

PRZYKŁAD C6

Opracować model ATP-EMTP do badania dwustronnie zasilanego generatora indukcyjnego (DZGI).

Wszystkie składowe zbiory znajdują się w kartotece: *przykład_C6*. Znajdują się tam modele dwóch systemów: z generatorem sterowanym przez napięcie wirnika (zbiory z nazwą DFIG_V) oraz z generatorem sterowanym za pomocą prądu wirnika (zbiory z nazwą DFIG_I). Opis modelu zawarty w DODATKU C odnosi się do tego pierwszego generatora. Krótki opis modelu z generatorem sterowanym prądem wirnika jest podany w dalszej części niniejszego wprowadzenia.

1. Model z generatorem sterowanym za pomocą napięcia wirnika

Schemat modelu ATPDraw sieci z generatorem sterowanym za pomocą napięcia wirnika jest pokazany na rys. 1. Dla uproszczenia, w miejsce układu przekształtnikowego, źródło napięciowe w obwodzie wirnika zostało przedstawione za pomocą sterowanych fazowych źródeł napięciowych. W obwodzie wirnika znajduje się także niezależne źródło prądowe, które jest wykorzystywane do wymuszenia określonych warunków początkowych w modelu generatora (okres załączenia tego źródła prądowego obejmuje czas przed rozpoczęciem symulacji: $(-1,0)$ – $(-0,5)$ s).

W obwodzie odtwarzającym część mechaniczną generatora znajdują się dwa źródła prądowe: jedno o stałej wartości, które w danym przypadku ma bardzo małą wartość, co odpowiada brakowi napędu od wiatraka w stanie początkowym; drugie z nich jest sterowane z bloku DFIG_V i służy do symulacji momentu napędowego wiatraka.

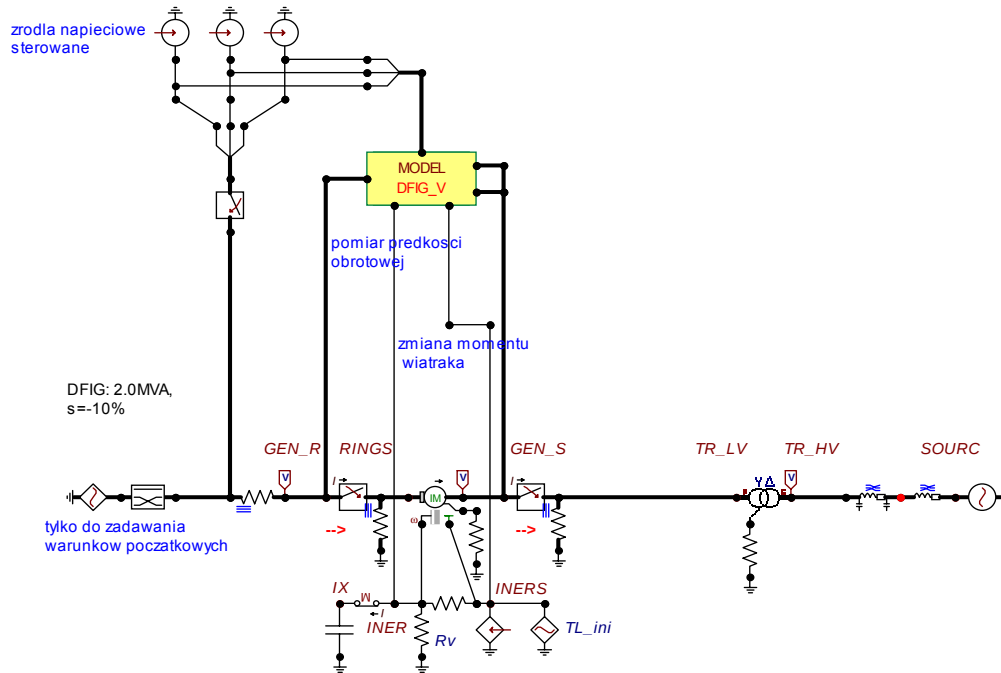
Model układu sterowania źródłami napięciowymi w obwodzie wirnika generatora został zrealizowany w postaci modułu MODELS (blok DFIG_V). Realizowana jest w nim procedura, której struktura jest pokazana na rys. 2. Jest tam także generowany sygnał sterujący źródłem prądowym (węzeł *INERS*), za pomocą którego zadawany jest moment napędowy turbiny wiatrowej. Na wejście tego bloku doprowadzane są pomiary prądów i napięć z zacisków generatora (parametry stojana). Na wyjście podawane są trójfazowe sygnały sterowania źródłami napięciowymi.

Model generatora DFIG ze sterowaniem napiciowym

Konwencja jak w generatorze synchronicznym:
przeciwny kierunek prądu stojana i wirnika, $U=ud-juq$, $U=u_{al}-j u_{be}$, $U=ux+juy$

Dwa różne regulatory w obwodach regulacji:

- mocy: (Kp1, Ki1) obliczane wg uproszczonego regulatora PI (zamknięty obwód II rzędu)
- prądu: (Kp2, Ki2) obliczane wg uproszczonego zamkniętego obwodu I rzędu
- sterowanie na podstawie modelu DFIG

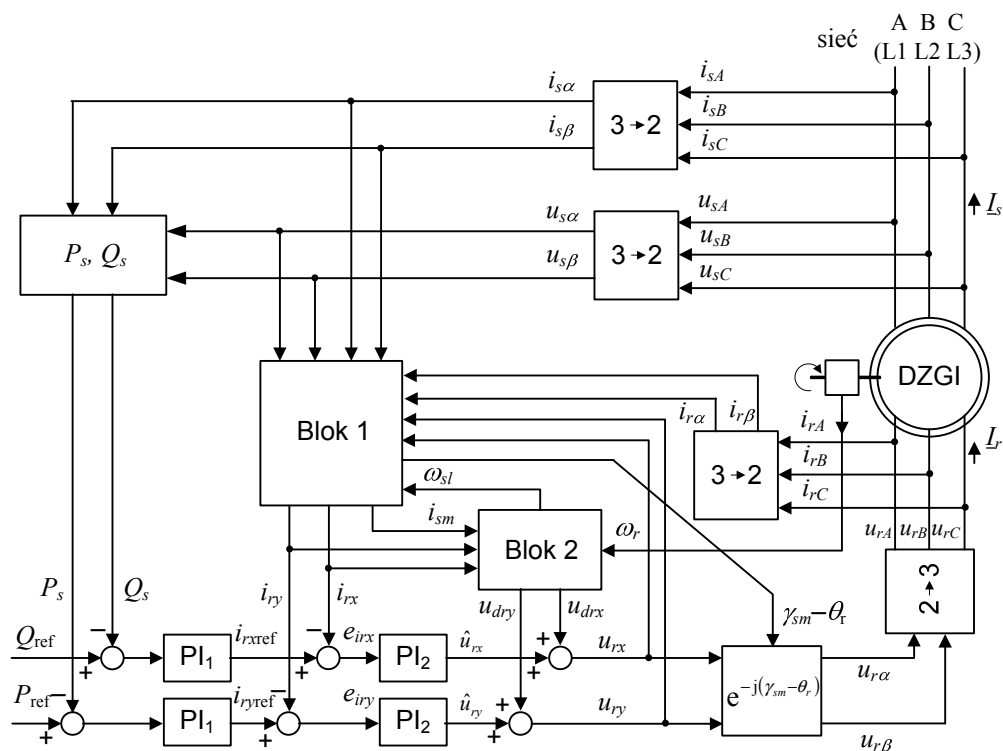


Rys. 1. Schemat analizowanego modelu ATPDraw

Podstawową procedurą realizowaną w układzie sterującym jest blok rozwiązywania układu równań różniczkowych (6.100)-(6.101). Tekst tego bloku jest następujący.

```
COMBINE ITERATE {5} AS first_group
del_s:=gam_s - gam_sm
Vsx:=Vs*cos(del_s)
Vsy:=Vs*sin(del_s)
-- solution of differential equations
a1:=Irx*Tsl+Vsx*Lm1
laplace (Ism/a1) := Ts / (1|s0+Ts|s1)
a2:=(Iry*Tsl+Vsy*Lm1)*recip(Ism)
laplace (gam_sm/a2) := 1 / (0|s0+1|s1)
a3:=Vrx*Lrp1+om_s1*Iry+sTs*Ism-Vsx*Lm1s
laplace (Irx/a3) := 1 / (Trps|s0+1|s1)
a4:=Vry*Lrp1-om_s1*Irx-s1om*Ism
laplace (Iry/a4) := 1 / (Trp1|s0+1|s1)
ENDCOMBINE
```

W każdym kroku wynik tej procedury jest ustalany na drodze iteracyjnego rozwiązywania zadanego układu równań. Całkowanie równań różniczkowych odbywa się z wykorzystaniem funkcji *Laplace*. Przyjęto, że maksymalna liczba iteracji wynosi 5. Wyjście z tego bloku może nastąpić po mniejszej liczbie iteracji, jeśli uzyskana zostanie założona zbieżność procesu obliczeniowego.



Rys. 2. Struktura układu sterowania DZGI

Parametry modelu układu mechanicznego maszyny zostały obliczone za pomocą programu WindSyn – patrz Przykład C5 przy danych wejściowych z Tablicy C.1.

Warunki początkowe

W modelu DZGI występuje wiele zmiennych, które są związane za pomocą równań różniczkowych. Obliczanie tych zmiennych w wyniku całkowania równań różniczkowych wymaga znajomości ich wartości początkowych. Rozsądnie jest założyć, że stan początkowy modelu odpowiada stanowi ustalonoemu rozpatrywanej sieci wraz z generatorem przy znamionowej pulsacji: $\omega_{sm} = \omega_1$, znanym poślizgu s (a więc także pulsacjach: poślizgu (ω_{sl}) i pola wirnika (ω_e), a także napięciu stojana $\underline{U}_s$. Dzięki takiemu założeniu, wartości początkowe niektórych zmiennych są bezpośrednio znane (jak wymienione powyżej pulsacje).

W stanie ustalonym maszyna znajduje się w stanie zrównoważenia mocy (jeśli pominąć moc strat), więc zależności (C.25) prowadzą do następujących związków:

$$\begin{aligned} P_{ref} &= P_{ini} = P_s - k_{Pr} P_r \\ Q_{ref} &= Q_{ini} = Q_s - k_{Pr} Q_r \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: $k_{Pr}=1$ – jeśli obwód wirnika jest zasilany przez dwukierunkowy przekształtnik (co pozwala przekazywać moc wirnika do sieci) oraz $k_{Pr}=0$ – w przeciwnym przypadku.

Wykorzystując zależności związane z modelem wektorowym maszyny (p. 6.2.5), moce czynne i bierne w (6.107)-(6.108) można wyrazić za pomocą zmiennych modelu, dla których poszukiwane są wartości początkowe:

$$P_s = \frac{3}{2} \left(\frac{X_m^2 i_m^2 - u_s^2}{R_s} - X_m i_m i_{sy} \right) \quad (2)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} X_m i_m i_{sx}$$

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{3}{2} \left(R_r (m_{sm}^2 i_s^2 + i_m^2) + m_{sm} (2R_r i_m i_{sx} + X_m i_m i_{sy}) \right) \\ Q_r &= \frac{3}{2} X_m i_m (i_m + m_{sm} i_{sx}) \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: $X_m = \omega_1 L_m$, $m_{sm} = L_s / L_m$.

W powyższych zależnościach występują trzy niewiadome: I_m , I_{sx} oraz I_{sy} . Wstawiając je do (1) uzyskuje się dwa równania. Dodatkowe równanie można utworzyć wyznaczając kwadrat napięcia stojana. W ten sposób otrzymuje się:

$$P_{ini} = P_s - k_{Pr} P_r = \frac{3}{2} \left(\left(\frac{X_m^2}{R_s} - k_{Pr} R_r \right) i_m^2 - \frac{U_s^2}{R_s} - k_{Pr} R_r m_{sm}^2 I_s^2 \right) \quad (4)$$

$$Q_{ini} = Q_s - k_{Pr} Q_r = \frac{3}{2} X_m \left((1 - k_{Pr} m_{sm}) i_m i_{sx} - k_{Pr} i_m^2 \right) \quad (5)$$

$$U_s^2 = u_{sx}^2 + u_{sy}^2 = R_s^2 I_s^2 + X_m^2 i_m^2 - 2 R_s X_m i_m i_{sy} \quad (6)$$

gdzie: $I_s^2 = i_{sx}^2 + i_{sy}^2$, $u_{sx} = -R_s i_{sx}$, $u_{sy} = X_m i_m - R_s i_{sy}$

W wyniku rozwiązania tego układu równań, otrzymuje się trzy wspomniane niewiadome. Składowe prądu wirnika można więc obliczyć z następujących zależności:

$$\begin{aligned} i_{rx} &= m_{sm} i_{sx} + i_m \\ i_{ry} &= m_{sm} i_{sy} \end{aligned} \quad (7)$$

Podobnie, jak składowe napięcia wirnika, również składowe prądu w układzie d-q pokrywają się z odpowiednimi składowymi w osiach α - β . Można je zatem obliczyć zgodnie z (C.24). Dzięki temu, można oszacować amplitudę i początkową fazę prądu dostarczanego przed uruchomieniem symulacji do obwodu wirnika: $i_{rA} = i_{r\alpha}$. Wielkości te są obliczane w bloku INIT modułu MODELS i wyprowadzane do zbioru *.lis za pomocą funkcji *write()*, co ułatwia nastawianie warunków początkowych symulacji.

Wyniki symulacji

Parametry badanego generatora są podane w tabeli 1. Na ich podstawie, za pomocą programu WindSyn obliczone zostały parametry elektryczne schematu zastępczego: $L_m = 0,002354$ H, $R_s = 0,001717$ Ω , $L_{ls} = 0,000055$ H, $R_r = 0,005563$ Ω , $L_{lr} = 0,000055$ H. Dane wejściowe do symulacji są następujące: przebieg zmian momentu turbiny wiatrowej T_t – jak na rys. 3a, natomiast żądana moc elektryczna generatora zmienia się zgodnie wykresem na rys 3c: moc czynna P_e –krzywa 1, moc bierna Q_e –krzywa 3.

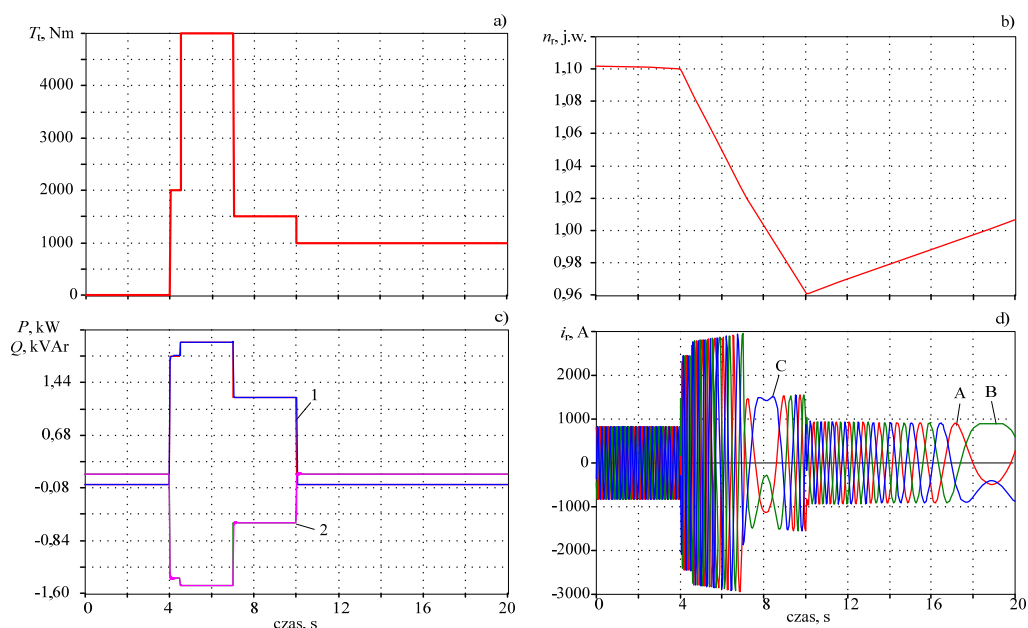
Tabela 1. Parametry analizowanego generatora

Moc znamionowa P , (kW)	2000	Liczba par biegunów	2
Napięcie znamionowe U , (V)	690	Poślizg początkowy	-10%
Współczynnik mocy $\cos \varphi$	0,9	Moment inercji H , (kgm ²)	58,0134
Sprawność	0,906	Znam. moment napędowy T_m , (Nm)	2485,94
Maks. moment napędowy, j.w.	1,58	Współczynnik tłumienia D , (Nm/(rad/s))	2,53

W trakcie symulacji prędkość obrotowa generatora zmienia się zgodnie z krzywą na rys. 3b (podana w jednostkach względnych). Widać, że na początku prędkość obrotowa była większa od wartości synchronicznej (wartość 1,0). Moment napędowy w tym czasie jest równy zero i przy niewielkim obciążeniu generatora w krótkim przedziale czasowym nie obserwuje się

zmian prędkości obrotowej całego zespołu (rys. 3b). W chwili $t=4$ s następuje duży wzrost momentu napędowego oraz obciążenia przez zwiększenie mocy czynnej i biernej. Jednak, ze względu na przeważającą żadaną moc obciążenia, obserwuje się obniżkę prędkości obrotowej, która następnie zwiększa się od czasu $t=10$ s, kiedy zmniejsza się moc obciążenia.

Zmianom tym towarzyszy zmiana napięcia i prądu wirnika w zakresie amplitudy i częstotliwości. Przebiegi prądów fazowych wirnika są pokazane na rys. 3d. Na początku, prąd ten przybiera stosunkowo niewielką wartość, a jego częstotliwość wynika z poślizgu: $s=10\%$, $f_r=5$ Hz. Po zwiększeniu obciążenia widać gwałtowny wzrost amplitudy tego prądu, a jego częstotliwość maleje zgodnie ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej wirnika.



Rys. 3. Wyniki symulacji: a) moment wiatraka, b) prędkość obrotowa wirnika, c) zmiana mocy czynnej i biernej, d) przebiegi prądów wirnika

Dla czasu $t \approx 9$ s poślizg zmienia kierunek, co odpowiada przejściu prędkości obrotowej generatora przez wartość prędkości synchronicznej (rys. 3b). W przebiegach prądu wirnika widać charakterystyczną zmianę kierunku wirowania: generator przechodzi z obszaru prędkości nadsynchronicznej w obszar prędkości podsynchronicznej. Odwrotne przejście następuje dla czasu ok. 17 s. W całym obszarze pracy rozpatrywanej instalacji, moc oddawana do sieci (w tym przypadku - moc stojana) jest utrzymywana na zadanych poziomach: przebiegi mocy zadanych: P_{ref} , Q_{ref} i uzyskanych: P_s , Q_s niemal się pokrywają (rys. 3c).

Zmienne zapisane w zbiorze rezultatów symulacji DFIG_V.PL4 mają następujące znaczenia:

GEN_RA	napięcie wirnika, faza A,
GEN_RB	napięcie wirnika, faza B,
GEN_RC	napięcie wirnika, faza C,
TR_HVA	napięcie górnej strony transformatora, faza A,
TR_HVB	napięcie górnej strony transformatora, faza B,
TR_HVC	napięcie górnej strony transformatora, faza C,
GEN_SA	napięcie na zaciskach generatora, faza A,
GEN_SB	napięcie na zaciskach generatora, faza B,
GEN_SC	napięcie na zaciskach generatora, faza C,
GEN_SA-TR_LVA	prąd na zaciskach generatora, faza A,
GEN_SB-TR_LVB	prąd na zaciskach generatora, faza B,
GEN_SC-TR_LVC	prąd na zaciskach generatora, faza C,
INERS-IX	prąd kondensatora w modelu części mechanicznej (moment związany z pokonaniem inercji maszyny),
GEN_RA-RINGSA	prąd wirnika, faza A,
GEN_RB-RINGSB	prąd wirnika, faza B,
GEN_RC-RINGSC	prąd wirnika, faza C,
IRYREF	prąd wyjściowy regulatora mocy czynnej PI (i_{ryref} , rys. 2),
IRXREF	prąd wyjściowy regulatora mocy bierniej PI (i_{rxref} , rys. 2),
OMEG_R	elektryczna prędkość kątowna wirnika (z uwzględnieniem liczby biegunów), rad,
T_WIND	moment napędowy wiatraka (prąd sterowanego źródła prądowego w modelu układu mechanicznego),
OM_SL	prędkość kątowna poślizgu ω_{sl} , rad,
P_NREF	sumaryczna żądana moc czynna maszyny,
Q_NREF	sumaryczna żądana moc bierna maszyny,
TH_R	elektryczny kąt położenia wirnika, rad,
IRX	prąd wirnika, składowa x ,
IRY	prąd wirnika, składowa y ,
VRX	napięcie wirnika, składowa x ,
VRY	napięcie wirnika, składowa y ,
VPRX	napięcie w obwodzie sterowania wirnika u_{rx} , składowa x ,
VPRY	napięcie w obwodzie sterowania wirnika u_{ry} , składowa y ,
VDRX	napięcie w obwodzie sterowania wirnika u_{drx} , składowa x ,
VDRY	napięcie w obwodzie sterowania wirnika u_{dry} , składowa y ,
GAM_SM	kąt położenia płaszczyzny współrzędnych x - y , γ_{sm} , rad,
ISM	prąd magnesujący I_{sm} ,
VS	amplituda napięcia generatora,
IS_AL	prąd stojana $i_{s\alpha}$ w osi α ,
IS_BE	prąd stojana $i_{s\beta}$ w osi β ,

VS_AL	napięcie stojana $u_{s\alpha}$ w osi α ,
VS_BE	napięcie stojana $u_{s\beta}$ w osi β ,
VSX	napięcie stojana u_{sx} w osi x ,
VSX	napięcie stojana u_{sy} w osi y ,
PS	moc czynna stojana,
QS	moc bierna stojana,
PR	moc czynna wirnika,
QR	moc bierna wirnika,
PN	moc czynna sumaryczna,
QN	moc bierna sumaryczna,
ISX	prąd stojana, składowa x ,
ISY	prąd stojana, składowa y ,
DEL_S	kąt pomiędzy płaszczyznami x - y i α - β stojana: $\delta_s = \gamma_s - \gamma_{sm} = \omega_s t - \gamma_{sm}$,
KI_IX	wyjście członu całkującego regulatora mocy biernej PI ₁ ,
KI_IY	wyjście członu całkującego regulatora mocy czynnej PI ₁ ,
KV_IX	wyjście członu całkującego regulatora napięcia (składowa x) PI ₂ ,
KV_IY	wyjście członu całkującego regulatora napięcia (składowa y) PI ₂ ,
TQGEN	moment mechaniczny maszyny,
OMEGM	prędkość kątowna wirnika maszyny (=OMEG_R/p),
THETAM	kąt położenia wirnika (=TH_R/p).

Zauważmy, że w stanie początkowym $\gamma_{sm}(0) = -\pi/2$ (płaszczyzna α - β wyprzedza płaszczyznę x - y o kąt $\pi/2$ i stąd $\delta_s(0) = \pi/2$ (rys. 6.22).

2. Model z generatorem sterowanym za pomocą prądu wirnika

Drugi z rozpatrywanych modeli generatora jest związany z plikami o nazwie DFIG_I. W tym przypadku, sterowanie generatora odbywa się za pomocą prądu wirnika. Schemat modelu ATPDraw jest pokazany na rys. 4. Układ sterujący (blok MODELS o nazwie DFIG_I) kontroluje źródła prądowe, które reprezentują stosowany w rzeczywistych układach przekształtnik elektroniczny z falownikiem prądowym.

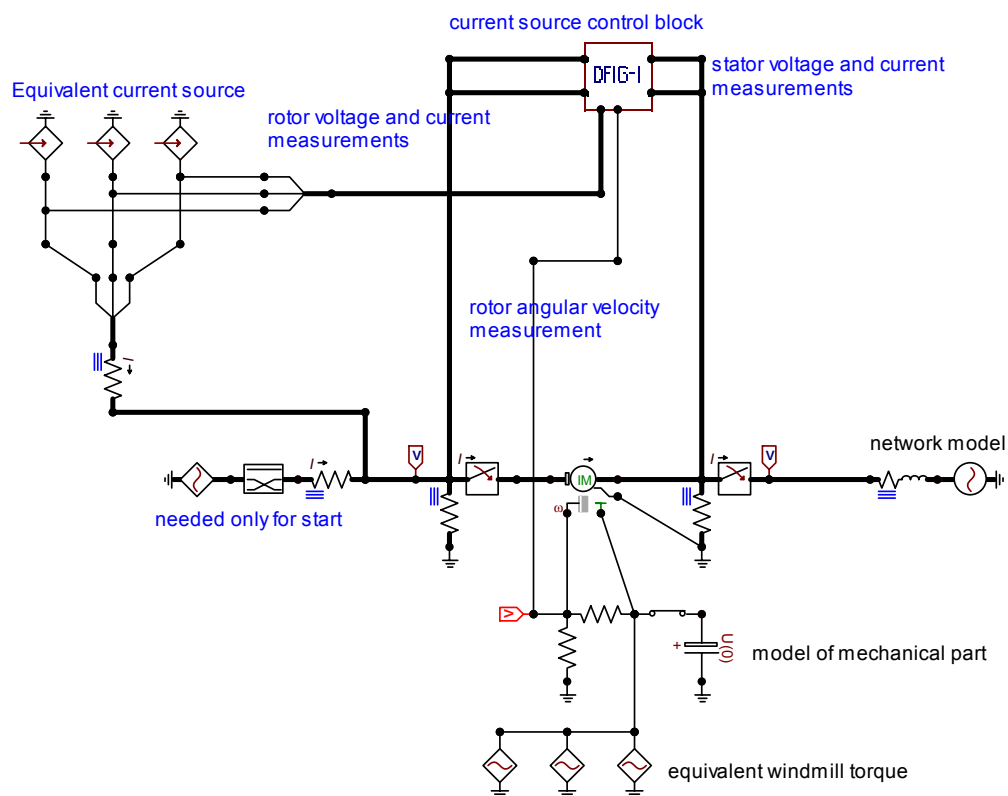
W modelu układu mechanicznego umieszczone są źródła prądowe, które określają moment napędowy wiatraka zgodnie z następującym harmonogramem: $t=0-4$ s, $I=0$; $t=4-7$ s, $I=1000$ A; $t>7$ s, $I=1500$ A ($1A \leftrightarrow 1Nm$).

Na wejścia bloku sterującego DFIG_I podawane są trójfazowe napięcia i prądy z zacisków generatora oraz z obwodów uzwojeń wirnika, a także napięcie z modelu układu mechanicznego, które odpowiada elektrycznej prędkości obrotowej wirnika ($1V \leftrightarrow 1$ rad/s).

Parametry rozpatrywanego generatora są podane w tabeli 2. Parametry schematu zastępczego generatora obliczone za pomocą programu WINDSYN są następujące:

$L_m=0,015064$ H, $R_s=0,013315$ Ω , $L_s=0,000317$ H, $R_r=0,040974$ Ω , $L_r=0,000317$ H.

Doubly-Fed Induction Generator with rotor current control



Rys. 4. Schemat modelu sieci z generatorem indukcyjnym sterowanym prądem wirnika

Tabela 2. Parametry analizowanego generatora w modelu DFIG_I

Moc znamionowa P , kW	670	Liczba par biegunów	2
Napięcie znamionowe U , V	690	Poślizg początkowy	2,3%
Współczynnik mocy $\cos \varphi$	0,9	Moment inercji H , kgm ²	58,0134
Sprawność	0,906	Znam. moment napędowy T_m , Nm	2485,94
Maks. moment napędowy, j.w.	1,58	Współczynnik tłumienia D , Nm/(rad/s)	2,53

Prądy $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$ są następnie transformowane do trójfazowego układu związanego z wirnikiem.

Wartość prądu wirnika generatora jest obliczana na podstawie jego parametrów i żądanej mocy oddawanej do sieci: $S_n = P_n + jQ_n$:

$$\begin{aligned} I_{r\alpha} &= \frac{S_n}{U_s} (d_1 \sin \gamma - d_2 \cos \gamma) \\ I_{r\beta} &= -\frac{S_n}{U_s} (d_1 \cos \gamma + d_2 \sin \gamma) \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie: $d_1 = \frac{2}{3} + \frac{X_s}{X_m} \left(\frac{2}{3} - \frac{U_s^2 Q_n}{S_n^2 X_s} \right)$, $d_2 = \frac{X_s}{X_m} \frac{U_s^2 P_n}{S_n^2 X_s}$,

$$\gamma = \omega t + \varphi_n - \theta, \quad \varphi_n = \arctg \frac{Q_n}{P_n},$$

X_m, X_s – reaktancje maszyny,

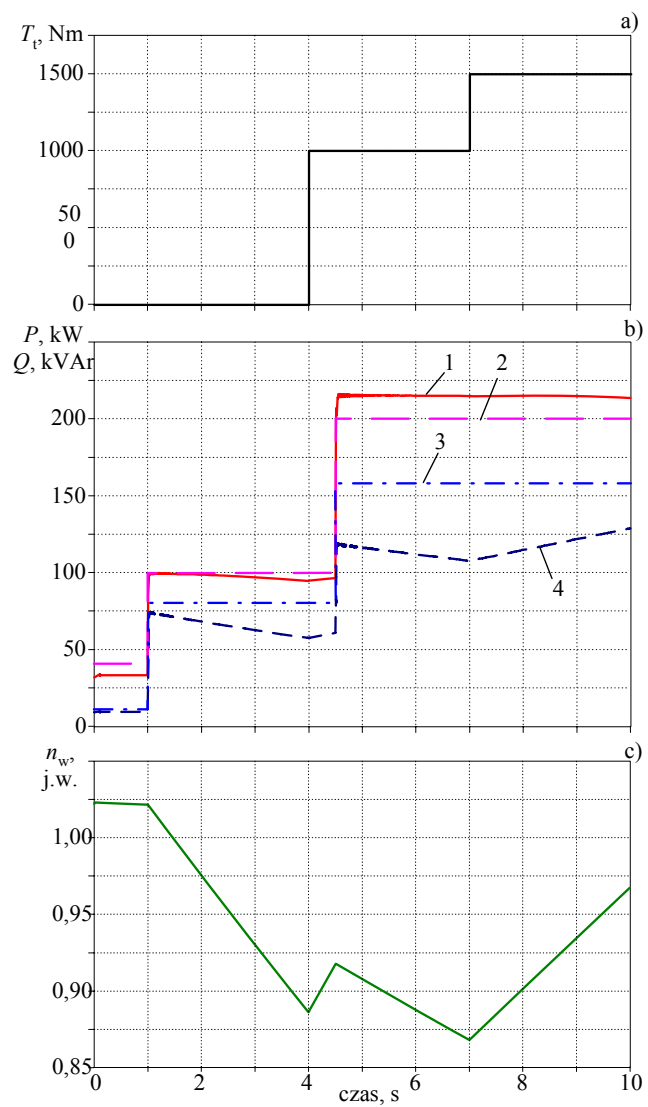
θ – kąt położenia wirnika względem stojana.

Wyniki symulacji

Zadane wielkości do symulacji są następujące: przebieg zmian momentu turbiny wiatrowej T_1 – jak na rys. 5a. Żądana moc elektryczna generatora zmienia się zgodnie z rys 5b: moc czynna P_n – krzywa 1, moc bierna Q_n – krzywa 3.

W trakcie symulacji prędkość obrotowa generatora zmienia się zgodnie z krzywą na rys. 5c (podana w jednostkach względnych). Widać, że na początku prędkość obrotowa była większa od wartości synchronicznej (wartość 1,0). Moment napędowy w tym czasie jest równy zero i przy niewielkim obciążeniu generatora można zauważyć powolne obniżanie się prędkości obrotowej (rys. 5c). W chwili $t=1s$ następuje duży wzrost obciążenia przez zwiększenie mocy czynnej i biernej, co prowadzi do znacznej obniżki prędkości obrotowej, która następnie zwiększa się od czasu $t=4s$, kiedy wzrasta moment napędowy turbiny. Rzeczywista moc generatora zmienia się zgodnie z krzywymi (rys. 5b): 2 (moc czynna) oraz 4 (moc bierna).

Pozostałe przebiegi są dostępne w pliku wyjściowym *DGIG_1.PL4*.



Rys. 5. Wyniki symulacji: moment wiatraka (a), zmiana mocy P , Q (b); prędkość obrotowa wirnika (c)