

IPMSM을 이용한 드럼세탁기용 고효율 구동 드라이브 설계

공태웅, 이원철, 이병국, 원충연
성균관대학교

Design the high Efficiency motor drive for drum wasing machine using IPMSM

Tae-Woong Kong, Won-cheol Lee, Byoung-Kuk Lee, Chung-Yuen Won
SungKyunKwan University

ABSTRACT

The washing machine needs high torque for large load variation, Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) is proper to adapt the washing machine system. However, IPMSM can operate the lower output power than the other permanent magnet synchronous motor(PMSM) when the motor control by the conventional control. This paper suggests adaptive motor control for IPMSM and experiments the washing machine system.

1. 서론

드럼 세탁기는 부하 변동이 심하고 그 크기가 크기 때문에 여타 가전기기보다 큰 토크를 필요로 한다. 때문에 영구자석에 의한 토크 뿐 아니라 킬러턴스에 의한 토크를 이용할 수 있는 매립형 영구자석 선형전동기(IPMSM)를 드럼 세탁기의 세탁용 전동기로 이용하였다.

하지만 기존의 영구자석형 모터보다 더 큰 토크를 낼 수 있는 IPMSM은 기존의 영구자석형 모터에 적용되는 진각 제어(Advanced angle control), 또는 계자 기준제어(Field oriented control)를 사용할 경우, 오히려 일반 영구자석 전동기를 적용했을 때보다 출력 토크가 감소한다.

큰 토크를 필요로 하는 드럼 세탁기에 적용하기 위해서 이 논문에서는 IPMSM을 최대 토크로 사용할 수 있는 제어 방법에 대해 정리하고 실제 드럼 세탁기용 모터에 적용하여 얼마 만큼의 효율 상승이 있는지 알아보려고 한다.

2. IPMSM의 토크 발생 원리

이 장에서는 IPMSM이 기존의 전동기보다 큰 토크를 낼 수 있는 원리에 대해 설명하고자 한다.

그림 1은 분포권의 고정자를 갖는 회전자에 영구자석이 없는 동기 킬러턴스 모터(SynRM)와 표면자석 동기모터(SPMSM), 그리고 IPMSM의 인덕턴스 분포를 나타낸 것이다.

SynRM은 돌극성에 의해 전기자 권선의 자기 인덕턴스 L 과 상호 인덕턴스 M 이 회전자의 위치에 따라 변하고, 이것에 따라 공극에 저장된 에너지가 기계 에너지로 변환된다. 이러한 토크 발생 메카니즘에 의해서 발생하는 토크를 일반적으로 킬러턴스 토크라고 한다.

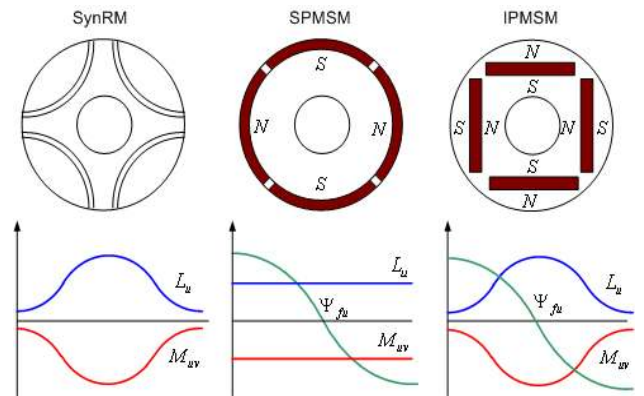


그림 1. 각 모터의 인덕턴스 변화
Fig. 1. Inductance variation of the each motor

SynRM의 토크 발생 메카니즘을 수식적으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_r = \frac{1}{2} i_u^2 \frac{\partial L_u}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_v^2 \frac{\partial L_v}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_w^2 \frac{\partial L_w}{\partial \theta} + i_u i_v \frac{\partial M_{uv}}{\partial \theta} + i_v i_w \frac{\partial M_{vw}}{\partial \theta} + i_u i_w \frac{\partial M_{wu}}{\partial \theta} \quad (1)$$

SPMSM에서는 영구자석과 공극의 비투자율이 거의 같기 때문에 회전자 위치에 따라서 자기저항이 변하지 않는다. 그러므로 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스는 일정한 값이 된다. 그러나 영구자석의 전기자 쇄교자속은 회전자의 회전각에 따라 정현적으로 변하기 때문에 영구자석의 전기자 쇄교자속을 이용한 토크를 발생시킬 수 있다.

SPMSM의 토크 발생 메카니즘을 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_m = i_u \frac{\partial \Psi_u}{\partial \theta} + i_v \frac{\partial \Psi_v}{\partial \theta} + i_w \frac{\partial \Psi_w}{\partial \theta} \quad (2)$$

IPMSM의 영구자석에서 발생하는 전기자 쇄교자속은 SPMSM과 같이 정현적으로 변한다. 그리고 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스는 전기자 쇄교자속과 비교하여 두 배의 속도로 변화한다.

따라서 IPMSM은 전기자 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스, 영구자석의 전기자 쇄교자속의 변화가 토크 발생에 영향을 준다.

IPMSM의 토크를 d-q축의 동기좌표계로 나타내기 위한 전압방정식은 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_u \\ V_v \\ V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_u & pM_{uv} & pM_{wu} \\ pM_{uv} & R_a + pL_v & pM_{vw} \\ pM_{wu} & pM_{vw} & R_a + pL_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega \Psi_f \sin \theta \\ \omega \Psi_f \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \omega \Psi_f \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d - \omega L_q & \omega L_d \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에 의하여 IPMSM의 토크는 d축과 q축의 방정식으로 표시할 수 있다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (5)$$

식 (5)에서 앞부분의 방정식은 영구자석의 쇄교자속에 의한 토크이며 뒷부분의 방정식은 릴럭턴스 차이에 의한 토크이다.

따라서 두 개의 토크는 각각 자기 인덕턴스의 주파수와 영구자석의 쇄교자속 주파수를 따르며, 두 종류의 토크와 합산된 토크는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

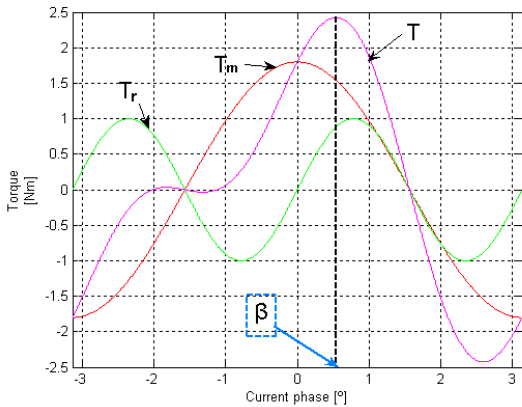


그림 2. IPMSM의 토크 곡선
Fig. 2. Torque curve of the IPMSM

3. IPMSM의 효율 제어 방법

그림 2를 살펴보면 영구자석에 의한 토크와 릴럭턴스에 의한 토크가 위상차를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 기존의 계자 기준 제어(Field oriented control)를 사용하여 모터에 전류를 흘려주면 IPMSM의 최대 토크 동작점에서 벗어나고, 일반 PMSM과 같은 성능으로 동작한다. 뿐만 아니라, 최대점 보다 빨리 여자를 시킬 경우에는 일반적인 PMSM보다 토크가 작게 나오는 것을 알 수 있다.

따라서 IPMSM에서 단위 전류 당 최대의 토크를 내기 위해서는 전류의 위상을 β 만큼 지연시켜야 한다. 여기서 β 를 구하기 위해서는 토크 곡선을 d축 전류와 q축 전류의 그래프로 바꾸어 주는 것이 필요하다.

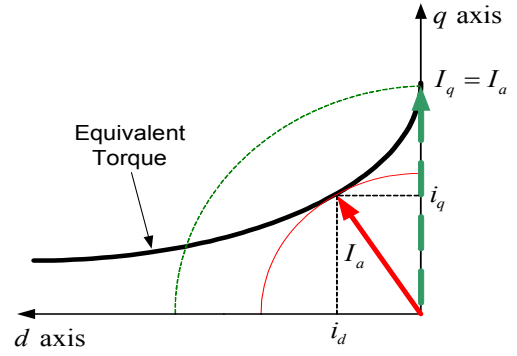


그림 3. 계자 기준 제어와 IPMSM의 효율제어의 비교

Fig. 3. Compare of the field oriented control and efficiency control

그림 3에서 빨간 선으로 표시된 원은 IPMSM 효율제어시 모터에 흐르는 전체 전류의 크기의 범위를 나타낸다. 여기서 I_a 는 d축 전류와 q축 전류의 벡터 합을 나타낸다. 식(5)를 d축 전류와 q축 전류로 표현한 등토크 곡선(Equivalent torque curve)이 그림 3과 같이 표현되기 때문에 d축 전류를 0으로 하는 계자 기준 제어에 비해 d축 전류를 흘려주어 보다 작은 I_a 전류로 같은 토크를 발생시킬 수 있다.

d축 전류와 q축 전류의 크기는 위상각 β 에 의해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_d &= -I_a \sin \beta \\ i_q &= I_a \cos \beta \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)에서의 토크를 β 각으로 표현하면 다음과 같은 수식으로 바꾸어 표현할 수 있다.

$$T = P_n \left\{ \Psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad (7)$$

한편 최적의 전류 위상을 찾기 위해서는 토크 식(7)을 β 각으로 편미분하여 0이 되는 지점을 찾으면 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \beta} &= P_n \{ -\Psi_a I_a \sin \beta + (L_q - L_d) I_a^2 \cos 2\beta \} \\ &= P_n \{ -\Psi_a I_a \sin \beta + (L_q - L_d) I_a^2 (1 - 2\sin^2 \beta) \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{-\Psi_a + \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \right) \quad (9)$$

근의 공식으로 구해진 β 각을 식 (6)에 대입하여 최적의 d축 전류와 q축 전류의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{\Psi_a - \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 (i_d^2 + i_q^2)}}{4(L_q - L_d)} \quad (10)$$

$$i_d = \frac{\Psi_a}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Psi_a^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (11)$$

4. 실험 결과

그림 4는 드럼세탁기용 고효율 드라이브 시스템 보드이다. 드럼세탁기용 고효율 드라이브 시스템 보드는 크게 컨버터와 6-Switch 인버터를 내장하고 있는 IPM(Intelligent Power Module), 전압 평활 회로, 돌입 전류를 제한하기 위한 써미스터, 제어부 등으로 나눌 수 있다.



그림 4. 드럼세탁기용 고효율 드라이브 시스템 보드
Fig. 4. Drive System Board for Drum Washing Machine

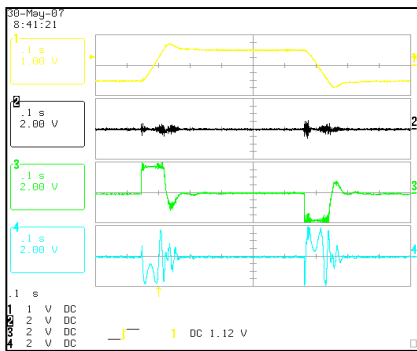


그림 5. 속도에 따른 d축, q축, a상 전류 파형
(속도응답: -200[rpm]~200[rpm])
Fig. 5. Speed Response(-200[rpm]~200[rpm]), d-axis Current, q-axis Current, Phase-a Current

그림 5는 속도 레퍼런스를 -200~200[rpm]으로 주었을 때의 d축, q축, a상의 전류 파형이다.

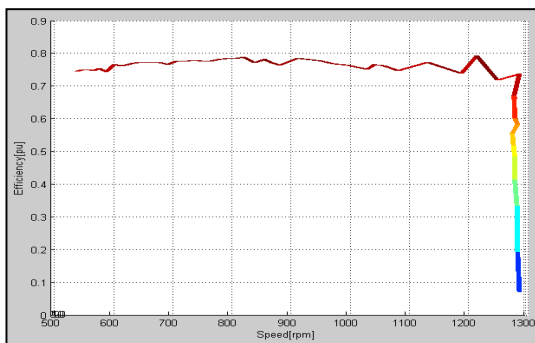


그림 6. SPMSM의 속도, 효율 특성 파형
(부하 : 6[N·m], 속도 : 1180[rpm], 효율 : 73.7%)
Fig. 6. Speed and Efficiency Curve
(Load : 6[N·m], Speed : 1180[rpm], Efficiency : 73.7%)

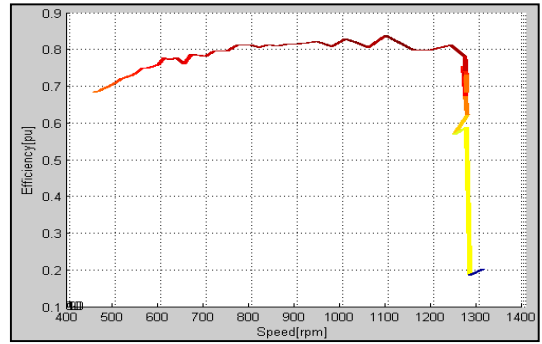


그림 7. IPMSM의 속도, 효율 특성 파형
(부하 : 6[N·m], 속도 : 1058[rpm], 효율 : 80.5%)
Fig. 7. Speed and Efficiency Curve
(Load : 6[N·m], Speed : 1058[rpm], Efficiency : 80.5%)

그림 6과 그림 7은 부하를 6[N·m] 가하여 속도대비 효율을 측정한 그래프이다. SPMSM에 비해서 IPMSM이 효율이 더 좋은 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 부하 변동이 심하고 큰 토크를 필요로 하는 드럼 세탁기에 기존의 SPMSM 대신 더 큰 토크를 발생시킬 수 있는 IPMSM을 사용하였다.

그리고 IPMSM의 고효율 구동을 위해서 기존의 진각제어 또는 계자 기준제어 대신 IPMSM을 최대 토크에서 구동할 수 있는 제어 방법에 대해서 정리하고 실제 실험을 통해서 SPMSM에 비해서 IPMSM이 효율이 좋다는 것을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] T. M. Jahns, G. B. Kliman, T. W. Newmann, "Interior permanent-magnet Synchronous motors for Adjustable-speed Drives", IEEE trans. on Ind. App. IA-22, No.4, pp 738-747, (1986)
- [2] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasa, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives", IEEE trans. on Ind. App. IE-41, No.5, pp.511-517, (1994)
- [3] B. K. Bose "A high performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine", IEEE Trans. on Ind. App, IA-24, No.6, pp.987-997, (1998)
- [4] 김장목, "매립형 영구자석 동기전동기의 제어특성 개선", 서울대학교 박사학위 논문, 1996.
- [5] S.A. NASAR, I. BOLDEA, L.E. UNNEWEHR, "PERMANENT MAGNET, RELUCTANCE, and SELF-SYNCHRONOUS MOTORS", CRC Press, Inc. 1993