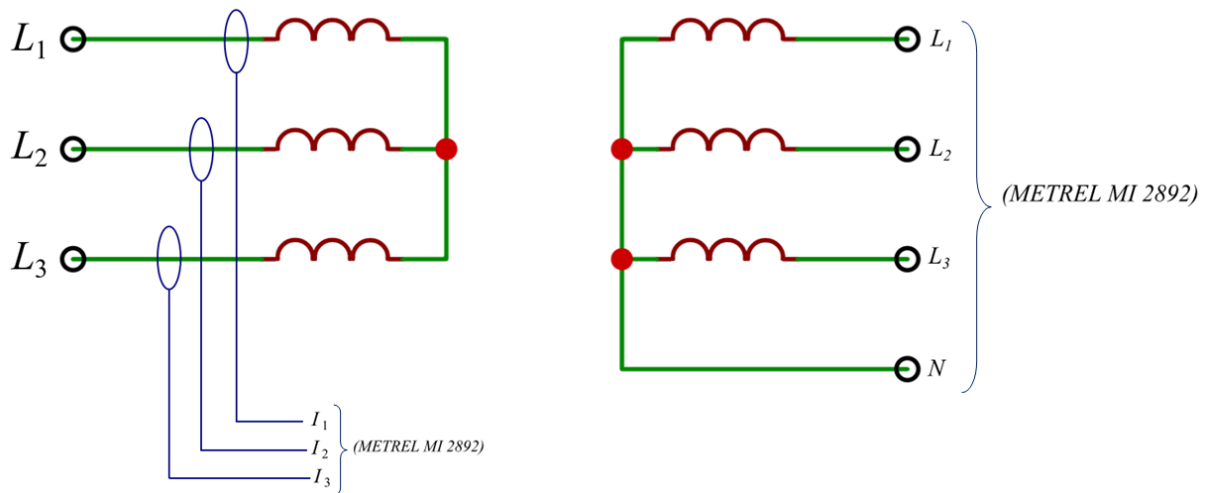
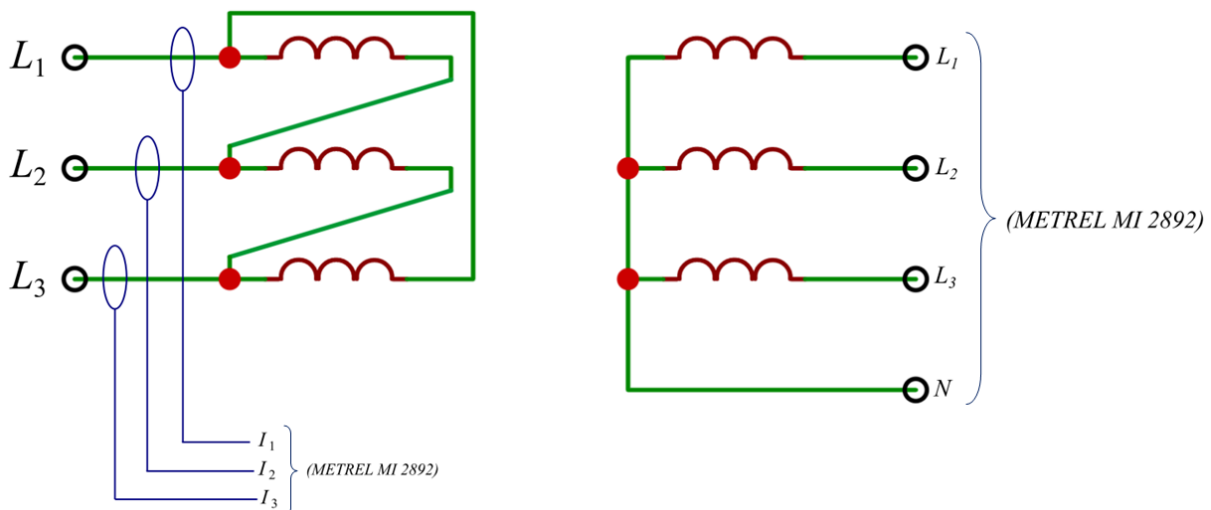


Temat: Badanie przebiegu prądu stanu jałowego i napięć transformatora trójfazowego dla różnych układów połączeń

- 1. Interpretacja wielkości występujących na tabliczce znamionowej**
- 2. Zestawienie stanowiska pomiarowego**
- 3. Zapoznanie z urządzeniem do pomiaru prądu, napięć i zawartości harmoniczných w prądach i napięciach oraz z obsługą programu do analizy tych parametrów**
- 4. Obserwacja przebiegu prądu przewodowego, prądu w przewodzie zerowym, napięć zasilających fazowego i przewodowego dla układu połączeń YNyn (pomiarы przy znamionowym napięciu zasilającym)**
- 5. Obserwacja przebiegu prądu przewodowego oraz napięć zasilających fazowego i przewodowego dla układu połączeń Yyn (pomiarы przy znamionowym napięciu zasilającym)**
- 6. Obserwacja przebiegu prądu przewodowego oraz fazowego, a także napięć wyjściowych fazowych i przewodowych dla układu połączeń Dyn (pomiarы przy znamionowym napięciu zasilającym)**
- 7. Analiza i interpretacja otrzymanych wyników pomiarów**



Rys. 2. Schemat połączeń transformatora w układzie Yyn



Rys. 3. Schemat połączeń transformatora w układzie Dyn

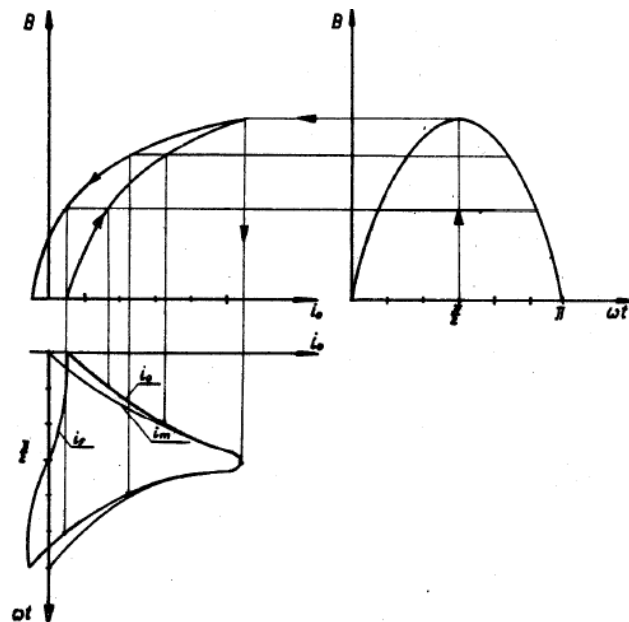
Stan jałowy transformatora

Stan jałowy transformatora to taki stan, w którym uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem przemiennym, a uzwojenie wtórne pozostaje nieobciążone (rozwarne).

Prąd magnesujący transformatora

Zamknięty obwód magnetyczny transformatora jest wzbudzany za pomocą uzwojenia zasilanego napięciem przemiennym. Jeśli napięcie zasilające jest sinusoidalnie zmienne, to przy założeniu $u_1(t) = e_1(t)$ strumień magnetyczny $\phi(t)$ musi również zmieniać się

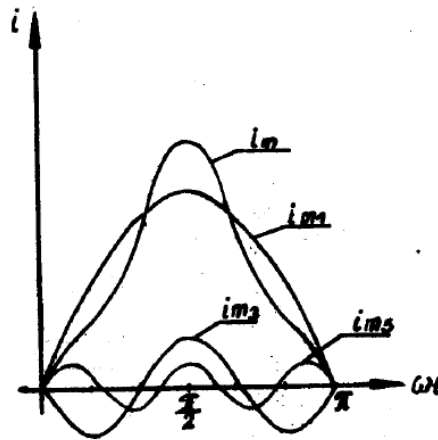
sinusoidalnie. Zatem indukcja magnetyczna w rdzeniu również zmienia się sinusoidalnie. W celu zapewnienia strumieniowi głównemu drogi o dużej przewodności magnetycznej rdzeń transformatora wykonany jest z materiału ferromagnetycznego (zależność indukcji $B = f(I_0)$ ma kształt rewersyjnej pętli histerezy). Z tego powodu przebieg prądu nie jest sinusoidalnie zmienny. Przy małych wartościach napięcia, odpowiadającym liniowej części charakterystyki magnesowania, krzywa prądu odkształca się nieznacznie. W miarę nasycania się rdzenia, przy wzroście napięcia, można zaobserwować większe odkształcenie przebiegu prądu od kształtu sinusoidy. Występowanie strat mocy w rdzeniu powoduje, że prąd i_0 jest przesunięty w czasie względem krzywej indukcji. Krzywą prądu i_0 można rozłożyć na dwie składowe: i_f składowa czynna prądu jałowego przesunięta o kąt $\frac{\pi}{2}$ względem krzywej indukcji oraz i_m – składowa bierna prądu magnesującego pozostająca w fazie z przebiegiem indukcji. Składowa i_f jest skutkiem zjawiska histerezy magnetycznej powodującej powstanie strat magnetycznych. Natomiast składowa i_m jest prądem magnesującym o charakterze czysto indukcyjnym i przedstawia prąd potrzebny do wytworzenia strumienia magnetycznego w rdzeniu. Wykreślny sposób wyznaczania prądu magnesującego na podstawie pętli histerezy przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wykreślny sposób wyznaczania prądu magnesującego na podstawie pętli histerezy

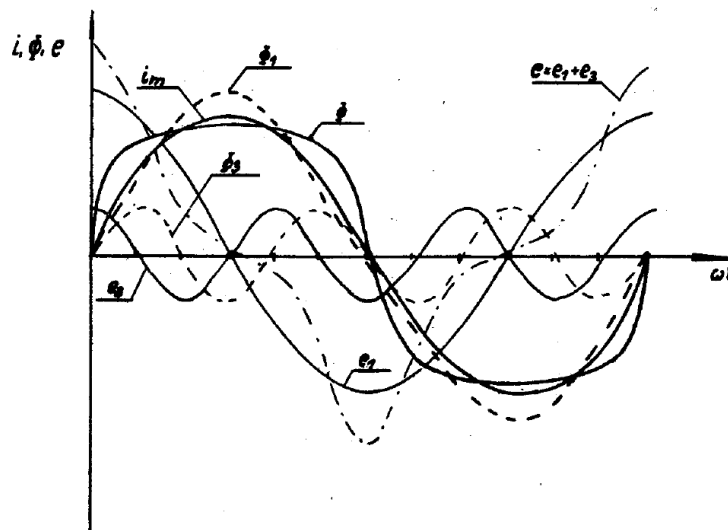
Przebieg czasowy prądu magnesującego (przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym) można rozłożyć zgodnie z twierdzeniem Fouriera na szereg harmonicznym. Oprócz harmonicznnej podstawowej występują wyższe harmoniczne nieparzyste, z których istotną rolę odgrywają

trzecia, piąta i siódma. Wartości ich amplitud zależą od stanu nasycenia obwodu magnetycznego. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład na wyższe harmoniczne przebiegu prądu magnesującego



Rys. 5. Rozkład na wyższe harmoniczne prądu magnesującego

Proces magnesowanie rdzenia, podczas którego do uzwojeń transformatora mogą dopłynąć prądy wszystkich wyższych harmonicznych nazywa się magnesowaniem swobodnym. Jeśli prąd magnesujący ma kształt sinusoidalny lub nie zawiera niektórych nieparzystych harmonicznych (przede wszystkim trzeciej), wówczas kształt strumienia i indukcji jest spłaszczony w porównaniu z przebiegiem sinusoidalnym (rys. 6). Magnesowanie tego typu nazywa się magnesowaniem wymuszonym.



Rys. 6. Przebiegi funkcji czasowych prądu, strumienia i SEM podczas magnesowania wymuszonego prądem sinusoidalnym

Krzywą strumienia można rozłożyć na harmoniczne, z których najważniejsza jest pierwsza i trzecia. Każdej harmonicznej strumienia odpowiadają harmoniczne indukowanej

siły elektromotorycznej, przede wszystkim pierwsza oraz trzecia. Funkcja czasowa wypadkowej siły elektromotorycznej odbiega wówczas od sinusoidy wykazując charakterystyczne wyostwienie.

Wpływ różnych układów połączeń na warunki magnesowania rdzenia trójfazowego

a) gwiazda – gwiazda z przewodem neutralnym (YNyn)

W układzie gwiazda – gwiazda z przewodem neutralnym występuje magnesowanie swobodne, zatem strumień magnetyczny oraz siły elektromotoryczne są sinusoidalne. W układzie występuje przewód neutralny, dlatego do transformatora mogą dopłynąć wszystkie harmoniczne. Suma prądów fazowych układów harmonicznycy kolejności zgodnej i przeciwnej w punkcie połączenia uzwojeń w gwiazdę daje zero. Zatem przewodem neutralnym płyną tylko prądy trzeciej harmonicznej i jej nieparzystych wielokrotności.

b) gwiazda – gwiazda bez przewodu neutralnego (Yy)

W układzie nie występuje przewód neutralny, zatem w prądzie magnesującym nie występują harmoniczna trzecia i jej nieparzyste wielokrotności (brak zamkniętego obwodu elektrycznego). W układzie Yy zachodzi magnesowanie wymuszone. Strumień magnetyczny jest odkształcony (krzywa strumienia jest spłaszczona), ponieważ oprócz sinusoidy podstawowej zawiera również trzecią harmoniczną. Napięcia indukowane fazowe są również niesinusoidalne, natomiast napięcia indukowane przewodowe odpowiadające napięciom przewodowym po stronie pierwotnej są sinusoidalne. Krzywą prądu magnesującego transformatora w układzie Yy bez przewodu neutralnego można wyznaczyć graficznie poprzez odjęcie trzeciej harmonicznej od krzywej prądu magnesującego transformatora o układzie Yy z przewodem neutralnym.

c) trójkąt – gwiazda (Dy)

Ze względu na brak przewodu neutralnego ze źródła zasilania nie mogą dopłynąć do transformatora trzecie harmoniczne prądu, co powoduje pojawienie się trzecich harmonicznycy w strumieniu. Trzecie harmoniczne strumieni indukują w uzwojeniach opóźnione o $\pi/2$ siły elektromotoryczne trzeciej harmonicznej, które są w poszczególnych uzwojeniach w fazie. Pod wpływem jednakowych sił elektromotorycznych trzeciej

harmonicznej, w uzwojeniu pierwotnym połączonym w trójkąt płyną prądy trzeciej harmonicznej. Uzwojenie połączone w trójkąt stanowi dla sił elektromotorycznych trzeciej harmonicznej obwód zamknięty i pozwala na przepływ prądu trzeciej harmonicznej. W układzie Dy następuje kompensacja strumieni trzeciej harmonicznej, co w rezultacie powoduje powstanie sinusoidalnego strumienia w rdzeniu transformatora.

W układzie trójkąt – gwiazda występuje magnesowanie swobodne, chociaż ze źródła napięcie nie mogą dopłynąć trzecie harmoniczne prądu. Trzecia harmoniczna prądu oraz jej nieparzyste wielokrotności indukują się w zamkniętym obwodzie trójkąta uzwojenia pierwotnego. W rezultacie prądy fazowe uzwojenia pierwotnego zawierają wszystkie harmoniczne.

3. Urządzenie do pomiaru prądów, napięć oraz zawartości wyższych harmonicznych

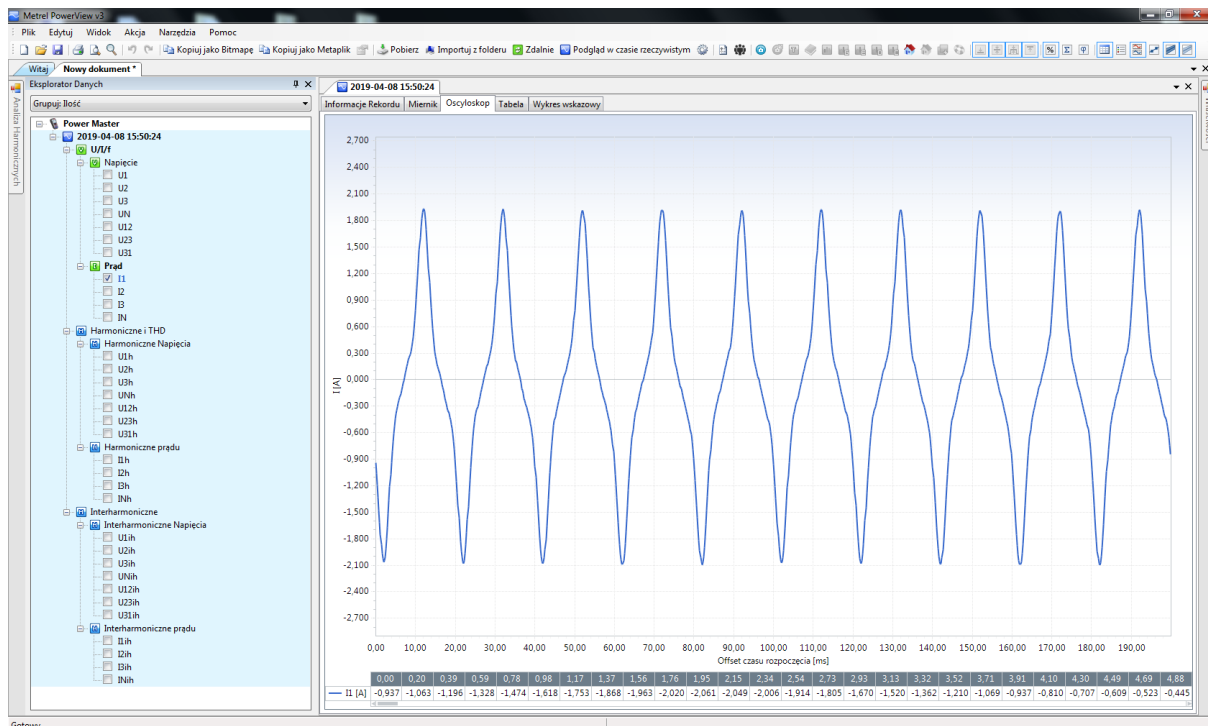
Wykorzystywane w ćwiczeniu urządzenie pomiarowe to METREL MI 2892 (rys. 7). Jest to przenośne urządzenie do analizy jakości zasilania w układach trójfazowych. Umożliwia m.in. rejestrację przebiegów napięcia, prądu, mocy, jak również obserwację zawartości wyższych harmonicznych w przebiegach napięć i prądów. Podłączając urządzenie należy pamiętać, aby sondy prądowe były umieszczone w jednym kierunku (do lub od źródła).



Rys. 7. Widok urządzenia METREL MI 2892

<http://www.wingold-mt.de/produkt/mi-2883-energy-master-h1105-j0122/>

Rejestrację przebiegów wykonuje się za pomocą oprogramowania dedykowanego do wykorzystywanego miernika METREL PowerView v3 (rys. 8).



Rys. 8. Widok ekranu oprogramowania METREL PowerView

4. Obserwacja prądów stanu jałowego, napięć po stronie wtórej transformatora oraz zawartości wyższych harmoniczných w tych przebiegach

Badania należy przeprowadzić dla różnych układów połączeń transformatora. Do obserwacji przebiegów prądów i napięć należy zastosować analizator METREL MI 2892. Zarejestrowane przebiegi należy zapisać na dysku przenośnym.

- W układzie YNyn należy zaobserwować i zapisać przebiegi prądów stanu jałowego, prądu w przewodzie neutralnym oraz napięć po stronie wtórnej transformatora. Wyznaczyć zawartości wyższych harmoniczných w tych przebiegach.
- W układzie Yy bez przewodu neutralnego zaobserwować i zapisać przebiegi prądów stanu jałowego, napięć fazowych i międzyfazowych po stronie wtórnej transformatora oraz zawartości wyższych harmoniczných w tych przebiegach.
- W układzie Dy dokonać obserwacji i rejestracji przebiegów prądów stanu jałowego, prądu fazowego w uzwojeniu trójkąta oraz napięć po stronie wtórnej transformatora. Wyznaczyć zawartości wyższych harmoniczných w tych przebiegach.

W sprawozdaniu należy wykreślić przebiegi wybranych prądów, napięć oraz wykresy słupkowe zawartości wyższych harmonicznycch w tych przebiegach. Następnie należy opisać wpływ połączeń na przebiegi prądu magnesującego w transformatorach trójfazowych. Pomiary należy wykonywać przy znamionowych wartościach napięć.

Przykładowe pytania kontrolne

1. Co to jest transformator?
2. Jakie informacje zawiera tabliczka znamionowa transformatora trójfazowego?
3. Jakie istnieją typy konstrukcji rdzeni transformatorów trójfazowych?
4. Jakie są powody stosowania różnych grup połączeń transformatorów?
5. Jakie są relacje pomiędzy wielkościami fazowymi i przewodowymi napięć i prądów w przypadku skojarzenia uzwojeń w trójkąt lub gwiazdę?
6. Jaka jest zależność między przekładnią napięciową a zwojową transformatora przy różnych grupach połączeń?
7. Czym charakteryzuje się jałowy stan pracy transformatora?
8. Jak wygląda przebieg czasowy prądu magnesującego transformatora jednofazowego przy dużym nasyceniu rdzenia?
9. Co to są wyższe harmoniczne prądu? Jakie wyższe harmoniczne prądu mogą wystąpić w prądzie magnesującym?
10. Na czym polega magnesowanie swobodne rdzenia w transformatorze?
11. Jakie składowe występują w prądzie stanu jałowego podczas magnesowania swobodnego i jakie są powody ich występowania?
12. Na czym polega magnesowanie wymuszone rdzenia w transformatorze?
13. W jakich warunkach powstaje 3-cia harmoniczna strumienia magnetycznego oraz przy jakich konstrukcjach rdzenia może się ona zamknąć w rdzeniu?
14. Jaki może być powód występowania trzeciej harmonicznej prądu w obwodzie nie zasilanego uzwojenia połączonego w trójkąt?
15. Na czym polega proces swobodnego magnesowania rdzenia transformatora w odróżnieniu od magnesowania wymuszonego lub częściowo wymuszonego?
16. Z czego wynika konieczność występowania odkształceń od przebiegu sinusoidalnego w prądzie magnesującym transformatora podczas magnesowania swobodnego?
17. Jakie wyższe harmoniczne prądu magnesującego nie mogą płynąć w uzwojeniu połączonym w gwiazdę bez przewodu neutralnego i jakie to wywołuje skutki w wytwarzanym polu magnetycznym?
18. Jakie są oczekiwania eksploatacyjne w zakresie zjawisk związanych z magnesowaniem transformatorów trójfazowych?
19. Jakie składowe strumienia magnetycznego oraz prądu można wyróżnić w przebiegach czasowych tych wielkości podczas załączenia transformatora do sieci w stanie jałowym?

Literatura

1. T. Glinka, *Maszyny elektryczne i transformatory*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2018.
2. G. Kamiński, W. Przyborowski, A. Biernat, J. Szczypior, *Badania laboratoryjne maszyn elektrycznych*, Wydawnictwo: OWPW, 2018.
3. W. Przyborowski, G. Kamiński *Maszyny elektryczne*, Wydawnictwo OWPW, 2014
4. W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, 2007