

# 汎用インバータ

## 基礎編

# 1. インバータによる誘導電動機制御の基本原理

近年、インバータを使用した生産設備が増えてきている。インバータは電動機（モータ）を**可変速に**駆動するときに使用する電力変換器である。そもそも、電動機を駆動するだけであるならば、インバータは必須の機器ではない。はじめに、インバータを使用することでどのような利点が得られるかを整理しておこう。

## 1.1 インバータとは

通常の電源では、電圧は 200 V、周波数は 60 Hz と固定されている。そのため、従来は 200 V、60 Hz 以外の電源を得ることが難しかった。しかし、近年の技術の進展によって、高性能なコンピュータや半導体素子が出現した。これらの技術を使って、電圧や周波数を自由に变化させる電力変換器を構成できるようになった。この電力変換器を**インバータ**と呼ぶ。つまり、インバータは電圧 200 V、周波数 60 Hz の電源から自由な電圧、自由な周波数を得るための電力変換器である。

## 1.2 インバータの効能

生産設備等における電動機にインバータを使う利点とは何だろうか。図 1.2 に、ポンプ設備における例を示す。図中①および②は、いずれもポンプを電動機により駆動するポンプ設備の簡易的な図である。

①はインバータを使わずに電源電圧（200 V、60 Hz）で ON/OFF 制御のみで駆動した例である。この例では、ポンプを 100% の出力で駆動すると、実際にほしい水圧を大きく上回ってしまうため、減圧弁で 50% 減圧している。減圧したエネルギーは原則として損失となるため、例えば熱となって水や弁の温度を上昇させたりするのに使われる。

②はモータを直接電源電圧（200 V、60 Hz）で駆動するのではなく、インバータを用いて電圧と周波数を低くして使用した例である。減圧弁を全開（0%）にして、その分、インバータの電圧と周波数をそれぞれ 50%（100 V、30 Hz）にしている。このようにすることで、おおむね同程度の水圧を得ることができる。インバータを使って減圧運転した場合、減圧弁を使った時と違い、損失が極めて小さくなるので、電源から供給される電力もそれに伴い小さくなる。具体的にはポンプ負荷（2 乗低減トルク負荷）の場合、低減効果は 3 乗で効いてくることが知られている。今回の場合は、インバータの電圧と周波数をそれぞれ 1/2 にしていることから、電源から供給される電力は 1/8 になる（ $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8$ ）。すなわち、設備の駆動にかかる電力量料金も 1/8 になるので、省エネ効果は非常に大きいといえる。

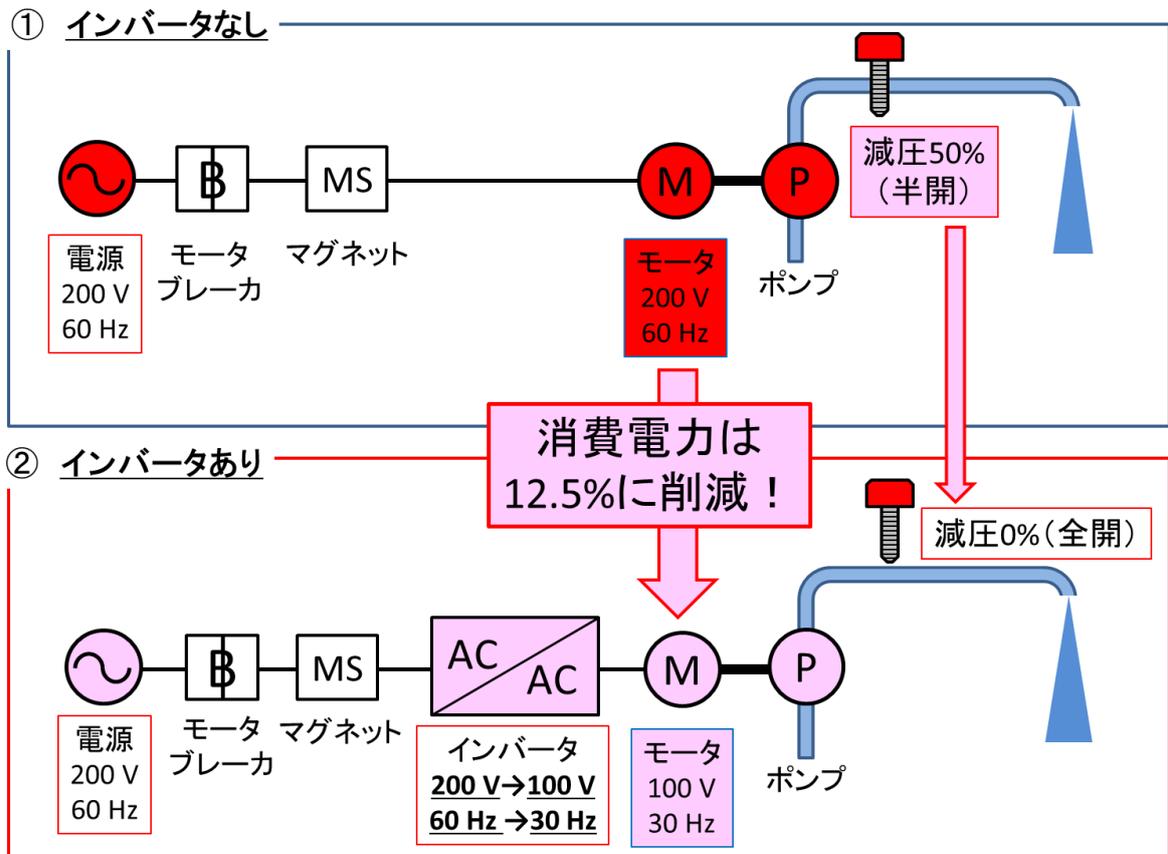


図 1.2 インバータを活用したポンプ設備の省エネの例

この例からわかるように、現状の設備で減圧弁等を用いて出力を調整している場合、その弁を全開にしたうえで、インバータを用いて出力を調整するようにすれば、大きな省エネ効果が得られる。その一方で、すでに調整弁等での調整が全く行われていない場合（すでに全開であった場合）、省エネ効果は得られるのであろうか。結論から言えば、このような場合には省エネ効果は全くない。むしろインバータが追加される分、その損失が追加され、消費電力は増加する。このように、インバータは設置さえすれば必ず省エネになるというものではない。設置する際には、インバータやモータ、設備等に関して正しい知識を持ったうえで、設置前の適切な見極めが必要である。

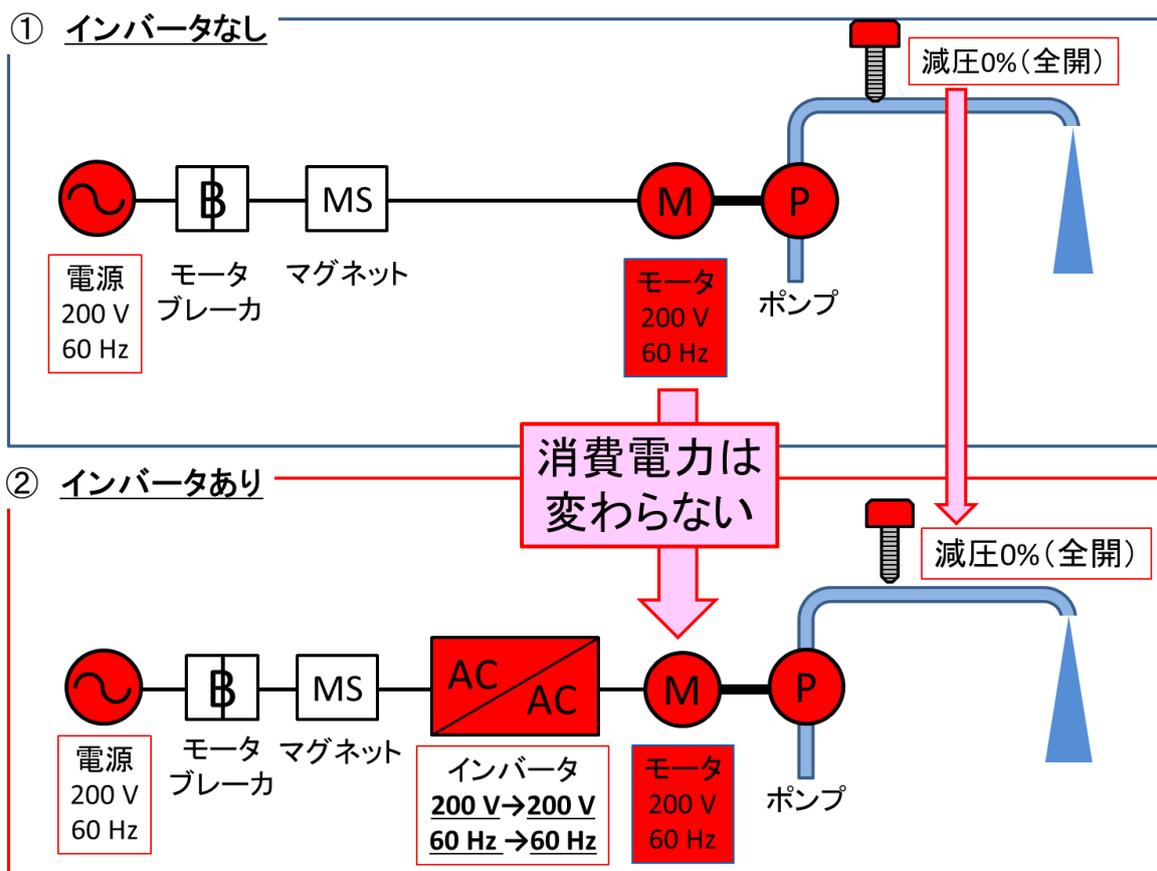


図 1.3 インバータを活用したポンプ設備における省エネとはならない例

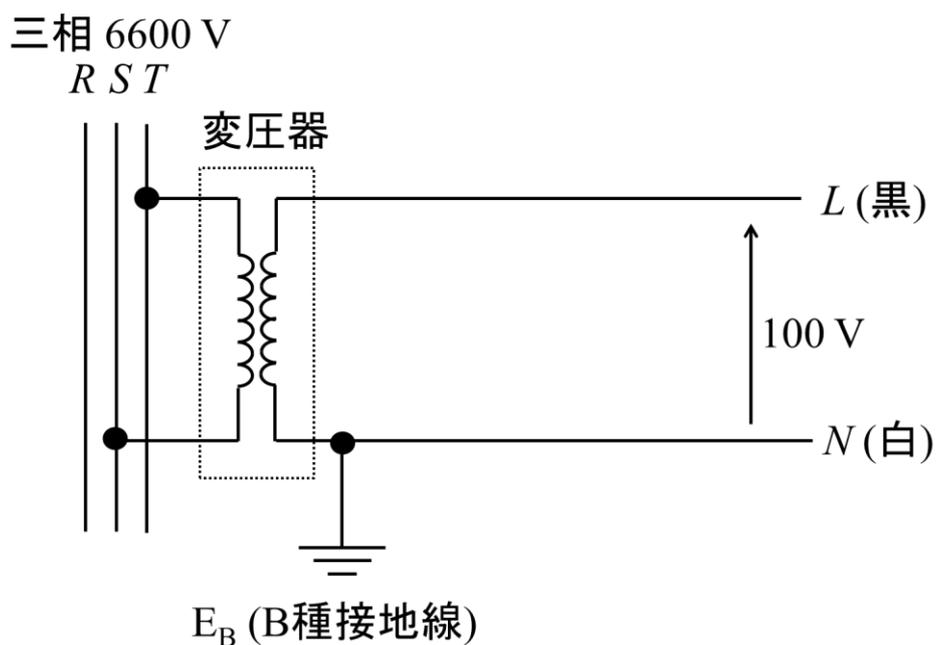
## 2. 電気回路の基礎

### 2.1 電気方式の種類

工場などで一般に使用される電気方式には、いくつかの種類がある。電気系統は、電気設備技術基準（通称：電技）、および電気設備技術基準の解釈（通称：解釈）、そして、各電力会社の発行する内線規程等に従って施工する必要がある。

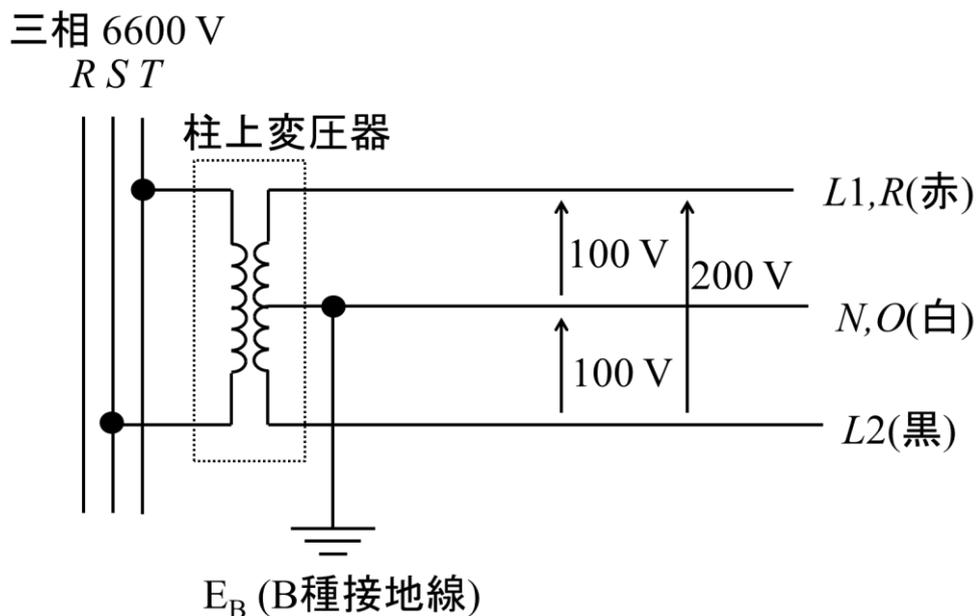
#### ①単相 2 線式 (1φ2w)

家電製品等の民生用電気機器への電気の供給のため、最も普通に用いられる電気方式である。黒線と白線で配線され、白線側に B 種接地工事がとってある。したがって、黒線の対地電圧は 100 V、白線の対地電圧は 0 V であり、黒線側は触れると感電するが、白線側には触れても感電しない。



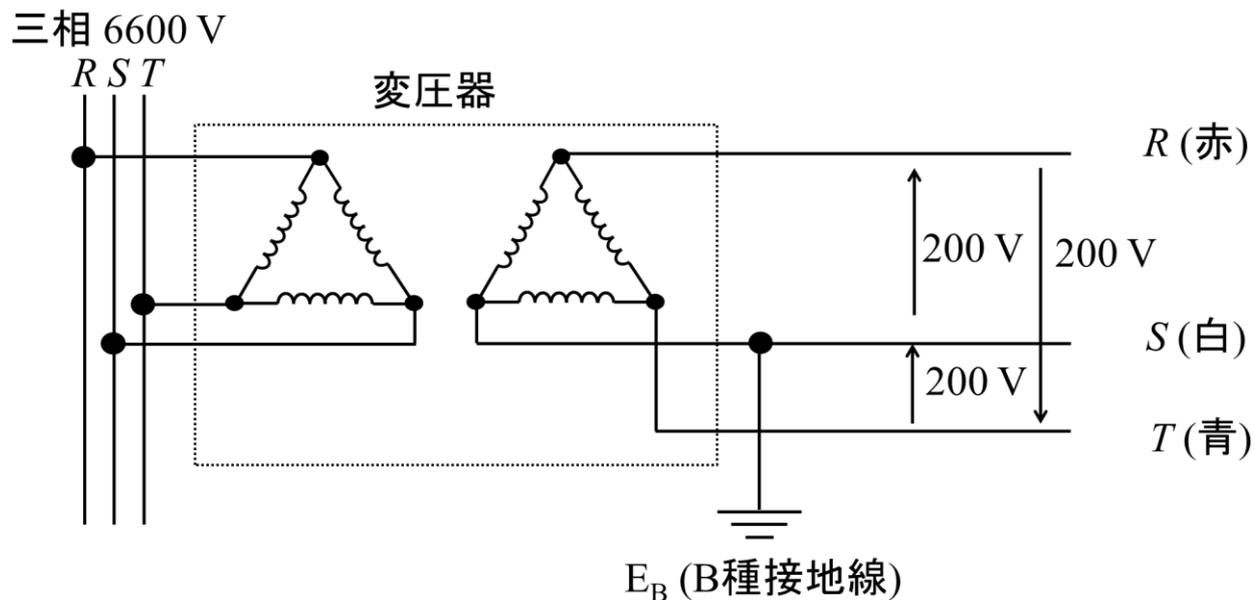
## ②単相 3 線式 (1φ3w)

家電製品等の民生用電気機器のうち、エアコンや冷凍機などの大電力を消費する需要家に施設する電気方式である。一般に、赤線、白線、黒線の 3 線で配線される。白線に B 種接地がとられている。赤—白間、および黒—白間の電圧は 100 V であるため、ここには一般の 100 V 機器を接続する。赤—黒間の電圧は 200 V であって、ここに 200 V 機器を接続する。なお、赤線と黒線の対地電圧は 100 V、白線の対地電圧は 0 V である。この電気方式の利点は、電気機器は 200 V まで使用できる一方、対地電圧は 100 V であるので、感電した場合の安全性が高いという点である。



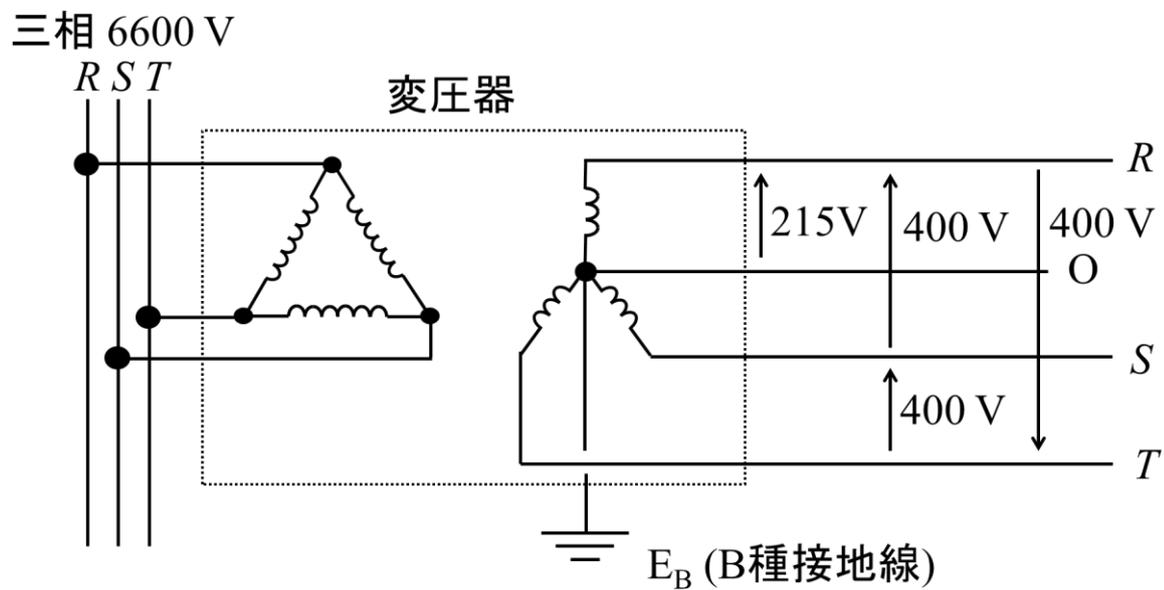
### ③三相 3 線式 (3φ3w)

工場などで産業用電気機器を使用する需要家に施設する電気方式である。赤線 (R 相) — 白線 (S 相) — 黒線 (R 相) の 3 線で敷設されるが、線間の電圧はどれをとっても 200 V である。白線 (S 相) は B 種接地がとっており、対地電圧は 0 V である。赤線 (R 相) と青線 (T 相) の対地電圧は 200 V である。  
※四国電力管内では、T 相に黒線を用いることがある。



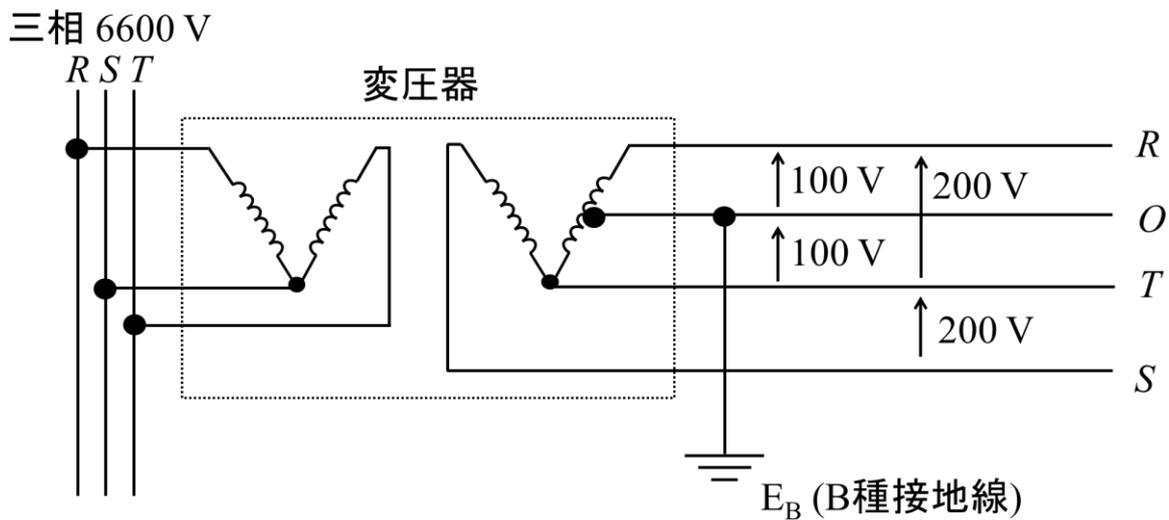
④三相 4 線式 (3φ4w)

大工場等などで大型の産業用電気機器を使用する需要家に施設する電気方式である。R 相-O 相、S 相-O 相、T 相-O 相の各線では 215 V の機器を使用でき、R 相-S 相-T 相で使用すると 400 V の三相機器を使用できる。



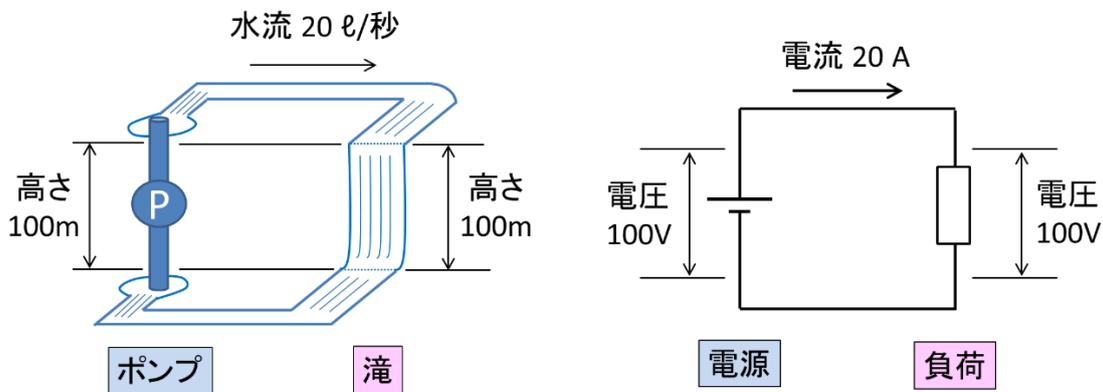
⑤電灯動力共用方式

配電線路等で用いる電気方式である。R-S-T を使うと三相 3 線式となり、R-O-T を使うと単相 3 線式として使うことができる。小規模な変圧器で、単相 3 線式（電灯回路）、三相 3 線式（動力回路）の 2 方式が使用できる点に特徴がある。

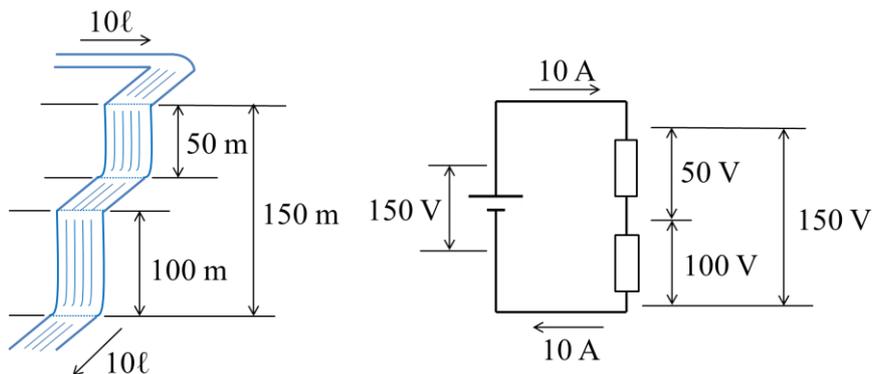


### 2.3 直流回路の性質

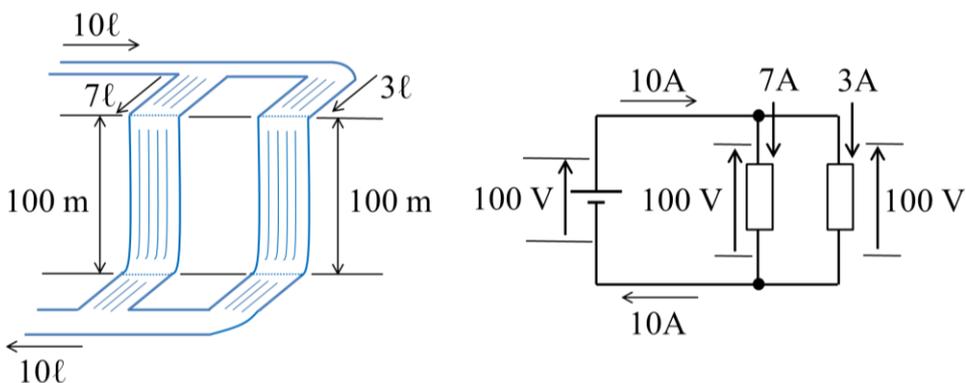
電気回路は、水の流れとよく似ているといわれている。下の図に、水の流れと電気回路の比較をした図を示す。



電気回路を水の流れで例えたとき、電源に相当するものは水をくみ上げるポンプ、抵抗に相当するものは滝になる。このとき、電流<sup>アンペア</sup> [ A ]は水流[l/秒]、電圧<sup>ボルト</sup> [ V ]は滝やポンプの高さ[m]になる。

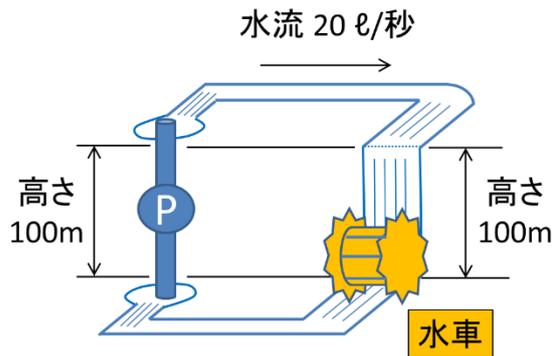


例えば、抵抗を直列にした場合は、電圧はたし算になる。これは、滝が縦に2つつながっているとき、全体の滝の高さは、それぞれの滝の高さのたし算で計算できることと同じである。

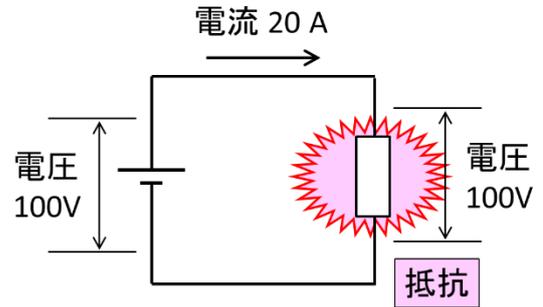


抵抗を並列にした場合は、電圧は等しく、電流はたし算になる。これは、滝が横に2つ並んでいるとき、それぞれの滝の高さは同じで、水流は足し算で求まることと同じである。

電力（単位： $\text{W}$ ）は、電気が発生するエネルギーの強さ（勢い）のことである。



**回転のエネルギー**  
回転の強さ = 高さ × 水流  
 $= 100\text{m} \times 20\ell = 2000$

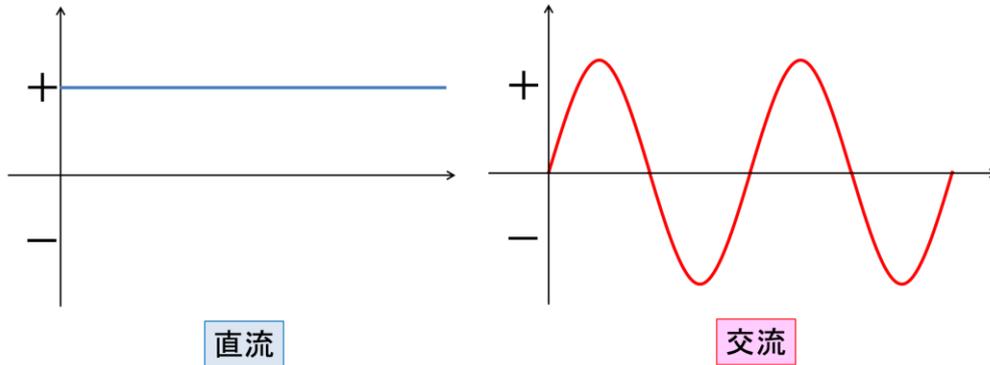


**熱エネルギー**  
熱の強さ = 電圧 × 電流  
 $= 100\text{V} \times 20\text{A} = 2000\text{W}$

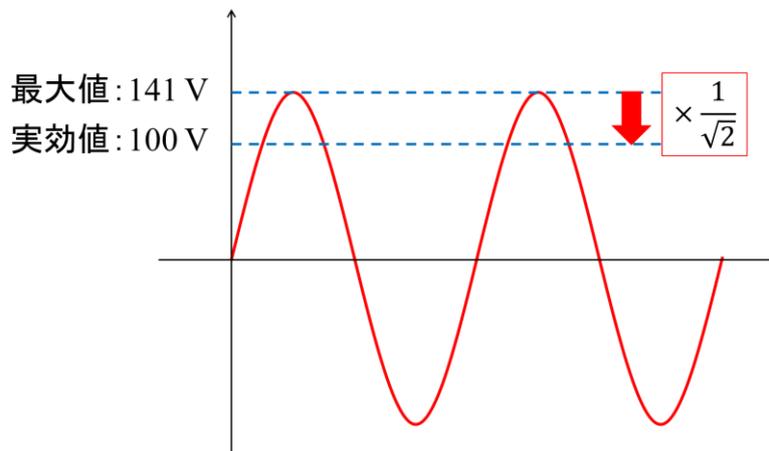
例えば、滝の例を考えると、滝の下に水車を置いたとすると、この水車を勢いよく回すには、滝の高さを高くするか、もしくは水流を増やすことのどちらかによることができる。つまり、水車の回る勢いは、高さと水流のかけ算で知ることができる。これと同じように、電気回路の場合は、抵抗が発生する熱の勢いは、電圧と電流のかけ算で知ることができる。これを電力という。

## 2.4 単相交流回路の性質

直流の場合、電流は常に一方にしか流れない。交流の場合、電流の向きが短い時間の間で入れ替わる。



交流電気は、その瞬間その瞬間で電圧（電流）の大きさが変わるため、電圧（電流）の大きさを表現として、『最大値』と『実効値』の2種類がある。



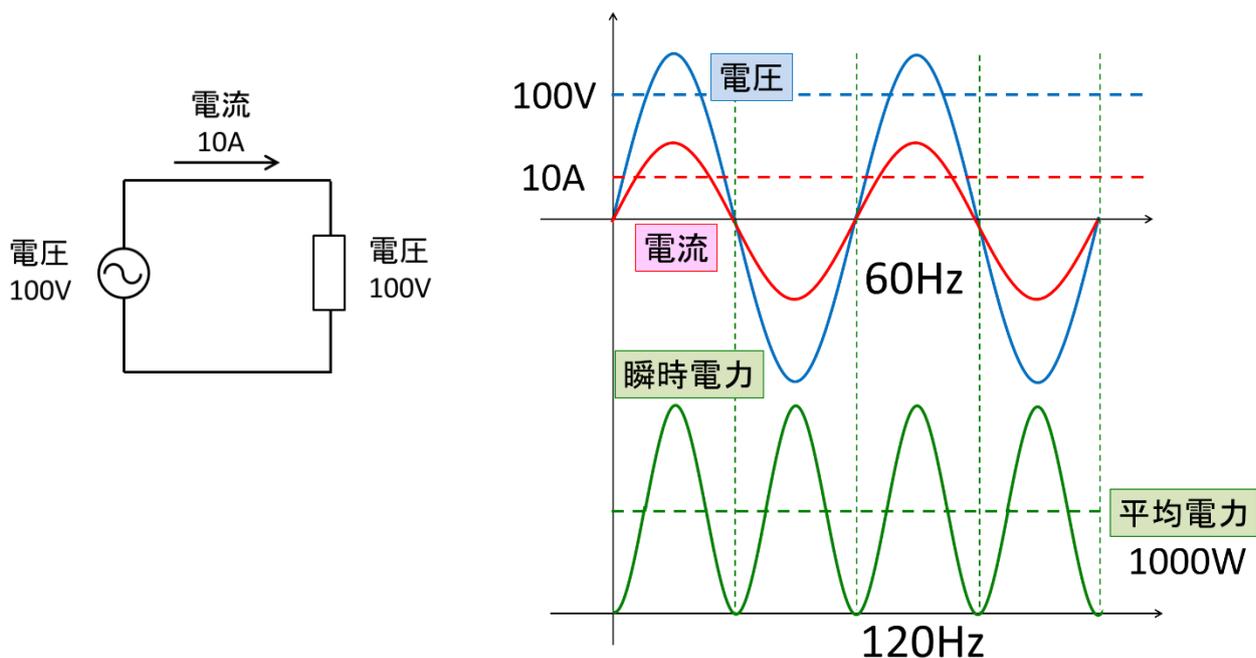
最大値とは、その電圧（電流）の最も大きくなる瞬間の電圧（電流）である。実効値とは、最大値の $\sqrt{2}$ 分の1倍の大きさの電圧（電流）のことである。**なぜ $\sqrt{2}$ 分の1倍の大きさであるのか**かというと、**この大きさのときに、直流電気と比較して同じ働きをするためである**。つまり、直流の100 Vと交流（の最大値）141 Vを比較したとき、全く同じ働きをするようになる。このときの電圧を『実効値100 V』とよぶ。原則として、交流の電圧（電流）を表現するときには、実効値の値をさす。

1秒間あたりの『“山—谷”（1周期）』の何回を周波数（単位： $\overset{\text{ヘルツ}}{\text{[Hz]}}$ ）と呼ぶ。例えば、60 Hzといった場合、1秒間に60回の“山—谷”があることを示す。

交流回路の場合、負荷は①抵抗、②コイル、③コンデンサの3種類がある。負荷の状態によって、電圧と電流の関係が変わってくる。

### ① 抵抗性負荷の電圧・電流の関係

交流電源に抵抗のみが接続されている場合、電圧と電流の“山—谷”のタイミングはぴったり一致している。これを、<sup>いそう</sup>位相がそろっている（<sup>どうそう</sup>同相）という。



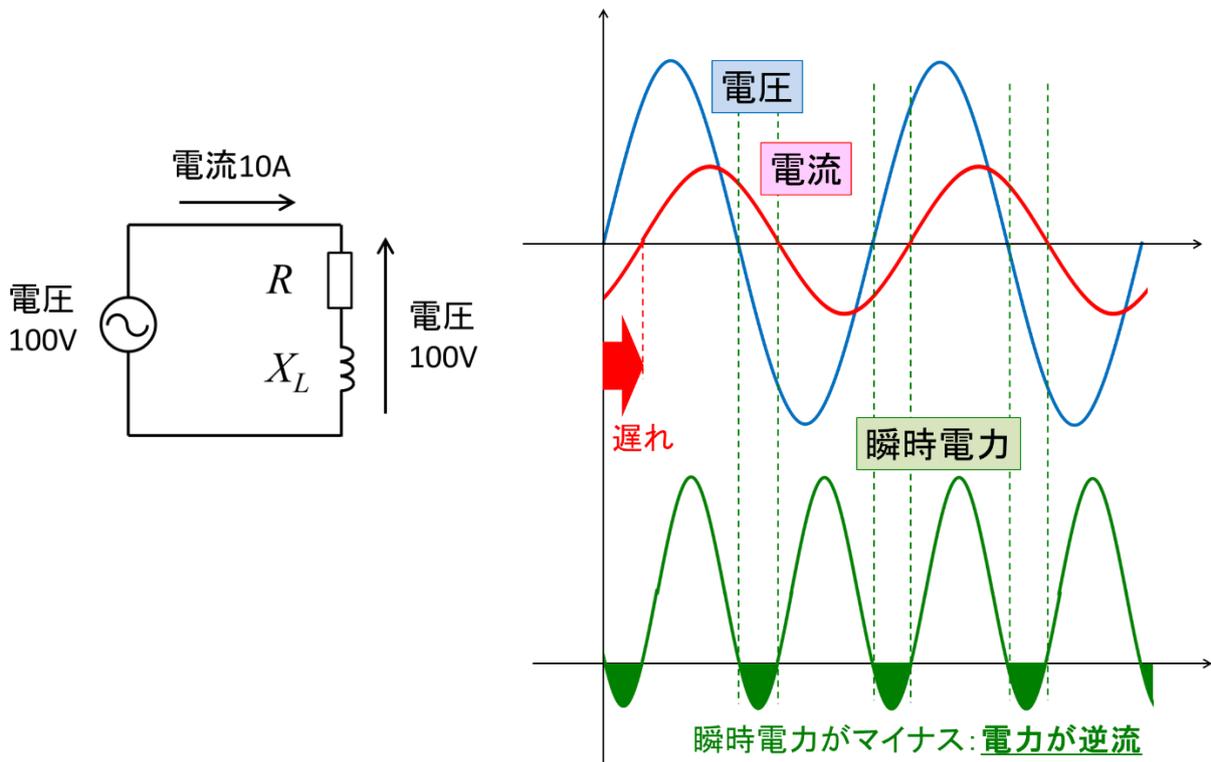
交流電力も直流の電力と同様に電圧と電流のかけ算で求められる。そのため、電圧・電流の周波数の2倍の周波数で仕事をすることになる。これを瞬時電力という。例えば、負荷が照明であって、電源周波数が 60 Hz であるとすれば、1 秒間に 120 回の点滅をしていることになる。

瞬時電力の平均の値を有効電力という。一般に交流回路の電力というと、こちらをさす。負荷が抵抗のみの場合、有効電力（平均電力）は、電圧の実効値と電流の実効値のかけ算で求めた値と一致する。

## ② 誘導性負荷（負荷が抵抗とコイル）の電圧・電流の関係

交流電源に抵抗とコイルが接続されている場合（このような負荷を誘導性負荷という）、電圧よりも少し遅れて電流の“山—谷”のタイミングがくるような形となる。これを、位相が遅れる（遅相）という。抵抗とコイルを比較して、抵抗のほうが大きいほど位相差（遅れの程度）は小さくなり、コイルのほうが大きいほど最大で  $90^\circ$ （1/4 周期）まで遅れる。

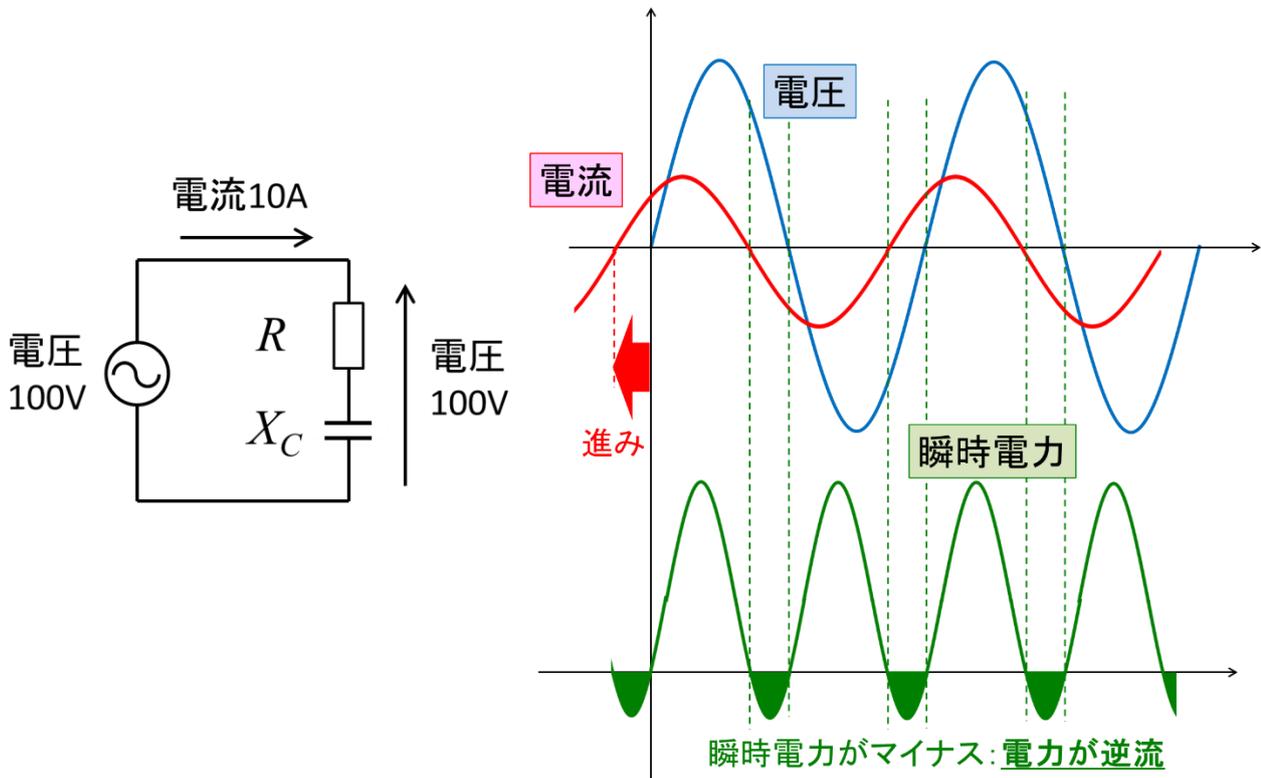
一般的には、電動機（モータ）の内部は巻き線で構成されているため、電動機全体は誘導性負荷として考えることができる。そのため、電動機を電源に接続すると下図のような電流が流れる。



誘導性負荷の場合、瞬時電力はプラスになるときに、マイナスになるときがある。プラスになるときは、電気エネルギーが電源から負荷へ流れていることを示している。一方、マイナスになるときは、電気エネルギーが負荷から電源へ逆流していることを示している。これは、コイルに電流が流れると磁界ができ、磁界中にエネルギーを蓄える性質があるためである。瞬時電力がマイナスである区間は、コイルに蓄えられたエネルギーが放出されて、電源へ帰っている状態である。このとき、電源から供給されて抵抗で消費される電力を『有効電力（単位：[W]）』、電源から供給されてコイルに蓄積・放出される電力を『無効電力（単位：[var]）』という。また、電源から供給される電力を『皮相電力（単位：[VA]）』という。

③ 容量性負荷（負荷が抵抗とコンデンサ）の電圧・電流の関係

交流電源に抵抗とコンデンサが接続されている場合（このような負荷を容量性負荷という）、電圧よりも少し早く電流の“山—谷”のタイミングがくるような形となる。これを、位相が進む（進相）という。抵抗とコイルを比較して、抵抗のほうが大きいほど位相差（進みの程度）は小さくなり、コンデンサのほうが大きいほど最大で  $90^\circ$ （1/4 周期）まで進む。

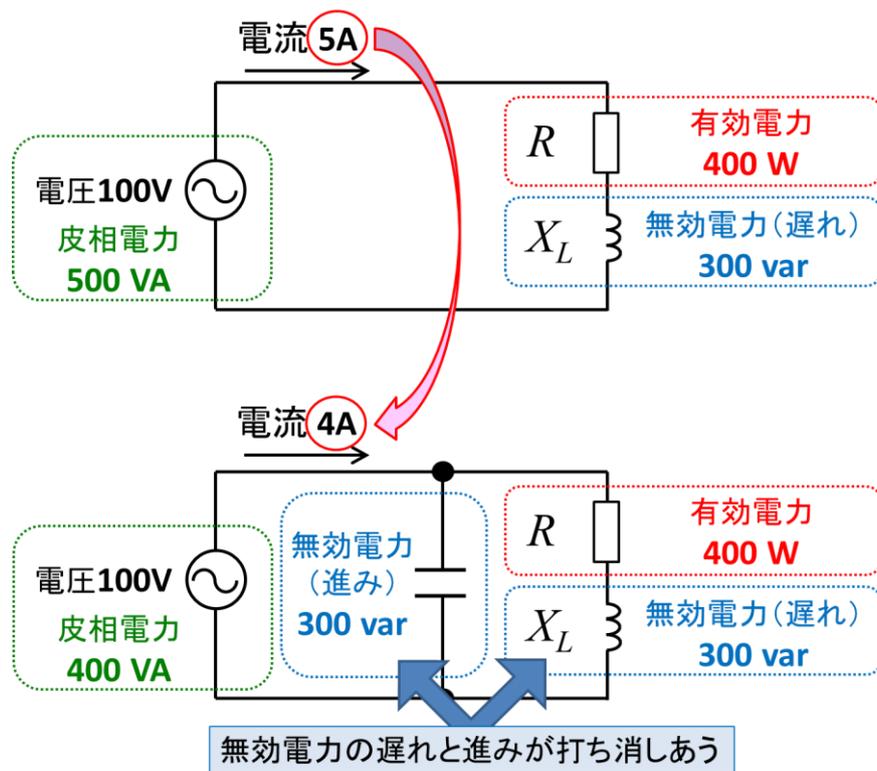


容量性負荷の場合、誘導性負荷のときと同様に、瞬時電力はプラスになるときと、マイナスになるときがある。これは、コンデンサにも電気を蓄える性質があるため、ある区間には電気エネルギーがコンデンサから電源へ逆流している。

#### ④ 力率改善

②、③でみたとおり、コイルには電流を遅らせる作用があり、コンデンサには電流を進ませる作用がある。一般には、工場等では電動機が多く使用されているため、工場全体での電流は遅れていると考えよう。電流が遅れれば遅れるほど、電源へ逆流する無駄なエネルギーをやり取りしなければならない分、電流が増えるので、施設としては好ましくはない。そこで、電動機には並列にコンデンサを接続することがある。このコンデンサを進相コンデンサという。また、キュービクル内にも高圧のコンデンサを設置することが多い。このコンデンサは、コイルによる遅れ無効電力を、コンデンサによる進み無効電力で打ち消して、全体の電圧・電流の関係が同相に近づけるようにするためである。

なぜ、誘導性負荷にコンデンサを取り付けることで、全体の電流が少なくなるかという点、コイルとコンデンサにそれぞれ蓄積・放出されるエネルギーは、このコイルとコンデンサの間を（まるでキャッチボールを行うかのように）行ったり来たりするためである。そのため、電源まで逆流していくエネルギーが減少する。



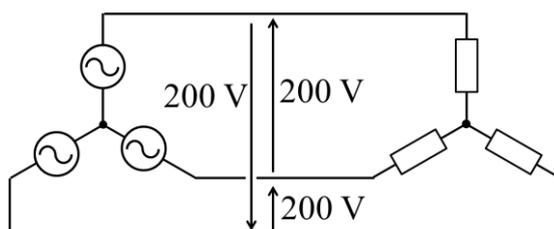
このとき、皮相電力と有効電力の比率を力率という。無効電力が完全に 0 var で、皮相電力と有効電力が等しいとき、力率が 100% であるという。無効電力が 0 var でないときは、皮相電力のほうが有効電力よりも大きくなる。この場合は、以下の式で計算できる。

$$\text{力率 } \cos \theta = \frac{\text{有効電力 } P [\text{W}]}{\text{皮相電力 } S [\text{VA}]}$$

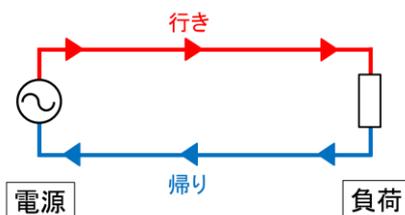
## 2.5 三相交流回路の性質

産業用機器の電源としては、三相交流が多く用いられる。また、電力系統（送電線路・配電線路）にも三相交流が用いられる。三相交流は単相交流と異なり、電線 3 本を 1 組として電力を伝送する方式である。三相交流回路には、主に『<sup>スター</sup>Y 結線』と『<sup>デルタ</sup>Δ 結線』が用いられる。

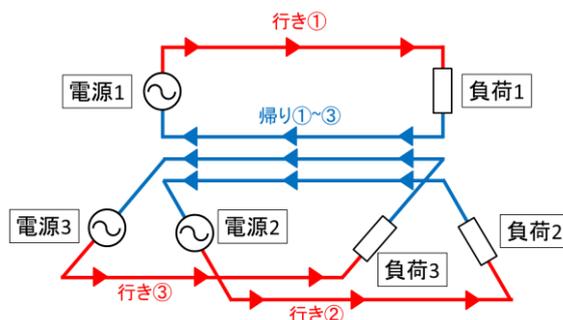
### ① Y 結線



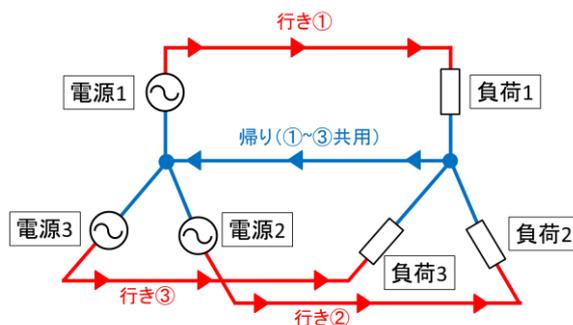
Y 結線は上の図のように、電源や負荷を Y の字形に接続したものである。このような形にする理由を以下でみていこう。



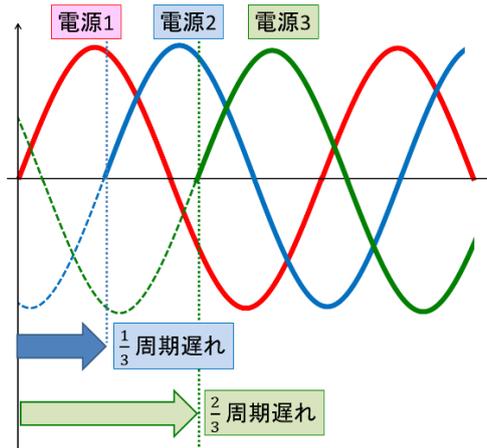
上の図は単相交流回路である。便宜上、上の線（赤い線）を“行き”、下の線（青い線）を“帰り”と考える。



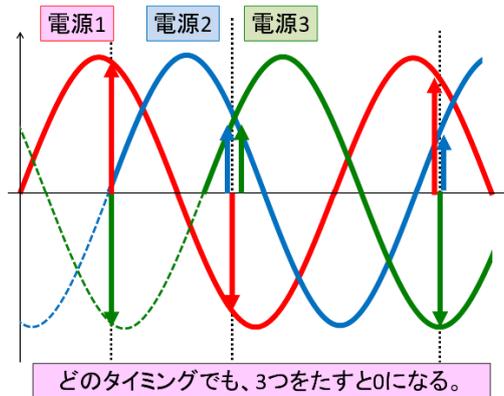
単相交流を上図のように 3 組用意して並べる。このとき、帰りの線が 3 本並んでいることが分かる。



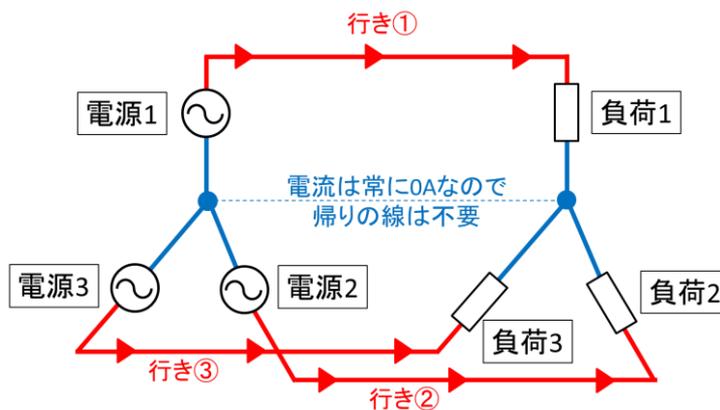
帰りの線①~③を共用として、1 本の線に置き換える。



ここで、電源電圧の“山—谷”のタイミング（位相）をそれぞれ  $1/3$ （位相差  $120^\circ$ ）ずつずらすことを考える。すると、各回路の電圧や電流は、上の図のような関係となる。

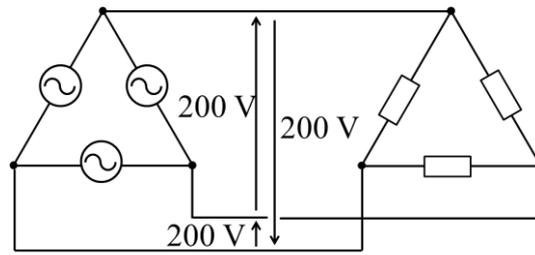


各回路を  $1/3$  ずつずらすと、どのタイミングをとっても 3 つの全てをたすと常に 0 になる。つまり、3 つの回路の電流をたすと、常に 0 A である。

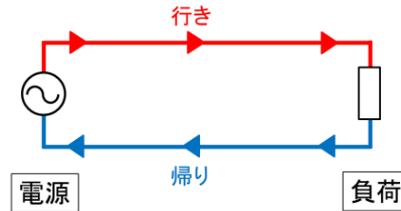


上の回路では、①~③の帰りの線の 3 本分を共用している。しかし、電流は全てたすと、常に 0 A になり、その帰り線には電流は常に流れなくなる。そのため、帰り線は不要であり、これを取り外しても回路の動作には全く影響を与えない。つまりこれが三相交流回路の Y 結線ということになる。なお、それぞれの回路のことを“相”という。各相の呼び方は、R 相—S 相—T 相、U 相—V 相—W 相、X 相—Y 相—Z 相、A 相—B 相—C 相など用途や電力会社ごとにさまざまなものがある。

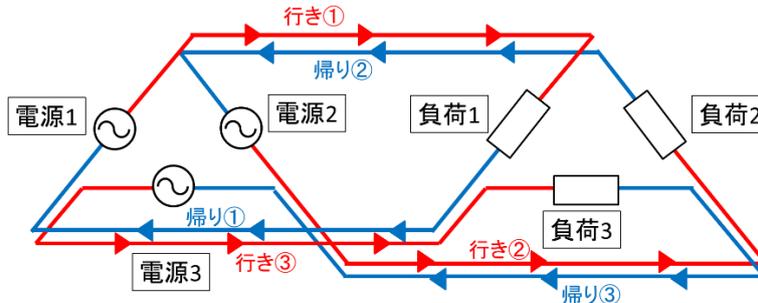
② Δ結線



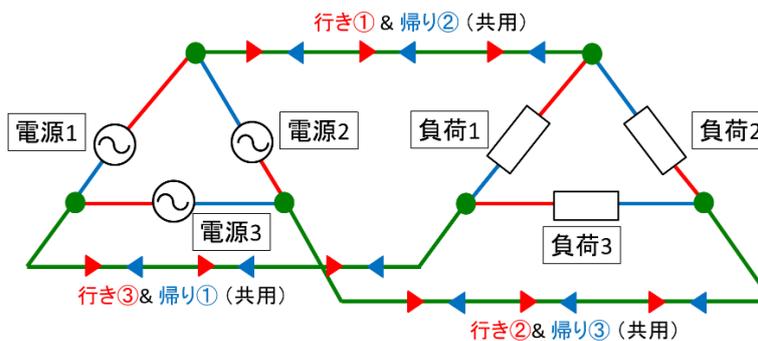
Δ結線は、電源・負荷を三角形の形に接続したものである。



ここでも、便宜上、上の線（赤い線）を“行き”、下の線（青い線）を“帰り”と考える。



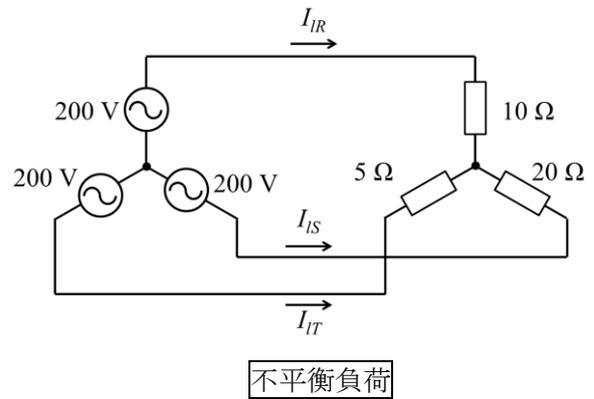
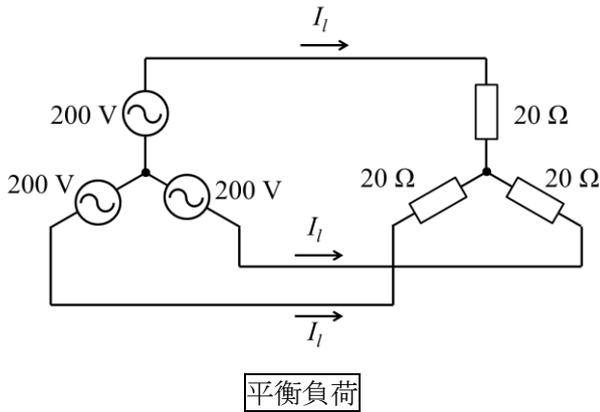
単相交流回路を上図のように、行きと帰りがセットになるように並べる。



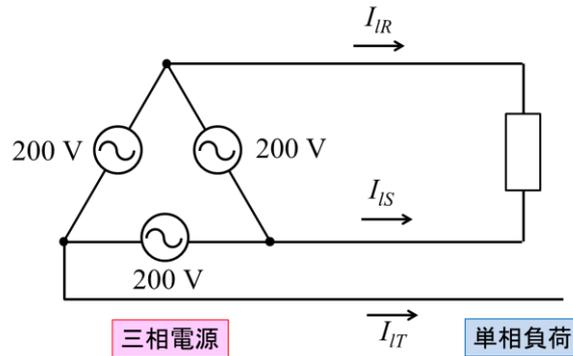
電源①~③はY結線のとおりと同じように、電圧は同じでタイミングが1/3ずつずれているとすると、行きと帰りの線を共用にしても、各線に同じ電流が流れ、回路の動作には影響を与えない。これがΔ結線である。

送配電を行う電力系統や、大きな電力を消費する産業用機器などでは、三相交流が用いられる。その理由は、単相交流に比べ3倍の電力を送ることができるためである。一方、電線の本数は単相交流(2本)に1本たすだけでよい。つまり、銅の使用量は1.5倍であるにもかかわらず、電力は3倍を送ることができるのである。このことから、一般に大電力を扱う場合には、三相交流が用いられる。

③ 不平衡負荷



三相交流において、理想的には3つの負荷が全て同じであることが望ましい。しかし、実際には負荷の大きさが異なることが多い。この状態を“不平衡”という。不平衡負荷が設置されると、各相のバランスが崩れ、それぞれの電線に流れる電流が異なり、特に発電側に負担を与えてしまったり、各電線における電圧降下が異なり、負荷側での電圧も異なってくるなどの悪影響がある。したがって、負荷の不平衡は可能な限り少ないほうが良い。

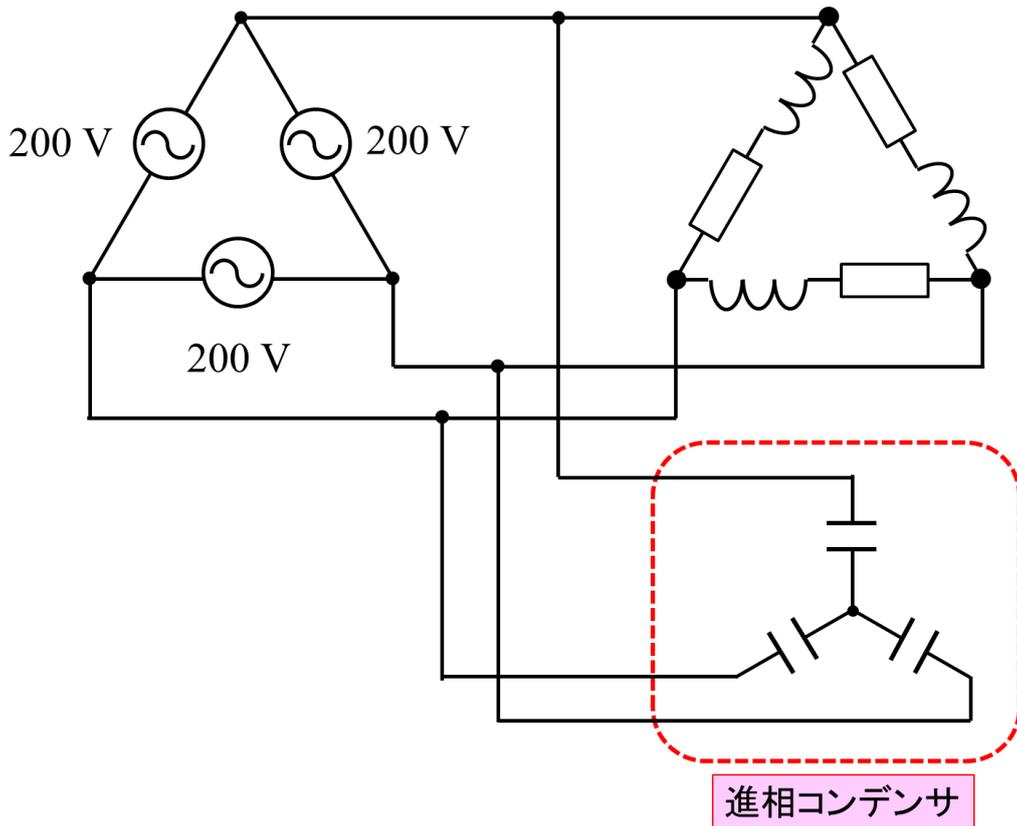


不平衡が起こる例として、三相電源から単相負荷をとる場合があげられる。各相にバランスよく単相負荷が接続されていれば、平衡負荷とみなすことができるが、特定の相に負荷が偏っていると不平衡が起きる。そのため、単相負荷をとる場合には、負荷電流を考慮してできる限りバランスよく接続する必要がある。

#### ④ 三相交流の力率改善

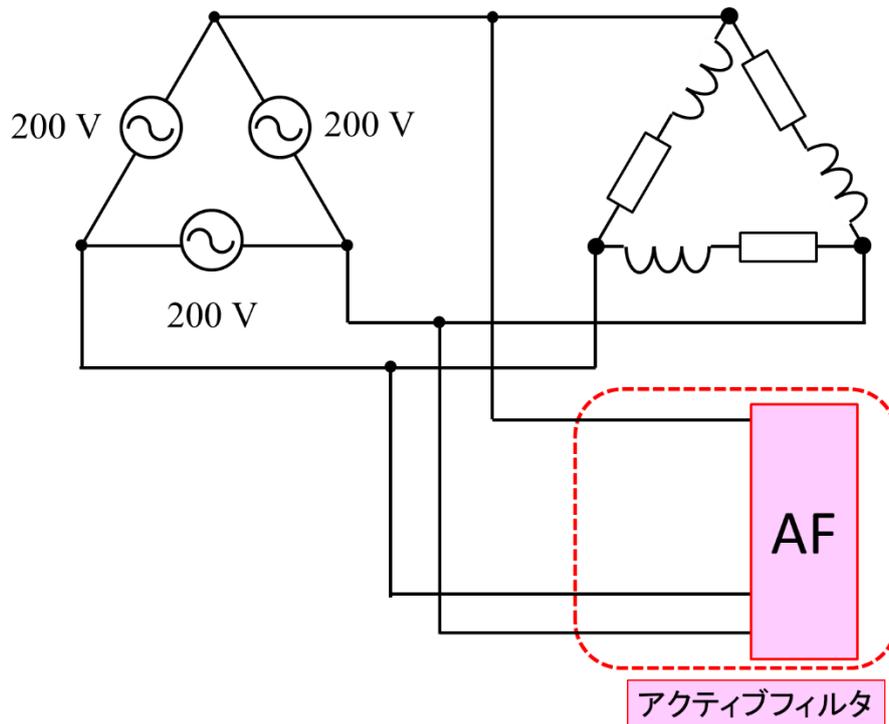
三相交流の場合でも、単相交流同様、負荷が誘導性であれば力率が悪化する。そのため、力率改善を行うことがよくある。三相交流の場合には、単相交流と違い、力率改善の方法は2通りある。

##### 1) 進相コンデンサを設置する



単相交流のときと同様に、誘導性負荷に並列にコンデンサを設置する。これは、コイルの発生する無効電力を進相コンデンサで打ち消してやることで、全体の無効電力を小さくする方法である。進相コンデンサを取り付けることで、コイルとコンデンサの間でエネルギーの蓄積・放出によるやり取りが発生するため、電源へ逆流する電力が減少する。従来、最も一般的に行われていた方法で、現在でも最も普通に採用される方法である。

## 2) アクティブフィルタを設置する



この方法は、近年の半導体素子の性能向上により実用になった方法である。これは、誘導性負荷に並列にアクティブフィルタを接続してやる方法である。負荷のコイルは、エネルギーの蓄積・放出を行うため、そのままでは電源に電力が逆流してしまう。しかし、三相交流では、各相で蓄積・放出のタイミングが異なっている。したがって、各相間でこのエネルギーのやり取りを行うことができれば、進相コンデンサがなくとも、無効電力を打ち消すことができる。この各相間でのエネルギーのやり取りを行うのがアクティブフィルタである。

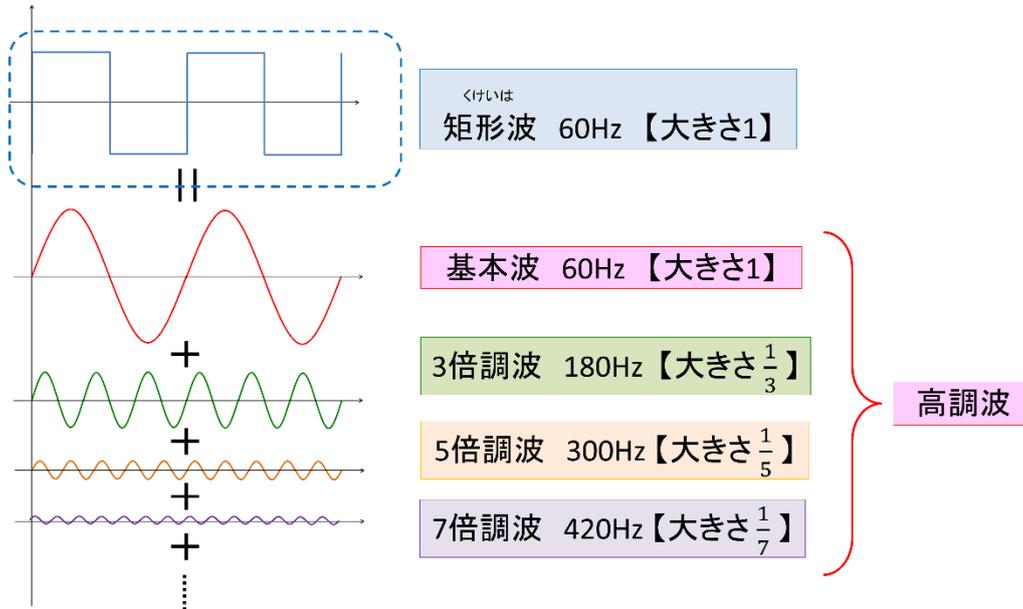
一般的にアクティブフィルタはインバータと全く同じ構成であるため、通常のインバータはアクティブフィルタとしての性能をもっている。したがって、インバータによって電動機の駆動を行う場合、進相コンデンサは不要である。

※インバータで駆動する電動機に進相コンデンサを取り付けると、制御方式によってはうまく駆動できない場合がある。電動機にインバータを新設した場合には、進相コンデンサを取り外すことを忘れないようにすること。

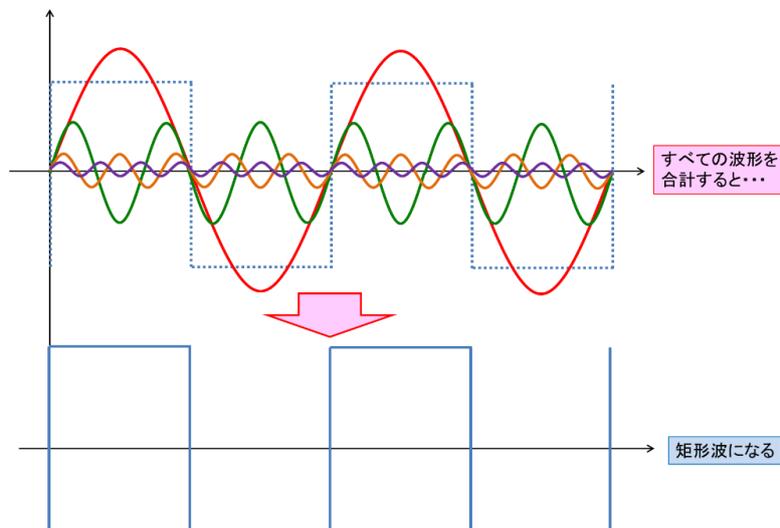
※電力系統で用いられる同期調相機も同じ仕組みで無効電力を吸収している。

## 2.6 高調波を含む交流

理想的な電源に理想的な負荷が接続されている場合、電圧・電流ともに 60 Hz の正弦波（サインカーブ）となっているはずである。しかし、実際には電圧や電流の波の形が歪んでいることが多い。このような、きれいな正弦波にならない場合の電圧・電流特性を見ていこう。

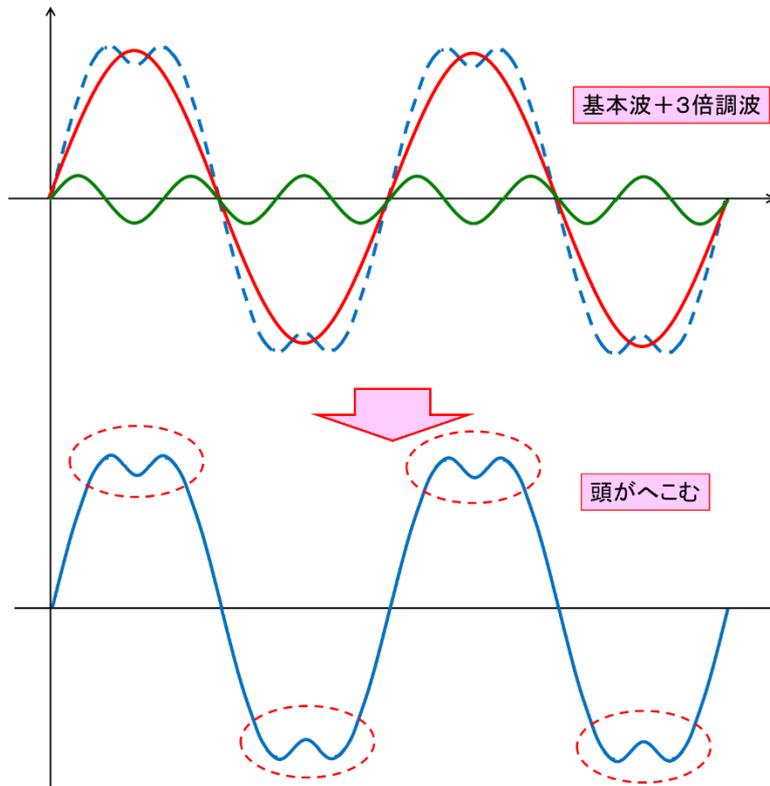


上の図のように、例えば、60 Hz の矩形波がある場合、60 Hz の正弦波を基本波として、その奇数倍（奇数次）の周波数の波に分解することができる。逆に、奇数倍の周波数の正弦波を全てたし合わせると、下の図のように矩形波を作ることができる。これをフーリエ展開、またはフーリエ変換という。オシロスコープなどには FFT（高速フーリエ変換）機能がついているものが近年多くなったが、これは、異なる周波数の波形に分ける演算処理を行うものである。数学の理論によれば、全ての波形はフーリエ変換により分解することが可能であることが知られている。また、基本波以外の高い周波数成分の波のうち、40 倍調波（40 次）までの波を高調波、それ以降をノイズと呼ぶ。電気設備の高調波については、高調波流出電流計算書により報告を求められることがある。

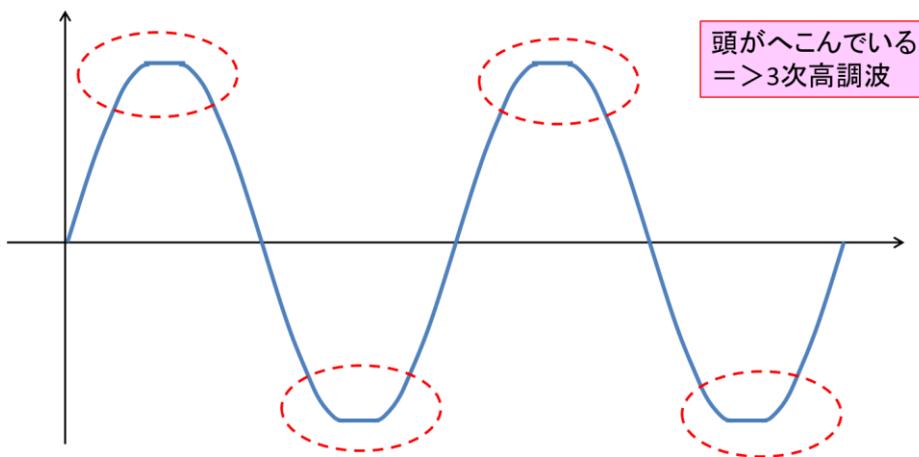


高調波を含む波形にはどのようなものがあるか、その特徴を見ていこう。

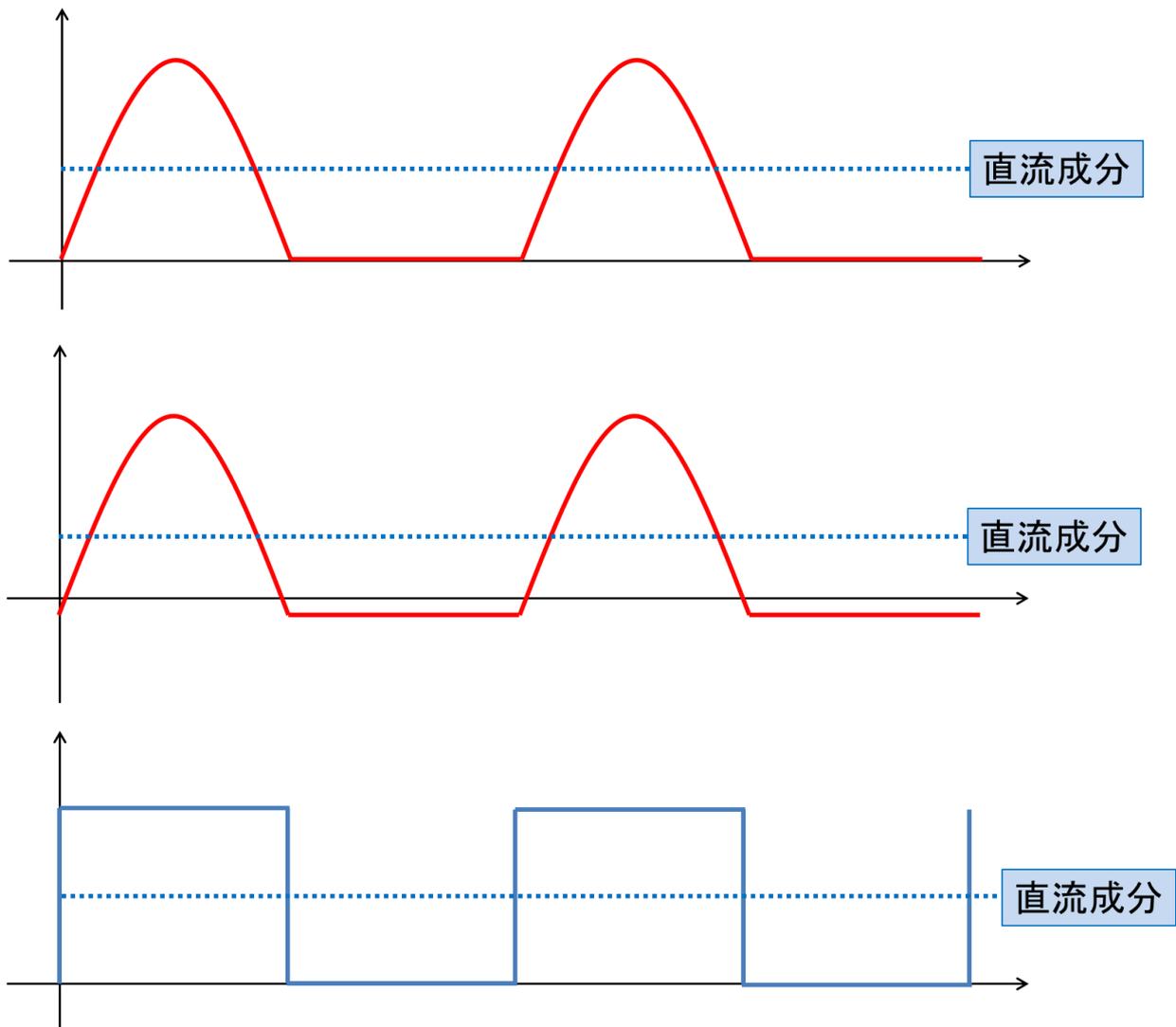
① 3次高調波の特性



上の図のように、基本波に3次高調波を重ね合わせると、正弦波の頭の部分が少しへこんだ形となる。つまり、頭がへこんでいる波形は3次高調波を含んでいる場合が多い。下の図は、一般的な電力系統の電圧は形である。電力系統の波形は、変圧器の鉄心の特性や、負荷の半導体素子の影響を受けて、3次高調波を含んでいる場合が多い。

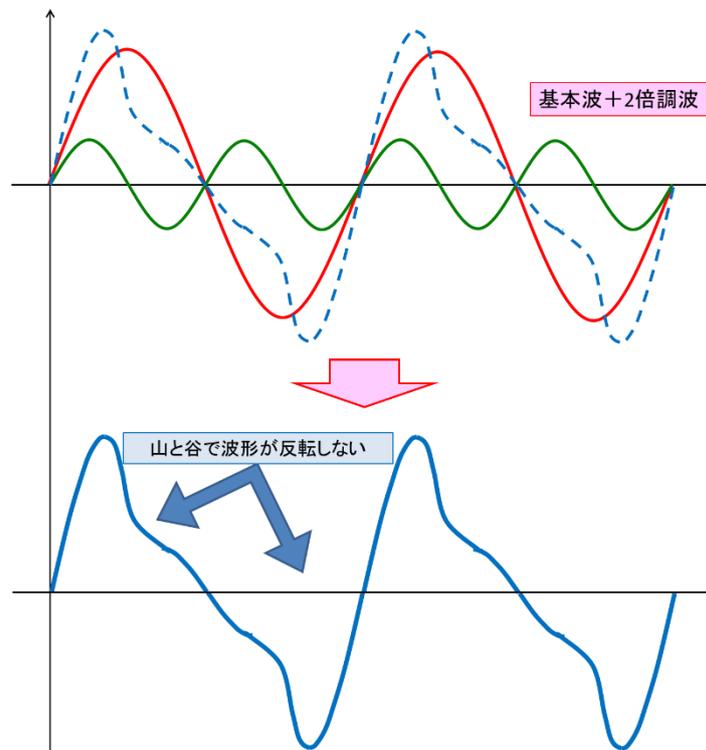


## ② 直流成分の特性

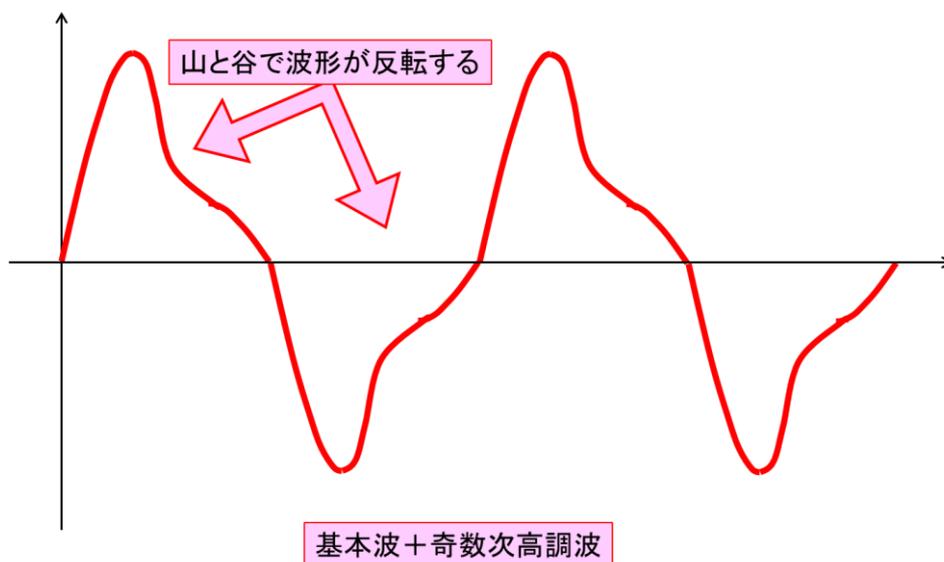


上の図のそれぞれの波形のように、プラスの部分とマイナスの部分の面積が違う場合は、直流成分を含んでいることを示している。変圧器の2次側に直流成分があると、“直流偏磁”という現象が起き、変圧器に負担を与えることになるので、変圧器の容量に十分余裕を持つなど、注意する必要がある。

③ 2次高調波の特性

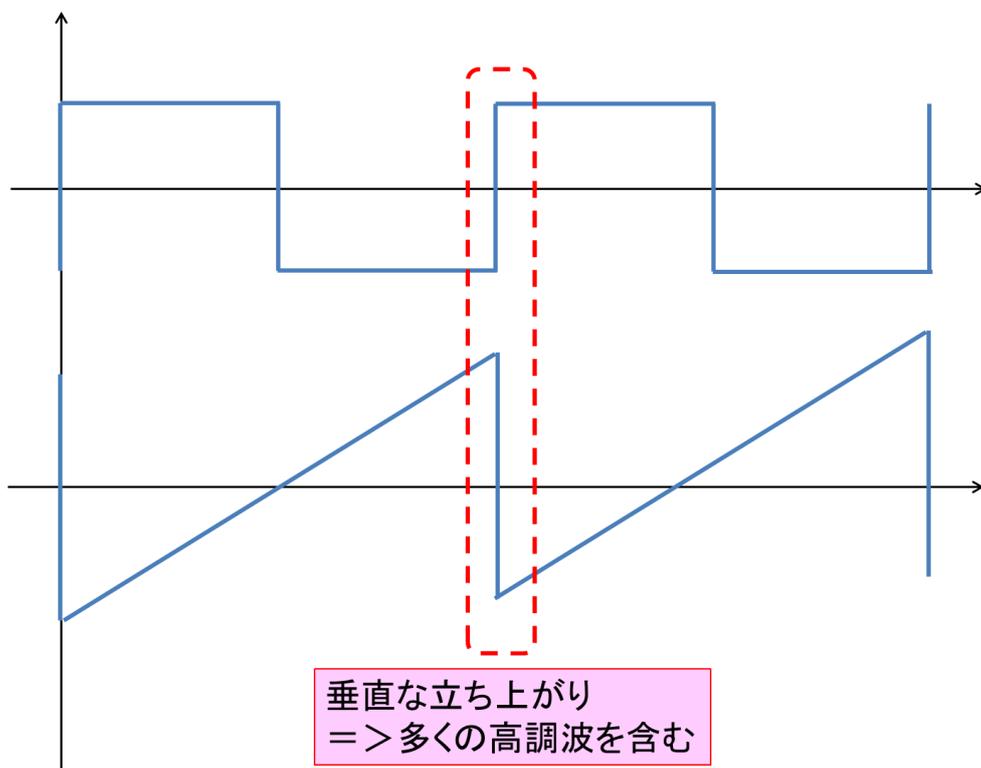


上の図のように、波形に2次高調波（偶数次高調波）を含むと、山をそのままひっくり返しても谷の形にはならない。そのため、下の図のように、山をひっくり返したときに、谷の形と同じになる場合には、2次高調波をはじめとする偶数次（2次、4次、6次・・・）を含まない、奇数次のみ（3次、5次、7次・・・）の波形であるといえる。

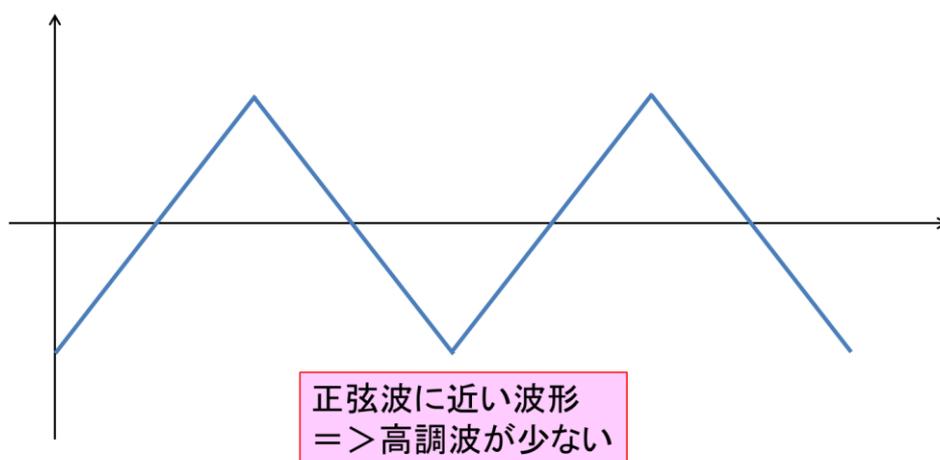


#### ④ その他特徴

高調波の大きさは、どのような場合に大きくなるのだろうか。数学的には、傾きの大きな波形、特に下の図のように垂直に立ち上がる部分を持つ波形の場合は、非常に多くの高調波成分を持つことが知られている。

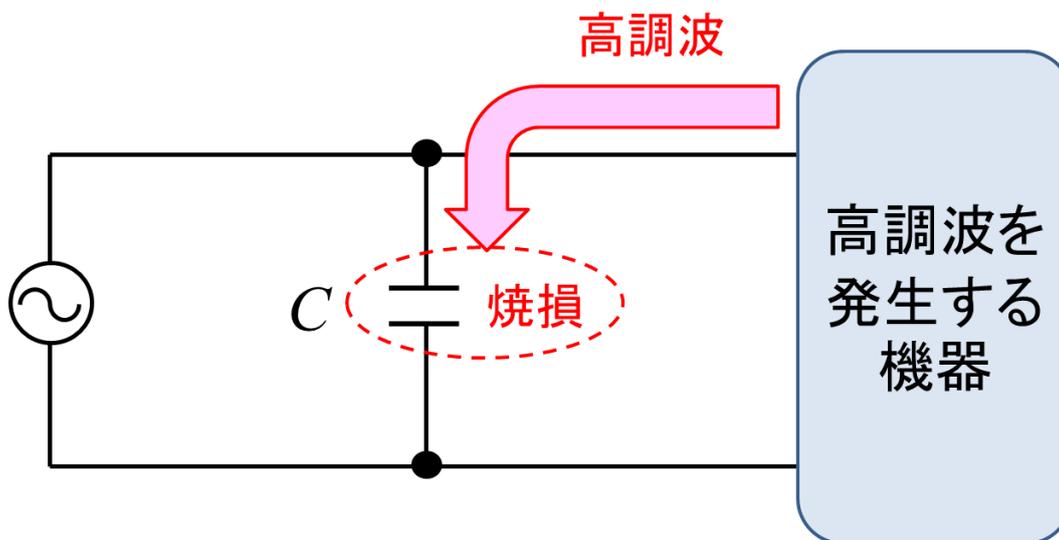


その一方で、正弦波に近づくにつれて、高調波は徐々に少なくなってくる。



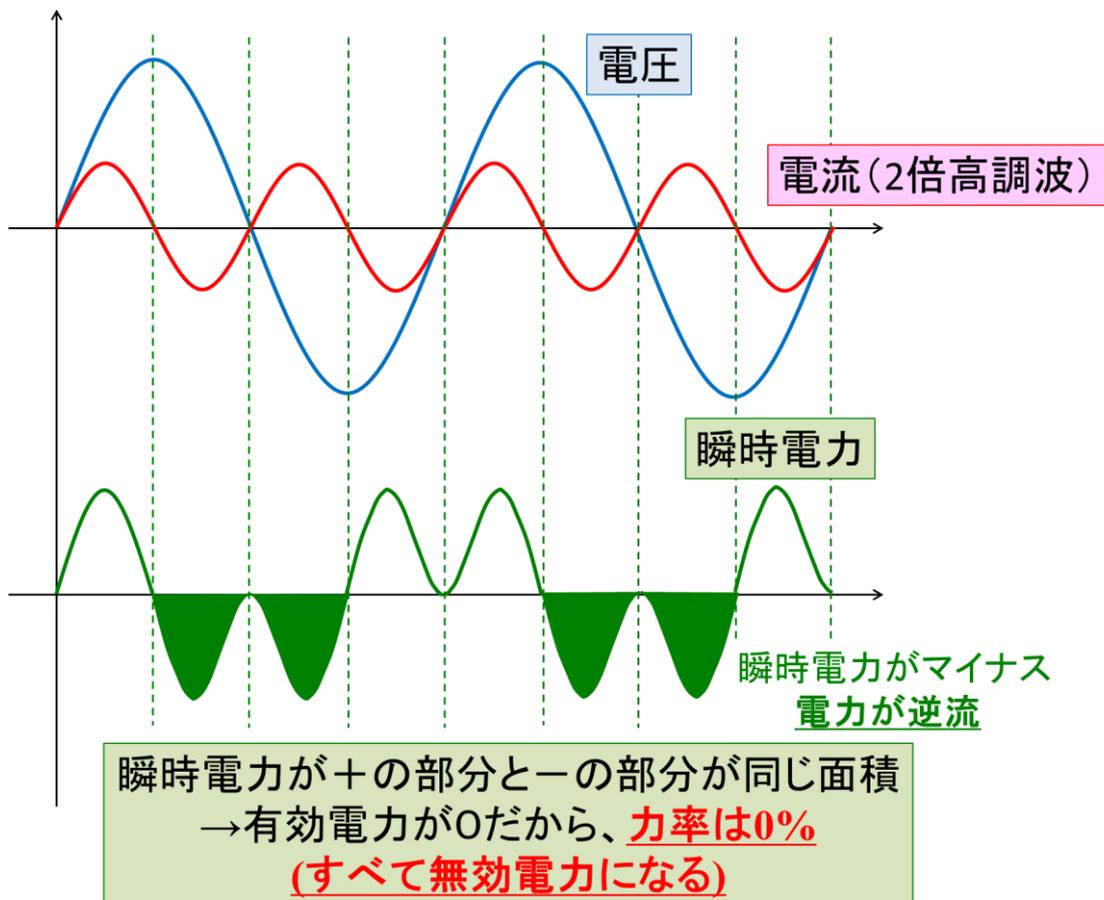
### ⑤ 高調波の特性

高調波が最も問題になるのは、進相コンデンサである。コンデンサは周波数が高いほど電流が流れやすくなるため、高調波が大量に流れるようになる。高調波の大きさが大きいと焼損することもある。そのため、電気設備から流出する高調波には制限が設けられている場合がある。

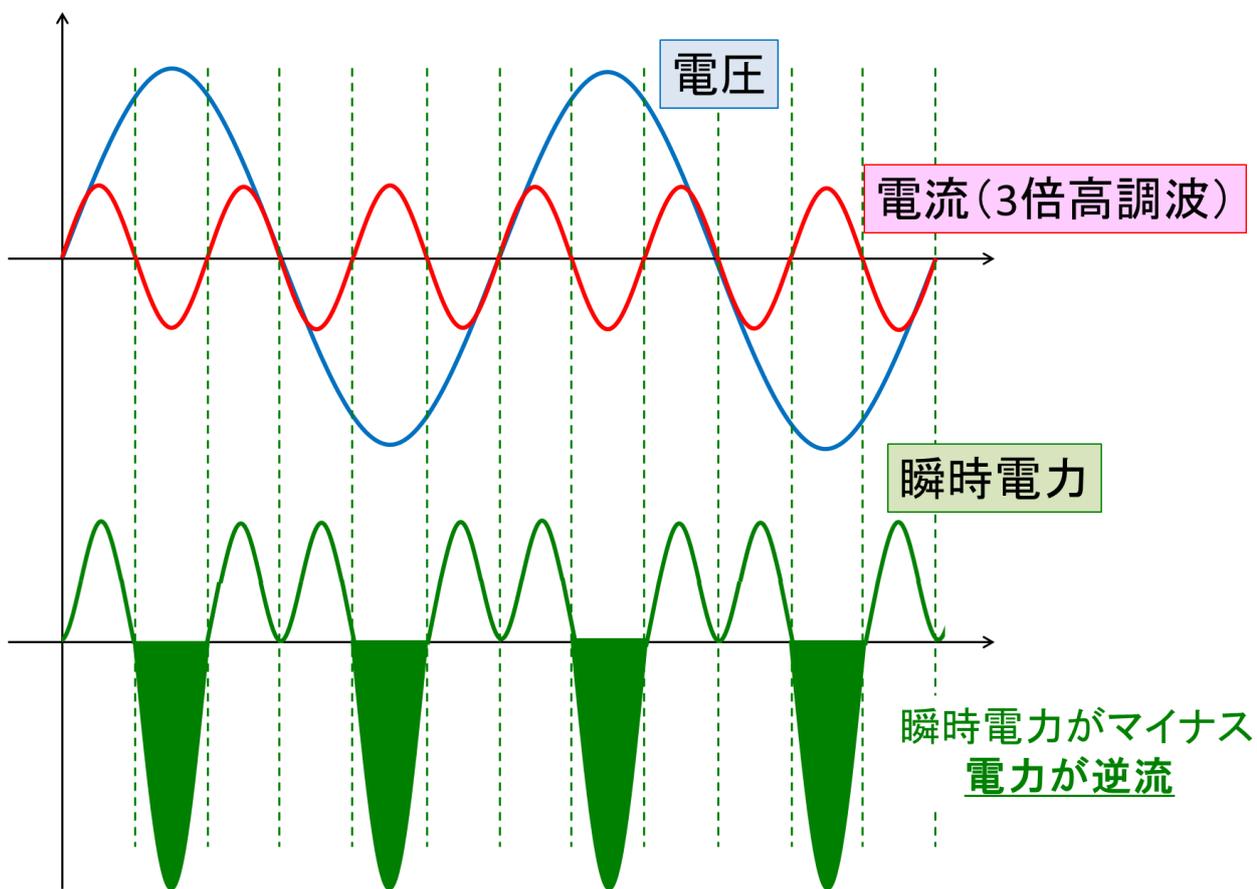


## ⑥ 高調波の無効電力

高調波電流が流れた場合の電力を考える。いま、電源の電圧は理想的な 60 Hz 交流とする。このとき、その 2 倍の周波数の 120 Hz の電流が流れたとする。そのときの瞬時電力は下の図のようになる。図に示すように、電源から供給される電力（瞬時電力のうちプラス側の部分）と電源に逆流する電力（瞬時電力のうちマイナス側の塗りつぶされている部分）は、大きさが同じであるので、電源から供給された電力の全てが電源に逆流していることになる。つまり、電圧が理想的な場合に高調波電流が流れると、その全てが無効電力となり、有効電力は 0 W である。また、力率は 0% である。後述するようにインバータの 1 次側に流れる（入力）電流はきれいな正弦波にならないので、高調波電流による無効電力が生ずる。しかし、旧式の力率計では高調波電流による無効電力の計測ができないので正しい値を示さないことが多い（例えば、以下の波形は力率 0% であるにもかかわらず、100% に近い値を示す）。力率の評価が必要になった場合は、データロガーなど高調波による無効電力が計測できる測定器を使用する必要がある。



例えば、3倍高調波電流の場合であっても、同様に全てが無効電力となる。このように考えると、電圧の周波数と異なる周波数の電流成分は全て無効電力となる。

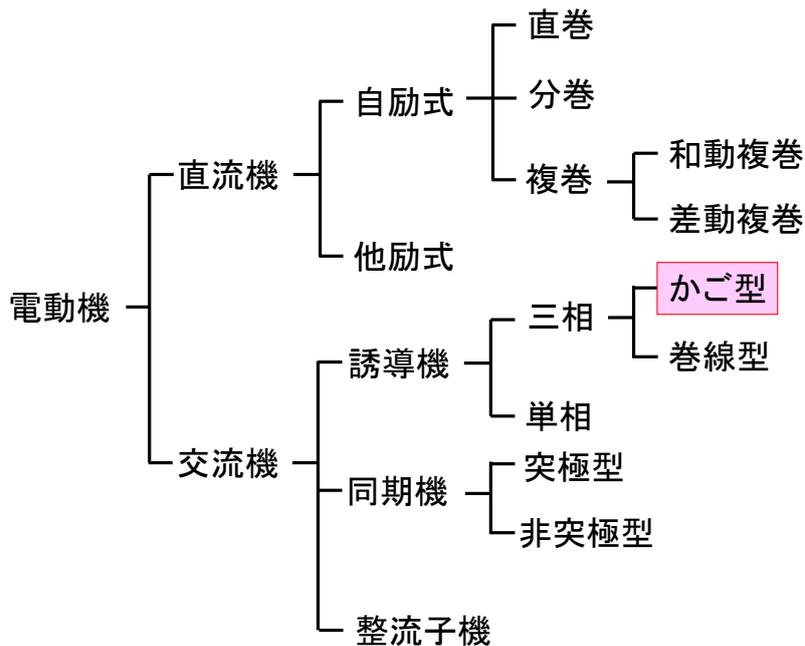


瞬時電力が+の部分と-の部分が同じ面積  
→有効電力が0だから、**力率は0%**  
**(すべて無効電力になる)**

### 3. 電動機のしくみ

#### 3.1 電動機の種類

**電動機**は別名『モータ』、『モートル』とも呼ばれ、電気を機械的な運動に変換する機器である。電動機には用途によって様々な種類があるが、比較的大型の電動機として広く普及しているものは**かご形三相誘導電動機**である。



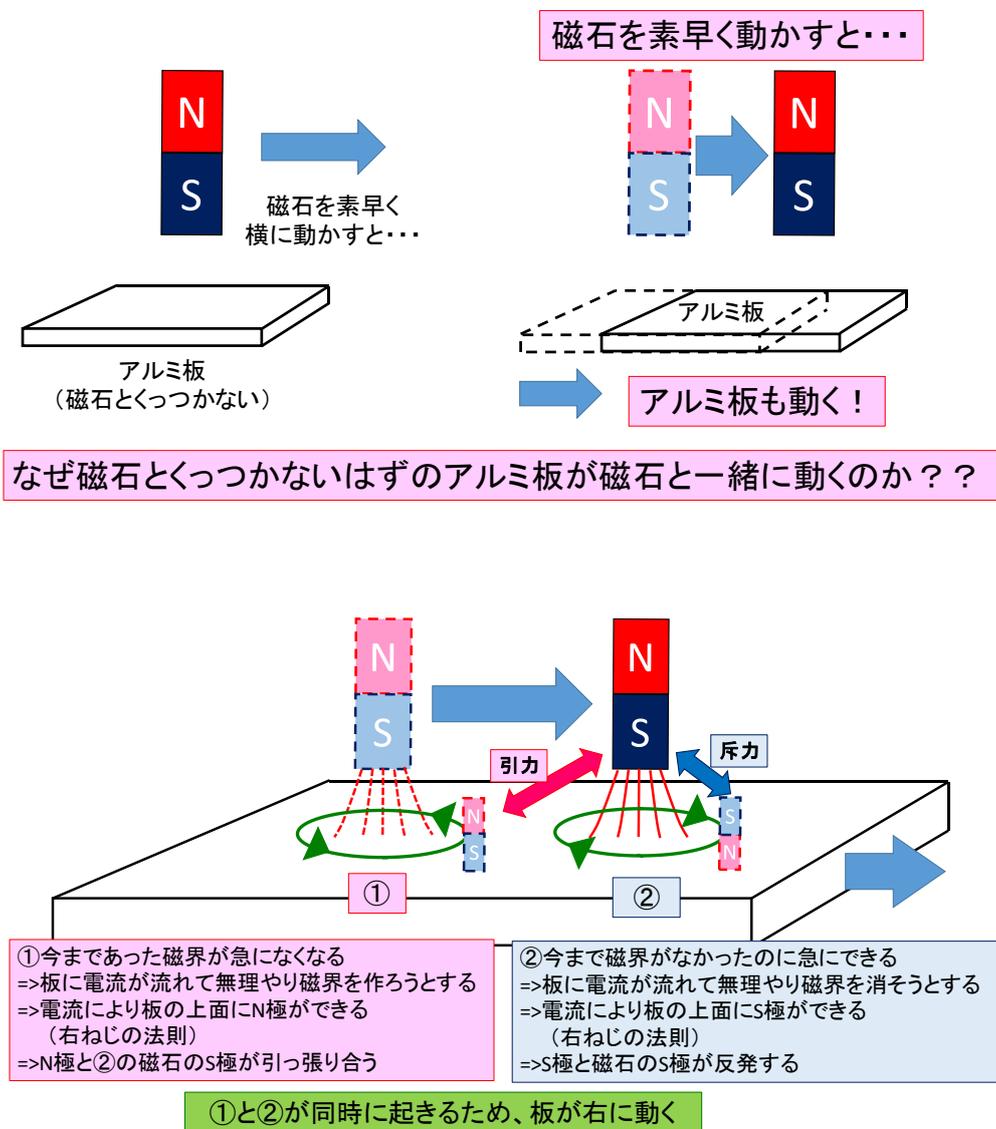
旧来は、ファンや水道ポンプなど一定の速度で運転をするものには誘導電動機を用い、電車やクレーンなど速度を制御する必要があるものには直流電動機を用いた。しかし、インバータなどの電力変換器の技術が大きく進歩してきたことから、速度制御を必要とするものに対しても誘導電動機を採用する機会が増えている。さらには、効率がよい永久磁石同期電動機を用いる例も見受けられる。

### 3.2 かご形三相誘導電動機の仕組み

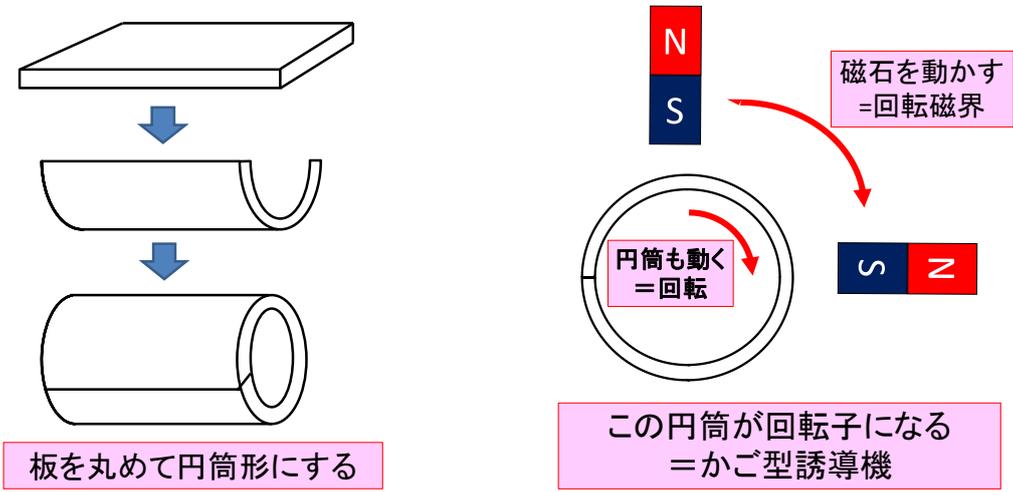
#### (1) 回転子

三相誘導電動機は、三相電源に接続することによって回転軸が回転を始める。まずは、どうして回転をするのかという仕組みを確認していく。

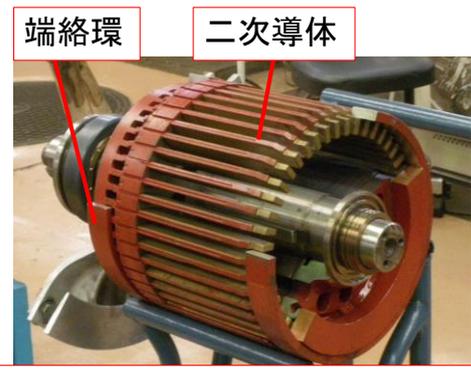
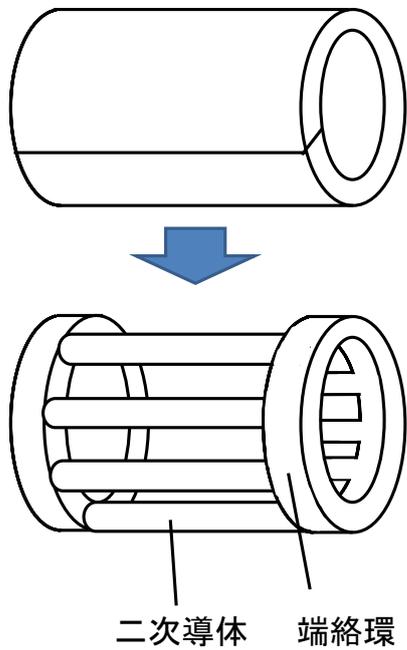
一般的な棒磁石に鉄の板を近づけると、磁石の作用により鉄板を引き寄せられる力が働く。一方で、この棒磁石にアルミ板を近づけても、アルミ板が引き寄せられることはない。しかし、下図のように、この**アルミ板の上で磁石を素早く横方向に動かすと、アルミ板が磁石と一緒に横方向へ移動する**ことが知られている。



以上の現象を使って、回転力を得ることを考える。まずは下図（左）のように板を円筒状にする。その後、下図（右）のように、磁石を円筒の側面に沿って素早く動かす。すると円筒は磁石につられて動くので、円筒は回転する。この回転する円筒のことを『**回転子**』とよぶ。また、磁石を動かすことによって、できる磁界も回転するように動く。このように、グルグルと回転する磁界を『**回転磁界**』という。



実際の回転子は、下図のように完全な円筒ではなく、リスかごのような形をしている。このような回転子をもつ誘導電動機を『**かご形誘導電動機**』という。



電気車用誘導電動機(MT68A)の回転子

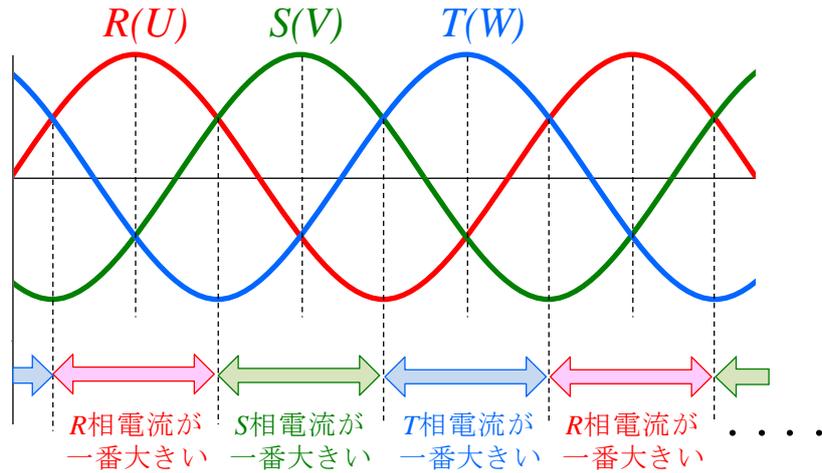
実際には円筒ではなく、かご型をしている

写真：JR 東日本大宮工場で撮影

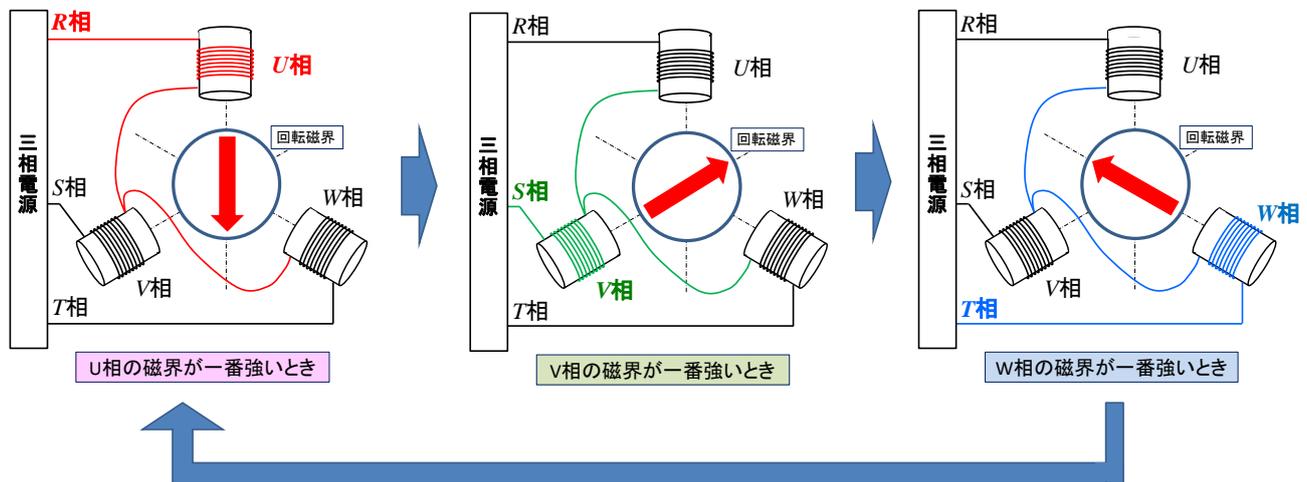
(2) 回転磁界（固定子）

回転子を回転させるためには、磁界を回転させる必要がある。そこで、コイルと三相電源を使って、三相電源を作る方法についてみていく。

三相交流は、下図のようにR相、S相、T相の3本の線によって電流が供給される。3つの相のそれぞれの電流を比較すると、R相の電流が一番大きな期間・S相の電流が一番大きな期間・T相の電流が一番大きな期間が順番にくることが分かる。



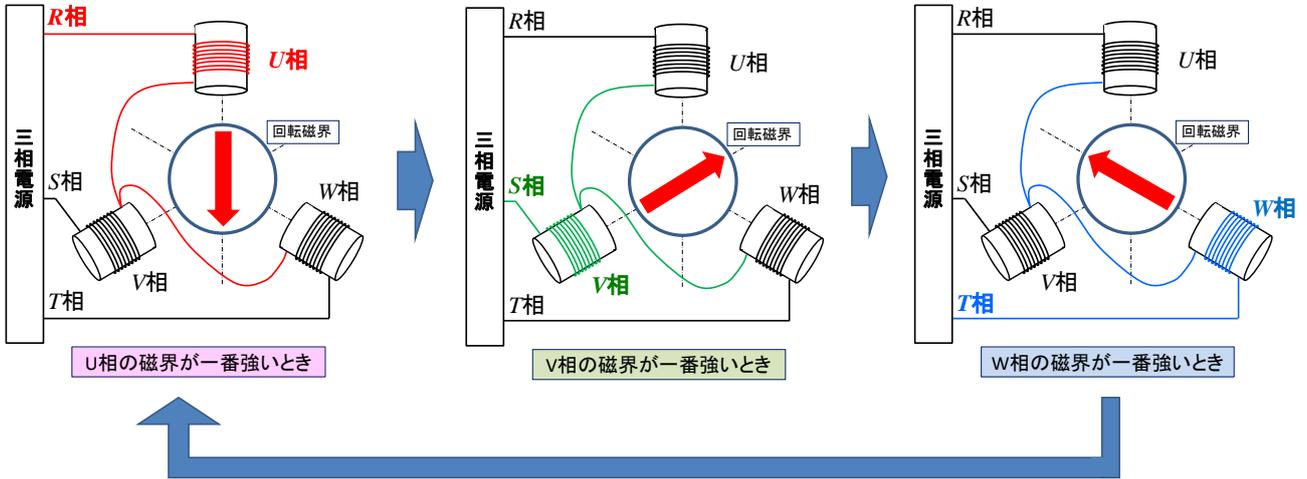
次に、下図のようにコイルを3つ用意して120度ずつの角度をとって設置する。それぞれのコイルに電源を接続する。



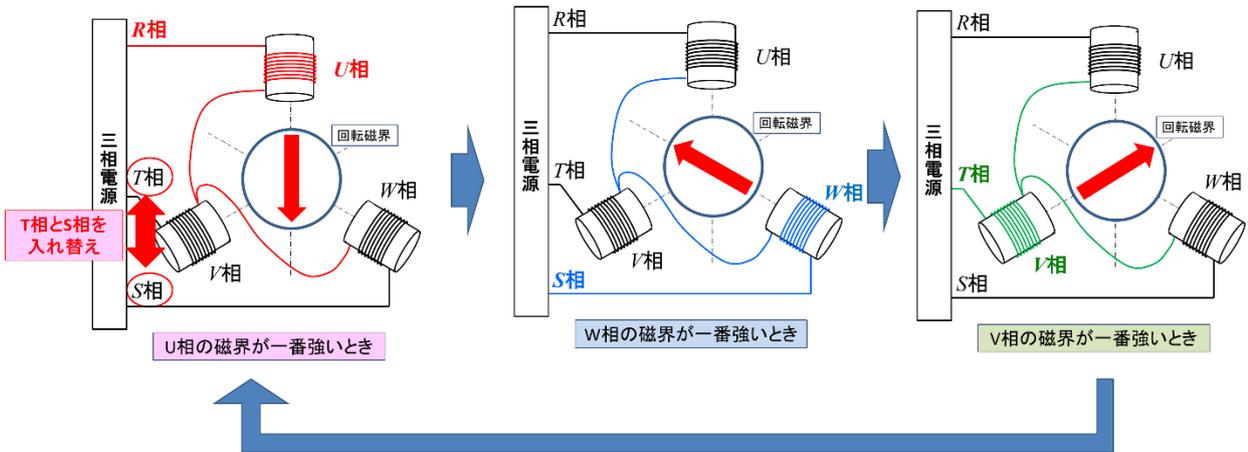
このようにすると、R相の電流が一番大きな期間ではU相の磁界が一番強くなる。S相の電流が一番大きな期間ではV相の磁界が一番強くなる。T相の電流が一番大きな期間ではW相の磁界が一番強くなる。この変化が電源の周波数に合わせて高速で繰り返されるので、内部の磁界は高速で回転することになる。このようにすることで、回転磁界を得ることができる。また、この回転磁界をつくるコイルのことを『固定子』という。回転磁界の回転速度を『同期速度』という。

なお、回転磁界の回転の向きを逆にしたければ、どれでもよいので3線のうち2線を入れ替えてやればよい。下の図では、S相とT相を入れ替えた場合の例を示す。

正回転の場合：図の回転磁界は時計回り



S相とT相を逆につないだ場合：図の回転磁界は反時計回り



一般的には、S相はB種接地をとってある場合が多いので、S相をそのままとしてR相とT相を入れ替える場合が多い。

### 3.3 すべりとトルク・電流特性

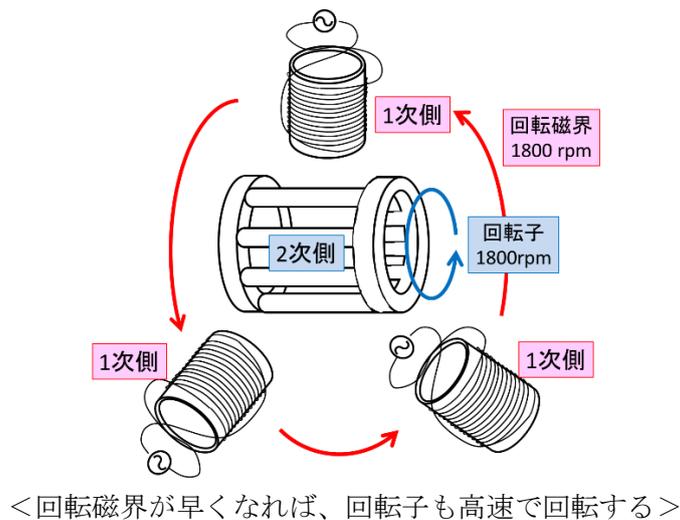
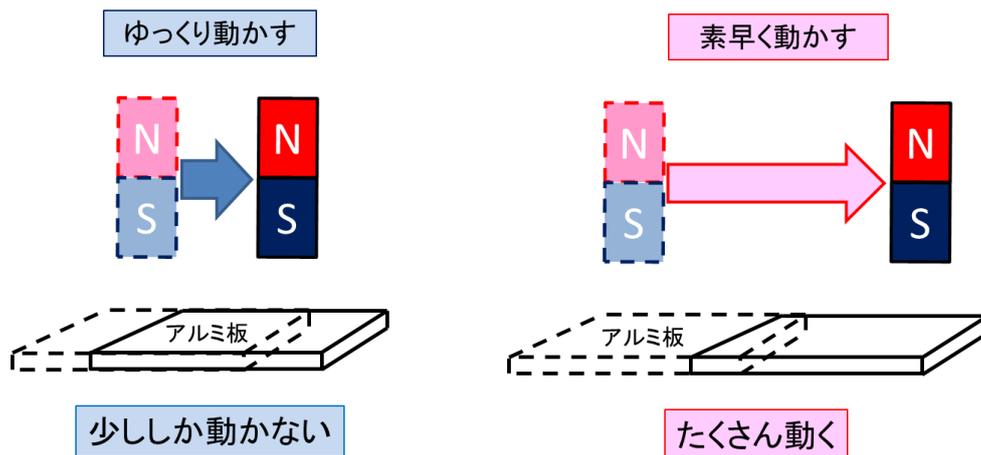
電動機の1分間あたりの回転の回数を回転速度という。単位は、[rpm]または[ $\overset{\text{パーミッツ}}{\text{m i n}^{-1}}$ ]をつかう。電動機の回転速度  $N$  は、**電源周波数  $f$** 、**極数  $p$** 、**すべり  $s$**  の3つで決まり、次式により計算できる。

$$N = \frac{120f}{p} (1 - s) \text{ [rpm]}$$

では、なぜこれらによって回転速度が決まるのか見ていこう。

#### ① 電源周波数

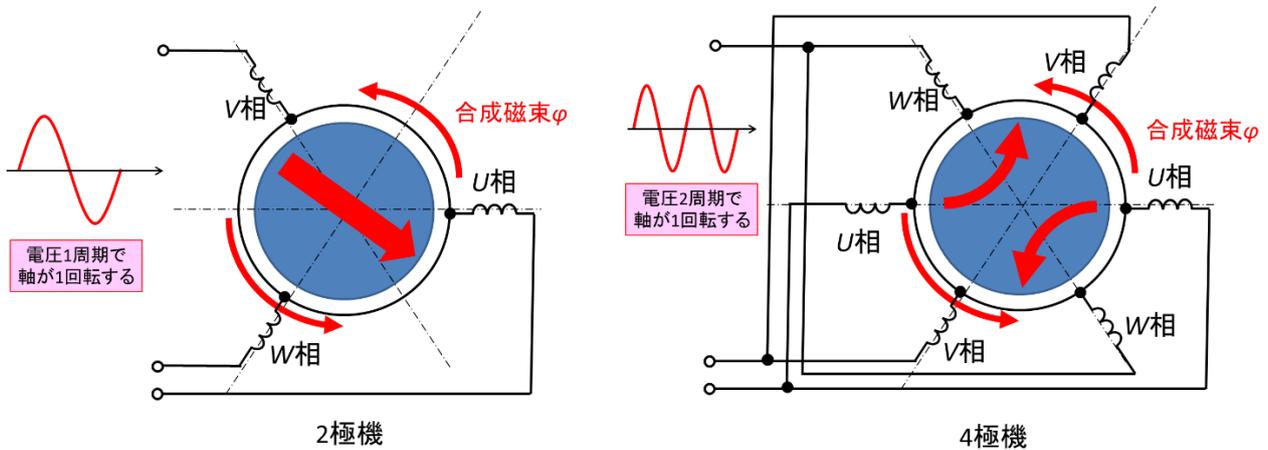
電動機の回転磁界は、電源の周波数と同じタイミングで作られるため、電源の周波数が高いほど回転磁界も早く回転する。回転磁界が早く回転すれば、下の図のように回転子もそれに引きずられて早く回転するようになる。したがって、電源の周波数が高いほど、回転速度も速くなる。



## ② 極数

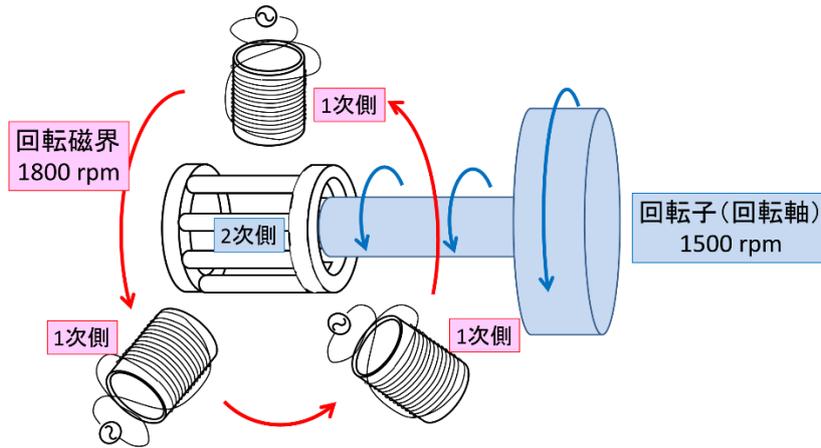
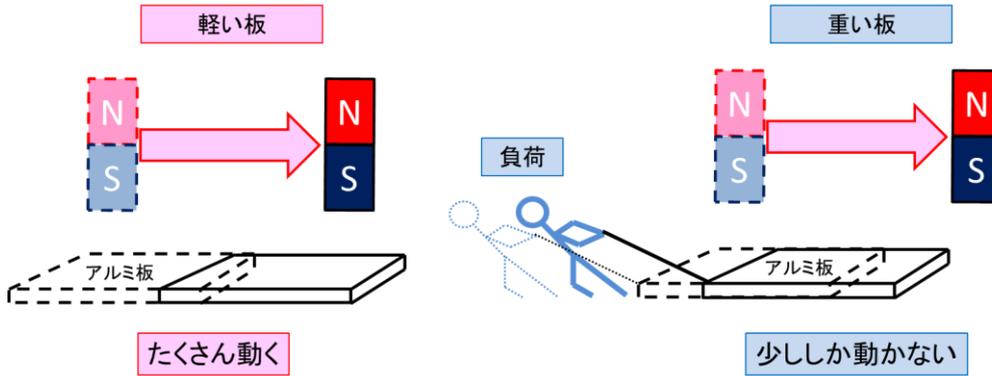
もっとも単純な形の電動機には、下図の左のように、三相電源に対応した3つのコイルがある。このような電動機を**2極機**という。**2極機は電源1周期で回転軸が1回転する**。一方で、コイルの数を倍にした電動機も多く採用されている。これは、3つのコイルを1組として、これを2組並列に接続し、下図右のように並べたものである。これを**4極機**という。**4極機は電源2周期で回転軸が1回転する**。このように極数が多くなるほど、回転軸が1周するために必要な電源周期が多くなり、これは、回転速度が遅くなることを意味する。

極数とは、何極機かを意味するものであり、2極機では極数は2、4極機では極数は4である。極対数きよくついでうは、極数を2で割ったもので、2極機では極対数は1、4極機では極対数は2である。



### ③ すべり

誘導電動機の場合、回転軸につながっている機械負荷の大きさによっても回転数が変わる。すなわち、軽い負荷が接続されていれば回転が速くなり、負荷が重ければ回転は遅くなる。全く負荷がない場合には回転軸と回転磁界が同じ速さで回転する（つまり、同期速度で回転する）。回転軸が回転磁界に比べてどの程度遅く回転しているかを示す指標を『すべり』という。すべりは、小数で表したり、%を使って表したりする。



<負荷が重ければ、回転子の回転は回転磁界よりも遅くなる>

すべりは、以下の式で計算する。

$$S = \frac{N_o - N}{N_o}$$

ただし、

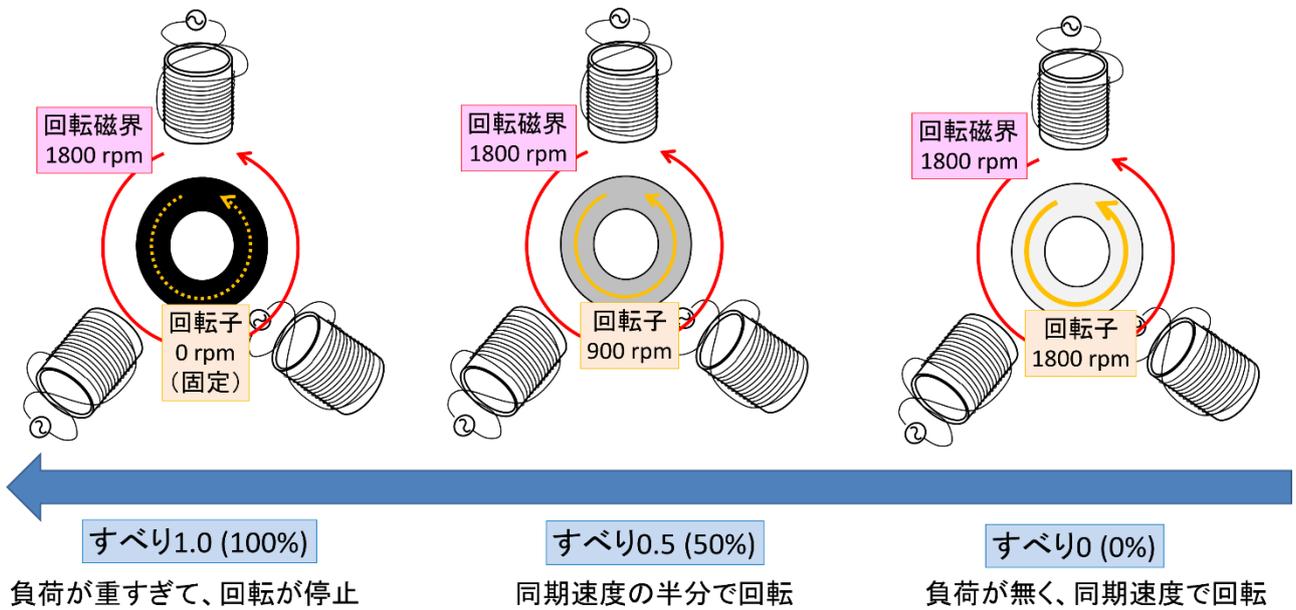
$N_o$  : 同期速度[rpm]

$N$  : 回転子の回転速度[rpm]

$s$  : すべり

○すべりのイメージ

すべりは、通常の使用状態では、0 から 1 までの数字をとる。すべり 0 とは、負荷が全くなく、回転軸が同期速度（回転磁界と同じ速度）で回転している状態である。また、すべり 1 とは、負荷が重すぎて、回転が完全に停止してしまっている状態を示している。



下の図に示すように、誘導電動機はすべりが 1 に近づくとも不安定な動作をするため、通常は 0 に近いところで用いる。

誘導機の回転速度

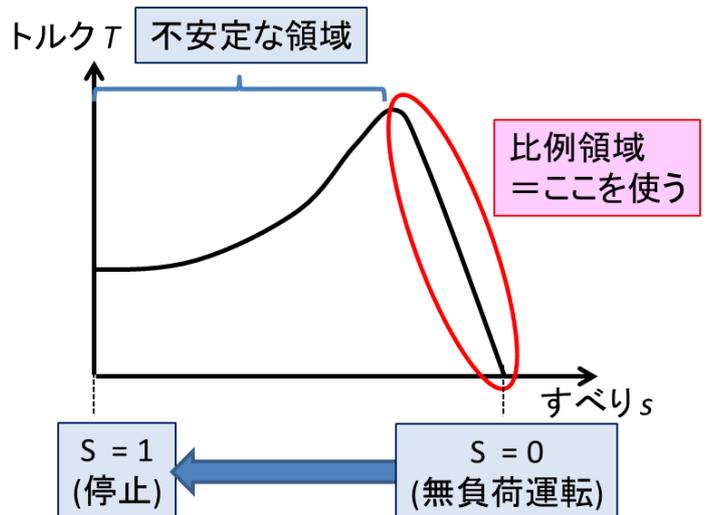
$$N = \frac{120f}{p} (1 - s) \quad [\text{rpm}]$$

- N : 回転数
- f : 電源周波数
- p : 極数
- s : すべり

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$

- N : 回転数
- N<sub>S</sub> : 同期回転数

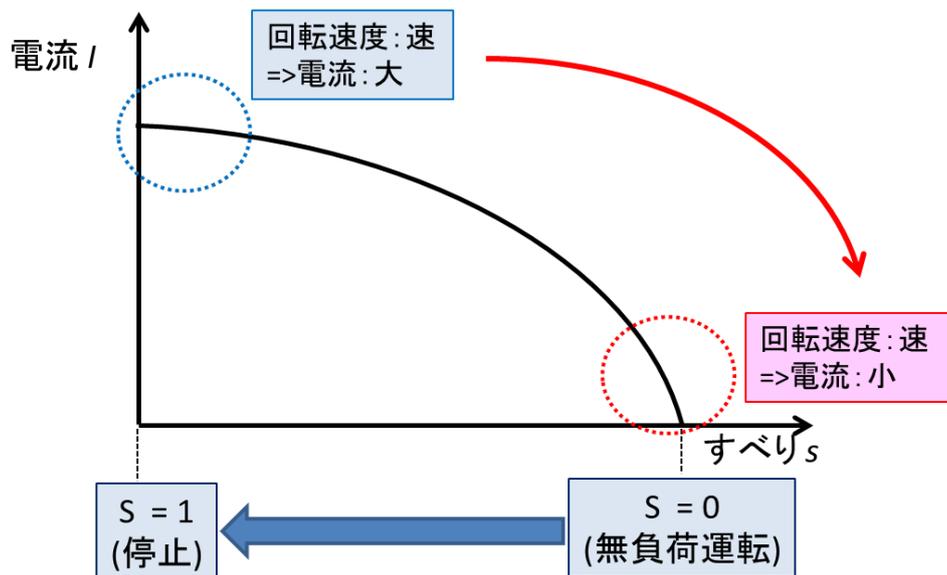
実際の回転数が回転磁界の回転数よりどのくらい遅くなっているかを表す。



## ○電流特性

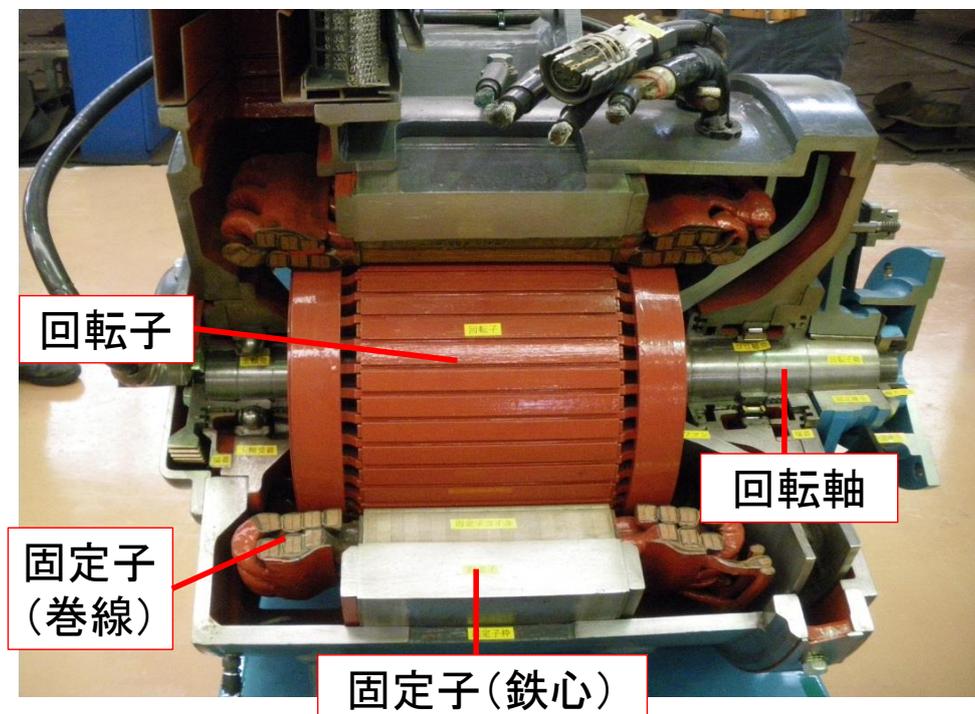
回転数と電流の関係は、下の図のようになる。回転数が早いときは、負荷が軽いことを意味するので、電流は小さい。負荷が重くなり、回転数が遅くなるにつれ、電流は大きくなっていく。電流が最も大きくなるのは、回転軸が完全に固定され回転が 0 rpm になったときである。この状態を『**ロック**』という。電動機がロックされると、過大な電流が流れて電動機が焼損するので、ロックした場合には直ちに電動機への電力の供給を停止させなければならない。

電動機の始動のときも回転が 0 rpm であり、瞬間的にロック状態と同じように過大な電流が流れる。このように始動時に流れる大きな電流のことを『**始動電流**』という。始動電流は、定格電流の 4~8 倍の電流が流れることが知られている。そのため、配線用遮断器や電線などの選定は、始動電流を考慮して余裕を持った設計とする必要がある。



### 3.4 かご形三相誘導電動機の構造と銘板

かご形三相誘導電動機はかご形の回転子と、回転磁界を作る固定子でできている。

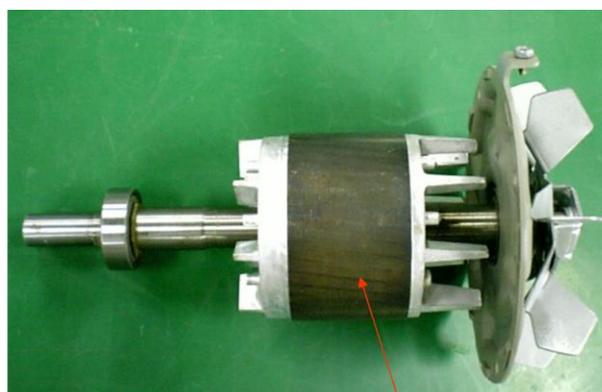


写真：JR 東日本大宮工場で撮影



固定子巻線

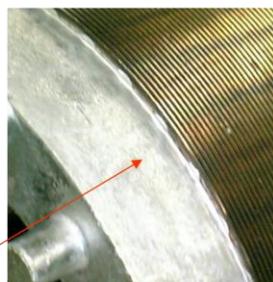
ステーター(固定子鉄心)



ローター(回転子鉄心)



積層鉄心



○ めいばん  
銘板



THREE PHASE INDUCTION MOTOR

MITSUBISHI ELECTRIC  

0.75 kW 4 POLE TYPE SF-PR

FRAME	80M	RATING	S1	AMB TEMP	40°C	INDOOR USE	TYPE
Hz		50	60	60	60		
V		200	200	220	230		
A		3.6	3.3	3.2	3.2		
min <sup>-1</sup>		1420	1710	1730	1735		
RATED EFF.		83.8%	86.0%	86.6%	86.6%		
EFF. CLASS		IE3	IE3	IE3	IE3		
P.F.		0.72	0.78	0.72	0.68		
MAX. OUTPUT		246%	228%	274%	298%		
JIS C 4213		JEC-2137-2000		IP44	IC411		
NOM. EFF.	85.5% (60Hz 230V)			TH. CLASS	120(E)		
	CC012A	S8754PRO1		BEARING	6204ZZ 6204ZZ		
SERIAL	1506	DATE		MASS	13kg		
MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION MADE IN THAILAND				BD26736-21	BD23922-01		



THREE PHASE INDUCTION MOTOR

MITSUBISHI ELECTRIC 

5.5 kW 4 POLE TYPE SF-PR

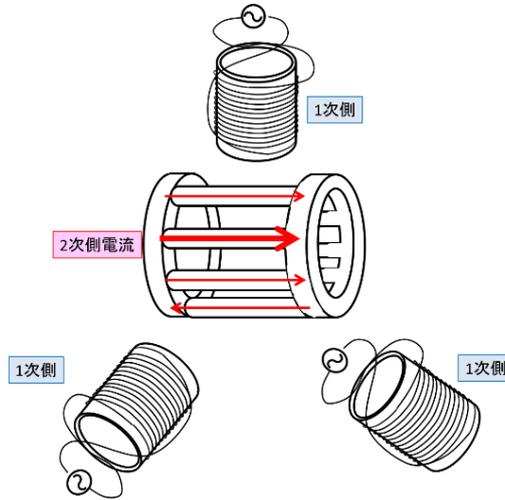
FRAME	132S	RATING	S1	AMB TEMP	40 °C	INDOOR USE	TYPE
Hz		50	60	60	60		
V		200	200	220	230		
A		22.6	20.8	20	19.8		
min <sup>-1</sup>		1465	1760	1765	1770		
RATED EFF.		91.2%	92.1%	92.4%	92.4%		
EFF. CLASS.		IE3	IE3	IE3	IE3		
P.F.		0.77	0.83	0.79	0.75		
MAX. OUTPUT		290%	261%	313%	341%		
JIS C 4213 / JEC-2137-2000				IP44	IC411		
NOM. EFF.	91.7% (60Hz 230V)			TH. CLASS	130 (B)		
	CC012A	S9554PRO1		BEARING	6308ZZ 6207ZZ		
SERIAL	1AXHS05A	DATE		MASS	56 kg		
MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION MADE IN JAPAN				M8000000-04	994203-02		

誘導電動機の種類

### 3.5 等価回路の導出とイメージ

誘導電動機を制御するうえで、ベクトル制御などの高級な制御をする場合には、等価回路の回路定数を検討する必要がある。そこで、誘導電動機の等価回路をみていこう。

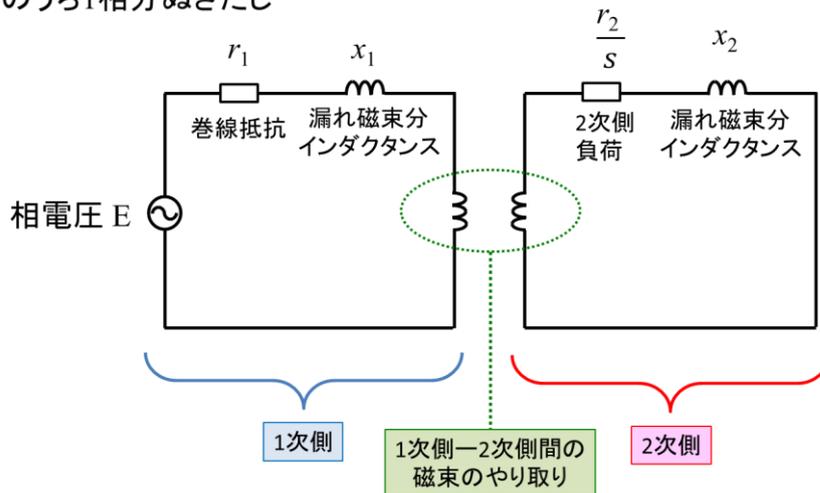
まずは、先にも説明した回転磁界とかご型の回転子から出発する。以下にその図を示す。



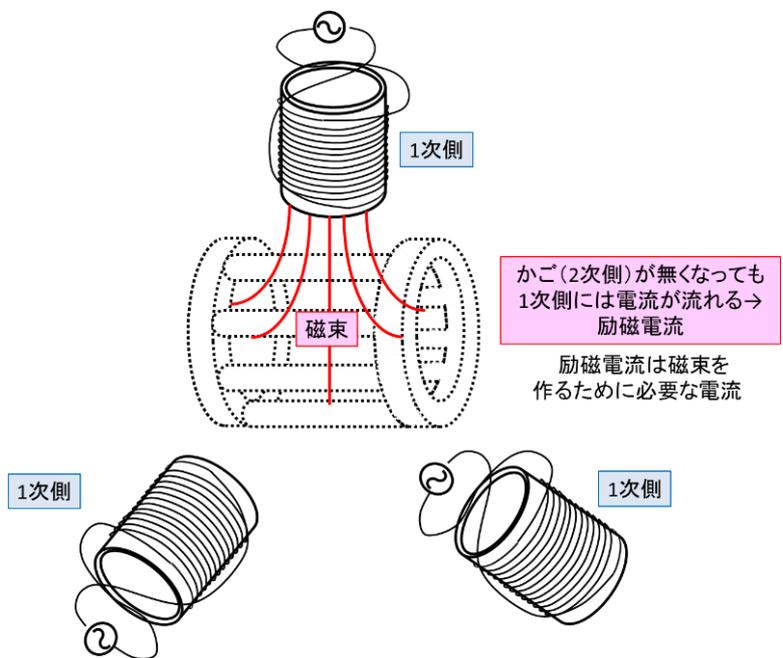
この回路は三相回路なので、そのうち1相分を抜き出して考える。電動機は平衡負荷なので、1相のみ考えれば他の2相も同じになるためである。

これらを回路図としてあらわすと、以下の図のようになる。回転磁界を発生させるために、コイルを使っているが、コイルには巻き線抵抗とコイルと回転子の隙間から漏れてしまう磁束分のインダクタンスがある。また、2次側（回転子側）も同様に、かごの部分の持つ抵抗と漏れインダクタンスがある。2次側の抵抗が  $r_2/s$  となっているのは、すべりによって2次側に流れる電流が変わるためである。もしすべりが0（同期速度で回転）であれば、負荷がないために電流は流れない。つまり、抵抗が無限大になっている。すべりが1（回転子が停止）の場合は、大きな電流が流れる。これを表現するために、 $r_2/s$  としている。

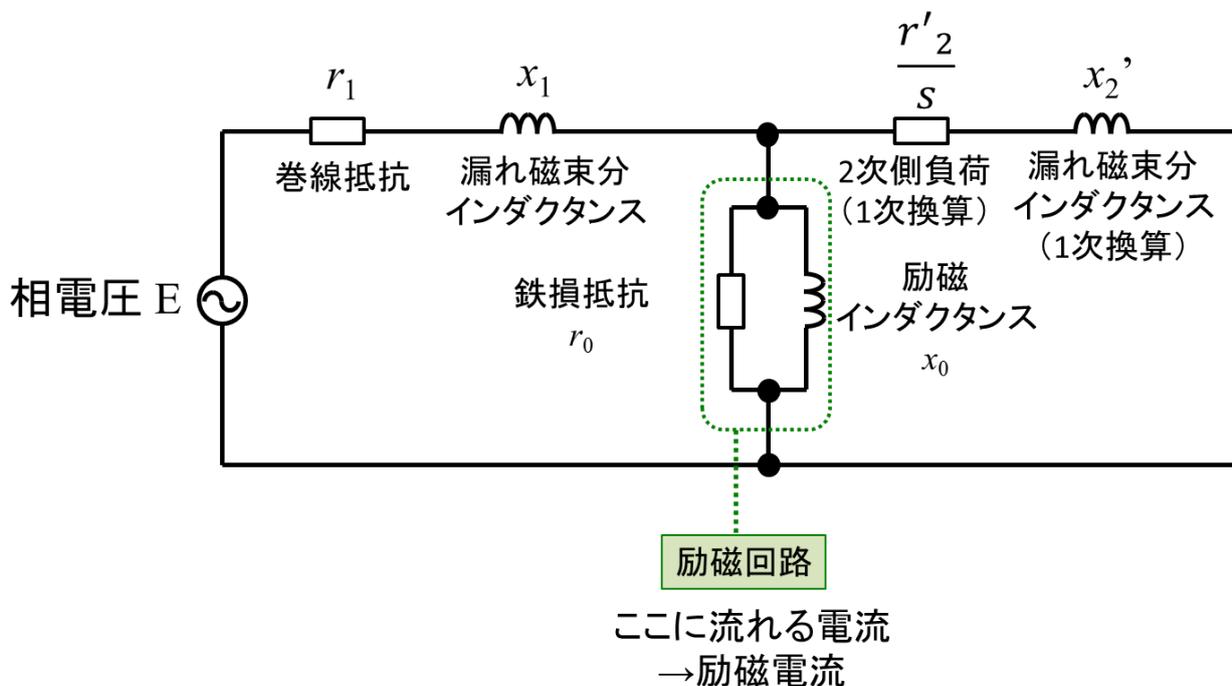
#### 三相のうち1相分ぬきだし



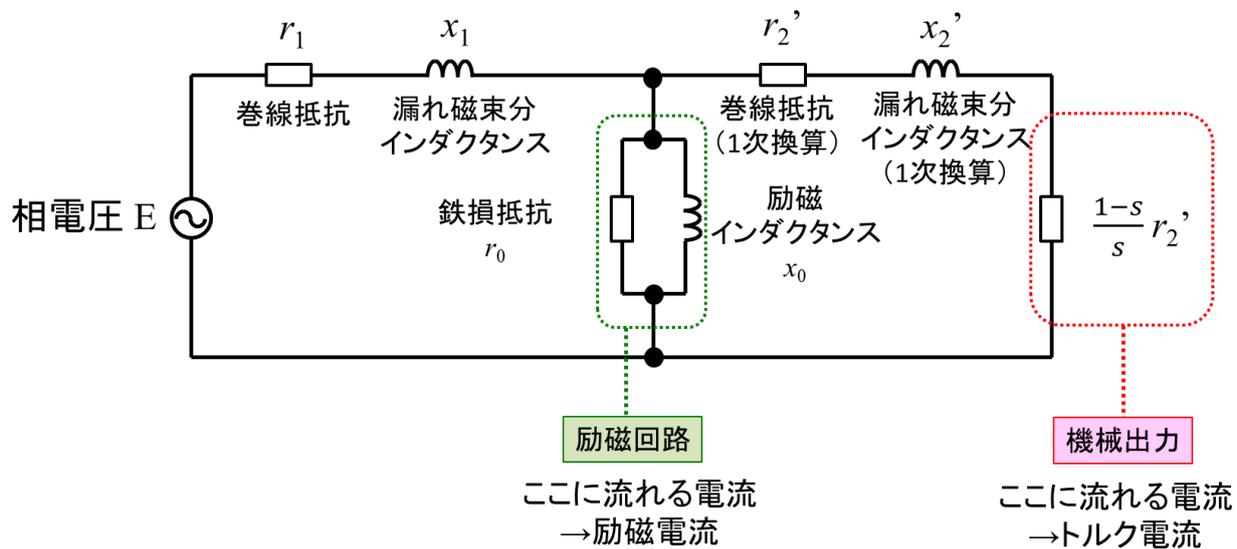
つぎに、回転磁界を作る部分について考える。2次側のかごがないときに、1次側に電流を流すと、回転磁界を作るための電流が流れる。これを『励磁電流』という。励磁電流はベースの磁束を作るために必要な電流である。一方、2次側にかごがある場合、1次側には励磁電流に加えて2次側にエネルギーを供給するための電流も流れるため、1次側の電流は大きくなる。



等価回路に励磁電流を含めると、次のように書ける。



ここで2次側の抵抗に注目してみる。先の等価回路では、2次側の抵抗は  $r_2/s$  であった。しかし実際には、2次側の巻き線抵抗と、回転軸が回転するためのエネルギー分の2つに分離することができる。2次側の巻き線抵抗を  $r_2$  と置くと、機械出力は  $(1-s)/s \cdot r_2$  となる。この等価回路を『精密等価回路』という。



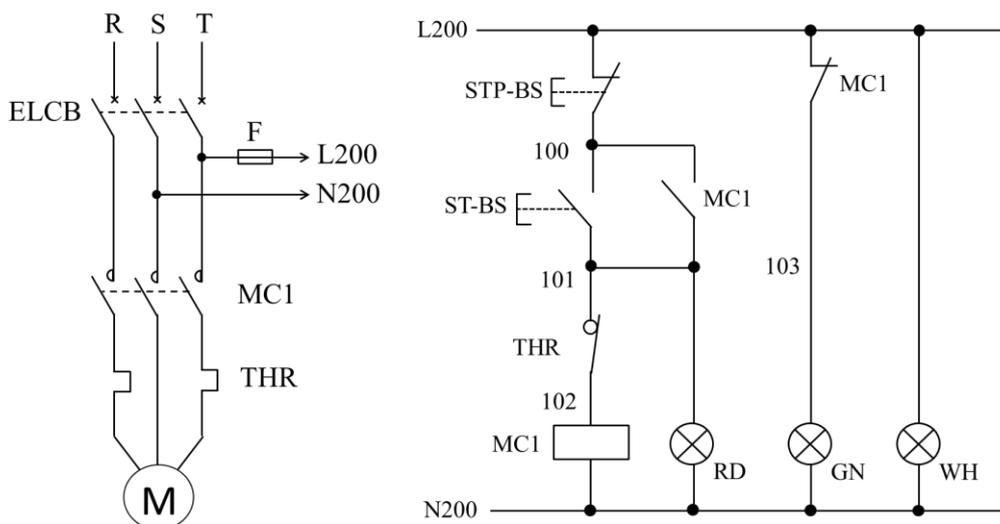
### 3.6 電動機始動法・速度制御の方法

電動機の始動時には定格電流の5～8倍の電流が流れるため、始動電流を抑えるための工夫がなされている場合がある。また、電動機を自由に制御できるように制御機器が設けられている場合がある。ここでは、始動法、速度制御法をみていく。以下の表にその一覧を示す。

直入れ始動法	定格電圧を直接加える方法。始動電流は定格電流の5～8倍。容量が小さい電動機で用いる。
Y-Δ始動法	始動時には電動機の固定子をY結線にし、加速したらΔ結線に切り替える。Y結線では、相電圧が $1/\sqrt{3}$ 倍、始動電流は $1/3$ になる。
2次抵抗制御法	回転子巻線(2次側巻線)に直列に2次抵抗を挿入して、すべりを大きくして速度を制御する。抵抗が大きいほどすべりが大きく、損失も大きくなる。
極数を変化	極数を切り替えることで、速度を変える。
電源電圧を変化	電源電圧を変化させることで、速度を変える。
V/f制御	インバータにより電源周波数を変化させることで速度を制御する。磁気飽和を防ぐため、電圧と周波数の比が一定になるようにする。
ベクトル制御	回転数・電流をフィードバック制御する。座標変換を使うことで直流機のような、滑らかな制御ができる。

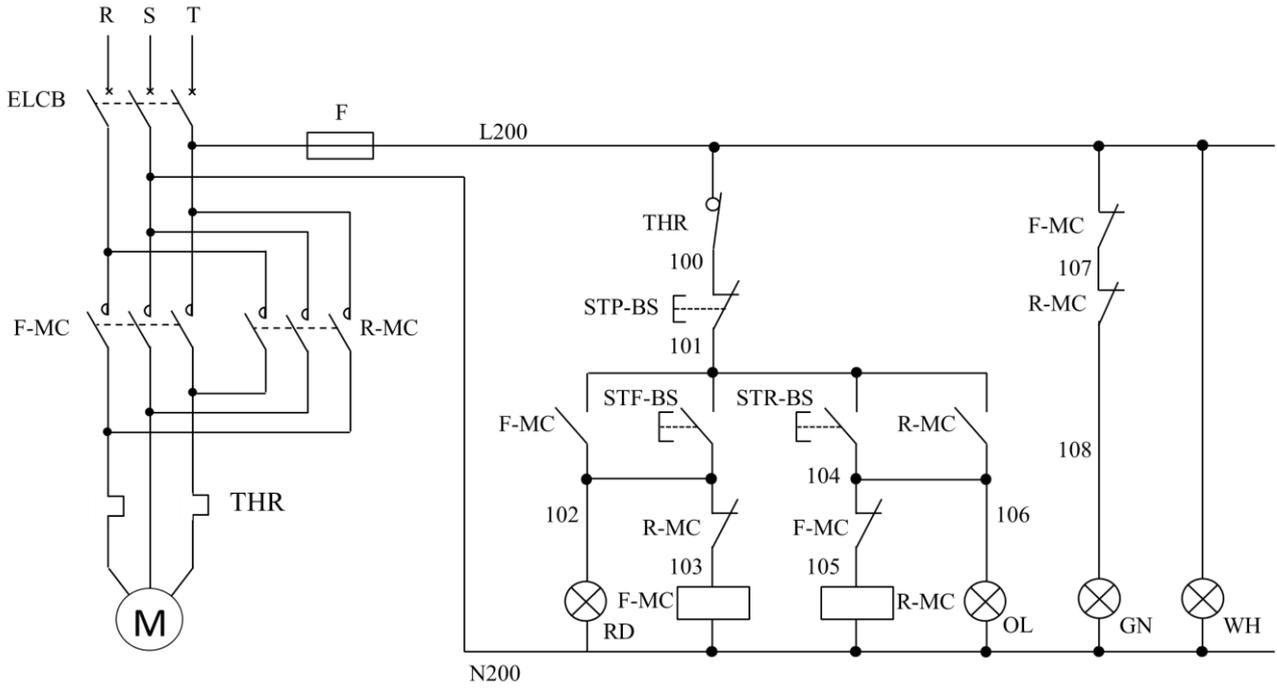
#### ①<sup>じかい</sup>直入れ始動法

始動時に特別な工夫をすることなく、いきなり定格電圧を加える方法。大きな始動電流が流れるため、配線用遮断器や電線には余裕を持った設計が必要となる。基本的には、小容量(5.5 kW未満)の電動機に用いられる。



直入れ始動回路の例

正逆転回路も直入れ始動法の一つである。

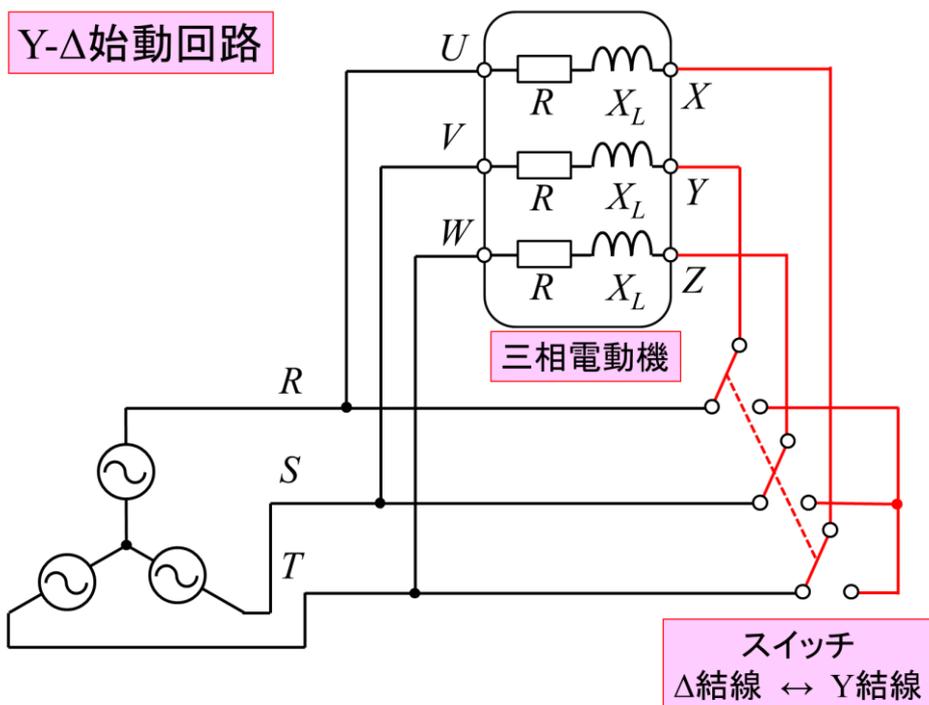
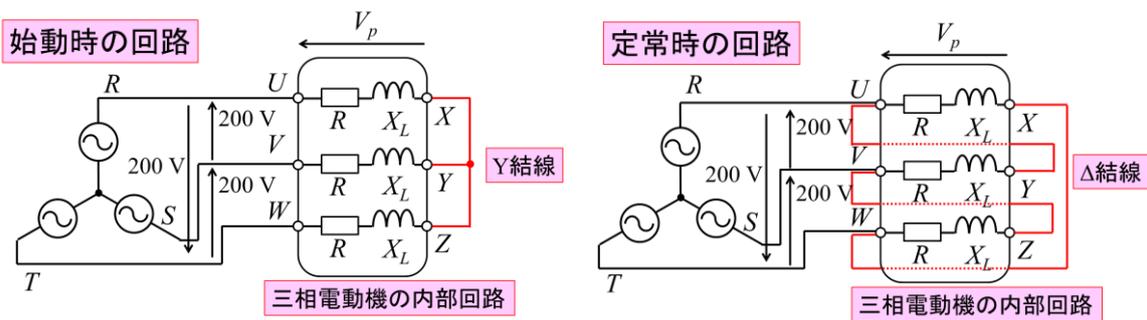


正逆転回路の例

② <sup>スター</sup> Y — <sup>デルタ</sup> Δ 始動法

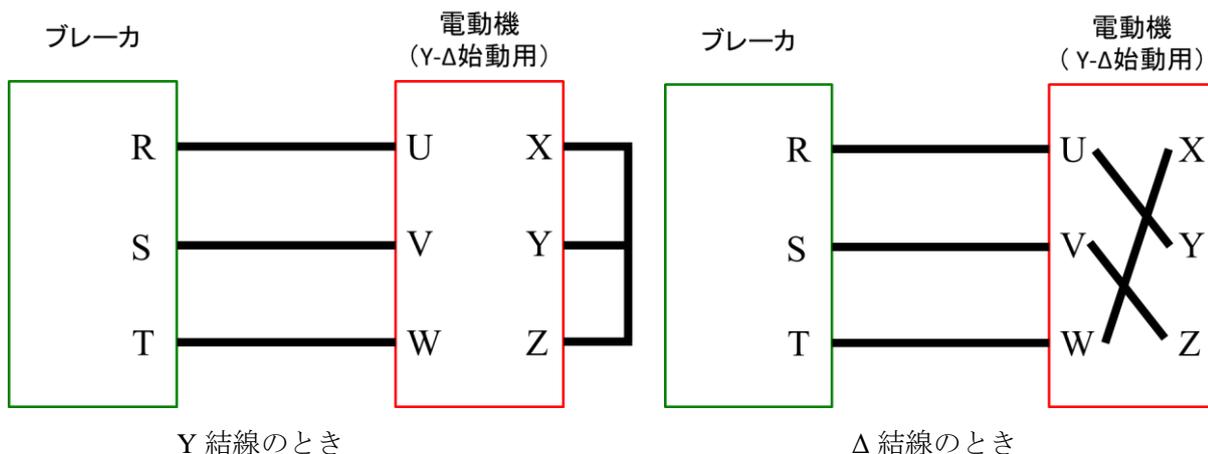
主に、大容量（5.5 kW 以上）で旧式の設備で広く採用される方式である。始動時に回転磁界を作るコイルの結線を、始動時は Y 結線、十分に始動したのちにデルタ結線に移行する方式である。Y 結線は線間電圧の  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  倍となるため、始動電流は直入れ始動のときの  $\frac{1}{3}$  に抑えられる。

Y-Δ 始動が採用される電動機は、大容量のものであって、5.5 kW 以上の電動機は、Y-Δ 始動法によることが前提となっている。Y-Δ 始動法を採用するには、Y-Δ 始動専用の電動機を用いる必要がある。Y-Δ 始動専用の電動機は、小容量の電動機と違い、R-S-T および X-Y-Z の 6 端子が設けられている（小容量機は R-S-T の 3 端子のみ）。

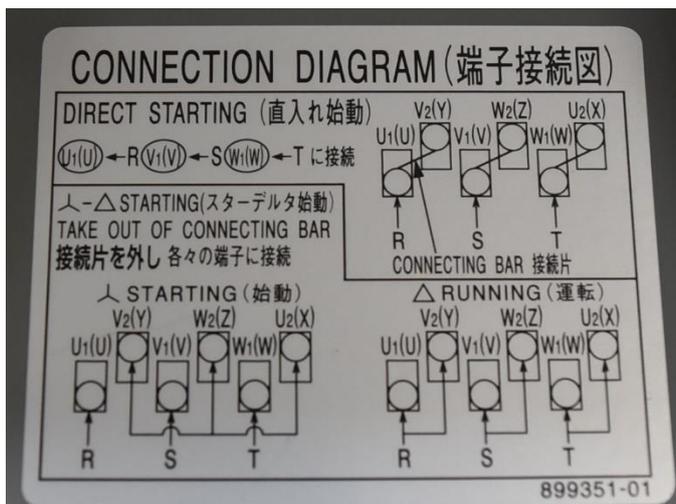




Y-Δ 始動に用いられる電動機は、直入れ始動の電動機と違い、R-S-T および X-Y-Z の 6 端子が設けられている。



かご型誘導電動機のうち 5.5 kW 以上の電動機は、Y-Δ 始動で用いることを前提に、端子が 6 つあるものがほとんどであるが、インバータで駆動する場合には X-Y-Z の端子は通常用いない。そこで、インバータで 5.5 kW 以上の電動機を駆動する場合、上図、デルタ結線のように接続しておけばよい。

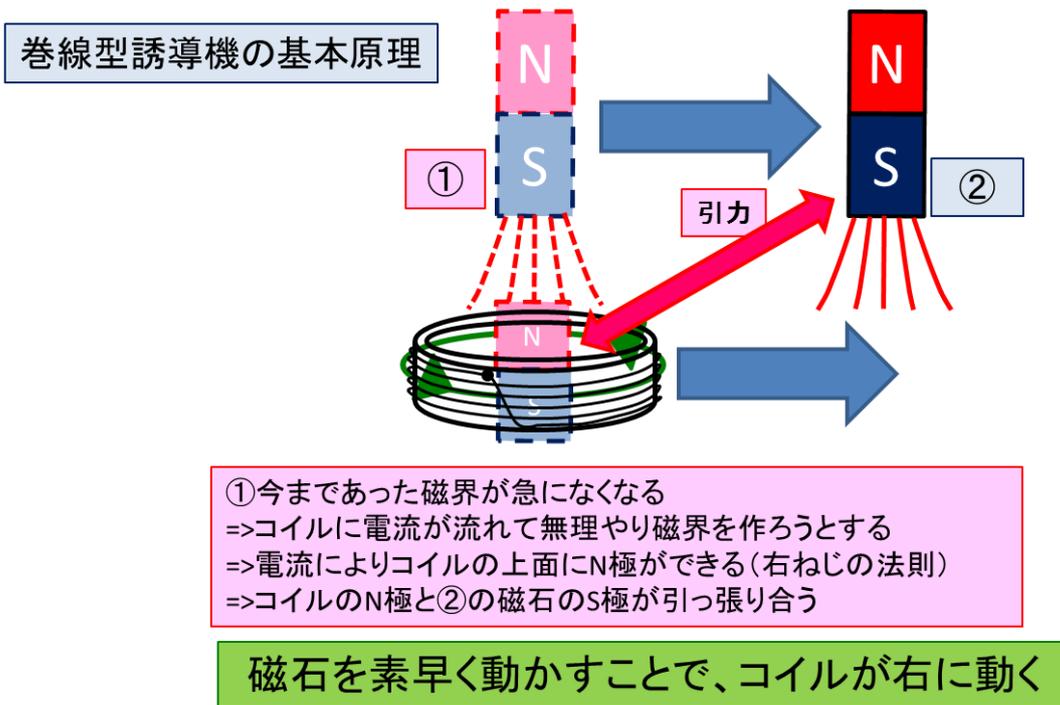
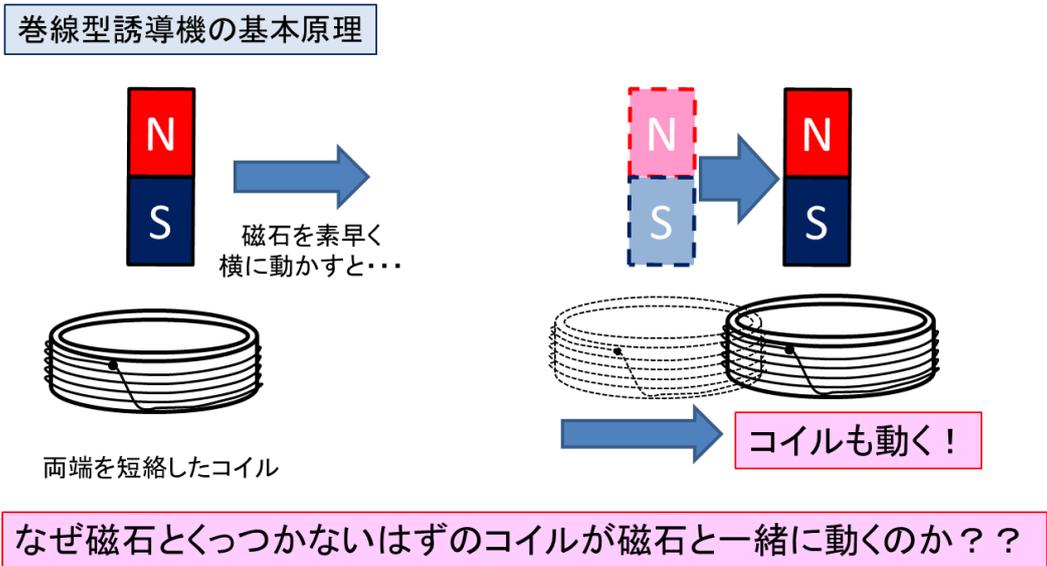


5.5 kW かご型誘導電動機の端子台の例

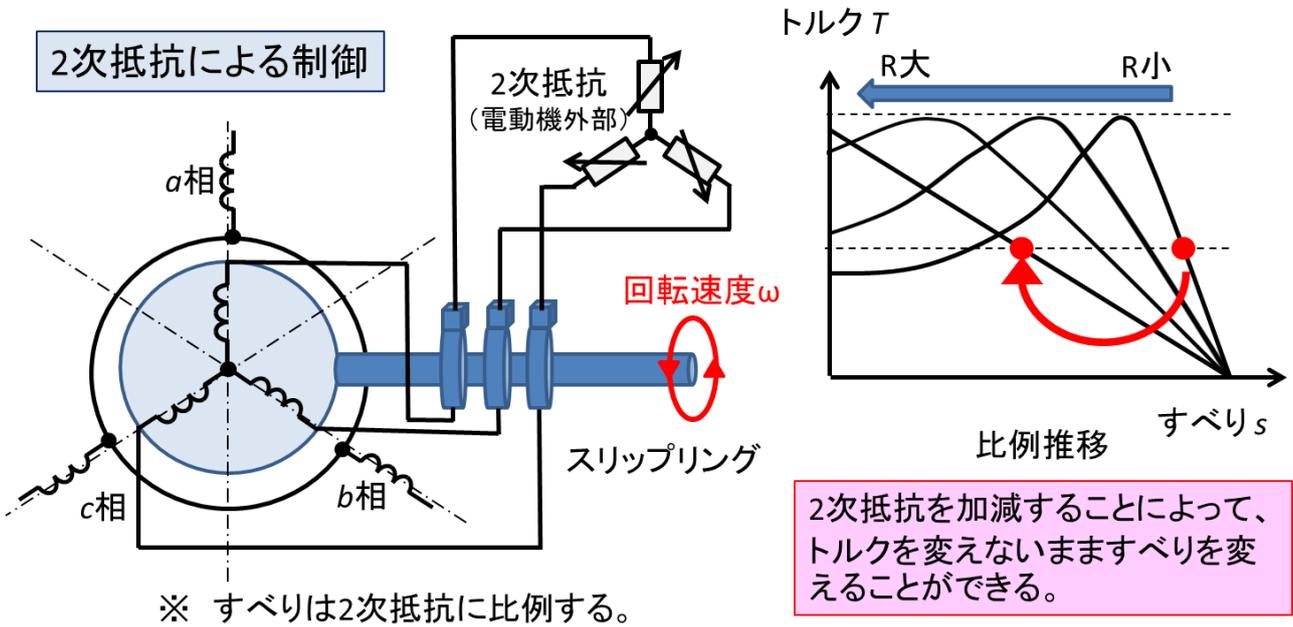
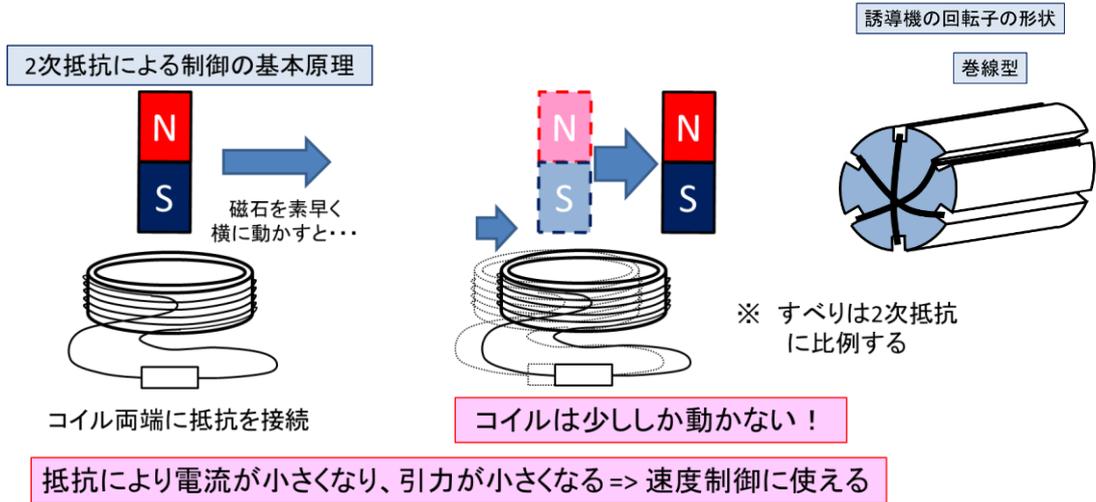
### ③2 次抵抗始動法

2次抵抗始動法は、自由に回転数を可変速できる制御方法である。この方法は、かご型誘導電動機では採用できず、専用の巻き線型誘導電動機を使わなければならない。

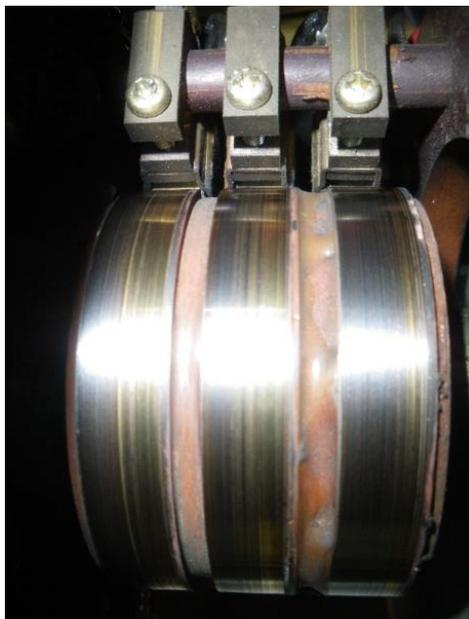
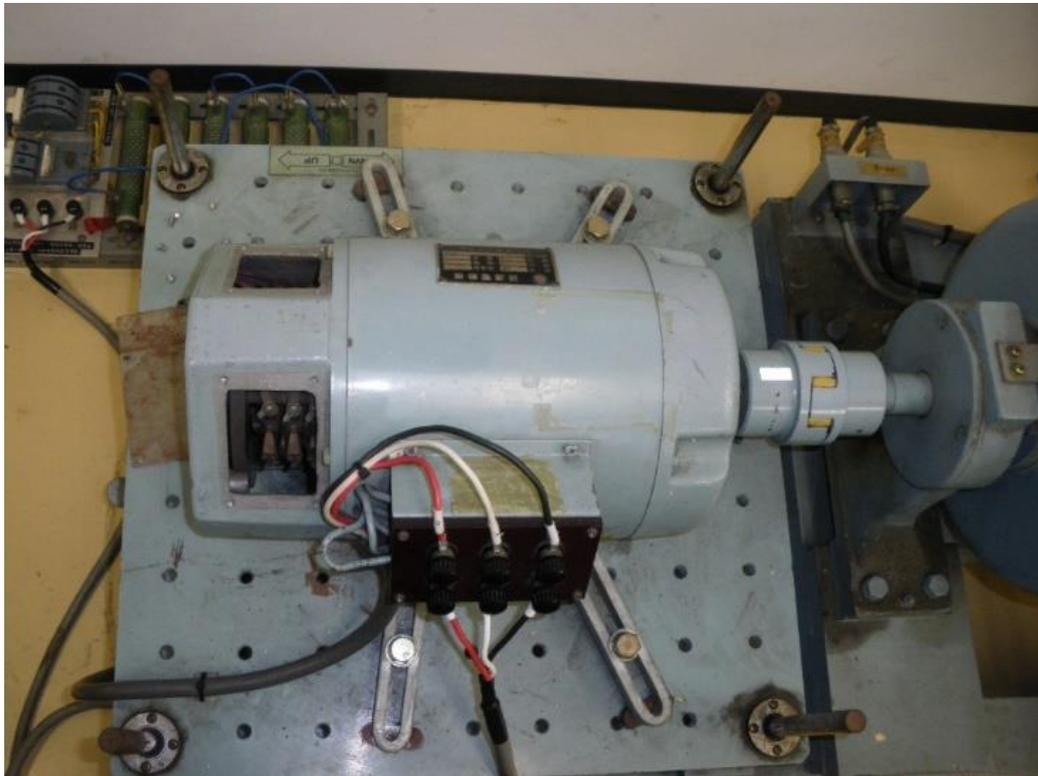
巻き線型誘導電動機は、回転子の部分にもコイルを用いている電動機である。下の図は、その仕組みを説明したものである。端子を短絡したコイルを用意し、その上で磁石を素早く移動させると、それについてコイルも移動することが知られている。これが巻き線型誘導電動機の基本原則である。後はかご型誘導電動機と同様に、回転磁界中に接地をすれば、コイルも回転するようになる。



ここで、コイルの両端に抵抗を接続し、コイル中にあまり電流が流れないようにした場合を考える。抵抗を大きくすればするほど、コイルに流れる電流は小さくなるので、磁石を素早く動かしたとき発生する引力は小さくなる。したがって、抵抗を大きくすればするほどコイルの動きは小さくなる。これが2次抵抗によって速度を制御できる仕組みである。巻き線型誘導電動機では、2次側に抵抗を設け、抵抗の値によって速度を制御させる。抵抗値を2倍にするとすべりも2倍になるというようにすべりは抵抗値に比例するという関係がある。

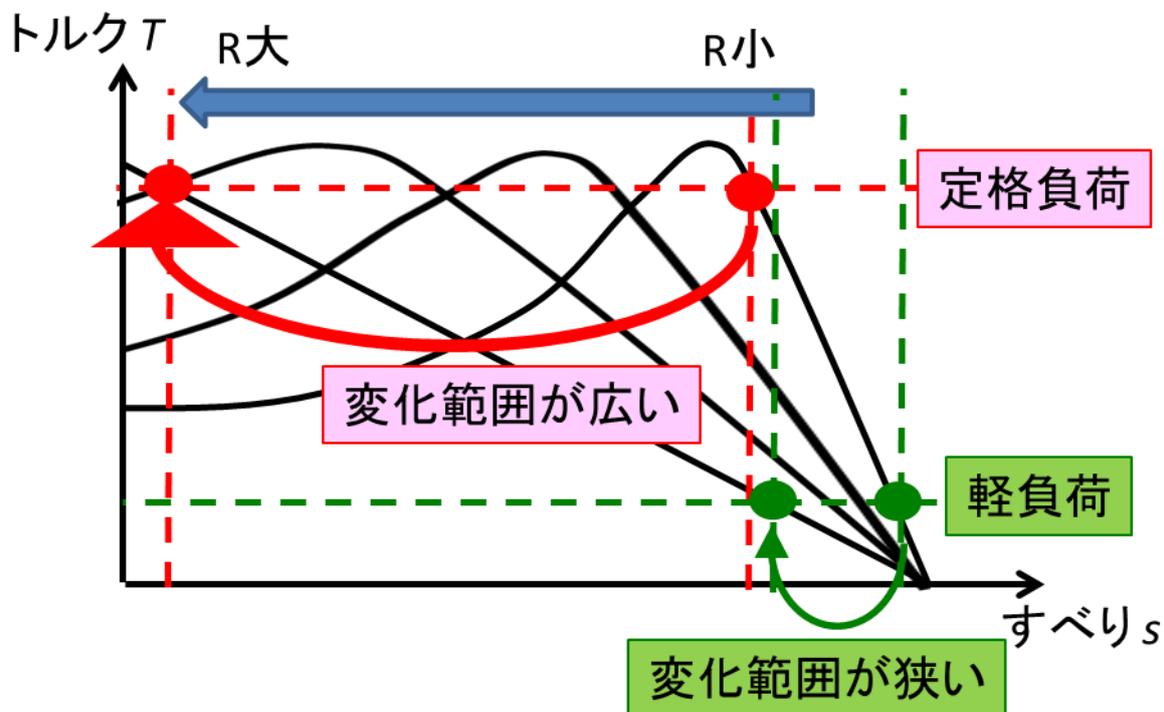


巻き線型誘導電動機は、Y-Δ 始動用のかご型誘導電動機と同様に、端子が6つあるが、構造が全く違うため注意が必要である。Y-Δ 始動用の電動機の場合は端子名が『U-V-W X-Y-Z』であった。巻き線型誘導電動機では端子名は『U-V-W u-v-w』となっており、見分けることが可能である。



UVW-uvwなら2次抵抗始動  
UVW-XYZならY-Δ始動

巻き線型誘導電動機の2次抵抗による速度制御は、低速から高速までダイナミックに制御できるため優れた制御方法であるといえる。一方で、欠点もある。この方式では2次抵抗に電流を流すことになるため、すべりが大きいほど電力損失が大きくなる。つまり、効率が悪くなる。また、下の図のように、負荷の大きさによって速度の変化の幅が変わってくるという問題もある。



### ○ 定格負荷時と軽負荷時の違い

定格負荷: 変化範囲が広い

軽負荷時: 変化範囲が狭い

無負荷時 ( $s=0$ ): 制御できない

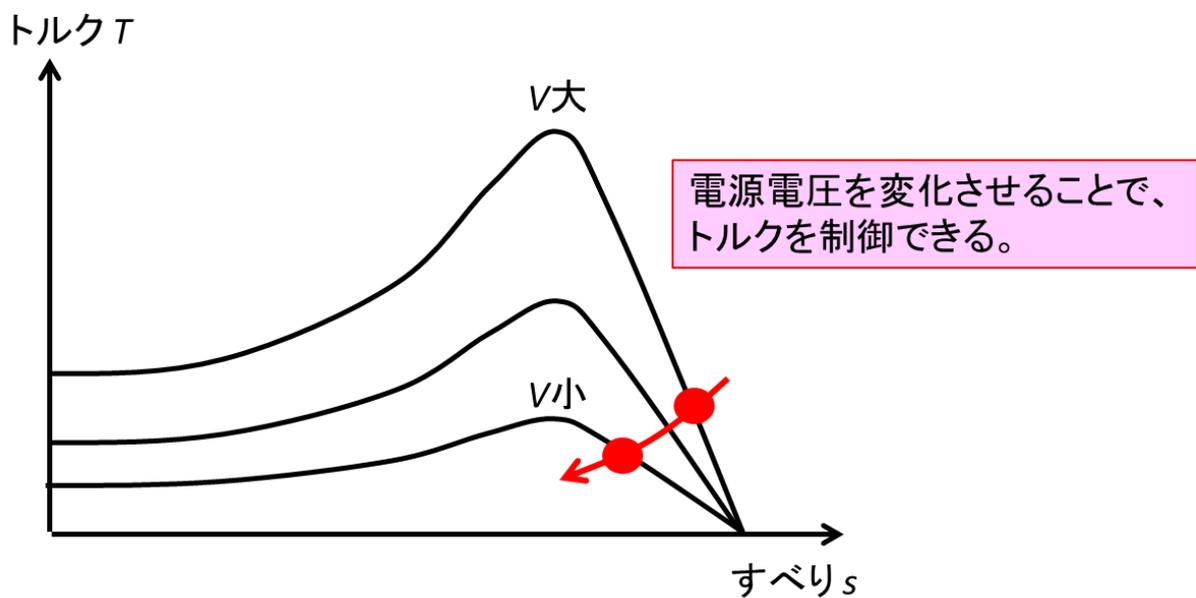
#### ④ 1次電圧による速度制御

誘導電動機の回転速度は、回転速度  $N$  は、**電源周波数  $f$** 、**極数  $p$** 、**すべり  $s$**  の3つで決まり、次式により計算できた。

$$N = \frac{120f}{p} (1 - s) \text{ [rpm]}$$

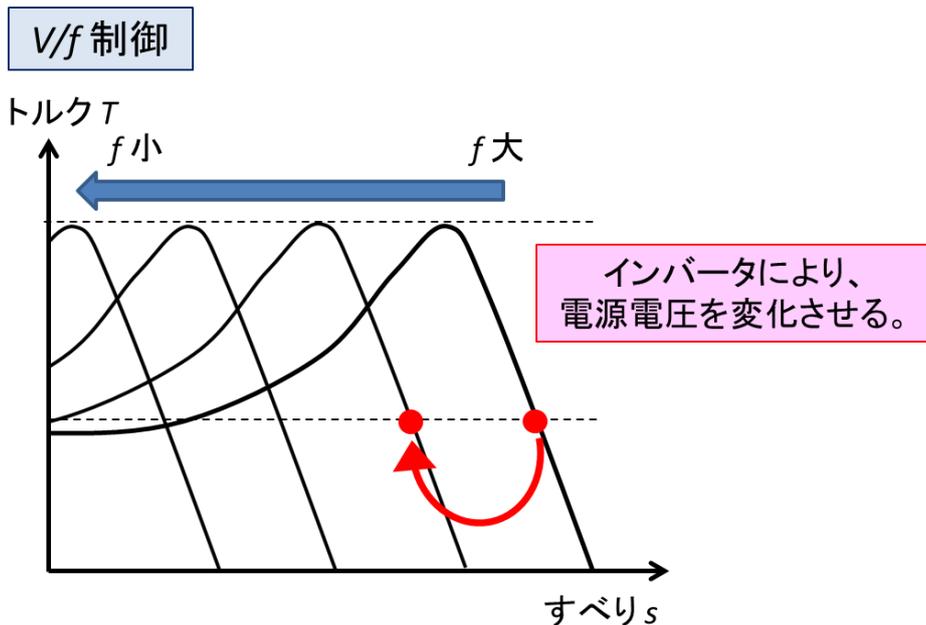
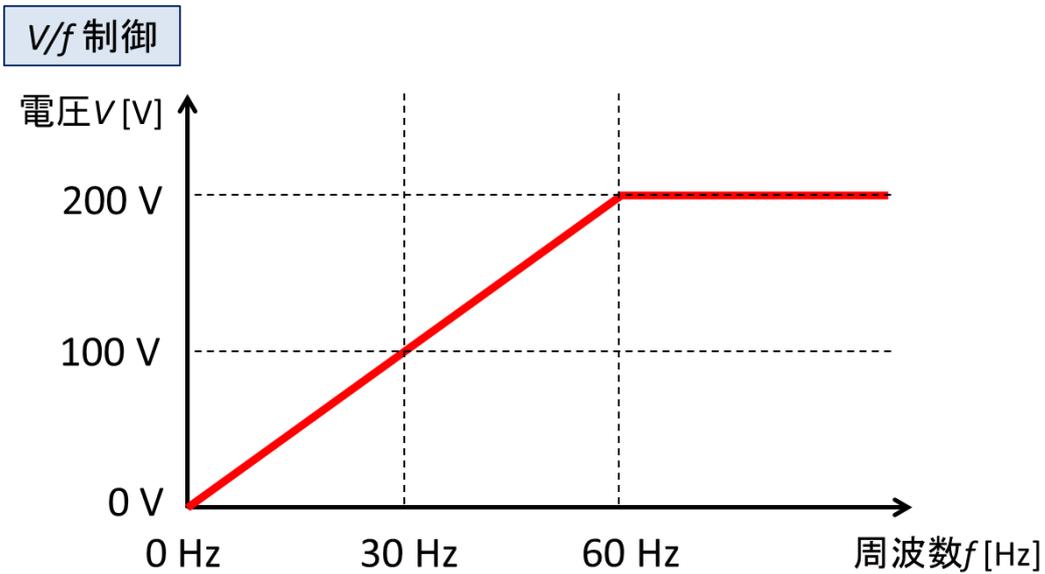
この式には電動機に与える電圧がないので、電圧を変えても回転速度は変わらないように思えるが、実際には、電圧を変えるとすべりが変わるので、電圧によって速度制御をすることが可能である。

#### 電源電圧による制御



⑤ V/f制御（ブイエフ制御、又はブイパーエフ制御）

V/f制御は、インバータの使用を前提とした制御方法で、電圧と周波数の比を一定のまま始動する方法である。例えば、60 Hz のときに 200 V の電圧を印加するとすれば、30 Hz のときに 100 V の電圧が印加されるようにする。始動時には、以下の図のように周波数と電圧を加えるようにする。インバータが必要となるが、通常のかご型誘導電動機で採用できる。始動電流が抑えられ、回転数も自由に決められて、負荷によっては大きな省エネ効果が得られることから、近年普及しつつある。この講座では、本方式をメインに扱うので、詳細は後述する。



## ⑥ ベクトル制御

ベクトル制御は、V/f制御よりも高級な制御方式である。インバータが製品化される前でベクトル制御が広く採用されるようになる前までは、鉄道やクレーンなどの細かい速度制御が使用される設備には直流電動機が用いられてきた。それは、直流機はトルクと電流が比例し、速度制御を極めて簡単に行うことができたためである。その一方で、直流機の速度制御は電力損失が極めて大きく、効率の向上が課題とされていた。この問題を克服したのがベクトル制御である。ベクトル制御は、誘導電動機を使って、**まるで直流電動機を制御しているかのように**細かい速度制御を行うことができる方法である。数学的に難解であるためここでは詳細を述べないが、簡単に言うと電動機に流れる電流を励磁回路に流れる電流とトルクを生み出す電流に計算上で分離し、トルクを生み出す電流をどのくらい流すかによって電動機を制御する。ベクトル制御を行うためには、インバータ（高度な計算機を含む）が必須で、事前に電動機の等価回路のそれぞれの定数が分かっている必要がある。最近のインバータでは、オートチューニング機能といい、回路定数を自動計測する機能を持つものもある。

### 3.7 電動機の停止と制動

電動機を停止させる方法についても様々なものが検討されてきた。かつては制動（ブレーキ）動作は機械的な機構を用いるものが多かったが、機械の保守や省エネルギーの観点から電氣的な制動も注目されている。この節では、①フリーラン、②直流制動、③逆相制動、④回生ブレーキについてみていく。

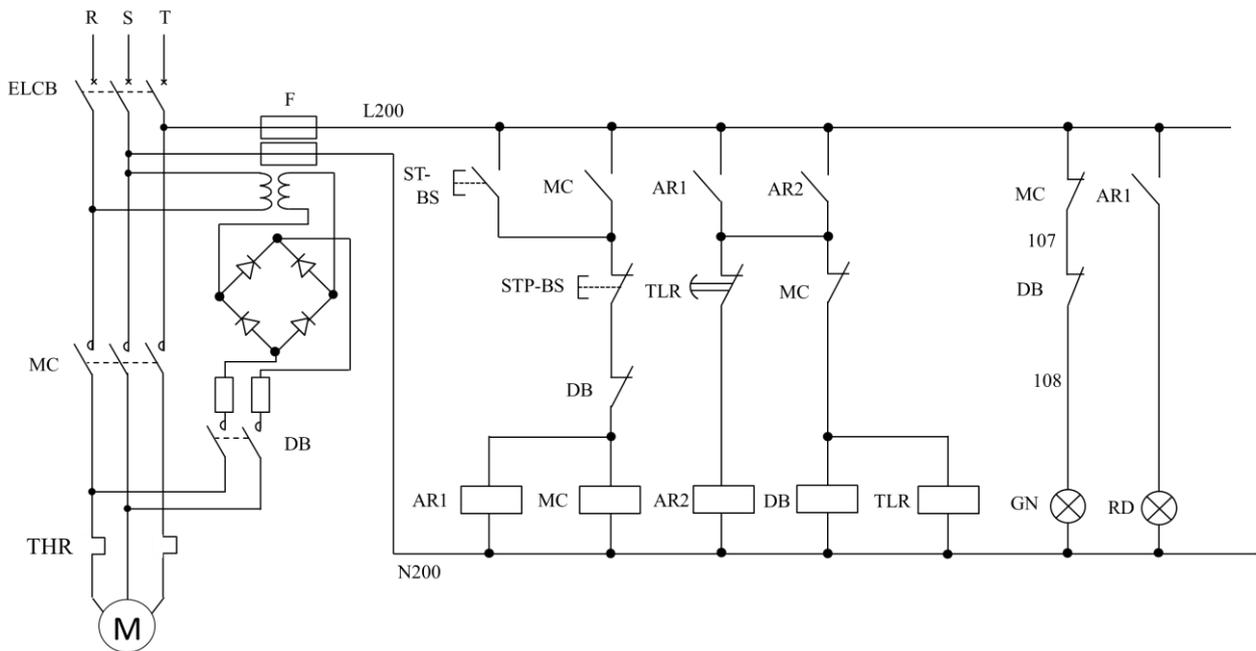
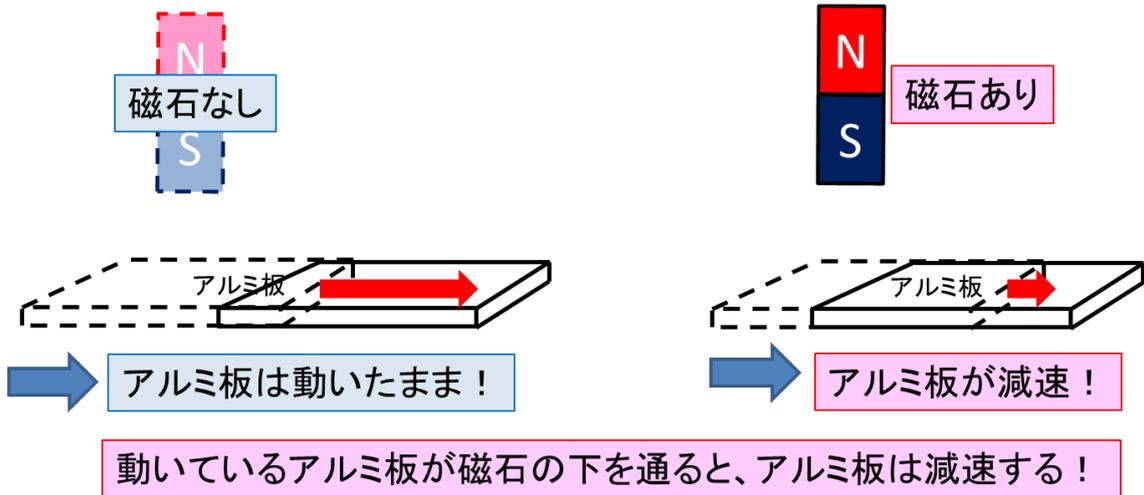
#### ① フリーラン

制動についての制御動作を持たず、電動機の電源を OFF にした後、自然に停止するのを待つような方式で、この動作を『フリーラン』という。電源を OFF した瞬間は回転軸が回転をしているので、慣性モーメントと回転数に応じた運動エネルギーを持つことになるが、負荷によるエネルギー消費・機械的な摩擦・空気抵抗等で徐々に消費され、ゆっくりと減速していく。停止までに長い時間が必要となるが、ポンプや工作機械など、電動機の停止までの時間が問題にならないようなところでは用いられる。

② 直流制動

電動機に直流電流を流すことによりブレーキをかける方法である。その仕組みは、下の図のように、磁界が停止していると、導体もそれにつられてブレーキがかかるためである。

かご型誘導機の直流制動のしくみ

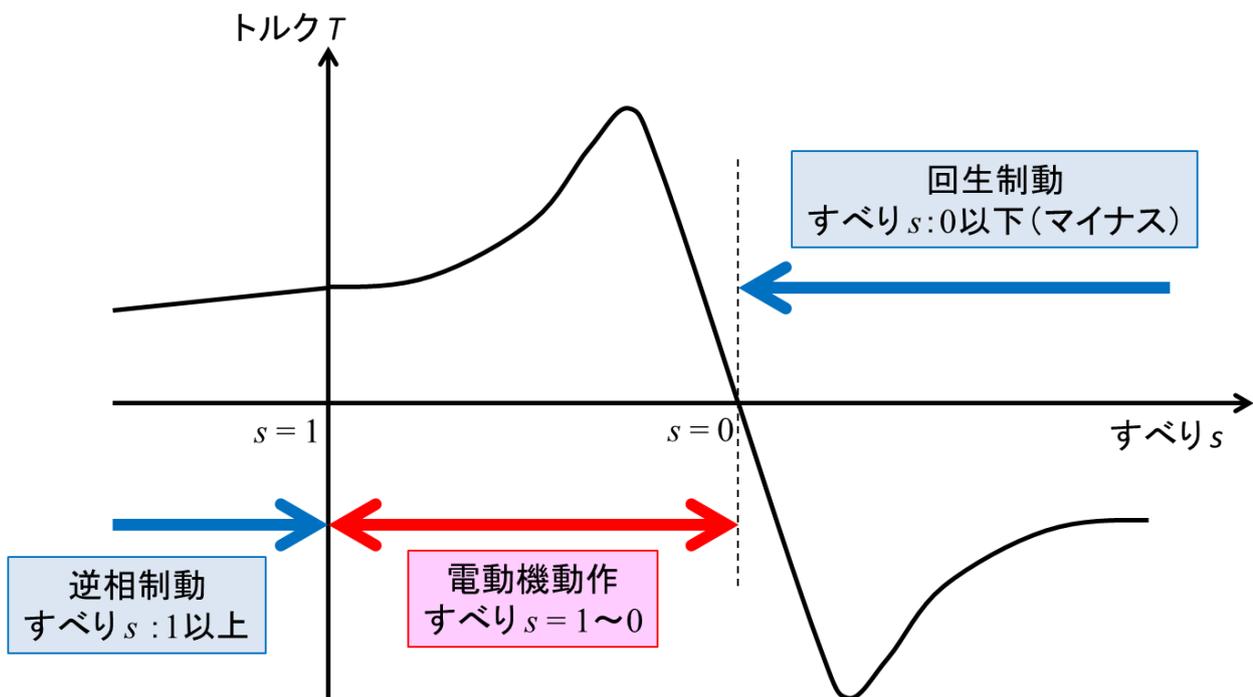


直流制動の回路例

### ③ 逆相制動

逆相制動とは、停止させようとするときに、回転磁界を逆回転させることでブレーキをかける方法である。回転磁界が逆回転すれば、回転子も逆回転のほうに力が加わるためにこれがブレーキとなる。負荷が持っていた機械的な運動エネルギーは、電動機二次側の巻き線抵抗によって熱エネルギーの形で消費され、全て損失となる。

誘導機のすべりとトルク

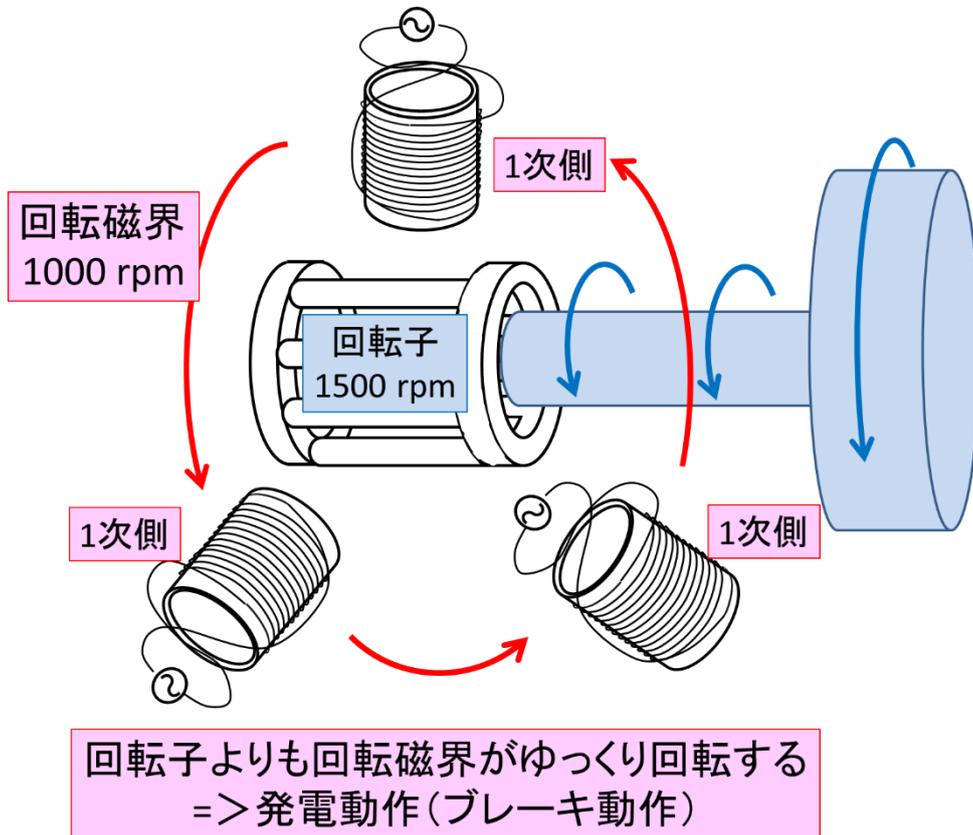


#### ④ 回生ブレーキ（回生制動）

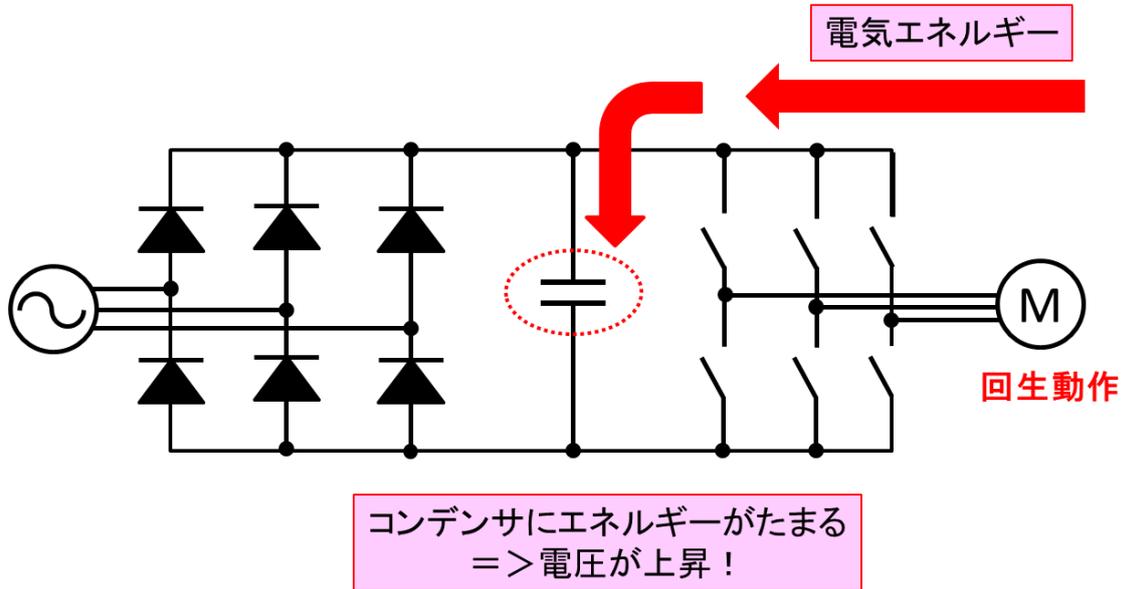
回生ブレーキとは、回転子の回転速度よりも回転磁界の回転速度を遅くすることで、電動機に発電動作をさせてブレーキをかける方法である。

回転子の回転速度よりも回転磁界の回転速度を遅いとき、すべりはマイナスになるが、このときに誘導電動機は発電機として動作することが知られている。発電動作をするとトルクがマイナスになるので、これをブレーキとして使うことができる。例えば、自転車に乗っているときに、前照灯を点灯させるとペダルが重くなるが、これをブレーキとして使おうというものである。自転車の場合は、前照灯の電球を大きくすればするほどペダルもそれに伴い重くなる。つまり、消費電力に伴ってブレーキの強さも変わるわけである。誘導期の場合は、回転磁界と回転子の速度差をどの程度にするかによって、ブレーキの強さを決められる。

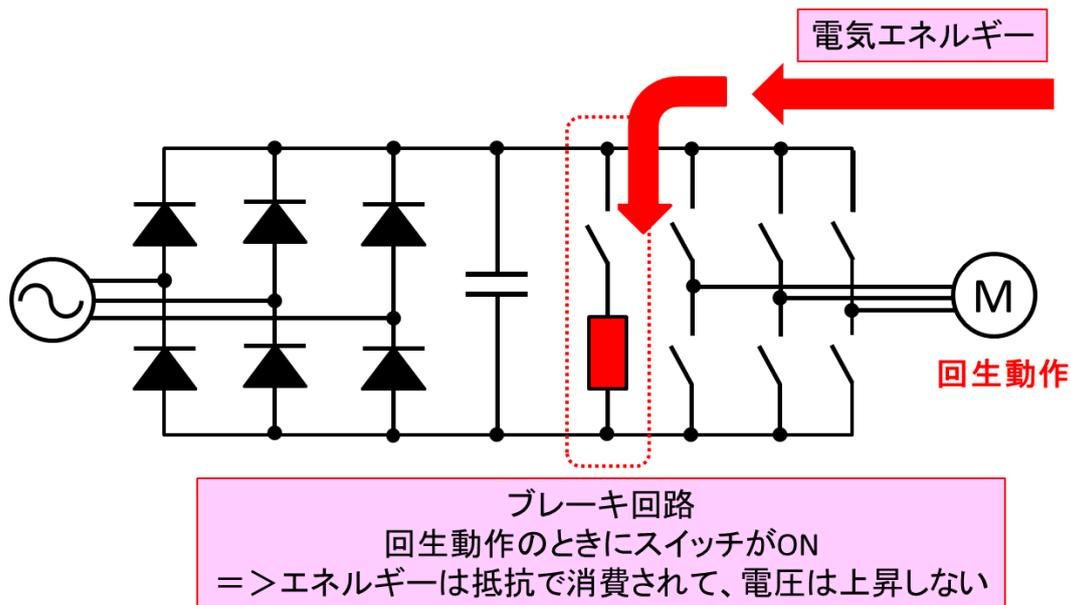
回生ブレーキは発電動作をするため、負荷等の運動エネルギーは誘導電動機によって電気エネルギーは電源に向かって逆流していく。そのため、電動機による電力損失は小さい。



インバータを使って電動機を制御しているとき、回生動作時に電源に向かって逆流した電力はどうなるのでしょうか。下の図にインバータと電動機を示す。図のように電動機から回生したエネルギーはインバータを逆流して直流になる。整流器の部分はダイオードに阻止されてそれ以上進むことができないから、コンデンサに蓄えられる。そのため、コンデンサの電圧が上昇する。コンデンサには使用上の最大電圧が決まっているので、このままでは電圧が上昇して危険である。



一般的なインバータには下図のようなブレーキ回路が備えられている。ブレーキ回路は回生動作のときにスイッチが ON し、回生してきた電力が抵抗により消費されるようにする回路である。回生のときにブレーキ回路が導通することで、直流部分の電圧の上昇を抑えられる。しかし、回生エネルギーを熱エネルギーとして捨ててしまうことになるので、全て損失となってしまう。



## 4. インバータを使った電動機制御

MCによる電動機制御は現在でも多く使用されているが、近年の顧客からの要求事項の高度化や環境意識の高まりにより、インバータによる電動機制御が普及してきている。本章では、インバータを用いた電動機制御についてみていく。

### 4.1 インバータ制御とは

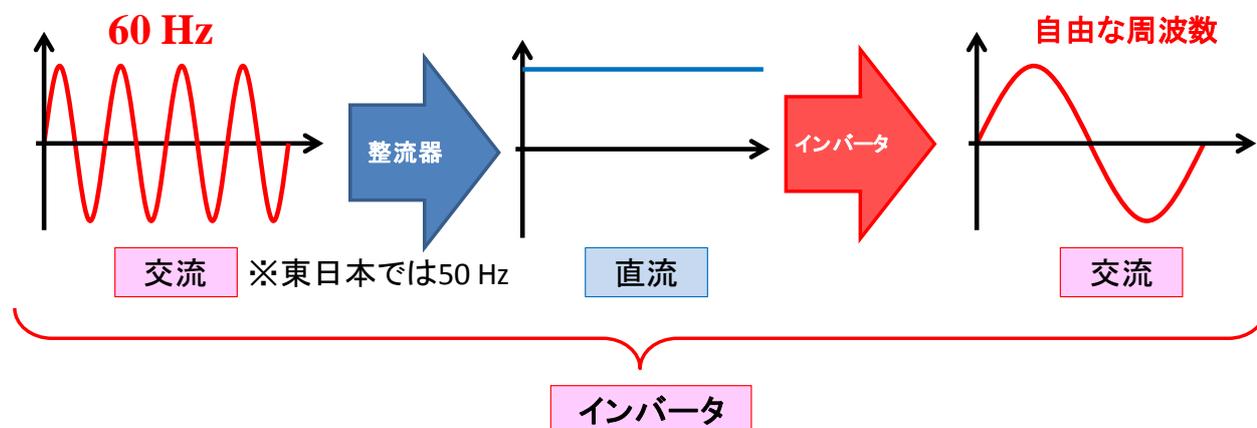
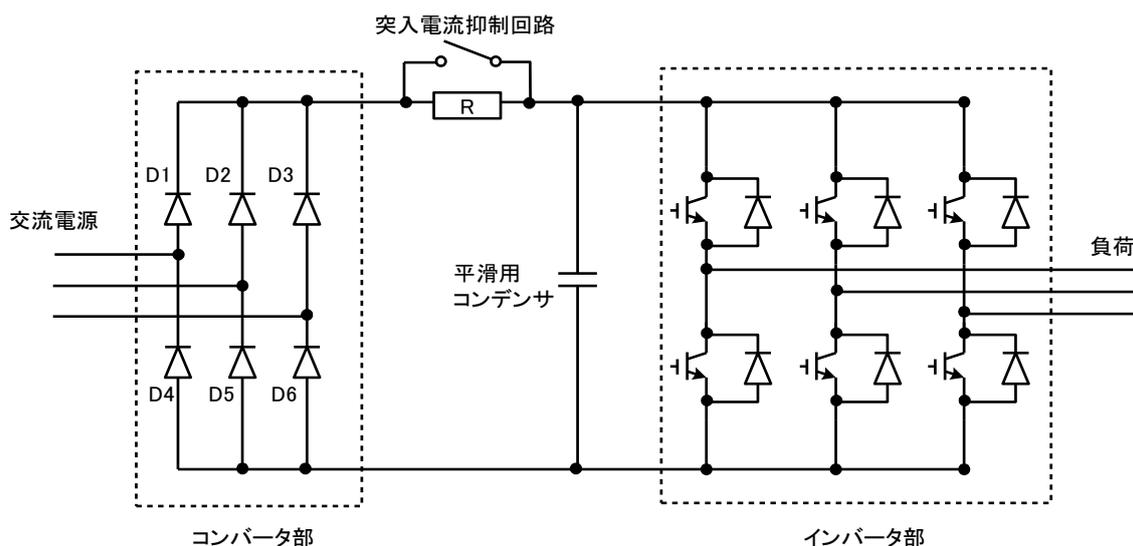
今までのようにMCを使った制御では、ON/OFFについては簡単に行うことができるが、可変速運転を行うことはできない。また、電動機の特性より、同じ働きをさせた場合でも回転速度と電圧の組み合わせしだいで、電動機の損失が大きく変わることが知られている。そこで、損失を低いままに保ちつつ、速度やトルクを自由に変えられる運転方法ができれば、最も良い制御方法であるといえる。この制御を実現するために使うのがインバータである。

インバータを用いた場合とMCを用いた場合の利点と欠点は次のとおりである。

	電磁接触器 (MC)	インバータ
利点	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 値段が安い</li><li>・ 制御が簡単</li><li>・ MC 自体はノイズに強い</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 可変速運転ができる</li><li>・ 低損失な運転ができる</li></ul>
欠点	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 可変速運転ができない</li><li>・ 速度が電源周波数に影響を受ける（西日本と東日本で速度が異なる）</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 装置が高価</li><li>・ ノイズの対策が必要</li><li>・ 装置の寿命が短い</li></ul>

## 4.2 インバータ制御の仕組み

インバータを使うことで、電動機を速度を自由に変えることができるが、それはモータに送る交流電圧の周波数を変えているためである。周波数を変えるために、インバータの内部では、以下のような回路を組んでいる。



電源の周波数は 60 Hz であるため、このままでは周波数を変えることはできない。そこで、はじめに整流器（コンバータ）によって、交流を直流にかえる。その後、インバータによって直流を交流にかえる。このインバータはコンピュータを使った制御を行うため、制御しだいで周波数を自由に変えることができる。

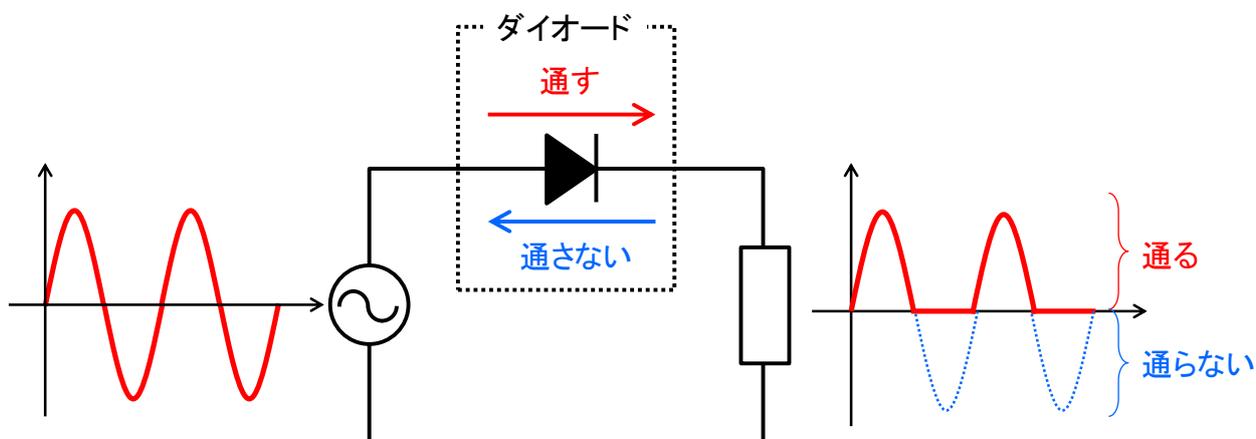
※インバータという言葉には 2 つの意味がある。狭い意味（狭義）では、直流を交流に変換する部分のみをさす。一方、広い意味（広義）では、交流を直流にして、さらに交流に変換するシステム全体（周辺回路や保護回路などの全てを含む）をさす。

### 4.3 整流器（コンバータ）

整流器は交流を直流に変換（整流）する回路である。以下の順に整流の仕組みを見ていく。

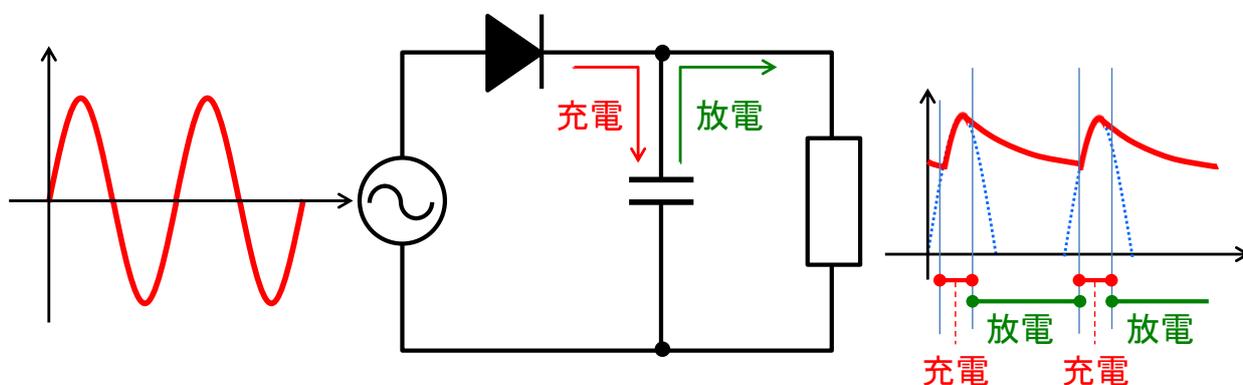
#### ①半波整流回路

半波整流回路は、最も簡単な整流回路である。この回路は、ダイオードという部品を使って構成する。ダイオードは、一方向にしか電流を流さないようにする部品である。電源と負荷の間にダイオードを置くことによって、電源電圧がプラスになったときはダイオードが ON し、電源電圧がマイナスになったときにはダイオードが OFF する。そのため、負荷にあらわれる電圧は一方向の電圧のみが現れる。



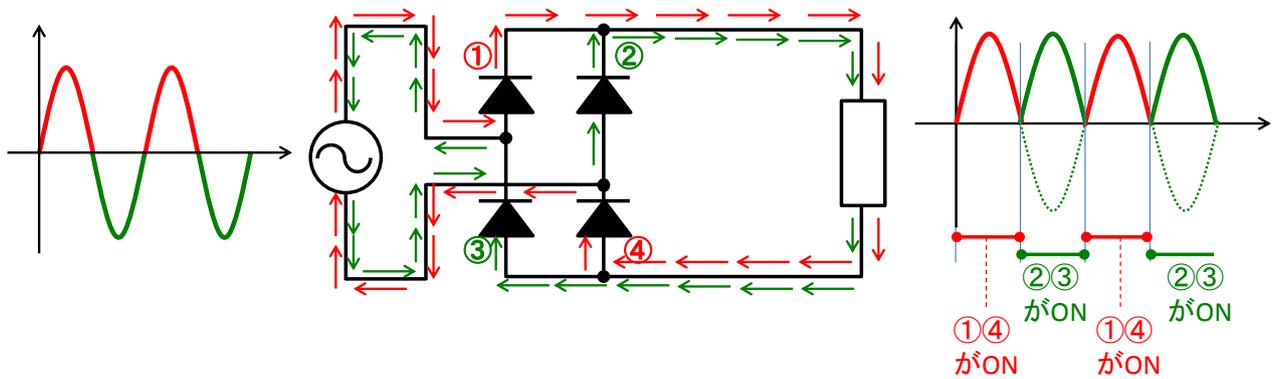
#### ②キャパシタインプット型半波整流回路

①の半波整流回路では、マイナスをカットすることはできるが、電圧の変動が大きいという欠点がある。そこで、ダイオードの後ろにコンデンサ（キャパシタ）を接続する。コンデンサは電気を蓄える/放出するという過程で、電圧を滑らかにする作用があるので、①の回路と比べて電圧変動が小さい直流を作り出すことができる。



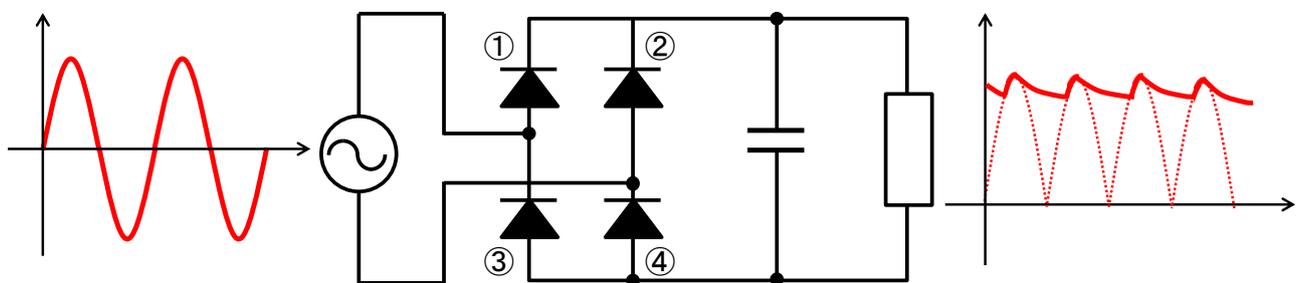
### ③全波整流回路

全波整流回路は、ダイオードを4つ使うことによって、半波整流回路ではカットしていた電圧を、うまくプラス側にまわしてやる回路である。半波整流と比べると電圧変動が小さくなる。



### ④キャパシタインプット型全波整流回路

全波整流にコンデンサを接続した回路で、出力電圧の変動はととても小さくなり、ほぼ一定の直流を作り出すことができる。インバータ装置に内蔵されている整流回路は、ほとんど本方式である。

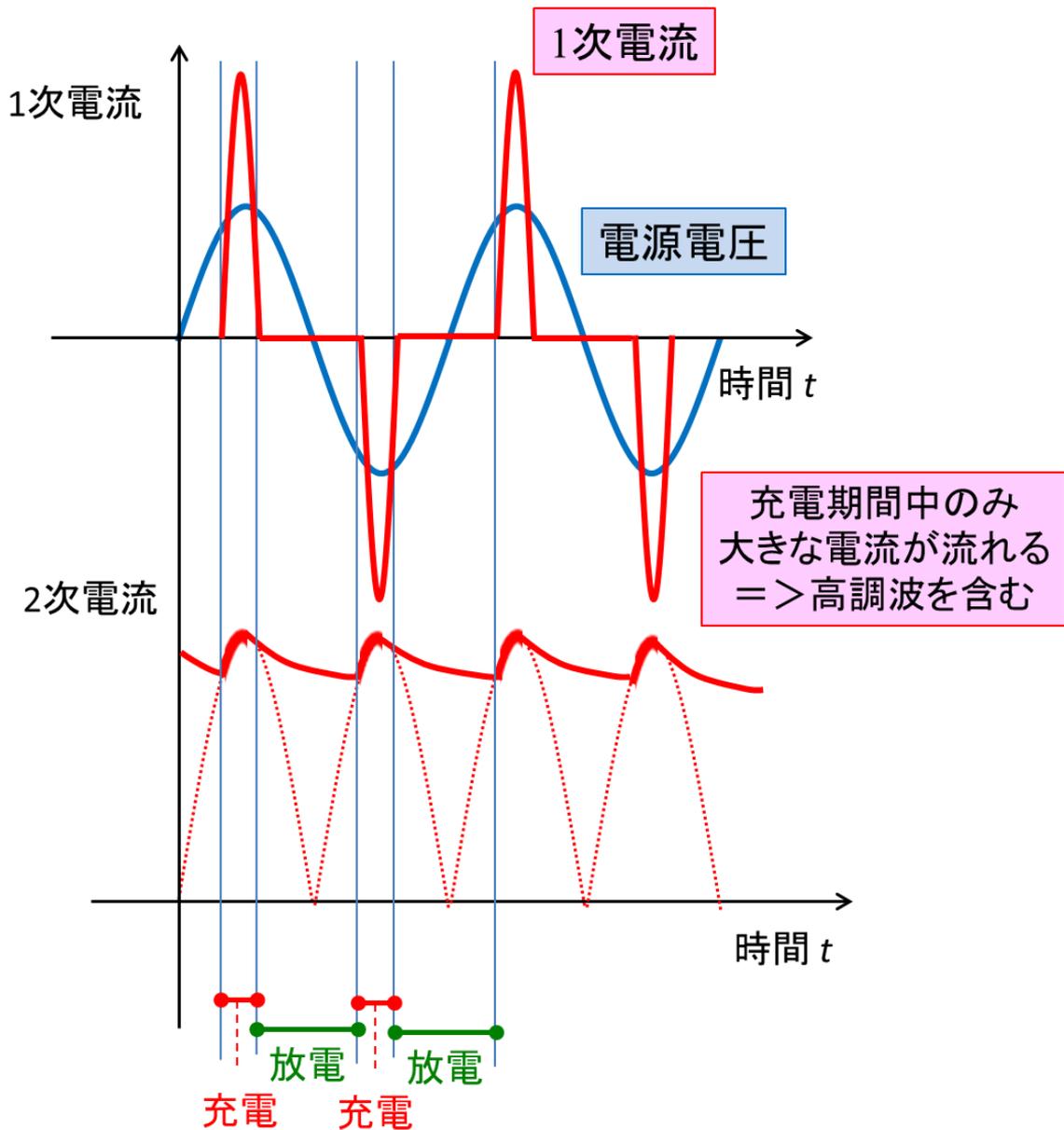


⑤ キャパシタインプット型整流器の問題点

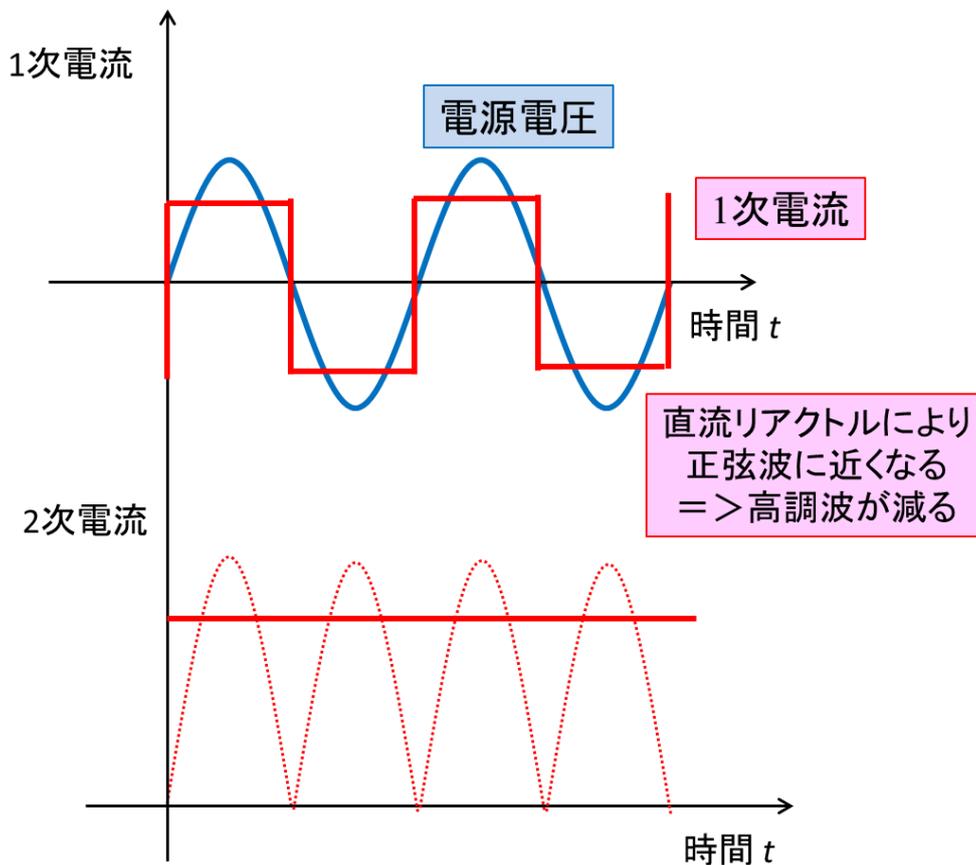
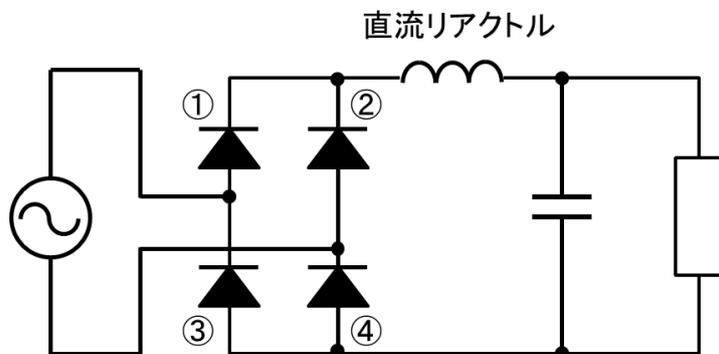
キャパシタインプット型整流器は、カンタンに直流を得られる反面、いくつかの問題点もある。ここでは、(1) 入力電流の高調波、(2) 突入電流、(3) コンデンサの寿命について解説する。

(1) 入力電流の高調波

入力側の電流は形が歪むという大きな問題がある。下の図のように、整流器に入力される電流は、充電期間中のみしか流れないことからその波形は大きく歪んでしまう（下図）。そのため、高調波電流に由来する大きな無効電力が流れることがある。

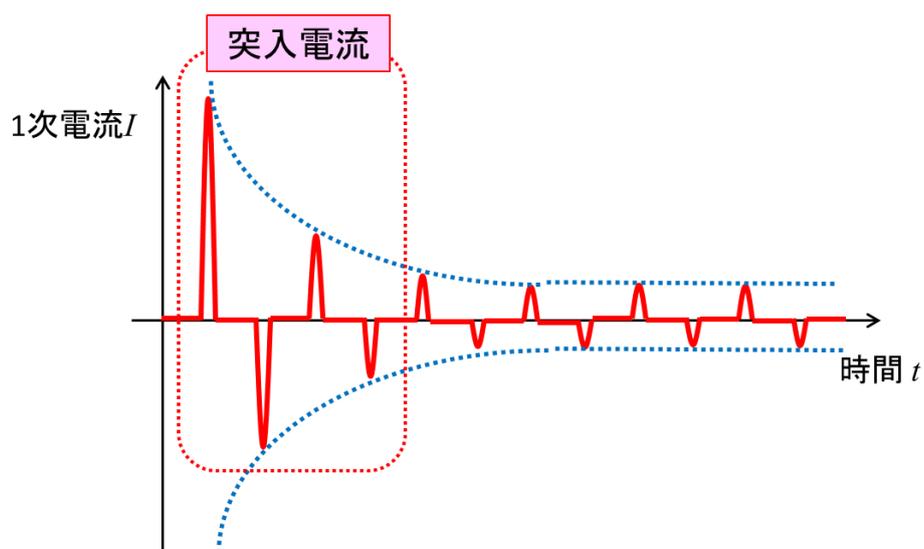


高調波を減らすには、下図のように直流部分に直流リアクトル（コイル）を挿入してやる方法がある。コイルを直流で使うと、電流を一定に保つ役割を果たすため、電流の急激な変化を和らげることができる。そのため、整流器の入力側の電流も正弦波に近づき、高調波を減らすことが可能である。

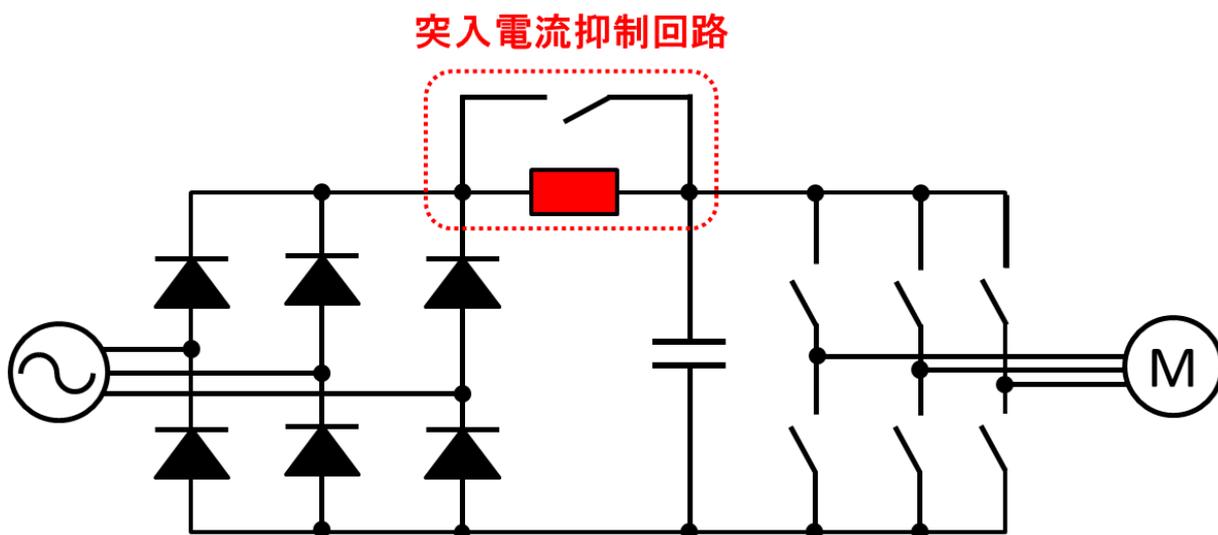


## (2) コンデンサの突入電流

インバータの電源投入時には、直流部分のコンデンサに電気を充電するため、大きな電流が瞬間的に流れる。これを『突入電流』、または『充電電流』という。インバータの電源をひんぱんに ON/OFF すると、ON のたびに突入電流が流れるので、インバータの寿命を縮める原因となる（1 日数回までにとどめるべきである）。



インバータには、上記の突入電流を抑えるため『**突入電流抑制回路**』が設けられている。電源を投入した瞬間のみ、整流器とコンデンサの間に抵抗が挿入されるようにして、適当な時間ののちに並列に設置したスイッチを ON して、抵抗に電流が流れないようにすることで、抵抗の作用で突入電流を抑えている。

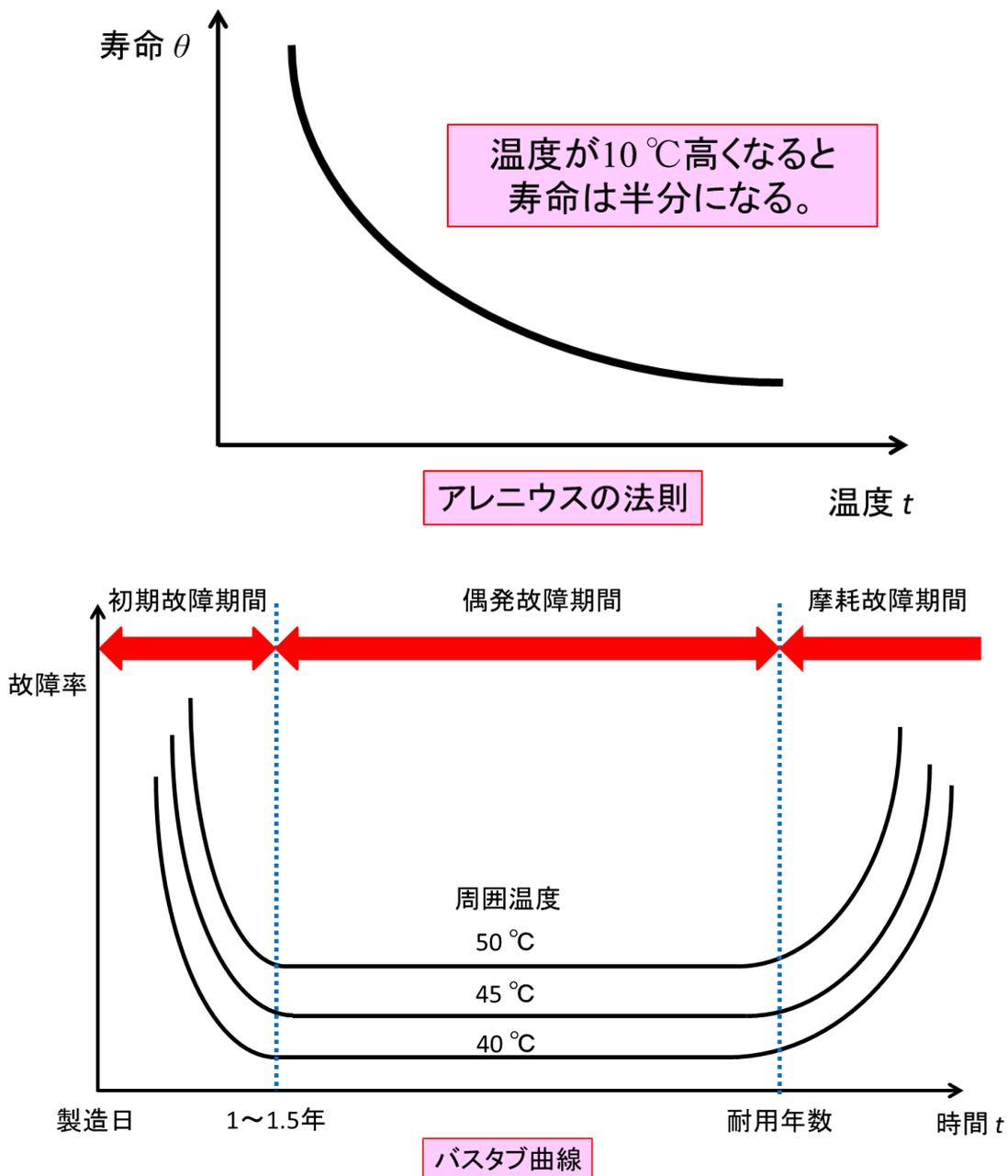


### (3) コンデンサの寿命

インバータに用いられるコンデンサは、電解コンデンサと呼ばれる種類のコンデンサが用いられるが、一般に電解コンデンサは熱に弱く、周囲温度が高温であるほど寿命が短くなる。インバータの不具合の原因の多くはこの電解コンデンサに起因するところが多い。

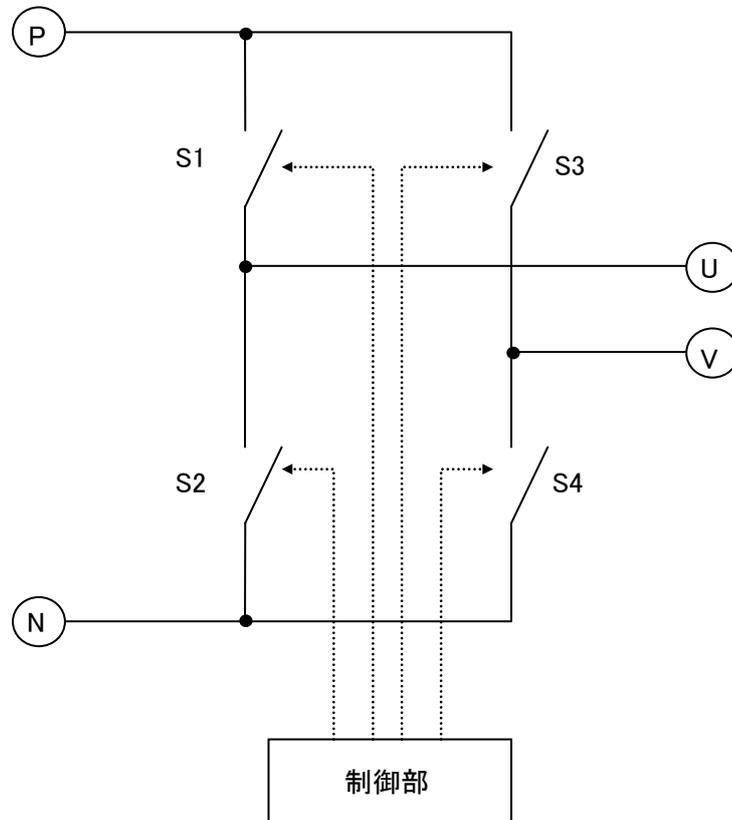
電解コンデンサの寿命と周囲温度の関係はアレニウスの法則として知られ、温度が10℃高くなるごとに寿命が半分になっていくと言われている。

故障の起きるタイミングとしては、初期故障期間（製造から1～1.5年以内）と摩耗故障期間（耐用年数以降）の2期があることが知られている。



#### 4.4 インバータ

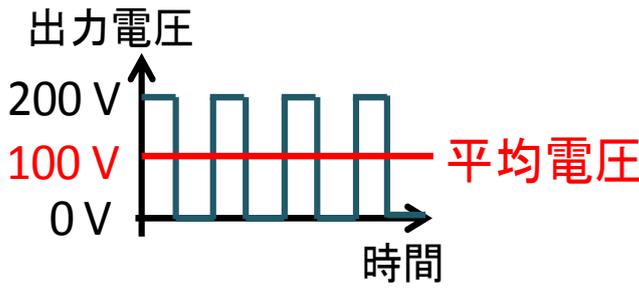
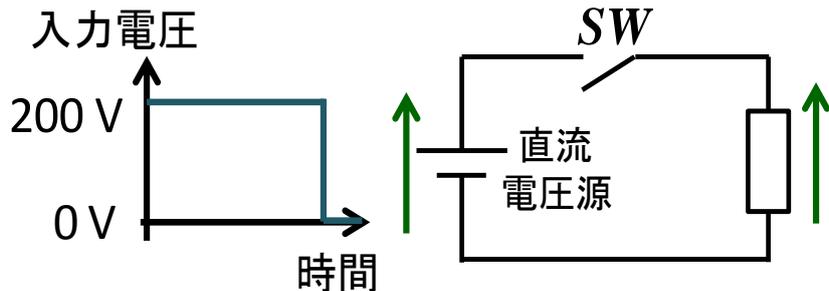
インバータは、半導体デバイスの ON/OFF 動作により直流を交流へ変換する装置である。以下に DC-AC 変換の基本原理を示す。



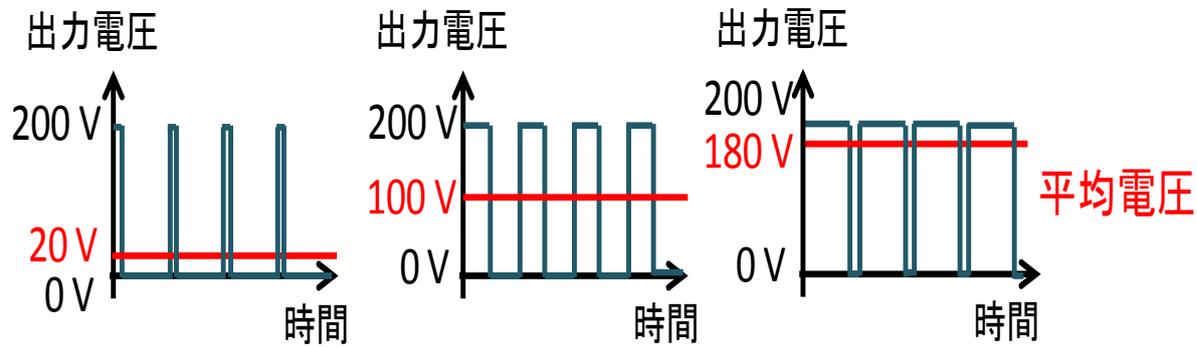
インバータ回路の概要

直流から交流を作る回路には、電圧を自由に変えることと、極性（+と-）を自由に変えることの 2 つの機能がなくてはならない。はじめに、直流電圧を自由に変えることのできる回路を考える。

直流電圧を自由に変えるにはいくつかの方法がある。そのなかでも一番損失を少なくしたまま実現できる方法は、直流電源と負荷の間に高速で ON/OFF できるスイッチ（SW）を挿入して動作させるという方法である。例えば、入力電圧が 200 V であって、高速スイッチで ON/OFF を同じ時間比率で繰り返すと、平均電圧で考えれば 100 V の電圧が出たのと同じことになる。

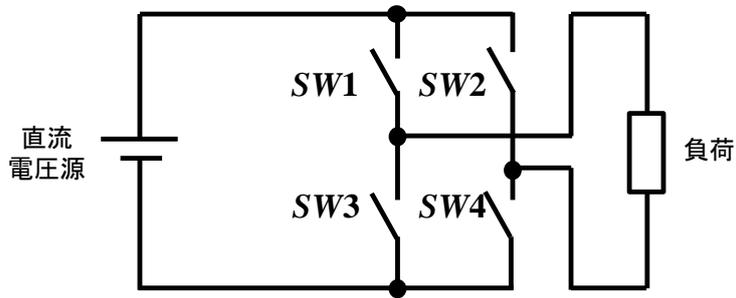


このとき、高速スイッチの ON/OFF の時間の比率を変えることで、出力される平均電圧も自由に変えることができる。

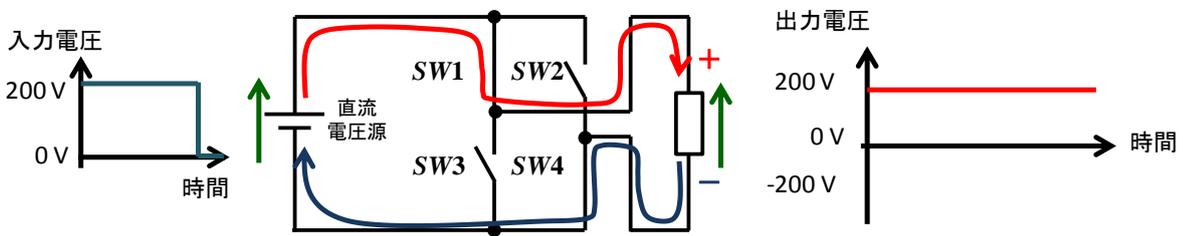


- ON を短めにする  
＝電圧は下がる
- ON と OFF が同じ時間  
＝入力電圧のちょうど半分
- ON を長めにする  
＝電圧は上がる

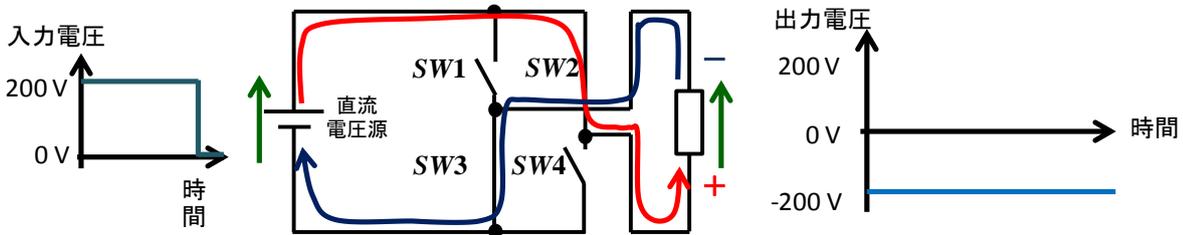
次に、直流電圧の極性（+と-）を自由に変えられる回路を考える。極性を変えるには、下図のように高速 SW を 4 つ用意し、4 つの高速スイッチの ON/OFF のタイミングを工夫することで実現できる。



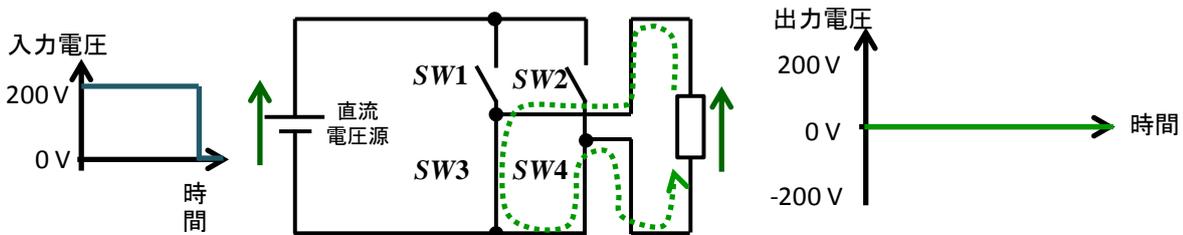
① 負荷の上端が+極になるようにするスイッチパターン（SW1 と SW4 を ON）



② 負荷の上端が-極になるようにするスイッチパターン（SW2 と SW3 を ON）

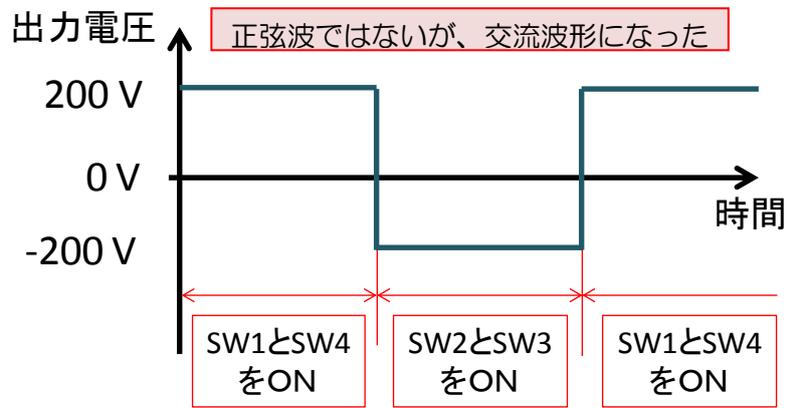
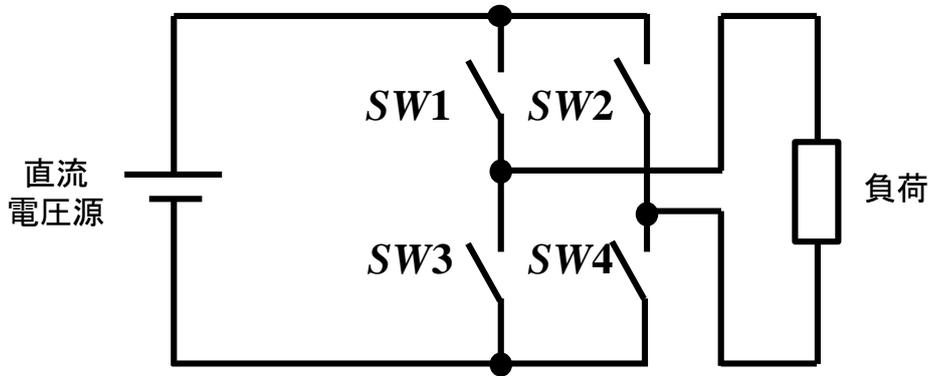


③ 負荷電圧が 0 V（OFF）になるようにするスイッチパターン（SW3 と SW4 を ON）

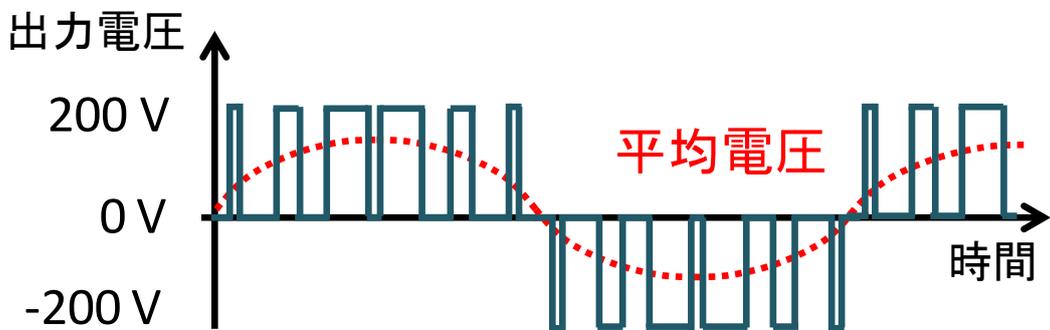


※ SW1 と SW2 を ONとしてもよい

この回路を使い、+電圧と-電圧を交互に出力することで、(形は正弦波ではないものの)交流波形を出力することができる。

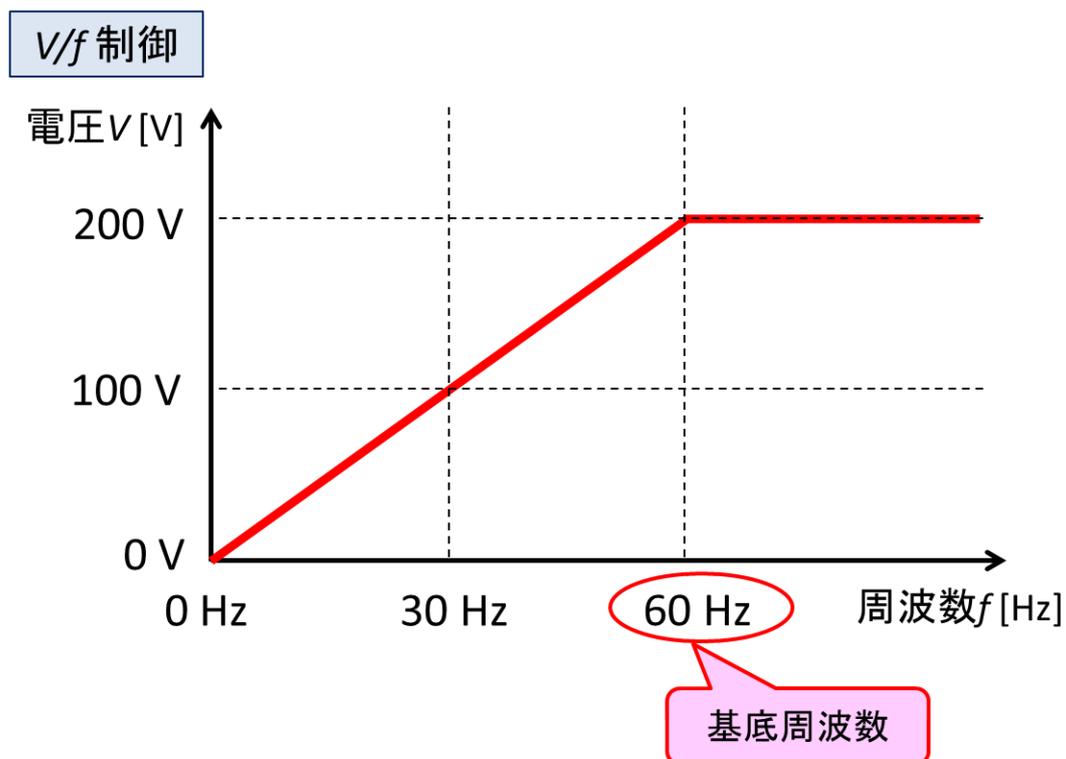


さらに正弦波に近づけたい場合には、ON と OFF を高速に繰り返すことで、+のときの電圧と-のときの電圧を変えてやればよい。このような方法で正弦波を作ることを PWM (Pulse Width Modulation) という。この波形は、インバータの出力側にフィルタ (コイルやコンデンサ) をつけることで、なめらかな正弦波に近づけることが可能である。このような手段によって、直流電圧を交流電圧に変換することができる。



#### 4.5 V/f制御の原理

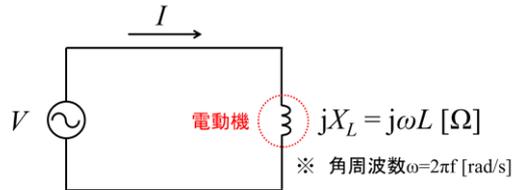
V/f制御はオープンループ制御（精密な制御を必要としない制御）の最も一般的な方法である。V/f制御は、下の図のように電動機を加速させる。



この図のように、V/f制御では基底周波数を基準にとって、そのときの電圧と周波数の比が常に等しくなるように、電圧、周波数を変えていく。このように制御することで、電動機に流れる電流を常に一定にすることができ、突入電流を抑えることができる。また、電動機のトルクは電流に比例するため、同じトルクのまま加速させることができる。

※参考：電流一定・トルク一定になる証明

V/f 制御をすることによって、電流が一定、かつトルクが一定になることを説明したが、それを証明してみよう。まず、V/f 制御をすることによって、電流が一定になることを証明する。実際の電動機の等価回路を考えると複雑になるので、下の図のように1つのコイルで置き換えてみる。



このときの回路方程式は、オームの法則を使って計算すると、次のようになる。

$$V = IX_L = I\omega L = I \times 2\pi f L \quad [\text{V}] \quad (1)$$

よって、電流の値は次のようになる。

$$I = \frac{V}{2\pi f L} \quad [\text{A}] \quad (2)$$

つぎに、コイルが作る磁界  $H$  [A/m] を計算する。 $n$  回巻きコイルに電流  $I$  [A] を流したときにできる磁界は、次のようになる。

$$H = nI = n \frac{V}{2\pi f L} = \frac{n}{2\pi L} \times \frac{V}{f} \quad (3)$$

つまり、磁界  $H$  は電流  $I$  に比例すると同時に、磁界  $H$  は  $V/f$  に比例することになる。

$$H \propto I$$

$$H \propto \frac{V}{f}$$

よって、 $V/f$  の関係を常に保つように制御すると、電流  $I$  を一定にすることができるわけである。

次に、 $V/f$  制御をすることによって、トルク  $T$  [Nm] が一定になることを証明する。電動機の実出力  $P$  [W] は、力率を  $\cos \theta$  とすると、次のようになる。

$$P = VI \cos \theta \quad [\text{W}] \quad (4)$$

また、電動機の実出力  $P$  [W] は、機械出力に注目すると、次式のようになる。ただし、 $p$  は極数である。

$$P = \omega T = 2\pi f T = 2\pi \frac{n}{60} T = \frac{2\pi}{60} \times \frac{120f}{p} T = \frac{4\pi f}{p} T \quad [\text{W}] \quad (5)$$

式(4)と(5)を連立して、トルク  $T$  の式を導く。

$$VI \cos \theta = \frac{4\pi f}{p} T$$

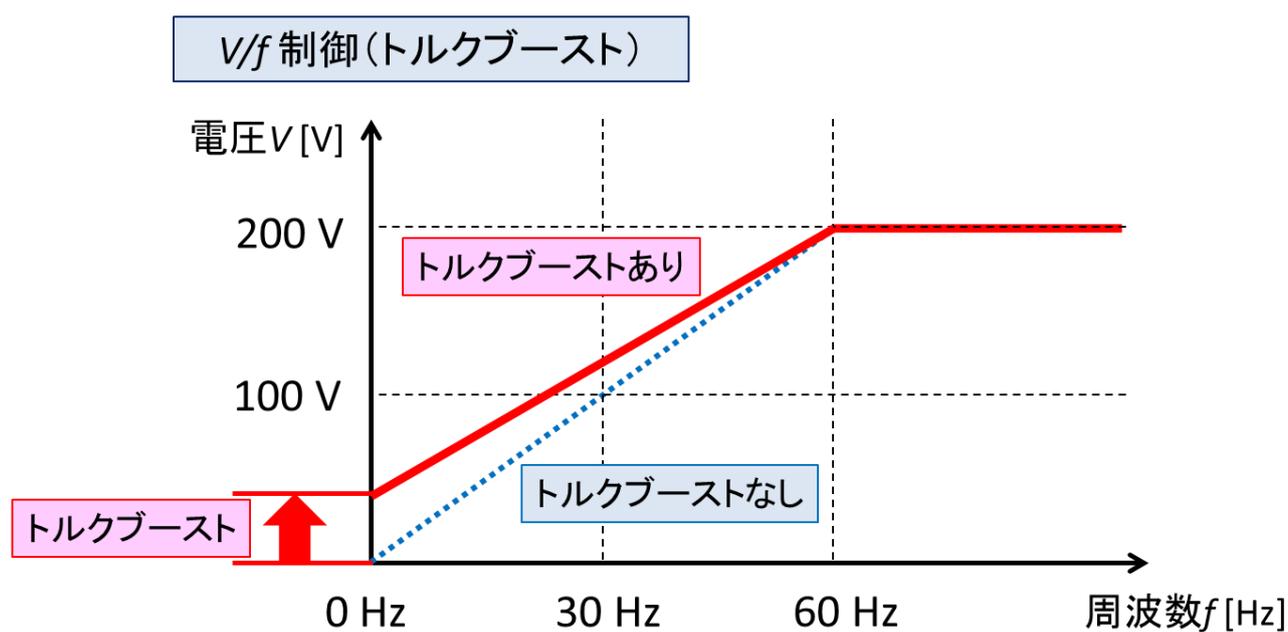
$$T = \frac{pVI \cos \theta}{4\pi f} = \frac{p \cos \theta}{4\pi} \times \frac{V}{f} \times I = k \times \frac{V}{f} \times I \quad [\text{Nm}] \quad (6)$$

上式より、 $V/f$  の関係を常に保つように制御すると、電流とトルクが比例関係になるが、先に導いた通り  $V/f$  にすると電流も一定になることから、 $T$  も一定とすることができる。

## 4.6 V/f 制御の具体的方法

### ①トルクブースト補償

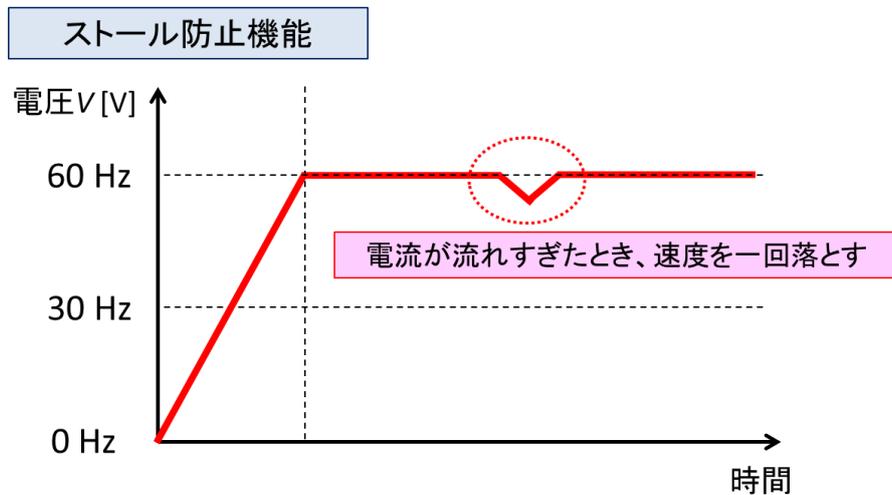
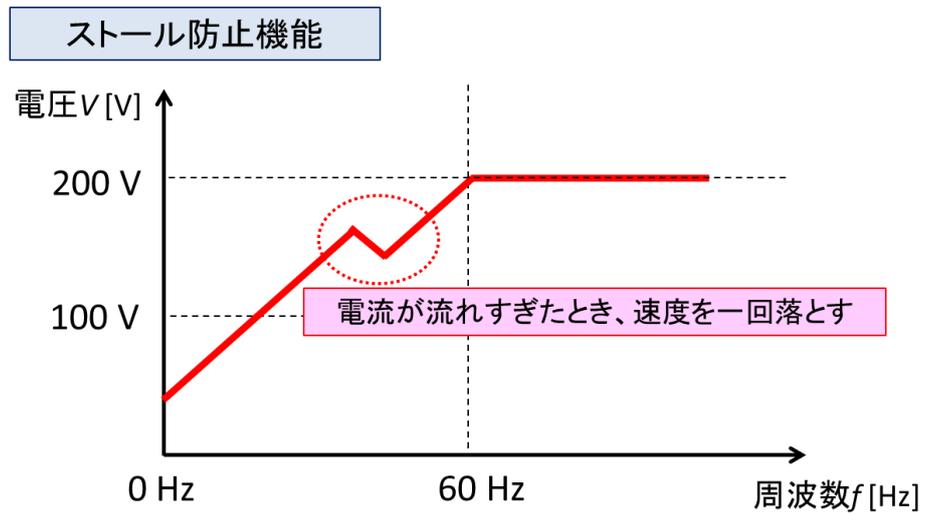
電動機は回転を始める瞬間に最も大きなトルクを必要とする。これを始動トルクという。例えば、自  
転車に乗るとき、一番初めに大きな力が必要であるのと同じである。一方、V / f 制御では、回転数が小  
さいときには電圧を低くしているため、始動に必要なトルクが得られない場合がある。そのため、回転  
数が低いときには、電圧を高めにしてトルクを稼ぐことを行う。これを『**トルクブースト**』という。



トルクブーストが小さすぎる場合は、始動時のトルクが小さすぎるために始動しない場合がある（電  
動機は始動領域で不安定になる場合がある）。一方、トルクブーストが大きすぎる場合は、大きな始動電  
流が流れインバータが停止してしまう場合がある（次項、ストール防止機能を参照）。

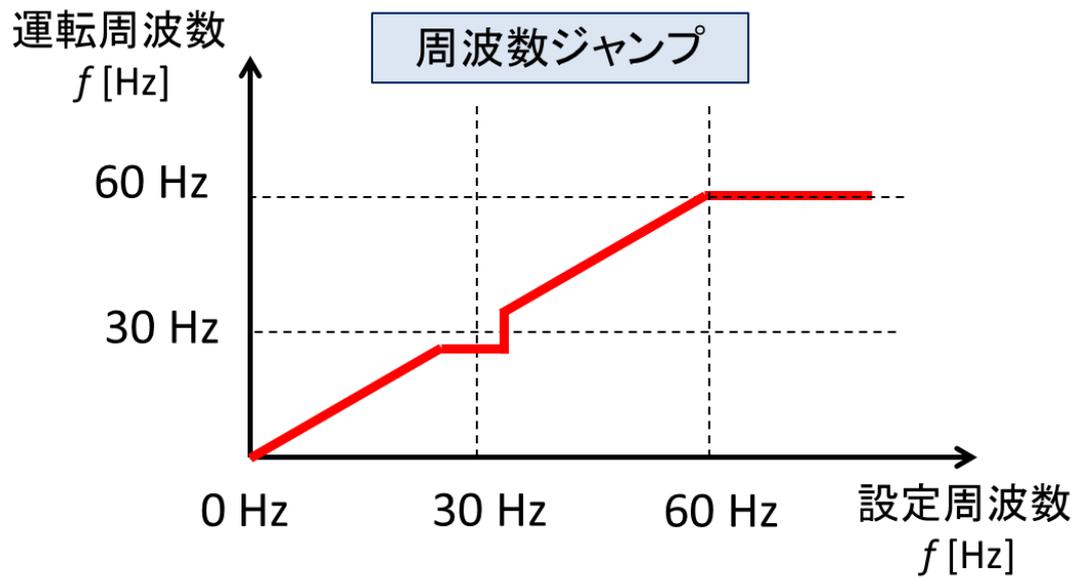
## ② ストール防止機能

ストール防止機能は、負荷が重く電流が流れすぎたとき、一度速度を落として電流を小さくする機能である。電流が大きくなるのは、すべりが大きくなるためであるから、一度速度を落としてすべりを小さくして、電流値が安定してから再度加速させる。



### ③ 周波数ジャンプ

周波数ジャンプは、電動機負荷に機械的な共振周波数がある場合、加速中に大きな振動や騒音が現れることがある。共振は特定の周波数のみで起こるものであるから、この周波数を避けることで振動や騒音を減らすことができる。

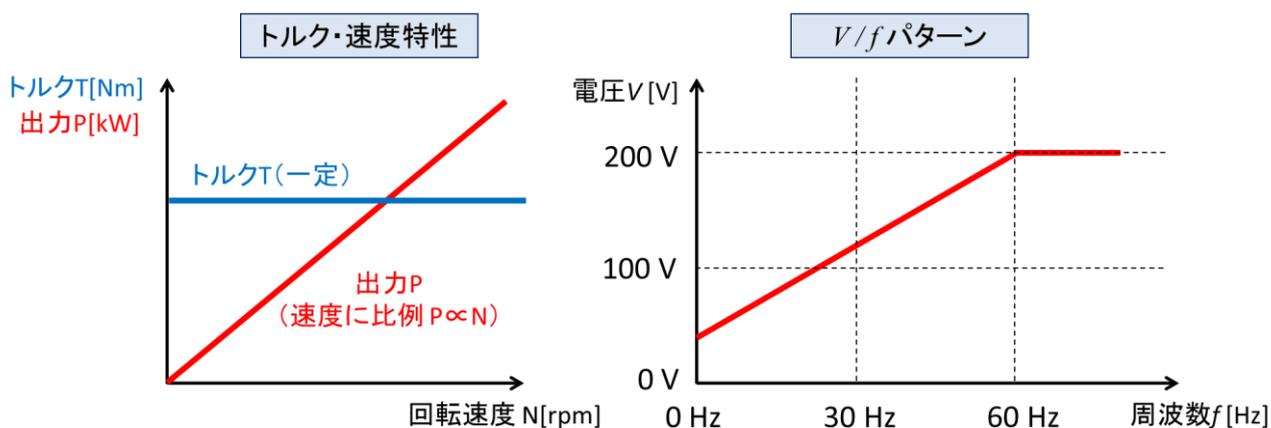


## 5. インバータによる誘導電動機の運転法

### 5.1 V/f 制御（負荷トルク特性と V/f パターン）

V/f 制御で電動機を運転する場合は、負荷の特性に合わせて回転数と電圧のパターンを選択する必要がある。負荷ごとのパターンを見ていく。

#### ①定トルク負荷（コンベア・台車・ロール）



#### 【定トルク負荷：速度に対して一定のトルク負荷】

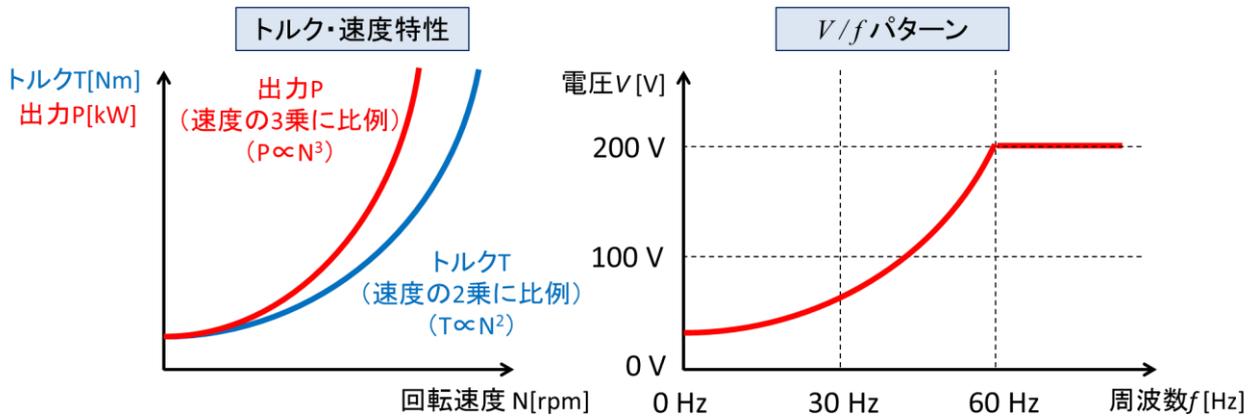
周波数に合わせて、電圧を直線状に上昇させていく方法である。始動時のトルクの低下を防ぐため、V/f 特性を低速度領域でトルクブースト量を上げた設定（周波数に対する電圧の比率を上げる）にあわせることにより定トルク特性になる。

モータは定トルク負荷を運転すると、電流が全運転範囲でほぼ定格電流値となるために冷却効果が低下する低速度領域での運転では過熱してしまうため、次のような対策をとるとよい。

- (1) インバータ専用モータの採用
- (2) 強制風冷のモータを採用
- (3) 1 ランク上の容量の標準モータを採用して負荷率を下げる

トルクブースト量を大きくしすぎると低速度領域でモータが過励磁となり、振動、騒音、加熱、過電流の原因となる。したがって、トルクブースト量は定格電圧の約 10～15%が目安である。

② 2乗低減トルク負荷（ファン・ポンプ・ブローア）



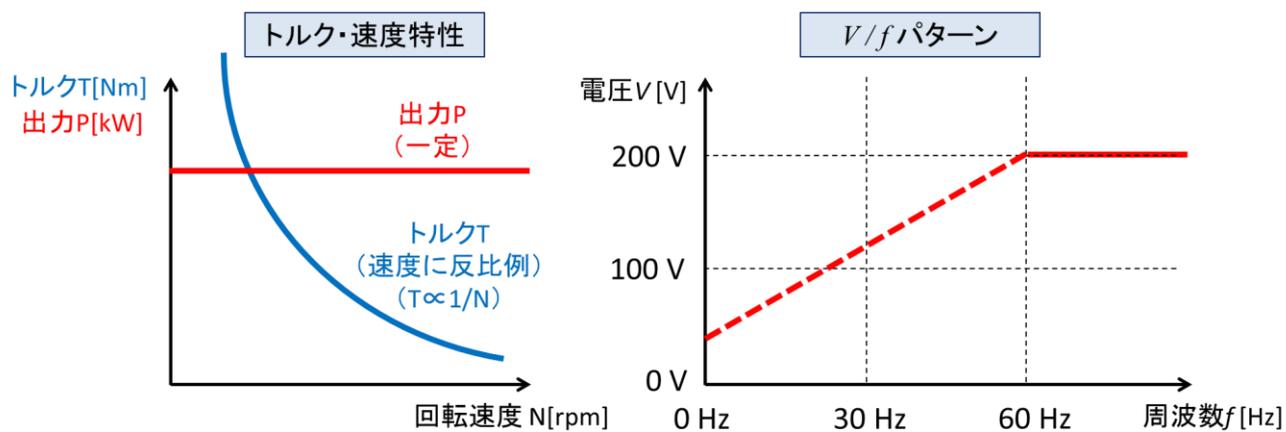
【2乗低減トルク負荷：速度に対して2乗で変化する2乗低減トルク負荷】

速度の低下とともにトルクが減少するため、定常運転状態での急激な負荷変動が少なく、2乗低減トルク特性に合わせたV/f制御で運転することが可能である。

インバータを用いた時の省エネ効果は、2乗低減トルク負荷が最も大きくなる。例えば、定トルク負荷で回転数を1/2にした場合、トルクはそのままであるので、出力は1/2になる。一方、2乗低減トルク負荷で回転数を1/2にした場合、トルクは1/4になるので、出力は(1/2 × 1/4で、) 1/8になる。このように、回転数を下げると、省エネ効果はその3乗で効いてくるので、大変大きな省エネ効果を得ることができる。

2乗低減トルク負荷の場合は、低速域での出力が大幅に減少するため、低速運転による冷却効果の低下もさほど問題にならない。

③ 定出力負荷（工作機械・巻き取り機）



【定出力負荷：速度に対して反比例で変化する定出力負荷】

出力が速度にほとんど関係なく一定の定出力となる。V/f 特性を基底速度以上で出力電圧が一定となるように調整する。

## 5.2 ベクトル制御

ベクトル制御は、励磁電流とトルク電流を計算上で分離し、トルク電流によってトルクを制御する方法である。原理は非常に難解であるため、その詳細は述べないが、 $V/f$  制御と比較して、おおむね次のような特徴がある。

- ・低出力でも高トルクを出力できる（0.3 Hz で定格 200% まで可）
- ・速度制御の場合、負荷が変動しても回転速度が変動しにくい
- ・トルク指令を与えることにより、トルク制御をすることも可能

一方で、次のような欠点もある。

- ・制御の仕組みが難解
- ・速度フィードバックを行うため、速度計が必要（速度計を用いない、センサレスベクトル制御もあるが、速度を電流、電圧から推定するため、やや不正確な制御になる。）
- ・電動機の回路定数を正確に把握し、設定しておく必要がある

※ 今回の実習では、『**リアルセンサレスベクトル制御**』で実習を行う。リアルセンサレスベクトル制御は、負荷の変動が激しい場合に系が不安定になることがあるので、その場合には『**アドバンスド磁束ベクトル制御**』を使用する。

※ 三菱製のインバータであれば、三菱製の電動機の回路定数があらかじめ設定してある。ただし、今回はオートチューニング機能を使って回路定数を測定する実習から始めることとする。

## ○フィードフォワード制御とフィードバック制御

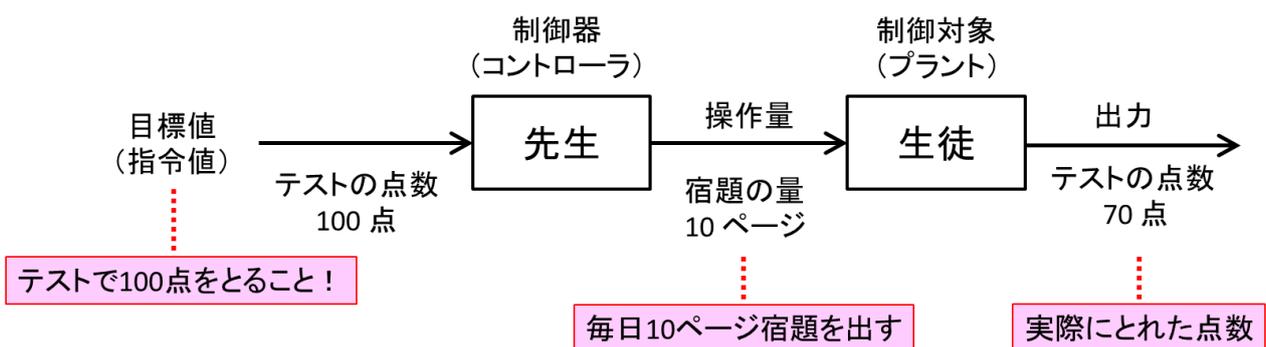
一般に、制御の方式には、フィードフォワード制御とフィードバック制御がある。今回の実習で使っている  $V/f$  制御はフィードフォワード制御に分類され、ベクトル制御はフィードバック制御に分類される。では、フィードフォワード制御とフィードバック制御の違いを見ていこう。

### ①フィードフォワード制御

フィードフォワード制御は、フィードバックを用いない制御方式で、オープンループ制御とも呼ばれる。フィードバック制御は、制御方式としては最も簡単で分かりやすい制御方式である。

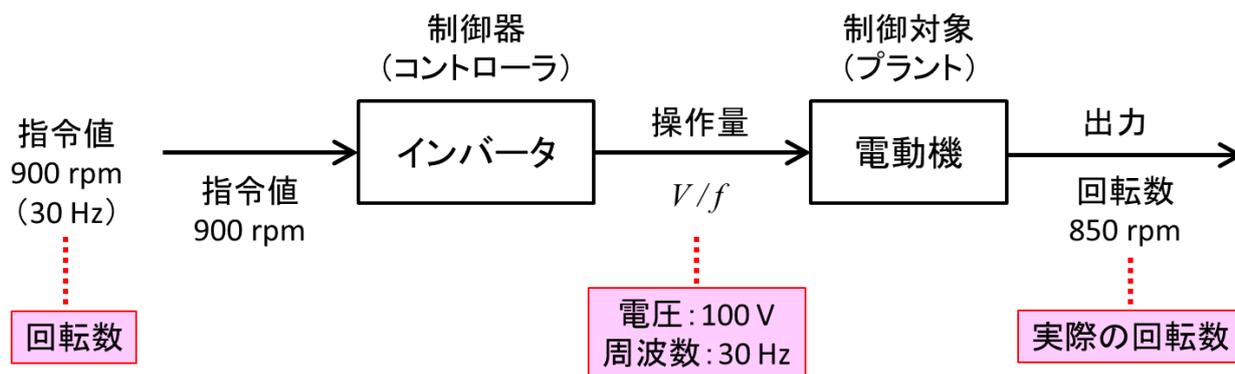
フィードフォワード制御を理解するために、先生が生徒を制御することを例にして考える。テストで100点をとることを目標にした生徒がいて、先生がその生徒を制御するとする。制御理論では、制御することで期待する出力を『**目標値（または指令値）**』、制御される側を『**制御対象（プラント）**』、制御する側を『**制御器（コントローラ）**』とよぶ。今の例では、目標値は100点で、制御対象は生徒、制御器は先生にあたる。この先生は、生徒に100点をとらせるために、毎日10ページの宿題を課すこととした。この宿題は『**操作量が10ページ/日**』になるという。何ページの宿題を課すのかは、先生の勘や経験をもとに決めることになる。このようにすることで、生徒の成績は徐々に上昇し、100点に近い点数をとることができる。このように、あらかじめ操作量を決めて、制御することを『**フィードフォワード制御**』という。

しかし、生徒によってはもっと少ない宿題で100点をとることができる人もいれば、10ページ程度では100点をとれない人もいる。また、1人の生徒でも、その日の体調や宿題の分野によっては、点数が変動することも考えられる。このように、制御対象の状態が変わると、出力も変わってしまうのがフィードフォワード制御の欠点である。



電動機の  $V/f$  制御について考えてみる。電動機をインバータによって、回転数 900rpm (30 Hz) に制御したいとき、制御対象が電動機、制御器はインバータとなる。指令値は 900 rpm (30 Hz) であり、この数値をインバータに入力する。インバータは電圧 100 V、周波数 30 Hz の電気を電動機に供給する。すると、電動機は 900 rpm に近い回転数で回転をする。

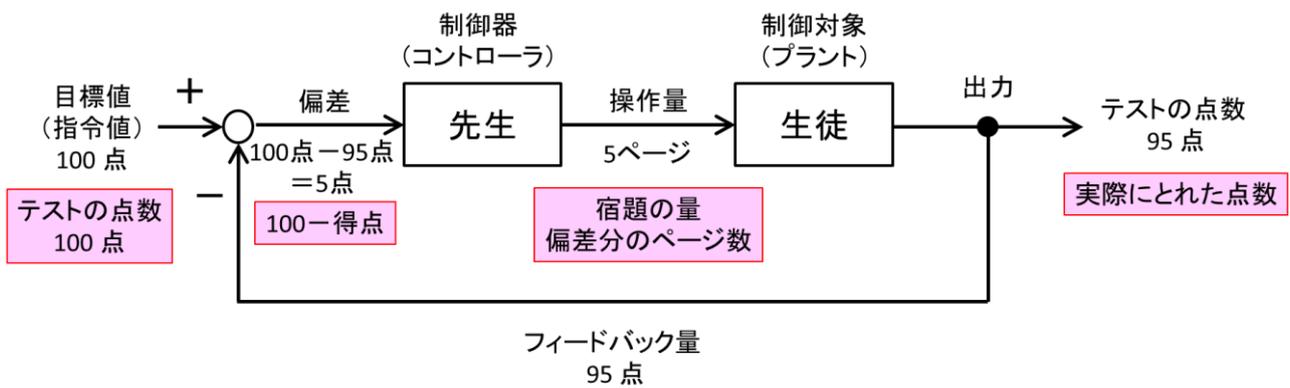
しかし、先の例のように、もし電動機の機械負荷が重いとき、周波数は低下してしまう。そのため、電動機の状態によっては、有効に制御ができなくなるおそれがある。



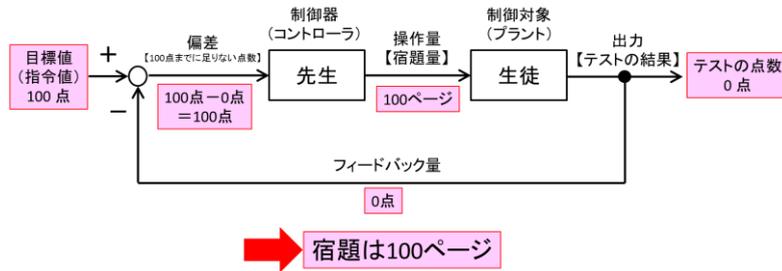
## ②フィードバック制御

フィードバック制御は、クローズドループ制御とも呼ばれ、出力を入力側にフィードバックし、出力値を常に見ながら出力値と目標値が一致するように制御する方法である。電動機制御では、ベクトル制御がフィードバック制御にあたる。

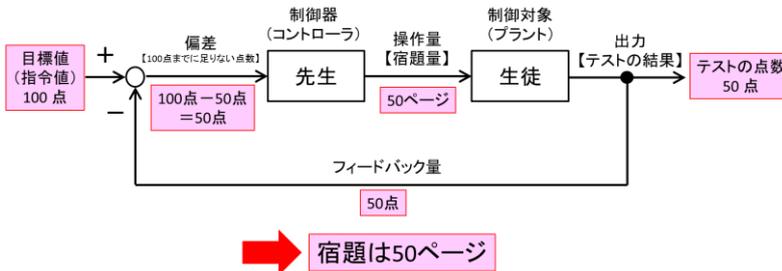
先ほどと同じように、フィードバック制御を理解するために、先生が生徒を制御することを例にして考える。フィードバック制御によって、先生が生徒を制御しようとする時、下の図のようになる。先生は宿題を何ページ出すかをあらかじめ決めるのではなく、テストの点数を見ながら宿題の量を決めるようにする。下の図の例では、100点（目標値）から実際にとれた点数を引き、その差の点数分だけ宿題を出している。例えば、テストで95点をとったならば、100点まではあと5点足りないことになるので、宿題のページ数を5ページとする。フィードバック制御をすることで、成績が下がれば宿題が増え、成績が上がれば宿題が減るので、苦手分野があったり、生徒の状態が変わっても、同じように制御できる。



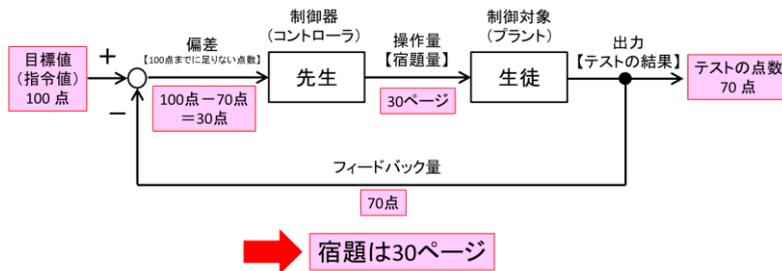
では、フィードバック制御によって、100点が本当にとれるようになるのかを検討してみよう。スタートはテストの点数が0点であるとする。すると、目標値（100点）との差は100点になるので、宿題は100ページ課すことになる。



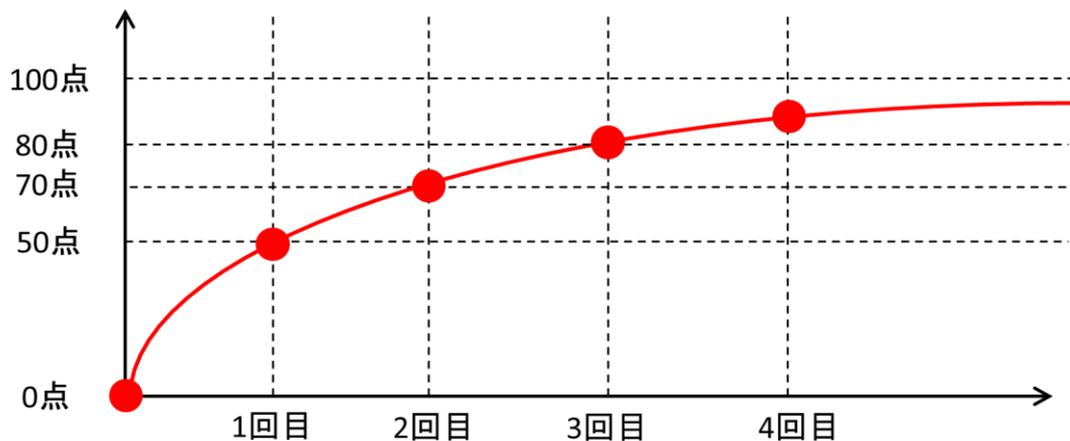
宿題をたくさんやったおかげで、次のテストでは50点をとれたとする。すると、目標値（100点）との差は50点になるので、宿題は50ページ課すことになる。



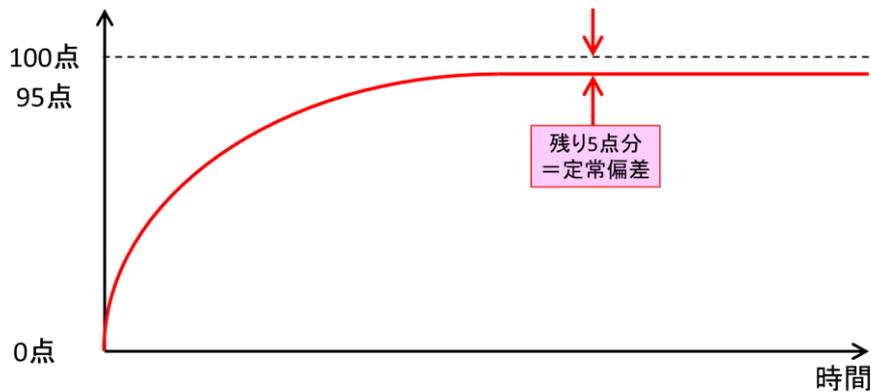
さらに次のテストでは70点をとれたとする。すると、目標値（100点）との差は30点になるので、宿題は30ページ課すことになる。



このように、回数を重ねるごとに徐々に点数が上がるのが分かる。十分に時間がたてば100点に近い成績をとることができる。



しかし、フィードバック制御には欠点がある。上の例では、回数を重ねるごとに100点に近い点数をとることができるが、実際には決して100点をとることはできない。なぜならば、もし100点に近づけば近づくほど、宿題の量が減ってきてしまい、仮に100点をとってしまった場合は、宿題は0ページになってしまう。それによって成績が下がってしまうので、実際には95点くらいをキープすることになってしまう。この残り5点分のことを『**定常偏差**』と呼ぶ。



今までの例でみてきたようなフィードバック制御は『**比例制御 (P 制御)**』とよばれ、比例制御の場合には必ず定常偏差が生じてしまうことが知られている。定常偏差をなくすには、次のような方法がある。

#### ①比例ゲインを大きくする

上の例のとき、偏差1点につき宿題1ページの場合、比例ゲインは1であるという。例えば、偏差1点につき宿題10ページとすると比例ゲインは10であるというが、比例ゲインを大きくとれば、小さい偏差でもたくさんの宿題を出すことができるので、結果的に定常偏差は小さくなる。現実には、ゲインを大きくしすぎると不安定になることがあるので、ゲインの大きさには限界がある。ゲインをどのくらいにするかの設計手法もさまざまであるが、インバータの場合は最終的には経験をもとに決められることが多い。

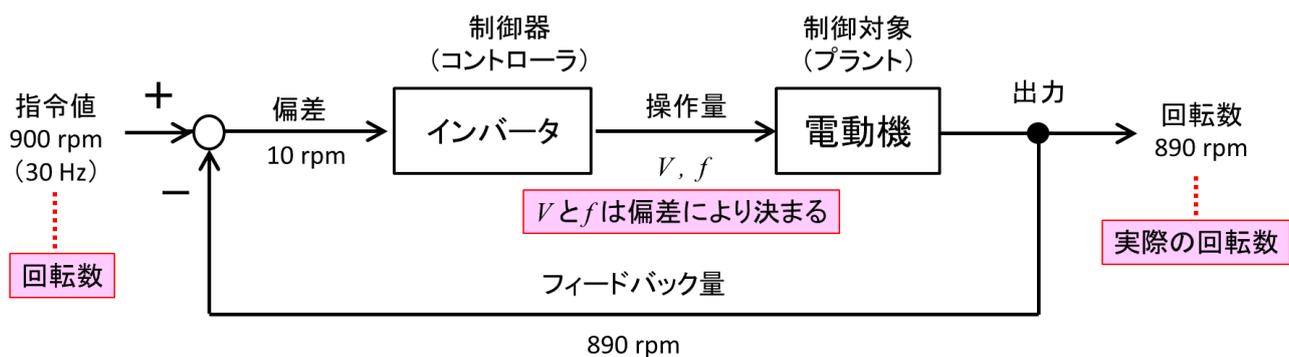
#### ②比例・積分制御 (PI 制御) をする

積分制御とは、最初からその時点までの偏差を合計していき、その合計値を何倍かして比例制御の合計値と合わせて制御を行う。このようにすることで、生徒がもし100点をとったとしても、宿題を出し続けることになるので、100点をキープすることができる。積分制御を行うと、理論的に定常偏差を完全になくすことができる。

#### ③比例・積分・微分制御 (PID 制御) をする。

微分制御とは、出力の傾きを見て出力を決める制御のことである。上の例では、前回と今回のテストの点数の差を見て、テストの点が下がっていたら宿題を増やし、テストの点が上がっていたら宿題を減らすような制御を行う。このようにすることで、テストの点が下がり続けている生徒により多くの宿題を課すことができ、点数の低下を事前に抑えることができる。ただし、微分制御を用いるとノイズに過剰に反応して出力が暴れてしまう欠点があるので、インバータでは通常用いない。

電動機のベクトル制御について考えてみる。ベクトル制御では、回転数を一定にする回転数制御やトルクを一定にするトルク制御など、利用する人の希望に応じて様々な制御が可能である。回転数制御の場合は指令値を回転数にし、トルク制御の場合は指令値をトルクとする。ベクトル制御は出力を常に確認し、出力と指令値が一致するように制御するので、電動機の負荷の重さが変わるなど、電動機の状態が変わっても、同じ出力を出し続けることができる。



回転数制御を行おうとすると、現在の回転数を知るために回転速度計が必要となる。しかし、負荷によっては回転速度計を取り付けることが困難である場合もある。そこで、回転速度計で回転速度を知る代わりに、インバータの電流や電圧の情報から回転数を推定する制御が用いられる場合がある。この制御をセンサレスベクトル制御という。センサレスベクトル制御では、フィードバックに用いる回転速度の情報は推定値であるので、精密な制御をすることはできない。しかし、電動機の回路の定数などが正確に把握できていると、かなりの精度で制御することができることから、広く使用されている。

## 参考文献

- [1] 電気書院編集部：「汎用インバータ活用ガイドブック」，電気書院，昭和 60
- [2] 水口雄二郎：「楽勝！ポンプ設備の省エネ技術」，省エネルギーセンター，2010
- [3] 水口雄二郎：「楽勝！現場で使うインバータ」，省エネルギーセンター，2015
- [4] 末武国弘：「基礎電気回路 1」，培風館，昭和 55
- [5] 末武国弘：「基礎電気回路 2」，培風館，昭和 55