



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Kierunek studiów:
Elektrotechnika

Kornelia Banasik

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

Elektroenergetyka zakładów przemysłowych

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. Schemat układu zasilania zakładu przemysłowego	3
2. Wzory do wykonania obliczeń projektowych	5
2.1. Podstawowe wielkości mocy dla stacji	5
2.2. Dobór baterii kondensatorów	6
2.3. Dobór transformatorów	6
2.4. Wyznaczenie mocy transformatorów	6
2.5. Obliczenia dla Głównego Punktu Zasilania (GPZ)	9
2.6. Dobór kabli energetycznych ze względu na dopuszczalne obciążenie długotrwałe	12
2.7. Weryfikacja poprawności doboru kabli energetycznych ze względu na warunki zwarciowe	14
2.8. Weryfikacja poprawności doboru kabli energetycznych ze względu na dopuszczalne spadki napięć	17
3. Odczytywanie z wykresów	20
3.1. Wyznaczanie mocy transformatorów	20



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

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

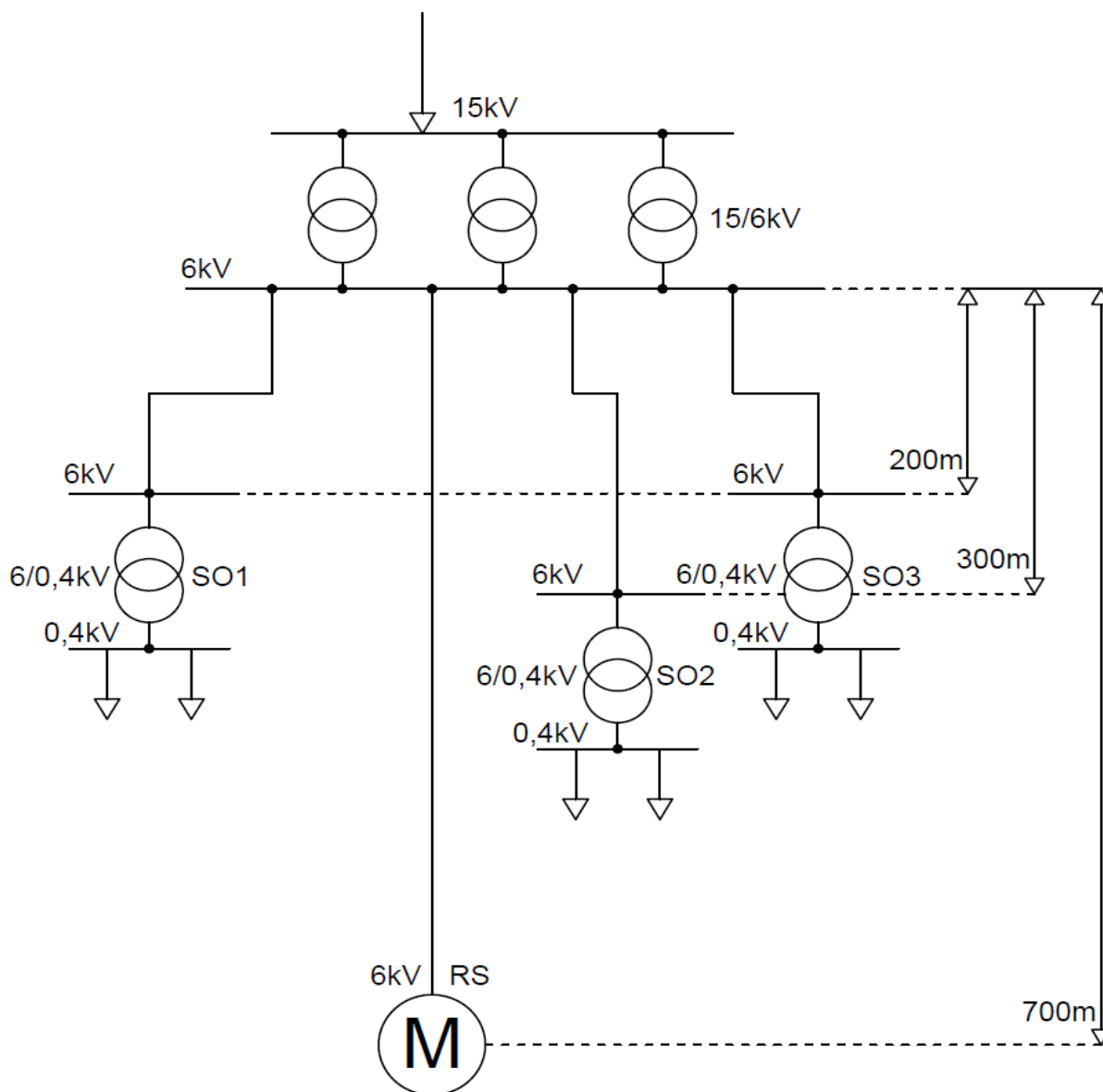


1. Schemat układu zasilania zakładu przemysłowego

Na rysunku 1. przedstawiono uproszczony schemat układu zasilania zakładu przemysłowego z sieci średniego napięcia (SN) wraz z rozdziałem energii do głównych odbiorów i transformatorów rozdzielczych.

Energia elektryczna doprowadzana jest do zakładu na poziomie średniego napięcia 15 kV i kierowana do głównych transformatorów o przekładni 15/6 kV. Po stronie wtórnej napięcie zostaje obniżone do 6 kV, stanowiąc zasadniczy poziom dystrybucji energii elektrycznej dla całego obiektu. Sieć 6 kV zasila główną rozdzielnicę oraz stacje transformatorowe, w których realizowana jest dalsza transformacja napięcia do poziomu niskiego, tj. 0,4 kV – dedykowanego urządzeniom odbiorczym oraz systemom pomocniczym zakładu. W analizowanym układzie przewidziano trzy stacje transformatorowe 6/0,4 kV (SO1, SO2, SO3) zlokalizowane w różnych obszarach obiektu, co umożliwia optymalizację lokalnych strat przesyłowych, poprawę niezawodności zasilania poprzez możliwość sekcjonowania oraz zwiększenie odporności infrastruktury na awarie. Poszczególne stacje transformatorowe umożliwiają wydzielenie dedykowanych obwodów 0,4 kV dla poszczególnych grup technologicznych i odbiorców końcowych, w tym maszyn technologicznych, infrastruktury pomocniczej, układów oświetleniowych oraz instalacji zapewniających funkcjonowanie zakładu zgodnie z wymaganiami technicznymi, technologicznymi i bezpieczeństwa pracy. W układzie wyodrębniono również zasilanie dużego napędu elektrycznego (np. silnika dużej mocy) bezpośrednio z systemu 6 kV. Stacje oddziałowe umieszczone są w określonych odległościach od głównej rozdzielni (SO2 – 200 m, SO1 i SO3 – 300 m), natomiast rozdzielnica silnikowa – 700 m od głównej rozdzielni, co ogranicza straty przesyłowe oraz umożliwia adaptację układu podczas rozbudowy zakładu. Zastosowanie rozproszonego systemu transformatorowego pozwala na elastyczne kształtowanie obciążenia, minimalizację strat energetycznych oraz zapewnienie wysokiego poziomu niezawodności poprzez możliwość sekcjonowania i szybkiej rekonfiguracji infrastruktury w trybie pracy awaryjnej. Rozwiązanie to cechuje się również optymalizacją kosztów eksploatacyjnych dzięki skracaniu tras kablowych niskiego napięcia oraz centralizacji węzłów zasilających dla poszczególnych segmentów funkcjonalnych zakładu.

[Tekst alternatywny. Schemat przedstawia zasilanie zakładu przemysłowego z sieci średniego napięcia 15 kV. Napięcie to jest transformowane do 6 kV, a następnie rozdzielane do trzech stacji transformatorowych rozmieszczonych na terenie zakładu, gdzie obniżane jest do poziomu 0,4 kV dla odbiorników końcowych. Dodatkowo, przewidziano zasilanie dużego silnika bezpośrednio z linii 6 kV. Stacje i silnik znajdują się w różnych odległościach od głównej rozdzielni.]



Rys. 1. Uproszczony schemat proponowanego układu zasilania zakładu przemysłowego.



2. Wzory do wykonania obliczeń projektowych

2.1. Podstawowe wielkości mocy dla stacji

Współczynnik obciążenia mocą pozorną m_{St} :

$$m_{St} = \frac{S_t}{S_S} \quad (1)$$

gdzie:

S_S – moc pozorna danej stacji,

S_t – moc chwilowa pozorna:

$$S_t = S_S \cdot m_{St} \quad (2)$$

Moc czynna chwilowa P_t :

$$P_t = S_t \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Moc bierna chwilowa Q_t :

$$Q_t = S_t \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

gdzie:

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \quad (5)$$

Moc bierna baterii kondensatorów Q_{Bk} :

$$Q_{Bk} = P_t \cdot (tg \varphi - tg \varphi_0) \quad (6)$$

gdzie:

$$tg \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} \quad (7)$$

$tg \varphi_0$ – ustalony $tg \varphi$ wzorcowy:

$$tg \varphi_0 \in < 0, 2; 0, 4 > \quad (8)$$

Moc czynna chwilowa po kompensacji P_{tk} :



$$P_{tk} = P_t \quad (9)$$

Moc bierna chwilowa po kompensacji Q_{tk} :

$$Q_{tk} = Q_t - Q_{Bk} \quad (10)$$

Moc pozorna końcowa stacji $S_{k_{stacji}}$:

$$S_{k_{stacji}} = \sqrt{P_{tk}^2 + Q_{tk}^2} \quad (11)$$

2.2. Dobór baterii kondensatorów

Człon stały baterii kondensatorowej Q_S dobrano z tabeli według warunku:

$$Q_S \leq Q_{Bk_{\min}} \quad (12)$$

Człon regulowany baterii kondensatorowej Q_R dobrano z tabeli według warunku:

$$Q_R \geq 1,1 \cdot (Q_{Bk_{\max}} - Q_S) \quad (13)$$

2.3. Dobór transformatorów

Moc średnia kwadratowa:

$$S_{srkw} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} S_{k_{stacji}}^2 \cdot t_1}{\sum_{i=1}^{24} t_1}} \quad (14)$$

2.4. Wyznaczenie mocy transformatorów

$$\begin{cases} S_{nt} \geq \frac{S_k}{K_k} \\ S_{nt} \geq \frac{S_p}{K_p} \end{cases} \quad (15)$$



gdzie:

S_{nt} – znamionowa moc pozorna transformatora.

Moc przełączenia:

$$S_k = S_n \cdot \sqrt{k \cdot (k+1) \cdot \frac{\Delta P_j}{\Delta P_{obc_n}}} \quad (16)$$

gdzie:

S_n – moc pozorna znamionowa jednego transformatora,

k – liczba transformatorów przed przełączeniem,

$(k+1)$ – liczba transformatorów pracujących po przełączeniu,

ΔP_j – straty mocy jałowe jednego transformatora,

ΔP_{obc_n} – straty mocy obciążeniowe znamionowe jednego transformatora.

Straty mocy czynnej ΔP_t :

$$\Delta P_t = n \cdot \Delta P_j + n \cdot \Delta P_{obc_n} \cdot \left(\frac{S_{kstacji}}{n \cdot S_n} \right)^2 \quad (17)$$

gdzie:

n – liczba transformatorów, które pracują w danej chwili.

Straty mocy biernej ΔQ_t :

$$\Delta Q_t = n \cdot \Delta Q_j + n \cdot \Delta Q_{obc_n} \cdot \left(\frac{S_{kstacji}}{n \cdot S_n} \right)^2 \quad (18)$$

gdzie:

ΔQ_j – straty mocy biernej jałowe jednego transformatora:

$$\Delta Q_j = \frac{i_{0\%}}{100} \cdot S_n \quad (19)$$

gdzie:

$i_{0\%}$ – wartość procentowa prądu biegu jałowego transformatora,

ΔQ_{obc_n} – straty mocy biernej obciążeniowe znamionowe jednego transformatora.



$$\Delta Q_{obc_n} = \frac{U_{X\%}}{100} \cdot S_n \quad (20)$$

gdzie:

$U_{X\%}$ – reaktancyjne procentowe napięcie zwarcia:

$$U_{X\%} = \sqrt{U_{Z\%}^2 - U_{R\%}^2} = \sqrt{U_{Z\%}^2 - \left(\frac{\Delta P_{obc_n}}{S_n} \cdot 100 \right)^2} \quad (21)$$

gdzie:

$U_{R\%}$ – napięcie rezystancyjne zwarcia transformatora,

$U_{Z\%}$ – napięcie procentowe zwarcia transformatora:

$$U_{Z\%}^2 = U_{X\%}^2 + U_{R\%}^2 \quad (22)$$

Moc całkowita czynna, która musi być dosłana do stacji:

$$P_{c_{stacji}} = P_{tk} + \Delta P_t \quad (23)$$

gdzie:

P_{tk} – moc czynna po kompensacji.

Moc całkowita bierna, która musi być dosłana do stacji:

$$Q_{c_{stacji}} = Q_{tk} + \Delta Q_t \quad (24)$$

gdzie:

Q_{tk} – moc bierna po kompensacji.

Moc całkowita pozorna, która musi być dosłana do stacji:

$$S_{c_{stacji}} = \sqrt{P_{c_{stacji}}^2 + Q_{c_{stacji}}^2} \quad (25)$$



Prąd całkowity, który musi być dostawiany do stacji:

$$I_{c_{stacji}} = \frac{S_{c_{stacji}}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (26)$$

2.5. Obliczenia dla Głównego Punktu Zasilania (GPZ)

Moc całkowita czynna rozdzielnic silnikowej P_{cS} :

$$P_{cS} = n \cdot P_n \quad (27)$$

Moc całkowita bierna rozdzielnic silnikowej Q_{cS} :

$$Q_{cS} = n \cdot Q_n = n \cdot P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n = n \cdot P_n \cdot \frac{\sin \varphi_n}{\cos \varphi_n} = n \cdot P_n \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}}{\cos \varphi_n} \quad (28)$$

Moc czynna odbierana z szyn dolnego napięcia GPZ, suma mocy odbierana przez poszczególne odbiorniki P_{GPZ} :

$$P_{GPZ} = P_{cSO1} + P_{cSO2} + P_{cSO3} + P_{cS} \quad (29)$$

gdzie:

P_{cSO1} – moc całkowita czynna stacji SO1,

P_{cSO2} – moc całkowita czynna stacji SO2,

P_{cSO3} – moc całkowita czynna stacji SO3.

Moc bierna odbierana z szyn dolnego napięcia GPZ, suma mocy odbierana przez poszczególne odbiorniki Q_{GPZ} :

$$Q_{GPZ} = Q_{cSO1} + Q_{cSO2} + Q_{cSO3} + Q_{cS} \quad (30)$$



gdzie:

Q_{cSO1} – moc całkowita bierna stacji SO1,

Q_{cSO2} – moc całkowita bierna stacji SO2,

Q_{cSO3} – moc całkowita bierna stacji SO3.

Moc pozorna odbierana z szyn dolnego napięcia GPZ, suma mocy odbierana przez poszczególne odbiorniki S_{GPZ} :

$$S_{GPZ} = \sqrt{P_{GPZ}^2 + Q_{GPZ}^2} \quad (31)$$

Moc bierna baterii kondensatorów $Q_{Bk_{GPZ}}$:

$$Q_{Bk_{GPZ}} = P_{GPZ} \cdot (tg\varphi_{GPZ} - tg\varphi_0) \quad (32)$$

gdzie:

$tg\varphi$ – współczynnik określający wielkość poboru mocy biernej w stosunku do poboru mocy czynnej:

$$tg\varphi_{GPZ} = \frac{Q_{GPZ}}{P_{GPZ}} \quad (33)$$

$tg\varphi_0$ – ustalony $tg\varphi$ wzorcowy:

$$tg\varphi_0 \in < 0,2 \div 0,4 > \quad (34)$$

Moc czynna po kompensacji mocy biernej $P_{k_{GPZ}}$:

$$P_{k_{GPZ}} = P_{GPZ} \quad (35)$$

Moc bierna po kompensacji mocy biernej $Q_{k_{GPZ}}$

$$Q_{k_{GPZ}} = Q_{GPZ} - Q_{Bk_{GPZ}} \quad (36)$$



Moc pozorna po kompensacji mocy biernej S_{kGPZ} :

$$S_{kGPZ} = \sqrt{P_{kGPZ}^2 + Q_{kGPZ}^2} \quad (37)$$

Straty mocy czynnej ΔP_t :

$$\Delta P_{tGPZ} = n \cdot \Delta P_j + n \cdot \Delta P_{obc_n} \cdot \left(\frac{S_{kGPZ}}{n \cdot S_n} \right)^2 \quad (38)$$

gdzie:

n – liczba transformatorów, które pracują w danej chwili.

Straty mocy biernej ΔQ_t :

$$\Delta Q_{tGPZ} = n \cdot \Delta Q_j + n \cdot \Delta Q_{obc_n} \cdot \left(\frac{S_{kGPZ}}{n \cdot S_n} \right)^2 \quad (39)$$

gdzie:

ΔQ_j – straty mocy biernej jałowe jednego transformatora:

$$\Delta Q_j = \frac{i_{0\%}}{100} \cdot S_n \quad (40)$$

gdzie:

$i_{0\%}$ – procentowy prąd biegu jałowego transformatora,

ΔQ_{obc_n} – straty mocy biernej obciążeniowe znamionowe jednego transformatora:

$$\Delta Q_{obc_n} = \frac{U_{X\%}}{100} \cdot S_n \quad (41)$$

gdzie:

$U_{X\%}$ – reaktancyjne procentowe napięcie zwarcia:

$$U_{X\%} = \sqrt{U_{Z\%}^2 - U_{R\%}^2} = \sqrt{U_{Z\%}^2 - \left(\frac{\Delta P_{obc_n}}{S_n} \cdot 100 \right)^2} \quad (42)$$

gdzie:

$U_{R\%}$ – napięcie rezystancyjne zwarcia transformatora,

$U_{Z\%}$ – napięcie procentowe zwarcia transformatora:



$$U_{Z\%} = U_{X\%}^2 + U_{R\%}^2 \quad (43)$$

Moc całkowita czynna, która musi być dosłana do GPZ:

$$P_{cGPZ} = P_{kGPZ} + \Delta P_{tGPZ} \quad (44)$$

gdzie:

P_{tk} – moc czynna po kompensacji.

Moc całkowita bierna, która musi być dosłana do GPZ:

$$Q_{cGPZ} = Q_{kGPZ} + \Delta Q_{tGPZ} \quad (45)$$

gdzie:

Q_{tk} – moc bierna po kompensacji.

Moc całkowita pozorna, która musi być dosłana do GPZ:

$$S_{cGPZ} = \sqrt{P_{cGPZ}^2 + Q_{cGPZ}^2} \quad (46)$$

2.6. Dobór kabli energetycznych ze względu na dopuszczalne obciążenie długotrwałe

Prąd płynący do poszczególnych stacji danym kablem wyznaczany jest z zależności:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (47)$$

gdzie:

S – moc chwilowa pobierana w danej chwili czasu przez odbiory przyłączone do danej stacji oddziałowej,

U_n – napięcie znamionowe stacji oddziałowej.

Prąd całkowity rozdzielniczy silnikowej wylicza się ze wzoru:

$$I_{cs} = \frac{S_s}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{n \cdot P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \quad (47)$$



Metoda polega na dobraniu kabla energetycznego, którego wartość dopuszczalna długotrwale prądu jest większa od największej wartości prądu, który będzie w nim płynął po przyłączeniu odbiorów.

$$n \cdot I_{ddp} \geq I_{c_{stacji\ max}} \quad (47)$$

gdzie:

I_{ddp} – prąd dopuszczalny długotrwale przewodu,

n – liczba dobranych kabli.

Rzeczywisty prąd obciążalności długotrwalej przedstawia wzór:

$$I_{ddp}' = n \cdot r \cdot I_{ddp} \cdot \sqrt{\frac{t_{ddp} - t_r}{t_{ddp} - t_o}} \quad (48)$$

gdzie:

r – współczynnik redukcyjny, uwzględnia ilość kabli na każdej fazie,

$r = 1,0$ dla 1 kabla,

$r = 0,9$ dla 2 kabli,

$r = 0,85$ dla 3 kabli,

$r = 0,8$ dla 4 kabli,

t_{ddp} – temperatura dopuszczalna długotrwale przewodu,

t_r – temperatura robocza w miejscu zainstalowania kabla,

t_o – temperatura otoczenia,

n – liczba dobranych kabli,

I_{ddp} – prąd dopuszczalny długotrwale jednego przewodu.

Warunek do spełnienia przedstawia wzór:

$$I_{c_{stacji\ max}} \leq I_{ddp}' \quad (49)$$

Temperatura robocza maksymalna w miejscu zainstalowania kabla $t_{r_{max}}$:

$$t_{r_{max}} = t_r + (t_{ddp} - t_r) \cdot \left(\frac{I_{cso1_{max}}}{I_{ddp}'} \right)^2 \quad (50)$$

Warunek do spełnienia przedstawia wzór:



$$t_{r_{\max}} \leq t_{ddp} \quad (51)$$

2.7. Weryfikacja poprawności doboru kabli energetycznych ze względu na warunki zwarciove

Aby obliczyć wartość prądu zwarciovego w przypadku zwarcia na szynach stacji należy znać wartość reaktancji systemu elektroenergetycznego, reaktancji i rezystancji transformatorów w GSZ oraz wartość reaktancji i rezystancji linii zasilającej.

Reaktancja zastępcza systemu elektroenergetycznego:

$$X_s = 1,1 \cdot \frac{U_n^2}{S_z} \cdot \frac{1}{g_{T_{GPZ}}^2} \quad (52)$$

gdzie:

U_n – napięcie znamionowe transformatora dla strony 15kV,

X_s – reaktancja zastępcza systemu elektroenergetycznego,

S_z – moc zwarciova,

$g_{T_{GPZ}}$ – przekładnia transformatora w GPZ, obniżającego napięcie.

Rezystancja zastępcza transformatora w GPZ:

$$R_{T_{GPZ}} = \frac{U_{R\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \quad (53)$$

gdzie:

U_n – napięcie znamionowe pracy,

$U_{R\%}$ – rezystancyjne procentowe napięcie zwarcia:

$$U_{R\%} = \frac{\Delta P_{obc_n}}{S_n} \cdot 100\% \quad (54)$$

gdzie:

ΔP_{obc_n} – straty mocy obciążeniowe znamionowe transformatora,

S_n – moc pozorna znamionowa transformatora.



Reaktancja zastępcza transformatora w GPZ:

$$X_{T_{GPZ}} = \frac{U_{X\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \quad (55)$$

gdzie:

U_n – napięcie znamionowe pracy,

$U_{X\%}$ – reaktancyjne procentowe napięcie zwarcia:

$$U_{X\%} = \sqrt{U_{Z\%}^2 - U_{R\%}^2} \quad (56)$$

gdzie:

$U_{R\%}$ – rezystancyjne procentowe napięcie zwarcia,

$U_{Z\%}$ – procentowe napięcie zwarcia transformatora.

Rezystancja kabla dla stacji:

$$R_{K_{stacji}} = R_K' \cdot l \quad (57)$$

gdzie:

R_K' – maksymalna rezystancja żyły roboczej w temperaturze 20°C,

l – długość kabla.

Reaktancja kabla dla stacji:

$$X_{K_{stacji}} = X_K' \cdot l \quad (58)$$

gdzie:

X_K' – reaktancja jednostkowa kabla.

Impedancja wypadkowa:

$$Z = \sqrt{\left(X_s + \frac{X_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} + \frac{X_{K_{stacji}}}{n_{K_{stacji}}} \right)^2 + \left(\frac{R_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} + \frac{R_{K_{stacji}}}{n_{K_{stacji}}} \right)^2} \quad (59)$$

gdzie:

$n_{K_{stacji}}$ – ilość kabli na jednej fazie,

$n_{T_{GPZ}}$ – ilość transformatorów w GPZ.



Prąd początkowy zwarcia:

$$I_{PZ} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (60)$$

gdzie:

c – współczynnik napięciowy, określa jakie może wystąpić minimalne oraz maksymalne napięcie robocze w linii danego napięcia,
 U_n – wartość napięcia, na którym występuje zwarcie.

Suma prądów znamionowych wszystkich źródeł pracujących na zwarcie (systemu):

$$I_n = \frac{S_z}{\sqrt{3} \cdot U_n} \cdot g_{T_{GPZ}} \quad (61)$$

Przekrój przewodu minimalny, który jest w stanie wytrzymać zwarcie:

$$S_{\min} = \frac{I_{tz} \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t_z}}{j} \quad (62)$$

gdzie:

t_z – czas trwania zwarcia,
 j – gęstość prądu zwarciovego jednosekundowego w temperaturze granicznej dopuszczalnej przy zwarcu,
 I_{tz} – zastępczy t_z -sekundowy prąd cieplny, zależy od czasu trwania zwarcia:

$$I_{tz} = k_c \cdot I_{PZ} \quad (63)$$

gdzie:

k_c – współczynnik cieplny.

Warunek do spełnienia:

$$n \cdot S \geq S_{\min} \quad (64)$$

gdzie:

n – liczba dobranych kabli,
 S – przekrój jednego kabla.

Warunek do spełnienia:

$$n \cdot I_{zw} \geq I_{tz} \quad (65)$$



gdzie:

n – liczba dobranych kabli,

I_{zw} – obciążalność żyły pierwotnej.

2.8. Weryfikacja poprawności doboru kabli energetycznych ze względu na dopuszczalne spadki napięć

Kable elektroenergetyczne zasilające poszczególne stacje oddziałowe (w rzeczywistości cały układ zasilający poszczególne stacje) są dobrane prawidłowo jeśli napięcie na szynach dolnego napięcia stacji oddziałowych zawiera się w przedziale $(94\% \div 107\%) \cdot U_n$.

Rezystancja transformatora w GPZ:

$$R_{T_{GPZ}} = \frac{U_{R\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \cdot \frac{1}{g_T^2} \quad (66)$$

gdzie:

U_n – napięcie znamionowe pracy,

ϑ_T – przekładnia transformatora obniżającego napięcie z 6kV na 0,4kV.

Reaktancja transformatora w GPZ:

$$X_{T_{GPZ}} = \frac{U_{X\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \cdot \frac{1}{g_T^2} \quad (67)$$

Rezystancja kabla w stacji:

$$R_{K_{stacji}} = R_K' \cdot l \cdot \frac{1}{g_T^2} \quad (68)$$

Reaktancja kabla w stacji:

$$X_{K_{stacji}} = X_K' \cdot l \cdot \frac{1}{g_T^2} \quad (69)$$

Rezystancja transformatora w stacji:

$$R_{T_{stacji}} = \frac{U_{R\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \quad (70)$$

Reaktancja transformatora w stacji:

$$X_{T_{stacji}} = \frac{U_{X\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \quad (71)$$

Spadki napięć:

$$\delta U_{61} = \sqrt{3} \cdot \left[I_c' \cdot \frac{R_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} - I_c'' \cdot \frac{X_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} + I_{SO1}' \cdot \left(\frac{R_{K_{SO1}}}{n_{K_{SO1}}} + \frac{R_{T_{SO1}}}{n_{T_{SO1}}} \right) - I_{SO1}'' \cdot \left(\frac{X_{K_{SO1}}}{n_{K_{SO1}}} + \frac{X_{T_{SO1}}}{n_{T_{SO1}}} \right) \right] \quad (72)$$

$$\delta U_{62} = \sqrt{3} \cdot \left[I_c' \cdot \frac{R_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} - I_c'' \cdot \frac{X_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} + I_{SO2}' \cdot \left(\frac{R_{K_{SO2}}}{n_{K_{SO2}}} + \frac{R_{T_{SO2}}}{n_{T_{SO2}}} \right) - I_{SO2}'' \cdot \left(\frac{X_{K_{SO2}}}{n_{K_{SO2}}} + \frac{X_{T_{SO2}}}{n_{T_{SO2}}} \right) \right] \quad (73)$$

$$\delta U_{63} = \sqrt{3} \cdot \left[I_c' \cdot \frac{R_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} - I_c'' \cdot \frac{X_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} + I_{SO3}' \cdot \left(\frac{R_{K_{SO3}}}{n_{K_{SO3}}} + \frac{R_{T_{SO3}}}{n_{T_{SO3}}} \right) - I_{SO3}'' \cdot \left(\frac{X_{K_{SO3}}}{n_{K_{SO3}}} + \frac{X_{T_{SO3}}}{n_{T_{SO3}}} \right) \right] \quad (74)$$

$$\delta U_{64} = \sqrt{3} \cdot \left[I_c' \cdot \frac{R_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} - I_c'' \cdot \frac{X_{T_{GPZ}}}{n_{T_{GPZ}}} + I_{RS}' \cdot \frac{R_{K_{RS}}}{n_{K_{RS}}} - I_{RS}'' \cdot \frac{X_{K_{RS}}}{n_{K_{RS}}} \right] \quad (75)$$

gdzie :

I' – składowa czynna danego prądu,

I'' – składowa bierna danego prądu.

Prąd całkowity (wartość zespolona):

$$\bar{I}_c = \bar{I}_{SO1} + \bar{I}_{SO2} + \bar{I}_{SO3} + \bar{I}_{RS} \quad (76)$$

Prądy stacji oddziaływanych w postaci zespolonej:

$$\bar{I}_{SO1} = \frac{S_{SO1\max}}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot (\cos \varphi_{SO1} + j \sin \varphi_{SO1}) \quad (77)$$

$$\bar{I}_{SO2} = \frac{S_{SO2\max}}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot (\cos \varphi_{SO2} + j \sin \varphi_{SO2}) \quad (78)$$



$$I_{SO3}^- = \frac{S_{SO3max}}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot (\cos \varphi_{SO3} + j \sin \varphi_{SO3}) \quad (79)$$

Prąd w rozdzielnicy silnikowej w postaci zespolonej:

$$I_{RS}^- = \frac{S_{RS}}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot (\cos \varphi_{RS} + j \sin \varphi_{RS}) = \frac{n \cdot P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_{RS}} \cdot (\cos \varphi_{RS} + j \sin \varphi_{RS}) \quad (80)$$

Wartości napięć w punktach:

$$U_1 = U_6 \cdot \frac{1}{g_{T_{GPZ}}} \cdot \frac{1}{g_{T_{SO1}}} - \delta U_{61} \quad (81)$$

$$U_2 = U_6 \cdot \frac{1}{g_{T_{GPZ}}} \cdot \frac{1}{g_{T_{SO2}}} - \delta U_{62} \quad (82)$$

$$U_3 = U_6 \cdot \frac{1}{g_{T_{GPZ}}} \cdot \frac{1}{g_{T_{SO3}}} - \delta U_{63} \quad (83)$$

$$U_4 = U_6 \cdot \frac{1}{g_{T_{GPZ}}} - \delta U_{64} \cdot g_{T_{stacji}} \quad (84)$$

Procentowe wartości napięć:

$$U_{1\%} = \frac{U_1}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (85)$$

$$U_{2\%} = \frac{U_2}{U_{2n}} \cdot 100\% \quad (86)$$

$$U_{3\%} = \frac{U_3}{U_{3n}} \cdot 100\% \quad (87)$$

$$U_{4\%} = \frac{U_4}{U_{4n}} \cdot 100\% \quad (88)$$



3. Odczytywanie z wykresów

3.1. Wyznaczanie mocy transformatorów

Aby wyznaczyć moc, na którą dobiera się transformator należy rozwiązać nierówności:

$$\begin{cases} S_{nt} \geq \frac{S_k}{K_k} \\ S_{nt} \geq \frac{S_p}{K_p} \end{cases} \quad (89)$$

gdzie:

S_{nt} – znamionowa moc pozorna transformatora.

- Przykład rozwiązania:

Na początku rozważań należy dokonać następujących przekształceń:

$$\frac{S_k}{K_k} = \frac{S_p}{K_p} / \cdot K_k \quad (90)$$

$$\frac{S_k}{1} = \frac{S_p \cdot K_k}{K_p} / : S_p \quad (91)$$

$$\frac{S_k}{S_p} = \frac{K_k}{K_p} \quad (92)$$

$$\frac{K_k}{K_p} = \frac{S_k}{S_p} \quad (93)$$

Przyjęto następujące założenia:

$$S_k = 6288 \text{ kVA} \quad (94)$$

$$S_p = 1646 \text{ kVA} \quad (95)$$



Po podstawieniu:

$$\frac{S_k}{S_p} = \frac{6288 \text{ kVA}}{1646 \text{ kVA}} = 3,82 \quad (96)$$

Skoro:

$$\frac{K_k}{K_p} = \frac{S_k}{S_p} \quad (97)$$

to:

$$K_k = \frac{S_k}{S_p} \cdot K_p \quad (98)$$

oraz skoro:

$$\frac{S_k}{S_p} = 3,82 \quad (99)$$

to:

$$K_k = 3,82 \cdot K_p \quad (100)$$

$K_k = 3,82 \cdot K_p$ jest więc wzorem funkcji liniowej $y = a \cdot x$, w którym znana jest wartość współczynnika kierunkowego a .

Dlatego, w celu wrysowania prostej $\frac{K_k}{K_p} = 3,82$ należy ustalić kilka punktów np.:

PUNKT 1.:

$$x = K_p = 0,3$$

$$y = 3,82 \cdot 0,3 = 1,146$$

$$y = K_k$$

PUNKT 2.:

$$x = K_p = 0,45$$

$$y = 3,82 \cdot 0,45 = 1,719$$

$$y = K_k$$

PUNKT 3.:

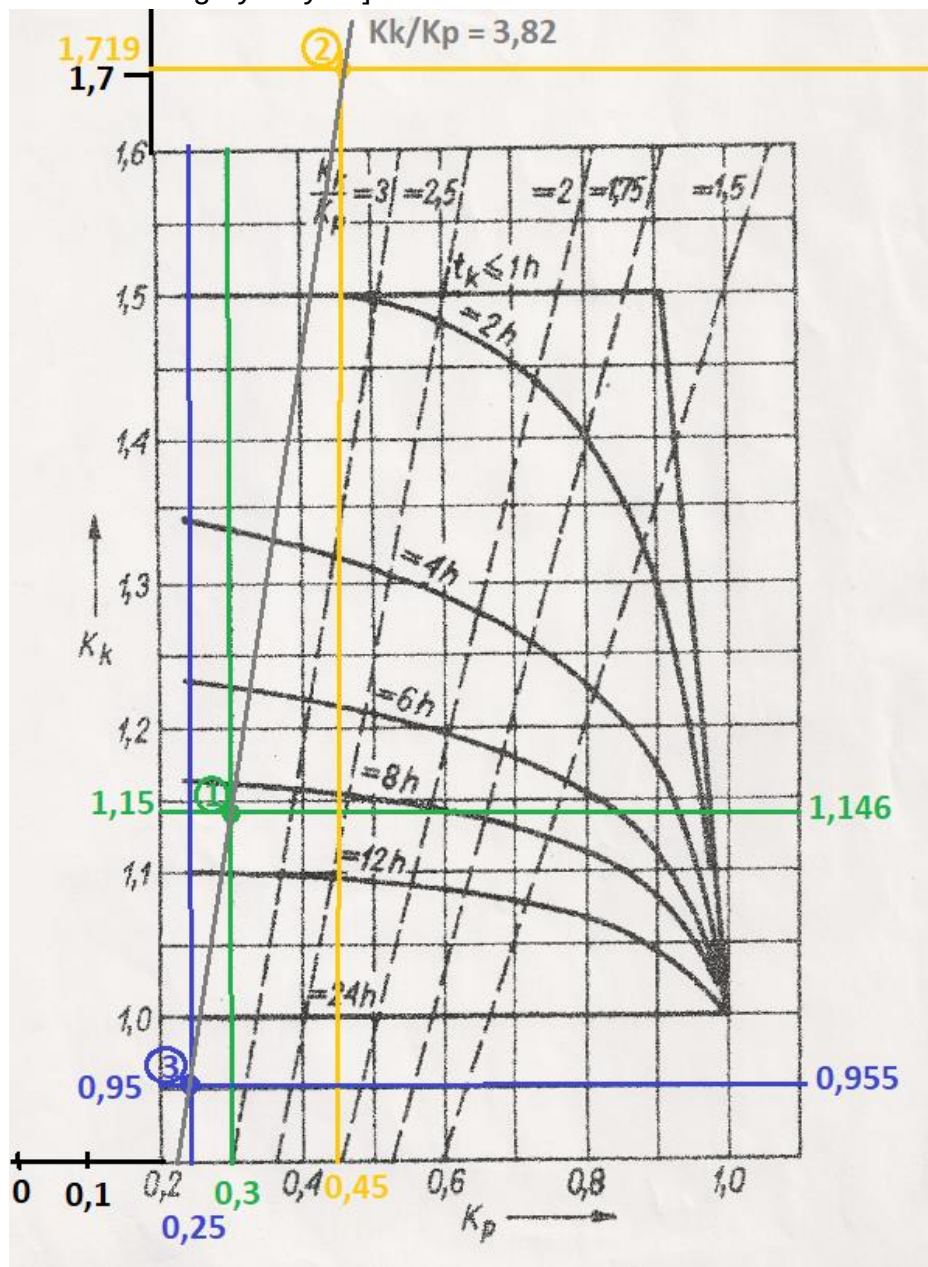
$$x = K_p = 0,25$$

$$y = 3,82 \cdot 0,25 = 0,955$$

$$y = K_k$$

Następnie należy wrysować prostą $\frac{K_k}{K_p} = 3,82$, która przechodzi przez wyznaczone punkty.

[Tekst alternatywny. Wykres przedstawia zależność współczynnika jednoczesności średniej mocy do współczynnika jednoczesności mocy szczytowej dla różnych czasów obliczeniowych. Osie oznaczają K_p (poziomo) i K_k (pionowo), a kolorowe linie i punkty zaznaczają wybrane wartości i ich stosunki. W tle znajdują się krzywe dla czasów od 1 do 24 godzin. Całość służy analizie jednoczesności poboru mocy w systemach elektroenergetycznych.]



Rys. 2. Wykres do wyznaczenia współczynników K_k i K_p .



4. Tabele

Tabela 1. Wzór tabeli, w której należy przedstawić wyniki obliczeń wykonanych według wzorów zawartych w rozdziale 2.1.

Lp.	S_s	m_{st}	S_t	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	P_t	Q_t	$tg \varphi$	$tg \varphi_o$	Q_{Bk}	P_{tk}	Q_{tk}	$S_{k_{stacji}}$
	kVA	-	kVA	-	-	kW	kVAr	-	-	kVAr	kW	kVAr	kVA
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													



Tabela 2. Wzór tabeli, w której należy przedstawić wyniki obliczeń wykonanych według wzorów zawartych w rozdziale 2.1 i 2.4.

Lp.	P_{tk}	Q_{tk}	$S_{k_{stacji}}$	n	ΔP_t	ΔQ_t	$P_{c_{stacji}}$	$Q_{c_{stacji}}$	$S_{c_{stacji}}$	$I_{c_{stacji}}$
	kW	kVAr	kVA	szt.	kW	kVAr	kW	kVAr	kVA	A
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										



Tabela 3. Wzór tabeli, w której należy przedstawić wyniki obliczeń wykonanych według wzorów zawartych w rozdziale 2.4 i 2.5.

Lp.	$P_{c_{stacji 1}}$	$Q_{c_{stacji 1}}$	$S_{c_{stacji 1}}$	$P_{c_{stacji 2}}$	$Q_{c_{stacji 2}}$	$S_{c_{stacji 2}}$	$P_{c_{stacji 3}}$	$Q_{c_{stacji 3}}$	$S_{c_{stacji 3}}$	P_{CS}	Q_{CS}	P_{GPZ}	Q_{GPZ}	S_{GPZ}
	kW	kVAr	kVA	kW	kVAr	kVA	kW	kVAr	kVA	kW	kVAr	kW	kVAr	kVA
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														



Tabela 4. Wzór tabeli, w której należy przedstawić wyniki obliczeń wykonanych według wzorów zawartych w rozdziale 2.5.

Lp.	$tg\varphi_{GPZ}$	$tg\varphi_O$	$Q_{Bk_{GPZ}}$	$P_{k_{GPZ}}$	$Q_{k_{GPZ}}$	$S_{k_{GPZ}}$	n	$\Delta P_{t_{GPZ}}$	$\Delta Q_{t_{GPZ}}$	$P_{c_{GPZ}}$	$Q_{c_{GPZ}}$	$S_{c_{GPZ}}$
	-	-	kVar	kW	kVar	kVA	szt.	kW	kVar	kW	kVar	kVA
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												



5. Literatura

1. Dyka E., Mróz-Radłowska I.: *Ekonomia w energetyce, wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2014 r.
2. Góra S., Pochyluk R.: *Zbiór Zadań z Gospodarki Elektroenergetycznej*. PWN, Warszawa 1976.
3. Kochel M., Niestępski S.: *Elektroenergetyczne sieci i urządzenia przemysłowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003 r.
4. Kowalski Z., Stępień J.: *Elektryfikacja zakładów przemysłowych. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwa Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2009.
5. Laudyn D.: *Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
6. Marzecki J.: *Rozdzielcze sieci elektroenergetyczne – zagadnienia wybrane*. PWN, Warszawa 2001.
7. Matla R.: *Gospodarka Elektroenergetyczna*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1988.
8. Stępień J.C.: *Laboratorium Gospodarki Elektroenergetycznej*, Skrypt Politechniki Świętokrzyskiej, 1995.