

고속전철의 인버터 기술

최 호 현* · 설 승 기**

(*금성산전 연구소 소장, **동 선임 연구원)

1. 서 론

철도는 그 편리성, 안전성, 대량 수송성 등의 장점으로 인하여 가장 널리 이용되는 대중 교통 수단이다. 물동량의 증가에 따라 수송 한계에 다다른 서울-부산간의 철도에 고속전철을 도입하고자 하는 움직임이 있다.

고속전철에서 견인력을 얻기 위하여 전기적 입력을 기계적 출력으로 변환하기 위한 전력 변환 및 전동기 구동 장치가 필요하다. 현재 개발되고 있는 고속 전철 시스템에는 대표적인 두가지를 생각할 수 있는데 자기부상식과 통상의 바퀴굴림형으로 나눌 수 있다.

자기부상식의 경우 차체를 자력(Magnetic Force)를 이용하여 공중에 띄운 후 선형유도전동기(Linear Induction Motor) 혹은 선형동기전동기(Linear Synchronous Motor)를 이용하여 견인력을 얻는 방법이다. 한편 바퀴굴림형의 경우 통상의 전철시스템을 개량한 것으로 입력되는 직류, 또는 교류전력을 적당히 제어하여 직류 견인 전동기 혹은 교류 견인 전동기를 구동하는 방식이다. 현재 실용화된 고속전철은 일본의 고속전철의 경우 직류전동기 구동시스템, 프랑스의 TGV는 동기전동기 구동시스템, 독일에서 시험중인 ICE는 유도전동기를 사용하는 바퀴 굴림형이다.

또한 일본의 경우에도 직류전동기 구동시스템을 유도전동기 구동시스템으로 변경할 계획을 추진중에

있다. 견인 전동기 구동시스템은 총 출력이 수 MW에 이르고 정지부터 최고속도에 이르기까지 속도와 회전력의 제어를 필요로 하는 거대한 전동기 가변속 구동시스템(Adjustable Machine Drive System)이다. 이러한 구동 시스템은 견인전동기의 종류와 전동기 구동을 위한 전력 변환 방식에 따라 몇가지로 분류할 수 있다. 이 글에서는 현재 실용화되어 있고 앞으로 실용화가 추진되고 있는 견인용 교류전동기(유도전동기, 동기전동기)의 가변속 구동을 위한 전력 변환장치(Converter, Inverter)에 중점을 두고 기술하고자 하며 전력변환 방식에 따른 전철의 전기적 특성에 대해 소개하고자 한다.

2. 견인전동기

현재 사용되고 있는 시스템을 견인 전동기에 따라 분류하면 직류 전동기와 교류 전동기로 나눌 수 있고, 교류 전동기는 다시 유도 전동기와 동기 전동기로 구별할 수 있다.

직류 전동기는 그 속도 제어의 간편성으로 인하여 현재 가장 널리 쓰이고 있는 전철용 견인 전동기이다. 직류 전동기는 계자 전류나 전기자의 전압을 조정하여 쉽게 속도를 제어할 수 있고 회전력은 계자 전류와 전기자 전류의 곱으로 나타나므로 회전력의 제어가 용이하다.

또한 직류 전동기는 제어 정류기 혹은 초퍼(Chopper)를 이용하여 전압, 전류 등의 제어가 간

편하고 대용량 정류용 반도체(Diode, Thyristor) 등의 확립된 기술을 이용할 수 있어 각종 지하철 및 시내 전철 등에 사용되어지고 있고 현재 일본의 고속 전철도 직류 전동기를 이용하고 있다. 그러나 직류 전동기는 전동기 구조에 기인한 몇가지의 결정적인 약점을 갖고 있다.

첫째, 정류자(Commutator)와 브러쉬(Brush)를 가지고 있어 이의 마모에 따른 정기적인 보수, 점검 및 교체 의 필요성이 있다. 둘째, 직류 전동기는 교류 전동기에 비해 같은 용량에서 자체 무게가 무거우며 또한 기계적인 취약성으로 인해 고속 회전을 얻을 수 없어 고속 전철의 응용에 있어서 중량의 불리함이 교류 전동기에 비해 크다. 셋째, 제동 및 정, 역 운전시 전력 회로에 기계적인 점접(Contactor)이 있어야 하고 이의 유지 보수를 필요로 한다.

교류 전동기는 최근의 대용량 전력용 반도체 및 그 제어 기술의 발전으로 인하여 점차 그 사용이 증대되는 추세에 있다. 교류 전동기는 입력 주파수에 의해 그 속도가 결정되므로 속도 제어를 위해서는 주파수의 변환이 필요한데 이를 위해서는 대용량 주파수 변환 장치(Inverter)가 필요하게 되고 전동기 회전력 및 자속(Magnetic flux)을 제어하기 위하여 주파수 제어와 동시에 전압 혹은 전류의 제어도 필요로 하여 전체적인 전력 변환 시스템이 복잡하여진다. 최근의 대용량 전력용 반도체 특히 GTO(Gate Turn-Off) Thyristor의 출현으로 인하여 이러한 전력 변환 시스템이 간편하게 구성될 수 있게 되었다.

교류 전동기중 특히 유도 전동기는 기계적 구조가 간단하고 견고하여 산업체에서 가장 널리 쓰이는 전동기이다. 유도 전동기를 견인 전동기로 사용할 경우 유지 보수에 필요한 경비 및 시간은 직류 전동기에 비해 약 1/3~1/5 정도이며, 유도 전동기는 자체 중량이 가볍고 고속 회전할 수 있으므로 동일 출력의 경우 직류 전동기에 비해 그 무게는 2/3 정도이다.

또한 교류 전동기는 Inverter의 주파수와 전압, 상회전(Phase rotation)을 제어하여 손쉽게 정, 역 운전 및 제동할 수 있어 전력 회로에 별도의 접촉기를 필요로 하지 않는다. 표 1에는 유도전동기와 직류전동기를 유지보수의 측면에서 비교하였다.

교류 전동기 중에서 동기 전동기는 유도 전동기에 비해 기계적으로 약간 복잡하고 가격이 비싸나 운전

표 1. 직류전동기와 유도전동기의 보수점검 비교

항목 \ 전동기	직류전동기	유도전동기	
브러쉬와 정류자	있음	없음	
중량(150kw)	약 800kg	약 550~600kg	
회전자 구조	전기자 권선을 Slot에 절연처리하여 삽입함.	동형의 구조로 기계적·전기적 구조가 간단하고 견고함.	
기타 사항	축의 베어링이 크다.	축의 베어링이 작다. 속도검출용 Encoder가 필요하다. 고속 회전이 가능하다.	
점검보수	보수점검에 걸리는 시간	전동기당 0.2~0.5시간	필요없음
	점검·보수 주기	3개월마다	"
분해 점검 및 수리	분해 점검에 필요한 시간	전동기당 약 35시간	완전 분해의 경우 약 20시간 부분 분해 점검의 경우 약 7시간
	분해 점검 주기	약 3년	3년~5년
보수비 (직류기 기준)	1.0	약 0.2~0.5	

효율이 높고 전동기의 속도가 출력 주파수에 의해 직접 결정되어 속도 제어가 용이하다. 또한 동기 전동기를 진상 역률로 운전할 경우 인버터 회로가 간편(Load Commutated Inverter)해지는 장점이 있다. 그러나 최근 전력용 반도체의 발달에 따라 인버터 회로의 간편성에 대한 장점은 퇴색해가고 있다. 반면에 동기 전동기는 각각의 전동기에 각각의 인버터를 필요로 하여 인버터의 수를 줄이기 위해서는 대용량 전동기를 사용해야 하는 단점이 있다. 그러나 유도 전동기는 한개의 인버터에 다수의(4~8대) 전동기를 부착할 수 있어 적은 용량의 전동기를 분

표 2. 인버터 방식에 따른 교류전동기 구동방식의 비교

인버터 방식 항목	전압형 PWM제어 인버터	전류형 PWM제어 인버터	부하 전류형 인버터 (Load Commutated Inverter)
기본회로			
인버터 출력 전압 파형			
인버터 출력 전류 파형			
사용전동기	유도전동기 (동기전동기 가능)	유도전동기 (동기전동기 가능)	동기 전동기 (유도 전동기 불가)
전력용 반도체 및 전류 (Commutation)	GTO사용 Gate신호에 의한 on-off	왼쪽과 같음	Thyristor 사용 주행시 부하에 의한 자연전류 (Natural Commutation)
전동기 입력전압 파형	인버터 출력과 동일	인버터 출력과 동일	인버터 출력과 동일
전동기 입력 전류 파형	인버터 출력과 동일		''
전동기 회전력의 맥동	저속시 인버터의 PWM 변조 주파수에 해당하는 Ripple 토오르크 발생. 고속시 출력 주파수의 6배의 주파수맥동 토오르크 발생	전동기 입력 전압 전류가 정현파에 유사하여 가장 토오르크의 맥동이 적음.	인버터 주파수의 6배에 해당하는 토오르크 맥동이 있음. 기동시 전류 PWM에 의해 맥동 토오르크를 감소시킴.
전동기 효율	약 91%	왼쪽과 같거나 약간 높음	93~94%
전동기 역률	0.85	왼쪽과 같음	1.0까지 가능
유도 장애	저차 고조파에 비해 고차 고조파 성분이 커 유도장애가 심각함	직류전동기 구동의 경우와 비슷하여 유도장애의 문제가 가장 적음	인버터 주파수의 6배의 저차 주파수 고조파가 크다
전동기 병렬 운전	유도 전동기 사용시 병렬 운전 가능	왼쪽과 같음	병렬 운전 불가능
보수성	완전 무접점화가 가능하여 유지보수가 가장 쉬움	유지보수의 면에서 왼쪽보다 불리	유지보수의 면에서 전동기를 포함하여 고려하면 왼쪽보다 불리
적용 예	일본의 고속전철에 적용 예정. 독일의 ICE에 적용	아직 없음 (연구중)	프랑스의 TGV에 적용

산 배치할 수 있다.

또한 동기전동기는 유도전동기에 비해 유지보수가 어려운 단점이 있다. 이상의 사항을 고려하면 고속전철용 전인 전동기는 유도전동기가 그 주종을 이룰 것으로 생각된다.

3. 전동기 구동용 전력변환 장치

전인전동기의 속도와 회전력을 제어하기 위해서는 전동기 입력의 전압, 전류, 또는 주파수를 제어하여야 한다. 최근의 전력변환 기술은 대용량 전력용 반도체와 전자회로기술의 발달로 인하여 비약적인 발전을 이룩하고 있다. 특히 고속전철의 전동기 구동을 위해서는 고전압, 대전류의 Switching이 가능하여야 하는데 최근의 Gate Turn Off(GTO) Thyristor의 발전은 단일소자로서 4500V, 2000A의 전력을 Switching할 수 있어 비교적 용이하게 전력회로를 구성할 수 있다. 그림1은 GTO를 이용한 직류전인전동기 구동 시스템의 한 예를 보이고 있다.

8개의 전인전동기를 군제어(Group Control)하는 회로로서 스위치 S₁, S₂, 초퍼(Chopper) Ch1, 2, 3, 4를 적절히 제어하여 8개의 계자전류의 크기와 방향

을 4개씩 별도 제어하여 정, 역회전시 구동력과 제동력을 얻을 수 있고 전전자 초퍼를 이용하여 회전력을 직접 제어할 수 있으며 또한 스위치 S₃와 S₄를 이용하여 회생제동을 행할 수 있다.

인버터를 이용한 교류전동기 구동에 관해서는 인버터의 방식에 따라 몇가지로 분류할 수 있다. 표2에는 각 방식에 따른 특징을 간략히 나타내었다.

표2에서 나타난 바와 같이 유도전동기의 PWM 전압형 혹은 전류형에 의한 구동 시스템이 바람직할 것으로 생각되며 실용성을 고려하면 PWM 전압형 인버터에 의한 유도전동기의 병렬구동 시스템이 가장 유망한 것으로 생각된다. 이 경우 인버터 시스템에서 발생하는 고조파에 의한 유도장애를 해결하는 것이 급선무로 생각된다. 최근의 광통신 방식을 이용한 Digital 통신 방식의 도입과 선로 주변에 적당한 고조파 필터를 설치함으로써 유도장애 문제는 해결될 수 있으리라 생각된다.

4. 입력용 전력변환 시스템

전철의 입력으로 통상 직류 혹은 단상 교류가 이용된다. 현재 가장 널리 쓰이는 방식은 직류 750V 또는 1500V로써 고속전철의 경우 대용량의 전력공급

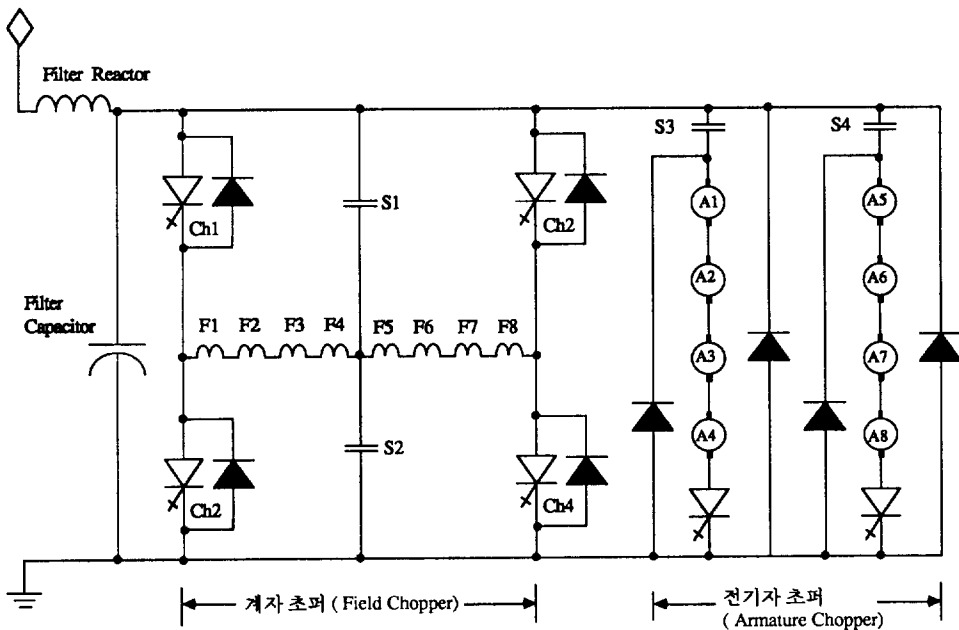


그림 1. 8대의 직류전인전동기 구동을 위한 GTO를 이용한 전력회로

이 필요하여 1500V가 사용되고 있다.

직류를 입력으로 할 경우 견인 전동기 구동을 위하여 전압 제어를 할 필요가 있는데 이 경우 초퍼가 사용되어지고 PWM 전압형 인버터의 경우 일정 직류 전압에서 원하는 가변 전압, 가변 주파수의 전압을 얻을 수 있다.

입력을 교류로 받을 경우 25kV 단상 교류가 흔히 이용된다. 삼상의 경우는 집전상의 어려움으로 인하여 사용되지 않고 있다. 단상 교류 입력의 경우 단순한 정류기 혹은 다이리스터를 이용한 제어 정류기를 이용하여 직류전압을 얻을 수 있다. 정류기를 사용하는 경우 교류입력단의 역율을 1에 가깝게 유지할 수 있으나 직류 전압제어를 위하여 별도의 초퍼를 필요로 한다.

제어 정류기를 이용하는 경우 가변전압을 얻을 수 있으나 역율이 변동하는 단점이 있다. 최근에는 단

상 입력측에 GTO를 이용한 PWM 제어 정류기를 적용하여 입력 전원의 역율을 1로 유지하고 전압제어를 행하며 동시에 입력측에 유입되는 고조파 성분을 최소화시켜 고속 전철의 수 변전 설비와 유도장애투를 줄이는 연구가 행해지고 있다.

5. 전 망

앞에서 검토된 사항을 고려하여 한국형 고속 전철 시스템을 바퀴굴림형의 전동기 구동방식을 택할 경우 교류 입력⇒GTO 제어 정류기⇒PWM 인버터⇒유도 전동기로 구성되는 그림2의 시스템이 유망한 것으로 생각된다.

그림2에서 집전 장치를 통해 단상 25kV 60Hz를 수전하여 전동차에 탑재된 변압기를 통하여 전압을 낮춘 후에 대용량 GTO 소자의 PWM 제어 정류기

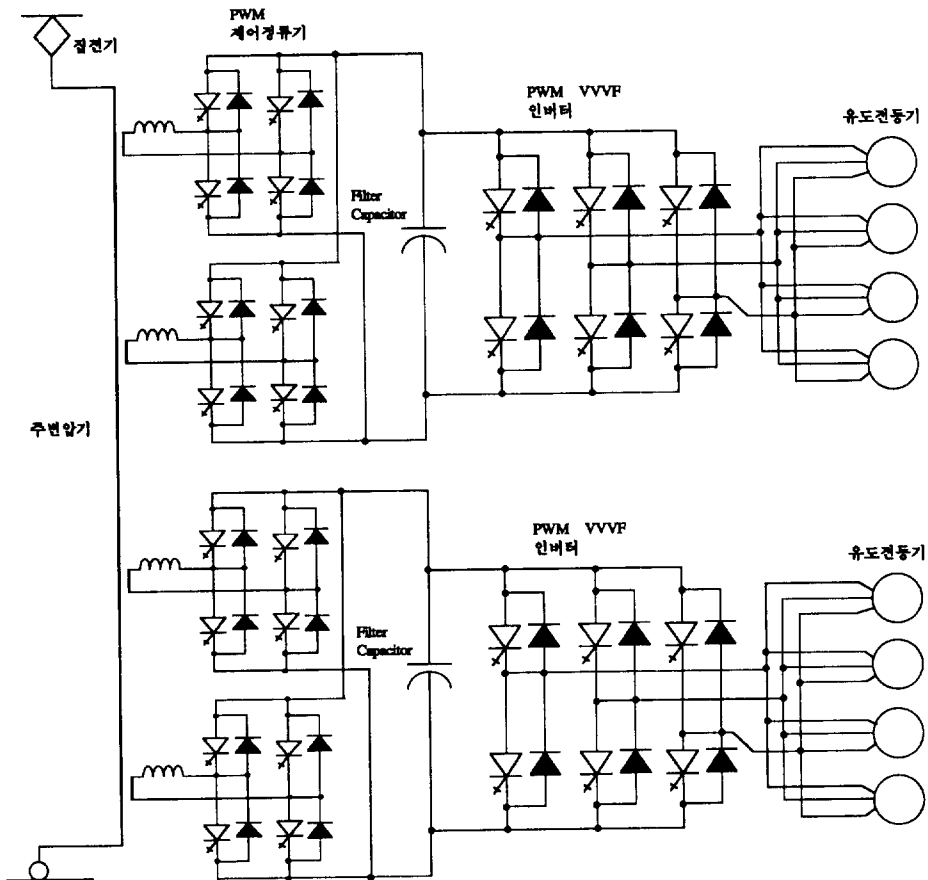


그림 2. 고속 전철용 유도전동기 구동시스템 전력회로

를 이용하여 입력측의 역율이 1이 되고 고조파가 최저가 되도록 정류하여 이를 평활용 Capacitor를 통하여 GTO 소자의 PWM 인버터에 공급한다. PWM 인버터에서는 전철이 요구하는 속도와 회전력을 얻

기 위해 출력 주파수와 전압을 가변시킨다. 전동기는 4~8대의 유도 전동기를 군 제어(Group Control)하고 개개의 전동기 용량은 200~300Kw 정도를 사용한다.
