



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Kamil Paduszyński

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025



Politechnika Świętokrzyska
Kielce University of Technology

Projekt „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki” nr FERS.01.05-IP.08-0234/23



Spis treści

1.	Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń	4
2.	Pojęcia ogólne i podstawowe definicje	7
3.	Dobór zabezpieczeń przyłączanej elektrowni lokalnej.....	12
4.	Dane techniczne.....	12
4.1.	Obliczanie parametrów schematu zastępczego.....	13
5.	Projektowana stacja transformatorowa	15
5.1.	Dobór transformatora.....	15
5.2.	Dobór kabla	16
5.3.	Dobór przekładników prądowych SN	16
5.4.	Dobór przekładników napięciowych SN	22
6.	Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa	24
6.1.	Dobór zabezpieczeń podstawowych (falownik)	24
6.1.1.	Zabezpieczenia napięciowe	24
6.1.2.	Zabezpieczenia częstotliwościowe.....	24
6.2.	Dobór zabezpieczeń e ² Tango.....	24
6.2.1.	Zabezpieczenia napięciowe	25
6.2.2.	Zabezpieczenia częstotliwościowe.....	25
6.2.3.	Zabezpieczenie od pracy wyspowej.....	25
6.2.4.	Zabezpieczenia od zwarć międzyfazowych.....	26
6.2.5.	Zabezpieczenia ziemnozwarciowe	26
6.3.	Dobór zabezpieczeń linii nN	27
6.3.1.	Zabezpieczenia nadprądowe	27
6.3.2.	Spadek napięcia.....	28
6.4.	Ochrona od porażeń	28
7.	Literatura	30



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>





1. Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

AWSB – automatyka wymuszania składowej biernej

AWSC (AWSCz) – automatyka wymuszania składowej czynnej

EAZ – elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa

SEE – system elektroenergetyczny

SN – średnie napięcie

nN – niskie napięcie

BK (BKR) – bateria kondensatorów

TR – transformator rozdzielczy

TO – transformator odbiorczy

TPW – transformator potrzeb własnych

TU – transformator uziemiający

EL – elektrownia lokalna

LRW – lokalna rezerwa wyłącznikowa

p.n. – punkt neutralny

RS – rozdzielnia sieciowa

SCO – samoczynne częstotliwościowe odciążanie

SPZ – samoczynne ponowne załączanie

SZR – samoczynne załączanie rezerwy

ZS (ZSZ) – zabezpieczenie szyn zbiorczych

ZIU – zespolona instalacja uziemiająca

$\Delta I'_{0\mu}$ – prąd uchybowy wprowadzany przez filtr składowej zerowej prądu

$\Delta Y'_{0\mu}$ – admitancja uchybowa wprowadzana przez filtry składowych zerowych (prądu i napięcia)

$B_{0\text{ nast}}$ – nastawa zabezpieczenia susceptancyjnego, $B_0 > t$

$G_{0\text{ nast}}$ – nastawa zabezpieczenia konduktancyjnego, $G_0 > t$

$I_{0\text{ nast}}$ – nastawa zabezpieczenia nadprądowego ziemnozwarciowego, $I_0 > t$



I_{2n} – prąd znamionowy strony wtórnej przekładnika prądowego

I_{AWSC} – składowa czynna prądu wymuszanego przez AWSC

I_{CL} – pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego linii

I_{CS} – pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci

I_d – prąd indukcyjny dławika

$I_{nast}^>$ – nastawa zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego, $I > t$

$I_{nast}^{>>}$ – nastawa zabezpieczenia nadprądowego bezzwłocznego, $I >> t$

$I_{nast}^{>>>}$ – nastawa zabezpieczenia nadprądowego zwarciovego, $I >>> t$

$I_{zw\ max}^{3f}$ – maksymalna wartość prądu zwarcia trójfazowego

$I_{zw\ min}^{2f}$ – minimalna wartość prądu zwarcia dwufazowego

R', R_k – rezystancja jednostkowa, rezystancja kilometryczna

R_F – rezystancja przejścia w miejscu zakłócenia

$R_{S\ max}$ – maksymalna rezystancja systemu zasilającego

S_Q – zastępcza moc zwarciovą źródła, systemu (wynikająca z podanej mocy zwarciovą)

$S_{zw\ max}$ – maksymalna moc zwarciovą

$S_{zw\ min}$ – minimalna moc zwarciovą

$U_{0\ nast}$ – nastawa zabezpieczenia napięciowego ziemnozwarciowego, $U_0 > t$

U_f – napięcie fazowe

U_n – napięcie nominalne sieci, linii, systemu

U_r – napięcie znamionowe

X', X_k – reaktancja jednostkowa, reaktancja kilometryczna

$X_{S\ max}$ – maksymalna reaktancja systemu zasilającego

$X_{S\ min}$ – minimalna reaktancja systemu zasilającego

$Y_{0\ nast}$ – nastawa zabezpieczenia admitancyjnego, $Y_0 > t$

Z_{nast} – impedancja nastawcza

$Z_{zw\ max}$ – maksymalna wartość impedancji pętli zwarciovą



$Z_{zw\ min}$ – minimalna wartość impedancji pętli zwarciowej
 d_0 – współczynnik tłumienia sieci
 k_b – współczynnik bezpieczeństwa
 k_c – współczynnik czułości
 k_{LR} – współczynnik zwarciowy
 k_n – współczynnik napięciowy
 k_p – współczynnik powrotu
 k_s – współczynnik schematowy
 k_u – współczynnik udarowy
 t_{ow} – czas otwierania wyłącznika
 t_p – czas przerwy podczas cyklu SPZ
 t_{ww} – czas własny wyłącznika
 γ_{Al} – przewodność właściwa aluminium
 γ_{Cu} – przewodność właściwa miedzi
 ϑ_T – przekładnia transformatora, przekładnika prądowego, przekładnika napięciowego
 ϑ_i – przekładnia przekładnika prądowego
 ϑ_{i0} – przekładnia przekładnika prądowego ziemnozwarciowego
 ϑ_u – przekładnia przekładnika napięciowego
 Δt – czas stopniowania zwłoki czasowej zabezpieczeń
 $3I_{0\ cz}$ – składowa czynna prądu doziemnego
 $3I_{0\ p}$ – składowa pojemnościowa prądu doziemnego
 a – operator obrotu o 120° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara
 a – współczynnik udziału pojemnościowego prądu doziemnego linii w pojemnościowym prądzie zwarcia doziemnego sieci
 a^2 – operator obrotu o 240° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara
 B – susceptancja
 C – pojemność



e – podstawa logarytmu naturalnego

E, e – siła elektromotoryczna, wartość skuteczna i chwilowa

f – częstotliwość

G – konduktancja

I, i – natężenie prądu, wartość skuteczna i chwilowa

j – operator obrotu o 90° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara

k – współczynnik kompensacji

L – indukcyjność

R – rezystancja

s – współczynnik rozstrojenia kompensacji

U, u – napięcie, wartość skuteczna i chwilowa

X – reaktancja

Z – impedancja

β – współczynnik ziemnozwarciowy

ρ – rezystywność gruntu

φ – przesunięcie fazowe prądu względem napięcia

ω – pulsacja prądu

2. Pojęcia ogólne i podstawowe definicje

Klasa dokładności - zestaw wymogów dla spełnienia warunków ustalonych dla wymaganej dokładności.

Linia elektroenergetyczna - zespół przewodów materiałów izolacyjnych, konstrukcji oraz wszystkich niezbędnych elementów przeznaczonych do przesłania energii elektrycznej pomiędzy dwoma punktami systemu elektroenergetycznego.

Napięcie nominalne sieci - przybliżona wartość napięcia określająca lub identyfikująca sieć. Zawsze dotyczy napięcia międzyprzewodowego.

Niskie napięcie (nN) - wartość skuteczna napięcia nie przekracza jednego 1kV.



Odlącznik automatyczny - jest to urządzenie składające się z odlącznika wraz z napędem. Wyposażony w aparaturę sterowniczą oraz zabezpieczeniową może przerywać obwód elektryczny tylko w stanie beznapięciowym.

Punkt neutralny (p.n.) - wspólny punkt połączenia uzwojeń transformatora lub innego urządzenia wielofazowego, zwykle połączonych w układ gwiazdowy. W kontekście sieci elektroenergetycznych termin ten odnosi się do punktu, który umożliwia odniesienie do potencjału ziemi.

Punkt zabezpieczeniowy (PZ) - miejsce w sieci, gdzie zainstalowane są przekładniki prądowe i/lub napięciowe oraz zabezpieczenie, a często również wyłącznik.

Reklozer - jest to urządzenie składające się z łącznika wyposażonego w napęd, który może przerywać prąd zwarciove. Wyposażony w aparaturę sterowniczą oraz zabezpieczeniową, umożliwia zdalne sterowanie punktu zabezpieczeniowego.

Rozdzielnia (stacja rozdzielcza) - stacja elektroenergetyczna, która posiada aparaturę łączeniową i zwykle szyny zbiorcze, ale nie posiada transformatora moc.

Rozłącznik automatyczny - jest to urządzenie składające się z rozłącznika wraz z napędem. Wyposażony w aparaturę sterowniczą oraz zabezpieczeniową, może przerywać prądy robocze linii, natomiast obwód zwarciove przerywa jedynie w przerwie beznapięciowej.

Sieć elektroenergetyczna - zespół galwanicznie połączonych wzajemnie linii i stacji elektroenergetycznych, przeznaczonych do przesyłania i rozdzielania energii elektrycznej.

Sieć aktywna - sieć zawierająca dodatkowe źródło napięcia lub/i dodatkowe źródła prądu.

Sieć pasywna – sieć nie zawierająca dodatkowych źródeł napięcia ani dodatkowych źródeł prądu.

Sieć skompensowana – sieć, w której przynajmniej jeden punkt neutralny transformatora lub transformatora uziemiającego jest uziemiony przez dławik gaszący, a łączna indukcyjność dławików gaszących w sieci jest zasadniczo dostosowana do pojemności doziemnej sieci.

Sieć z izolowanym punktem neutralnym - sieć, w której punkt neutralny nie jest uziemiony w sposób zamierzony, z wyjątkiem połączeń o dużej impedancji przeznaczonych dla celów zabezpieczeń i pomiarów.

Sieć z punktem neutralnym uziemiony przez rezystor - sieć, w której składowa czynna prądu ziemnozwarciowego, wywołana przez trwale włączony element rezystancyjny, jest przynajmniej zbliżona do składowej pojemnościowej, ale nie mniejsza od 100 A i zapewnia działanie zabezpieczeń zerowoprądowych w polach



liniowych oraz dostateczne tłumienie przebiegów ziemnozwarciowych, a jednocześnie w tej sieci nie jest spełniony warunek skuteczności uziemienia.

Sieć z punktem neutralnym uziemionym bezpośrednio - sieć, w której co najmniej jeden punkt neutralny, jest uziemiony bezpośrednio przez uziemienie bezpośrednie należy rozumieć takie, w którym nie występuje dodatkowa impedancja.

Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez impedancję - sieć, w której co najmniej jeden punkt neutralny jest uziemiony za pośrednictwem urządzenia o impedancji przewidzianej do ograniczenia prądu zwarcia z ziemią.

Składowa zgodna (1) - jedna z trzech składowych występujących w symetrycznym i niesymetrycznym układzie wielkości sinusoidalnych. Zdefiniowana wyrażeniem:

$$X_1 = \frac{1}{3}(X_{L1} + aX_{L2} + a^2X_{L3}) \quad (1)$$

Składowa przeciwna (2) - jedna z trzech składowych symetrycznych, występujących jedynie w niesymetrycznym układzie wielkości sinusoidalnych. Zdefiniowana wyrażeniem:

$$X_2 = \frac{1}{3}(X_{L1} + a^2X_{L2} + aX_{L3}) \quad (2)$$

Składowa zerowa (0) - jedna z trzech składowych występujących jedynie w niesymetrycznym układzie wielkości sinusoidalnych. Zdefiniowana wyrażeniem:

$$X_0 = \frac{1}{3}(X_{L1} + X_{L2} + X_{L3}) \quad (3)$$

Składowe zerowe prądu i napięcia występują w systemie elektroenergetycznym podczas zwarć doziemnych lub są wywoływane asymetrią doziemną w stanach bezzakłóceń.

Sposób pracy punktu neutralnego - sposób, w jaki punkt neutralny jest połączony elektrycznie z ziemią odniesienia.

Stacja elektroenergetyczna - część systemu elektroenergetycznego skoncentrowana na określonym obszarze, łącznie z doprowadzeniami linii przesyłowych i rozdzielczych łącznikami i aparaturą kontrolną, pomieszczeniami oraz transformatorami.

Średnie napięcie (SN) - zakres napięć powyżej 1kV do 36kV włącznie. W warunkach polskich szereg napięć średnich kończy się na wartości 30kV.



Uchyb bezwzględny – jest to różnica pomiędzy zmierzoną wartością zadziałania wielkości charakterystycznej lub zmierzonego czasu za działania, a wartością deklarowaną.

Uchyb dopuszczalny - dla danego przekątnika pomiarowego maksymalny błąd jakiego należy się spodziewać przy danym poziomie ufności w identycznych warunkach badań.

Uchyb średni - dla danego przekątnika pomiarowego i określonej liczby pomiarów wykonanych w tych samych warunkach. Iloraz sumy błędów bezwzględnych względnych lub umownych i liczby umiarów.

Uchyb względny - stosunek błędu bezwzględnego do wartości deklarowanej.

Układ zabezpieczeń - zespół złożony z jednego lub kilku urządzeń zabezpieczeniowych i innych urządzeń przeznaczonych do spełnienia jednej lub wielu określonych funkcji zabezpieczeniowych. W jego skład wchodzi urządzenia zabezpieczeniowe, przekładniki, okablowanie, łącza transmisyjne, urządzenia SPZ. Nie wchodzi w jego skład łącznik, z którym współpracuje.

Wartość nastawcza wielkości pomiarowej – jest to wartość wielkości pomiarowej, oznaczona na mechanizmie nastawczym, wyświetlaczu lub programie obsługi, przy której przekątnik powinien w określonych warunkach zadziałać z dokładnością wynikającą z jego klasy.

Wartość nominalna - odpowiednia przybliżona wartość liczbowa stosowana do oznaczenia lub wyróżnienia elementów przyrządu lub urządzenia.

Wartość powrotu - wartość wielkości wejściowej lub wielkości charakterystycznej, przy której przekątnik pomiarowy wykonuje powrót.

Wartość rozruchowa - wartość wielkości wejściowej, zasilającej lub wielkości charakterystycznej, przy której przekątnik pomiarowy rozpoczyna rozruch.

Wartość zadziałania - wartość wielkości wejściowej lub wielkości charakterystycznej, przy której następuje zadziałanie przekątnika.

Wartość znamionowa - wartość wielkości deklarowana przez producenta jako właściwą dla danej aparatury.

Różnicę pomiędzy napięciem nominalnym, a napięciem znamionowym najlepiej rozróżnić na przykładzie transformatora. Może być transformator pracujący na napięciu znamionowym 15,75kV, który pracuje w sieci o napięciu nominalnym 15kV.

Współczynnik czułości – jest to stosunek wielkości pomiarowej, będącej objawem zakłócenia do wartości nastawczej danego urządzenia.



Zabezpieczenie bezzwłoczne - zabezpieczenie działające bez zamierzonego opóźnienia. Zabezpieczenie działa z opóźnieniem równym jego czasowi własnemu, zależnym od konstrukcji, przeważnie od 10 do 40 milisekund.

Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne - zabezpieczenie nadprądowe, którego nastawa prądowa jest zasadniczo odstrojona od prądów roboczych zabezpieczanego urządzenia.

Zabezpieczenie podstawowe - zabezpieczenie, dla którego zakłada się pierwszeństwo w inicjowaniu eliminacji zakłócenia lub akcji zmierzającej do likwidacji, nienormalnego stanu pracy systemu elektroenergetycznego, element systemu elektroenergetycznego może mieć kilka zabezpieczeń podstawowych.

Zabezpieczenie rezerwowe - zabezpieczenie przeznaczone do działania w sytuacji, gdy zakłócenie nie zostało usunięte lub gdy nienormalne stany pracy nie zostały wykryte w wymaganym czasie z powodu uszkodzenia lub niezdolności do działania innego zabezpieczenia lub niewyłączenia odpowiedniego wyłącznika. Zabezpieczenie rezerwowe może być lokalne w tym samym polu co podstawowe lub zdalne w innym polu lub nawet innej stacji.

Zabezpieczenie zwarciovowe - zabezpieczenie nadprądowe, którego opóźnienie czasowe jest mniejszy od 0,4 sekundy, a nastawa prądowa wynika z oceny prądów zwarciovowych w otoczeniu miejsca jego zainstalowania z pominięciem wpływu prądów roboczych.

Zabezpieczenie zwłoczne - zabezpieczenie działające z zamierzonym opóźnieniem, np. wynikającym z nastawionej charakterystyki zadziałania.

Zakłócenie samogasnące - uszkodzenie izolacji, przy którym łuk gaśnie samoistnie bez konieczności wyłączenia urządzenia spod napięcia w celu odbudowy jego właściwości izolacyjnych.

Zakłócenie trwałe - zakłócenie urządzenia nie pozwalające na jego powtórne uruchomienie bez interwencji obsługi w miejscu zakłócenia

Zakłócenie, zwarcie przemijające - uszkodzenie izolacji, urządzenia naruszające chwilowo jego właściwości elektryczne, które zostają przywrócone samoistnie po krótkim czasie.

Zwarcie – jest to przypadkowe lub celowe zmniejszenie impedancji pomiędzy dwoma lub więcej częściami przewodzącymi i/lub ziemią różnych potencjałach, które prowadzi do obniżenia napięcia pomiędzy nimi i przepływu prądu nieprzewidzianego w warunkach normalnych. Zwarcie do ziemne zwarcie między przewodem kwasowym a ziemią w sieci z punktem neutralnym, uziemionym bezpośrednio lub w sieci z punktem neutralnym, uziemionym przez impedancję.

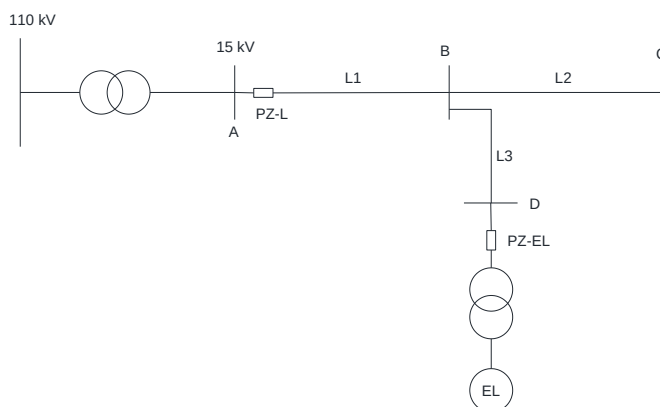
3. Dobór zabezpieczeń przyłączanej elektrowni lokalnej

Dobór zabezpieczeń do nowo przyłączanej elektrowni należy rozpocząć od wglądu do warunków przyłączenia. W warunkach przyłączenia zawarte są najistotniejsze informacje takie jak: moc przyłączeniowa, wartość napięcia w miejscu przyłączenia, moc zwarciowa, miejsce przyłączenia, informacje dotyczące przekładników, prądu zwarcia doziemnego oraz czasu wyłączenia zwarcia, długości linii, stopnia skompensowania mocy biernej. Warunki przyłączenia również determinują wymagania w zakresie automatyki zabezpieczeniowej. Opis zawiera wymagane elementy automatyki zabezpieczeniowej oraz wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i zabezpieczeniowej. W celu prawidłowego doboru zabezpieczeń należy zapoznać się z IRIESD odpowiedniego dostawcy energii.

4. Dane techniczne

Przykładowe parametry i informację dotyczące przyłączanego podmiotu oraz pracy sieci, do której podmiot ma zostać przyłączony:

[Tekst alternatywny: Schemat jednokreskowy sieci SN/nN. Po lewej doprowadzenie z poziomu 110 kV przez transformator do szyn 15 kV. Na wyjściu 15 kV punkt A z odgałęzieniem linii L1; na początku L1 wstawione jest zabezpieczenie linii PZ-L. Linia L1 prowadzi do punktu B, z którego główna linia kontynuuje jako L2 do punktu C. Z punktu B odchodzi pionowo w dół linia L3 do punktu D, na której zainstalowano zabezpieczenie pola PZ-EL. Pod PZ-EL pokazano transformator i elektrownię oznaczoną jako EL przyłączoną do L3. Całość przedstawia stację 15 kV z linią przelotową L1–L2 oraz odłącznym polem odbiorczo-wytwórczym L3 zabezpieczonym PZ-EL; PZ-L chroni odcinek L1 pomiędzy szynami A i B.]



Rys. 1. Schemat układu.

Tabela 1. Dane techniczne.

Napięcie znamionowe	15 kV
Moc zwarciorowa systemu	100 MVA
Prąd pojemnościowy sieci	25 A
Prąd AWSC	20 A
Czas trwania zwarcia doziemnego	10 s
Współczynnik mocy ($tg\varphi$)	0,4
Moc przyłączeniowa elektrowni	1000 kW
LN1: Linia napowietrzna SN	AFL-6 70mm ² ; l = 370 m; R _k = 0,434 Ω/km; X _k = 0,369 Ω/km
L3: Linia kablowa SN	XRUHAKXS 120/50mm ² ; l=500 m; R _k = 0,253 Ω/km; X _k = 0,12 Ω/km

Sieć pracuje z kompensacją prądu ziemnozwarciowego.

Przekładniki prądowe w klasie 0,2, prąd znamionowy przekładnika powinien zawierać się w granicy 1÷120% prądu obciążenia.

4.1. Obliczanie parametrów schematu zastępczego

System elektroenergetyczny:

- Impedancja zastępcza:

$$Z_Q = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot 15kV^2}{100 \text{ MW}} = 2,48 \Omega \quad (4)$$

- Rezystancja zastępcza:

$$R_Q = 0,1Z_Q = 0,248 \Omega \quad (5)$$

- Reaktancja zastępcza:

$$X_Q = 0,995Z_Q = 2,46 \Omega \quad (6)$$

Elektrownia lokalna:

- Impedancja i reaktancja zastępcza:

$$Z_{EL} = X_{EL} = \frac{U_r^2}{k_{LR}S_r} = \frac{15kV^2}{1,1 \cdot 1075 \text{ kVA}} = 205,55 \Omega \quad (7)$$



Linia L1:

- Rezystancja:

$$R_{L1-20} = l \cdot R'_{l1} = 0,37 \cdot 0,434 = 0,16 \, \Omega \quad (8)$$

$$R_{L1} = [1 + \alpha(\vartheta_k - 20)]R_{L1-20} = [1 + 0,004(80 - 20)]0,16 = 0,20 \, \Omega \quad (9)$$

- Reaktancja:

$$X_{L1} = l \cdot X'_{l1} = 0,37 \cdot 0,369 = 0,14 \, \Omega \quad (10)$$

- Impedancja:

$$Z_{L1} = \sqrt{R_{L1}^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{0,20^2 + 0,14^2} = 0,24 \, \Omega \quad (11)$$

Linia L3:

- Rezystancja:

$$R_{L3-20} = l \cdot R'_{l3} = 0,50 \cdot 0,253 = 0,13 \, \Omega \quad (12)$$

$$R_{L3} = [1 + \alpha(\vartheta_k - 20)]R_{L3-20} = [1 + 0,004(90 - 20)]0,13 = 0,17 \, \Omega \quad (13)$$

- Reaktancja:

$$X_{L3} = l \cdot X'_{l3} = 0,5 \cdot 0,12 = 0,07 \, \Omega \quad (14)$$

- Impedancja:

$$Z_{L3} = \sqrt{R_{L3}^2 + X_{L3}^2} = \sqrt{0,17^2 + 0,07^2} = 0,18 \, \Omega \quad (15)$$

Do zabezpieczeń w PZ-EL:

- Rezystancja minimalna całego układu

$$R_{kmin} = R_Q + R_{minL1} + R_{minL3} = 0,248 + 0,16 + 0,13 = 0,538 \, \Omega \quad (16)$$

- Reaktancja minimalna całego układu

$$X_k = X_Q + X_{L1} + X_{L3} = 2,46 + 0,14 + 0,07 = 2,67 \, \Omega \quad (17)$$

- Impedancja minimalna całego układu

$$Z_{kmin} = \sqrt{R_{kmin}^2 + X_k^2} = \sqrt{0,538^2 + 2,67^2} = 2,72 \, \Omega \quad (18)$$

- Maksymalny prąd zwarciový od szyn A do D

$$I_{kmaxAD} = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{kmin}} = \frac{1,1 \cdot 15000}{\sqrt{3} \cdot 2,72} = 3,50 \text{ kA} \quad (19)$$

- Maksymalny prąd zwarcia od szyn A do B

$$I_{kmaxAB} = \frac{S''_k}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 3,84 \text{ kA} \quad (20)$$

- Minimalny prąd zwarcia od szyn A do B

$$I_{kminAB} = \frac{S''_k}{2,2 \cdot U_n} = \frac{100 \cdot 10^6}{2,2 \cdot 15 \cdot 10^3} = 3,03 \text{ kA} \quad (21)$$

- Czas zwarcia z uwzględnieniem SPZ i czasu własnego wyłącznika

$$t_k = t_{SPZ1} + t_{SPZ2} + 2t_{ow} = 2(1 + 0,1) = 2,2 \text{ s} \quad (22)$$

- Dopuszczalny prąd ze względu na nagrzewanie przewodów prądem zwarciaowym względem rzeczywistego czasu zwarcia

$$I_{thdop} = \frac{S_{jth}}{\sqrt{t_k}} = \frac{70 \cdot 85}{\sqrt{2,2}} = 4,11 \text{ kA} \quad (23)$$

5. Projektowana stacja transformatorowa

5.1. Dobór transformatora

Dobrano transformator o następujących danych technicznych:

Moc znamionowa	1600 kVA
Napięcie górne	15 kV
Napięcie dolne	0,4 kV
Napięcie zwarcia	6%
Straty obciążeniowe	13,0 kW
Straty jałowe	1,98 kW
Grupa połączeń	Dyn5

Sprawdzenie poprawności doboru transformatora:

- Moc transformatora dla potrzeb elektrowni lokalnej wynosi:

$$S_T = \frac{P_{EL}}{\cos \varphi} = \frac{1000 \text{ kW}}{0,93} = 1075 \text{ kVA} \quad (24)$$

$$S_{nT} > S_T \quad (25)$$



$$1600 \text{ kVA} > 1000 \text{ kVA}$$

Warunek spełniony.

- Stopień obciążenia transformatora:

$$k_T = \frac{S_T \cdot 100\%}{S_{nT}} = \frac{1075 \text{ kVA} \cdot 100\%}{1600 \text{ kVA}} = 67,2\% \quad (26)$$

Stopień obciążenia transformatora powinien zawierać się w przedziale pomiędzy 50, a 70%.

Warunek spełniony.

5.2. Dobór kabla

Dobrano kabel XRUHAKXS 1x120/50 mm²

Sprawdzenie poprawności doboru kabla:

- Prąd obciążenia:

$$I_{obc} = \frac{S_{nT}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,93} = 64,15 \text{ A} \quad (27)$$

Wartość prądu dopuszczalnie długotrwałego dla kabla XRUHAKXS 1x 120/50mm² wynosi $I_{dtp} = 319 \text{ A}$

$$I_{obc} \leq I_{dtp} \quad (28)$$

$$64,15 \leq 319$$

Warunek spełniony.

5.3. Dobór przekładników prądowych SN

Dobrano przekładniki prądowe o następujących danych technicznych:

Typ	CTM 24
Znamionowy prąd pierwotny	50 A
Znamionowy prąd wtórny układu pomiarowego	5 A



Znamionowy prąd wtórny układu zabezpieczeń	5 A
Przekładnia	50/5/5 A/A/A
Moc obwodu wtórnego układu pomiarowego	5 VA
Moc obwodu wtórnego układu zabezpieczeń	5 VA
Klasa układu pomiarowego	0,2s
Klasa układu zabezpieczeń	5P10
Klasa bezpieczeństwa	FS 5
Znamionowy krótkotrwały prąd cieplny	10 kA
Znamionowy krótkotrwały prąd dynamiczny	25 kA

Weryfikacja poprawności doboru przekładników:

- Sprawdzenie warunku doboru pierwotnego prądu znamionowego:

Prąd obciążenia wynosi:

$$I_{obc} = \frac{P_{EL}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 0,93} = 41,38 \text{ A} \quad (29)$$

Zgodnie z warunkami przyłączenia, prąd pierwotny przekładnika prądowego wynikający z mocy przyłączeniowej powinien mieścić się w granicach 1% ÷ 120 % prądu znamionowego przekładnika, czyli:

$$0,1 I_n < I_{obc} < 1,2 I_n \quad (30)$$

$$0,6 \text{ A} < 41,38 \text{ A} < 60 \text{ A}$$

Warunek spełniony.

- Sprawdzenie warunku doboru prądu wtórnego

Dla mocy maksymalnej przyłączanej elektrowni, wartość prądu po stronie pierwotnej wynosi 41,38 A, co dla dobranej przekładni 50/5/5/5 wynosić będzie 82,76% nominalnego obciążenia przekładników.

$$I_{2obl} \leq I_{2n} \quad (31)$$

gdzie,

I_{2obl} – maksymalny obliczeniowy prąd obciążeniowy po stronie wtórnej



$$I_{2obl} = \frac{I_{1obl}}{\frac{I_{1n}}{I_{2n}}} = \frac{41,38}{\frac{50}{5}} = 4,14 \text{ A} \quad (32)$$

$$4,14 \text{ A} \leq 5 \text{ A}$$

Warunek spełniony.

- Sprawdzenie warunku wytrzymałości zwarciowej:

Znamionowy krótkotrwały prąd cieplny przekładników prądowych wynosi $I_{th} = 10,0 \text{ kA}$

$$I_{th} > I_{ths} \quad (33)$$

Znamionowy krótkotrwały prądu cieplnego po stronie SN dla $T_k = 0,5 \text{ s}$. Aby dokonać obliczeń należy odczytać z wykresu wartości składowej nieokresowej m na rysunku 2 oraz składowej okresowej n z rysunku 3.

$$m = 0,05; n = 1$$

Wartość składowej okresowej dla sieci rozdzielczej zazwyczaj wynosi 1.

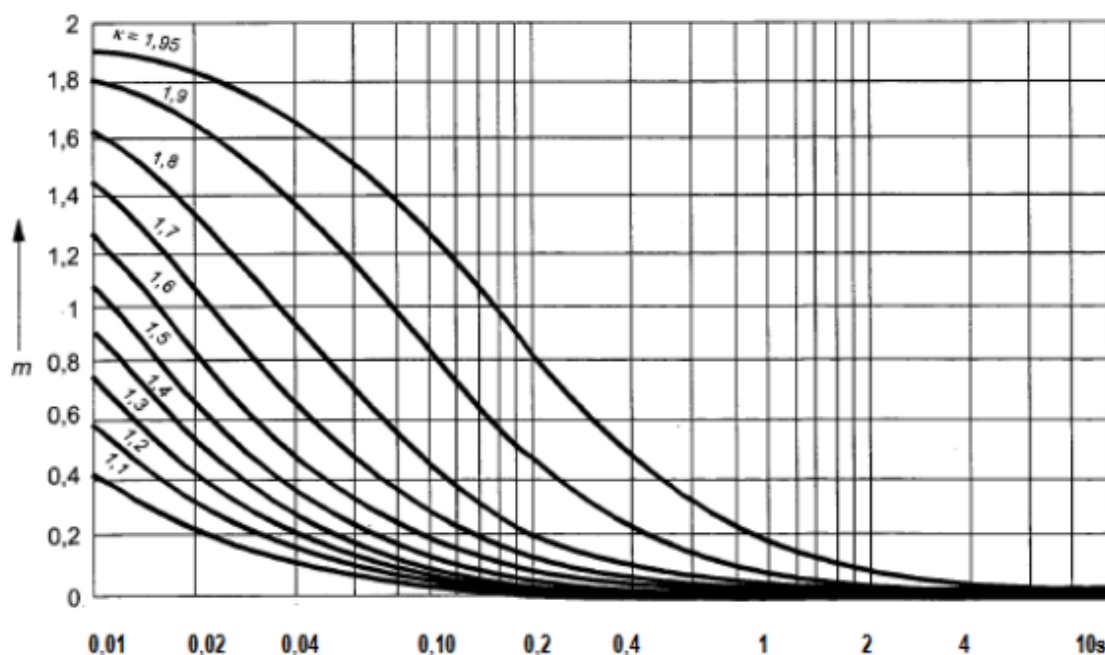
$$I_{ths} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} = 3,18 \cdot 10^3 \cdot 1,02 = 3,24 \text{ kA} \quad (34)$$

$$I_k'' = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{SEE} + Z_{L1})} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot (2,48 + 0,24)} = 3,18 \text{ kA} \quad (35)$$

$$10 \text{ kA} > 3,24 \text{ kA}$$

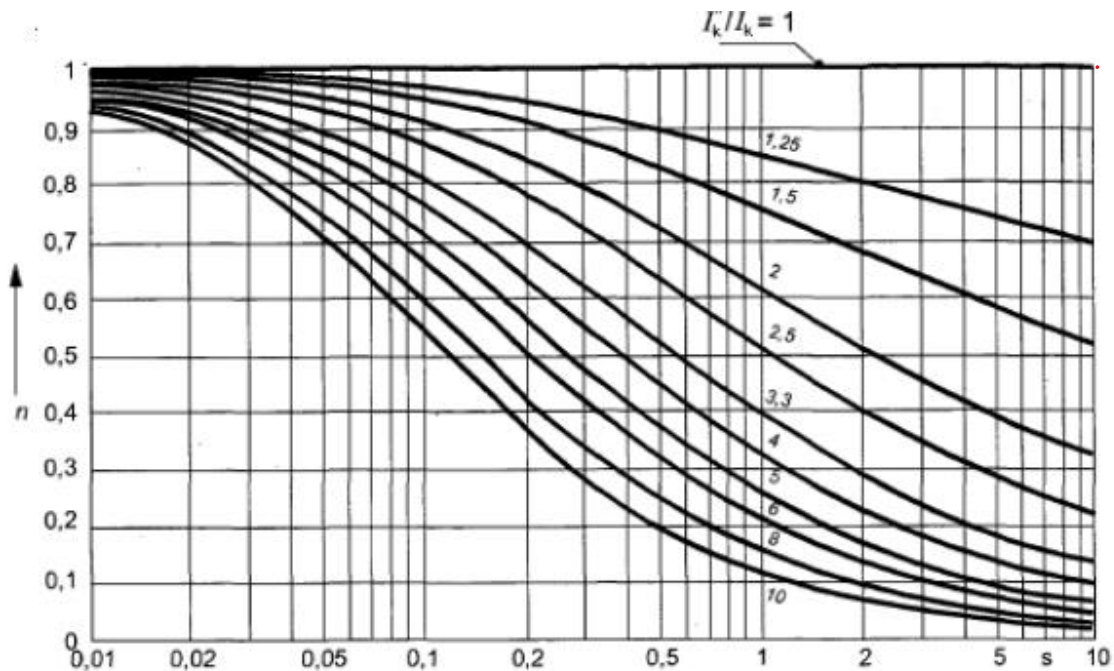
Warunek spełniony.

[Tekst alternatywny: Wykres rodziny krzywych malejących przedstawiających zależność współczynnika m (oś pionowa, zakres 0–2) od czasu t w sekundach w skali logarytmicznej na osi poziomej (0,01 s do 10 s). Każda krzywa odpowiada innej wartości parametru k (oznaczenia przy początku krzywych: 1,1; 1,2; 1,3; ...; 1,9 oraz $k \approx 1,95$). Krzywe startują dla małych czasów od wartości m około 0,3–1,9 i monotonicznie opadają w kierunku zera, tym wolniej im większy jest parametr k ; dla k bliskiego 1,95 krzywa opada najwolniej, osiągając wartości bliskie zera dopiero po około 2–4 s, podczas gdy dla $k \approx 1,1$ spada do zera już w okolicach 0,05–0,1 s. W tle gęsta siatka pomocnicza, kilka pionowych linii akcentuje czasy około 0,12–0,3 s oraz 1–3 s. Wykres ilustruje zestaw charakterystyk czasowo-prądowych typu odwrotnie proporcjonalnego lub przebiegów zanikania współczynnika m dla różnych parametrów k .]



Rys. 2. Wartość składowej nieokresowej m [9]

[Tekst alternatywny: Wykres rodziny krzywych przedstawiających zależność współczynnika n (oś pionowa 0–1) od czasu t w sekundach w skali logarytmicznej na osi poziomej (0,01 s do 10 s). Wszystkie krzywe startują blisko $n = 1$ dla bardzo krótkich czasów i następnie maleją w różnym tempie, tym szybciej im większa opisana przy krzywej wartość parametru: 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3,3; 4; 5; 6; 8; 10. Dla małych wartości parametru krzywe opadają łagodnie (np. 1,25 pozostaje powyżej $n \approx 0,8$ nawet dla kilku sekund), natomiast dla większych wartości spadek jest szybki (np. 10 schodzi poniżej $n \approx 0,1$ około 1–2 s). U góry zaznaczono warunek $l_k'/l_k = 1$. Siatka pomocnicza jest gęsta, z pionowymi liniami akcentującymi czasy w okolicach 0,06–0,12 s oraz 1–3 s. Wykres obrazuje zestaw charakterystyk zaniku współczynnika n w funkcji czasu dla różnych parametrów.]



Rys. 3. Wartość składowej okresowej n [9]

- Sprawdzenie warunku znamionowego prądu dynamicznego.

$$I_{dyn} = 2,5 \cdot I_{th} = 2,5 \cdot 10 = 25 \text{ kA} \quad (36)$$

$$I_{dyn} \geq i_p \quad (37)$$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot \kappa = \sqrt{2} \cdot 3,18 \cdot 1,64 = 7,38 \text{ kA} \quad (38)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} = 1,64 \quad (39)$$

Stosunek R/X dla sieci skompensowanej z zakresu od 0,1 do 0,2. Przyjęto $R/X = 0,2$.

$$25 \text{ kA} > 7,38 \text{ kA}$$

Warunek spełniony.

Zastosowano przewody obwodu prądowego DY 2,5 mm² o długości $l = 8 \text{ mb}$ (łącznie długość przewodu liczona od strony wtórnej przekładników do licznika i z powrotem).

Moc licznika ZMD 405:

$$S_L = 0,125 \text{ VA}$$



Strata mocy na przewodach:

$$S_p = \frac{I_{sn}^2 \cdot 2l}{\gamma \cdot s} = \frac{5^2 \cdot 2 \cdot 8}{56 \cdot 2,5} = 2,86 \text{ VA} \quad (40)$$

Strata mocy na zestykach:

$$S_{zest} = I_{sn}^2 \cdot R = 5^2 \cdot 0,05 = 1,25 \text{ VA} \quad (41)$$

Suma:

$$S = S_L + S_p + S_{zest} = 0,125 + 2,86 + 1,25 = 4,25 \text{ VA} \quad (42)$$

Warunek:

$$\begin{aligned} 0,25 \cdot S_n &< S < S_n \\ 0,25 \cdot 5 \text{ VA} &< 4,25 \text{ VA} < 5 \text{ VA} \\ 1,25 \text{ VA} &< 4,25 \text{ VA} < 5 \text{ VA} \end{aligned} \quad (43)$$

Warunek spełniony.

- II uzwojenie – obwód zabezpieczeń

Moc e²Tango:

$$S_{e2Tango} = 0,03 \text{ VA}$$

Strata mocy na przewodach:

$$S_p = \frac{I_{sn}^2 \cdot 2l}{\gamma \cdot s} = \frac{4,59^2 \cdot 2 \cdot 8}{56 \cdot 2,5} = 2,41 \text{ VA} \quad (44)$$

$$I_{sn} = \frac{I_{obc}}{\vartheta_I} = \frac{55,1}{12} = 4,59 \text{ A} \quad (45)$$

Strata mocy na zestykach:

$$S_{zest} = I_{sn}^2 \cdot R = 5^2 \cdot 0,05 = 1,25 \text{ VA} \quad (46)$$

Suma:

$$S = S_L + S_p + S_{zest} = 0,03 + 2,41 + 1,25 = 3,69 \text{ VA} \quad (47)$$

Warunek:

$$\begin{aligned} 0,25 \cdot S_n &< S < S_n \\ 0,25 \cdot 5 \text{ VA} &< 3,69 \text{ VA} < 5 \text{ VA} \end{aligned} \quad (48)$$



$$1,25 VA < 3,69 VA < 5VA$$

Warunek spełniony.

5.4. Dobór przekładników napięciowych SN

Dobrano przekładniki napięciowe o danych technicznych:

Typ	VTB 20-K 17,5 KV
Napięcie znamionowe pierwotne	15 kV
Przekładnia	$\frac{15}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{\sqrt{3}} / \frac{0,1}{3} V/V/V/V$
Moc obwodu wtórnego układu pomiarowego	10 VA
Moc obwodu wtórnego pomiaru 3U0	10 VA
Moc obwodu wtórnego układu zabezpieczeń	10 VA
Klasa układu pomiarowego	0,2
Klasa układu analizatora	3P10
Klasa układu zabezpieczeń	3P10

- Sprawdzenie warunku napięcia znamionowego:

$$U_{ns} < U_{nu} \quad (49)$$

$$15kV < 17,5 kV$$

Warunek spełniony

- I uzwojenie – obwód pomiarowy

Zastosowano przewody do obwodu napięciowego DY 1,5 mm² o długości 8 mb (łączna długość przewodu liczona od strony wtórnej przekładników do licznika i z powrotem).

Moc licznika ZMD 405 z modułem komunikacyjnym CU-L52:

$$S_L = 3,5 VA$$



Strata mocy na przewodach:

$$S_p = \frac{I_{sn}^2 \cdot 2l}{\gamma \cdot s} = \frac{5^2 \cdot 2 \cdot 8}{56 \cdot 1,5} = 4,76 \text{ VA} \quad (50)$$

Strata mocy na zestykach:

$$S_{zest} = I_{sn}^2 \cdot R = 5^2 \cdot 0,05 = 1,25 \text{ VA} \quad (51)$$

Suma:

$$S = S_L + S_p + S_{zest} = 0,125 + 2,86 + 1,25 = 4,25 \text{ VA} \quad (52)$$

Warunek:

$$\begin{aligned} 0,25 \cdot S_n &< S < S_n \\ 0,25 \cdot 10 \text{ VA} &< 9,5 \text{ VA} < 10 \text{ VA} \\ 2,5 \text{ VA} &< 9,5 \text{ VA} < 10 \text{ VA} \end{aligned} \quad (53)$$

Warunek spełniony.

- II uzwojenie – obwód zabezpieczeniowy

$$0,25 \cdot S_n < S < S_n \quad (54)$$

$$S = S_{e2Tango} + S_p + S_{zest} \quad (55)$$

$$S_{e2Tango} = I_{sn}^2 \cdot Z_{e2Tan} = 0,634 \text{ VA} \quad (56)$$

$$S_p = \frac{I_{sn}^2 \cdot 2l}{\gamma \cdot s} = \frac{5^2 \cdot 2 \cdot 11,5}{56 \cdot 2,5} = \text{VA} \quad (57)$$

$$I_{sn} = \frac{I_{obc}}{\vartheta_I} = \frac{55,1}{12} = 4,59 \quad (58)$$

$$S_{zest} = I_{sn}^2 \cdot R = 5^2 \cdot 0,05 = \text{VA} \quad (59)$$

$$S = S_{e2Tango} + S_p + S_{zest} = \text{VA} \quad (60)$$

$$0,25 \cdot 5 \text{ VA} < \text{VA} < 5 \text{ VA}$$

$$1,25 \text{ VA} < \text{VA} < 5 \text{ VA}$$

Warunek spełniony.



6. Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa

6.1. Dobór zabezpieczeń podstawowych (falownik)

6.1.1. Zabezpieczenia napięciowe

Do falownika należy dobrać i nastawić zarówno zabezpieczenie podnapięciowe jak i nadnapięciowe według następujących nastaw:

- Zabezpieczenie podnapięciowe

$$U_{nast}^< = 0,9U_n = 360 \text{ V}$$

- Zabezpieczenie nadnapięciowe I stopień

$$U_{nast}^> = 1,1U_n = 440 \text{ V}$$

- Zabezpieczenie nadnapięciowe II stopień

$$U_{nast}^> = 1,15U_n = 460 \text{ V}$$

6.1.2. Zabezpieczenia częstotliwościowe

Do falownika należy dobrać i nastawić zarówno zabezpieczenie podczęstotliwościowe jak i nadczęstotliwościowe według następujących nastaw:

- Zabezpieczenie podczęstotliwościowe

$$f_{nast}^< = 95\% f_n = 47,5 \text{ Hz}$$

- Zabezpieczenie nadczęstotliwościowe

$$f_{nast}^> = 102\% f_n = 51 \text{ Hz}$$

6.2. Dobór zabezpieczeń e²Tango

Wymagany zestaw automatyki zabezpieczeniowej po stronie SN, zgodny z podanymi warunkami przyłączenia, został dobrany poniżej.



6.2.1. Zabezpieczenia napięciowe

Po stronie SN należy dobrać i nastawić zarówno zabezpieczenie podnapięciowe jak i nadnapięciowe według następujących nastaw:

- Zabezpieczenie podnapięciowe

$$U_{nast}^{<} = 0,9U_n = 14175 \text{ V}$$

- Zabezpieczenie nadnapięciowe I stopnia

$$U_{nast}^{>} = 1,1U_n = 17325 \text{ V}$$

- Zabezpieczenie nadnapięciowe II stopnia

$$U_{nast}^{>} = 1,15U_n = 18112 \text{ V}$$

6.2.2. Zabezpieczenia częstotliwościowe

Do strony SN należy dobrać i nastawić zarówno zabezpieczenie podczęstotliwościowe jak i nadczęstotliwościowe według następujących nastaw:

- Zabezpieczenie podczęstotliwościowe

$$f_{nast}^{<} = 95\% f_n = 47,5 \text{ Hz}$$

- Zabezpieczenie nadczęstotliwościowe

$$f_{nast}^{>} = 102\% f_n = 51 \text{ Hz}$$

6.2.3. Zabezpieczenie od pracy wyspowej

Ze względu na brak jednoznacznego kryterium, które w sposób pewny zabezpieczy elektrownię lokalną przed niepożądaną pracą wyspową należy zaproponować zabezpieczenie, jeżeli nie zostało ono podane w warunkach przyłączenia. Takimi zabezpieczeniami mogą być na przykład zabezpieczenie df/dt lub zabezpieczenie wektorowe.

Proponowana nastawa zabezpieczenia df/dt : 2 Hz/s

6.2.4. Zabezpieczenia od zwarć międzyfazowych

- Zabezpieczenie nadprądowe zwłoczne:

$$k_b = 1,2$$

$$k_r = 1,1$$

$$I_{EL} = 41,38 \text{ A}$$

$$\vartheta_I = 50/5 = 10$$

$$I_{nast}^{>} = \frac{k_b \cdot k_r \cdot I_{EL}}{k_p \cdot \vartheta_I} = \frac{1,2 \cdot 1,1 \cdot 41,38}{0,98 \cdot 10} = 5,57 \text{ A} \quad (61)$$

Przyjęto nastawę 5,6 A

- Zabezpieczenie nadprądowe bezzwłoczne:

Nastawę nadmiarowo prądową bezzwłoczną przyjmujemy od 4 do 6 razy większą od nastawy zwłocznej.

$$I_{nast}^{>>} = (4 \div 6) \cdot I_{nast}^{>} \quad (62)$$

$$I_{nast}^{>>} > 4 \cdot I_{nast}^{>} = 4 \cdot 5,6 = 22,4 \text{ A} \quad (63)$$

$$I_{nast}^{>>} < 6 \cdot I_{nast}^{>} = 6 \cdot 5,6 = 33,6 \text{ A} \quad (64)$$

Przyjęto nastawę 25 A.

Czas w granicy od 0,1 do 0,25 s.

6.2.5. Zabezpieczenia ziemnozwarciowe

- Zabezpieczenie zerowonapięciowe:

Wartość nastawcza zabezpieczenia $3U_0$ podlega ogólnym zasadom i wartościom zależnym od sposobu pracy punktu neutralnego [5].

Tabela 2. Wartości nastawy $3U_0$ w zależności od sposobu pracy punktu neutralnego.

Sposób pracy punktu neutralnego	Wartość nastawy $3U_0$ [V]
izolowany punkt neutralny	10 ÷ 20
p.n. uziemiony przez rezystor	5 ÷ 10
p.n. uziemiony przez dławik	15 ÷ 25

Natomiast nastawę czasową należy wyliczyć według zależności:

$$t_{U0} = t_{AWS} + \max t_{PZ-L} + \Delta t = 2 + 0,7 + 0,3 = 3 \text{ s} \quad (65)$$

Tabela. 3. Nastawy zabezpieczeń.

Miejsce zabudowy	Typ zabezpieczenia	Kryterium	Nastawa	Nastawa czasowa	Rodzaj pracy
Falownik	Zabezpieczenie podstawowe (firmowe falownika)	$U <$	360 V	1 s	WYŁĄCZ
		$U >$ stopień 1	440 V	1 s	WYŁĄCZ
		$U >$ stopień 2	460 V	0,1 s	WYŁĄCZ
		$f <$	47,5 Hz	0,1 s	WYŁĄCZ
		$f >$	51 Hz	0,1 s	WYŁĄCZ
PZ-EL	Zabezpieczenie e ² Tango	$U <$	14,2 kV	5 s	WYŁĄCZ
		$U >$ stopień 1	17,3 kV	1 s	WYŁĄCZ
		$U >$ stopień 2	18,1 kV	0,1 s	WYŁĄCZ
		$f <$	47,5 Hz	1 s	WYŁĄCZ
		$f >$	51 Hz	0,5 s	WYŁĄCZ
		df/dt	1,5 Hz/s	0,1 s	WYŁĄCZ
		$I > T$	5,6 A	0,3 s	WYŁĄCZ
		$I >> T$	25 A	0,1 s	WYŁĄCZ
		3U0	15 V	3 s	WYŁĄCZ

6.3. Dobór zabezpieczeń linii nN

6.3.1. Zabezpieczenia nadprądowe

Prąd szczytowy dla jednego obwodu wynosi:

$$P_{sz} = 125 \text{ kW}$$

$$I_{obl} = \frac{P_{sz}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{125 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,93} = 194 \text{ A} \quad (66)$$

Dobrano kabel YAKXS 4x95mm² o $I_{ddp} = 234 \text{ A}$.

- Sprawdzenie warunku dopuszczalnego długotrwałego prądu przeciążenia

$$I_{ddp} > I_{obl} \quad (67)$$

$$234 \text{ A} > 194 \text{ A}$$

Warunek spełniony.



Dobrano zabezpieczenie linii kablowej nN w postaci wkładek topikowych NH2gG200A o prądzie znamionowym 200 A w rozdzielnicy nN w stacji transformatorowej.

- Sprawdzenie doboru kabli i zabezpieczeń dla obwodu nr 1 falownika:

$$I_2 = k \cdot I_n = 1,6 \cdot 200 = 320 \text{ A} \quad (68)$$

$$I_{obc} \leq I_n \leq I_2 \quad (69)$$

$$194 \text{ A} < 200 \text{ A} < 320 \text{ A}$$

Warunek spełniony.

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_{ddp} \quad (70)$$

$$320 \text{ A} < 339 \text{ A}$$

Warunek spełniony.

6.3.2. Spadek napięcia

- Sprawdzenie dopuszczalnego spadku napięcia dla obwodu nr 1

$$l = 63,0 \text{ m}$$

$$\Delta U\% < \Delta U_{dop} \quad (71)$$

$$0,92\% < 6,5\%$$

$$\Delta U\% = \frac{100 \cdot P_{sz} \cdot l}{\gamma \cdot s \cdot U_n^2} = \frac{100 \cdot 125 \text{ kW} \cdot 63}{56 \cdot 95 \cdot 400} = 0,92\% \quad (72)$$

$$\Delta U_{dop} = 6,5\%$$

Warunek spełniony.

6.4. Ochrona od porażeń

Zgodnie z warunkami przyłączenia pojemnościowy prąd ziemnozwarciowy $I_{cs} = 25 \text{ A}$, a prąd automatyki wymuszania składowej czynnej $I_{awsc} = 20 \text{ A}$, zatem prąd zwarcia doziemnego:

$$I''_{k1} = \sqrt{(I_{AWSC})^2 + (0,1 \cdot I_{CS})^2} = 20,2A \quad (73)$$

Zgodnie z normą należy odczytać wartość napięcia dotykowego rażeniowego dla czasu trwania rażenia [12] oraz wartość napięcia zakłóceniewego ograniczającego przenoszenie przez wspólne uziemienie potencjału na przewód PEN przy zawarciu doziemnym [13]. Wartości zostały zestawione w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości największego dopuszczalnego napięcia dotykowego rażeniowego U_{TP} oraz największego napięcia zakłóceniewego U_F względem czasu przepływu prądu rażeniowego lub trwania czasu zakłócenia.

Czas przepływu prądu rażeniowego lub trwania zakłócenia, s	U_{TP} , V	U_F , V
0,1	650	680
0,2	540	560
0,3	420	430
0,4	310	310
0,5	220	200
0,6	180	170
0,7	150	130
0,8	130	120
0,9	125	115
1	120	110
2	95	90
3	85	87
4	85	83
5	85	82
≥ 10	85	80

Odczytane wartości wynoszą:

$U_{TP} = 85V$ – wartość napięcia dotykowego rażeniowego

$U_F = 80 V$ – wartość napięcia zakłóceniewego przy zwarcu doziemnym

- Warunek uziemienia ochronnego powinien spełniać zależność:

$$R_B \leq \frac{U_F}{r_E \cdot I''_{k1}} = \frac{80 V}{0,6 \cdot 20,2A} = 6,6 \Omega \quad (74)$$

gdzie,

R_B - wypadkowa rezystancja uziemienia uziomów przyłączonych do punktu neutralnego sieci,



r_E - współczynnik redukcyjny (przyjęto $r_E = 1$ – dla linii napowietrznych, dla kablowych 0,6).

7. Literatura

1. ABB (2007). Medium voltage switchgear manual.
(http://at.dii.unipd.it/renato.gobbo/didattica/corsi/Componenti_tecnologie_elettrici/ABB_switchgear_manual_E11/ABB_11_E_03_druck.pdf, dostęp 15.07.2025).
2. Baran K. (2015). Obliczanie prądów zwarciovych w systemie elektroenergetycznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika, 34, 29–45.
3. Czapp S., Ocena stanu instalacji uziemiającej w stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia.
(<https://sep.com.pl/opracowania/Ocena%20stanu%20instalacji%20uziemiajacej.pdf>, dostęp 15.07.2025).
4. ENEA Operator sp. z o.o. (2023). Dobór środków ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym w sieci SN.
(<https://www.operator.enea.pl/sites/operator/files/2025-06/Dob%C3%B3r%20%C5%9Brodk%C3%B3w%20ochrony%20przed%20poraz%C5%B3eniem%20pr%C4%85dem%20elektrycznym%20w%20sieci%20SN%20-%20obowi%C4%85zuje%20od%2001.10.2023.pdf>, dostęp 15.07.2025).
5. Hoppel W. (2017). *Sieci średnich napięć: Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażień*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
6. Hoppel W., Sieluk W., & Zięba B. (2023). Automatyka zabezpieczeniowa dla elektrowni fotowoltaicznych.
(<https://www.urzadeniadlaenergetyki.pl/technologie/automatyka-zabezpieczeniowa-dla-elektrowni-fotowoltaicznych/>, dostęp 15.07.2025).
7. Korniluk W., & Woliński K. W. (2012). *Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.
8. Kucharska E. (2019). *Dobór i weryfikacja środków ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektroenergetycznych*. Dolnośląska Biblioteka Cyfrowa.
9. Lubośny Z. (2022). *Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa farm wiatrowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.



10. Musiał E. Ochrona przeciwporażeniowa w sieciach SN.
(http://www.edwardmusial.info/pliki/ochrona_pporazeniowa_sn.pdf, dostęp 15.07.2025).
11. Musiał E. Obciążalność zwarciorowa przekładników prądowych.
(http://www.edwardmusial.info/pliki/obc_zwarc_przekladn_pradowych.pdf, dostęp 15.07.2025).
12. PN-EN 50522: Uziemienia instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego powyżej 1 kV. PKN, Warszawa.
13. PN-HD 60364-4-442:2012 Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-44: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi. PKN, Warszawa.
14. Schneider Electric (2000). Calculation of short-circuit currents.
(https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/Calculation_of_short_circuit_currents.pdf, dostęp 15.07.2025).
15. Wiatr J. (2024). Ograniczenia mocy generatora PV przyłączanego do sieci elektroenergetycznej. Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Oddział Kraków
(<https://sep.krakow.pl/uploads/editor/21-Wiatr-J-OGNANICZENIA-MOCY-GENERATORA-PV-PRZYLACZANEGO-DO-SIECI-ELEKTROENERGETYCZNEJ-66ab74a23ccd7.pdf>, dostęp 15.07.2025).
16. Winkler W., & Wiszniewski A. (2017). *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.