

선행각을 이용한 팬용 플럭스 스위칭 전동기 드라이브에 대한 연구

(A Study on Flux Switching Motor drive for Fan Application with Advance angle)

김남훈* · 구본삼

(Nam-Hun Kim · Bon-Sam Koo)

요 약

최근에는 파워툴(power tools)과 가전 제품에 있어서 전자적인 전류(commutation)를 사용하는 새로운 형태의 브러시리스 전동기인 플럭스 스위칭 전동기(Flux switching motor)에 대한 관심이 점차적으로 증가되고 있으며, 특히 팬과 펌프 시장에 있어서는 그린 정책으로 인하여 플럭스 스위칭 전동기에 대한 관심이 급격히 증가되고 있다. 플럭스 스위칭 전동기는 유도전동기에 비해서는 높은 전력 밀도(power density)와 상대적으로 높은 효율, 그리고 브러시리스 DC 전동기에 비해서는 간단한 전동기 구조와 가격 경쟁력이라는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 팬 용도로 제작된 12/6 폴을 가지는 플럭스 스위칭 전동기의 드라이브 설계와 동작원리에 대해서 나타내고, 팬 용도로 제작된 프로토타입 플럭스 스위칭 전동기의 타당성을 검증하기 위해서 TMS320F2812 DSP와 일반적인 인버터를 이용한 실험 결과를 제시한다.

Abstract

A new class of electronically commutated brushless motor, the flux-switching motor(FSM) is gradually emerging in power tools and household appliances especially fan and pump application because of green policy. This motor offers advantages of high-power density and relatively high efficiency compare with induction motor, low cost and simple motor structure compare with blcdc motor. This paper presents the principle of the FSM and design of the 12/6 pole FSM drive system for fan application. Finally, test results of the prototype motor are provided to verify a validity of the fan application with TMS320F2812 DSP and inverter.

Key Words : SRM, Current Controller, PI, Hysteresis

1. 서 론

팬(fan)과 펌프(pump)는 전동기 시장에 있어서 큰 부분을 차지하고 있으며, 유도전동기(induction motor)와 브러시리스 DC 전동기(Brushless DC motor)가 대부분의 응용 시장을 점유하고 있다.

* 주저자 : 청주대학교 전자정보공학부 전임강사
Tel : 043-229-8487, Fax : 043-900-8581
E-mail : cop1288@hotmail.com
접수일자 : 2009년 5월 12일
1차심사 : 2009년 5월 15일
심사완료 : 2009년 5월 26일

선행각을 이용한 팬용 플렉스 스위칭 전동기 드라이브에 대한 연구

1[kW]이상의 응용부분에서는 인버터 구동되는 삼상 유도전동기가 주로 사용되고 있으며, 1[kW]이하의 응용 시스템에서는 단상 유도전동기가 주로 사용되고 있다[1].

최근에는 그린 정책 및 고효율 정책으로 인하여 효율이 낮은 유도 전동기보다는 영구자석을 사용하는 브러시리스 DC 전동기나 영구 자석형 동기전동기(Permanent magnet synchronous motor)가 주목을 받고 있고, 가격 경쟁력 관점에서는 영구자석을 사용하지 않고 구조적으로 간단한 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor)에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 팬과 펌프용으로 사용되는 전동기 드라이브는 저가이면서 정밀 속도제어가 필요하지 않는 시스템이므로 브러시리스 DC 전동기나 스위치드 릴럭턴스 전동기가 많은 관심을 받고 있다.

효율을 증가시키기 위해서는 일반적으로 50[W] 이하의 시스템에서는 단상 브러시리스 DC전동기가 많이 거론되고 있지만, 큰 파워를 사용하는 시스템의 경우에서 브러시리스 DC전동기 드라이브는 상대적으로 영구자석을 사용하며 드라이브 구성이 비싸다는 단점으로 인하여 대체 전동기에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다. 가격 경쟁력 관점에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기가 저가이면서 간단한 전동기 구조를 가진다는 장점을 가지지만 소음 문제로 인하여 상용화에 어려움을 가지고 있다[2].

플렉스 스위칭 전동기(Flux switching motor)는 브러시리스 DC 전동기에 비해서 상대적으로 적은 스위치가 사용되며, 스위치드 릴럭턴스 전동기에 비해 소음과 효율특성이 우수하고, 속도나 토크제어에 있어서 용이한 특성을 가지고 있다. 그림 1은 플렉스 스위칭 전동기의 드라이브 구성을 보여주고 있으며, 드라이브 구성을 위해 2개의 스위칭 소자와 홀센서나 셔터와 같은 위치센서 그리고 프로세서가 사용되고 있다.

본 논문에서는 유도 전동기나 스위치드 릴럭턴스 전동기에 비해 높은 효율을 가지고, 상대적으로 드라이브 구성에 있어서 브러시리스 전동기보다 저가이면서, 구조적으로는 스위치드 릴럭턴스 전동기와 비슷하여서 제작이 매우 용이하며 제어에 있어서도

매우 간단한 알고리즘을 가지는 플렉스 스위칭 전동기(Flux switching motor : FSM)에 대해서 소개한다[3-4]. 2장에서는 플렉스 스위칭 전동기의 동작원리와 수식을 유도하고, 3장에서는 시스템 구성 그리고 4장에서는 팬 용도로 제작된 플렉스 스위칭 전동기의 타당성을 확인하기 위해서, TI사의 DSP인 TMS320 F2812과 FET를 이용하여 드라이브를 구성하고 실험결과를 확인하였다.

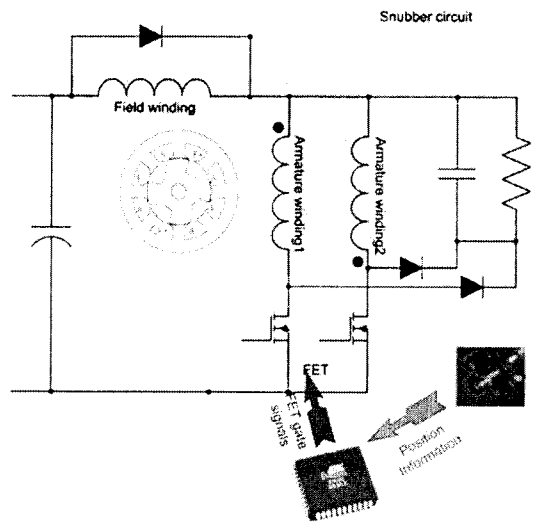
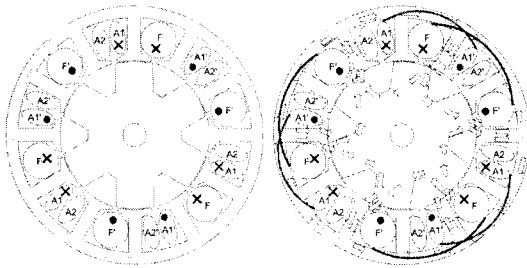


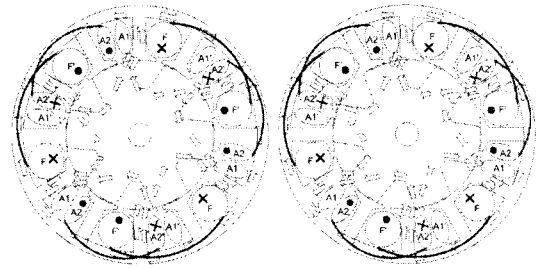
그림 1. 플렉스 스위칭 전동기 드라이브 구성도
Fig. 1. The drive configuration of Flux switching motor

2. 플렉스 스위칭 전동기

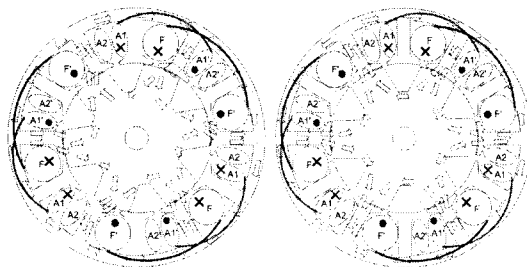
플렉스 스위칭 전동기는 필드 권선(Field winding)과 아마추어 권선(Armature winding)에 흐르는 전류에 의해서 발생하는 자속의 상호 작용에 의해서 만들어진 릴럭턴스 토크에 의해서 구동되고, 필드와 아마추어 전류에 의해서 발생된 자속은 그림 2와 3과 같이 고정자와 회전자를 통하여 흐르게 된다. 그림 2 (a)는 회전자가 초기 위치 $\theta_e=0$ 인 경우의 그림을 보여주고 있다. 그림 2 (e)와 같이 필드 권선 (F)와 아마추어 권선(A1)에 전류를 흘리게 되면 그림 2 (b), 2 (c) 그리고 2 (d)의 형태로 자속이 발생하면서 회전자를 정렬시키게 된다. 그림 2 (d)와 같이 회전자가 고정자와 정렬하게 되면 그림 3 (e)와 같이



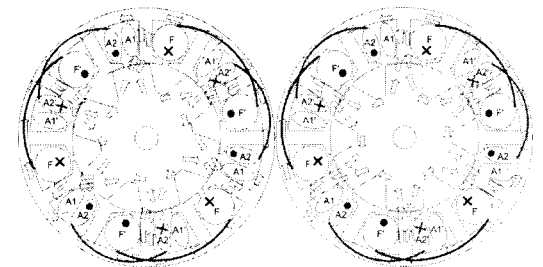
(a) F(+), A1(+), $\theta_e = 0$ (b) F(+), A1(+), $\theta_e = 30$



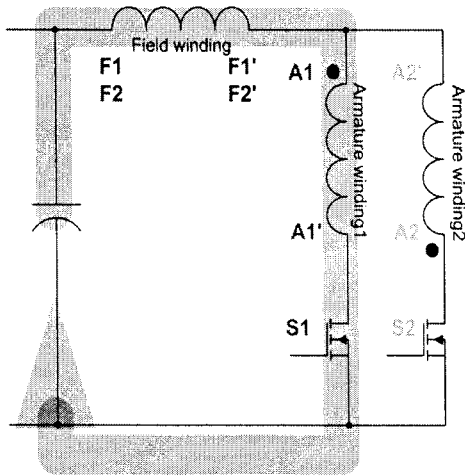
(a) F(+), A2(+), $\theta_e = 90$ (b) F(+), A2(+), $\theta_e = 90$



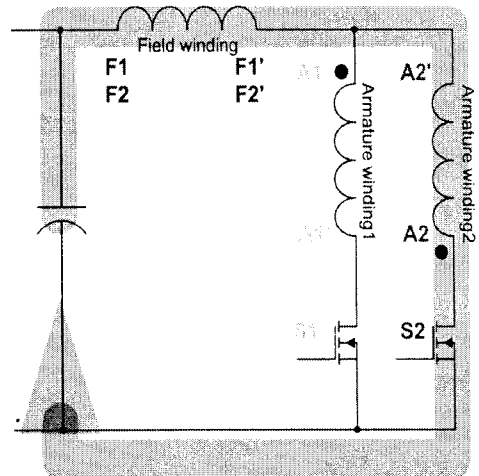
(c) F(+), A1(+), $\theta_e = 60$ (d) F(+), A1(+), $\theta_e = 90$



(c) F(+), A2(+), $\theta_e = 150$ (d) F(+), A2(+), $\theta_e = 180$



(e) 드라이브 구성



(e) 드라이브 구성

그림 2. 필드와 아마추어권선(A1) 여자시 자속 패턴
Fig. 2. Flux pattern for field and armature(A1) winding excitations

그림 3. 필드와 아마추어권선(A2) 여자시 자속 패턴
Fig. 3. Flux pattern for field and armature(A2) winding excitations

필드 권선(F)와 아마추어 권선(A2)에 전류를 흘리게 되며, 그림 3 (b), 3 (c) 그리고 3 (d)의 형태로 자속이 발생하면서 회전자를 정렬시키게 된다. 그림 2와 3에서와 같이 필드 권선에 의해 발생하는 자속벡터의 방향은 항상 일정한 방향으로 발생되며, 아마추어

어 권선에 의해 발생하는 자속벡터는 90[deg]의 전기각도를 가지면서 쉬프트되게 된다.

그림 4는 이상적인 필드 권선(F)과 아마추어 권선(A1, A2)에 의해서 발생하는 인덕턴스 프로파일을 나타내며, 위치에 따른 필드권선의 전류(I_f)와 아마

축어 권선의 전류(I_{A1} , I_{A2}) 그리고 권선의 역기전력(E_{A1} , E_{A2})의 파형을 나타내고 있다. 회전자 폴과 고정자 폴의 형상에 따라 자기 인덕턴스(Self inductance)가 미세하게 변화할 수 있지만, 그림 4에서는 필드권선과 아마추어 권선의 자기 인덕턴스는 일정하다고 가정하고 아마추어 권선과 필드권선 사이에서 발생하는 상호 인덕턴스(Mutual inductance)에 의해서 토크가 발생한다고 가정한다. 결과적으로, 플럭스 스위칭 전동기는 필드권선과 아

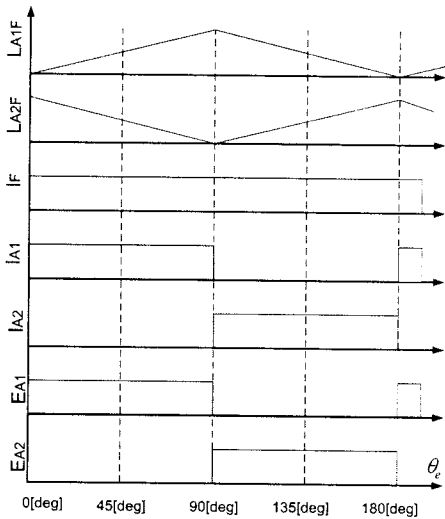


그림 4. 이상적인 상호인덕턴스와 상전류
Fig. 4. Idealized mutual inductance and current waveforms

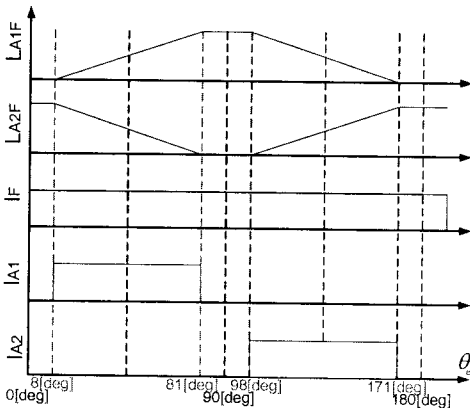


그림 5. 실제 상호인덕턴스와 상전류
Fig. 5. Actual mutual inductance and current waveforms

마추어 권선에 의해서 발생하는 자속은 회전자 폴과 고정자 폴 사이의 자기저항을 최소화하기 위해서 회전자를 고정자와 정렬시키고, 각각의 위치에 대해서 적절한 전류를 인가함으로써 토크가 발생하여 회전자를 회전시키게 된다.

플럭스 스위칭 전동기의 상 전압은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 자기 인덕턴스 성분을 0으로 하면 식 (2)와 같이 다시 적을 수 있다.

$$V_{A1} = V_{dc} - (i_F R_F + i_{A1} R_{A1} - \frac{dL_F}{dt} i_F - \frac{dL_M}{dt} i_F - \frac{dL_{A1}}{dt} i_{A1} - \frac{dL_M}{dt} i_{A1}) \quad (1)$$

$$V_{A2} = V_{dc} - (i_F R_F + i_{A2} R_{A2} - \frac{dL_F}{dt} i_F - \frac{dL_M}{dt} i_F - \frac{dL_{A2}}{dt} i_{A2} - \frac{dL_M}{dt} i_{A2})$$

$$V_{A1} = V_{dc} - (i_F R_F + i_{A1} R_{A1} - \frac{dL_{A1F}}{dt} i_F - \frac{dL_{A1F}}{dt} i_{A1}) \quad (2)$$

$$V_{A2} = V_{dc} - (i_F R_F + i_{A2} R_{A2} - \frac{dL_{A2F}}{dt} i_F - \frac{dL_{A2F}}{dt} i_{A2})$$

여기서, R_{A1} , R_{A2} , R_F 는 A1상 A2상 그리고 F상의 상저항을 나타내고, L_{A1F} 과 L_{A2F} 는 A1상과 F상 그리고 A2상과 F상과의 상호 인덕턴스를 나타내고, L_{A1} , L_{A2} , L_F 는 A1상 A2상 그리고 F상의 자기 인덕턴스를 나타낸다.

토크는 수식 (3)과 같이 쓸 수 있고, 자기 인덕턴스가 일정하다면 (4)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$T_e = \frac{1}{2} i_{A1}^2 \frac{dL_{A1}}{d\theta_e} + \frac{1}{2} i_{A2}^2 \frac{dL_{A2}}{d\theta_e} + \frac{1}{2} i_F^2 \frac{dL_F}{d\theta_e} + i_{A1} i_F \frac{dL_{A1F}}{d\theta_e} + i_{A2} i_F \frac{dL_{A2F}}{d\theta_e} \quad (3)$$

$$T_e = i_{A1} i_F \frac{dL_{A1F}}{d\theta_e} + i_{A2} i_F \frac{dL_{A2F}}{d\theta_e} \quad (4)$$

(4)에서 알 수 있듯이 상호 인덕턴스의 미분값이 마이너스 값을 가질 때 상전류가 흐르게 되는 경우는 역토크(Negative torque)가 발생하게 되고, 정토크(Positive torque)만을 발생시키기 위해서는 식 (5)

과 같은 조건을 만족시켜야 된다[5].

$$i_{A1}i_F > 0, \frac{dL_{A1F}}{d\theta_e} > 0 \quad (5)$$

$$i_{A2}i_F > 0, \frac{dL_{A2F}}{d\theta_e} > 0$$

그림 5는 실제 인덕턴스와 인가되는 전류파형을 보여주고 있다. 그림 5와 식 (5)의 조건을 만족시키기 위해서 선행각을 18[deg]를 주어 실제로 V_{A1} 과 V_{A2} 가 역토크가 발생하지 않도록 프로그래밍한다.

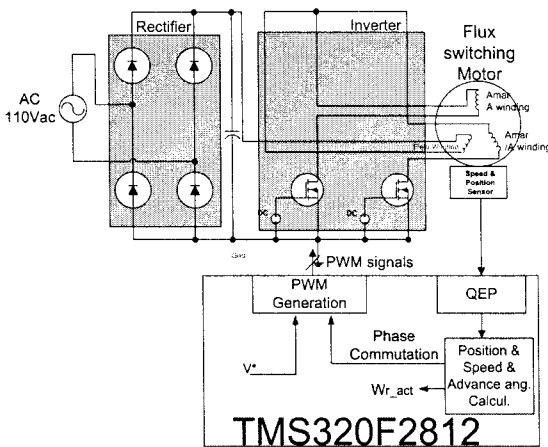


그림 6. 시스템 구성도
Fig. 6. System configuration

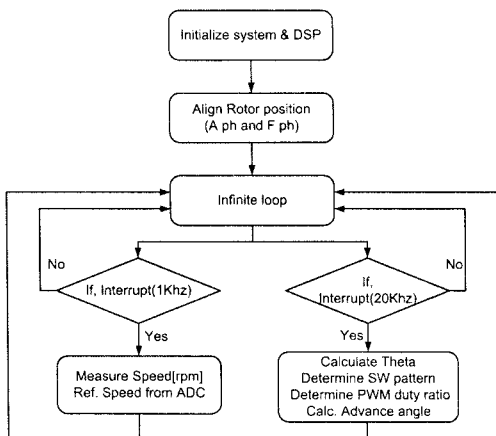


그림 7. 프로그램 플로차트
Fig. 7. Program flowchar

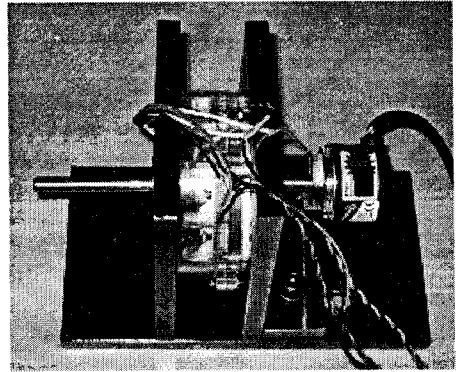


그림 8. 프로토타입 플럭스 스위칭 전동기
Fig. 8. Prototype flux switching motor

3. 시스템 구성

제작된 플럭스 스위칭 전동기의 타당성을 검증하기 위해서 그림 6과 같은 시스템을 구성하였다. 그림 6에서와 같이 브릿지 정류기를 사용하였으며, FET 2개를 이용하여 인버터를 구성하였다. 속도 측정과 전류 정보(Commutation information)을 계산하기 위해서 2048[PPR]을 가지는 인크리멘탈 타입의 엔코더를 사용하였으며, 알고리즘을 검증하기 위해서 Texas Instruments사에서 전동기 전용으로 제작된 TMS320F2812 DSP를 사용하였다. 그림 7은 구현된 알고리즘을 나타내고 있다. 초기 회전자의 위치를 고정시켜 주기 위하여 임의의 전압벡터를 인가하여 회전자를 정렬하고, 1[KHz]의 주기로 외부 ADC로부터 기준 속도를 읽어 들이고 전동기의 회전속도를 계산한다. 그리고 20[KHz] 마다 인터럽터를 발생하여 엔코더로부터의 신호를 이용하여 위치정보를 계산하고, 현재의 위치정보를 바탕으로 하여 적절한 스위칭 패턴을 생성하게 되며, ADC로부터 측정된 기준속도에 따라서 적절한 PWM 회로의 듀티비를 결정하게 된다. 그림 8은 프로토타입으로 제작된 플럭스 스위칭 전동기를 보여주고 있다. 표1은 제작된 전동기의 외형에 대한 치수를 보여주고 있다.

선행각을 이용한 팬용 플럭스 스위칭 전동기 드라이브에 대한 연구

표 1. 제작된 플럭스 스위칭 전동기의 사양
Table 1. Parameters of prototype FSM

아마추어 권선 턴수	700
필드 권선 턴수	600
고정자 외경	88[mm]
회전자 내경	50[mm]
회전자 외경	51[mm]
회전자 길이	40[mm]

4. 실험 결과

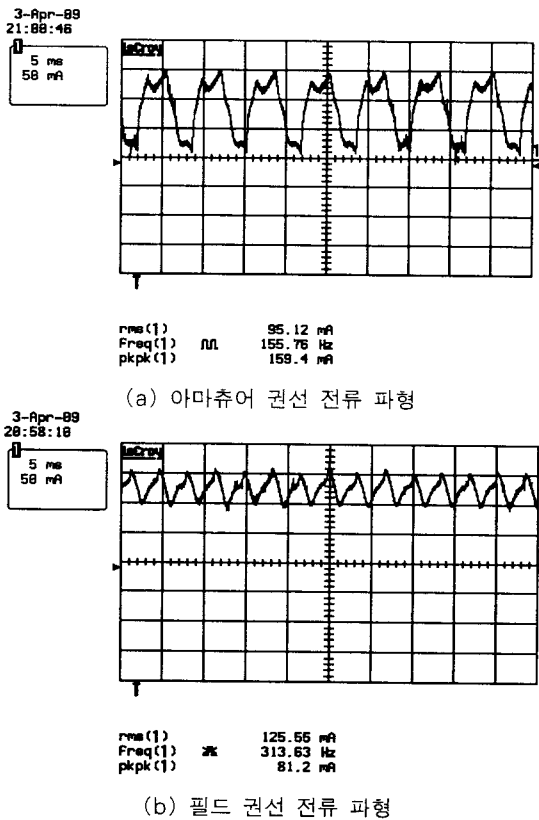


그림 9. 전류 파형
Fig. 9. Current waveforms

그림 9는 실제 전동기의 아마추어와 필드 권선의 전류를 보여주고 있다. 아마추어 전류는 95[mA]가 흐르고 있으며, 필드에는 125[mA]가 흐르고 있다. 표 2는 그림 6과 같이 구성된 시스템에서 PWM의 듀티비를 변화시키면서 전압을 인가하였을 때의 전

동기 속도 및 DC링크 전류를 측정된 값을 나타내고 있으며, 역토크가 발생하지 않도록 선행각을 18[deg] 주었으며, 전압(E)는 DC링크 전압과 PWM 듀티 비를 곱하여 계산하였고, 입력과위는 측정된 DC링크 전류와 입력전압을 곱하여서 계산하였다. 그림 10은 입력전압에 따른 전동기의 속도와 DC링크 입력전류를 나타내고 있으며, Idc_1과 Speed_1은 선행각을 주지 않고 구동을 한 결과이며, Idc와 Speed는 18[deg]의 선행각을 준 결과이다.

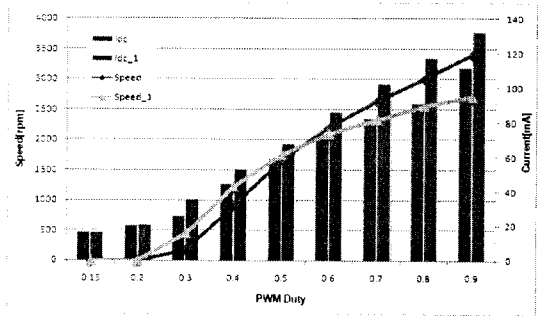


그림 10. 입력전압에 따른 전동기 속도와 전류값
Fig. 10. Motor speed and current against supplied voltage

표 2. 측정된 플럭스 스위칭 전동기의 특성
Table 2. Measured characteristics of flux switching motor

Vin [Vac]	PWM Duty	E [Vdc]	Idc [mA]	속도 [rpm]	Pi [W]
114	0.15	18.6	16.88	0	0.313968
114	0.2	24.8	20.6	0	0.51088
114	0.3	37.2	26	170	0.9672
114	0.4	49.6	44.6	922	2.21216
114	0.5	62	59.1	1662	3.6642
114	0.6	74.4	72.9	2200	5.42376
114	0.7	86.8	82.5	2636	7.161
114	0.8	99.2	91.5	2999	9.0768
114	0.9	111.6	112	3400	12.4992

5. 결 과

본 연구에서는 전자적인 스위치를 이용해서 전류(commutation)가 이루어지고, 톨럭턴스 토크를 이

용하며, 매우 간단한 구조의 드라이브를 가지는 팬 용도로 제작된 50[W] 플럭스 스위칭 전동기(12 고정자 폴, 6 회전자 폴)를 제작하였다. 특성 확인을 위해서 DSP와 엔코더를 이용하여 기본적인 알고리즘을 적용하여 구동하였으며, 플럭스 스위칭 전동기의 동작원리와 수식에 대해서 설명하였다.

제작된 플럭스 스위칭 전동기의 팬 용도로써의 유용성을 확인하기 위하여 역토크가 발생하지 않도록 선행각을 주는 알고리즘을 이용하여 구현한 결과 입력전압에 대하여 안정적인 속도 특성을 얻을 수 있었으며, 선행각을 주지 않는 제어에 비하여 좋은 속도특성을 얻을 수 있었고, 같은 PWM 듀티비에 대하여 작은 전류로 높은 무부하 속도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

플럭스 스위칭 전동기는 스위치드 릴럭턴스 전동기에 비해 청각적인 노이즈 특성이 우수하고, 유도 전동기에 비해 효율이 뛰어나다고 알려져 있으며, 실험결과에서 확인한 바와 같이 항 후 공기 청정기나 에어컨의 팬과 같은 용도로 많이 사용될 것으로 예상되며, 차 후 연구 과제로는 효율 및 청각적인 노이즈를 감소하기 위한 여러 가지 알고리즘을 적용하여 개선할 예정이다.

References

- [1] C. Pollock, H. Pollock and M. Brackley, "Electronically controlled flux switching motors : a comparison with an induction motor driving an axial fan", IECON '03, vol. 3, pp.2465~2470, Nov. 2003.
- [2] C. Pollock and M. Brackley, "Comparison of the Acoustic Noise of a flux switching and a switched reluctance drive", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No.3, pp. 826-834, May/June 2003.
- [3] C. Pollock, H. Pollack, R. Bamon, R. Sunon, J. Coles, D. Maule and A. Coun, "Flux Switching Motor for Automotive Applications". IEEE IAS Annual Meeting, October 2003.
- [4] H. Pollack, C. Pollock, R.T. Walter, B.V. Coni, "Low Cost, High Power Density, Flux Switching Machines and Driver for Power Tools", IEEE IAS Annual Meeting, October 2003.
- [5] John F. Bangura., "Design of High-Power Density and Relatively High-Efficiency Flux-Switching Motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, pp.416-425, Jun. 2006.

◆ 저자소개 ◆

김남훈 (金男勳)

1973년 6월 12일생. 1998년 삼척대학교 제어계측공학과 졸업. 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년 영남대학교 전자공학과 졸업(박사). 2004~2007년 Texas A&M Univ. Post Doc. 2007년~현재 청주대학교 전임강사.

구본삼 (具本三)

1961년 11월 25일생. 1988년 부산대학교 전기공학공학과 졸업. 2000년 부산대학교 지능기계시스템학과 졸업(석사). 1987~2007년 LG전자 모터사업부연구실, 2007년~현재 씨엘엠 연구소장.