

Temat: Badanie transformatora trójfazowego

- 1. Interpretacja wielkości występujących na tabliczce znamionowej**
- 2. Ocena stanu technicznego transformatora**
- 3. Pomiar rezystancji uzwojeń**
 - a. Wizualna ocena wyglądu kadzi transformatora;
 - b. Wizualnie ocena stanu izolatorów;
 - c. Pomiar stanu izolacji transformatora.
- 4. Stan jałowy transformatora**
 - a. Pomiar prądów i mocy w stanie jałowym dla różnych wartości napięcia zasilającego;
 - b. Wyznaczenie i wykreślenie charakterystyk $P_0, I_0, I_\mu, I_{Fe}, R_{Fe}, X_\mu, \cos \varphi_0 = f(U_0)$.
- 5. Stan zwarcia transformatora**
 - a. Pomiar prądów i mocy w stanie zwarcia dla różnych wartości napięcia zasilającego.
Wyznaczenie procentowego napięcia zwarcia;
 - b. Wykreślenie charakterystyk $I_z, P_z, \cos \varphi_z, Z_z, R_z, X_z = f(U)$.
- 6. Pomiar przekładni napięciowej transformatora**
- 7. Wyznaczenie sprowadzonych do uzwojenia GN wartości parametrów schematu zastępczego transformatora**
- 8. Sporządzenie wykresu fazorowego transformatora**

Przebieg ćwiczenia

1. Interpretacja wielkości występujących na tabliczce znamionowej

Na tabliczce znamionowej znajduje się szereg istotnych informacji dotyczących transformatora. Do informacji tych należą między innymi:

- znamionowa moc pozorna,
- znamionowe napięcia strony górnego i dolnego napięcia, możliwości regulacji napięcia,
- znamionowe prądy strony górnego i dolnego napięcia,
- procentowe napięcie zwarcia,
- prąd stanu jałowego,
- układ połączeń uzwojeń,
- przesunięcie godzinowe.

Powyższe informacje należy zestawić w tabeli 1.

S_N [VA]
U_{1N} [V]
U_{2N} [V]
I_{1N} [A]
I_{2N} [A]
$u_{z\%}$ [-]
I_0 [A]
Grupa połączeń
Przesunięcie godzinowe

2. Ocena stanu technicznego transformatora

- Należy wizualnie ocenić wygląd kadzi transformatora. Należy zwrócić uwagę na ewentualne pęknięcia kadzi lub wszelkiego rodzaju nieszczelności objawiające się widocznymi wyciekami oleju.
- Należy wizualnie ocenić stan izolatorów przepustowych. Zwrócić uwagę, czy nie występują pęknięcia i ubytki w częściach ceramicznych izolatorów.
- Pomiaru stanu izolacji wykonujemy dedykowanym do tego miernikiem. O stanie izolacji decyduje tzw. współczynnik absorpcji. Określa on stosunek wartości rezystancji zmierzonej po 60s od rozpoczęcia pomiarów do wartości rezystancji zmierzonej po 15s od rozpoczęcia pomiarów:

$$k_a = \frac{R_{60}}{R_{15}}$$

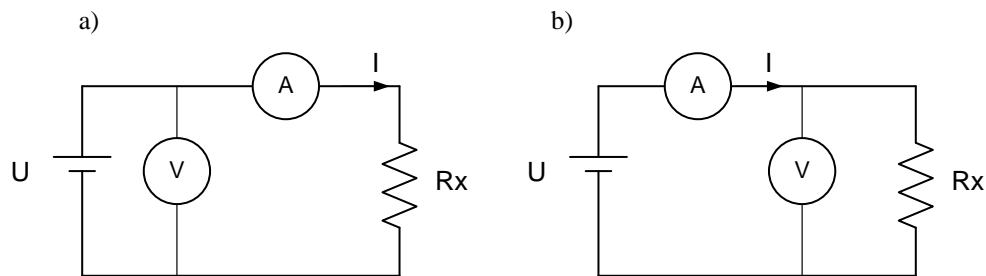
Pomiary dokonujemy w układzie:

- kadź – zacisk liniowy uzwojenia GN,
- kadź – zacisk liniowy uzwojenia DN,
- zacisk liniowy uzwojenia GN – zacisk liniowy uzwojenia DN

Pomiary wykonywane są przy zasilaniu układów napięciem stałym o wartości min. 2,5kV. Wartość współczynnika $k_a > 1$ świadczy o dobrym stanie izolacji.

3. Pomiar rezystancji uzwojeń

Pomiaru rezystancji uzwojeń pomiędzy zaciskami liniowymi, w zależności od spodziewanych wartości, należy wykonać metodą techniczną w układzie o poprawnie mierzonym prądzie lub napięciu (rys. 1). Zazwyczaj rezystancję uzwojenia GN wyznaczamy z wykorzystaniem układu o poprawnie mierzonym prądzie, a uzwojenia DN – w układzie o poprawnie mierzonym napięciu. Źródłem napięcia w obu przypadkach powinno być ogniwo galwaniczne. W celu ograniczenia wartości prądu w układzie stosuje się dodatkowy rezystor.



Rys. 1. Układ o poprawnie mierzonym: a) prądzie, b) napięciu

Wartość rezystancji: $R_x = U / I$. Na podstawie tak zmierzonych wartości rezystancji należy wyznaczyć rezystancję uzwojeń fazowych R_f . Należy w tym celu uwzględnić sposób połączenia uzwojeń fazowych. Rezystancje fazowe wynoszą:

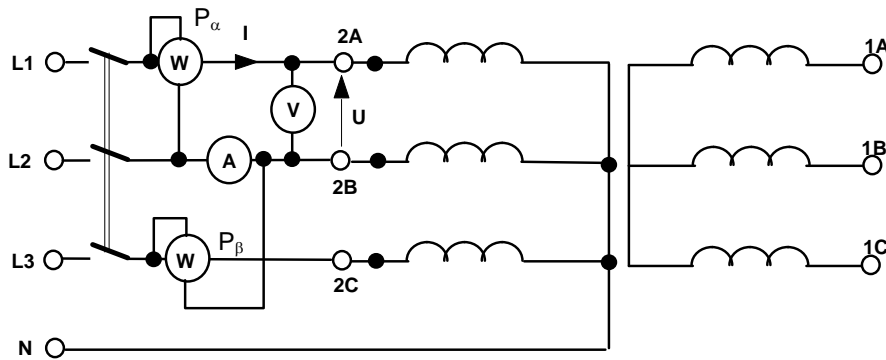
$R_f = R_x / 2$ - dla połączenia w gwiazdę,

- $R_f = 1,5R_x$ - dla połączenia w trójkąt.

4. Stan jałowy transformatora

b. Pomiar prądów i mocy w stanie jałowym dla różnych wartości napięcia zasilającego

Stan jałowy transformatora to taki stan, w którym jedno z uzwojeń jest zasilane napięciem przemiennym, a drugie z uzwojeń pozostaje w stanie bezprądowym. Pomiary w stanie jałowym transformatora możemy wykonać zarówno po stronie górnego jak i dolnego napięcia. O tym, które z uzwojeń jest zasilane decyduje dostępność źródła napięcia (wartości napięcia) oraz aparatury pomiarowej. Układ pomiarowy pokazano na rysunku 2. Pomiaru mocy czynnej w układzie trójfazowym trójprzewodowym wykonuje się za pomocą dwóch watomierzy połączonych w układ Arona.



Rys. 2. Stan jałowy transformatora - układ pomiarowy

W tabeli należy zestawić wyniki pomiarów i obliczeń.

Lp.	U	I_0	P_α	P_β	P_0	$\cos \varphi_0$	I_μ	I_{Fe}	R_{Fe}	X_μ
	V	A	W	W	W	-	A	A	Ω	Ω
1	U_N									
...										
n	$0,1U_N$									

Moc czynna pobierana przez układ:

$$P_0 = P_\alpha + P_\beta$$

Należy pamiętać, że przy współczynniku mocy $\cos \varphi \leq 0,5$, wskazania jednego z watomierzy są równe zero lub ujemne - $P \leq 0$. Współczynnik mocy wyznacza się z zależności:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}UI}$$

Sposób obliczania składowej czynnej I_{Fe} oraz biernej I_μ prądu stanu jałowego I_0 , a także rezystancji R_{Fe} reprezentującej straty mocy w rdzeniu oraz reaktancji magnesującej X_μ wynika ze sposobu połączeń uzwojeń fazowych. Zależności te zestawiono w tabeli poniżej:

Układ połączeń	I_μ	I_{Fe}	R_{Fe}	X_μ
	A	A	Ω	Ω
gwiazda	$I_0 \sin \varphi_0$	$I_0 \cos \varphi_0$	$\frac{U^2}{P_0}$	$\frac{U}{\sqrt{3}I_\mu}$
trójkąt	$\frac{I_0 \sin \varphi_0}{\sqrt{3}}$	$\frac{I_0 \cos \varphi_0}{\sqrt{3}}$	$3 \frac{U^2}{P_0}$	$\frac{\sqrt{3}U}{I_\mu}$

b. Na podstawie pomiarów oraz obliczonych wielkości należy wykreślić następujące charakterystyki: $P_0, I_0, I_\mu, I_{Fe}, R_{Fe}, X_\mu, \cos \varphi_0 = f(U_0)$.

5. Stan zwarcia transformatora

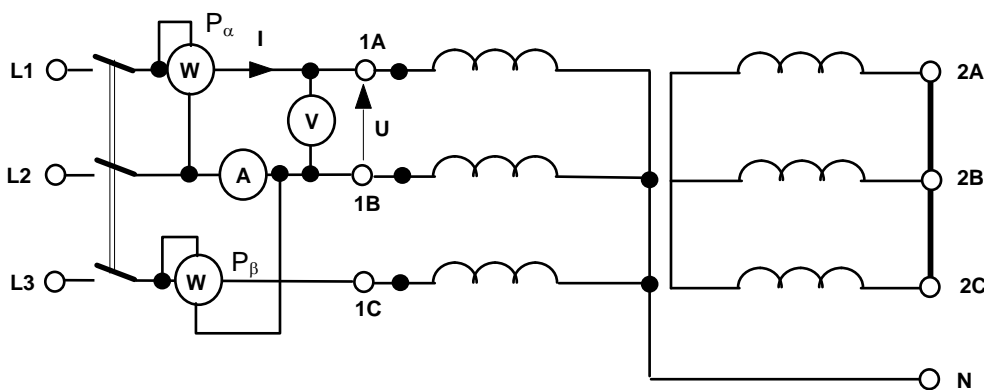
a. Pomiar prądów i mocy w stanie zwarcia dla różnych wartości napięcia zasilającego

Stan zwarcia transformatora to taki stan, w którym jedno z uzwojeń jest zasilane napięciem przemiennym, a zaciski drugiego uzwojenia są zwarte. Próbę zwarcia wykonujemy nastawiając napięcie zasilające od zera do takiej wartości, która spowoduje przepływ w obu uzwojeniach (pierwotnym i wtórnym) prądu znamionowego. Napięcie zasilające powodujące przepływ prądu znamionowego w stanie zwarcia nazywamy napięciem zwarcia. Napięcie to zazwyczaj wyraża się w procentach napięcia znamionowego i określa procentowym napięciem zwarcia:

$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_N} 100\%$$

Procentowe napięcie zwarcia w przypadku transformatorów energetycznych wynosi kilka procent. Jest to jeden z istotnych parametrów transformatora podawanych na tabliczce znamionowej.

Pomiary w stanie zwarcia transformatora możemy wykonać zarówno po stronie górnego jak i dolnego napięcia. O tym, które z uzwojeń jest zasilane decyduje dostępność źródła napięcia (wartości napięcia) oraz aparatury pomiarowej. Układ pomiarowy dla stanu zwarcia pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Zwarcie transformatora - układ pomiarowy

Wyniki pomiarów i obliczeń należy zestawić w tabeli.

Lp.	U	I_z	P_α	P_β	P_z	$\cos \varphi_z$	Z_z	R_z	X_z
	V	A	W	W	W	-	Ω	Ω	Ω
1	U_z	I_N							
2									
...									
n		$0,1I_N$							

Moc czynna pobierana przez układ:

$$P_z = P_\alpha + P_\beta$$

Współczynnik mocy:

$$\cos \varphi_z = \frac{P_z}{\sqrt{3}UI}$$

Sposób obliczania impedancji zwarcia Z_z , rezystancji zwarcia R_z , oraz reaktancji zwarcia X_z wynika ze sposobu połączeń uzwojeń fazowych. Zależności te zestawiono w tabeli poniżej:

Układ połączeń	Z_z	R_z	X_z
	Ω	Ω	Ω
gwiazda	$\frac{U}{\sqrt{3}I}$	$\frac{U}{\sqrt{3}I} \cos \varphi_z$	$\frac{U}{\sqrt{3}I} \sin \varphi_z$
trójkąt	$\frac{\sqrt{3}U}{I}$	$\frac{\sqrt{3}U}{I} \cos \varphi_z$	$\frac{\sqrt{3}U}{I} \sin \varphi_z$

Na podstawie wyników pomiarów należy wyznaczyć procentowe napięcie zwarcia.

- b. Na podstawie pomiarów oraz obliczonych wielkości należy wykreślić następujące charakterystyki:** $I_z, P_z, \cos \varphi_z, Z_z, R_z, X_z = f(U)$.

6. Pomiar przekładni napięciowej transformatora

Pomiaru przekładni napięciowej dokonuje się przy zasilaniu jednego z uzwojeń, podczas gdy drugie z uzwojeń pozostaje w stanie bezprądowym. Przekładnią napięciową nazywamy stosunek napięć na zaciskach strony pierwotnej i wtórnej w przypadku, gdy $I_1 = I_{10}, I_2 = 0$ i określamy zależnością:

$$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2}$$

Na podstawie przekładni napięciowej ϑ_u można określić przekładnię zwojową ϑ_z transformatora. W tym celu należy wziąć pod uwagę sposób skojarzenia uzwojeń górnego i dolnego napięcia. Relacje pomiędzy przekładniami, w zależności od grupy połączeń uzwojeń, określa poniższa tabela:

Układ połączeń	
Yy	$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{1f}}{\sqrt{3}U_{2f}} = \vartheta_z$
Dy	$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{3}U_{2f}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \vartheta_z$
Yd	$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{1f}}{U_{2f}} = \sqrt{3} \vartheta_z$
Yz	$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}U_{2f}^*} = \frac{2}{\sqrt{3}} \vartheta_z$
Dz	$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1f}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}U_{2f}^*} = \frac{2}{3} \vartheta_z$

przy czym U_{2f}^* - napięcie na połowie uzwojenia połączonego w zygzak.

Na podstawie pomiarów należy wyznaczyć przekładnię napięciową i zwojową transformatora.

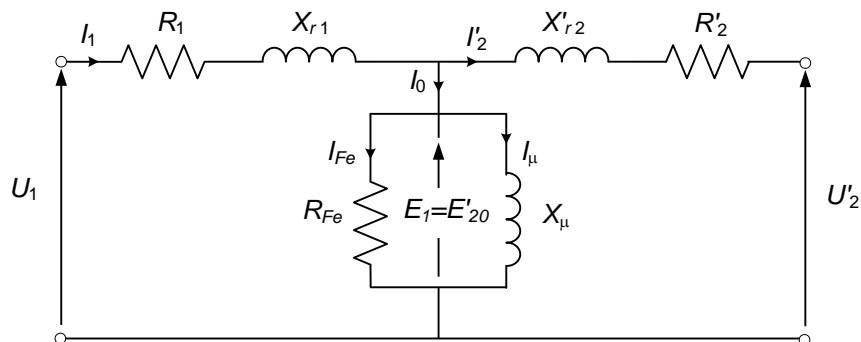
7. Wyznaczenie sprowadzonych do uzwojenia GN wartości parametrów schematu zastępczego transformatora

Jeżeli próba stanu jałowego oraz próba zwarcia została przeprowadzona po stronie GN, to otrzymujemy parametry schematu zastępczego transformatora przedstawionego poniżej, przy czym:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_z}{2} \text{ oraz } X_{r1} = X_{r2}' = \frac{X_z}{2}$$

Rzeczywistą wartość rezystancji oraz reaktancji rozproszenia po stronie DN możemy wyznaczyć z zależności:

$$R_2 = R_2' / \vartheta_z^2 \text{ oraz } X_{r2} = X_{r2}' / \vartheta_z^2$$



Jeżeli którykolwiek z pomiarów (lub oba pomiary) zostały wykonane po stronie DN, to należy pomiar (lub pomiary) przeliczyć na stronę GN wg zależności przedstawionych powyżej, uwzględniając ponadto, że:

$$R_{Fe}^{GN} = R_{Fe}^{DN} \cdot \vartheta_z^2 \text{ oraz } X_{\mu}^{GN} = X_{\mu}^{DN} \cdot \vartheta_z^2$$

W tabeli należy zestawzić parametry schematu zastępczego transformatora sprowadzone na stronę GN.

Parametr	Wartość
R_1
X_{r1}
R_{Fe}
X_{μ}
R_2'
X_{r2}'

8. Sporządzenie wykresu wskazowego transformatora

Na podstawie wyznaczonych parametrów schematu zastępczego transformatora narysować w skali sprowadzony do uzwojenia GN wykres wskazowy dla następujących danych wejściowych podanych przez prowadzącego:

Dane wejściowe	Wartość
U_2
I_2
$\cos \varphi_2$
Charakter obciążenia

Obliczenia wykonać w dziedzinie liczb zespolonych.

Przykładowe pytania kontrolne

1. Co to jest transformator?
2. Omów budowę transformatora 1-fazowego kolumnowego.
3. Omów budowę transformatora 1-fazowego płaszczyznowego.
4. Jakie informacje zawiera tabliczka znamionowa transformatora?
5. Co to jest przekładnia napięciowa transformatora jednofazowego? Czy przekładnia może być równa jedności?
6. Które z uzwojeń - górnego czy dolnego napięcia – ma mniejszy przekrój poprzeczny? Kiedy pola przekroju poprzecznego uzwojeń byłyby równe?
7. Co to jest napięcie zwojowe transformatora?
8. Jak wyznaczyć liczbę zwojów transformatora za pomocą dodatkowej cewki pomiarowej?
9. Co to jest przekładnia zwojowa transformatora jednofazowego?
10. Jaka jest typowa wartość indukcji w kolumnie transformatora?
11. Jak na podstawie napięcia, częstotliwości, liczby zwojów i pola powierzchni przekroju poprzecznego kolumny oszacować wartość indukcji w kolumnie?
12. Co to jest współczynnik k_{Fe} i od czego zależy?
13. Czym charakteryzuje się jałowy stan pracy transformatora?
14. Co to są charakterystyki stanu jałowego transformatora?
15. Jak wygląda schemat zastępczy transformatora w stanie jałowym. Co reprezentują elementy tego schematu?
16. Jaka jest relacja prąd stanu jałowego w stosunku do prądu znamionowego? Jaki to ma związek z mocą transformatora?
17. Jakie są relacje pomiędzy mocą wydzielaną na elementach czynnych schematu zastępczego transformatora w stanie jałowym?
18. Jakie straty mocy występują w rdzeniu transformatora i od czego zależą?
19. Co to jest charakterystyka magnesowania ferromagnetyka? Jaka jest typowa wartość indukcji nasycenia?
20. Jak wygląda przebieg czasowy prądu magnesującego transformatora jednofazowego przy dużym nasyceniu rdzenia?

21. Co to są wyższe harmoniczne prądu? Jakie wyższe harmoniczne prądu mogą wystąpić w prądzie magnesującym?
22. Podaj prawo Ampera w ujęciu całkowym. Jak je zastosować w odniesieniu do transformatora?
23. Jak wyznaczyć charakterystykę $B=f(H)$ transformatora? Wyjaśnij szczegółowo założenia upraszczające.
24. Co to jest charakterystyka zewnętrzna transformatora?
25. Zdefiniuj zmienność napięcia transformatora. Jak zależy ona od charakteru obciążenia?
26. Kiedy zmienność napięcia przyjmuje wartość maksymalną. Ile ona wynosi?
27. Jakie informacje zawiera tabliczka znamionowa transformatora trójfazowego?
28. Czym jest podany w godzinach kąt przesunięcia fazowego?
29. Jakie są relacje pomiędzy wielkościami fazowymi i przewodowymi napięć i prądów w przypadku skojarzenia uzwojeń w trójkąt lub gwiazdę?
30. Na czym polega pomiar rezystancji metodą techniczną w układzie poprawnie mierzonego napięcia i poprawnie mierzonego prądu?
31. Jak na podstawie zmierzonej rezystancji (widzianej od strony zacisków) określić rezystancję jednej fazy w przypadku uzwojeń skojarzonych w trójkąt lub gwiazdę bez przewodu neutralnego. Założyć symetrię układu, tzn. założyć równość rezystancji.
32. Co to jest współczynnik absorpcji? W jakim przedziale powinien się zawierać?
33. Na czym polega próba zwarcia transformatora?
34. Co to jest napięcie zwarcia transformatora?
35. Co to jest procentowe napięcie zwarcia transformatora?
36. Co to jest impedancja zwarcia transformatora?
37. Przedstaw schemat zastępczy transformatora w stanie zwarcia. Uzasadnij pominięcie gałęzi poprzecznej.
38. Jak przeliczamy parametry schematu zastępczego transformatora ze strony DN na GN i odwrotnie?
39. Omów wykres wskazowy obciążonego transformatora trójfazowego dla parametrów zadanych przez prowadzącego.

Literatura

1. G. Kamiński, W. Przyborowski, A. Biernat, J. Szczypior, *Badania laboratoryjne maszyn elektrycznych*, Wydawnictwo: OWPW, 2018.
2. W. Przyborowski, G. Kamiński *Maszyny elektryczne*, Wydawnictwo OWPW, 2014
3. W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, 2007
4. H. Rawa, *Elektryczność i magnetyzm w technice*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001