

Modified C-dump 컨버터를 이용한 자동차 냉각시스템 SRM 제어

Control of SRM with Modified C-dump Converter in Cooling System of Automobiles

윤 용 호*
(Yong-Ho Yoon)

Abstract - Recently, SRMs are used in automobiles for power assistant steering, accessory motion control and traction drives. Especially in the motion control and traction drives, safety and efficiency are of paramount importance. The paper describes the essential elements faced in designing and constructing driving circuits for a switched reluctance motor for automobiles. An important factor in the selection of a motor and a drive for industrial application is the cost. The switched reluctance motor(SRM) is a simple, low-cost, and robust motor suitable for variable-speed as well as servo-type applications. With relatively simple converter and control requirements, the SRM is gaining an increasing attention in the drive industry. This paper presents a modified C-dump converter for Switched Reluctance Motor (SRM) machine application in the cooling system of automobiles. The experiments are performed to verify the capability of applicate control method on 6/4 salient type SRM.

Key Words : SRM, Modified C-dump converter, Cooling system, Automobiles

1. 서 론

최근 직류전동기 및 유도전동기가 주로 사용되어 왔던 많은 고효율 분야에서 점차 가변속 전동기로 대체되고 있다. 이와 같은 가변속 전동기에는 브러시리스 DC 전동기와 같은 영구자석형과 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하, SRM)로 구분되어진다. 또한 세계적으로 환경문제와 에너지 문제가 대두 되면서 자동차 산업 역시 이의 영향을 받고 있다. 자동차 내부의 모든 전동기가 직류전동기를 사용해 왔지만, 지금은 가변속 전동기 타입으로 바뀌어가고 있다. 이와 같은 추세에 따라 가정용, 산업화의 전기제품에도 동일한 경향이 나타나고 있는 실정이다.

예를 들면 EV, HEV와 같은 시스템의 도입을 통하여 화석연료의 사용 감소 및 환경 문제의 개선을 추구하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 이러한 EV, HEV의 개발이 이루어지면서 차량에서의 모터 사용이 증대되고 모터의 소형 고효율화의 추세가 이루어지고 있으며 소형 고효율화를 위해서 에너지 밀도가 높은 영구자석형 BLDC 전동기, SRM의 비중이 증가하고 있다[1-3].

현재 국내 친환경 버스용 구동모터로 저가형 DC모터가 대부분의 점유율을 나타내고 있고 에너지 밀도가 높은 BLDC, SRM의 적용사례는 미비한 실정이다. 특히 에어컨 쿨링팬 모터는 일반 저효율 DC 모터를 사용하고 있는 실정으로 지속적인 친환경 부품개발에 따른 요구를 만족하는 구동 모터의 개발 및 적용이 확대 될 필요가 있다.

BLDC 모터는 회전자에 권선을 감는 대신 영구자석을 장착하

여 일반적인 DC 모터에 비해 관성 대 토크 비율이 높으며, 브러시가 없으므로 유지, 보수가 용이하고 브러쉬와 정류자편의 마찰에 의해 발생하는 스파크나 분진, 가청잡음이 없어 사용 환경에 제약을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 그러나 최근 많은 산업체는 효율이 높은 영구자석형 전동기를 많이 선호해 왔으나 수급과 비용 문제로 가격 경쟁력이 낮은 단점으로 인해 그 사용이 제한되고 점점 더 대체되고 있다[4-5].

이러한 문제점을 극복하기 위한 방법 중 하나로 SRM이 주목 받고 있으며, 이 전동기의 장점은 회전자와 고정자가 이중 돌극형으로 구성되어 있고, 고정자에만 권선이 있는 단순한 구조를 가지고 있다. 그리고 영구자석과 회전자에 권선이 없으므로 견고하고 간단한 전자계 구조 때문에 다른 전동기에 비해 생산단가를 낮추는 것이 용이하여, 팬, 블러워, 트랙션용과 저비용으로 많은 분야에 적용되고 많은 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 SRM 구동용 topology로 modified C-dump 컨버터를 이용하여 차량용 냉각시스템의 구동 및 타당성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 냉각시스템과 SRM의 응용[6]

그림 1은 Radiator Engine 냉각시스템으로 자동차 및 산업용 엔진의 과열을 방지하여 적정온도로 유지시키는 기능을 하며, 실린더 블록 및 헤드에 마련된 Water Jacket 안에 냉각수를 순환시켜 엔진을 냉각시키는 수냉식에 적용된다. 일반적으로 수냉식 엔진의 실린더 벽은 110°C이하의 온도로 유지하기 위하여 냉각수의 온도를 75~85°C로 유지시켜야 하며, 이러한 냉각작용을 위하여 Radiator, Water Pump, Cooling-Fan, Thermostat 등이 설

* Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Gwangju University, Korea.

E-mail: yhyoon@gwangju.ac.kr

Received : May 21, 2017; Accepted : July 17, 2017

치되고 본 논문에서는 이러한 기기의 구동용 모터로 SRM을 적용하였다.

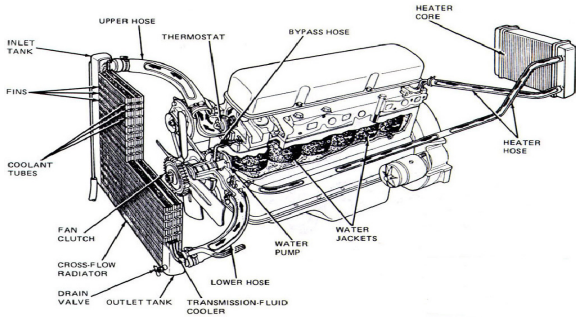


그림 1 Radiator Engine 냉각시스템
Fig. 1 Radiator Engine Cooling System

3. Modified C-dump Converter[7]

일반적으로 SRM을 구동시키기 위하여 사용되고 있는 구동용 컨버터로 비대칭 브리지 컨버터를 많이 사용하고 있는 실정이다. 클래식 컨버터라고도 불리는 비대칭 브리지 컨버터(Asymmetric Bridge Converter)는 상당 2개의 스위치와 2개의 환류 다이오드를 가지는 구조로 효율이 높고 다양한 제어가 가능하며, 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류 중첩이 가능하고, 상의 수에 관계없이 사용할 수 있는 컨버터이다. 또한 한 상의 고장 발생 시에도 다른 상에 큰 영향이 없으며, 소자의 정격전압이 상대적으로 낮고 제어성능이 가장 우수하다.

그림 2는 상수보다 하나 더 많은 스위치 및 다이오드를 지니고, 부가적으로 커패시터와 인덕터가 추가되는 구조로, 에너지를 커패시터에 저장하였다가 직류전원에 환원하는 방식의 C-dump 컨버터이다.

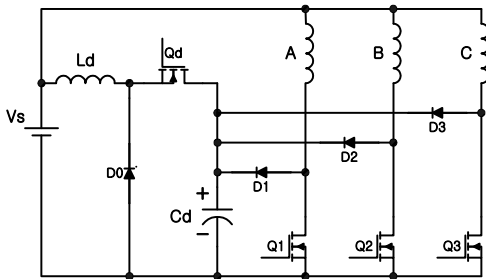


그림 2 C-dump 컨버터
Fig. 2 C-dump Converter

특히 상의 갑자기 빠른 전류의 하강으로 인해 역도오크의 발생을 최소화하는 특징을 가지고 있다. 그러나 덤프 커패시터에 흐르는 전류로 인하여 상대적으로 높은 전압정격의 소자가 필요하며 제어가 복잡하고 부가된 보호회로에 의해 신뢰성이 낮아지는 단

점이 있다.

따라서 본 논문에서는 차량의 환경 및 구조적인 특성을 고려하여 그림 3과 같이 기존의 C-dump 컨버터를 보완한 modified C-dump 컨버터를 적용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 상수보다 하나 더 많은 스위치 및 다이오드를 가지고 부가적으로 커패시터가 추가되는 구조로 기존의 인덕터를 제거하여 에너지를 커패시터에 저장하였다가 바로 다음상의 여자 시에 전달하는 방식의 컨버터로서 제어의 복잡성을 개선하였다. 전류확립시 인가 전압의 2배의 덤프 커패시터(Cd) 전압을 이용하므로 빠른 전류의 확립을 가져올 수 있는 장점을 가지고 있다.

반면 단점으로는 한 상의 전류가 완전히 소멸된 후 다음 스위치를 여자 시켜야 되므로 상전류의 중첩을 시킬 수 없어 토크 발생영역을 충분히 활용하지 못하고 공통스위치의 높은 정격과 발열문제를 안고 있다.

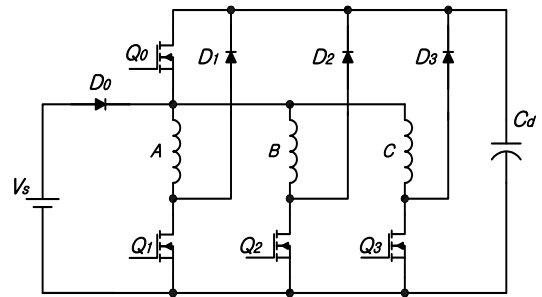


그림 3 Modified C-dump 컨버터
Fig. 3 Modified C-dump Converter

Modified C-dump 컨버터의 동작 mode는 다음과 같으며 각 모드 세부내용은 참고문헌 [6]을 통해 확인할 수 있다.

- 1) Q1을 턴온시켜 상권선을 여자 시키는 단계.
전원전압이 초기 커패시터 충전전압보다 큰 경우와 작은 경우의 두 가지로 나눌 수 있다.
- 2) Q1을 턴 오프하여 전류를 환류하는 단계.
- 3) Q1과 Q0 모두 턴 오프된 경우로서 권선에 저장되어 있던 에너지와 전원 에너지가 덤프 커패시터(Cd)에 저장 단계.
- 4) 다음 여자 될 상은 덤프 커패시터(Cd) 에너지에 의해 공급되다가 공급전압 레벨까지 감소하게 되면 블리킹 다이오드 D0가 정방향 바이어스 되어 공급전압 에너지가 상으로 공급.

4. 실험결과

본 논문에서 기존의 C-dump 컨버터를 보완한 Modified C-dump 컨버터를 이용한 냉각시스템의 실험결과를 얻기 위하여 차량용 냉각시스템에 SRM과 Modified C-dump 컨버터를 적용하였다. 적용한 시스템을 통해 각각의 속도에 따른 무부하 및 부하실험결과로 결과값을 정리하였으며 타 전동기와의 EMI 비교시험을 추가적으로 수행하였다.

본 논문에서 사용된 SRM의 상 수는 표 1과 같다.

표 1 실험에 사용된 전동기 상 수

Table 1 Motor parameters for experiments

Rated power	250[W]
Rated speed	3000[rpm]
Number of stator poles	6[pole]
Number of rotor poles	4[pole]
Phase resistance	0.02166[Ω]
Maximum inductance	1.332[mH]
Minimum inductance	0.241[mH]
Rated voltage	12[Vdc]
Number of phase	3[phase]

4.1 무부하 실험

그림 4는 무부하시 500rpm에서 1000rpm으로 그림 5는 1000rpm에서 1500rpm으로 속도 가변시 속도응답과 상전류 결과 파형을 각각 보여주고 있다.

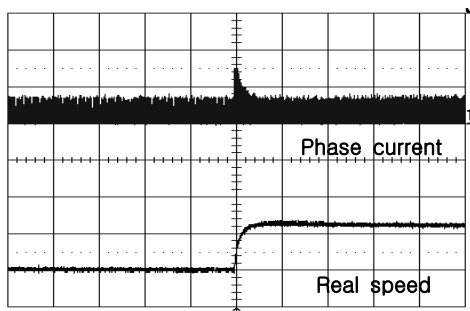


그림 4 속도응답 및 상전류 (500rpm→1,000rpm)
Fig. 4 Speed response and phase current (10A/1s/div.)

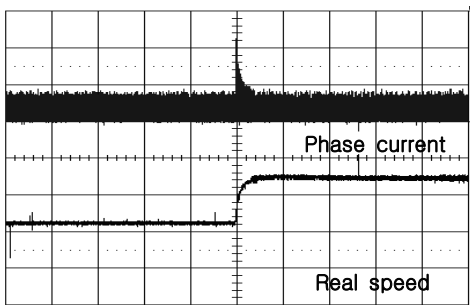


그림 5 속도응답 및 상전류 (1,000rpm→1,500rpm)
Fig. 5 Speed response and phase current (10A/1s/div.)

그림 6, 7, 8은 본 연구에서 사용된 SRM을 이용하여 각각의 속도 500rpm, 1,000rpm, 1,500rpm으로 최적의 선행각도 (advance angle) 7.8°, 오프각도(off angle) -4.8°로 운전시 한 상의 전류파형을 보여주고 있다. 전류파형에서 보여주고 있듯이 속도변화에 따라 제한된 히스테리시스 밴드폭 내에서 스위치의 초핑수가 가변되고 있음을 알 수 있다. 고속운전으로 갈수록 한

상당 초핑수가 줄어들을 알 수 있고 출력전류는 무부하시 구동되어서 속도가 증가하여도 속도의 변화에 따른 전류변화는 거의 없음을 알 수 있다.

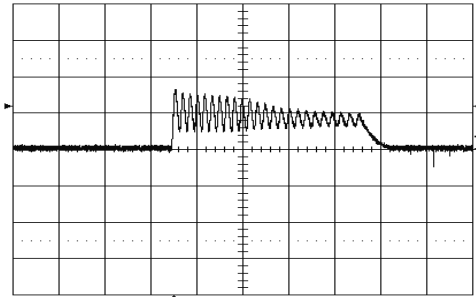


그림 6 한 상의 전류파형 (500rpm, 5A/0.5ms/div.)
Fig. 6 Phase current at 500rpm
(advance angle: 7.8°, off angle: -4.8°)

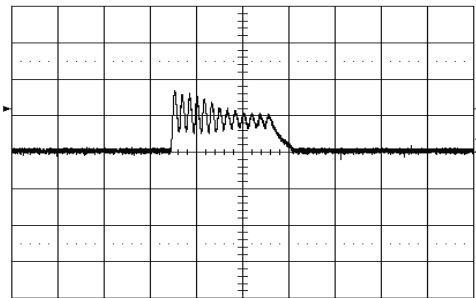


그림 7 한 상의 전류파형 (1,000rpm, 5A/1ms/div.)
Fig. 7 Phase current at 1,000rpm
(advance angle: 7.8°, off angle: -4.8°)

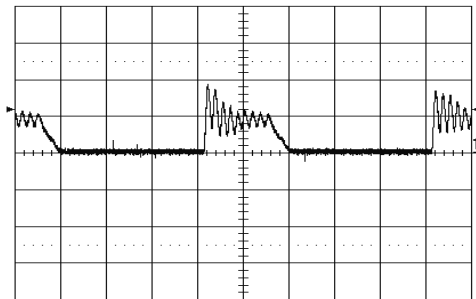


그림 8 한 상의 전류파형 (1,500rpm, 5A/2ms/div.)
Fig. 8 Phase current at 1,500rpm
(advance angle: 7.8°, off angle: -4.8°)

4.2 부하 실험

본 부하실험은 팬 부하를 달고 실험한 결과로 무부하 실험과 동일한 조건으로 속도를 가변하여 500rpm, 1,000rpm, 1,500rpm에서의 상전류파형과 Modified C-dump 컨버터에서 덤프 커패시

터(C_d)에 인가되는 전압에 대한 결과를 분석하였다.

그림 9~10은 팬 부하를 달고 500rpm에서 1000rpm으로 1000 rpm에서 1500rpm으로 각각 속도 가변시 속도응답과 상전류 결과 파형을 나타내고 있다.

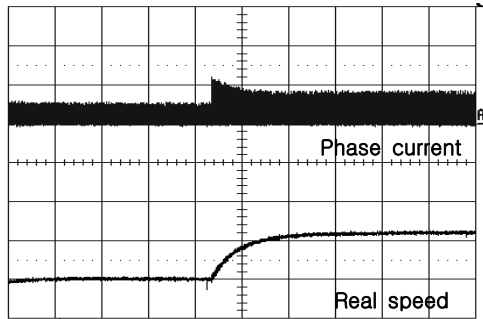


그림 9 속도응답 및 상전류 (500rpm→1,000rpm)
Fig. 9 Speed response and phase current (25A/1s/div.)

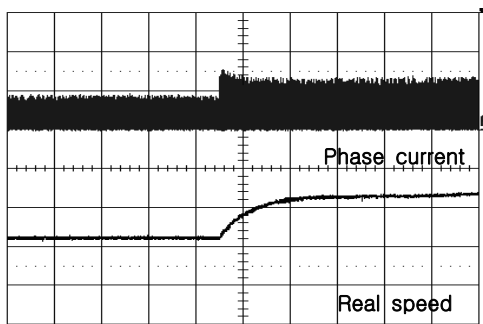


그림 10 속도응답 및 상전류 (1,000rpm→1,500rpm)
Fig. 10 Speed response and phase current (25A/1s/div.)

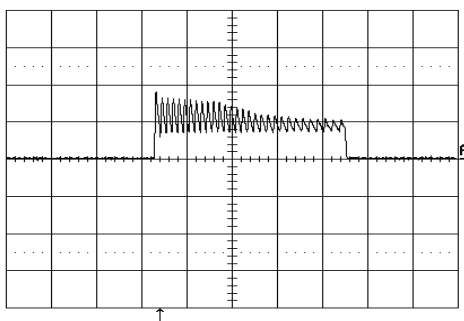


그림 11 한 상의 전류파형 (500rpm, 5A/0.5ms/div.)
Fig. 11 Phase current at 500rpm
(advance angle: 7.8°, off angle: -4.8°)

무부하 구동시 적용한 선행각도(advance angle) 7.8°, 오프각도(off angle) -4.8°를 부하실험에서도 동일하게 적용하였고 각각의 속도 500, 1000, 1500rpm에서 한 상의 전류파형을 그림 11,

12, 13에서 보여주고 있다. 무부하시 때와 동일하게 히스테리시스 전류제어에 의해 밴드폭 내에서 스위치의 초핑수가 가변되고 있음을 알 수 있다.

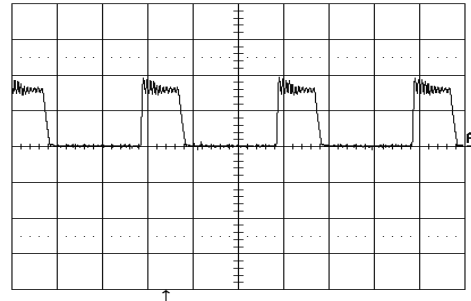


그림 12 한 상의 전류파형 (1,000rpm, 10A/2ms/div.)
Fig. 12 Phase current at 1,000rpm
(advance angle: 7.8°, off angle: -4.8°)

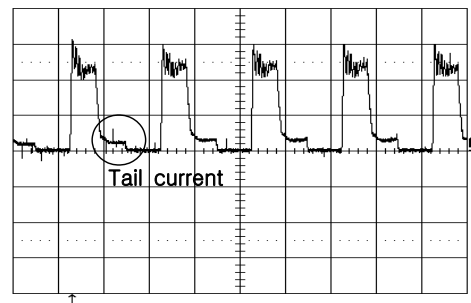


그림 13 한 상의 전류파형 (1,500rpm, 10A/5ms/div.)
Fig. 13 Phase current at 1,500rpm
(advance angle: 7.8°, off angle: -4.8°)

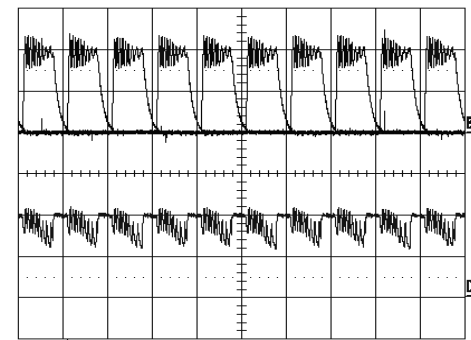


그림 14 3상전류 및 dump 커패시터 전압
Fig. 14 3 phase current and dump C voltage
(1,000rpm, 10A/10V/5ms/div.)

또한 속도를 점점 증가시 한 상의 전류파형에 나타난 꼬리전류가 길어지는 현상을 볼 수 있다. 이러한 꼬리 전류는 SRM의 구동특성에서 역토크를 발생시킬 수 있는 부분으로 본 논문에서는 이러한 역토크 발생을 최소화시키기 위해 오프각도(off angle)

를 -4.8° 로 스위치를 앞당겨 off할 수 있도록 설계하였다.

그림 14는 1,000rpm의 속도로 운전시 히스테리시스 전류제어에 의한 전류구동과 덤프 커패시터(C_d)에 충전전 전압의 결과를 보여주고 있다.

인가전압의 2배인 덤프 커패시터(C_d) 전압을 이용하여 빠른 전류확립을 가질 수 있는 Modified C-dump 컨버터 특징을 그림 14에서 덤프 커패시터(C_d)의 충전전 전압파형을 통하여 확인할 수 있다.

4.3 Common Mode 전압 및 전도노이즈(EMI) 실험

차량용 냉각시스템 제어용으로 SRM 및 Modified C-dump 컨버터를 적용한 것에 대한 타당성을 검증하기 위하여 Common Mode 전압(V_{cm})과 전도 노이즈(EMI)를 측정하기 위해 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer)를 이용하였다.

표 2 자동차에 적용되는 규격별 EMI LEVEL 비교

Table 2 EMI specification for vehicles

SPEC	FREQUENCY (MHz)	NB LIMIT (dBuV/m)	BB LIMIT (dBuV/m)
95/54 EEC	30~75	54~44	64~54
	75~400	44~55	54~65
	400~1000	55	65
SES E922 (CISPR #25 CLASS 3)	0.15~0.3	41	63
	0.53~54	34	35
	70~960	24	2
GM UTS	0.01~0.5	34.6~32.4	47.6~45.4
	0.5~20	28	41
	20~512	15	28
	512~1000	15~21.7	28~34.7

또한 입력전압은 차량용 배터리를 이용하여 12V를 입력 및 LISN(Line Impedance Stabilization Network)의 출력전압이 Modified C-dump 컨버터의 입력전압으로 공급될 수 있도록 구성하였다. LISN을 이용하여 전원측에서 전동기 입력으로 들어오는 Noise를 차단하였고 임피던스 매칭을 하기위해 DMRN을 이용하여 스펙트럼 분석기에 연결하여 전동기의 외함과 Ground 사이에서 발생하는 부유 커패시턴스(Stray Capacitance) 성분과 전동기를 구동하기 위한 인버터에서 발생되는 노이즈 성분을 스펙트럼 분석기로 측정하였다. 또한 시험에 적용된 EMC 규격으로는 자동차 EMC 국제규격인 CISPR #25를 적용하였으며 차량에 적용되는 규격별 EMI level은 표 2와 같다.

추가적으로 차량의 냉각시스템 제어용으로 BLDC 전동기 그리고 본 논문에서 적용한 SRM의 전도노이즈(EMI)를 측정하여 각 실험의 결과값을 비교 분석 하였다. SRM과 Modified C-dump 컨버터 topology를 적용하여 Common Mode 전압인 V_{cm} 을 속도변화 500, 1000, 1500 rpm에 따른 결과를 그림 15, 16, 17에

서 각각 확인할 수 있다.

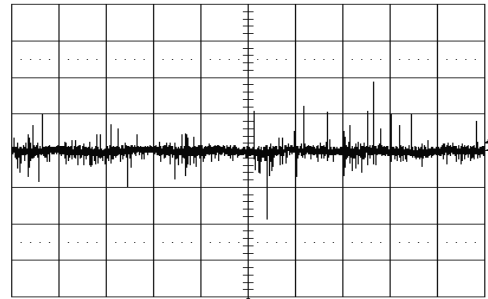


그림 15 500rpm에서의 V_{cm} (200mV/5ms/div.)

Fig. 15 V_{cm} wave at 500rpm

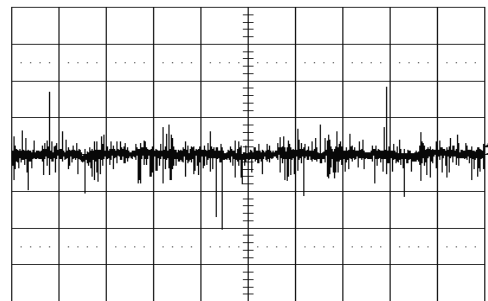


그림 16 1000rpm에서의 V_{cm} (200mV/5ms/div.)

Fig. 16 V_{cm} wave at 1000rpm

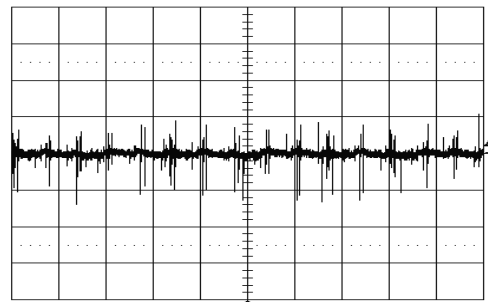


그림 17 1500rpm에서의 V_{cm} (200mV/5ms/div.)

Fig. 17 V_{cm} wave at 1500rpm

또한 SRM과의 비교실험에 250W급 BLDC 전동기를 사용하여 전도노이즈(EMI)를 각각 측정하였다. CISPR #25 규격에서 Narrow Band를 기준으로 960MHz까지의 노이즈를 스펙트럼 분석기로 나타내었으며 속도는 1,000rpm으로 동일한 조건에서 실험하였다.

그림 18, 19의 결과를 표 1의 기준에 적용해 볼 때 본 논문에서 SRM과 Modified C-dump 컨버터 topology를 적용한 결과는 BLDC 전동기 결과에 비해 EMI의 수치가 안정적인 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 추가적인 노이즈 대책에 대한 연구결과를 보완한다면 기존 차량용 냉각시스템 제어용으로 사용되

고 있는 DC 전동기를 대체할 수 있는 성능적 타당성이 입증될 것으로 사료된다.

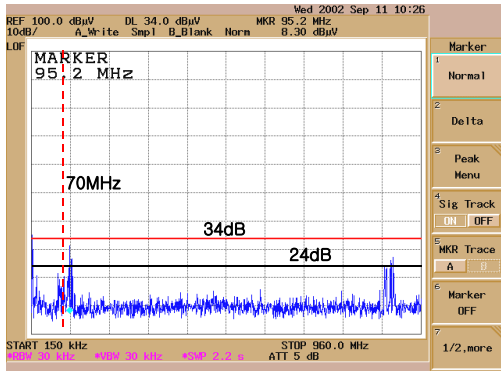


그림 18 BLDC 전동기의 노이즈
Fig. 18 Noise spectrum of BLDC motor

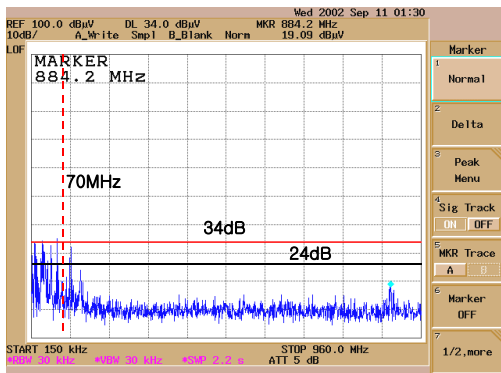


그림 19 SRM의 노이즈
Fig. 19 Noise spectrum of SRM

6. 결 론

자동차 내부의 모든 전동기가 직류전동기를 사용해 왔지만, 지금은 가변속 전동기 타입으로 바뀌어가고 있다. 이와 같은 추세에 따라 가정용, 산업화의 전기제품에도 동일한 경향이 나타나고 있는 실정으로 본 논문에서는 차량용 냉각시스템 제어용 전동기로 기존에 사용되고 있는 DC 전동기대신 SRM 적용에 대한 타당성 연구를 수행하였다.

본 연구를 통해 차량용이라는 응용범위를 고려하여, SRM이 현재 냉각시스템 제어용 전동기로 사용되고 있는 DC전동기, 차세대용으로 활용이 증가되고 있는 BLDC 전동기와의 EMI 비교 실험을 통해, 동등이상의 성능적 우수성을 검증하였다. 따라서 내구성과 경제성 측면에서 현재 여러 종류의 차량용 전동기의 대체효과뿐만 아니라 연구 가치가 매우 높은 응용분야가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] Zhenyao Xu, D. H. Lee and J. W. Ahn, "Comparative Analysis of SRM with Segmental Rotors for Vehicle Cooling Fan," *Conf., of KIEE*, pp. 506-506, 2015.
- [2] Y. S. Lee, J. M. Noh and J. H. Kim, "Development of SRM Drive System for Built-in Car Vacuum Cleaner," *Conf., of KIEE*, pp. 506-506, 2015.
- [3] J. S. Park, J. H. Choi, B. G. Gu, and I. S. Jung, "BLDC Motor Control for Automotive Water Pump," *Conf., of KIEE*, pp. 530-531, 2010.
- [4] Parvatham Paramesh, Venkateswarlu K and Sunitha K, "Performance Analysis of C-dump Converter for BLDC Machine Application in a Flywheel Energy Storage System," *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 19-30, 2014
- [5] M. Bala Krishna and M. Kiran Kumar, "A New C-dump Converter with Power Factor Correction for BLDC Drive," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, vol. 3, pp. 59-70, 2013.
- [6] www.cato.com
- [7] A. Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines", *IEEE Trans. Ind. Applcat.*, vol. 28, Sept./Oct. 1992.

저 자 소 개



윤 용 호 (Yong-Ho Yoon)

2007년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업 (박사). 2007년~2011년 삼성탈레스 종합연구소 메카트로닉스그룹 전력전자팀 전문연구원. 2011년~2015년 한국산업기술시험원 신재생사업센터 책임연구원. 현재 광주대학교 전기공학부 교수.