

외란 관측기를 이용한 공간벡터 저 속도 운전에 관한 연구

나 승 권[°], 정 연 만^{*}, 안 용 길^{**}

A Study on the Low Speed Operation of Space Vector Using Disturbance Observer

Seung-Kwon Na[°], Yeon-Man Jeong^{*}, Yong-Gil An^{**}

요 약

본 논문에서는 유도전동기의 저속운전영역에서 고속운전영역까지 안정된 속도제어를 목적으로 전압/전류 모델 합성 자속 추정기를 통해 자속을 추정하여 자속 각을 추정하는 알고리즘을 사용하였다. 제안된 관측기는 축소차원 상태관측기를 부하토크 추정에 적용하여 속도추정에 이용함으로써 시스템구성을 간단히 구현하여도 극 저속 영역에서 정확한 순시속도 추정이 가능하였다. 시스템 잡음에 의한 영향을 줄이고 관측기의 극을 변화시키는 일 없이 부하 외란이나 모델화오차, 측정 잡음 등에 유도전동기 속도제어 시스템을 제시하였다. 또한, 유도전동기의 속도제어를 위해 FMRAS(Flux Model Reference Adaptive System) 이론에 기초하여 전동기의 회전자 속도를 추정하는 벡터제어 시스템과 속도 센서리스 벡터제어의 운전특성을 개선하기 위하여 전압모델 자속추정기와 폐 루프 적분방식을 이용한 자속추정기의 오차보상 알고리즘을 도입하여 정밀도가 높은 개선된 자속추정 방법을 이용하였다. 제시한 제어 알고리즘은 시뮬레이션으로 실험을 통하여 이론의 타당성을 입증하였는데, 기존의 PI(Proportional-Integral) 제어방식에 비해 극 저속에서의 속도검출 지연에 따른 속도 리플을 감소시켰으며, 기준속도나 부하토크의 변화에 대해 과도특성이 우수함을 알 수 있었다.

Key Words : decoupling control, Model Reference Adaptive System, space voltage vector PWM

ABSTRACT

In this paper, an algorithm has been employed which estimates magnetic flux using a voltage/current model combined magnetic flux estimator and from this result estimates magnetic flux angle for the purpose of stably controlling the speed of induction motor across all areas from the low-speed drive area to the high-speed drive area. The proposed observer has simply performed the system configuration by applying the reduced order state observer to estimation of load torque to use it for estimation of speed and also enabled accurate estimation of instantaneous speed in the very-low-speed area. An induction motor speed controller has been presented which is strong against load disturbance, modeling error, measurement noise, etc. without reducing the influence of system noise and changing the poles of the observer.

Also, an improved magnetic flux estimation method with high precision has been used by introducing the

[°] First and Corresponding Author : Korea polytechnic College Wonju Campus Department of Information and Electric Control Engineering, skna2@hanmail.net, 정회원

^{*} Gangneung-Wonju National University Department of Information and Telecommunication, ymjeong@gwnu.ac.kr, 종신회원

^{**} SAMIL TRANSFORMER, samiltr@chol.com

논문번호 : 201909-185-C-RN, Received September 2, 2019; Revised January 7, 2020; Accepted April 17, 2020

vector control system that estimates the speed of the motor's rotator based on the theory of FMRAS (Flux Model Reference Adaptive System) for speed control of the induction motor and the error compensation algorithm of magnetic flux estimator which uses voltage model magnetic flux estimator and closed loop integration method to improve operation characteristics of speed-sensorless vector control. The possibility for the proposed control algorithm has been reviewed through simulations and the validity of the theory has been verified through experiments. The result has shown that the speed ripple caused by delay in speed detection in the very-low-speed area has been reduced compared to that of the existing PI(Proportional-Integral) control method and its transient characteristics are superior for the standard speed or changes in the load torque.

I. 서론

직류전동기는 정류자 및 브러시를 가지는 구조적 특징으로 여러 가지의 본질적인 단점을 가지고 있어 용도의 제한을 받을 수밖에 없다. 따라서 산업기술의 발전과 함께 자동화의 필수적 요소인 서보전동기응용 분야에서는 직류전동기를 교류전동기로 대체하려는 노력이 계속되고 있다. 최근 유도 전동기 운전 시스템에 있어서 벡터제어 이론을 기초로 한 시스템은 구동 기술의 발전에 의해 그 적용 분야가 다양하다¹⁾.

유도전동기 제어에 있어 가장 대표적인 문제점은 계자회로와 전기자회로의 간섭성이 심하여 전동기모델의 비선형성이 심하다.

초기 유도전동기 구동에 스칼라제어인 V/F방식을 채택하여 빠른 속도 응답이 필요 하지 않는 전동기 제어분야에서 직류전동기 구동시스템을 대체하여 왔다. 그러나 스칼라 제어방식은 정확한 속도제어가 어렵고, 과도응답이나 저속 운전특성 등이 좋지 않아 응용분야 범위에 한계가 있다²⁻⁴⁾.

본 논문에서는 유도전동기의 벡터 제어시스템에 순시속도 부하토크 관측기를 기존의 PI속도제어 시스템에 추가하여 저속영역 및 엔코더 펄스 간격이 샘플링 시간보다 길게 되는 극저속 영역에서의 속도검출 지연에 따른 불안정한 현상을 해결하고자 한다.

제어시스템 설계에서 벡터제어 및 관측기 알고리즘에서의 고속 연산처리를 위해 TMS320C31DSP 를 CPU로 사용한다. 인버터의 고속 스위칭 및 소형화를 위하여 IGBT모듈인 IPM을 사용하고, 공간전압벡터 PWM관련 회로나 인터페이스 회로 등은 EPLD로 처리하여 신뢰성이 높은 시스템을 구성하였다.

제어시스템의 유용성을 확인하기 위해 기존의 제어방법과 제시된 제어방법의 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 비교, 분석하여 제안된 제어시스템의 유용성을 연구하였다.

II. 유도전동기의 벡터제어 모델링

전동기의 고정자 전류에는 토크 전류성분과 여자 전류성분이 포함되어 있다. 유도전동기의 발생토크는 2가지의 전류성분에 의해 영향을 받기 때문에 이를 분리하여 제어 할 수 있으면 전기자전류와 계자전류를 독립적으로 제어할 수 있는 타여자 직류전동기와 유사한 제어 특성을 얻을 수 있다. 여기서 고정자의 α 축을 기준으로 한 d 축의 회전각 θ_e 는 식 (1)과 같다.

$$\theta_e = \theta_r + \theta_{sl} \tag{1}$$

θ_r 을 전동기로부터 측정하고 θ_{sl} 은 전동기 상수를 이용하여 계산하고, 다시 θ_r 을 피드포워드 보상방법으로 θ_e 를 얻을 수 있다. 그림 1은 회전자 쇄교자속 및 계자전류의 벡터도로 동기속도로 회전하는 회전자의 공간 전류벡터를 동기속도로 회전하는 d, q 축 좌표계로 변환하기 위하여, 먼저 계자의 기준축(α 축)으로부터 d 축의 회전각 θ_e 는 식 (2)와 같다^{5,6)}.

$$\theta_e = \omega_e t \tag{2}$$

이 등가회로에는 고정좌표계 등가회로에 비하여 고

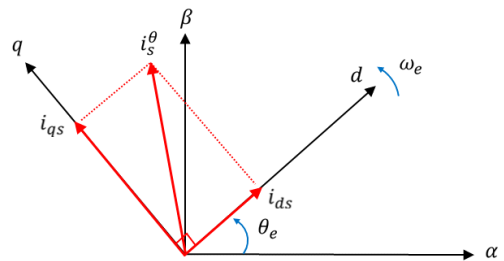


그림 1. 고정좌표계와 동기 회전좌표계의 관계
Fig. 1. Relation between stationary reference frame

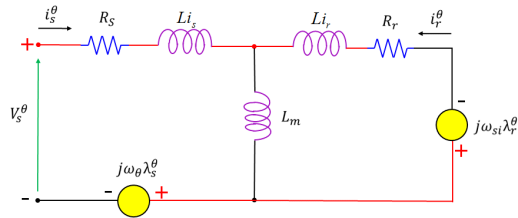


그림 2. 동기 회전 좌표계에서 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of Induction Motor in synchronously rotating system

정지측에 속도전압인 역기전력항이 추가되어 있다. 그리고 동기속도가 $\omega_e = 0$ 이라면 그림 2의 동기 회전 좌표계 등가회로와 같은 형태가 된다.

III. 순시속도 관측기

그림 3은 속도 추정기를 부가한 제어시스템의 구성도이다. 동기 회전좌표계의 기준전압을 실제 인버터에 인가하기 위해서는 2축 정지좌표계의 기준전압으로 변환해야 한다. 또한 고정자의 3상전류를 측정하여 동기 회전좌표계로 변환할 수 있으며 이는 간접벡터 제어 방식에 의한 자속각 θ_e 를 사용한다⁷⁾.

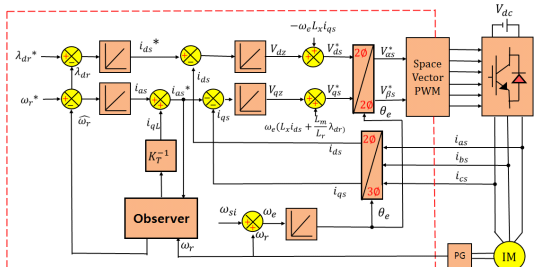


그림 3. 속도제어시스템의 구성도
Fig. 3. Configuration diagram of speed control system

IV. 제어 시스템

유도전동기의 속도제어 시스템의 하드웨어는 그림 4와 같이 마이크로프로세서부, 전력변환부, 인터페이스부 등의 전형적인 3부분과 제어전원으로 구성된다.

디지털 제어기는 비선형 시스템을 포함한 광범위한 시스템에 복잡한 현대 제어이론을 적용할 수 있고, 환경변화에 거의 영향을 받지 않는 안정된 성능을 발휘할 수 있다.

제어 알고리즘의 대부분이 소프트웨어로 구성됨으로 설계의 수정이나 개선 또는 보수 유지가 용이 하

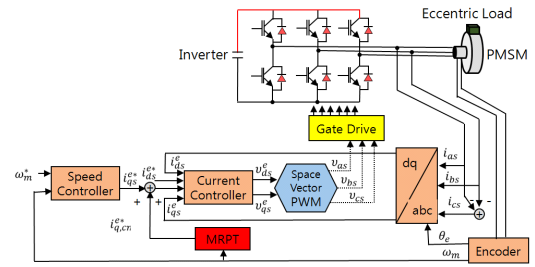


그림 4. 시스템의 하드웨어 구성
Fig. 4. Hardware configuration of system

다. 다만 디지털 시스템은 아날로그 시스템을 근사화 하는데 불확함으로 정밀도가 시스템의 분해능에 크게 좌우된다.

본 시스템에서는 이러한 문제를 해결하고 제어회로를 컴팩트하게 할 수 있도록 디지털 로직회로에 고집적 EPLD인 EPM7128을 사용하였다. CPU를 포함하여 인터페이스부 회로의 블록도는 매우 복잡한 디지털 및 아날로그 회로로 그림 5와 같이 구성되며 결과적으로 제어기판이 커지게 된다. CPU 주변에는 클럭 발생회로, 리셋회로, 어드레스 및 데이터버스 버퍼, 메모리 등으로 구성되며 CPU 관련 기본회로 들과 EPLD가 설치되어 있다.

EPLD에는 대부분의 인터페이스 회로가 내장되어 CPU의 메모리 및 I/O 어드레스 디코딩과 각종 입/출력 기능을 수행한다. 외부에서 전압, 전류를 측정하기 위해 아날로그 신호와 속도지령은 A/D 컨버터를 통하여 EPLD에 공급된다.

전동기의 회전속도를 측정하기 위한 모터리 엔코더의 신호도 EPLD내에서 처리된다. 또한 IPM을 구동하기 위한 게이팅 신호는 EPLD에서 포토커플러를 거쳐서 IPM에 공급된다.

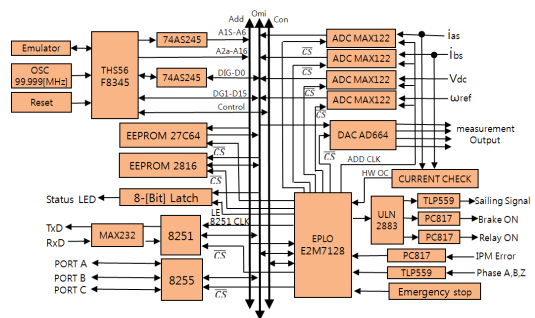


그림 5. 시스템의 하드웨어 구성
Fig. 5. Hardware configuration of system

V. 실험 결과 및 고찰

본 시스템에서는 돌입전류를 제한하기 위하여 다이오드 컨버터와 평활용 콘덴서 사이에 30[W], 10[Ω]의 저항을 직렬로 삽입하고, 이 저항과 병렬로 충분한 전류용량을 갖는 릴레이 스위치 또는 SSR을 접속하는 방법을 사용하였다.

DC 링크에 접속된 SMPS는 직렬저항에서의 전압 강하를 고려하여 넓은 입력전압 범위에서 동작하도록 그림 6과 같이 설계하였다. 또한 정상동작중에 릴레이 접점이 개방되면 큰 서지가 발생 할수 있어 릴레이는 일단 접점이 단락된 후에는 다시 개방될 수 없도록 하였다.

그림 7은 관측기를 부가한 제어 시스템에서의 속도와 토크의 비교 파형이다. PI 제어기만 사용한 경우와 관측기를 부가한 제어시스템에서의 속도와 토크를 비교하였을 때 관측기를 부가한 제어시스템이 보다 안정적으로 나타난다⁸⁾.

그림 8의 (a)는 기존 PI제어기에 의해 제어한 경우이며, 과 도시에 속도의 진동 현상이 있다. 그러나 그림 8의 (b)는 관측기를 부가하여 제어한 방식은 진동 등 불안한 현상이 일어나지 않으며, 구동 특성이 향상됨을 알 수 있다. 다만 전동기 회전속도 ω_r^* 에 비해 250[ms]정도 늦은 응답을 보이는 것은 전동기의 마찰 토크 영향에 의한 것으로 본다.

PI제어기 시스템에 속도와 토크 명령을 100[rpm]과 10[N·m]로 인가하고 부하를 스텝적으로 가변 하

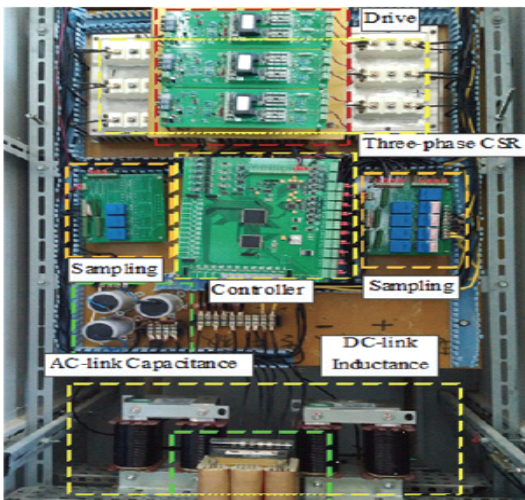


그림 6. 마이크로프로세서 및 인터페이스부의 구성 장치도
Fig. 6. Microprocessor and consist device of interface

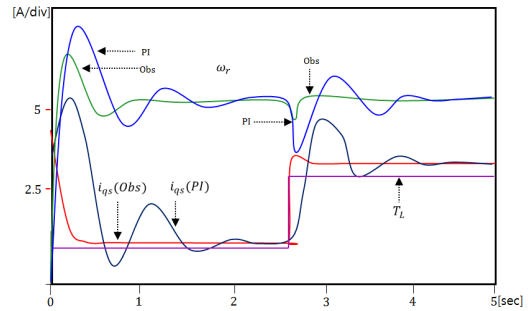
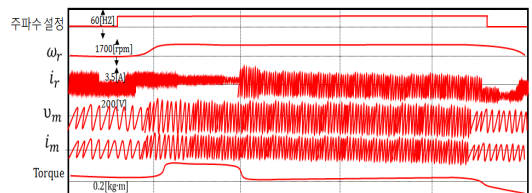


그림 7. 관측기를 부가한 제어 시스템의 속도와 토크 비교 파형
Fig. 7. Speed and torque comparison waveforms from the control system with an observer

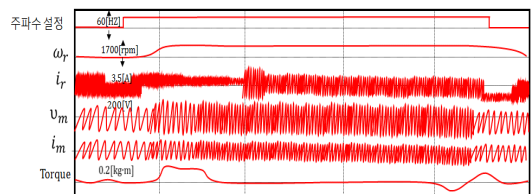
였을 경우의 출력속도 파형이다.

그림 9 (a), (b), (c)의 q축 기본전류와 같이 일정 부하일 경우는 원활한 속도를 유지하지만 부하가 스텝적으로 가변되는 경우에는 속도 변동이 발생하고 정격속도에 도달하는 시간도 오래 걸리는 것을 알 수 있다. PI제어기 시스템에 부하토크 관측기를 부가하여 구성된 시스템에 속도명령을 100[rpm]으로 인가하고, 부하를 스텝적으로 가변하였을 경우의 부하토크 T_L , 그리고 관측기에 의한 부하토크 추정치 \hat{T}_L 의 파형을 나타내고 있다.

그림 10(a)는 기존의 방법만으로는 속도정보의 지연으로 인하여 속도 리플이 발생되어 속도특성이 나빠지고 있음을 알 수 있다. 그래서 순시속도 관측기 알고리즘을 적용하였을 경우 그림 10(b)와 같이 속도 검출기 한계 이하의 저속 회전일 때도 양호한 속도특성을 보인다.

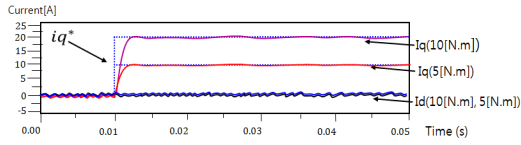


(a) 기존 PI제어기에 의한 방법

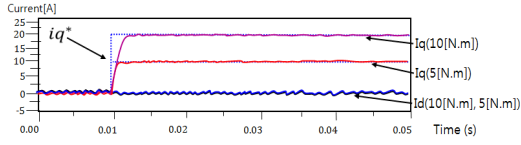


(b) 관측기를 부가한 제한된 방법

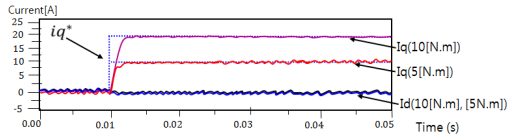
그림 8. 구동시스템의 부응답 특성(a, b)
Fig. 8. Load response characteristic of driving system(a, b)



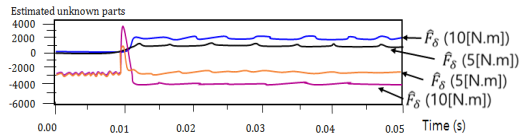
(a) PI controller with feedforward decoupling compensation



(b) MBDPCC

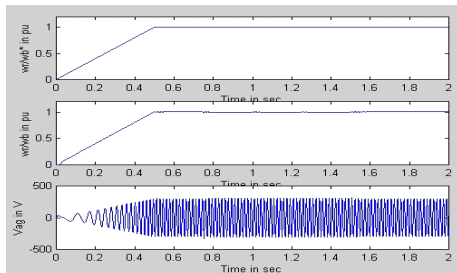


(c) Proposed MFDPCC

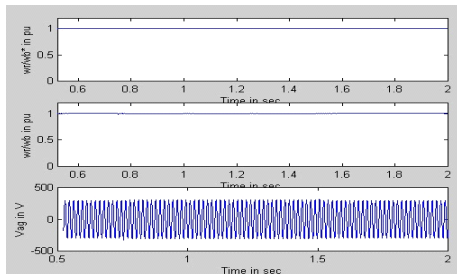


(d) Online estimation of F_d and F_q .

그림 9. 저속 시 부하응답 특성 시물레이션(100 rpm/min)
Fig. 9. Simulation of Load response characteristics at extremely low

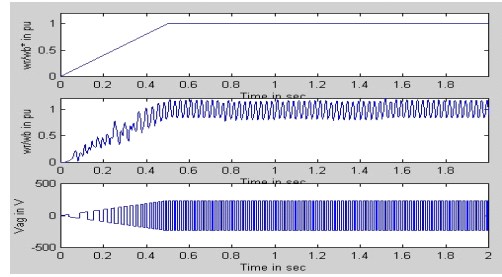


(a) 기존 PI제어기에 의한 방법



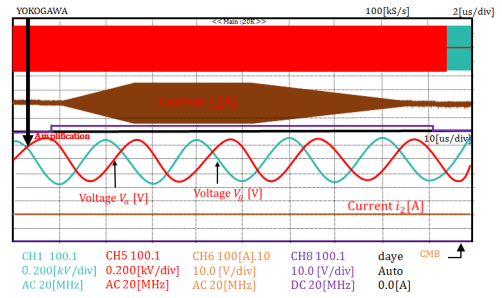
(b) 관측기를 부가한 제한된 방법

그림 10. 순시속도 관측기의 속도추정 특성
Fig. 10. Speed estimation characteristics of instantaneous speed observer

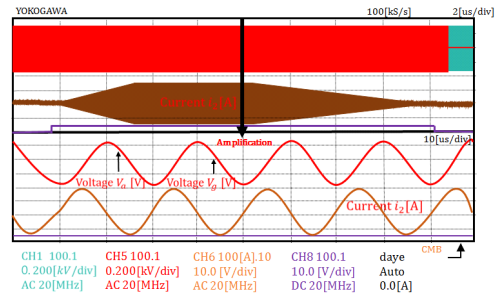


Speed:10[rpm]/div, Time:1[s]/div, i_{qs} :5[A]/div

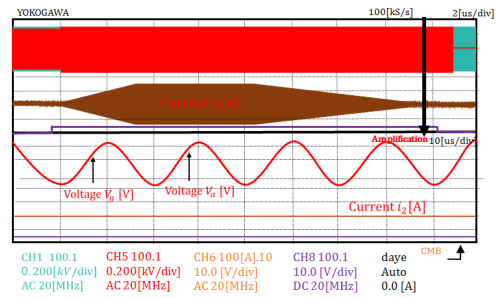
그림 11. 저속 시 부하응답 특성 (부하 : 0→1/6→0)
Fig. 11. Load response characteristics at extremely low speed.(Load : 0→1/6→0)



(a) $V_{fil}=200V$, $f_{fil}=50Hz$, $V_g=220V$, $f_g=50Hz$



(b) $P_{fil}=0$, $Q_{fil}=230 Var$



(c) $P_{fil}=0$, $Q_{fil}=0 Var$

그림 12. 선간전압 및 상전류 파형
(V_{ab} : 200[V]/div, i_{as} : 10[A]/div, Time : 10[msec]/div)
Fig. 12. Waveforms of the phase current and line-to-line voltage

그림 11은 50[rpm]으로 회전하고 있는 전동기에 부하를 0 → 1/6 → 0으로 스텝적으로 인가했을 때의 외란역압 특성을 나타낸 것이다. 부하토크가 스텝적으로 크게 변동하더라도 시스템은 안정되게 응답하며, 회전속도는 500[ms]내에 기준속도를 추종하는 것을 알 수 있다.

그림 12는 (a)전간전압, (b)상전류 파형을 나타내고 (c)는 유효전력과 무효전력의 크기 3개의 다른 특성값을 보이는 그래프를 시간이 지남에 따라 부분 확대하여 분석 하였다. 같은 특성을 시간이 지남에 따라 분석하면 가능하지만 다른 특성을 시간이 지남에 따라 분석은 어렵지만 전류가 통전되면서 시간이 지남에 따라 Va와 Vg의 싸이클이 만나서 시스템안정도는 주 파수대가 갈아진다. 본 시스템의 인버터의 prototype에 벡터제어 방식을 사용한 속도제어 알고리즘을 적용하여 실험한 결과 전류성분에 의한 영향 없이 전기자전류와 계자전류를 독립적으로 제어할 수 있는 타 여자 직류전동기와 유사한 제어특성을 확인 하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 속도검출기로 엔코더를 이용하는 벡터제어 유도전동기 시스템에서 속도제어 주기 안에 엔코더 펄스가 얻어지지 않는 저속영역에 대한 안정성의 개선에 대해서 검토한 것이다. 그 개선방법의 하나로서 부하토크 추정특성을 향상시킨 순시속도 추정기를 제안하였다.

출력전류의 고조파 함유율 및 토크 맥동의 감소를 위하여 공간 전압벡터 PWM 제어기법을 사용하였다. 제안된 관측기는 관측기 자체의 미분동작으로 인해 시스템잡음에 의한 영향을 줄이고 관측기의 극을 변화시키는 일 없이 부하토크 추정능력을 개선시키는 것이다.

전체 시스템의 제어 알고리즘은 DSP, EPLD 등을 사용한 디지털 방식으로 구현하였고 IPM을 사용하여 하드웨어의 단순화 및 시스템의 신뢰성이 높아짐을 확인하였다.

속도추정 관측기를 포함한 전체시스템의 제어 알고리즘은 고속 연산처리를 위하여 TMS 320C31 DSP를 이용한 제어회로를 구성하였으며 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과 제안된 순시속도 관측기는 저속 및 극 저속영역에서 기존의 PI제어기보다 우수한 동특성을 얻을 수 있었다.

또한, 시스템의 전류 제어부는 공간전압벡터 PWM 기법을 사용하였으며 제안한 속도 추정기는 부하토크

추정능력의 향상에 의해 외란역압 특성도 개선되었다.

컴퓨터 시뮬레이션 및 실험으로 제안된 순시속도관측기는 저속 및 저속영역에서 기존의 PI제어기보다 우수한 동특성을 얻을 수 있었으며 제안된 관측기는 속도추정의 고성능화를 위해서 관측기의 극을 변화시키는 일 없이 부하토크의 추정능력을 향상시킴으로써 외란역압 특성도 개선할 수 있음을 확인하였다.

향후 연구방향으로는 저속 크기 보상 알고리즘 및 회전자 속도 추정기로 전동기의 상태를 정확하게 추정하여, 양호한 속도 제어를 할 수 있음을 확인하였으나, 저속 추정시 전동기 파라미터 변동에 대한 오차보상과 극저속 영역에 있어서 정밀도 높은 저속 추정 방법 등은 앞으로 계속 연구하여 개선해야 할 과제이다. 또한, 전동기 파라미터의 변동에 따른 추정예러보상과 PI 제어기 이득의 자기 동조 방법과 보다 빠른 응답 특성을 위해서는 고속의 프로세서 사용이 요구된다.

References

- [1] P. C. Loh, L. Zhang, and F. Gao, "Compact integrated energy systems for distributed generation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1492-1502, Apr. 2013.
- [2] N. P. Soe, D. M. Vilathgamuwa, and K. S. Low, "Doubly fed induction generator for wind energy generation using nine-switch power converter," in *2011 Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 3608-3613, 2011.
- [3] T. Kominami and Y. Fujimoto, "A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads," in *Ind. Applicat. Conf.*, pp. 2346-2350, 2007.
- [4] G. Wen, Y. Chen, Z. Zhong, and Y. Kang, "Dynamic voltage and current assignment strategies of nine-switch-converter-based DFIG wind power system for low-voltage ride-through (LVRT) under symmetrical grid voltage dip," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 4, pp. 3422-3434, Jul. 2016.
- [5] X. Zhang, W. Zhang, J. Chen, and D. Xu, "Deadbeat control strategy of circulating currents in parallel connection system of three-phase PWM converter," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 2, pp. 406-417,

Jun. 2014.

- [6] H. Zhang, A. Von Jouanne, S. Dai, A. K. Wallace, and F. Wang, "Multilevel inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltages," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 1645-1653, Nov./Dec. 2000.
- [7] M. R. Baiju, K. K. Mohapatra, R. S. Kanchan, and K. Gopakumar, "A dual two-level inverter scheme with common mode voltage elimination for an induction motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 3, pp. 794-805, May 2004.
- [8] S. K. Na, Y. M. Jeong, and Y. G. An, "Study on the ultra low speed operation using induction motor vector control," in *Proc. KICS Summer Conf. Commun. 2019*, pp. 232-233, Jeju Island, Korea, Jun. 2019.

나 승 권 (Seung-Kwon Na)



1999년 2월 : 세명대학교 전기 공학과(공학사)
 2001년 2월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과(공학석사)
 2008년 2월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과(공학박사)
 1981년 7월~1988년 4월 : 삼육의료원 부산(한방병원)

1988년 5월~1994년 8월 : 한국수자원공사
 1994년 9월~현재 : 한국폴리텍대학교 원주캠퍼스 전기제어과 교수
 <관심분야> 의공학, 신재생에너지 및 대체에너지분야, 에너지변환, 전력전자응용분야

정 연 만 (Yeon-Man Jeong)



1983년 2월 : 송실대학교 전자공학과(공학사)
 1985년 2월 : 송실대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1991년 8월 : 송실대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 1993년 3월~현재 : 강릉원주대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> 신재생에너지, 무선통신시스템, 통신신호처리, 음성신호처리, 통신회로설계

안 용 길 (Yong-Gil An)



1995년 2월 : 명지대학교 화학공학과 (공학사)
 2000년 2월 : 한양대학교 대학원 생산운영과 (공학석사)
 2006년 2월 : 중앙대학교 대학원 건설경영과 (공학석사)
 2019년 8월 : 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)

1996년 3월~현재 : 주식회사 삼일변압기대표이사
 <관심분야> 변압기, 송배전, 개폐기, 신재생에너지, 에너지변환, 전력전자응용분야