

전기 기본이론 (Basic Theories of Electrical Engineering) -IV

4. 발전기

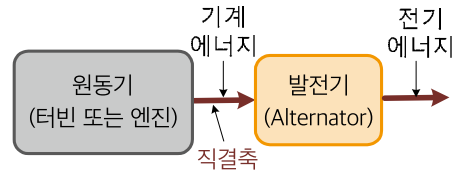
연재목록

1. 전류
2. 전기와 자기
3. 임피던스
4. 발전기
5. 전동기
6. 변압기
7. 전력
8. 접지
9. 전기안전
10. 노이즈
11. 무정전 전원설비

발전기에는 동기발전기, 유도발전기, 풍력발전기, 태양광발전기 등 여러가지가 있다. 이들 중 Solar Cell을 이용하는 태양광 발전을 제외하고는 모두다 자계 내에서 코일을 회전시켜 코일과 자속이 채교하게 함으로써 패러데이의 전자유도법칙에 의해 전력을 생산한다.

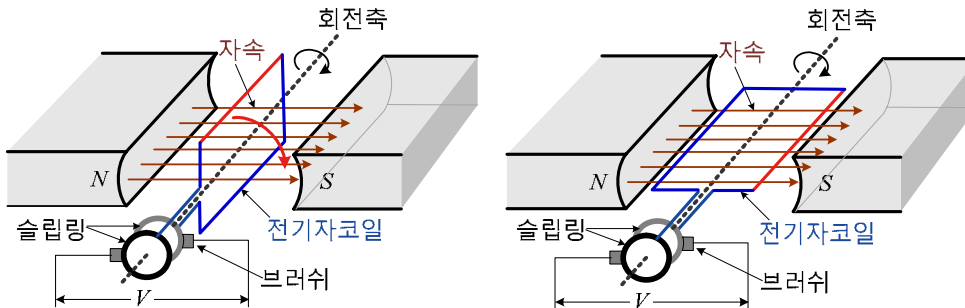
발전기의 구조와 원리

발전기 Set는 원동기에서 나오는 기계적 에너지를 직결축을 통해 발전기 (Alternator)에 전달해서 발전기에서 전기 에너지로 변환하는 장치이다. 일반적으로 발전기라고 하면 원동기와 발전기를 포함해서 지칭하는 경우가 많다. 원동기로는 증기터빈, 가스터빈, 수차(Water Turbine), 디젤엔진 등이 사용된다.



발전기는 그림과 같이 N-S 자계 내에서 회전축에 권선되어 있는 전기자 코일이 회전하는 구조로 되어 있다. N-S 자극은 극히 소용량 발전기의 경우는 영구자석을 사용하기도 하지만, 일반적인 발전기는 모두 전자석을 사용하는데, 이 전자석을 만들기 위해서 감아놓은 권선을 계자권선이라고 한다. (그림에 계자권선은 표시하지 않았다)

전기자 코일은 회전축에 감겨있어서 회전축과 함께 회전한다. 발전기에서 생산된 전력을 외부로 인출하기 위해서는 전기자 코일에 전선을 접속해야 하는데, 전선을 전기자 코일에 직접 접속해 두면 회전축이 몇 바퀴 돌아가면 끊어져 버릴 것이므로, 회전축에 슬립링을 설치해서 여기에 전기자 코일을 접속한다. 슬립링에 브러시가 접촉된 상태로 미끄러지면서 축이 회전하도록 하고 브러쉬에 외부로 접속되는 전선을 접속한다.



위의 그림에서 전기자 코일이 왼쪽 그림의 위치에 있을 때 코일을 관통하는 자속은 최대가 된다. 코일이 그림의 빨간화살표 방향으로 회전하면 코일을 관통하는 자속은 점점 적어지다가 오른쪽 그림과 같이 코일 평면이 수평으로 되어 자속의 방향과 같아지는 순간에는 코일을 관통하는 자속은 0이 된다. 그림에서 한쪽 코일변을 빨간 색으로 표시한 것은 코일이 회전하는 상태를 쉽게 볼 수 있도록 하기 위한 것이다.

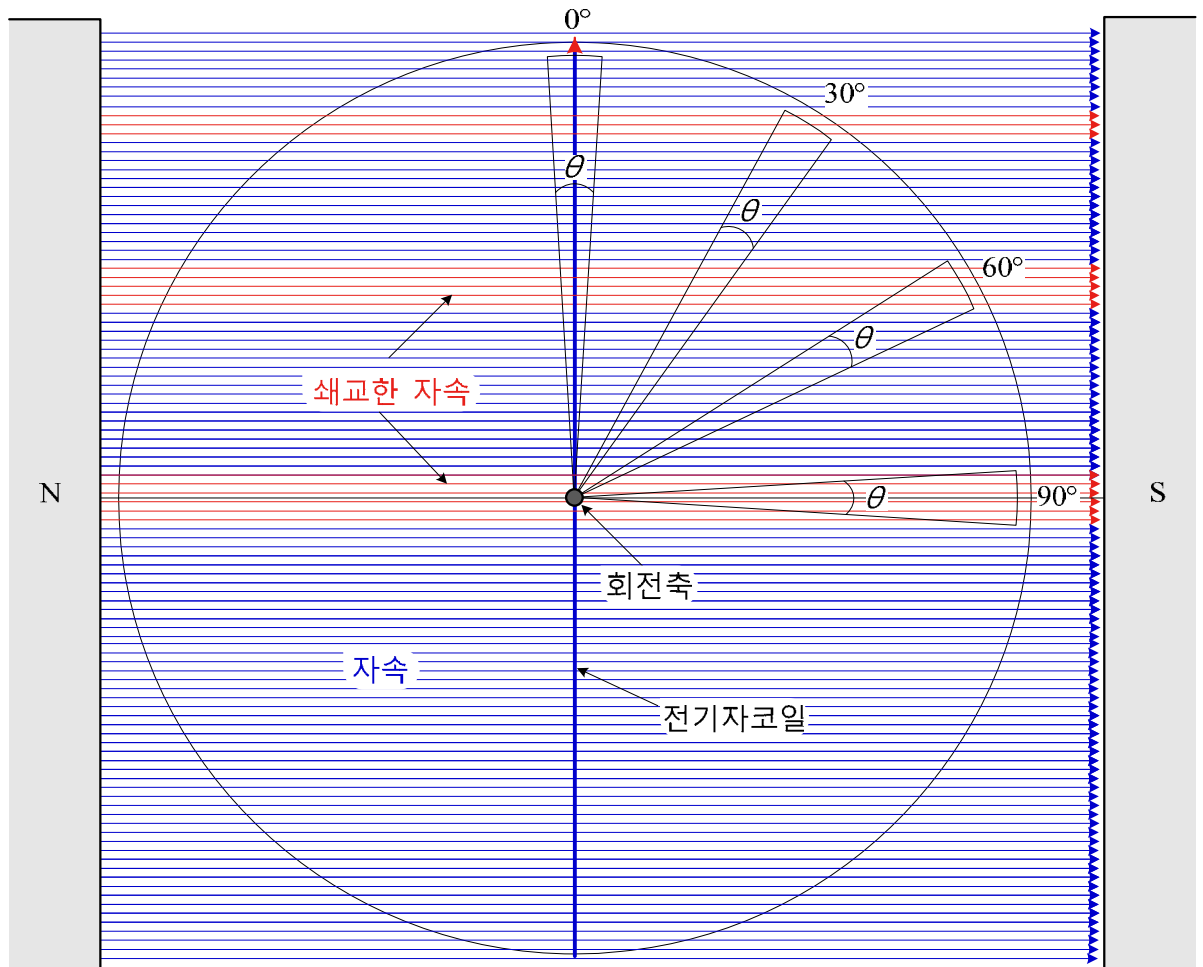
자계 내에서 코일이 회전하면 코일을 관통하는 자속의 양이 연속적으로 변화하기 때문에 코일에는 패러데이의 전자유도법칙에 따른 전압이 유기된다.

전기자 코일이 앞의 왼쪽 그림에서 오른쪽 그림으로 90° 회전할 때 코일을 관통하는 자속의 변화량을 고찰해 본다. 자기력선은 천문학적인 숫자 만큼 무한히 많이 있겠으나, 이를 모두 그릴 수는 없으므로 다음 그림에 그린 선이 전부라고 가정한다.

앞의 왼쪽 그림의 위치를 0°라고 하면 다음 그림에서 0° 부근에서 코일이 $\angle\theta$ 만큼 회전해도 코일을 관통하는 자속의 양에는 변화가 없음을 볼 수 있다. 30° 부근에서 같은 $\angle\theta$ 만큼 회전하면 그림에서 3가닥의 자속이 감소하고, 60° 부근에서 같은 $\angle\theta$ 만큼 회전하면 그림에서 5가닥의 자속이 감소하고, 90° 부근에서는 같은 $\angle\theta$ 만큼 회전할 때 3가닥이 감소했다가 3가닥이 증가해서 총 6가닥의 자속변화가 있는 것을 볼 수 있다.

즉, 0° 부근에서 코일을 관통하는 자속의 양에 변화가 없으므로 자속의 시간에 대한 변화율 $d\phi/dt = 0$ 이고 각도가 90°에 가까워질수록 $d\phi/dt$ 가 커지는 것을 알 수 있다. 그림에서는 회전축 상부의 자속변화만을 고찰해 보았으나 회전축 하부에서도 같은 비율로 $d\phi/dt$ 가 변해간다.

패러데이의 전자유도법칙 $e = -nd\phi/dt$ 에 따라 다음 그림의 0°에서 유기 기전력은 0[V]이고, 각도가 증가해 가면서 유기기전력이 점점 커지다가 90° 부근에서 최대가 된다.

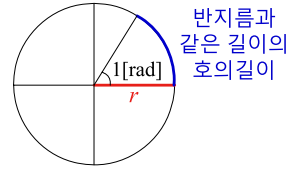


각도와 각속도

공학에서 사용하는 각도에는 **Degree**[°], **Radian**[Rad] 및 **Gradient**[Grad]의 3가지가 있다. Degree 단위는 한바퀴를 360°로 나눈 것이고, Gradient 단위는 한바퀴를 400[Grad]로 나눈 것이다. 즉, Degree 단위로 90°는 Gradient 단위로는 100[Grad]가 된다.

Radian 단위는 그림과 같이 원의 반지름과 같은 길이의 호의 길이가 만드는 각을 1[rad]으로 정의한 것이다. 원둘레는 $2\pi r$ 이니까 한바퀴를 돌면

$$\frac{2\pi r}{r} = 2\pi [rad]$$



이 된다. 2극 발전기의 전기자 코일이 한바퀴를 돌았을 때, Degree 단위로는 360° 돌았다고 할 수 있고, Radian 단위로는 $2\pi [rad]$ 돌았다고 말할 수 있다. 결국 $2\pi [rad] = 360^\circ$ 이므로 $1 [rad] = 360 / 2\pi = 57.2958^\circ$ 가 된다. 2극 발전기가 1초에 60바퀴를 돌 때 회전하는 **각속도**를 Degree 단위로 표시하면

$$360^\circ \times 60 [\text{바퀴/s}] = 21,600 [^\circ/\text{s}]$$

로 표시할 수 있고, 1초에 60바퀴 도는 회전속도를 Radian 단위로 표시하면 한바퀴는 $2\pi [rad]$ 이니까

$$2\pi [rad] \times 60 [\text{바퀴/s}] = 120\pi [rad / s]$$

의 **각속도**로 회전하는 것이다. 2극기에서 한바퀴는 정현파 1 [Cycle]이 된다. 따라서 1초에 60바퀴를 돌면 **주파수**가 60 [cycle/s]가 되어 주파수 $f = 60 [\text{cycle} / s]$ 가 되므로 각속도를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$2\pi [rad] \times 60 [\text{바퀴/s}] = 2\pi [rad] \times 60 [\text{cycle/s}] = 2\pi f [rad / s]$$

전기공학에서는 $2\pi f [rad / s]$ 를 간단히 $\omega [rad / s]$ 로 사용한다. 즉, $\omega = 2\pi f [rad / s]$ 이다.

속도[m/s]에 시간[s]을 곱하면 거리[m]가 되는 것과 같이, 각속도[°/s]에 시간[s]을 곱하면 각도[°]가 되고, Radian 단위로 하면, 각속도[rad/s]에 시간[s]을 곱하면 각도[rad]이 된다. 따라서 전기공학에서 흔히 사용하는 ωt 는 각속도에 시간을 곱한 것이므로 각도(Degree 또는 Radian)이다. 주파수가 60Hz인 경우 각속도는

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 120\pi [rad / s]$$

가 되고 이 각속도로 0.01초 동안 회전했다면, 그때 회전한 각도는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta = 120\pi [rad / s] \times 0.01 [s] = 3.77 [rad] = 216^\circ$$

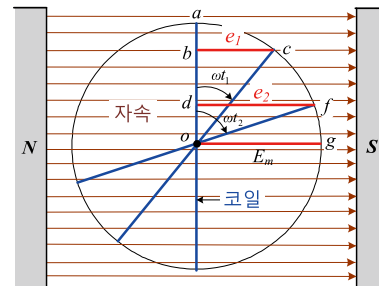
정현파 전압이 유기되는 원리

그림에서 코일이 a의 위치를 지나는 순간에는 $d\phi/dt = 0$ 이 되어 코일에 유기되는 기전력은 0 [V]이다.

코일이 $\omega t_1 [rad]$ 만큼 회전해서 c의 위치를 지나는 순간에는 그림의 e_1 으로 표시된 길이만큼의 전압이 유기되고, 코일이 $\omega t_2 [rad]$ 만큼 회전해서 f의 위치를 지나는 순간에는 그림의 e_2 로 표시된 길이만큼의 전압이 유기된다. 코일이 $\pi/2 [rad]$ (90°)회전해서 g의 위치를 지나는 순간에 최대전압 E_m (o-g 사이의 길이)이 유기된다. 이상의 결과로부터 코일이 a에서 g까지 $\pi/2 [rad]$ (90°)를 회전하는 동안에 유기되는 기전력은 삼각함수의 sine 함수에 비례한다는 것을 알 수 있다. 그림에서 o-g 사이의 길이가 E_m 이면 o-c 사이의 길이도 E_m 이고 o-f의 길이도 E_m 이므로 Δobc 와 Δofd 에서

$$e_1 = E_m \sin \omega t_1, e_2 = E_m \sin \omega t_2$$

회전각에 따라 유기되는 전압의 크기를 표시하는 일반식은 $e = E_m \sin \omega t$ 로 쓸 수 있고, ωt 가 90° 일 때는 $e = E_m \sin 90^\circ = E_m$ 이 된다.



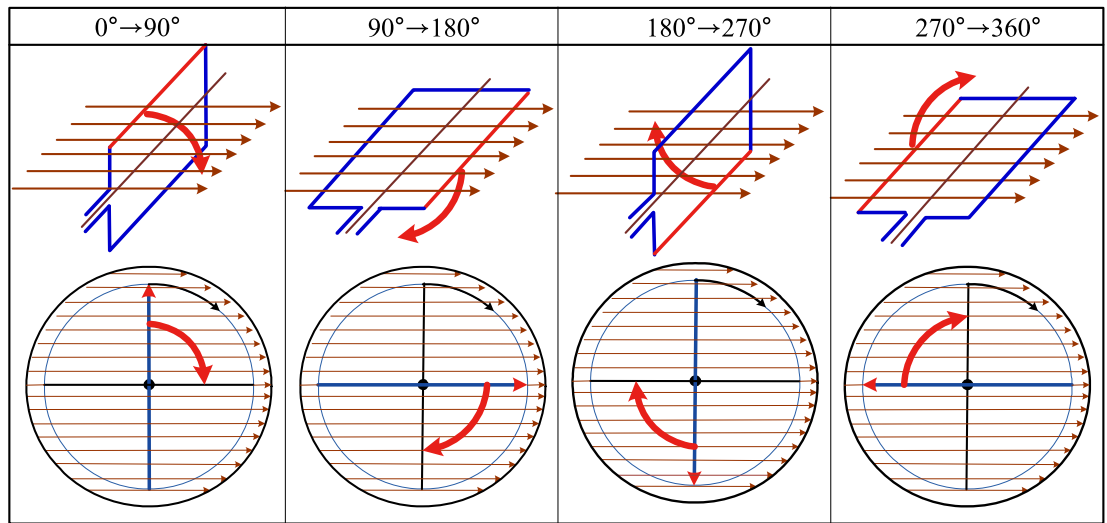
전기공학에서 변치 않는 상수는 대문자를 사용하고, 시시각각 변하는 값은 소문자를 사용한다. 최대전압 E_m 의 E를 대문자로 쓴 것은 하나의 발전기에서 E_m 은 정해진 상수이기 때문이고, e_1, e_2 를 소문자로 쓴 것은 이들이 시간에 따라 시시각각 변화하는 **순시치**이기 때문이다. 다음에는 정현파 1 사이클이 만들어지는 과정을 고찰해 본다.

자속이 코일을 관통하는 방향은 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ 로 회전할 때를 (+)로 보면, $180^\circ \rightarrow 270^\circ$ 로 회전할 때는 자속의 방향은 변화가 없으나, 코일이 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ 로 회전할 때와는 반대방향으로 뒤집어져 있기 때문에, 자속이 코일을 관통하는 방향은 (-)이다.

코일을 관통하는 자속의 양은 0°에서 최대였다가 점점 감소해서 90°가 되면 0이 되고, 90°를 지나는 순간부터 관통하는 자속의 양이 (-)방향으로 증가해 가다가 180°에서 최대가 된다. 180°를 지나면서 관통하는 자속의 양이 감소해 가다가 270°가 되면 0이 된다. 270°를 지나는 순간부터 자속은 (+)방향으로 증가해 가다가 90°가 되었을 때 최대가 된다.

자속의 시간에 대한 변화율 $d\phi/dt$ 는 0°에서는 0이었다가 점점 커져가서 90°에서 최대가 되고, 다음에는 감소해 가다가 180°에서 0이 된다. 180°를 지나면서 $d\phi/dt$ 는 다시 커지다가 270°에서 최대가 되고, 그 다음에는 감소해 가다가 360°(=0°)에서 0 이 된다.

자속의 시간에 대한 변화율 $d\phi/dt$ 의 부호는 0°→90°에서는 관통하는 자속이 감소해 가니까 (-)가 되고, 90°→180°에서는 관통하는 자속이 증가해 가니까 (+)가 되고, 180°→270°에서는 관통하는 자속이 감소해 가니까 (-)가 되고, 270°→360°에서는 관통하는 자속이 증가해 가니까 (+)가 된다.



따라서 회전자가 한바퀴 돌 때 정현파가 형성되는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

0°→90°에서 자속의 코일 관통방향은 (+), $d\phi/dt$ 는 (-)이므로 기전력 $e = -N \left(-\frac{d\phi}{dt} \right)$ 의 값은 (+)가 된다.

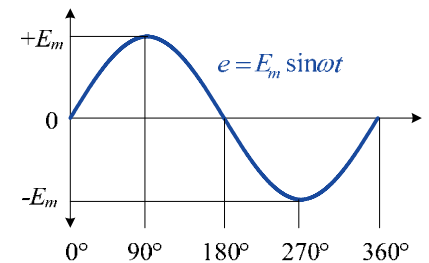
90°→180°에서 자속의 코일 관통방향은(-), $d\phi/dt$ 는 (+)이므로 기전력 $e = -N \frac{d(-\phi)}{dt}$ 의 값은 (+)가 된다.

180°→270°에서 자속의 코일 관통방향은 (-), $d\phi/dt$ 도 (-)이므로 기전력 $e = -N \left(-\frac{d(-\phi)}{dt} \right)$ 의 값은 (-)가 된다.

270°→360°에서 자속의 코일 관통방향은 (+), $d\phi/dt$ 도 (+)이므로 기전력 $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ 의 값은 (-)가 된다.

전기자 코일은 계속해서 회전하므로 위의 과정을 반복해서 한 바퀴 돌 적마다 정현파 1 사이클의 전압을 유기한다.

그리고 각도에 따른 기전력의 크기는 정현(sine)에 비례하므로 코일에 유기되는 전압의 파형은 그림과 같이 그려진다.



평균치

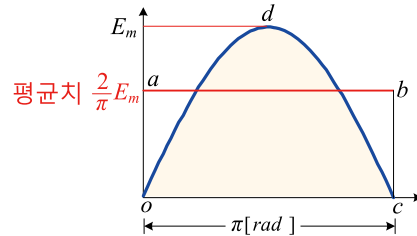
교류 전압과 전류는 시간에 따라서 수시로 그 크기와 부호가 바뀌기 때문에 직류처럼 일정하게 몇 [V] 또는 몇 [A]라고 말할 수가 없다. 따라서 다음과 같이 시간의 함수로 표시하는데 이를 **순시치(순시전압 및 순시전류)**라고 한다

$$e = E_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin \omega t$$

평균치는 다음식으로 계산한다.

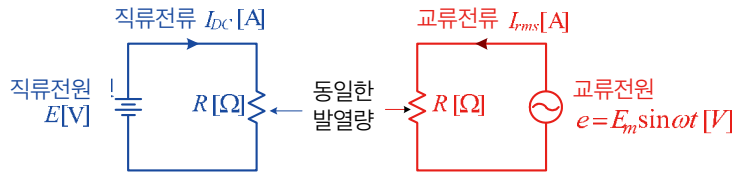
$$\begin{aligned} E_a &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \omega t d\omega t = \frac{E_m}{\pi} [-\cos \omega t]_0^{\pi} \\ &= \frac{E_m}{\pi} [1 - (-1)] = \frac{2}{\pi} E_m \end{aligned}$$



순시치 $E_m \sin \omega t$ 를 0에서 π 까지 적분한 것은 정현파 반사이클(odc)의 면적을 구한 것이다. 그리고 정현파 반사이클의 면적과 직사각형 oabc의 면적이 같으면, 이 직사각형의 높이(oa)가 정현파의 평균치가 된다. (직사각형의 넓이를 밑변의 길이 π 로 나누면 높이가 된다.) 계산식과 그림에서 보는 바와 같이 정현파의 평균치는 최대치 E_m 의 $2/\pi$ 배가 된다.

실효치

만일 어떤 부하에 직류 1[A]가 흐를 때 발생하는 에너지의 양과 교류 1[A]가 흐를 때 발생하는 에너지의 양이 다르면 매우 혼동스럽게 될 것이다. 그래서 교류의 실효치는 그림에서와 같이 동일한 크기의 저항에 직류전류 I_{DC} 와 교류전류 I_{rms} 가 흐를 때 소비되는 전력이 같을 때를 교류에서 실효치라고 정의한 것이다. 즉, 저항에서 소비되는 전력은 $I^2 R [W]$ 이니까, $I_{DC}^2 R = I_{rms}^2 R \rightarrow I_{DC}^2 = I_{rms}^2 \rightarrow I_{DC} = \sqrt{I_{rms}^2}$ 를 만족하는 I_{rms} 를 구하면 된다.

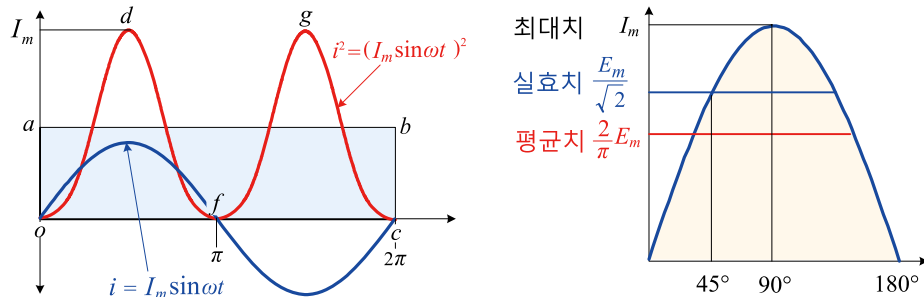


직류는 시간에 대한 변화가 없으니까 시간에 관계 없이 아무데서나 그 값을 제공해도 변화가 없다. 그러나 교류의 경우에는 60Hz 라면 1초에도 120번씩 부호가 바뀌고 크기도 $0 \rightarrow (+I_m) \rightarrow 0 \rightarrow (-I_m)$ 으로 시시각각으로 변하기 때문에 어느 시점에서 제곱을 취하느냐에 따라 그 값은 0이 될 수도 있고, E_m^2 이 될 수도 있고 또는 그 사이의 값이 될 수도 있다. 그래서 실효치를 다음과 같이 계산한다.

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

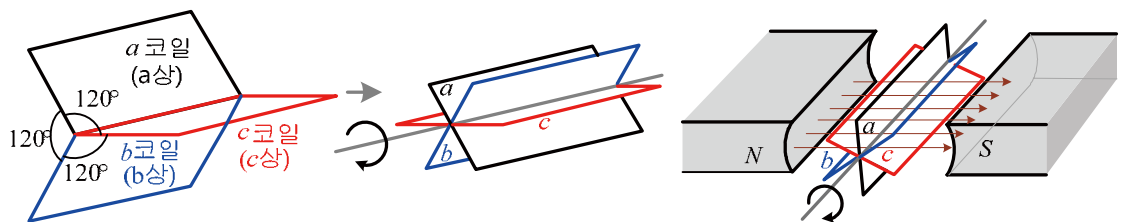
결국 **실효치** I_{rms} 라고 하는 것은 (1) 순시치의 제곱을 $0 \rightarrow 2\pi[rad]$ 까지 적분해서(아래의 왼쪽 그림에서 odf 및 fgc의 면적을 구해서), (2) 이 면적과 같은 넓이의 직사각형 oabc를 그리고, (3) 이를 주기(밀변) $2\pi[rad]$ 으로 나누어 높이 o-a 를 구한 다음 (4) 이의 제곱근을 취한 것인데 이 값은 $I_m / \sqrt{2}$ 이 된다.

즉, 실효치는 최대치의 $1 / \sqrt{2}$ 배이다. 실효치를 rms로 표시하는데 이는 Root(제곱근) Mean(평균) Square(제곱) 의 약어이다. 즉, 제곱의 평균의 제곱근을 구했다는 뜻이다. 아래 오른쪽 그림은 최대치, 실효치, 평균치의 관계를 보인 것이다. 실효치는 최대치의 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 배 인데 $\sin 45^\circ = 0.707$ 이므로 실효치는 정현파의 위상각이 45° 일 때의 값이라고 말할 수 있다. 교류에서 예를들어 전압이 22.9[kV] , 380[V] 또는 220[V]라고 하는 것은 모두 **실효치**를 말하는 것이다.

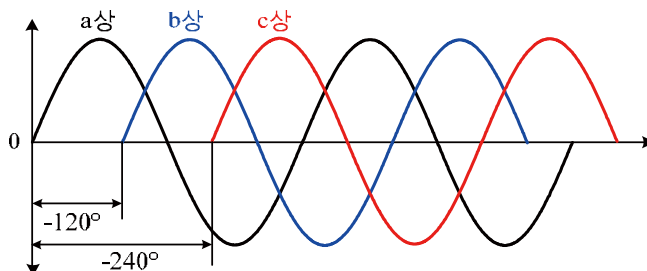


3상 교류

단상의 경우에는 자계 내에서 코일 1개를 회전시키지만, 3상의 경우는 그림과 같이 3개의 코일을 각각 120° 씩의 각도차(위상차)를 가지고 배치하여 이를 자계 내에서 회전시킴으로써 3상 전압이 발생하도록 한 것이다.



a b c 각상 코일은 120° 의 위상차를 가지고 있기 때문에 a상을 기준으로 0° 로 하면 b상은 a상보다 120° 뒤지고, c상은 a상보다 240° 뒤져서 각상에서 유기되는 전압은 다음 그림과 같이 그릴 수 있다.



각상에 유기되는 전압은 다음과 같이 표기된다.

$$e_a = E_m \sin \omega t$$

$$e_b = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

$$e_c = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$