

# 고속열차용 추진제어장치의 기술

조성준\*, 정만규\*\*, 김두식\*\*\*

(현대중공업 기술개발본부 기계전기연구소 \*선임연구원, \*\*책임연구원, \*\*\*수석연구원)

현대중공업은 철도차량 전장품 분야에서 주변압기, 추진제어장치, 보조전원장치, 배터리 충전기 등 다양한 제품의 개발에 노력을 기울여 관련 산업 및 기술 발전에 기여해 왔다. 특히 전동차용 추진제어장치는 국내 최초로 국산화 및 상용화에 성공하여 광주지하철과 대전지하철에 납품한 실적을 가지고 있으며 최근에는 고속열차용 주전력변환장치를 세계에서 네 번째로 개발 및 상용화 하여 신규 고속열차인 KTX-II에 적용하였다. 본 논문에서는 고속열차용 추진제어장치의 기술 동향과 추진제어 장치의 설계 및 제작에 활용된 전력전자 기술에 대한 소개를 하고자 한다.

## 1. 서론

물류수송의 중요성은 국가 산업경쟁력을 좌우하고 있으며 교역량의 양적인 증대와 더불어 빠르고 정시성을 가진 고속열차에 의한 물류이동 수요가 점차 증대되고 있다. 세계의 환경규제협약으로 인해 대기오염이 없는 전기추진장치가 대중교통수단으로 필수적인 시기가 도래하였으며, 세계의 고속철도는 지속적인 기술개발과 고속철도망의 확장을 통해 성장을 거듭할 것으로 예상된다. 유럽의 경우 세계철도연맹(UIC)에 의해 고속철도 계획이 통합 조정되고 있으며, 고속철도망은 현재 3,040 km에서 2010년에는 6,000 km, 2020년에는 약 10,000 km 까지 확대될 계획이다. 일본은 현재 총 연장 약

1,950km의 신간선 4개 노선을 운영 중이며 향후 신간선 노선을 4,940km 까지 확장할 계획을 가지고 있다. 미국에서도 차세대 고속철도 프로그램이 1995년 미국 연방 철도법에 의하여 시작되면서 새로운 고속열차 시스템 개발을 추진하여 최근 첨단 가스터빈 고속열차를 개발 하였다. 국내에서는 남북철도 연결 사업을 비롯하여 유라시아 대륙 철도망 구축이 논의되고 있으며, 중국이 10,000km 고속철도 건설 계획을 발표하는 등 국내의 환경 변화가 나타나고 있다. 고속전철의 건설은 지역 간의 거리가 300~600km인 경우가 가장 이상적이라고 할 수 있다. 거리가 300km 이하인 경우에는 자동차의 이용이 간편하고 시간도 절약될 것이며, 600km 이상이면 비행기가 더욱 편리할 것이기 때문이다. 이러한 점을 고려하면 우리나라 만큼 고속전철에 적합한 나라도 없다. 국민소득의 향상에 따라 교통에 소비되는 시간가치가 급격히 증가하면서 국민생활과 경제활동의 기반인 교통수단, 그 중에서도 중·장거리 도시간 철도교통의 고속화가 절실하게 요구된다. 경부고속전철은 물론 앞으로 호남지역의 호남선 고속전철의 건설로 국토의 동서간의 균형적인 발전을 기대할 수 있다. 한국형 고속철도 개발을 계기로 고속철도 분야가 국내 철도산업 전반에 주도적인 역할을 자리매김 한 만큼 독자적인 설계 기술의 확보와 관련 기술에 대한 연구는 국산화에 따른 수입 대체와 수출증대 뿐만 아니라 차량의 운행에 따른 유지보수 비용 등을 절감할 수 있다. 특히 고속열차에서 추진제어장치는

자동차의 엔진과 같은 역할을 수행하는 핵심 장치로써 추진 제어장치의 설계 및 제작에 활용되는 전력전자 기술에 대한 연구는 관련 산업의 발전에 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 국내 고속열차의 추진제어장치에 대한 기술동향을 살펴보기 위하여 KTX와 KTX-II의 추진제어 시스템을 비교하고 관련 전력전자 제어 방법에 대하여 기술한다.

## 2. 고속열차용 추진제어장치

고속열차는 편성의 구성 방식에 따라 동력 집중식과 동력 분산식으로 나눌 수 있다. 동력 분산식은 점착성능이 높아 가속 및 감속 성능 확보에 유리하며, 축중이 가볍고 하나의 추진제어장치 고장이 전체 편성의 운행에 미치는 영향이 적은 장점이 있다. 하지만 차량의 에너지 소모가 크고, 무게 및 제작비용이 증가하고 추진제어장치의 개수가 증가하여 유지보수가 어렵다. 또한 추진제어장치로 인한 소음이 객실 내의 승차감에 영향을 미치는 단점이 있다. 동력 분산식은 대표적으로 일본의 신간선에 적용되고 있다. 이에 반해 추진제어장치가 동력차에 집중된 동력 집중식은 분산식에 비하여 점착력이 작으며, 정차가 빈번한 노선의 경우 기계 제동의 역할이 크지만 동력기와 추진제어장치의 집중으로 유지 보수에 유리하고, 객차에 소음원이 존재하지 않는다는 장점이 있다. 따라서 유럽에서는 프랑스의 TGV 독일의 ICE 등에서 적용되고 있으며, 국내에 도입되어 운영중인 KTX도 동력 집중식으로 구성되어 있다.<sup>(1)</sup>

### 2.1 KTX 추진제어장치

국내에 도입되어 2004년 영업운전을 시작한 고속철도차량(KTX)은 프랑스 고속열차인 2세대 TGV-A 차량을 기본

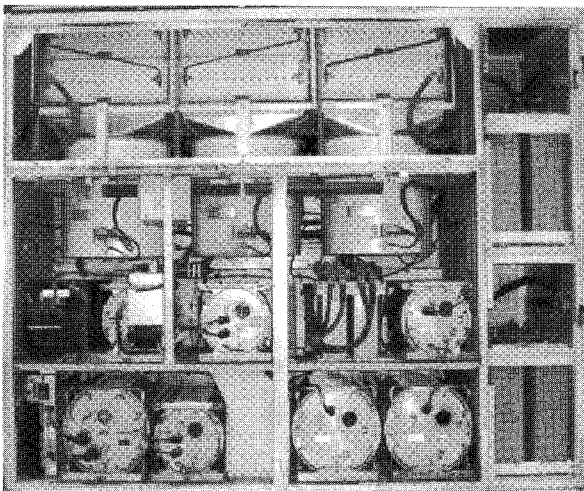


그림 1 KTX 추진제어장치

으로 한국의 운행여건에 맞게 변경 제작된 차량으로 동력 집중식 방식을 사용하고 있으며, 열차의 특징인 연결대차(관절대차)를 채용하고 있다. 열차 편성은 동력차 2량, 동력객차 2량 및 객차 16량으로 총 20량 1편성으로 구성된 단일 편성이다. 주전력변환장치의 컨버터부는 위상제어 정류기이며 인버터부는 전류형 인버터를 사용하고 있으며, 주회로의 전력회로 소자는 GTO 이다. 전력회로를 이루는 스택의 냉각 방식은 프레온 탱크를 사용한 비등 침적 방식의 액체 냉각형이다. 차상컴퓨터와 통신 방식은 산업용 LAN방식의 TORNAD 네트워크 전송시스템을 적용하고 있다. 입력 전압과 전류의 역률 제어와 고조파 저감을 위한 별도의 PFC(Power Factor Correction) 회로를 가지고 있다. 한편 주전력변환장치와 함께 추진제어 시스템을 구성하는 견인전동기는 1,130kW급 삼상 동기전동기가 사용되었으며, 동기전동기의 제어는 3상 전류형 인버터를 통해 가속 제어 및 회생제어를 수행한다. 그림 1은 KTX 추진제어장치의 외관을 나타낸다.

### 2.2 KTX-II 추진제어장치

신규 고속열차인 KTX-II 열차는 호남선과 전라선에 투입 예정인 신규 고속차량이다. KTX-II 차량은 동력차 2량, 객차 8량으로 구성된 총 10량 1편성이며 중련 편성이 가능하여 승객 수요에 따른 탄력적인 운용이 가능하다. 주전력변환장치는 가선으로부터 교류 25kV를 입력받아 직류전압으로 변환하는 컨버터장치와 견인전동기에 3상 교류전압을 공급하여 전동기의 속도를 제어하는 인버터장치로 구성되어 있다. 교류 25kV는 변압기 1차측 전압이며 변압기 2차측 전압은 교류 1,400V이다. KTX-II 추진제어장치의 컨버터부는 병렬로 연결된 2대의 단상 PWM 컨버터로 구성되며 고조파 저감을 위한 별도의 회로를 필요로 하지 않는다. 인버터부는 2레벨 전압형 인버터이며 2대의 견인전동기를 병렬로 구동하는 1C2M 시스템을 적용하고 있다. 주회로의 전력회로 소자는 고압 대용량의 최신 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 소자이며 스택의 냉각 방식은 Heat pipe를 이용한 환경 친화적인 냉각 방식이다. 반도체소자의 스택구성은 유지보수의 편리를 위해 각각 상별로 구성되고 컨버터 및 인버터장치와 호환성이 유지되도록 설계되었다. 상위 장치인 TDCS(Train Diagnosis Control System)와 통신방식은 TCN(Train Communication Network)을 이용한 네트워크를 구성하고 있다. KTX-II 추진제어장치의 견인전동기는 1,100kW급의 유도전동기이며 3상 전압형 인버터를 이용하여 견인 및 제동 제어를 수행한다. 그림 2는 KTX-II 추진제어장치의 전력회로 구성도이며 그림 3은 제작된 주전력변환장치의 외관이다. 표 1은 KTX와 KTX-II 추진제어장치의 구성에 대한 특징 비교이다.

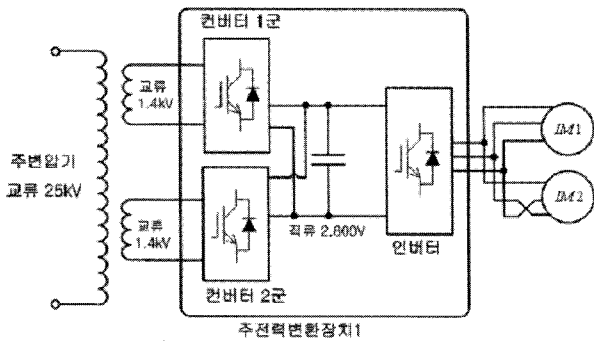


그림 2 KTX-II 추진제어장치 전력회로 구성도

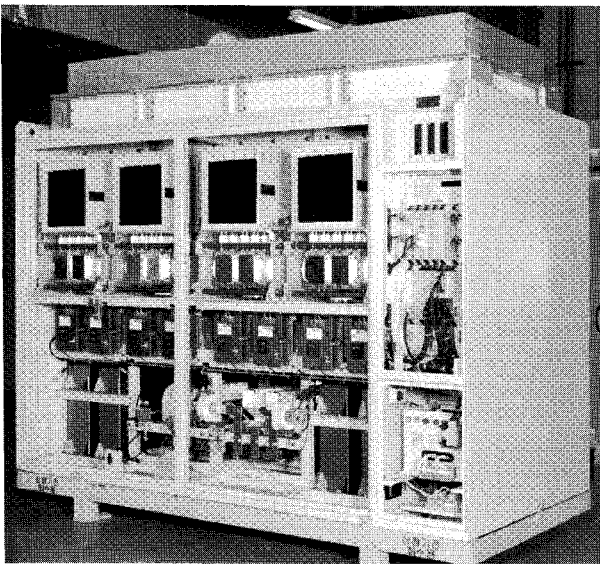


그림 3 KTX-II 추진제어장치

표 1 KTX, KTX-II 추진제어장치 비교

구분	KTX	KTX-II	
차량 구성	동력 집중식	동력 집중식	
열차 편성	20량	10량 (중편 가능)	
최고운행속도	300km/h	300km/h	
설계최고속도	330km/h	330km/h	
추진 제어 장치	컨버터	위상제어 정류기	단상 PWM 컨버터
	인버터	전류형 인버터	전압형 인버터
	전력소자	GTO	IGBT
	고조파 저감	수동 PFC 회로	단상 PWM 컨버터 병렬운전
	냉각방식	탱크 침적식	Heat Pipe 방식
견인전동기	동기전동기	유도전동기	
	1,130kW	1,100kW	

### 3. 추진제어장치 제어기술

기존에는 추진제어장치의 견인력과 제동력을 제어하기 위하여 슬립주파수 제어가 널리 사용되었다. 하지만 최근에는 전력 반도체 소자의 발전으로 고압 대용량의 빠른 스위칭이 가능해졌고 제어기의 연산속도 개선 등으로 인해 복잡한 알고리즘의 구현이 가능해지면서 벡터제어를 채용한 추진제어장치가 일반적이다. 추진제어장치의 인버터부에서 사용하는 PWM 방식은 종래에는 인버터 동작 주파수에 따라 출력 전압의 펄스수를 절환하는 방식이 사용되었으나 최근에는 SVPWM을 이용한 저주파 동기 PWM 방식을 채용하게 되었다. 고속열차용 추진제어장치는 가선으로부터 단상 교류전원을 공급받기 때문에 이를 직류로 변환하는 컨버터 장치가 존재하며 직류로 변환한 에너지를 다시 교류로 전환하여 전동기에 공급하는 인버터 장치도 필요하다. 단상 PWM 컨버터는 일정한 출력 직류 전압을 유지하면서 입력 전압과 전류의 단위 역률을 제어하는 기능을 수행한다. 추진제어장치 내에 컨버터와 인버터가 동시에 존재하면 인버터의 동작 주파수에 따라 컨버터의 출력 전압에 저주파 맥동 성분이 존재하여 인버터 출력 토크 리플에 영향을 주게 된다. 이러한 비딩 현상을 억제하기 위하여 Beatless 제어 알고리즘을 사용하여 저주파 토크 리플을 저감한다.

#### 3.1 단상 PWM 컨버터 제어

단상 PWM 컨버터는 DC-link 전압 일정제어 기능과 입력 전압, 전류의 단위 역률 제어 기능을 가지고 있다. 컨버터는 일정 전압제어 기능을 수행하기 위해 인버터가 견인 모드로 동작하는 경우에는 인버터로 필요한 전력을 공급하고 제동 모드로 동작하는 경우에는 회생 전력을 가선으로 회귀시키는 역할을 수행한다. 이러한 단상 PWM 컨버터의 제어알고리즘 블록도는 그림 4와 같다. 전류 지령치 연산기는 DC-link 전압을 일정하게 제어하기 위한 전류 지령치의 크기를 계산하고 가선전압의 위상 정보를 검출하여 순시 전류 지령치를 연산한다. 전압 지령치 연산기에서는 순시 전류의 크기와 위상을 제어하기 위하여 전류지령치와 실제 전류를 비교하여 전

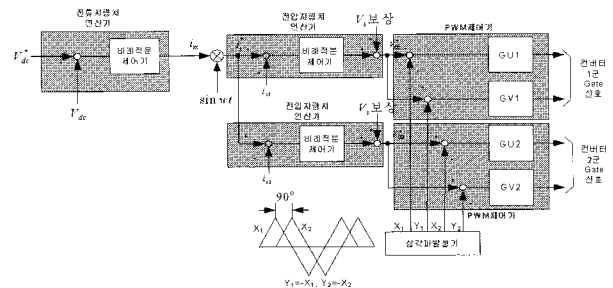


그림 4 단상 PWM 컨버터 제어 알고리즘

압 지령치를 계산한다. PWM 제어기는 컨버터 전압지령치 연산기의 출력  $V_C^*$ 를 기준전압으로 설정하고 삼각파와 비교하여 IGBT를 구동하는 게이팅 신호를 발생시킨다. 병렬로 연결된 컨버터 제어기는 가선전류의 고조파 저감을 위하여  $90^\circ$  위상차를 가지는 삼각파를 사용하여 컨버터 1군 게이트 신호와 컨버터 2군 게이트 신호에 위상 지연을 발생시킨다.

### 3.2 저주파 동기 PWM 기법

스위칭 주파수가 수 kHz로 높은 응용분야에 대한 과변조 기법은 기존에도 많은 연구가 진행되었다.<sup>(2)(3)</sup> 그러나 스위칭 주파수가 수백 Hz로 제한되어 응용되는 고속열차용 추진제어장치는 오셋 전압과 위상 오차가 발생하지 않는 저주파 동기 과변조 PWM 방법을 필요로 한다. 본 논문에서는 인버터 동작 주파수 전구간에서 공간전압벡터에 의한 단일 과변조 알고리즘을 사용하여 낮은 스위칭 주파수로 간략하게 구현할 수 있는 저주파 동기 PWM 방법을 소개한다.<sup>(4)(5)</sup> 그림 5는 저주파 동기 PWM 방법의 변조지수에 대한 스위칭 주파수 특성이다. 저주파 동기 PWM 방식은 비동기, 동기, 과변조1, 과변조2 모드를 변조지수의 크기에 따라 설정하며 최대 출력 전압을 생성하기 위하여 1펄스 모드를 사용한다. 이러한 저주파 동기 PWM 방법은 기존의 출력 전압 펄스수 변화 방식에 비하여 스위칭 주파수 절환이 존재하지 않기 때문에 스위칭 기어 현상이 발생하지 않으며 변조지수의 증가에 따른 출력 전압의 연속성과 선형성을 확보할 수 있다.

### 3.3 병렬운전 벡터제어

최근 차량의 경량화 및 견인부의 단위 체적당 출력의 증대로 견인력 제어가 점차 한계에 근접하는 경우가 빈번하다. 또한 구배 기동을 위한 역상 운전, 견인 및 제동 명령에 대한 빠른 응답 특성 요구 등 고성능의 견인력 제어기법이 필요하게 되었다. 고속열차용 추진제어장치는 이러한 요구조건을 충족하기 위해 견인력 제어기법으로 벡터 제어기법을 적용하고

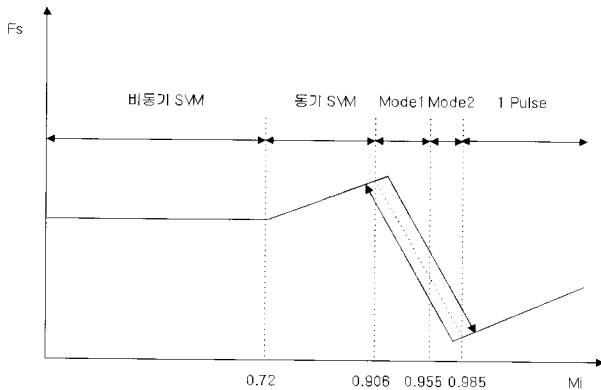


그림 5 저주파 동기 과변조 PWM 방법

있다.<sup>(5)(6)</sup> 2대의 전동기가 병렬로 운전되기 때문에 완벽한 벡터 제어를 구현하기는 어렵지만 저속에서는 병렬로 접속된 전동기의 동작점 차이가 적으므로 벡터제어 특성을 충분히 확보할 수 있다. 그림 6은 추진제어장치의 벡터 제어 블록도를 나타낸다. 주간제어기의 견인력 지령치를 동기좌표계 d, q 축 전류 지령치로 변환하고, 비례적분 전류제어와 역기전력을 보상한 d, q축 기준 전압벡터를 연산하여 저주파 동기 과변조 PWM 방법을 적용한 게이트 신호를 발생한다.

### 3.4 비트리스(Beatless) 제어

컨버터와 인버터로 이루어진 고속열차용 추진제어장치의 인버터 출력 전류의 저주파 맥동 성분은 DC-link 리플 전압

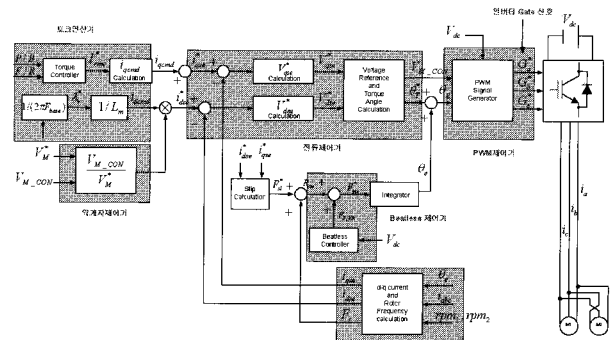


그림 6 추진제어장치 벡터제어 블록 다이어그램

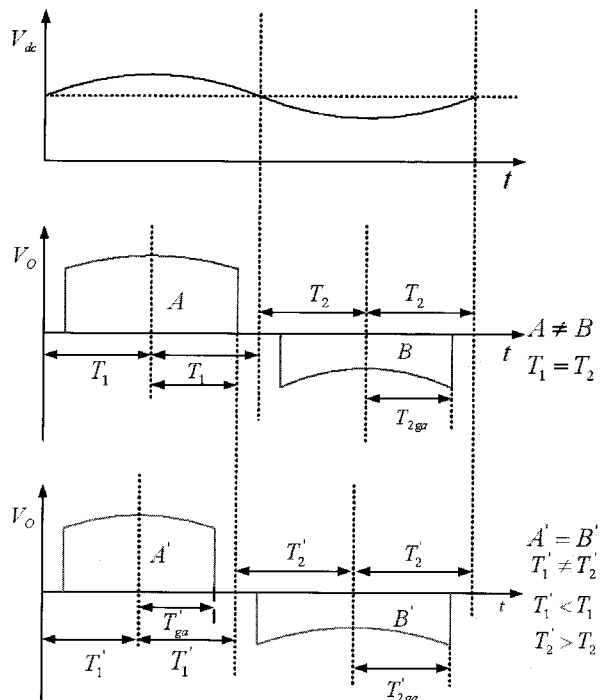


그림 7 DC-link 리플 전압과 1펄스 영역의 인버터 출력 전압

에 의해 인버터 출력전압에 기본파 성분을 제외한 저주파 출력전압이 포함되어 생기는 현상이다. 일반적인 1펄스 영역의 인버터 출력 전압은 그림 7과 같다. 인버터 출력전압의 반주기 게이팅 시간을 각각  $T_1$ 과  $T_2$ 라 하고 (+) 반주기와 (-) 반주기의 면적을 각각 A, B라 하면 비트리스 제어가 적용되지 않은 인버터의 게이팅 시간은  $T_1 = T_2$ 이다. 하지만 인버터 출력전압의 면적인 A와 B는 같지 않다. 따라서 (+) 반주기와 (-) 반주기의 출력전압이 일치하지 않는다.

그림 7에서 출력 전압 (+) 반주기와 (-) 반주기의 면적이 일치하지 않는 전압은 저주파 고조파 성분을 포함하고 있다. 따라서 인버터 출력 전압에 저주파 성분이 포함되지 않도록 인버터 출력 전압이 동작 주파수 한 주기 동안에 평형이 되도록 인버터 게이팅 각을 조절할 필요가 있다. 비트리스 제어를 수행하는 인버터는 DC-link 전압의 리플 전압의 크기와 위상을 검지하여 (+) 반주기의 리플 전압이 인가되면 게이팅 시간을 줄이고 (-) 반주기의 리플 전압이 인가되면 게이팅 시간

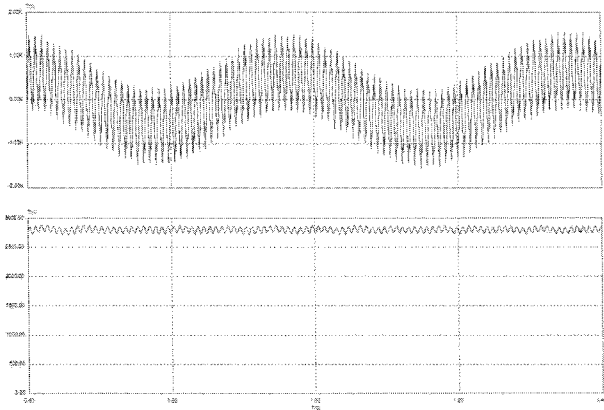
을 늘리게 된다. 이러한 비트리스 제어를 수행한 인버터 출력 전압의 게이팅 시간은 출력전압의 면적  $A'$ 과  $B'$ 을 같게 하기 위해  $T_1'$ 과  $T_2'$ 의 시간이 같지 않다. 비트리스 제어를 수행하면 출력 전압의 (+) 반주기와 (-) 반주기 면적을 같게 생성하여 전동기 입력 전압의 저주파 리플 성분을 제거하는 것이다. 그림 8은 컨버터부와 인버터부로 이루어진 추진제어장치의 인버터 출력 전류와 컨버터 DC-link 전압을 나타낸 것이다. 그림 8의 (a)는 비트리스 제어를 수행하지 않는 경우로써 인버터 출력 전류에 저주파 맥동 성분 전류가 크게 존재하는 것을 알 수 있다. 그림 8의 (b)는 비트리스 제어를 수행하는 경우로써 인버터 출력 전류에 저주파 맥동 성분 전류가 거의 존재하지 않는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

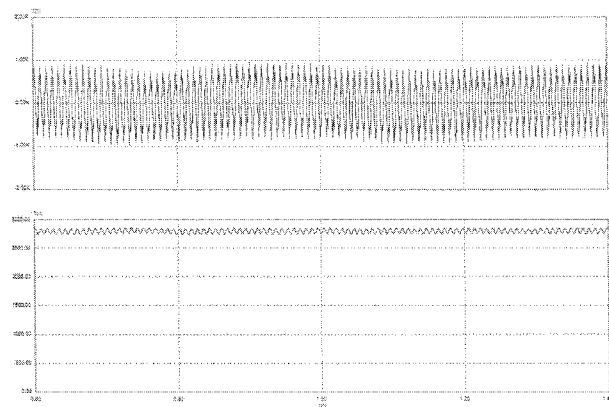
본 논문에서는 고속열차 추진제어장치의 기술동향과 활용되는 전력전자 제어 기술에 대하여 간단하게 기술하였다. 고속열차의 추진제어장치에 활용되는 전력전자 제어 기술은 단상 PWM 컨버터 제어기술, 저주파 동기 PWM 기술, 병렬운전 벡터제어기술, 비트리스 제어기술 등이 있으며, 고속열차 추진제어장치의 성능 향상을 위한 전력전자 제어기술에 대한 연구는 앞으로도 지속적으로 이루어져야 한다. 특히 실제 운행 중에 발생하는 가선전압의 변동, 레일 상태에 따른 점착계수의 변화에도 강인한 시스템 제어에 필요한 위상검지 기술 및 재점착 제어 기술 등에 관한 연구가 필요할 것이다. 국내에서는 KTX-II 고속열차의 추진제어장치 개발을 통해 관련 기술의 국산화 및 상용화가 이루어져 수입 대체 효과뿐만 아니라 향후 해외 시장 개척도 가능하게 되었다.

#### 참고 문헌

- [1] 백광선, 김석원, 최강운, "해외 고속철도 기술동향", 한국철도기술, 2001.
- [2] J. Holtz, W. Lotzat, and A. M. Khambadkone, "On Continuous Control of PWM Inverter in the Overmodulation Range Including the Six-step Mode", Trans. IEEE. on PE, Vol. 8, No.4, pp. 546-553, 1993.
- [3] 이지명, 이동춘, 최중우, "PWM 인버터의 과변조 제어 기법", Trans. KIEE, Vol. 46, No. 5, pp. 712-719, 1997. 5.
- [4] K. J. Lee, M. K. Jeong, L. S. Bang, K. D. Seo, N. H. Kim, "A Study on the High Performance PWM Technique for a Propulsion System of



(a) 비트리스 제어를 수행하지 않는 경우 (1000A/div, 500V/div)



(b) 비트리스 제어를 수행하는 경우 (1000A/div, 500V/div)

그림 8 비트리스 제어 수행 전, 후의 인버터 출력전류와 DC-link 전압

Railway”, Proceedings ICPE'98, pp. 425-430, 1998.

- [5] 정만규, 서광덕, “관성부하를 이용한 전동차 추진용 VVVF 인버터의 모의주행 및 과도상태시험”, 전력전자학회 논문지, 제4권, 제6호, pp. 491-499, 1999.
- [6] D. W. Novotny and T. A. Lipo, “Vector Control of Dynamics of AC Drives”, Oxford University Press Inc., New York, pp. 257-268.

## 〈 필 자 소 개 〉



### 조성준(趙成濬)

1974년 11월 29일생. 1997년 고려대 제어계측 공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원.



### 정만규(鄭萬圭)

1967년 3월 1일생. 1990년 건국대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년~현재 현대중공업 기계전기연구소 책임연구원.



### 김두식(金斗植)

1961년 3월 23일생. 1985년 영남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~현재 현대중공업 기계전기연구소 수석연구원.