

**특집 : 전기 추진 시스템(II) - 전기철도**

# 전기철도차량용 주 전력변환장치(추진제어장치)의 이해

정은성

(현대로템 기술연구소 책임연구원)

현대로템은 전기철도차량의 핵심장치인 주 전력변환장치(추진제어장치) 국산화 및 기술개발에 매진하여 왔으며, 성능 및 신뢰성 향상을 위하여 지속적으로 기술개발을 진행하고 있다. 또한 전력전자기술 및 산업기술 발전으로 인한 전기기기, 전력반도체, 제어기술 발전으로 전기철도차량용 주 전력변환장치(추진제어장치)도 비약적인 발전을 하였다. 이런 산업전반에 걸친 기술발전을 기반으로 현대로템은 전기철도차량용 주 전력변환장치의 원천기술 확보하면서 전기철도차량 시스템 기술 발전에 기여하고 있다.

본지에서는 전기철도차량의 핵심장치인 주 전력변환장치에 대한 이해를 돕고자 최근 전동차에 적용되고 있는 유도전동기용 주 전력변환장치인 추진제어장치를 소개하고자 한다.

## 1. 서론

주 변환장치는 견인전동기의 전원을 제어하여 전동차의 견인력을 발생시키는 장치이며, 초기 전기철도차량에는 직류 전동기가 사용되었는데, 반도체 소자의 발달하지 않은 70년대는 저항제어방식이 주류를 이루었다. 점차 반도체 소자가 발달하면서 80년대에 이르러 초퍼제어 시스템이 추진제어장치에 적용되었고, 에너지 절감과 승차감 향상이라는 철도차량발전에 진일보한 성과를 이루었다. 그러나, 직류전동기를 견인전동기로 사용함으로 발생하는 유지, 보수 비용과 시스템의 불안정등 문제점은 여전히 남아 있었다. 80년대 말 고전압, 대용량급의 역도통 GTO Thyristor소자의 개발과 VVVF 인버터 제어방식의 적용으로 철도차량에 유도전동기의 사용이 가능하게 되어 GTO VVVF 인버터가 철

도차량의 추진제어장치를 선도하게 되었다. 90년대 반도체 소자의 발달로 고속 스위칭이 가능한 IGBT가 개발되면서 기존 소자의 대체품으로 주목을 받게 되었다. 전압구동 소자인 IGBT는 게이트 구동회로가 간단하고 빠른 스위칭에 의한 필터의 소형화와 저소음화로 시스템의 안정성 향상, 소형경량화, 승차감 향상등의 이점이 있었지만 대용량화에 어려움이 있어 철도차량에 사용되지 못했는데, 90년대 후반 이후 대용량 IGBT가 개발되면서 추진제어장치에 적용 되었다.<sup>(1)</sup>

또한, 근래에는 주로 소용량의 IGBT에 드라이브 회로 및 각종 보호 기능을 포함하는 IPM (Intelligent Power Module)을 대용량의 IGBT에도 적용한 HVIPM(High Voltage Intelligent Power Module)이 개발되어 보편화 되고 있는 단계로 이러한 기반 기술의 발전으로 철도차량 구동을 위한 추진제어장치에서도 HVIPM을 적용하는 추세에 있으며<sup>(2)</sup> 이러한 전력반도체를 적용함으로써 회로의 구성을 단순화하여 사이즈를 줄이고 안정성 및 경제성을 갖춘 추진시스템의 개발이 가능해 졌다.

표 1 추진제어장치의 국내의 기술 동향

	70년대	80년대	90년대	2000년대	2010년대
직류 전동기	저항제어				
		초퍼 제어			
유도 전동기			GTO VVVF		
				IGBT VVVF	

## 2. 추진제어장치 구성

주 회로를 구성하는 방식은 각각의 전인전동기를 제어하는 개별제어방식과 전인전동기를 병렬로 연결하여 제어하는 집중제어방식이 있다. 집중제어방식은 제어 측면에서 볼 때 제어와 안정성 면에서 개별제어방식보다 불리하나, 회로 구성이 간단하고 중량 및 부피를 감소할 수 있으며 경제성과 유지보수가 뛰어난 장점이 있기 때문에 국내에서는 대부분 집중제어방식을 사용하고 있다. 또한, 가선전압(추진제어장치 입력전압)에 따라 AC 추진제어장치(Converter/Inverter, C/I)와 DC 추진제어장치(VVVF Inverter)로 분류되어 진다.

### 2.1 AC 추진제어장치 (Conveter/Inverter,C/I)

그림 1, 표 2은 국내 전동차에 적용되고 있는 일반적인 AC

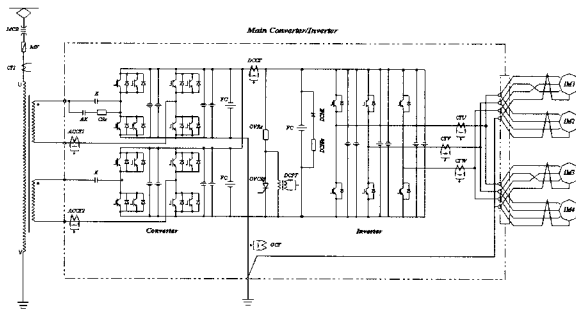


그림 1 추진제어장치(C/I)의 주 회로도

표 2 추진제어장치(C/I)의 사양

구분	성능	
가선 전압	AC 25kV(20.0kV~27.5kV), 60Hz	
제어 방식	전압형 PWM 제어	
제어 전압	DC 100V(70V~110V)	
컨버터 Part	입력전압	AC 840V×2회로
	연속출력	DC 1,800V 1,150kW
	최대출력	DC 1,800V 1,350kW이상
인버터 Part	연속출력	AC 0~1,370V 1,100KVA
	최대출력	AC 0~1,370V 1,500KVA이상
	출력주파수	0~183 Hz
냉각방식	자연냉각방식(Heat-pipe부)	
효율	95% 이상	

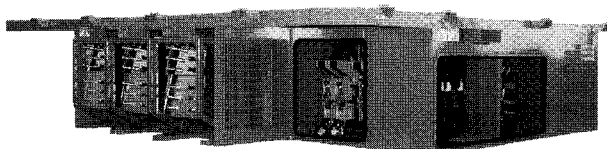


그림 2 추진제어시스템(C/I)의 외형

추진제어장치의 전체 시스템의 회로 구성 및 사양이다. 가선 전압의 차단 투입 기능을 하는 컨택터(K, AK), 단상 교류를 직류 1,800V로 변환하는 2병렬 PWM 컨버터부, DC-Link 부, 과전압 보호회로인 OVCRf, VVVF 제어를 담당하는 PWM inverter 부로 구성되어 있으며 그 외 전체 추진시스템을 제어하는 Control unit과 계전기의 동작을 담당하는 Relay unit, Power supply unit 등이 있다. 여기서, 컨버터의 Boost에 필요한 입력측 리액터는 시스템의 부피 및 중량을 고려해 입력 변압기 내부의 누설 임피던스 형태로 포함시켰다.

### 2.2 DC 추진제어장치 ( VVVF Inverter)

DC 추진제어장치의 전체 시스템의 회로 구성 그림 3과 같으며, 주회로의 고전압 장치는 그림 3과와 같이 집전장치인 판토그래프, 낙뢰등 서지전압에 대하여 시스템을 보호하기

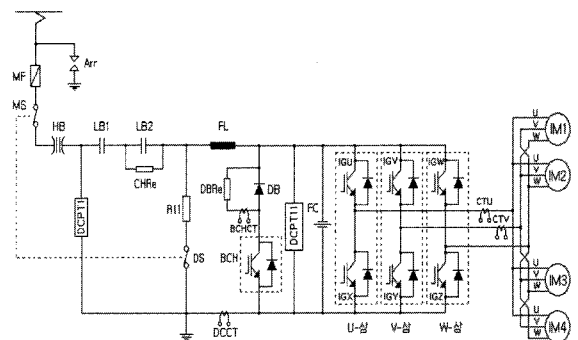


그림 3 DC 추진제어시스템(VVVF Inverter)의 주회로

표 3 추진제어장치(VVVF Inverter)의 사양

구분	성능
가선 전압	DC 1500V(1000V~1800V)
제어 방식	전압형 PWM 제어
제어 전압	DC 100V(70V~110V)
연속출력	AC 0~1,100V 1,100KVA
최대출력	AC 0~1,100V 1,640KVA
출력주파수	0~180 Hz
냉각방식	자연냉각방식(Heat-pipe부)
제어용량	210 kW×4
효율	97%

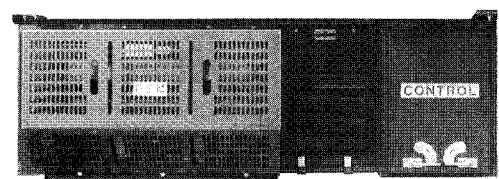


그림 4 DC 추진제어시스템(VVVF Inverter)의 외형

위한 직류 피뢰기, 단락사고를 방지하기 위한 선로 퓨즈, 유지 보수시 고압을 분리하기 위한 주회로 분리기, 과전류 보호를 위한 고속 차단기 (HSCB), 주회로 차단기(LB), 필터리액터 및 제동저항기가 별도의 장치로 구성되어 있으며, 추진 인버터는 DC-Link부인 Filter Capacitor, 회생시 과전압 보호회로인 Dynamic Brake Chopper부, VVVF 제어를 담당하는 PWM inverter 부로 구성되어 있다.

### 3. 전력 반도체 소자 및 Stack(냉각기) 설계

추진제어장치의 용량을 산정하기 위해 TPS(Train Performance Simulation)를 통해 추진제어장치, 견인전동기의 정격 및 최대용량을 산정하고 이를 통해 전력반도체 소자 및 주 회로를 구성하는 기기의 용량을 산정한다.

#### 3.1 전력 반도체 소자

서론에서 언급한 바와 같이 추진제어장치에 적용된 전력 반도체 소자는 90년대 초에는 GTO가 사용되었으나 전류형 소자이기 때문에 스위칭 주파수가 낮고 게이트 구동회로가 복잡하며 별도의 스너버 회로를 구성해야 하는 단점이 있다. 반도체 소자의 발달로 전압형 소자인 IGBT가 개발되면서 기존 소자 대체품으로 주목받게 되었고 90년대 후반부터는 대용량 IGBT를 채용한 시스템이 적용되고 있다.

최근에는 IGBT 소자의 특성을 그대로 유지하면서 구동회로와 센싱부, 보호회로가 내장된 3,300V, 1,200A IPM 소자<sup>[2]</sup>

표 4 스위칭 소자의 비교

구분	GTO	IGBT	IPM
Type	5SGF40L4502	CM1200HC-66H	PM1200HCE330
형상			
정격	4,500V/4,000A	3,300V/1,200A	3,300V/1,200A
소자구성	자기소호형 Thyristor	FET+Transistor	FET+Transistor + 구동회로
스위칭 주파수	Max. 500 Hz	Max. 2 kHz	좌동
보호기능	없음	없음	OC, OT, UV
병렬접속	복잡	간단	간단
스위칭/도통손실	높음/낮음	낮음/높음	좌동
취부방식	복잡 (Press type)	간단 (Module type)	좌동
구조/중량	복잡/중량	간단/경량	좌동

를 사용하여 시스템을 구성하고 있다.

추진제어장치에 사용되는 반도체 소자에 대한 전반적인 비교를 표 4에 나타내었다.

#### 3.2 Stack(냉각기) 설계

Stack 설계를 위한 스위칭 소자 발열량 계산은 전력 반도체 소자 도통손실 및 스위칭 손실, 다이오드 도통 손실 및 스위칭 손실로 구분된다. 손실 계산에 사용되는 수식은 IGBT(IPM)과 다이오드의 시간에 따른 스위칭과 도통상태에 따라 계산되어야 하나, 실제로 소자 메이커에서 제공하는 데이터를 적용한 계산식은 식 (1)~(4)와 같다. 여기서,  $P_{IC}$ 와  $P_{IS}$ 는 각각 IGBT(IPM) 소자의 도통 손실과 스위칭 손실이며,  $P_{DC}$ 와  $P_{DS}$ 는 환류 다이오드의 도통 손실과 스위칭 손실이다.

$$P_{IC} = I_{MP} \cdot V_{CE(sat)} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cdot \cos\theta \right) \quad (1)$$

$$P_{IS} = (E_{ON} + E_{OFF}) \cdot f_{sw} \cdot \frac{1}{\pi} \quad (2)$$

$$P_{DC} = I_{MP} \cdot V_F \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{M}{3\pi} \cdot \cos\theta \right) \quad (3)$$

$$P_{DS} = \frac{1}{8} \cdot I_{rr} \cdot t_{rr} \cdot V_{CE(peak)} \cdot f_{sw} \quad (4)$$

여기서,  $I_{MP}$ 는 입력(출력) 최대 전류,  $V_{CE(sat)}$ 는 IPM(IGBT)의 C-E간 포화전압,  $M$ 은 변조지수,  $\cos\theta$ 는 역률,  $E_{ON}$ ,  $E_{OFF}$ 는  $I_{MP}$ 에서의 턴-온, 턴-오프 손실,  $f_{sw}$ 는 스위칭 주파수,  $V_F$ 는  $I_{MP}$ 에서 다이오드의 순방향 전압,  $I_{rr}$ 는 다이오드 역회복 전류,  $t_{rr}$ 는 다이오드 역 회복 시간이다.

또한, 추진제어장치는 전동차의 운행 패턴에 따라 전압, 전류, 주파수가 변하기 때문에 전동차 운행 성능의 최악 상태를 고려한 주행 패턴에 의해 설계하여야 한다. 그림 5는 특정 노선의 주행 패턴을 나타내며, 이런 노선별 주행패턴을 이용하

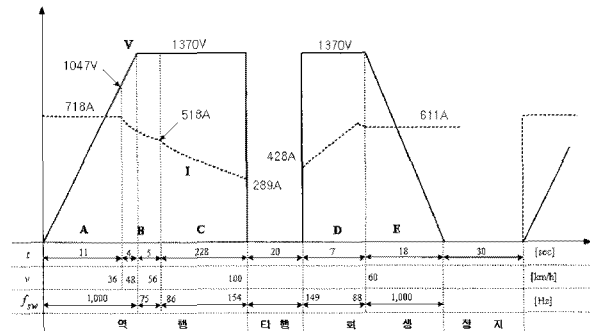


그림 5 추진제어장치 주행 패턴

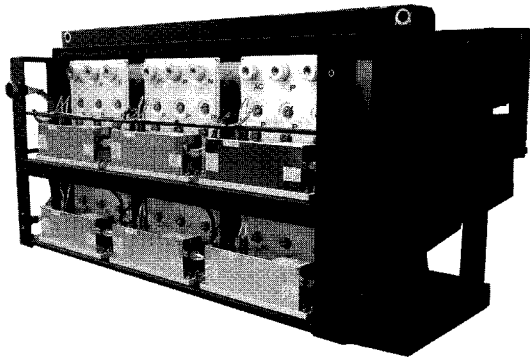


그림 6 추진제어장치 스택의 사진(전동차용)

여 IGBT(IPM)와 다이오드의 도통 손실 및 스위칭 손실은 식 (1)~(4)을 반복 적용하여 발열량을 계산하여 냉각기 용량을 선정한다.

#### 4. 추진제어장치 제어

유도전동기를 사용하는 대부분의 전동차 구동시스템은 스칼라 제어방식인 V/F 제어방식을 사용하였으나 이 경우 빠른 토크 응답 특성을 얻을 수 없어 저속일수록 구동특성이 저하되고 구배에서 기동시 특성이 나쁘다<sup>(4)(5)</sup>. 반면, 벡터제어는 저속 및 고속영역에까지 빠른 순시 토크제어가 가능<sup>(6)</sup>하여 빠르고 정밀한 재점착 제어가 가능하지만 철도 차량용 구동 시스템은 DC-Link단의 전압 이용률을 최대로 하기 위해 고속 운전영역에서는 6-스텝 PWM 방법인 1-펄스 모드를 사용한다<sup>(6)</sup>. 1-펄스 모드를 사용하면 출력 전압의 크기는 DC-Link 단의 전압에 의해서 결정되므로 순시적으로 전압의 크기와 위상을 제어해야 하는 벡터제어기법을 적용할 수 없다.

일반적으로 점착력을 효과적으로 이용하게 하고, DC link 전압을 충분히 이용할 수 있도록 그림 7과 같이 두 가지 제어 방법을 병용하는 제어기법을 적용<sup>(8)</sup> 한다.

제어방법은 회전자 자속각을 얻기 위해 전류 모델과 전압 모델을 결합한 자속 추정 방법을 사용하는 직접벡터제어를 적용하고 있으며 제어 블럭도는 그림 8과 같다. 저속에서는 회전자 전류 모델로부터 추정된 자속이 선정되며 고속에서는 전압 모델로부터 추정된 자속이 선정되도록 한다. 전류제어를 위해서는 역기전력을 전향보상한 동기 좌표계 PI 전류제어기와 공간전압벡터 PWM 기법을 사용하였다. 벡터제어에서 슬립 주파수제어로 제어 방법을 바꿀 때에 출력변수 변경으로 인한 과도현상 없이 부드럽게 전환될 수 있도록 그림 8에서와 같이 차원 일치(Dimension Matching)블록에서 이를 고려하여 전류제어기의 출력인 d와 q축 전압  $V_{ds}^{e*}$ ,  $V_{qs}^{e*}$  을 전압의 크기  $V_{mag}$ 와 주파수  $\omega_e$ 로 변환한다.<sup>(3)</sup>

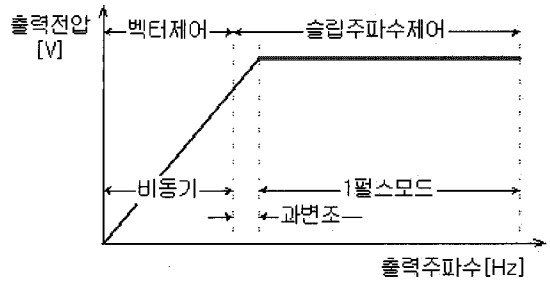


그림 7 벡터제어와 스칼라 제어의 병용

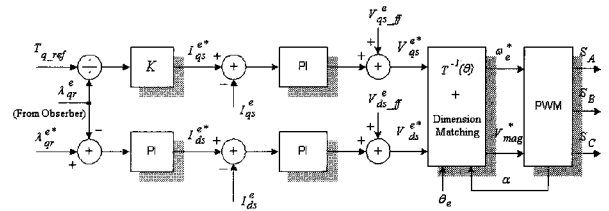


그림 8 벡터제어의 블럭도

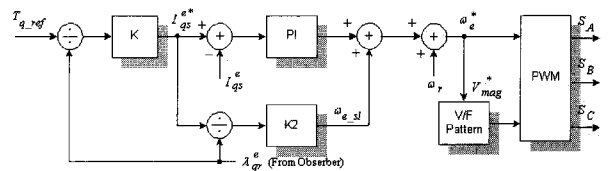


그림 9 슬립 주파수제어의 블럭도

그림 9는 슬립 주파수 제어를 위한 블럭도이며, 슬립 주파수 제어에서 사용되는 변수들은 벡터 제어와 동일한 차원(Dimension)에서 처리하기 위해 d-q축 변수로 설정되었다. 그림 9와 같이 PI제어에 의해 주파수가 결정되면 기준 전압  $V_{mag}^*$ 는 V/F 패턴에 의해 결정된다. 여기서, V/F 패턴은 자속의 크기를 결정하므로 벡터제어에서 사용된 자속수준과 일치하도록 결정해야 제어기법 변동시 자속 변동으로 인한 과도현상을 줄일 수 있다.

#### 5. 결론

추진제어장치의 이해를 돕고자 전동차용 추진제어장치의 구성, 주요부품인 냉각기 및 전기 철도 차량용 제어방식에 대하여 간단하게 기술하였으며, 추진제어장치는 전력 반도체 소자의 발전과 더불어 발전하여 왔으며, 최근에는 고압대용량 IGBT(4500V/1000A, 6500V/750A)도 개발되어 고속전철이나 기관차용 대용량 추진제어장치에도 IGBT가 널리 사용되고 있다.

## 참고 문헌

- [1] 정만규, 방이석, "차량추진제어장치에 응용되는 전력전자 및 제어기술" 전력전자학회지, 제8권, 제1호, pp. 14-19, 2003.
- [2] "PM1200HCE330-1, High Voltage Intelligent Power Module Specification", Data sheet, Mitsubishi Electric.
- [3] 김태운, 노애숙, 황광철, 최종묵, "IPM 스위칭 소자를 적용한 AC 전동차 추진제어장치", 전력전자학회논문지, 제10권 제3호 2005.6, page(s): 233-240
- [4] Takamasa Kanzaki, Ikuo Yasuoka and Gorge Yamamoto, "Direct Digital Controlled PWM GTO Inverter for DC 1500V Electric Cars", in proc. IPEC-Tokyo. pp. 1587-1598, 1983.
- [5] Mikio Ohta, Atsushi KAGA, Mitsuo Muneyuki and Eiji Akagawa, "AC Propulsion System for Kumamoto Municipal Transportation Bureau.", in proc. IPEC-Tokyo. pp. 1575-1586, 1983.
- [6] D.W. Novotny and T.A. Lipo, "Vector control and Dynamics of AC Drives", New York Oxford University Press., ch. 7, 1996.
- [7] Yoske Nakazawa, Shin-Ichi Toda, Ikuo Yasuoka and Haruo Naito., "One-Pulse PWM Mode Vector Control for Traction Drives", Power Electronics in transportation. IEEE, pp. 135-141, 1996.
- [8] 김상훈, 배본호, 설승기, "벡터제어를 적용한 전동차 구동 시스템 개발", 전력전자학회논문지, 제6권, 제2호, pp. 125-131, 2001.

## 〈 필 자 소 개 〉

**정은성(鄭銀盛)**

1970년 3월 12일생. 1994년 명지대 공과대학 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 현대로템 기술연구소 책임연구원.