

파라미터 비동조 조건에서의 유도전동기 간접 벡터제어 시스템 시뮬레이션

이학주* 권성철* 최병윤* 조항신**
 * 한전 전력연구원 ** 충남대학교 전기공학과

A PC Based Simulation of IRFOC System Considering the Parameter Detuning Condition

Lee, Hakju* Kwon, Seongchul* Choi, Byoungyun* Jo, Hangshin**

* Korea Electric Power Research Institute(KEPRI) ** Dept. of Electrical Eng. Chungnam Nat'l University

Abstract - This paper discusses the basic principle of vector control applied to induction motors. A indirect strategy for impressed stator currents control is used for system modeling. IRFOC for induction motor was modelled using "Matlab with Simulink"

IRFOC be applied to 15kW induction motor is simulated in different conditions: step changes in torque at a fixed reference speed, and cyclic change of speed reference. Simulation result considering the variation of stator, rotor resistance includes the response of speed, torque and rotor d-q fluxes.

1. 서 론

벡터제어가 적용된 유도전동기는 자속과 토크를 분리, 독립적으로 제어함으로써 입, 출력관계를 선형화 할 수 있기 때문에 과도특성이 개선되어 빠른 응답특성을 나타나게 된다. 이는 타여자 직류전동기의 제어특성과 동일한 형태이다.

본 논문에서는 파라미터 비동조가 간접 제어시스템에 미치는 영향을 해석하기 위하여 15kW 유도전동기의 간접 벡터제어 시스템을 Matlab/Simulink 환경에서 모델링하여, 일정속도에서 토크의 스텝 변동에서의 시뮬레이션으로 회전자 저항의 변동에 대한 자속, 토크 응답을 통하여 파라미터 비동조에 대한 간접형 벡터제어 시스템의 민감도를 보이고 있다.

2. 본 론

2.1 간접 벡터제어 시스템

벡터제어에서 회전자 자속의 크기와 위치를 직접 측정하거나 자속추정기를 통해 정보를 획득하는 직접 벡터제어와 전동기 회전자속도에 슬립속도를 가산하여 적분한 값으로 자속의 위치를 추정하여 제어하는 간접 벡터제어로 구분된다.

구현이 용이하고, 경제적인 방식의 간접 벡터제어는 슬립을 개루프로 보상하는 전향제어로 파라미터 변화에 민감하다. 즉, 파라미터의 변동은 자속 추정 오차를 발생하여 과도 및 정상상태에서 제어시스템의 성능을 저하시키는 원인이 된다.

본 논문은 전동기 저항의 비동조에 의한 간접 벡터제어의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 그림3의 블록도와 같이 시스템을 구성한다.

그림1은 간접 벡터제어의 페이지도 이다. 여기서, $d^s - q^s$ 는 고정자 축상에 있고, $d^e - q^e$ 축은 동기각속도로 회전하고 있다. 페이지도에서 알 수 있듯이 전동기 벡터의 한 시점에서 q^e 축은 q^s 축에 대하여 변위각 θ_e

떨어진 곳에 위치하고 있으며, 이는 회전자 속도각 θ_r 과 θ_{st} 의 합이다. 또한 회전자 자속은 d^e 축에 일치하고 있으며, 자속성분 전류 i_{ds}^e 와 토크성분 전류 i_{qs}^e 는 각 d,q축에 일치한다.

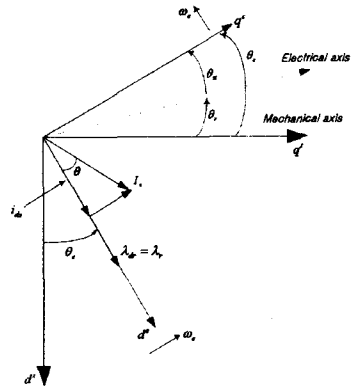


그림 1 간접벡터제어의 Phasor Diagram

회전자 좌표계에서 회전자 방정식은 식(1),(2)이다.

$$\frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} + R_r i_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} + R_r i_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e = 0 \quad (2)$$

회전자 자속은 다음과 같다.

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e \quad (3)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e \quad (4)$$

가 되고 이를 회전자 전류에 대하여 정리하면 식(5),(6)이 된다.

$$i_{qr}^e = \frac{1}{L_r} \lambda_{qr}^e - \frac{L_m}{L_r} i_{qs}^e \quad (5)$$

$$i_{dr}^e = \frac{1}{L_r} \lambda_{dr}^e - \frac{L_m}{L_r} i_{ds}^e \quad (6)$$

위 식을 이용하여 회전자 전류를 소거하면 다음의 식(7),(8)을 구할 수 있다.

$$\frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{qr}^e - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{qs}^e + \omega_{sl} \lambda_{dr}^e = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{dr}^e - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{ds}^e + \omega_{sl} \lambda_{qr}^e = 0 \quad (8)$$

완전한 벡터제어를 수행하기 위하여 다음을 가정한다.

$$\lambda_{qr}^e = \frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} = 0 \quad (9)$$

$$\lambda_{dr}^e = \lambda_r^e = const \quad (10)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} = 0 \quad (11)$$

식(7),(8) 에 벡터제어 조건인 식(9), (10), (11)을 대입하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{\lambda_r^e L_r} i_{qs}^e \quad (12)$$

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d\lambda_r^e}{dt} + \lambda_r^e = L_m i_{ds}^e \quad (13)$$

한편, 고정자 자속 관계식은 다음과 같다.

$$\lambda_{qs}^e = L_m i_{qr}^e + L_s i_{qs}^e \quad (14)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_m i_{dr}^e + L_s i_{ds}^e \quad (15)$$

식(14)와 (15)를 이용하여 다음의 관계식을 구한다.

$$\lambda_{qs}^e = (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) i_{qs}^e + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qr}^e \quad (16)$$

$$\lambda_{ds}^e = (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) i_{ds}^e + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \quad (17)$$

또한, 발생 토오크를 고정자 전류와 고정자 자속을 이용하여 표현하면 식(18)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{qs}^e \lambda_{ds}^e - i_{ds}^e \lambda_{qs}^e) \quad (18)$$

위 식의 고정자 자속을 회전자 자속으로 대체하면 토오크 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{qs}^e \lambda_{dr}^e - i_{ds}^e \lambda_{qr}^e) \quad (19)$$

위 관계식을 기초로 Matlab/Simulink를 이용하여 간접벡터제어 시스템을 구성하였으며, 전류제어형 인버터 구동 유도전동기의 간접 벡터제어 시스템을 모델링하고 있지만, 연산속도를 향상 시키기 위하여 PWM 인버터 모델은 PWM 출력전압의 기본파 성분만을 고려하여 모델링 하였다.

그림2는 간접 벡터제어의 Simulink 모델이다. PI 제어기는 속도 오차를 0으로 하기 위하여, $\frac{30s+7}{s}$ 로 설계하였고, FOC블럭의 k는 회전자 저항의 추정 비율이다.

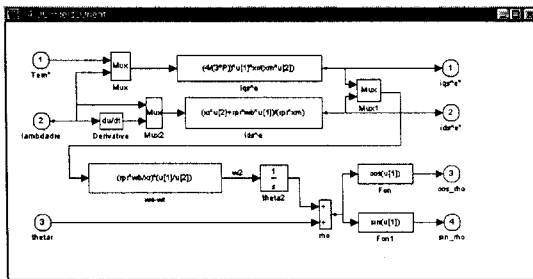


그림 2 Field Oriented Control Block

2.2 시스템 시뮬레이션

15kW 유도전동기의 회전자 저항의 변동에 의한 전동기 파라미터의 영향을 관찰하기 위하여 속도와 q하 토오크의 지령값을 그림3과 같이 ① 일정 속도 지령치에서 부하 토오크의 스텝 변화 즉, 정격부하, ② 속도 지령치의 주기적인 변화 즉, 무부하 상태로 나누어 두가

지 경우를 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 전동기 파라미터는 부록1과 같고, Simulink의 ode15s, 스텝의 최대 및 최소크기를 각각 0.01, $1e^{-4}$ 로 설정하여 2초 동안 시뮬레이션 하였다. 회전자 저항의 추정비율(k)은 $\pm 50\%$ 로 설정하였다.

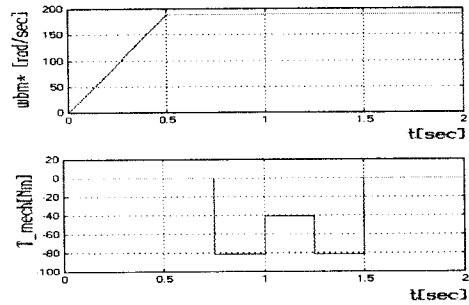


그림 3 정격부하상태의 속도, 토오크 지령치

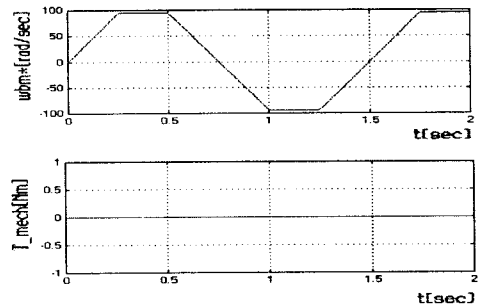


그림 4 무부하상태의 속도, 토오크 지령치

2.3 시뮬레이션 결과

그림5,6은 회전자의 변동조건 $\pm 50\%$ 인 정격부하 상태의 토오크응답, d-q성분의 회전자 자속이다. 그림7, 8은 무부하상태의 토오크 및 회전자 자속 시뮬레이션 파형이다.

시뮬레이션은 전동기와 제어기의 회전자 저항이 동조된 경우 속도 및 토오크 응답이 바람직한 특성을 보이고 있으나, 제어기의 저항이 회전자의 150%로 설정된 경우는 자속이 충분히 발생되지 못하여 기동 토오크가 작다. 하지만, 전동기 속도는 폐루프 제어로 회전자자속 및 토오크의 과도적인 진동에 관계없이 정속도 운전을 한다. 또한, 50%로 설정된 경우는 과도상태에서 과도한 자속이 발생하여 정격보다 큰 토오크가 발생하게 된다.

2.3.1 정격부하 상태의 변동조건 결과

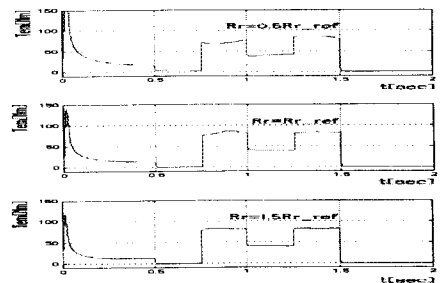


그림 5 정격부하 상태의 토오크

[참고 문헌]

[1] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery using MATLAB/SIMULINK", 1998.
 [2] The MATHWORKS Inc, "SIMULINK User's guide", Ver3.0, 1999.
 [3] D. Fodor와 3인, "IFO Control Performance Considering Parameters Detuning and Rotor Speed Error", Conf. of ISIE, Vol.2, pp.719~725, 1994.
 [4] Rajan Mathew와 2인, "Vector Control Technique for Induction Motors", Conf. of PEDS, Vol.2, pp.813~818, 1995.
 [5] Tendor Pana etc "Simultaneous Speed Estimation and Rotor Flux Indentification for Sensorless Induction Motor Drives" Japan Industry Applications Society Conference(JIASC'94) pp.135~140, 1994.

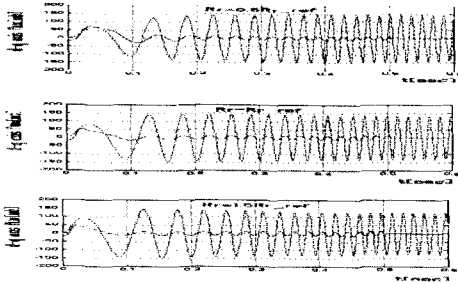


그림 6 정격부하 상태의 회전자 자속

2.3.2 무부하상태의 비동조 결과

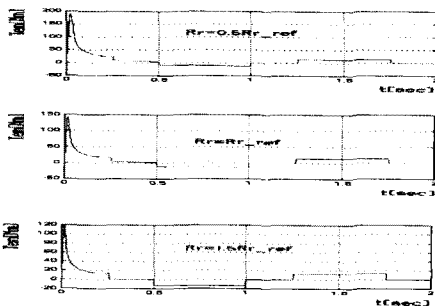


그림 7 무부하상태의 토크

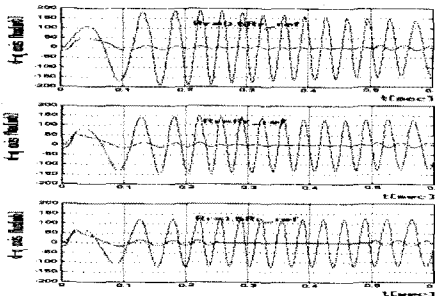


그림 8 무부하상태의 회전자 자속

그림5,6은 정격부하상태에서의 회전자 저항 동조 및 비동조의 토크 및 회전자 자속 파형이다.

그림7,8은 무부하상태에서의 회전자 저항 동조 및 비동조의 토크 및 회전자 자속 파형이다.

3. 결 론

전동기와 회전자 저항과 간접 제어기의 회전자 저항 비동조에 의한 시스템의 영향을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 회전자 저항의 비동조에 의하여 회전자 자속과 토크에 영향을 미치지만, 속도제어 대한 영향은 상대적으로 적어 무시할 수 있다.

하지만, 토크 제어의 경우는 토크의 감쇄 진동이나 지령치에 대한 토크 오차가 발생한다. 즉, 전동기의 회전자 저항은 온도에 의하여 변하고 인덕턴스는 자기포화의 영향으로 비선형을 가지므로 적용된 제어대상의 목적에 의하여 이들의 변화에 대한 영향을 무시할 수 없게 된다.

[Appendix]

1. 전동기 정수(M-file)

```

Sb = 20*746; % rating in VA
Vrated = 220; % rated line-to-line voltage in V
pf = 0.853; % rated power factor
Irated = Sb/(sqrt(3)*Vrated*pf); % rated rms current
P = 4; % number of poles
frated = 60; % rated frequency in Hz
k=1.0;
wb = 2*pi*frated;% base electrical frequency
we=wb;
wbm = 2*wb/P; % base mechanical frequency
Tb = Sb/wbm; % base torque
Zb=Vrated*Vrated/Sb; %base impedance in ohms
Vm = Vrated*sqrt(2/3); % magnitude of phase voltage
Vb=Vm;
Tfactor = (3*P)/(4*wb); % factor for torque expression
srated=0.0287; % rated slip
Nrated = 1748.3; % rated speed in rev/min
wmrated=2*pi*Nrated/60; % rated speed in rad/sec
Trated = Sb/wmrated; % rated torque
iasb= 49.68; % rated rms phase current
rs = 0.1062; % stator wdg resistance in ohms
xls = 0.2145; % stator leakage reactance in ohms
xplr = xls; % rotor leakage reactance in ohms
xm = 5.8339; % stator magnetizing reactance in ohms
rpr = 0.0764; % referred rotor wdg resistance in ohms
xM = 1/(1/xm + 1/xls + 1/xplr);
J = 2.8; % rotor inertia in kg m2
H = J*wbm*wbm/(2*Sb); % inertia constant in sec
Domega = 0; % rotor damping coefficient
    
```

2. 속도 및 토크 지령값(M-file)

```

tstop = 2.0;
time_wref=[0 0.5 tstop];
speed_wref=[0 wbm wbm];
time_tmech=[0 0.75 0.75 1.0 1.0 1.25 1.25 1.5 1.5 2];
tmech_tmech=[0 0 -Trated -Trated -Trated/2 -Trated/2
-Trated -Trated 0 0];

time_wref=[0 0.25 0.5 1.0 1.25 1.5];
speed_wref=[0 wbm/2 wbm/2 -wbm/2 -wbm/2 0];
time_tmech=[0 tstop];
tmech_tmech=[0 0];
    
```