Integrirani pogonski sistemi

Modeliranje električnih pogonov

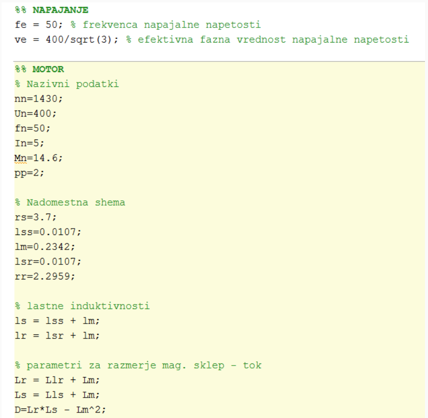
as. dr. Klemen Drobnič
klemen.drobnic@fe.uni-lj.si

8. november 2016

Modeliranje AS v Simulinku

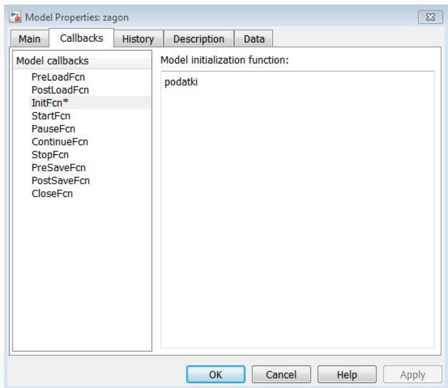
Definiranje konstant, začetnih vrednosti spremenljivk...

Vse konstante in začetne vrednosti spremenljivk definiramo v samostojni datoteki `podatki.m`, ki je v isti mapi kot model. Nato preko `File`→`Model Properties...`→`Callbacks`→`InitFcn` zagotovimo, da se datoteka naloži ob vsakem zagonu modela v Simulinku.



```
%% NAPAJANJE
fe = 50; % frekvenca napajalne napetosti
ve = 400/sqrt(3); % efektivna fazna vrednost napajalne napetosti

%% MOTOR
% Nazivni podatki
nn=1430;
Un=400;
fn=50;
In=5;
Mn=14.6;
pp=2;

% Nadomestna shema
rs=3.7;
lss=0.0107;
lm=0.2342;
lsr=0.0107;
rr=2.2959;

% lastne induktivnosti
ls = lss + lm;
lr = lsr + lm;

% parametri za razmerje mag. sklep - tok
Lr = Llr + Lm;
Ls = Lls + Lm;
D=Lr*Ls - Lm^2;
```

Slika 1: Datoteka `podatki.m`



Slika 2: Klic ob vsakem zagonu

Napetosti na faznih navitjih stroja

1. predpostavka

Simetrična zgradba stroja (enake upornosti in induktivnosti navitij, zamaknjene v prostoru za 120°)

2. predpostavka

Simetrično napajanje (enake amplitude sinusnih napetosti, zamaknjene v času za 120°)

z ničelnim vodnikom

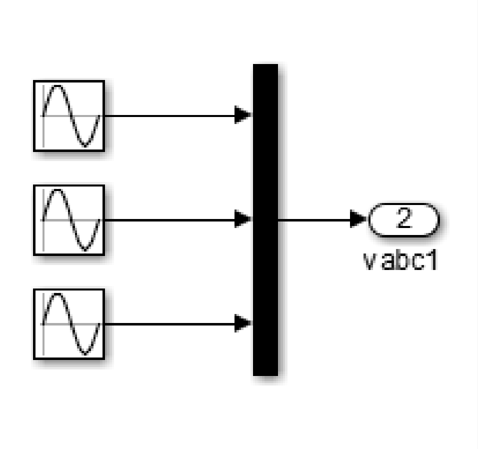
$$u_{as} = U_s \cos(\omega_e t)$$
$$u_{bs} = U_s \cos(\omega_e t - {}^{2\pi}/_{3})$$
$$u_{cs} = U_s \cos(\omega_e t + {}^{2\pi}/_{3})$$

brez ničelnega vodnika

$$u_{as} = U_s \cos(\omega_e t)$$
$$u_{bs} = U_s \cos(\omega_e t - {}^{2\pi}/_{3})$$
$$u_{cs} = -u_{as} - u_{bs}$$

Napetosti na faznih navitjih

Iz knjižnjice (Simulink Library→Sources) izberemo Sine Wave in ga parametriramo (amplituda, fazni kot) v skladu z želenimi faznimi napetostmi ter signal multipleksiramo z Mux (Simulink Library→Signal Routing).

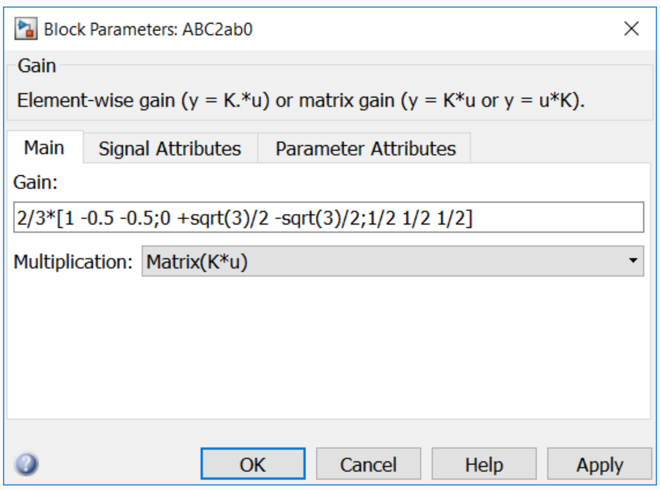


Označimo vse elemente ter z desnim klikom izberemo Create Subsystem from Selection.

Fazna transformacija

Fazno trasformacijo bomo realizirali kot matrično množenje konstantne matrike in vektorja faznih napetosti. Uporabili bomo ameriški dogovor. Vstavimo Gain (Math Operations), izberemo opcijo Matrix(K*u) ter vpišemo elemente matrike.

$$\frac{2}{3}\begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & +\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

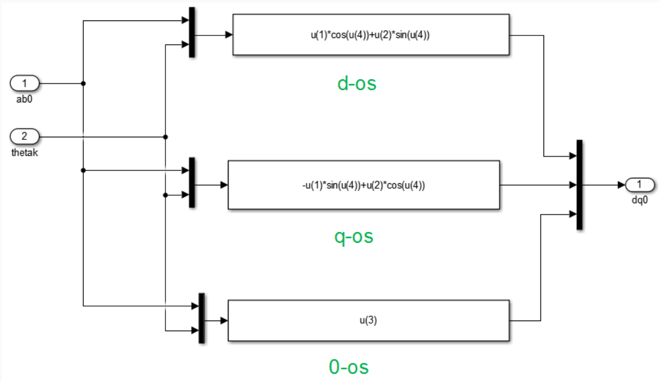


Rotacijska transformacija

Rotacijsko trasformacijo lahko prav tako obravnavamo kot matrično množenje, a z elementi, ki so odvisni od kota zasuka koordinatnega sistema θ. Zato se moramo poslužiti nekoliko drugačnega pristopa kot pri fazni transformaciji.

Vstavimo `Fcn` iz `User-Defined Functions` ter vpišemo transformacijske enačbe.

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



Napetostni enačbi v komponentni obliki

vektorski napetostni enačbi

$$\boldsymbol{u}_s = R_s \boldsymbol{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} + \mathrm{j}\omega\boldsymbol{\psi}_s$$

$$\boldsymbol{u}_r = R_r \boldsymbol{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} + \mathrm{j}(\omega - \omega_r)\boldsymbol{\psi}_r$$

komponentni zapis veličin

$$\boldsymbol{u}_s = u_{ds} + \mathrm{j}u_{qs} \qquad \boldsymbol{u}_r = u_{dr} + \mathrm{j}u_{qr}$$

$$\boldsymbol{i}_s = i_{ds} + \mathrm{j}i_{qs} \qquad \boldsymbol{i}_r = u_{dr} + \mathrm{j}i_{qr}$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = \psi_{ds} + \mathrm{j}\psi_{qs} \qquad \boldsymbol{\psi}_r = \psi_{dr} + \mathrm{j}\psi_{qr}$$

razširjen zapis enačb

$$u_{ds} + \mathrm{j}u_{qs} = R_s(i_{ds} + \mathrm{j}i_{qs}) + \frac{d(\psi_{ds} + \mathrm{j}\psi_{qs})}{dt} + \mathrm{j}\omega(\psi_{ds} + \mathrm{j}\psi_{qs})$$

$$u_{dr} + \mathrm{j}u_{qr} = R_r(i_{dr} + \mathrm{j}i_{qr}) + \frac{d(\psi_{dr} + \mathrm{j}\psi_{qr})}{dt} + \mathrm{j}(\omega - \omega_r)(\psi_{dr} + \mathrm{j}\psi_{qr})$$

komponentni zapis statorske enačbe

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega\psi_{qs}$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega\psi_{ds}$$

komponentni zapis rotorske enačbe

$$u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r)\psi_{qr}$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\psi_{dr}$$

Preoblikovanje napetostne enačbe - spremenljivka stanja

Vsako izmed štirih diferencialnih napetostnih enačb preoblikujemo v obliko primerno za reševanje v Simulinku. Npr. napetostna statorska enačba za q-os

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega\psi_{ds} \quad \rightarrow \quad \frac{d\psi_{qs}}{dt} = u_{qs} - R_s i_{qs} - \omega\psi_{ds}$$

Z integriranjem leve in desne strani dobimo trenutno vrednost magnetnega sklepa ψ_{qs}

$$\psi_{qs} = \int_0^t (u_{qs} - R_s i_{qs} - \omega\psi_{ds})\mathrm{d}t.$$

V Simulinku integriranje realiziramo z `Integrator` (`Continious`).

Preoblikovanje napetostne enačbe - vektorski zapis

Po opravljenih transformacijah je napetostni signal predstavljen v vektorski obliki

$$\begin{pmatrix} u_{ds} & u_{qs} & u_{0s} \end{pmatrix}^T.$$

Če iz vektorja odvzamemo ničelno komponento, lahko za realizacijo statorske oz. rotorske napetostne enačbe v modelu uporabimo 2-D signale

$$\begin{pmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{pmatrix} = \int_0^t \left[\begin{pmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{pmatrix} - R_s \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} - \omega M \begin{pmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{pmatrix} \right] \mathrm{d}t,$$

kjer je

$$M = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ +1 & 0 \end{pmatrix}$$

rotacijska matrika, ki jo realiziramo podobno kot fazno transformacijo.

Odnos med tokovi in magnetnimi sklepi

sklepi odvisni od tokov

$$\psi = f(i)$$

$$\psi_{ds} = L_{ss} i_{ds} + L_m(i_{ds} + i_{dr})$$
$$\psi_{qs} = L_{ss} i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr})$$

$$\psi_{dr} = L_{sr} i_{dr} + L_m(i_{dr} + i_{ds})$$
$$\psi_{qr} = L_{sr} i_{qr} + L_m(i_{qr} + i_{qs})$$

tokovi odvisni od sklepov

$$i = f(\psi)$$

$$i_{ds} = \frac{\psi_{ds} - k_r \psi_{dr}}{L_{sT}}$$
$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs} - k_r \psi_{qr}}{L_{sT}}$$

$$i_{dr} = \frac{\psi_{dr} - k_s \psi_{ds}}{L_{rT}}$$
$$i_{qr} = \frac{\psi_{qr} - k_s \psi_{qs}}{L_{rT}}$$

vpeljane konstante

$$k_s = L_m/L_s \qquad L_{sT} = L_s - L_m^2/L_r$$
$$k_r = L_m/L_r \qquad L_{rT} = L_r - L_m^2/L_s$$

pri čemer velja $L_s = L_{ss} + L_m$ in $L_r = L_{sr} + L_m$.

Izračun tokov

Rezultat diferencialne enačbe so magnetni sklepi, iz katerih nato izračunamo tokove. Z upoštevanjem vektorske definicije, dobimo

$$\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} = \frac{1}{L_{sT}} \left[\begin{pmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{pmatrix} - k_r \begin{pmatrix} \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{pmatrix} \right]$$

$$\begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} = \frac{1}{L_{rT}} \left[\begin{pmatrix} \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{pmatrix} - k_s \begin{pmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{pmatrix} \right]$$

Elektromagnetni navor

Elektromagnetni navor lahko določimo več enakovrednih enačb. Če izhajamo iz

$$M_e = \frac{3}{2} p_p L_m \boldsymbol{i}_r \times \boldsymbol{i}_s$$

je ekvivalenten zapis

$$M_e = \frac{3}{2} p_p L_m \operatorname{Im}\left[\boldsymbol{i}_r^* \boldsymbol{i}_s\right] = \frac{3}{2} p_p L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}).$$

Zato lahko v vektorski obliki zapišemo

$$M_e = \frac{3}{2} p_p L_m \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ +1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} = \frac{3}{2} p_p L_m \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} \cdot M \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix}$$

Vztrajnost

Vse količine so skalarji, zato le preoblikujemo

$$\omega_{rm} = \frac{1}{J_M} \int_0^t (M_e - D\omega_{rm} - M_{br}) \mathrm{d}t$$

pri čemer je $\omega_{rm} = \omega_r / p_p$ mehanska rotorska hitrost.