

## 약계자영역에서 유도전동기 고정자자속기준제어의 파라미터 비동조 영향 분석

(Analysis on Parameter Detuning of Induction Motor Drives in Field Weakening Region)

신명호\*

(Myoung-Ho Shin)

### Abstract

The selection of flux level in the maximum torque control of stator flux-oriented induction motor drives in the field weakening region is dependent on stator resistance and inductances. This paper presents parameter detuning effects of stator flux-oriented control drives in the field weakening region. The detuning effects of stator resistance and rotor leakage inductance are analyzed. The decrease of torque and the flux control lost by the detuning of inductance are shown in the simulation results.

Key Words : Induction Motor, Parameter Detuning, Stator Flux-Oriented Control, Maximum Torque Control

### 1. 서 론

3상 유도전동기의 고정자자속기준제어에서 벡터제어를 위한 고정자자속은 역기전력을 적분하여 구하는데, 고정자자항에 의한 전압강하가 저속영역을 제외한 속도영역에서 역기전력에 비해서 무시할 정도로 작기 때문에 정확한 고정자자속의 추정이 이루어지므로 파라미터의 변동에 강인한 것으로 알려져 있다[1]. 그러나 고정자자속기준제어에서 자속 이외의 다른 변수도 다양한 파라미터에 의존하고 있으므로 파라미터의 비동조에 의해서 영향을 받을 수 있음에도 불구하고 이에 대한 분석은 거의 이루어지지 않았다.

한편 참고문헌 [2]에서 고정자자속기준제어의 약계자영역에서의 최대토크운전시 기준자속 선정에 관한 방법이 발표되었다. 이 방법에서 전압제한조건과 토크제한조건을 동시에 고려한 최대토크를 위한 기준자속의 선정은 고정자저항과 인덕턴스에 의존하는데 파라미터의 비동조에 의한 영향의 분석이 이루어진 바가 없다.

유도전동기의 고정자저항은 주변온도 및 운전조건에 따라 고정자권선의 온도가 변화하게 되므로 고정자저항은 쉽게 비동조가 이루어질 수 있다. 인덕턴스는 고정자누설인덕턴스, 자화인덕턴스, 회전자누설인덕턴스로 크게 나눌 수 있다. 고정자누설인덕턴스는 고정자의 구조에 의해서 영향을 받는다. 고정자의 슬롯은 권선의 시행을 위하여 개슬롯의 구조를 하고 있으며, 따라서 고정자 누설자속의 경로는 공기를 포함하므로 고정자누설인덕턴스는 운전조건에 의해서 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 유지한다. 또한 자

\* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 부교수  
Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754  
E-mail : mhshin@snut.ac.kr  
접수일자 : 2010년 6월 14일  
1차심사 : 2010년 6월 17일  
심사완료 : 2010년 7월 9일

회전토크는 주자속이 포화되지 않는다면 거의 변화가 없는 값이다. 일반적으로 주자속이 포화되지 않도록 기기를 설계하므로 자화인덕턴스도 거의 일정하다고 할 수 있다. 그러나 회전자누설인덕턴스는 운전조건에 따라서 변화할 수 있다. 회전자의 슬롯은 자속의 고조파 저감을 통한 저소음화를 위하여 보통 폐슬롯의 구조로 설계한다. 회전자전류가 작을 경우 회전자의 누설자속은 회전자의 폐슬롯의 철심을 통하여 흐르나 회전자전류가 증가하면 회전자누설자속은 철심의 포화 때문에 철심을 통하여 흐르지 못하게 되므로 회전자누설인덕턴스는 감소하게 된다[3]. 참고문헌 [3]에 의하면 약계자영역에서 회전자누설인덕턴스는 일정토크영역의 값에 비해서 약 60[%] 정도로 감소하는 것으로 나타나 있다.

본 논문에서는 약계자영역에서 최대토크제어시 기준자속의 선정에 영향을 미치는 고정자저항과 회전자누설인덕턴스의 비동조 효과에 대해서 분석한다. 고정자저항 및 회전자누설인덕턴스의 비동조에 의해서 토크가 감소하며, 제어가 불가능해짐을 시뮬레이션 결과를 통해서 제시한다.

## 2. 약계자영역에서 최대토크운전[2]

참고문헌 [2]에서 제안한 약계자영역에서의 최대토크운전은 다음과 같다. 3상 유도전동기의 고정자자속 기준제어에서 제어의 안정을 위한 토크제한조건  $T_{e\_t}$ 는 식 (1)과 같다[1].

$$T_{e\_t} = \frac{3}{4} P \lambda_{ds} i_{qs} = \frac{3}{4} P \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^2 \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ =누설계수(=1-L<sub>m</sub><sup>2</sup>/L<sub>s</sub>L<sub>r</sub>), P=극수, L<sub>s</sub>=고정자자기인덕턴스이다.

$T_{e\_t}$ 는 주어진 자속  $\lambda_{ds}$ 에서 전동기가 발생할 수 있는 최대토크를 나타내며,  $T_{e\_t}$ 를 초과하는 토크지령을 발생시키면 시스템이 불안정해져서 제어가 불가능해진다[1].

식 (2)는 전압제한조건  $T_{e\_v}$ 를 나타내고 있다.

$$T_{e\_v} = \frac{3}{4} P \lambda_{ds} i_{qs} = \frac{3}{4} P \frac{V_{sm} \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{ds}^2}{R_s} \quad (2)$$

여기서  $\omega_e$ =동기각속도,  $V_{sm}$ =모터에 가해지는 최대전압이다.

$T_{e\_v}$ 는 모터에 가해지는 최대전압을 고려했을 때 모터에서 발생할 수 있는 최대토크를 나타낸다. 만일 식 (2)의 전압제한조건을 초과하도록 토크지령을 발생시키면 전압여유가 부족하기 때문에 전류제어는 이루어지지 못하며, q축 전류는 전압여유를 고려한 지점으로 감소하게 된다[2].

그림 1은 전압 및 토크제한조건을 고려한 최대토크를 나타낸다.  $T_{e\_v\_m}$ 은 전압제한조건을 고려한 최대점을 연결한 직선을 나타낸다.  $\omega_e$ 가  $T_{e\_v\_m}$ 과  $T_{e\_t}$ 가 만날 때의 동기속도인  $\omega_c$ 보다 작으면 최대토크는 H, I에서 발생되며,  $\omega_e$ 가  $\omega_c$ 보다 크면 최대토크는 토크제한에 의해서 제한되는 점, 즉 K, L에서 발생함을 나타내고 있다.

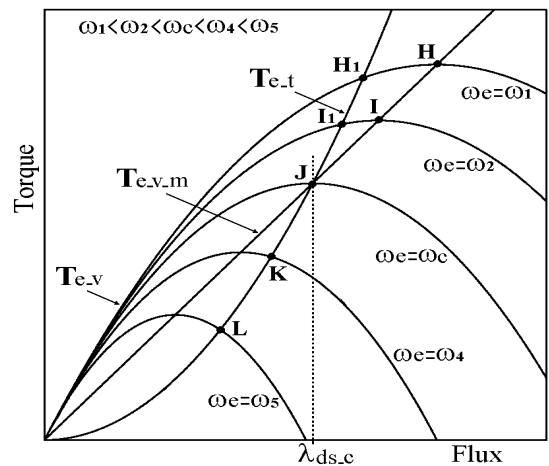


그림 1. 전압 및 토크제한조건을 고려한 최대토크  
Fig. 1. Maximum torque by voltage and torque limit

식 (3)은  $\omega_e$ 가  $\omega_c$ 보다 작은 경우의 최대토크를 위한 기준자속을 나타낸다. 전압제한조건을 고려한 최대점에서의 자속을 구한 것으로서 고정자저항 및 인덕턴스의 파라미터를 포함하고 있지 않아서 파라미터 비동조의 영향이 없음을 알 수 있다.

$$\lambda_{ds\_opt\_1}^* = V_{sm}/(2\omega_e) \quad (3)$$

식 (4)는  $\omega_e$ 가  $\omega_c$ 보다 큰 경우의 최대토크를 위한 기준자속을 나타낸다. 고정자저항 및 인덕턴스에 의존함을 알 수 있다.

$$\lambda_{ds\_opt\_2}^* = \frac{2\sigma L_s V_{sm}}{R_s - \sigma R_s + 2\sigma L_s \omega_e} \quad (4)$$

그림 2는 고정자자속기준제어의 블록도를 나타내고 있다. 고정자자속은 역기전력을 적분해서 구하며 [4]에서 제안한 programmable low pass filter를 이용해서 구한다.

### 3. 시뮬레이션에 의한 파라미터 비동조 영향 분석

파라미터 비동조의 영향을 해석하기 위하여 ACSL을 이용하여 그림 2의 고정자자속기준제어 드라이브의 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 본 논문에서 사용한 3상 유도전동기의 파라미터를 나타내고 있다.

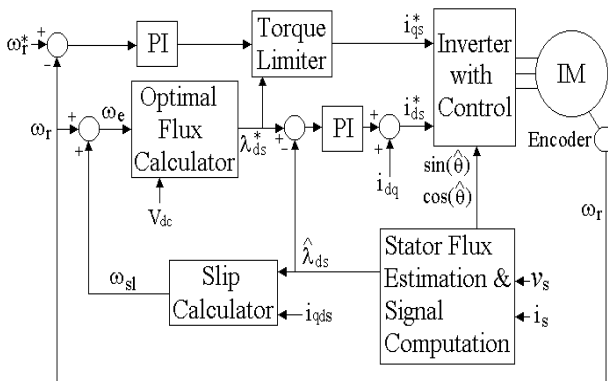


그림 2. 고정자자속기준제어 블록도  
Fig. 2. Block diagram of stator flux-oriented control

#### 3.1 고정자저항 비동조 영향 분석

저항은 온도에 따라 변화하며 상온에서의 저항과 정격에서의 저항은 온도상승에 의해서 대략 20[%] 정도

표 1. 3상 유도전동기 파라미터  
Table 1. 3-Phase induction motor parameters

5[hp], 220[V], 4[poles]		
정격자속	0.4	[Wb]
정격전류(peak)	18.2	[A]
고정자저항	1.26	[ohm]
회전자저항	0.2	[ohm]
자화인덕턴스	50	[mH]
고정자누설인덕턴스	4.7	[mH]
회전자누설인덕턴스	4.7	[mH]

의 차이가 발생한다. 온도상승을 고려하지 않았을 경우 제어기의 저항이 모터의 저항보다 20[%] 정도 낮게 비동조가 되며, 또는 온도상승을 고려하여 제어기의 저항을 정격에서의 저항으로 입력하였으나 모터가 운전을 시작하는 순간에 모터의 온도는 상온이므로 제어기의 저항이 모터의 저항보다 높은 비동조가 발생하게 된다. 본 논문에서는 제어기의 고정자저항이 모터의 저항보다 낮은 경우에 대해서 분석하였다. 그림 3은 표 1의 유도전동기를 이용하여 구한 전압제한 및 토크제한을 나타내고 있다. 동기각속도  $\omega_e$ 는 600[rad/sec]이며, 제어기의 고정자저항은 1[Ω]이며, 모터의 저항은 1.26[Ω]으로 비동조가 된 경우이다. 제어기의 토크지령은 토크제한조건에 의해서 점 A로 제한되며 기준자속은  $\lambda_1$ 이 된다. 그러나 실제 모터의 전

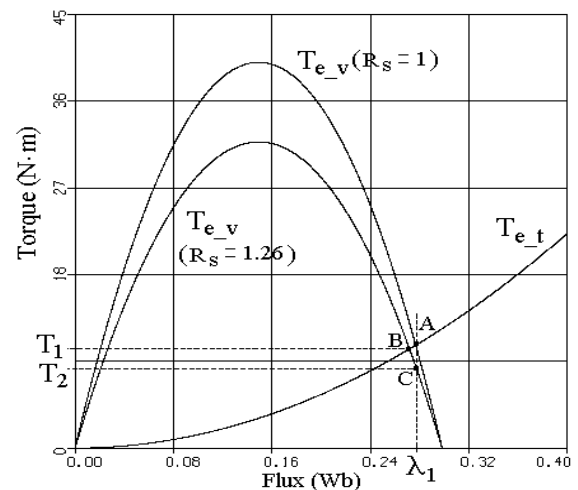


그림 3. 고정자저항 비동조시의 전압제한 및 토크제한  
Fig. 3. Voltage limit and torque limit with  $R_s$  detuning

압제한조건은 점 A가 아니고 점 C이므로 전압여유가 부족해서 토크는 감소하게 되어서 결국  $T_2$ 의 토크를 출력하게 된다. 만일 저항이 비동조되지 않았다면 모터는 점 B에서  $T_1$ 의 토크를 발생하게 되므로 결국 고정자저항의 비동조에 의해서 토크는  $T_1$ 에서  $T_2$ 로 감소하게 된다.

그림 4는 고정자저항이 비동조된 경우에 최대토크 제어에 의한 발생토크를 나타내고 있다. 속도지령은 1,000[rpm]에서 5,000[rpm]으로 증가시켰으며 부하는 0[N.m]이다.  $T_e$ (tuned)는 제어기의 고정자저항과 모터의 고정자저항이 모두 1.26[Ω]인 경우의 토크를 나타내며,  $T_e$ (detuned)는 제어기의 고정자저항은 1[Ω], 모터의 고정자저항은 1.26[Ω]으로 비동조된 경우의 발생토크를 나타내고 있다. 그림 3에서 얻은 결과와 같이 비동조에 의한 토크의 저감이 발생하고 있음을 알 수 있다.

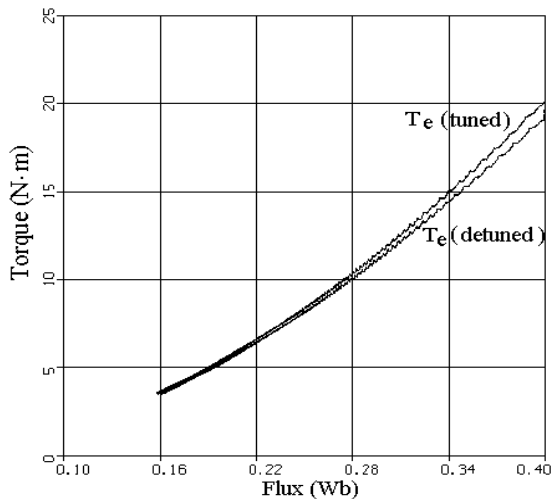


그림 4.  $R_s$  비동조에 의한 토크 감소  
Fig. 4. Torque decrease by detuning of  $R_s$

### 3.2 회전자누설인덕턴스 비동조 영향 분석

그림 5는  $\omega_e$ 는 600[rad/sec]일 때의 전압제한  $T_{e\_v}$ 와 회전자누설인덕턴스  $L_{lr}$ 의 변화에 따른 토크제한  $T_{e\_t}$ 를 나타내고 있다.  $T_{e\_t\_1}$ 은  $L_{lr}$ 이 0.00235[H](정격의 50[%])일 때,  $T_{e\_t\_2}$ 는  $L_{lr}$ 이 0.0047[H]일 때,

$T_{e\_t\_3}$ 은  $L_{lr}$ 이 0.00705[H](정격의 150[%])일 때의 토크제한이다.

제어기의  $L_{lr}$ 이 0.0047[H]이며, 모터의  $L_{lr}$ 이 0.00235[H]로 비동조된 경우를 살펴보면, 제어기의 토크는 점 E로 제한이 되어서 지령자속은  $\lambda_4$ 가 된다. 그런데 모터의 토크제한은  $T_{e\_t\_1}$ 이므로, 점 E는 모터의 토크제한 내에 놓이게 되므로 시스템은 불안정하게 되지 않고 원활한 제어가 수행된다. 그러나 모터는 점 D에서  $T_3$ 의 토크를 발생시킬 수 있으나  $L_{lr}$ 의 비동조 때문에  $T_3$ 보다 작은 토크  $T_4$ 를 출력하게 된다. 따라서 모터의 능력을 충분히 활용하지 못하는 문제가 발생한다.

다음에 제어기의  $L_{lr}$ 이 0.0047[H]이며, 모터의  $L_{lr}$ 이 0.00705[H]로 비동조된 경우를 살펴보면, 제어기의 토크지령은 점 E가 된다. 그러나 모터의 토크제한은  $T_{e\_t\_3}$ 이므로 점 E는 모터의 토크제한을 벗어난 영역에 놓이게 된다. 따라서 제어기는 불안정하게 되어서 원활한 제어가 수행되지 못하게 된다.

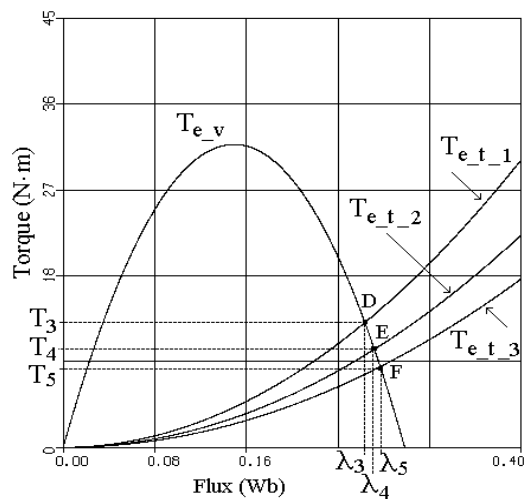


그림 5.  $L_{lr}$  변화 시 토크제한  
Fig. 5. Torque limit with various  $L_{lr}$

그림 6은 모터의  $L_{lr}$ 은 0.00235[H]이나 제어기의  $L_{lr}$ 이 0.0047[H]로 비동조되어 있는 경우의 제어결과이다. 그림 7은 모터의  $L_{lr}$ 은 0.00235[H]이며 제어기의  $L_{lr}$ 이 0.00235[H]로 동조되어 있는 경우의 제어결과이다

다. 제어기보다 모터의  $L_{lr}$ 이 작도록 비동조되면 그림 7과 비교한 그림 6의 결과처럼 모터의 토크를 충분히 활용하지 못하게 되어서 속도가 늦게 가속되고 있음을 알 수 있다.

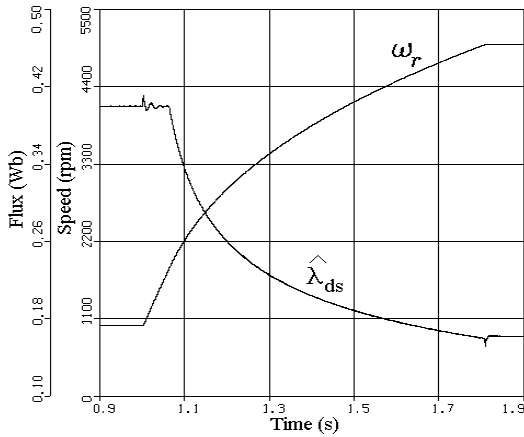


그림 6. 모터  $L_{lr}=0.00235[H]$ , 제어기  $L_{lr}=0.0047[H]$ 일 때의 최대토크운전 결과  
 Fig. 6. Maximum torque control(motor  $L_{lr}=0.00235[H]$ , controller  $L_{lr}=0.0047[H]$ )

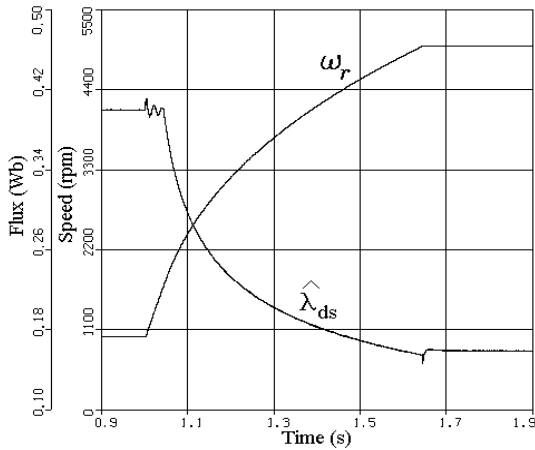


그림 7. 모터  $L_{lr}=0.00235[H]$ , 제어기  $L_{lr}=0.00235[H]$ 일 때의 최대토크운전 결과  
 Fig. 7. Maximum torque control(motor  $L_{lr}=0.00235[H]$ , controller  $L_{lr}=0.00235[H]$ )

그림 8은 모터의  $L_{lr}$ 은  $0.00705[H]$ 이나 제어기의  $L_{lr}$ 이  $0.0047[H]$ 로 비동조되어 있는 경우의 제어결과이다. 제어기에 의해 출력되는 토크지령은 모터의 토크

제한조건을 벗어난 영역에 놓이게 되므로 그림처럼 불안정해져서 제어가 원활하게 수행되지 못하게 된다.

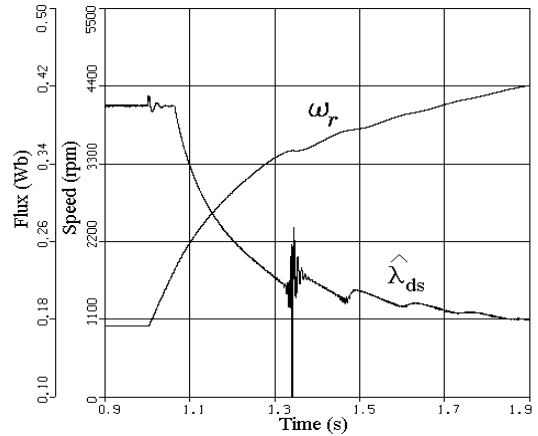


그림 8. 모터  $L_{lr}=0.00705[H]$ , 제어기  $L_{lr}=0.0047[H]$ 일 때의 최대토크운전 결과  
 Fig. 8. Maximum torque control(motor  $L_{lr}=0.00705[H]$ , controller  $L_{lr}=0.0047[H]$ )

#### 4. 결 론

본 논문에서는 3상 유도전동기의 약계자영역에서 최대토크운전시 고정자자속 및 회전자누설인덕턴스의 비동조에 의한 영향을 분석하였다. 시뮬레이션결과 고정자저항의 비동조에 의해서 토크의 저감이 발생함을 확인하였다. 회전자누설인덕턴스의 비동조의 경우 제어기의 회전자누설인덕턴스의 값이 모터보다 큰 경우 제어의 불안정성은 발생하지 않았으나 모터가 발생할 수 있는 토크를 최대로 출력하지 못하는 문제를 가지고 있음을 알 수 있었으며, 제어기의 회전자누설인덕턴스의 값이 모터보다 작은 경우에는 모터의 토크제한조건을 만족하지 못하여 제어가 불가능하게 되는 현상이 발생함을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 결과를 바탕으로 향후에 파라미터 동조를 고려한 제어기법을 적용한다면 보다 우수한 제어성능을 얻을 것으로 사료된다.

#### References

- [1] X. X. Xu, R. D. Doncker, and D. W. Novotny, "A stator flux oriented induction machine drive," in Proc. IEEE PESC'88, 1988, pp. 870-876.1992.
- [2] M.-H. Shin, D.-S. Hyun, and S.-B. Cho "Maximum Torque Control of Stator-Flux-Oriented Induction Machine Drive in the Field-Weakening Region, IEEE Trans. IA, vol. 38, no.1, pp.117-122, 2002.
- [3] M.-H. Shin and D.-S. Hyun, "Online Identification of Stator Transient Inductance in Rotor-Flux-Oriented Induction Motor Drive", IEEE Trans. IE, vol. 54, no.4, pp.2018-2023, 2007.
- [4] M.-H. Shin, D. S. Hyun, S. B. Cho, and S. Y. Choe, An Improved Stator Flux Estimation for Speed Sensorless Stator Flux Orientation Control of Induction Motors, IEEE Trans. PE, vol. 15, no. 2, pp. 312-318, 2000.

◇ 저자소개 ◇



**신명호**(申明昊)

1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업.  
1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
1991~1996년 삼성종합기술원 근무(선임 연구원). 2002년 8월~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 부교수.