

드럼 세탁기용 유도전동기의 효율운전

이동엽, 이원철, 배우리, 김이훈, 원충연
성균관대학교

Induction motor vector control for washing machine

Lee Dong-Yup, Kim Lee-Hun, Lee Won-Chul, Bae Woo-Ri, Won Chung-Yuen
SungKyunKwan University

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.

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. 서론

그림 1에서 보는 바와 같이, 세탁기는 그 구동방식에 따라 나누어진다.

일반 세탁기는 세탁통 아래 설치된 회전날개(펠세이터)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.

이러한 특성 때문에 드럼 세탁기는 전력소비량이 크다. 그러므로 드럼세탁기의 제어에 있어서 최적의 입력 전력

(소비 전력)의 공급과 최소의 손실 운전이 요구된다.[1]

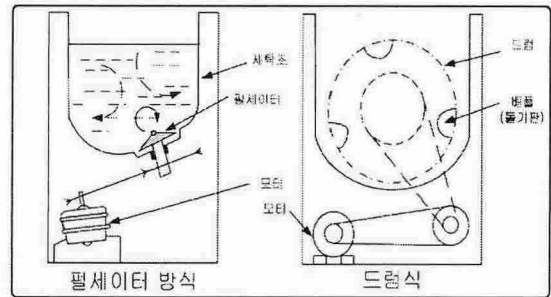


그림 1. 세탁기의 종류

2. 유도전동기의 최대 효율제어

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

그러나 속도와 부하가 전동기의 정격보다 높거나 너무 작아지게 되면 유도전동기의 효율은 감소하게 된다. 이와 같이 효율이 낮아지게 되는 본질적인 이유는 유도전동기를 제어 할 때 자속레벨에 따라 자속이 높으면 철손이 증가하게 되고, 자속이 낮으면 동손이 증가하기 때문이다.

따라서 간접벡터제어 루프 내에 적용하여 손실이 최소화 되는 알고리즘을 구현하여 최대 효율 운전을 한다.[3]

2.1. 유도전동기 최대 효율제어 원리

일반적인 경우 유도전동기의 모델링에서 철손부분 (R_m)을 무시한다. 그러나 세탁기의 효율제어시 철손을 고려하여야만 한다.[4]

그 이유는 다음 손실들의 식으로 알 수 있다.
와전류손

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

히스테리시스손

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

고정자 철손

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

회전자 철손

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

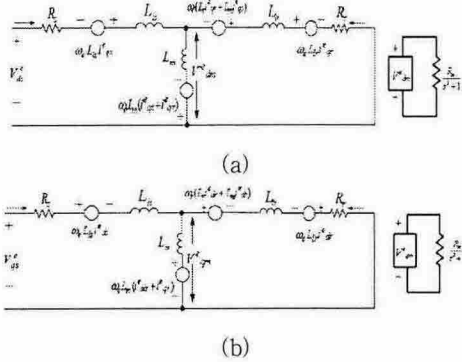


그림 2. 동기좌표계에서의 철손을 고려한 유도전동기 d-q축 등가회로

그림 2에서와 같이 동기좌표계에서의 d축, q축의 등가 회로 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + L_s \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e L_s i_{qs}^e + V_{dm}^e \\ V_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + L_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e L_s i_{ds}^e + V_{qm}^e \end{aligned} \quad (2-5)$$

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

그림 2에서 분리된 철손 등가회로로부터

$$V_{dm}^e = L_m \frac{d(i_{ds}^e + i_{dr}^e)}{dt} - \omega_e L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (2-7)$$

$$V_{qm}^e = L_m \frac{d(i_{qs}^e + i_{qr}^e)}{dt} + \omega_e L_m (i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (2-8)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 정상상태에서는,

$$V_{dm}^e = -\omega_e \frac{L_m L_{lr}}{L_r} i_{qs}^e \quad (2-9)$$

$$V_{qm}^e = \omega_e L_m i_{ds}^e \quad (2-10)$$

와 같이 간단히 정리될 수 있다.

위의 식(2-9)와 (2-10)으로부터 유도전동기의 철손을 얻을 수 있으며, 철손은 $(V_{dm}^e + V_{qm}^e)/R_m$ 의 비로 줄어드는 것을 알 수 있다.

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

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

여기서

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

여기서 R_d 및 R_q 는 모든 손실을 등가화 한 저항이다. 위의 식으로부터 총 손실은 d축과 q축 전류 모두에 의해서 발생하는 것을 알 수 있다.

그러나 식(2-12)를 보면 L_{lr}/L_r 구성되는 항이 있는데, 이는 실제로 매우 작은 값으로 무시할 수 있다.

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

그러나 이 결과를 이용하여 d축 전류를 무한히 줄이면 토크 변화 시 지령치를 추종하기 위해 q축 전류가 과도하게 흘러들어 기존보다 큰 동손을 발생한다.

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

2.2. 유도 전동기의 최대효율제어 알고리즘

유도전동기의 총 손실 식

$$P_{loss} = R_d i_{ds}^e + R_q i_{qs}^e \quad (2-13)$$

으로부터 최소 손실 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{ds}^e = \sqrt{\frac{R_q}{R_d}} |i_{qs}^e| \quad (2-14)$$

이제 위에서 구한 조건들을 벡터제어에 의한 속도제어 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 정격속도 이내에서만 동작하므로 이를 위해 약계자 영역에서의 최소 손실은 고려하지 않았다.

그림 3은 드럼세탁기 벡터제어시 제안된 최소 손실 운전 알고리즘을 나타낸다.

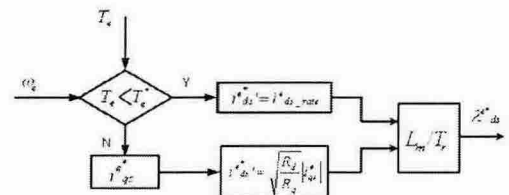


그림3 드럼 세탁기용 유도전동기의 최소손실 알고리즘

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.

이상에서 설명한 유도전동기의 속도제어 알고리즘을 블록도로 나타내면 그림 4와 같다.

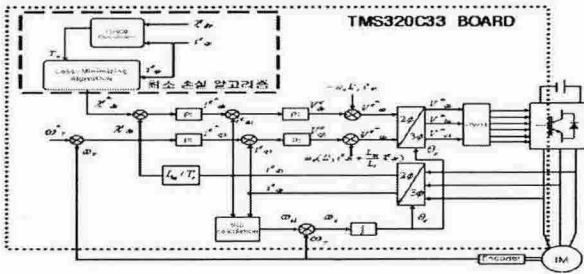


그림 4. 제안된 최소 손실제어 전체 시스템 블록도

3. 시뮬레이션 결과

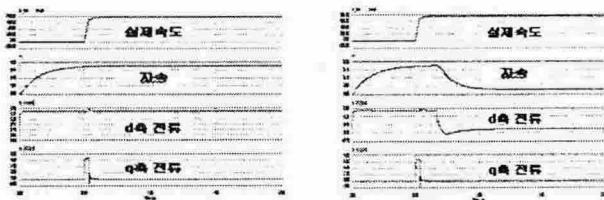
시뮬레이션은 PSIM 6.0으로 수행하였고, 전동기의 간접 벡터제어 블록은 PSIM의 DLL (Dynamic Link Library) 블록을 이용하여 ANSI-C로 코딩하여 구성하였다.

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 5. 세탁모드에서의 속도, 자속, d축-q축 전류
드럼세탁기의 세탁과 탈수 행정에서의 제안된 알고리즘과 기존의 벡터제어 방식을 비교하였다.

그림5의 (a)는 기존의 벡터제어방식을 이용하여 세탁모드에서의 속도 및 d축-q축 전류를 나타낸다.

지령속도를 추종하여 정상상태가 되면 자속은 일정한 값을 유지한다.

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

그림 6는 정격의 10% 부하일 때 기존의 벡터제어 방식으로 시뮬레이션 하였다.

8.5초 동안 구동 시, 세탁모드에서 소비전력은 약 25.9[W]이며, 자속은 일정함을 볼 수 있다.

그림 6의 (b)에서 보는 것과 같이 정상 상태일 때, 약 9.9[W]의 전력이 소비됨을 볼 수 있는데, 이는 기존의 벡터제어가 정상상태에서 자속을 일정하게 해 줌으로써

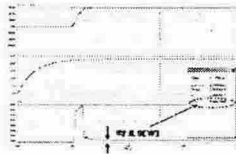
d축 전류에 의한 손실이 발생하기 때문이다.

그림 7은 제안한 알고리즘에 의한 시뮬레이션 파형이다. 그림 6과 같은 조건에서 8.5초 동안 구동했을 때, 소비전력은 약 19.2[W]로써 기존방식보다 약 6[W] 정도 전력이 낮게 소비됨을 볼 수 있다.

또한, 정상상태에서 d축 전류를 줄임으로써 소비전력이 기존방식보다 2배 정도 줄어들었음을 볼 수 있다.

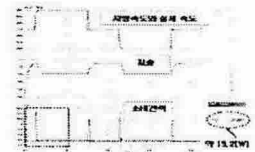


(a) 8.5초 동안 구동 시

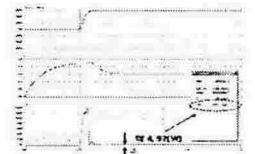


(b) 정상상태에서의 소비전력

그림 6. 벡터제어 방식



(a) 8.5초 동안 구동 시



(b) 정상상태에서의 소비전력

그림 7. 제안된 방식

4. 결론

본 논문에서는 드럼세탁기용 유도전동기의 최소 손실 운전에 필요한 알고리즘을 연구 하였다.

그러므로 드럼세탁기 특성상 세탁 행정에서의 소비전력은 매우 중요한 문제이다.

정격의 10% 부하에서 기존의 벡터제어방식과 제안된 최소손실 운전제어 방식을 비교하였을 때 소비전력은 각각 25.9[W]와 19.2[W]로 나타났다.

실제 드럼세탁기의 세탁동작 시간이 50~60분임을 감안하면 소비전력 개선은 더욱 클 것으로 기대된다.

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

참고 문헌

- [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.