

고속회전을 지원하는 SRM형 BLDC 모터 제어알고리즘 및 성능분석에 관한 연구

김기중^{1*}

¹신경대학교 인터넷정보통신학과

A Study on High-speed SRM-BLDC Motor Controller and its Performance

Ki-Jung Kim^{1*}

¹Department of Internet and Information Communications, Shingyeong University

요 약 브러쉬형 모터는 여러 가지 전기기계 및 가전제품에서 미세먼지와 유해물질을 발생시키는 것으로 알려졌다. 그래서 브러쉬가 없는 형태의 모터가 브러쉬형 모터를 대신하여 친환경적인 대안으로 제안되었다. 또한 BLDC 모터의 값비싼 마그넷 회전자에 SRM형으로 대체되고 있는데 SRM은 시스템의 허용범위 내에서 전류값이 넘지 않도록 해야하는 제어를 요구한다. 본 논문에서는 SRM형 BLDC 모터를 사용하여 고속회전을 제어하기 위한 경제적인 제어기와 효율적인 접근방법을 소개한다.

Abstract Brushes are known to generate unwanted nano particles of dust and harm elements in various electro-mechanical home appliances. Subsequently, the brushless type is proposed as an eco-friendly alternative to replace the brushes. Further, the expensive magnetized rotor of the Brush-less DC (BLDC) is to be replaced in SRM, which requires complex control not to overflow the switching current the system within a budget. This paper introduces an approach to implement an efficient yet, cost-effective controller for high-speed rotation control, employing Switched Reluctance Motor (SRM) BLDC motor.

Key Words : Switched Reluctance Motor(SRM), BLDC Motor, Advance angle control

1. 서론

산업문명의 발달로 현대사회에서 가정용 및 산업용 기기의 수요가 급격히 증가하고 있다. 예를 들어 선풍기, 에어컨디션, 냉장고, 컴프레셔, 원심분리기 등과 같은 대부분의 기기에는 모터가 사용되고 있다. 장착되는 모터는 Universal 모터에서 생기는 카본 분진 오염 문제와 브러시 교체등 유지보수비 및 짧은 수명으로 인해 점차 Universal 모터에서 BLDC 모터나, SRM (Switched Reluctance Motor) 모터를 사용하는 기기의 수요가 증가하고 있다[1-3]. SRM 모터는 구조가 간단하고, 가격이 저렴하며 회전자의 허용온도가 매우 높고, 개방회로의 전압과 단락시의 전류가 영이거나 매우 작을 뿐만 아니라 높

은 효율, 단위 부피 및 무게 당 높은 출력, 높은 토크 대비 비용, 넓은 속도 범위에 걸친 제어 능력, 우수한 신뢰성을 갖는 고속 동작 등으로 인해 환경보존을 위한 고효율에너지 장치에 대한 관심과 함께 가전산업에서 널리 주목을 받고 있다[3-5].

SRM은 전기적인 상의 개수에 따라 단상, 2상, 3상등으로 나뉘는데, 상의 개수가 증가 할수록 각 상에 대한 스위치의 개수가 증가하여 인버터의 크기와 비용을 증가시키는 단점 때문에 스위치의 개수를 줄인 단상 SRM 모터에 대한 수요가 더 많이 이루어지고 있는 상황이다 [3-6].

본 논문에서는 20,000RPM의 고속회전을 지원하는 단상 SRM형 BLDC 모터 제어에 효율적으로 사용할 수 있

*Corresponding Author : Kijung-Jung Kim

Tel : +82-10-3937-3062 email : kjkim@sgu.ac.kr

접수일 : 12년 07월 23일

수정일 : 12년 09월 07일

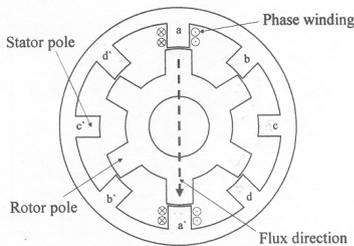
게재확정일 : 12년 10월 11일

는 제어알고리즘에 대하여 소개하고, 사용 용량에 적합한 단상 SRM 드라이버를 개발하여 적용한 알고리즘의 성능 분석을 한다.

2. SRM 개념

2.1 SRM의 구조

그림1은 SRM의 일반적인 구조로 고정자와 회전자 양 쪽이 돌극 형상으로 이루어진 이중 돌극 구조로 되어있고, 권선은 간단한 집중권으로 고정자에만 감겨 있고, 회전자에는 권선, 도체 바, 영구자석이 없는 간단한 구조로 되어 있다.



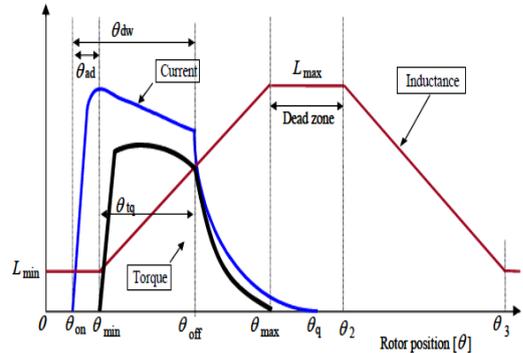
[그림 1] SRM의 구조
[Fig. 1] Structure of SRM

2.2 모터의 속도제어 방법

그림2는 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스와 고정자상의 스위칭에 의한 전류파형이다. 인가전압의 θ_{on} 은 비정렬 위치에 있으며, 전류의 크기는 극들이 겹치기 시작하는 시점 θ_{min} 까지는 선형적으로 증가한다. 이것은 인덕턴스가 작은 값을 가지고 있을 때 전류를 어느 정도 값까지 상승시켜 주기 위함이다. 고속의 경우 턴온각을 많이 앞당겨 주어야 하며 앞 영역의 인덕턴스가 감소하는 구간까지 당겨줄 필요가 있다. 위와 같이 θ_{on} 과 θ_{min} 사이의 θ_{ad} 를 진상각(Advance angle)이라고 하며 이 진상각을 조정함으로써 부하토크가 증가하여 요구되는 부하전류가 커지더라도 항상 평활한 전류를 확립시키는 방법으로 모터의 속도를 제어하게 된다.

기본 BLDC와 달리, SRM은 고속회전을 위해서는 속도제어기의 출력이 기동 시 최고치가 되기 때문에 PWM duty 자체도 최대로 출력되게 되고 그 결과 과전류가 모터의 권선에 흐르게 되어 모터 및 스위칭 소자의 파손이 야기 될 수 있다. 그러므로 기동 시 과전류 방지가 필요

하다. 본 논문에서는 기동과 속도제어 시 과전류 보호회로를 위한 H/W 설계방법과 제어알고리즘을 제시하고 측정 결과를 소개 한다.

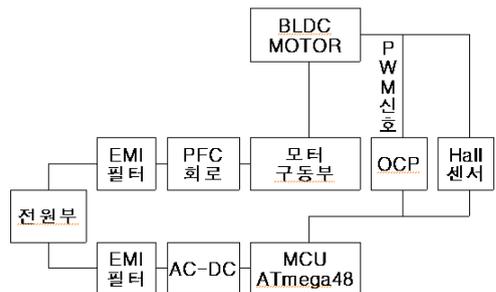


[그림 2] 인덕턴스와 상전류 파형
[Fig. 2] Waveforms of Inductance and corresponding Phase Current and Torque

3. SRM 드라이버 구현

3.1 H/W 개발

그림3은 본 논문에서 제시하는 SRM형 BLDC 모터 드라이버의 블록도로 Hall 센서로부터 입력되는 신호를 MCU(ATmega48)에서 분석하여 회전자의 위치정보와 속도정보를 확인하고 확인된 신호와 제어하고자 하는 속도를 감안하여 PWM신호를 출력하여 모터를 제어하게 된다. OCP(Over Current Protection)는 모터 기동과 제어 시 과전류 보호를 위한 회로로 전류값을 센싱하여 측정된 전류를 전압으로 변경하여 변경된 전압을 이용하여 과전류 측정 시 자동으로 PWM을 Off 할 수 있게 설계되었다. 이때 사용한 SRM의 규격은 표1과 같다



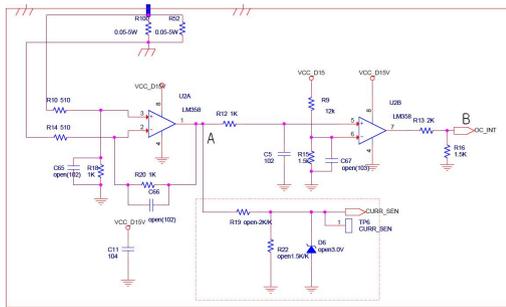
[그림 3] SRM 드라이버 블록도
[Fig. 3] Block diagram of SRM driver

[표 1] SRM 규격

[Table 1] SRM specification

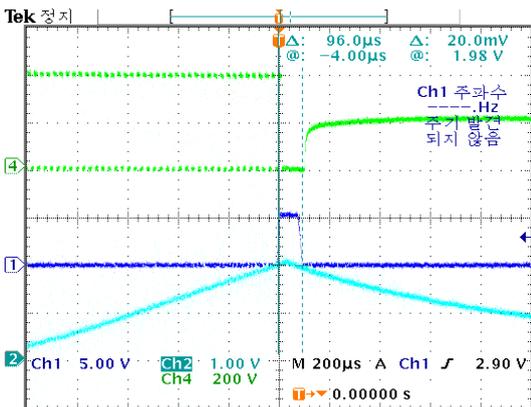
구분	규격
정격출력	700W
정격전압	220V
정격속도	20,000RPM
상수	1
극수	6/6

SRM 드라이버는 시변적 회전 기동시 모터의 전기 기계적 특성에 기인하여 시변적이며 임펄시브 형태의 전류 변화가 자주 무작위적으로 발생한다. 이에 따른 과전류는 IGBT의 수명에 민감하며, 과전류 제어는 모터 제어보다 상위 제어 기능으로 기동과 속도제어 시 과전류보호가 필수적이다. 그림4는 연속제어보다 On-Off 제어방식을 이용하여 과전류보호를 위한 회로 구성을 보여주며, 동작 원리는 다음과 같다.



[그림 4] 드라이버의 과전류 보호용 OCP회로

[Fig. 4] OCP Circuit for Over-current Protection



[그림 5] 과전류 보호 시 OCP 동작파형

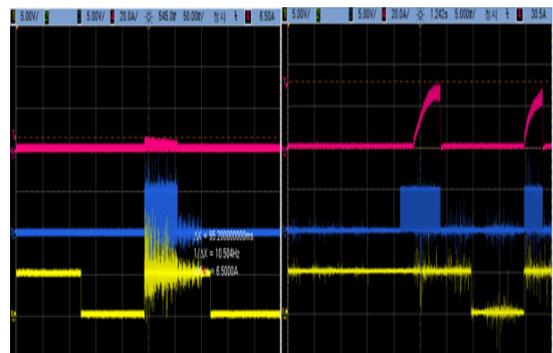
[Fig. 5] OCP Circuit Behaviors during Over-current Protection

과전류 보호 기능은 응급환경 처리 기능으로 디지털 방식만으로는 IGBT의 인내 허용 시간 내 보호 처리가 불가능하여 그림4와 같은 아날로그 회로를 이용한다. 먼저 첫 번째 OP Amp에서 센싱된 전류는 두 번째 OP Amp의 컴퍼레이터 회로에서 설정치와 비교되고, 설정치에 도달하면 PWM 출력이 아날로그적으로 단락되어 IGBT 및 구동회로를 과전류로부터 보호하도록 설계 하였다. 현재 설계에서 150A 600V용 IGBT를 보호하기 위해, 제작된 SRM 모터의 제작 속성을 고려하여 실험적으로 최적화된, 설정치 40A 이상 전류상승 시 자동으로 PWM 출력이 차단된다. 이의 실험 결과는 그림5와 같다

그림5는 설계된 과전류 보호용 OCP회로를 이용하여 PWM출력을 제어하는 동작 상태를 측정한 화면으로 첫 번째(채널4) 그래프는 IGBT에서 출력되는 SRM모터 입력 PWM신호이고, 두 번째신호(채널1)는 그림4의 B에서 측정된 신호로 OCP의 전류센싱 후 전압으로 변경된 후 파형이다. 마지막그래프(채널2)는 그림4의 A에서 측정된 신호로 OCP에서 센싱한 전류파형을 나타내고 있다. 최대허용전류는 40A인 경우 저항 0.05Ω에 걸리는 전압은 2V이므로 그림5의 채널2 그래프와 같이 최대허용전압 2V가 되면 PWM출력이 Off 된 것을 그림5의 채널4 파형을 통해 확인할 수 있다.

3.2 제어 알고리즘

SRM-BLDC 모터의 속도제어 시 과전류 보호를 위해서 사용된 중요한 알고리즘은 Soft start 알고리즘, 가변 전류 스위칭 알고리즘 및 진상각 제어 알고리즘이다.



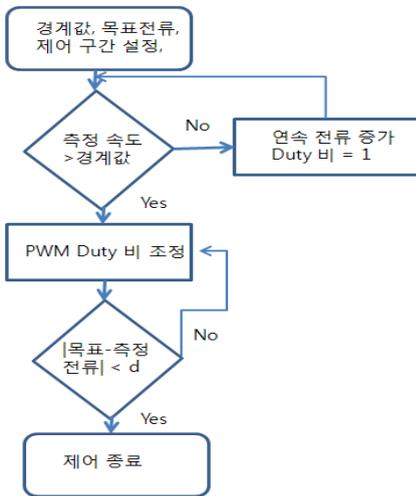
[그림 6] 기동 Soft start 알고리즘 적용 후(그림 좌측)와 적용 전 (우측) 비교 파형

[Fig. 6] Current Waveforms after (left) and before (right) the Soft Start Operation

- 1) Soft start 알고리즘: Soft start 알고리즘은 기본적으로 모터 초기 기동 시 과전류 방지를 위해 PWM duty를

부드럽게 증가 시키는 방법이다. 구현된 제어시스템의 PWM신호는 20MHz 주파수의 분주비 256으로 나눈 78.125kHz 주파수를 가진다. 그림6은 기동 Soft start 알고리즘 적용 전 후의 그림으로 위에서 부터 각각 전류, PWM출력, 홀센서파형을 나타낸다. 모터의 홀센서 신호가 나오기 시작하는 위치 즉 1/6회전시키기 위해 필요한 PWM 출력신호로써, 기본적인 동작은 홀센서 신호가 출력신호가 나올 때까지 PWM Duty비를 지정된 상수값으로부터 0.78%씩 높여가며 출력하는 알고리즘으로 좌측의 모터는 Duty비 41%에서 PWM Duty비를 올리기 시작하여 모터가동이 되었고 그때 전류값은 6.5A임을 확인할 수 있다. 우측의 그래프는 모터의 Soft 알고리즘이 적용 전으로 실험을 통해 알고 있는 PWM Duty비 53%로 기동시킨 화면으로 53%에서 30.5A가 되었음을 확인할 수 있다. 전후 20%수준으로 전류가 감소하였음을 확인할 수 있다.

- 2) 가변 전류 스위칭 알고리즘: SRM은 저속 운전 시는 역기전력과 모터의 인덕턴스 증가가 낮으므로 인가전압이 같더라도 전류 상승률이 크기 때문에 고속 운전 시 보다 PWM 제어가 효율적이지만, 고속 운전 시에는 전류 상승률이 상대적으로 작아져 단일 펄스 제어가 효율적이다. 따라서 본 제어시스템에서 고속구동 제어 시, 즉 정상 속도 도달 시에는, 단일 펄스와 PWM의 가변폭을 이용하여 전류를 제어하는 가변 전류 스위칭 알고리즘을 사용하였다. 가변 전류 스위칭 알고리즘의 구체적 흐름은 그림7과 같다.



[그림 7] 가변 전류 스위칭 흐름도
[Fig. 7] PWM Current Switching

그림8은 19,500RPM 가변 전류 스위칭 알고리즘 적용 구동 시 모터 회전속도를 보여 주는 화면이다. A 구간의 경우 제어는 단일펄스로 제어를 하게 되며 전류가 상승한 시점인 B구간에서는 PWM신호로 변경하여 Peak 전류 상승을 방지한다. RPM 계산은 위 파형 중 아래 2개의 홀센서신호를 가지고 계산하며 홀센서의 주파수 1.946kHz는 1주기의 진동수 이므로 (1)의 계산식을 통해 시간계산이 가능하고 그 시간에 극수 6을 곱한 후 결과값을 60으로 나누면 (2)의 계산식에 따라 RPM계산이 된다. 19,500RPM에서 약 28A의 전류가 측정됨을 확인할 수 있으며 이때 출력된 PWM Duty비는 68%이다.

$$T = 1/f \tag{1}$$

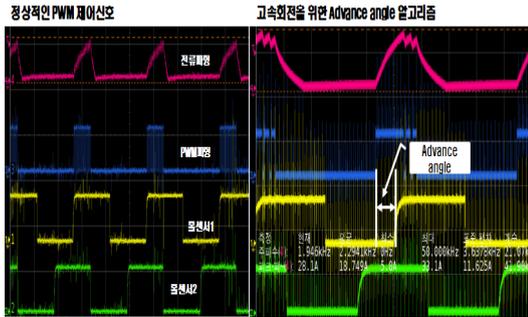
$$RPM = 60 / (T \times 6) \tag{2}$$



[그림 8] SRM 고속 구동 제어 알고리즘 동작
[Fig. 8] High Speed Control Operation of SRM

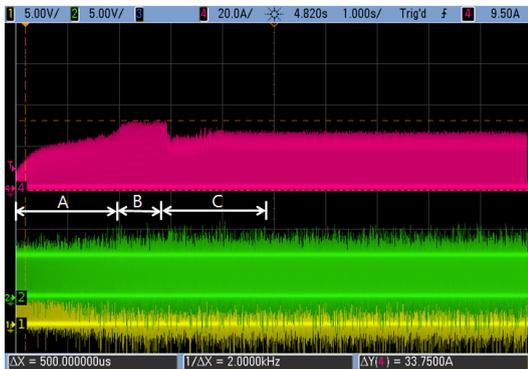
- 3) 진상각 제어 알고리즘: 모터고속회전과 과전류방지를 위해 진상각 (Advance angle) 제어를 통해 모터의 회전속도를 제어하였다. SRM 모터를 고속제어 시에는 역기전력이 크게 되므로 전류의 turn-on 시점을 앞서게 하여 충분한 전류의 상승시간을 도모하여 필요한 토크를 얻을 수 있게 되어 고속회전이 가능하게 된다. 하지만, 진상각 제어의 급작스런 변화는 IGBT의 과부하를 야기하므로, 진상각 변화는 선결정된 일정량의 변화분을 점진적으로 목표 진상각 값에 선형적 포화가 되도록 제어한다. 이를 위해 앞서와 같이 홀센서를 이용하여 측정된 모터의 속도 관련 변수를 읽어, 속도를 높일 경우 (또는 낮출 경우) 진상각도를 점진적으로 증가 (또는 감소) 시킨다. 진상각의 변화에 따른 전류를 측정하고 전류치가 목표치에 미치지 않은 경우 (또는 넘치는 경우) 진상각을 점진적으로 증가 (또는 감소)시킨다. 이에 따른 결과적 속도 측정치를 측정하고, 진상각을 점진적으로 변화시킬지 여부를 결정하여

수행한다.



[그림 9] 고속회전을 위한 제어 알고리즘 적용 전/후 전류 파형의 변화
 [Fig. 9] Current Waveforms before/after High Speed Control

그림9의 좌측화면은 일반적인 PWM출력파형이고 우측은 진상각 제어를 통해 모터속도를 안정적으로 상승하여 고속 동작에서도 IGBT 및 구동회로를 보호하며 동작시키는 파형이다.



[그림 10] 모터제어에 따른 전류파형변화
 [Fig. 10] Overall Current Waveform from the Start to the Target Rotation Speed

앞서 설명한 알고리즘을 적용한 종합적인 알고리즘의 성능을 보여주는, 그림10은 모터 기동부터 고속회전까지 모터제어에 따른 전류파형의 변화를 그래프로 출력한 화면으로 A지점은 모터의 기동부터 PWM출력만을 통해 모터의 회전속도를 상승시킨 구간이다. B구간은 모터의 RPM이 15,000이 되는 구간으로 단일펄스를 출력하여 회전속도를 향상시킨 구간이다. 이때 목표로 하는 최대 속도까지 회전속도를 상승시키면 전류는 꾸준히 상승하여 제한하고자 하는 전류 Peak 최대치에 접근하게 되는데 C

지점에서 다시 그림8과 9에서 설명했던 Advance angle 알고리즘과 고속구동 알고리즘, 즉 단일펄스와 PWM신호를 동시에 출력함으로써 목표 속도를 유지한 채 전류값이 하락하는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이 그래프에서의 최대 RPM은 20,000RPM이고 이때 최대 Peak 전류는 15,000RPM구간인 B지점에서 33.75A임을 확인할 수 있다.

4. 결론

모터의 기동과 제어를 위해 출력되는 PWM 신호는 출력의 크기와 공급되는 상전압의 Overvoltage, rate of rise, Harmonics등이 모터의 동작특성과 수명에 영향을 주게 된다. 따라서 보호회로를 통해 모터의 신뢰성을 확보해야 하며, 고속 회전수를 갖는 응용 제품 상품화를 위해서는 모터 최대의 성능을 위한 최적의 제어조건을 확립하여야 한다. 따라서 SRM의 특성을 감안한 과전류보호회로를 개발하였으며, 실험결과에 따른 최적의 제어방법을 결정하였다.

본 논문에서는 고속 SRM BLDC를 위한 경제적인 콘트롤러 설계방법에 대해 소개 하였고, 개발된 SRM 제어 시스템은 전기자동차, 킴프레서, 초고속 팬, 전기 스쿠터, 청소기, 세탁기 등 회전에너지를 이용하는 전기기계 산업 응용분야에서 널리 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

References

- [1] M. Morimoto, N. Matsui, and Y. Takeda, "Recent Advances of Reluctance Motors", IEEE Trans. IA, Vol.119, No.10, 1145-1148, 1999.
- [2] A. Chiba, "Design of a Switched Reluctance Drive and Its Application," J. Magn. Soc. Japan, Vol.26, No.8, pp. 909-914, 2002.
- [3] M. Parchomiuk, and K. Tomczuk, "Influence of control parameters of SRM for output characteristics," Intern. Conf. on Compatibility and Power Electronics (CPE), pp. 214-219 June 2011.
- [4] C. Zhang, et al., "Optimized Commutation Strategy for High-speed Single Phase Brushless DC Motor," 6th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications, 2011.
- [5] T. J. E Miller, "Electric Control of Switched Reluctance Machines." Jordan Hill, Oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd: A division of Reed

Educational, 2001.

- [6] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motors Drives : Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Application", CRC Press, 2001.
-

김 기 중(Ki-Jung Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 원광대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 2005년 2월 : 광양보건대학 전자계산과 교수
- 2005년 3월 ~ 현재 : 신경대학교 인터넷정보통신학과 교수

<관심분야>

마이크로프로세서응용, 임베디드시스템설계