

## Ćwiczenie 5

### SKOMPENSOWANY PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI AC/DC/AC

#### 1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA

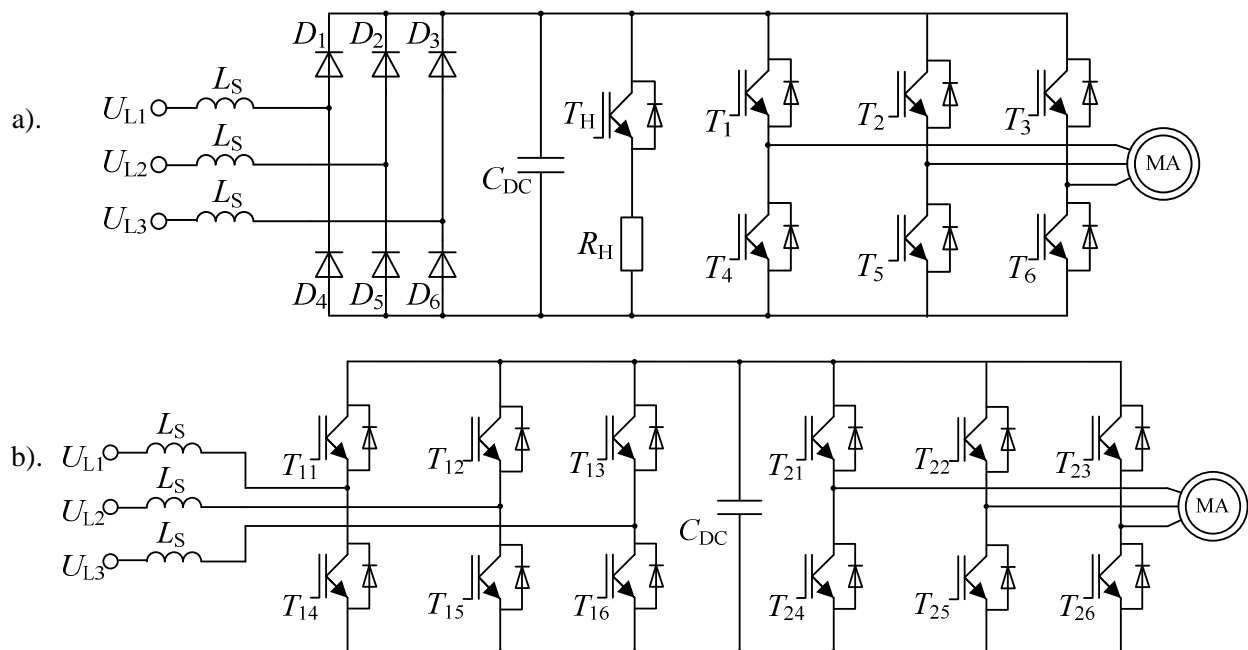
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową, właściwościami oraz metodami sterowania skompensowanego przemiennika częstotliwości AC/DC/AC. Przekształtnik taki pozwala na pracę układu napędowego z silnikiem indukcyjnym we wszystkich ćwiartkach układu współrzędnych przy zachowaniu jednostkowego współczynnika mocy. Zakres ćwiczenia obejmuje wyznaczenie charakterystyk statycznych przemiennika oraz obserwacje przebiegów czasowych w przemienniku dla jego różnych stanów pracy. Szczególna uwaga w ćwiczeniu poświęcona jest wejściowemu tranzystorowemu prostownikowi z modulacją szerokości impulsów.

#### 2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

W klasycznych układach napędowych z silnikami prądu przemiennego stosuje się najczęściej falowniki, które zasilają się z sieci poprzez niesterowalny prostownik diodowy (rys. 5.1.a). Przemienniki takie, ze względu na brak możliwości zwrotu energii do sieci zasilającej, wyposaża się w dodatkowe układy służące do rozpraszania energii przy hamowaniu odzyskowym napędu (szeregowe połączenie rezystora  $R_H$  i tranzystora  $T_H$ ). Oprócz prostej budowy, przemienniki częstotliwości wyposażone w prostownik wejściowy z obwodem napięcia stałego charakteryzują się dużymi odkształceniami prądu wejściowego (wysoka wartość współczynnika odkształceń prądu  $THD_I$ ). Widoczne na rys. 5.1.a dławiki  $L_S$  służą do ograniczania stromości zmian prądu wejściowego oraz do ograniczania amplitud prądów zwarciovych.

W ostatnich latach zagadnienia związane z poprawą jakości energii elektrycznej stają się coraz ważniejsze. Przedstawiony na rys. 5.1.b skompensowany przemiennik częstotliwości pozwala na zmniejszenie negatywnego wpływu układu napędowego na sieć zasilającą. Jest to możliwe poprzez zastosowanie wejściowego prostownika

tranzystorowego sterowanego w ten sposób, aby zapewnić quasisinusoidalny kształt prądu wejściowego i współczynnik mocy jak najbliższy wartości jeden. Dodatkowo skompensowany przemiennik częstotliwości pozwala na dwukierunkowe przekazywanie energii pomiędzy siecią zasilającą a silnikiem prądu przemiennego. Dławiki  $L_S$  mają w tym wypadku większe wartości niż dla prostownika diodowego, ze względu na wymagania dotyczące maksymalnej amplitudy tętnień prądu wejściowego przemiennika częstotliwości.



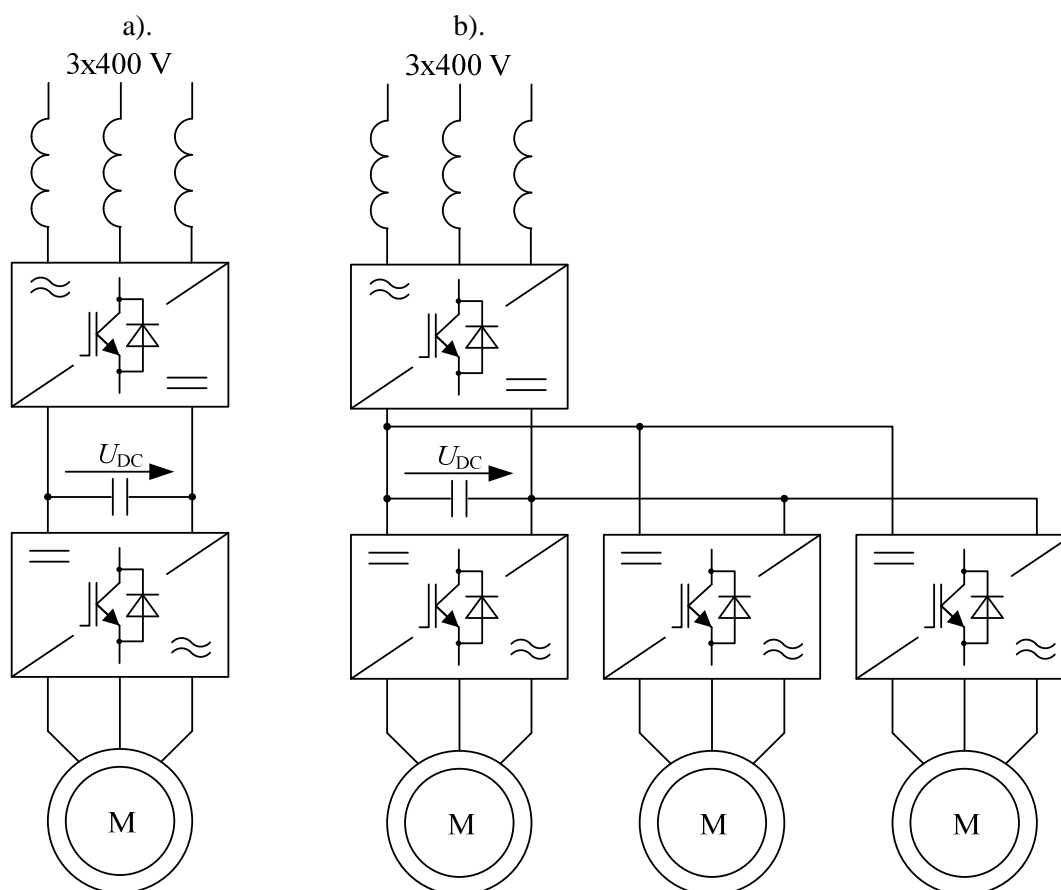
Rys. 5.1 Obwody główne przemienników częstotliwości: a) przemiennik częstotliwości z prostownikiem diodowym, b) skompensowany przemiennik częstotliwości

## 2.1. Zastosowania skompensowanych przemienników częstotliwości

Głównym zastosowaniem skompensowanych przemienników częstotliwości są układy pozwalające na zwrot energii do sieci zasilającej przez długi czas. Są one stosowane jako układy sprzęgające generatory wiatrowe z siecią zasilającą, hamownie do badań napędów i silników elektrycznych, napędy charakteryzujące się dłuższą pracą z hamowaniem odzyskowym, np. wywrotnice wagonowe, dźwigi itp.

Skompensowane przemienniki częstotliwości stosuje się również w innych układach napędowych (szczególnie w układach większej mocy) ze względu na ich zmniejszony negatywny wpływ na sieć zasilającą. W tym przypadku możliwe jest zastosowanie układu z jednym prostownikiem tranzystorowym i jednym

falownikiem napięcia (rys. 5.2.a) lub jednego prostownika tranzystorowego dla grupy falowników (rys. 5.2.b). Drugie rozwiązanie jest bardziej ekonomiczne, ze względu na fakt, że prostownik taki nie musi być projektowany na sumę mocy znamionowych wszystkich napędów (występujących tylko przy znamionowej prędkości i momencie).



Rys. 5.2 Skompensowany przemiennik częstotliwości: a). rozwiązanie: jeden prostownik i falownik, b). rozwiązanie: jeden prostownik i kilka falowników

W niektórych rozwiązaniach możliwe jest wykorzystanie tranzystorów mniejszej mocy oraz dławika wejściowego o mniejszej reaktancji, przy założeniu, że prostownik tranzystorowy będzie pracował jedynie jako element zwracający energię do sieci zasilającej (zastępował układ hamowania). W tym przypadku, przy pracy napędowej działają diody w przekształtniku wejściowym, natomiast tranzystory załączane są jedynie w chwili wzrostu napięcia powyżej określonego poziomu. Przy takich rozwiązaniach mniejsza reaktancja dławika wynika z potrzeby ograniczenia zmniejszania się napięcia obwodu pośredniczącego przy wzroście obciążenia w układzie napędowym oraz z faktu krótkotrwałej pracy przekształtnika tranzystorowego (przy dopuszczeniu wyższych tętnień prądu).

## 2.2. Zasada działania skompensowanego przemiennika częstotliwości

Zasada działania przemiennika częstotliwości obejmuje zarówno działanie przekształtnika współpracującego z siecią zasilającą, jak również przekształtnika zasilającego silnik. Ze względu na fakt, że opis działania przekształtnika silnikowego można znaleźć w instrukcjach do innych ćwiczeń, tu ograniczono się do opisu działania prostownika tranzystorowego.

Schemat zastępczy prostownika tranzystorowego, tłumaczący zasadę działania, pokazano na rys. 5.3.a. Parametry  $L_S$  i  $R_S$  są odpowiednio indukcyjnością i rezystancją dławika wejściowego. W celu kontroli prądu sieciowego prostownik taki powinien generować napięcie odpowiadające sieciowemu oraz dodatkowe napięcie odpowiadające za kształtowanie prądu sieci. Na rys. 5.3.b i 5.3.c pokazano wykresy wektorowe napięć i prądów dla pracy przekształtnika z poborem oraz ze zwrotem energii do sieci zasilającej (występujących odpowiednio przy pracy napędowej oraz prądnicowej silnika). Pomijając wpływ rezystancji stojana, napięcie prostownika tranzystorowego powinno być przesunięte względem napięcia sieci o kąt zależny od mocy pobieranej lub generowanej w przekształtniku. Ze względu na potrzebę uzyskiwania napięć wyższych od napięcia sieci, przekształtnik tranzystorowy należy do układów podwyższających napięcie (typu „boost”) i praca przekształtnika jest możliwa jedynie, gdy spełniony jest warunek:

$$U_{DC} > \sqrt{2}U_{LL}, \quad (5.1)$$

gdzie:

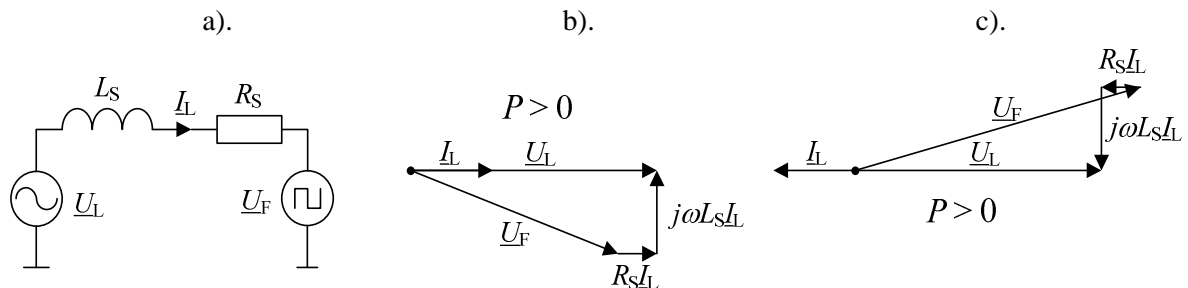
$U_{DC}$  – napięcie obwodu pośredniczącego,

$U_{LL}$  – wartość skuteczna napięcia międzyfazowego sieci.

Pracę przekształtnika, jako układu podnoszącego napięcie, można wytłumaczyć w oparciu o schemat układu pokazany na rys. 5.1.b. Wygenerowanie w układzie sterowania (modulatorze) wektora zerowego powoduje zwieranie sieci zasilającej poprzez dławiki  $L_S$  i gromadzenie energii w dławikach, która po wyłączeniu odpowiednich tranzystorów jest przekazywana do obwodu pośredniczącego napięcia stałego. Z powyższej analizy wynika, że wektory zerowe w prostowniku tranzystorowym powinny być stosunkowo krótkie (ze względu na zwiększanie się prądu sieci) oraz wartości indukcyjności dławików powinny być odpowiednio wysokie w celu ograniczenia zmian prądu wejściowego przekształtnika.

Amplituda prądu sieciowego w skompensowanym przemienniku częstotliwości zależy od mocy mechanicznej na wale silnika indukcyjnego. Osiąga ona maksymalne

wartości dla maksymalnej prędkości i momentu silnika. Należy zaznaczyć, że przy stałej wartości bezwzględnej momentu silnika dla zwrotu energii amplituda prądu sieci jest mniejsza niż dla jej poboru, co wynika ze strat mocy w silniku i przemienniku.



Rys. 5.3 Idea działania prostownika tranzystorowego: a). model zastępczy, b). wykres wektorowy przy dodatniej mocy czynnej c). wykres wektorowy przy ujemnej mocy czynnej

### 2.3. Układy sterowania skompensowanego przemiennika częstotliwości

Układy sterowania skompensowanego przemiennika częstotliwości można analizować oddzielnie dla każdego przekształtnika energoelektronicznego.

Układ sterowania przekształtnika zasilającego silnik może bazować na dowolnym sterowaniu stosowanym w napędach z silnikami klatkowymi i nie będzie tu omawiany.

Analizując schemat obwodów głównych skompensowanego przemiennika częstotliwości (rys. 1b) można zauważyć analogię obwodu sieci zasilająca - dławiki wejściowe do schematu zastępczego silnika indukcyjnego. Napięcie sieci odpowiada w nim sile elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana, natomiast dławiki odpowiadają reaktancjom rozproszenia silnika. Z tego względu metody sterowania prostownikiem odpowiadają metodom sterowania napędów z przemiennikiem częstotliwości i silnikiem klatkowym. Wśród nich można wyróżnić:

- metody polowo – zorientowane: VOC (voltage oriented control), VFOC (virtual flux oriented control), mające swe podłoże w sterowaniu polowo-zorientowanym silników klatkowych
- metody bezpośredniego sterowania mocy: DPC (direct power control), VF-DPC (virtual flux direct power control, DPC-SVM (direct power control + space vector modulation), opierające się na metodzie DTC.

Innym podziałem układów sterowania przedstawia się następująco:

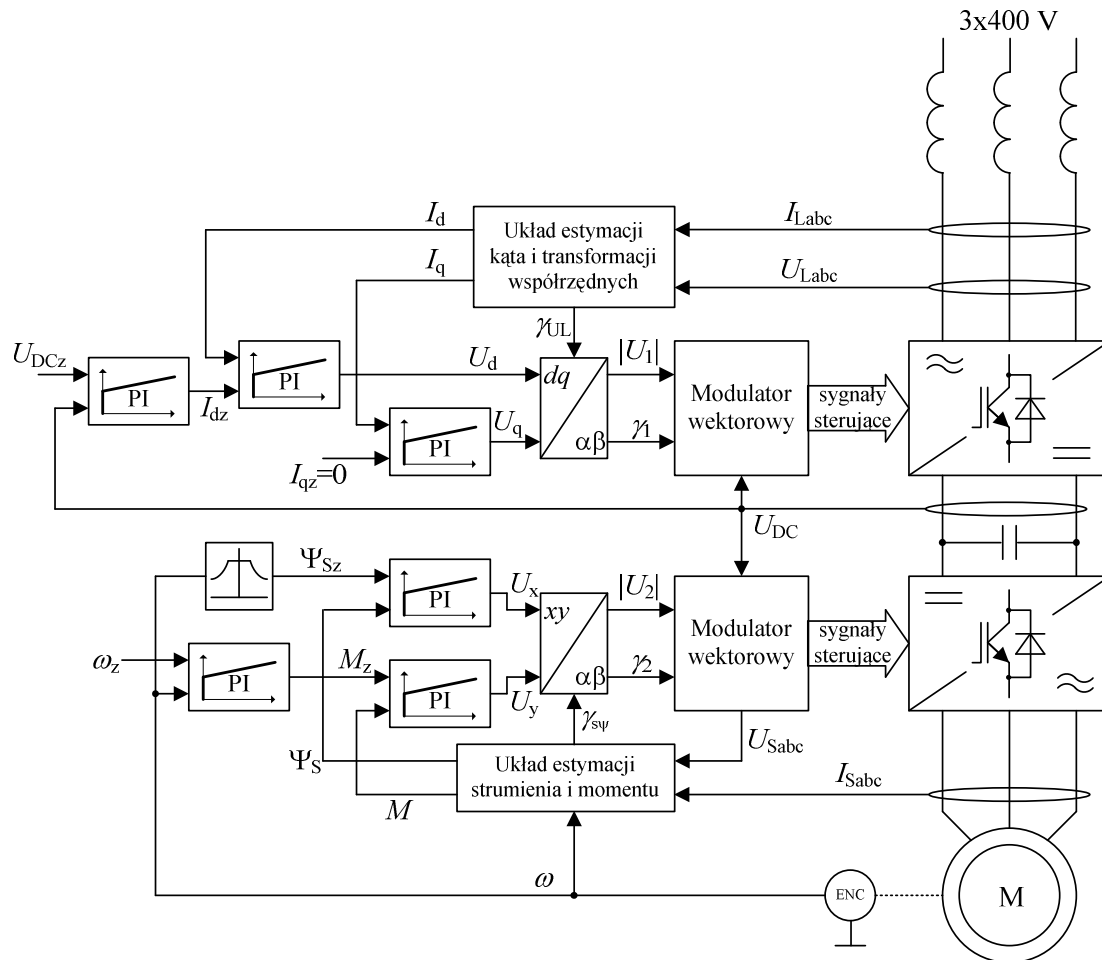
- sterowanie oparte o napięcie sieci (VOC, DPC),
- sterowanie oparte o wirtualny strumień sieci (VFOC, VF-DPC).

W metodach polowo-zorientowanych wektor zadany napięcia dla modulatora wektorowego określa się w oparciu o sygnały wyjściowe z regulatorów PI prądów porównujących wartości zadane z wartościami rzeczywistymi. Proces regulacji odbywa się w układzie wirującym zorientowanym względem wybranej wielkości elektrycznej. Układy te wymagają transformacji współrzędnych w celu zapewnienia ich poprawnej pracy oraz zastosowania modulatora wektorowego. W przypadku orientacji sterowania względem wektora przestrzennego napięcia sieci składowa  $d$  prądu jest związana z mocą czynną, natomiast składowa  $q$  z mocą bierną. W układach z orientacją względem wirtualnego strumienia sieci role składowych prądu zamieniają się. Wprowadzenie wirtualnego strumienia sieci jako wielkości, względem której zorientowane jest sterowanie, pozwala ograniczyć wpływ wyższych harmonicznych w napięciu sieci na pracę prostownika tranzystorowego. Dodatkowo zastosowanie wirtualnych strumieni sieci pozwala na sterowanie bezczujnikowe prostownikiem, co w tym przypadku oznacza brak czujników mierzących napięcia sieci.

W układach z bezpośrednim sterowaniem mocy (DPC), podobnie jak w klasycznym DTC, w miejsce układów współrzędnych stosuje się komparatory histerezy, w których porównuje się wybrane wielkości (moc chwilową – czynną oraz moc urojona - bierną). Układy te cechują się prostą strukturą i brakiem wewnętrznych obwodów regulacji prądów oraz brakiem modulatora wektorowego. Dodatkowo poprzez sterowanie histerezy są mniej czułe na odkształcenia napięcia sieci. Wymagają jednak dużych nakładów obliczeniowych (szybkie procesory) i charakteryzują się zmienną częstotliwością przełączeń tranzystorów, co utrudnia projektowanie filtrów do eliminacji tych częstotliwości.

Przykładowy układ sterowania skompensowanym przemiennikiem częstotliwości, bazujący na metodach VOC (prostownik tranzystorowy) i DTC-SVM (wyjściowy falownik napięcia), przedstawiono na rys. 5.4. Widoczne na nim są wszystkie wymagane sprzężenia oraz pętle regulacji obu przekształtników. Możliwość wykorzystania dwóch układów modulatora wektorowego pozwala na zmniejszenie wymagań co do szybkości wykonywania obliczeń w sterowniku. Podobieństwo obu metod sterowania umożliwia wykorzystanie identycznych procedur w algorytmie obliczeniowym każdego z przekształtników.

W celu zwiększenia szybkości reakcji prostownika tranzystorowego na zmianę momentu obciążenia możliwe jest zastosowanie dodatkowego sygnału od momentu silnika dodawanego do sygnału zadanego prądu  $I_{dz}$  (tak zwane sprzężenie wyprzedzające). Takie podejście umożliwia zmniejszenie wartości pojemności obwodu pośredniczącego i poprzez to zmniejszenie kosztów przekształtnika.



Rys. 5.4 Przykładowy układ sterowania skompensowanego przemiennika częstotliwości

### 3. STANOWISKO LABORATORYJNE

Stanowisko pomiarowe składa się z silnika indukcyjnego klatkowego, zasilanego ze skompensowanego przemiennika częstotliwości oraz sprzężonego z nim silnika obcowzbudnego prądu stałego. W charakterze sterownika zastosowano kartę sterowniczo-pomiarową DS1104 firmy dSPACE, której cechą charakterystyczną jest możliwość programowania jej w środowisku Matlab-Simulink. Obsługa sterownika odbywa się za pomocą panelu operatorskiego, zrealizowanego w programie Control Desk. Panel ten umożliwi kontrolę pracy układu, pozwala na zmianę parametrów układu sterowania oraz daje możliwość podglądu w czasie rzeczywistym zmiennych mierzonych oraz obliczanych w sterowniku. Skompensowany przemiennik częstotliwości realizuje bezpośrednie sterowanie momentu z modulatorem wektorowym (sterowanie silnikiem) oraz sterowanie polowo – zorientowane z orientacją względem napięcia sieci (prostownik tranzystorowy).

## 4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

### 4.1. Wyznaczanie charakterystyk statycznych

W ramach ćwiczenia wyznacza się charakterystyki wybranych wielkości elektrycznych w funkcji momentu obciążenia lub prędkości obrotowej. Pierwszą część pomiarów przeprowadza się dla zadanych wartości prędkości i oraz zmieniającego się momentu obciążenia na wale. Charakterystyki wyznacza się dla klasycznego oraz skompensowanego przemiennika częstotliwości. Na podstawie pomiarów należy wyznaczyć następujące charakterystyki (jako obciążenie przyjmuje się estymowaną w układzie wartość momentu lub wartość prądu twornika maszyny prądu stałego):

- $I_S = f(M), I_L = f(M), I_{L1h} = f(M), P_S = f(M), P_L = f(M), I_{dL} = f(M), I_{qL} = f(M)$
- $S_L = f(M), \lambda = \frac{P_L}{S_L} = f(M), \eta = \frac{P_S}{P_L} = f(M), THD_I = \frac{\sqrt{I_L^2 - I_{L1h}^2}}{I_L} = f(M)$

Druga część pomiarów dotyczy skompensowanego przemiennika częstotliwości. Przeprowadza się w niej pomiary przy zadanej wartości momentu obciążenia na wale i zmieniającej się prędkości. Na podstawie pomiarów w sprawozdaniu należy wyznaczyć następujące charakterystyki:

- $I_S = f(n), U_S = f(n), I_L = f(n), I_{L1h} = f(n), P_S = f(M), P_L = f(M)$
- $S_L = f(M), \lambda = \frac{P_L}{S_L} = f(M), \eta = \frac{P_S}{P_L} = f(M), THD_I = \frac{\sqrt{I_L^2 - I_{L1h}^2}}{I_L} = f(M)$

### 4.2. Rejestracja przebiegów wybranych wielkości w przemienniku częstotliwości

Rejestrację przebiegów należy przeprowadzić dla rozwiązania klasycznego oraz skompensowanego przemiennika częstotliwości. Dla wybranych prędkości i wartości obciążeń należy zarejestrować napięcie i prąd sieci oraz prąd silnika. Dodatkowo należy zarejestrować rozkład harmonicznym prądu sieci. Rejestrację stanów przejściowych obejmuje: reakcję układu na zmianę momentu obciążenia, zmianę prędkości zadanej oraz nawrót silnika przy aktywnym momencie na wale silnika.