

TAREA 4.A: MÁQUINA DE INDUCCIÓN EN COORDENADAS DE CAMPO ORIENTADO

ORLANDO TREJO - 12-88982

ABSTRACT. En el presente trabajo se muestran los resultados de la simulación en MATLAB de una Máquina de Inducción (MI) en coordenadas de campo orientado. Este modelo escalar hace uso de una variable teórica, la corriente de magnetización modificada, con un valor inicial de remanencia. Se muestran los resultados referentes al Par Eléctrico, la Velocidad Angular del Rotor y las Corrientes de Fase del Estator y del Rotor, trabajando todas las unidades físicas en el sistema por unidad.

1. Modelo de la Máquina de Inducción en Coordenadas de Campo Orientado

El modelo de la Máquina de Inducción en Coordenadas de Campo Orientado se obtiene al establecer como variable de referencia a la corriente de campo modificada, la cual se define de la siguiente manera:

$$\vec{i}_m = \vec{i}_e + k\vec{i}_r^e$$

Se despeja de esta ecuación la corriente del rotor referida al estator y se sustituye en el modelo de la MI en vectores espaciales (referidos al estator). Posteriormente se elige la constante k de manera tal de realizar simplificaciones cancelando términos, resultando finalmente:

$$\vec{i}_m = \vec{i}_e + \frac{L_r}{M_{er}}\vec{i}_r^e$$

Con esta simplificación, la ecuación de tensión del rotor es independiente de las derivadas de las corrientes de estator. Por otra parte, es posible expresar el par eléctrico en función de la magnitud de la corriente de magnetización modificada y la componente en cuadratura de la corriente del estator. Re resolviendo las ecuaciones, el modelo escalar puede ser expresado con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} p i_{de} &= (L_e - M_{er}^2)^{-1} \{ v_{de} - (R_e + R_r \frac{M_{er}^2}{L_r^2}) i_{de} \} + \omega_m i_{qe} + \frac{i_{qe}^2}{T_r i_m} + R_r \frac{M_{er}^2}{L_r^2} i_m \\ p i_{qe} &= -\omega_m i_{de} - \frac{i_{de} i_{qe}}{T_r i_m} - (L_e - \frac{M_{er}^2}{L_r})^{-1} \{ (R_e + R_r \frac{M_{er}^2}{L_r^2}) i_{qe} - \frac{M_{er}^2}{L_r^2} \omega_m i_m - v_{qe} \} \\ p i_m &= \frac{i_{de} - i_m}{T_r} \\ p \delta &= \omega_m + \frac{i_{qe}}{T_r i_m} \end{aligned}$$

TABLE 1. Parámetros de la Máquina de Inducción a Simular

Parámetro	Valor en Por Unidad
$L_{\gamma e}$	0.1
$L_{\gamma r}$	0.1
L_{er}	0.02
L_e	$L_{\gamma e} + \frac{3}{2}L_{er} = 0.13$
L_r	$L_{\gamma r} + \frac{3}{2}L_{er} = 0.13$
M	$\frac{3}{2}L_{er} = 0.03$
R_e	0.03
R_r	0.03
J	$2H\omega_B = 377$

$$p\omega_m = \frac{1}{J} \left\{ \frac{M_{er}^2}{L_r} i_m \cdot i_{qe} - T_m(\omega_m) \right\}$$

Y la ecuación del par eléctrico:

$$T_e = \frac{M_{er}^2}{L_r} i_m i_q$$

2. Simulación de la MI en Coordenadas de Campo Orientado

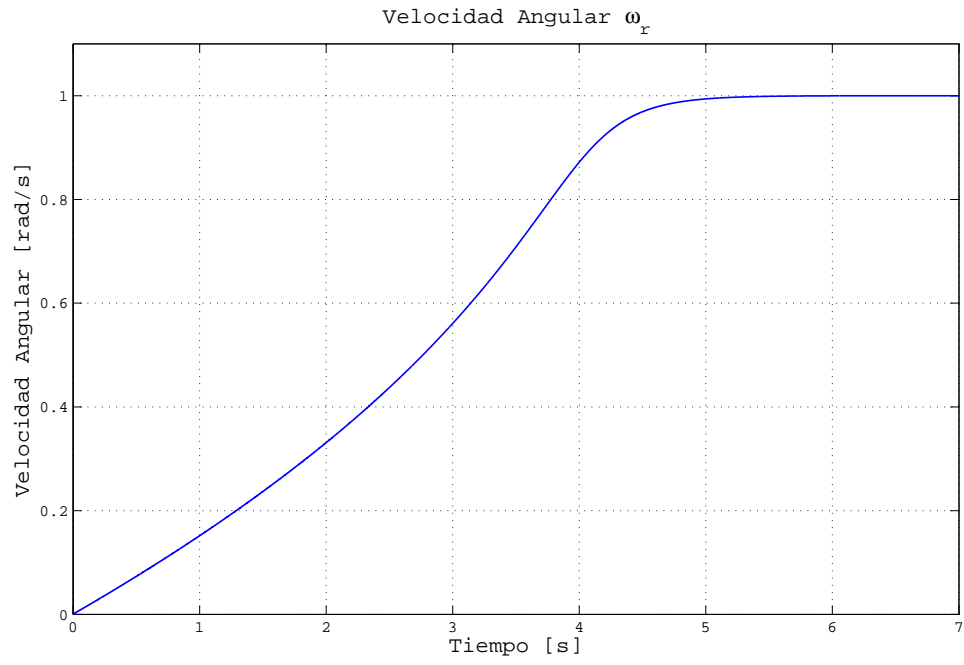
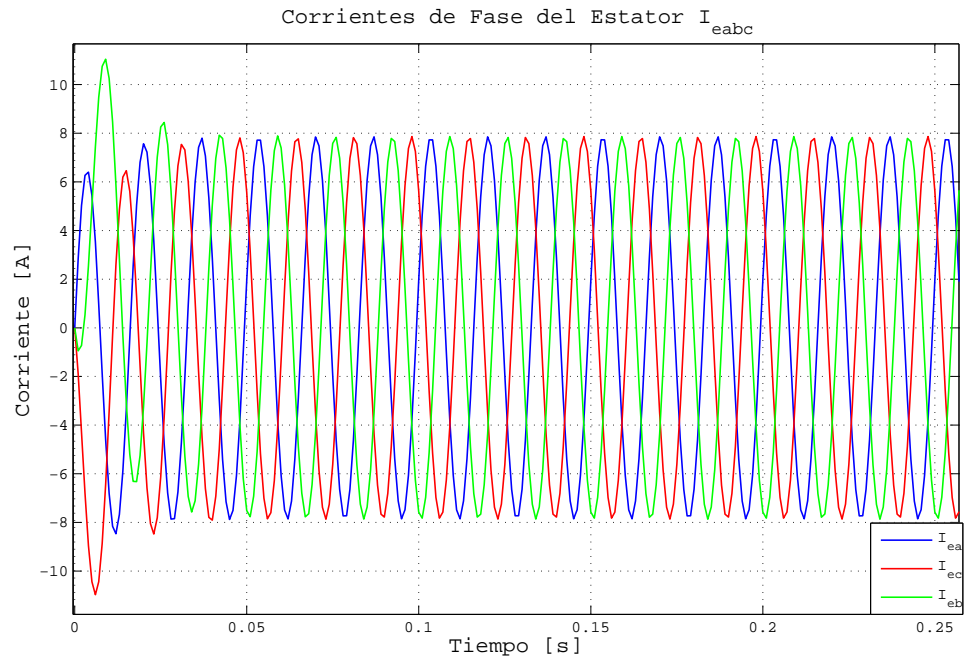
En la tabla 1 se muestran los parámetros intrínsecos de la MI, los cuales serán utilizados en la simulación junto con el modelo escalar mostrado anteriormente.

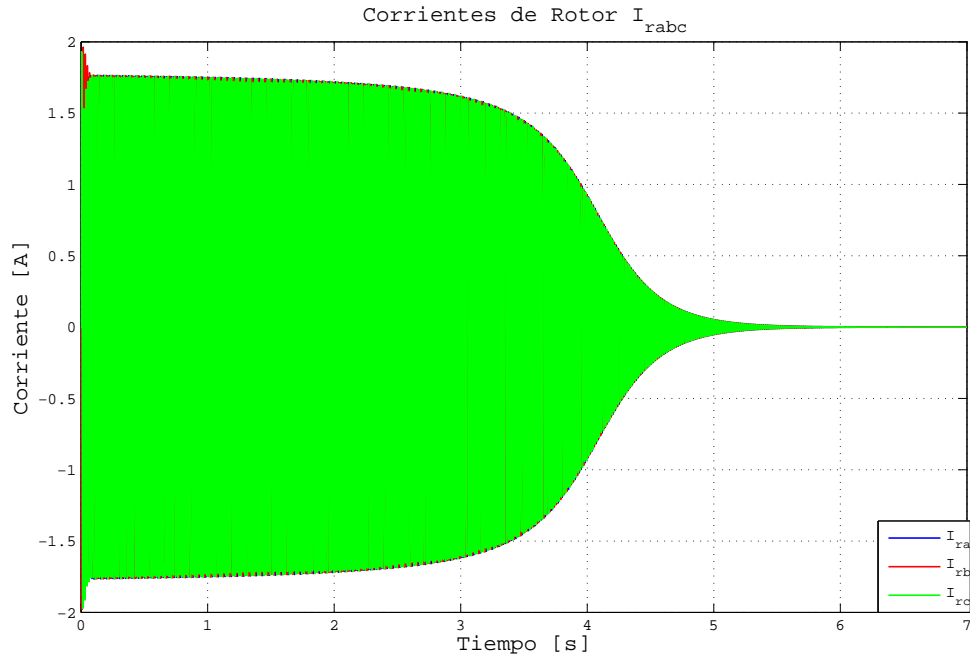
Como el modelo de la MI en coordenadas de campo orientado no admite que la corriente de magnetización modificada i_m sea cero, en el momento inicial esta variable tendrá un valor de remanencia $i_m = 0.05$. De igual forma, se vigila esta variable para que no sea menor a este valor durante la simulación. Bajo estas premisas se realizó un programa en MATLAB para simular la dinámica del arranque de la máquina de inducción, el cual se muestra en el apéndice A.

En la **figura 0.1** se puede observar la curva de la velocidad angular del rotor, se aprecia que la MI alcanza la velocidad sincrónica en un tiempo de 5 segundos.

En la **figura 0.2** se puede apreciar en detalle las formas de onda de la corriente de estator en el arranque, en coordenadas primitivas luego de aplicar la transformada dqo inversa. Luego de estabilizarse, estas corrientes tienen la misma forma de onda hasta el final de la simulación.

En la **figura 0.3** se pueden apreciar las formas de onda de la corriente de rotor, en coordenadas primitivas, luego de aplicar la transformada dqo inversa. Se puede observar que después de que la MI alcanza la velocidad sincrónica, las corrientes de rotor se hacen cero.

FIGURE 0.1. Velocidad Angular ω_r de la MIFIGURE 0.2. Corrientes de Fase de Estator I_{eabc}

FIGURE 0.3. Corrientes de Fase de Rotor I_{rabc}

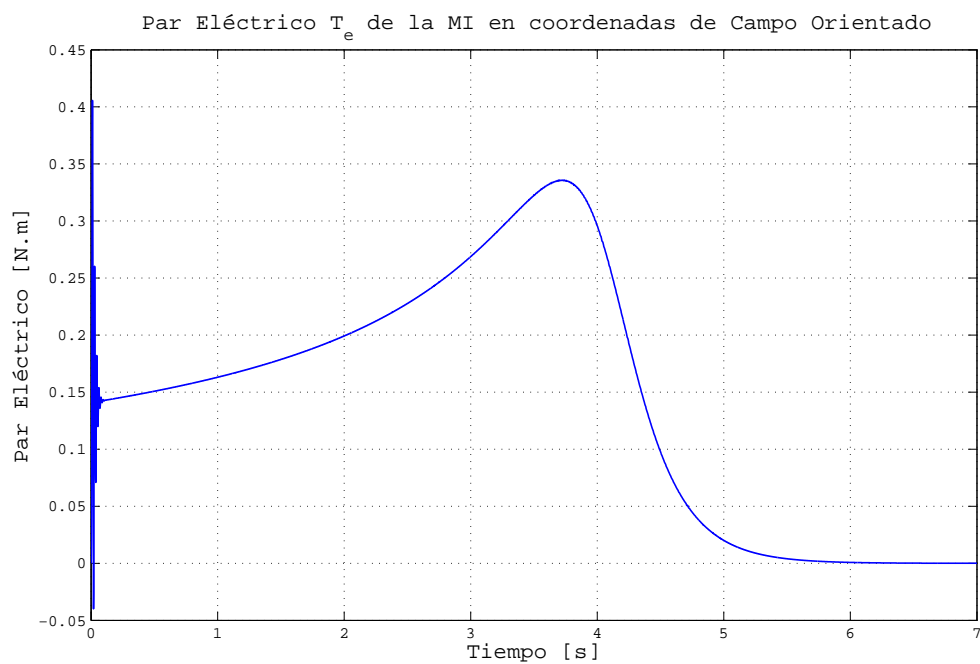
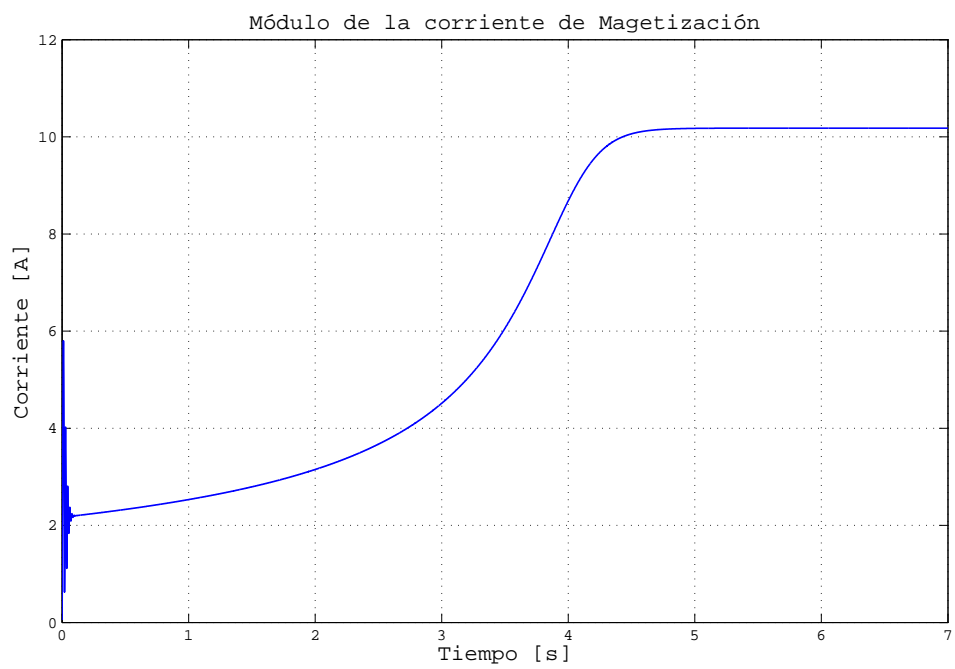
En la **figura 0.4** se observa la forma resultante del par eléctrico T_e , en donde se puede observar que el máximo par se obtiene justo antes de llegar a la velocidad sincrónica y luego va disminuyendo hasta llegar a cero.

En la **figura 0.5** se aprecia el comportamiento del módulo de la corriente de magnetización. Luego de haber alcanzado la velocidad sincrónica, se estabiliza en un valor constante, justo antes de la máquina haber llegado a la velocidad sincrónica.

3. Conclusiones

Se logró simular la MI en MATLAB utilizando el modelo de campo orientado. Es importante colocar un valor inicial de remanencia a la corriente de magnetización para dar sustento al modelo, que en este caso fue suficiente colocar $i_{m0} = 0.05$. Las formas de onda obtenidas concuerdan con lo observado en la teoría [1]. Se puede apreciar además que este modelo permitiría el control independiente de componentes de la corriente de estator, ya sea para la manipulación del par eléctrico y/o del flujo magnético.

Por otra parte, se observa que la variable J influye en el tiempo de establecimiento de la velocidad de rotor de la MI y en el tipo de respuesta, en este caso subamortiguada.

FIGURE 0.4. Par Eléctrico T_e FIGURE 0.5. Par Eléctrico T_e

Apendice A: Programa de Simulación en MATLAB

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % PROGRAMA PRINCIPAL MI EN CAMPO ORIENTADO %
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4
5  global Re Rr Le Lr VS Ler M Tr J
6
7  % Parametros de la MI en por unidad
8  Re=0.03; Rr=0.03; Le=0.13; Lr=0.13; Ler=0.02; M=3*Ler/2; Tr=Lr/Rr; p=2;
9  J=2*2*pi*60/p;
10
11 % Fuente Trifasica Balanceada
12 VS=sqrt(2/3)*[1 exp(1i*2*pi/3) exp(1i*4*pi/3)];
13
14 % Valores Iniciales y Tiempo de Simulacion
15 x0 = [0,0,0.05,0,0]; t0=0; t=0:0.001*377:7*377;
16
17 % Llamada a la Funcion de Integracion Numerica
18 [T,X]=ode45(@maquina_co,t,x0);
19
20 % Calculo de Par
21 Te = (M^2)*X(:,3).*X(:,2)/Lr;
22
23 % Transformacion a Coordenadas Primitivas
24 Ie_co = X(:,1)+1i*X(:,2);
25 Im_co = X(:,3).*exp(1i*X(:,4));
26
27 Iae = sqrt(2/3)*real(Ie_co.*exp(1i*X(:,4)));
28 Ibe = sqrt(2/3)*real(Ie_co.*exp(1i*X(:,4))*exp(1i*4*pi/3));
29 Ice = sqrt(2/3)*real(Ie_co.*exp(1i*X(:,4))*exp(1i*2*pi/3));
30
31 Ir_co = M*(X(:,3)-Ie_co)/Lr;
32 Iar = sqrt(2/3)*real(Ir_co.*exp(1i*X(:,4)));
33 Ibr = sqrt(2/3)*real(Ir_co.*exp(1i*X(:,4))*exp(1i*4*pi/3));
34 Icr = sqrt(2/3)*real(Ir_co.*exp(1i*X(:,4))*exp(1i*2*pi/3));

```

```

1  XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
2  % FUNCION MODELO DE LA MI EN CAMPO ORIENTADO %
3  XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
4
5  function px=maquina_co(t,x)
6
7  global Re Rr Le Lr VS M Tr J
8
9  ide=x(1); iqe=x(2); im=x(3); delta=x(4); wm=x(5);
10
11  % Valor de Remanencia de la corriente de magnetizacion
12  if im < 0.05
13      im = 0.05;
14  end
15
16  % Voltaje de Entrada
17  ve = VS*[cos(t);cos(t-2*pi/3);cos(t-4*pi/3)];
18
19  T = [cos(delta), sin(delta); -sin(delta), cos(delta)];
20
21  vedq = T * [real(ve);imag(ve)];
22  vde = vedq(1); vqe = vedq(2);
23
24  px(1) = ((Le - M*M/Lr)^(-1)) * (vde-(Re+Rr*M*M/(Lr*Lr))*ide) + ...
25          wm*iqe + iqe*iqe/Tr/im + Rr*M*M*im/Lr/Lr;
26
27  px(2) = -wm*ide - ide*iqe/Tr/im - (Le - M*M/Lr)^(-1) * ...
28          ((Re+Rr*M*M/Lr/Lr)*iqe - M*M/Lr*wm*im - vqe);
29
30  px(3) = (ide-im)/Tr;
31
32  px(4) = wm + iqe/(Tr*im);
33
34  px(5) = (M*M/Lr*im*iqe)/J;
35
36  px=px';
37
38  end

```