

2상 통전 방식에 따른 동기 리럭턴스 모터의 소음 특성 분석

오재윤, 정달호, 김정철

엘지 전자 홈어플라이언스 연구소 전력전자팀

The Analysis of Noise characteristics of Synchronous Reluctance Motor in the two-phase conduction operation

Jae-Yoon Oh, Dal-Ho Cheong, Jung-Chul Kim

Home Appliance Research Lab. LG Electronics Inc.

Abstract

In this paper, we operate Synchronous Reluctance Motor(SynRM) using the two-phase conduction method. Actually SynRM is operated by the sinusoidal PWM method but in home-appliance there is many restrictions of making the motor such as the method of winding, the shape of rotor etc. Therefore it is possible that there is little difference of performance between the two-phase conduction method and the sinusoidal PWM method.

In this paper the characteristics of motor noise will be analyzed especially in the case of using the two-phase conduction method by experiment results.

1. 서론

동기 리럭턴스 모터는 Switched Reluctance Motor와 같이 Reluctance Torque를 이용하는 모터로 기본적으로는 분포권과 같은 권선 방식을 이용하며 구동 방식은 정현파 구동 방식을 이용하게 되어 있다. 그러나 가전 제품과 같은 실 제품에 적용할 때는 가격적인 제한이나 구현상의 어려움으로 인하여 정현파 구동 방식을 사용하지 못할 수도 있다. 매우 저가의 Micom을 사용할 경우에는 Timer등의 부족과 연산 처리 속도등의 문제가 생기게 된다. 특히 적용분야가 매우 고속으로 구동되는 경우에는 연산 처리 속도가 매우 중요하게 된다. 또한 Inductance profile을 sinusoidal하게 만들기 위해서는 Rotor의 형상 역시

많은 Flux Barrier와 함께 여러 가지 고려되어야만 하는 점들이 있으나 이 역시 현실적으로는 생산에 문제가 될 수 있다.

매우 간단한 Rotor 형상과 집중권과 같은 간단한 권선 방식을 사용하는 경우에는 이상적인 정현파 구동이 2상 통전 방식과 비교하여 비교 우위를 차지하지 못할 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 조건의 경우 2상 통전 방식을 이용하여 동기 리럭턴스 모터를 구동하며 PWM 방식에 따른 소음 특성을 분석하고 끝으로 Dead-Band PWM 방식을 이용하여 정현파 구동을 하였을 경우와의 비교를 통하여 적당한 응용분야에서는 2상 통전을 이용하여서도 동기 리럭턴스 모터의 구동이 가능함을 제시하고자 한다.

2. 동기 리럭턴스 모터

그림 1과 2는 각각 실험에 사용된 동기리럭턴스 모터의 D,Q축 기자력 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 동기 리럭턴스 모터의 기본적인 구동 원리는 D,Q Inductance 차이를 이용한 Reluctance Torque를 이용하는 것이다. 실험에 사용된 Rotor의 구조는 2개의 Flux Barrier를 이용하고 있으며 실제 권선 방식은 집중권 방식이다.

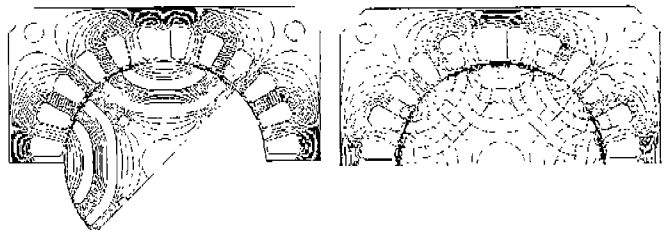


그림 1. D축 기자력 분포 그림 2. Q축 기자력 분포

그림 3은 사용된 Motor의 Inductance 파형을 보여주고 있으며 Inductance Ratio는 약 5이다.

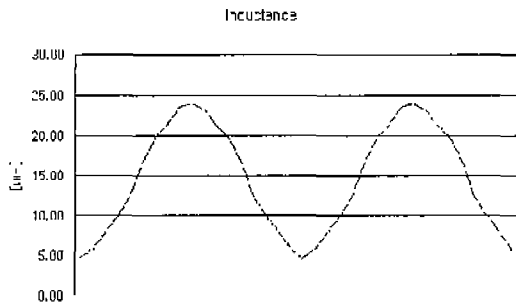


그림 3. Inductance profile

2.1 모터 형상에 따른 특성

일반적인 리럭턴스 타입의 모터는 BLDC와 같은 모터와는 달리 Magnet과 같은 내부 에너지원이 없다. 따라서 상대적으로 많은 전류 사용과 작은 Inductance 값을 갖게 된다. 그러나 작은 Inductance 값을 갖게 됨에 따라 상대적으로 Inductance의 변화에 민감하게 된다.

그림 4는 실험에 사용된 Motor의 D축 Inductance 파형을 보여주고 있으며 Inductance에 Ripple이 발생되는 것을 볼 수 있다. 이것은 Slot Opening에 의해 Inductance가 변하고 있는 것으로 특히 Flux Barrier의 형상이나 개수와 관련이 깊다.

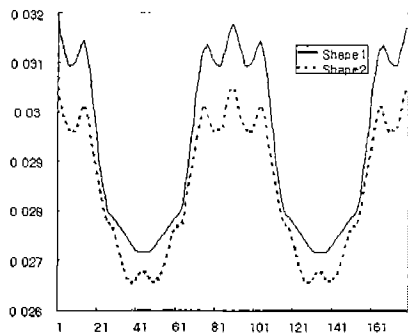


그림 4. D축 Inductance Ripple

상대적으로 작은 Inductance 값을 갖고 이와 같은 Inductance Ripple이 발생할 경우에는 전류에도 심한 Ripple이 발생하게 된다. 사용된 동기 리럭턴스 모터의 경우에는 3상 4극이며 고정자의 Slot의 개수는 24이다. 따라서 전류와 Inductance의 Ripple이 모두 기계적 회전수의 24배수에 해당하는 성분을 갖게 되며 소음 특성을 저하시키게 된다.

그림 5는 2상 통전 방식으로 동기 리럭턴스 모터를 구동하였을 때의 전류 파형을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 전류에 Ripple이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 Ripple 성분을 줄이기 위해서는

Inductance Ripple을 저감하는 방식으로 Rotor 설계를 하여야만 한다.

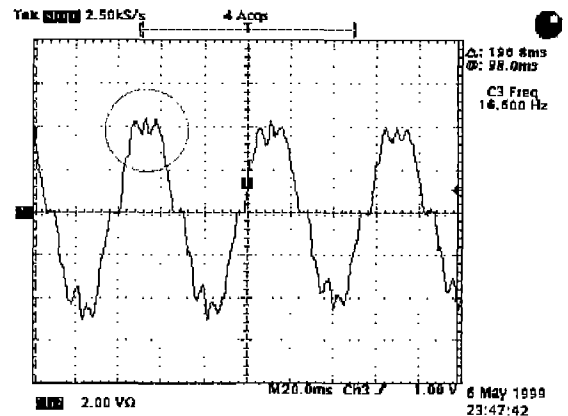


그림 5. 전류 파형 (2상 통전시)

Matsushita에서는 Flux Barrier의 형상이나 배치에 따른 동기 리럭턴스 모터의 특성을 비교한 기술 보고서를 발표하였다[1]. 기술 보고서에 따르면 Q축에 충분한 포화를 일어나게 하기 위해서는 Flux Barrier는 5~6개 이상, Slot Opening에 의한 Torque Ripple을 저감하기 위해서는 Flux Barrier의 폭을 불균일하게 갖는 것이 좋다고 하였다. 그러나 실제 제품에 적용될 것을 고려한다면 5개 이상의 Flux Barrier를 갖는 Rotor의 제작에는 문제가 있다. 따라서 추후에는 4개의 Flux Barrier와 Flux Barrier의 분포에 따른 Inductance Ripple과의 관련에 대한 연구가 이루어져야만 할 것이다.

2.2 2상 통전 방식에 따른 특성

동기 리럭턴스 모터를 2상 통전할 경우에는 필연적으로 2가지의 소음원이 발생하게 된다. 첫 번째의 소음원은 commutation시에 발생하게 되는 Torque Ripple에 의한 소음이며 두 번째는 앞에서 설명된 Slot Opening에 의한 Torque Ripple의 발생이다. 후자의 경우에는 Rotor 설계상의 변경이 필요한 경우이므로 본 논문에서는 고려되지 않는다.

2.2.1 아래상 PWM

아래상 PWM 방식은 그림 6의 Power 소자중 아래상 소자들만 PWM되는 방식으로 Freewheeling Path가 PWM On/Off에 의해 달라지게 된다.

즉, 위상 Power 소자가 Off되고 Freewheeling이 시작되는 순간에는 그림 6과 같은 방향의 전류가 흐르게 된다. 이 경우 그림에서 알 수 있듯이 Freewheeling되는 전류는 On되어 있는 아래상 Power 소자 방향으로 흐르게 되어 있으며 PWM On

이에는 Path2과 같은 방식으로, PWM Off시에는 Path1와 같은 방식으로 흐르게 된다.

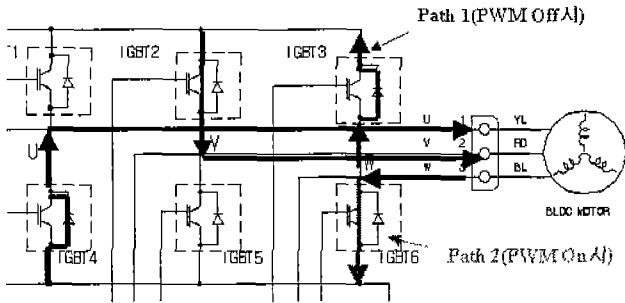


그림 6. 아래상 PWM 방식(IGBT1 On시)

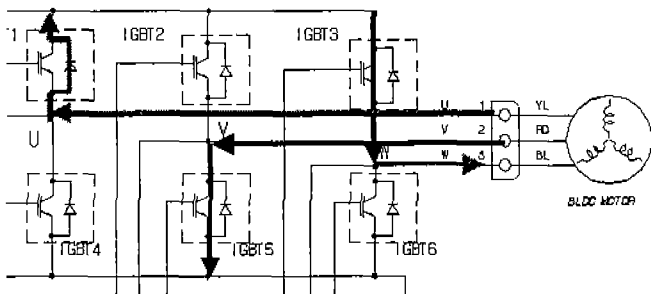


그림 7. 아래상 PWM 방식(IGBT1 Off시)

반면, 아래상 소자가 Off되고 Freewheeling을 하게 되는 경우에는 전류는 그림 7과 같은 방향으로 흐르게 되며 전류는 항상 위상 power 소자 방향으로 Freewheeling하게 된다. 위상 power 소자는 항상 On 되어 있는 소자이므로 이 때는 PWM의 On/Off와 무관하게 Path를 유지하게 된다. 이와 같은 경우 위상 Power 소자가 Off되고 Freewheeling할 때는 Freewheeling Path 전체에 인가되는 전압이 PWM On시에는 0V, Off시에는 -Vdc가 된다. 반면 아래상 소자의 Freewheeling Path의 인가 전압은 항상 0V이다. 따라서 두 경우의 Freewheeling되는 전류의 기울기는 다르게 된다.

2.2.2 상하 PWM

상하 PWM 방식에는 PWM이 120도 구간중에 전 반 60도에 있는 방식과 후반 60도에 있는 방식으로 나누어 지지만 여기서는 전반부에 있는 경우만을 고려한다. 따라서 Gate Signal은 그림 8과 같은 형상이 된다.

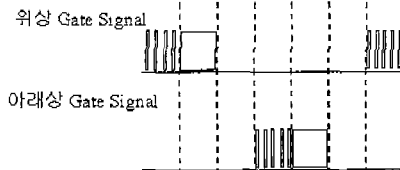


그림 8. 상하 PWM 방식 Gate Signal

위상 Power 소자가 Off되어 Freewheeling시에는 그림 9와 같은 방향으로 전류가 흐르게 되며 따라서 PWM과 무관하게 인가되는 전압은 항상 0V가 된다. 그림 9의 경우에는 IGBT2가 PWM되고 있다.

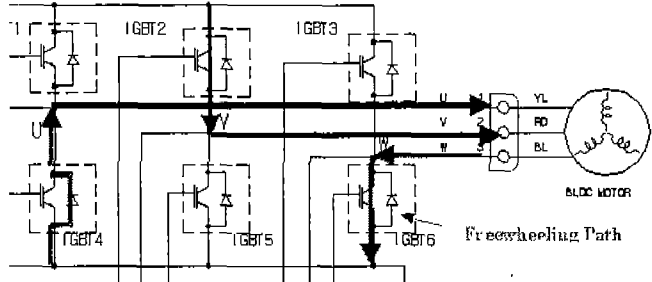


그림 9. 상하 PWM 방식(IGBT1 Off시)

아래상 Power 소자가 Off되어 Freewheeling하는 경우에도 인가되는 전압은 0V가 된다. 따라서 상하 PWM 방식의 경우에는 전류의 방향과 상관없이 어느 Freewheeling 구간에서나 인가 전압은 항상 0V가 된다.

2.2.3 통전 방식과 소음

아래상 PWM 방식을 적용하여 앞에서 설명된 바와 같이 Freewheeling이 일어날 경우에는 전류 형상에 비대칭성이 발생하게 된다. 기본적으로 2상 통전 방식에서는 Commutation시의 Torque Ripple이 항상 존재하게 되어있지만 전류 형상이 비대칭을 이룰때는 더 악화되게 된다. 반면에 상하 PWM에서는 전류의 대칭성을 유지하게 된다. 따라서 두가지 방식사이에는 소음 성능의 차이가 생기게 된다. 특히 동기 리플턴스 모터와 같이 작은 Inductance값을 갖는 경우에는 전류의 비대칭성은 더욱 커지게 된다.

그림 10은 아래상 PWM을 사용할 경우의 전류 파형과 진동을 보여주고 있다. 전류 방향에 따른 기울기가 매우 다름을 알 수 있으며 commutation시마다 진동이 발생됨을 알 수 있다.

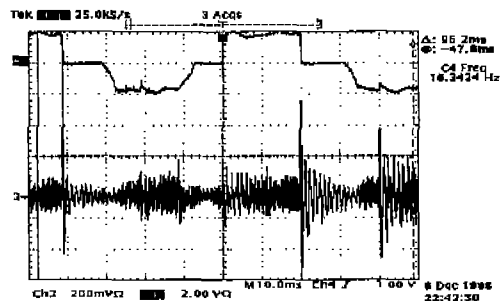


그림 10. 전류 파형 및 진동 (아래상 PWM)

3. 실험 및 결과

실험적으로 PWM 방식에 따른 소음 특성을 비교하기 위하여 같은 Motor와 부하 상태에서 Drive 방

식만을 바꾸어 비교하였다. 실험 조건은 7.2kg Drum 세탁기를 사용하였으며 1M 거리에서 소음을 측정 비교하였다.

그림 11은 7kg의 세탁부하를 넣은 상태에서 500rpm으로 Motor를 구동하였을 때의 소음 파형을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 500rpm의 commutation에 의한 Torque Ripple 주파수인 100Hz 소음이 감소했음을 알 수 있다. 또한 그로 인한 고주파쪽의 많은 성분들이 함께 감소함을 알 수 있다.

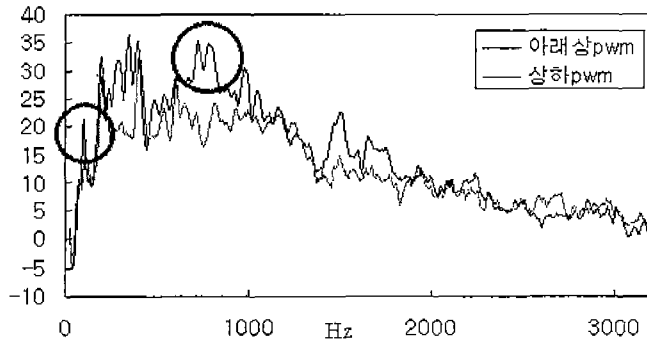


그림 11. 소음 파형 비교

또한 그림에서 200Hz 성분은 감소하지 않았음을 알 수 있는데 200Hz는 기계적 회전 주파수의 24배수에 해당하는 것으로 Slot Opening에 의한 Torque Ripple이 주원인이 된다. 따라서 이 부분의 소음은 PWM 방식과 무관하게 존재하게 된다.

그림 12는 같은 조건에서 Motor를 6500rpm으로 구동하였을 경우의 소음 파형이다. 파형에서 알 수 있듯이 구동 주파수의 24배수에 해당하는 소음치가 존재함을 알 수 있다.

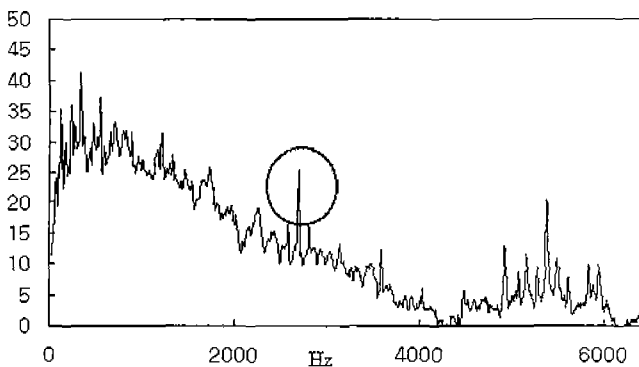


그림 12. 고속시 소음 파형

그림 13은 dead-band PWM 방식을 이용한 정현파 구동시의 전류 파형과 FFT 분석이다. 전류 파형이 sinusoidal 하지 못한 부분은 Slot Opening에 의한 Inductance Ripple 때문으로 보이며 FFT 분석상에는 2배수 성분이 크게 존재하는 것으로 나타나고 있다.

이러한 경우에는 정현파 구동을 하여도 Slot Opening에 의한 소음이 주 소음이 되며 이를 없애기 위해서는 전류 Ripple을 저감하기 위해 전류 제어가 추가되어야만 하기 때문에 저가의 제품 적용에는 적용이 어렵게 된다.

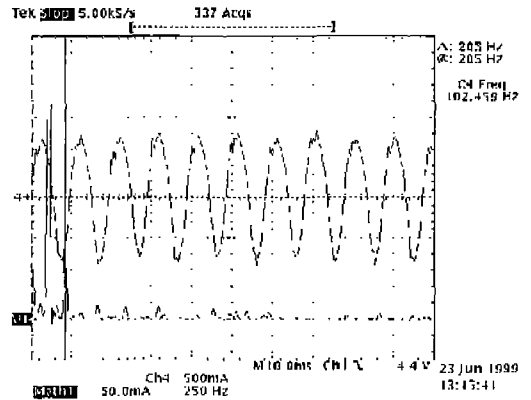


그림 13. 전류 파형 및 FFT

따라서 정현파 구동을 하기 위해서는 그전에 Rotor 형상을 재설계하여 Inductance Ripple을 없애는 노력이 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 동기 리럭턴스 모터를 2상 통전 방식으로 구동하였을 때의 소음 특성에 대하여 실험을 통하여 비교 분석하였다. 특히 상대적으로 작은 Inductance에 의한 성능 저하를 막기 위하여 상하 PWM 방식을 이용하였으며 아래상 PWM 방식에 비하여 소음 성능이 우수함을 실험적으로 보였다. 또한 commutation 소음뿐만 아니라 Slot Opening에 의한 Inductance Ripple이 주 소음원이 됨을 실험적으로 알아 보았으며 정현파 구동을 하기 위해서도 Rotor 형상 설계를 통하여 Inductance Ripple을 줄여야함을 알 수 있었다.

향후에는 Inductance Ripple을 최소화할 수 있는 Rotor 형상에 대한 연구와 2상 통전 방식과 정현파 구동 방식에 있어서 권선 방식에 따른 Torque Ripple의 영향에 대한 연구가 더 되어야할 것이다.

참고 문헌

- [1] Hiroyuki Kiriyama, "Multi-Flux type Synchronous Reluctance Motor", Matsushita Technical Journal, Vol 44 No. 2, 1998.4