

관측 위치를 지령치로 하는 새로운 속도추정 알고리즘을 이용한 BLAC 속도제어

BLAC speed control using precision Velocity Estimation through the Rotor Position ObservationR

이상훈*, 송현직**, 박찬규

Sang-Hun Lee, Hyin-Jig Song, Chan-Kyu Park

〈Abstract〉

Recently the interest in permanent magnet alternating motor using for electric compressor become great. Especially the research on Interior Permanent Magnet Motor has been doing actively for its advantages in the energy density and the efficiency. In order to control the output of motor to the desired value, the current control or speed control of motor are required. The accurate detection of rotor position and speed information are necessary for the control of motor. In general, the encoder, hall sensor, and resolver are used to obtain the information of motor position and speed and the speed detection algorithm, M/T method, is applied. However, the M/T method causes the error depending on rotor speed. Therefore, this M/T speed detection method is not perfect. In this paper, it is proposed that the PI control with a 1st transfer function and the integration element between velocity and position are composed in series and this feeds back to the reference value of position angle. The proposed algorithm is a function of the integral elements 2nd term, speed element, is used as an output. Thus, it is possible to detect the correct speed by configuring like the mechanical structure similarly. The proposed algorithm is verified by using PSIM DLL and is applied to the BLAC motor drive. And also it is confirmed that this system estimates the accurate speed regardless of rotor speed changes. As a example, the experimental results and simulations shows that the proposed method is very effective.

Keywords : Permanent Magnet Motor, M/T speed detction, Precision Velocity Estimation

* 주저자, 영남이공대학교 전기자동화과 교수, 工博
부산대학교 일반대학원 졸업
705-703 대구시 남구 현충로 170

** 교신저자, 영남이공대학교 전기자동화과 교수, 工博
영남대학교 일반대학원 졸업
705-703 대구시 남구 현충로 170

* Post Author, Professor Dept, of Electrical Automatic
Engineering, PhD Yeungnam University college
Tel:+82-53-6501-9262 Fax:+82-53-624-4736
E-mail : purme417@ync.ac.kr

** Corresponding Author, Professor Dept, of Electrical
Automatic Engineering, Ph.D Yeungnam University college
Tel:+82-53-6501-9266 Fax:+82-53-624-4736
E-mail : hjsong@ync.ac.kr

1. 서 론

지구 환경문제 및 자원 고갈문최근 각종산업기술의 고속화, 고정밀화의 추세에 따라 구동부가 안정하고 가능한 소형이면서 토크가 상대적으로 큰 전동기가 요구되어 지고 있는 실정이다. 기존 구동용 모터는 AC 유도기가 주류를 이루고 있었으나, 유도기는 회전자 발열로 효율이 높지 못하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 출력밀도와 효율이 높은 Brushless 모터가 구동용 모터로 널리 적용되고 있다.

Brushless 모터는 구동방식에 따라 BLAC와 BLDC로 분류 할 수 있다. 스크루압축기용 전기구동장치는 갑작스런 부하변동에 신속히 대응하기 위하여 정밀제어가 가능한 BLAC 모터가 적합 할 것으로 사료된다. 특히 매입형 영구자석 전동기 (Interior Permanent Magnet Motor : IPM)는 에너지 밀도, 효율 등 많은 장점으로 인하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다1)-3).

공장 자동화나 인공지능을 가진 로봇 및 기계 도구 적용 분야 등의 활용도가 높아짐에 의해 정확한 모터 속도와 위치정보의 필요성은 나날이 늘어나고 있고, 모터의 속도를 알아내는데 가장 보편적으로 증분형 엔코더를 사용한다. 증분형 엔코더를 이용해 속도를 추출하는 방법으로 M/T방식을 보편적으로 많이 사용한다. 그러나 이 M/T방식은 저속에서 엔코더 펄스의 낮은 진동수로 인해 속도 정보를 확보하기 힘들고, 양자화로 인한 노이즈를 가지게 된다. 그로 인해 증분 인코더를 이용하여 저속에서 모터 속도를 획득하기 위해 관측기 모델을 사용한 많은 연구가 이루어 졌고, 보상에 의해 속도추정의 성능을 개선시키기도 한다.

본 논문에서는 기존의 속도 추정 방식을 대체하기 위해 위치와 속도의 관계식을 이용하였다. 위치를 미분함으로써 속도를 얻을 수 있지만 미분은 노이즈에 약하고 오차가 발생할 수 있는 단점

을 가지고 있다. 이런 문제 해결을 위해 미분형태가 아닌 적분형태로 나타내어 노이즈에 강한 속도 정보를 가져올 수 있었다. 제어기는 다양한 방식으로 구성할 수 있으나, 기계적 구조와 거의 같은 형태로 구성함으로써 안정된 속도 검출이 가능하였다.

제안된 모터 회전자 속도 추정 기법은 BLAC 전동기에 적용하고 PSIM을 이용한 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과 제안된 방식의 시스템은 응답 속도가 빠르고 기준속도나 부하변동에 따른 과도 응답특성이 우수하다는 것을 확인하였다.

2. 기존의 M/T 방식을 이용한 속도검출 방식

엔코더를 이용한 속도 측정 방식 중 현재 산업계에서 널리 사용되고 있는 방식은 M/T방식이다. 그림 1은 M/T 방식을 이용한 속도측정 방식을 나타내고 있다. 측정 시간 T_d 는 주어진 샘플링 시간 T_c 이후에 처음으로 발생하는 엔코더 펄스에 동기(Synchronize)되어 결정된다.

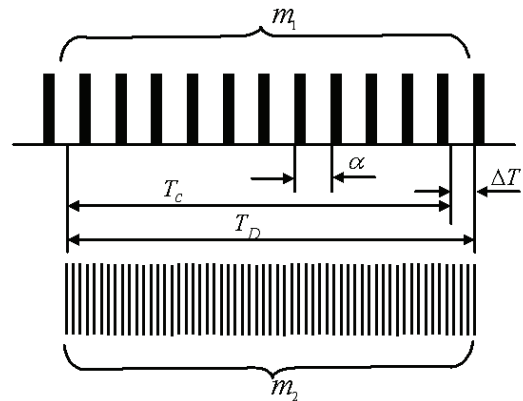


Fig. 1. Motor Speed Measurement by /T-method

측정 속도 $N_f(r/min)$ 는 측정 시간과 그동안에 회전자가 움직인 $X(rad)$ 에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$N_f = \frac{60X}{2\pi T_d} = \frac{60X}{2\pi(T_c + \Delta T)} \quad (r/min) \quad (1)$$

1회전당 펄스 수 P_{PR} 의 엔코더가 T_d 시간 동안에 m_1 의 펄스를 발생한다면 각 변위 $X(rad)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$X = \frac{2\pi m_1}{P_{PR}} \quad (2)$$

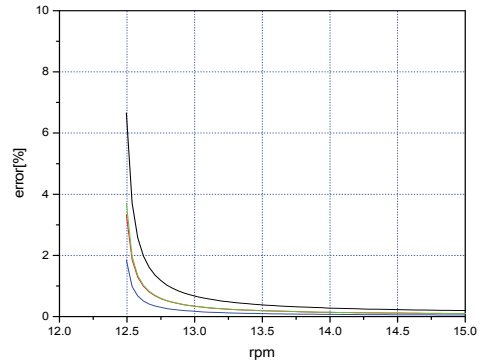
또한 측정 시간 $T_d = T_c + \Delta T$ 는 주파수 $f_c(Hz)$ 의 클럭 펄스로 이산화(Discretion) 되는데, 그 값이 m_2 라 하면 T_d 는 다음과 같이 구해진다.

$$T_d = \frac{m_2}{f_c} \quad (3)$$

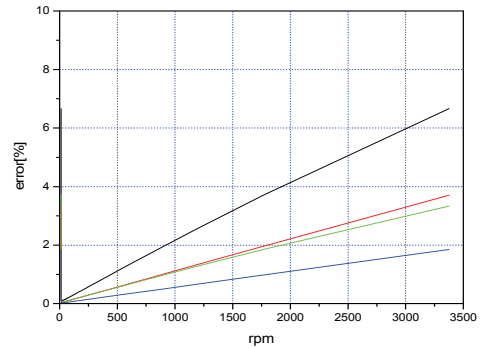
이상의 식에서 측정 속도 $N_f(r/min)$ 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$N_f = \frac{60f_c m_1}{P_{PR} m_2} \quad (4)$$

이 방식의 기본 원리는 카운터(Counter)를 이용하여 이산화 된 값 m_1 과 m_2 를 얻고, 마이크로프로세서를 이용한 연산에 의하여 속도를 측정하는 것이다. 이 방식은 대부분의 전동기 구동 시스템에서 디지털 엔코더를 이용한 속도 측정에 널리 이용되고 있고 디지털 회로와 마이크로프로세서를 이용하여 쉽게 구현될 수 있다. M/T 방식은 고속에서 좋은 특성을 보이는 M방식과 저속에서



(a)



(b)

Fig. 2. Motor Speed Estimation error by M/T-method

유리한 T방식을 결합했기 때문에 일반적인 속도 범위에서 좋은 특성을 갖는다.

그림 2는 속도 추정시 M/T 방식을 이용할 경우의 오차율로서 오차율이 전동기 속도에 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 이를 줄이려면 엔코더의 펄스 수를 늘이거나 m_2 값을 크게 해야 하는데, 엔코더 펄스를 늘리는 것은 엔코더의 가격이 엔코더 펄스 수에 따라 증가하는 문제가 있고 m_2 값을 증가시키면 디지털 로직의 처리 속도 문제가 발생하게 된다. 또한 m_2 를 어느 정도 이상 즉, 엔코더의 펄스 발생 정밀도 이상으로 늘리는 것은 오차율 저감에 아무런 의미가 없다. 또 극저속 운전 에 있어서는 T_d 가 속도에 반비례하여 증가하므로 이에 의한 속도 측정상의 시지연(Time delay)이

속도제어 시스템의 주파수 대역폭을 제한하는 되는 단점이 존재하게 된다.

3. 제안된 위치관측에 의한 회전자 속도 검출 기법

위치와 속도의 관계식은 위치를 미분함으로써 속도를 얻을 수 있다. 하지만 미분은 노이즈에 약하고 위치 정보에 노이즈가 존재할 경우 오차를 발생할 수 있는 단점을 가지고 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 미분형태가 아닌 적분형태로 나타내면 노이즈에 강한 형태의 위치정보를 가져올 수 있다. 따라서 식 (4)와 같이 전기적 토크를 적분하여 속도를 구할 수 있다.

$$\omega_r = \frac{1}{J} \int (T_e - T_L - B\omega_r) dt \quad (4)$$

그림 3은 제안된 방식의 속도추정 알고리즘이다. 이는 1차 전달함수 PI제어기와 적분기를 직렬로 연결하고 피드백 구조를 취함으로써 위치정보 지령치로 추정속도 응답을 갖는 추정알고리즘을 나타내고 있다. 제어기는 다양한 방식으로 구성할 수 있으나, 기계적 구조와 거의 같은 형태로 구성함으로써 안정된 속도검출이 가능하다. 그림 3과 같이 제안된 위치추정에 의한 속도추정 알고리즘

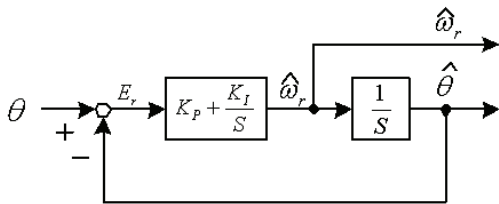


Fig. 3. Proposed Speed Estimation Algorithm with Position Observer

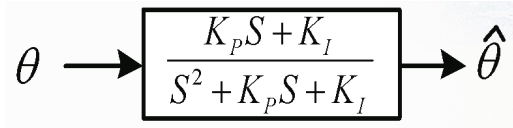


Fig. 4. Transfer Function of Position response

분석을 위해 제안된 알고리즘에서 전달함수를 구해보면 그림 4와 같은 위치응답 전달함수로 표현될 수 있다.

4. 가상위치에 의한 위치예러 검출기법

실제 엔코더의 의한 위치정보는 엔코더 펄스를 계수함으로써 정확히 가져올 수 있지만 기계각 360° 마다 오버플로우가 발생하며, 오버플로우가 이루어지지 않는 경우, 예를 들어 그림 5에서 T(n-2)와 T(n-1)사이에는 이전 엔코더 카운터 값과 현재 엔코더 카운터 값의 차에 의해서 구해지나, 오버플로우가 발생한 경우, 예를 들어 그림 5에서 T(n-1)와 T(n)사이에는 위에서 언급한 방식으로는 정확한 위치정보를 취하기 어려워진다.

따라서 본 논문에서는 엔코더 신호를 카운트하는 Timer의 오버플로의 경우에는 엔코더 카운트 맥스 값에 현재의 엔코더 카운트 값을 더한 후 이전의 엔코더 카운트 값을 빼주는 알고리즘을 적용하여 오버플로의 경우에도 정확한 위치를 취할 수 있게 하였다.

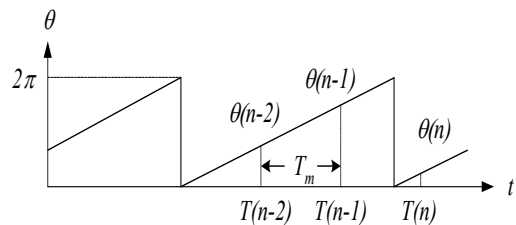


Fig. 5. Exiting detection on degree change of the encoder

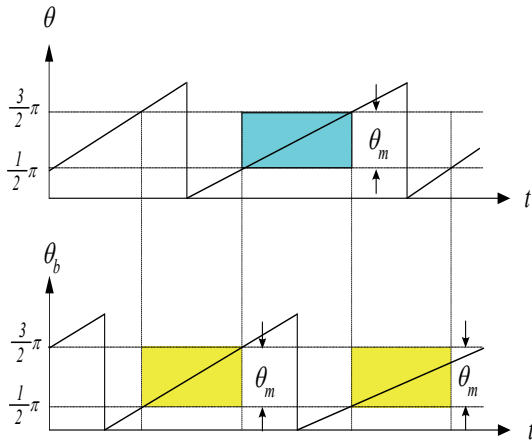


Fig. 6 Proposed detection on degree change of the encoder

제안된 방식의 개념도는 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 회전자의 각도가 상 90°에서 270° 내에 위치 할 때에는 실제 회전자 각도에서 각도변위를 취하고 이외의 영역에서는 오버플로우의 경우의 알고리즘에 의한 각도변위를 취한다. 이렇게 함으로써 각도 오버플로우와 회전방향에 관계없이 T_m 시간 동안 회전자의 각도 변위를 얻을 수 있다.

5. 속도추정기법의 왜란영향 분석

제안된 속도 추정 기법에 왜란이 발생할 경우를 대비하여 설계하여야 한다.

첫째, 그림 7과 같이 추정 위치에 왜란이 발생할 경우 출력은 식 (5)와 같이 주어지고 오차는 입력에 대한 출력의 차로써 식 (6)과 같이 주어진다.

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)}R(s) + \frac{1}{1+G(s)C(s)}D(s) \quad (5)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) = \frac{1}{1+G(s)C(s)}(R(s) - D(s)) \quad (6)$$

이와 같은 추정위치에 왜란이 존재할 경우 식 (6)에서 보이는 바와 같이 $G(s)C(s)$ 의 값을 크게 함으로써 추정위치 왜란으로 인한 영향을 보상할 수 있다.

둘째, 그림 8과 같이 위치센서에서 들어오는 입력레퍼런스 자체에 노이즈가 끼었을 경우의 출력은 식 (7)과 같고 오차는 식 (8)로 나타내어진다.

$$Y(s) = \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)}(R(s) + D(s)) \quad (7)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) = \frac{1}{1+G(s)C(s)}R(s) - \frac{G(s)C(s)}{1+G(s)C(s)}D(s) \quad (8)$$

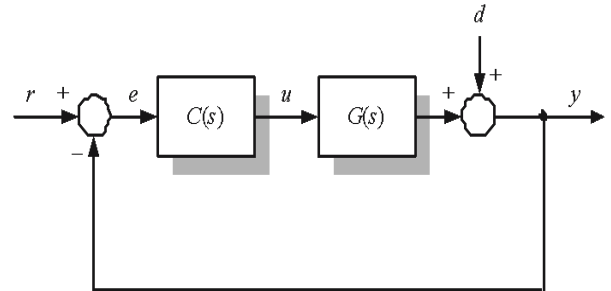


Fig. 7. Disturbance Effects of Estimation Position

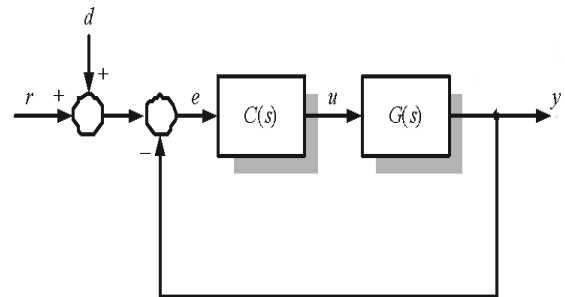


Fig. 8. Disturbance Effects of Input Reference

추정위치에 왜란이 발생할 경우엔 $G(s)C(s)$ 를 크게 하면 왜란의 영향을 보상할 수 있었으나 입력 레퍼런스 자체에 왜란이 발생할 경우엔 $G(s)C(s)$ 를 크게 하더라도 오차 성분 중 $R(s)$ 항은 제거되나 $D(s)$ 항은 보상되지 않아 왜란의 영향을 제거할 수 없다. 이와 같은 경우 $G(s)$ 성분은 영점과 관련된 항으로 영점을 원점과 멀리하기 위해 크게 설계하고 $C(s)$ 성분은 비례 계인으로 작게 설계하여 왜란의 영향을 최소한으로 제한하는 제어를 설계하여야 한다.

6. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 설계, 제작한 제어기 및 속도 추정 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 PSIM DLL을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 9는 기존 모터 회전자 위치 속도 추정인 M-기법, T-기법, MT-기법의 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로도이다. 본 시뮬레이션을 통하여 기존 속도 추정 기법의 장단점을 파악할 수 있다.

그림 10은 5000rpm 기준속도에 대한 M-방식 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다. 첫 번째 그림은 엔코더 펄스를 나타내고 두 번째 그림은 엔코더 펄스를 캡처하는 샘플링 신호이다. 여기 두 번째 그림의 반주기는 앞서 설명한 M-기법의 측정주기가 되고 이 반 주기 동안 엔코더의 펄스 수를 카운트한다. 이 주기를 줄일수록 정확도는 올라가나 속도 분해능은 떨어지게 된다. 이 시뮬레이션을 통해 저속에서는 속도추정의 정확도가 낮고 고속에서는 추정 정도가 안정됨을 알 수 있다. 샘플링 주기를 늘일 시 저속에서 속도추정 특성이 일정정도 좋아지지만 속도추정 지연이 엔코더 펄스 샘플링 주기만큼 지연되게 된다.

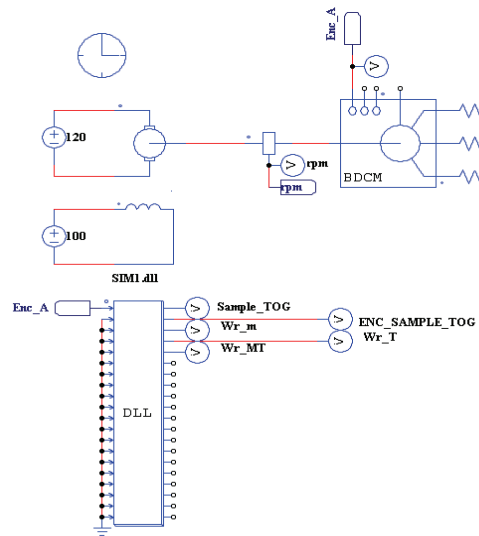


Fig. 9. Simulation for M/T/MT-method

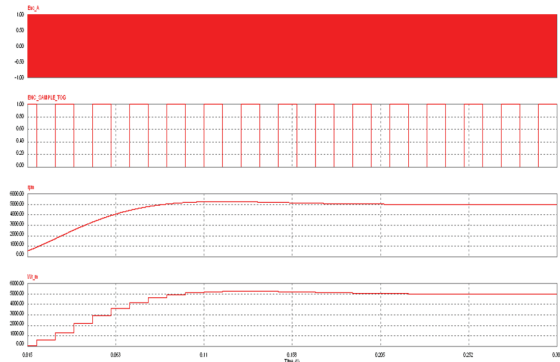


Fig. 10. Simulation result for M-method

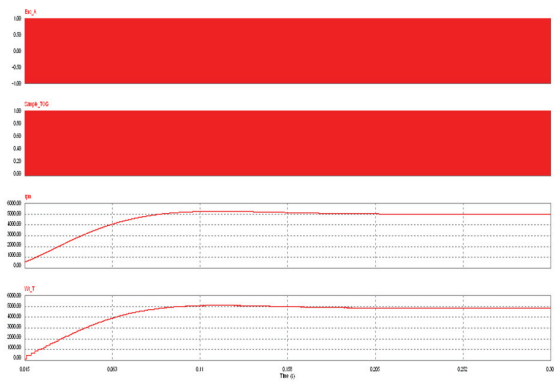


Fig. 11. Simulation result for T-method

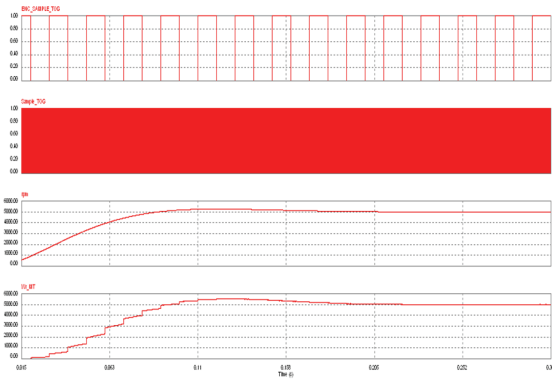


Fig. 12. Simulation result for MT-method

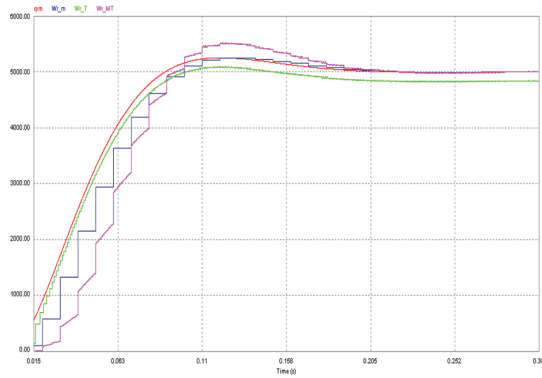


Fig. 13. Comparison of Speed Estimation Characteristic

그림 11은 5000rpm 기준속도에 대한 T-방식 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다. 첫 번째 그림은 엔코더 펄스이고 두 번째 그림은 내부 시스템 클럭 신호이다.

결과 파형을 통해 저속에서는 엔코더 펄스의 일정주기 동안에 많은 시스템 클럭 신호를 카운트 할 수 있어 속도 추정에 정확도를 높일 수 있으나 고속 영역에서는 일정한 엔코더 주기 동안 적은 수의 내부 클럭 신호만 캡처하다 보니 정확도를 기할 수 없음을 알 수 있다. 그림 12는 5000rpm 기준속도에 대한 MT-방식 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다.

저속에서도 계단이 아닌 램프에 가까운 형으로 M-기법 보다 완만한 속도 변화를 나타내는 장점이 있고 고속에서는 에러의 발생이 작다. Tc와 엔코더 펄스의 주기를 얼마로 할 것인가에 따라 성능을 결정할 수 있어 저속이나 고속 시 어느 정도 양호한 특성이 있어 일반적으로 사용하고 있으나 이 또한 고정도 및 시 지연 문제가 발생한다. 실제 속도에 대한 M/T/MT-기법에 대한 속도 추정에 대한 결과를 보여주고 있다. 고속 영역에서는 T-기법만이 실제 속도에 일정한 오차를 보일 뿐 다른 기법들은 오차가 발생하지 않고 있다. 모터의 기동 시 저속 영역에서는 T-기법은 오차가 발생하지 않고 실제 속도를 양호하게 추종하고 있지만 M-기법은 상당한 오차뿐만 아니라 계단식 파형으로 급격한 속도의 변화를 보여 추종 성능이 열악함을 알 수 있다. MT-기법은 고속 영역에서는 양호한 특성을 보이고 저속영역에서도 계단식이 아니라 램프형 추종 특성을 보이면서 양 기법 사이의 장점을 수렴하고 있음을 알 수 있으나 실제 속도와의 오차를 또한 상당히 크다는 점을 본 시뮬레이션을 통해 알 수 있다.

제안된 방식의 추정 기법의 시뮬레이션 회로를 그림 14에 나타내었다. 특성실험은 일정 속도로 회전 시의 속도 추정 능력과 기동 시 능력 그리고 고속 및 저속 영역에서 정현적인 속도 변동을 주었을 때의 특성을 알아보기 위해 시뮬레이션을 구성하였다.

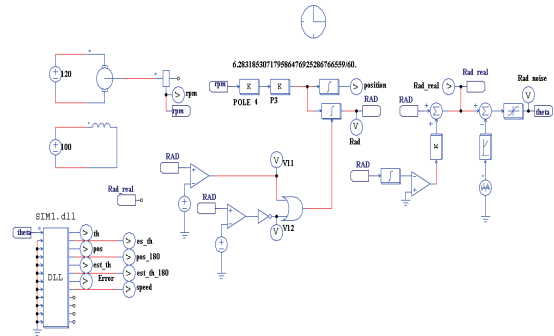


Fig. 14. Simulation with Proposed Speed stimulation

그림 15는 제안된 속도 추정기 및 가상 각도 추정 기법을 이용하여 모터 회전자가 1700 rpm으로 회전하고 있을 때의 추정 특성이다. 그림 15의 첫 번째 파형은 실제 회전 각도이고 그림 15의 두 번째 파형은 실제 회전자 각도를 100주기 동안 합성한 실제 각도와 추정각도이다. 그림 15의 세 번째는 가상 각도 추정기법을 이용한 실제 회전 각도를 180° 지연한 가상각도와 추정각도이다. 그림 15의 네 번째 파형은 스텝응답에서 속도 추정 결과로서 0.5초에 후에 정상상태 속도추정을 수행하고 있음을 알 수 있다. 아래 그림 16은 모터의 기동 시 제안된 속도 추정 기법의 특성을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과로써 초기에 그림 16의 네 번째 파형에서 약간의 오버슈트가 존재하지만 실제속도와 추정속도가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 17은 1700 rpm에서 속도 변동을 정현적으로 주었을 때, 즉 전류 지령치를 1 Hz로 주었을 때 실제속도와 추정속도를 보여주고 있다. 그림 17의 첫 번째 파형은 2파이를 주기로 한 실제 각도이고 그림 17의 두 번째 파형은 200파이를 주기로 한 실제 각도와 추정 회전자 각도이다. 그림 17의 세 번째 파형은 180도 지연한 200파이 주기의 실제 각도와 가상 각도이다. 그림 17의 마지막 파형은 제안된 추정기법에 의한 추정 속도는

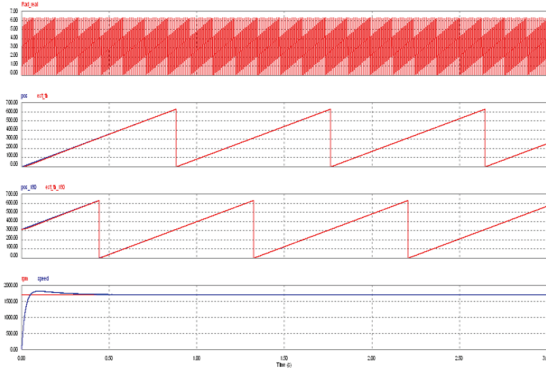


Fig. 15. Step response characteristics at 1700rpm

실제 속도와 약간의 오차가 존재함을 알 수 있지만 전체적으로 양호하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

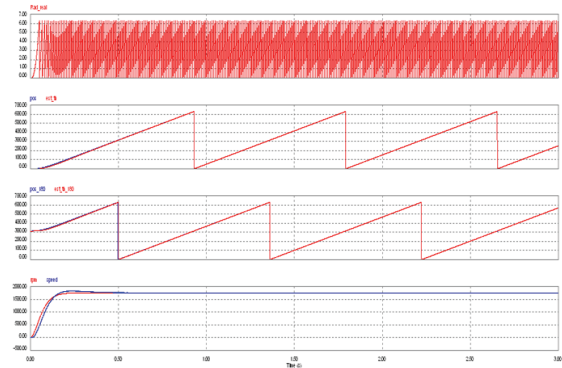


Fig. 16. Starting characteristics

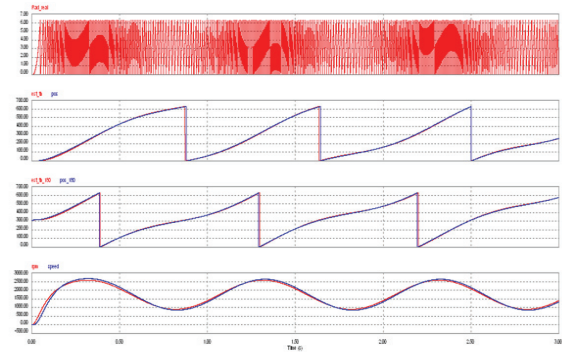


Fig. 17. Speed variation characteristics at High speed

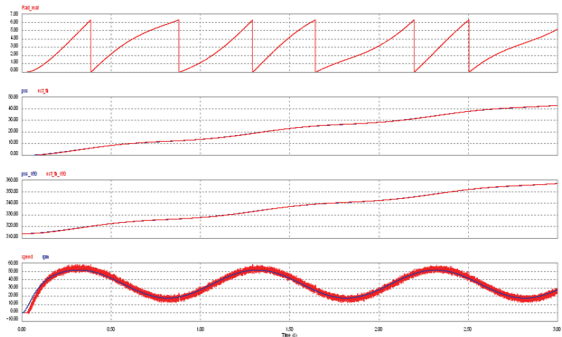


Fig. 18. Speed variation characteristics at Low speed

그림 18은 10 rpm의 저속에서 제안된 기법에 의한 추정속도가 실제속도를 양호하게 따라가고 있음을 보여주는 결과다. 위 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 회전자 추정 속도 기법이 고속과 저속 모든 영역에서 양호한 추종 특성을 가짐으로써 기존의 MT-기법보다 우수함을 보여 준다.

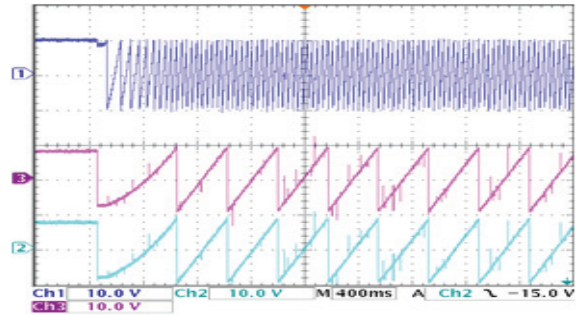


Fig. 20. Waveform of real Rotor Angle and Estimation Rotor Angle

7. 실험 결과

그림 19는 제안된 속도추정 알고리즘을 확인하기 위해 구성된 전체 시스템 사진을 나타내고 있다. 부하로는 직류 분권발전기를 사용하여 여자전류를 제어함으로써 부하량을 설정하도록 하였으며, 토크를 측정하기 위해 토크센서(NC-T100-17.5-R)를 사용하였다. 상태변수 값들은 제어보드에 장착된 2-channel D/A컨버터와 오실로스코프를 통하여 관측할 수 있도록 하였다.

그림 20은 모터 회전자의 실제 회전 각도와 추정 각도를 보여주고 있다. 그림 20의 첫 번째 파형은 실제 회전 각도이고 두 번째 파형은 실제 회전자 각도를 10배하여 나타낸 실제 회전자 각도이다. 세 번째 파형은 추정각도이다. 모터를 제어하는 데 필요한 추정 속도 정보가 실제 회전자 각도를 거의 오차 없이 추종하고 있음을 알 수 있다.

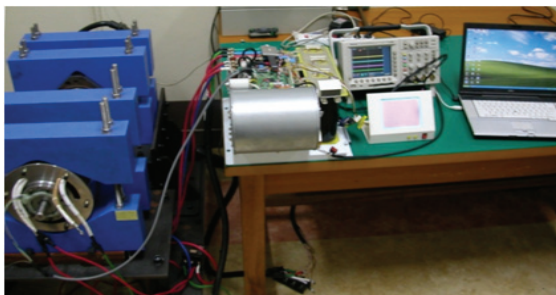
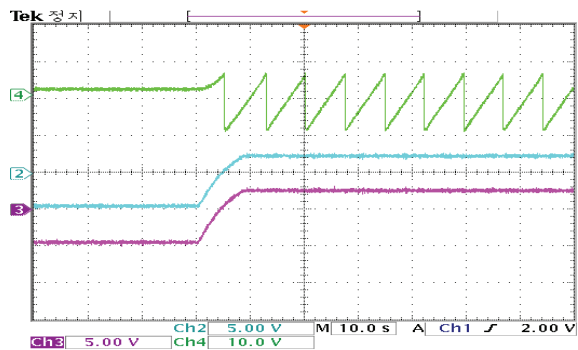
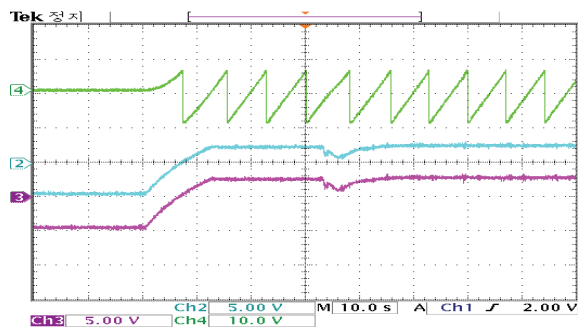


Fig. 19. Photograph of System



(a) 기동시 회전자 위치 및 모터 속도 검출



(b) 정상상태에 부하 투입시 모터 속도 파형

Fig. 21. Rotor Position & Rotor Speed Estimation

그림 21(a)는 무부하 상태에서 기동시 모터 회전자 위치와 실제 속도 및 제안된 기법에 의해 구해진 추정 속도를 나타내고 있다. 그림 21(b)는 정상상태에서 부하 투입시의 과도상태의 회전자

위치와 추정 속도를 보여주고 있다. 약 2000 rpm으로 회전하고 있는 회전자는 부하 투입으로 인해 약간의 속도 저하 현상이 발생하지만 오차 없이 정상상태나 과도상태에서도 실제 속도를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다.

8. 결론

본 연구에서는 위치와 속도의 관계식을 기본으로 하여 위치정보 지령치로 추정속도 응답을 갖는 추정알고리즘 제안하여 기존의 속도 검출 기법보다 개선된 형태의 응답을 얻을 수 있었다. 이는 일반적으로 사용되는 M/T 기법과 비교할 때, 동특성 및 정상상태 에러에 강인함을 시뮬레이션 및 하드웨어 구축으로 증명하였다. 이것은 산업 현장에 실질적인 제어에 많은 이점이 있을 거라 사료된다.

참고문헌

- 1) S. A. Nasar, I. Bolder and L. E. Unnewehr, Permanent Magnet, Reluctance, and Self synchronous Motors, CRC Press, 1993.
- 2) M. A. Alhamadi, et al., "Precise method for linearizing sine and cosine signals in resolvers and quadrature encoders applications," Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE, vol. 2, pp. 1935-1940, 2004.
- 3) D. C. Hanselman, "Resolver Signal Requirements for High Accuracy Resolver-to-Digital Conversion," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 37, p. 561, 1990, Dec.

(접수:2014.06.27. 수정:2014.07.11. 게재확정:2014.07.18.)