

第5章 整流器

○ダイオードの特性(Characteristics of Diode)

P形半導体(Positive : 正の)と**N形半導体**(Negative : 負の)を接合して作られる**ダイオード**は、交流から直流を作る整流回路や電子回路などに広く利用されている。**P形半導体**とは、電子が入る穴(ホールまたは正孔)が多く存在し、**N型半導体**では自由に動き回る電子が多く存在する。

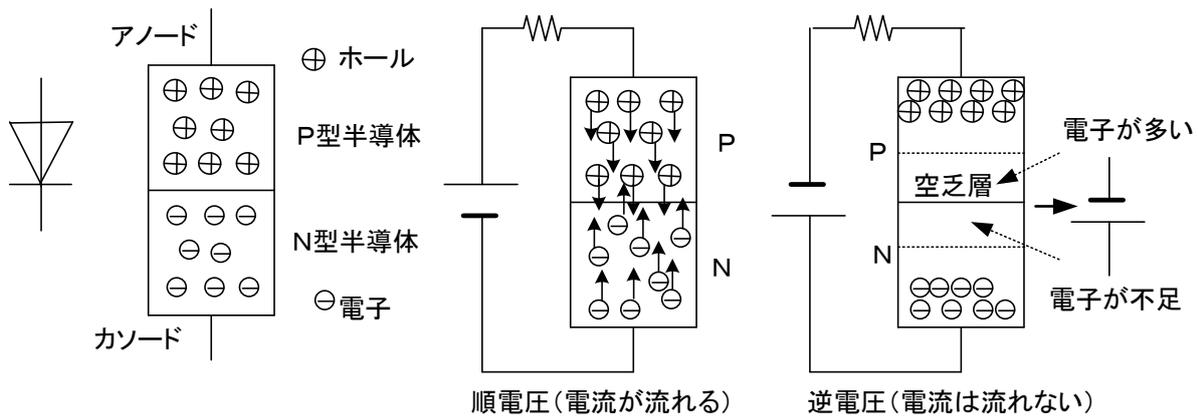


図 5-1 ダイオードの構造(structure of diode)

図 5-2 にその特性を示す。 $v > 0$ すなわち**アノード**に正の電圧が加わると電流が流れ、素子自体の電圧降下は 0.6V 程度なので電力用としては通常無視できる。逆に、**カソード**側に正電圧が印加される場合には電流はほとんど流れない。

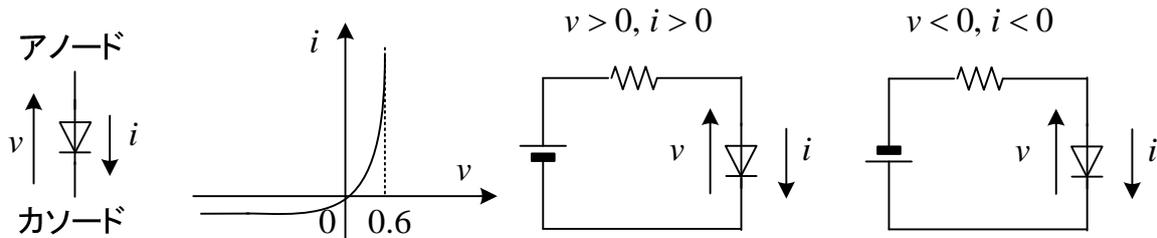


図 5-2 ダイオードの特性(characteristic of diode)

仮にダイオードの特性を図 5-3(a)太線と仮定して(実際とは異なるが)、回路(b), (c)に流れる電流を求めてみよう。

図(b)の場合、

$$E = Ri + v \quad \therefore i = -\frac{1}{R}v + \frac{E}{R} = -0.5v + 10 \quad (5-1)$$

このグラフを(a)の上を書いて、交点が求めるダイオードの電圧と電流になる。なぜなら、ダイオードは図(a)の特性を満足し、なおかつつながった回路の条件(5-1)も満足しないといけないからである。仮定されたダイオードの特性は、

$$i = 9.5v \quad (5-2)$$

である。従って、(5-1)、(5-2)より、 $v = 1V$ 、 $i = 9.5A$ となる。ダイオードの特性が直線でないときは、その特性の上に(5-1)を書いて、グラフから読み取る必要がある。

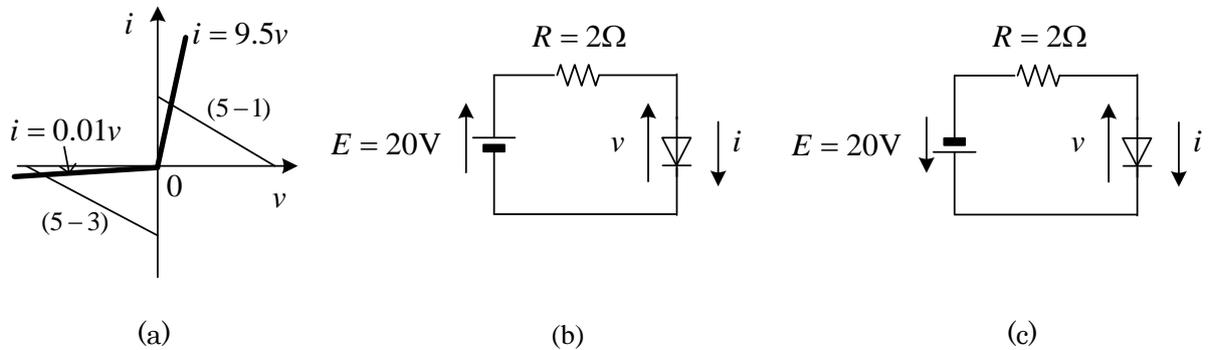


図 5-3 ダイオードに流れる電流

図(c)の場合、

$$-E = Ri + v \quad \therefore i = -\frac{1}{R}v - \frac{E}{R} = -0.5v - 10 \quad (5-3)$$

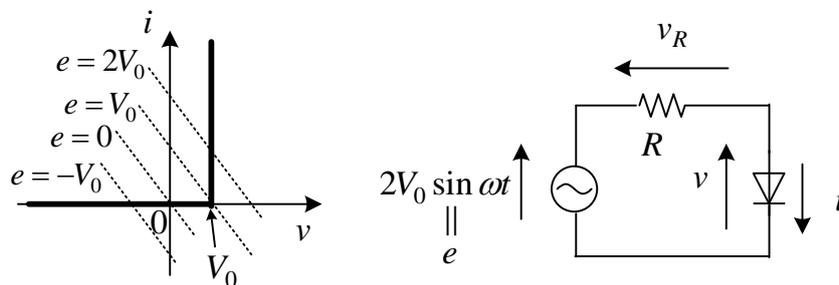
このグラフを(a)の上を書いて、交点が求めるダイオードの電圧と電流になる。仮定されたダイオードの特性は、

$$i = 0.01v \quad (5-4)$$

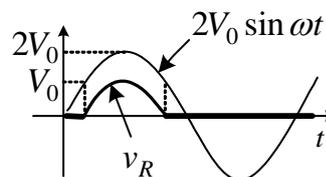
である。(5-3)、(5-4)より、 $v = -19.6V$ 、 $i = -0.196A$ となる。

理想的なダイオードの特性は、(5-2)の傾きが非常に大きく、(5-4)の傾きが非常に小さい。この結果どの交点になっても、(b)の回路では、 $v = 0$ (導体)、(c)の回路では、 $i = 0$ (絶縁体)と考えるとよい。そうすると、(b)の回路では、 $i = 10$ 、(c)の回路では、 $v = -20$ となる。

問題 1 ダイオードの特性が図の様に与えられている。抵抗の両端の電圧を図示せよ。



(解)電源電圧が V_0 以上で電流が流れる。このとき、ダイオードの電圧は V_0 で、その分引く。図の点線の式を求めよ。



○ ダイオードによる整流回路

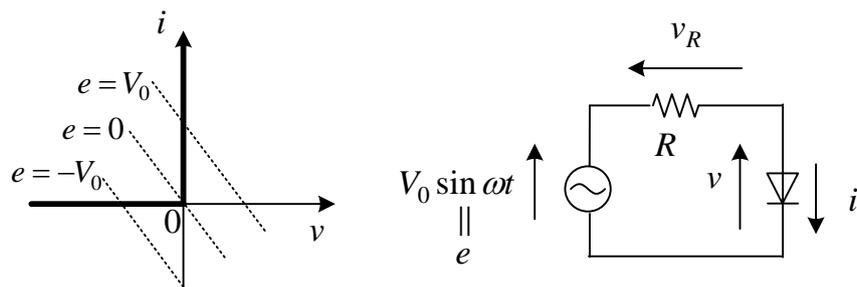


図 5-4 理想的なダイオードの特性と半波整流回路

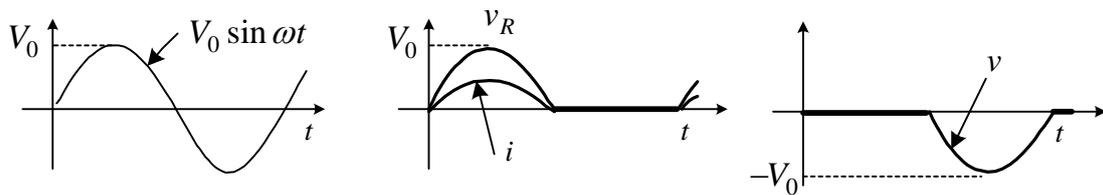


図 5-5 図 4 の回路の波形

図 5-4 に理想的なダイオードの特性と最も簡単な半波整流回路(half-wave rectifier circuit)を示す。

理想的ダイオードを含む回路の解き方



1. ダイオードがなく線が切れているとして、ダイオードに加わる電圧を求める。
b 点の電位が高いと、電流は流れず、線が切れているとして解いてよい。
2. a 点の電位が高い場合、ダイオードは導通するので、ダイオードを導線に置き換えて回路を解く。

まず図 5-4 で、ダイオードを取り去ると、電流は流れないから、 $v = V_0 \sin \omega t$ となる。
 $v = V_0 \sin \omega t > 0$ のとき、ダイオードは導線だから、

$$v = 0, v_R = V_0 \sin \omega t, i = \frac{V_0 \sin \omega t}{R} \quad (5-5)$$

となる。 $v = V_0 \sin \omega t < 0$ の場合には、電流は流れず、

$$v = V_0 \sin \omega t, v_R = 0, i = 0 \quad (5-6)$$

である。これらの波形を、図 5-5 に示す。

図 5-6 はダイオードを利用した全波整流回路で、交流電圧 v 、交流電流 i に対し、出力電圧 v_d 、出力電流 i_d は直流となっている。図はダイオードが理想的な場合の波形である。電流 i_d は、負荷のインダクタンス L によって波形が異なり、 L が小さいと脈動するが、 L が十分大きいと図に示すように脈動がない。この場合には、ダイオードを一方通行の道路のように考えて、電源の電位

が高い側からダイオードを通して電位の低い側に電流が流れるとしてルートを探そう。そして、その場合に、その他のダイオードが導通する可能性がないか（逆電圧になるか）確認しておこう。

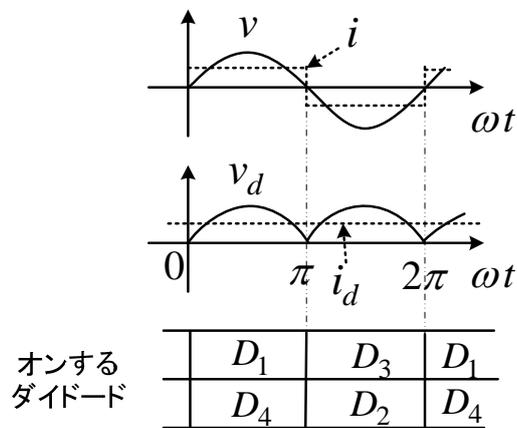
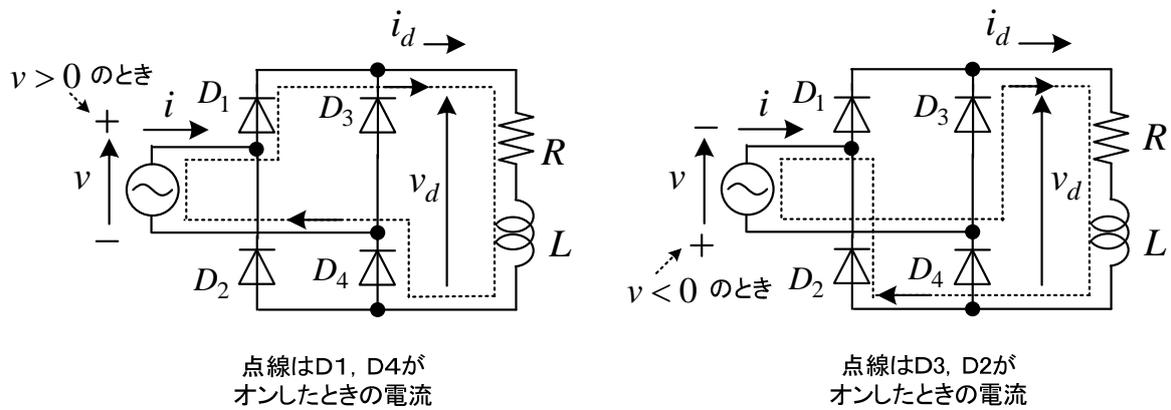


図 5-6 単相全波整流回路

図 5-6 の回路で、電源電圧を

$$v = V_m \sin \theta \tag{5-7}$$

但し、 $\theta = \omega t$

とする。このとき、整流された直流電圧の平均値は、

$$\begin{aligned} \bar{v}_d &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m \sin \theta d\theta \\ &= \frac{V_m}{\pi} [-\cos \theta]_0^\pi \\ &= \frac{2V_m}{\pi} \end{aligned} \tag{5-8}$$

となる。

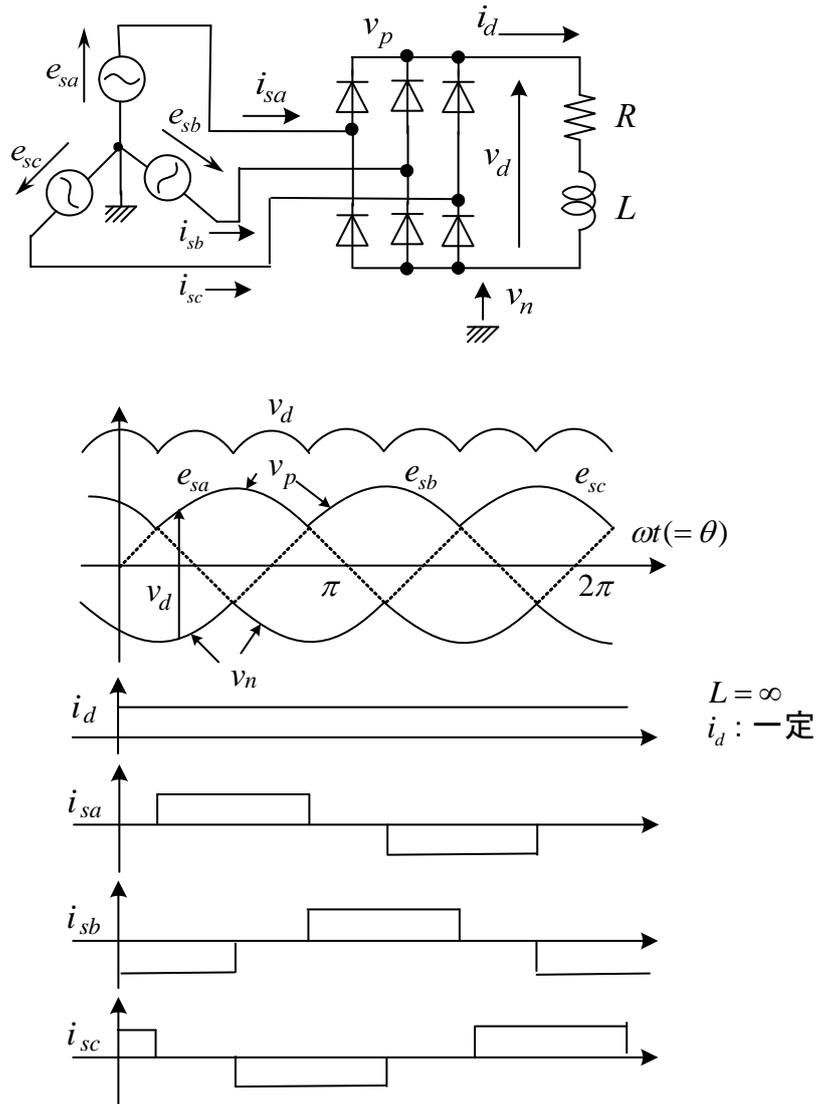


図 5-7 三相全波整流回路

図 5-7 に**三相全波整流回路**を示す。最も電位の高い相から最も電位の低い相にダイオードを通して電流が流れる。中間の電位の相から最も電位が低い相に電流が流れる可能性はない。なぜなら両方が同時に起きても、中間の電位のダイオードにはすぐ逆電圧がかかりオフするためである。整流された直流電圧の平均値は、

$$\begin{aligned}
 \bar{v}_d &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6}^{\pi/2} (e_{sa} - e_{sb}) d\theta \\
 &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} E_{ab} \sin \theta d\theta \\
 &= \frac{3\sqrt{2} E_{ab}}{\pi} \approx 1.35 E_{ab}
 \end{aligned} \tag{5-9}$$

E_{ab} は線間電圧の実効値である。 $E_{ab}=200\text{V}$ のとき、 $\bar{v}_d = 270\text{V}$ となり、線間電圧の最大値より少し低い電圧である。 v_d 、 i_d は常に正であるから、エネルギーの流れは一方向で電源から常に負荷側に供給される。

○サイリスタによる整流回路

ダイオードは、正の電圧が加えられると常にオン状態になり、直流電圧の大きさを変えるためには交流電圧の大きさを変える必要がある。これは、変圧器の巻数比を変えることで行えるが、スマートな方法ではない。そこで**サイリスタ**を利用すると、電圧がスムーズに変えられる。

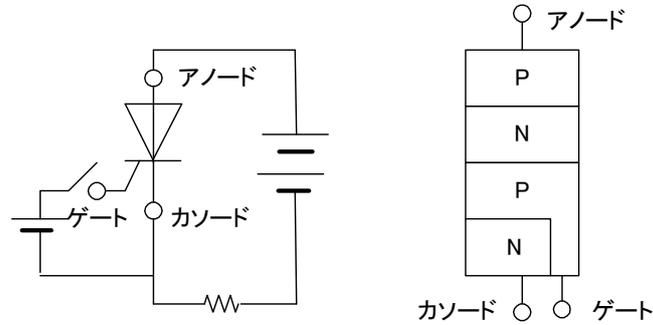


図 5-8 サイリスタ

サイリスタは、**アノード**に正の電圧が印加されているだけではオンにならず、**ゲート**にも電圧が印加されてはじめてオン状態になる。ゲートに加える電圧は小さいので、そのオン、オフの切替は電子回路で行える。図 5-9 にサイリスタを使った最も簡単な整流回路を示す。図 5-9 は、正の電圧になってから、 α 経過してからゲートにオン信号を入れた場合の波形である。 α を**制御角**と呼ぶ。この α の値をいろいろ変えることで、直流電圧の平均値を変えることができる。

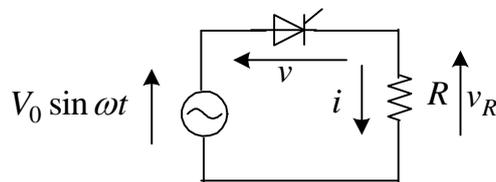


図 5-9 サイリスタによる整流回路

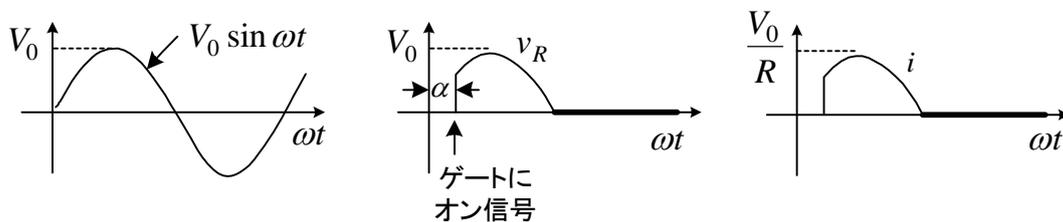


図 5-10 電圧，電流波形

サイリスタは、一度オンすると逆電圧が加わるまでオンし続ける。すなわちオンする時間はゲート信号で制御できても、ゲート信号でオフできない欠点がある。

○整流回路の応用

1964年（東京オリンピックの年）の登場した新幹線0系は、図5-11の構成でDCモータを駆動し、車輪を回していた。速度を速くするためには、モータに加わる電圧 v_d を高くする必要があるが、このためには変圧器（タップ切り替え）を用いて電源電圧 v を変化させた。

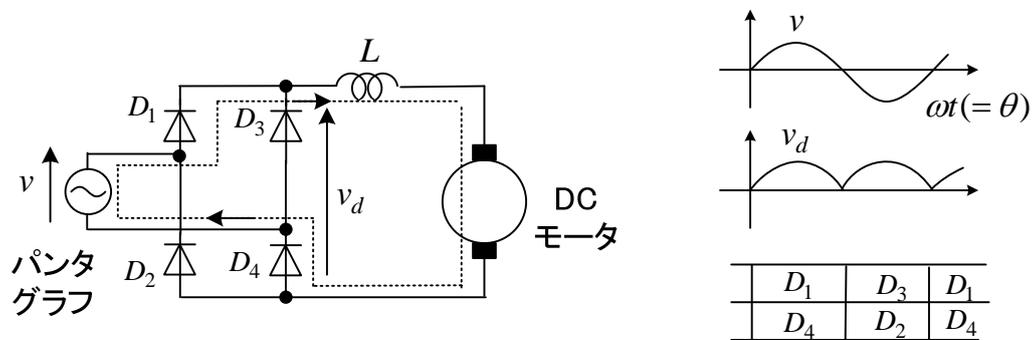


図5-11 ダイオード整流回路

図5-12は、その後1985年に登場した100系と呼ばれる新幹線で、サイリスタによる位相制御が行われていた。この場合、制御角 α を変えて、スムーズにモータ電圧が変えられるので、電源電圧 v は変えなくてよい。 D_3, D_4 は T_1, T_2 がどちらもオフのとき導通し、 L の電流を持続させる還流ダイオードの役割を果たす。100系も2012年に運転を終わっている。

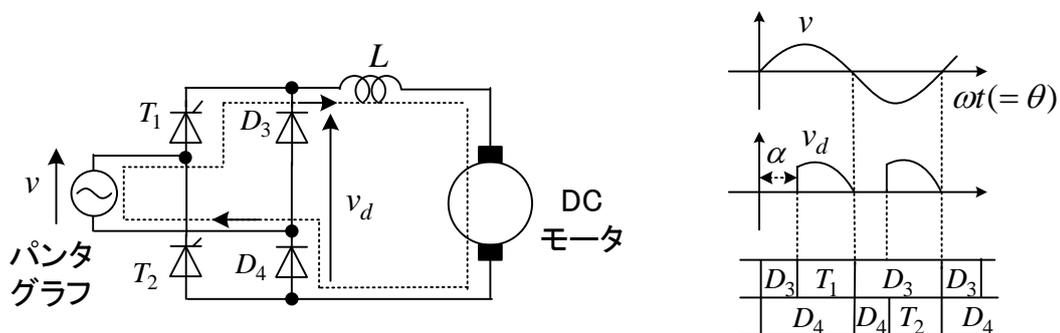


図5-12 サイリスタによる位相制御

整流された直流電圧の平均値は、

$$\begin{aligned}
 \bar{v}_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \theta d\theta \\
 &= \frac{V_m}{\pi} [-\cos \theta]_{\alpha}^{\pi} \\
 &= \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)
 \end{aligned} \tag{5-10}$$

となる。図中の L は平滑リアクトルで電流の脈動を抑える働きがある。実際電車に用いる直流電動機は、**直流直巻電動機**なので、この場合界磁巻線が直列に入っており平滑リアクトルの役目も果たす。