

전력전자공학의 기초

Basics of Power Electronics

개요 _1.1

기초 회로이론 _1.2

응용 분야 _1.3

연습문제

학습목표

- 전력전자 시스템의 구성과 기능 및 전력변환 방식을 이해할 수 있다.
- 순시전력과 평균전력, 왜율과 역률 등을 이해할 수 있다.
- 인덕터와 커패시터의 특성 및 인덕터와 커패시터에서 전압과 전류의 관계를 이해할 수 있다.
- 유효전력과 무효전력 및 정현파 교류에 대해 해석할 수 있다.
- 전력전자공학과 인접 학문을 접목한 응용 분야를 알 수 있다.

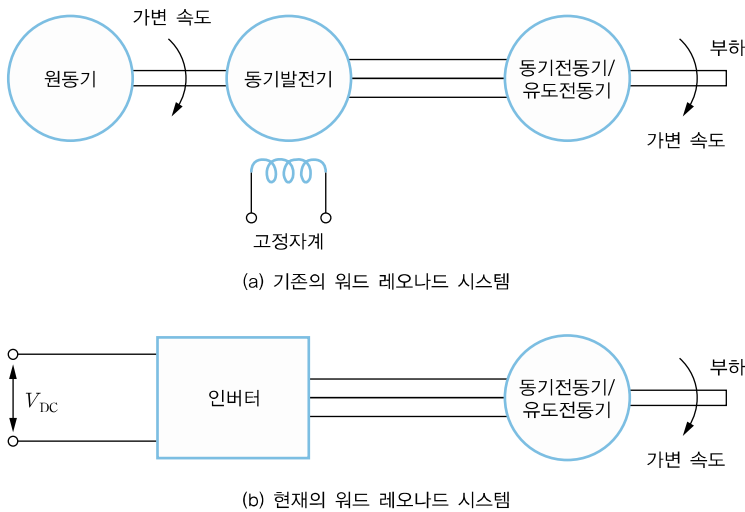
1.1 개요

1.1.1 전력전자공학이란?

인류는 아주 오래전부터 편리한 생활을 하기 위해 끊임없이 많은 노력을 해왔다. 그 결과 화석연료, 원자력, 신재생에너지 등 자연에 존재하는 대부분의 에너지원을 활용하여 전기에너지를 생산하게 되었으며, 이렇게 생산된 전기에너지로 열과 빛을 만들고, 현대에 사용되는 거의 모든 전자기기를 동작시켰다. 이처럼 전기에너지는 모든 에너지원의 30%를 차지할 정도로 오늘날 없어서는 안 될 매우 중요한 에너지이다.

전기에너지는 자연에 존재하는 에너지를 활용하여 쉽게 얻을 수 있고, 원거리 운송과 분배 및 제어에 용이할 뿐 아니라, 다른 에너지원과 비교하여 발생, 운송, 소비 과정에서 공해가 거의 없다는 장점이 있다. 하지만 전기에너지는 실생활에 바로 사용할 수 없기 때문에, 전기에너지의 흐름을 제어하고 전류나 전압의 크기, 주파수, 위상^{phase} 등을 변환하는 장치가 필요하다. 이와 같은 장치를 **전력변환 장치**라고 하며, 전력변환 장치에 대해 연구하여 전기에너지를 실생활에 사용할 수 있게 해주는 학문이 바로 **전력전자공학**이다. 전력전자공학은 전력전자와 혼용하여 사용한다.

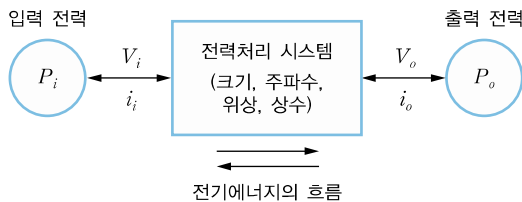
현대의 전력전자공학은 1958년 사이리스터라고 하는 제너럴일렉트릭 사의 SCR 개발로 시작되었다. 그 이전에는 [그림 1-1(a)]와 같은 기존의 워드 레오나드 시스템으로, 전력을 변환하거나 제어하기 위해 원동기^{prime mover}를 가변 속도로 제어하여 커플링된 동기발전기^{synchronous generator}로 교류전력을 만들었다. 교류전력을 받은 동기전동기/유도전동기에 의해 부하를 가변 속도로 회전할 수 있다. [그림 1-1(b)]는 현재의 워드 레오나드 시스템으로서 전력용 반도체 소자를 사용한 인버터로 원동기와 동기발전기를 대체했다. 이 방식처럼 회전기를 사용하지 않고 전력전자 기술을 사용하면 편의성, 효율성, 신뢰성이 커지게 된다.



[그림 1-1] 워드 레오나드 시스템

전력전자공학은 전력용 반도체 소자로 구성된 전력변환 장치를 사용하여 화석연료, 원자력, 신재생에너지를 통해 생산되는 전기에너지를 실생활에 활용 가능한 전기에너지로 변환하거나 제어하는 전기공학의 한 분야이다. 즉 전력전자공학은 전력용 반도체 스위치를 사용하여 전력변환 장치의 회로를 구성하고, 구성된 회로로 들어오는 전력을 제어하여 여러 분야에 응용할 수 있도록 돕는다.

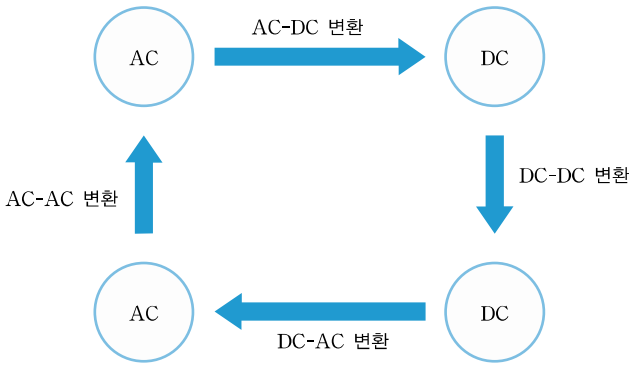
오늘날 전 세계에서 사용되는 발전 시스템은 고정된 주파수와 고정된 크기의 교류전압을 사용한다. 우리나라는 60[Hz]로 고정된 전압 주파수의 전력을 상용 전력으로 사용하며, 다른 나라는 대부분 50[Hz]로 고정된 전압 주파수의 전력을 상용 전력으로 사용하고 있다. 이러한 고정된 주파수를 가진 전압을 다른 분야에서 사용하려면 [그림 1-2]의 전력처리 시스템을 통해 조절해야 한다. 전력전자 분야에서 전력처리 시스템을 이용하여 전력을 조절하는 방식은 AC-DC 정류기, DC-DC 컨버터, DC-AC 인버터, AC-AC 컨버터가 있다. 또한 전력변환 장치의 대표적인 예로는 AC를 DC로 만들어주는 정류기, DC를 AC로 만들어주는 인버터를 들 수 있다.



[그림 1-2] 전력처리 시스템의 개념도

1.1.2 전력변환 방식

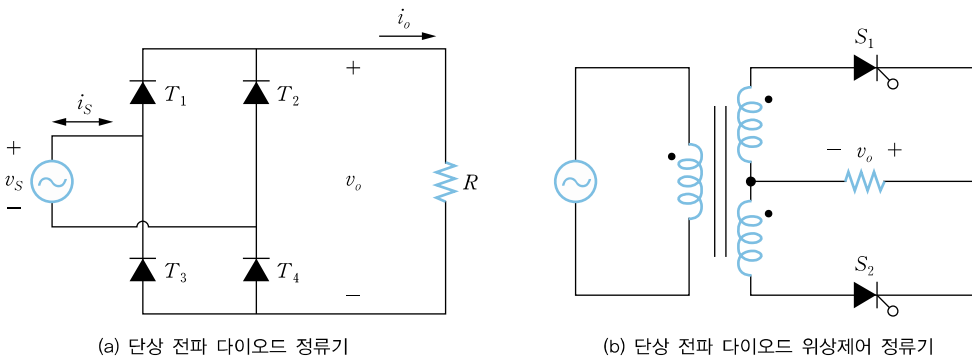
전력변환 장치는 발전된 전력을 사용자가 원하는 전력 형태로 변환하고 전력의 흐름을 제어한다. 전력변환 장치는 변환하는 전력의 형태와 전력의 전달 방향에 따라 [그림 1-3]과 같이 AC-DC 변환, DC-DC 변환, DC-AC 변환, AC-AC 변환으로 나눌 수 있다.



[그림 1-3] 전력변환 방식

AC-DC 변환

AC-DC 변환은 교류전력을 직류전력으로 변환하는 방식으로 이를 수행하는 전력변환 장치를 정류기라고 한다. AC-DC 변환을 하는 대표적인 전력변환 장치로는 [그림 1-4]와 같은 다이오드 정류기가 있으며, 이에 대한 자세한 내용은 3장에서 다룬다. 실생활에 사용되는 모든 전기기기 (에어컨, TV, 선풍기 등)는 DC 전력을 사용하기 때문에 전력회사에서 보내는 AC 전력을 DC 전력으로 만들기 위해 정류기를 사용한다.



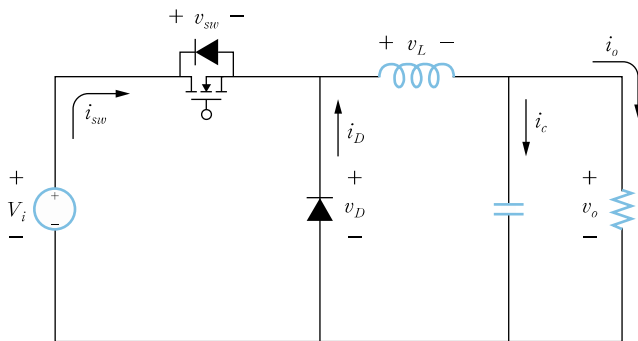
(a) 단상 전파 다이오드 정류기

(b) 단상 전파 다이오드 위상제어 정류기

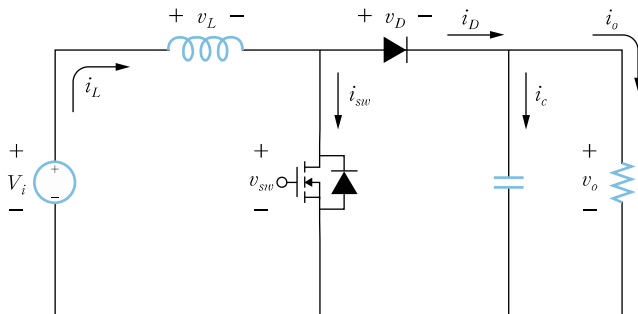
[그림 1-4] AC-DC 변환의 예

DC-DC 변환

DC-DC 변환은 직류전력을 사용자가 원하는 크기의 직류전력으로 변환하는 방식으로 직류변환이라고도 하며, 이를 수행하는 전력변환 장치를 DC-DC 컨버터라 한다. DC-DC 컨버터는 여러 전자 기기 안에서 AC-DC 정류기를 통해 정류된 직류전력을 각 부하에 맞는 직류전력으로 변환하여 전력을 공급하기 위해 많이 사용되고 있다. 또한 신재생에너지를 활용하는 스마트그리드 시스템에서 발전된 전력을 변환하는 데 사용된다. DC-DC 변환을 하는 대표적인 전력변환 장치로는 [그림 1-5]와 같은 강압형 컨버터와 승압형 컨버터가 있고, 이에 대한 자세한 내용은 4장에서 다룬다.



(a) 강압형 컨버터



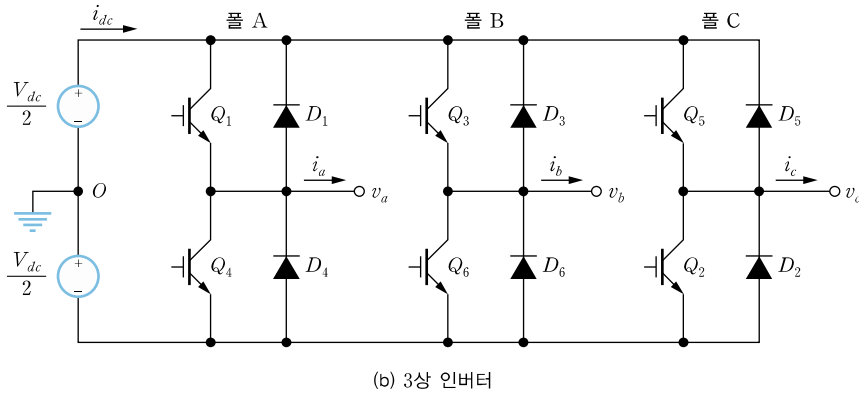
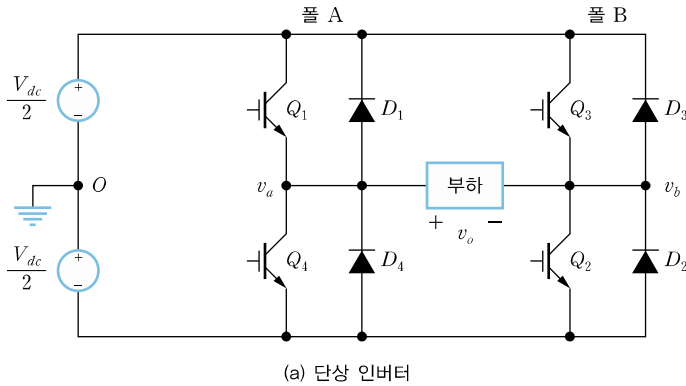
(b) 승압형 컨버터

[그림 1-5] DC-DC 변환의 예

DC-AC 변환

DC-AC 변환은 직류전력을 원하는 크기의 교류전력으로 변환하는 방식으로, 이를 수행하는 전력변환 장치를 인버터라 한다. 인버터는 신재생에너지를 이용하는 태양광 발전 시스템과 풍력 발전 시스템 등에서 발전되는 전력을 계통에 공급하는 데 사용되고 있다. 또한 최근에는 전기자동차의 교류전동기와 인버터를 연결하여 구동하는 데 사용하기도 한다. DC-AC 변환을 하는 대표적인 전력변환 장치로는 [그림 1-6(a)]와 같은 단상 인버터가 있으며, 현재는 [그림 1-6(b)]와 같은 3

상 인버터가 많이 사용되고 있다. 하지만 3상 인버터로는 출력 전압에 한계가 있어 최근에는 3상 인버터에 비해 고조파가 적고 더 높은 출력 전압을 낼 수 있는 멀티레벨 인버터에 대한 많은 연구가 이뤄지고 있다. 이에 대한 자세한 내용은 6장에서 다룬다.

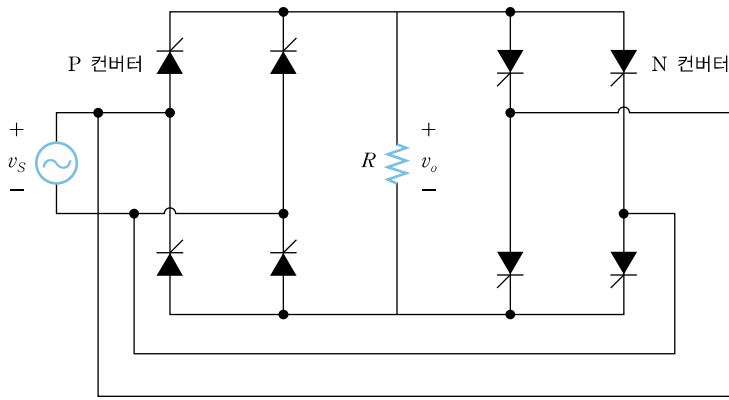


[그림 1-6] DC-AC 변환의 예

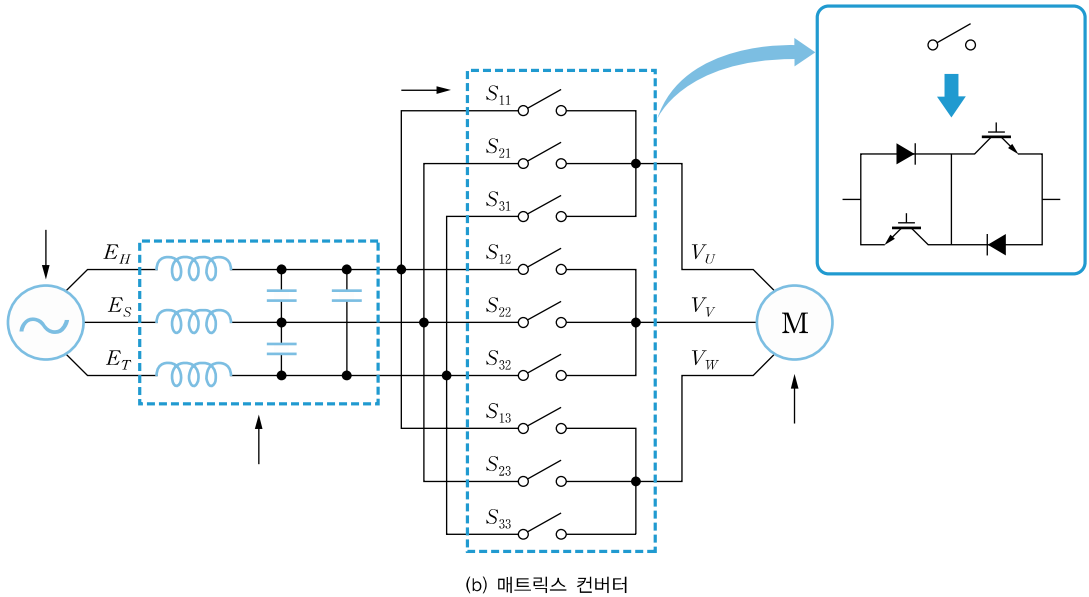
AC-AC 변환

교류전력의 형태는 전압과 전류, 주파수, 위상, 상수로 결정된다. 이와 같은 여러 변수 중에서 하나 또는 여러 가지 변수를 조정하여 변환하는 것을 AC-AC 변환 또는 교류변환이라 하며, 이를 수행하는 전력변환 장치를 AC-AC 컨버터라 한다. AC-AC 변환의 대표적인 전력변환 장치는 사이클로 컨버터와 매트릭스 컨버터가 있다. 이에 대한 자세한 내용은 3장에서 다룬다.

단상에서 단상으로 변환하는 사이클로 컨버터는 2개의 전파 정류기를 [그림 1-7(a)]처럼 구성한 형태이다. 이때 입력 교류전압 v_s 의 주파수가 f_i 이고, 출력 전압의 주파수는 입력 주파수의 $\frac{1}{4}$ 이다. 처음 v_s 의 두 사이클 동안에는 P 컨버터가 부하에 전류를 공급하고 다음 두 사이클에서는 N 컨버터가 역방향으로 부하에 전류를 공급하며 동작한다.



(a) 사이클로 컨버터



(b) 매트릭스 컨버터

[그림 1-7] AC-AC 변환의 예

또한 매트릭스 컨버터는 가변속 교류전동기 구동 분야에서 관심을 받고 있으며, 전원 회생 능력과 입력 전원의 고조파 억제 효과가 뛰어나 크레인이나 엘리베이터에 널리 사용되고 있다. 이는 [그림 1-7(b)]처럼 주회로부의 입력 필터와 9개의 양방향 스위치로 구성된다.

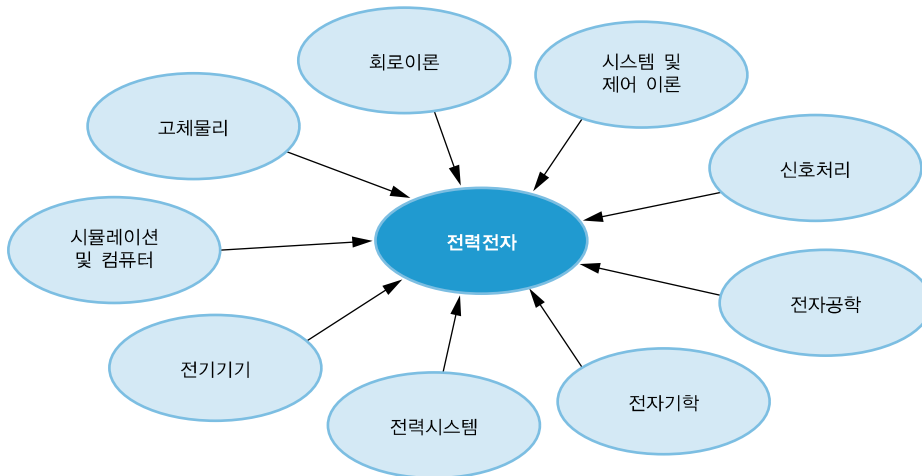
1.1.3 전력전자공학의 구성 영역

전력전자공학은 한 가지 분야만으로 구성된 것이 아니라 [그림 1-8]과 같이 전력 분야, 제어 분야, 전자 분야, 반도체 분야 등 여러 학문이 융합된 매우 복합적인 학문이다.

- ① 전력 분야는 발전소에서 전력을 발전하고, 발전된 전력을 송전 및 배전, 그리고 전력을 소비하는 각종 부하에 대한 이해를 통해 모든 전력전자 시스템에 응용할 수 있는 기초 학문이다.
- ② 제어 분야는 전력전자 시스템에서 사용되는 폐루프 회로의 안정도와 응답 특성의 개선을 위한 이론 및 알고리즘을 연구하는 학문으로 전력전자 시스템의 성능을 결정하는 중요한 분야이다.
- ③ 전자 분야는 전력 분야에서 전력전자 시스템의 성능을 높이기 위해 만든 최적의 알고리즘을 적용시키는 아날로그 또는 디지털 전자회로를 설계 및 구성하는 분야이다. 전력전자 시스템에서 신경 및 두뇌에 해당한다고 할 정도로 중요하다.
- ④ 전력용 반도체 소자 분야는 가장 핵심적인 요소이다. 전력전자공학에서 사용되는 모든 회로에 전력용 반도체 소자가 사용되기 때문에 전력전자공학을 스위치의 학문이라고도 부른다. 이러한 전력용 반도체 스위치를 이해하고 회로에 적용하는 것은 매우 중요하다.

이와 같이 전력 분야, 제어 분야, 전자 분야, 전력용 반도체 소자 분야가 적절히 조화를 이뤄 하나의 전력전자 시스템을 이루게 된다.

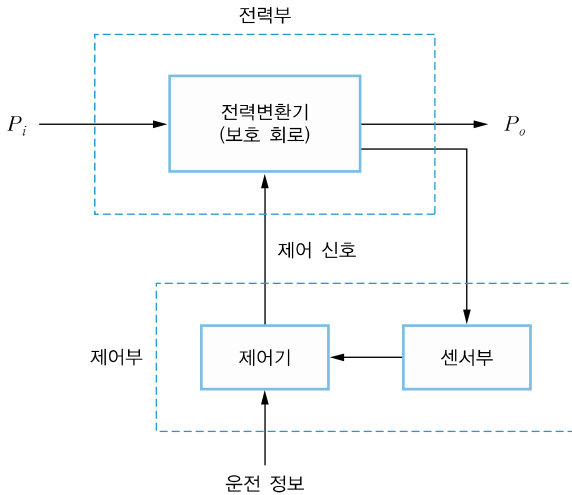
전력전자공학을 응용하는 기술자들은 전력변환 장치의 회로 구성, 전력 계통, 제어 이론, 마이크로프로세서 등 여러 분야의 지식을 갖춰야 한다. 각 분야의 발전은 전력전자공학에 직접적인 영향을 주기 때문에 전력전자공학은 각 분야와 함께 발전하는 학문이다.



[그림 1-8] 전력전자공학의 구성 영역

1.1.4 전력전자 시스템의 구성과 기능

전력전자 시스템의 구성은 [그림 1-9]와 같다. 전력전자 시스템은 크게 전력회로가 구성된 전력부, 페루프 회로의 안정성과 응답 특성 개선을 위해 구성된 센서와 제어가 포함된 제어부로 나눌 수 있다.



[그림 1-9] 전력전자 시스템의 구성

전력부는 발전소에서 발전되는 전력을 처리하는 부분으로 전력용 반도체 스위치와 퓨즈, 차단기를 포함한다. 전력용 반도체 스위치는 제어부에서 나오는 출력 신호를 전달받아서 출력 신호에 따라 턴온, 턴오프 동작을 하고, 퓨즈와 차단기는 전력부가 동작하다 갑자기 과부하나 단락 사고가 발생할 경우 시스템을 보호하는 중요한 역할을 담당하고 있다.

제어부는 사용자로부터 제어 정보를 받아서 그 정보를 토대로 전력부의 전력용 반도체 스위치를 동작시킨다. 또한 제어부에서는 센서를 통해 원하는 위치의 전압, 전류, 온도 등의 물리량을 검출한다. 그리고 검출된 물리량으로 각 상황에 맞는 제어 신호를 전력부로 보내주어 전력부의 정상 동작을 가능하게 만든다. 예를 들어 전력부의 출력단에 원하는 전압보다 낮은 레벨의 전압이 출력되면 제어부가 센서를 통해 인지하게 된다. 그러면 원하는 출력 전압 레벨을 얻기 위해 마이크로프로세서를 통해 전력용 반도체 스위치에 PWM 파형을 다시 내보낸다.

제어부는 마이크로프로세서가 점차 고기능화됨에 따라 스위치 제어 신호를 발생시키는 기능 이외에 좀 더 많은 기능을 할 수 있다. 전력부와 제어부의 상태를 감시하고 진단하여 전력부의 운전 상태를 최적으로 유지하며, 이 밖에도 사용자에게 편리한 기능이 점점 늘어나고 있다.

1.2 기초 회로이론

1.2.1 전력과 에너지

전력은 단위 시간 동안 공급되는 전기에너지로, 전력과 에너지의 계산은 전력전자공학에서 매우 중요하다. 먼저 정현적인 전압과 전류가 흐르는 회로를 살펴본 다음 비정현적인 전압과 전류가 흐르는 회로를 다룬다.

수학적으로 단위 시간당 에너지는 도함수 형태로 표현된다.

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.1)$$

식 (1.1)에서 우변의 분모와 분자에 전하의 미소 변화량 dq 를 곱하면 다음과 같다.

$$p = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} \quad (1.2)$$

전압은 단위 전하당 에너지이고 전하 흐름의 비율은 전류이므로 다음 식으로 표현된다.

$$v = \frac{dw}{dq}, \quad i = \frac{dq}{dt} \quad (1.3)$$

식 (1.3)으로 식 (1.2)를 다시 고쳐 쓸 수 있다.

$$p = v \times i \quad (1.4)$$

위 식은 일반적으로 순시전력이라 한다. 만약 전력이 양이면($p > 0$) 전원 측에서 부하 측으로 전달되어 전력이 소모되는 것을 의미하고 전력이 음이면($p < 0$) 부하 측에서 전원 측으로 전달되어 전력을 공급하는 것을 의미한다.

에너지는 식 (1.1)을 변형하여 다음과 같이 구한다.

$$w = \int p dt \quad (1.5)$$

전력의 단위는 W이고 에너지의 단위는 J이다. 전압 v 와 전류 i 의 주기가 T 라면 순시전력의 한 주기 평균값, 즉 평균전력은 다음과 같다.

$$p = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \quad (1.6)$$

예제 1-1

전압, 전류, 전력의 파형이 [그림 1-10]과 같을 때 다음을 구하라.

- 소자에서 소비되는 순시전력 $p(t)$ 를 구하라.
- 한 주기 동안 소자에서 소비되는 에너지를 구하라.
- 소자에서 소비되는 평균전력을 구하라.
- PSIM으로 시뮬레이션하여 소자에서 소비되는 평균전력을 구하고, 계산값과 비교하라.

풀이

(a) 먼저 전압과 전류를 구하면 다음과 같다.

$$v(t) = \begin{cases} 20[\text{V}] & (0 < t < 8) \\ -20[\text{V}] & (8 < t < 14) \end{cases}$$

$$i(t) = \begin{cases} 40[\text{A}] & (0 < t < 6) \\ -20[\text{A}] & (6 < t < 14) \end{cases}$$

[그림 1-10]에 주어진 순시전력을 식 (1.4)를 이용하여 전압과 전류의 곱으로 나타내면 다음과 같다.

$$p(t) = \begin{cases} 800[\text{W}] & (0 < t < 6) \\ -400[\text{W}] & (6 < t < 8) \\ 400[\text{W}] & (8 < t < 14) \end{cases}$$

(b) 한 주기 동안 소자에서 소비되는 에너지는 식 (1.5)로 구할 수 있다.

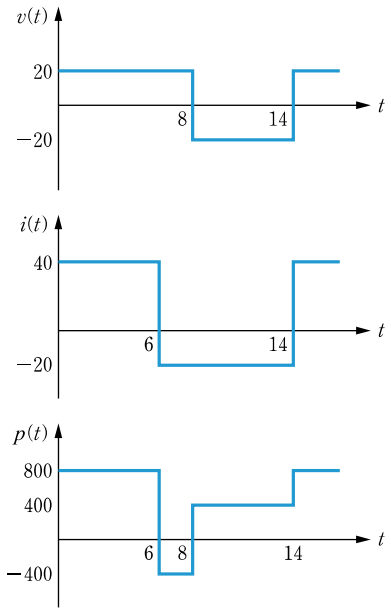
$$W = \int_0^T P(t) dt = \int_0^6 800 dt + \int_6^8 (-400) dt + \int_8^{14} 400 dt$$

$$= 4800 - (3200 - 2400) + (5600 - 3200) = 6400 [\text{J}]$$

(c) 식 (1.6)을 이용하여 평균전력을 구하면 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{14} \left[\int_0^6 800 dt + \int_6^8 (-400) dt + \int_8^{14} 400 dt \right]$$

$$= \frac{1}{14} [4800 - (3200 - 2400) + (5600 - 3200)] = \frac{1}{14} \cdot 6400 = 457.1 [\text{W}]$$

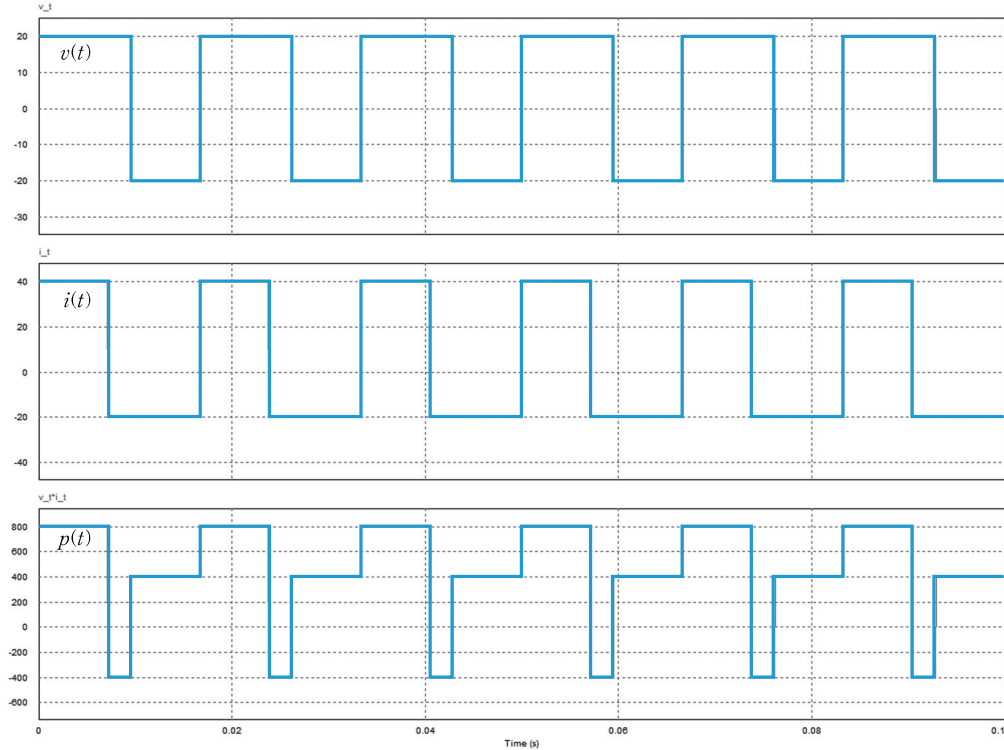


[그림 1-10] 전압, 전류, 전력의 파형

평균전력은 (b)에서 구한 주기당 에너지를 이용하여 식 (1.1)로 구할 수도 있다.

$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{6400}{14} = 457.1 \text{ [W]}$$

(d) 주어진 파라미터값을 대입하여 PSIM으로 시뮬레이션한 결과 주기당 에너지는 아래와 같다.



Average Value	
Time From	1.0000000e-005
Time To	0.0000000e+000
v_t	2.8600000e+000
i_t	5.7100000e+000
v_t*i_t	4.5700000e+002

[그림 1-11] PSIM 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과와 계산값을 비교하면 다음과 같다. 평균전압과 평균전류는 1.2.3절을 배운 후 [예제 1-4]에서 구한다.

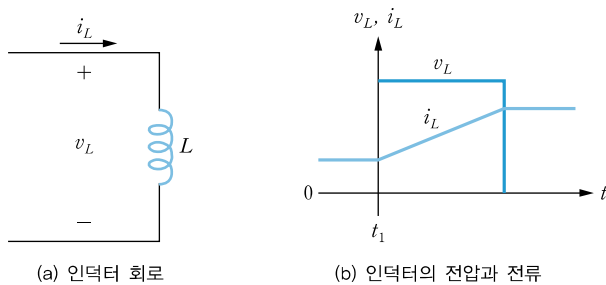
구분	평균전압	평균전류	평균전력
계산값	-	-	457.1
시뮬레이션 결과	2.86	5.71	457

1.2.2 인덕터와 커패시터

인덕터

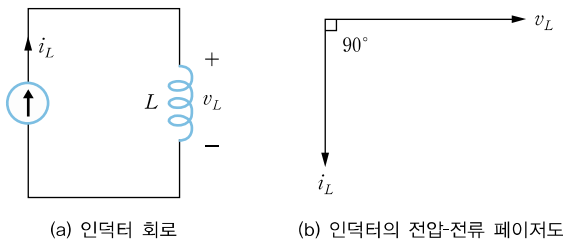
인덕터(inductor)는 전자유도 현상을 이용하여 전기에너지를 자기에너지로 바꿔 저장하는 수동 소자로, 자기에너지를 저장할 때 전력을 소모하지 않는다. 이러한 전기 저장 능력을 이용하면 패러데이의 법칙과 렌츠의 법칙에 의해 전자에너지를 상호 교환할 수 있다.

구형파 전압을 인가했을 때 인덕터의 전압과 전류는 [그림 1-12(b)]와 같다. $i_L(t_1)$ 은 [그림 1-12(a)]와 같은 인덕터 회로에서 인덕터의 초기 전류이고, 인덕터의 전압은 순간적으로 상승하지만 인덕터의 전류는 순간적으로 변화하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 인덕터에 흐르는 전류가 일정하면 전압은 0이 된다. 그러므로 인덕터는 직류에 대해 단락회로로 동작한다.



[그림 1-12] 인덕터 회로와 구형파 전압 인가 시 인덕터의 전압과 전류

또한 [그림 1-13(a)]와 같은 인덕턴스 L 만의 회로에 정현파 전류가 흐르면 전압은 전류보다 90° 위상이 앞선다. 이는 [그림 1-13(b)]의 인덕터의 전압-전류 페이저도에서 확인할 수 있다.



[그림 1-13] 인덕터 회로와 전압-전류 페이저도

전류가 인덕터를 통해 흐른다면 인덕터의 전압은 시간에 대한 전류의 변화량에 비례하므로 다음 식으로 표현된다.

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.7)$$

이때 L 은 비례상수로서 인덕턴스 inductance라고 한다. 전류를 전압의 함수로 나타내려면 다음과 같이 식 (1.7)의 양변에 dt 를 곱한다.

$$v_L dt = L \left(\frac{di_L}{dt} \right) dt \quad (1.8)$$

이 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_L dt = L di_L \quad (1.9)$$

인덕터의 전류와 전압이 주기적이라고 할 때 식 (1.9)의 양변을 적분하면 다음과 같다.

$$L \int_{i(t_0)}^{i_L(t_0+T)} di = \int_{t_0}^{t_0+T} v_L dt \quad (1.10)$$

이때 주기의 시작과 끝 부분 값이 같으므로 0이 된다.

$$\begin{aligned} L \{ i_L(t_0+T) - i_L(t_0) \} &= \int_{t_0}^{t_0+T} v_L dt \\ i_L(t_0+T) - i(t_0) &= \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0+T} v_L dt = 0 \end{aligned} \quad (1.11)$$

여기에 $\frac{L}{T}$ 을 곱하여 한 주기 동안 인덕터의 평균전압을 구하면

$$V_{L, avg} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_L dt = 0 \quad (1.12)$$

이므로 인덕터의 전류가 주기적이면 인덕터의 양단에 걸리는 평균전압은 0이다. 인덕터에서 전력과 에너지의 관계는 양단의 전압과 흐르는 전류로 계산한다.

$$p = v_L i_L \quad (1.13)$$

인덕터의 전압을 인덕터의 전류 함수로 나타낸 식 (1.7)을 이용하여 인덕터에 저장된 에너지를 나타내면 다음과 같다.

$$p = L i_L \frac{di_L}{dt} \quad (1.14)$$

전력은 소비 에너지의 시간 비율이므로 다음과 같이 나타내며,

$$p = \frac{dw}{dt} = Li_L \frac{di_L}{dt} \quad (1.15)$$

양변에 dt 를 곱하여 정리하면 다음과 같다.

$$dw = Li_L di_L \quad (1.16)$$

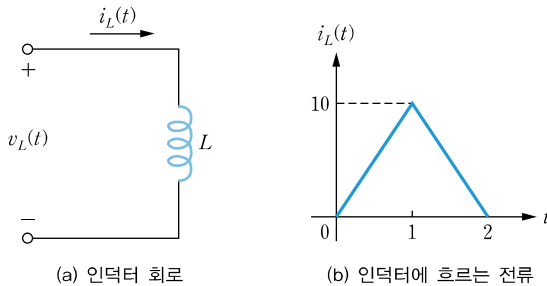
위 식의 양변을 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^w dw = L \int_0^{i_L} i_L di_L$$

$$w = \frac{1}{2} Li_L^2 \quad (1.17)$$

예제 1-2

[그림 1-14(a)]와 같은 인덕터 회로에 인덕터에 흐르는 전류 $i_L(t)$ 가 [그림 1-14(b)]와 같다고 하자. 이때 이 소자의 양단 전압 $v_L(t)$ 를 그래프로 나타내라. 단, 코일의 인덕턴스는 4[H]이다. 또한 인덕터의 순시전력과 평균전력을 구하고 그래프로 나타내라.



[그림 1-14] 인덕터 회로와 전류

풀이

시간이 0[sec]에서 2[sec]까지의 전류를 함수로 나타내면 다음과 같다.

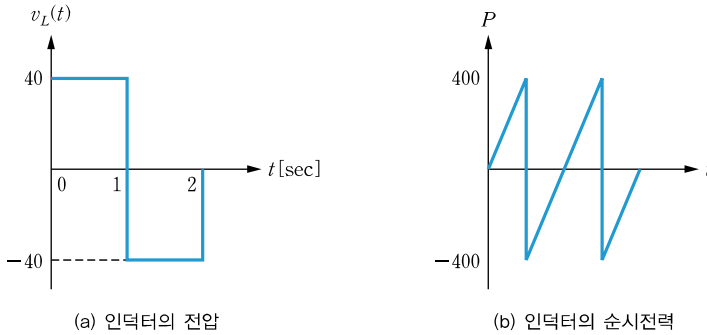
$$i_L(t) = \begin{cases} 10t & (0 < t \leq 1) \\ 20 - 10t & (1 < t \leq 2) \end{cases}$$

그러므로 식 (1.8)을 이용하여 인덕터의 전압을 구하면 다음과 같다.

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \begin{cases} 4 \cdot 10 & (0 < t \leq 1) \\ 4 \cdot (-10) & (1 < t \leq 2) \end{cases}$$

$$= L \frac{di_L}{dt} \begin{cases} 40 & (0 < t \leq 1) \\ -40 & (1 < t \leq 2) \end{cases}$$

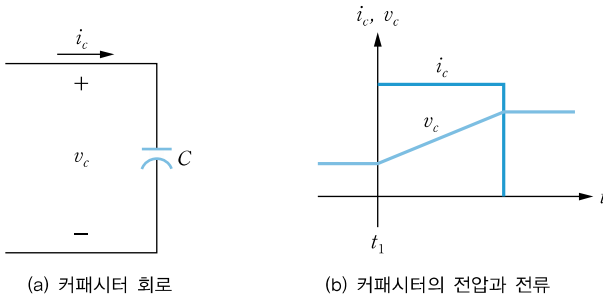
[그림 1-15(a)]는 인덕터의 전압을 그래프로 나타낸 것이다. 인덕터의 전류가 주기적이면 인덕터에 저장되어 있는 에너지는 시작과 끝점에서 같고, 주기적인 동작이 이뤄지므로 인덕터에 의해 소비되는 평균 전력은 0이다. 인덕터의 순시전력은 $P(t) = v(t)i(t)$ 로 구하며, [그림 1-15(b)]와 같이 그려진다.



[그림 1-15] 인덕터의 전압과 순시전력

커패시터

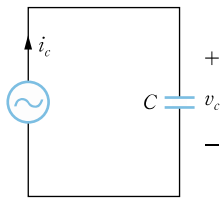
커패시터 capacitor는 커패시터 내부의 전계에 에너지를 저장하는 수동 소자로, 커패시터에 걸리는 전압은 시간에 따라 변한다. [그림 1-16(a)]의 커패시터 회로에 구형파 전류를 인가하면 [그림 1-16(b)]와 같이 커패시터 양단의 전압은 순간적으로 변할 수 없지만 커패시터에 흐르는 전류는 순간적으로 변화가 가능하다. 즉 커패시터는 직류전원에서 개방회로로 동작한다.



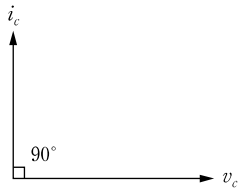
[그림 1-16] 커패시터 회로와 구형파 전류 인가 시 커패시터의 전압과 전류

또한 [그림 1-17(a)]와 같은 커패시터의 회로에 정현파 전압을 인가하면 흐르는 전류는 전압보다 90° 위상이 앞서게 된다. 이는 [그림 1-17(b)]의 커패시터의 전압-전류 페이지도에서 확인할 수 있다.

정상상태에서 전압 v 가 커패시터에 연결되었을 때, q 로 표시되는 저장된 전하의 양은 공급된 전압 v 에 비례한다.



(a) 커패시터 회로



(b) 커패시터의 전압-전류 페이저도

[그림 1-17] 커패시터 회로와 전압-전류 페이저도

$$q = C v_c \quad (1.18)$$

이때 비례상수 C 는 커패시터의 커패시턴스(capacitance)라고 하는데, 이는 커패시터가 도체 판 양단에 저장할 수 있는 단위 전압당 전하의 양 또는 전하를 저장하기 위한 커패시터의 능력을 말한다. 커패시터의 전류와 전압의 관계를 알기 위해 식 (1.18)의 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$i_c = \frac{dq}{dt} \quad (1.19)$$

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} \quad (1.20)$$

식 (1.20)의 양변에 미분 시간 dt 를 곱하고 적분하면 다음과 같다.

$$i_c dt = C dv_c$$

$$\int_{v_c(t_0)}^{v_c(t)} dx = \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c d\tau$$

위 식의 좌변을 적분하면

$$v_c(t_0 + T) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c d\tau + v_c(t_0) \quad (1.21)$$

이다. 또한 주기 전압에서 시작과 끝점의 값이 같다면

$$v_c(t_0 + T) - v_c(t_0) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c dt \quad (1.22)$$

이므로, 양변에 $\frac{C}{T}$ 를 곱하면 한 주기 동안 커패시터의 평균전류는 다음과 같다.

$$i_{c, avg} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_c(t) dt = 0 \quad (1.23)$$

이때 전압이 주기적이면 커패시터의 평균전류는 0이 된다. 커패시터에 대한 전력과 에너지는 다음과 같이 구한다.

$$p = v_c i_c = C v_c \cdot \frac{dv_c}{dt} \quad (1.24)$$

전력은 소비한 에너지의 시간으로 나눈 것이므로 다음과 같이 나타낸다.

$$p = \frac{dw}{dt} = C v_c \cdot \frac{dv_c}{dt} \quad (1.25)$$

양변에 dt 를 곱하면

$$dw = C v_c dv_c \quad (1.26)$$

이고, 양변을 적분하면

$$\int_0^w dw = C \int_0^v v_c dv_c \quad (1.27)$$

이다. 따라서 전력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$w = \frac{1}{2} C v_c^2 \quad (1.28)$$

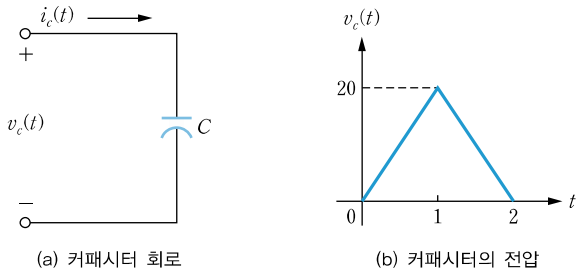
[표 1-1]에 기본 소자의 주요 특성을 정리했다.

[표 1-1] 기본 소자의 주요 특성

관계	저항(R)	커패시터(C)	인덕터(L)
$v-i$	$v = iR$	$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau + v(t_0)$	$v = L \frac{di}{dt}$
$i-v$	$i = \frac{v}{R}$	$i = C \frac{dv}{dt}$	$i = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau + i(t_0)$
p 또는 w	$p = i^2 R = \frac{v^2}{R}$	$w = \frac{1}{2} C v^2$	$w = \frac{1}{2} L i^2$
직렬 연결	$R_{eq} = R_1 + R_2$	$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$L_{eq} = L_1 + L_2$
병렬 연결	$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$	$C_{eq} = C_1 + C_2$	$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$
직류일 때	같음	개방회로	단락회로
갑자기 변할 수 없는 회로 변수	해당되지 않음	전압	전류

예제 1-3

커패시터 양단의 전압 $v_c(t)$ 가 [그림 1-18(b)]와 같을 때 이 소자에 흐르는 전류 $i_c(t)$ 를 그래프로 나타내라. 단, 커패시터의 용량은 $100[\text{mF}]$ 이다.



[그림 1-18] 커패시터 회로와 전압

풀이

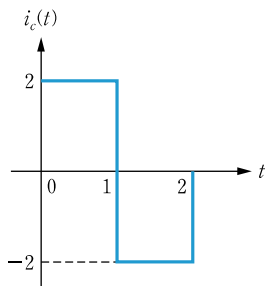
시간이 $0[\text{sec}]$ 에서 $2[\text{sec}]$ 까지 변할 때 커패시터 양단의 전압을 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$v_c(t) = \begin{cases} 20t & (0 < t \leq 1) \\ 40 - 20t & (1 < t \leq 2) \end{cases}$$

그러므로 식 (1.20)을 이용하여 전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_c(t) &= C \frac{dv_c}{dt} \\ &= \begin{cases} 100 \cdot 10^{-3} \cdot 20 & (0 < t \leq 1) \\ 100 \cdot 10^{-3} \cdot (-20) & (1 < t \leq 2) \end{cases} \\ &= \begin{cases} 2 & (0 < t \leq 1) \\ -2 & (1 < t \leq 2) \end{cases} \end{aligned}$$

커패시터에 흐르는 전류 $i_c(t)$ 를 그래프로 나타내면 [그림 1-19]와 같다.



[그림 1-19] 커패시터에 흐르는 전류

1.2.3 정현파 교류의 해석

순시값은 시간에 대한 값이므로 이를 이용하면 어떤 파형을 시간의 함수로 표현할 수 있다. 예를 들어 정현파 전압의 순시값에는 최댓값, 주파수, 위상이 나타나 있다.

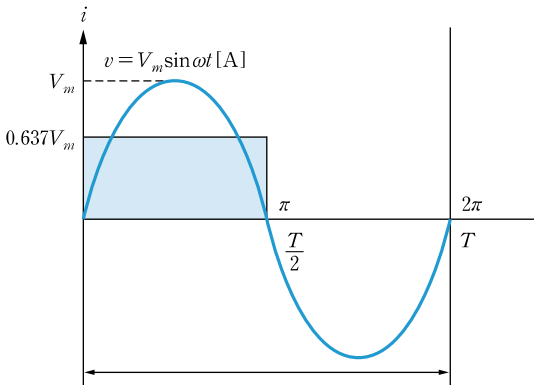
$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) = V_m \sin(2\pi f t + \theta) \quad (1.29)$$

어떤 소자에 걸린 전압과 흐르는 전류의 순시값을 각각 $v(t)$, $i(t)$ 라 할 때 그 소자의 전력은 $p(t) = v(t) \cdot i(t)$ 가 된다. 여기서 전력 $p(t)$ 의 값이 양(+)이면 전력을 소모하는 것이고, 음(-)이면 전력을 공급하는 것을 의미한다. 지금까지는 교류파의 크기를 순시값과 최댓값만으로 나타냈다. 하지만 정현파 파형 외에 비정현파의 주기함수인 경우 전압과 전류의 파형은 파형의 순시값, 최댓값만으로는 파형이 서로 다른 전압, 전류의 작용에 대한 효과를 신속히 비교하거나 판단할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 교류전압 및 교류전류에 대한 양의 크기를 효과적으로 나타낼 수 있도록 평균값과 실효값을 사용한다.

평균값

평균값 average value은 정현파 교류 한 주기 동안의 값의 평균을 구한 것이다. 즉 교류전압 또는 교류전류 순시값의 한 주기 동안을 평균하여 교류전압, 교류전류의 평균값으로 나타낼 수 있다. 그러나 [그림 1-20]과 같이 정현파 교류전원의 양의 반주기와 전원의 음의 반주기가 같으므로 한 주기 동안을 평균하면 정현파 교류에서의 평균값은 0이 된다. 따라서 정현파 교류의 평균값은 반파의 평균값으로 나타낸다. 교류전압의 순시값 v 의 평균값 V_{avg} 는 다음과 같다.

$$V_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} v dt [V] \quad (1.30)$$



[그림 1-20] 정현파 교류에서의 평균값

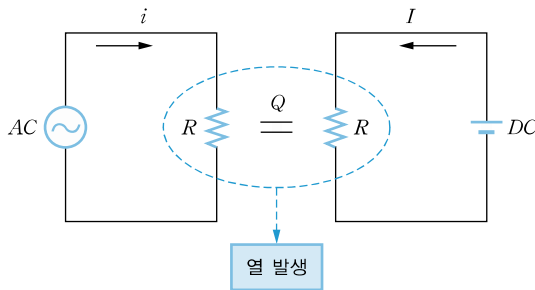
정현파 교류전압의 순시값 $v = V_m \sin \omega t$ 의 평균값 V_{avg} 는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} V_{avg} &= \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{V_m}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} V_m = 0.637 V_m \text{ [V]} \end{aligned} \quad (1.31)$$

즉 정현파 교류의 평균값은 전압, 전류 최댓값의 $\frac{2}{\pi}$ 배이다.

실효값

실효값 effective value은 정현파나 비정현파 등 주기적인 파형을 가진 전압이나 전류가 저항에서 나타내는 열 효과의 정도를 말한다. 이 값의 크기는 동일한 효과를 내는 직류전압이나 직류전류의 크기로 정한다.



[그림 1-21] 직류와 교류에서의 저항

[그림 1-21]과 같이 임의의 저항 R 에 주기전류 $i(t)$ 와 직류전류 I 가 각각 흐를 때 일정 시간 T 동안에 동일한 열량 Q 가 발생한다고 하자. 이때 열량 Q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \int_0^T R i^2(t) dt = \int_0^T R I^2 dt \quad (1.32)$$

식 (1.32)로부터 직류전류를 구하면 다음과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1.33)$$

식 (1.33)에서 직류전류 I 를 주기전류 $i(t)$ 의 실효값이라 하며, 평균값의 제곱근 형태이기 때문에 rms root mean square 값이라고도 한다. 교류전압, 전류의 실효값은 각 순시값 제곱의 평방근 root mean square

value으로 정의된다. 예를 들어 정현파 교류전압 $v = V_m \sin \omega t$ [V]의 실효값 V_{rms} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} \\
 &= \sqrt{\frac{V_m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d(\omega t)} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right]_0^{2\pi}} \\
 &= \sqrt{\frac{V_m^2}{2}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ [V]} \tag{1.34}
 \end{aligned}$$

즉 정현파 교류전압, 전류의 실효값은 최댓값의 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 배가 된다. 우리가 흔히 사용하는 교류전압, 전류값은 특별한 경우를 제외하고는 모두 실효값이다.

예제 1-4

어떤 회로의 전압과 전류의 파형이 [그림 1-22]와 같을 때 각각의 평균값과 실효값을 구하라. 그리고 PSIM으로 시뮬레이션하여 확인하라.

풀이

[그림 1-22]로부터 전압을 구하면 다음과 같다.

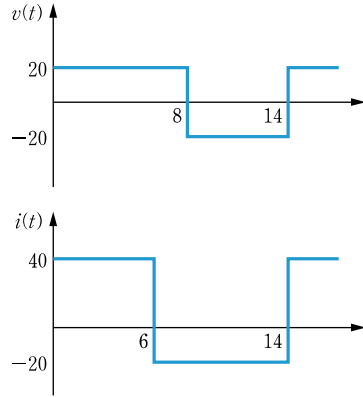
$$v(t) = \begin{cases} 20 & (0 \leq t < 8) \\ -20 & (8 \leq t < 14) \end{cases}$$

전압의 평균값은 식 (1.30)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 V_{avg} &= \frac{1}{14} \left[\int_0^8 20 \cdot dt + \int_8^{14} -20 \cdot dt \right] = \frac{1}{14} ([20t]_0^8 + [-20t]_8^{14}) \\
 &= \frac{1}{14} (160 - 280 + 160) = 2.857 \text{ [V]}
 \end{aligned}$$

전압의 실효값은 식 (1.34)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{14} \left[\int_0^8 20^2 \cdot dt + \int_8^{14} (-20)^2 \cdot dt \right]} = \sqrt{\frac{1}{14} ([400t]_0^8 + [400t]_8^{14})} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{14} (3200 + 5600 - 3200)} = 20 \text{ [V]}
 \end{aligned}$$



[그림 1-22] 구형파의 전압, 전류 파형

같은 방법으로 [그림 1-22]로부터 전류식을 구하면 다음과 같다.

$$i(t) = \begin{cases} 40 & (0 \leq t < 6) \\ -20 & (6 \leq t < 14) \end{cases}$$

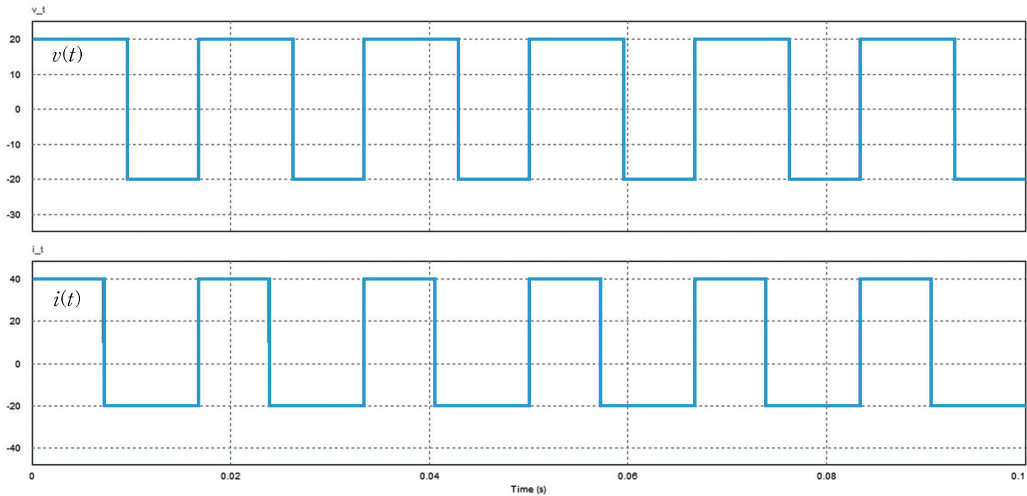
전류의 평균값은 식 (1.30)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} I_{avg} &= \frac{1}{14} \left[\int_0^6 40 \cdot dt + \int_6^{14} -20 \cdot dt \right] = \frac{1}{14} ([40t]_0^6 + [-20t]_6^{14}) \\ &= \frac{1}{14} (240 - 280 + 120) = 5.714 \text{ [A]} \end{aligned}$$

전류의 실효값은 식 (1.34)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} I_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{14} \left[\int_0^6 40^2 \cdot dt + \int_6^{14} (-20)^2 \cdot dt \right]} = \sqrt{\frac{1}{14} ([1600t]_0^6 + [400t]_6^{14})} \\ &= \sqrt{\frac{1}{14} (9600 + 5600 - 2400)} = \sqrt{\frac{1}{14} (12800)} = 30.2 \text{ [A]} \end{aligned}$$

주어진 파라미터값을 대입하여 PSIM으로 시뮬레이션한 결과 전압과 전류는 아래와 같다.



Average Value	
Time From	1.0000000e-005
Time To	0.0000000e+000
v_t	2.8600000e+000
i_t	5.7100000e+000

RMS Value	
Time From	1.0000000e-005
Time To	0.0000000e+000
v_t	2.0000000e+001
i_t	3.0235740e+001

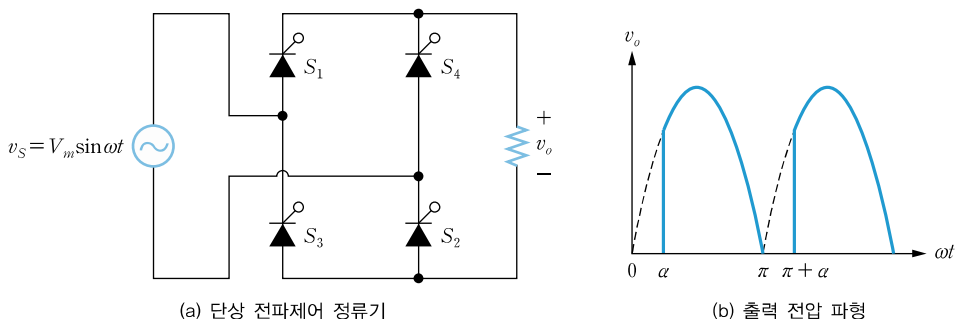
[그림 1-23] PSIM 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과와 계산값을 비교하면 다음과 같다.

구분	전압 평균값	전압 실효값	전류 평균값	전류 실효값
계산값	2,867	20	5,714	30,2
시뮬레이션 결과	2,86	20	5,71	30,236

예제 1-5

3장에서 다룬 단상 전파제어 정류기는 사이리스터의 지연각 α 를 조절하여 출력을 제어하며, 회로는 [그림 1-24(a)]와 같이 구성된다. 정류기 출력 전압의 파형이 [그림 1-24(b)]와 같을 때 출력 전류의 평균값과 실효값을 구하라.



[그림 1-24] 단상 전파제어 정류기와 출력 전압 파형

풀이

단상 전파제어 정류기의 출력 전압을 구하면 다음과 같다.

$$V_{avg} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

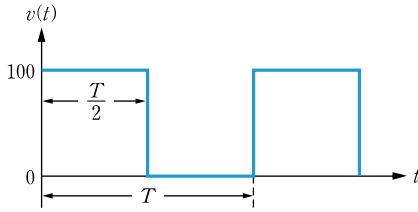
따라서 평균 출력 전류는 $I_{avg} = \frac{V_o}{R} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha)$ 이다.

또한 저항 부하에서 전력은 $P = I_{rms}^2 R$ 이므로 전류의 실효값은 식 (1.34)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{V_m}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{V_m}{R} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{4}}$$

예제 1-6

어떤 회로의 출력 전압을 그래프로 나타내면 [그림 1-25]와 같다. 입력 전압이 100[V]로 일정하고 스위치 S 의 스위칭 주기가 T , 듀티비가 0.5일 때 다음을 구하라. 이때 저항 R 은 10[Ω]이다.



[그림 1-25] 펄스파

- 평균 출력 전압 V_{avg} 를 구하라.
- 평균 출력 전력 P_{avg} 를 구하라.
- PSIM으로 평균 출력 전압과 평균 출력 전력을 구하고 계산값과 비교하라.

풀이

(a) 식 (1.30)을 이용하여 평균 출력 전압을 구하면 다음과 같다.

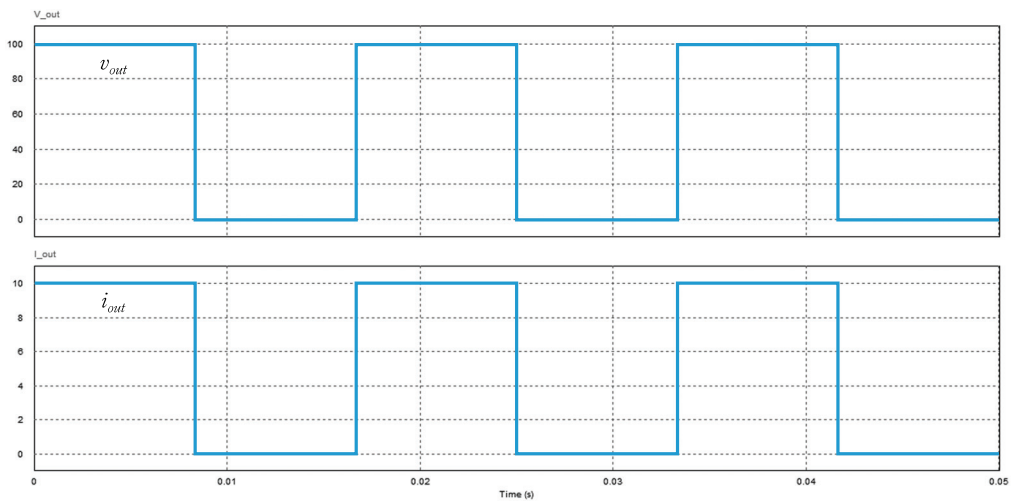
$$V_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = 50 \text{ [V]}$$

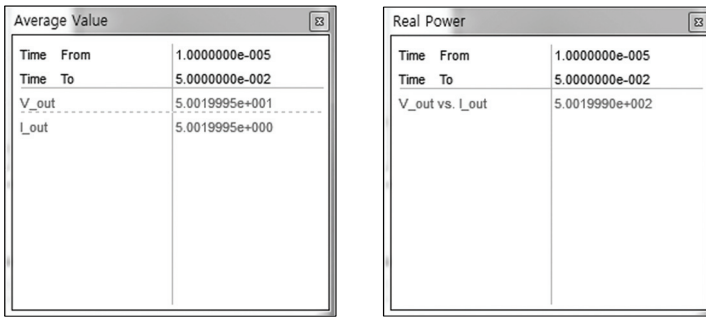
$$V_{avg} = DV_i = 0.5 \times 100 = 50 \text{ [V]}$$

(b) 순시전력 $P=vi$ 이고 $i = \frac{v}{R}$ 이므로 $P = \frac{v^2}{R}$ 이 된다. 식 (1.6)을 이용하여 평균 출력 전력을 구하면 다음과 같다.

$$P_{avg} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} \frac{(100)^2}{10} dt + \int_{\frac{T}{2}}^T 0 dt \right] = \frac{1}{T} \left[\frac{10000}{10} \right] \frac{T}{2} + 0 = 500 \text{ [W]}$$

(c) 주어진 파라미터값을 대입하여 PSIM으로 시뮬레이션한 결과 출력 전압, 출력 전류는 아래와 같다.





[그림 1-26] PSIM 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과와 계산값을 비교하면 다음과 같다.

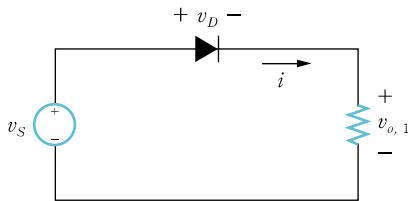
구분	평균 출력 전압	평균 출력 전력
계산값	50	500
시뮬레이션 결과	50.02	500.2

예제 1-7

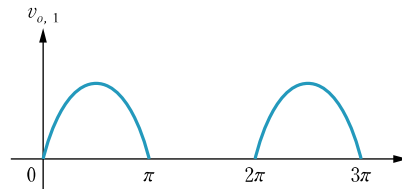
3장에서 살펴볼 반파 정류회로와 전파 정류회로 및 출력 전압 $v_{o,1}$, $v_{o,2}$ 는 [그림 1-27]과 같다. 이때 출력 전압의 평균값과 실효값을 구하라.

$$v_{o,1}(t) = \begin{cases} V_m \sin \omega t & \left(0 < t \leq \frac{T}{2} \right) \\ 0 & \left(\frac{T}{2} < t \leq T \right) \end{cases}$$

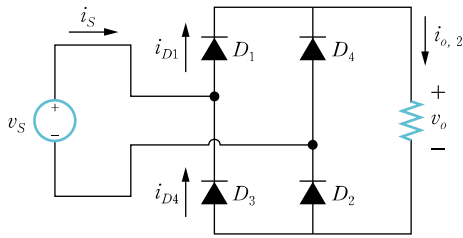
$$v_{o,2}(t) = \begin{cases} V_m \sin \omega t & \left(0 < t \leq \frac{T}{2} \right) \\ -V_m \sin \omega t & \left(\frac{T}{2} < t \leq T \right) \end{cases}$$



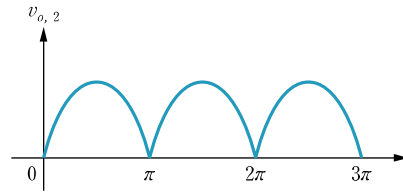
(a) 반파 정류회로



(b) 반파 정류회로의 출력 전압



(c) 전파 정류회로



(d) 전파 정류회로의 출력 전압

[그림 1-27] 반파 정류회로와 전파 정류회로 및 출력 전압

풀이

(a) 반파 정류회로에서 출력 전압의 평균값은 다음과 같이 구한다.

$$V_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_0^\pi = \frac{V_m}{\pi}$$

반파 정류회로에서 출력 전압의 실효값은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (V_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4} \right]_0^\pi} = \sqrt{\frac{V_m^2}{4}} = \frac{V_m}{2} \end{aligned}$$

(b) 전파 정류회로에서 출력 전압의 평균값은 다음과 같이 구한다.

$$V_{avg} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}$$

전파 정류회로에서 출력 전압의 실효값은 다음과 같이 구한다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

예제 1-8

가정용 전원의 실효전압은 220[V]이다. 이 전압의 첨두 대 첨두치^{peak-to-peak value} (V_{p-p})를 구하라. 또한 전원에 44[Ω]의 저항을 가진 전기히터를 연결했을 때 이 전기히터에서 소비하는 전력을 구하라.

풀이

식 (1.34)를 이용하여 이 전압의 첨두치(최댓값) V_m 을 구하면 다음과 같다.

$$V_m = \sqrt{2} V_{rms} = 1.4142 \cdot 220 = 311.13 [\text{V}]$$

첨두 대 첨두치 V_{p-p} 는 이 값의 2배이므로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{p-p} = 2V_m = 2 \cdot 311.13 = 622.26 [\text{V}]$$

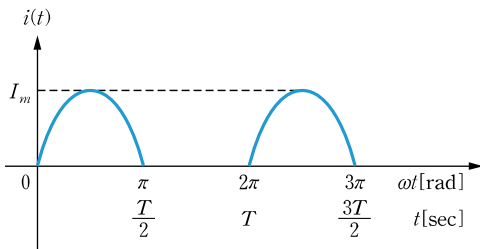
따라서 전기히터의 소비 전력은 다음과 같다.

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{220^2}{44} = 1100 [\text{W}] = 1.1 [\text{kW}]$$

예제 1-9

단상 반파 정류회로를 통해 얻은 전류의 파형이 [그림 1-28]과 같을 때 실효값을 구하라.

$$i(t) = \begin{cases} I_m \sin \omega t & (0 < t \leq \frac{T}{2}) \\ 0 & (\frac{T}{2} < t \leq T) \end{cases}$$



[그림 1-28] 단상 반파 정류회로의 출력 전류 파형

풀이

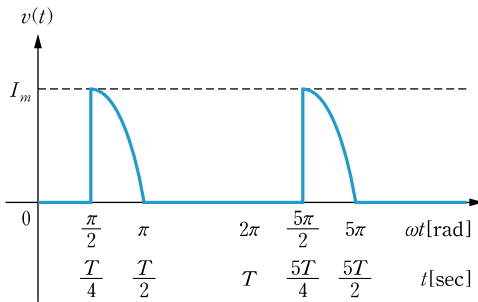
$0 < t \leq \frac{T}{2}$ 구간에서 적분한 후 식 (1.33)을 이용하여 실효값을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m^2 \sin^2 \omega t dt} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m^2 \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt} \\ &= \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} \cdot \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{2} \end{aligned}$$

예제 1-10

$\frac{1}{4}$ 파 정현파의 전압이 [그림 1-29]와 같을 때 이 정현파의 평균값을 구하라.

$$v(t) = \begin{cases} 0 & \left(0 < t \leq \frac{T}{4}\right) \\ V_m \sin \omega t & \left(\frac{T}{4} < t \leq \frac{T}{2}\right) \end{cases}$$



[그림 1-29] 1/4파 정현파의 전압 파형

풀이

적분 구간이 $\frac{T}{4} < t \leq \frac{T}{2}$ 이므로 평균값은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} V_{avg} &= \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2}} V_m \sin \omega t dt = \frac{V_m}{\omega T} [-\cos \omega T] \Bigg|_{\omega = \frac{2\pi}{T}}^{\frac{T}{2}} \\ &= \frac{V_m}{2\pi} \left[-\cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} \right) + \cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{4} \right) \right] = \frac{V_m}{2\pi} \end{aligned}$$

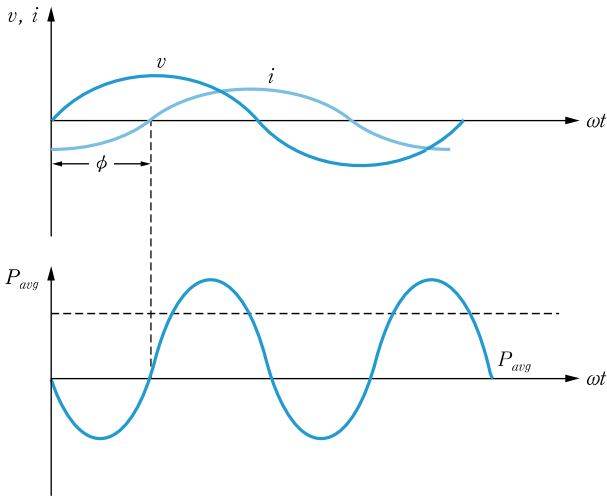
정현파에서의 전력과 역률

임의의 정현파 교류회로에서 전압과 전류의 순시값이 식 (1.35)와 같을 때 순시전력은 식 (1.36)과 같다.

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin \omega t [\text{V}], \quad i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \phi) [\text{A}] \tag{1.35}$$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) [\text{W}] \tag{1.36}$$

순시전압, 전류, 순시전력의 파형은 [그림 1-30]과 같이 나타난다.



[그림 1-30] 순시전압, 전류, 순시전력의 파형

평균전력은 [그림 1-30]의 순시전력을 평균한 값으로, 식 (1.6)을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{avg} &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2} V \sin \omega t \sqrt{2} I \sin(\omega t - \phi) dt \\
 &= VI \cos \phi \text{ [W]}
 \end{aligned} \tag{1.37}$$

여기서 V 와 I 는 실효값이다.

일반적으로 변압기, 발전기 등과 같은 전기 기계나 설비의 전력 용량은 피상전력의 크기로 나타낸다. 피상전력은 실효전압과 실효전류 크기의 곱으로 주어지며 변압기와 같은 전력 장치의 정격을 표시하는 데 주로 사용된다. 피상전력은 다음과 같이 구한다.

$$S = V_{rms} I_{rms} \tag{1.38}$$

전압과 전류가 정현파인 경우 식 (1.35)의 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 i &= \sqrt{2} I \sin(\omega t - \phi) \\
 &= \sqrt{2} I (\cos \phi \sin \omega t - \sin \phi \cos \omega t)
 \end{aligned} \tag{1.39}$$

식 (1.39)에서 정현파 전류 i 는 전압 v 와 동상인 성분 i_d 그리고 90° 의 위상차를 가진 성분 i_q 로 나눌 수 있으며, 각 성분을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$i_d = (\sqrt{2} I \cos \phi) \sin \omega t \quad (1.40)$$

$$i_q = (-\sqrt{2} I \sin \phi) \cos \omega t \quad (1.41)$$

이때 식 (1.42)는 전압과 동상인 성분으로 유효전류라고 한다. 유효전력 P 는 전원에서 공급되고 부하에서 실제로 소비되는 전력으로, 전류의 실효값 $I \cos \phi$ 와 전압의 실효값 V 를 곱한 것과 같다.

$$P = VI \cos \phi [\text{W}] \quad (1.42)$$

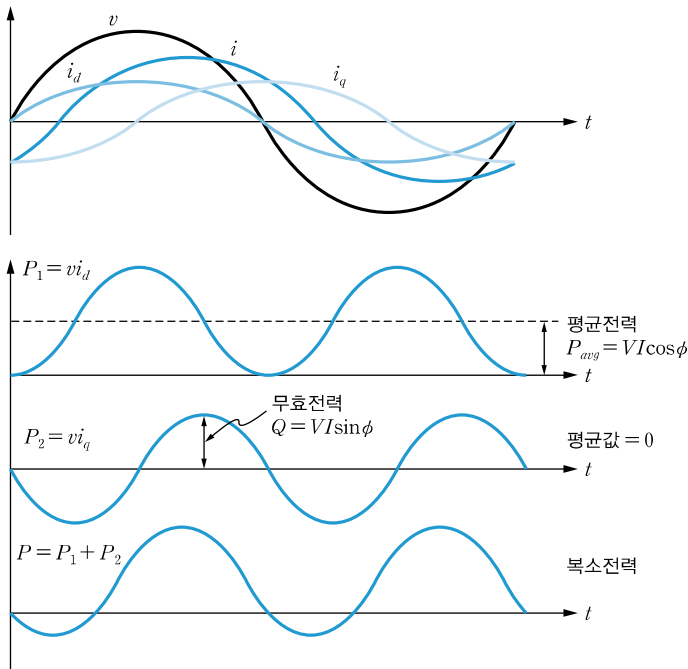
또한 식 (1.41)은 전압과 90° 의 위상차를 가진 전류 성분으로 무효전류라고 한다. 무효전류와 전압의 실효값 V 의 곱을 무효전력 Q 라 하며 다음과 같다.

$$Q = VI \sin \phi [\text{VAR}] \quad (1.43)$$

복소전력은 교류회로에서 유효전력과 무효전력의 합으로 이뤄진다.

$$S = P + jQ = (V_{rms})(I_{rms})^* \quad (1.44)$$

V_{rms} , I_{rms} 는 위상의 크기와 각으로 표시되는 복소량이고 I_{rms}^* 는 위상전류의 공액복소이다. 전압, 전류, 유효전력, 무효전력, 피상전력 등의 파형은 [그림 1-31]과 같이 나타난다.

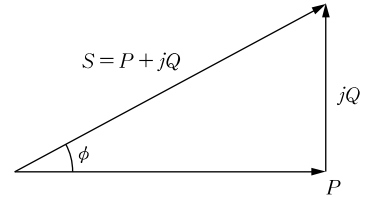


[그림 1-31] 전압, 전류, 전력의 파형

전력전달의 관점에서 직접적으로 유용한 성분은 유효전력이므로, 무효전력을 최소화함으로써 전력전달의 효율을 개선하기도 한다. 이때 전력전달의 효율성을 **역률** power factor이라 하며, 다음과 같이 피상전력과 유효전력의 비로 나타낸다.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{VI\cos\phi}{VI} = \cos\phi \quad (1.45)$$

식 (1.45)에서 $\phi > 0$ 이면 **지상역률** lagging power factor이라 하고, $\phi < 0$ 이면 **진상역률** leading power factor이라 한다. 유효전력과 무효전력을 벡터로 나타낸 것을 **전력벡터도**라 하며 [그림 1-32]와 같다.



[그림 1-32] 전력벡터도

[표 1-2]에 전력의 종류와 의미를 정리하였다.

[표 1-2] 전력의 종류와 의미

구분	식	의미
순시전력	$p(t) = v(t) \cdot i(t) [W]$	단위 시간당 공급/소비하는 에너지
평균전력	$P_{avg} = VI\cos\phi [W]$	순시전력의 평균값
피상전력	$S = VI [VA]$	교류의 부하와 용량을 표시하는 전력
유효전력	$P = VI\cos\phi [W]$	전원에서 실제 소비하는 전력
무효전력	$Q = VI\sin\phi [VAR]$	실제 아무 일도 하지 않는 전력
복소전력	$S = P + jQ = (V_{rms})(I_{rms})^*$	유효전력과 무효전력의 합
역률	$PF = \frac{P}{S} = \frac{VI\cos\phi}{VI} = \cos\phi$	전력전달의 효율성

예제 1-11

주파수 60 [Hz], 교류전원 240 [V] (rms)에 직렬로 $R = 20 [\Omega]$, 인덕터 $L = 20 [mH]$, 커패시터 $C = 200 [\mu F]$ 인 부하가 연결되어 있다. 이때 회로에 흐르는 전류와 피상전력 S , 유효전력 P , 무효전력 Q , 역률을 구하고 PSIM으로 확인하라.

풀이

먼저 임피던스 Z 는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = 20 + j120\pi \times 0.02 - j\frac{1}{120\pi \times 0.0002} \\ &= 20 + j(7.54 - 13.26) = 20 - j5.72 = 20.8 \angle -15.96^\circ [\Omega] \end{aligned}$$

회로에 흐르는 전류 I 는 전압을 임피던스로 나누어 다음과 같이 구한다.

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{240}{20.8 \angle -15.96^\circ} = 11.54 \angle -15.96^\circ [\text{A}]$$

피상전력 S 는 식 (1.38)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$S = VI^* = 240 \cdot 11.54 \angle -15.96^\circ = 2769.6 \angle -15.96^\circ [\text{VA}]$$

유효전력 P 는 식 (1.42)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$P = |S| \cos \phi = 2769.6 \cdot \cos(-15.96)^\circ = 2663 [\text{W}]$$

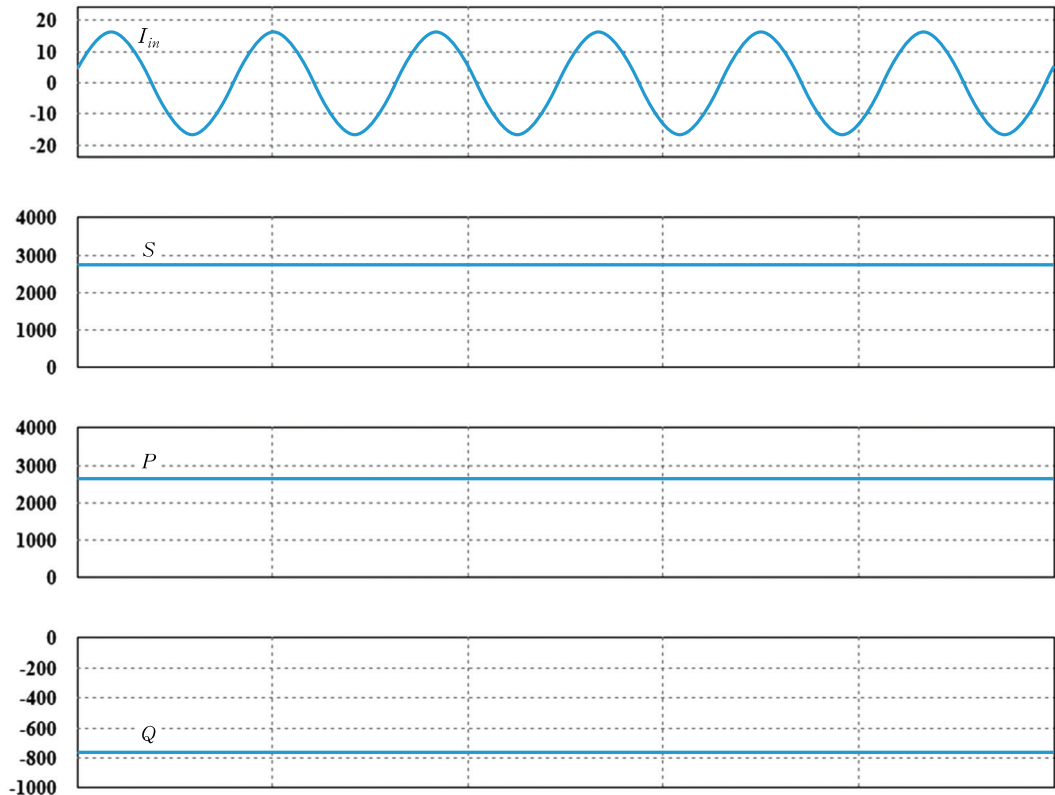
무효전력 Q 는 식 (1.43)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

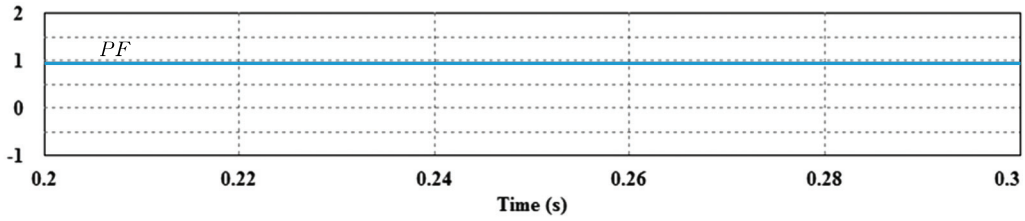
$$Q = |S| \sin \phi = 2769.6 \cdot \sin(-15.96)^\circ = -761.5 [\text{VAR}]$$

역률은 피상전력과 유효전력의 비로 식 (1.46)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$PF = \frac{P}{S} = \cos \phi = 0.9614 (\text{진상})$$

주어진 파라미터값을 대입하여 PSIM으로 시뮬레이션한 결과 입력전압, 출력전압, 출력전류는 아래와 같다.





[그림 1-33] PSIM 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과와 계산값을 비교하면 다음과 같다.

구분	전류	피상전력 S	유효전력 P	무효전력 Q	역률
계산값	11.54	2769.6	2663	-761.5	0.9614
시뮬레이션 결과	11.54	2768.87	2662.93	-761.73	0.9614

1.2.4 비정현 주기함수의 해석

전원 측 전류 고조파

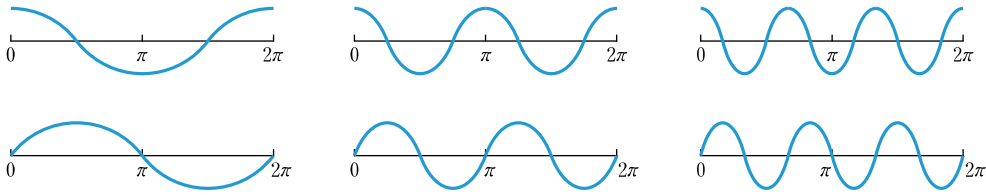
전력전자회로에서는 전력용 반도체 소자의 스위칭에 의해 비정현 주기의 전압과 전류가 나타난다. 비정현파 해석은 다음과 같이 단순한 함수를 이용하여 주기가 2π 인 여러 함수 $f(x)$ 를 표현한다.

$$1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots, \cos nx, \sin nx, \dots \quad (1.46)$$

이때 식 (1.46)과 같이 함수의 주기가 2π 인 함수들은 소위 삼각함수계(trigonometric system)를 이룬다고 말하는데, 이 중 일부를 [그림 1-34]에 나타냈다(단, 상수 1은 예외이며, 상수는 어떤 주기에 대해서도 주기함수이다). 그리고 이러한 함수로부터 얻어지는 급수를 삼각급수(trigonometric series)라 하며 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} & a_0 + a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x + \dots \\ & = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \end{aligned} \quad (1.47)$$

여기서 상수 2π 를 이 급수의 계수(coefficient)라 한다. 이 급수의 각 항은 주기가 2π 이다. 그러므로 이 급수가 수렴한다면 그 함수는 주기가 2π 인 주기함수일 것이다. 주기가 2π 인 함수 $f(x)$ 가 식 (1.47)과 같은 급수로 표현된다 함은 수렴하여 그 함수가 $f(x)$ 라는 것이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.



[그림 1-34] 주기에 따른 코사인함수와 사인함수

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (1.48)$$

식 (1.48)을 함수 $f(x)$ 의 푸리에 급수 Fourier series라 한다. 또한 식 (1.48)에서의 계수를 함수 $f(x)$ 의 푸리에 계수 Fourier coefficient라 하며, 오일러 공식 Euler's formula에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (1.49a)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1.49b)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1.49c)$$

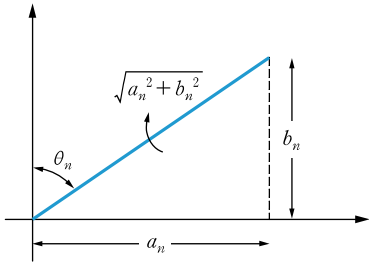
식 (1.49)에서 동일 주파수의 사인함수와 코사인함수는 푸리에 급수의 또 다른 표현식인 하나의 정현함수로 결합할 수 있다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t + \phi_n) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1.50)$$

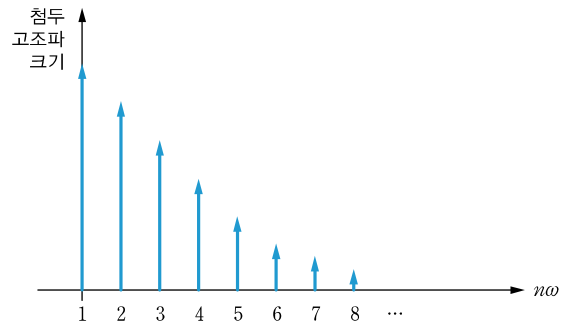
$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(-\frac{a_n}{b_n}\right), \quad \theta_n = \tan^{-1}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (1.51)$$

이때 a_0 항은 $f(t)$ 의 평균값으로 전기 설비의 직류전압 또는 직류전류를 나타낸다. 또한 계수 c_1 은 기본 주파수가 ω 인 항의 크기이고, 계수 c_2, c_3, \dots 는 주파수가 $2\omega, 3\omega, \dots$ 인 고조파의 크기이다. 식 (1.51)을 위상도로 표현하면 [그림 1-35]와 같다.

또한 [그림 1-36]은 $f(t)$ 의 주파수 스펙트럼으로, $f(t)$ 의 주파수에 대응하는 고조파 성분의 크기를 나타낸다. 이때 n 이 커짐에 따라 고차 고조파의 크기가 감소한다. c_1 은 기본파 성분의 피크값으로 우리가 원하는 성분이지만 나머지는 원하지 않는 성분이다.



[그림 1-35] 식 (1.51)의 위상도



[그림 1-36] $f(t)$ 의 주파수 스펙트럼

임의의 회로에서 주기가 T 인 비정현 주기파의 전류 측 전류가 i_S 이고 전원전압이 v_S 일 때 푸리에 급수를 적용하면 다음과 같다.

$$i_S(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1.52)$$

$$v_S(t) = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1.53)$$

여기서 I_{dc} , V_{dc} 는 직류 성분이고 I_n , V_n ($n = 1, 2, 3, \dots$)은 n 차 고조파의 크기이다. 기본파의 전류와 전압 성분은 다음과 같다.

$$i_{S1}(t) = I_{S1} \sin(\omega t + \theta_1) \quad (1.54)$$

$$v_{S1}(t) = V_{S1} \sin(\omega t + \theta_1) \quad (1.55)$$

여기서 I_{S1} 과 V_{S1} 은 전압과 전류 기본파 성분의 피크값이다. 전류와 전압의 실효값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{S, rms} &= I_{dc}^2 + \left(\frac{I_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2 \\ &= I_{dc}^2 + I_{1, rms}^2 + I_{2, rms}^2 + \dots + I_{n, rms}^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (1.56)$$

$$\begin{aligned} V_{S, rms} &= V_{dc}^2 + \left(\frac{V_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{V_2}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}}\right)^2 \\ &= V_{dc}^2 + V_{1, rms}^2 + V_{2, rms}^2 + \dots + V_{n, rms}^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (1.57)$$

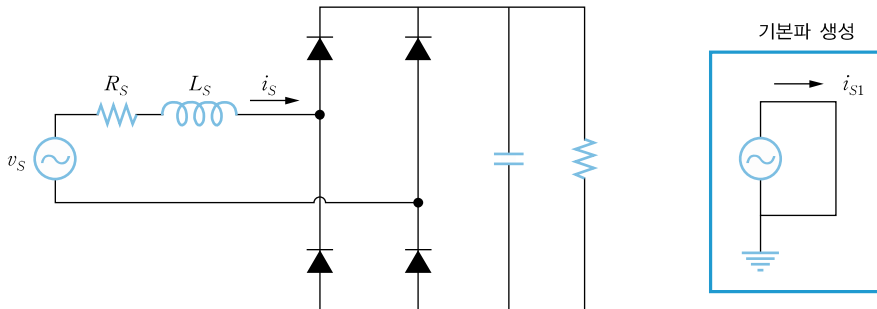
순시전력은 $p(t) = i_S(t) \cdot v_S(t)$ 로 구할 수 있으며, 평균전력은 다음과 같이 구한다.

$$p_{avg}(t) = I_{dc} V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{S_{n, rms}} \cdot V_{S_{n, rms}} \cos \theta_n \quad (1.58)$$

여기서 θ_n 은 n 번째 고조파 전압 V_n 과 고조파 전류의 위상차를 나타낸다.

전 고조파 왜율

전원 측 전류 i_S 의 기본 주파수 성분 i_{S1} 에 대한 왜곡된 성분의 실효값은 전 고조파 왜율^{total} harmonic distortion, THD로 정의할 수 있다. [그림 1-37]에서 전원 측의 L_S 는 내부 인덕턴스와 직렬로 연결된 외부 인덕턴스의 합이고, 저항 R_S 는 전원 측 손실을 나타낸다. [그림 1-37]의 단상 전파 다이오드 정류회로에서 전원 측 전압을 v_S , 전류를 i_S 라 하면 i_S 의 기본파 전류 i_{S1} 과 전류의 왜곡 성분 $i_{S,d}$ 는 [그림 1-38]과 같은데, 이는 PSIM으로 시뮬레이션하여 얻은 파형이다.



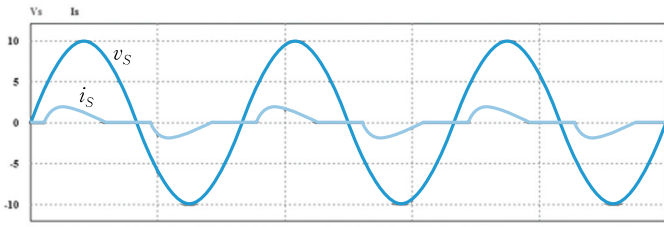
[그림 1-37] 단상 전파 다이오드 정류회로

[그림 1-37]의 회로를 PSIM으로 구현하기 위한 파라미터를 [표 1-3]에 정리했다.

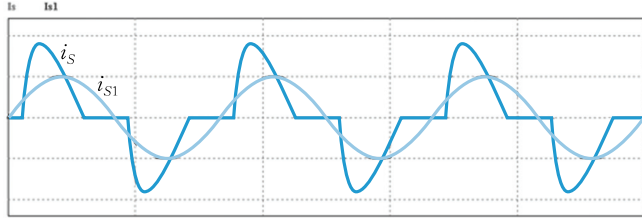
[표 1-3] 시뮬레이션 파라미터

항목	값
입력 전압	10[V], 60[Hz]
기본파 전압	1[V], 60[Hz]
입력 측 저항, 인덕터	1[Ω], 100[μH]
출력 측 커패시터	1[mF]
부하	10[Ω]

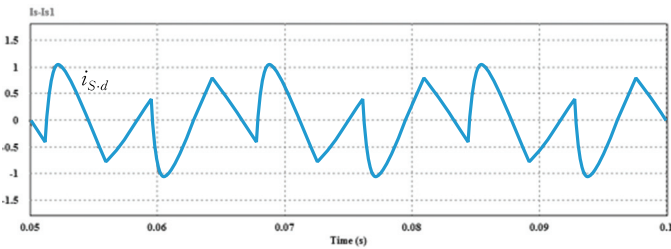
푸리에 해석을 통해 [그림 1-38(b)]의 기본 주파수 전류 성분 i_S 를 구할 수 있다. 이때 입력 전류의 왜곡된 성분 $i_{S,d}$ 는 입력 전류 i_S 와 기본 주파수 성분 $i_{S1}(t)$ 의 차로 표현되며 [그림 1-38(c)]와 같다. 이러한 왜곡 성분에는 기본 주파수의 정수배에 해당하는 주파수 성분이 포함된다.



(a) 전원 측 전압 v_s 와 전류 i_s 의 파형



(b) 전원 측 전류 i_s 의 파형과 기본파 성분 전류 i_{s1} 의 파형



(c) 왜곡된 전류의 파형 $i_{s,d}$

[그림 1-38] 각 부분의 파형

$$i_{s,d} = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{n=2}^{\infty} i_{sn}(t) \quad (1.59)$$

$$v_{s,d} = v_s(t) - v_{s1}(t) = \sum_{n=2}^{\infty} v_{sn}(t) \quad (1.60)$$

주기를 T 라고 할 때 [그림 1-38(a)]의 전원 측 전류 $i_s(t)$ 의 실효값은 다음과 같이 구한다.

$$I_{s, rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_s^2(t) dt} \quad (1.61)$$

전 고조파 왜율은 기본 주파수 항의 실효값에 대한 전 고조파의 실효값으로 나타낼 수 있다.

$$THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{s, rms}}{I_{s1, rms}}\right)^2 - 1} \quad (1.62)$$

$$THD_v = \sqrt{\left(\frac{V_{s, rms}}{V_{s1, rms}}\right)^2 - 1} \quad (1.63)$$

왜곡된 파형의 역률

왜곡된 파형의 역률을 계산하는 식은 정현파의 경우보다 복잡하다.

$$PF = \frac{I_{S1, rms}}{I_{S, rms}} \cos \theta_1 \quad (1.64)$$

여기서 θ_1 은 전압 $v_S(t)$ 와 전류 $i_S(t)$ 의 기본파 성분 간의 위상각이다. 전력전자회로에서 상전압은 순수한 정현파이고 전류는 왜곡된 파형일 때 다음과 같이 표현된다.

$$v_S(t) = V_S \sin \omega t \quad (1.65)$$

$$i_S(t) = \text{비정현적인 왜곡된 전류} \quad (1.66)$$

이 전류는 푸리에 급수를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_S(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + I_2 \sin(2\omega t + \theta_1) + \dots + I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (1.67)$$

평균전력을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{avg} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_S i_S dt \\ &= \frac{V_S I_1}{2} \cos \theta_1 \\ &= V_{S, rms} I_{S1, rms} \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (1.68)$$

그러므로 역률을 다시 쓰면 다음과 같다.

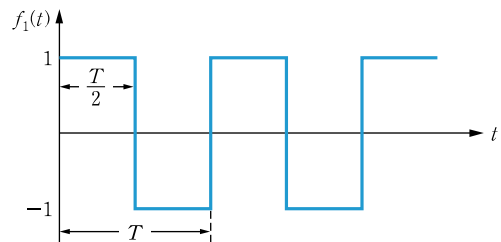
$$PF = \frac{I_{S1, rms} V_{S, rms} \cos \theta_1}{I_{S, rms} V_{S, rms}} = \frac{I_{S1, rms}}{I_{S, rms}} \cos \theta_1 \quad (1.69)$$

예제 1-12

[그림 1-39]와 같이 주기가 T 인 구형파를 푸리에 급수로 전개하라.

풀이

[그림 1-39]에서 a_0 항은 평균값이므로 0이고, 기함수이므로 $a_n = 0$ 이 된다. 또한 b_n 항도 홀수만 존재하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 1-39] 주기가 T 인 구형파

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \\
 &= \frac{2}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} 1 \cdot \sin n\omega t dt + \int_{\frac{T}{2}}^T (-1) \cdot \sin n\omega t dt \right] \\
 &= \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi)
 \end{aligned}$$

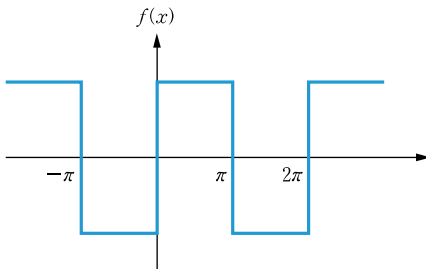
따라서 푸리에 급수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \right] \sin n\omega t \\
 &= \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)
 \end{aligned}$$

예제 1-13

주기가 다음과 같은 구형파 함수의 푸리에 급수를 구하라.

$$f(x) = \begin{cases} -k & (-\pi < x < 0) \\ k & (0 < x < \pi) \end{cases}, \quad f(x+2\pi) = f(x)$$



[그림 1-40] 주기적인 구형파 함수 $f(x)$

풀이

역학 시스템의 외부에서 가해지는 힘이나 전기회로에서의 기전력 등은 이러한 구형파 주기함수로 나타난다. 한 점에서의 $f(x)$ 값이 적분에 영향을 미치지 않으므로 $x=0$, $x=\pm\pi$ 에서 $f(x)$ 값은 정의되지 않은 상태로 둘 수 있다.

이때 식 (1.49)로부터 $a_0=0$ 이다. 이 계숫값은 $-\pi$ 와 π 사이에서 $f(x)$ 의 면적이 0이므로 적분을 하지 않고도 알 수 있다.

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi}^0 (-k) \cos nx dx + \int_0^{\pi} k \sin nx dx \right]$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[-k \frac{\cos nx}{n} \Big|_{-\pi}^0 - k \frac{\cos nx}{n} \Big|_0^{\pi} \right]$$

왜냐하면 $\sin nx$ 가 $x = -\pi, 0, \pi$ 에서 모든 $n = 1, 2, \dots$ 에 대해 0이므로 계수 a_n 의 값이 0이기 때문이다. 같은 방법으로 식 (1.49)를 이용하여 다음과 같이 계수 b_n 을 얻는다.

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi}^0 (-k) \sin nx dx + \int_0^{\pi} k \sin nx dx \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \left[-k \frac{\cos nx}{n} \Big|_{-\pi}^0 - k \frac{\cos nx}{n} \Big|_0^{\pi} \right] \end{aligned}$$

한편 $\cos(-\alpha) = \cos \alpha$ 이고 $\cos 0 = 1$ 이므로 b_n 은 다음과 같다.

$$b_n = \frac{k}{n\pi} [\cos 0 - \cos(-n\pi) - \cos n\pi + \cos 0] = \frac{2k}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$$

또한 $\cos \pi = -1$, $\cos 2\pi = 1$, $\cos 3\pi = -1$ 등이 되므로 일반적으로 다음 식이 성립한다.

$$\cos n\pi = \begin{cases} -1 & (n \text{이 홀수}) \\ 1 & (n \text{이 짝수}) \end{cases}$$

따라서 함수 $f(x)$ 의 푸리에 계수는 다음과 같다.

$$b_1 = \frac{4k}{\pi}, \quad b_2 = 0, \quad b_3 = \frac{4k}{3\pi}, \quad b_4 = 0, \quad b_5 = \frac{4k}{5\pi}, \quad \dots$$

계수 a_n 의 값이 0이므로 $f(x)$ 의 푸리에 급수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{4k}{\pi} \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right)$$

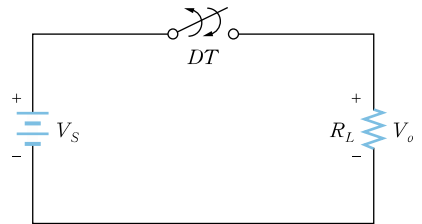
예제 1-14

[그림 1-41]과 같은 스위칭 회로에서 스위치는 DT 동안 열리고 $(1-D)T$ 동안 닫힌다. 이 회로의 평균 부하 전류, 출력 전압의 실효값, 출력 전력의 변환 효율, 출력 전압의 푸리에 급수를 구하라.

풀이

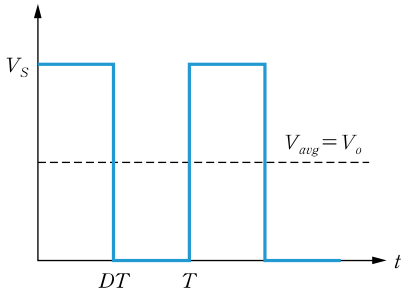
스위치 턴온 시간 t_{on} 을 스위칭 주기로 나누어 듀티 사이클 D 를 구하면 다음과 같다.

$$D = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f_s$$



[그림 1-41] 스위칭 회로

여기서 f_s 는 스위칭 주파수이다. DT 동안에 부하 저항이 입력 전원 V_S 에 연결된다. 반면에 $(1-D)T$ 구간에서는 부하 저항에 입력 전원이 인가되지 않는다. 부하 양단 전압 $v_{load}(t)$ 의 파형은 [그림 1-42]에서 보듯이 펄스 파형이 된다.



[그림 1-42] 출력 저항 R_L 양단의 전압 파형

따라서 평균 출력 전압 V_{avg} 는 다음과 같다.

$$V_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_S dt = \frac{V_S DT}{T} = DV_S$$

평균 출력 전압은 듀티 사이클 D 에 비례하며 듀티 사이클이 1이면 입력 전압과 같게 된다. 이 경우에 스위칭 동작이 없고 스위치는 항상 닫혀 있다. 평균 부하 전류 I_{avg} 는 옴의 법칙을 통해 얻을 수 있다.

$$I_{avg} = \frac{V_a}{R} = \frac{DV_S}{R}$$

출력 전압의 실효값은 식 (1.34)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$V_{avg} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{DT} V_S^2 dt} = \sqrt{D} V_S$$

스위칭 트랜지스터 양단의 전압 강하 V_{ce} 가 있다고 가정하면 스위칭 컨버터의 평균 입력 전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} V_S I_{avg} dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} \frac{V_S(V_S - V_{ce})}{R} dt \\ &= \frac{V_S(V_S - V_{ce})t_{on}}{RT} \end{aligned}$$

출력 전력 P_o 는 다음과 같이 구한다.

$$P_o = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} \frac{(V_S - V_{ce})^2}{R} dt = \frac{t_{on}}{T} \frac{(V_S - V_{ce})^2}{R}$$

변환 효율은 출력 전력을 입력 전력으로 나누어 구한다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{V_S - V_{\alpha}}{V_S}$$

따라서 위 식으로부터 변환 효율은 입력 전압 V_S 가 증가함에 따라 증가한다. 또한 출력 전압은 푸리에 급수의 합으로 설명된다.

$$v_o(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_s t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi n f_s t)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(2\pi n f_s t) d(\omega t)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(2\pi n f_s t) d(\omega t)$$

$D=0.5$ 이면 코사인 항은 전압 파형이 기함수이므로 0이다. 이때 푸리에 급수를 이용하여 출력 전압을 나타내면 다음과 같다.

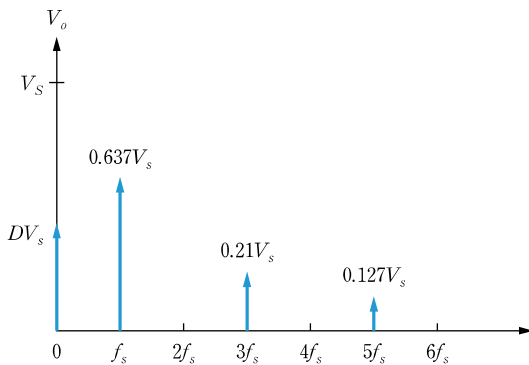
$$v_o(t) = DV_S + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_S(1 - \cos(n\pi)) \sin(2\pi n f_s t)}{n\pi}$$

위 식에서 첫 항인 DV_S 는 출력 전압의 평균값 또는 DC 값이다.

출력 전압의 기본파 성분 크기는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_{o,1} = \frac{V_S(1 - \cos \pi)}{\pi} = 0.637 V_S$$

즉 입력 전압 V_S 의 63.7%이다. 같은 방법으로 3차 고조파 성분 $3f_s$ 는 $0.21 V_S$ 혹은 V_S 의 21%이다. [그림 1-43]은 50% 듀티 사이클을 가진 기본적인 스위칭 컨버터 출력 전압의 고조파 스펙트럼이다. 전류 파형은 전압 파형과 유사하며, 이때 고조파 성분은 전류 파형을 부하 저항으로 나눈 것으로 전압 파형과 유사하다.



[그림 1-43] 기본적인 스위칭 컨버터의 출력 전압 고조파 스펙트럼

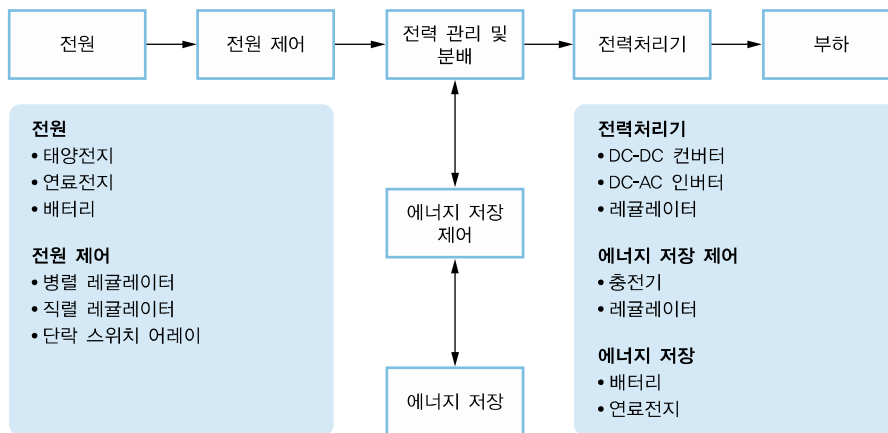
1.3 응용 분야

1.3.1 우주선과 항공기

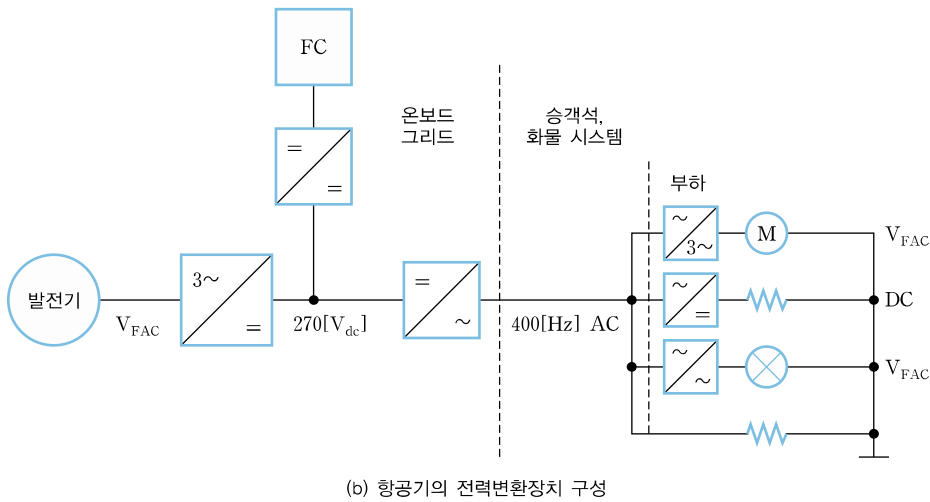
우주선과 항공기는 높은 신뢰성과 정밀도를 요구하는 각종 첨단 장비로 구성되어 있다. 또한 우주선과 항공기는 중량에 제한이 있어 모든 부품을 경량화, 소형화해야 하므로 매우 어려운 분야 중 하나이다.

여러 전자 장비에서 대부분의 중량을 차지하는 부분은 전원 장치이며, 전력전자공학에서 연구하는 전력변환 장치가 전원 장치로 사용되고 있다. 이러한 전력변환 장치를 소형화하는 방법 중 하나는 스위칭 주파수를 최대한 높이는 것인데, 이 조건을 만족시키기 위해 고주파 고효율 변환기, 마이크로 인버터, 변압기 등의 개발에 많은 연구가 이뤄지고 있다.

[그림 1-44]의 우주선과 항공기의 전력 시스템 구성도를 살펴보면 전원을 부하로 전달하는 데 다양한 전력변환 장치가 사용됨을 확인할 수 있다.



(a) 우주선의 전력 시스템 구성도 블록선도

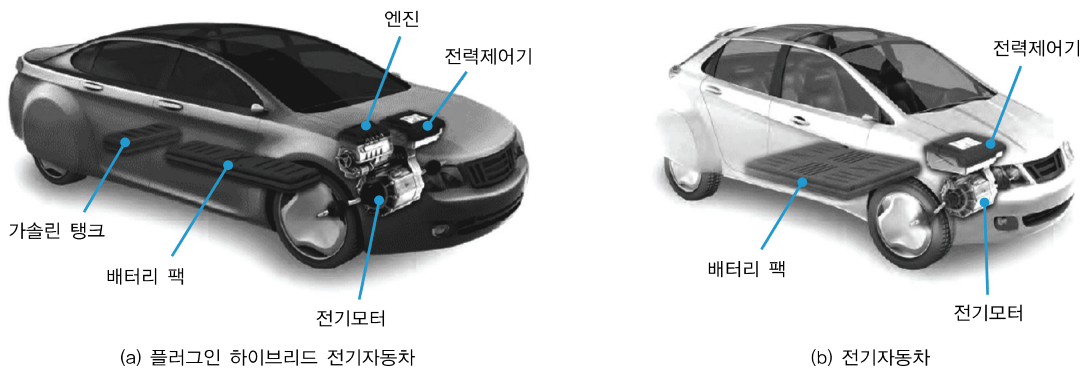


[그림 1-44] 우주선과 항공기의 전력 시스템 구성도

오늘날의 항공기는 중요한 전원을 직류로 변경하여 사용한다. 연료전지가 전원 장치에 결합되면 고전압 직류 그리드가 되며, 주 컨버터는 승객석과 화물 시스템에 교류 115[V], 400[Hz]의 전력이 공급된다. 고압 직류전원 계통은 DC-DC 컨버터, 연료전지 혹은 엔진에 의해 구동되는 발전기와 연결된 정류기 유니트인 AC-DC 컨버터에 의해 공급된다.

1.3.2 전기자동차

기존의 내연기관 자동차는 화석연료에서 동력을 얻을 수 있었다. 하지만 화석연료의 고갈과 함께 에너지 위기가 찾아오면서 전 세계적으로 에너지 절약과 지구의 환경 보호를 목적으로 전기자동차에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. [그림 1-45]는 플러그인 하이브리드 전기자동차와 전기자동차의 내부 구조를 보여준다.



[그림 1-45] 플러그인 하이브리드 전기자동차와 전기자동차의 내부 구조
출처 : Union of Concerned Scientists, Catalyst, Spring 2012

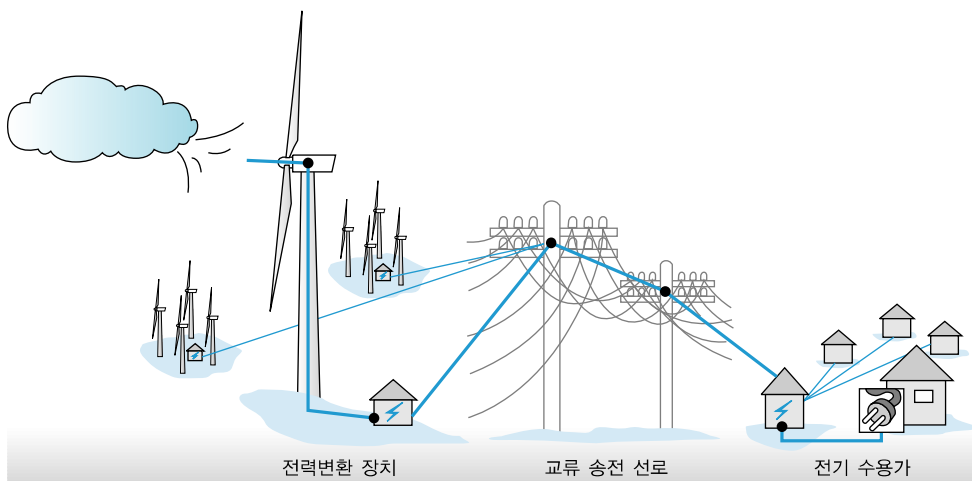
플러그인 하이브리드 자동차는 가정이나 건물의 전기 등을 이용하여 외부에서 충전한 배터리의 전기 동력으로 주행하다가 배터리가 방전되면 일반 하이브리드 자동차처럼 내연기관 엔진과 배터리의 전기 동력을 동시에 사용하여 운행한다.

전기자동차의 가장 핵심적인 동력원은 배터리이다. 배터리를 인버터에 연결하여 배터리에서 출력되는 직류 전기에너지를 교류로 변환하고, 변환된 교류를 이용하여 교류전동기를 구동함으로써 기계적 토크를 얻을 수 있다. 제동 시에는 제동 에너지를 전기적으로 회생하여 배터리를 충전함으로써 에너지 효율을 높일 수 있다. 여기서 사용되는 배터리의 성능을 최대한 활용하려면 고밀도 급속 충전이 가능한 배터리 충전기와 고효율 인버터의 개발이 필수적이다.

1.3.3 풍력 발전

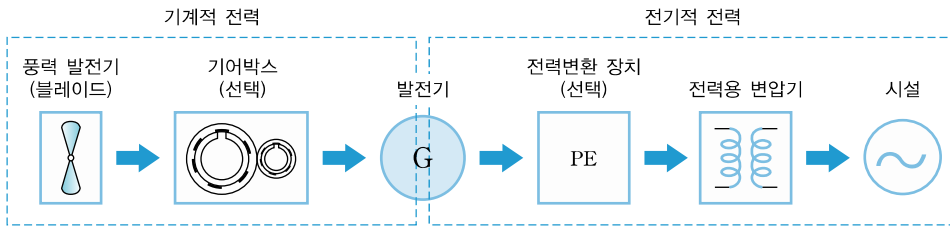
화석연료를 사용함으로써 지구 온난화가 가속되고, 화석연료가 고갈되면서 가격이 급등하는 현상이 나타나고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 에너지 부족 문제를 해결하고 환경을 보호하기 위해 공해가 없고 반영구적인 풍력 발전에 대해 많은 연구를 하고 있다. 풍력 발전은 바람을 이용하여 전기를 생산하는 것으로, 매년 전 세계적으로 보급량이 꾸준히 증가하고 있다. 또한 5~7[MW]급의 대형 풍력 발전기가 일반화될 정도로 고도의 성장을 이루고 있다.

[그림 1-46]은 풍력 발전기로부터 얻은 전력이 전력변환 장치와 교류 송전 선로를 거쳐 전기 수용가까지 전송되는 과정을 보여준다. 이 중에서 전력변환 장치에는 컨버터-인버터 시스템이 포함되어 있는데, 60[Hz]로 일정한 상용 계통에 연계하기 위해서는 고성능의 컨버터-인버터 시스템이 반드시 필요하다.



[그림 1-46] 풍력 발전기의 전력 전송 과정

[그림 1-47]의 풍력 발전 시스템은 바람을 운동에너지로 전환하는 풍력 발전기 블레이드, 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 발전기, 전기에너지를 적절한 전압과 주파수로 변환하는 전력변환 장치, 사용자가 필요로 하는 형태의 전압으로 바꿔주는 변압기로 구성된다.



[그림 1-47] 풍력 발전 시스템의 구성도

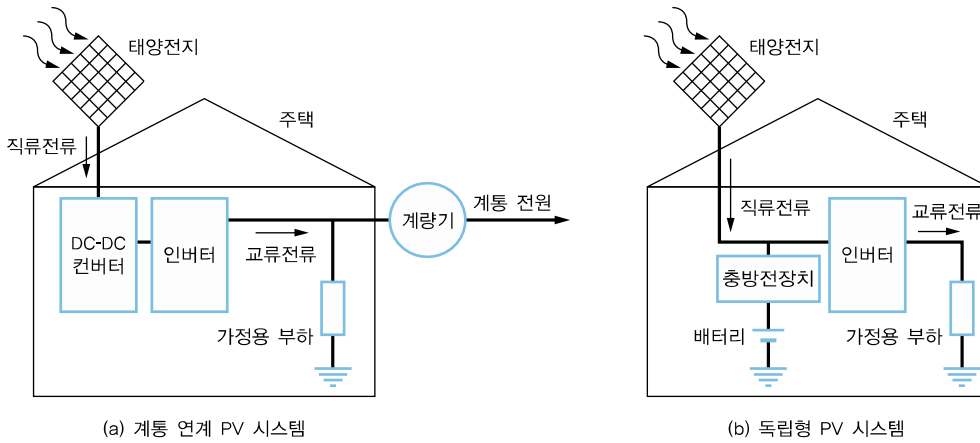
1.3.4 태양광 발전

풍력과 더불어 태양광 발전 시스템도 무공해 청정에너지원으로 많은 관심을 받고 있다. 풍력에 비해 발전 단가가 높지만 태양광에너지도 반영구적인 에너지이므로 여러 나라에서 많은 연구가 이뤄지며 지속적으로 성장하고 있는 추세이다. 태양광 발전에서 가장 중요한 요소는 태양광 셀의 효율 향상이다. 현재 단결정 실리콘(Si) 셀의 효율은 20% 전후이며, 갈륨비소(GaAs) 계열 태양전지의 효율은 18~30%대이다. 최근에는 에너지 변환 효율을 높이기 위해 집광형 고밀도 셀을 개발하고 있다.

태양광 발전 시스템에서는 PV 어레이로부터 받은 전력을 DC-DC 컨버터를 거쳐 승압하고, 다시 단상 인버터에 연결하여 계통 연계한다. 그중 중앙 집중형 태양광 발전 시스템은 태양전지, 태양전지 출력을 배터리에 저장하는 충전 장치, 전력변환 장치, 배터리와 계통 연계 장치로 구성된다.

태양전지에서 태양전지 셀은 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 반도체 소자로 출력 전압이 약 0.5[V] 내외이다. 1개의 셀은 전압과 전력이 작으므로 여러 개의 태양전지 셀을 직렬과 병렬로 연결하여 일정 전력이 나오도록 태양전지 모듈을 구성한다. 다수의 태양전지 모듈을 태양전지 패널에 연결하여 구성한 것이 태양전지의 어레이(PV 어레이)이다.

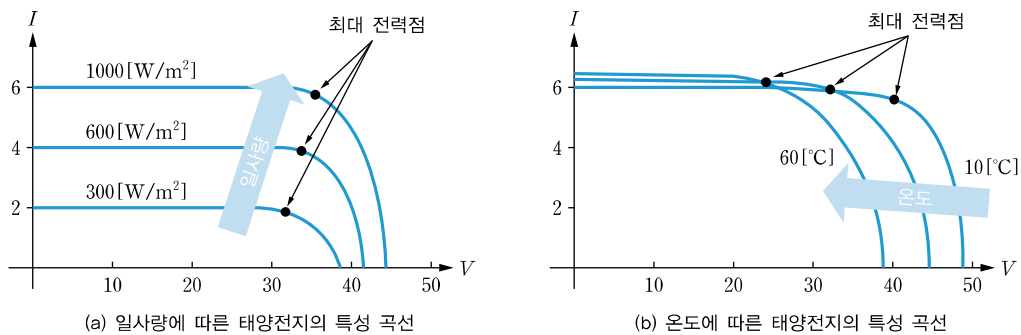
[그림 1-48(a)]와 같은 직류의 태양전지 발전 전력은 계통 연계를 위해 일반적으로 DC-DC 컨버터를 통해 승압되고, 계통 연계형 인버터를 통해 승압된 직류전력이 교류전력으로 변환된다. [그림 1-48(b)]와 같이 태양전지가 빛에너지를 받지 못하는 시간대에도 발전 전력을 이용할 수 있도록 배터리를 사용한 에너지 저장 장치가 추가되는데, 에너지 저장 장치는 배터리와 배터리 충전·방전용 전력변환 장치로 구성된다.



[그림 1-48] 태양광 발전 시스템

태양전지는 [그림 1-49]와 같이 일사량이 증가함에 따라 발전 전압과 전류의 크기가 증가하고, 일사량이 적은 경우에는 일사량이 큰 경우와 크게 차이가 나지 않는 출력 전압에 비해 출력 전류가 급격히 감소한다. 그런데 태양의 일사량 변화에 의해서도 이러한 특성이 나타나지만, 구름에 의한 태양전지 패널의 음영과 같은 자연현상에 의해 같은 변화가 나타나기도 한다. 또한 온도에 따라서도 출력 전압과 출력 전류의 특성이 변화한다.

즉 발전 가능한 전력은 일사량, 주변 환경 및 온도에 따라 크게 변하게 된다. 따라서 전력변환 장치를 통해 출력 임피던스값을 제어하여 최대 전력을 낼 수 있는 전압 또는 전류에서 동작하게 만드는 최대 전력점 maximum power point의 추종 제어로 태양광 발전 시스템의 효율을 높일 수 있다.



[그림 1-49] 일사량과 온도에 따른 태양전지의 전압-전류 특성 곡선

중앙 집중형 태양광 발전 시스템은 위에서 언급한 최대 전력점 추종 제어를 모든 태양전지 어레이에서 수행할 수 없다는 단점이 있다. 그러므로 하나의 태양전지 패널에 연결되어 태양전지의 발전 및 계통 연계를 수행하는 모듈 집적형 컨버터 module integrated converter, MIC 구조를 가진 모듈 집

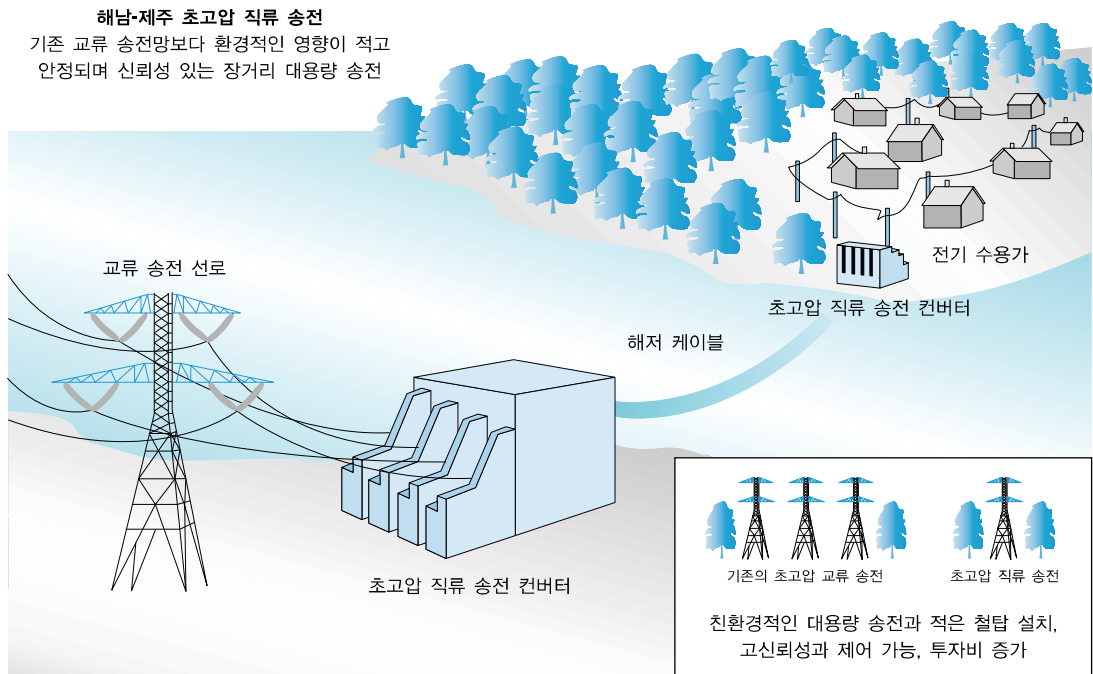
적형 태양광 발전 시스템이 개발되고 있다. 즉 태양광 발전 시스템은 모듈 집적형 컨버터가 태양 전지 패널 뒤쪽에 부착되어, 각 태양전지 패널의 최대 전력점 추종 제어를 수행하여 태양광 발전 효율을 높이고, 직류출력을 교류출력으로 변환하여 계통 연계를 수행한다.

1.3.5 초고압 직류 송전

초고압 직류 송전(high voltage direct current, HVDC) 기술은 해저 케이블 송전, 대용량 장거리 송전, 주파수가 상이한 교류 계통 간의 연계, 도시 밀집 지역의 단락 용량 경감을 위한 연계 등 활용 분야가 넓은 차세대 전력전송 기술이다.

우리나라는 1988년부터 해남에서 육지의 값싼 전력을 제주도에 공급하는 초고압 직류 송전 기술을 운영하고 있다. 제주와 해남을 연결하는 HVDC 연계 설비는 2개소 HVDC 해저 케이블 2회선(150[MW]×2)으로 구성되었으며, 각 변환 설비가 300[MW]급 전력을 갖추고 있다.

[그림 1-50]은 기존의 교류 송전망에서 HVDC 컨버터로 직류전력을 만들고, 해저 케이블을 통해 제주도 쪽의 HVDC 컨버터는 직류전력을 교류전력으로 변환하여 공급한다.

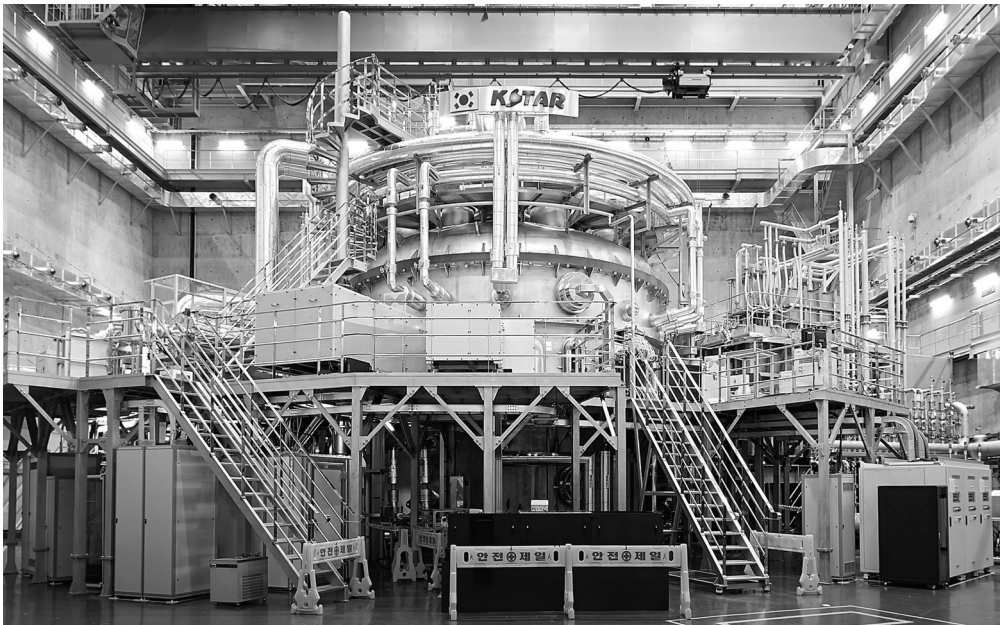


[그림 1-50] 초고압 직류 송전 설치 모습
 출처 : ABB(<http://www.abb.co.kr>)

1.3.6 핵융합 발전

핵융합은 원자핵을 서로 충돌시켜서 융합하는 것인데, 이때 질량 결손에 상당하는 매우 큰 에너지가 방출된다. 핵융합 발전은 바로 이 에너지를 전력으로 이용하는 것이다. 170[GHz]의 고마이크로웨이브를 발생시키는 전자공명 가열 시스템의 전원 장치는 캐소드 전원 장치, 가속 전원 장치, 케소드가 열 전원 장치, 콜렉터 코일 전원 장치 및 제어 시스템으로 구성된다.

2007년에 우리나라가 독자적으로 개발에 성공한 한국형 핵융합 연구로 KSTAR^{Korea Superconducting Tokamak Advanced Research}은 대전광역시 유성구에 위치한 국가핵융합연구소^{NFRI}에 설치되어 있다. KSTAR의 토로이달 코일용 전원 장치는 고주파 인버터, 필터 유닛, 방전 유닛으로 이뤄져 있으며, 이를 통해 자석에 흐르는 전류를 제어할 수 있다. [그림 1-51]은 KSTAR 장치를 보여준다.

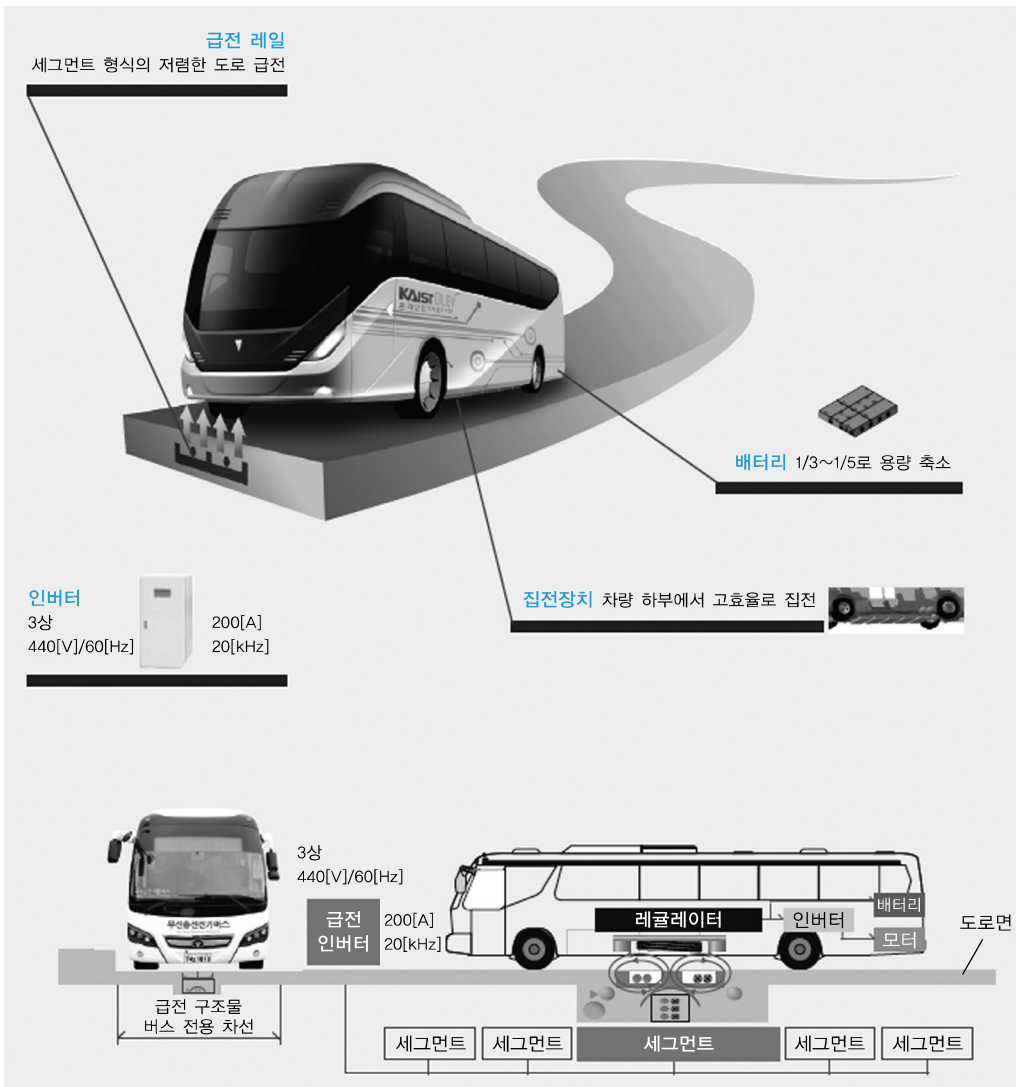


[그림 1-51] KSTAR 토카막 외형

출처 : 국가핵융합연구소(<http://www.nfri.re.kr>)

1.3.7 무선 전력전송

실시간 대용량 무선 충전이 가능한 신개념 자동차 시스템을 개발하면 도로를 충전소로 활용하고 배터리 문제와 충전 문제를 해결할 수 있다. 최근 20[kHz] 무선 전력전송 원천 기술을 이용하여, 도로 밑에 매설된 전선에서 발생하는 자기장을 차량 부하에 장착된 집전장치를 통해 전기에너지로 변환하여 차량을 운행하는 친환경 전기자동차를 [그림 1-52]와 같이 개발하였다.



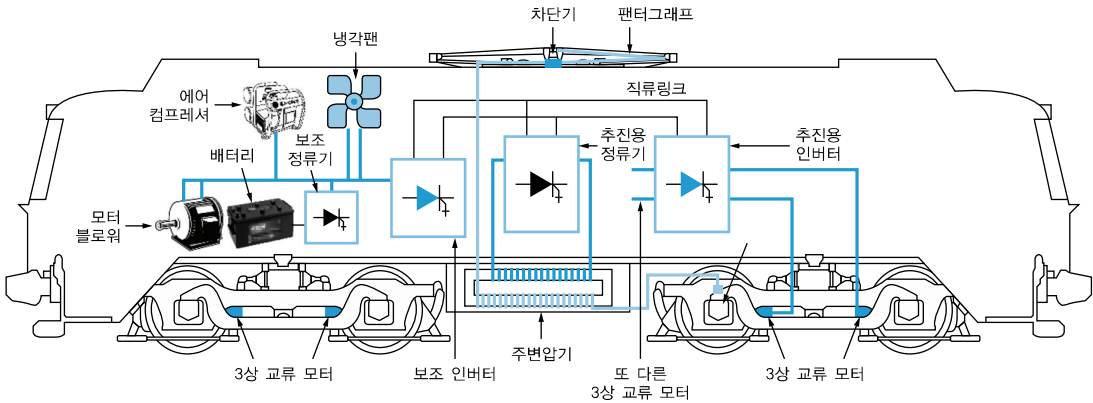
[그림 1-52] 무선 전력전송의 구현

출처 : KAIST 무선전송연구센터(<http://www.smfir.co.kr>)

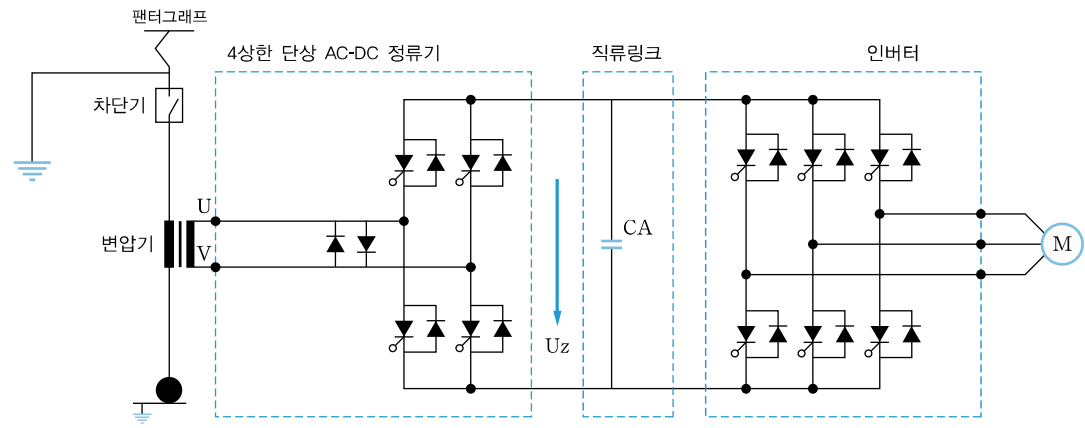
1.3.8 교류 전기기관차

교류 전기기관차는 주 변압기, AC-DC 정류기, DC-AC 인버터와 보조정류기로 구성되어 있으며, 이를 그림으로 나타내면 [그림 1-53(a)]와 같다. 교류전력은 팬터그래프와 차단기를 거쳐 주변압기에서 강압되어 AC-DC 정류기에 공급된다. 4상한 단상 AC-DC 정류기는 교류전원을 직류전력으로 변환하여 직류링크에 연결된 추진용 인버터를 거쳐 교류전동기에 공급하고, 또한 직류링크에서 교류전원 측으로 회생된 에너지를 보내는 역할을 한다. 또한 보조정류기는 [그림 1-53(a)]

와 같이 각종 제어 장치 및 승객 서비스 장치에 전원을 공급하는 역할을 한다. 예를 들면 전기철도 차량 내의 냉난방 장치, 공기 압축기, 조명 장치, 출입문 개폐 등을 담당한다. 배터리 충전기를 이용하여 자동차 내의 각종 직류 제어 장치에 전원을 공급한다.



(a) 교류 전기기관차

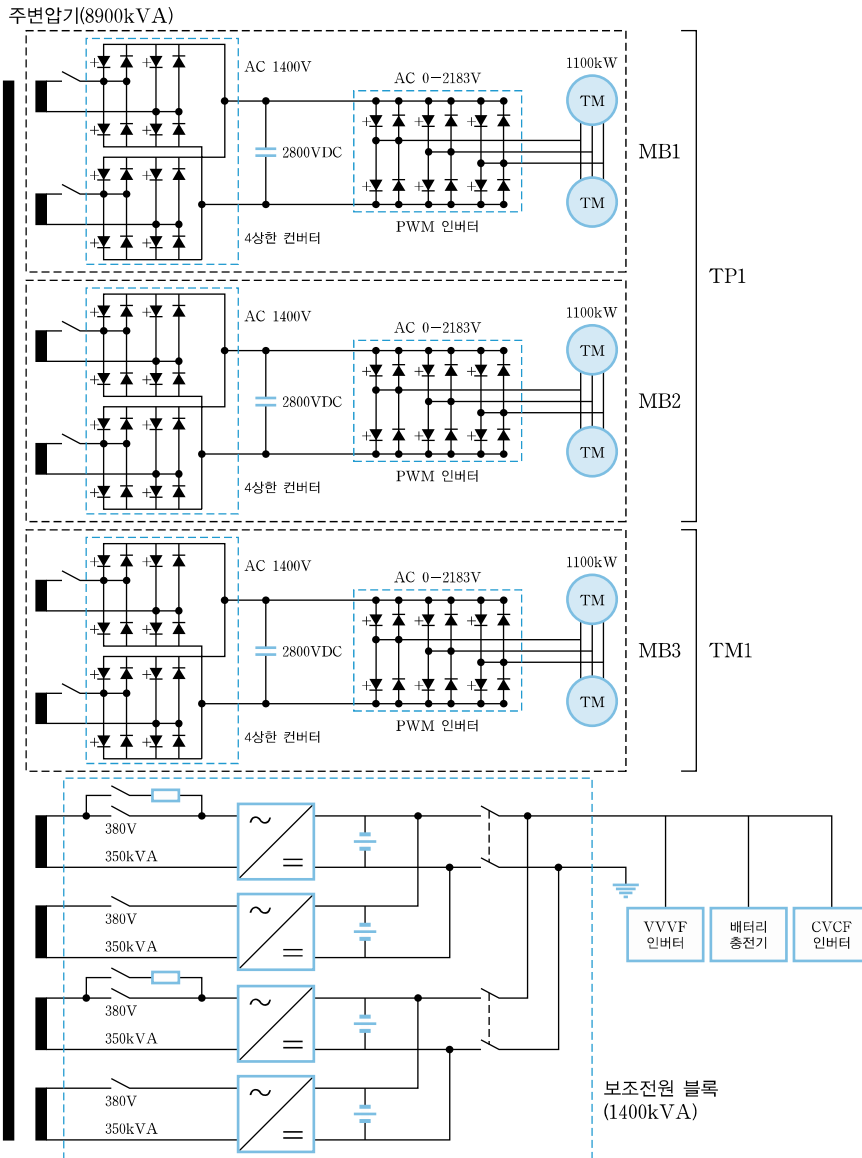
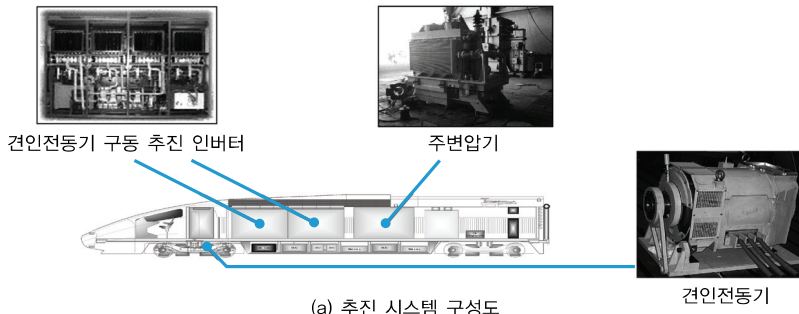


(b) 전력변환 장치 회로

[그림 1-53] 교류 전기기관차와 전력변환 장치
출처 : LEM(lsn@lem.com, http://lem.com)

1.3.9 한국형 고속전철

고속전철의 추진 시스템을 이루는 견인전동기 구동 추진 인버터, 주변압기 및 견인전동기의 실제 외형은 [그림 1-54(a)]와 같다. [그림 1-54(b)]에서 추진 시스템은 컨버터 2대를 병렬 운전하고 인버터 1대로 견인전동기 2대를 구동하는 구조로 되어 있는 MB이며, 동력차의 경우는 3개의 전동기 구동 추진 인버터로 구성된다. 전동기 구동 추진 인버터는 IGCT, 다이오드가 각 2개씩으로 구성된 브리지 한 상을 하나의 스택으로 조립하여 컨버터용 4개 스택, 인버터용 3개 스택과 별도의 초퍼 스택 1개 등으로 구성되며 직류단 콘덴서, 각 부의 전압, 전류검지기 및 제어부가 포함된다.



(b) 한국형 고속전철의 추진 시스템

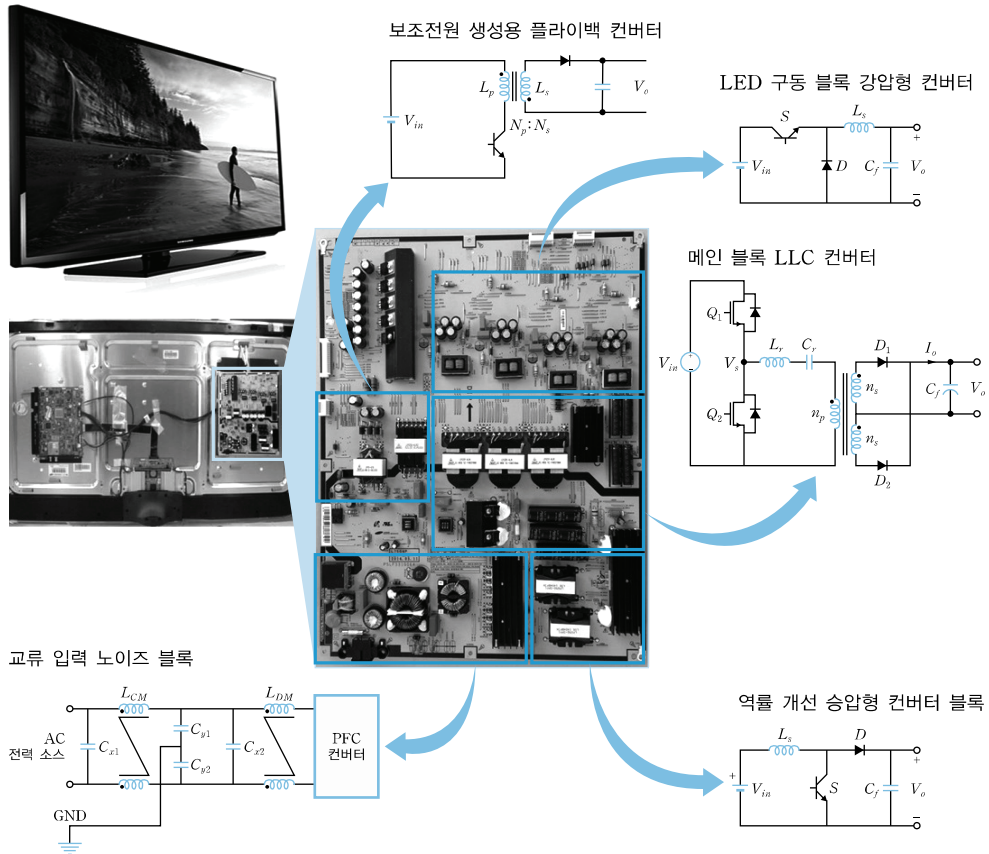
[그림 1-54] 한국형 고속전철의 추진 시스템 구성도와 추진 시스템

출처 : 한국철도기술연구원(<http://www.krri.re.kr>)

2병렬 4상한 초퍼로 구성된 컨버터 시스템은 직류링크 전압을 $2,800[V_{dc}]$ 로 제어하고, 컨버터 1대 용량은 약 $1,238[kVA]$ 로 하며 입력단 전압은 $1,400[V_{ac}]$ 이다. 이러한 병렬 컨버터를 사용함으로써 입력 역률이 1에 가깝도록 제어가 가능하고, 회생 제동시에 에너지를 입력 측으로 환원할 수 있으며, 입력 전류를 정현파 형태로 제어하므로 입력 측 고조파 성분을 저감할 수 있다.

1.3.10 TV 디스플레이용 전원

현대 사회에서 디스플레이는 인류의 문명을 주도해온 중요한 산업 기술 중 하나이다. 디스플레이용 전원 장치는 상용 라인($90\sim 264[V_{ac}]$)으로부터 입력을 받아 고조파 규제 회피를 위한 PFC power factor correction 컨버터를 통해 약 $380\sim 400[V_{dc}]$ 의 직류전압을 생성하고, 이후 직류 전력 변환기를 거쳐 부하 구동에 필요한 다양한 전원을 공급한다.



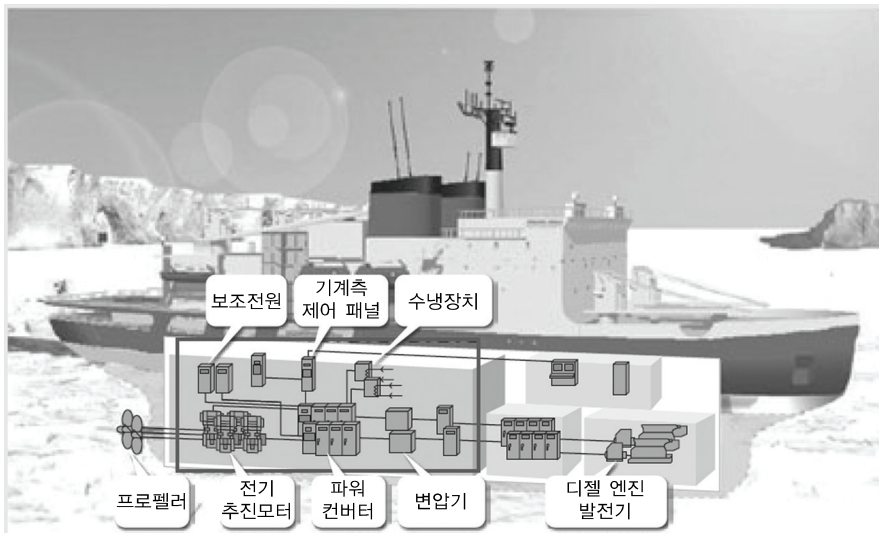
[그림 1-55] TV 디스플레이용 전력 블록의 구성도
출처 : 삼성전기(<http://www.sem.samsung.co.kr>)

[그림 1-55]는 TV 디스플레이용 전력 블록의 구성도이며, 교류 상용 전원에서부터 발생하는 EMI 노이즈를 저감하는 EMI 필터단, THD 규제 및 역률을 보정하는 승압형 컨버터로 구성된 PFC단, 보조전원을 생성하는 플라이백 컨버터, 전 부하 영역에 대해 ZVS(zero voltage switching) 동작을 하면서 시스템에 주 전원을 제공하는 LLC 공진형 컨버터, 일정한 빛 세기를 조절하기 위해 정전류를 제어하고 빛의 휘도를 조절하는 승압형 또는 강압형 컨버터로 구현되는 LED 드라이버단으로 구성된다.

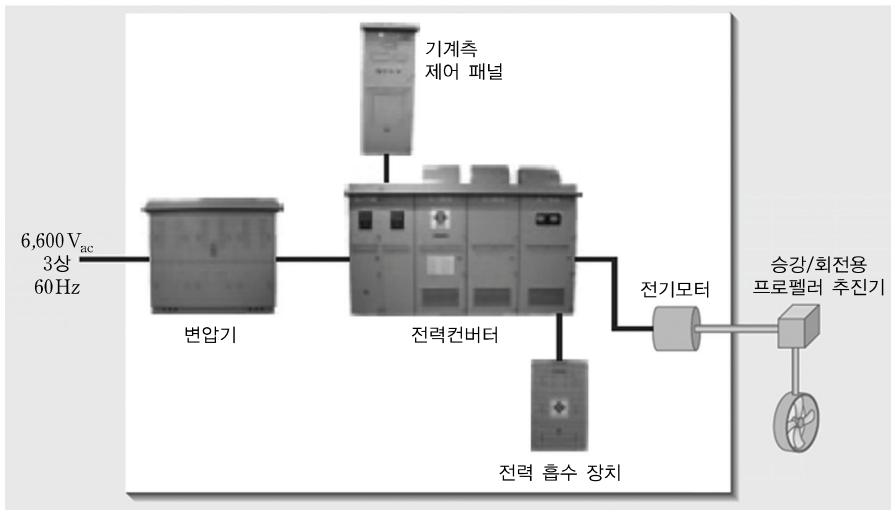
최근의 전원회로는 초소형화, 초경량화를 목표로 빠른 발전을 거듭하고 있다. 따라서 소재 및 반도체 소자 기술, 회로 토폴로지 기술, 제어 기술, 패키징 기술 등이 선행되어야 하며, 고효율/고전력밀도 전력 모듈의 적용을 위해 고주파 스위칭 및 디지털 제어를 통한 디스플레이 전원 시스템의 지속적인 연구 및 개발이 필요하다.

1.3.11 전기선박

선박용 전기추진 시스템은 발전기로부터 선체 외부의 프로펠러와 일체형으로 구성된 전동기를 사용하여 추진하며, 진동, 소음을 낮출 수 있다. 이러한 전기추진 시스템은 디젤엔진, 발전기, 컨버터, 전동기, 프로펠러, 추진축 등으로 구성되며, 추진을 위한 주 디젤엔진과 타 장치의 전원공급을 위한 보조디젤엔진이 통합된 형태로 구성되어 디젤엔진에 연결된 발전기가 추진 전동기와 선박의 타 장치에 전압을 공급하고, 전동기를 원하는 속도로 구동시키기 위해 발전기로부터 공급되는 전원을 컨버터로 제어한다.



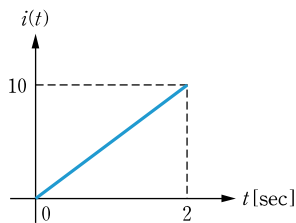
[그림 1-56] 전기추진 시스템에 의한 쇄빙선



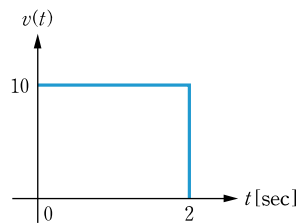
[그림 1-57] 승강/회전용 프로펠러 추진기 구동 시스템

출처 : Hitachi Review Vol. 62 (2013), No. 3

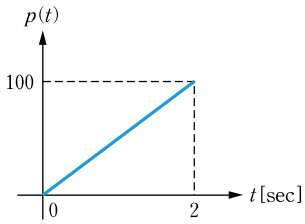
- 1.1 전력전자가 무엇인지 정의하고 설명하라.
- 1.2 전력전자 기술이 있기 전의 워드 레오나드 시스템과 현재의 인버터를 사용한 워드 레오나드 시스템을 비교하여 설명하라.
- 1.3 전력처리 시스템의 개념도를 그리고 설명하라.
- 1.4 전력전자의 구성 영역에 대해 설명하라.
- 1.5 전력변환 방식의 종류에 대해 설명하라.
- 1.6 우주선에 사용되는 전력 시스템의 구성도를 그려라.
- 1.7 항공기에 사용되는 파워 서플라이에 대해 설명하라.
- 1.8 태양광 발전에 대해 설명하라.
- 1.9 무선 전력전송에 대해 설명하라.
- 1.10 인덕터에 흐르는 전류가 다음 그림과 같을 때 이 인덕터의 양단에 걸리는 전압, 순시전력 및 2초 동안 축적된 에너지를 구하라. 단, 코일의 인덕턴스는 2[H]이다.



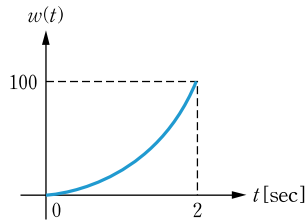
(a) 전류



(b) 전압

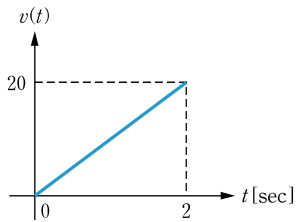


(c) 전력

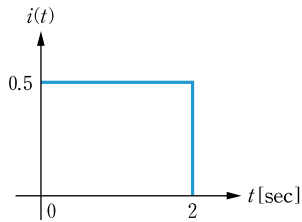


(d) 에너지

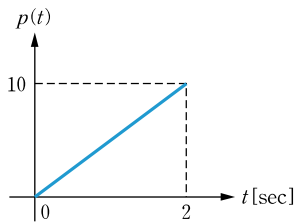
1.11 콘덴서 양단의 전압이 다음 그림과 같을 때 콘덴서에 흐르는 전류, 콘덴서에 걸리는 전력 및 2초 동안 축적된 에너지를 구하라. 단, 콘덴서의 커패시턴스는 50[mF]이다.



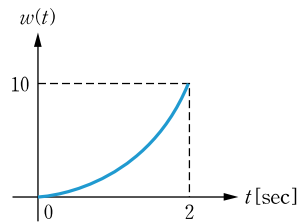
(a) 전압



(b) 전류

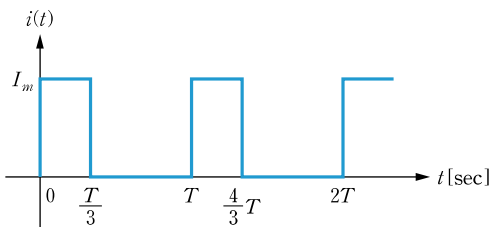


(c) 전력

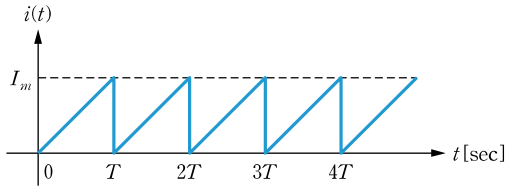


(d) 에너지

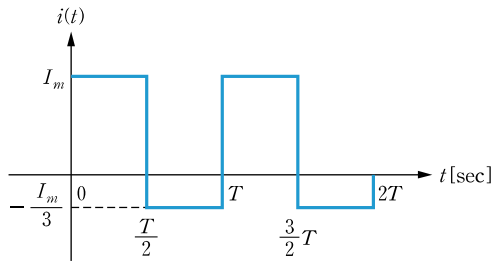
1.12 다음 그림과 같은 구형 펄스파의 실효값과 평균값을 구하라.



1.13 다음 그림과 같은 톱니파의 실효값과 평균값을 구하라.

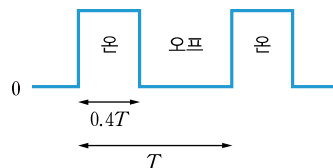
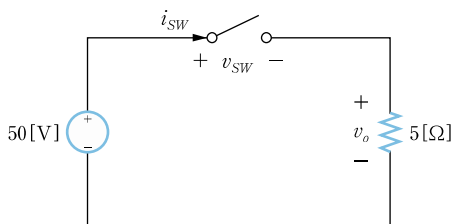


1.14 다음 그림과 같은 구형파 전류의 실효값과 평균값을 구하라.



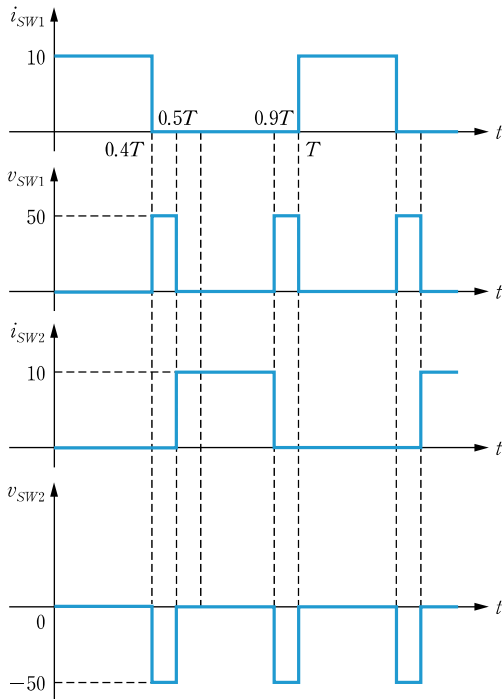
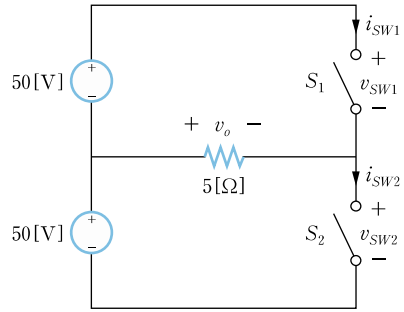
1.15 저항 부하를 가진 스위칭 회로에서 스위치는 이상적이고 듀티비 40%에서 동작할 때, 다음을 구하라.

- i_{SW} 와 v_{SW} 에 대한 파형을 그려라.
- 평균 출력 전압을 구하라.
- 부하에 전달되는 평균 출력 전압을 구하라.
- DC 전원에 의해 공급된 평균 출력을 구하라.
- 회로의 효율을 구하라.



1.16 오른쪽 그림과 같이 2개의 스위치를 가진 회로가 있다. S_1 과 S_2 가 이상적인 스위치라고 할 때, 부하가 $5[\Omega]$ 인 i_{sw1} , i_{sw2} , v_{sw1} , v_{sw2} 를 그리고 다음을 구하라.

- 평균 출력 전압
- 부하에 전달된 평균전력
- 효율



1.17 기계적 에너지가 $400[\text{J/s}]$ 의 비율로 직류발전기에 공급된다. 발전기는 $120[\text{V}]$ 에서 $3.22[\text{A}]$ 를 전달한다.

- 발전기의 효율은 몇 %인가?
- 운전 중에 분당 얼마나 많은 에너지가 손실되는가?