

УДК 621.316

**ШВИДКОДІЮЧИЙ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВУЗЛОВИХ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ
РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ**

К-т техн. наук В.М. Баженов , ст. виклад М.М. Одегов

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА УЗЛОВЫХ СХЕМ ПИТАНИЯ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

К-т техн. наук В.Н. Баженов , ст. преподав. Н.Н. Одегов

**THE QUICK-OPERATED PROTECTION RELAY FOR THE NODAL POWER
CIRCUIT OF DISTRIBUTION NETWORKS**

Candidate of techn. sciences V. N. Bazhenov, senior lecturer N.N. Odegov

Визначені критерії та алгоритми функціонування релейного захисту для швидкого вимкнення пошкоджень в розподільних електричних мережах 6 – 35 кВ в межах ступені селективності 0,3 – 0,5 с. Запропоновано два способи швидкого вимкнення пошкоджень в

розподільних мережах: перший – пов'язаний з новим рівнем управління аварійними режимами за допомогою реклоузерів. Другий – погоджена дія засобів релейного захисту і автоматики. Сформульовані основні умови функціонування захисту розподільної мережі з двостороннім живленням. Умови спрацьовування захисту визначені нормованою чутливістю до пошкоджень. Умови неспрацьовування захисту задані відстроєністю від зовнішніх пошкоджень і всі види захисту – від максимального робочого режиму розподільної мережі. Розглянуті умови спрацьовування і неспрацьовування застосовні для всіх видів технічних засобів релейного захисту, у тому числі – електромеханічних, які можуть бути використані для вибору умов роботи систем безпеки інтелектуальних систем автоматизації розподільних мереж 6 – 35 кВ.

Ключові слова: релейний захист, пошкодження, реклоузер, розподільні мережі.

Определены критерии и алгоритмы функционирования релейной защиты для быстрого отключения поврежденных в распределительных электрических сетях 6 – 35 кВ в пределах ступени селективности 0,3 – 0,5 с. Предложены два способа быстрого отключения поврежденных в распределительных сетях: первый – связан с новым уровнем управления аварийными режимами с помощью реклоузеров. Второй – согласованное действие средств релейной защиты и автоматики. Сформулированы основные условия функционирования защиты распределительной сети с двухсторонним питанием. Условия срабатывания защит определены нормированной чувствительностью к повреждениям. Условия несрабатывания защит заданы отстроенностью от внешних повреждений и все виды защит – от максимального рабочего режима распределительной сети. Рассмотренные условия срабатывания и несрабатывания применимы для всех видов технических средств релейной защиты, в том числе – электромеханических, которые могут быть использованы для выбора условий работы систем безопасности интеллектуальных систем автоматизации распределительных сетей 6 – 35 кВ.

Ключевые слова: релейная защита, повреждение, реклоузер, распределительные сети.

Electric distributive networks by voltage of 10 - 35 кV are the basic parts of power supply of all electric power users . Statistically they are one of the most damaged electric networks, including for the railway transport of Ukraine. There is 60% from the all damages of all electric networks. With the purpose of decline of harm from violation of insufficient power supply of the users new untraditional methods and technical tools of intelligent control systems by electric distributive networks are supplied. For realization of the conception Smart Grid intelligent technology is used in an electroenergy. It provide complex application of tools for reliability and safety systems of power supply of electric power users. Criteria and algorithms of functioning of relay protection are given for the rapid disconnecting of damages in distributive electric networks 6 – 35 кV within the [grading margin time](#) during 0,3 – 0,5 sec. Two methods of the rapid disconnecting of damages are offered in distributive networks. The first method is related to the new level of management malfunctions by the recloser. It supposes introduction of fifth-generation of hardwares of relay protection and automation. It is microprocessors of making decision, processors of recognition of situations. Connections between the microprocessors of making decision provide functions absolutely selective protection. The backing-up is arrived at adjacent off-delay protection of disconnecting of switch in a basic area. Second is the coordination of tools of the relay protection and the automation. Basic conditions of protection of distributive network with a two-sided feed are formulated. The terms of tripping of protection are determined by the damage sensitiveness. The terms of the [unavailability](#) of protection are offset from external damages (current cut-off, 1 and 2 areas of the distance protection) and all types of protection – from the maximal operating condition of distributive network. The considered terms of the tripping and the [unavailability](#) are applicable for all types of hardwares of relay protection, including – electromechanics, which can

be used for the choice of terms of work of the systems of safety of the intellectual systems of automation of distributive networks of 6 – 35 kV.

Keywords: relay protection, damage, recloser, rapredelitelnye network

Постановка проблеми. Електричні розподільні мережі напругою 6 - 35 кВ є основною ланкою електропостачання усіх споживачів електроенергії і за статистикою одні з тих електричних мереж України, що найбільше ушкоджуються. На їх долю припадає 60% від загального числа ушкоджень всіх електричних мереж. Розподільні електричні мережі забезпечують електропостачання таких споживачів як: населені селища і райони міст, підприємства газової і нафтової галузей, залізничного транспорту, промисловості та ін. Зараз у зв'язку з новими вимогами до зниження збитків від порушення електропостачання вказаних споживачів намітився пошук нових нетрадиційних методів і технічних засобів інтелектуалізації систем управління електричними розподільними мережами. Для реалізації концепції інтелектуалізації в електроенергетиці в даний час застосовується технологія Smart Grid, що передбачає комплексне застосування всіх засобів для надійності та безпеки систем електропостачання споживачів електроенергії. Тривалість вимкнення пошкоджень в розподільних мережах 6 – 35 кВ, що працюють з ізольованими або резонансно – компенсованими нейтраліями, складається з часу спрацьовування захисту і власного часу вимкнення вимикачем навантаження.

Аналіз останніх досліджень. Вимога до швидкості дії релейного захисту визначається параметрами електроустановки, величинами термічної і динамічної стійкості, щоб за час дії захисту в електроустановці не сталися значні пошкодження, а також не порушилася стійка робота рухового навантаження, не знизилася напруга нижче допустимого рівня та ін. Для певних електроустановок [1] допустимий час спрацьовування релейного захисту не повинен перевищувати ступені селективності, рівної 0,3 – 0,5 с.

Мета статті. Визначити способи та алгоритми функціонування релейного захисту для швидкого вимкнення

пошкоджень в розподільних електричних мережах 6 – 35 кВ в межах ступені селективності.

Основні матеріали дослідження. Найкращий спосіб пов'язаний з новим рівнем управління аварійними режимами розподільних мереж за допомогою технології SMART CRID [2 – 7] – це впровадження п'ятого покоління технічних засобів релейного захисту і автоматики [8 – 9], які будуть працювати на мікропроцесорах ухвалення рішень (МУР), процесорах розпізнавання ситуацій. Особливість архітектури релейного захисту і автоматики п'ятого покоління в тому, що відповідні дії здійснюються мікропроцесорами ухвалення рішень, що підключаються до вимірювальних трансформаторів струму і напруги з кожного боку відповідного вимикача всіх приєднань. Кожен мікропроцесор ухвалення рішень розпізнає ситуацію електричної мережі відносно свого вимикача в зонах “справа” і “зліва” – “за спиною” і повинен діяти на вимкнення лише свого вимикача. МУР всіх вимикачів зв'язуються цифровими волоконно – оптичними каналами, високочастотними або радіоканалами для створення абсолютно селективного захисту без витримки часу елементів розподільної мережі за принципом віртуального диференційного струмового захисту (ВДСЗ). Якщо відмовлять всі канали зв'язку з суміжними вимикачами, то МУР діє як автономний релейний захист четвертого (мікропроцесорного) покоління, розпізнає ситуацію в електричній мережі по обидві сторони лише свого вимикача. Завдяки зв'язкам між мікропроцесорами ухвалення рішень, які йдуть від вимикача до вимикача, абсолютно селективні захисти резервуються суміжними захистами із затримкою на тривалість вимкнення вимикача в основній зоні згідно протоколу МЕК 61850 [10].

Другий спосіб – погоджена дія засобів релейного захисту і автоматики. Вживання лише максимального струмового захисту не дає бажаних результатів в швидкому вимкненні пошкоджень. Так, в [11] для

прискорення захисту ліній електропередачі з однобічним живленням пропонується застосовувати замість триступінчатого струмового захисту – двоступінчатий струмовий захист: перший рівень – струмове відсічення без витримки часу, другий – струмовий захист із залежною характеристикою спрацьовування.

Проте, як і для всіх максимальних струмових захистів, тут характерний вплив режимів роботи джерел живлення розподільної мережі (наприклад, із збільшенням опору енергосистеми, у тому числі живлячого силового трансформатора, час спрацьовування захисту теж збільшується). З метою зниження тривалості пошкоджень, використовуючи можливості автоматизації розподільних мереж на базі реклоузерів, нами пропонується застосовувати погоджену дію релейного захисту і автоматики в наступному об'ємі: струмове відсічення без витримки часу (ТО); перша зона дистанційного захисту (ДЗ1); друга зона дистанційного захисту (ДЗ2); третя зона дистанційного захисту (ДЗ3); максимальний струмовий захист (МЗ); автоматичне повторне ввімкнення (АПВ) і автоматичне включення резерву (АВР). Дистанційні захисту ДЗ1 – ДЗ3 повинні автоматично резервуватися триступінчатим струмовим захистом, який включається в роботу при глибоких посадках напруги в місцях установки захисту. Сформулюємо основні технічні можливості вказаних пристроїв захисту і автоматики. ТО – миттєвий захист з нормованою чутливістю в межах 40% об'єкту, що захищається; ДЗ1 – теж миттєвий захист з нормованою чутливістю, але в межах 85 – 90% свого об'єкту захисту; ДЗ2 – 100% захист для свого об'єкту; ДЗ3 – резерв 100% до захисту свого і суміжного об'єктів; МЗ – резерв 100% до захисту свого об'єкту. Основне призначення струмового відсічення – перекривати мертві зони по напрузі першого рівня дистанційного захисту. Швидке відключення пошкоджень може дати неселективний релейний захист з подальшим виправленням її неселективності за рахунок використання АПВ, що дозволяє прискорюватися захисту до дії АПВ. Застосовується прискорення дії релейного захисту після циклу АВР. У

розподільних мережах з двостороннім живленням можна використовувати АПВ з контролями напруги і синхронізму джерел живлення, і прискорення нижчих по сигналах від вищих рівнів протилежного захисту.

Для розгляду умов функціонування релейного захисту розподільної мережі з двостороннім живленням (шини А – пункт секціонування ПС – шини В) вибрані розрахункові точки короткого замикання: К1 – пошкодження на початку лінії А – ПС, поблизу вимикача фідера $QA1$; К2 – пошкодження в кінці лінії А – ПС, поблизу пункту секціонування і вимикача $QPC1$; К3 – пошкодження на початку суміжної лінії ПС – В, поблизу вимикача пункту секціонування $QPC2$; К4 – пошкодження в кінці суміжної лінії ПС – В, поблизу шин В і вимикача $QB1$; К5 – пошкодження поблизу шин, А ” за спиною” для вимикача фідера $QA1$.

Позначимо коефіцієнти, використовувані в умовах спрацьовування і неспрацьовування пристроїв релейного захисту: k_{H1} – коефіцієнт надійного відстроювання (умова неспрацьовування) захисту від максимального струму к.з. в кінці об'єкту захисту; k_{H2} – коефіцієнт надійного відстроювання (умова неспрацьовування) захисту мінімального опору від пошкоджень в кінці об'єкту захисту; k_3 – коефіцієнт запасу для умов неспрацьовування захисту і блокувань в максимальних режимах мережі; k_B – коефіцієнт повернення захисту мінімального типу;

k_{B1} – коефіцієнт повернення захисту максимального типу; k_4 – нормований коефіцієнт чутливості (умова спрацьовування) для струмового відсічення і третього рівня дистанційного захисту; k_{41} – нормований коефіцієнт чутливості (умова спрацьовування) для другого рівня дистанційного захисту до пошкоджень в кінці об'єкту захисту; k_{42} – нормований коефіцієнт чутливості (умова спрацьовування) для третього рівня дистанційного захисту до пошкоджень в кінці об'єкту захисту.

Запропоновані умови функціонування захисту ділянки розподільної мережі: шини А – пункт секціонування ПС. *Струмове відсічення.* Даний захист з абсолютною

селективністю не повинен спрацьовувати при пошкодженнях на кордоні суміжних приєднань в точці К2 в максимальному режимі роботи прилеглої електричної мережі по формулі:

$$I_{T0} \geq k_{H1} \cdot I_{K2. \max} , \quad (1)$$

де $I_{K2. \max}$ – струм вимикача QA1 при к.з. у точці К2 в максимальному режимі роботи прилеглої електричної мережі.

Дія захисту визначається забезпеченням нормованої чутливості до пошкоджень в місці установки захисту:

$$k_{\text{ч}} = I_{K1. \min} / I_{T0} \geq 1,2 , \quad (2)$$

де $I_{K1. \min}$ – струм вимикача QA1 при к.з. у точці К1 в мінімальному режимі роботи прилеглої електричної мережі.

Додатково захист не повинен спрацьовувати під час максимальних режимів навантажень і пошкодженнях "за спиною":

$$I_{T0} \geq k_3 \cdot I_{P. \max} , \quad (3)$$

де $I_{P. \max}$ – розрахункове значення максимального струму в робочому режимі розподільної мережі,

$$I_{T0} \geq k_3 \cdot I_{K5. \max} , \quad (4)$$

де $I_{K5. \max}$ – струм вимикача QA1 при к.з. у точці К5 в максимальному режимі роботи джерела В.

Якщо умови(3 або 4) не дотримуються, то струмове відсічення має бути відповідно спрямоване у вигляді сектора $55 - 120^\circ$ або $0 - 120^\circ$.

Струмове відсічення виконується миттєвим, без витримки часу $t_{\text{CP}}=0$, оскільки селективність забезпечується вибором струму спрацьовування захисту.

1 зона дистанційного захисту. Уставка даного захисту з абсолютною селективністю вибирається по умові неспрацьовування від опору, вимірюваного 1 зоною захисту, при к.з. в кінці лінії, що захищається, А – ПС:

$$Z_{\text{ДЗ1}} \leq k_{H2} \cdot Z_{K2. \min} , \quad (5)$$

де $Z_{K2. \min}$ – опір, вимірюваний першим рівнем, при к.з. в кінці лінії А – ПС в режимі максимуму енергосистеми.

Також захист не повинен спрацьовувати від максимальних режимів навантажень:

$$Z_{\text{ДЗ1}} \leq Z_{P. \min} / k_3 , \quad (6)$$

де $Z_{P. \min}$ – мінімальний опір, вимірюваний захистом, в робочому максимальному режимі мережі.

Характеристика захисту в комплексній площині – не спрямоване, у вигляді кола з центром на початку координат $\varphi_{\text{CP}} = 0 - 360^\circ$.

Властивість спрямованості забезпечується струмовим блокуванням. ДЗ1 виконується без витримки часу $t_{\text{CP}}=0$.

Струмове блокування. Застосовується для першого рівня дистанційного захисту фідера розподільної мережі. Уставка струмового пуску вибирається більше струму у вимикачі QA1 при к.з. К5:

$$I_{\text{BT}} \geq k_3 \cdot I_{K5. \max} , \quad (7)$$

де $I_{K5. \max}$ – розрахунковий струм вимикача QA1 при к.з. у точці К5 рівний струму від підстанції В в максимальному режимі роботи підстанції і прилеглої електричної мережі. *2 зона дистанційного захисту.* Захист повинен захищати 100 % своїй лінії з нормованою чутливістю до пошкоджень на всій ділянці А – ПС:

$$Z_{\text{ДЗ2}} \geq k_{\text{ч1}} \cdot Z_{K2. \max} , \quad (8)$$

де $Z_{K2. \max}$ – опір пошкодження в точці К2, який вимірюється другим рівнем дистанційного захисту в режимі мінімуму енергосистеми А.

Проте, захист не повинен спрацьовувати під час максимального робочого режиму мережі з врахуванням повернення даного захисту після відключення пошкодження на суміжній лінії своїм основним захистом:

$$Z_{\text{ДЗ2}} \leq Z_{P. \min} / (k_3 \cdot k_B) , \quad (9)$$

де $Z_{P. \min}$ – мінімальний опір, вимірюваний захистом, в робочому максимальному режимі розподільної мережі.

Характеристика 2 зони захисту – спрямована, у вигляді сегменту кола з кутом $\varphi_{CP} = 0 - 120^\circ$ у 1 і 2 квадрантах комплексної площинності. Витримка часу приймається рівному ступеню селективності з метою резервування першої зони.

3 зона дистанційного захисту. Бажано, щоб захист відчував пошкодження на суміжній лінії ПС – В в режимі мінімуму живлячої енергосистеми:

$$Z_{ДЗ3} \geq k_{ч} \cdot Z_{K4. \max} , \quad (10)$$

де $Z_{K4. \max}$ – опір пошкодження в точці K4, який вимірюється третьою зоною дистанційного захисту в режимі мінімуму енергосистеми А і з врахуванням активного опору дуги (5 – 8 Ом) в місці пошкодження. Обов'язково 3 зона дистанційного захисту повинна відчувати пошкодження на шинах пункту секціонування в розрахунковій точці K2:

$$Z_{ДЗ3} \geq k_{ч2} \cdot Z_{K2. \max} , \quad (11)$$

де $Z_{K2. \max}$ – опір пошкодження в точці K2, який вимірюється 3 зоною дистанційного захисту в режимі мінімуму енергосистеми А і з врахуванням активного опору дуги (5 – 8 Ом) в місці пошкодження.

Як правило, уставка 3 зони дистанційного захисту по абсолютному значенню не може бути відбудована від мінімального опору $Z_{P. \min}$ в робочому максимальному режимі розподільної мережі. Тому відстроювання від цього режиму можливе за рахунок кутової характеристики захисту у вигляді сектора 55 – 120 град. *Максимальний струмовий захист*. Захист повинен спрацьовувати при всіх пошкодженнях на своїй лінії (100 % захист) по умові забезпечення нормованої чутливості до пошкоджень на шинах пункту секціонування в розрахунковій точці K2:

$$I_{МЗ} \leq I_{K2. \min} / k_{ч1} , \quad (12)$$

де $I_{K2. \min}$ - струм вимикача QА1 при к.з. у точці K2 в мінімальному режимі роботи мережі.

Перевіряється захист по умові неспрацьовування після вимкнення суміжними захистами пошкодження на всій розподільній мережі:

$$I_{МЗ} \geq k_3 \cdot I_{P. \max} / k_{В1} , \quad (13)$$

де $I_{P. \max}$ – розрахункове значення максимального струму в робочому режимі. Даний захист є другим рівнем струмового захисту і виконує функції ближнього і далекого резервування. Розглянуті умови функціонування релейного захисту розподільної мережі з двостороннім живленням у поєднанні з пристроями автоматики дозволяють вимкати пошкодження часом до рівня селективності, застосовуючи прискорення протилежних чутливих захистів, котрі мають найбільші затримки часу.

Висновки. Запропоновано два способи швидкого вимкнення пошкоджень в розподільних мережах: перший – пов'язаний з новим рівнем управління аварійними режимами за допомогою реклоузерів. Другий – погоджена дія засобів релейного захисту і автоматики. Сформульовані основні умови функціонування захисту розподільної мережі з двостороннім живленням. Умови спрацьовування захисту визначені нормованою чутливістю до пошкоджень. Умови неспрацьовування захисту задані відстроєністю від зовнішніх пошкоджень (струмове відсічення, 1 і 2 зони дистанційного захисту) і всі види захисту – від максимального робочого режиму розподільної мережі. Розглянуті умови спрацьовування і неспрацьовування застосовні для всіх видів технічних засобів релейного захисту, у тому числі – електромеханічних, які можуть бути використані для вибору умов роботи систем безпеки інтелектуальних систем автоматизації розподільних мереж 6 – 35 кВ.

Список використаних джерел

1. Фигурнов Е.П. Релейная защита : учебник для вузов железнодорожн. трансп. / Е.П. Фигурнов – М. : Желдориздат, 2002. – 720 с.
2. Симонов А. Новый уровень управления аварийными режимами распределительных сетей с помощью реклоузеров // Электрик. 2012. №12. – С. 12-18.
3. SMART CRID [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
4. Delfino B. Load – Frequency Control: new perspectives in the open access environment // B. Delfino, F. Formari, S. Massuco / IEEE, 2000, vol.3, P. 1866 – 1871.
5. Barsali S, Control techniques of Dispersed Generators to improve the continuity of electricity supply // S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi / IEEE, 2002, vol.2, P. 789 – 794.
6. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006, 40 p.
7. Smart Power Grids – Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.
8. Силаев Ю. Релейная защита от плавкой вставки до микропроцессора // Релейная защита и автоматизация. 2012. №01 (06). – С.48-53.
9. Микропроцессорная защита распределительной сети 10 – 35 кВ / Баженов В.Н., Эхсони Субхон //Тези доповідей ХХ111 міжнародної науково-практичної конференції Ч.2 (20-22 травня 2015р, Харків) / за ред проф Сокола Е.І- Харків, НТУ “ХПІ”–С. 162–163.
10. Brunner C. , Apostolov A. IEC 61850 Brand New World Magazine. Summer 2007.
11. Гарке В., Исаков. Р. Ступенчатые токовые защиты распределительных сетей с зависимой характеристикой срабатывания // Релейная защита и автоматизация. 2011. №01 (02). – С. 22-26.

Баженов Володимир Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації енергосистем, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, тел. 7076551, fider 41@ mail.ru

Одегов Микола миколайович, ст. викладач кафедри автоматизовані системи електричного транспорту, Українського державного університета залізничного транспорту, тел 7301075, ел. пошта 8084214@ukr.net

Стаття постуила 21.05.2015