

일정토크영역에서 유도전동기 고정자자속기준제어의 파라미터 비동조 영향 분석

(Analysis on Parameter Detuning of Induction Motor Drives in Constant Torque Region)

신명호*

(Myoung-Ho Shin)

Abstract

It is well known that the stator-flux-oriented induction motor drives are not dependent on parameter detuning in constant torque region except low speed range. This paper presents parameter detuning effects of stator-flux-oriented induction motor drives in constant torque region. The detuning effects of stator resistance, rotor resistance and rotor leakage inductance are analyzed.

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

1. 서 론

3상 유도전동기의 고정자자속기준제어는 일반적으로 파라미터의 비동조에 강인한 것으로 알려져 있는데, 고정자자속의 추정이 역기전력을 적분하여 구하고, 고정자자속에 의한 전압강하가 정격속도의 5% 이하인 저속영역을 제외한 속도영역에서 역기전력에 비해서 무시할 정도로 작기 때문에 정확한 고정자자속의 추정이 이루어지기 때문인 것으로 알려져 있다[1].

유도전동기의 고정자저항 및 회전자저항은 주위온도에 따라 변화하게 되므로 저항은 쉽게 비동조가 이루어

질 수 있다. 인덕턴스 중 고정자누설인덕턴스, 자화인덕턴스는 변화가 거의 없으나 회전자누설인덕턴스는 전류의 변화에 따라서 변화할 수 있다[2,3]. 회전자누설인덕턴스는 약계자영역에서 일정토크영역의 값에 비해서 약 60% 정도로 감소하는 것으로 나타나 있다[2].

약계자영역에서 최대토크운전시 고정자저항 및 회전자누설인덕턴스의 비동조에 의해서 발생하는 문제점에 관한 연구가 수행되었다[3]. 그러나 전압제한조건 및 토크제한조건이 파라미터의 비동조에 영향을 받게 되는 것은 제시되어 있지만, 일정토크영역에서 파라미터의 비동조에 의해서 발생하는 제어성능의 저하에 관한 연구는 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 일정토크영역에서 고정자자속기준제어시 고정자저항, 회전자저항 및 회전자누설인덕턴스의 비동조에 의해서 발생하는 문제점에 대해서 분석한다. 고정자자항 및 회전자누설인덕턴스의 비동조에 의해서 백터제어의 성능이 저하되며, 제어가 불가능해짐을 시뮬레이션결과를 통해서 제시한다.

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수
* Main author : Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology
Tel : 02-970-6408, Fax : 02-978-2754
E-mail : mhshin@seoultech.ac.kr
접수일자 : 2012년 9월 10일
1차심사 : 2012년 9월 12일
심사완료 : 2012년 10월 8일

2. 고정자자속기준제어

그림 1은 고정자자속기준제어의 블록도를 나타내고 있다. 고정자자속의 크기와 변환각은 $\alpha-\beta$ 정좌표계에서 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$|\hat{\lambda}_s| = \hat{\lambda}_{ds} = \sqrt{(\hat{\lambda}_{\alpha s})^2 + (\hat{\lambda}_{\beta s})^2} \quad (1)$$

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \frac{\hat{\lambda}_{\beta s}}{\hat{\lambda}_{\alpha s}} \quad (2)$$

여기서 첨자 $\hat{}$ 은 추정된 값을 의미한다.

d-q 회전좌표계에서 비간섭보상전류는 다음과 같다 [1].

$$i_{dq} = \frac{i_{qs}^2 \sigma L_s}{\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds}} \quad (3)$$

여기서 σ =누설계수($=1-L_m^2/L_s L_r$), L_s =고정자자기인덕턴스, L_m =자화인덕턴스, L_r =회전자자기인덕턴스이다.

식 (4)는 고정자자속기준제어의 토크제한조건을 나타내고 있다. T_{ct} 를 초과하는 토크지령을 발생시키면 제어시스템이 불안정해져서 제어가 불가능해진다[1].

$$T_e^* \leq \frac{3}{4} P \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^{*2} = T_{ct} \quad (4)$$

여기서 P 는 극수이다.

고정자자속은 식 (5)와 같이 역기전력을 적분하여 구한다.

$$\hat{\lambda}_s = \int (\vec{v}_s - R_s \vec{i}_s) dt \quad (5)$$

여기서 \vec{v}_s 와 \vec{i}_s 는 각각 정좌표계에서의 고정자전압벡터와 고정자전류벡터이다. 식 (5)의 적분은 programmable low pass filter를 이용해서 계산하였다[4].

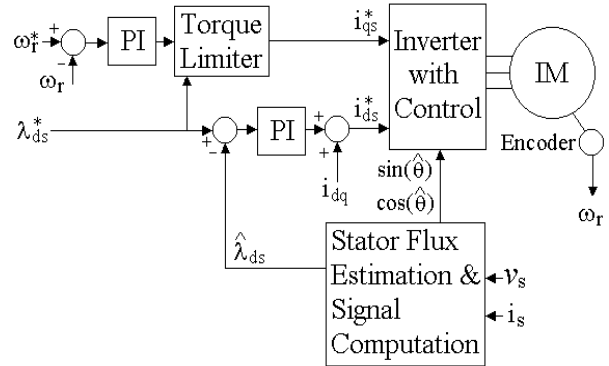


그림 1. 고정자자속기준제어 블록도
Fig. 1. Block diagram of stator-flux-oriented control

3. 파라미터 비동조 영향 분석

파라미터 비동조의 영향을 분석하기 위하여 ACSL을 이용하여 그림 1의 고정자자속기준제어 드라이브의 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 본 논문에서 사용한 3상 유도전동기의 파라미터를 나타내고 있다. 시뮬레이션은 고정자저항의 값이 큰 경우와 작은 경우에 고정자저항의 비동조 영향을 살펴보기 위하여 고정자저항이 상대적으로 큰 5Hp과 고정자저항이 상대적으로 적은 40Hp의 두 대의 유도전동기를 사용하였다.

고정자저항 및 회전자저항은 온도상승에 따라 증가하며 상온에서의 저항과 정격에서의 저항은 온도상승에 의해서 대략 20% 정도의 차이가 발생한다. 온도상승을 고려하지 않았을 경우 제어기의 저항이 모터의 저항보다 20% 정도 낮게 비동조가 된다[3]. 본 논문에서는 제어기의 고정자저항 및 회전자저항이 각각 모터의 저항보다 낮도록 비동조 된 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 2는 제어기의 고정자저항 R_{s-con} 과 모터의 고정자저항 R_s 의 값이 모두 1.26Ω으로 동조된 경우의 5Hp 모터의 시뮬레이션 결과이다. 부하는 10N·m이며, 속도지령은 500rpm으로 운전하던 중 2s에 1,700rpm으로 변화된다. 속도지령의 변화에 따라 회전자 속도는 약 0.18s만에 500rpm에서 1,700rpm으로 바뀐 모습을 나타내고 있다.

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

	5Hp, 4극	40Hp, 4극
정격자속	0.4Wb	0.4Wb
정격전류(peak)	18.2A	141A
고정자저항	1.26Ω	0.01Ω
회전자저항	0.2Ω	0.005Ω
자화인덕턴스	50mH	9.5mH
고정자누설인덕턴스	4.7mH	0.1mH
회전자누설인덕턴스	4.7mH	0.2mH

그림 3은 제어기의 고정자저항 $R_{s-con}=1.0\Omega$, 모터의 고정자저항 $R_s=1.26\Omega$ 으로 비동조된 경우의 5Hp 모터의 시뮬레이션 결과이다. 부하는 $10N \cdot m$ 이며, 속도지령은 500rpm으로 운전하던 중 2s에 1,700rpm으로 변화된다. 과도상태에서의 i_{qs} 는 같으나 가속이 느리게 이루어져서 500rpm에서 1,700rpm으로 변화하는데 약 0.22s가 걸림을 알 수 있다. 500rpm과 1,700rpm에서 i_{qs} 를 비교해 보면 그림 2의 경우보다 그림 3의 비동조된 경우에 더 큰 전류가 흐름을 알 수 있다. 이는 고정자저항의 비동조로 인해서 식 (5)에 의한 자속 계산시 고정자저항에서의 전압강하의 계산에 오차가 발생하고 이 때문에 고정자자속기준(field orientation)에 오차가 발생하였기 때문으로 사료된다.

그림 4는 고정자저항이 1.26Ω 으로 동조된 경우에 고정자자속과 추정된 고정자자속의 파형을 나타내고 있다. 5Hp 모터이며, 속도지령은 500rpm, 부하는 $10N \cdot m$ 이다. 고정자저항이 동조되어 있기 때문에 모터의 자속 λ_{as} 와 추정된 자속 $\hat{\lambda}_{as}$ 가 정확히 일치하고 있음을 나타내고 있다.

그림 5는 제어기의 고정자저항 $R_{s-con}=1.0\Omega$, 모터의 고정자저항 $R_s=1.26\Omega$ 으로 비동조된 경우의 5Hp 모터의 시뮬레이션 결과이다. 속도지령은 500rpm, 부하는 $10N \cdot m$ 이다. 고정자저항이 비동조되어 있기 때문에 모터의 자속 λ_{as} 와 추정된 자속 $\hat{\lambda}_{as}$ 가 일치하지 못하고 자속추정에 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 고정자자속기준(field orientation)에 오차가 발생하게 되고 모터는 $10N \cdot m$ 의 토크를 발생시키기 위해서 동조된 경우보다 더 많은 토크성분 전류 i_{qs} 가 흐르게 되

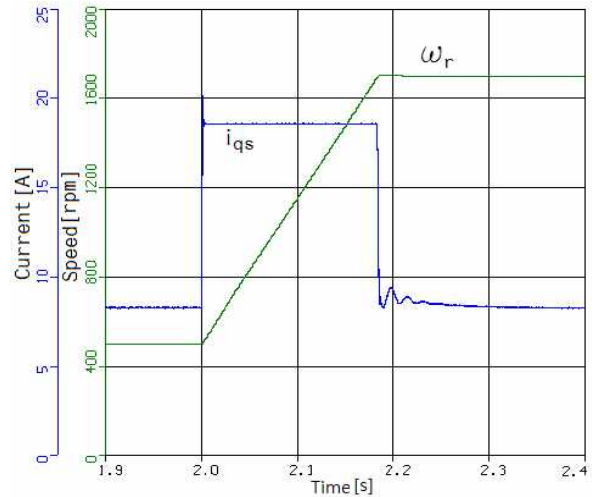


그림 2. 제어기와 모터의 고정자저항이 같은 경우(5Hp)
Fig. 2. Stator resistance of controller is same with that of motor(5Hp)

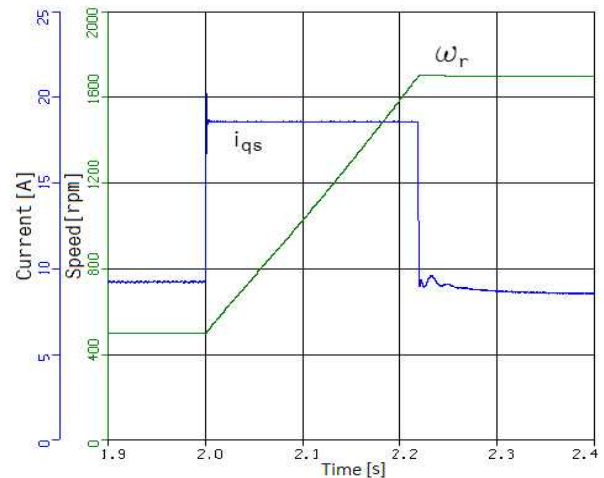


그림 3. 제어기의 $R_{s-con}=1.0\Omega$, 모터의 $R_s=1.26\Omega$ 으로 비동조된 경우(5Hp)
Fig. 3. Stator resistance detuning ($R_{s-con}=1.0\Omega$, $R_s=1.26\Omega$, 5Hp)

며, 그림 3에서 확인한 것과 같이 과도상태에서 가속이 느리게 이루어지게 된다.

그림 6은 40Hp 모터의 고정자저항이 동조되어 있는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 부하는 $100N \cdot m$ 이며, 속도지령은 2s에서 500rpm에서 1,700rpm으로 변경된다. 500rpm에서 1,700rpm으로 증가하는데 약 0.25s가

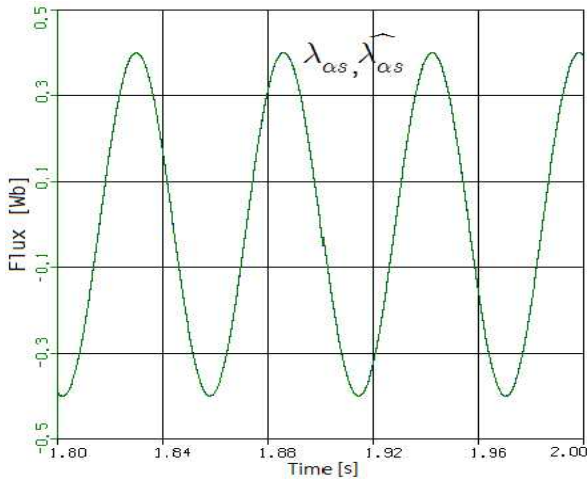


그림 4. 제어기와 모터의 고정자저항이 같은 경우(5Hp)
Fig. 4. Stator resistance of controller is same with that of motor(5Hp)

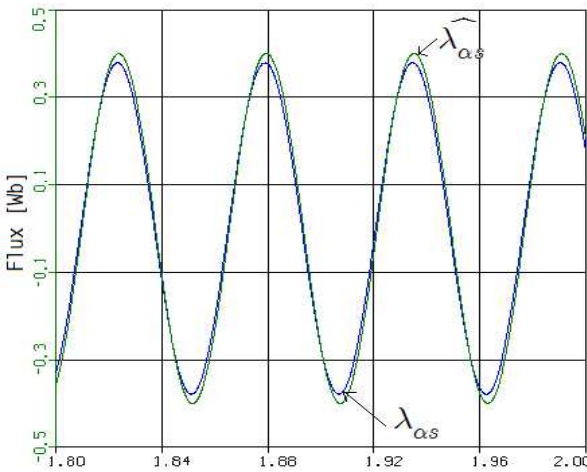


그림 5. 제어기의 $R_{s-con} = 1.0\Omega$, 모터의 $R_s = 1.26\Omega$ 으로 비동조된 경우(5Hp)
Fig. 5. Stator resistance detuning($R_{s-con} = 1.0\Omega$, $R_s = 1.26\Omega$ 5Hp)

결리고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 40Hp 모터의 제어기의 고정자저항이 0.00794Ω , 모터의 고정자저항이 0.01Ω 으로 비동조 되어 있는 경우의 시뮬레이션결과이다. 부하는 $100N \cdot m$ 이며, 속도지령은 2s에서 500rpm에서 1,700rpm으로 변경된다. 500rpm에서 1,700rpm으로 증가하는데 약 0.25s가 걸리고 있음을 알 수 있다. 그림 6의 결과

와 비교할 때 가속시간에 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

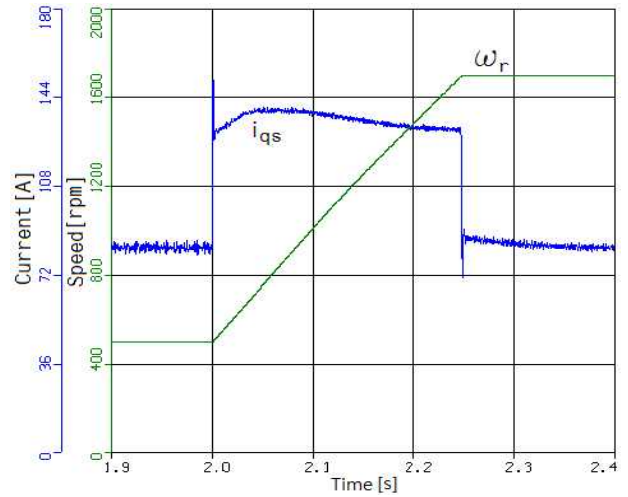


그림 6. 제어기의 $R_{s-con} = 0.01\Omega$, 모터의 $R_s = 0.01\Omega$ 으로 동조된 경우(40Hp)
Fig. 6. Stator resistance tuning($R_{s-con} = 0.01\Omega$, $R_s = 0.01\Omega$, 40Hp)

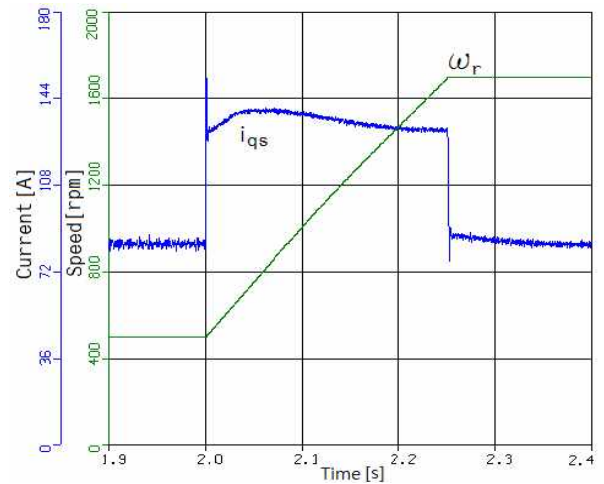


그림 7. 제어기의 $R_{s-con} = 0.00794\Omega$, 모터의 $R_s = 0.01\Omega$ 으로 비동조 된 경우(40Hp)
Fig. 7. Stator resistance detuning ($R_{s-con} = 0.00794\Omega$, $R_s = 0.01\Omega$, 40Hp)

그림 8은 40Hp 모터의 제어기의 고정자저항이 0.00794Ω , 모터의 고정자저항이 0.01Ω 으로 비동조되어 있는 경우의 시뮬레이션 결과이다. 부하는 $100N \cdot m$

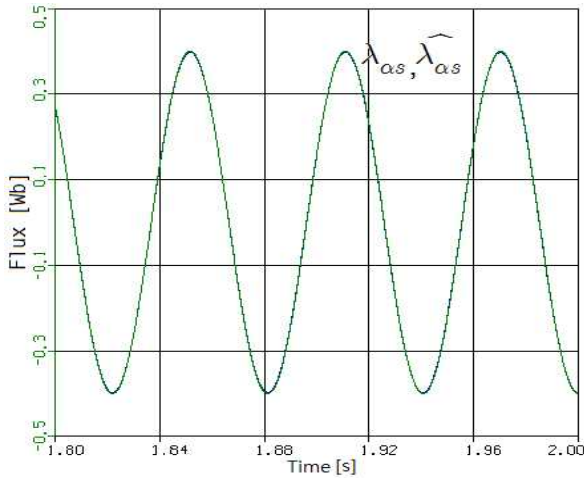


그림 8. 제어기의 $R_{s-con} = 0.00794\Omega$, 모터의 $R_s = 0.01\Omega$ 으로 비동조된 경우(40Hp)
 Fig. 8. Stator resistance detuning($R_{s-con} = 0.00794\Omega$, $R_s = 0.01\Omega$, 40Hp)

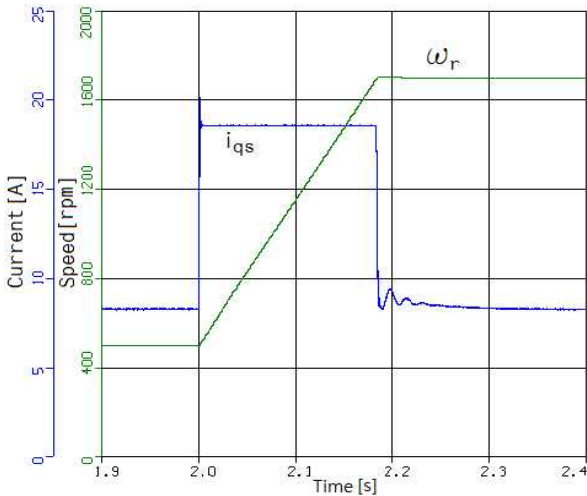


그림 9. 제어기의 $R_{r-con} = 0.2\Omega$, 모터의 $R_r = 0.27\Omega$ 으로 비동조된 경우(5Hp)
 Fig. 9. Rotor resistance detuning($R_{r-con} = 0.2\Omega$, $R_r = 0.27$, 5Hp)

이며, 속도지령은 500rpm이다. 추정된 고정자자속을 보면 모터의 자속과 거의 일치하여 고정자저항이 비동조되어 있음에도 불구하고 자속의 추정이 거의 정확하게 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 5Hp 모터의 고정자저항이 비동조되어 있는 경우와 비교할 때 40Hp

모터는 고정자저항의 비동조에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 모터의 출력이 커질수록 고정자저항의 값이 작아지고, 이에 따라 고정자저항의 비동조 영향이 작아지게 됨을 나타내고 있다. 따라서 일반적으로 알려진 바와 같이 고정자자속기준제어가 정격속도의 5%이하의 저속영역을 제외하고 고정자저항의 비동조에 강인하다는 것은 모터의 출력이 큰 경우를 제외하고는 적용되지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 제어기의 회전자저항 R_{r-con} 이 0.2Ω , 모터의 회전자저항 R_r 이 0.27Ω 으로 비동조 되어 있는 경우의 결과이다. 모터는 5Hp이며, 부하는 $10N \cdot m$ 이며, 속도지령은 500rpm에서 2s에 1,700rpm으로 변화된다. 그림 2의 동조된 경우의 결과와 비교할 때 q축 전류 및 가속시간에 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 회전자저항의 비동조에는 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

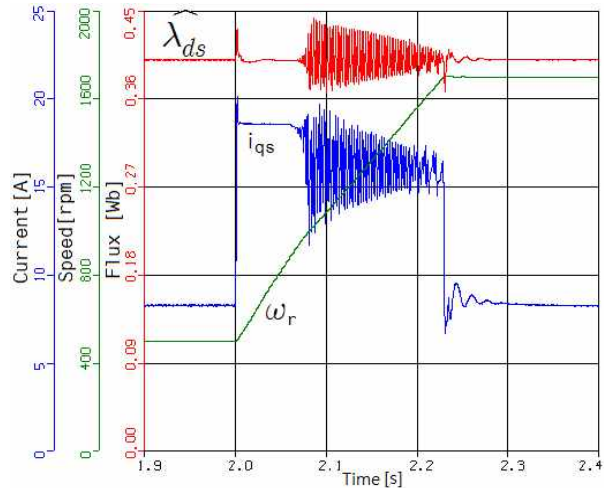


그림 10. 모터의 $L_{lr} = 0.00705H$, 제어기의 $L_{lr-con} = 0.0047H$ 으로 비동조된 경우
 Fig. 10. Rotor leakage inductance deruning ($L_{lr} = 0.00705H$, $L_{lr-con} = 0.0047H$)

그림 10은 제어기의 회전자누설인덕턴스 L_{lr-con} 이 $0.0047H$, 모터의 회전자누설인덕턴스 L_{lr} 이 $0.00705H$ 로 비동조되어 있을 때의 결과이다. 모터는 5Hp이며, 부하는 $10N \cdot m$, 속도지령은 500rpm에서 1,700rpm으로 변화된다. 회전자누설인덕턴스의 비동조로 인해서

식 (4)의 토크제한조건이 만족이 안 되어 제어가 불안정해져서 자속과 q축 전류가 과도상태에서 제어가 안 되는 모습을 나타내고 있다. 따라서 고정자자속기준 제어는 회전자누설인덕턴스의 비동조에 심하게 영향을 받음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 유도전동기의 일정토크영역에서 고정자자속기준제어 시 고정자저항, 회전자저항 및 회전자누설인덕턴스의 비동조에 의한 영향을 분석하였다. 전동기의 출력이 상대적으로 적은 5Hp 모터의 경우 기준에 알려진 것과는 달리 정격의 5% 이내 뿐만 아니라 중속도 이상에서도 고정저항의 비동조에 의한 영향을 받아서 제어성능이 저하됨을 확인할 수 있었다. 그러나 출력이 상대적으로 큰 40Hp 모터의 경우 고정저항의 비동조에 의한 영향을 거의 안 받음을 알 수 있었다. 회전자저항의 비동조의 경우 제어성능은 거의 영향을 받지 않아서 회전자저항의 비동조에 강인하다는 것을 확인할 수 있었으며, 회전자누설인덕턴스의 비동조에는 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제시한 결과를 고려하여 고정자자속기준 제어를 적용한다면 향상된 제어성능을 얻을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

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] Myoung-Ho Shin and Dong-Seok 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.
- [3] Myoung-Ho Shin, "Analysis on Parameter Detuning of Induction Motor Drives in Field Weakening Region", Journal of KIIE, vol. 24, no. 9, pp. 118-123, 2010.
- [4] Myoung-Ho Shin, Dong-Seok Hyun, Soon-Bong Cho, and Song-Yul 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)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 2002년 8월~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수.