

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-3>

УДК 621.3

І. Т. Карпалюк¹, професорВ. М. Баженов², доцентМ. М. Одегов³О. О. Горюн², аспірант

ORCID: 0000-0002-5634-6807

ORCID: 0009-0001-5450-8382

ORCID: 0000-0003-3967-9009

ORCID: 0009-0002-5235-6853

¹Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»³Український державний університет залізничного транспорту

e-mail: humpway@gmail.com

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ МІСЦЕВИХ ЛІНІЙ

Анотація. У роботі розглянуто особливості функціонування релейного захисту високовольтних ліній 110–220 кВ в умовах дефіциту генеруючої потужності та струму короткого замикання, що характерне для автономних локальних енергосистем у періоди надзвичайних ситуацій, зокрема у воєнний час. Проведено аналіз умов спрацювання резервних струмових та дистанційних захистів ліній у нестандартних режимах роботи енергосистеми. Запропоновано рекомендації щодо вибору уставок, забезпечення селективності, чутливості та надійності спрацювання захистів за мінливих потоків потужності. Установлено, що ефективність резервного захисту суттєво знижується зі зменшенням потужності системи, особливо за живлення з боку слабких джерел. Обґрунтовано доцільність застосування додаткових захисних заходів, таких як селективна струмова відсічка з витримкою часу та використання АПВ із блокуванням.

Ключові слова: релейний захист, дефіцит потужності, слабкі джерела живлення, ефективність резервного захисту, чутливість захисту, надійність спрацювання, максимальна струмова відсічка, селективна струмова відсічка, автоматичне повторне включення.

Постановка проблеми. В час для надійного електропостачання особисте значення приймає високовольтні лінії 110–220 кВ, котрі виконують функції міжсистемних зв'язків, а в подальшому функції основних високовольтних ліній електропередачі для автономних місцевих енергосистем. Основні труднощі для захисту даних ліній від пошкоджень є налаштування параметрів спрацювання часто мінливих режимів живлючої мережи.

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності сучасних пристроїв резервних захистів місцевих ліній електропередачі в умовах дефіциту генеруючої потужності та потужності короткого замикання

Матеріали дослідження. Дослідження ефективності релейного захисту виконується на прикладі високовольтної лінії 110 кВ для електропостачання 2-х трансформаторної підстанції 110/35/6 кВ.

Проаналізуємо рекомендовані [1, 2, 3] умови функціонування та вибору резервних струмових захистів лінії (рис. 1). Згідно загальних правил перша умова функціонування максимальної струмової відсічки (МСВ) від між фазних КЗ, як абсолютно селективного захисту, – це не спрацювання від КЗ в кінці лінії, в точці К1 в максимальному режиму живлючої мережи ПСА, в зоні захисту трансформаторів підстанції ПСБ:

$$I_{сз} \geq K_{від} \cdot I_{\max K1}^{(3)},$$

де $K_{від}$ – коефіцієнт відведення в межах 1,2–1,5, $I_{\max K1}^{(3)}$ – струм КЗ в максимальному режиму.

Друга умова функціонування: відсічка повинна бути відведення від кидка струму намагнічування $I_{\text{нам}}$ при включенні ненавантаженого трансформатора підстанції ПСБ під напругу:

$$I_{\text{сз}} \geq K_{\text{від}} \cdot I_{\text{нам}},$$

$$\text{де } I_{\text{нам}} = 7 \cdot I_{\text{ном}} \text{ та } I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{(\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}})}.$$

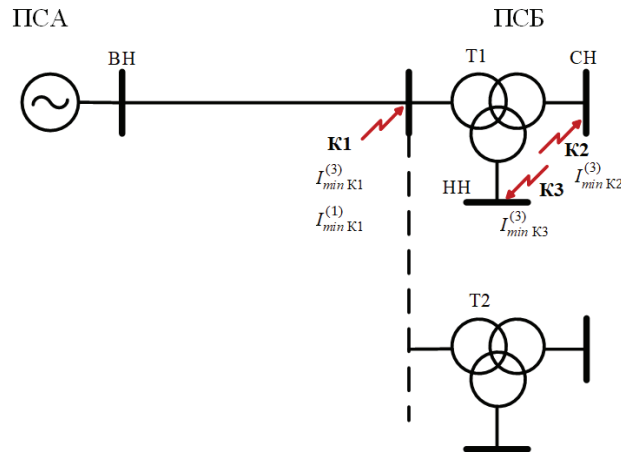


Рис. 1. Вихідні дані до струмових захистів

Струмова відсічка перевіряється по чутливості до 2-х фазного КЗ наприкінці лінії в мінімальному режимі:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{мин K1}}^{(2)} / I_{\text{сз}} = I_{\text{мин K1}}^{(3)} \cdot 0,867 / I_{\text{сз}}.$$

Згідно ПУЕ: $K_{\text{ч}} \geq 1,5 \div 2$.

Зону дії струмової відсічки $Z_{\text{св}\%}$ пропонуємо визначати по опору спрацювання СВ:

$$Z_{\text{сз}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{сз}}},$$

$$Z_{\text{св}\%} = (Z_{\text{сз}} - Z_{\text{C min}}) \cdot 100 / Z_{\text{л}},$$

де $Z_{\text{C min}}$ – опір живлючої системи в мінімальному режиму роботи; $Z_{\text{л}}$ – опір лінії, що захищається.

Ефективність струмової відсічки визначаємо шляхом порівняння $Z_{\text{C min}}$ з $Z_{\text{л}}$ по табл. 1.

$$K_{\text{C}} = Z_{\text{C min}} / Z_{\text{л}}.$$

Таблиця 1

Вплив параметрів живлючої системи на ефективність захисту лінії

Z_{Cmax} Ом	$Z_{\text{л}}$, Ом	K_{C}	$Z_{\text{св}} \%$	$S_{\text{ном, с}}$, МВт	$Z_{\text{C min}}$, Ом	$Z_{\text{сз}}$, Ом
1	5	0,1	82	2645	0,5	4,6
		0,2 = Z_{Cmax}	72	1322	1	
		0,4	52	661	2	
		0,8	12	330	4	
		0,92 = $Z_{\text{сз}}$	0	287 (3,5 $S_{\text{ПС}}$)	4,6	

Розрахункові дослідження показали, що якщо опір живлючої системи збільшується до опору спрацювання струмової відсічки, то вона не захищає лінію від пошкодження. Тому у таких випад-

ках рекомендуємо застосувати додатково струмову відсічку з затримкою часу 0,5 с зі с зоною дії в межах захисту трансформатора підстанції. Для виправлення неселективної роботи використовувати АПВ по спрацюванню захисту с блокуванням від диференційного захисту трансформатора:

$$I_{c3} \geq 1,3 \cdot I_{\max K2}^{(3)},$$

де $I_{\max K2}^{(3)}$ – струм короткого замикання за трансформатором в максимальному режимі.

Максимальний струмовий захист зі затримкою часу також залежить від часто мінливих режимів живлючої мережі [5, 6, 7]. Перша умова функціонування для максимального струмового захисту (МСЗ) [4] від між фазних КЗ – це відведення від струму навантаження:

$$I_{c3} = 1,2 \cdot I_{\text{нав}}.$$

Ефективність МСЗ забезпечується за рахунок резервування захистів трансформаторів підстанції:

$$I_{c3} = I_{\min K3}^{(2)} / 1,3(1,2),$$

де $I_{\min K3}^{(2)}$ – 2-х фазний струм КЗ за трансформатором в мінімальному режимі.

МСЗ перевіряється по чутливості до 2-х фазного КЗ наприкінці лінії в мінімальному режимі:

$$K_{\text{ч}} \geq I_{\min K1}^{(2)} / I_{c3}.$$

Згідно ПУЕ: $K_{\text{ч}} \geq 1,2$.

Уставка часу спрацювання МСЗ для виключення неселективної роботи обирається рівною часу спрацювання останньої зони дистанційного захисту.

Струмова відсічка захисту нульової послідовності (СЗНП) від між фазних КЗ зобов'язана захищати всю лінію:

$$I_{c3} = I_{\min K1}^{(1)} / K_{\text{ч}},$$

де: $K_{\text{ч}} = 1,5 \div 2$ – коефіцієнт чутливості; $I_{\min K1}^{(1)}$ – мінімальний режим КЗ наприкінці лінії.

Для 2 ступені СЗНП це умова відведення від струму небалансу в нульовому дроті трансформатору струму при зовнішніх КЗ між фазами:

$$I_{c3} = 1,5 \cdot 0,1 \cdot I_{\max K2}^{(3)},$$

де: $I_{\max K2}^{(3)}$ – розраховується при включеній нейтралі трансформатора з меншим опором.

Уставка часу спрацювання СЗНП обирається: відсічка (1 ступінь) $t_{c3} = 0,1$ с.; 2 ступінь $T_{c3} = 1$ с.

Згідно аналізу функціонування струмових захистів на рисунку 1 приведені ті параметри які впливають на ефективність релейного захисту лінії в умовах дефіциту генеруючої потужності та потужності короткого замикання.

По теорії ефективність дистанційного захисту (ДЗ) лінії не залежить від режимів роботи живлячої енергосистеми [5, 7]. Розглянемо це затвердження. Дистанційна відсічка (1 зона) повинна бути відведення від захистів підстанції (рис. 2):

$$Z_{c3\ 1} \leq 0,85 \cdot Z_{\text{л}},$$

$$\text{де } Z_{\text{л}} = \sqrt{(r_{\Sigma}^2 + x_{\Sigma}^2)}.$$

Чутливість дистанційного захисту перевіряється по струму точної роботи. $I_{\text{тр}}$.

$$K_{\text{ч}} = I_{\min K1}^{(2)} / I_{\text{тр}} \geq 1,3.$$

З метою збільшення ефективності дистанційного захисту лінії пропонується налаштовувати уставку на захист всій лінії:

$$Z_{c3\ 1} \geq 2 \cdot Z_{\text{л}}.$$

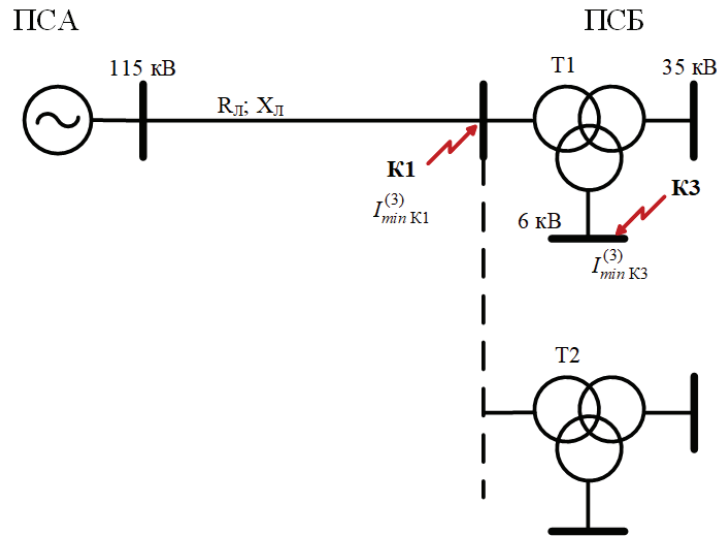


Рис. 2. Вихідні дані до дистанційних захистів

Для виправлення неселективної роботи пропонується використовувати АПВ з блокуванням від диференційного захисту трансформатора [5, 6].

Вихідні дані трансформаторів підстанції для подальших розрахунків дистанційних захистів: $S_{ном}$ – потужність трансформатора, МВА, в.о; ΔU – межа РПН трансформатора; $U_{кВ-Н}$, $U_{кВ-С}$, $U_{кС-Н}$ – напруги КЗ по обмоткам трансформатора, %. Далі розрахунки параметрів трансформатора для уставок дистанційних захистів.

Напруги КЗ:

$$U_B \% = 0,5 (U_{кВ-С} + U_{кВ-Н} - U_{кС-Н}),$$

$$U_C \% = 0,5 (U_{кВ-С} + U_{кС-Н} - U_{кВ-Н}),$$

$$U_H \% = 0,5 (U_{кВ-Н} + U_{кС-Н} - U_{кВ-С}).$$

Опорі кожної обмотки розраховуються по формулі:

$$Z = U \% \cdot U_{ном}^2 / (100 \cdot S_{ном}).$$

Для II зони – це умова відведення від КЗ на шинах СН трансформатора:

$$Z_{сз 2} \leq 0,85 \cdot (Z_{л} + Z_{тр.с РПН}).$$

$$Z_{тр.с РПН} = (Z_B + Z_C) \cdot (1 - \Delta U)^2.$$

II зона – це дистанційна відсічка зі затримкою часу:

$$T_2 = T_1 + \Delta t = 0 + 0,5 = 0,5 \text{ с.}$$

Перевіряється чутливість по струму точної роботи:

$$K_{ч} = I_{мин}^{(2)} K1 / I_{тр} \geq 1,3.$$

В ПМ РЗА Діамант характеристики спрацювання I та II зони мають форму чотирикутника з можливістю зміщення на будь-який квадрант щодо початку координат. Вершини розраховуються за допомогою програмного забезпечення по параметрам спрацювання ($Z_{уст}$, $\varphi_{мч}$). Вхідні ланцюги 1-ої і 2-ої зони проходять через блокування від колихань. Для блокування при хитаннях в Діаманті використовується принцип вимірювання швидкості входження вектору опору до зони. Для блокованого ступеня: ширина – 1 Ом втор., час руху – 0,04 с.

Для III зони – це умова надійного захисту лінії:

$$Z_{сз3} \geq 1,5 \cdot Z_{л}.$$

Також умова резервування трансформаторів:

$$Z_{сз3} \geq 1,2 \cdot (Z_{л} + X_{тр.с РПН}),$$

$$X_{тр.с РПН} = (X_B + X_H) \cdot (1 + \Delta U)^2.$$

Наступна умова відведення від струму навантаження при знижені робочої напруги менше ніж номінальної.

$$Z_{сз3} \leq U_{\min} / (K_{\text{від}} \cdot K_{\text{пов}} \cdot \sqrt{3} \cdot K_{\text{зап}} \cdot I_{\text{нав}} \cdot \cos(\varphi_{\text{мч}} - \varphi_{\text{н}})),$$

де: $U_{\min} = 0,8$; $K_{\text{від}} = 1,2$; $K_{\text{пов}} = 1,05$; $K_{\text{зап}} = 1$; $\varphi_{\text{мч}} = 65^\circ$; $\varphi_{\text{н}} = 30^\circ$.

Час спрацювання 3 ступені захисту:

$$T_3 = T_{2\max} + \Delta t,$$

де: $T_{2\max}$ – максимальний час захисту трансформатора ПС Б.

Перевіряється чутливість по струму точної роботи $I_{\text{тр}}$.

$$K_{\text{ч}} = I_{\min K3}^{(2)} / I_{\text{тр}} \geq 1,3.$$

В ПМ РЗА Діамант характеристики спрацьовування III зони мають форму трикутника з можливістю зміщення на будь-який квадрант щодо початку координат. Вершина z_3 розташована на початку координат, сторона z_2 , z_3 має нахил до осі R 115° , а сторона z_1 , z_3 нахил 47° .

Як і раніше, аналіз функціонування дистанційних захистів дає висновок, що на рисунку 2 показані ті вихідні параметри які визначають ефективність релейного захисту лінії в умовах дефіциту генеруючої потужності та потужності короткого замикання.

Висновки: Розглянуті особливості функціонування резервних захистів ліній електропередачі дозволили нам визначити вплив непередбаченої зміни режиму роботи електричної системи живлення в умовах дефіциту потужності енергопостачання на ефективність їх роботи. Вся суть у тому, що вибір уставок захистів виконується на вимогу їхньої селективної роботи із суміжними захистами в максимальних режимах роботи живильної енергосистеми. А ефективність резервних захистів потрібна у мінімальних режимах роботи енергосистеми, наприклад, при вимушеному виході з ладу багатьох ліній та трансформаторів. Виходячи з цього в роботі дана методика улаштування резервних захистів місцевих ліній енергосистем з метою підвищення їх ефективності в умовах війни.

Список використаних джерел

- 1 Правила улаштування електроустановок. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
- 2 Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.
- 3 Релейний захист електроенергетичних систем. Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Є.І. Сокол, Г.А. Сендерович, О.Г. Гриб, В.М. Баженов та ін. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. – 306 с.
- 4 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.
- 5 Релейний захист і автоматика: навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків :УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с.
- 6 Яндульський О. С. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання] : навч. посіб. О. С. Яндульський,



О. О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О. С. Яндутьського. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с.

7 М. Bini, R. Abboud, P. Lima, and F. Lollo, Challenges and solutions in the protection of transmission lines connecting nonconventional power sources, 48th Annual Western Protective Relay Conference, 2021. – 16 p.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2025р.

I. Karpaliuk¹, V. Bajenov², M. Odiehov³, O. Horiun²

¹*The Institute of Energy of National Academy of Sciences of Ukraine*

²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

³*Ukrainian State University of Railway Transport*

EFFICIENCY OF RELAY PROTECTION FOR LOCAL POWER TRANSMISSION LINES

Summary

The paper investigates the specific features of relay protection operation for high-voltage power transmission lines rated at 110–220 kV under conditions of limited generation capacity and reduced short-circuit current levels. Such conditions typically arise in autonomous or isolated local power systems operating during emergencies, particularly in wartime or following major accidents that result in the loss of connection with the main power grid. The study analyzes the impact of non-standard operating modes on the performance of backup overcurrent and distance protection schemes, identifying potential errors in relay behavior under weak infeed conditions. Examples of selectivity violations, sensitivity loss, and reduced reliability of protection devices due to significantly lower fault currents are presented. It is shown that traditional protection settings and coordination methods do not ensure effective operation in isolated system scenarios. Approaches to improve the settings of overcurrent and distance protection are proposed, taking into account the reduced capacity of power supply sources. The paper discusses the feasibility of implementing additional technical solutions such as time-delayed selective overcurrent protection, adaptive auto-reclosing blocking, and the use of information from automated control systems to enhance protection performance. The results of this study can be applied in the design, modernization, and operation of relay protection systems in local power networks..

Keywords: relay protection, power deficit, weak power sources, efficiency of backup protection, protection sensitivity, operating reliability, instantaneous overcurrent protection, selective overcurrent protection, automatic reclosing.