gamma} \leq I_{кр}; \quad x_{зш} \geq x_{кр},$$

де  $I_{кр}$  та  $x_{кр}$  – критичні струм та опір. При КЗ у точці, відповідній опоріві  $x_{кр}$ , генератор працює з граничним збудженням, коли напруга на затискачах дорівнює номінальному значенню, а струм відповідає критичному значенню.

- Режим граничного збудження:

$$E_q = E_{q \max}; \quad U_{\Gamma} \leq U_{\Gamma \text{н}}; \quad (33)$$

$$I_{\Gamma} \geq I_{кр}; \quad x_{зш} \leq x_{кр}.$$

Критичний опір можна знайти з рівняння

$$(E_{q \max} - U_{\Gamma \text{н}}) / x_d = U_{\Gamma \text{н}} / x_{кр}, \quad (34)$$

звідки

$$x_{кр} = x_d U_{\Gamma \text{н}} / (E_{q \max} - U_{\Gamma \text{н}}). \quad (35)$$

Якщо при визначенні усталеного струму КЗ ураховують узагальнене навантаження, то його звичайно виражають у відносних одиницях виміру при повній робочій потужності навантаження і середній номінальній напрузі живильної мережі. У такому разі  $x_{*нв} = 1,2$ ;  $E_{*нв} = 0$ .