

고속철도의 전력변환 및 제어기

김 윤 호*

(*중앙대 공대 전기공학과 교수)

1. 서 론

한국의 고속전철을 위하여 불란서, 독일, 일본 등의 3개국이 제시한 고속전철 구동 시스템은 모두 동기전동기 또는 유도전동기를 이용한 교류 구동 시스템이었다. 기존의 직류 구동 방식 전철 시스템도 점차 교류 구동 방식 전철 시스템으로 바뀌어 갈 것으로 예상되며 앞으로 건설될 지하철을 포함한 모든 전철은 직류 구동 방식 대신에 교류 구동 방식이 될 것으로 전망된다. 이는 최근의 전력전자 기술과 마이크로 컴퓨터어 기술에 힘입어 교류 전동기의 제어 기술의 진보가 이루어졌기 때문이다.

고속전철의 견인용 교류 전동기는 유도전동기와 동기전동기로 구별된다. 고속전철운용 및 개발에서 3개국 중 선발 주자라고 할 수 있는 불란서는 동기전동기를 견인 전동기로 채택하여 구동 시스템을 구성하고 있다. 이에 비해서 후발 주자인 독일은 이를 기술적으로 검토하여 유도전동기를 채택한 구동 시스템으로 결정하였다. 고속전철 개발에서 이보다 후발 주자인 일본은 불란서, 독일 양국의 구동 시스템을 면밀히 검토한 결과 독일과 마찬가지로 유도전동기 구동 시스템을 채택하기로 결정하였다. 이는 동기 전동기 시스템의 경우 회전자와 고정자에 동시에 공급하여야 하는 전원 장치의 복잡성과 슬립링이 필요하며 회전자의 돌극 구조로 인한 전동기의 신뢰성 문제인 것으로 보인다. 불란서의 경우 고속전철 개발 당시 동기전동기를 채택한 주된 이유의 하나는 그 당시 GTO와 같은 자기 소호

형 소자의 신뢰성이 완전하지 못하여 전압형 인버터와 유도 전동기의 구동 방식은 다량의 일반 사이리스터가 요구되고 제어가 복잡하다고 판단되었기 때문에 유도 전동기의 구동 방식이 부적절 하다고 결론지은 것으로 사려된다. 그러나 불란서의 경우도 차세대 고속전철의 구동 시스템은 능형 유도전동기를 채택할 것으로 전망된다.

유도전동기 또는 동기전동기의 어느 경우이나 고속 전철의 구동 시스템용 전력 변환 장치로서 갖추어야 할 기능과 구성은 크게 다음 4가지로 나누어진다.

- (1) 컨버터
- (2) 인버터
- (3) 전동기
- (4) 제어기

2. 컨버터

컨버터는 교류를 직류로 변환하는 기능을 가지며 또한 컨버터의 기능은 교직류 변환 기능뿐만 아니라 입력 역률제어 기능과 고조파 제어 기능까지도 포함된다.

고속전철에 이용되고 있는 컨버터의 회로 방식은 자력식과 타력식으로 구분된다. 타력식은 SCR을 이용한 방식으로 한국에 제안한 불란서 고속전철 시스템에서 채택하고 있다. 그림 1은 불란서에서 한국 고속전철로 제안한 전력 변환 시스템을 보여주고 있다. 강제전류 회로가 부착된 SCR을 이용하여 역률 1제어가 가능하도록 하고 있다. 이러한 위상 제어 방식은 제어가 용이하고 스위칭 손실을 줄일 수 있는 장점이 있으

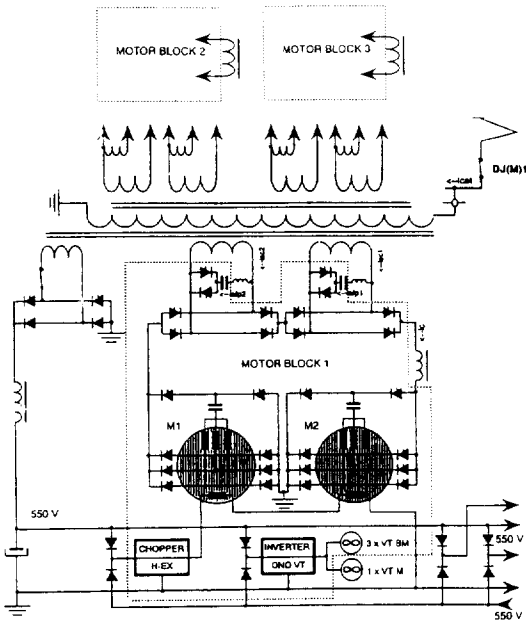


그림 1. 주회로

나 상대적으로 고조파 함유율이 높다. 불란서가 제한한 시스템은 25KV/60Hz 계통선으로 부터 전력을 수전하여 3개의 전력 블록으로 공급하며 입력측의 주요 전기적 특성은 다음과 같다.

- 변압기

* 정격1차 전압: 25kV(60Hz)

* 2차 권선 전압: 1,800V

- 평활 인덕터: 45mH

- 보조 필터 인덕터

* 인덕턴스: 10mH

* 정격 전류: 2,600A

- 고조파 필터 인덕터

* 인덕턴스: 2.08mH

* 작동 주파수: 180Hz

* 정격 전류: 440A RMS

그림 2는 독일과 일본에서 제안한 GTO를 이용한 자력식 컨버터를 나타내고 있다. GTO를 이용한 자력식 컨버터는 PWM 제어 방식을 적용하여 출력 전압과 입력 역률을 동시에 제어하며 고조파 성분을 제어하여 통신선 장애를 줄이도록 하고 있다. 그림 2는 4상한 컨버터로서 회생전력이 가능하다. 정상상태에서는 양방향 그룹의 컨버터가 정류기로서 작동하여 전력

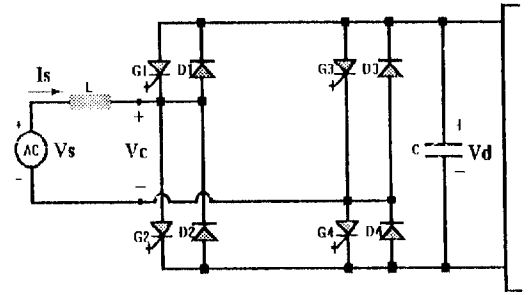


그림 2. PWM 컨버터의 회로도

이 교류측에서 직류측으로 흐르게 된다. 회생제동의 상태에서는 부방향 그룹의 컨버터가 작동하여 인버터 모드로 된다.

이때 교류측에서 공급되는 실효전력은

$$P = V_s I_s \cos \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(\frac{V_{\text{conv}}}{V_s} \sin \delta \right) \quad (1)$$

로되고 교류측에서 공급되는 무효전력은

$$Q = V_s I_s \sin \theta = \frac{V_s^2}{\omega L_s} \left(1 - \frac{V_{\text{conv}}}{V_s} \cos \delta \right) \quad (2)$$

로 된다.

여기에서 δ 는 입력전압 V_s 와 V_{conv} 전압 사이의 위상각 차이를 나타낸다.

독일에서 제안했던 구동 시스템은 그림 3과 같이 두대의 GTO 컨버터를 병렬로 연결하여 위상을 변화시켜 스위칭 함으로서 다음과 같은 추가적인 장점을 더하고 있다.

(1) GTO 사이리스터 전류 용량 감소

(2) 초퍼 모듈의 온도 저하

(3) 입력 전류의 고조파 성분 감소

4상한 제어기의 GTO 사이리스터에 가해지는 제어펄스는 펄스제어 인버터의 경우와 마찬가지로 기준파형과 삼각파형을 비교함으로써 얻어진다. 기준전압은 정현파 전압으로서 가변 주파수와 크기를 갖는다. 삼각파의 크기는 1이며, 삼각파의 주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_m = n * f_l \quad (3)$$

여기에서 $n = 3, 5, 7, 11, 13 \dots$ 등으로 주어지는 펄스 수이다.

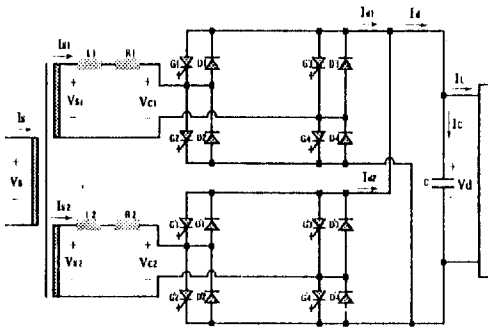
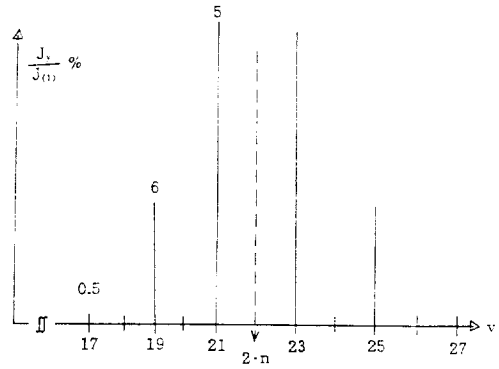
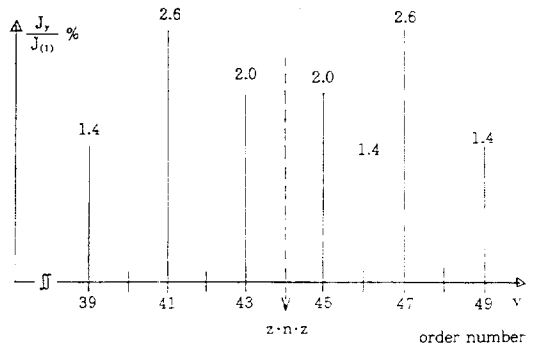


그림 3. 병렬 접속된 PWM 컨버터의 회로



order number



pulse number n=11, number of choppers in parallel z=2

그림 5. 컨버터의 고조파 성분

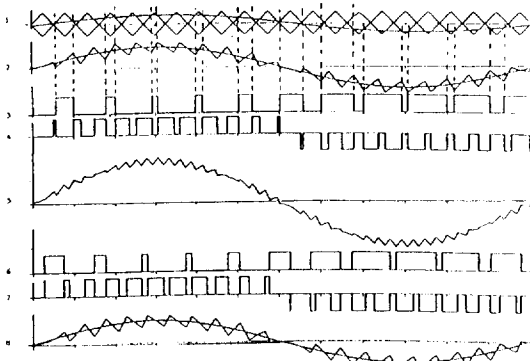


그림 4. 4상한 컨버터의 출력파형

그림 4는 4상한 컨버터의 출력파형을 나타낸다. 1에 나타나는 파형은 정현파의 기준전압과 거기에 적용되는 11배의 주파수를 갖는 삼각파를 보여주고 있다. 3은 4개의 주사이리스터중 하나의 사이리스터의 스위칭 펄스를 나타내고 있으며 4는 이 결과로 나타나는 컨버터의 입력전압을 나타낸다. 이 입력전압과 리액터의 입력측에 걸리는 전압과의 차이가 리액터에 걸리게 된다.

이미 언급한 바와 같이 입력 전류는 기본파와 고조파 성분으로 구성된다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 지배적인 고조파성분 전류는 선전류 주파수의 2n배의 양옆 밴드에서 나타나며 그 외의 밴드에서는 그 크기가 급격히 줄어들 수 있다.

보통 부하분담을 위해서 몇개의 컨버터를 병렬로 연결해서 사용하게 된다. 만일 4상한 제어기의 제어펄스가 시차를 두고 안배되면 전체전류의 주된 고조파의 크기는 크게 줄어들며 좀더

고주파수 쪽으로 이동하게 된다. 두개의 컨버터를 병렬로 하는 경우 시차를 두고 발생된 펄스는 'i'번째의 4상한 제어기를 $(i-1) \times \pi/z$ 만큼 양방향으로 삼각파를 이동함으로써 얻을 수 있다. 그림 4는 또한 두번째 컨버터의 사이리스터 전압(6), 컨버터 입력전압(7)과 변압기의 2차전류(8)를 나타낸다. 2개의 부분전류(2와8)를 합치면 최종 전류파형이 되며 고조파성분이 상당히 줄어들음을 알 수 있다. 전력 컨버터의 기술적인 데이터는 다음과 같다.

입력측(4상한 초파)

정격 입력전압	2×1432/60 Hz
출력전압	2600~2800 V
4상한 클록 주파수	300 Hz
정격출력	2×1400 kW
효율	98.2%

직류 링크 회로

직류링크 커패시터 C_D	9.6 mF
공진필터 커패시터 C_F	2.84 mF
공진필터 리액터 L_F	0.62 mH
공진전류 I_F	670 A
효율	99.5%
입력전압	2600~2800 V (dc)
출력전압	1~2200 V
정격출력	300 KVA
최대 클록 주파수	300 Hz
출력 주파수	0~135 Hz
효율	99%

주변압기는 1차 권선과 2개의 견인권선으로 구성되어 있다. 또한 2개의 직렬공진회로의 두개의 인덕턴스가 변압기 탱크내에 자리잡고 있다. 일본에서 제안한 컨버터 시스템도 독일과 마찬가지로 GTO를 이용한 PWM 컨버터이며 컨버터 4대를 병렬로 연결하여 고조파 성분을 더욱 감소하도록 하고 있다.

3. 인버터 시스템

인버터의 운전 및 회로 방식은 전동기가 유도전동기인가 동기전동기인가에 따라서 달라진다. 동기전동기와 유도전동기의 기계적인 구조를 살펴보면 회전자계를 공급해 주는 고정자는 두 경우 유사하나 회전자의 구조는 서로 다른 구조를 하고 있으며 전동기의 속도와 토크 제어 원리도 다르게 된다. 동기기에서는 역률과 입력 전류를 유도기에서는 슬립 주파수를 제어함으로써 기동에서 고속 운전시 까지 광범위한 영역에서 토크 제어가 가능하게 된다. 따라서 동기기의 역률은 임의로 제어할 수가 있으며 진상 동작을 하게 되면 인버터 스위치는 강제 소호 능력을 갖지 않아도 되는 장점이 있다. 이에 비해서 유도기의 역률은 항상 지상으로 보이기 때문에 인버터는 강제 소호 능력을 필요로 하게 된다.

3.1 동기전동기 구동 인버터 시스템

전술한 바와 같은 이유로 불란서가 제안한 전력변환 시스템에서는 자연전류형(Natural Commutation) 인버터를 구비하고 (그림 6) 두개의 인버터를 직렬로 연결하여 사용하고 있다. 또한

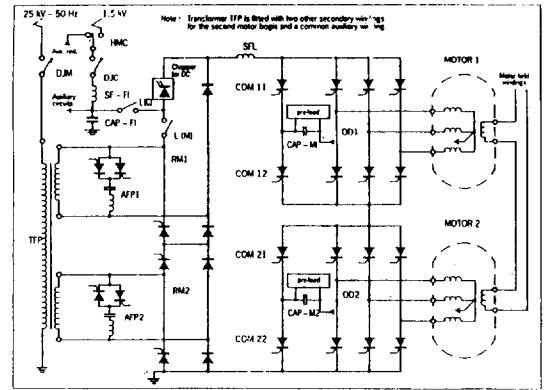


그림 6. 불란서에서 제안한 전력변환 시스템

각각의 인버터는 일반 사이리스터 6개로 3상 브리지를 형성하여 자연 전류 방식 인버터 스위칭을 행하고 있다. 그러나 동기기를 기동시킬때나 저속에서는 전류 회로를 필요로 한다.

각 인버터의 사이리스터는 원하는 방향으로 자속이 회전하도록 하는 전류가 흐르도록 제어되며 사이리스터가 도통하거나 오프되는 시간은 전동기의 속도에 관계없이 최대 견인력이 생기도록 하는 자속과 상대적인 정지자 권선의 위치에 의해서 결정된다.

동기전동기에 의해서 발생하는 토크는 다음 식으로 주어진다.

$$T = \frac{3 * I_s * V_1}{\cos \phi * \Omega} \quad (4)$$

여기에서 I_s = 정지자 전류

V_1 = 단상 내부 전압

ϕ = I_s 와 V_1 사이의 위상차

Ω = 전동기의 회전속도

인버터의 제어는 두개의 모드로 나누어 지며 이들은

- (1) 80 km/h 이상의 속도에서는 자연전류 모드이고
- (2) 80 km/h 이하에서의 속도에서는 보조전류 모드를 이용한다.

자연 전류 모드

자연 전류 모드에서의 인버터 제어는 토크가 감소하지않고 사이리스터가 전동기에 의해서 발생하는 전압에 의해서 턴 온-오프 되도록 I_s

와 V_1 사이의 위상 차이를 가한다. 이는 사이리스터의 역 바이어싱 시간을 확보할 수 있도록 전류의 위상이 전압보다 앞서게 하기위한 것이다. 이 모드에서는 정지자 상 사이의 전압을 측정함으로써 전류시점이 결정된다.

보조 전류 모드

이 모드에서는 사이리스터는 강제로 소호됨으로 전류 I_s 가 전압보다 위상각이 앞설 필요는 없다. 전동기 토오크는 회전자 자속 ϕ_r 과 정지자 자속 ϕ_s 와 벡터 적이 된다.

$$\vec{T} = K \cdot \phi_r \times \phi_s \quad (5)$$

3.2 유도전동기 구동 인버터 시스템

독일과 일본에서 제안해 온 고속전철 구동 시스템은 유도 전동기를 채택하고 있으며 이에 따라서 자기 소호형 GTO를 이용한 3상 PWM 인버터를 사용하고 있다.

가. 견인전동기

독일에서 제안한 시스템을 예로들면 전동기형은 4극의 3상 비동기 농형 유도전동기로서 전압원 인버터와 펄스폭 변조 방식에 의해서 운전되며 표1과 같은 규격을 가지고 있다.

또한 인버터측의 기술적인 데이터는 다음과 같다.

출력측(인버터)

입력전압	2600~2800 V(dc)
출력전압	0~2200 V
정격출력	3000 KVA
최대 클록 주파수	300 Hz
출력 주파수	0~135 Hz
효율	99%

전동기의 전기적인 특성은 그림 7에 주어지며 속도의 함수로서 선택된 전동기 전압과 여기에 따르는 전류, 토오크, 역률등이 표시되어 있다. 교류 3상 견인 전동기의 주된 구조는 그림 8과 같다.

고정자와 회전자 사이에는 공극이 있으며 유도기기의 토오크는 이 공극의 자장에 의하여 발생한다. 유도전동기의 운전모드는 정지자의 합성적인 결과 즉 공극자속, 계자전압, 전류 등을 포함한 다이어그램으로 표시할 수 있다. 전류 벡

표 1. 독일에서 제안한 전동기의 규격

	정 격	연 속	최 대
전 압	1730 V	2050 V	2200 V
전 류	493 A	415 A	381 A
속 도	1279min ⁻¹	1535min ⁻¹	4032min ⁻¹
토오크	9331Nm	7775Nm	2713Nm
전 력	1250kW	1250kW	1146kW
COS ϕ	0.98	0.88	0.82
주파수	43.4Hz	52.0Hz	136.1 Hz

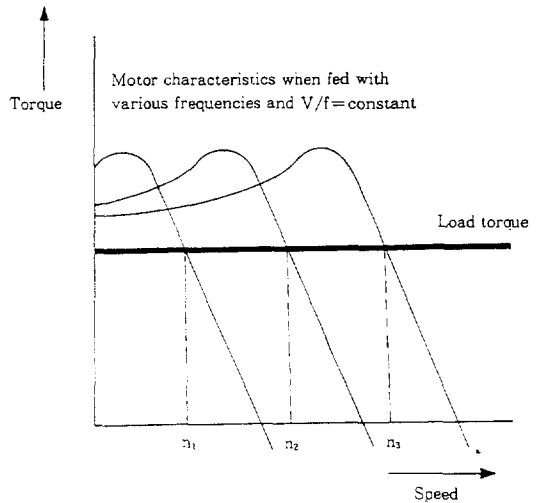


그림 7. 유도전동기의 토오크, 속도 특성곡선

터 I 는 그의 영향에 따라 분류되는 2가지 성분의 합으로 주어진다.

- 1) 토크 형성 전류성분 : 자속벡터와 수직이다.
- 2) 자화 전류성분 : 자속 벡터와 평행이다.

유도전동기의 토오크 M 은 다음식으로 주어진다.

$$M = \Phi \times I \times \sin \phi \quad (6)$$

합성자속 Φ 와 전류 I 가 수식적으로 시간에 대해서 일정하기 위해서는 고정자에 정현파 3상전압을 공급하는 것이 필요하다. 또한 가변속 구동을 위해서는 3상전압의 주파수와 크기가 계속적으로 가변될 수 있어야 한다. 유도전동기의 속도가 전동기의 토오크 M 과 독립적으로 제어되기

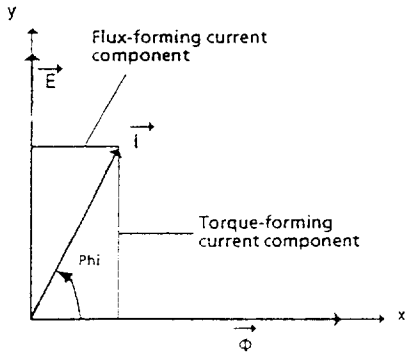
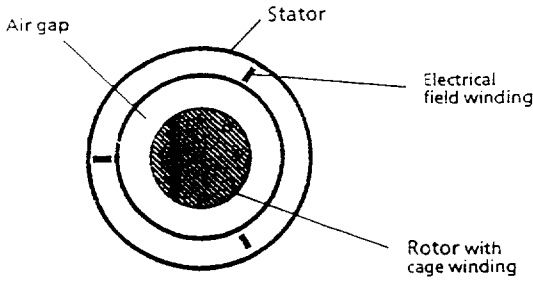


그림 8. 전동기의 구조와 벡터도

위해서는 주파수와 크기의 동시적인 변화가 이루어져야 한다. 이는 V/f 가 일정해야 해야 함을 의미한다.

유도전동기에 V/f =일정한 다양한 값의 주파수와 크기를 갖는 전압을 공급했을시 전동기의 최대 전압의 크기는 한계가 있다. 최대치는 정격 전압이며 여기서 부터는 전동기는 일정 전압으로 운전되며 이 때 자속은 주파수에 비례하여 감소한다. 따라서 이때는 약제자 운전이 되며 이와 같은 속도/토크 특성을 갖기 위해서는 넓은 영역에서 가변될 수 있는 3상 전압이 공급되어야 한다. 이 3상전압의 주파수는 0Hz에서 200Hz까지 가변될 수 있다.

나. 전압원 인버터

GTO 사이리스터를 이용한 전압원 인버터는 종래의 인버터에 비해 높은 효율을 갖는다. 그림 9는 이러한 전압원 인버터를 보여주고 있는데 R,S,T.상에 3상 전압을 공급한다. 인버터의 운전 모드는 주파수 조정과 진폭 조정등 크게 두개의 특성을 갖는다.

GTO 사이리스터를 단순한 스위치로 간주하

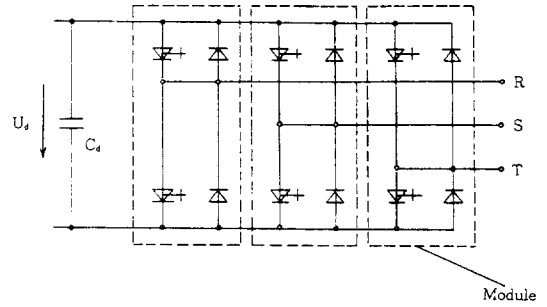


그림 9. 전압원 인버터

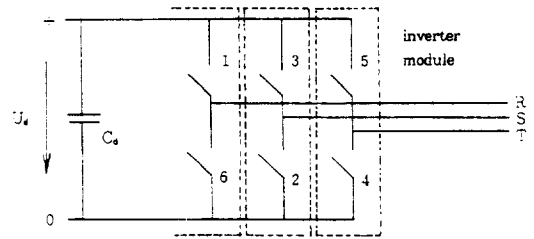


그림 10. 간략화된 인버터 회로

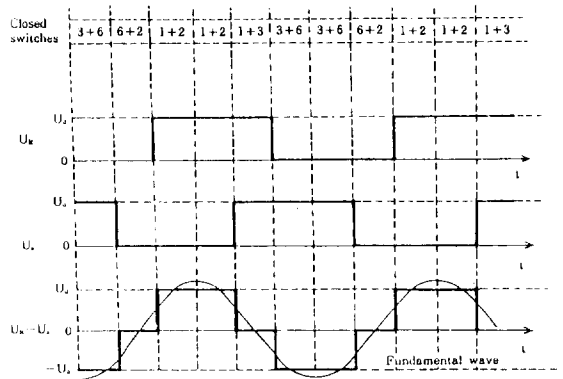


그림 11. 인버터의 출력전압

면 그림 9의 인버터 운전 모드는 그림 10과 같은 간략화된 회로로 표시될 수 있다. 정현파 출력 V_R, V_S, V_T 의 주파수와 진폭은 GTO 사이리스터의 적절한 스위칭 패턴을 선택함으로써 해서 임의적으로 변화시킬 수 있다. 그림 11은 이때의 선간 전압 V_{RS} 를 보여준다.

(1) 진폭과 주파수 조정

최대 출력 선간전압 V_d 는 직류 링크 전압 V_d 의 크기에 달려 있다. 그림 11에 표시한 파형으로부터 최대 출력 선간전압은 다음과 같이 계산

된다.

$$V_r = 0.78 \times V_d \quad (7)$$

선간 출력 전압 파형의 반주기 안의 펄스의 갯수를 펄스수 'n'이라 부른다. 따라서 반주기의 파형은 n=1, 3, 5, 7, 15, ... 등의 전압펄스열을 갖는다. 이때 인버터의 운전 모드는 'n' 펄스 변조라 부른다. 펄스폭은 인버터의 출력전압과 직류 링크 전압의 크기 즉 인버터의 제어요소에 의해서 결정된다. 실제의 운전에 있어서는 GTO의 스위칭 주파수는 한계를 가지며 현재 그 한계치는 몇 백 Hz이다.

따라서 제어요소는 펄스수와 출력주파수의 크기에 달려있다. 특히 저주파수와 적은 진폭에서의 운전은 고정된 n 펄스 변조방식에 의해서 작동되지 않고 GTO의 최대 스위칭 주파수에 의해서 좌우된다. 이는 스위칭 주파수가 출력 주파수에 동기화하지 않음을 의미하며 이 동작모드는 자유 또는 비동기 변조방식으로 불리운다.

인버터의 이러한 스위칭 모드 운전으로 출력 전압은 고조파 성분을 갖게 되며 이 전압 고조파는 다시 진동 토오크를 일으키게 되나 비동기 변조방식을 통하여 고조파 성분을 많이 줄일 수 있다.

인버터의 운전모드는 출력 주파수와 진폭의 크기에 따라 달라지며 이를 요약하면 다음 세가지로 주어진다.

1) 자유(비동기) 변조

GTO 스위칭 주파수가 최대가 되도록 운전되는 모드이다. 따라서 GTO 스위칭 주파수는 출력전압과 동기되지 않는다.

2) n-펄스 변조

GTO의 스위칭 주파수가 출력 주파수에 비례하여 운전되는 모드이며 스위칭 주파수는 고정된 펄스 수에 의해서 영향을 받는다. 만일 GTO의 스위칭 주파수가 허용범위를 넘으면, 더 낮은 펄스수가 선택 된다. 출력 전류의 고조파 성분은 펄스 수와 변조 방식에 의해 결정된다.

3) 기본 주파수 변조

출력파형의 반주기마다 단 하나의 펄스를 갖는 모드로서 출력 파형의 진폭은 일정하며 GTO 스위칭 주파수는 출력 주파수에 비례한다.

다. 직류 링크 회로

전압원 직류링크는 커패시터 C_d 로 구성되며 전원과 인버터를 연결하는 역할을 한다. 전원은 필요한 유효 전력을 공급하게 된다. 이때 유효전력 P_d 는 다음과 같이 계산된다.

$$P_d = V_d \times I_d$$

$$V_d = \text{직류 링크 전압}$$

$$I_d = \text{직류 링크 전류어 평균치}$$

이때 커패시터 C의 기능을 살펴보면 다음과 같다.

1) 직류링크 전압의 안정화

2) 유도 전동기에 필요한 자화 무효 전력의 공급

3) 인버터 입력전류 교류 고조파의 전원에의 영향감소

직류링크 커패시터는 인버터의 변조방식에 따라 고조파의 교류성분이 흐르게된다. 기존 주파수 변조방식 사용시의 커패시터 전류파형은 톱니파가 되며, 톱니파 교류 전류의 주파수는 인버터 출력 주파수의 6배이다. 링크 커패시터와 병렬로 연결된 흡수필터도 링크회로의 한 부분으로 4상한 컨버터와 함께 이용된다.

4. 맺음말

한국의 고속전철을 위하여 불란서, 독일, 일본 등 각국이 제안한 구동 시스템의 전력 변환 장치를 개괄적으로 살펴보았다. 고속전철 부분의 선발 주자인 불란서는 오래전에 동기 전동기 구동 시스템을 채택하였으나 그후 전력 변환 기술 및 전력용 변환소자의 발달로 인하여 후발 주자인 독일과 일본은 유도 전동기 시스템을 채택하였다. 이는 앞으로 고속전철 기술을 흡수하고 국산화함에 있어 구동 시스템 이외에 차량, 통신 분야 등 불란서 고속전철이 갖는 장점과 독일, 일본의 고속전철에서 채택하고 있는 유도 전동기 시스템과의 같이 전력전자의 발전에 따르는 전력 변환 장치를 포함한 새로운 구동 기술을 결합하도록 해야 함을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Wolfgang Lienau, Wolfgang Runge, "Development Trends of High Power Traction Converter", EPE, vol.2. pp. 573-pp.578, 1991.
- [2] S.Saadate, R. le Doeuff, "A 400V-800A GTO Chopper for Traction Applications", DPE, pp.395-pp.400, 1989.
- [3] Yoon-Ho Kim, Chi-Young Song, "Control of Parallel GTO Converters for High-Speed Train System", in Korean-Germany Workshop on New Transportation System, pp.59-pp.64. 1993.
- [4] G.Bocchetti, A.Coffetti, "A Now GTO Drive For High Power Asynchronous Motor Locomotive", EPE vol.2, pp. 583-pp.588, 1991
- [5] A.Steimel, "Application of Evaporative-Cooled GTO Inverters and Transistor Auxiliary Inverter on A Diesel-Electric Locomotive", EPE, pp. 1575-pp.1580, 1989.
- [6] Jugen K. Steinke, "Control Strategy for A Three Phase AC Traction Drive With Three-Level GTO PWM Inverter", PESC, pp.431-pp.438, 1988.
- [7] R.Marquardt, Siemens AG, "High Power GTO Converters for the New German High Speed Train ICE", EPE, pp. 583-pp.587, 1989.
- [8] 기술조사보고 제 2호, "고속전철 기술현황", 대한전기학회, 1992. 7.
- [9] "고속전철의 성능향상을 위한 전기 및 전자 기술연구", 과학기술처, 1991.



김윤호(金倫鎭)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(공학박). 현재 중앙대 공대 전기공학과 부교수.