

드럼 세탁기용 유도전동기의 효율운전에 관한 연구

(Induction Motor Vector Control for Drum Washing Machine)

정정길*,이원철*,배우리*,원충연*,장봉안**,양하영**

(Jeong Jeong-Gil*, Lee Won-Chul, *Bae Woo-Ri*, Won Chung-Yuen*, Jang Bong-An**, Yang Ha-Yeong**,)

(*성균관대학교, **삼성전자 시스템가전 사업부)

Abstract

In home appliances, electric energy is optimally controlled by using power electronics technology, creating a comfortable environment in terms of energy saving, low sound generation, and reduced time consumption. Usually simplicity and robustness make the three phase induction motor attractive for use in domestic appliance, including washing machines. Two main types of domestic washing machine have evolved. We focus on the front loading machine favored in Europe, which has a horizontal drum axis. With the advent of electronic control, universal motor, with a phase controller operating directly from the ac source, has become popular in washing machine.

The efficiency improvement in home appliances is very important for customers. Induction motor efficiency can be improved by means of loss reduction, which can be realized by motor selection and design, improvement of the waveforms supplied by power inverter, utilizing a suitable control method.

So this paper describes the architecture and feature of washing machine fed induction motor drive under minimizing losses vector control.

1. 서 론

세탁기를 비롯한 백색 가전 시스템은 단상유도전동기의위상제어 방식에서 에너지 절약 및 소음 등과 같은 문제로 유도전동기 V/f 제어를 위한 인버터 방식으로 일반화 되었다.

세탁기는 그 구동방식에 따라, 크게 일반 세탁기(펄세이터 방식)와 드럼 세탁기(드럼 방식)로 나누어진다.

일반 세탁기는 세탁통 아래 설치된 회전날개(펄세이터)를 좌우로 회전시키는 구조로 강한 물살을 이용한다. 상대적으로 세탁성능이 좋고 짧은 시간에 세탁이 가능하다.

반면에 드럼을 회전시켜 세탁물이 떨어지는 힘(자유낙하)을 이용하는 드럼 세탁기의 경우, 그 힘이 매우 약하므로 약 60°C 정도의 온도에서 오랜 시간 세탁하여야 한다.

드럼세탁기는 특성 상, 일반 세탁기에 비해 상대적으로 세탁시간이 길고, 약 60°C 정도의 온도에서 세탁하여야 하므로 전력소비량이 크다.

그러므로 드럼세탁기의 제어에 있어서 최적의 입력 전력(소비 전력)의 공급과 최소의 손실 운전 알고리즘 구현이 필수적이다.

드럼 세탁기의 세탁 패턴에서 가장 기본적인 두 행정은 세탁과 탈수이다.[1]

유도전동기를 이용한 드럼 세탁기의 경우 세탁 동작은 전동기의 정격 내 저속도로 회전한다. 이 동작은 비

교적 속도가 느리고 정역회전을 반복하기 때문에 순시토크 제어가 가능한 벡터제어를 적용하여 세탁 성능을 향상시킬 수 있다.

그러나 탈수 부분에서는 전동기가 정방향 회전하고, 고속으로 인한 관성이 크기 때문에 정확한 토크 제어보다는 강한 원심력이 필요하다.

그러므로, 벡터제어보다는 기존의 제어가 간단한 스칼라 제어를 적용하여 드럼 세탁기의 성능을 개선하고 고효율 운전이 가능하다.

2. 세탁기 종류 및 구동 방식

2.1 세탁기의 원리 및 종류

의류를 세탁액(물+세제) 속에 넣으면 세제의 화학 작용으로 섬유에서 때가 떨어져 나가게 된다.

그러나 세제만의 화학작용으로는 시간이 너무 걸리기 때문에, 이것에 마찰이나 진동 그리고 자유낙하 등의 기계적 작용을 가하면 때가 빠지는 속도는 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 1은 구조에 따른 세탁기의 분류를 나타낸다.

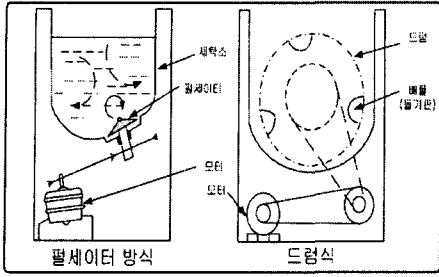


그림 1. 세탁기의 종류

일반 세탁기(펄세이터 방식)는 세탁통 아래 설치된 회전 날개를 좌우로 회전시키는 구조로 강한 물살을 이용한다.

상대적으로 짧은 시간에 세탁이 가능하다는 장점이 있지만 세탁물이 서로 엉키는 단점이 있다.

비누가 잘 풀리지 않는 '센물'이 많은 유럽에서 주로 사용되는 드럼 세탁기는 다수의 작은 구멍이 뚫린 드럼이 수평축을 지점으로 하여 회전하고, 드럼 내부의 돌기판(baffle)에 세탁물이 걸려서 들어 올려져 수면에 떨어지는 방법으로 세탁을 한다.

즉, 다람쥐 쳇바퀴처럼 생긴 드럼을 회전시켜 세탁물이 떨어지는 힘(자유 낙하)을 이용하므로 세탁물을 비벼주는 힘은 매우 약하다. 그래서 물을 가열하는 전기 히터가 있는 등 구조가 복잡해서 가격이 비싸고 전력 소비도 많다.

상대적으로 물 사용량이 적고 세탁물이 덜 엉키는 장점이 있다.

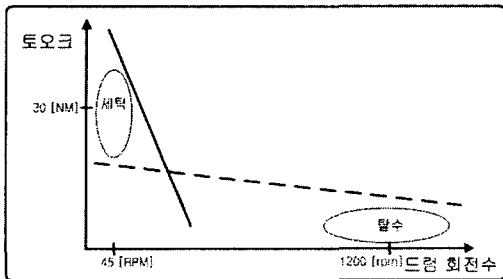


그림 2. 드럼 세탁기의 부하특성

그림 2는 드럼세탁기의 부하특성을 나타내며, 상이한 부하영역에 대하여 저속 및 높은 토크가 필요한 세탁모드에는 기어 및 풀리에 의해 감속비를 약 1:13.7로 하여 높은 토크를 낼 수 있도록 한다.

그림 3과 같이 드럼 세탁기는 동작 영역이 크게 세탁과 탈수 두 가지로 구분되어진다.

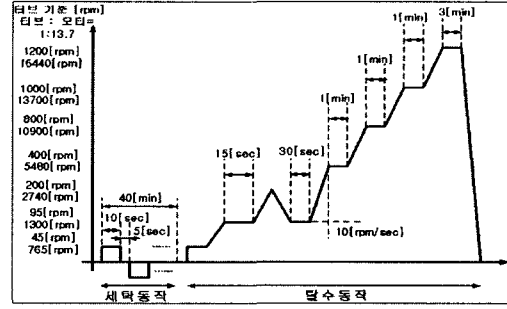


그림 3. 드럼 세탁기의 세탁 및 탈수 속도 도표

3. 유도전동기의 최대효율제어

모든 전동기는 정격속도 및 정격 출력 토크로 운전될 때 최대의 효율을 나타내도록 설계되어 있다.[2]

그러나 속도와 부하가 전동기의 정격보다 높거나 너무 낮아지면 유도전동기 효율은 감소한다. 이와 같이 전동기의 효율이 낮아지게 되는 본질인 이유는 유도전동기의 제어 시에 자속레벨에 따라 손실이 관계하기 때문이다. 자속이 높으면 철손이 증가하게 되고, 자속이 너무 낮으면 동손이 증가한다. 따라서, 유도전동기의 벡터제어기법을 적용하여 이 손실이 최소화 되는 최적의 자속을 만들어 줌으로써 최대의 효율 운전을 한다.[3]

3.1. 유도전동기 최대효율제어 원리

일반적인 경우 유도전동기의 모델링에서 철손부분(R_m)을 무시한다. 그러나 철손 중에서 히스테리시스손(hysteresis loss)은 대체로 전원의 주파수에 비례하고 와전류손(eddy current loss)은 전원 주파수의 제곱에 비례하며 또한 이것들은 모두 자속밀도의 제곱에 비례한다. 그러므로 세탁기의 효율제어 시 철손을 고려하여야만 한다.[4]

이러한 손실들을 식으로 정리하면 다음과 같다.

와전류손

$$P_{iron}^e = k_e \omega_e^2 \Phi^2 \quad (3-1)$$

히스테리시스손

$$P_{iron}^h = k_h \omega_e \Phi^2 \quad (3-2)$$

고정자 철손

$$P_{iron}^s = [k_e \omega_e^2 + k_h \omega_e] \Phi_m^2 \simeq \frac{\omega_e^2 \Phi_m^2}{1/k_e} = \frac{\omega_e^2 \Phi_m^2}{R_m} \quad (3-3)$$

회전자 철손

$$P_{iron}^r = [k_e \omega_{sl}^2 + k_h \omega_{sl}] \Phi_m^2 \simeq \frac{\omega_{sl}^2 \Phi_m^2}{1/k_e} = \frac{\omega_{sl}^2 \Phi_m^2}{R_m/s^2} \quad (3-4)$$

그림8은 동기좌표계에서의 d축, q축의 손실을 독립적인 회로에 나타내었다.

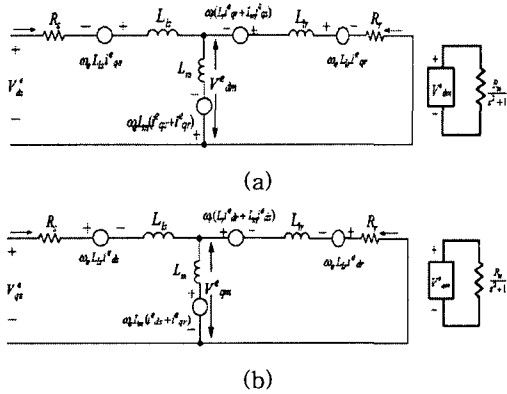


그림 4. 동기좌표계에서의 철손을 고려한 유도전동기 d-q축 등가회로

그림 4에서와 같이 동기좌표계에서의 d축, q축의 등가회로 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + L_s \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e L_{ls} i_{qs}^e + V_{dm}^e \\ V_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + L_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e L_{ls} i_{ds}^e + V_{qm}^e \\ 0 &= R_r i_{dr}^e + L_r \frac{di_{dr}^e}{dt} + \omega_e (L_r i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e) - \omega_e L_{lr} i_{qr}^e + V_{dm}^e \\ 0 &= R_r i_{qr}^e + L_r \frac{di_{qr}^e}{dt} - \omega_e (L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e) + \omega_e L_{lr} i_{dr}^e + V_{qm}^e \end{aligned} \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned} i_{ds}^e + i_{dr}^e &= \frac{s^2 + 1}{R_m} V_{dm}^e + i_{dm}^e \\ i_{qs}^e + i_{qr}^e &= \frac{s^2 + 1}{R_m} V_{qm}^e + i_{qm}^e \end{aligned} \quad (3-6)$$

그림 4에서 분리된 철손 등가회로로부터

$$V_{dm}^e = L_m \frac{d(i_{ds}^e + i_{dr}^e)}{dt} - \omega_e L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (4-7)$$

$$V_{qm}^e = L_m \frac{d(i_{qs}^e + i_{qr}^e)}{dt} + \omega_e L_m (i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (3-8)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 정상상태에서 미분항의 값은 0이 되므로

$$V_{dm}^e = -\omega_e \frac{L_m L_{lr}}{L_r} i_{qs}^e \quad (3-9)$$

$$V_{qm}^e = \omega_e L_m i_{ds}^e \quad (3-10)$$

와 같이 간단히 정리될 수 있다.

위의 식(3-9)와 (3-10)으로부터 유도전동기의 철손을 얻을 수 있으며, 철손은 $(V_{dm}^e + V_{qm}^e)/R_m$ 의 비로 줄어드는 것을 알 수 있다.

유도전동기의 모든 손실(전기적 손실)은 다음과 같이 동손(고정자, 회전자) 및 철손의 합으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_{loss} &= R_s (i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2}) + R_r (i_{dr}^{e2} + i_{qr}^{e2}) + \frac{1}{R_m} (V_{dm}^{e2} + V_{qm}^{e2}) \\ &= R_s (i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2}) + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^{e2} + \frac{1}{R_m} \left(\omega_e^2 L_m^2 \left(\frac{L_m^2}{L_r^2} \right) i_{qs}^{e2} + \omega_e^2 L_m^2 i_{ds}^{e2} \right) \\ &= R_d i_{ds}^{e2} + R_q i_{qs}^{e2} \end{aligned} \quad (3-11)$$

여기서

$$\begin{aligned} R_d &= R_s + \omega_e^2 \frac{L_m^2}{R_m} \\ R_q &= R_s + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2} + \omega_e^2 \frac{L_m^2 L_{lr}^2}{R_m L_r^2} \end{aligned} \quad (3-12)$$

여기서 R_d 및 R_q 는 유도전동기의 모든 손실(전기적 손실)을 등가화 한 저항이다.

위의 식으로부터 유도전동기에서 발생하는 총 손실은 d축과 q축 전류 모두에 의해서 발생하는 것을 알 수 있다.

그러나 식(4-12)를 보면 L_{lr}/L_r 구성되는 항이 있으나 실제 유도전동기에서는 매우 작은 값으로 무시될 수 있다.

결과적으로 총 손실의 대부분은 d축 전류에 의해 결정됨을 알 수 있다.

그러나 이런 결과를 이용하여 d축 전류를 무한히 줄이면 토오크 변화 시 지령치를 추종하기 위해 q축 전류가 과도하게 흘러들어 기존보다 큰 동손이 나타나게 된다.

따라서, 어떠한 운전점이 주어지면 그에 맞는 적절한 d축, q축 전류를 흘러주어야 한다.

3.2. 유도 전동기의 최대 효율제어 알고리즘

유도전동기의 총 손실 식

$$P_{loss} = R_d i_{ds}^e + R_q i_{qs}^e \quad (3-13)$$

으로부터 최소 손실 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{ds}^e = \sqrt{\frac{R_q}{R_d}} |i_{qs}^e| \quad (3-14)$$

이제 위에서 구한 조건들을 벡터제어에 의한 속도 제어 시스템에 구현하기 위해 d축 기준전류를 설정하는 부분에 이를 추가한다.

본 논문에서 드럼세탁기의 행정 중 세탁 동작일 때만 최소 손실 운전을 하였다.

세탁 동작은 일정 토크영역에서, 즉 유도전동기의 정격속도 이내에서만 동작하므로 이를 위해 약계자 영역에서의 최소 손실은 고려하지 않았다.

그림 5는 드럼세탁기 벡터제어 시 제안된 최소 손실 운전 알고리즘을 나타낸다.

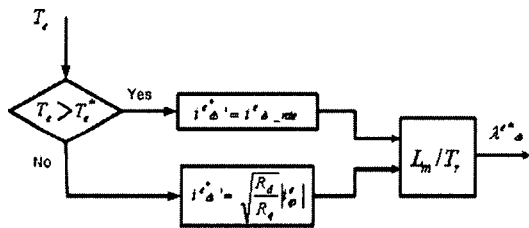


그림 5. 드럼세탁기용 유도전동기의 최소 손실 알고리즘

실제 속도와 계산된 슬립속도로부터 ω_e 와 실제 발생 토크 T_e 가 인가되면 그에 맞는 토크 지령치와 비교하게 된다.

적절한 토크 지령치를 발생하기 위해 q축 전류를 선정하고, 그에 상응하는 최적의 d축 전류를 계산하여 인가하게 된다.

이 때 실제 토크보다 토크 지령치가 작게 되면 최소 손실 운전 알고리즘을 적용한다.

그렇지 않은 경우, 즉 실제 토크보다 토크 지령치가 클 경우에는 기존과 동일한 운전을 하게 된다.

이는 d축 전류를 낮추게 되면 부족여자가 되어 그에 따른 q축 전류가 많이 흐르게 되고 그에 따라 동손이 증가하기 때문이다.

이상에서 설명한 유도전동기의 속도제어 알고리즘을 블록도로 나타내면 그림 6과 같다.

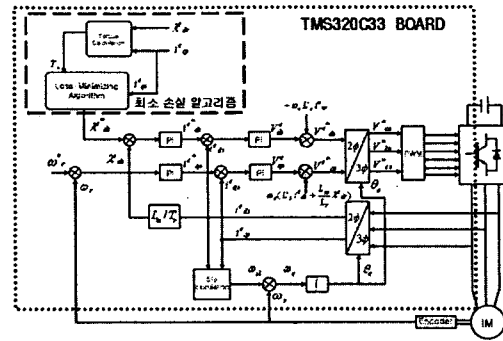


그림 6. 제안된 최소 손실제어 전체 시스템 블록도

4. 시뮬레이션 결과

그림 7은 드럼세탁기용 유도전동기에 벡터제어를 적용한 전동기 구동 시스템의 회로도이다.

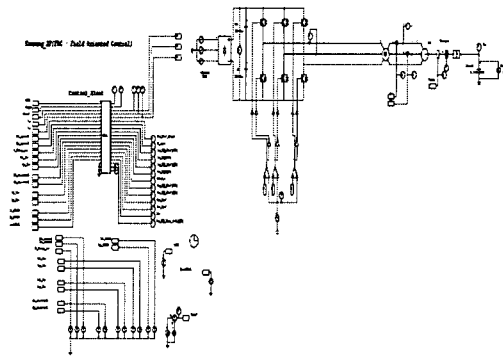


그림 7. 드럼세탁기용 유도전동기 구동시스템의 Psim 시뮬레이션 회로도

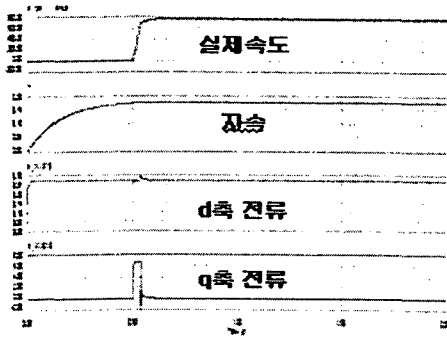
전동기의 벡터제어 시뮬레이션은 Psim의 DLL (Dynamic Link Library) 블록을 이용하여 ANSI-C로 코딩하여 구성하였다.

SVPWM방식과 간접벡터제어방식을 채택하였고, 인버터 출력 단에 전력계를 연결하여 소비전력을 측정하였다.

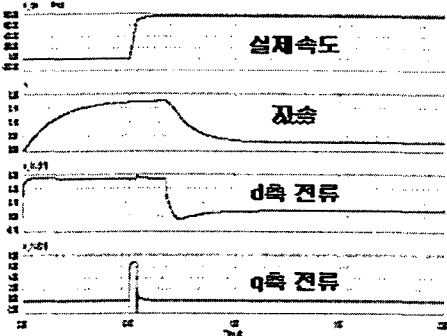
표 1은 시뮬레이션에 사용한 드럼세탁기용 고속 유도전동기의 파라미터를 나타낸다.

표 1. 실험 대상 유도전동기 시스템 정격 및 파라미터

600 [W], 180 [V], 2pole, 100 [Hz], 6000 [rpm]	
Rs: 9.2 [Ω]	Rr : 4.45 [Ω]
Lls: 11.55 [mH]	Llr : 11.55 [mH]
Lm : 628 [mH]	Jm : 0.000783 [kg · m ²]



(a) 기존 방식



(b) 제안된 방식

그림 8. 세탁모드에서의 속도, 자속, d축-q축 전류

드럼세탁기의 세탁과 탈수 행정에서의 제안된 알고리즘과 기존의 벡터제어 방식을 비교하여 보았다.

그림 8의 (a)는 기존의 벡터제어방식을 이용하여 세탁모드에서의 속도 및 d축-q축 전류를 보였다.

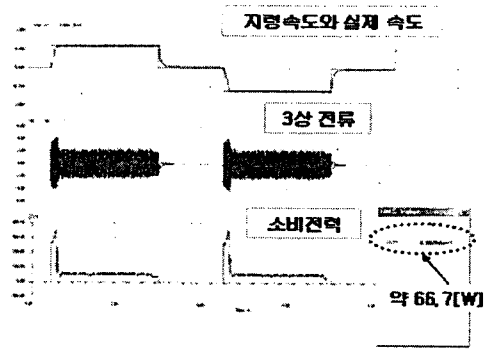
지령속도를 추종하여 정상상태가 되면 자속은 일정한 값을 유지한다.

이는 손실로써 작용하게 되고 (b)의 제안된 최소 손실 제어방식을 사용함으로써 정상상태에서의 불필요한 자속이 줄어든다.

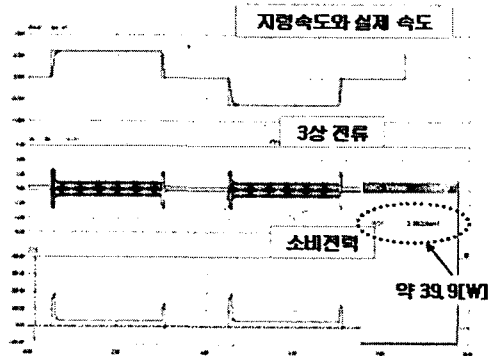
그림 9는 세탁모드에서 정격의 30%부하일 때 각각 슬립주파수 제어방식과 기존의 벡터제어 방식으로 구동 시의 시뮬레이션 파형이다.

8.5초 동안 시뮬레이션 하였을 때 슬립주파수제어 시 약 66.7[W], 벡터제어 시 약 39.9[W]의 전력을 소비함을 볼 수 있다.

이는 슬립주파수 제어할 때 보다 벡터제어 방식으로 구동하였을 때, 약 25[W]정도의 소비전력이 적음을 나타낸다.



(a) 슬립주파수 제어 시



(b) 벡터제어 시

그림 9. 정격의 30% 부하 시 속도, 상전류 및 소비전력

그림 10은 정격의 10% 부하일 때 기존의 벡터제어 방식으로 시뮬레이션 하였다.

8.5초 동안 구동 시, 세탁모드에서 소비전력은 약 25.9[W]이며, 자속은 일정하게 제어한다.

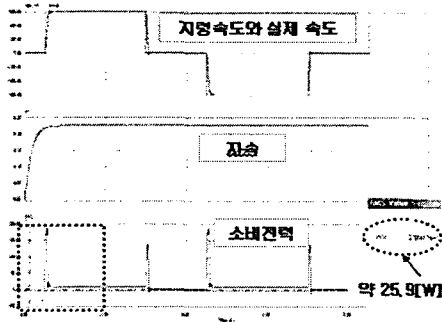
그림 10의 (b)에서 보는 것과 같이 정상 상태일 때,

약 9.9[W]의 전력이 되는데, 이는 기존의 벡터제어가 정상상태에서 자속을 일정하게 함으로써 d축 전류에 의한 손실이 발생하기 때문이다.

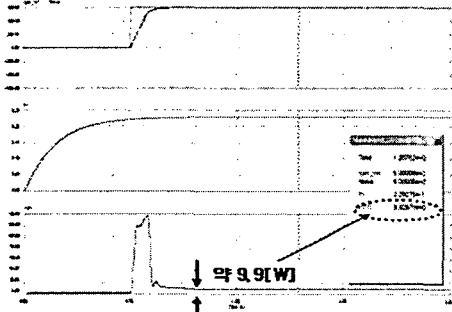
그림 11은 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의한 시뮬레이션 파형이다.

그림 10과 같은 조건에서 8.5초 동안 구동했을 때, 소비전력은 약 19.2[W]로써 기존방식보다 약 6[W]정도 전력이 낮게 소비되었다.

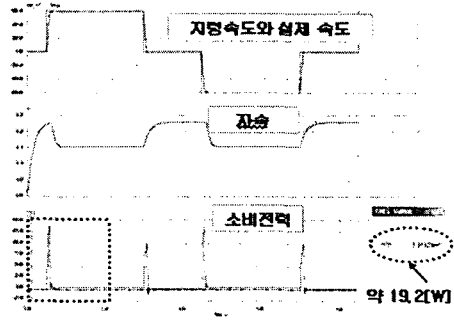
또한 정상상태에서 d축 전류를 줄임으로써 소비전력이 기존방식보다 2배정도 줄어들었음을 볼 수 있다.



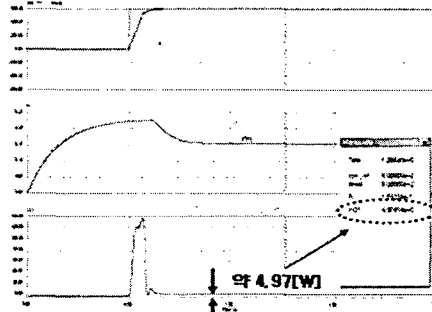
(a) 8.5초 동안 구동 시



(b) 정상상태에서의 소비전력
그림 10. 벡터제어 방식



(a) 8.5초 동안 구동 시



(b) 정상상태에서의 소비전력
그림 11. 제안된 방식

5. 결론

본 논문에서는 드럼세탁기용 유도전동기 구동에
서 최소 손실운전을 하였다.

드럼세탁기 특성상 일반 세탁기보다 세탁시간이
길다. 또한 세탁기의 모든 동작 중 세탁행정이 차
지하는 부분이 크므로 세탁 행정에서의 소비전력
은 매우 중요한 문제이다.

기존의 V/f 슬립주파수제어방식과 최소 손실운전
알고리즘을 적용한 벡터제어방식으로 구동하여 각
각 세탁동작 시의 소비전력을 비교하였다.

각각 8.5초 동안 구동했을 때, 정격의 30% 부하
에서 소비전력은 슬립주파수 제어 시 약 66.7
[W], 벡터제어 시 약 39.9[W]로 나타났다.

또한 정격의 10% 부하에서 기존의 벡터제어방
식과 제안된 최소손실 운전제어 방식을 비교하였을
때 소비전력은 각각 25.9[W]와 19.2[W]로 나타
났다.

실제 드럼세탁기의 세탁동작 시간이 50~60분
을 감안하면 소비전력 개선은 더욱 클 것으로 기
대되며, 향후 제안된 알고리즘을 실제 드럼세탁
기용 유도전동기에 적용하여 실험할 예정이다.

이 논문 삼성전자의 지원을 받은 SFARC 2004-0656-800에 의하
여 연구되었음.(2004.09 ~ 2005.08)

참고문헌

- [1] Tanaka, T, "Environment Friendly Revolution in Home Appliances", Proceedings of the 13th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs(ISPSD), pp.91 - 95, 2001.
- [2] K. Harmer, P.H Mellor, D. Howe, "An energy efficient brushless drive system for a domestic washing machine", International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, pp.514 - 519, 1994
- [3] 배우리, 이원철, 김이훈, 원충연, 장봉안, "드럼 세탁기용 유도전동기 벡터제어", 한국조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp. 69-73, 2004.
- [4] 임선경, "Loss-minimising control scheme for induction motors", 포항공과대학교 박사학위논문, 2004년 2월.