

편심 무게 부하를 갖는 영구자석 동기 전동기의 속도리플 저감기법 분석

論 文
53B-3-5

Analysis of Speed Ripple Reduction Methods for Permanent Magnet Synchronous Motor with Eccentric-weight Load

朴正雨* · 金鍾武** · 李基旭***
(Jung-Woo Park · Jong-Moo Kim · Ki-Wook Lee)

Abstract - This paper presents the comparison results of some kinds of control method in circumstance of eccentric load. The plant to be controlled is a computed tomography(CT) driven by a permanent magnet synchronous motor. In a CT system, many units are attached on the rotationally part of a gantry such as x-ray tube, detector, heat exchanger, and data acquisition unit etc. Therefore keeping many components to balance which have different weight is not easy; this is inescapable problem in the all CT systems.

To solve this problem against eccentric load, some kinds of control method have been compared and analysed by using prototype CT. From the experimental results it is verified that the CT drive system with model reference control method indicates higher speed regulation ability regardless of variable eccentric weight and uncertain position, and also in the limit condition of constant eccentric weight and fixed position, the compensation method with sinusoidal form is a strong candidate in view of speed ripple reduction.

Key Words : 동기전동기, 편심부하, 속도리플 저감, 기준모델제어기, 토크추정기

1. 서 론

영구자석 동기전동기에 대한 정토크 영역에서의 제어방식으로는 단위 전류당 최대토크제어(maximum torque per Ampere) 개념을 반영한 벡터제어 방식을 일반적으로 많이 사용하고 있다. 속도제어기의 출력을 q축 전류기준치로 설정하고 단위전류당 최대 토크제어기법을 근거로 하여 d축 기준 전류는 영(zero)으로 설정한 후 공간전압 PWM 방법을 적용함으로써 기준 속도 수렴과 단위 전류당 최대토크를 발생시킬 수 있도록 제어하는 방법으로 요약된다.

그런데 일반적으로 많이 사용하는 이 방법을 편심이 있는 플랜트에 적용하게 되면 속도제어기 내의 비례이득 값(P_gain) 조절로 얻을 수 있는 좋은 제어 특성영역은 제한적이며, 보통은 정상상태에서도 속도 오차가 영(zero)으로 수렴하지 않고 일정한 크기의 AC 성분을 갖는 제어 특성이 그림1과 같이 나타나며 편심무게 크기에 따라 AC 신호를 갖는 오차가 커지는 문제점을 나타낸다.

편심무게 조건을 갖는 상태에서 제어를 수행할 수밖에 없는 제어 대상(Plant)으로는 컴퓨터 단층촬영 장치(computed tomography, CT)가 있다. CT는 갠트리의 회전체 면에 X-선 발생장치를 부착한 상태에서 일정한 속도로 회전시키면서 일정 간격으로 인체를 스캐닝하면 검출기에서 인체 구조

에 대한 2진 정보를 획득할 수 있으며, 데이터를 획득할 때의 X-선관 위치를 이용하여 3차원 영상으로 복원할 수 있어 진단 장비로 활용되고 있는 의료기기이다.

X-선 발생장치를 사용하기 위해서는 고압발생 장치가 필요하며 영상을 검출하는 검출기, 내부 온도를 균일하게 제어하는 온도 조절 장치, 그리고 검출된 신호를 처리하는 DAS 장치 등이 필요하다. 각각의 장치들은 서로 용도와 목적이 상이하므로 무게 관점에서 볼 때 무게는 서로 다르지만, 회전체에 함께 부착된 상태로 회전하면서 일련의 영상정보를 획득할 수 있도록 제작되어 있다는 구조적인 특성을 갖고 있다.

CT에서 회전속도가 균일하지 않게 되면 복원된 영상이 겹친 영상과 같이 선명한 윤곽을 갖지 못하게 되므로 진단

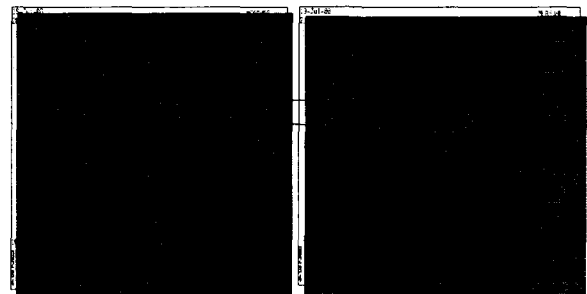


그림 1 편심부하 조건에서 정상상태 속도수렴 특성 (우측은 확대된 파형)

Fig. 1 Steady state char. under the eccentric weight load condition

* 正 會 員 : 電氣研究院 責任研究員

** 正 會 員 : 電氣研究院 先任研究員

*** 正 會 員 : 電氣研究院 研究員

接受日字 : 2003年 8月 7日

最終完了 : 2003年 12月 29日

용 영상으로 활용될 수 없게 된다. 따라서 속도리플을 줄이는 것이 시스템 품질을 결정하는 요소 중 하나이다.

속도 리플을 저감시키기 위해 가장 많이 사용하는 방법으로 균형추(dummy weight)를 부착하여 무게 평형이 이루어지도록 해결하는 방법이 있다. 방법은 쉽고 특성도 좋지만 한정된 공간 때문에 제약을 받게 된다. 이와 유사한 개념을 갖는 제어방법으로 보상전류 신호를 정현파로 규정한 후 편심무게 위치를 추정하여 오프셋(offset) 각을 결정하며, 편심무게에 상응한 크기를 조절(tuning)함으로써 정의되는 정현파를 이용하여 속도 리플을 줄이는 기법[1]이 있다. 이 방법은 간단하다는 특징이 있지만 편심 무게가 변동되는 조건이나 편심 무게 위치가 변동되는 조건에서 제어 특성이 악화되는 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하는 다른 방법으로, 관측기 이론을 적용하여 편심무게 때문에 생기는 부하토크(load torque)를 추정한 후 보상전류 크기를 도출하는 방법[2-4]이 있다.

또 다른 방법으로는 부하토크에 관계없이 정해진 기준 모델 특성을 추종하도록 제어함으로써 편심 부하를 극복하는 제어기를 사용하는 방법[5]이 있다.

본 논문에서는 편심부하 조건에서 속도리플을 줄이기 위한 위의 3가지 방법을 좀더 자세히 소개한 후 직접구동방식의 컴퓨터단층촬영장치 시제품에 적용하여 편심 무게 변동과 편심위치 변동, 그리고 기울임 운전 모드에서 얻은 실험 결과로부터 각 제어기 특성을 분석하고자 한다.

2. 속도 리플저감 기법

2.1 정현파 보상법

편심에 의해서 질량중심과 회전중심과 일치하지 않을 때 중력의 영향으로 발생하는 것이 편심에 의한 부하토크 성분기므로, 편심무게 m 이 회전체 중앙으로부터 r 만큼의 거리에 떨어져 있고 무게 중심축(중력방향 축)에서 θ 만큼 벗어나 있을 때 편심무게에 의한 부하토크는 식(1)과 같은 관계를 갖는다.

$$T_L(\theta) = rmg \sin \theta \quad [Nm] \quad (1)$$

따라서 편심무게에 의한 부하를 $A_m \sin(\omega_m t + \Phi_0)$ 으로 모델링을 할 수 있으며, 이때에 시간에 대한 속도 리플은 기계적인 토크 방정식과 동기전동기의 토크방정식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\left(\frac{B}{J}\right)\omega_m - \left(\frac{A}{J}\right)\sin(\omega_m t + \Phi_0) + \left(\frac{K_T}{J}\right)i_a \quad (2)$$

속도리플이 영(zero)이 되도록 하기 위해서는 제어전류를 나타내는 i_q 전류가 기준 속도를 추종하는데 요구되는 성분 이외에 방정식(3)과 같이 편심부하 성분을 상쇄시키는 성분을 함께 가지도록 함으로써 편심무게에 의한 속도리플을 저감시키는 방법이 정현파 보상법이다.

$$i_c = A_m \sin(\omega_m t + \Phi_0) \quad (3)$$

이 방법을 구현하기 위해서는 편심무게의 크기에 대응하는 보상전류의 크기(A_m)와 편심 위치에 대응한 보상전류의 오프셋 각(Φ_0)을 결정해야 하는데, 오프셋 위치를 정확히 추정하는 것이 보상전류의 크기를 정확히 결정하는 것보다 속도리플 저감에 큰 영향을 주는 특성을 나타낸다. 오프셋 위치를 자동으로 추정하는 방법에 대해서는 관련 문헌[1]을 참조할 수 있다. 기본적인 원리는 편심무게가 존재하는 위치를 기준으로 180도 위상차를 갖는 보상전류 주입할 때 속도리플을 최대 줄일 수 있으므로, 속도리플이 최소가 되는 위치를 찾아가는 탐색방법이다. 편심위치 추정기를 포함한 싸인파 보상법의 제어 구성도를 그림2에 나타내었다.

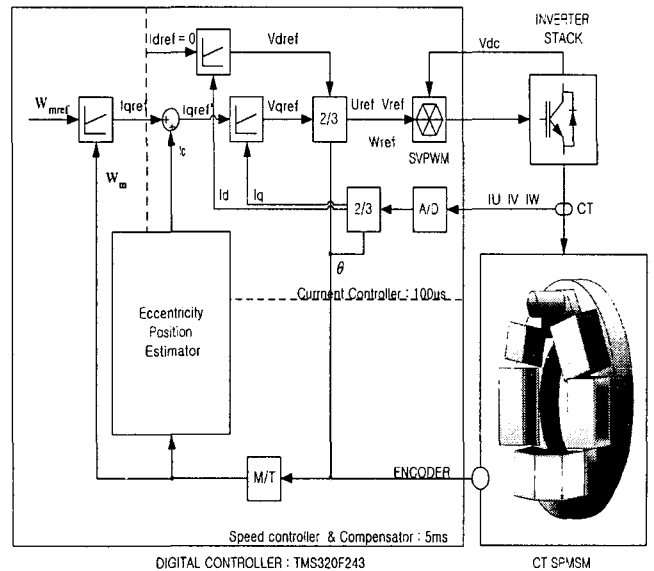


그림 2 싸인파 보상법의 블록선도

Fig. 2 Block diagram of the control method using compensation current with sine-wave-form

2.2 부하토크 추정기를 이용한 보상법

영구자석동기전동기에 최소차원 관측기 이론을 적용하기 위해 전기적인 토크 방정식과 기계적인 토크 방정식을 나타내면 식(4) 및 식(5)와 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_f i_a \triangleq K_T i_a \quad (4)$$

$$T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_e \quad (5)$$

방정식 (4)과 (5)에서 전기적인 발생토크 성분을 소거하여 한 개의 방정식으로 정리한 수식과, 속도제어기 주기가 빠르기(5ms) 때문에 한 샘플링 구간 내에서 부하 토크는 변동되

$$\omega_m = \frac{a_0(1+\tau s)}{s^2 + a_1s + a_0} \omega_m^* - \frac{bs}{s^2 + a_1s + a_0} T_L \quad (12)$$

여기서, $a_1 \triangleq \frac{B+K_P K_I}{J}$, $a_0 \triangleq \frac{K_I K_I}{J}$,
 $\tau \triangleq \frac{K_P}{K_I}$, $b \triangleq \frac{1}{J}$, $s \triangleq \frac{d}{dt}$

기준모델 제어기 관점에서, 기준모델은 부하와 관계없이 속도 제어 특성을 갖도록 선정하는 것이 바람직하므로 첫 번째 항만 고려하여 기준모델에 대한 관계식을 식(13)과 같이 선정할 수 있다. 기준모델 제어기의 출력을 기준속도 ω_m^* 으로 정의하고 사용자가 입력한 기준 속도를 ω_{ref} 라고 할 때 기준모델과 기준모델 제어기를 포함한 전체 제어기 구성도를 그림5에 나타내었다.

$$\hat{\omega}_m = \frac{\hat{a}_0(1+\hat{\tau}s)}{s^2 + \hat{a}_1s + \hat{a}_0} \omega_{ref} \quad (13)$$

여기서 $\hat{a}_0, \hat{a}_1 > 0$ 이고 $\hat{\tau} = \frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_0}$ 이다. 기준 모델과 실 모델 사이에 존재하는 오차를 e 라고 할 때, 오차방정식은 식(12)와 식(13)을 이용하여 식(14)과 같이 표현된다.

$$e = G(P)(d - v) \quad (14)$$

여기서 $G(P) = \frac{a_0(\tau s + 1)}{s^2 + \hat{a}_1s + \hat{a}_0}$

$$d = \frac{bs}{a_0(\tau s + 1)} T_L$$

$$v = \omega_m^* - \frac{(a_1 - \hat{a}_1)s + (a_0 - \hat{a}_0)}{a_0(\tau s + 1)} \omega_m - \frac{\hat{a}_0(\hat{\tau}s + 1)}{a_0(\tau s + 1)} \omega_{ref}$$

$$e = \omega_m^* - \omega_m$$

블록선도로 오차방정식을 나타내면 그림6과 같다. 오차 동특성(dynamics) 블록도에서 u 에서 e 로 가는 시불변 전달함수가 SPR(strictly positive real)이고, e 에서 v 로 가는 비선형 전달함수가 파보푸 부등식 (Popov's inequality)을 만족하도록 하면 항상 초안정 조건을 만족하여 기준모델처럼 플랜트를 제어할 수 있다[9].

SPR 조건을 만족해야하는 관계식으로부터 $\hat{a}_1 > \frac{K_I}{K_P}$ 이도록 \hat{a}_1 을 튜닝하기만 하면 항상 시불변 전달함수는 SPR 조건을 만족시킬 수 있게 된다. 그리고 파보푸 부등식 식(15)를 만족하도록 하는 관계식으로부터 식(16)과 같이 기준모델 제어기의 출력인 ω_m^* 을 결정하는 규칙이 얻어진다.

$$\int_{\tau=0}^t e(\tau)v(\tau)d\tau \geq -x \quad (15)$$

$$\omega_m^* = \omega_f + \left[\Psi_1 * \left| \frac{\hat{\tau}s + 1}{\tau s + 1} \omega_{ref} - \omega_f \right| + \Psi_2 |\hat{\omega}_m| \right] \text{Sign}(e) \quad (16)$$

단, $\Psi_1 \geq \sup \frac{\hat{a}_0}{a_0}$,

$$\Psi_2 \geq \sup \left| \frac{a_1 - \hat{a}_1}{a_0} \right|$$

$$\text{Sign}(e) = \begin{cases} +1 & e > 0 \\ -1 & e < 0 \end{cases}$$

$$\omega_f = \frac{1}{\tau s + 1} \omega_m$$

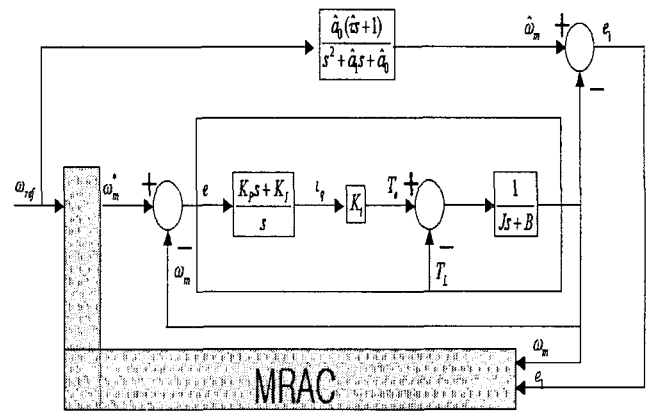


그림 5 기준모델 제어기 구성도

Fig. 5 Block diagram of speed controller with the model reference adaptive control

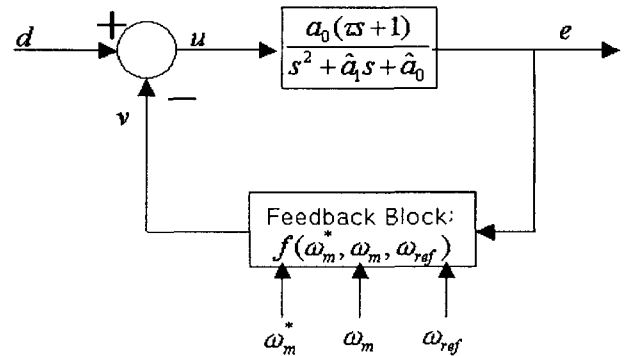


그림 6 오차 동특성 방정식의 블록선도

Fig. 6 Block diagram of the error dynamics

기준모델제어기를 종래의 일반 벡터제어기와 결합한 속도 제어기 구성도를 그림7에 나타내었다.

록 슬롯 링(slot ring)을 제작하여 엔코더로 이용하고 있는 경우이다.

표 1 제작된 영구자석 동기전동기의 전기적 사양
Table 1 Electrical specification of the prototype-PMSM

고정자 저항	1.158[Ω]
d, q축 인덕턴스	2.26[mH]
쇄교자속	0.2822[Wb]
극수	100Σ _m
회전자 관성 모멘트	110[kg]
정격속도	60[rpm]
입력	3Φ, 380Vac
정격출력	1.5[kW]

표 2 제작된 영구자석 동기전동기 설계상수
Table 2 Mechanical specification of the prototype-PMSM

항 목	수치[단위]	항 목	수치[단위]
회전자외반경(Rm)	681.5[mm]	기계적 공극	2.35[mm]
고정자 내반경(Rs)	689.1[mm]	적층 폭	50[mm]
극쌍수(p)	50	코일 높이	5.25[mm]
전류자속밀도(Br)	1.15[T]	코일한변의폭	17.2[mm]
자극비	0.7	영구자석축방향길이	50[mm]
영구자석 두께	5[mm]	영구자석 폭	30[mm]

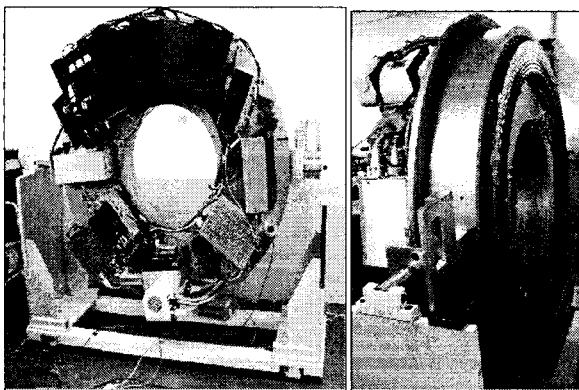


그림 10 직접구동방식의 갠트리를 갖는 시제품 CT
Fig. 10 Prototype CT including gantry of direct-drive type

그런데 CT 갠트리의 회전자 반경이 크기 때문에 전동기의 회전자 반경도 매우 커 극수를 100극 (28.8펄스수/극쌍수)으로 설계된 전동기이기 때문에, 4극인 산업용 전동기에 시도 보통 1회전 당 1,024개의 펄스수 (512펄스수/극쌍수)를 갖는 엔코더를 사용하는 것과 비교할 때 1/18 (28.8/512*100%)의 해상도를 갖는 엔코더를 이용하여 속도 제어를 수

행하는 경우에 해당되며 더욱이 전체 회전체 무게의 약1% 정도에 해당되는 편심무게(9.29kg)가 존재하는 경우이다.

4. 실험 특성 및 검토

정현파 보상법, 부하토크 추정기를 이용한 보상법, 기준모 델제어를 이용한 속도제어의 제어에 대한 실험 파형을 그림 11에서부터 그림17까지 나타내었다.

그림 11은 편심부하가 없는 조건에서 보상방법이 필요 없는 일반적인 벡터제어를 적용하였을 때의 속도 수렴 특성을 나타내었다. 기준 속도가 60[rpm]인 경우 속도 오차는 ±0.125[rpm]를 나타내고 있다. 회전체 무게인 1,000[kg]을 지지하기 위한 베어링 6개가 고정자와 회전자 사이에 배치 되어 있는데 베어링에 의한 마찰 부하가 불균일하게 존재하고 있으며, 극당 펄스수가 상대적으로 적은 점, 그리고 수제작한 저급 엔코더로 말미암아 외부에 별도의 편심무게가 존재하지 않는 조건에서도 0.2[%]의 속도 리플을 가지고 있는 초기 운전특성을 나타낸다.

그림12는 회전체 무게의 1% 정도를 편심무게로 갖는 경우에 특성을 분석하기 위하여, 표본 편심무게(9.29kg)를 부착한 조건에서 보상제어 방법이 없는 일반적인 벡터제어를 적용하였을 때의 속도 수렴 특성을 나타내었다. 이 조건에서 속도리플은 ±0.5[rpm]까지 악화되는 특성을 나타내었다.

그림13은 표본 편심무게(9.29[kg])를 부착한 상태에서 회전체를 기울여 스캐닝을 하는 운전모드(tilting mode)에서 보상제어 방법이 없는 벡터제어의 속도 수렴 특성을 나타낸다. 기울어진 경사 각도가 없는 경우와 33°되는 경우, 그리고 편심 무게를 가벼운 것(4.59[kg])으로 교체하였을 경우의 특성 결과인데 기울어지거나 편심 무게가 바뀌는 경우에서 속도 제어성이 달라진다는 것을 알 수 있다.

그림14는 표본 편심 무게(9.29[kg])를 갖되 기울임이 없는 조건에서의 운전특성으로, 보상 방법을 적용하지 않은 경우와 부하토크 추정치를 이용하는 방법 보다 싸인과 보상법과 기준모델제어를 적용한 경우에서 제어 특성이 양호하다는 것을 알 수 있다. 고정된 편심조건에서는 싸인과 보상법만으로도 좋은 특성을 얻을 수 있음을 보여 주고 있다.

그림15는 표본 편심 무게(9.29[kg])를 갖는 조건에서, 싸인과 보상법의 단점을 보여주는 것으로 회전체에 놓이는 구성장치가 ±30° 범위 내에서 편심위치가 변동될 때 제어특성이 크게 악화되는 것을 보여주고 있다. 따라서 여러 구성요소 중에서 한 개라도 무게적인 관점에서 변동이 생기면 그 때마다 보상전류의 크기와 위상을 재조정해야 한다는 단점을 보여주고 있다.

그림16은 부하토크 관측기와 기준모델 제어기의 위치변동 조건에서 강인성을 보여주는 것으로, 편심 부하(9.29[kg])의 위치를 기계적으로 90° 변동시킨 조건에서도 위치 변동에 관계없이 제어 특성을 유지한다는 것을 보여주고 있다. 강인성은 두 방식이 모두 갖고 있지만 리플의 크기를 저감하는 측면에서 볼 때 기준제어기 성능이 우수함을 알 수 있다.

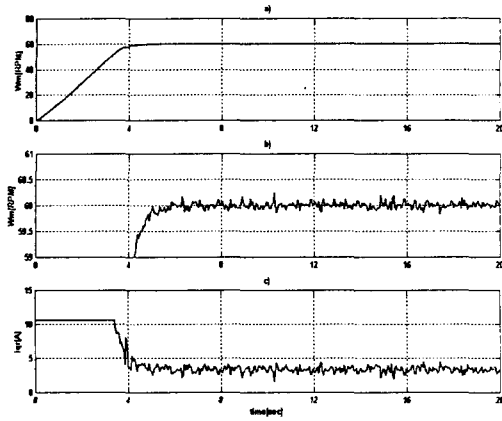


그림 11 일반형 벡터제어기의 스텝응답 특성 (편심무게 0 [kg]) a) 속도 수렴 특성 b) 정상상태의 속도리플 c) q축 전류

Fig. 11 Step response of the vec. con. without a compensation method a) speed trajectory b) speed char. at the steady state c) q-axis current

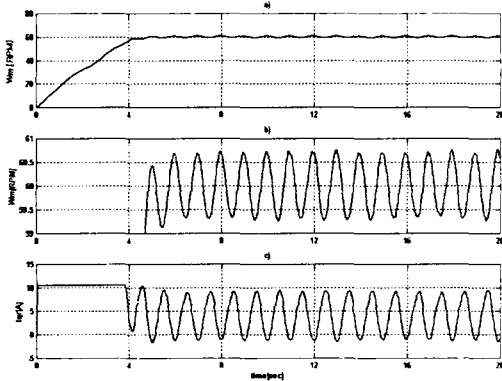


그림 12 편심무게(9.29[kg]) 조건에서 일반형 벡터제어기의 스텝응답 a) 속도 수렴 특성 b) 정상 상태의 속도리플 c) q축 전류

Fig. 12 Step response of the vec. con. without a compensation method under eccentric-weight of 9.29[kg] a) speed trajectory b) speed char. at the steady state c) q-axis current

그림17은 편심 부하무게로 4.59[kg]과 9.29[kg]인 두 종류를 사용하여 편심 무게 변동에 대한 제어기의 강인성을 살펴 본 것으로, 부하토크 관측기를 이용한 제어방법에서는 편심무게가 커질수록 속도리플이 증가하는 특성을 보여주고 있지만, 기준모델 제어기를 적용한 경우의 제어 특성에서는 실험 결과로부터 가변적인 편심무게 조건과 가변적인 편심 위치 조건에 대해서는 기준모델제어기를 적용하는 것이 속도리플 저감 측면에서 가장 좋은 특성을 얻을 수 있으며, 편심 무게의 크기 변동에 관계없이 편심무게가 없는 조건에서 나타내었던 준위에 상당하는 정도까지 속도리플이 저감됨을 알 수 있다.

편심 무게의 크기와 위치가 변동 되지 않는 조건으로 제한 할 수 있다면 싸인파 보상법도 좋은 제어 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

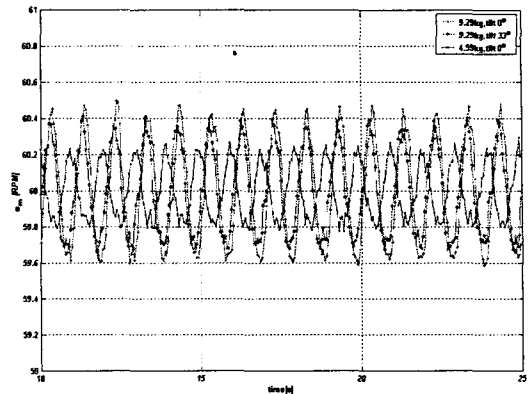


그림 13 편심무게 변동과 경사각 변동 조건에서 일반형 벡터제어기 특성

Fig. 13 Speed control char. of the vec. con. without a compensation method under variable eccentric-weight and variable tilting-angle condition

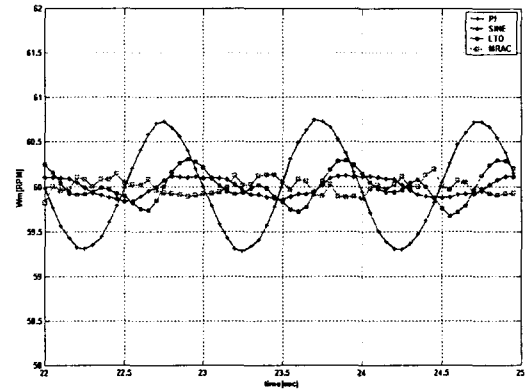


그림 14 편심무게(9.29[kg]) 조건에서 보상제어기 (PI제어기, 싸인파 보상법, 부하토크 추정치 이용방법, 기준모델제어기) 특성비교

Fig. 14 Comparison results of three kind of compensation methods (only PI speed controller, compensation current of sine type, load torque observer, model reference adaptive controller)

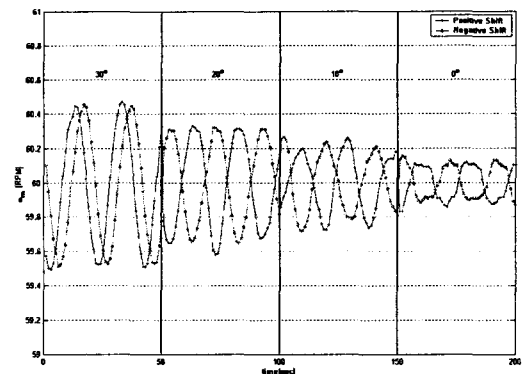


그림 15 편심무게(9.29[kg])의 위치변동에 따른 싸인파 보상법의 속도 제어 특성

Fig. 15 Speed char. of the method using compensation current of sine type under eccentric weight of 9.29 [kg] and changed position

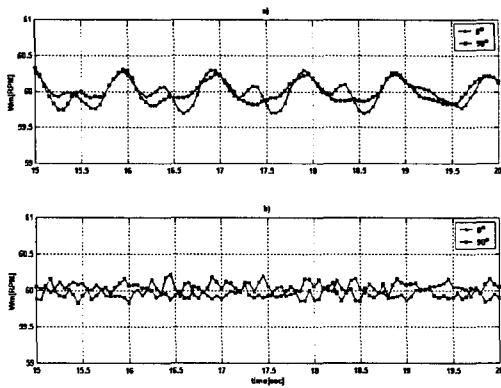


그림 16 편심무게(9.29[kg])의 위치변동에 따른 속도 제어 특성
(a) 부하토크 추정기 이용법 (b) 기준모델제어기 이용법

Fig. 16 Speed char. of the method using compensation current of sine type at the changed position with eccentric weight of 9.29[kg]

5. 결 론

편심무게 조건을 갖는 컴퓨터 단층촬영장치에 대해 속도 제어성을 개선시키기 위한 속도리플 저감기법을 소개하고 비교·분석을 하였다.

시스템에서 발생 가능한 편심 무게변동과 편심 위치 변동, 기울임 운전 모드에 대한 실험 결과로부터 기준모델 제어기의 특성이 상대적으로 가장 강인하다는 것을 검증하였다. 그리고 편심 무게에 대한 크기와 위치가 고정되어 있는 경우에는 싸인파를 갖는 보상방법 만으로도 동등한 리플저감 특성을 얻을 수 있다는 것을 검증하였다.

그리고 속도리플을 저감시킬 수 있도록 고려한 전동기 선정 방식, 전동기 설계 방식 및 설계결과, 그리고 기계적인 구조 대책에 대해 고찰하였고 이들 모두를 수용하여 제작된 직접구동방식의 슬롯없는 표면부착형 영구자석동기전동기에 대한 시제품과 세부 사양을 제시하였고, 시제품 전동기가 직접구동방식의 CT 갠트리로 접목되었을 때에 제어 특성을 개선하기 위한 방안을 종합적인 측면에서 접근한 결과를 제시하였다.

연구결과를 적용하여 씨멘스와 도시바에 이어 직접구동방식의 CT 갠트리를 국산화하였으며, 최종적인 CT 영상 비교에서 씨멘스 제품과 동등 준위를 갖는 것으로 평가되었다.

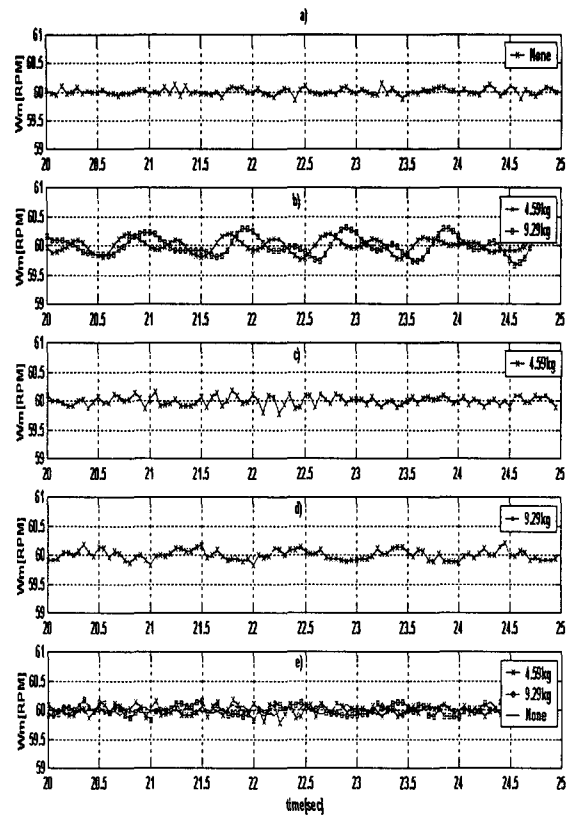


그림 17 편심무게 변동에 대한 제어기 특성 비교

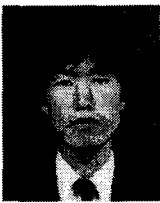
(a) 편심이 없는 경우 일반형 제어기 특성 (b) 편심 조건에서 부하토크 추정기 (4.59[kg], 9.29[kg]) (c) 4.59[kg] 편심조건에서 기준모델 제어기 (d) 9.29[kg] 편심조건에서 기준모델제어기 (e) 한평면에 a, c, 그리고 d경우의 속도리플 비교

Fig. 17 Char. comparison of the compensation methods under variable eccentric weight a) only PI speed controller without eccentric weight b) load torque observer under eccentric weight of 4.59[kg] and 9.29[kg] c) model reference adaptive controller under eccentric weight 4.59[kg] d) model reference adaptive controller under eccentric weight 9.29[kg] e) projection of all the speed char. for the case of a, c, and d

참 고 문 헌

- [1] J.W. Park, J.M. Kim, K.W. Lee etc., "A Compensation Method with Robust Regulation Ability against Eccentricity weight Load", IEEE ICEE, pp.764 -769, 2002.
- [2] Nobuyaki Matsui, Tatsuo Makino, Hirokazu Satoh, "Autocompensation of Torque Ripple of Direct Drive Motor by Torque Observer", IEEE Trans. on I.A. vol.29, no. 1, pp.187-194, JAN/FEB 1993.
- [3] Guchuan Zhu, Louis-A Dessaint, Ouassima Akhrif, Azeddine Kaddouri, "Speed Tracking Control of a permanent-Magnet Synchronous Motor with State and Load Torque Observer", IEEE Trans. on I.E. vol.47, no.2, pp.346-355, 2000.
- [4] Sung Jun Park, Han Woong Park, Man Hyung Lee, and Fumio Harashima, "A New Approach for Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of BLDC Motor", IEEE Trans. on I.E. vol.47, no.1, pp.109-114, 2000.
- [5] 최익, 기준모델 적응제어에 의한 영구자석 동기전동기의 서보제어, 서울대학교대학원, 전기공학과 박사학위논문, 1989.
- [6] Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, and Yoji Takeda, "Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High Performance Current Regulator", IEEE Trans. I.A, Vol. 30, No. 4, pp.920-926, 1994.
- [7] T.S. Low, M.A.Jabbar and T.S.Tan, "Design Aspects and Performance of a Slotless PM Motor for Hard Disk", IEEE Trans. J. Magn. pp.664-671, 1995.
- [8] Ungtae Kim and Dennis K. Lieu, "Magnetic field calculation in permanent magnet motors with rotor eccentricity: without slotting effect", IEEE Trans. J. Magn, vol. 34.no. 4. July 1998.
- [9] Hans Butler, Model Reference Adaptive Control, Prentice Hall, pp.15-17, 1992.
- [10] 강규홍, 홍정표, 김규탁, 박정우, "직접 구동 슬롯리스형 영구자석 동기전동기의 설계", 대한전기학회논문지, 제49 권, 12호, pp.789-796, 2000.

저 자 소 개



박 정 우 (朴 正 雨)

1963년 2월5일생. 1986년 충남대 공대 전자공학과졸업. 1988년 동 대학원 전자공학과 졸업 (석사). 1997년 경북대 대학원 전기공학과 졸업 (박사). 1988년~현재 한국전기연구원 책임연구원
 Tel : (055)280-1485
 Fax : (055)280-1547
 E-mail : jwpark@keri.re.kr



김 중 무 (金 鍾 武)

1970년 1월4일생. 1992년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 (수료). 1994년~현재 한국전기연구원 선임연구원
 Tel : (055)280-1483
 Fax : (055)280-1547
 E-mail : kimjm@keri.re.kr



이 기 옥 (李 基 旭)

1975년 11월 27일생. 2001년 창원대 전기공학과 졸업. 2003년 부산대 전기공학과 대학원 석사졸업. 2003년~현재 한국전기연구원 근무.
 Tel : (055)280-1482
 Fax : (055)280-1547
 E-mail : 1751127@hotmail.com