

Wprowadzenie

Transformatory to urządzenia elektryczne, za pomocą których wejściowe napięcie przemiennie jednofazowe lub trójfazowe przekształcane jest na napięcie wyższe lub niższe. Oprócz przekształcania napięcia, czyli funkcji odgrywającej kluczową rolę w przesyłaniu energii o wysokim napięciu, transformatory mogą także działać jako przemienniki w zastosowaniach obejmujących różne przyrządy lub jako elementy wzmacniające w przesyłaniu sygnałów niskoprądowych. Transformatory działają w oparciu o zasadę indukcji elektromagnetycznej. W ramach tego kursu omawiane są jedynie transformatory jednofazowe prądu przemiennego.

Konstrukcja transformatora

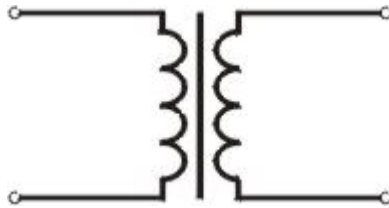
Na poniższym schemacie przedstawiono podstawową konstrukcję transformatora zasilanego jednofazowym prądem przemiennym.

W transformatorze zwykle znajduje się zamknięty ferromagnetyczny rdzeń wykonany z metalowych blach oddzielonych warstwami izolatora w celu tłumienia prądów wirowych. Blachy zaprojektowane są specjalnie pod kątem zminimalizowania strat w żelazie podczas magnesowania. Wokół rdzenia nawinięte są dwie cewki, których uzwojenia zwykle mają różną liczbę zwojów N_1 i N_2 . Cewka zasilana energią elektryczną przez źródło napięcia przemiennego stanowi *uzwojenie pierwotne* (lewa strona schematu powyżej), natomiast prąd I_1 płynący przez to uzwojenie jest nazywany *prądem pierwotnym*. Cewka oddająca energię elektryczną, czyli służąca jako źródło dla innych obciążeń, stanowi *uzwojenie wtórne* (prawa strona schematu powyżej), a prąd przez nią płynący nazywany jest *prądem wtórnym* I_2 . Podobnie, napięcie U_1 to *napięcie pierwotne*, a napięcie U_2 to *napięcie wtórne*. Końcówki uzwojenia pierwotnego mają oznaczenia $1U$ i $1V$, natomiast uzwojenia wtórnego $2U$ i $2V$.

Zasada działania transformatora

Ze względu na ciągle zmieniające się natężenie i kierunek, prąd przemienny podawany na uzwojenie pierwotne powoduje wytworzenie oscylującego pola magnetycznego w żelaznym rdzeniu. Tak jak prąd, pole to także zmienia ciągle swoje natężenie i kierunek. Poza pewną ilość linii pola rozproszonych w otaczającym powietrzu (pole rozproszenia), większość pozostałych linii pola magnetycznego wytworzonych przez uzwojenie pierwotne jest ograniczona w zamkniętym rdzeniu żelaznym i w całości przechodzi przez uzwojenie wtórne. Te dwa uzwojenia są zatem ściśle sprzężone przez wspólne pole magnetyczne (strumieniem magnetycznym Φ). Zgodnie z prawem indukcji, w uzwojeniu wtórnym wytwarzane jest napięcie indukowane, którego częstotliwość jest równa częstotliwości napięcia pierwotnego. Podłączenie do obwodu wtórnego obciążenia (np. rezystancji jak na schemacie powyżej) powoduje przepływ prądu w tym obwodzie.

Na schematach połączeń transformator jednofazowy jest przedstawiany za pomocą symbolu pokazanego poniżej. Symbol ten wskazuje na podstawowe elementy transformatora, czyli jego dwie odizolowane cewki.



Charakterystyka robocza bez obciążenia

Bez obciążenia, czyli przy otwartym obwodzie wtórnym, transformator działa tak, jakby uzwojenia wtórnego nie było, tj. jako cewka indukcyjna. Ze względu na dużą indukcyjność i odpowiednio dużą reaktancję indukcyjną, prąd płynący w sytuacji, gdy nie ma obciążenia jest bardzo mały i powoduje powstanie małego przemiennego pola magnetycznego, nazywany jest więc *prądem magnesowania*. Między pierwotnym napięciem zasilania i prądem magnesowania występuje przesunięcie fazowe o wartości bliskiej 90° .

Napięcie jałowe i prąd jałowy

Prąd w uzwojeniu pierwotnym powoduje wytworzenie przemiennego pola magnetycznego, które wzbudza tak zwane *napięcie jałowe* w uzwojeniu wtórnym, gdy do transformatora nie jest podłączone żadne obciążenie. Wartość szczytowa napięcia jałowego \hat{U}_0 zależy od wartości szczytowej \hat{B} indukcji magnetycznej, przekroju poprzecznego A rdzenia żelaznego, pulsacji ω prądu wejściowego oraz liczby zwojów N w uzwojeniu wtórnym. W tym przypadku stosowane jest następujące równanie:

$$\hat{U}_0 = \hat{B} \cdot A \cdot \omega \cdot N$$

Zastępując pulsację ω wyrażeniem $2\pi f$, a wartość szczytową napięcia wartością skuteczną napięcia jałowego U_0 (amplituda całkowita napięcia podzielona przez $\sqrt{2}$ dla przebiegu sinusoidalnego), dostajemy główne *równanie transformatora* stosowane do obliczenia wartości skutecznej napięcia na zaciskach transformatora:

$$U_0 = 4.44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

Przekładnia transformatora

Oczywiste jest, że główne równanie transformatora stosowane jest nie tylko w odniesieniu do strony wtórnej, lecz także do strony pierwotnej. Ponieważ indukcja magnetyczna, przekrój poprzeczny rdzenia żelaznego oraz częstotliwość są takie same po obu stronach, w przypadku pominięcia oporu czynnego dwóch cewek uzyskiwana jest następująca zależność:

$$U_1 = 4.44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N_1$$

$$U_2 = 4.44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N_2$$

$$\Rightarrow \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

Zmienne z indeksami 1 i 2 określają odpowiednio pierwotną i wtórną stronę transformatora. Innymi słowy:

Stosunek pomiędzy napięciami pierwotnym i wtórnym transformatora bez obciążenia jest równa stosunkowi liczby zwojów zwojów uzwojenia każdej z cewek.

Większa liczba zwojów w cewce wiąże się z wyższym napięciem. Mniejsza liczba zwojów w cewce wiąże się z napięciem niższym. Stosunek między liczbą zwojów po stronie pierwotnej transformatora i liczbą zwojów po stronie wtórnej nazywana jest *przekładnią transformatora*.

Jeśli przyjmiemy, że w transformatorze nie występują straty, moc $S_1 = U_1 I_1$ podawana na stronę pierwotną musi być równa mocy $S_2 = U_2 I_2$ pobieranej po stronie wtórnej. Innymi słowy, prądy zachowują się w sposób będący odwrotnością sposobu działania napięć. W odniesieniu do liczby zwojów stosowana jest następująca zależność:

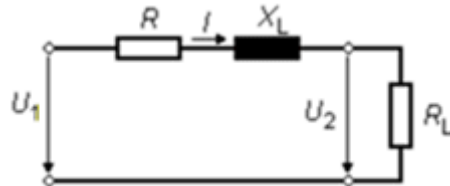
$$\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}}$$

W poniższej animacji interaktywnej przedstawiono zależność między napięciem, prądem i liczbą zwojów. Za pomocą funkcji przełączania zadawaj różne wartości napięcia pierwotnego, prądu wtórnego oraz liczby zwojów i obserwuj zmiany odpowiednich zmiennych po drugiej stronie.

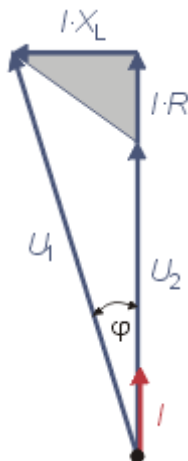
Charakterystyka pod obciążeniem

Gdy transformator jest obciążony, prąd płynie przez jego uzwojenie wtórne. Prąd ten zmniejsza pole magnetyczne, wytwarzając odwrotne pole magnetyczne zgodnie z *regułą Lenza*. W rezultacie uzwojenia nie znajdują się pod wpływem pełnego pola magnetycznego co prowadzi do spadku napięcia i dlatego napięcie wtórne jest niższe niż sugeruje to przekładnia transformatora.

Prąd płynący przez uzwojenie wtórne powoduje także wzbudzenie prądu wejściowego. Obydwa prądy powodują spadki napięcia na cewkach ze względu na swoją rezystancję. Obciążony transformator działa zatem jak generator z wewnętrzną rezystancją obejmującą składową czynną i indukcyjną. Poniżej przedstawiono uproszczony schemat obwodu zastępczego transformatora z oporem czynnym R_L . I to prąd obciążeniowy.

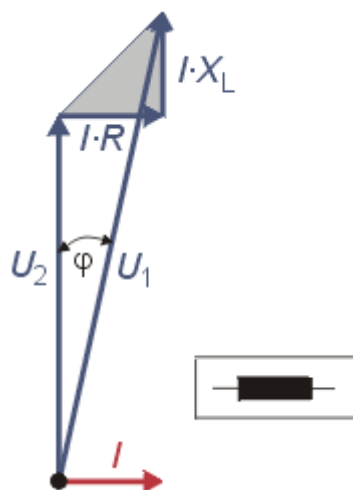


Napięcie wyjściowe U_2 jest niższe od napięcia wejściowego U_1 o wartość równą wewnętrznemu spadkowi napięcia w transformatorze. Przesunięcie fazowe φ między dwoma napięciami zależy od typu obciążenia. Na poniższym wykresie przedstawiono zależności dotyczące obciążenia rezystancyjnego. W tym przypadku napięcie wyjściowe i prąd obciążeniowy są w fazie.

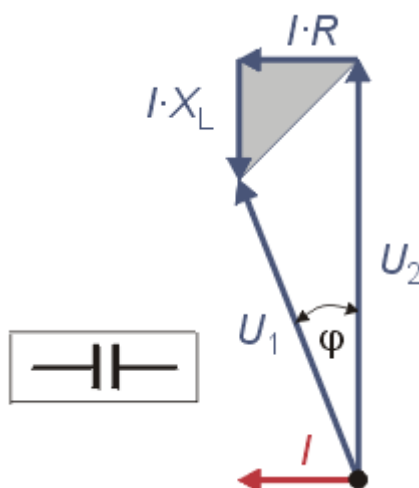


Na wewnętrzny spadek napięcia w transformatorze składają się dwa spadki cząstkowe $I \times R$ oraz $I \times X_L$, przedstawione jako szary trójkąt (lub *trójkąt Kappa*) na wykresie wektorowym.

Na poniższym wykresie wektorowym przedstawiono zależności dotyczące obciążenia czysto indukcyjnego. W tym przypadku prąd obciążeniowy jest opóźniony w stosunku do napięcia o 90° , tak samo jak spadek napięcia na oporze czynnym $I \times R$. Ponieważ napięcie na obciążeniu jest w fazie ze spadkiem napięcia na oporze indukcyjnym $I \times X_L$, wewnętrzny spadek napięcia powodowany przez obciążenie tego typu jest dość duży.



Na kolejnym wykresie wektorowym przedstawiono zależności dotyczące obciążenia pojemnościowego. W tym przypadku prąd obciążeniowy wyprzedza napięcie wyjściowe o 90° . Napięcie wyjściowe jest wyższe od napięcia wejściowego ze względu na szeregowy obwód oscylacyjny tworzony przez wewnętrzną indukcyjność i pojemność obciążenia. Dlatego nie można podłączać dużych kondensatorów bez tłumienia do sieci energetycznej.



Na kolejnym wykresie wektorowym przedstawiono zależności dotyczące obciążeń rezystancyjno-indukcyjnych. Przesunięcie fazowe między prądem obciążeniowym i napięciem wyjściowym zawiera się w zakresie między 0 i 90° , w zależności od rezystancji i indukcyjności obciążenia. Obciążenie tego typu powoduje największy spadek napięcia, ponieważ opór czynny i reaktancja obciążenia działa jak wewnętrzna rezystancja transformatora.

