

전력전자 시스템과 변조기술

金 倫 鎬

中央大學校 工大 電氣工學科

I. 서 론

전송 시스템에서의 변조는 신호 정보를 전송할 수 있도록 반송파(carrier wave)의 특성을 변경 또는 개조 시키는 것이라고 할 수 있다. 여기에서 반송파는 정현파 또는 펄스파형으로 구성된다. 만일 반송파가 정현파형이면, 정현파형의 크기 또는 주파수가 변조된다. 펄스 파형의 경우는 펄스의 크기 또는 폭이 변조된다.

이 경우 변조의 목적은 크게 세가지로 구분될 수 있다. 첫째는 변조 신호 자체로는 적합하지 않는 매체를 통한 변조 신호의 전송 수단으로서 반송신호를 사용하는 경우이다. 라디오 또는 TV 전파의 경우가 여기서 해당된다.

두번째 목적은 주파수가 다른 여러개의 반송파를 사용하여 여러가지 많은 정보를 하나의 공동 매체를 통하여 전송할 수 있도록 하기 위한 것이다.

세번째는 전기측정 또는 데이터 처리에서와 같이 신호 정보를 잡음 또는 왜란에 민감하지 않는 스펙트럼으로 전송하기 위한 목적이다. 예를 들면 전압의 크기를 주파수로 바꾸는 경우이다.

지금까지 기술된 변조의 목적은 주로 통신 계통에서 사용되는 경우에서 정보신호의 전송이 큰 목적이 라고 요약된다. 그러나 전력전자에 있어서의 변조는 앞에서 기술한 것과는 크게 다르다. 우선 전력전자 시스템의 경우는 정보신호의 전송 목적보다는 실제 원하는 파형을 만들어 내기 위한 것이 중요한 목적 이라고 할 수 있다. 여기에서 전력전자 시스템에서의 변조기술을 기술하기 전에 먼저 전력전자 시스템에 대해 요약해서 설명하고자 한다.

II. 전력전자 시스템 개요

전력전자 공학은 반도체 전자회로를 이용하여 전력의 변환 및 제어를 하는 분야로 정의될 수 있다. 전력전자 공학은 전력변환 및 전기기기 제어등에 있어서의 전력제어의 개념을 혁신적으로 진전시켰으며 전력, 전자와 제어의 종합으로 구성된다.

최근에 이르러 새로운 반도체 소자 기술 및 제어 기술등의 발달로 인하여 전력전자 분야는 큰 성장을 가져왔으며 이는 전력전자 기기의 팔목할 만한 시장의 확대로 연결되어 왔다. 예를 들면 프로세스 제어에 있어서 콤프레셔나 펌프에서와 같이 가변속 모터 구동 장치에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 자동화된 공장에서의 로봇트는 서보 장치에 의하여 구동되며 반도체 기술의 발전은 컴퓨터, 통신 계통, 상용 전자의 발달을 가져왔으며 이 모든 것은 양질의 전원장치를 필요로 한다.

에너지 가격의 상승은 효율적인 에너지 사용을 요구하고 있으며 전력전자 시스템은 효율적인 에너지 이용을 위한 가장 저렴한 방법을 제공한다. 선형 전자 시스템에 있어서는, 반도체 소자는 선형 운전영역에서 이용되며 이때 반도체 소자는 가변저항의 역할을 하게 된다. 이 경우 원하는 출력파형을 손쉽게 얻을 수 있다는 장점은 있으나 효율이 낮아지는 단점이 있다. 이러한 저효율 운전은 몇 십 와트 정도의 저전력 회로에서만 사용될 수 밖에 없다. 그러나 전력전자 회로에서는, 전력은 몇 와트에서부터 몇 백 메가와트까지 넓은 범위에서 전력이 제어됨으로써, 선형 전자 시스템에서와는 달리, 반도체소자는 완전도통상태(saturation) 또는 완전 오프 상태에서

운전되어야 한다. 이러한 운전은 에너지 효율을 크게 향상시키며 히트 싱크(heat sink)와 같은 하드웨어의 필요성을 크게 간략화하는 장점을 가짐으로 해서 매우 큰 중요성을 갖는다.

따라서 전력전자는 전력용 반도체의 스위칭을 이용하며, 반도체 기술의 발전에 따라 반도체소자의 전력용량과 속도에 있어서 괄목할 만한 성장을 가져왔다. 또한 마이크로프로세서 기술의 발전은 이런 전력용 반도체소자의 제어 및 운전에 지대한 영향을 미치고 있다.

1. 전력전자 컨버터의 분류

전력전자 시스템은 하나 또는 그 이상의 반도체 소자를 이용한 전력전자 컨버터로 구성된다. 컨버터는 전력전자 시스템에 있어서 핵심부분을 차지한다. 일반적으로 전력전자 컨버터는 일정한 크기, 주파수와 상수를 갖는 전기적인 입력을 원하는 크기, 주파수와 상수를 갖는 전기적 출력으로 바꾸는 역할을 한다. 이러한 컨버터를 통한 전력의 흐름은 양방향으로 될 수 있어서 입력의 역할과 출력의 역할이 서로 바뀔 수도 있다. 예를들면 AC-DC 컨버터에 있어서, 전력의 흐름이 AC 쪽에서 DC 쪽의 방향이면 이때의 컨버터는 정류기로 불리며 반일 전력의 흐름이 DC 쪽에서 AC 쪽의 방향이면 인버터로 불리운다.

전력전자에 사용되는 컨버터의 종류는 사용되는 반도체 소자의 종류, 컨버터의 기능, 컨버터에 사용되는 소자가 어떤 방식으로 동작되는가 등에 따라서 여러가지 방법으로 분류될 수 있다.

컨버터에 사용되는 반도체 스위치의 동작방식에 따라서 컨버터를 분류해 보면 크게 상용주파수 컨버터와 스위칭 컨버터 두가지로 분류된다.

상용주파수 컨버터는 컨버터의 한쪽 터미날에 상용주파수 전압이 주어지고 이때 반도체 스위치는 상용주파수 전압에 동기되어 동작한다. 따라서 이때 스위치는 상용주파수인 60 사이클로 동작한다. 스위칭 컨버터는 컨버터의 스위치가 상용주파수 보다 높게 동작되는 경우이며 이때 출력주파수는 직류에서부터 상용주파수 이상까지 될 수 있다.

또 다른 분류방식은 변환 기능에 따라 분류하는 방식이다. 이 방식에 따르면 전력 컨버터는 다음과 같이 6가지로 구분될 수 있다.

- (1) 정류기
- (2) AC-DC 컨버터
- (3) AC-AC 컨버터

- (4) DC-DC 컨버터
- (5) DC-AC 컨버터
- (6) 무점접 스위치

Ⅲ. 전력전자 시스템에서의 변조기술

전력전자 시스템에서의 변조 목적은 앞에서 언급한 바와 같이 높은 전력회로에 있어서, 반도체 소자를 선형 작동 영역에서 사용시 효율이 크게 낮아지기 때문에 효율을 높이기 위해서는 완전 도통상태 또는 완전 오프(off) 상태에서 운전되어야 하는 특성 때문이라고 요약된다. 다시 말하면 전력전자 시스템에서의 변조방식은 위에 언급한 바와같은 반도체 스위치의 운전특성을 포함하는 방식이어야 한다.

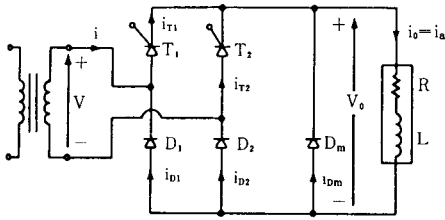
따라서 전력전자 시스템에서는 이와같은 특성을 포함하는 펄스폭 변조방식이 주로 많이 이용되고 있으나 전력변환기의 특성 및 제어 방식에 따라 펄스폭 방식 외에도 다양한 변조 방식이 이용되고 있다.

1. AC/DC 변환시의 변조기술

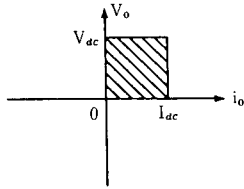
교류를 직류로 변환하는 경우에 적용되는 변조기술은 크게 두가지로 구분된다. 하나는 위상각 제어이며 다른 하나는 펄스폭 변조이다. 위상각 제어는 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 입력전압을 한 주기마다 일정부분을 출력에 연결하여 직류 전압을 얻는 방식으로서 SCR과 같은 사이리스터를 이용시 주로 채택된다. 사이리스터 정류기기의 출력전압은 위상각 제어 즉 사이리스터의 지연각 또는 점호각을 제어함으로써 가변된다. 이러한 위상각 제어 정류기는 구조가 간단하고 가격도 저렴하며 정류기의 효율도 95% 이상으로서 전동기의 가변속 제어등을 비롯한 산업 전력제어 시스템에 광범위하게 사용되고 있다.

그러나 이러한 위상각 제어 방식은 컨버터의 입력파형의 한주기당 하나의 펄스만이 만들어지기 때문에 저차수의 고조파 성분은 생기기 되며 이러한 저주파수의 고조파 성분은 필터로 제거하기가 어려운 단점이 있다.

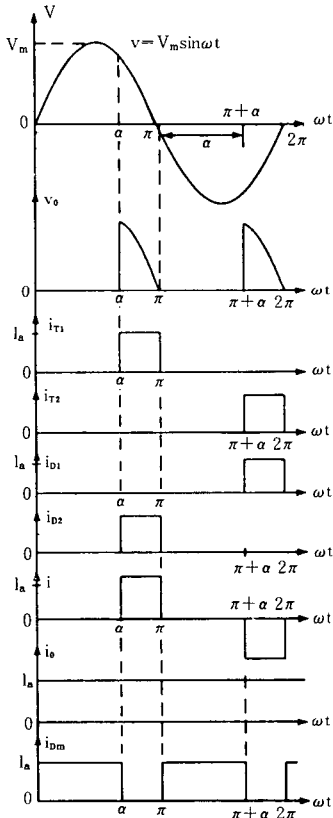
펄스폭 변조 방식을 사용하는 경우에는 그림2에서와 같이 입력파형의 한주기당 많은 펄스가, 만들어질 수 있으며 출력전압은 펄스의 크기를 변화시킴으로써 제어되며 저차수의 고조파 성분은 펄스의 갯수를 조절하여 없애거나 줄일 수 있다. 이때 펄스의 갯수가 증가함에 따라 고차수의 고조파 성분은 증가하나 필터로서 쉽게 줄일 수 있다.



(a) Circuit



(b) Quadrant



(c) Waveforms

그림 1. 단상 AC-DC 컨버터 위상제어

2. DC-DC 변환시의 변조기술

DC-DC 변환기는 주어진 직류 입력전압을 가변 직류전압으로 바꾸는데 사용되며 초퍼(chopper)라고

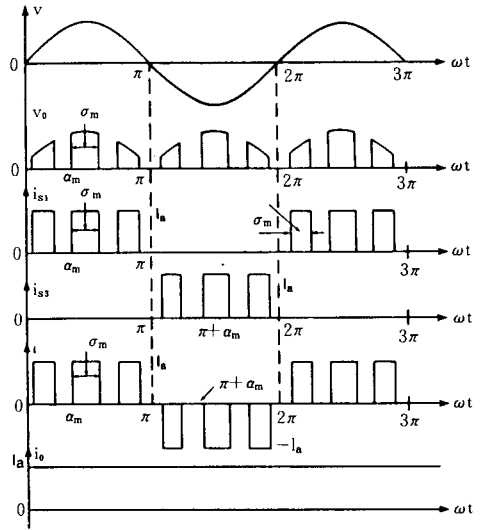


그림 2. 펄스폭 제어

도 불리운다. 초퍼는 직류 변압기라고도 할 수 있으며 승압 또는 강압이 모두 가능하여 직류 전동기의 구동 및 스위치 모드 직류 전원으로서 널리 사용된다.

DC-DC 변환기는 주로 다음 네가지로 구분된다.

- ① 강압(buck) 컨버터
- ② 승압(boost) 컨버터
- ③ 승강압 컨버터
- ④ Cuk 컨버터

위에 언급된 네가지형의 컨버터는 기능과 구조면에서 약간의 차이는 있으나 주로 다음 두가지 변조방식이 적용된다.

1) 펄스폭 변조방식

초핑 주파수를 일정하게 하고 도통 시간을 변화시켜 펄스폭을 가변시키는 방식으로 일정 주파수 제어로도 불리운다.

2) 주파수 변조방식

도통 또는 비도통 시간을 일정하게 고정시키고 초핑 주파수를 가변시키는 가변 주파수 운전 방식이다. 이 방식의 경우는 최대 출력을 얻기 위해서는 초핑 주파수가 넓은 범위에 걸쳐 변화하여야 함으로 해서 미리 예상치 않은 고조파를 발생시킬 염려가 있으며 이는 필터 설계에 어려움을 야기시킨다.

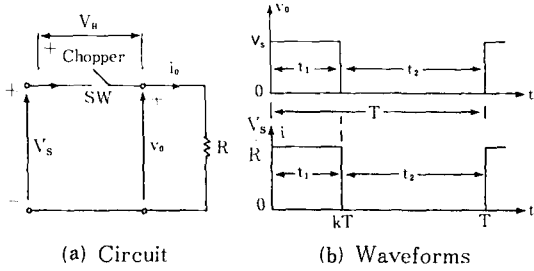


그림 3. 강압 초퍼

3. DC-AC 변환시의 변조 기술

DC-AC 변환기는 흔히 인버터라 불리우며 교류 전동기의 가변 속도 제어, 유도 가열, UPS 등의 산업 응용 시스템에 널리 이용된다. 인버터의 기능은 직류 입력전압을 원하는 크기와 주파수를 갖는 교류 전압으로 바꾸는 것이다. 이때 출력 전압과 주파수는 고정될 수도 있고 가변될 수도 있다.

출력 전압을 가변시키는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 인버터의 입출력 비율을 고정시키고 직류 입력 전압을 변화시킴으로써 가변 출력 전압을 얻는 방식이다. 또다른 방식은 직류 입력 전압이 정전압으로 고정되어 있을 경우에 이용되는 방식으로서 인버터의 입출력 비율을 변화시킴으로써 가변 출력 전압을 얻는 방식이다. 인버터의 입출력 비율을 변화시키는 방식은 다음의 여러가지로 요약된다.

- 단일 펄스폭 변조(single pulse width modulation)
 - 다중 펄스폭 변조(multiple pulse width modulation)
 - 정현파 펄스폭 변조(sinusoidal pulse width modulation)
 - 수정된 정현파 펄스폭 변조(modified sinusoidal pulse width modulation)
 - 과 변조(overmodulation)
 - 델타 변조(delta modulation)
 - 고조파 제거 방식(harmonic elimination method)
- 이외에도 전류 왜형률의 최소화(current distortion minimization), 또는 전력 손실의 최소화를 목표로 하는 변조 방식들이 있다. 또한 위에서 언급된 변조방식은 주로 아날로그 변조 방식이라 할 수 있으며 현재 많이 사용되고 있는 마이크로 프로세서 등의 디지털 제어 방식에는 직접적으로 사용되기 힘들며 디지털 제어에 적합한 방식들이 제안되어 왔다. 디지털

제어 방식들을 요약하면 다음과 같다.

- 자연 샘플링 (natural sampling)
- 균등 샘플링 (uniform sampling)
- 직접 변조 (direct modulation)

지금까지 여기에 요약된 방식외에도 여러 방식들이 있으나 여기에서는 흔히 쓰이는 몇가지 방식에 대하여 좀더 구체적으로 기술하고자 한다.

1) 단일 펄스폭 변조 방식

단일 펄스폭 변조방식은 그림 4에서와 같이 출력 파형은 반주기 마다 하나의 펄스만으로 구성되며 출력 전압은 이 펄스의 폭을 가변시킴으로써 제어된다. 단일 펄스폭 변조 방식의 장점은 스위칭 주파수가 낮고 스위칭 손실이 적어 특히 고전력 인버터에서는 큰 장점이 될 수 있으나 고조파 성분이 높다는 단점이 있다. 특히 전동기 제어에 이용될 경우 운전 특성 특히 저속에서의 운전 특성에 나쁜 영향을 준다.

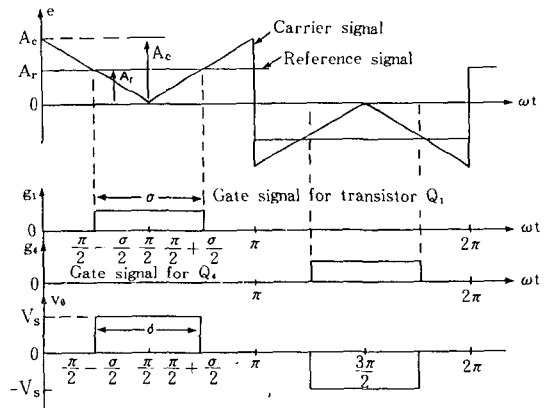


그림 4. 단일폭 펄스 변조

2) 다중 펄스폭 변조

다중 펄스폭 변조 방식은 그림 5에서 처럼 출력 전압의 반주기마다 하나 대신 여러개의 펄스를 이용함으로써 고조파 성분의 크기를 줄일 수 있다. 그러나 스위칭 주파수와 손실이 증가하는 단점이 있다. 이 경우 각각의 펄스폭은 일정하며 제어가 비교적 용이하다.

3) 정현파 펄스폭 변조

정현파 펄스폭 변조는 다중 펄스폭 변조방식의 경우에서 각각의 펄스폭을 일정하게 유지시키는 것과는 달리 정현파형의 크기에 비례해서 그 크기를 변화시키는 변조 방식이다. 실제의 파형을 만드는

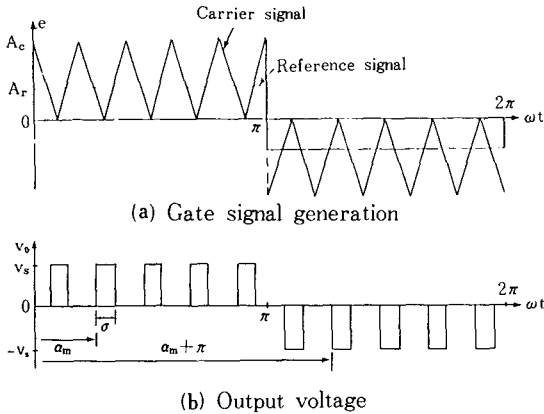


그림 5. 다중 펄스폭 변조

방식은 그림 6에서 나타난 바와 같이 일반적으로 삼각파형과 정현파형을 비교하여 게이팅 신호를 만들어 내며 이렇게 함으로 해서 고주파 성분 그중에서도 저주파의 고조파 성분을 크게 줄일 수 있다. 이 변조 방식은 현재 인버터의 제어에 가장 많이 이용되는 방식이다. 또한 이 방식은 아날로그 회로를 이용하는 경우에는 비교적 쉽게 실현될 수 있으나 마

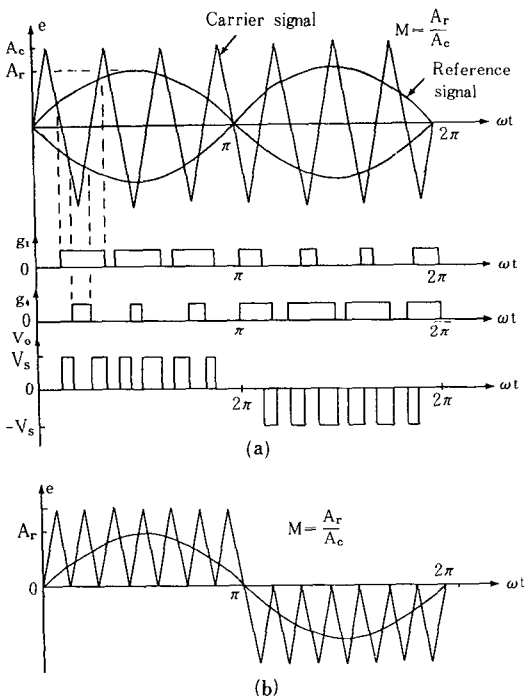


그림 6. 정현파 펄스폭 변조

이므로 프로세서를 비롯한 디지털 제어 방식에서는 그의 실현이 용이하지 않아 균등 샘플링, 자연 샘플링 방식과 같은 다양한 변형된 정현파 펄스폭 변조 방식이 사용되고 있다.

4) 고조파 제거방식

컨버터의 이용분야에 따라서는 고조파 왜형율이 매우 낮을 필요가 있으며 이때 고주파수의 고조파 성분을 제거하기 위해서는 인버터 출력측에 저역필터를 필요로 하며 만일 저주파수 고조파 성분을 다른 방법으로 줄이거나 제거시킬 수 있다면 필터의 크기는 크게 감소될 수 있다.

이러한 저주파수의 고조파를 제거하기 위한 방식으로 푸리에 급수를 이용하여 펄스폭을 구한다. 그러나 이 방식은 기본파형의 성분이 비선형적으로 증가하며 아날로그 방식으로는 제어가 매우 어렵기 때문에 실제로는 정현파 변조방식에 비해서는 많이 이용되지 않는 방식이다.

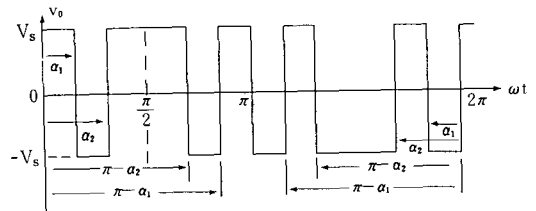


그림 7. 고조파 제거 방식

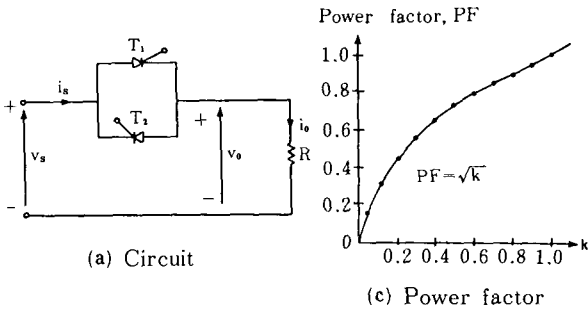
4. AC-AC 변조기술

AC-AC 변환기는 주어진 교류 입력전압을 원하는 교류 출력전압으로 바꾸는 장치로서 출력전압의 크기만을 바꾸는 전압제어 교류변환기와 출력전압의 크기와 함께 주파수의 크기도 함께 변화시키는 사이클로 컨버터로 구분된다.

1) 전압제어 교류변환기 변조기술

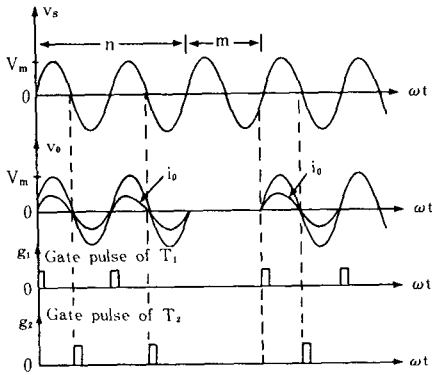
전압제어 교류변환기 변조방식은 크게 세가지로 나눌 수 있다. 하나는 온/오프(on/off) 변조방식으로 그림 8에서와 같이 일정시간 동안은 입력 전압이 출력전압으로 나타나고 또 다른 시간동안은 입력전압이 출력전압으로 나타나지 않는 방식이다. 이와 같은 변조방식은 높은 관성을 갖는 시스템에 주로 적용된다.

두번째의 방식은 그림 9에서 처럼 입력전압의 각 주기마다 일정 부분만이 부하에 나타나게 하는 방식



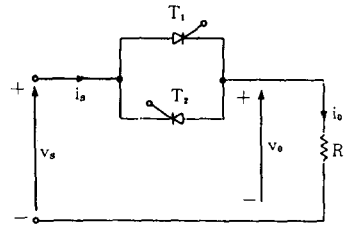
(a) Circuit

(c) Power factor

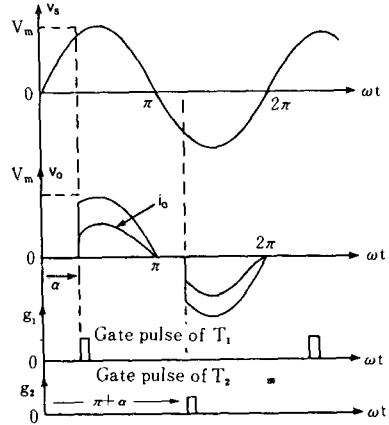


(b) Waveforms

그림 8. 전압제어 교류변환기 온/오프 제어



(a) Circuit



(b) Waveforms

그림 9. 전압제어 교류변환기 위상제어

으로서 위상각 제어방식으로 분류되며 제어가 비교적 용이하나 출력전압이 낮을 때는 역율이 낮다는 단점이 있으며 고조파 성분도 큰 편이다.

세번째의 방식은 펄스폭 변조방식으로 그림10에서 볼 수 있는 바와 같이 스위칭 손실이 증가하는 단점은 있으나 저주파수의 입출력 고조파 성분을 줄일 수 있으며 입력 역율도 높일 수 있는 장점이 있어 최근의 고속 스위칭 소자의 발전과 함께 점차 산업계에 많이 채용되고 있다.

2) 사이클로 컨버터 변조기술

사이클로 컨버터는 주어진 전압의 크기와 주파수를 갖는 교류전압을 원하는 전압의 크기와 주파수를 갖는 교류전압으로 중간 단계를 거치지 않고 직접 변환시키는 컨버터이다.

사이클로 컨버터는 직접 주파수 변환기 라고도 불리우며 이는 교류를 직류로 바꾸고 이를 다시 교류전압으로 바꾸는 주파수 변환기에 비하여 이러한 두 단계를 거치지 않고 직접 변환 시키기 때문이다.

사이클로 컨버터는 사이리스터를 채용하는 자연전류(natural commutation)형 주파수 변환기와 강제전

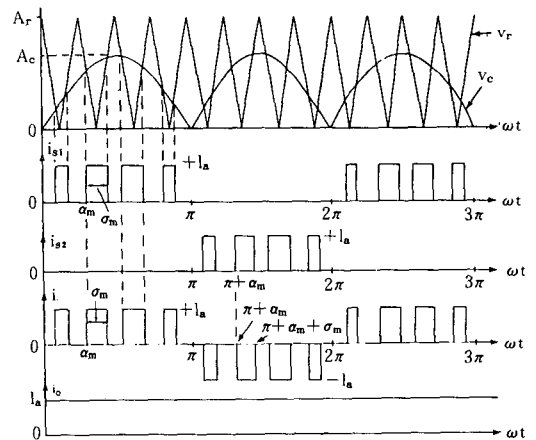


그림10. 전압제어 교류변환기 펄스폭 제어

류(force commutation)형 주파수 변환기로 구분된다.

(1) 자연전류형 사이클로 컨버터

현재 주로 사용되고 있는 사이클로 컨버터는 자연

전류형으로서 사이리스터의 턴오프(turn-off)를 입력 전압을 이용해서 수행하는 방식을 말한다. 입력전압의 상수에 따라서 단상 또는 삼상이 많이 쓰인다.

그림11은 단상 사이클로 컨버터로서 위상제어를 통하여 출력전압이 제어되며 위상각이 일정하여 제어가 용이한 장점은 있으나 고조파 성분이 많으며 출력주파수가 입력주파수보다 낮다는 단점이 있다.

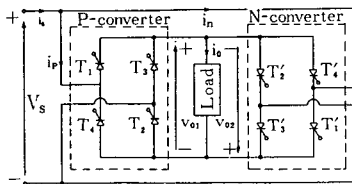
그림12는 삼상 사이클로 컨버터로서 이 경우도 기본적으로 위상 제어라고 할 수 있으나 그림11의 단상 사이클로 컨버터와 다른점은 위상 제어 출력전압의 크기가 원하는 출력전압의 크기와 가장 가까울 수 있도록 위상각을 가변 시킴으로써 출력전압의 고조파 성분을 줄인다는 것이다.

(2) 강제전류형 사이클로 컨버터

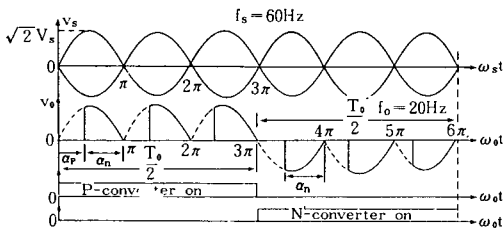
자연전류형 사이클로 컨버터는 제어가 상대적으로 용이하다는 장점이 있으나 출력주파수가 입력주파수보다 낮고 고조파 성분이 크며 입력 역률이 낮다는 단점들이 있다. 여기에 비하여 강제전류형 사이클로 컨버터는 펄스폭 변조 방식을 적용함으로써 입력 역률도 개선시킬 수 있으며 출력주파수도 입력주파수보다 높게 만들 수 있고 고조파 성분도 줄일 수 있어 최근에 개발되고 있는 고속 스위칭 소자와 마이크로 프로세서등의 결합을 통하여 점차 이용이 확대되고 있다.

IV. 결 론

전력전자 시스템에서 전력 컨버터는 핵심 부분을



(a) Circuit



(b) Waveforms for resistive load

그림11. 단상 사이클로 컨버터 위상제어

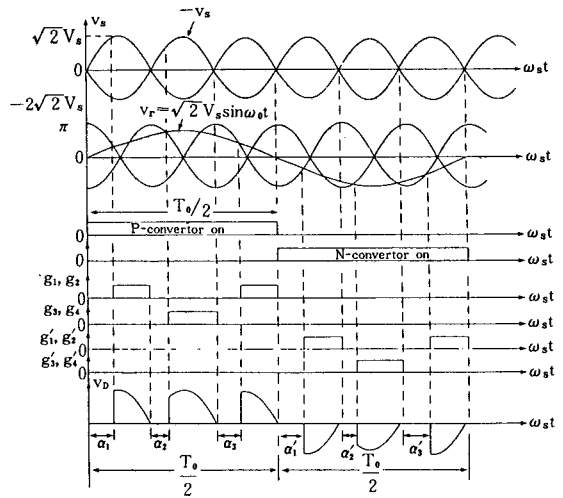


그림12. 삼상 사이클로 컨버터 위상제어

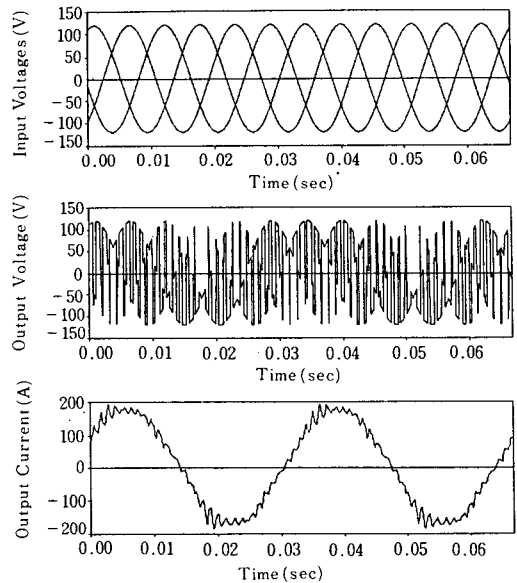


그림13. 강제전류형 사이클로 컨버터 출력파형

차지한다. 본고에서는 전력 컨버터에서 사용되는 여러가지 변조방식을 간략하게 살펴보았다. 앞에서 언급된 바와 같이 전력 컨버터의 구조에 따라 다양한 변조 방식이 이용되고 있으나 현재 및 앞으로의 경향은 펄스폭 변조방식이 광범위 하게 이용될 전망이다.

펄스폭 변조 방식은 고조파 성분의 저감, 입력 역률의 향상등의 중요한 장점이 있으며 주된 단점으로

는 스위칭 주파수의 향상으로 인한 스위칭 손실의 증가라고 할 수 있다. 그러나 고속 전력용 스위칭 소자 및 마이크로 프로세서를 비롯한 하드웨어의 발달과 최신 제어 기술의 도움으로 펄스폭 변조 방식의 이용은 점차적으로 증가할 것으로 보인다.

또한 스위칭 손실을 줄이기 위한 방식으로 공진형 컨버터에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있어 이에 대한 실용화 및 광범위한 응용도 그리 멀지 않을 전망이다.

參 考 文 獻

[1] T.M. Undeland and N. Mohan, "Overmodulation and loss consideration in high frequency modulated transistorized induction motor drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 447-452, October 1988.

[2] B.M. Bird and K.G. King, *An Introduction to Power Electronics*, John Wiley & Sons, New York, 1983.

[3] R.P. Severns and Ed Bloom, *Modern DC-to-DC Switchmode Power Converter Circuits*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1985.

[4] H. Patel and R.G. Hoft, "Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I harmonics elimination," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-9, no. 3, May/June 1973.

[5] H. Patel and R.G. Hoft "Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part II voltage control techniques," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. IA-10, no. 5,

September/October 1974.

[6] I.J. Pitel, S.N. Talukdar, and P. Wood, "Characterization of programmed-waveform pulsewidth modulation," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. IA-16, no. 5, September/October 1980.

[7] M. Boost and P.D. Ziogas, "State-of-the-Art PWM Techniques: A Critical Evaluation," *IEEE Power Electronics Specialists Conference 1986*, pp. 425-433.

[8] N. Mohan, et al., *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John-Wiley & Sons, 1989.

[9] B.M. Bird, et al., *An Introduction to Power Electronics*, John Wiley & Sons, 1983.

[10] S.B. Dewan, et al., *Power Semiconductor Drive*, John Wiley & Sons, 1984.

[11] M.H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Application*, Prentice-Hall, 1988.

[12] P.D. Ziogas, "The delta modulation technique in static PWM inverters," *IEEE Trans. on IA*, vol. 17, no. 2, 1981.

[13] H.S. Patel, et al., "Generalized technique of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I-harmonic elimination," *IEEE Trans. on IA*, vol. 9, no. 3, 1973.

[14] H.S. Patel, et al., "Generalized technique of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part II-Voltage control techniques," *IEEE Trans. on IA*, vol. 10, no. 5, 1974.

[15] J.M. D. Murphy, et al., "A comparison of PWM strategies for inverter-fed induction motor," *IEEE Trans. on IA*, vol. 9, no. 3, 1983. Ⓢ

筆 者 紹 介



金 倫 鎬

1949年 6月 20日生

1974年 서울대 공대 전기공학과 졸업

1987年 Texas A&M University 졸업 (공학박사)

1991年 5月 현재 중앙대 공대 전기공학과 조교수