

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

КАФЕДРА ТГЕ

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
«РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ І АВТОМАТИКА»

*для студентів спеціальності 6. 145 «Гідроенергетика»
денної й заочної форм навчання*

Запоріжжя
2021

Релейний захист і автоматика. Методичні вказівки до практичних занять студентів ІННІ ЗНУ спеціальності 6. 145 «Гідроенергетика» денної й заочної форм навчання /Укл. Радченко В. В. - Запоріжжя: ІННІ ЗНУ, 2021. – 22 с.

Укладач: **В. В. Радченко, к. т. н., доцент**

Відповідальний за випуск: **завідуючий кафедри ТГЕ
д. т. н. А. В. Чейлитко**

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Характеристики симетричного короткого замикання.....	5
1. 1 Загальні відомості.....	5
1. 2 Вирази параметрів в іменованих і відносних одиницях.....	6
1. 3 Перехід від магнітних величин до еквівалентних електричних.....	9
1. 4 Визначення еквівалентних параметрів в ланцюзі короткого замикання.....	10
2. Визначення струмів симетричного короткого замикання	
2. 1 Визначення початкових струмів трифазного КЗ в схемі без відгалужень.....	12
2. 2 Визначення сталих струмів трифазного КЗ в схемі без відгалужень.....	13
3. Завдання до самостійної практичної роботи.....	15
Контрольні запитання до матеріалу.....	17
Список літератури.....	18
ДОДАТОК А Приклад розрахунку надперехідних струмів КЗ.....	19

ВСТУП

У трифазних електроенергетичних системах змінного струму найбільш небезпечними видами перехідних режимів та пошкоджень є короткі замикання (КЗ). При КЗ виникають великі струми, які можуть викликати руйнування електрообладнання, устаткування ГЕС й елементи ліній електропередач, а також можуть привести до суттєвого розладу нормальної роботи головної схеми ГЕС, окремого вузла або навіть всієї енергосистеми, унаслідок зниження напруги.

У багатьох випадках трифазне КЗ пов'язане з найважчим аварійним режимом енергетичного обладнання, тому з цієї причини визначення струму трифазного КЗ є таким, що визначає та є обов'язковою умовою вибору вимикачів, якими відключається пошкоджений елемент; електричних апаратів, способу кріплення і охолодження струмопровідних частин, аналізу й перевірки вразливих складових електроустановок на предмет їх механічної (електродинамічної) і термічної стійкості.

У сучасних розгалужених електричних системах точний розрахунок струмів КЗ з урахуванням всіх діючих умов досить складний – тому для таких розрахунків струмів КЗ широко застосовується обчислювальна техніка на основі комп'ютерних технологій.

Мета методичних рекомендацій – надати студентам загальні уявлення про методику практичного розрахунку симетричного струму КЗ в заданій точці простої електричної мережі при відомих параметрах її елементів в надперехідному і сталому режимах.

Саме такі відомості необхідні для вибору обладнання головних схем й організації РЗ ГЕС.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИМЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Симетричне КЗ відноситься до найважчих перехідних аварійних режимів обладнання, що безпосередньо впливає на його функціональну здатність. Тому важливо визначати його характеристики й використовувати їх в організації РЗ.

1.1.ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Коротким замиканням є безпосереднє з'єднання між будь-якими струмопровідними елементами різних фаз: фази і нульового дроту або фази із землею, не передбачене нормальними умовами роботи й порушуюче нормальний режим електроустановки. Різні види КЗ позначаються наступними індексами:

- (3) – трифазне КЗ;
- (2) – двофазне КЗ;
- (1) – однофазне КЗ;
- (11) – двофазне КЗ на землю.

Трифазне КЗ є симетричним, пов'язане з найважчим аварійним режимом. Решта інших видів КЗ є несиметричними. В цілому, в аварійних умовах доводиться зважати на трифазний КЗ для вибору електричних апаратів і інших ланцюгів. При розрахунку струму КЗ визначаються наступні величини:

I_y – ударний струм КЗ для перевірки електричних апаратів, шин і ізоляторів на електродинамічну стійкість;

I'' – початкове значення що періодичною складає струму КЗ (початкове значення надперехідного струму КЗ)

I_g – найбільше значення повного діючого струму КЗ, для перевірки електричних апаратів на стійкість протягом першого періоду КЗ;

$I_{0.2}$ – значення I_t при $t=0.2$ сек, для перевірки вимикачів за струмом, що ними відключається;

I_∞ – значення сталого діючого струму КЗ, за яким перевіряють електричні апарати, прохідні ізолятори і кабелі на термічну стійкість;

$S_{0.2}$ – потужність КЗ за часом $t=0.2$ сек, для перевірки вимикачів за відключенням потужності, що гранично допускається.

Елементи електричних систем володіють активними і реактивними опорами (R , X_L і X_C). При виникненні КЗ загальний електричний опір ланцюга системи від джерела живлення до місця КЗ зменшується. Таким чином, при раптовому виникненні КЗ електрична система є коливальним контуром. За час КЗ від моменту його виникнення до моменту відключення пошкодженої ділянки в ланцюзі протікає перехідний процес що характеризується тим, що в кожній з фаз разом з періодичною складовою струму (точніше, коливальною) має місце складова постійного знаку або аперіодична.

Періодична складова I_r струму КЗ однакова для всіх трьох фаз і визначається для будь-якого моменту часу значенням ординати огинаючої, діленим на $\sqrt{2}$. Аперіодична складова I_a різна для всіх трьох фаз і змінюється залежно від моменту виникнення КЗ. На рис.1. 1 показані складові діючого струму КЗ.

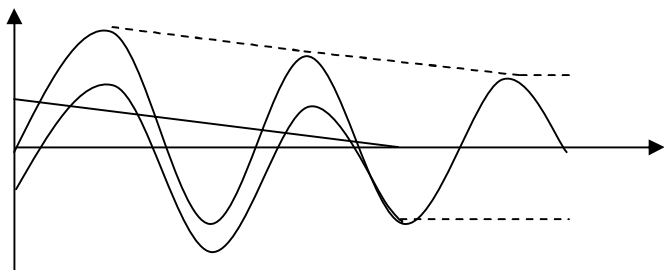


Рис. 1. 1 Складові струму КЗ.

Кількісні характеристики складових струмів КЗ визначаються параметрами режимів й параметрами обладнання на момент замикання.

1. 2 ВИРАЗИ ПАРАМЕТРІВ В ІМЕНОВАНИХ І ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЯХ

Розрахунковими величинами для обчислення струмів КЗ є: напруга (ЕРС), потужність, активний, реактивний і повний опори елементів системи. Параметри елементів електричних систем можуть бути задані в іменованих числах, у відсотках або відносними одиницями.

Відносною величиною вважають відношення даної величини до однойменної, прийнятої за основну (базисну); *процентною* – відношення даної величини у відсотках до однойменної.

$$A_{*б} = \frac{A}{A_б}, \quad (1. 1)$$

$$A_б \% = \frac{A}{A_б} \cdot 100, \quad (1. 2)$$

У випадку, коли $A_б = A_H$ співвідношення (1. 1), (1. 2) приймають вигляд:

$$A^*_H = \frac{A}{A_H}, \quad (1. 3)$$

$$A_H \% = \frac{A}{A_H} \cdot 100, \quad (1. 4)$$

де зірочка * вказує, що величина наведена в відносних одиницях.

У довідковій літературі напруга і потужність зазвичай даються в іменованих числах; значення реактивного опору генераторів – у відносних одиницях; повний опір трансформаторів і реактивний опір реакторів – у відсотках; погонний опір ліній передач – в Омах на одиницю довжини. При розрахунку струму КЗ всі вхідні в розрахунок величини можна виражати в іменованих одиницях або відносних одиницях. У експлуатаційній практиці

загальноприйнятим є розрахунок у відносних одиницях, оскільки більшість розрахункових виразів мають досить просту структуру, тому можна швидко визначити обчислювані величини. Для виразу всіх величин у відносних одиницях слід встановити базисні величини. Як незалежні базисні величини зазвичай обирають базисну потужність S_{σ} і базисну напругу U_{σ} .

Для базисної потужності доцільно приймати значення 1000, 100 000 кВт і т. д. або номінальну (що задається) потужність одного з джерел живлення. За базисну напругу береться номінальна напруга того ступеня, для якого визначається струм КЗ.

В якості номінальної середньої напруги рекомендовано обирати: 400, 230, 154, 115, 37, 10.5, 6.3, 3.15, 0.4 кВ. При спрощеному розрахунку базисні величини будуть:

$$S_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot U_{\sigma} \cdot I_{\sigma}, \quad I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\sigma}}, \quad Z_{\sigma} = \frac{U_{\phi\sigma}}{I_{\sigma}} = \frac{U_{\sigma}}{\sqrt{3} \cdot I_{\sigma}}$$

Відповідно до формули (1. 1) електричні величини, задані в іменованих одиницях і віднесені до базисних умов, приймуть вигляд:

$$E^*_{\sigma} = \frac{E}{U_{\sigma}}, \quad U^*_{\sigma} = \frac{U}{U_{\sigma}}, \quad I^*_{\sigma} = \frac{I}{I_{\sigma}}, \quad S^*_{\sigma} = \frac{S}{S_{\sigma}},$$

$$Z^*_{\sigma} = \frac{Z}{Z_{\sigma}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\sigma} \cdot Z_{\sigma}}{U_{\sigma}} = Z \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}^2}, \quad (1. 5)$$

Зазвичай в каталогах опори генераторів, трансформаторів, реакторів і інших елементів задаються за номінальних умов, тобто $I_{\sigma} = I_{ном}$, $U_{\sigma} = U_{ном}$, $S_{\sigma} = S_{ном}$, тоді розрахункова формула (1. 5) номінальних відносних опорів прийме вигляд:

$$Z^*_{ном} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{ном} \cdot Z}{U_{ном}} = Z \cdot \frac{S_{ном}}{U_{ном}^2}, \quad (1. 6)$$

Якщо відносні величини опорів виражені у відсотках $Z\% = 100 \cdot Z^*_{ном}$ або $U_K\% = Z\%$, то опори елементів в іменованих одиницях з формули (1. 6) визначаються так:

$$Z = \frac{Z^*_{ном} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{Z\% \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot S_{ном}}, \quad (1. 7)$$

або

$$Z = \frac{U_K^2\% \cdot U_{ном}^2}{100 \cdot S_{ном}}, \quad (1. 8)$$

Для приведення відносного опору, заданого за номінальної умови, до базисних підставимо у формулу (1. 5) значення Z з формули (1. 7):

$$Z^*_{\sigma} = Z^*_{ном} \cdot \frac{I_{\sigma} \cdot U_{ном}}{I_{ном} \cdot U_{\sigma}} = Z^*_{ном} \cdot \frac{S_{\sigma} \cdot U_{ном}^2}{S_{ном} \cdot U_{\sigma}^2}, \quad (1. 9)$$

Аналогічні формули можна отримати для відносних значень активного і реактивного опорів, підставивши замість Z символи r або X .

Активний опір елементів системи в Омах можна отримати за перетином, матеріалу й довжиною провідників або по величині активних втрат в даному елементі. Якщо відомі втрати потужності в трифазному елементі за номінальних умов

$$\Delta P_n = 3 \cdot I_n^2 \cdot r,$$

то шуканий опір дорівнює

$$r = \frac{\Delta P_n}{3 \cdot I_n^2}.$$

Цей опір у відносних одиницях по відношенню до номінальних умов дорівнює:

$$r^*_{n} = \frac{r}{r_n} = \frac{\Delta P_n}{3 \cdot I_n^2 \cdot r_n} = \frac{\Delta P_n}{S_n},$$

$$\text{де } R = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n}.$$

За повним і активним опором знаходиться значення реактивного опору:

$$X = \sqrt{Z^2 - r^2} \quad \text{або} \quad X_* = \sqrt{Z_*^2 - r_*^2}.$$

Якщо відомі погонні реактивні й активні опори лінії X_o Ом/км. і r_o Ом/км., то відносний опір цих елементів буде дорівнювати:

$$X^*_{o.l.} = X_o \cdot L \cdot \frac{S_{\phi}}{U_n^2}, \quad r^*_{o.l.} = r_o \cdot L \cdot \frac{S_{\phi}}{U_n^2},$$

де X_o – табличні значення;

$$r_o = \frac{100}{\gamma \cdot S}, \quad [\text{Ом/км}]$$

де γ – питома провідність провідника $\text{км}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$;

S – перетин провідника однієї фази мм^2 .

Якщо відомі режим роботи джерела живлення (генератора), тобто його U, I, φ і внутрішнє падіння напруги в джерелі, то ЕРС джерела живлення у відносних одиницях по відношенню до базисних або номінальних умов визначається таким чином:

$$E^*_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{U_{\phi.o.}} = \frac{E}{U_{\phi}} \quad \text{и} \quad E^*_{n} = \frac{E_{\phi}}{U_{\phi.n.}} = \frac{E}{U_n}, \quad (1.10)$$

$$\text{де } E_{\phi} = \sqrt{(U_{\phi} \cdot \cos \varphi + I \cdot r)^2 + (U_{\phi} \cdot \sin \varphi + I \cdot X)^2},$$

$$\text{тому що } \frac{U_{\phi}}{U_{\phi.n.}} = U^*, \quad \frac{I \cdot r}{U_{\phi.n.}} = I^*_{n} \cdot r^*_{n}, \quad \frac{I \cdot X}{U_{\phi.n.}} = I^*_{n} \cdot X^*_{n},$$

тоді співвідношення приймає наступний вигляд:

$$E_* = \sqrt{(U^* \cdot \cos \varphi + I^*_{n} \cdot r^*_{n})^2 + (U^* \cdot \sin \varphi + I^*_{n} \cdot X^*_{n})^2}, \quad (1.11)$$

1.3 ПЕРЕХІД ВІД МАГНІТНИХ ВЕЛИЧИН ДО ЕКВІВАЛЕНТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ

При розрахунку електричних ланцюгів з різними ступенями напруги магнітні зв'язки необхідно замінити еквівалентними електричними, тобто параметри елементів системи привести до одного ступеня напруги, який приймають в даній схемі за основну (базисну).

Приведення параметрів елементів і ЕРС різних ступенів трансформації до основного ступеня здійснюється на основі співвідношень, які витікають із загальної теорії трансформаторів. При розрахунку в іменованих одиницях приведення ЕРС (напруги) струмів і опорів до основного ступеня в електричному ланцюзі включених каскадних трансформаторів здійснюється у відповідність з формулами:

$$E_{\text{прив.}} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_n) \cdot E;$$

$$U_{\text{прив.}} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_n) \cdot U;$$

$$I_{\text{прив.}} = \frac{1}{(K_1 \cdot K_2 \dots K_n)} \cdot I;$$

$$Z_{\text{прив.}} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_n)^2 \cdot Z;$$

де $K_1 K_2 \dots K_n$ – коефіцієнти трансформації всіх трансформаторів на шляху між ланцюгом, що приводиться, і прийнятим основним ступенем, визначені в напрямі від вибраного основного ступеня до того ступеня, елементи якого підлягають приведенню.

При розрахунку у відносних одиницях потрібно задатися базисними умовами S_{δ} , U_{δ} на одному із ступенів заданої схеми. Базисні величини на будь-якому іншому ступені визначаються за формулами:

$$U_{\delta, \text{прив.}} = \frac{1}{(K_1 \cdot K_2 \dots K_n)} \cdot U_{\delta};$$

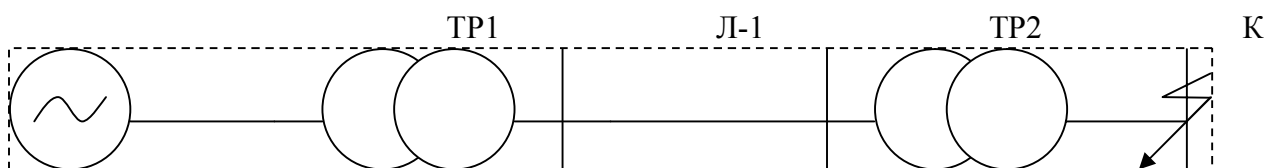
$$I_{\delta, \text{прив.}} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_n) \cdot I_{\delta} = (K_1 \cdot K_2 \dots K_n) \cdot \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}};$$

де $K_1 K_2 \dots K_n$ – коефіцієнти трансформації трансформаторів, визначувані в напрямі від ступеня, де вибрані S_{δ} і U_{δ} , до ступеня для якої обчислюються базисні одиниці $U_{\text{прив.}\delta}$ і $I_{\text{прив.}\delta}$.

Наприклад, треба визначити струм КЗ в т. «К» у відносних одиницях на рис. 1. 2.

Приймаємо $S_{\delta} = 1000$ мВА, $U_{\delta 1} = U_{\text{НГ}}$, $I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}}$, $U_{\delta 2} = \frac{1}{K_{\text{ТР}}} \cdot U_{\delta 1}$,

$$I_{\delta 2} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}}, \quad U_{\delta 3} = \frac{1}{K_{\text{ТР1}} \cdot K_{\text{ТР2}}} \cdot U_{\delta 1}, \quad I_{\delta 3} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 3}}.$$



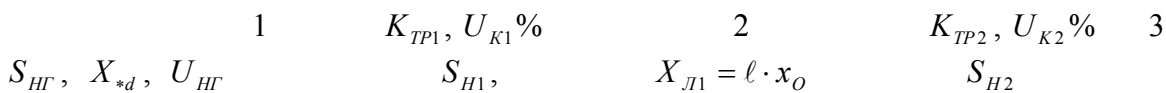


Рис. 1. 2 Розрахункова схема

Визначаємо в загальному вигляді відносні базисні опори елементів ланцюга по формулах (1. 9), (1. 10) і ланцюзі в цілому:

$$\begin{aligned}
 X_{*б.Г.}'' &= \frac{X_{*d}'' \cdot U_{б1}^2}{S_{HG}} \cdot \frac{S_{б.}}{U_{б1}^2}; & X_{*б.ТP1} &= \frac{U_{K1} \% \cdot U_{б1}^2}{100 \cdot S_{H1}} \cdot \frac{S_{б.}}{U_{б1}^2}; \\
 X_{*б.Л1} &= X_{Л1} \cdot \frac{S_{б.}}{U_{б2}^2}; & X_{*б.ТP2} &= \frac{U_{K2} \% \cdot U_{ном.ВH}^2}{100 \cdot S_{H2}} \cdot \frac{S_{б.}}{U_{б2}^2}; \\
 X_{*б\Sigma} &= X_{*б.Г.}'' + X_{*б.ТP1} + X_{*б.м.} + X_{*б.ТP2}; & I_{*K}^{(3)} &= \frac{E_{*б}''}{X_{*б\Sigma}},
 \end{aligned}$$

де $E_{*б}'' = E_{*Г.ном}'' \cdot \frac{U_{Г.ном}}{U_{б1}}$.

Дійсний струм КЗ в точці «К» в загальному вигляді буде: $I_K^{(3)} = I_{*K}^{(3)} \cdot I_{б3}$

1. 4 ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЛАНЦЮЗІ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Струм в місці КЗ визначається відношенням ЕРС еквівалентного джерела живлення до еквівалентного опору КЗ ланцюга.

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{E}_{\phi\varphi}}{Z_{\varphi}} \quad \text{або} \quad \dot{I}_K = \frac{\dot{E}_{\phi\varphi}}{X_{\varphi}}, \quad \text{нехтуючи } R - \text{активним}$$

Цих еквівалентних значень можливо набути після ряду перетворень розрахункової схеми заміщення для даної точки КЗ шляхом поступового переходу від складної до простої конфігурації, показаної на рис. 1. 3.

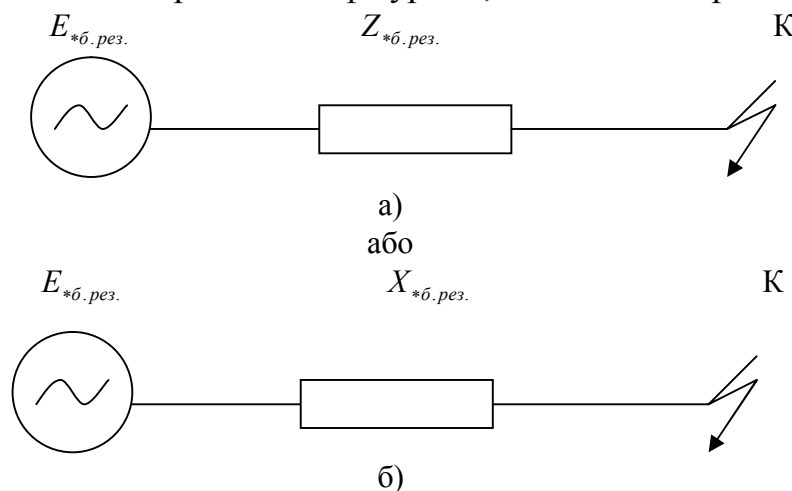


Рис. 1. 3 Вигляд еквівалентної розрахункової схеми.

Основні способи спрощення схеми наведені в табл. 1. 1. Заміна двох або декількох джерел живлення одним еквівалентним, шляхом їх об'єднання можливо лише в тих випадках, коли джерела живлення знаходяться приблизно в однакових умовах по відношенню до місця КЗ. Найпростіший, але й досить наближений спосіб полягає в заміні всіх джерел живлення ЕРС рівними

одиниці, тобто $\Sigma_{*б.рез.} = 1$, і приведення дійсної схеми до схеми заміщення з одним результуючим опором ($Z_{*б.рез.}^*$) вигляду (див. рис. 1. 3).

Застосовується і інший спосіб розрахунку перехідного процесу при трифазному КЗ, заснований на використанні розрахункових кривих, побудованих для типових гідро– і турбогенераторів, забезпечених АРЗ і без АРЗ. Цей спосіб в даній рекомендації не розглядається.

Таблиця 1. 1 Основні методи спрощення схеми

Вихідна схема	Спрощена схема	Формули переходу
		$\frac{1}{x} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}$
		$x = \sum_{i=1}^n x_i$
		$x_1 = \frac{x_{12} \cdot x_{13}}{x_{12} + x_{13} + x_{23}}$ $x_2 = \frac{x_{12} \cdot x_{23}}{x_{12} + x_{13} + x_{23}}$ $x_3 = \frac{x_{23} \cdot x_{13}}{x_{12} + x_{13} + x_{23}}$
		$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3}$ $x_{13} = x_1 + x_3 + \frac{x_1 \cdot x_3}{x_2}$ $x_{23} = x_2 + x_3 + \frac{x_2 \cdot x_3}{x_1}$
		$x_1 = x_1 \cdot x_{n+1} \cdot \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{x_i}$ $x_2 = x_2 \cdot x_{n+1} \cdot \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{x_i}$ $x_K = x_n \cdot x_{n+1} \cdot \sum_{i=1}^{n+1} \frac{1}{x_i}$

Наведені еквівалентні перетворення дозволяють спрощувати реальні схеми – схемами заміщення й одержувати еквівалентні схеми для визначення необхідних параметрів КЗ.

2. ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ СИМЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Струми симетричного трифазного КЗ мають визначальне значення в виборі обладнання первинних схем та уставок РЗА. Визначення струмів залежить від фази КЗ та параметрів обладнання. Virізнюють надперехідні, перехідні й сталі значення струмів КЗ.

2.1 ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ СТРУМІВ ТРИФАЗНОГО КЗ В СХЕМІ БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ

У практиці релейного захисту розрахунок струмів КЗ виконують з урахуванням дійсних коефіцієнтів трансформації, які є відношенням міжфазних напруг холостого ходу обмоток трансформатора при встановлених на них відгалуженнях.

При обчисленні надперехідних струмів генератори в схемі заміщення представляють надперехідною ЕРС E_d'' і надперехідним індуктивним опором x_d'' .

Надперехідний опір генераторів в іменованих одиницях визначається по формулі (1. 7), приведене до базисних умов по формулі (1. 9).

Надперехідна ЕРС генераторів у відносних одиницях віднесених до їх номінальних параметрів, визначається по формулі (1. 11).

$$E_{*Г.ном.}'' = \sqrt{(U_{*Г.ном.} \cdot \cos \varphi_{Г.ном.})^2 + (U_{*Г.ном.} \cdot \sin \varphi_{Г.ном.} + I_{*Г.ном.} \cdot x_{*d}'')^2}$$

Надперехідна ЕРС генераторів, приведена до базисних умов, визначається за формулою:

$$E_{*б.}'' = E_{*Г.ном.}'' \cdot \frac{U_{Г.ном.}}{U_{б.}}$$

Після приведення розрахункової схеми до вигляду на рис. 1. 3 відносний початковий надперехідний струм при трифазному КЗ в точці «К», приведений до базисних умов і однаковий на всіх ступенях напруги, визначиться по формулі:

$$I_{*К}^{(3)} = \frac{E_{*б.}''}{x_{*б\Sigma}}$$

Дійсний струм на будь якому ступені напруги визначиться по формулі:

$$I_{стунени}^{(3)} = I_{*К}^{(3)} \cdot I_{б.стунени}$$

2.2 ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛИХ СТРУМІВ ТРИФАЗНОГО КЗ В СХЕМІ БЕЗ ВІДГАЛУЖЕНЬ

У практичних аналітичних методах розрахунку сталих струмів КЗ генератори вважають ненасиченими тобто їх характеристики ХХ, задані функцією $E_r = f(I_B)$, вважають прямолінійними. При такому допущенні сталий

струм генераторів при трифазному КЗ за зовнішнім реактивним опором (при $t = \infty$) визначається за формулою:

$$I_{\infty}^{(3)} = E_{\infty} \cdot (x_{\infty} + x_{\text{вн}}),$$

де E_{∞} і x_{∞} – розрахункові ЕРС збудження і подовжній синхронний опір.

Або у відносних одиницях, приведенних до номінальних (базисним) умов:

$$I_{*G\infty}^{(3)} = \frac{E_{*G\infty}}{(x_{*G\infty} + x_{*\text{вн}})}, \quad (2.1)$$

де **фіктивний реактивний опір генератора**, знайдений по випрямленій характеристиці ХХ:

$$x_{*G\infty} = \frac{E_{*G\infty}}{I_{*G\infty}^{(3)}} = \frac{E_{*G\infty}}{(BKZI_{*6})}, \quad (2.2)$$

Фіктивна ЕРС генератора, підібрана емпірично по випрямленій ХХХ при $K=0.8$ для турбогенераторів і при $K=0.7$ для гідрогенераторів:

$$E_{*G\infty} = 0.2 + K \cdot I_{*B}, \quad (2.3)$$

відносна величина струму збудження генератора:

$$I_{*B} = \sqrt{(U_{*G} \cdot \cos \varphi_G)^2 + (U_{*G} \cdot \sin \varphi_G + I_{*G} \cdot x_{*d})^2}$$

Випрямлена характеристика ХХ (ХХХ) дає дійсне значення струму при трифазному КЗ на затисках генератора і досить точні значення при КЗ в зовнішньому ланцюзі. При визначенні сталого струму КЗ залежно від віддаленості КЗ можливі 2 режими.

Перший режим. Залишкова напруга на затисках джерела живлення під час КЗ рівна $U_{\text{ном.}}$ при струмі збудження меншому граничного, і тоді вважають, що,

$x_{\text{вн}} > x_{\text{кр}}$ а струм визначається по формулі, $I_{\infty K}^{(3)} = \frac{U_{\text{Г.ном.}}}{x_{\text{вн.}}}$ тобто в цьому режимі

джерело живлення розглядається як джерело необмеженої потужності $x_{G\infty} = 0$ і $E_{G\infty} = U_{\text{Г.ном.}}$

Другий режим. Залишкова напруга на затисках джерела живлення під час КЗ менше $U_{\text{ном.}}$ при граничному струмі збудження, і тоді вважають, що, $x_{\text{вн}} < x_{\text{кр}}$ а струм визначається по аналогії з формулою (12), тобто

$$I_{*G\infty}^{(3)} = \frac{E_{*np.G.\infty}}{(x_{*np.\infty} + x_{*\text{вн.}})},$$

де $E_{*np.G.\infty}$ і $x_{*np.\infty}$ – фіктивні ЕРС і реактивний опір генератора, які визначаються при $I_{*B.\text{пред.}}$ за формулами (2.2) і (2.3).

Для турбогенераторів нормального типу приймають $i_{*B.np.} = 4$, для гідрогенераторів – $i_{*B.np.} = 3.2$.

Дійсний струм в місці КЗ (на ступені напруги «К» див. рис. 1.3) визначається по формулі:

$$I_{K\infty}^{(3)} = I_{*G\infty}^{(3)} \cdot I_{\text{б.ступени}}$$

Критичне значення x визначається з умови одночасного дотримання двох режимів при граничному збудженні:

$$I_{кр.\infty} = \frac{U_{Г.ном.}}{x_{кр.\infty}},$$

$$U_{Г.ном.} = E_{Г.ном} - I_{кр.\infty} \cdot x_{кр.\infty}.$$

Вирішуючи ці рівняння відносно $x_{кр.\infty}$, отримаємо:

$$x_{кр.\infty} = \frac{x_{нр.\infty} \cdot U_{Г.ном.}}{(E_{нр.\infty} - U_{Г.ном.})},$$

або у відносних одиницях, віднесених до номінальних (базисних) умов:

$$x_{кр.\infty}^* = \frac{x_{нр}^*}{(E_{нр.\infty}^* - 1)}.$$

3 ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

Завдання № 1

За заданим варіантом параметрів елементів електричної схеми таблиці 3. 1 на рис. 3. 1 визначити:

а) шляхом розрахунку в іменованих одиницях дійсну величину початкового надперехідного струму при трифазному металевому КЗ в точці «К» і в джерелі живлення. При розрахунку активним опором елементів схеми нехтувати;

б) теж, що і за пунктом «а)», тільки шляхом розрахунку у відносних одиницях;

г) шляхом розрахунку в іменованих (або відносних) одиницях дійсну величину сталого струму при трифазному металевому КЗ в точці «К» і в джерелі живлення. Активним опором нехтувати.

Електрична схема з трансформаторними зв'язками до завдання 1

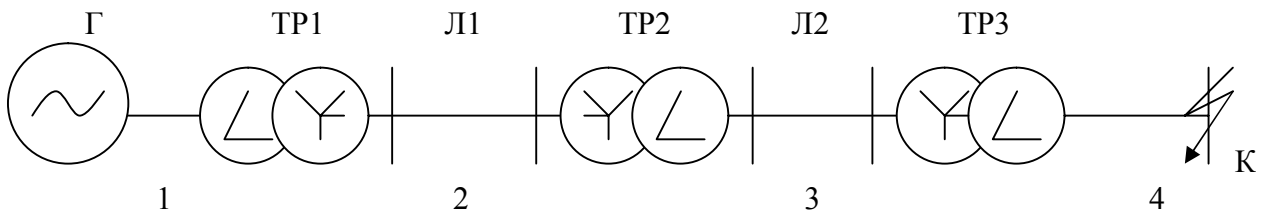


Рис. 3. 1 Розрахункова схема

Таблиця 3. 1 ВАРІАНТИ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ

№ п/п	Генератор, Г							Трансформатор, ТР1			Трансформатор, ТР2			Трансформатор, ТР3			$\ell 1$	$\ell 2$
	S_H МВА	U_H кВ	$\frac{S}{S_H}$ %	$\cos\varphi_H$ в.о.	ОКЗ в.о.	x_{*d}'' о.е.	x_{*d} в.о.	S_H МВА	$\frac{U_{B.ном.}}{U_{H.ном.}}$ кВ/кВ	U_K %	S_H МВА	$\frac{U_{B.ном.}}{U_{H.ном.}}$ кВ/кВ	U_K %	S_H МВА	$\frac{U_{B.ном.}}{U_{H.ном.}}$ кВ/кВ	U_K %	$\frac{x_{y0}}{\ell}$, Ом/км	$\frac{x_{y0}}{\ell}$ Ом/км
1	120	10.5	100	0.8	1.0	0.2	0.9	110	235/10.5	10.0	60	220/115	10.0	40	110/10.0	8.0	0.4/150	0.4/80
2	160	20	100	0.85	0.8	0.125	1.72	125	242/20	11.0	100	230/38.5	12.0	20	35/6.3	6.5	0.4/180	0.4/30
3	90	13.8	100	0.8	0.95	0.266	0.86	90	161/13.8	8.0	70	154/38.5	8.0	20	35/0.4	6.5	0.4/70	0.4/20
4	127	13.8	100	0.85	1.0	0.22	0.8	105	161/13.8	10.0	60	154/38.5	8.5	40	35/10	7.5	0.4/90	0.4/30
5	200	15.75	100	0.8	0.98	0.24	1.0	40	120/15.75	10.5	30	115/11.0	7.5	10	10/0.4	6.0	0.4/90	0.4/30
6	470	20	100	0.85	0.8	0.12	1.8	360	340/20	11.5	270	330/115	11.0	80	110/10	8.5	0.4/250	0.4/60
7	400	20	100	0.75	0.7	0.13	1.7	330	242/20	11.0	240	230/115	10.5	60	110/37.5	8.0	0.4/200	0.4/50
8	15	6.3	100	0.8	0.658	0.16	1.86	12.5	115/6.3	7.0	10	110/11.0	7.0	2.5	10/0.69	6.5	0.4/80	0.4/10
9	120	10.5	85	0.8	1.0	0.2	0.9	110	235/10.5	10.0	60	220/115	10.0	40	110/10.0	8.0	0.4/150	0.4/80
10	90	13.8	60	0.8	0.95	0.266	0.86	90	161/13.8	8.0	70	154/38.5	8.0	20	35/0.4	6.5	0.4/70	0.4/20
11	127	13.8	85	0.85	1.0	0.22	0.8	105	161/13.8	10.0	60	154/38.5	8.5	40	35/10	7.5	0.4/90	0.4/30
12	200	15.75	60	0.8	0.98	0.24	1.0	40	120/15.75	10.5	30	115/11.0	7.5	10	10/0.4	6.0	0.4/90	0.4/80
13	160	20	85	0.85	0.8	0.125	1.72	125	245/20	11.0	100	230/38.5	12.0	20	35/6.3	6.5	0.4/180	0.4/30
14	470	20	85	0.85	0.8	0.12	1.8	360	340/20	11.5	270	330/115	1.5	80	110/10	8.5	0.4/250	0.4/60
15	400	20	75	0.75	0.7	0.13	1.7	330	242/20	11.0	240	230/115	10.5	60	110/37.5	7.5	0.4/200	0.4/50
16	15	6.3	80	0.8	0.658	0.16	1.86	12.5	115/6.3	7.0	10	110/11.0	7.0	2.5	10/0.69	6.5	0.4/80	0.4/10

Примітка: $\frac{S}{S_H}$ – завантаження генератора при $U_{Г.ном.}$ и $\cos\varphi_{ном.}$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО МАТЕРІАЛУ

1. Що являє коротке замикання в електричному ланцюзі?
2. Поняття про іменовані числа і відносні одиниці.
3. Види короткого замикання і їх символічне позначення.
4. У яких числах і одиницях даються параметри електроустаткування в довідниках і каталогах.
5. Які електричні величини обираються за базисні при розрахунку струмів КЗ у відносних одиницях.
6. Навести формули обчислення базисного струму і опору.
7. Складові опорів елементів електричних ланцюгів (систем).
8. За якими величинами розрахункового струму обираються електричні апарати, вимикачі, струмопровідні елементи електричних ланцюгів (систем).
9. Навести формули електричних величин у відносних одиницях (напруги, струму, потужності, опору генератора, трансформатора, реактора, повітряної і кабельної ліній), заданих в іменованих одиницях, віднесені до базисних (номінальним) умов.
10. Навести те, що і в пункті 9, в іменованих одиницях, заданих у відносних одиницях, віднесених до базисних умов.
11. Навести формули визначення активного і реактивного внутрішнього опору генератора, трансформатора, реактора, опорів повітряних і кабельних ліній.
12. Навести формулу ЕРС (Е) джерела живлення в іменованих і відносних одиницях при відомому його «U», «I», куті «φ» і внутрішньому опорі. Побудуйте векторну діаграму ЕРС джерела живлення.
13. Навести формули приведення E, U, I і Z в іменованих одиницях до якого-небудь ступеня напруги для каскадно-включених трансформаторів в електричний ланцюг.
14. Напишіть формули приведення $E_{\sigma}, U_{\sigma}, I_{\sigma}$ і Z_{σ} в іменованих одиницях до будь-якого ступеня U_{σ} , виражених в базисних умовах, для каскадний-включених трансформаторів в електричний ланцюг.
15. Чим визначається величина надперехідного і сталого струму КЗ.
16. Що таке відношення КЗ генератора (ВКЗ) генератора.
17. Що таке еквівалентна ЕРС і еквівалентний опір ланцюга КЗ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах – М.: Высшая школа, 2008. – 252 с.
2. Копьев В. Н. Релейная защита основного электрооборудования электростанций и подстанций. — Томск: Изд. ЭЛТИТПУ, 2005. – 107с.
3. Евминов, Л. И., Селиверстов Г. И. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – Гомель: ГГТУ, 2016. – 531 с.
4. Авербук А. М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Л: Энергия, 1975 г. – 416 с.
5. Ухов А. С. Релейная защита. МУ к практическим занятиям студентов специальности «Гидроэнергетика». – Запорожье: ЗГИА, 2005. – 18 с.

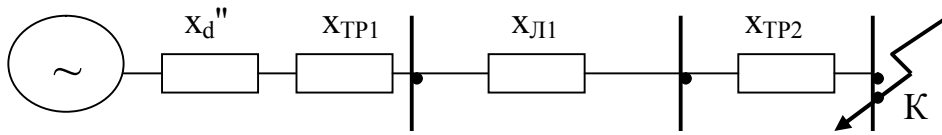


Рис. А 2. Схема заміщення без трансформаторних зв'язків.

Відповідно до вказаного, обчислюємо параметри окремих елементів схеми. Зазвичай задаються одиницею базисної трифазної потужності S_6 в МВА, яка залишається однаковою на всіх ступенях напруги трансформації, і базисною міжфазною напругою будь-якого одного ступеня напруги U_6 в кіловольтах.

Базисні одиниці напруги і струмів на всіх інших ступенях напруги $U_{прив.6}$ і $I_{прив.6}$ однозначно визначаються з урахуванням дійсних коефіцієнтів трансформації трансформаторів між даним ступенем і ступенем, прийнятим за базисну основу, по формулах:

$$U_{прив.6} = \frac{U_6}{k_{TP1}k_{TP2}\dots k_{TPN}};$$

$$I_{прив.6} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{прив.6}},$$

де k_{TP1} , k_{TP2} , k_{TPN} – коефіцієнти трансформації трансформаторів, визначувані в напрямі від ступеня, де вибрані S_6 і U_6 до ступеня, для якого обчислюються базисні одиниці $U_{прив.6}$ і $I_{прив.6}$.

Після того, як визначені базисні одиниці напруги і струмів для всіх ступенів, обчислюються відносні опори, приведені до базисних умов, для елементів, що знаходяться на цих ступенях:

$$Z_{*прив.6} = \frac{zS_6}{U_{прив.6}^2}$$

$$Z_{*прив.6} = \frac{z_{*ном}U_{ном}^2}{S_{ном}} \cdot \frac{S_6}{U_{прив.6}^2}$$

де Z – опір елемента в іменованих одиницях на даному ступені; $Z_{*ном}$ – відносний номінальний опір елемента на цьому ж ступені.

Приймаємо $S_6=1000$ МВ•А і на першому ступені (генераторна напруга) $U_6=U_{61}=13,8$ кВ.

Тоді базисний струм на першому ступені обчислюється за формулою:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{61}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 13,8} = 41,88 \text{ кА}$$

Визначаємо базисну напругу і струми на інших ступенях:

$$U_{62} = \frac{1}{k_{TP1}}U_{61} = \frac{1}{13,8/242}13,8 = 242 \text{ кВ}$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{62}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 242} = 2,38 \text{ кА}$$

$$U_{\delta 3} = \frac{I}{k_{Tp1} k_{Tp2}} U_{\delta 1} = \frac{13,8}{(13,8 / 242)(230 / 38,5)} = 40,5 \text{ кВ}$$

$$I_{\delta 3} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta 3}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 40,5} = 14,25 \text{ кА}$$

Визначаємо відносні базисні опори:

- генератора

$$x_{*\delta G}'' = \frac{x_{*d}'' U_{Гном}^2}{S_{Гном}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = \frac{0,138 \cdot 13,8^2}{54} \cdot \frac{1000}{13,8^2} = 2,55$$

де $S = \frac{90 \text{ МВ} \cdot \text{А}}{100\%} 60\% = 54 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

- трансформатора Тр1

$$x_{*\delta Tr1} = \frac{U_{\%K} \cdot U_{\delta 1}^2}{100 S_{номTr1}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2} = \frac{11 \cdot 13,8^2}{100 \cdot 100} \cdot \frac{1000}{13,8^2} = 1,1$$

- лінії Л1

$$x_{*\delta L1} = x_{L1} \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2} = 110 \cdot 0,4 \frac{1000}{242^2} = 0,75$$

- трансформатора Тр2

$$x_{*\delta Tr2} = \frac{u_{\%K} U_{ном.ВН}^2}{100 S_{номTr2}} \cdot \frac{S}{U_{\delta 2}^2} = \frac{12 \cdot 230^2}{100 \cdot 50} \cdot \frac{1000}{242^2} = 2,16$$

Результуючий відносний базисний опір до точки КЗ дорівнює сумі всіх опорів в схемі заміщення:

$$x_{*\delta \Sigma} = 2,55 + 1,1 + 0,75 + 2,16 = 6,56$$

Визначення надперехідної ЕРС $E_{*Гном}''$ генератора у відносних одиницях, віднесених до його номінальних параметрів, визначається:

$$E_{*Гном}'' = \sqrt{(U_{*Гном} \cos \varphi_{Гном})^2 + (U_{*Гном} \sin \varphi_{Гном} + I_{*Гном} x_{*d}'')^2} =$$

$$= \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,138)^2} = 1,08$$

Приведення ЕРС до базисних умов за співвідношенням:

$$E_{*\delta}'' = E_{*Гном}'' \frac{U_{Гном}}{U_{\delta 1}} = 1,08 \frac{13,8}{13,8} = 1,08$$

Відносний початковий надперехідний струм при трифазному КЗ, приведений до базисних умов і однаковий на всіх ступенях напруги, визначається по формулі:

$$I_{*K}''^{(3)} = \frac{E_{*\delta}''}{x_{*\delta \Sigma}} = \frac{1,08}{6,56} = 0,164$$

Визначуваний надперехідний струм КЗ у іменованих одиницях в точці **К** складає:

$$I_K^{n(3)} = I_{3\text{ступени}} = I_{*K}^{n(3)} I_{\bar{6}3} = 0,164 \cdot 14,25 = 2,337 \text{ кА},$$

а також можливо визначити надперехідний струм КЗ:
генератора:

$$I_G^{n(3)} = I_{*K}^{n(3)} I_{\bar{6}1} = 0,164 \cdot 41,88 = 6,86 \text{ кА},$$

лінії Л1:

$$I_{Л1}^{n(3)} = I_{*K}^{n(3)} I_{\bar{6}2} = 0,164 \cdot 2,38 = 0,39 \text{ кА}.$$

Визначено відносні й абсолютні значення початкового надперехідного струму обладнання при трифазному КЗ.