

ОБҐРУНТУВАННЯ ПОБУДОВИ РЕЗЕРВНИХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ЗАХИСТІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

В. Я. БУНЬКО, кандидат технічних наук, доцент
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»
E-mail: VBunko@gmail.com

Анотація. Запропонований принцип побудови резервних централізованих захистів від коротких замикань на землю ліній електропередач 330-750 кВ кільцевих схем відкритого розподільного пристрою, на відміну від відомих, заснований на контролі відносин струмів фаз на стороні нижчої напруги підвищувального трансформатора блоку електростанції. Розроблено алгоритми функціонування, методика вибору уставок, оцінка чутливості, що враховує струми в непошкоджених фазах і модель захисту.

За рахунок контролю сум струмів непошкоджених приєднань і величин струмів в пошкоджених, запропонований метод побудови централізованих захистів від міжфазних замикань, заснований на використанні першого закону Кірхгофа.

Розроблені алгоритми резервних централізованих захистів згаданих приєднань від міжфазних замикань на порівнянні знаку потужності на них. Ці алгоритми відрізняються від відомих із врахуванням значно більшої кількості режимів роботи устаткування. Серед традиційних централізованих найбільший інтерес викликає диференційний струмовий захист шин, оскільки він заснований на аналізі тільки струмів приєднань і застосуванні першого закону Кірхгофа без використання інформації про напрямок потужності.

Проведено оцінку чутливості традиційних резервних захистів від міжфазних замикань (максимального струмового та дистанційного захистів) і від однофазних замикань на землю (нульової послідовності).

Ключові слова: *трансформатор, лінія електропередач, коротке замикання, струм, напруга, відкритий розподільний пристрій*

Актуальність. За останні десятиліття в декількох країнах відбулися великі техногенні аварії, одніє. з причин деяких виявилася недостатня надійність релейного захисту електроустаткування відкритих розподільних пристроїв (ВРП), напругою 330-750 кВ, особливо ліній електропередач (ЛЕП). Для її забезпечення в цей час застосовується просте дублювання, але воно, збільшуючи надійність спрацьовування, зменшує надійність неспрацьовування. Відомо, що за мікропроцесорного виконання захистів у багатьох випадках краще використати мажорнування, коли число захистів потроюється, а сигнал на вимикання подається, якщо

спрацювали будь-яких два інших. За таких обставин відповідно до положень теорії надійності найбільш доцільно використовувати пристрої з різними принципами дії. Однак для згаданих ЛЕП повноцінне мажорювання захистів ускладнюється через недостатню кількість апробованих резервних захистів, оскільки від міжфазних і однофазних замикань на землю використовується відповідно тільки дистанційні та нульові послідовності.

У зв'язку з викладеним, розробка нових резервних захистів актуальна. Вона може йти в напрямі створення як автономних, так і централізованих захистів, де об'єктом дослідження являються резервні захисти електроенергетичних систем від коротких замикань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні положення даного питання обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції «Радіоелектроніка, електротехніка й енергетика» (м. Москва), на міжнародній науково-технічній конференції «Енерго-ресурсозберігаючі технології – основа індустріально-інноваційного розвитку» (Казахстан, м. Павлодар).

Об'єктом дослідження є резервні захисти електроенергетичних систем від коротких замикань. Предмет дослідження – резервні централізовані захисти ЛЕП та іншого основного устаткування відкритих розподільних пристроїв, напругою 330-750 кВ.

Мета дослідження – розробка алгоритмів функціонування і моделей резервних централізованих захистів від коротких замикань для ліній, напругою 330-750 кВ.

Досягнення поставленої мети пов'язане з вирішенням наступних завдань:

- розробка алгоритму функціонування резервного централізованого захисту ліній від коротких замикань на землю, що відрізняється за принципом дії від традиційних і не поступається їм за чутливістю;
- розробка схем контролю справності реле централізованих спрямованих захистів.

Матеріали і методи дослідження. Для вирішення поставленого завдання використалися фундаментальні положення теоретичних основ електротехніки, релейного захисту, теорії надійності, електричних машин, алгебри логіки та теорії релейних пристроїв. Проводилося математичне моделювання, всі обчислення виконані в середовищі MS Excel, Mathematica 5,0.

Результати дослідження та їх обговорення. За розробки алгоритмів резервних спрямованих захистів приєднань кільцевих схем представлені алгоритми двох централізованих резервних спрямованих захистів приєднань головних схем відкритих розподільних пристроїв напругою 330-750кВ. Алгоритм [4] першої враховує можливість помилкового спрацювання в неповнофазному режимі роботи кожного із приєднань, у випадку замикань на землю на них, КЗ із боку нижчої напруги підвищувальних трансформаторів на електростанції і розподілі схем ВРП на декілька частин [1,4]. Друга [4] враховує перераховані

режими роботи ВРП та заснована на порівнянні знаку потужності на всіх приєднаннях. Захист спрацьовує за напрямку потужності (НП) на лінії. Для її визначення звичайно використовується орган напрямку потужності (ОНП), що контролює струм у фазі лінії і напруга між двома іншими. У розглянутій статті в схемах чотирикутника [4], шестикутника [1,4], 3/2 [1,4], 4/3 кожна фаза приєднання вимикається двома вимикачами. Тому враховувалась можливість вимкненого стану одного з них. Приклад під'єднання вимірювальних пристроїв наведений для схеми чотирикутника (рис.1). Згаданий контроль здійснюється на лініях, як загальноприйнятий, за допомогою конденсаторів зв'язку (на схемі не показані) і трансформаторів струму. Як показав аналіз, умови її спрацьовування за НП, наприклад, для лінії W2, використовуючи алгебру логіки, можна записати так:

$$M_{W2} = M_3^{\text{Л}} \cdot M_4^{\text{Л}} + M_3^{\text{Л}} \cdot a'_4 + M_4^{\text{Л}} \cdot a'_3, \quad (1)$$

де M_{W2} - сигнал про НП від блоків G1-тр1, G2-тр2 до лінії, що приймає значення логічної одиниці «1» і «0» за зворотного напрямку або її відсутності;

$M_3^{\text{Л}}$, $M_4^{\text{Л}}$ – сигнали від KW1, KW2, що приймають значення «1» за НП на лінії;

a'_3 і a'_4 - сигнали від реле фіксації положення «вимкнено» Q3 і Q4, що приймають значення «1», коли відповідний вимикач вимкнений і «0», коли ввімкнений.

Аналогічним чином будуються вирази для визначення НП в інших приєднаннях.

Розглянуто транзит електроенергії від системи GS2 (рис. 1) через схему чотирикутника в навантаження. За однофазного КЗ на лінії W2 (точка K1) активна потужність в пошкодженій фазі А спрямована від енергоблоків G1-тр1, G2-тр2 до K1, а струм перевищує значення $I_{\text{H.MKC}}$ (струм максимального навантаження). У фазах В і С лінії W1 при цьому КЗ потужність може мати напрямок до навантаження, а струм у них перевищити $I_{\text{H.MKC}}$. Це може призвести до вимикання лінії W1, що заборонено відповідною побудовою алгоритму дії захисту. У разі заземлення нейтралі трансформатора навантаження НП у фазах лінії W1 залежить від коефіцієнта розподілу струму нульової послідовності, довжин ліній W1 і W2, віддаленості точки КЗ від схеми, потужності енергоблоків G1-тр1, G2-тр2. При цьому струм може бути як меншим, так і більшим $I_{\text{H.MKC}}$, що може призвести до вимикання фаз W1.

Із проведеного аналізу випливає, що НП за однофазних КЗ на лінії та за двофазних КЗ на інших приєднаннях можуть збігатися. Для запобігання помилкової роботи за однофазних КЗ введено блокування. Так, за КЗ на лінії W2, в алгоритм вводиться блокуючий сигнал B_{W2}^0 у напрямку потужності і струмів нульової послідовності, що приймає значення «1» за КЗ на землю на інших приєднаннях ВРП:

$$B_{W2}^0 = T_{W1}^0 \cdot M_{W1}^0 + T_{Tp1}^0 \cdot M_{Tp1}^0 + T_{Tp2}^0 \cdot M_{Tp2}^0, \quad (2)$$

де $M_{W1}^0, M_{Tp2}^0, M_{Tp1}^0$ ($T_{W1}^0, T_{Tp2}^0, T_{Tp1}^0$) - відповідно сигнали від ОНП (пускових органів) нульової послідовності приєднань W1, Tr2, Tr1, що приймають значення «1» за їх спрацьовування.

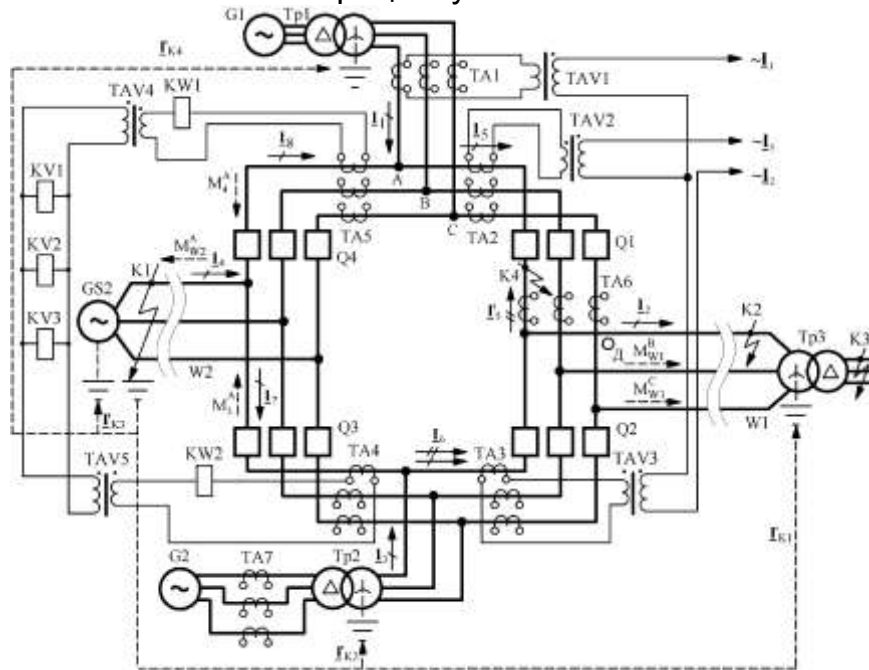


Рис.1. Підключення вимірювальних пристроїв

Відомо, що КЗ за трансформаторами з боку трикутника супроводжуються зміною НП із боку зірки [7,8,10]. Для запобігання хибного спрацьовування ОНП введені сигнали b_1^Δ, b_2^Δ , що приймають значення «0» («1») за наявності (відсутності) КЗ за Tr1, Tr2. Щоб не відлаштовуватись від струмів за коливання і від струмів в непошкоджених фазах, що виникають за КЗ на землю на інших приєднаннях, запуск захисту здійснюється за допомогою блокування від коливань, яке використовується в традиційних дистанційних захистах. Сигнали b_1, b_2 приймають значення «1» («0») за відсутності (наявності) коливань.

Через те, що ОНП не відрізняє КЗ на лінії W2 від режиму передачі потужності її споживачам, передбачені пускові органи (ПО) [10]. Струм I_{C31} спрацьовування ПО для кожної лінії (за аналогією із пристроями резервування відмови вимикачів) повинен бути відлаштований від струму $I_{H.MKC}$. Для лінії W2:

$$I_{C31}^{W2} = 1,4 \cdot I_{H.MKC}^{W2}. \quad (3)$$

За I_{C31} не виключено, що захист спрацює хибно в режимі роботи двох фаз після неуспішного однофазного автоматичного повторного вмикання. Щоб цього не трапилося, уставка перелаштовується з I_{C31} на:

$$I_{C32}^{W2} = 1,2 \cdot I_{ДФ}^{W2}, \quad (4)$$

де, 1,2 – коефіцієнт, що враховує похибку трансформаторів струму, розрахунку та реалізації;

$I_{ДФ}$ - струм (найбільший з можливих) у кожній із двох фаз за вимкненої третіої [2,9].

$I_{ДФ}$ залежить від опорів приєднань, режиму заземлення нейтралей, конфігурації мережі. У зв'язку із цим, в деяких випадках захист не буде мати достатньої чутливості за роботи двох фаз. Тому, слід зауважити, що таким недоліком можна знехтувати, якщо враховувати, що режим триває не більше трьох годин.

Опускаючи дане формулювання, умова спрацьовування на вимикання лінії W2 записується так:

$$Y_{W2}^A = M_{W2}^A \cdot (\overline{x_{V2}} \cdot T_{1,W2}^A + x_{V2} \cdot T_{2,W2}^A) \cdot D_2^\uparrow \cdot \overline{B_{W2}^0} \cdot (b_1 + b_2) \cdot \overline{b_1^\Delta} \cdot \overline{b_2^\Delta},$$

$$x_{V2} = \overline{T_{3,W1}^A} \cdot T_{3,W1}^B \cdot T_{3,W1}^C + T_{3,W1}^A \cdot \overline{T_{3,W1}^B} \cdot T_{3,W1}^C + T_{3,W1}^A \cdot T_{3,W1}^B \cdot \overline{T_{3,W1}^C} +$$

$$+ \overline{T_{3,Ip2}^A} \cdot T_{3,Ip2}^B \cdot T_{3,Ip2}^C + \dots + \overline{T_{3,W2}^A} \cdot T_{3,W2}^B \cdot T_{3,W2}^C + \dots + \overline{T_{3,Ip1}^A} \cdot T_{3,Ip1}^B \cdot \overline{T_{3,Ip1}^C},$$

де Y_{W2}^A - сигнал, що приймає значення «1» за КЗ у фазі А лінії W2;

D_2^\uparrow - оператор затримки появи сигналу на час $t_2 = t_{Л.} + \Delta t$ ($t_{Л.}$ - час роботи дистанційного захисту лінії W2);

$T_{1,W2}^A, T_{2,W2}^A$ - сигнали від першого, другого ПО;

x_{V2} - сигнал, на зміну струму спрацьовування захисту з I_{C31} на I_{C32} ;

$T_{3,W1}^A, T_{3,W1}^B, T_{3,W1}^C, T_{3,Ip2}^A, \dots, T_{3,W2}^C, T_{3,Ip1}^A, T_{3,Ip1}^B, T_{3,Ip1}^C$ - сигнали від КВЗ всіх приєднань про те, що струм в їхніх фазах А, В, С більший струмів холостого ходу $I_{C33} \geq 1,3 \cdot I_{XX}$.

Представлені логічні формули виражають умови визначення пошкодженої фази і подачі сигналів на котушки вимикання її вимикачів, дана оцінка чутливості захисту, що може виявляти мінімальний струм КЗ $I_{КЗ.МИН} = 1,7 \cdot I_{Н.МКС}$, схема пристрою захисту приєднань чотирикутника і опис її роботи, а також для шестикутника структурна схема алгоритму захисту в частині її дії на вимикання W1 (рис. 2).

Структури алгоритмів захистів схем 3/2 і 4/3 відрізняються тим, що в них резервується захист збірних шин. Напрямок потужності у всіх режимах розглянуто для різних положень вимикачів. В умові подачі сигналів на вимикання шин ввімкнено блокування, яке запобігає хибному спрацьовуванню захисту за зовнішніх КЗ [3,10]. Представлена структурна схема алгоритму, що виражає умови вимкнення КЗ на шинах. За побудови алгоритму для схеми 4/3 враховані різні варіанти її розпаду, у тому числі вимикання секційних вимикачів [6].

З огляду на велику кількість вимірювальних органів, розроблений алгоритм перевірки справності деяких реле розглянутого захисту та обривів з'єднувальних проводів [5]. Використовується, наприклад, наявність (відсутність) сигналу від реле положення «ввімкнено» і відсутність (наявність) сигналу від реле положення «вимкнено», які

Розроблені алгоритми та схеми для контролю справності основних реле запропонованих захистів і реле положення вимикачів, можуть бути використані і для підвищення надійності традиційних захистів.

Список використаних джерел

1. Шахаев, К. Т. Резервная токовая направленная защита линий ОРУ 330-750кВ / К. Т. Шахаев, М. Я. Клецель, К. И. Никитин, А. С. Стинский // Научные проблемы транспорта. – 2009. - №2. - С. 355-358.

2. Бунько, В. Я. Розробка алгоритму для дослідження методів підвищення надійності пристроїв релейного захисту [Текст] / В. Я. Бунько // Актуальні проблеми в сферах науки та шляхи їх вирішення: матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції (Україна, м. Харків, 18-19 березня 2016 року). – С. 20-25.

3. Бунько, В. Я. Аналіз методів та засобів підвищення надійності елементів релейного захисту [Текст] / В. Я. Бунько // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – №3/1(23) – С. 26-30.

4. Шахаев, К. Т. Построение резервных защит линий электропередач с использованием первого закона Кирхгофа / К. Т. Шахаев, М. Я. Клецель, К. И. Никитин, А. С. Стинский // Научные проблемы транспорта. – 2010. - №1. - С. 309-312.

5. Кузнецов, В. Г. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж [Текст] / В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2009. – Вип. 23. – С. 110–117.

6. Некрасов, А. М. Дальние электропередачи 750 кВ. Воздушные линии [Текст] / А. М. Некрасов, С. С. Рокотян. – М.: Энергия, 1974. – 356 с.

7. Сулейманов, В. М. Электрические сети и системы [Текст] / В. М. Сулейманов, Т.Л. Кацадзе. – Киев.: НТУУ «КПИ». – 2007. – 274 с.

8. Веников, В. А. Расчёт режимов дальних электрических передач переменного тока [Текст] / В. А. Веников, И. П. Сиуда. – М.: Высшая школа. – 1966. – 189с.

9. Бунько, В. Я. Обґрунтування розробки резервних централізованих захистів ліній електропередач напругою 330-750 кВ. // Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці: зб. наук. праць IV Наукова конференція. (...) – Харків, Х.: Технологічний Центр, 2016. – С. 67-68.

10. Шахаев, К. Т. Разработка резервных централизованных защит линий напряжением 330-750 кВ [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / К. Т. Шахаев. - Омский государственный технический университет. – Омск, 2011. – 23 с.

References

1. Shakhaev, K. T., Kletsel, M. Ia., Nykytyn, K. Y., Stynskiy, A. S. (2009). Rezervnaia tokovaia napravlennaia zashchyta lyny ORU 330-750kV [Back-up current directional protection of lines of outdoor switchgear 330-750kV]. Nauchnye problemy transporta, 355-358.

2. Bunko, V. Ia. (2016). Rozrobka alhorytmu dlia doslidzhennia metodiv pidvyshchennia nadiinosti prystroiv releinoho zakhystu [Developing an algorithm to study methods of improving the reliability of relay protection]. Materialy IV

mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Aktualni problemy v sferakh nauky ta shliakhy yikh vyrishennia», 20-25.

3. Bunko, V. Ia. (2015). Analiz metodiv ta zasobiv pidvyshchennia nadiinosti elementiv releinoho zakhystu [Analysis methods and means to improve the reliability of relay protection]. Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva, 26-30.

4. Shakhaev, K. T., Kletsel, M. Ia., Nyktyyn, K. Y., Stynskiy, A. S. (2010). Postroenye rezervnykh zashchyt lynyi elektroperedach s yspolzovanyem pervoho zakona Kyrkhghofa [Building backup power line protections using the first Kirchhoff law]. Nauchnye problemy transporta, 309-312.

5. Kuznetsov, V. H., Tuhai lu. I. (2009). Pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti mahistralnykh elektrychnykh merezh [Improving the reliability and efficiency of the electricity grid]. Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy: Zb. nauk. pr. – Kyiv.: IED NAN Ukrainy, 110–117.

6. Nekrasov, A. M., Rokotian, S. S. (1974). Dalnye elektroperedachy 750 kV. Vozdushnye lynyy. [Long power of 750 kV. Overhead lines]. Moscow: Enerhyia, 356.

7. Suleimanov, V. M., Katsadze, T.L. (2007). Elektrycheskye sety y systemy. [Electrical networks and systems]. Kyev, NTUU «KPY», 274.

8. Venykov, V. A., Syuda, Y. P. (1966). Raschët rezhyrov dalnykh elektrycheskykh peredach peremennoho toka. [Calculation modes Ordering of long-distance transmission of alternating current]. Moscow: Vysshaya shkola, 189.

9. Bunko, V. Ia. (2016). Obgruntuvannia rozrobky rezervnykh tsentralizovanykh zakhystiv linii elektroperedach napruhoiu 330-750 kV [Justification develop centralized backup power protection voltage of 330-750 kV]. IV Naukova konferentsiia «Fundamentalni ta prykladni doslidzhennia u suchasni nauki». Zbirka naukovykh prats. – Kharkiv, Tekhnolohichniy Tsentr, 67-68.

10. Shakhaev, K. T. (2011). Razrabotka rezervnykh tsentralizovannykh zashchyt lynyi napriazhenyem 330-750 kV [Contingency centralized protection line voltage 330-750kV]. Omsk State Technical University. – Omsk., – 23 s.

ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В. Я. Бунько

Аннотация. *Предложенный принцип построения резервных централизованных защит от коротких замыканий на землю линий электропередач 330-750 кВ кольцевых схем открытого распределительного устройства, в отличие от известных, основан на контроле отношений токов фаз на стороне низшего напряжения повышающего трансформатора блока электростанции. Разработаны алгоритмы функционирования, методика выбора уставок, оценка чувствительности, учитывающие токи в неповрежденных фазах и модель защиты.*

За счет контроля сумм токов неповрежденных присоединений и величин токов в поврежденных, предложенный метод построения централизованных защит от междуфазных замыканий, основан на использовании первого закона Кирхгофа.

Разработаны алгоритмы резервных централизованных защит упомянутых присоединений от межфазных замыканий на сравнении знака мощности на них. Эти алгоритмы отличаются от известных с учетом значительно большего количества режимов работы оборудования. Среди традиционных централизованных наибольший интерес вызывает дифференциальная токовая защита шин, так как она основана на анализе только токов присоединений и применении первого закона Кирхгофа без использования информации о направлении мощности.

Проведена оценка чувствительности традиционных резервных защит от междуфазных замыканий (максимальной токовой и дистанционной защит) и от однофазных замыканий на землю (нулевой последовательности).

Ключевые слова: трансформатор, линия электропередач, короткое замыкание, ток, напряжение, открытое распределительное устройство

BACKGROUND OF CONSTRUCTION OF BACKUP CENTRALIZED POWER PROTECTION HIGH VOLTAGE

V. Ia. Bunko

Abstract. *The proposed principle of the centralized backup protection from short circuits to ground transmission lines 330-750 kV ring circuits outdoor switchgear, in contrast to the known, based on monitoring phase currents relations on the side of low voltage step-up transformer power supply. Developed algorithms of functioning, methods of selecting the settings, evaluation of sensitivity, considering the currents in the healthy phases and security model.*

By controlling the amounts of currents connections intact and current values in injured, the proposed method of construction of the centralized protection against phase faults, based on the use of the first law of Kirchhoff.

The developed algorithms centralized backup protection from the mentioned connections interphase fault comparison power sign on them. These differ from the known algorithms taking into account the significantly larger number of operating modes of the equipment. Among the most traditional centralized interes causes a differential current busbar protection, since it is based on the analysis of only the current connections and the application of the first law of Kirchhoff without the use of sending power information.

Evaluation of the sensitivity of traditional backup protection from phase faults (overcurrent and distance protection) and on the single-phase ground fault (zero sequence).

Keywords: *transformer, power line, a short circuit current, voltage, outdoor switchgear*