

# 전동차 인버터 시스템의 최근 기술동향

원충연\*, 박현준\*\*, 김길동\*\*\*

(\*성균관대 공대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수, \*\*한국철도 기술연구원 책임연구원,

\*\*\*한국철도 기술연구원 선임연구원)

## 1. 서론

최근 산업발달과 생활범위의 확대로 운송 시스템에 대한 수요는 급격히 증대되고 있다. 그러나 물류 이동에 필요한 여러 가지 제반 시설은 이를 충족시키지 못하고 있으며, 이로 인하여 현재 국내의 물류수송효율은 최악의 상황에 직면하여 있다. 이로써 대용량의 수송능력을 담당하는 철도 차량 운송 시스템에 대한 수요가 급증하게 되었다. 따라서 이에 대비하고자 많은 신규 노선을 계획하고 증설 중에 있다.

이와 함께 신설되는 노선에 대해서는 시스템 운영 효율의 극대화를 위해 노선별로 고속 전철과 지하철, 경량 전철, 경전철, 그리고 자기 부상 열차 시스템등 여러 가지 방식으로 적용이 검토 중에 있다. 이러한 전동 차량의 수요 증대는 궁극적으로 그와 관련된 기술 발전이 필수적이다.

그러나 현재 국내에서는 이러한 핵심 전장 부품들에 대한 연구가 업계, 학계 그리고 연구 기관 등에서 산발적으로 이루어져 전체 시스템을 만들기에는 기술 자립 도가 부족한 실정이다. 따라서 현재 국내 각 호선에서 사용되고 있는 핵심 전장품들은 대부분 수입에 의존하고 있다[1].

이에 한국 철도 기술 연구원에서 추진하고 있는 핵심 전장품중 추진 제어장치와 종합 제어장치의 표준화 개발 연구는 학계와 업계 등을 총괄하여 전장품의 표준화 개발 연구를 진행하고 있어 핵심전장품에 대한 국내의 기술자립도를 높일 수 있을 것으로 생각된다[2].

추진 제어장치에 있어서 저항 제어 방식, 초퍼 제어 방식으로부터 가변 주파수 가변 전압(VVVF) 인버터 시스템이 적용되기까지 10년이 경과하였다. 그동안 사용된 마이크로 프로세서는 8bit CPU에서 32bit CPU로, GTO 사이리스터 소자는 2500V~4500V로, IGBT소자는 2500V~3300V로 변화되었다. 실용화의 단계의 10년이 경과한 현재 인버터 제어 전동차는 보편적으로 안정기에 돌입하였다고 생각된다.

유도 전동기는 구조가 간단하고 견고하기 때문에 유지보수가 쉽고 전력 회생 제동도 공급함으로써 에너지 손실이 적은 장점을 가지고 있다. 일반적으로 주회로 시스템은 대

용량 GTO 사이리스터 소자를 사용한 VVVF 제어방식으로 1개의 인버터로 4개 또는 8개의 유도전동기를 일괄 제어하는 방식이 일반적이다. 반면에 1대의 인버터로 1개의 모터를 제어하는 개별 제어 방식도 일부 실용화되고 있다.

언급한 바와 같이 전력용 반도체 소자가 점점 고성능화, 고속스위칭화 되면서 소자에서 발열량이 높아지고 작은 면적에서 다량의 발열량을 처리하여야 하는 문제가 발생되었다. 또한 전기장치의 소형, 경량화와 관련되어 냉각장치가 차지하는 비중이 점점 커지면서 소형, 경량이면서도 냉각 효과가 큰 장치가 요구되고 있다.

본 전동차 인버터 시스템의 기술 동향에서는 주회로 방식에 대한 검토 및 반도체 소자의 동향과 냉각 기술에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 추진 제어장치의 최근 기술 동향과 전망

종래 직류 전동기 전동차의 대표적인 구동 방식은 제어 방식에 따라 저항 제어 방식, 초퍼 제어 방식이 있다. 건인 직류 전동기는 높은 견인력과 속도 특성이 요구되며 이 특성에 적합하도록 제어하기 위해서는 건인 전동기 특성에 따라 다양한 제어 시스템이 사용되어 왔다.

직류 전동기는 전압·전류제어에 의한 높은 기동 토크로 제어가 가능하므로 차량 운행에 필요한 견인력은 물론 속도 제어가 용이하였다. 그러나, 반도체 소자의 발달이 늦어 70년대 차량 속도 제어 방식은 저항을 이용한 저항 제어 방식이 주류를 이루어 왔다.

80년대의 초퍼제어시스템은 에너지 절감과 승차감 향상이라는 차량 기술 측면에서 진일보한 시대였음에는 틀림없으나 차량용 견인 장치가 직류 전동기였기 때문에 정류에 필요한 부품 등의 사후 관리비용, Flash over 등에 의한 시스템 안정에 많은 문제점을 가지고 있었다.

그러나 80년대 말부터 고전압, 대용량급의 역도동 GTO Thyristor소자가 개발되면서 유도 전동기를 전동차에 사용

할 수 있게 되었으며, 90년대 초부터 우리 나라에도 지하철 전동차에 대량으로 유도 전동기가 적용되기 시작하였다. 유도 전동기는 정류자가 없어 유지 보수가 거의 필요 없고 같은 용량의 전동기라 해도 훨씬 가벼운 장점을 가지고 있다. 그러나 유도 전동기는 직류 전동기에 비해 기동토크가 작아 사용에 어려움이 있었다.

표 1은 국내의 자동차 기술 사양 중에서 가선 공급 전압, 견인 제어 및 구동장치를 요약 하였다.

표 1. 전동차 기술 동향

구분	현 황
견인제어 및 구동장치	<b>1. 제어/구동 시스템</b> · 저항 제어 장치 - 직류 전동기 : 서울 1호선, 철도청 1호선 · 효과 제어 장치 - 직류 전동기 : 서울 2,3호선, 부산 1호선 · VVVF인버터장치-유도 전동기 : 서울 5호선, 과천선, 일산선
	<b>2. 출력용량(제어용량 - T/M)</b> · 970KVA - T/M 200KW AC : 철도청 과천선 · 991KVA - T/M 200KW AC : 일산선 · 1,100KVA - T/M 200KW AC : 서울 5호선 · 600KWV - T/M 150KW AC : 서울 3, 4호선
	<b>3. 냉각 방식</b> · 강제 냉각방식 : 서울 5호선 · 자연 냉각방식 : 과천선, 일산선
가선공급 전압	· 직류(1,500VDC)방식 - 서울 2, 3, 4, 5호선, 일산선, 부산, 대구, 인천 · 직교류(1,500VDC/25,000VAC결함)방식 - 철도청 1호선, 과천선, 분당선

우리 나라의 전동차 제어 방식은 고전압, 대용량 역도통 GTO 사이리스터를 사용한 VVVF인버터 제어 시스템의 일괄 제어 방식(IC4M)이 사용되고 있다.

그러나 최근 반도체 기술(Power Electronics and Micro Electronics) 발달에 따라 고속스위칭이 가능한 IGBT소자는 전압 구동형이므로 게이트 구동장치가 간단하며 게이트 구동 전력도 작아 GTO인버터에 비해 크기 및 중량을 크게 줄일 수 있다. 또한 고속 스위칭제어가 가능하여 토크 맥동 및 출력 파형의 정현화가 가능하다. 이에 따라, 시스템 안정성 향상, 승차감 향상, 저 비용, 무보수화, 소형 경량화 및 고성능화 등에 대한 요구를 IGBT소자를 사용한 일괄 제어 및 개별 제어 방식을 이용하여 실현 가능하게 되었다.

2.1 일괄 제어 방식

기존의 일괄 제어 방식은 1개의 인버터로 4개의 견인 전

동기 또는 8개의 견인 전동기를 병렬로 연결하여 제어하는 방식이다. 이 방식은 고전압·대용량 GTO 사이리스터소자(4500V, 3000A)를 사용하여 인버터 주회로를 구성하여 주전동기 4개를 일괄로 제어하는 방식이다.

최근에 대전력변환장치에 사용되는 GTO 사이리스터는 고내압, 대전류 특성을 가지고 있으므로 주회로 구성이 간단해지는 장점을 가지고 있다. 단점은 대전류를 off하기 위해서는 게이트 구동 전류가 커야 하며 off시간 지연으로 발생 손실이 커서 냉각장치의 용량과 인버터장치의 크기 및 중량이 증가한다. 그리고 낮은 스위칭(400Hz) 속도로 인해 고성능 제어에 한계가 있으며, 인버터 출력 전류에 고조파를 함유하게 되어 토크 맥동이 발생된다는 점등이다.

그러나 최근의 고내압·대용량 IGBT(3300V,1200A)의 실용화에 따라서 국내 도시 철도 차량의 구동용 인버터에 한층 고성능화가 추진되고 있다.

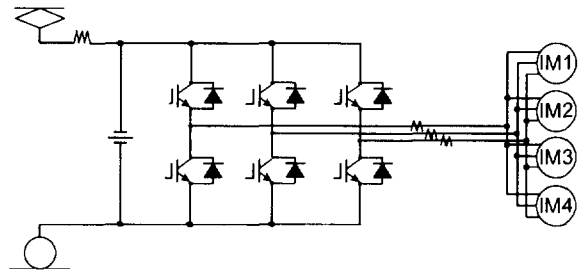


그림 1. IGBT 일괄제어방식 VVVF 인버터 주회로도

그림1의 IGBT를 사용한 일괄 제어 방식 인버터 구동 시스템은 구조적 소형 경량화를 가속화 할 수있고, 회생 효율 및 재점착 특성을 한층 향상 시킬 수 있다.

2.2 개별 제어 방식

개별 제어 방식은 1개의 인버터로 1개의 견인 전동기를 제어하는 방식이다. 이 방식은 인버터 용량이 기존 용량의 1/4로 감소할 수 있기 때문에 고속 스위칭 제어가 가능한 IGBT소자를 이용하여 제어할 수 있다.

주회로 구성은 전력용 반도체 소자의 발달로 그림2의 IGBT소자를 사용한 제어가 가능하게 되었다.

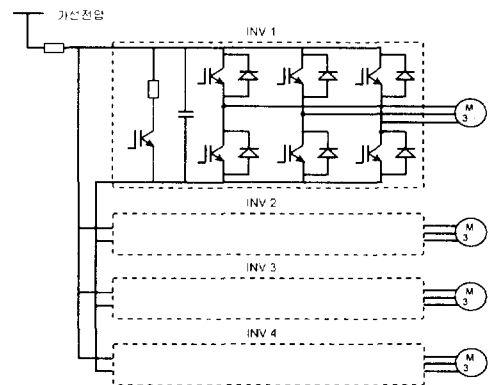


그림 2. 개별 제어 방식 VVVF 주회로도

제어 방식을 살펴보면 인버터가 개별적으로 전인 전동기 제어하기 때문에 전동기에서 발생한 공전이 다른 전동기 축에 영향을 미치지 않아 우수한 재점착제어가 가능하다.

또한 각각의 인버터를 독립적으로 제어하기 때문에 고정밀도 토오크 제어가 가능하고 한 대의 인버터 고장 발생 시에도 고장난 인버터만 off하고 운전할 수 있으므로 차량 시스템 안정성 측면에서 일괄 제어에 비해 우수한 성능을 발휘할 수 있다.

그러나 개별 제어 방식은 소자의 수가 많아 부피 및 중량이 증가하고 유지 보수비가 증가 할 수 있고, 일괄 제어에 비해 가격 상승이 될 수 있는 문제가 있다.

### 3. 전력용 반도체 소자

전력용 반도체 소자는 각종 전력 전자 시스템에 응용되어 수W에서 수백MW에 이르는 광범위한 전력을 변환하는 스위칭 소자이다.

근래 대전력 변환 장치에 사용되는 GTO 사이리스터는 고내압 대전류 특성을 가지고 있으므로 주회로 구성이 간단해지는 장점을 가지고 있으나 대전류를 off 하기 위해서는 게이트 구동 전류가 커야 하고 off 시간 지연으로 인한 발생 손실이 커서 냉각장치의 용량이 증가하고 낮은 스위칭 속도로 인한 인버터 출력 전류에 많은 고조파를 함유하게 되고 또한 소음 및 토오크 맥동이 발생하게 된다.

이러한 이유로 인해 전압 구동이며 고속 스위칭이 가능한 IGBT등 MOS게이트 소자가 기존의 소자를 대체할 수 있는 새로운 소자로 주목받고 있다. 특히 IGBT 소자의 기술 발달로 인해 고압 고전류 및 주파수 특성이 우수한 제품이 개발되어 차량용 GTO를 많이 대체할 것으로 예상된다. 전력용 반도체 소자 GTO와 IGBT의 장단점을 비교하며 표2와 같다. GTO 사용의 경우 스너버로서 소자에 직렬로 인덕터, 병렬로 커패시터를 필요로 하는 등 복잡한 스너버 회로를 필요로 하며 또한 이 스너버 회로에서 소비되는 전력도 매우 크다. 하지만 IGBT의 경우 GTO와 비교시 스너버 회로가 거의 무시될 수 있을 정도이다.

또한 게이트 구동 방식이 GTO의 전류 구동에 비해 IGBT는 전압 구동이므로 게이트 드라이브가 간단하며 게이트의 구동 전력도 훨씬 적다. IGBT는 절연이 되어 있어 소자와 냉각장치 사이의 절연을 고려할 필요가 없는 등 상대적으로 Compact한 Stack구성이 가능하다. IGBT는 GTO에 비해 고속 스위칭이 가능하며 전동기의 입력 전류의 파형에 고조파 전류가 적어 고조파에 의한 손실, 소음 및 진동 등의 제어 성능의 향상이 기대된다.

최근 들어 3,300V, 1,200A IGBT소자가 상용화됨에 따라 일괄 제어 인버터 시스템뿐만 아니라 우리 나라에 주류를 이루고 있는 일괄 제어 인버터 시스템도 IGBT 소자를 사용하여 고성능 및 Compact한 인버터 Stack으로 대체될 것으로 전망된다.

표 2. 전력용 반도체 비교(IGBT/GTO)

스너버 회로	필요없다	di/dt, dv/dt 스너버회로 필요
스위칭 주파수	높다(0~2kHz)	낮다(0~500kHz)
스위칭 손실	적다	크다
냉각장치	작다	크다
전압	중간	높다
전류	중간	높다
Gate drive	간단	복잡
구동 방식	전압 구동	전류 구동
게이트 구동전력	낮다	높다
크기	적다(모듈화)	크다

### 4. 2-Level/3-Level 제어 방식 비교

기존의 전동 차량은 대부분 GTO를 사용한 2-레벨 인버터 방식을 사용하여 왔으나 고속 스위칭에 따른 고성능 제어가 가능한 3-레벨 IGBT 인버터 방식이 일본의 경우에 일부 사용되고 있다. 3-레벨 방식으로 제어를 하면 인버터 출력 전류가 정현파에 가깝고 고속 스위칭에 따른 고조파 억제와 소음 저감 효과가 있으므로 전류 파형 개선으로 인한 토오크 맥동을 줄일 수 있다.

3-레벨 인버터 방식은 스위칭 소자의 차단 전압이 DC링크 전압의 절반이므로 스위칭 소자의 전압 내량을 반으로 줄일 수 있어 IGBT의 적용이 가능하고 출력 전압의 고조파 성분은 같은 스위칭 주파수에서 2-레벨에 비해 반정도 밖에 되지 않는 장점들이 있다.

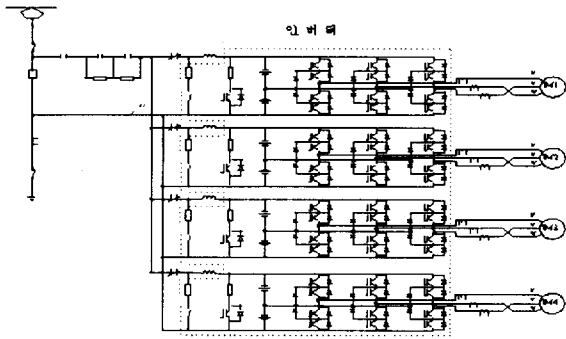
그림 3은 2-레벨 인버터 및 3-레벨 인버터의 전력 회로를 나타낸 것이다. 2-레벨의 경우 한 상에 GTO소자 두개가 직렬로 접속되어 있고 소자의 보호를 목적으로 역병렬 다이오드로 구성되어 있다.

3-레벨의 경우 한 상에 4개의 IGBT 전력 소자가 직렬로 연결되어 있고 프리휠링을 위한 역병렬 다이오드와 중성점 전압을 출력하기 위한 클램프 다이오드 2개로 구성되어 있다.

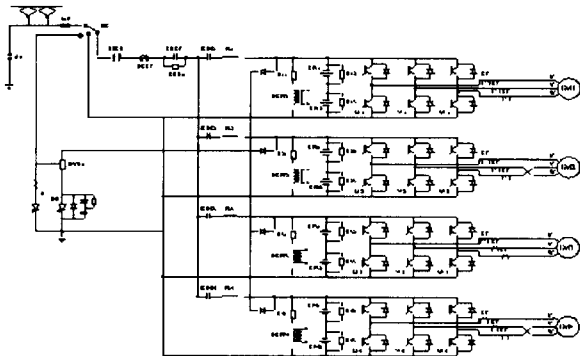
### 5. 냉각 방식[3]

전력 변환 장치는 전력용 반도체 소자와 제어기기의 급속한 발전으로 실용화가 이루어 졌다.

전력 변환을 위한 스위칭시 전력 소자에서 발생하는 열손실을 줄이고 또한 이 발생열을 냉각시켜 과온에 의한 전력용 반도체 소자의 파손이나 오동작을 막기 위한 냉각장치가 절대적으로 필요하다.



(b) 3-레벨 인버터



(a) 2-레벨 인버터

그림 3. 개별 제어 인버터 주회로 방식

이 냉각장치를 구성하기 위해서는 인버터 제어시 발생되는 스위칭 손실에 따른 발열량 계산과 기타 주변 요소에 따라 발생하는 열을 정확히 해석하여 설계되어야 한다.

즉 인버터의 전력 용 반도체 소자 스위칭 동작에 의한 발열량, 이때의 IGBT 소자의 열저항, 열시정수 및 운전 조건에 대한 정상 운전, 특수 운행에 따른 열시정수 패턴 등을 고려한 냉각 설계 조건을 만족하여야 한다.

냉각장치를 구성시에는 다음과 같은 사항을 고려해서 IGBT 모듈이 구성되어야 한다.

- 냉각 효율의 극대화
- 경량화
- 소자 파손시 검수 및 보수 용이성
- 소자 배열시 회로의 인덕턴스 최소화
- 소자 접촉부 표면 가공도 및 재질
- 방진 및 방수
- 노이즈 내량을 고려한 배선
- 비등부 냉각 핀의 열 저항 극소화
- 절연

국내 철도 차량에서 일괄 제어의 GTO 인버터 장치에 사용되고 있는 냉각 방식을 비교하면 표 3과 같다.

표 3에서 보는 바와 같이 GTO를 사용한 냉각 방식은 턴

표 3. 국내에서 사용되는 변환 장치의 냉각 방식

냉각장치 크기, 무게	크다	적다	크다	크다
냉매장치	사용	불필요	사용	불필요
전력소자 교환	어렵다	쉽다	어렵다	쉽다
소음	크다	크다	있다	없다
냉각성능	크다	중간	중간	적다

오프 손실이 크므로 인하여 발생하는 열을 소화하기 위해 Heatpipe를 사용한다. 여기에 강제 송풍기를 부착하여 사용하므로 중량이 증가하고 소음이 발생하는 등 문제점이 대두되고 있다. 또한 인버터의 안전한 동작을 위해 송풍기 고장시에도 인버터가 정지해야 하는 단점이 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위해서는 Heatpipe를 사용한 자연 냉각 방식이 적용되어야 한다.

### 5.1 Heat pipe 냉각방식

히트 파이프는 동일 직경의 구리나 은 봉에 비해 500~1000배 정도의 등가 열전도율을 가진 열의 초전체(超傳體)라고 부르는 우수한 열전도 소자이다.

그림 4는 표준적인 Heat pipe의 작동 원리를 나타낸 것이다. 히트 파이프는 금속관의 내부의 공기를 완전하게 추출시킨 감압상태로 한 후 몰리나 프로로 카본 같은 작동액을 소량 밀봉 한 것이기 때문에 그 내면에는 액의 비등 및 응축과 모세관 현상을 촉진시키기 위하여 그루부 등 위크(Wick)가 형성되어 있다.

이와 같은 구조로 관 한쪽 끝을 가열하면 액은 상압(常壓) 하에서 비점보다도 낮은 온도에서도 비등, 증발하기 시작한다. 그 증기는 압력이 되어 음속에 가까운 속도로 다른 쪽 끝 부분으로 이동하여 냉각시키며 거기에서 응축하여 중력이나 모세관력에 의해 가열부에 되돌아 와서 다시 그 액이 비등하여 증기가 되어 다른 쪽 끝으로 이동하는 시클을 외력없이 반복하게 된다.

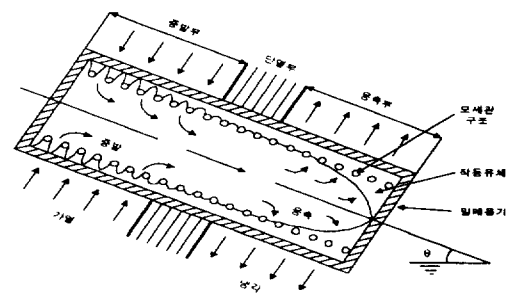


그림 4. Heat pipe의 작동 원리

이 때문에 Heat pipe는 금속 고체 전도(傳導)에 비해 순간적으로 대단히 많은 양의 열을 대단히 적은 온도 차이로 수송하는 것이 가능하다.

### 6. 결론

차세대 인버터 제어 전동차 시스템은 주회로 방식에서 전력용 반도체 소자의 고성능화와 전력 전자 기술과 마이크로 일렉트로닉스 소자의 발달로 GTO 인버터 대신에 IGBT 인버터로 대체됨으로써 소형, 경량화, 효율 향상, 저소음화, 접촉성 등의 성능 향상이 예상된다.

한편 GTO를 사용한 냉각 방식은 턴오프 손실이 크므로 발생하는 열을 식히기 위하여 Heatpipe를 사용하며 여기에 강제 송풍기를 부착하므로 중량이 증가하고 소음이 발생된다.

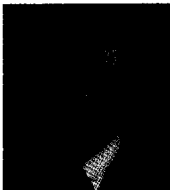
이러한 문제점을 보완하기 위하여 Heatpipe를 사용한 자연 냉각 방식이 적용되어야 한다.

결론적으로 선진국에 비하여 유도 전동기 구동 방식은 역사도 짧고 사용 실적도 적으므로 최신 추진 시스템의 동향과 기술 분석과 함께 지속적인 산·학·연 공동으로 연구 개발을 하여야 할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한국 전력 공사, 지하철 견인 전동기용 전력 변환 장치 기술 개발에 관한 연구(최종 보고서), 우진 산전 부설 기술 연구소
- [2] 한국 철도 기술 연구원, 도시 철도 차량 표준 사양 (안), 1997.9
- [3] 현대정공(주) 기술 연구소, 철도 차량 전장품의 최근 기술 동향, 김남해, 현대 중공업(주) 마북리 연구소 연구 개발 기술 세미나 발표 자료집, 1997.6

## 저 자 소 개



#### 원충연(原忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대전기공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년-1992년 미국 University of Tenness 전기공학과 객원교수. 현재 성균관대 공대 전기

공학과 부교수.



#### 김길동(金吉童)

1986년 명지대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1991년-94년 우진산전 기술연구소. 1995년-현재 한국철도기술연구원 추진제어개발팀 선임연구원.