

# 세계의 인버터전기차 개발현황

김 양 모

충남대학교 전기공학교육과 부교수

## I. 머리말

정류자를 갖지 않는 전동기로 구동되는 전기차는 일찌기 19세기말부터 등산용 전차와 중량이 나가는 화물기관차 등 특수용도로 실용화되었지만 일반전기차로서의 실용화에는 소형, 경량으로, 고신뢰도의 인버터가 적절한 가격으로 구입되어야 한다는 조건때문에 그 개발이 둔화되어 왔었다.

그러나 power electronics의 기술진전에 힘입어 교류구동전기차의 개발에 박차를 가한 결과 1976년 독일에서 탄광운반용차량으로 근대식 인버터제어 전기기관차가 등장하게 되었고 최근에는 일본에서 GTO를 사용한 VVVF 인버터차량이 熊本(구마모또), 大阪(오오사카)市 등에서 시험운전을 거쳐 영업운전에 들어감으로써 바야흐로 전기차에 관계하는 사람들의 오랜 숙원이었던 교류구동전기차의 시대를 맞게 되었다고 볼 수 있다.

우리의 경우 서울지하철1~4호선의 운영과 부산지하철의 개통이 외국의 기술의 도입에 의해 이루어 지기는 하였으나 대도시의 지하철시대를 맞이하였고 서울, 부산간 고속전철의 계획도 거론되고 있는 이 시기를 맞아 세계의 인버터제어 전기차의 개발현황을 돌아보고 그 중 대표적인 차량의 제어방식을 소개함으로써 전기차 개발및 새로운 선로계획에 있어 적은 보탬이 되고자 한다.

## II. 전기차로서의 전동기와 인버터

### 2.1 직류전동기의 한계점

차량구동력을 얻기 위한 주전동기에는 직류전동기가 많이 사용되는데 이것은 회전속도에 관계없이 고효율을 얻을 수 있고 광범위한 속도에 걸쳐 제어가 용이하다는 점과 기동토크가 크고 병렬운전시 부하분담특성이 우수하다고 하는 점에 기인된다.

그러나 직류기에는 복잡한 구조의 정류자와 브러쉬가 불가결하게 필요하며 이것들은 회전형 스위치같은 것으로 보수및 정류상태의 보정은 직류전동기 구동전기차의 운용에 있어서의 제한점이 된다. 또한 직류전동기는 정류능력의 한계와 기계적 강도의 부족으로 속도에 있어서 제약을 받고 속도향상을 이루려면 전동차의 비용을 높여야 하는데 이것은 수송비용의 증가를 뜻한다.

최근의 전동기제작기술은 절연재료의 개발등에 의해 소형, 경량화및 대출력화의 발전을 거듭했지만 근본적으로 브러쉬, 정류자가 필요한 관계로 같은 크기, 같은 용량의 교류기에 비하여 출력이 상당히 적고 또한 정격전압을 높일 수 없기 때문에 직렬접속및 직렬특성에서의 점착(adhesion)능력의 한계, 제자율제한에 의한 고속에서의 토크저하등 직류전동기 구동전기차의 한계점에 도달했다고 볼 수 있다.

전기차 특성중 중요한 것은 레일과 차륜간의 점착성

능으로 제어무리 전동기의 성능이 향상된다 하더라도 차륜이 공전(空轉) 또는 활주(滑走)하는 경우에는 열차의 가속, 감속능력의 저하를 초래한다.

활주는 열차가 중량에 마찰계수를 곱한 값이상으로 견인되면 일어나고 작은 활주에 의해 대공전이 일어날 수 있으며 설령 공전이 발생했다 하더라도 곧 재접착한다면 정상적인 운행이 가능한데 직류전동기는 재접착특성이 좋지 않다.

### 2.2 인버터전기차의 종류

교류전동기가 차량구동용으로 우수한 특성을 지니고 있음은 옛부터 알려져 왔다. 이것은 정류자를 갖지 않아 고속회전이 용이하고 소형경량화가 가능하고 보수가 필요치 않다고 하는 점이다. 또한 정류자의 회전제한과 계자율제한이 없기 때문에 회전수를 기계적한계까지 기여비를 내리지 않고서도 높일 수 있고 고속도오차를 증대시킬 수 있다.

교류기에는 동기속도가 있고 속도제어를 행하기 위하여는 새로운 power electronics 기술을 구사한 가변주파수(Variable Frequency) 전원이 필요하다. 여기에 가변전압(Variable Voltage) 또는 가변전류의 교류를 만드는 인버터와 차량구동용 교류전동기의 구성요소에 따라 여러방식이 생각될 수 있다(표1참조). 표1에서 인버터의 형태란 부하에서 볼 때의 인버터가 전압원적인가 또는 전류원적인가에 따라 분류되는 것으로 전압원적인 경우는 단지 전력스위치에 의해 전력을 제어하는 전압형 인버터를 구성할 수 있고, 인버터 전단에 변환기와 인덕터를 놓아 전류형인버터를 구성할 수 있다.

전압형인버터에서는 일반적으로 정현파교류에 근사시키기 위하여 일정 진폭의 다수 구형파로 근사시키는 것이 보통이고 전류형인버터는 제어가 간단하고 스위칭 횟수도 적으며 전류가 늘 일정하기 때문에 스윗칭(轉流) 실패로 단락된다고 하더라도 전류의 변화가 없어 소자 파괴의 염려가 적다.

전기차에서의 전압형인버터와 전류형인버터를 단적으로 비교하기는 어려우나 전압형인버터에는 거의 PWM 제어가 사용되어 전압은 구형파에 전류는 정현파모양으로 되어 주전동기의 토오크리플이 적고 공전시에도 재접착이 쉽고 제어응답이 빠르다고 할 수 있다. 한편 전류형인버터는 전술한 바와 같이 회로내에 리액터가 있

어 보호기능이 간단하나 효율이 약간 떨어지고 제어응답 및 재접착성능도 약간 떨어진다고 알려져 있다.

전동기로는 회전자구조가 간단한 유도기와 역기전력으로 사이리스터의 전류(轉流)가 가능한 동기가 있는데 유도기의 경우 기계적으로 강하고 고속회전용 설계가 용이한 반면 동기의 경우에는 인버터가 간단하게 되고 유도기보다 정출력의 속도영역을 넓힐 수 있다는 장점을 갖고 있다.

### Ⅲ. 세계의 인버터전기차

세계에서 인버터전기차를 개발한 예를 보면 표2와 같다. 인버터차량의 개발역사는 오래되었지만 근대적 차량의 원조라고 한다면 독일의 Henschel사와 BBC사가 공동개발한 전기식디젤기관차 DE2500이라 할 수 있다. 이 시험차는 대량생산되지 못한채 연방철도에 흡수되어 버렸지만 이 기관차의 인버터유도기구동기술은 뒤에 DB(Deutschen Bahn)의 E120형전기차의 개발에 연결되었다. DB의 E120(그림1)은 1979년출력 5600kw, 간선용고출력인버터기관차로 개발되어 1985년부터 대량생산에 들어갔다.

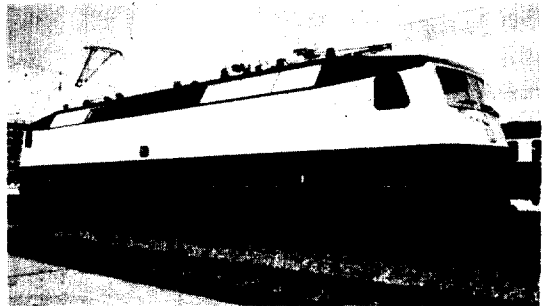


그림 1. 인버터를 사용하여 3상전동기를 구동하는 DB의 E120 전기기관차

한편, 1972년에 스위스의 BBC는 화물차를 개조한 시험차 Be% 1200I를 제작, 1전동기-1인버터방식과 점착제어에 의해 점착특성이 양호함을 입증하고 6축디젤식 전기차 Am%를 제작, 그 후 Ee%II가 등장하여 4상한 컨버터를 사용하여 16%Hz에서 운용되고 있다.

이후 Ee%II의 사용실적에 의해 Re%IV(그림2)가 설계되어 80 t의 중량으로 제작되어 실용화되었다.

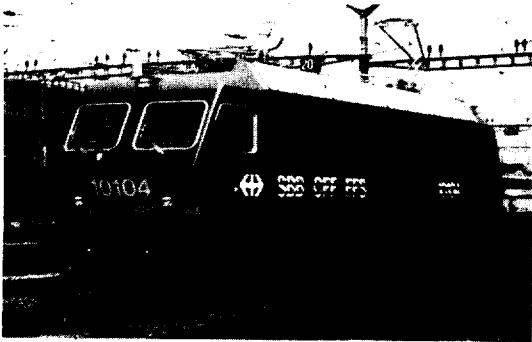


그림 2. 1978년에 시험제작 되었던 Ee %의 사용실적에 의해 설계 제작된 Re 4/4 IV 4호기 인버터 전기기관차

동기기를 사용한 방식으로는 초기에 소련과 일본에서 사이크로컨버터를 사용하여 개발이 추진되었으나 자기 부상철도의 응용외에는 별다른 진전이 없었으나 프랑스가 1대차(台車) 1전동기식의 기관차를 개조하여 유도기식, 동기기식의 비교시험을 한 결과 동기기식쪽이 종합 성능이 우수한 결과가 나와 대서양TGV(Train a Grande Vitesse)를 비롯하여 널리 채용할 것을 목표로 BB10004 (2대의 2800KW 대형동기기와 2대의 인버터)의 시험기를 제작하였다.

기관차이외의 것으로는 출력이 적은 노면전차, 지하철에의 적용으로 70~250KW의 전동기 수개에 600~750 V 저압직류로부터 초퍼로 전류원을 만들어 전류형인버

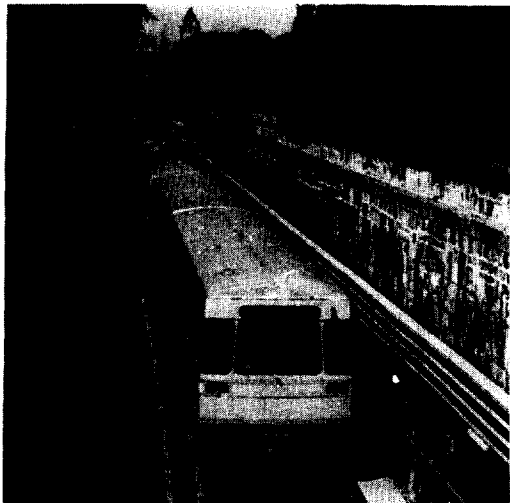


그림 3. 오스트리아 수도 비인의 지하철(제3개조방식)

터에 의해 구형파전류를 공급하는 방식이 주류를 이루고 있다. 이에 속하는 것으로 뉘른베르크, 듀셀도르프의 시가전차, 뮌헨, 비인 등의 지하철을 들 수 있다.

특히 요즘 주목해야 할 것은 가까운 이웃나라 일본의 인버터전기차의 개발이다. 앞서서도 잠깐 언급했듯이 일본에서는 동기기식 인버터전기차의 개발은 미약한 반면, 유도기를 사용한 인버터기술은 거의 완성단계에 이르렀다고 볼 수 있는데 자기전류능력을 가진 GTO 사이리스터를 사용한 PWM인버터전기차를 일본의 각 메이커가 앞다투어 제작하고 있다. PWM인버터는 복잡한 파형제어를 행하게 되는데 집적회로기술과 마이크로컴퓨터를 이용하여 경량으로 실현시키고 있다.

이리하여 구마모토시의 8200형, 삿쵸로시교통국의 8500형, 오오사카시교통국의 20계(그림4)가 이미 영업운전에 들어갔다. 그외에 도요쿠, 낀데쯔, 향큐등 각 회사에서 앞을 다투어 인버터차의 개발을 추진하고 있다.

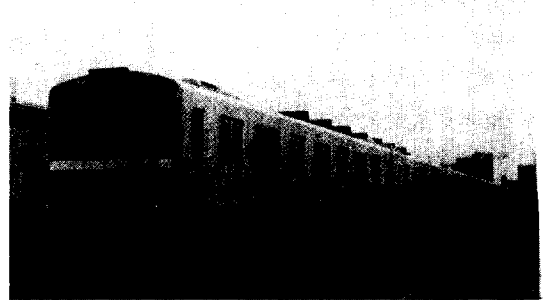


그림 4. 3M3T편성의 일본 오오사카시 교통국의 20계 인버터전차

상기의 실적을 본다면 인버터전기차의 개발은 서독을 중심으로한 유럽과 이웃나라 일본을 중심으로 그 개발이 활발히 진행되고 있고 세계 각국에서 이미 수백량의 인버터전기차가 활약하고 있다. 이하에서는 이들중 대표적인 차량의 제어방식을 소개하여 보고자 한다.

### 3.1 서독철도청(DB)의 E120

E120형은 전기기관차로 최고속도 160km/h의 객차열차로부터 최대견인력 340KN의 화물열차까지 견인할 수 있도록 하였고 장래 200km/h 고속운전을 위해 경량화를 꾀하고 있다. E120형의 주회로는 그림5와 같고 특

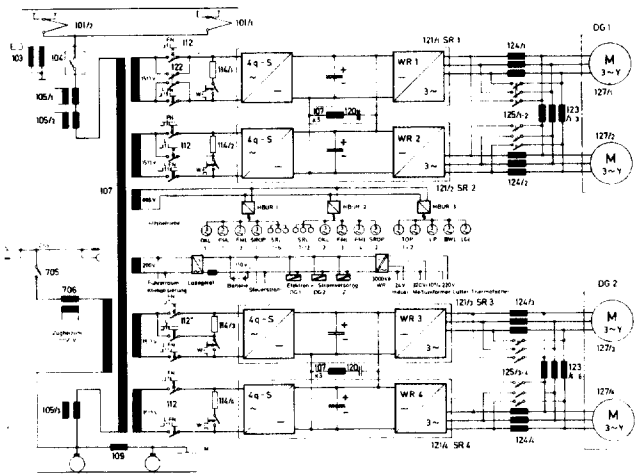


그림 5. 서독 철도청(DB)의 인버터 전기기관차 E120형의 주회로

101/1-2	pantagraph
103	1차 전압 측정용 변압기
104	주스위치
105/1-2	1차 전류 측정용 변류기
105/3	접지 전류 검출기
107	주변압기
109	접지리액터
112	가속, 감속전환기
114/1-4	감속용 저항기
107	직렬공진 인덕턴스
120	직렬공진 콘덴서
121/1-4	주회로용 전력변환기
123/1-6	주전동기 결합회로용 리액터
124/1-4	주전동기용 리액터
125/1-4	리액터 단락용 접촉기
127/1-4	주전동기
705	열차 난방용 접촉기
706	난방용 전류측정용 변류기

정은 다음과 같다.

- (1) 4축기 5600kw의 객화차 양용.
- (2) 강제전류회로의 펄스계어컨버터와 PWM인버터.
- (3) 전진및 후진의 가속·회생제어가능.
- (4) 주전동기는 3상농형유도전동기(1400kw, 2,380kg).
- (5) 차량중량은 84 t으로 경량화를 꾀했다.

### 3.2 프랑스 SNCF의 BB10004형

BB10004는 2800kw의 동기전동기 2대가 설비된 1대차 1전동기의 4축기로 650 t의 여객열차를 200km/h의 속도로 견인하고 8.8%의 경사에서 2066 t의 화물열차를 기동시킬 수 있다.

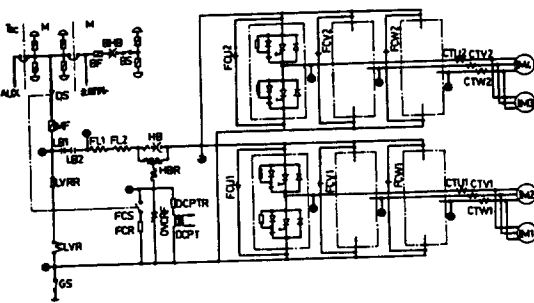


그림 6. 특수권선과 제어방법으로 저속토크 맥동을 감소시킨 프랑스의 동기기구동 인버터 전기기관차 BB10004의 주회로

- (1) 주회로(그림6)는 사이리스터컨버터와 자연전류인버터.
- (2) 주전동기는 출력 2800KW, 중량6900kg이고 견인력은 0km/h에서 320KN, 200km/h에서 100KN을 달성시키고 있다.
- (3) 특수권선과 제어방법으로 저속에서의 토크맥동을 감소시키고 동기기의 역기전력으로 전류시킨다.

### 3.3 일본 오오사카시의 20계

20계전차는 VVVF제어법에 전압형 PWM방식을 채용하여 인버터의 출력리플에 의해 전동기회전이 코르지

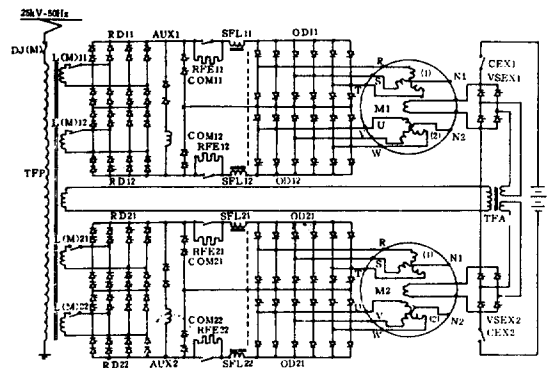


그림 7. 1인버터-2유도전동기 제어방식의 일본의 20계 인버터전차의 주회로

못한 것을 감소시키는 것과 고주파영역에서 轉流손실을 줄이기 위해 반사이클간의 펄스수를 주파수의 상승에 따라 45→27→15→9→5→3→1로 바뀌어가며 제어하고 있다. 주회로는 그림7과 같고 특성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 전원전압은 직류 750V로 VVVF인버터에 의한 자동가속제어를 행하고 전력회생감속장치와 속도 억제용 감속장치가 있다.
- (2) 주전동기는 140KW의 4극자기통풍식 3상농형유도전동기 4대로 1인버터2전동기제어방식을 택하고 있다.
- (3) 인버터의 가속제어방식은 정토크정슬립주파수 제어→정전압정전류제어→정전압정슬립주파수 제어(그림8참조)를 행하고 회생제동제어방식은 정슬립주파수제어→정전압정토크제어→정전류정슬립주파수제어를 행하며 스위칭장소로는 2500V, 2000A의 GTO를 사용하고 있다.

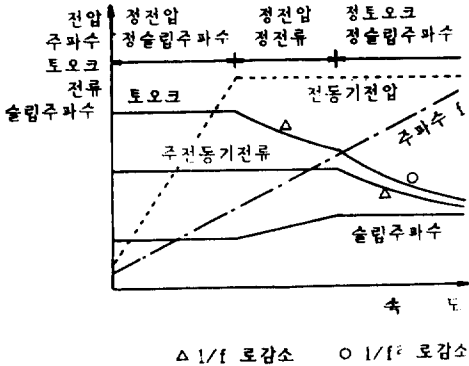


그림 8. 일본 20계전차의 가속특성곡선

#### IV. 인버터제어전기차의 전망

인버터차량의 장점은 두말할 것도 없이 보수의 경감을 들 수 있는데 이것은 전동기의 마모부분이 없어지고 제어회로에서의 접점도 회로보호용만이 남게 되어 거의 불필요한 상태가 되는데 기인된다.

성능면에서는 전동기의 크기에 대한 출력을 대폭적으로 증가시킬 수 있는데 이것은 직류기의 정류자길이지만 큰 전동기의 실효길이를 길게 할 수 있을 뿐만 아니라 정류자회전속도의 제한이 없어서 회전속도를 높게 설계

할 수 있고 현실적으로 전동기와 차륜간의 치차비나 접촉한계까지 전동기출력을 크게 취할 수 있다.

접촉성능이 교류기로 구동시킨 전기차에서 직류기방식보다 양호한 것은 익히 알려져 왔고 이 특성을 직류기구동전기차에서의 같은 정도의 성능을 얻으려고 한다면 동력집중화에 의해 전기차의 경량화를 꾀할 수 있고 제작비를 줄일 수 있다.

이러한 여러가지의 장점이 있는 반면 몇가지 문제점도 안고 있다. 첫째로 직경이 다른 차륜의 전동기를 병렬운전했을때에 생기는 토오크 불평형현상과 이에 대한 관리문제를 들 수 있고, 둘째로 초퍼제어와 달리 주파수가 연속적으로 변화함에 따른 유도장해문제, 셋째로는 초기기술투자에 의한 코스트의 문제등이 있다.

그러나 전기차기술에 있어서 선진국들이 앞을 다투어 교류기구동전기차의 개발을 서두르고 있고 이미 상당수의 전기차가 활약하고 있으며 power electronics기술의 발달이 완속의 경지에 도달하게 됨에 따라 인버터제어 전기차의 수는 증가되어 갈 것임에 틀림이 없다고 볼 때 조만간 인버터제어전기차가 전기차의 주류를 이룰 날이 도래할 것이다.

#### V. 맺는말

이상에서 교류기구동 인버터전기차에 대하여 제어방식과 세계에 있어서의 개발현황을 살펴보았다. 교류기구동전기차는 보수작업이 대폭경감되고 출력특성도 직류기구동전기차에 비해 같은 크기의 전동기에서 월등 양호하고 접촉 또는 공전후의 재접촉특성도 우수하다.

세계의 교류기구동전기차의 개발추세는 중량있는 개화차를 견인하는 전기기관차는 대출력의 동기전동기 1~2개를 한 개의 인버터로 제어하는 것이 보편적이고 소출력인 지하철이나 노면전차에는 유도전동기를 사용한 인

表 1. 인버터제어전기차의 분류

인버터			전동기	차량 종류
형태	파형	스위칭소자		
전압형	PWM	전력트랜지스터	유도기	전기기관차
전류형	구형파	사이리스터 GTO 등	동기기	전차

버터가 실용화되었고 한개의 인버터로 다수의 전동기를 제어하는 것이 일반적이다.

세계의 철도주종국들이 다루어 인버터전기차의 개발에 박차를 가하고 있는 때에 우리나라에서도 인버터전기차의 개발을 서두르지 않으면 모처럼의 전철화기운이

그 예봉을 꺾이고 낙후한 기술로 전락되어 또다시 기술의 도입이라는 쓰라림을 맛보게 될 것임은 기정 사실이기예 우리나라에서도 인버터전기차의 개발연구가 활발히 진행되기를 바라마지 않는다.

表 2. 세계의 인버터 전기차 개발 현황

Inv. → 인버터  
IM. → 유도기  
SM. → 동기기

형식 및 명칭	국가	제작	년도	출력(Kw)	축배치	중량(t)	방식	기타
Hawk	영국	Brush	65	1100	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	80	디젤	
DB, DE2500	서독	BBC, Henschel	71	1840	C <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	80	"	4Inv-6IM
VME 1-024	소련	레닌그라드공대	72	340	4축		"	
SBB, Be 4/4 12001	스위스	스위스 BBC	72	1000	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>		15Kv 16½Hz	
WL80a	소련	Novocher, Kassk	75	9600	4축×2		25Kv 50Hz	1Inv. - 1IM
ZuH, E1200	서독	BBC, Henschel	76	1500	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	88	15Kv 16½Hz	혼합브릿지
SBB, Am6/6	스위스	스위스 BBC	76	1500	C <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	111	디젤	디젤출력 1840Kw
SNCF, CC14003	프랑스	Jenmout Schneidet	76	500			25Kv 50Hz	
NS, 1600p	폴란드	Henschel	77	1400	1A 1	84	DC1500V	
E323	이태리		77	280	3축		DC3000V	
SBB, Ee6/6 II	스위스	스위스 BBC	78	1000	C <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	111	15Kv 16½Hz	
DB, E120	서독	BBC	79	5600	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	84	15Kv 16½Hz	1985년 대량생산
E117	노르웨이		80	3000	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	64	15Kv 16½Hz	
SNCF, BB10004	프랑스		80	2800				2Inv-2SM
DSB, ME	덴마크	BBC	83	2000	C <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	114	디젤	
ÖBB, 1063	오스트리아		83	1520	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	76	15Kv 16½Hz 25Kv 50Hz	
SAR, 8 E	남아프리카		83	680	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	83	DC3000V	
SBB, Re4/4 IV	스위스	스위스 BBC	83	5000	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	80	15Kv 16½Hz	
CTS, Airporter	미국	WABCO Reliance	72	440	4축	38	DC600V	
뉘른베르크 시가전차(VAG)	서독	Siemens	75	250		54/unit	DC600V	1Inv-2IM
베를린 지하철	"	AEG Telefunken	76	600		43/unit	DC750V	직접인버터급전, 1Inv. - 4IM
함부르크 지하철	"	BBC	78	720			DC750V	
물하임 지하철	"	Siemens, Henschel	79	380			DC600V	
비인 지하철	오스트리아	Siemens	79	1140			DC750V	
헬싱키 지하철(M100)	핀란드	Strömberg	79	1000		32	DC750V	125Kw×8, 1INV-2IM
뒤셀도르프 시가전차(B80D)	서독	Düwag, BBC Siemens	80	600			DC600V, 750V	1INV-1IM
문헨 지하철(B1)	"	BBC	81	1080		58/unit	DC750V	1INV-2IM
구마모토 시가전차(8200형)	일본	미쓰비시	82	240		19	DC600V	역도통사이리스터사용
오오사카시교통국(20계)	일본	히다찌, 미쓰비시	84	1680		191	DC750V	3M3T. GTO(2500V, 2000A) 1Inv. - 2IM
도큐 6000계	"	히다찌	84				DC1500V	GTO2500V용 2개 직렬사용 GTO(4500V용) 사용
긴태즈 1250계	"	미쓰비시	84	1320		150	DC1500V	1Inv. - 4IM
세이부 야마구찌선	"		85				DC600V	산형식의 고무타이어식철도
도큐 9000계	"		86	2040		240	DC1500V	4M4T. 1 INV-8 IM

참 고 문 헌

- 1) F.J. Bourbeau, "Synchronous Motor Railcar Propulsion", IEEE Trans. on IA, Vol. IA, No. 1, 98, 1977
- 2) N.Vutz, "PWM Inverter Induction Motor Transit Car Drives", IEEE Trans. on IA, Vol. IA-8, No. 1. pp. 89-91, 1972.1-2.
- 3) Walter Lössel, "Drehstromantrieb für Wechselstromtriebfahrzeuge", Elektrische Bahnen 48. H. 4, pp. 82-90, 1977
- 4) A.B. Plunkett and D.L. Plette, "Inverter-Induction Motor Drive for Transit Cars", IEEE Trans. on IA, Vol.IA-13, No. 1, pp. 26, 1977
- 5) Joachim Körber, "Developing a 15KV single-phase electric locomotive with three-phase induction motors", Railway Gazette International, pp. 381-384, 1976. 10
- 6) Rolf Gammert, "Die elektrische Ausrüstung der Drehstromlokomotive Baureihe 120 der Deutschen Bundesbahn", Elektrische bahnen 77, H.10, pp. 272-283, 1979. 10
- 7) 石橋・鈴木・相沢, "インバータ駆動による車兩用誘導電動機", 電氣車の科學, 第35卷第6號, pp. 23-29, 1982. 6
- 8) 曾根, "最近におけるインバータ制御電氣車の開發," 日本機械學會誌, 89-814, pp. 1015-1019, 1986. 9
- 9) 横山, "大阪市交通局のVVVF インバータ電車", JREA, Vol 27-6 pp.15555-15558, 1984. 6
- 10) 眞野, "VVVF インバータによる無整流子電動機驅動システムにつりて (I) (II)", 電氣鐵道, Vol. 39, No. 9~10, 1985. 9~10
- 11) 日立製作所, "わが國最初のインバータ電車の開發", 電氣車の科學, Vol. 34-1, pp.35-38, 1981. 1
- 12) "4500V GTO を應用した1250系 インバータ電車", 近鐵技報, Vol. 16, pp.64-72, 1985
- 13) 加我, "インバータ電車の開發と今後", 電氣車の科學, Vol. 38-2, 1985. 2
- 14) 日本車輛・三菱, "熊本市交通局8200形 新性能電車 (1)~(3)", 電氣車の科學, Vol.35, No. 9-11, 1982. 9-11.