

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації систем»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

За темою № 10 - Релейний захист збірних шин електростанцій та підстанцій

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробники:

Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, викладач вищої категорії, Шокарьов Д.А.

Рецензенти:

- 1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю. М.*
- 2. К.т.н., професор, завідувач кафедру електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

План лекції:

1. Релейний захист збірних шин електростанцій та підстанцій, диференційні струмові захисти і особливості їхнього виконання
2. Схеми, вибір параметрів і область використання диференційних захистів трансформаторів

Рекомендована література:

Основна:

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник.- Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. – 533 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем/ Чернобровов Н.В., Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита/ Шнеерсон Э.М. – М.: Энергоатомиздат, 2007. -549.

Допоміжна література:

1. Андрев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб.для вузов/ В.А.Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 2006 – 639 с.
2. Басс Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб.пособие/ Басс Э.И., Дорогунцев В.Г.; под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
3. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматикаи рлейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов./ А.Ф.Дьяков, Н.И.Овчаренко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 336 с.
4. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение/ Циглер Г.; пер. с англ. под ред. Дьякова А.Ф. – м.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
5. Перехідні процеси в системах електропостачання/ [Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І.]; за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.
6. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб.пособие/ Куликов Ю.А. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.
7. Reimert D.Protective relaying for power generation/ Donald Reimert/ - USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2006/ - 561 p.
8. Preve C. protection of electrical networks/ Christophe Preve/ - GB: Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2006. – 508 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

9. Офіційний сайт Міністерство енергетики та вугільної промисловості України <http://mpe.kmu.gov.ua/>

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ЗБІРНИХ ШИН ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ПІДСТАНЦІЙ ДИФЕРЕНЦІЙНІ СТРУМОВІ ЗАХИСТИ І ОСОБЛИВОСТІ ЇХНЬОГО ВИКОНАННЯ

Диференційний принцип дозволяє виконати швидкодіючий захист трансформатора, що реагує на ушкодження в обмотках, на виводах і в з'єднаннях з вимикачами. При цьому він може мати недостатню чутливість тільки при виткових замиканнях і «пожежі сталі». Для здійснення захисту використовуються трансформатори струму ТАІ, ТАІІ, встановлені по обидва боки трансформатора, що захищається, поблизу вимикачів Q1, Q2 (Рис. 8.5, а). Вторинні обмотки трансформаторів струму й реле КА з'єднуються в схему поздовжнього диференційного захисту із циркулюючими струмами. При цьому в реле КА, як і в реле розглянутих вище диференційних захистів при відсутності ушкодження в захищеній зоні, проходить струм небалансу. Однак цей струм у диференціальному захисті трансформатора визначається не тільки погіршністю трансформаторів струму, але й рядом додаткових факторів.

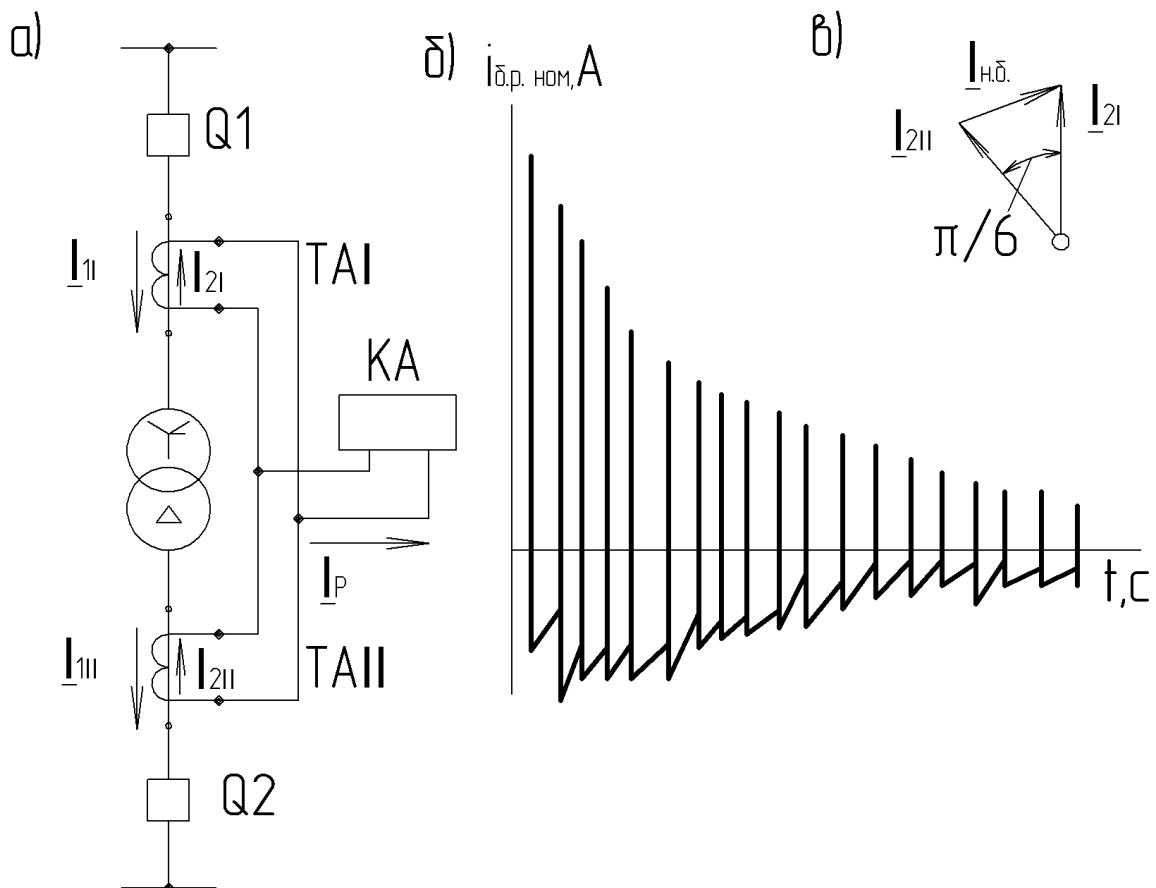


Рис. 11.1. Диференційний струмовий захист двообмоточного трансформатора

Вони обумовлюють особливості схеми, ускладнюють її та повинні враховуватися при виконанні диференційного захисту трансформатора. Розглянемо ці фактори на прикладі захисту двообмоточного трансформатора.

Струм намагнічування трансформатора. У силових трансформаторів коефіцієнт трансформації $n_T = U_{II}/U_{III} \neq 1,0$, тому у захисті повинні бути рівні струми I_{II} й I_{III}/n_T . При відсутності ушкодження в захищеній зоні, струм намагнічування $I_{\text{нам}} = I_{II} - I_{III}/n_T$ обумовлює нерівність порівнюваних струмів I_{II} й I_{III}/n_T . У зв'язку з цим в обмотці реле з'являється додаткова складова струму небалансу $I_{\text{нб.нам}}$, що при нормальній роботі й зовнішніх коротких замиканнях незначна й тому може не враховуватися.

Інше відбувається з появою в живильній обмотці трансформатора кидка струму намагнічування $I_{\text{бр.нам}}$, максимальні миттєві значення якого досягають 6—8-кратних значень амплітуди номінального струму в перший момент включення трансформатора під напругу й при відновленні напруги після відключення зовнішніх коротких замикань. Струм намагнічування, проходячи через реле, може викликати неправильне спрацьовування захисту. Перехідний струм намагнічування містить значні вищі гармонійні (2-гу та 3-тю), а також значну аперіодичну складову, у результаті чого крива його миттєвих значень майже повністю зміщується від осі часу (Рис. 8.5, б).

Час повного загасання перехідного струму намагнічування визначається постійними часу галузі намагнічування трансформатора й мережі й може досягати декількох секунд. Однак уже після закінчення часу $t=0,3...0,5$ його максимальні миттєві значення стають менше амплітуди номінального струму трансформатора. Відстройка диференційного захисту від кидків струму намагнічування є першою умовою при виборі струму спрацьовування. У цьому випадку іншими складовими струму небалансу, малими в порівнянні $I_{\text{бр.нам}}$, можна знехтувати, тому розрахунковий первинний струм небалансу $I_{\text{нб.расч.мах1}} \approx I_{\text{бр.нам}}$.

Відстройка захисту від кидка струму намагнічування досягається в основному трьома шляхами: загрубленням захисту по струму спрацьовування; включенням реле через проміжні трансформатори струму (НТТ), що насичуються; виявленню розходження між формою кривої струму к. з. і формою кривої струму намагнічування (реле в комплекті пристрою ЯРЭ-2201). При цьому струм спрацьовування вибирають виходячи зі значення номінального струму трансформатора за умовою

$$I_{\text{с.з.}} \geq k_{\text{відстр.}} I_{\text{т. ном}} \quad (11.1)$$

Залежно від використаних реле й способу відстройки коефіцієнт $k_{\text{відстр}}$ приймається рівним 0,3...4,5.

Схеми з'єднання обмоток трансформатора. Якщо $n_T \neq 1,0$, то при нормальній роботі й надструмах, обумовлених перевантаженням або зовнішніми короткими замиканнями, струми I_{II} та I_{III} на стороні вищого U_{II} та нижчого U_{III} напруг не рівні між собою. У трансформаторах із з'єднанням обмоток $Y/Y-12$ струми відрізняються тільки за абсолютним значенням (струм намагнічування не враховується).

У випадку різного з'єднання обмоток трансформатора, наприклад за схемою Y/Δ , первинні струми зрушені по фазі на кут, обумовлений групою з'єднання обмоток. Відповідно зрушені по фазі й вторинні струми I_{2I} та I_{2II} .

Для групи з'єднання $Y/\Delta-11$ кут зрушення фаз становить $\pi/6$ (Рис. 11.1, в). Тому при відсутності ушкодження в захищеній зоні, у симетричному режимі в обмотці реле - з'являється значний струм $I_{нб} = 2 I_{2I} \sin(\pi/12)$. Для його усунення необхідно, щоб порівнювані вторинні струми незалежно від групи з'єднання трансформатора збігалися по фазі.

При прийнятих умовних позитивних напрямках струмів (Рис. 11.2)

$$I_{A\Delta} = I_{\alpha} - I_{\beta}; \quad I_{B\Delta} = I_{\beta} - I_{\gamma}; \quad I_{C\Delta} = I_{\gamma} - I_{\alpha};$$

Крім того із цих співвідношень виходить:

$$\begin{aligned} I_{A\Delta} &= n_T (I_{AY} - I_{BY}) / \sqrt{3}; \\ I_{B\Delta} &= n_T (I_{BY} - I_{CY}) / \sqrt{3}; \\ I_{C\Delta} &= n_T (I_{CY} - I_{AY}) / \sqrt{3}; \end{aligned} \tag{11.2}$$

Вираз (11.2) показує, що диференційний захист трансформаторів із з'єднанням обмоток $Y/\Delta-11$ повинен виконуватися так, щоб рівнялися співпадаючі по фазі струми: $I_{A\Delta}$ і $(I_{AY} - I_{BY})$; $I_{B\Delta}$ і $(I_{BY} - I_{CY})$; $I_{C\Delta}$ і $(I_{CY} - I_{AY})$. Це досягається шляхом з'єднання вторинних обмоток трансформаторів струму ТА1, установлених з боку зірки трансформатора, що захищається, за схемою трикутника, а ТАИ з боку його трикутника - за схемою зірки.

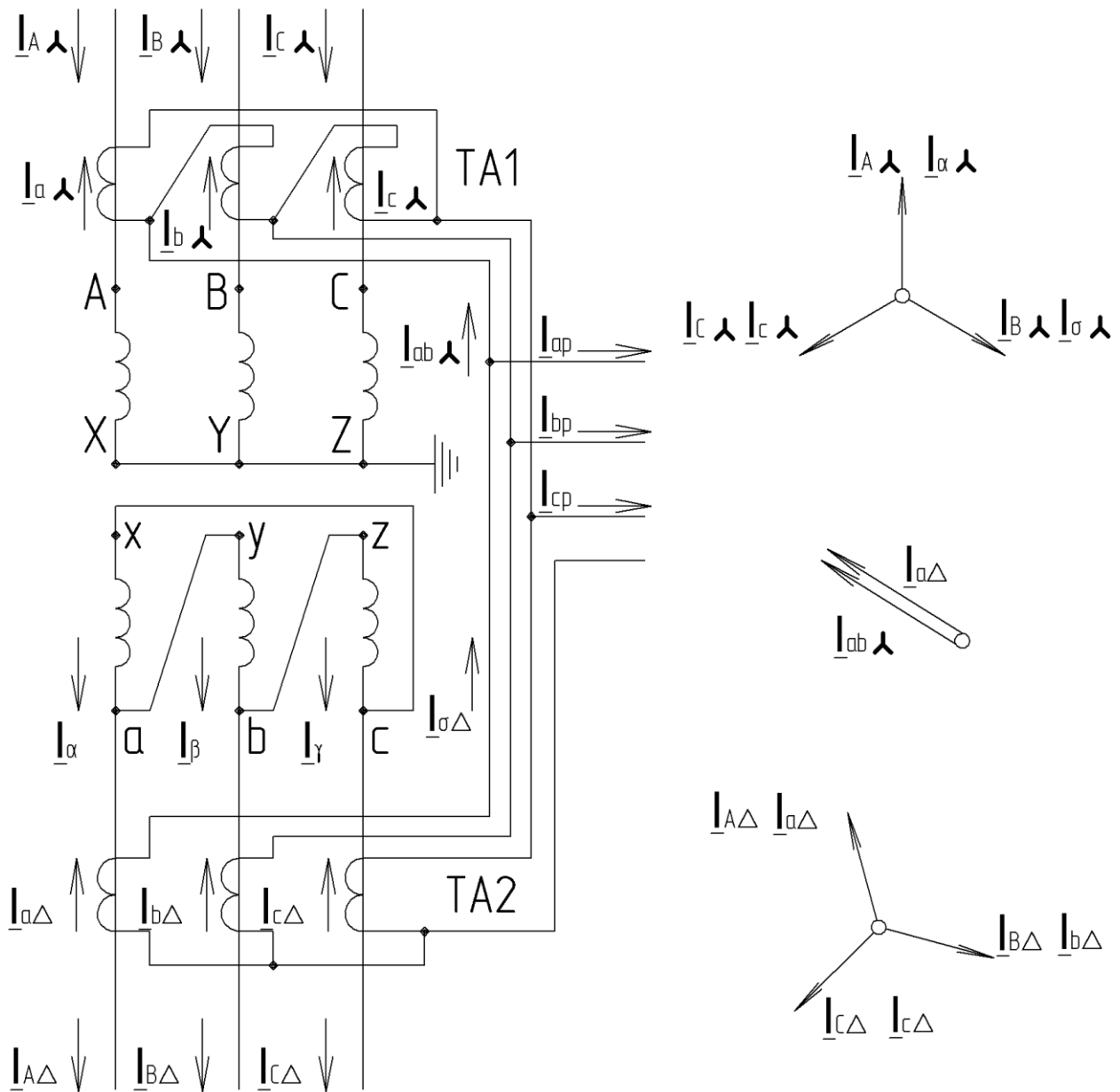


Рис. 11.2. Струморозподіл й векторні діаграми струмів у ланцюгах трансформатора й диференційного струмового захисту

Група з'єднання трансформаторів струму повинна відповідати групі з'єднання обмоток трансформатора, що захищається. При цьому у випадку заземленої нейтралі (Рис. 11.1) за схемою трикутника повинні з'єднуватися саме трансформатори струму ТАІ з боку зірки трансформатора, що захищається. Дійсно, якщо ці трансформатори струму з'єднати в зірку, а трансформатори струму ТАІІ з боку трикутника трансформатора, що захищає - у трикутник, то з виразу (11.2) маємо

$$\begin{aligned}\sqrt{3}n_T &= (I_{AY} - I_0) = I_{A\Delta} - I_{C\Delta}; \\ \sqrt{3}n_T &= (I_{BY} - I_0) = I_{B\Delta} - I_{A\Delta}; \\ \sqrt{3}n_T &= (I_{CY} - I_0) = I_{C\Delta} - I_{B\Delta};\end{aligned}\quad (11.3)$$

Співвідношення (11.3) показують, що диференційний захист трансформатора із зазначеним з'єднанням трансформаторів струму може

правильно працювати за умови, якщо у фазних струмах I_{AY} , I_{BY} , I_{CY} при нормальній роботі й зовнішніх коротких замиканнях немає складової нульової послідовності I_0 . Таке положення є лише при ізольованій нейтралі трансформатора.

З'єднання трансформаторів струму за схемою трикутника з боку зірки трансформатора, що захищається, із заземленою нейтраллю виключає проникнення струмів нульової послідовності в ланцюги циркуляції та у реле і тим самим запобігає можливої неправильної роботи захисту при зовнішніх коротких замиканнях на землю.

Коефіцієнти трансформації трансформаторів струму. Номінальні струми трансформатора, що захищається, визначаються з кожної його сторони по номінальній потужності

$$I_{T.HOM Y} = S_{T.HOM} / (\sqrt{3} U_Y); \quad I_{T.HOM \Delta} = S_{T.HOM} / (\sqrt{3} U_{\Delta});$$

Розрахункові коефіцієнти трансформації трансформаторів струму вибираються виходячи з рівності абсолютних значень порівнюваних вторинних струмів, у цьому випадку $I_{a\Delta}$ і I_{ab} (Рис. 11.1). З урахуванням коефіцієнта схеми $k^{(3)}_{cx}$ і при вторинному номінальному струмі $I_{2HOM} = 5A$ коефіцієнт трансформації $K_I = k^{(3)}_{cx} I_{THOM} / 5$. При прийнятих позначеннях первинних номінальних струмів коефіцієнти трансформації трансформаторів струму дорівнюють:

для з'єднаних за схемою зірки $K_{IY} = I_{THOM\Delta} / 5$;

для з'єднаних за схемою трикутника $K_{I\Delta} = I_{THOM} / 5$.

розрахункові коефіцієнти, що отримуються, у загальному випадку відрізняються від коефіцієнтів трансформації, які приймаються по шкалі номінальних струмів як найближчі більші. У зв'язку з цим струми в ланцюгах циркуляції можуть бути різними й обумовлюють додаткову складову струму небалансу:

$$I_{нб.вр} = (\Delta f_{вр} / 100) (I^{(3)}_{к. вн. max} / K_I), \quad (11.4)$$

де $\Delta f_{вр} = [(I_{2I} - I_{2II}) / I_{2I}] 100$ — погрішність від неточності вирівнювання струмів.

При $\Delta f_{вр} > 5\%$ струми вирівнюються автотрансформаторами або зрівняльними обмотками реле із НТТ.

Автоматичне регулювання коефіцієнта трансформації. Регулювання коефіцієнта трансформації трансформатора, що захищається, порушує співвідношення між первинними струмами I_{II} і I_{III} . У зв'язку з цим порушується ступінь вирівнювання струмів у ланцюгах циркуляції, а в реле з'являється додаткова складова струму небалансу $I_{нб.рег}$, пропорційна діапазону зміни напруги $\Delta U_{рег}$ в одну сторону від номінального:

$$I_{\text{нб.рег}} = (\Delta U_{\text{рег}}/100) (I^{(3)}_{\text{к. зовн. мах}}/K_I). \quad (11.5)$$

Різнотипність трансформаторів струму. Різнотипність трансформаторів струму, установлених з боку вищої й нижчої напруг, обумовлює розходження їхніх характеристик намагнічування та у зв'язку з цим приводить до збільшення складового струму небалансу $I_{\text{нб.пгр}}$, обумовленою повною погрішністю трансформаторів струму ε (%):

$$I_{\text{нб.пгр}} = (k_{\text{одн}} k_{\text{ап}} \varepsilon / 100) (I^{(3)}_{\text{к. зовн. мах}}/K_I). \quad (11.6)$$

У трьохобмоточних трансформаторів, а також у двообмоточних з розщепленими обмотками не однакові кратності струму при зовнішніх коротких замиканнях для трансформаторів струму, установлених з різних сторін трансформатора, що захищається. Це обумовлює різний ступінь намагнічування магнітопровода трансформаторів струму й збільшує тим самим складову $I_{\text{нб.пгр}}$. Не ідентичність характеристик трансформаторів струму враховується коефіцієнтом однотипності $k_{\text{одн}}$, що для диференційного захисту трансформатора приймається максимальним ($k_{\text{одн}}=1,0$).

Із викладеного отримуємо, що струм небалансу диференційного захисту трансформатора при зовнішніх коротких замиканнях має підвищене значення: у найгіршому випадку всі розглянуті складові (11.4) - (11.6) складаються арифметично, створюючи при зовнішньому короткому замиканні максимальний розрахунковий струм небалансу:

$$\begin{aligned} I_{\text{нб.розр.мах}} &= I_{\text{нб.пгр}} + I_{\text{нб.рег}} + I_{\text{нб.вр}} = \\ &= [(k_{\text{ап}} \varepsilon + \Delta U_{\text{рег}} + \Delta f_{\text{вр}}) / 100] (I^{(3)}_{\text{к. вн. мах}}/K_I). \end{aligned} \quad (11.7)$$

При максимальних $\Delta U_{\text{рег}} = \pm 16\%$, $\varepsilon = 10\%$, $\Delta f_{\text{вр}} = 5\%$ і $k_{\text{ап}} = 2,0$

$$I_{\text{нб.розр.мах}} = 0,41 I^{(3)}_{\text{к. зовн. мах}}/K_I$$

Вираз (8.9) визначає друга умова вибору струму спрацьовування:

$$I_{\text{с.з}} \geq k_{\text{відстр}} K_I I_{\text{нб.розр.мах}} = k^I_{\text{відстр}} I_{\text{нб.розр.мах}} \quad (11.8)$$

Струм спрацьовування приймають найбільшим із двох значень, отриманих за умовами (11.1) і (11.8). Якщо визначальною виявляється умова (11.8), а коефіцієнт чутливості отримуємо недостатній, то використовують спеціальні реле з гальмуванням, наприклад типу ДЗТ. Найбільші можливості для забезпечення необхідного коефіцієнта чутливості має диференційний захист у комплекті ЯРЭ-2201. Відповідно до вимог, коефіцієнт чутливості,

обумовлений при двофазному короткому замиканні на виводах нижчої напруги трансформатора, повинен бути $k_q \geq 2,0$. Допускається зниження коефіцієнта чутливості до значення $k_q \geq 1,5$.

11.2 СХЕМИ, ВИБІР ПАРАМЕТРІВ І ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАХИСТІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Диференційні струмові захисти трансформаторів виконуються у вигляді: диференціальної струмової відсічки; диференційного струмового захисту із проміжними трансформаторами струму, що насичуються; диференційного струмового захисту з реле, що мають гальмування.

На Рис. 11.2 показана повна трифазна схема з'єднання трансформаторів струму, яка використовується при виконанні кожного із зазначених захистів. Недолік схеми полягає в її складності, тому на трансформаторах малої й середньої потужностей досить широко застосовується спрощена схема (Рис. 11.5, а) з меншою кількістю трансформаторів струму й реле. Ця схема, як і повна трифазна, забезпечує вирівнювання вторинних струмів у ланцюгах циркуляції при нормальній роботі й зовнішніх коротких замиканнях за трансформатором із з'єднанням обмоток Y/Δ . Струм спрацьовування вибирається відповідно до загальних положень, розглянутих вище, однак спрощення захисту приводить до недоліків, які проявляються при деяких ушкодженнях у захищеній зоні.

Диференціальна струмова відсічка. Відсічка є найбільш простою з диференційних захистів трансформаторів. Вона виконується за допомогою максимальних реле струму КА1, КА2, наприклад РТ-40 або РТМ, що включаються безпосередньо у диференційний ланцюг схеми без будь-яких проміжних пристроїв (Рис. 11.3, а).

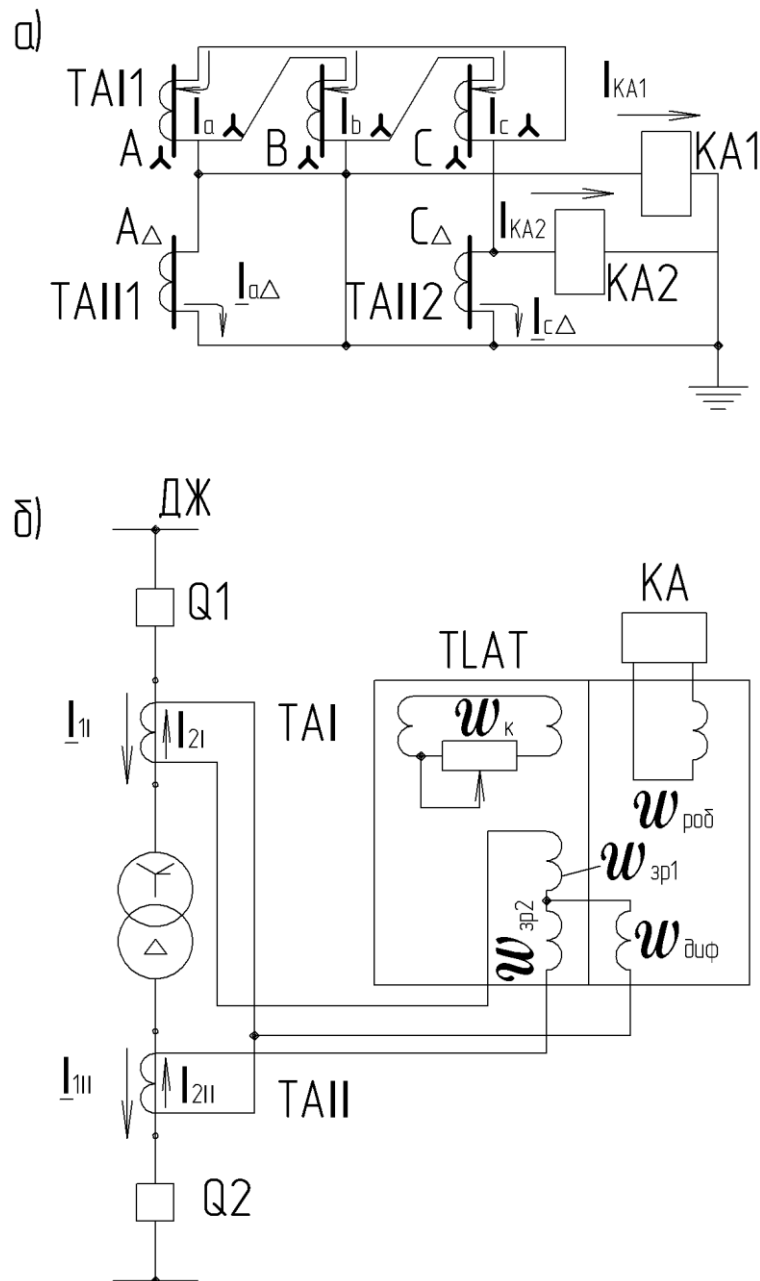


Рис. 11.3 Схема диференційної відсічки (а) і диференційного струмового захисту двообмоточного трансформатора із проміжними трансформаторами струму , що насичуються (б)

При цьому відстройка від кидків струму намагнічування досягається вибором струму спрацьовування з урахуванням власного часу дії реле РТМ, а в схемах з реле непрямої дії — часу спрацьовування реле струму й вихідного (проміжного) реле ($t_{c.p}=0,04...0,06$ с). За цей час струм намагнічування встигає знизитися, у зв'язку із чим з'являється можливість вибирати струм спрацьовування захисту не за максимальним значенням кидка струму, а з урахуванням його загасання за умовою (8.3), приймаючи $k_{відстр}=3,0...4,5$. Якщо трансформатори струму обрані так, що їхня повна погрішність не перевищує $\epsilon=10\%$, то відстройка від кидка струму намагнічування забезпечує також відстройку й від максимального струму небалансу при зовнішніх коротких

замиканнях за умови припустимого розходження струмів у ланцюгах циркуляції.

Перевагою диференційної струмової відсічки є швидкодія й простота, однак через великий струм спрацьовування диференційна струмова відсічка іноді недостатньо чутлива, тому вона застосовується на трансформаторах з невеликою потужністю. При цьому відсічка повинна забезпечувати необхідну чутливість при коротких замиканнях на виводах трансформатора.

Диференційний струмів захист із проміжними трансформаторами струму, що насичуються. Для виконання захисту використовуються реле із НТТ типу РНТ-565. Принципова схема захисту трансформатора з ТЛАТ в однофазному зображенні показана на Рис. 8.7, б. Реле РНТ-565 застосовують у тому випадку, якщо чутливість струмової відсічки недостатня або потрібні додаткові пристрої для вирівнювання струмів у схемі з реле непрямої дії. При цьому необхідну чутливість захист звичайно має на двообмоточних трансформаторах потужністю менше 25МВА. Розрахунок параметрів захисту починається з попереднього визначення струму спрацьовування:

за умовою (11.1) відстройка від кидка струму намагнічування

$$I_{c.3} \geq 1,3 I_{T.max} \quad (11.9)$$

за умовою (11.8) відстройка від максимального первинного струму небалансу з урахуванням того, що для захисту із НТТ коефіцієнт $k_{ан} = 1,0$, а складова струму небалансу $\Delta f_{вр}$ у першому наближенні не враховується завдяки відповідному вибору числа витків зрівняльних обмоток НТТ,

$$I_{c.3} \geq 1,3((\epsilon + \Delta U_{рег})/100) I_{к. вн. max}^{(3)} \quad (11.10)$$

Приймається більше з двох отриманих значень струму спрацьовування й виконується попередня перевірка чутливості:

$$k_{ч} = (k_{cx}^{(m)} I_{kmin}^{(m)}) / (k_{cx}^{(3)} I_{c.3}) \geq 1,5 \quad (11.11)$$

Розрахунковим по чутливості є двофазне к. з. на стороні нижчої напруги в мінімальному режимі роботи живильної системи й при максимальному опорі трансформатора, що захищається. Для диференційного захисту трансформатора із з'єднанням обмоток Y/Δ-11 при зазначеному виді ушкодження $k_{cx}^{(m)} = k_{cx}^{(2)} = \sqrt{3}$. Якщо умова (11.11) забезпечується, то розрахунок параметрів захисту продовжують. Він зводиться до вибору схем з'єднання трансформаторів струму та їхніх коефіцієнтів трансформації, визначення числа витків диференціальної $\omega_{зрI}$ ($\omega_{роб}$) і зрівняльних $\omega_{зрI}$ й $\omega_{зрII}$ обмоток виходячи, з прийнятого значення струму спрацьовування, магніторушійної сили спрацьовування $F_{с.р}$ і умови повного вирівнювання, що забезпечується при

$$I_{2I}(\omega_{зрI} + \omega_{диф}) = I_{2II}(\omega_{зрII} + \omega_{диф}). \quad (11.12)$$

Гіршим випадком щодо чутливості є однобічне живлення при к. з. у зоні ($I_{2II} = 0$). При цьому для спрацьовування реле ($I_{2I} = I_{c.p.}$) необхідно

$$I_{c.p.}(\omega_{зрI} + \omega_{диф}) = F_{c.p.}$$

звідси

$$\omega_{зрI} + \omega_{диф} = F_{c.p.} / I_{c.p.} \quad (11.13)$$

де $I_{c.p.}$ — струм спрацьовування реле, обумовлений по $I_{c.з.}$ з урахуванням коефіцієнта схеми $k_{сх}$ і віднесений до сторони зі струмом I_{2I} , А.

З виразу (8.14) знаходимо

$$(\omega_{зрII} + \omega_{диф}) = (\omega_{зрI} + \omega_{диф}) I_{2I} / I_{2II} \quad (11.14)$$

За допомогою відгалужень від обмоток НТТ підбираються витки диференціальної й зрівняльної обмоток так, щоб забезпечувалися умови (11.13) і (11.14). Ці умови забезпечуються й без використання диференціальної обмотки ($\omega_{диф} = 0$). У загальному випадку встановити розрахункове число витків важко. Тому з'являється додаткова складова струму небалансу $I_{нб.вр.}$. Її необхідно враховувати в остаточному визначенні струму спрацьовування захисту. При цьому значення коефіцієнта відстройки й коефіцієнта чутливості повинні відповідати вимогам ПУЭ. При визначенні $I_{c.p.}$ і числа витків НТТ попередньо вибирають основну сторону трансформатора, що захищається. З урахуванням умови (11.13) та (11.14) можна записати як

$$\omega_{осн.розр.} = F_{c.p.} / I_{c.p. осн} \text{ і } \omega_{неосн.розр.} = \omega_{осн.розр.} I_{2осн.} / I_{2неосн.}$$

Запропонований порядок розрахунку після попереднього вибору струму спрацьовування захисту й перевірки чутливості звичайно оформлюється у вигляді табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Найменування величини

Розрахункові вирази для сторін

вищої напруги (ВН)

нижчої напруги
(НН)

1. Первинний струм трансформатора, що захищається, А	$I_{I\text{НОМ}} = S_{\text{Т.НОМ}} / \sqrt{3} U_{\text{НОМ.ср}}$	$I_{I\text{IIНОМ}} = S_{\text{Т.НОМ}} / \sqrt{3} U_{\text{IIНОМ.ср}}$
2. Схема з'єднання обмоток трансформатора Y/Δ-11, що захищається.	Y	Δ
3. Схема з'єднання трансформаторів струму	Δ	Y
4. Коефіцієнт схеми $k^{(3)}_{\text{сх}}$	$\sqrt{3}$	1
5. Коефіцієнт трансформації трансформаторів струму	$K_{I\Delta} = k^{(3)}_{\text{сх}} I_{I\text{НОМ}} / 5$	$K_{IY} = k^{(3)}_{\text{сх}} I_{I\text{IIНОМ}} / 5$
6. Вторинний струм у плечах захисту, що відповідає номінальній потужності трансформатора, А	$I_{2\text{НОМ}} = k^{(3)}_{\text{сх}} I_{I\text{НОМ}} / K_{I\Delta}$	$I_{2\text{IIНОМ}} = k^{(3)}_{\text{сх}} I_{I\text{IIНОМ}} / K_{IY}$
7. Струм спрацьовування реле, А	$I_{\text{с.р}} = k^{(3)}_{\text{сх}} I_{\text{с.з}} / K_{I\Delta}$	$I_{\text{с.рII}} = k^{(3)}_{\text{сх}} I_{\text{с.зII}} / K_{IY}$
8. Розрахункове число витків обмотки НТТ реле для основної сторони трансформатора, що захищається; звичайно за основну сторону приймається сторона з більшим струмом спрацьовування $I_{\text{с.р. осн}} (I_{\text{с.рI}} \text{ або } I_{\text{с.рII}})$	$\omega_{\text{осн.розр.}} = F_{\text{с.р}} / I_{\text{с.р осн}}, F_{\text{с.р}} = 100\text{А}$	

Продовження табл. 11.1

Найменування величини	Розрахункові вирази для сторін	
	вищої напруги (ВН)	нижчої напруги (НН)
9. Попередньо прийняте	$\omega_{\text{осн}}$ - приймається найближче менше	

число витків для основної сторони

число витків відносно $\omega_{\text{осн.розр}}$

10. Розрахункове число витків НТТ реле для неосновної сторони

$\omega_{\text{неосн.розр}} = \omega_{\text{осн.}} \cdot I_{2\text{осн. ном}} / I_{2\text{неосн. ном}}$, тут струми взяті з п. 6 з урахуванням того, яка зі сторін трансформатора прийнята за основну

11. Попередньо прийняте число витків обмотки НТТ реле для неосновної сторони

$\omega_{\text{неосн}}$ - приймається найближче ціле число

12. Складова первинного струму небалансу $I_{\text{нб.вр1}}$, обумовлена округленням розрахункового числа витків неосновної сторони, А

$$I_{\text{нб.вр1}} = \Delta f_{\text{вир}} I_{\text{к. зовн. мах}}^{(3)} / 100 = (\omega_{\text{неосн.розр}} - \omega_{\text{неосн}}) / \omega_{\text{неосн.розр}} \cdot I_{\text{к. зовн. мах}}^{(3)}$$

13. Первинний розрахунковий струм небалансу $I_{\text{нб.расч.мах1}}$ з урахуванням складової $I_{\text{нб.вр1}}$, А

$$((\epsilon + \Delta U_{\text{рег}}) / 100) I_{\text{к. зовн. мах}}^{(3)} + I_{\text{нб.вр1}}$$

14. Уточнене значення струму спрацьовування реле на основній стороні, А

$$I_{\text{с.р. осн}} = F_{\text{с.р}} / \omega_{\text{осн}}$$

15. Уточнене значення струму спрацьовування захисту на основній стороні, А

$I_{\text{с.з}} = I_{\text{с.р. осн}} K_{\text{Iосн}} / k_{\text{сх}}^{(3)}$, тут $K_{\text{Iосн}}$ може бути або $K_{\text{IΔ}}$ або K_{IY} , а $k_{\text{сх}}^{(3)}$ – або $\sqrt{3}$ або 1 залежно від того, яка зі сторін прийнята за основну

16. Дійсне значення коефіцієнта відстройки

$$k_{\text{відстр}} = I_{\text{с.з}} / I_{\text{нб.розр.мах1}}$$

Дійсний коефіцієнт відстройки повинен бути не менше 1,3. Якщо $k_{\text{відстр}} < 1,3$, то варто прийняти для основної сторони нове число витків $\omega_{\text{осн}}$, менше відносно прийнятих раніше (див. п. 9). Потім повторити розрахунок по п. 10-16. Розрахунок повторюється до тих пір, поки дійсний коефіцієнт відстройки не виявиться приблизно рівним або більшим 1,3. Для остаточно обраного струму спрацьовування захисту визначається значення коефіцієнта чутливості. Він повинен задовольняти умові (11.11).

В ряді випадків, особливо при наявності вбудованого регулювання напруги під навантаженням і на трансформаторах з числом груп трансформаторів струму більше двох, що мають джерела живлення з декількох сторін, що визначають при виборі струму спрацьовування чи є відстройка від максимального струму небалансу при зовнішніх коротких замиканнях. При цьому чутливість захисту з реле РНТ може виявитися недостатньою. У таких випадках диференційний захист виконується за допомогою реле з гальмуванням.

Диференційний струмовий захист на основі реле з магнітним гальмуванням. У нашій країні для диференційного захисту трансформаторів випускаються реле з магнітним гальмуванням типу ДЗТ. На Рис. 11.4, а показана принципова схема захисту в однофазному виконанні з реле ДЗТ-11. Реле ДЗТ-11 має одну гальмову обмотку.

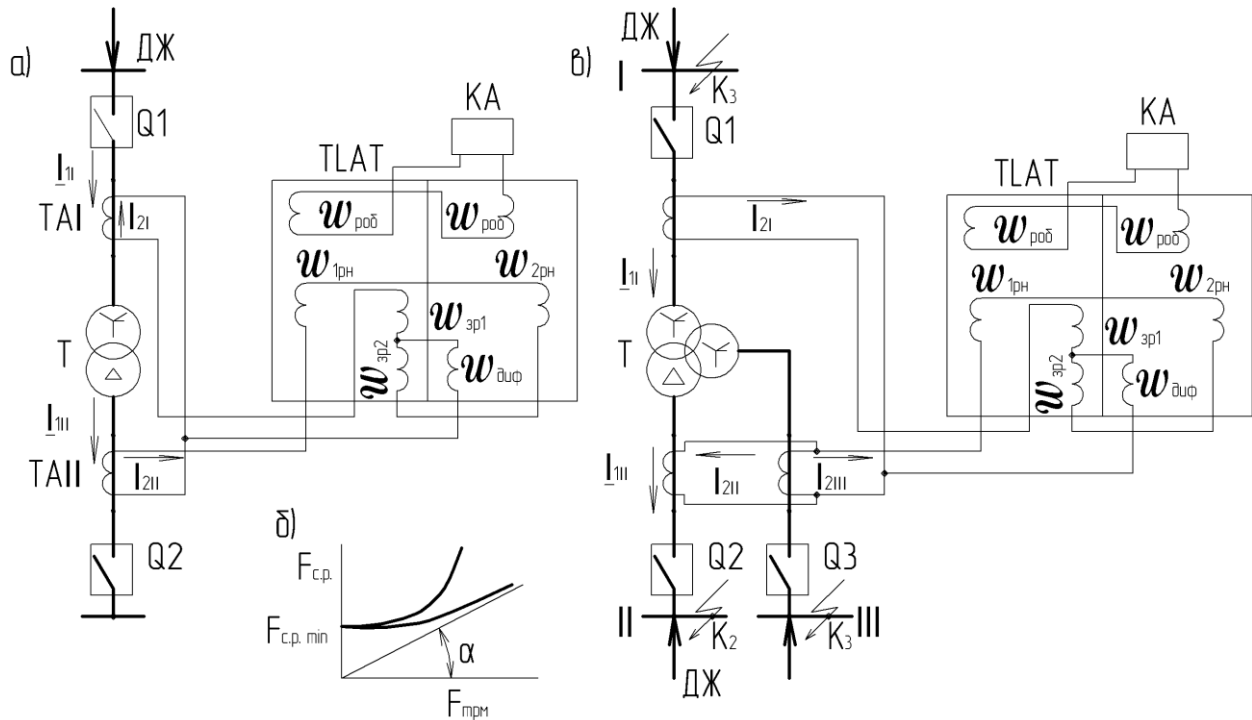


Рис. 11.4. Диференційні струмові захисти трансформаторів з магнітним гальмуванням

При виконанні захисту важливий вибір сторони, до трансформаторів струму якої доцільно приєднати гальмову обмотку, щоб забезпечити мінімальне гальмування при к. з. у зоні захисту й максимальне гальмування при зовнішніх ушкодженнях. Розглянутий двообмоточний трансформатор має однобічне живлення, тому гальмову обмотку доцільно приєднати до трансформаторів струму живлячої сторони. Таке включення забезпечує гальмування тільки при зовнішніх коротких замиканнях. При двосторонньому живленні іноді доцільно гальмову обмотку розділити на дві секції й включити кожен з них відповідно у перший й другий ланцюги циркуляції захисту. Цим зменшується гальмова дія при короткому замиканні у захищеній зоні.

На двообмоточних трансформаторах з розщепленою обмоткою гальмова обмотка включається на суму струмів трансформаторів струму, встановлених у ланцюзі кожної з розщеплених обмоток. Струм спрацьовування захисту залежить від числа витків і значення струму гальмової обмотки. При відсутності гальмування ($I_{гал}=0$) струм спрацьовування приймає значення мінімального струму спрацьовування $I_{с.з. min}$. Йому відповідає мінімальна МДС спрацьовування $F_{с.р. min}$, рівна 100 А (див. Рис. 11.4, б). Таким чином, для відстройки захисту від кидків струму намагнічування й від максимальних

значень сталого первинного струму небалансу $I_{\text{нб}\cdot\text{розр.max1}}$ при зовнішніх коротких замиканнях необхідно відповідним чином вибрати мінімальний струм спрацьовування захисту $I_{\text{с.з min}}$ і число витків гальмової обмотки $\omega_{\text{гал}}$. Відстройка від кидків струму намагнічування, коли струм у гальмовій обмотці відсутній, досягається вибором струму $I_{\text{с.з min}}$ за умовою (10.1). При цьому коефіцієнт відстройки $k_{\text{відстр}}$ приймається рівним 1,5, тому що реле ДЗТ-11 має гірші, ніж реле РНТ, параметри відносно відстройки від несталих струмів через відсутність у НТТ реле короткозамкненої обмотки. Далі розрахунок витків НТТ реле $\omega_{\text{осн}}$ і $\omega_{\text{неосн}}$ і максимального первинного струму небалансу $I_{\text{нб}\cdot\text{розр.max1}}$ виконується, як і для реле РНТ, відповідно до табл.11.1. Доповненням до цього розрахунку є вибір числа витків гальмової обмотки $\omega_{\text{гал}}$, що забезпечує відстройку від $I_{\text{нб}\cdot\text{розр.max1}}$. Характеристики реле ДЗТ-11 представляють залежність $F_{\text{роб}} = f(F_{\text{гал}})$, де $F_{\text{роб}} = I_{\text{роб}}\omega_{\text{роб}}$, а $F_{\text{гал}} = I_{\text{гал}}\omega_{\text{гал}}$. З рис 11.4, б для умови спрацьовування $F_{\text{с.р}}/F_{\text{гал}} = \text{tg}\alpha$. При зовнішніх коротких замиканнях неспрацьовування захистів буде забезпечено, якщо задовольняється умова

$$\text{tg}\alpha \geq k_{\text{відстр}} F_{\text{роб}} / F_{\text{гал}} = k_{\text{відстр}} (I_{\text{роб}} / I_{\text{гал}}) (\omega_{\text{роб}} / \omega_{\text{гал}}). \quad (11.15)$$

Відношення $I_{\text{роб}}/I_{\text{гал}}$ дорівнює відношенню відповідних первинних струмів $I_{\text{роб1}}/I_{\text{гал1}}$. При зовнішніх коротких замиканнях $I_{\text{роб1}} = I_{\text{нб}\cdot\text{розр.max1}}$, а первинний гальмовий струм $I_{\text{гал1}}$ дорівнює результуючому струму, що проходить по первинних обмотках трансформаторів струму, до яких приєднана гальмова обмотка. Для двообмоточного трансформатора $I_{\text{гал1}} = I_{\text{к.зовн.max}}^{(3)}$. З (11.15)

$$\omega_{\text{гал}} \geq k_{\text{відстр}} I_{\text{нб}\cdot\text{розр.max1}} \omega_{\text{роб}} / (I_{\text{к.зовн.max}}^{(3)} \text{tg}\alpha). \quad (11.16)$$

де $k_{\text{відстр}} = 1,5$; $\omega_{\text{роб}}$ — число витків обмотки НТТ реле на стороні, до якої приєднана гальмова обмотка, при цьому враховується прийняте число витків $\omega_{\text{осн}}$, якщо розглянута сторона є основною, і прийняте число витків $\omega_{\text{неосн}}$, якщо розглянута сторона є неосновною; $\text{tg}\alpha$ — тангенс кута нахилу до осі абсцис дотичної, проведеної з початку координат до характеристики спрацьовування реле, що відповідає мінімальному гальмуванню (нижня характеристика на Рис. 11.4, б); для реле ДЗТ-11 $\text{tg}\alpha = 0,75$.

На трансформаторах, що захищаються, із числом груп трансформаторів струму більше двох, що мають джерела живлення з декількох сторін (Рис. 11.4, в), струми небалансу мають, як правило, більші значення, чим для двообмоточних трансформаторів. Звичайно струми $I_{\text{нб}\cdot\text{розр}}$ при коротких замиканнях з різних сторін (точки K_1 , K_2 , K_3) не однакові. Тому при використанні реле ДЗТ-11 його гальмова обмотка включається в той ланцюг захисту, у якому при зовнішньому короткому замиканні проходить струм, що обумовлює найбільший струм небалансу. У деяких випадках при недостатній чутливості виникає необхідність застосовувати реле з декількома гальмовими обмотками, наприклад ДЗТ-13.

При виборі струму спрацьовування захисту визначальними є ті ж умови, по яким визначається струм спрацьовування захисту двообмоточних трансформаторів. При цьому для спрощення одна з обмоток трансформатора,

що захищається, наприклад на стороні III, передбачається відключеною й розрахунок виконується, як для двообмоточного трансформатора. Потім виконується розрахунок, коли відключена обмотка на стороні II. При цьому обрані в попередньому розрахунку параметри захисту, що ставляться до обмотки на стороні I, повинні залишатися незмінними. У всіх випадках струми I_{II} , I_{III} , I_{III} визначаються по відповідних номінальних напругах і номінальній потужності трансформатора не залежно від потужностей його окремих обмоток.

Диференційований струмовий захист із гальмуванням у комплекті пристрою ЯРЭ-2201. В захисті використовується реле з гальмуванням, виконане на мікроелектронній елементній базі. Схема й принцип дії реле розглянуті вище. Це реле забезпечує більш високу чутливість захисту, ніж реле ДЗТ. Відстройка захисту від кидків струму намагнічування здійснюється як і в захисті з ДЗТ, вибором мінімального струму спрацьовування за умовою (11.1) при коефіцієнті відстройки $k_{\text{відстр}}=0,3\dots0,7$. Відстройка від максимальних значень сталого первинного струму небалансу $I_{\text{нб}\cdot\text{розр}\cdot\text{max1}}$ при зовнішніх коротких замиканнях досягається вибором відповідного коефіцієнта гальмування $k_{\text{гал}}$. У цьому випадку струм спрацьовування захисту завдяки гальмуванню повинен бути $I_{\text{с.з}}=k_{\text{відстр}}I_{\text{нб}\cdot\text{розр}\cdot\text{max1}}$. Значення коефіцієнта $k_{\text{відстр}}$ приймається рівним 1,2—1,3. Гальмування створюється гальмовим струмом $I_{\text{гал}}$, що при зовнішніх коротких замиканнях дорівнює $I_{\text{к. зовн. max}}^{(3)}/K_1$. Із захисної характеристики реле коефіцієнт гальмування

$$k_{\text{гал}}=(I_{\text{с.р}}-I_{\text{с.р. min}})/(I_{\text{гал}}-0,8 I_{\text{т.ном}}).$$

Нехтуючи наявністю $I_{\text{с.р. min}}$ і $0,8 I_{\text{т.ном}}$, з деяким запасом отримуємо $k_{\text{гал}}=I_{\text{с.р}}/I_{\text{гал}}$. Відношення струмів у реле $I_{\text{с.р}}/I_{\text{гал}}$ дорівнює відношенню відповідних первинних струмів $I_{\text{с.з}}/I_{\text{к. вн. max}}^{(3)}$ з (11.7) максимальний первинний струм небалансу

$$I_{\text{нб}\cdot\text{розр}\cdot\text{max1}}=[(k_{\text{ап}}\varepsilon+\Delta U_{\text{рег}}+\Delta f_{\text{вр}})/100] I_{\text{к. зовн. max}}^{(3)}.$$

Із сказаного слідує

$$k_{\text{гал}}=k_{\text{відстр}}(k_{\text{ап}}\varepsilon+\Delta U_{\text{рег}}+\Delta f_{\text{вр}})/100. \quad (11.17)$$

При $k_{\text{відстр}}=1,3$, $k_{\text{ап}}=2$, $\varepsilon=10\%$, $\Delta U_{\text{рег}}=\pm 16\%$, $\Delta f_{\text{вр}}=5\%$ коефіцієнт гальмування $k_{\text{гал}}=0,533$.

Є можливість встановлювати на реле коефіцієнт гальмування рівним 0,3, 0,45, 0,6. Уставка мінімального струму спрацьовування реле змінюється дискретно й становить 2; 2,5; 3,25; 4,5 і 6 А.

Загальна оцінка диференційних захистів трансформаторів. Диференційні захисти забезпечують швидке й селективне відключення ушкоджень у зоні, охопленої трансформаторами струму. Рекомендується застосовувати диференційний захист на поодинокі працюючих трансформаторах потужністю $P_{\text{т}}\geq 6,3$ МВА й на трансформаторах потужністю $P_{\text{т}}\geq 4$ МВА, що працюють паралельно. Диференційний захист встановлюється також на трансформаторах потужністю $P_{\text{т}}=1\dots 4$ МВА у тому випадку, якщо:

струмова відсічка не задовольняє вимогам чутливості, а максимальний струмовий захист має витримку часу $t_{c.з} > 0,5$ с; трансформатор встановлений у районі, підлягаючому землетрусам.

При виборі схеми диференційного захисту необхідно насамперед розглянути можливість застосування найбільш простого з диференційних захистів - диференційної струмової відсічки. Тільки у випадку її недостатньої чутливості варто використати реле РНТ. Захисти з реле, що мають гальмування, найбільш складні, та їх застосування виправдане тільки неможливістю відстройки захисту без гальмування від сталих значень максимального струму небалансу при зовнішніх коротких замиканнях.

Диференційний струмовий захист має такий недолік-можливість відмовити через недостатню чутливість при внутрішніх коротких замиканнях, наприклад виткових. Це викликає необхідність встановлювати поряд з диференційним й газовий захист.

складається із часу роботи захисту t_z і часу дії вимикача t_v , що розриває струм короткого замикання. Найпоширеніші вимикачі діють протягом 0.05 - 0.15 сек., а сучасні швидкодіючі захисти можуть діяти протягом 0.02-0.04 сек.

Чутливість.

Для того, щоб захист діяв при ушкодженнях, він повинен мати певну чутливість.

Для визначення необхідної чутливості захисту потрібно, насамперед, встановити зону, у межах якої він повинен діяти. Кожний захист повинен відключати ушкодження на тій ділянці, для захисту якої він встановлений. Крім того, захист кожної ділянки повинен діяти при коротких замиканнях на другій ділянці, що захищається іншим захистом.

Дія захисту на другій ділянці необхідна для відключення коротких замикань у тому випадку, якщо другий захист або вимикач ділянки Б не спрацюють через яку-небудь несправність.

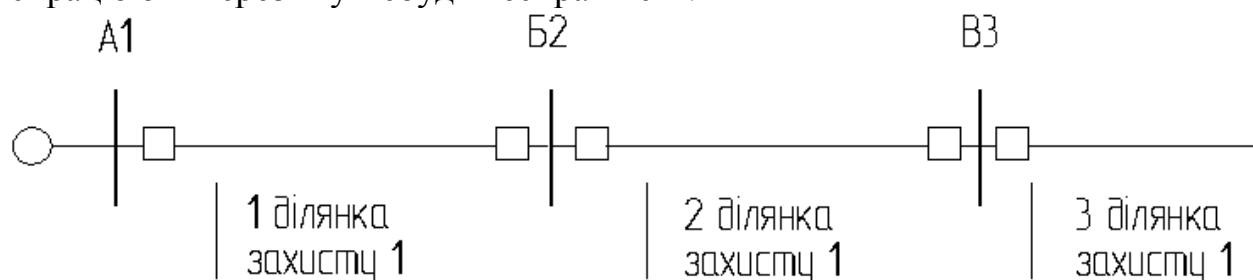


Рис. 1.2. Ділянки дії захистів.

Резервування наступної другої ділянки є важливою вимогою. Якщо воно не буде виконуватися, то при короткому замиканні на другій ділянці БВ та відмові його захисту або вимикача ушкодження залишаться не відключеним, що призведе до порушення роботи споживачів усієї мережі.

Дія захисту I при короткому замиканні на третій ділянці не потрібна, тому що при відмові захисту або вимикача третьої ділянки повинен подіяти захист II другої ділянки. Одночасна відмова захисту на двох ділянках мало ймовірна, тому з нею не рахуються.

У такий спосіб чутливість захисту повинна бути достатньою наприкінці другої ділянки.

Надійність.

Вимога надійності полягає в тому, що захист повинен безвідмовно працювати при коротких замиканнях у межах встановленої для неї зони й не повинен працювати неправильно в режимах, при яких його робота не передбачається.

Вимоги надійності є досить важливими. Відмова в роботі будь-якого захисту завжди сполучена з додатковим відключенням однієї або більшої кількості підстанцій, як показано на Рис.1.3.

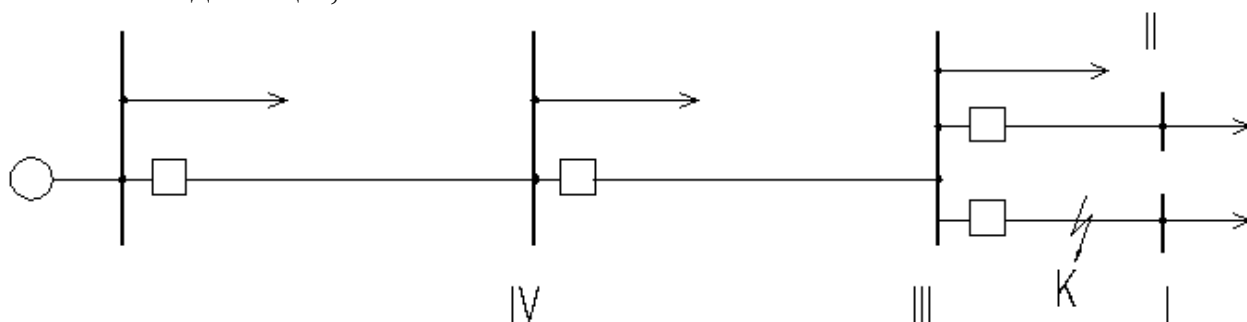


Рис. 1.3. Схема ділянки мережі з однобічним живленням.

При короткому замиканні в точці K і відмові захисту B1 спрацює захист B3, у результаті чого додатково відключаються підстанції 2 і 3. У випадку, якщо через ненадійність неправильно спрацює в нормальному режимі захист B4, то, в результаті відключення лінії 4, втрачатимуть живлення споживачі чотирьох підстанцій, а джерелом аварії стане ненадійний захист.

Звідси витікає:

- Захист повинен виконуватися за допомогою якісних і надійно працюючих реле.
- Схема захисту повинна бути простіше й одночасно мати якнайменшу кількість реле й контактів.
- Монтаж захисту повинен бути надійним.
- Всі допоміжні елементи, сполучні затискачі, проведення повинні бути надійними.