

Laboratorium Automatyki Napędu Elektrycznego

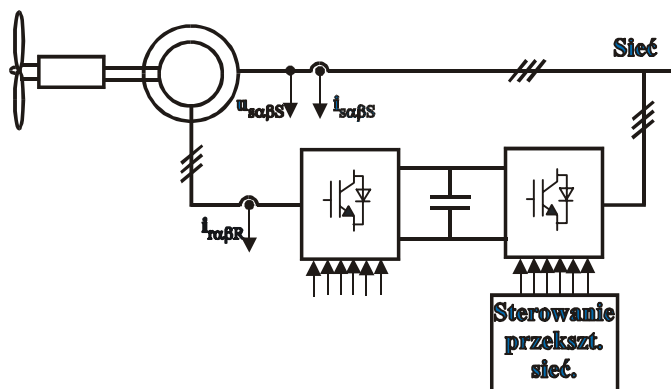
Badanie układu sterowania maszyną dwustronnie zasilaną za pomocą
przebiegu częstotliwości CTM 5,5

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości statycznych i dynamicznych maszyny dwustronnie zasilanej (MDZ) przy pracy generatorowej. Badaniu podlegają właściwości maszyny z beczujnikowym układem sterowania mocą czynną i bierną oddawaną do systemu elektroenergetycznego przy różnych prędkościach kątowych maszyny i przy różnych rodzajach źródła energii mechanicznej. W badanym układzie prądnica może być napędzana albo przez silnik wiatrowy albo przez silnik asynchroniczny o sztywnej charakterystyce mechanicznej a także przez emulator silnika wiatrowego. Czynności wykonywane w trakcie ćwiczenia pozwalają również na zapoznanie się z obsługą eksperymentalnego stanowiska laboratoryjnego oraz ze strukturą programu sterującego napisanego w języku C.

2. Wstęp

Dążenie do pozyskiwania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych wymusiło poszukiwanie rozwiązań układów zdolnych do przetwarzania energii mechanicznej w elektryczną przy zmiennej prędkości wału prądnicy. Tego rodzaju zagadnienie dotyczy problemu przetwarzania energii np.: w elektrowniach wiatrowych, w elektrowniach wałowych na statkach, w małych elektrowniach wodnych czy tzw. wirujących magazynach energii. Jako generatory mogą być stosowane maszyny synchroniczne, maszyny asynchroniczne klatkowe i maszyny dwustronnie zasilane. Każdy układ wymaga odrębnego układu przekształtnikowego do przetwarzania energii i odrębnego układu sterowania. Ze



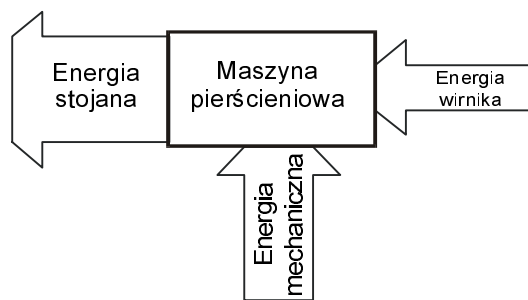
Rys.1. Schemat zasilania MDZ

względu na swoje właściwości maszyna dwustronnie zasilana jest chętnie stosowana. Jednak dopiero w ostatnich latach dynamiczny rozwój nowoczesnych urządzeń energoelektronicznych oraz ogromny postęp w dziedzinie mikroprocesorów umożliwił zrealizowanie układu z maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako generator przy zmiennej prędkości kątowej wału.

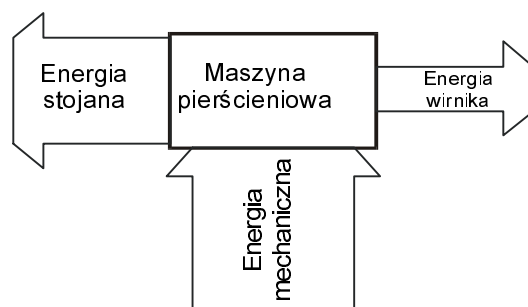
Maszyna dwustronnie zasilana jest to maszyna asynchroniczna pierścieniowa (rys. 1) ze stojanem przyłączonym bezpośrednio do sieci prądu przemiennego. Wirnik dołączony jest do sieci przez przekształtnik. Maszyna (szybkoobrotowa) połączona jest z wałem napędowym (zwykle wolnoobrotowym) przez przekładnię. Zastosowanie przekształtników w obwodzie wirnika i odpowiedniego układu sterowania pozwala na oddawanie do sieci zadanych wartości mocy o określonych parametrach bez względu na prędkość obrotową wirnika. Przy ograniczonym zakresie zmian prędkości obrotowej możliwe jest zastosowanie w wirniku przekształtnika o mocy mniejszej od mocy maszyny, gdyż przetwarzaniu w układzie energoelektronicznym podlega moc czynna proporcjonalna do różnicy pomiędzy częstością sieci zasilającej a prędkością kątową wirnika, czyli proporcjonalna do poślizgu. Prawidłowo dobrane zmiany poślizgów generatora pierścieniowego mieszczą się w zakresie $\pm 35\%$ i taki

jest również stosunek mocy przekształtnika do mocy maszyny. Oznacza to że MDZ pracuje jako prądnica przy ograniczonym zakresie zmian prędkości obrotowej np. $\pm 35\%$ od prędkości znamionowej.

Maszyna dwustronnie zasilana może pracować jako prądnica przy prędkości nad- i podsynchronicznej; zmienia się przy tym kierunek mocy dostarczanej do wirnika. Jeżeli pominąć straty w maszynie to przy prędkości podsynchronicznej energia jest dostarczana do wirnika a odbierana jest przy prędkości nadsynchronicznej (rysunki 2 i 3) co oznacza że w tym drugim przypadku energia mechaniczna pobierana z wału, jest po przetworzeniu przekazywana do sieci przez obwód stojana i wirnika..



Rys. 2. Przetwarzanie energii w MDZ przy prędkości podsynchronicznej



Rys. 3. Przetwarzanie energii w MDZ przy prędkości nadsynchronicznej

Pierwsze układy z maszyną pierścieniową oparte były na tzw. kaskadzie nadsynchronicznej tyrystorowej ale obecnie przekształtnik w wirniku to układ dwóch falowników napięciowych: sieciowego i maszynowego z obwodem pośredniczącym napięcia stałego z kondensatorem. Taka struktura umożliwia dwukierunkowy przepływ energii w obwodzie wirnika. Przekształtnik maszynowy wraz ze swoim układem regulacji realizuje algorytm sterowania maszyną natomiast przekształtnik sieciowy realizuje algorytm regulacji napięcia w obwodzie pośredniczącym. Maszyną steruje się generując w wirniku maszyny prądy o odpowiedniej częstotliwości, amplitudzie i fazie. Układ posiada zdolność do pełnej kontroli mocy biernej. Możliwa jest praca maszyny przy zerowym zapotrzebowaniu na moc bierną.

Kolejnym atutem układu jest spokojne generowanie mocy tj. pomimo zmiennego momentu na wale moc oddawana do sieci może być stała, co znacznie zmniejsza mechaniczne obciążenia układu. Decyduje o tym szerokie pasmo przenoszenia układu regulacji i w efekcie znakomita dynamika układu. Zapewnia to bardzo dobrą współpracę z siecią (migotanie $<1\%$) i eliminację takich zjawisk jak efekt przesłaniania czy pulsacje mocy wywołane zmianami chwilowymi prędkości wiatru w elektrowniach wiatrowych.

Niewątpliwe zalety układu okupione są wyższą ceną: maszyny, przekształtnika i wyrafinowanego układu sterowania. Przeważnie wymagany jest układ synchronizacji z siecią. Sterowanie maszyną polega na niezależnym sterowaniu mocą czynną i bierną maszyny i oparte jest na zasadach sterowania wektorowego. Realizacja sterowania wymaga złożonego algorytmu, zawierającego w swojej strukturze nie tylko klasyczne regulatory typu PI, ale także układ nieliniowego odsprężenia, transformacje zmiennych i algorytm modulacji. Firmy, które produkują układy generatorów z maszyną dwustronnie zasilaną starają się stworzyć sterowanie z estymatorem położenia wału maszyny (sensorless control). Realizacja tak rozbudowanego algorytmu sterowania wymaga odpowiednio rozbudowanych narzędzi cyfrowych.

Biorąc pod uwagę różne metody sterowania przekształtnikiem zasilającym wirnik MDZ można uzyskać jakościowo różne przebiegi wielkości sterowanych. Dobrymi właściwościami zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych odznacza się układ regulacji zrealizowany z wykorzystaniem modelu multiskalarnego maszyny dwustronnie zasilanej.

Model ten został przedstawiony w [1]. Na jego podstawie zrealizowana została struktura sterowania MDZ [1]. Struktura została zaimplementowana na stanowisku laboratoryjnym.

3. Konstrukcja stanowiska laboratoryjnego

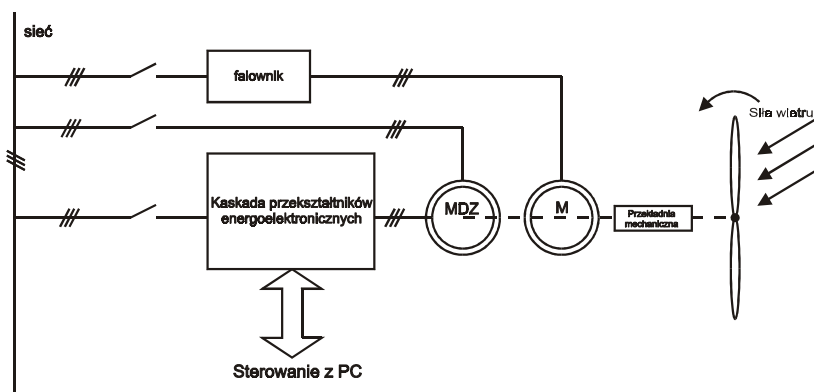
Zarówno silnik wiatrowy jak i generator z układem regulacji są z punktu widzenia sterowania obiektami wielowymiarowymi, nieliniowymi i niestacjonarnymi, które w warunkach rzeczywistych podlegają wymuszeniom o charakterze losowym.

Zadaniem jest budowa stanowiska do badania generatora wraz z układem sterowania w warunkach zbliżonych do występujących podczas pracy elektrowni wiatrowej. Generator wiatrowy wraz z układem sterowania może być badany w stanie pracy ustalonej oraz przy standardowych sygnałach wymuszających w postaci skoku jednostkowego. Ponadto można oceniać wpływ składowych zmiennych w prędkości kątovej wirnika, specyficznych dla silnika wiatrowego, na jakość generowanej energii oraz na drgania konstrukcji mechanicznej wiatraka. Przyczyną zmiennych składowych momentu jest nie tylko wiatr ale także sam wiatrak (zjawisko przesłonięcia) oraz oscylacje wieży w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru. Możliwość zbadania tych dodatkowych zjawisk oraz ewentualnego zbadania możliwości ich eliminacji w warunkach laboratoryjnych jest istotna.

Stanowisko zostało zaprojektowane jako uniwersalne. Możliwe jest badanie struktur sterowania w wyizolowanych warunkach laboratoryjnych a także w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy elektrowni wiatrowej.

Stojan maszyny dwustronnie zasilanej jest przyłączony bezpośrednio do sieci. Wirnik maszyny jest zasilany z przemiennika częstotliwości z obwodem pośredniczącym napięcia stałego. Obecnie przekształtnik w wirniku maszyny zbudowany jest z prostownika niesterowanego od strony sieci i z falownika napięcia od strony wirnika maszyny; możliwy jest więc jednokierunkowy przepływ energii w kierunku do wirnika a więc maszyna może pracować tylko podsynchronicznie jako generator.

Maszyna dwustronnie zasilana przewidziana jako generator jest połączona sprzęgłem z maszyną klatkową (rys.4), która została przewidziana jako silnik napędowy generatora.



rys.4 Poglądowy schemat stanowiska pomiarowego

Ponieważ każda z maszyn może być i silnikiem i generatorem to układ ten nie jest zobowiązujący i rolę generatora może pełnić maszyna klatkowa. Na wale maszyn poprzez sprzęgło rozłączne można zamontować silnik wiatrowy, który może być źródłem energii mechanicznej. W warunkach laboratoryjnych źródłem sztucznego wiatru jest wentylator. Silnik napędowy wentylatora zasilany jest z falownika co umożliwia zmiany prędkości kątovej wentylatora i co za tym idzie wiatru.

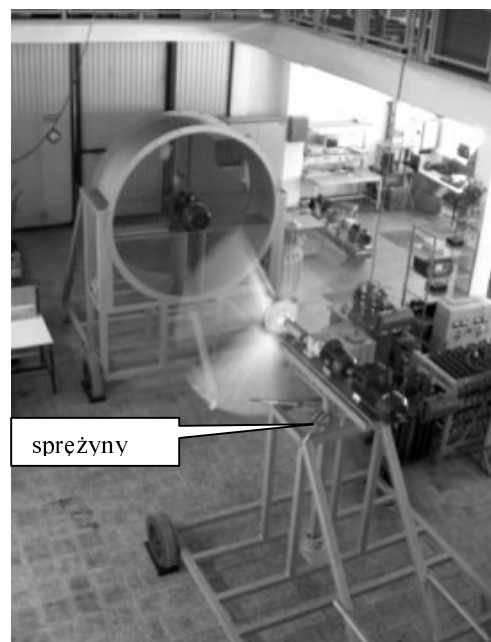
Silnik asynchroniczny klatkowy zasilany z falownika napięcia jest silnikiem napędowym MDZ i może pracować przy dwóch różnych strukturach układu sterowania i co za tym idzie przy różnych właściwościach. W pierwszym reżimie pracy silnik klatkowy pracuje z (bezcujnikowym) układem regulacji prędkości kątowej zespołu silnik - prądnicą. Oznacza to że prędkość wału jest stała (zadana) niezależnie od stanu obciążenia maszyny.

Dla lepszego oddania warunków pracy zespołu silnik wiatrowy-prądnicą, układ sterowania silnika asynchronicznego został rozbudowany o dodatkowy algorytm nadający mu charakterystyki silnika wiatrowego i to zarówno statyczne jak i dynamiczne. Może być traktowany jak emulator wiatru i silnika wiatrowego. W tym przypadku prędkość wału zespołu silnik prądnicą zależy od stanu obciążenia. W reżimie pracy jako emulator silnika wiatrowego układ sterowania zapewnia wytworzenie na wale maszyny momentu napędowego, którego wartość zależy od prędkości wiatru i prędkości kątowej maszyny oraz od wymiarów silnika. Ponadto dodatkowo ukształtowana została dynamika układu aby oddać duże stałe czasowe wynikające z dużych momentów bezwładności silnika wiatrowego. Układ dwóch maszyn: napędowej i generatora pozwala na sprawdzenie działania koncepcji sterowania, struktury sterowania, jakości regulacji i jakości energii w warunkach laboratoryjnych przy znanych wymuszeniach i w stanie pracy ustalonej.

Układy sterowania wszystkich przekształtników oparte są na opracowanym w katedrze systemie uruchomieniowym na bazie procesora sygnałowego wraz z układem interfejsów. Kontrola procesu, pomiary i ładowanie programu do procesora odbywa się z komputera nadrzędnego. Należy zaznaczyć że system uruchomieniowy jest tak skonstruowany że może samodzielnie pracować i sterować procesem.

Programy sterujące pisane są w języku C w wersji dla tego procesora. Ponieważ programy symulacyjne także pisane są w języku C to implementacja algorytmów jest prosta; duże fragmenty programów symulacyjnych można bezpośrednio użyć do sterowania obiektem po ewentualnej „ręcznej” optymalizacji. Ze względu na złożoność algorytmów sterowania i krótki okres próbkowania ($150\mu\text{s}$) użycie języków symulacyjnych wyższego rzędu i ich kompilatorów jest utrudnione ze względu na nieoptymalny kod.

Jak wspomniano wcześniej zmienny moment na wale generatora powoduje w rzeczywistych elektrowniach zjawiska niekorzystne w postaci drgań mechanicznych o częstotliwościach rezonansowych. Typowe są drgania wieży w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru o częstotliwości 1-2Hz. Do badania tego zjawiska i badania możliwości tłumienia drgań na



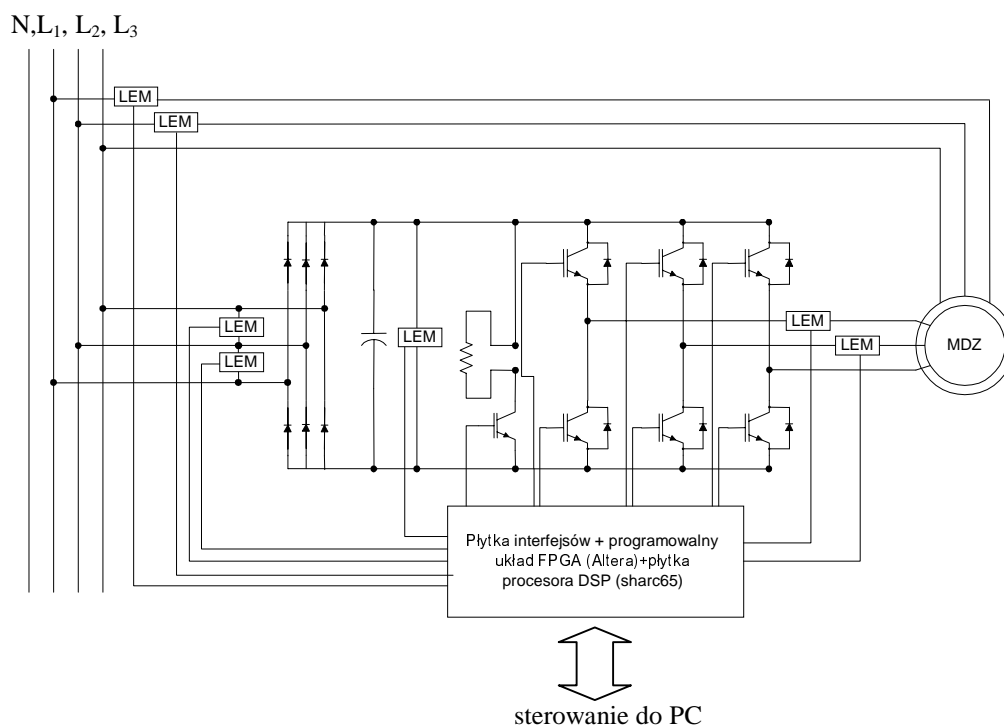
Rys.5. Widok stanowiska laboratoryjnego

drodze regulacyjnej, konstrukcja modelu laboratoryjnego została tak zaprojektowana aby drgania były możliwe. Zespół silnika wiatrowego, prądnicy i silnika napędowego został umieszczony (rys.5) na platformie zamocowanej przegubowo do podłoża. W pozycji stabilnej utrzymują konstrukcję cztery sprężyny o regulowanym napięciu. Sprężyny zostały tak dobrane że przy uderach momentu na wał konstrukcja kołysze się. Napięciem sprężyn można tym zjawiskiem sterować.

Pracą falownika sterującego MDZ kontroluje układ mikroprocesorowy SH65 v3 z procesorem sygnałowym ADSP21065L oraz układem logiki programowalnej Altera FLEX6016. Oprogramowanie narzędziowe procesora sygnałowego VisualDSP pozwala na przygotowanie i kompilację programów sterujących falownikiem. Program ładowany jest do procesora za pomocą konsoli operatora, która umożliwia także zmianę parametrów sterowania, wielkości zadanych oraz rejestrację i wizualizację dowolnych przebiegów. Maszyna sterowana jest napięciowo od strony wirnika. Wybrane dane techniczne maszyn wykorzystanych na stanowisku laboratoryjnym zostały przedstawione w Tabeli 1a na rys.6 pokazano schemat układu zasilania maszyny.

Tabela 1. Wybrane dane techniczne maszyn wykorzystanych na stanowisku pomiarowym:

		Maszyna dwustronnie zasilana	Silnik klatkowy
typ		SUDf 112M-6A	SSKg 100L-4B
moc znamionowa P_n (S1)	kW	2	3
prędkość obrotowa	obr/min	910	1415
częstotliwość	Hz	50	50
$\cos\varphi$	-	0.73	0.81
napięcie znamionowe	V	3x380	220Δ\380Y
prąd znamionowy po stronie stojana I_1	A	5.5	11.9/6.9
prąd znamionowy po stronie wirnika I_2	A	3.4	-



rys.6. Schemat połączeń MDZ na stanowisku laboratoryjnym

4. Maszyna dwustronnie zasilana

Ogólny model matematyczny opisujący MDZ od strony elektrycznej przedstawiają równania różniczkowe, gdzie podkreślenie danej zmiennej oznacza wektor przestrzenny.

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_s \Psi_s$$

$$\underline{u}_r = R_r \underline{i}_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_m) \Psi_r$$

$$\Psi_s = L_s \underline{i}_s + L_m \underline{i}_r$$

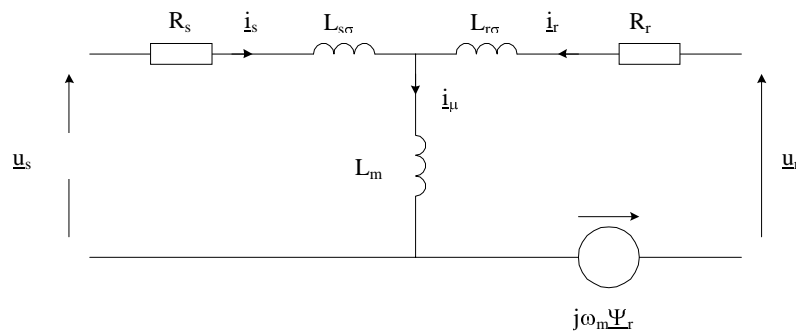
$$\Psi_r = L_r \underline{i}_r + L_m \underline{i}_s$$

Przyjmując, że indukcyjności stojana i wirnika równe są odpowiednio sumie indukcyjności wzajemnej oraz indukcyjności rozproszenia poszczególnych uzwojeń ($L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$) oraz zakładając zerową wartość prędkości wirowania układu odniesienia $\omega_s = 0$ równania MDZ przyjmują postać:

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + L_{s\sigma} \frac{d\underline{i}_s}{dt} + L_m \frac{d\underline{i}_\mu}{dt}$$

$$\underline{u}_r = R_r \underline{i}_r + L_{r\sigma} \frac{d\underline{i}_r}{dt} + L_m \frac{d\underline{i}_\mu}{dt} - j\omega_m \Psi_r$$

Na podstawie powyższych równań sporządzony został schemat zastępczy MDZ w postaci jak na rysunku 3.



Rys. 7. Schemat zastępczy MDZ (wektorowo)

gdzie:

R_s – rezystancja uzwojenia stojana,

\underline{i}_s – wektor prąd stojana,

$L_{s\sigma}$ – indukcyjność rozproszenia stojana,

\underline{u}_s – wektor napięcia stojana,

L_m – indukcyjność wzajemna stojana i wirnika,

\underline{i}_μ – prąd magnesujący,

$j\omega_m \Psi_r$ – wektor SEM rotacji.

R_r – rezystancja uzwojenia wirnika,

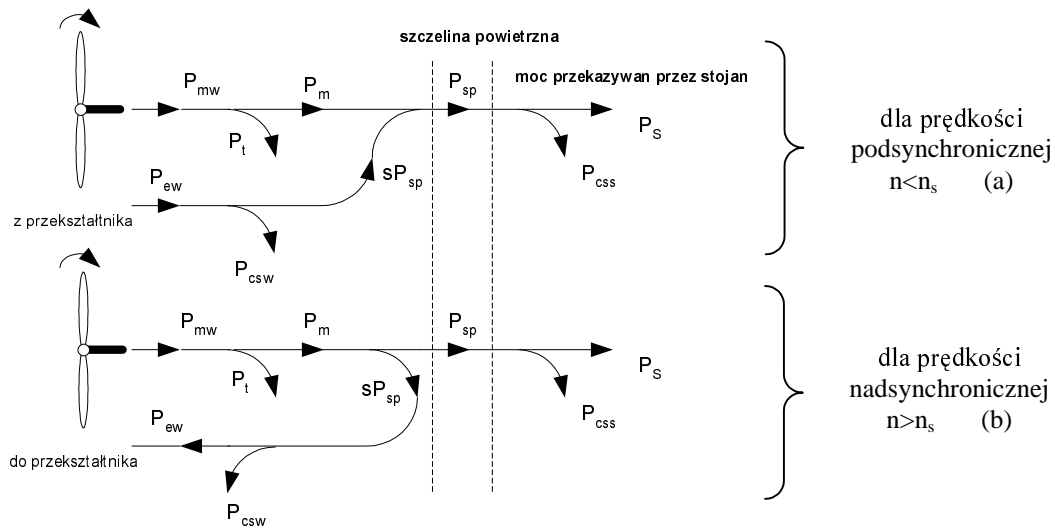
\underline{i}_r – wektor prąd wirnika,

$L_{r\sigma}$ – indukcyjność rozproszenia wirnika,

\underline{u}_r – wektor napięcia wirnika,

MDZ może pracować zarówno jako prądnica jak i silnik. Praca ta odbywa się w szerokim zakresie prędkości obrotowej wału maszyny ($0.7n_s < n < 1.3n_s$) od prędkości podsynchronicznej poprzez synchroniczną, aż do nadsynchronicznej. W zależności od zakresu prędkości wału MDZ następuje zmiana kierunków przepływu mocy w wirniku. Kierunki przepływu mocy zostały zaprezentowane na rysunkach 2, 3 i 8. W przypadku pracy układu w zakresie prędkości podsynchronicznej maszyna generuje moc elektryczną do sieci poprzez stojan natomiast do wirnika energia zostaje dostarczona poprzez przekształtnik (rys.8a). Praca

w zakresie prędkości nadsynchronicznej charakteryzuje się tym, że maszyna generuje moc elektryczną do sieci zarówno poprzez stojan jak i wirnik (rys 8b).

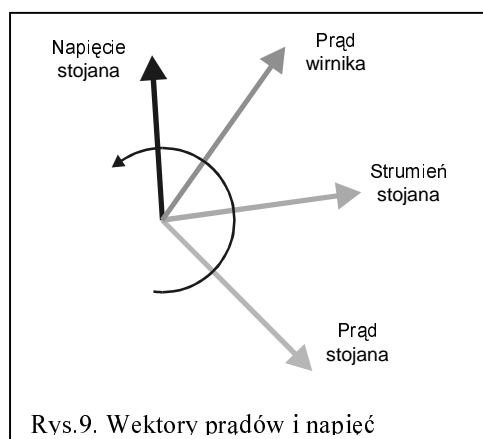


Rys. 8 Rozpływ mocy w MDZ dla różnych zakresów prędkości pracy

Oznaczenia symboli gdzie:

- P_{mw} – moc mechaniczna dostarczana do wału,
- P_m – moc mechaniczna użytkowa,
- P_t – straty mechaniczne (tarcie),
- P_{ew} – moc elektryczna wirnika,
- P_{csw} – całkowite straty wirnika,
- P_{ag} – moc przenoszona przez szczelinę powietrzną (przez pole wirujące),
- P_s – moc przekazywana przez stojana,
- P_{css} – całkowite straty stojana.

5. Układ regulacji MDZ wykorzystujący model multiskalarny.



Rys.9. Wektory prądów i napięcie

Możliwych jest wiele struktur regulacji maszyny dwustronnie zasilanej pracującej jako generator wiatrowy, które realizują postawione zadania. Głównym zadaniem jest generowanie energii elektrycznej o zadanych parametrach (napięciu, częstotliwości, mocy czynnej i biernej) niezależnie od zmieniającej się prędkości kątowej maszyny. Układ regulacji generatora pierścieniowego oparty jest na modelu wektorowym. Sterowanie mocą maszyny polega na regulacji długości i fazy wektora prądu stojana względem wektora napięcia stojana (przy stałym napięciu sieci). Składowa czynna i bierna prądu stojana jest miarą mocy czynnej i biernej oddawanej lub pobieranej przez maszynę. Maszyna sterowana jest od strony wirnika, poprzez wymuszenie w wirniku maszyny prądów o odpowiedniej częstotliwości, amplitudzie i fazie czyli odpowiedniego wektora prądu wirnika wirującego z prędkością własną równą pulsacji prądu wirnika (ω_r). Wektor ten jest unoszony z prędkością równą prędkości wirnika (ω_m) (dla $p=1$) (rys.9.). Sterowanie mocą maszyny wymaga więc przede wszystkim

bieżnej oddawanej lub pobieranej przez maszynę. Maszyna sterowana jest od strony wirnika, poprzez wymuszenie w wirniku maszyny prądów o odpowiedniej częstotliwości, amplitudzie i fazie czyli odpowiedniego wektora prądu wirnika wirującego z prędkością własną równą pulsacji prądu wirnika (ω_r). Wektor ten jest unoszony z prędkością równą prędkości wirnika (ω_m) (dla $p=1$) (rys.9.). Sterowanie mocą maszyny wymaga więc przede wszystkim

z synchronizowania wektora prądu wirnika z układem odniesienia związanym ze stojanem. W stanie ustalonym musi być spełniona zależność:

$$\omega_m + \omega_r = \omega_s$$

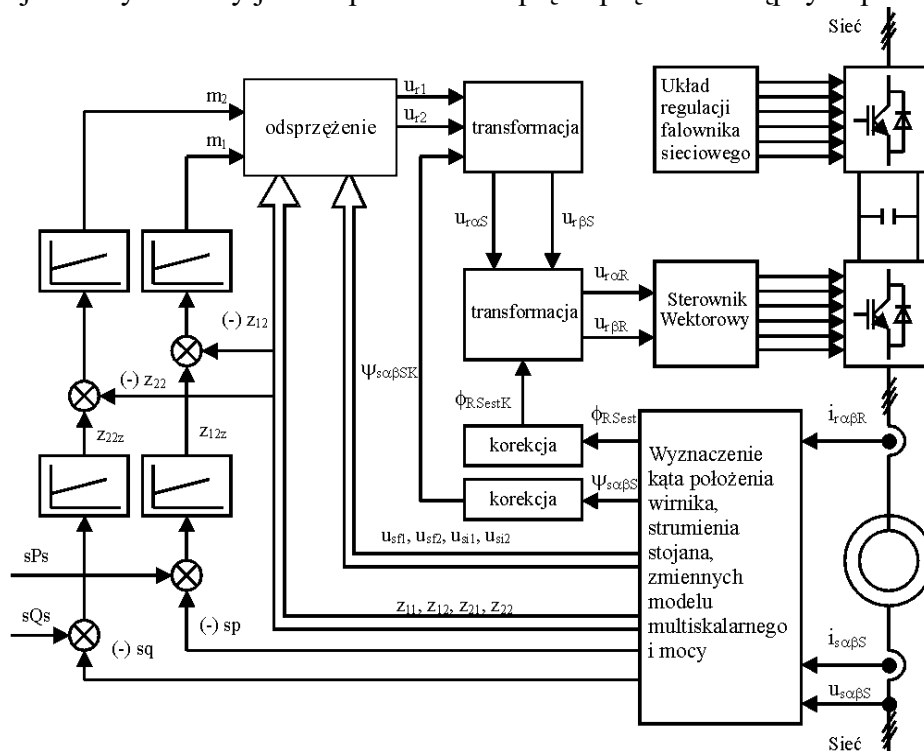
gdzie ω_s jest pulsacją napięcia sieci.

Sterowanie maszyną odbywa się w wirniku i wielkości sterujące muszą być określone w układzie współrzędnych związanym z wirnikiem. Wielkości sterowane są związane z układem współrzędnych stojana. Pomiary prądów i napięć dokonywane są w dwóch różnych układach współrzędnych, jeden związany jest z wirnikiem, a drugi ze stojanem. Sprowadzenie zmiennych do tego samego układu współrzędnych wymaga wykonania na nich operacji obrotu o kąt (położenia wirnika względem stojana). W wielu rozwiązaniach kąt położenia wirnika jest mierzony za pomocą przetwornika obrotowo-impulsowego, co pociąga za sobą nakłady inwestycyjne i problemy eksploatacyjne. Kąt położenia wirnika może być także odtwarzany.

Maszyna dwustronnie zasilana jest z punktu widzenia sterowania obiektem nieliniowym, wielowymiarowym i sprzężonym. Uzyskanie odpowiedniej jakości regulacji, w tym regulacji odsprężonej, wymaga dodatkowych bloków w układzie regulacji.

Na rys.9 przedstawiona jest ogólna struktura układu regulacji maszyny dwustronnie zasilanej opartego na modelu multiskalarnym. Struktura zawiera regulatory mocy czynnej i biernej, układ transformacji, rozbudowany układ odtwarzania zmiennych, regulatory wielkości podporządkowanych oraz modulator. Falownik sieciowy ma swój osobny układ sterowania. Należy pamiętać że jest jeszcze, nie pokazany na rysunku, układ zadawania optymalnej mocy czynnej, układ synchronizacji oraz układ nadzoru i kontroli.

Wielkościami zadanymi dla układu regulacji są wartości mocy czynnej sPs i biernej sQs jaką maszyna wygeneruje lub pobierze z sieci. W układzie tym kąt położenia wirnika względem stojana estymowany jest na podstawie napięć i prądów dostępnych pomiarowo. W



Rys.9 Schemat struktury układu regulacji maszyny dwustronnie zasilanej z zastosowaniem modelu multiskalarnego [1]

schemacie struktury wyodrębnić można kilka bloków funkcjonalnych, które pokrótce można scharakteryzować następująco:

- Blok nieliniowego odsprężenia (we: $m_1, m_2, z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}, u_{sf1}, u_{sf2}, u_{si1}, u_{si2}$ / wy: u_{r1}, u_{r2}).
- Blok wyznaczania zmiennych modelu multiskalarnego, kąta położenia wirnika, strumienia stojana oraz mocy
(we: $i_{s\alpha\beta S}, i_{ra\beta R}, u_{s\alpha\beta S}$ / wy: $z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{22}, u_{sf1}, u_{sf2}, u_{si1}, u_{si2}, \Psi_{s\alpha\beta S}, \phi_{R\text{Sest}}$).
- Cztery regulatory typu PI.
- Dwa bloki transformacji zmiennych pomiędzy odpowiednimi układami współrzędnych.
- Dwa bloki korekcji wynikającej z cyfrowej realizacji układu sterowania.
- Modulator.

Równania matematyczne opisujące poszczególne bloki przedstawione są w [1].

6. Literatura pomocnicza:

1. Tunia H., Kaźmierkowski M.: *Automatyka napędu przekształtnikowego*. PWN, Warszawa, 1987.
2. Krzemiński Z.: *Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2001. Gdańsk.
3. Bogalecka E.: Zagadnienia sterowania maszyną dwustronnie zasilaną pracującą jako prądnica w systemie elektroenergetycznym. Prace Naukowe WSM w Gdyni, Gdynia 1997.

7. Instrukcja obsługi stanowiska z maszyną dwustronnie zasilaną

Prądnica (MDZ) jest w warunkach laboratoryjnych napędzana albo przez silnik wiatrowy albo przez silnik asynchroniczny klatkowy. Maszyna asynchroniczna może pracować w dwóch reżimach: regulacji prędkości kątowej i w reżimie emulatora silnika wiatrowego. Przy uruchamianiu układu należy najpierw uruchomić silnik napędowy w zadanym reżimie pracy a MDZ w drugiej kolejności.

Kolejność postępowania:

1. Podać zasilanie na stanowisko (pole rozdzielni nr 4 i wyłącznik na pulpicie)
2. Włączyć komputer i wyłącznik bezpieczeństwa
3. Załączyć zasilanie silnika asynchronicznego i zasilanie wirnika i stojana maszyny pierścieniowej (przyciskami na pulpicie)
4. Uruchomić układ sterowania silnikiem asynchronicznym. Dla realizacji tego algorytmu należy z poziomu konsoli operatora wykonać następujące działania:

Adres [F4]	Wartość	Funkcja
80	-320 minus jest konieczny	Maszyna startuje ze sterowaniem U/f i należy bez obciążenia ustawić punkt pracy odpowiadający stratom biegu jałowego. Prędkość 320 [obr/min] odpowiadająca stratom dla wiatru 5[m/s]
Załączyć falownik maszyny asynchronicznej przyciskiem Z z konsoli		
48, 52 lub przycisk M	1, 1	Załączenie układu sterowania prędkością z obserwatorem; Zadane prędkości wału maszyny wpisuje się pod adres 80 w [obr/min]
56, lub przycisk V	3	Przejęcie na reżim pracy „emulator silnika wiatrowego”; maszyna pracuje w układzie zadawania wyliczonego momentu
84	5 – 9 8.2 m/s prędkość startowa MDZ	Zadawanie prędkości wiatru w [m/s]. Aktualnie ustawiona jest opcja zmiany prędkości wiatru pod warunkiem zarejestrowania tego procesu.

5. Uruchomienie układu sterowania maszyną dwustronnie zasilaną
 - Ustawić prędkość wału maszyny na 800 [obr/min] z konsoli silnika (co odpowiada prędkości wiatru 8.2[m/s]). Algorytm sterowania MDZ startuje od takiej prędkości. Przełączanie między konsolami **ALT+TAB**.
 - Z poziomu konsoli operatora MDZ załadować program sterujący maszyną do procesora.
 - Zadać moc bierną i czynną MDZ i wyślij do procesora (**przy starcie Q=-0.3, P=0**).
 - Załączyć MDZ przyciskiem ON z konsoli operatora.
6. Układ powinien pracować poprawnie. Można realizować program ćwiczeń, zmieniać z konsoli sterującej silnikiem prędkość maszyny lub prędkość wiatru a z konsoli MDZ zadane wartości mocy czynnej i biernej i rejestrować odpowiednie wielkości. Należy pilnować aby prąd wirnika MDZ nie przekroczył wartości 3.8A. Ze względu na charakterystyki silnika wiatrowego (ograniczony moment maksymalny dla określonej prędkości wiatru) należy w tym trybie pracy wymuszać niewielkie lub świadome zmiany zadanej mocy czynnej.

7. Przy zatrzymywaniu procedura jest odwrotna albo **OFF** z konsoli MDZ i **W** z konsoli silnika.

Program ćwiczenia

1. Zapoznać się i przećwiczyć procedurę uruchamiania układu.
2. Zapoznać się z obsługą konsoli operatora MDZ.
3. Dla zadanych prędkości wału maszyny sprawdzić jakość sterowania mocą czynną i bierną; zarejestrować odpowiednie przebiegi.
4. Określić zakres pracy maszyny ze względu na prąd wirnika.
5. Określić właściwości dynamiczne zamodelowanego silnika wiatrowego.
6. Dla wybranych prędkości wiatru wyznaczyć charakterystyki zamodelowanego silnika wiatrowego. Określić zakres pracy maszyny ze względu na ograniczenie momentu zamodelowanego silnika wiatrowego.
7. Dla wybranych prędkości wiatru sprawdzić jakość i sterowania mocą czynną i bierną. Zarejestrować odpowiednie przebiegi, zwrócić uwagę na zmiany prędkości wału maszyny.
8. Zbadać zachowanie układu sterowania mocą przy zmianach prędkości wiatru.