

드럼 세탁기용 유도전동기 벡터제어

(Induction motor vector control for washing machine)

배우리*,이원철*,김이훈*,원충연*,장봉안**,양하영**
 (Bae Woo-Ri*, Lee Won-Chul*, Kim Lee-Hun*, Won Chung-Yuen*, Yang Ha-Yeong**,)
 *성균관대학교, **삼성전자 시스템가전 사업부

Abstract

For technical and economic reasons, the drum drive system employed in the domestic waching machines have traditionally been based on a combination of a high speed induction motor and a pulley and belt. This paper deals with washing machine drive based on an inverter fed induction motor. In this case, voltage is applied in proportion to frequency to achieve rated motor torque through the range. But scalar control such as V/f methode is somewhat simple to implement, but the inherent coupling effect given sluggish response. Therefore, this paper describes study on induction motor vector control for drum type washing machine.

1. 서 론

최근 세탁기를 비롯한 백색 가전 시스템은 위상제어 방식에서 에너지 절약 및 소음 등과 같은 문제로 V/f 제어를 위한 인버터 방식으로 일반화 되어있다.

드럼세탁기는 PWM 인버터에의한 유도전동기와 BLDC 전동기 구동 방식이 있다.

스칼라 제어에 속하는 V/f 방식은 기본파 전압의 실효값과 주파수를 독립변수로 하여 평균적인 토크를 제어하므로 제어가 쉽고 구현이 간단하여 산업계에서 널리 쓰이고 있다.

그러나 주파수의 변화에 따라서 전동기 내부 임피던스도 변화하기 때문에 단순히 주파수만을 가변 하는 것만으로는 약계자에 의한 토크 부족이나 과여자에 의한 여자 포화 등에 의해 역률과 효율이 떨어진다.

또한 순시적인 토크 제어가 불가능하여 전동기의 고성능 제어가 어렵다.[1],[2]

따라서, 순시적인 토크 제어가 가능한 벡터제어 기법을 적용하여 유도 전동기를 제어한다.

본 논문에서는 부하의 변동에 의해 토크의 변동이 큰 드럼 세탁기 제어에 벡터제어 기법에 의한 고효율 운전의 가능성을 시뮬레이션에 의하여 확인하였다.

2. 세탁기 종류 및 구동 방식

의류를 세탁액(물+세제) 속에 넣으면 세제의 화학 작용으로 섬유에서 때가 떨어져 나가게 된다. 그러나 세제만의 화학 작용으로는 시간이 너무 걸리기 때문에, 이것에 마찰이나 진동 그리고 자유낙하 등의 기계적 작용을 가하면 때가 빠지는 속도

는 매우 빨라진다.

이러한 기계적인 작용을 가하는 것이 세탁기의 역할이다.

빨래에 가하는 물리적 힘을 얻는 방식에 따라 세탁기를 분류하며, 그에 따라 구조도 달라진다. 일반적으로 세탁물에 가해지는 힘이 크면 세탁 성능은 좋아지지만 그만큼 섬유 손상 정도가 커진다.

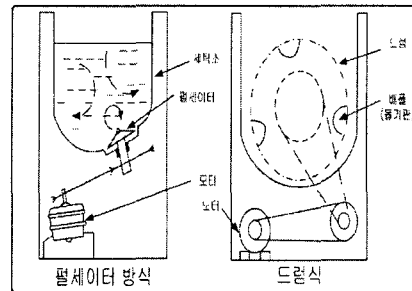


그림 1. 세탁기의 종류
 Fig 1. Two types of washing machine

그림 1은 세탁기 구조에 따른 세탁기의 종류이다.

일반 세탁기(펠세이터 방식)는 세탁통 아래 설치된 회전날개(펠세이터)를 좌우로 회전시키는 구조로 강한 물살을 이용한다. 상대적으로 짧은 시간에 세탁이 가능하다는 장점이 있지만 세탁물이 서로 엉키는 단점이 있다. 수질이 좋아 냉수 세탁이 가능한 한국·일본에서 주로 사용하며 미국 등에서도 사용된다.

비누가 잘 풀리지 않는 '센물' 이 많은 유럽에서 주로 사용되는 드럼세탁기는 다수의 작은 구멍이 뚫린 드럼이 수평축을 기점으로 하여 회전하고, 드럼 내부의 돌기판(baffle)에 세탁물

이 걸려서 들어 올려져 수면에 떨어지는 방법으로 세탁을 한다.

종래의 드럼세탁기는 위상제어 정류기에 의한 유니버설 전동기방식을 사용하였다. 하지만 최근에는 에너지 절약 효과가 높은 PWM 인버터와 유도전동기 또는 BLDC 전동기를 사용하는 방식으로 나누어 진다.

드럼세탁기에 요구되고 있는 부하특성은 그림 2와 같이 20~30[Nm]의 높은 토크를 필요로 하는 저속 10~45[rpm]의 세탁 모드와 800~1200[rpm]의 고속회전이 필요한 탈수모드로 구별되는 두 가지의 부하 토크 영역이 있다.

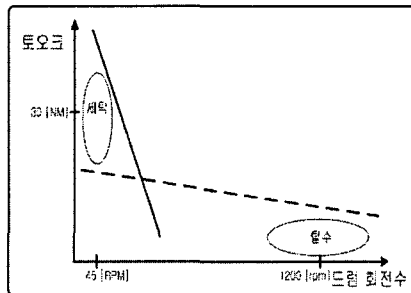


그림 2. 드럼 세탁기의 부하특성
Fig 2. Load characteristics of washing machine

현재 드럼 세탁기는 상이한 부하영역에 대하여 저속 및 높은 토크가 필요한 세탁모드에는 기어 및 폴리에 의해 감속비를 약 1:13.7로 하여 높은 토크를 낼 수 있도록 한다.

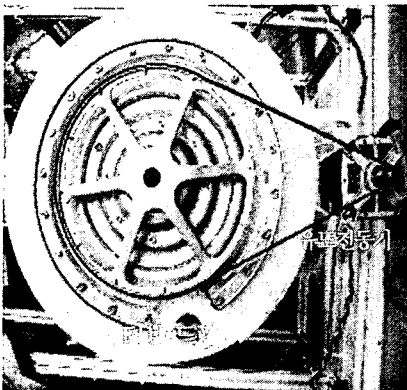


그림 3. 3상 유도 전동기와 티브(드럼) 연결 상태
Fig 3. Coupling state of three phase induction motor and tub(drum)

본 논문에서는 그림 3처럼 유도전동기와 드럼을 벨트만으로 연결하여 드럼의 속도를 세탁 모드 45[rpm]에서 탈수 모드 1200[rpm]까지 넓은 속도영역에서 구동한다.

따라서 정해진 속도로 드럼을 회전시키기 위해 유도전동기는 넓은 속도영역 0 ~ 16440[rpm]에서 구동된다.

그림 4에서 드럼 세탁기는 동작 영역이 크게 세탁과 탈수 두 가지로 구분되어진다.

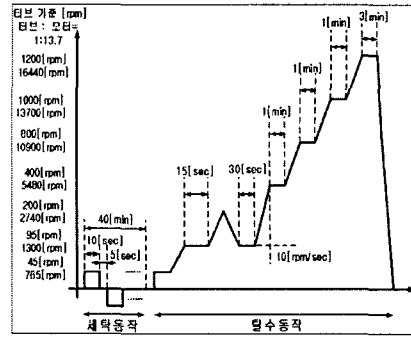


그림 4. 드럼 세탁기의 세탁 및 탈수 속도 도표
Fig 4. Washing and spinning speed profile of drum washing machine

그림 4에서와 같이 세탁 영역에서는 일정 시간 동안 드럼을 정역 회전시켜 세탁물을 세탁하게 된다. 세탁 동작의 전동기 속도는 756 [rpm]이며 드럼의 속도는 45 [rpm] 이다.

최종 탈수 속도에 도달하기 전에 이루어지는 동작은 빨래의 엉킴을 풀어서 불평형 부하를 줄여 드럼의 수평을 유지하여 원활한 탈수를 가능하게 한다.

기존의 펄세이터 방식 세탁기는 옷감과 물의 마찰을 이용해 세탁을 하였으나 드럼 세탁기는 세탁물을 중력을 이용하여 떨어뜨려서 세탁을 하게 된다.

즉 드럼이 45[rpm]으로 회전하면서 세탁물을 감아올리고 정점에 도달하면 세탁물을 밑으로 떨어뜨려 세탁을 함으로써 세탁력이 기존 펄세이터 방식에 비해 증가되어 마치 방망이로 두드려 세탁을 하는 원리이다.

그리고 기존의 펄세이터 세탁기가 물을 가득 채워서 세탁을 하는 반면에 드럼 세탁기는 소량의 물만 필요하므로 경제적인 측면이 유리하다.[3]

3. 유도전동기의 전압 방정식 및 벡터제어

3.1 유도전동기 시스템 방정식

농형 유도전동기의 고정자 권선은 3상 Y결선 대칭 분포권이 고, 공극의 기자력은 정현파이며, 고정자 철심의 자화특성은 선형이라는 가정하에 고정자 및 회전자측의 전압방정식을 동기 회전좌표계에서 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \\ v_{dr}^e \\ v_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_s L_s & pL_m & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + pL_s & \omega_s L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega_s - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)L_m & pL_m & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서, $p = \frac{d}{dt}$ 이고, 농형 유도전동기의 경우 $v_{\omega}^e = v_{\omega_r}^e = 0$ 이다.

식 (1)의 상태방정식으로부터

$$\begin{aligned}
V_{ds}^w &= R_s i_{ds}^w + p \lambda_{ds}^w - \omega \lambda_{qs}^w \\
V_{qs}^w &= R_s i_{qs}^w + p \lambda_{qs}^w + \omega \lambda_{ds}^w \\
0 &= R_r i_{dr}^w + p \lambda_{dr}^w - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}^w \\
0 &= R_r i_{qr}^w + p \lambda_{qr}^w + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}^w
\end{aligned} \tag{2}$$

로 나타내고, 다음의 쇄교자속을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\lambda_{ds}^w &= L_s i_{ds}^w + L_m i_{dr}^w \\
\lambda_{qs}^w &= L_s i_{qs}^w + L_m i_{qr}^w \\
\lambda_{dr}^w &= L_m i_{ds}^w + L_r i_{dr}^w \\
\lambda_{qr}^w &= L_m i_{qs}^w + L_r i_{qr}^w
\end{aligned} \tag{3}$$

이 때 발생 토오크는

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^w i_{qs}^w - \lambda_{qr}^w i_{ds}^w) \tag{4}$$

이다.

3.2 약계자 영역을 고려한 유도전동기 벡터제어

종래의 유도 전동기를 사용하는 드림세탁기는 탈수 동작 시 전동기의 속도는 정격을 넘어 약계자 영역으로 넘어가게 된다. 그리고 약계자 운전을 위하여 속도가 증가함에 따라 $1/\omega_e$ 로 자속성분 전류를 줄이는 방식을 사용했다.

그러나 이 방식은 회전자 자속을 정확히 추정하지 못하여 출력 토오크가 저하되고 과도한 자속으로 인한 전류제어 능력을 잃어버리는 경우가 있다.

따라서 원만한 약계자 운전을 행하기 위해서는 최적의 회전자 자속을 고려한 벡터제어가 필수적이다.

벡터 제어는 토오크와 자속의 독립적인 제어를 위해 고정자 전류를 토크발생 전류성분(i_{qs}^e)과 자속발생 전류성분(i_{ds}^e)으로 분리하여 제어한다.

그 때의 회전자 관계식은 식 (5)와 같다. 회전자 자속이 d축에만 존재하도록 제어하므로, 식(5)의 $\lambda_{qr}^e=0$ 이 된다.

$$\lambda_r^e = \lambda_{dr}^e + j \lambda_{qr}^e = \lambda_{dr}^e \tag{5}$$

$$i_{qs}^e = -\frac{L_r}{L_m} i_{qr}^e \tag{6}$$

$\lambda_{qr}^e=0$ 을 식 (3)에 대입하면 식(6)에서처럼 고정자 전류의 관계가 성립된다.

또한 $\lambda_{qr}^e=0$ 을 식 (2)와(4)에 적용하면 전동기 발생 토오크와 슬립각속도는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

(7)

$$\begin{aligned}
T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^w i_{qs}^w \\
\omega_e - \omega_r &= \omega_s = -\frac{R_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e}
\end{aligned} \tag{8}$$

위의 식(8)에 식 (6)을 이용하여 변형하면 i_{ds}^e , i_{qs}^e 를 이용하여 식(9)의 슬립각속도인 ω_s 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\omega_s &= -\frac{R_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} = \frac{R_r L_m}{\lambda_{dr}^e L_r} i_{qs}^e \\
&= \left[\left(1 + p \frac{L_r}{R_r} \right) \frac{1}{i_{ds}^e} \right] \frac{R_r}{L_r} i_{qs}^e
\end{aligned} \tag{9}$$

여기에, 실제 회전하고 있는 회전자 자속의 각속도를 측정하여 얻은 회전자 각속도 ω_r 를 구하면, 회전자 자속의 위치 θ_e 는

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e dt = \int_0^t (\omega_r + \omega_s) dt \tag{10}$$

이다.

이와 같이 전동기에서 측정된 회전속도와 고정자 전류 및 전동기 파라미터들로부터 계산된 슬립각속도를 이용하므로 간접벡터제어라고 한다.

정격속도 이상에서 전동기 회전속도가 증가함에 따라 자속 발생 전류성분을 감소시킴으로써 구현된다.

일반적으로 유도전동기의 출력토크는 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대전압과 전류로 제한되므로, 최대토크로 발생시키기 위해서 고정자 전류에 토오크성분 전류와 자속성분 전류를 최적으로 분해하여 운전해야 한다. [4-6]

3.2.1 전압과 전류 제한 조건

인버터가 인가할 수 있는 최대 고정자 전압 (V_{smax})은 직류 링크 전압 V_d 와 사용된 PWM 기법에 따라 크게 달라진다.

본 논문에서는 전류제어 특성이 우수하고 넓은 선형 제어 영역을 가지는 공간전압벡터 PWM 방식을 사용한다.

이때 V_{smax} 는 $V_d/\sqrt{3}$ 이 되고 또한, 고정자 전류의 최대 크기도 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해서 제한된다.

식 (11),(12)는 전압과 전류제한 조건식을 나타낸다.

$$V_{ds}^{e*2} + V_{qs}^{e*2} \leq V_{smax}^2 \tag{11}$$

$$i_{ds}^{e*2} + i_{qs}^{e*2} \leq i_{max}^2 \tag{12}$$

정상상태에서 유도전동기의 동기 회전좌표계의 전압 방정식

은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ds}^{e*} = R_s i_{ds}^{e*} - \omega_e L_s i_{qs}^{e*} \quad (13)$$

$$V_{qs}^{e*} = R_s i_{qs}^{e*} + \omega_e L_s i_{ds}^{e*} \quad (14)$$

고속운전 영역에서 고정자 저항의 전압 강하는 무시될 수 있으므로 간략화 된 고정자 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds}^{e*} \approx -\omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*} \quad (15)$$

$$V_{qs}^{e*} \approx \frac{L_m}{L_r} \omega_e \lambda_{dr}^{e*} + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^{e*} = \omega_e L_s i_{ds}^{e*} \quad (16)$$

식 (15)와 (16)을 식 (11)에 대입하면 전압 제한 조건식은 다음과 같이 나타낸다.

$$(\omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*})^2 + (\omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 \leq V_{smax}^2 \quad (17)$$

3.2.2 제어 가능한 기준전류의 영역

그림 5는 전압제한타원을 나타내며 제어 가능한 기준전류의 영역은 운전주파수 ω_e 의 함수인 타원의 내부로 주어진다.

이 타원의 영역은 운전 주파수 증가에 따라 점점 작아지며 이는 제어 가능한 기준전류의 범위가 줄어든다는 것을 나타낸다.

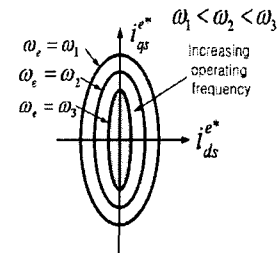


그림 5. 전압 제한 타원
Fig.5 Voltage-limit ellipse

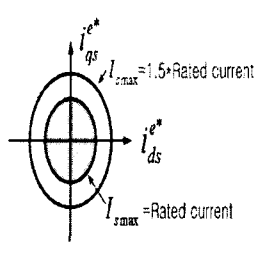


그림 6. 전류 제한원
Fig.6 Current-limit circle

그림 6은 전류 제한원을 나타내며 전류 제한 조건하에서 제어 가능한 전류의 영역은 I_{smax} 를 반지름으로 하는 원의 내부로 표현된다.

정상상태에서 유도전동기의 발생토크 식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^{e*} i_{qs}^{e*} \quad (18)$$

i_{ds}^* 과 i_{qs}^* 의 곱이 최대가 되면 전동기는 최대 토크를 발생한다.

그림 7은 전압과 전류의 두 제한 조건을 모두 고려한 경우

의 제어 가능한 기준전류 영역으로 전압 제한타원과 전류 제한원의 공통된 영역이다.

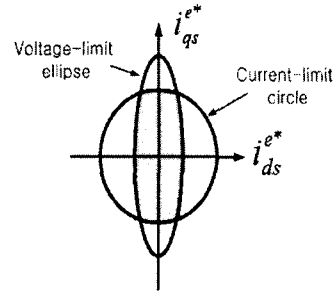


그림 7. 전압 제한 타원과 전류 제한원의 공통영역
Fig.7 Common region between voltage-limit ellipse and current-limit circle

이상에서 설명한 유도전동기의 속도제어 알고리즘을 블록도로 나타내면 그림 8과 같다.

기준 지령속도 ω_r^* 이 주어지면 이는 전동기 회전축의 증분형 엔코더로부터 측정된 실제속도 ω 과 비교되어 토오크를 발생하기 위한 q축 기준전류 i_{qs}^* 를 발생한다. 이 속도제어기 및 자속제어기, 전류제어기에는 모든 제어기의 오차보상에는 PI 제어 방식을 사용한다.

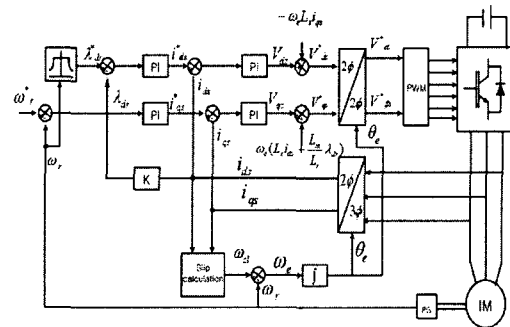


그림 8. 드럼세탁기용 유도전동기 약제자 제어 블록도
Fig.8. Control block of field weakening incut ion motor for drum washing machine

또한 일정한 값으로 주어지는 회전자 기준자속 λ_{dr}^* 은 전동기의 고정자 전류로부터 환산된 실제 회전자 자속 λ_{dr} 과 비교되어 자속을 발생하기 위한 d축 기준전류 i_{ds}^* 을 만든다.

정격 속도 내에서의 속도제어의 경우에는 회전자 기준자속은 정격값으로 일정하게 유지하지만, 정격속도 이상에서는 인버터의 직류 입력전압 또는 전동기의 고정자 정격전압의 제한 때문에 이것의 크기를 감소시키는 약제자 제어를 사용한다.

이와 같이 발생된 d축 및 q축의 기준전류는 각각 전동기의 고정자에서 측정된 실제전류와 비교되어 이를 인버터로 제어하기 위한 기준전압 V_{dr}^* V_{qr}^* 가 된다.

그러나 이 기준전압들은 인버터로 인가되기 전에 각각 역기전력에 해당하는 값으로 보상됨으로써 최종적인 고정자 기

준 전압 $V_d^* V_q^*$ 가 된다.

한편, 동기 회전좌표계의 기준전압을 실제 인버터에 인가하기 위한 2축 정지좌표계의 기준전압으로 변환하거나, 고정자 3상 전류를 추정하여 이를 동기 회전좌표계로 변환하기 위해서는 자속각 θ_e 가 사용된다.

이 θ_e 는 실제 속도 ω_r 과 추정된 슬립 속도 ω_s 의 합인 ω_e 를 적분하여 구하여진다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 9는 드럼세탁기용 유도전동기에 벡터제어를 적용한 전동기 구동 시스템의 회로도이다.

시뮬레이션은 전력전자 전용 툴인 Psim6.0으로 수행하였고 전동기의 벡터제어는 Psim의 DLL(Dynamic Link Library) 블록을 이용하여 ANSI-C로 코딩하여 구성하였다. 실제 시뮬레이션에 사용한 드럼세탁기용 유도전동기 파라미터를 일정 토오크 영역에서부터 특정 영역까지 시뮬레이션을 하였다.

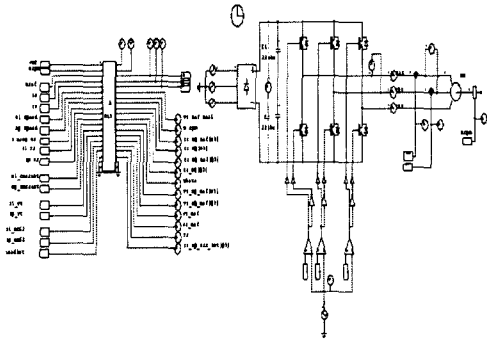


그림 9. 드럼세탁기용 유도전동기 구동시스템의 Psim 시뮬레이션 회로도

Fig 9.Psim simulation circuit of induction motor drive system for drum washing machine

표 1은 시뮬레이션에 사용한 드럼세탁기용 고속 유도전동기의 파라미터를 나타낸다.

표 1. 실험 대상 유도전동기 시스템 정격 및 파라미터

600 [W], 180 [V], 2pole, 100 [Hz], 6000 [rpm]	
R_s : 9.2 [Ω]	R_r : 4.45 [Ω]
L_s : 11.55 [mH]	L_r : 11.55 [mH]
L_m : 628 [mH]	J_m : 0.000783 [kg · m ²]

그림 10에서 그림 4의 세탁기의 세탁 및 탈수 영역(765 [rpm]~ 16440 [rpm])을 시뮬레이션에 사용한 드럼세탁기용 유도전동기가 기준 속도를 잘 추종하고 있다.

전압 및 전류 제한 조건 때문에 고속에서는 지령 일정 토오크 영역에서보다 응답특성이 떨어진다.

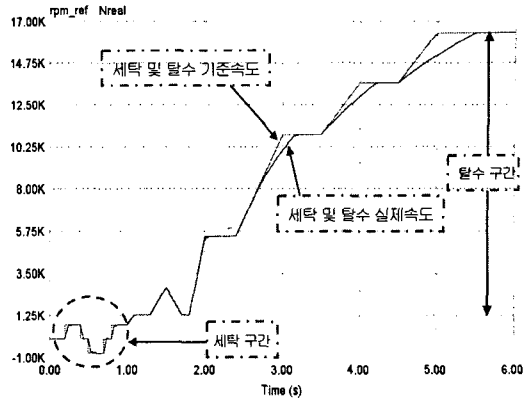


그림 10. 드럼 세탁기의 세탁 및 탈수 속도 시뮬레이션 파형
Fig 10. Washing and spinning velocity waveform of drum washing machine

그림 11은 정격속도 이내에서 기준속도를 0 [rpm] → 2740 [rpm] → 5180 [rpm] 으로 변화시켰을 경우 전동기 실제속도 파형, i_{d^*} , i_{q^*} 의 파형이다.

정격속도 내에서의 벡터제어의 경우 일정 자속 운전을 하기 때문에 i_{d^*} 는 일정 전류 제어를 한다.

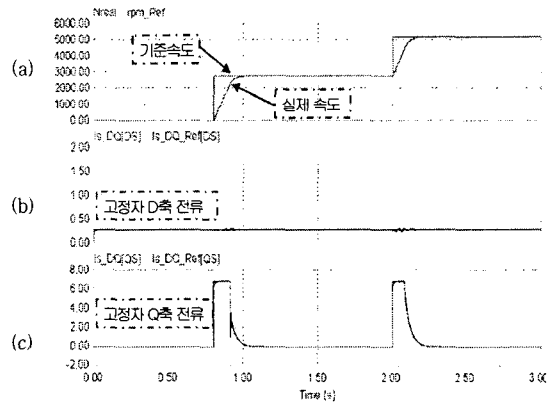


그림 11. 일정 토오크 이내에서의 ω_r , i_{d^*} , i_{q^*} 시뮬레이션 파형
(a) ω_r (b) i_{d^*} (c) i_{q^*}

Fig 11.Simulation Waveforms of ω_r , i_{d^*} , i_{q^*} in constant torque region

그림 12는 유도전동기가 약계자 영역에서 구동할 때의 속도 및 그에 따른 자속의 시뮬레이션 파형이다. 유도전동기의 정격 속도인 6000 [rpm]이상의 고속 운전 시 약계자 운전을 한다.

즉 6000 [rpm] 이상의 고속 운전에서 자속이 속도가 증가함에 따라 감소한다.

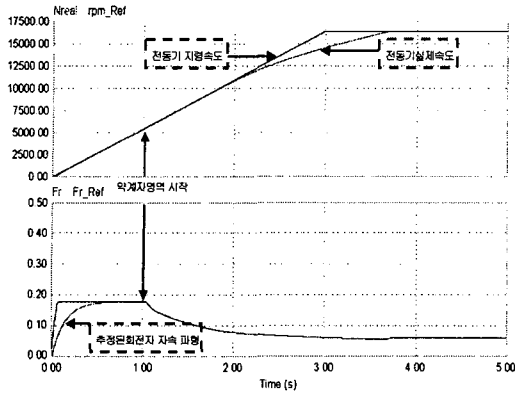


그림 12. 약제자 영역에서의 속도, 자속 시뮬레이션파형
 Fig 12. Waveform of rotor speed, rotor flux in the field weakening region

그림 13은 드림 세탁기용 유도전동기가 약제자 영역에서의 기준속도 변동에 대한 과도응답 시뮬레이션 파형이다. 이는 지령 속도 변화시 토크 응답 특성이 어떻게 변화하는지 알기 위해 속도를 7000[rpm]에서 7500[rpm]으로 증가시켰다.

이 때, 자속의 변동을 요구하기 때문에 그에 따른 i_{ds}^{e*} , i_{qs}^{e*} 을 보여준다.

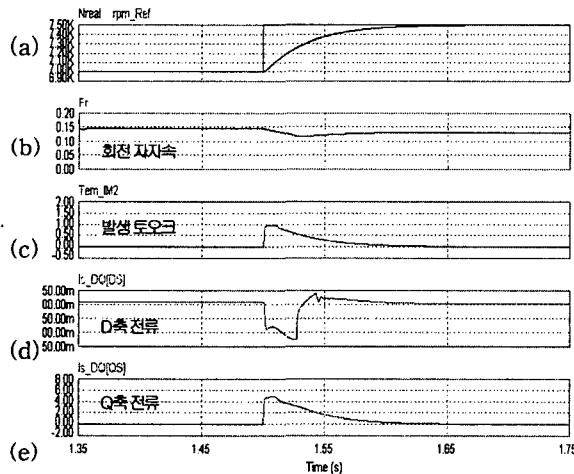


그림 13. 약제자 영역에서의 기준속도 변동에 대한 과도응답
 (a) 속도 (b) 자속 (c) 토크 (d) i_{ds}^{e*} (e) i_{qs}^{e*}
 Fig 13. Transient response for change of reference speed in field weakening region

6. 결론

본 논문은 유도전동기에 벡터제어를 적용하여 드림 세탁기에서 이루어지는 세탁과 탈수 모드 부분을 시뮬레이션 하였다.

Psim을 이용한 디지털 시뮬레이션을 통해 드림세탁기용 고속 유도전동기에 벡터제어를 적용하여 일정자속 영역과 약제자 영역에서 가변속 제어가 가능함을 입증하였다.

전 속도 영역에서 유도전동기 고성능 제어를 실현하기 위해서 간접벡터제어를 사용한 약제자 운전을 적용하였다.

기존의 드림세탁기에는 약제자 운전을 위해 속도의 반비례로 자속성분 전류를 감소하는 방식으로 설계되었다.

그러나 이 방식으로 선정된 자속은 적절하지 못하여 구동 시스템이 전동기의 토크 능력을 충분히 이용할 수 없게 된다.

제안한 방식에서는 고속의 영역을 크게 두 영역으로 나누어 각각의 영역에서 전동기가 최대 토크를 발생하도록 하는 최적의 회전자 자속을 추정하였다.

향후 제안한 방식을 이용하여 부하 실험과 실제 세탁기에 제안한 고속 유도전동기 벡터제어 방식을 적용하여 그 타당성을 확인할 예정이다.

이 논문은 삼성전자의 지원을 받은 SFARC 2004-0656-800에 의하여 연구되었음.
 (2004.09~2005.08)

참고 문헌

- [1] P. Vas, Vector Control of AC Machines, Clarendon Press, pp.316-330, 1990.
- [2] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, pp.356-385, 1986
- [3] 이원철, 김이훈, 원충연, 장봉안, RPWM기법을 이용한 세탁기용 유도전동기 구동 시스템의 소음 및 진동 저감, 한국조명전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp. 69-73, 2004.
- [4] R.J. Kerkman, T.M. Rowan, D. Leggate, Indirect field-oriented control of an induction motor in the field-weakening region, IEEE Transactions on Industry Applications, pp.850 - 857, 1992.
- [5] Myoung-Ho Shin, Dong-Seok Hyun, Maximum torque control of stator-flux-oriented induction machine drive in the field-weakening region, IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 117 - 122, 2002.
- [6] Sang-Hoon Kim, Seung-Ki Sul, Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region, Industry Applications, IEEE Transactions on, pp. 787 - 794, 1995.