

第1章

電氣工学

- ①——電氣理論
- ②——電氣機器
- ③——電力系統
- ④——電氣応用

1

電気理論

物理量・物理現象

1 電気量・電流

電荷の持つ電気の量を電気量といい、単位はクーロン[C]で表す。電流は、単位時間あたりに流れる電気量で、単位はアンペア[A]で表す。すなわち、**1秒間に1Cの電気量が流れるときの電流は1A**である。

2 オームの法則

オームの法則とは、「**電気回路を流れる電流Iの大きさは、導体に加えた電圧Vに比例し、導体の抵抗Rに反比例する。**」という法則であり、次式で表される。

$$I = \frac{V}{R} [\text{A}]$$

これ重要！ オームの法則は次式に変形して表すこともできる。

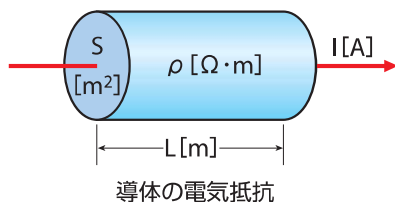
$$V = IR \quad R = \frac{V}{I}$$

3 電気抵抗

導体の電気抵抗は、断面積に反比例し、長さに比例する。

図のような断面積 $S [\text{m}^2]$ 、長さ $L [\text{m}]$ 、抵抗率 $\rho [\Omega \cdot \text{m}]$ の導体の抵抗 $R [\Omega]$ は、次のとおりである。

$$R = \rho \times \frac{L}{S} [\Omega]$$



これ重要！ ρ は抵抗率といい、断面積 1m^2 、長さ 1m の導体の抵抗値 $[\Omega]$ である。
また、抵抗率の逆数を導電率 (σ) といい、 $\sigma = 1/\rho$ で表される。

覚え方！

ダメ な 手 帳
断面積 抵抗率 長さ

4 電力

単位時間あたりに行われる仕事を電力といい、単位はワット[W]で表す。すなわち、**1秒間に1Jの仕事をするときの電力は1W**である。

また、電気回路において、V[V]の電圧を加えてI[A]の電流が流れたときの電力P[W]は次式で表される。

$$P=VI \text{ [W]}$$

これ重要！ オームの法則を代入すると電力は次式で表される。

$$P=VI=I^2R=\frac{V^2}{R}$$

覚え方！

$$\begin{array}{c} V \quad I \quad P \\ VI = P \end{array}$$

5 電力量

電力によりなされた電気的な仕事を電力量といい、単位はジュール[J]で表される。すなわち、**1Wの電力で1秒間になされた電力量は1J**である。**一般に、電力量の単位はワット秒[W・s]**で表される。

電力P[W]のt秒間の電力量W[W・s]は次式で表される。

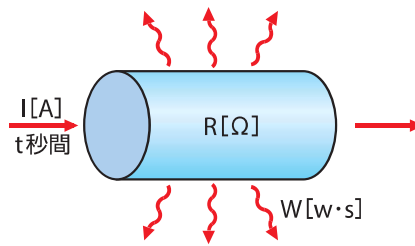
$$W=Pt=VI t \text{ [W} \cdot \text{s]}$$

これ重要！ 1[W・s]=1[J]であり、毎月の電気料金使用量は[kW・h]という単位。

6 ジュールの法則

抵抗R[Ω]にI[A]の電流をt秒間流したとき、抵抗で消費される電力量W[W・s]は、次式で表される。

$$W=Pt=RI^2t \text{ [W} \cdot \text{s]}$$



抵抗で消費される電気エネルギーは、すべて熱エネルギーに変換される。これをジュールの法則という。

覚え方！

愛児歩いて 熱が出る

$I^2 R t$ 熱量

7 効率

機器やシステムに供給された入力エネルギーに対する有効に使用された出力エネルギーの比を効率という。また、入力と出力の差を損失という。したがって、効率は、入力・出力・損失を用いて、次式で表される。

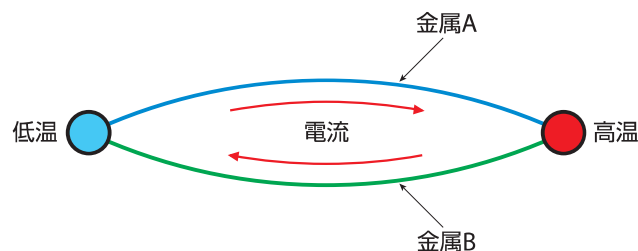
$$\text{効率} = \frac{\text{出力}}{\text{入力}} \times 100 = \frac{\text{入力} - \text{損失}}{\text{入力}} \times 100 = \frac{\text{出力}}{\text{出力} + \text{損失}} \times 100 [\%]$$

8 電気現象

① ゼーベック効果

2種類の金属線で1つの閉回路を作り、接続部を異なる温度に保持して温度差を与えると、回路内に起電力が生じて電流が流れる。この現象をゼーベック効果という。

ゼーベック効果により発生した起電力を熱起電力、流れる電流を熱電流といい、2種の組み合わせた導体を熱電対という。



② ペルチェ効果

2種類の金属による導体を組合せた閉回路に電流を流すと、接続点に熱の吸収あるいは発生が生じる。この現象をペルチェ効果という。

これ重要！ ゼーベックとペルチェは逆。

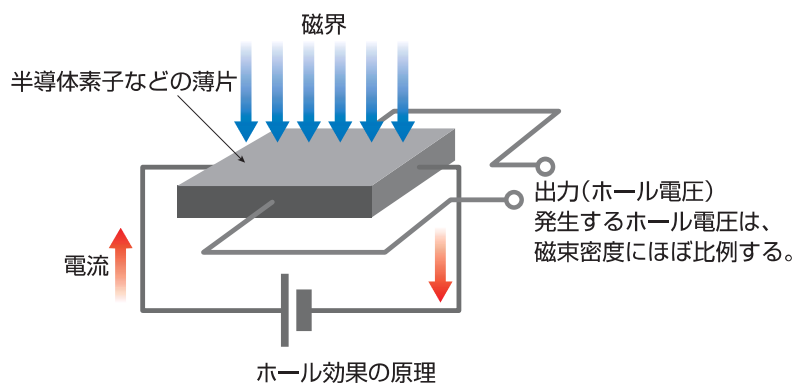
③ トムソン効果

同一の金属の閉回路上の温度差がある2点間に電流を流すと、温度差と電流の積に比例した熱の発生または吸収が生じる。この現象をトムソン効果という。

これ重要！ ゼーベック効果とペルチェ効果は、2つの異なる種類の金属による閉回路における現象。トムソン効果は、同一の金属による閉回路における現象。

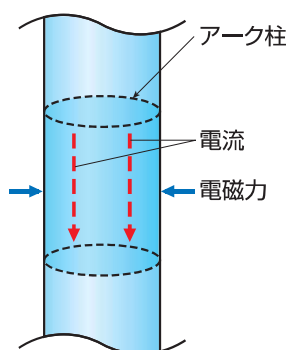
④ ホール効果

電流が流れている物体に対し、電流に対して垂直方向に磁界を与えると、**電流と磁界の双方に直交する方向に起電力が発生**する。この現象をホール効果という。また、ホール効果によって発生した起電力による電圧をホール電圧という。



⑤ ピンチ効果

導電性液体に電流が流れると導体断面に磁界が生じ、磁界と電流の間に、電流を中心に引き寄せようとする収縮力が働く。この現象をピンチ効果という。

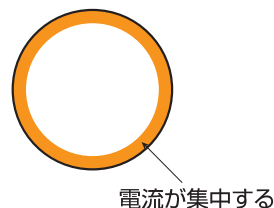


⑥ 表皮効果

導体に交流電流が流れる場合、導体中心部の電流ほど磁束鎖交数が大きいため、レンツの法則による逆起電力が大きく、導体の中心部の電流密度は小さくなる。これにより、**交流電流は、導体の表皮(周辺部)に集中して流れるようになる**。この現象を電流の表皮効果という。

表皮効果の性質は次のとおりである。

- ① 導体の断面積が大きいほど大きくなる。
- ② 周波数が高いほど大きくなる。
- ③ 導体の導電率が大きいほど大きくなる。
- ④ 導体が強磁性体で、導体自身の体内の磁束が多くなるほど大きくなる。



電気現象の種類

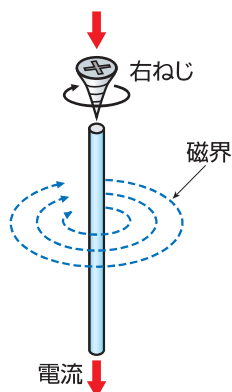
覚え方！

ほう 放る トムソン ピンチでひょう変 ゼーゼー ペろチェッ
ホール トムソン ピンチ 表皮 ゼーベック ペルチェ

電磁気

1 右ねじの法則

図のように、導体に電流が流れると、導体の周囲に同心円状の磁界が発生する。電流の方向と磁界の方向の関係は、**右ねじの進む方向と右ねじの回転方向の関係**と同様である。この関係を右ねじの法則という。



これ重要！ 電流が流れると、周囲に磁界が発生する。

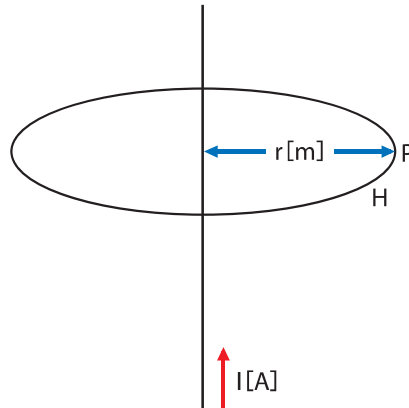
2 直線電流による磁界

図のように、 I [A] の電流が流れる直線状の導体から r [m] 離れた点 P における磁界の強さ H [A/m] は次式のとおりである。

$$H = \frac{I}{2\pi r} \text{ [A/m]}$$

I [A] の電流が流れる直線状の導線が N 本の場合は、次式のとおりである。

$$H = \frac{IN}{2\pi r} \text{ [A/m]}$$



これ重要! 直線電流の磁界の式中の $2\pi r$ は半径 r の円の円周である。

覚え方!

丸い輪に IN (入る)

$2\pi r$ IN

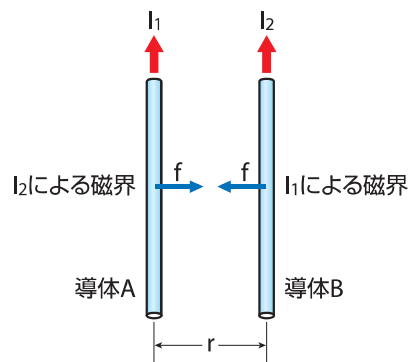
3 平行導体に働く力

図に示すように、 r [m] の間隔で2つの平行導体があり、導体Aに電流 I_1 、導体Bに I_2 が同方向に流れるとき、2つの平行導体に働く力 f [N/m] は、次式で表される。

$$f = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} = \frac{2I_1 I_2}{r} \times 10^{-7} \text{ [N/m]}$$

μ_0 : 真空の透磁率

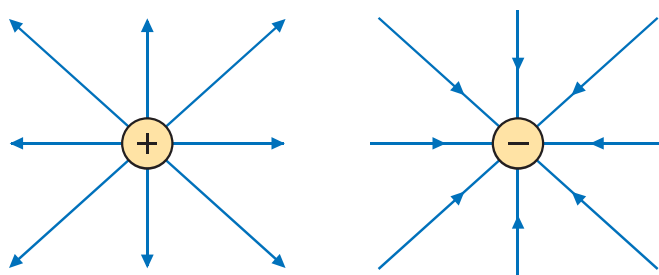
2本の導体に同一方向に電流が流れている場合は、互いに吸引力が生じ、反対方向に流れている場合は、互いに反発力が生じる。力の大きさは I_1 、 I_2 の積に比例し、導体間の距離に反比例する。



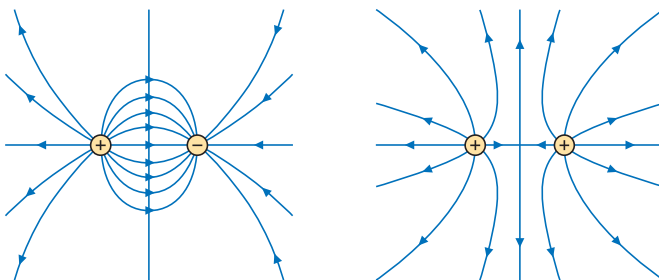
4 電気力線

静電力が及ぶ空間である電界の様子を視覚的に捉えるために仮想した線を、電気力線という。電気力線の性質は次のとおりである。

- ① 電気力線は、等電位面と直交する。
- ② 電気力線は、正電荷から始まり負電荷に終わる。
- ③ 電気力線の密度は、その点の電界の大きさを表す。
- ④ 電気力線の接線方向は、電界の向きに一致する。



点電荷1個(正、負)の電気力線



点電荷が2個あるときの電気力線

5 クーロンの法則

2つの点電荷には静電力が生じ、異符号のときは吸引し、同符号のときは反発する。その力の大きさ F [N] は、次式となる。

$$\oplus \rightarrow \leftarrow \ominus \quad \leftarrow \oplus \quad \oplus \rightarrow$$

$$F = Q_1 Q_2 / 4\pi\epsilon r^2 \text{ [N]}$$

覚え方！

心配一杯なあるじは^{きゆうきゆう}窮窮と苦勞

$4\pi\epsilon$ r^2 $Q_1 Q_2$ クーロン

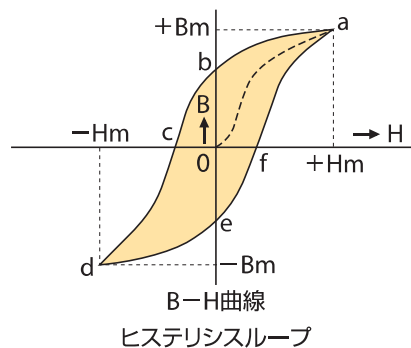
6 ヒステリシスループ

磁化されていない鉄に磁化力 H [A/m]を徐々に増加していくと、磁束密度 B [T]は、図の点線の $B-H$ 曲線に従って0点から増え、飽和して a 点に達する。この状態から磁化力 H を減らしていくと、 B は前と同じ値とならず、 $a \rightarrow b$ のように変化する。これは、鉄には過去の磁化の履歴を残留する性質があるためである。

これは、**磁化力 H をゼロにしても、鉄中の磁束密度 B はゼロにならず磁気が残ることを表している。この残留した磁気を残留磁気という。**

次に磁化力 H を逆方向へ増やしていくと、磁束密度 B は $b \rightarrow c \rightarrow d$ のように変化する、飽和して d 点に達する。

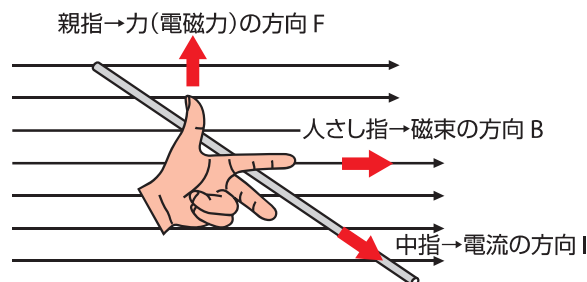
このように $+H_m$ から $-H_m$ までの範囲において、磁化力 H と磁束密度 B の描く線は、一つの閉曲線となる。この曲線をヒステリシスループまたはヒステリシス曲線という。



これ重要！ 図中の磁化力 H を0にしても残る磁束密度 B に相当する b 、 e を残留磁気、残留磁気が0になる磁化力に相当する f 、 c を保磁力という。

7 フレミングの左手の法則

磁界中の導体に電流を流すと、導体に電磁力が働く。電流と磁界と電磁力の方向は、図のように**左手の中指が電流、人差し指が磁界、親指が電磁力の方向になる**。この関係をフレミングの左手の法則という。



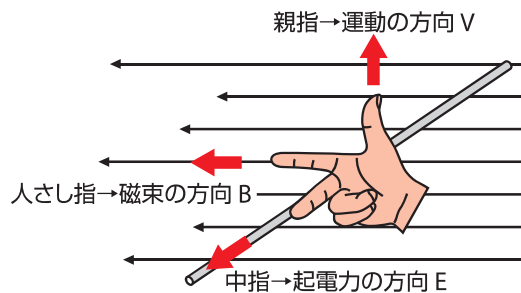
これ重要！ フレミングの左手の法則は電動機の原理を表す。力強い親指が力の方向と覚えるとよい。

覚え方！

電磁力
電流 磁界 力

8 フレミングの右手の法則

磁界中の導体を動かすと、導体に起電力が生じる。起電力と磁界と導体の運動の方向は、図のように**右手の中指が起電力、人差し指が磁界、親指が運動の方向になる**。この関係をフレミングの右手の法則という。



これ重要！ フレミングの右手の法則は発電機の原理を表す。

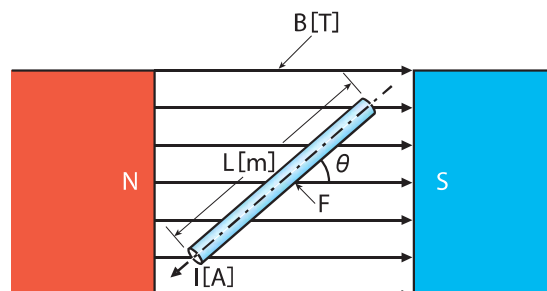
覚え方！

キジ動く
起動 磁界 運動

9 電磁力の大きさ

図のように、磁束密度 B [T]の平等磁界中に、磁界に対して θ の角度傾いた長さ L [m]の直線導体に、 I [A]の電流を流したとき、導体に生ずる電磁力の大きさ F [N]は次式のとおりである。

$$F = BIL \sin\theta \text{ [N]}$$



平等磁界中の電磁力の大きさ

覚え方！

FBIがLOVEとサインした。
 $F = BIL \sin\theta \text{ [N]}$

10 ファラデーの電磁誘導の法則

コイルに磁石を近づけたり離したりして、コイルと交わる磁束を時間的に変化させると、コイルに起電力が生じる。この現象を電磁誘導という。電磁誘導により発生する起電力を誘導起電力、流れる電流を誘導電流という。

電磁誘導によってコイルに生じる起電力の大きさは、コイルと交わる磁束の時間的変化の割合とコイルの巻数に比例する。この関係をファラデーの電磁誘導の法則という。

誘導起電力 e [V] の大きさは、次式のとおりである。

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

N : コイルの巻数

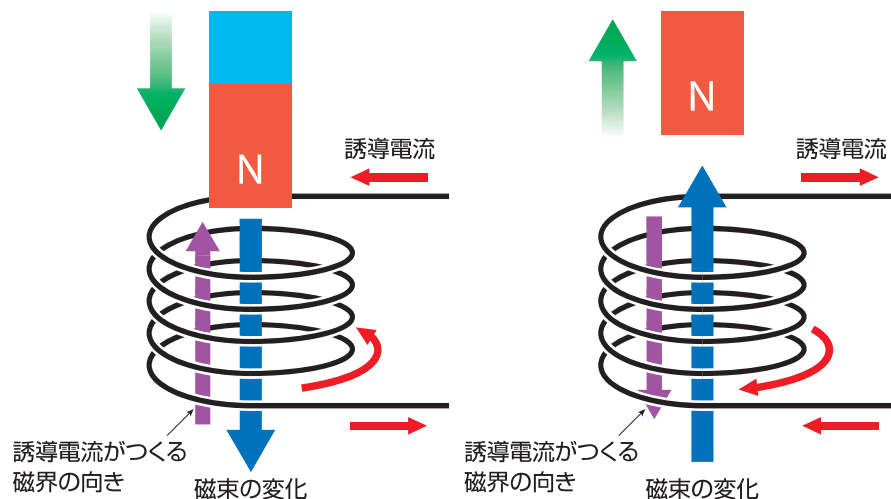
$\Delta \phi$: 磁束 [Wb]

Δt : 時間 [s]

これ重要! ファラデーの電磁誘導の法則は変圧器の原理を表す。変圧器はコイルの巻数が起電力に比例することを利用して電圧を変成している。誘導起電力の式のマイナスの符号は、後述するレンツの法則を示している。

11 レンツの法則

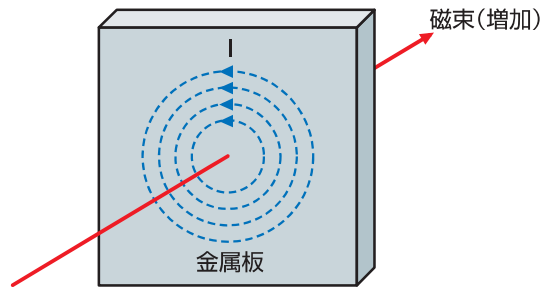
電磁誘導によって生じる起電力の向きは、磁束の変化を妨げる方向に発生する。この現象をレンツの法則という。



12 うず電流

図のように、金属板などの導体中を磁束が貫いている場合、その磁束が矢印の方向に増加して変化すると、レンツの法則により、その**変化を妨げる方向に起電力を生じ、磁束の周囲にう**

ず状の電流が流れる。この電流をうず電流(渦電流)という。導体にうず電流Iが流れると導体の抵抗Rとの間に、 I^2R のジュール熱が発生し、損失となる。**この損失をうず電流損**という。



13 自己インダクタンス

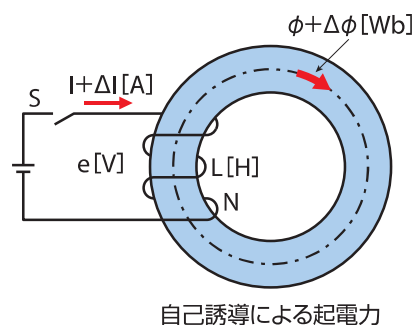
図において、巻数Nのコイルに流れる電流Iが Δt 秒の間に ΔI だけ変化し、コイルを貫く磁束 ϕ [Wb] が $\Delta \phi$ だけ変化したときの誘導起電力を e [V]とする。また、鉄心の透磁率が一定なら磁束 ϕ は電流Iに比例するので、電流の変化 ΔI と自己誘導起電力 e の関係を、比例定数Lを用いて表すと、次式のとおりとなる。

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ [V]}$$

この比例定数Lを自己インダクタンスといい、単位はヘンリー [H] で表す。1Hとは1秒間に1Aの電流が変化したとき、1Vの誘導起電力を生じさせる自己インダクタンスである。また、上式より自己インダクタンスは、次式のとおりとなる。

$$L = \frac{N \phi}{I} \text{ [H]}$$

すなわち、**自己インダクタンスは1Aあたりのコイルの磁束鎖交数 $N\phi$** で表される。



また、鉄心の透磁率を μ [H/m]、磁路の断面積を S [m²]、磁路の長さを l [m]とすると、自己インダクタンスL [H] は次式で表される。

$$L = \frac{\mu S N^2}{l} [\text{H}]$$

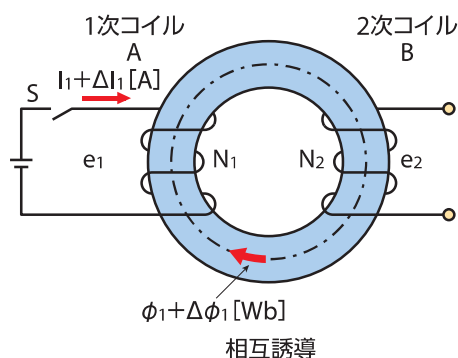
これ重要！ 透磁率とは磁束の通しやすさを示し、単位は[H/m]で表す。

覚え方！

みち 路で 当時 ダメな 人參売り にんじん
磁路長 透磁率 断面積 N^2

14 相互インダクタンス

図のように、同一の環状鉄心に2つのコイルA、Bがある。コイルAの電流 I_1 [A]を変化させると、コイルAに電磁誘導による起電力 e_1 [V]が発生する。また、コイルBを貫く磁束も変化するため、コイルBにも起電力 e_2 [V]が発生する。この現象を**相互誘導**という。



コイルBの誘導起電力 e_2 [V]は、コイルAに流れる電流 I_1 が Δt 秒間に ΔI_1 [A]だけ変化し、コイルA及びBを貫く磁束 ϕ_1 [Wb]が $\Delta \phi$ だけ変化したとき、次式のとおりである。

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi_1}{\Delta t} [\text{V}]$$

鉄心の透磁率が一定なら磁束は電流に比例するため、電流の変化 ΔI と誘導起電力 e との関係は、比例定数 M を用いて表すと、次式のとおりである。

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi_1}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} [\text{V}]$$

比例定数 M を相互インダクタンスという。

また、**相互インダクタンス**は、上式から次式のとおりとなる。

$$M = \frac{N_2 \phi_1}{I_1} [\text{H}]$$

これ重要！ 上式の相互インダクタンスの式は、添え字の数字に注意。相互インダクタンスは、1次側のコイルに電流を流したとき、1次側から発生する磁束と2次側のコイルの巻き数との錯交数である。

また、鉄心の透磁率を μ [H/m]、磁路の断面積を S [m²]、磁路の長さを l [m] とすると、相互インダクタンス M [H] は次式で表される。

$$M = \frac{\mu S N_1 N_2}{l} [\text{H}]$$

直流回路

1 合成抵抗

① 抵抗の直列接続

図のような抵抗 r_1 、 r_2 、 r_3 [Ω] を直列接続した回路に電圧 V [V] を加えたとき、 r_1 、 r_2 、 r_3 の端子間の電圧をそれぞれ v_1 、 v_2 、 v_3 とすると、次の関係が成り立つ。

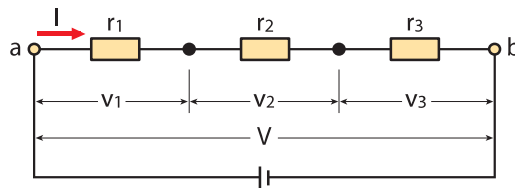
$$v_1 : v_2 : v_3 = r_1 : r_2 : r_3$$

すなわち、**直列接続した各抵抗の端子間の電圧は、各抵抗に比例**する。

また、各抵抗を直列接続した合成抵抗を R とすると、次の関係が成り立つ。

$$R = r_1 + r_2 + r_3 [\Omega]$$

すなわち、**直列接続の合成抵抗は、各抵抗の和**となる。



② 抵抗の並列接続

図のような抵抗 r_1 、 r_2 、 r_3 [Ω] を並列接続した回路に電圧 V [V] を加えたとき、 r_1 、 r_2 、 r_3 に流れる電流をそれぞれ I_1 、 I_2 、 I_3 [A] とすると、次の関係が成り立つ。

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3}$$

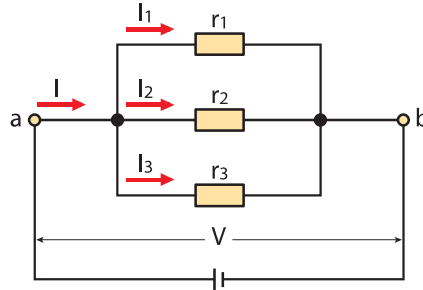
すなわち、**並列接続した各抵抗に流れる電流は、各抵抗に反比例**する。

また、各抵抗を並列接続した合成抵抗を R とすると、次の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} [\Omega]$$

すなわち、

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}} [\Omega]$$

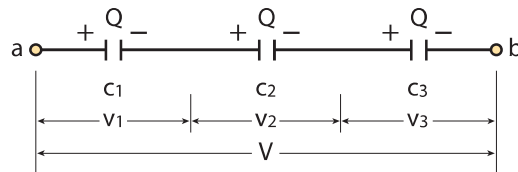


2 合成静電容量

① コンデンサの直列接続

図のような静電容量 c_1 、 c_2 、 c_3 のコンデンサを直列接続した回路に電圧 V [V]を加えたとき、各コンデンサに正負の電荷が誘導され、端子 ab 間に Q の電荷が蓄えられる。合成静電容量 C [F]とすると、各コンデンサの静電容量と次の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} [\text{F}] \quad C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} [\text{F}]$$

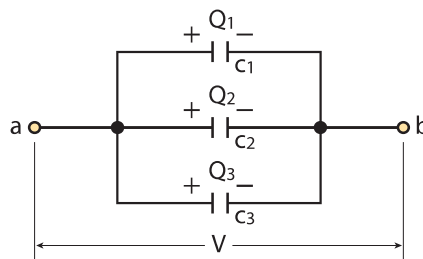


② コンデンサの並列接続

図のような静電容量 c_1 、 c_2 、 c_3 のコンデンサを並列接続した回路に電圧 V [V]を加えたとき、各コンデンサに電荷が蓄えられる。合成静電容量 C [F]とすると、各コンデンサの静電容量と次の関係が成り立つ。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 [\text{F}]$$

すなわち、**並列接続の合成静電容量は、各コンデンサの静電容量の和**となる。



③ 平行平板コンデンサの静電容量

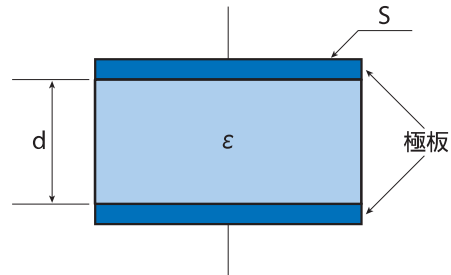
図のような平行平板コンデンサの静電容量 C [F] は次式で求められる。

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \text{ [F]}$$

S : コンデンサの極板の面積 [m²]

d : 極板間の距離 (誘電体の厚さ) [m]

ϵ : 誘電率 [F/m]



すなわち、**平行平板コンデンサの静電容量は、誘電率と極板の面積の積に比例し、極板間の距離に反比例**する。

これ重要! 誘電率とは電荷の蓄えやすさを示し、単位は[F/m]で表す。

覚え方!

だ**い**ぶ ゆ**で**た 麵
d**分**の 誘電率 面積

3 電磁エネルギーと静電エネルギー

① コイルに蓄えられる電磁エネルギー

自己インダクタンス L [H] のコイルに電流 I [A] を流したとき、コイルに蓄えられる電磁エネルギー W_L [J] は次式で表される。

$$W_L = \frac{1}{2} L I^2 \text{ [J]}$$

覚え方!

恋は半分、得る愛情

② コンデンサに蓄えられる静電エネルギー

静電容量 C [F] のコンデンサに電圧 V [V] を加えたとき、コンデンサに蓄えられる静電エネルギー W_c [J] は次式で表される。

$$W_c = \frac{1}{2} C V^2 \text{ [J]}$$

覚え方！

昆布半分、濃い煮汁

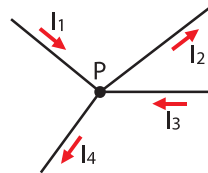
4 キルヒホッフの法則

① キルヒホッフの第1法則（電流の法則）

図のように、接続点Pに流入する電流が I_1 、 I_3 、流出する電流が I_2 、 I_4 のとき、P点において次式が成り立つ。

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

すなわち、回路網の任意接続点において、流入する電流の総和と流出する電流の総和は等しい。この関係をキルヒホッフの第1法則という。



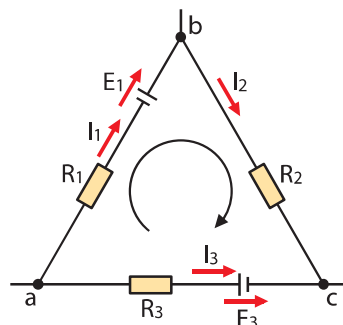
キルヒホッフの第1法則

② キルヒホッフの第2法則（電圧の法則）

図のようなabcaの閉回路において、閉回路中の電圧降下（抵抗と電流の積）と起電力には次式が成り立つ。

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 + (-R_3 I_3) = E_1 + (-E_3)$$

すなわち、回路網の任意の閉回路において、電圧降下の総和と起電力の総和は等しい。この関係をキルヒホッフの第2法則という。

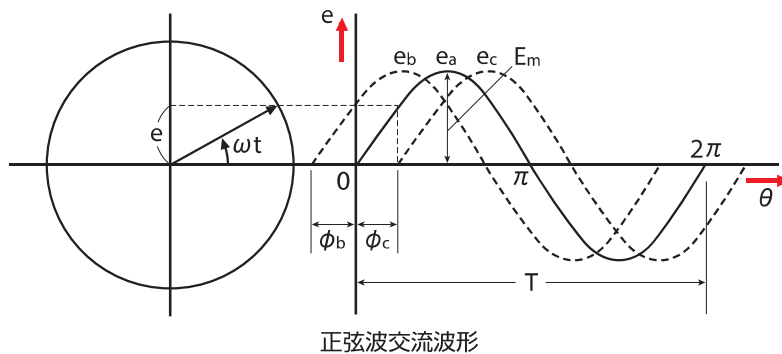


キルヒホッフの第2法則

交流回路

1 正弦波交流

交流とは、周期的に向き、大きさが変化する流れをいい、正弦波交流とは、周期的な変化が図のように正弦的曲線を描く交流をいう。



1周期に要する時間を周期、1秒間当たりの周期の回数を周波数という。周期を T [S]、周波数を f [Hz]とすると、周期と周波数の関係は次式のとおりである。

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

すなわち、**周波数は周期の逆数**である。

2 瞬時値、最大値、平均値、実効値

正弦波交流の大きさは、次の値で表す。

① 瞬時値

交流の電圧・電流は時間とともに変化する、各時刻の値を瞬時値という。交流の瞬時値は時間の関数となり、上図の正弦波交流の電圧の瞬時値は次式で表される。

$$e = E_m \sin \omega t \text{ [V]}$$

② 最大値

交流の正または負の最大値で、電圧の最大値を E_m [V]、電流の最大値を I_m [A]で表す。

③ 平均値

交流波形の**正の半周期の瞬時値の平均値**を平均値といい、正弦波交流の電圧の平均値 E_a 、電流の平均値 I_a は、それぞれ最大値を用いて次式で表される。

$$E_a = \frac{2}{\pi} E_m [\text{V}]、I_a = \frac{2}{\pi} I_m [\text{A}]$$

④ 実効値

交流波形の**各瞬時値の二乗の和の平方根**を実効値といい、正弦波交流の電圧の実効値 E 、電流の実効値 I は、それぞれ最大値を用いて次式で表される。

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m [\text{V}]、I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m [\text{A}]$$

3 波高率と波形率

① 波高率

交流波形の最大値と実効値の比をいい、次式で表される。

$$\text{波高率} = \frac{\text{最大値}}{\text{実効値}}$$

$$\text{正弦波交流の波高率} = \frac{\text{最大値}}{\text{実効値}} = \frac{E_m}{E_m/\sqrt{2}} = \sqrt{2} \div 1.414$$

② 波形率

交流波形の実効値と平均値の比をいい、次式で表される。

$$\text{波形率} = \frac{\text{実効値}}{\text{平均値}}$$

$$\text{正弦波交流の波形率} = \frac{\text{実効値}}{\text{平均値}} = \frac{E_m/\sqrt{2}}{(2/\pi)E_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \div 1.11$$

覚え方！

波高率：波高は実際(実最)

波形率：波形は平日(平実)

4 皮相電力・有効電力・無効電力

① 皮相電力

交流回路において、端子電圧の実効値を V [V]、そのときの電流の実効値を I [A]とすると、 **V 、 I の積を皮相電力 S [VA]**という。

$$S = VI [\text{VA}]$$

② 有効電力

交流回路において、**皮相電力 S [VA]**に**力率 $\cos\theta$** を乗じたものを**有効電力 P [W]**という。

$$P = S \cos\theta = VI \cos\theta \text{ [W]}$$

③ 無効電力

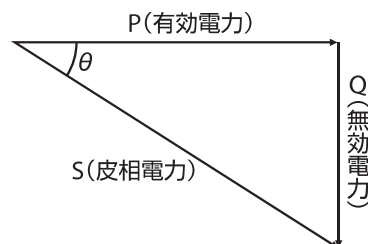
交流回路において、**皮相電力 S [VA]**に**無効率 $\sin\theta$** を乗じたものを**無効電力 Q [var]**という。

$$Q = S \sin\theta = VI \sin\theta \text{ [var]}$$

④ 電力ベクトル

皮相電力、有効電力、無効電力のベクトルは図のようになり、三平方の定理より次式が成り立つ。

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ [VA]}$$



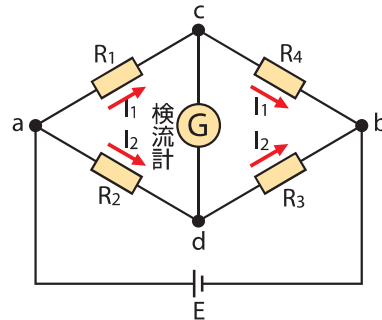
5 ブリッジ回路

図のように、4個の抵抗 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 と電源 E 、検流計 G を接続した回路をブリッジ回路という。検流計 G に流れる電流が0のとき、 cd 間の電位差は0であり、ブリッジが平衡する。このときの抵抗 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 には次式の関係が成り立つ。

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

memo

すなわち、ブリッジが平衡したとき、それぞれの対辺同士の抵抗の積は等しい。



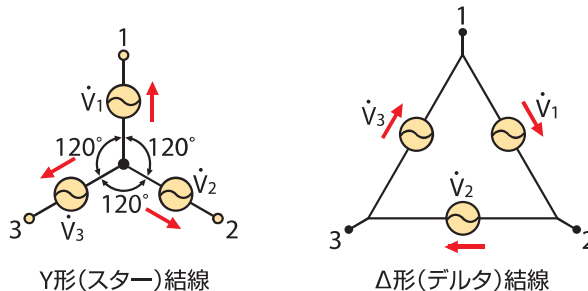
ホイートストンブリッジ

覚え方！

回路図の対辺同士の積が等しいと覚える。

6 三相交流回路

図のように、大きさが等しく、位相差が 120° ずつ異なる三つの正弦波交流を組み合わせたものを三相といい、三相による回路を三相交流回路という。また、一つの正弦波交流によるものを単相といい、単相による回路を単相交流回路という。



Y形(スター)結線

Δ形(デルタ)結線

7 三相交流回路の結線

三相交流回路の結線にはY結線、Δ結線があり、それぞれ電圧、電流、電力の関係は次のとおりである。

① Y結線(スター結線・星形結線)

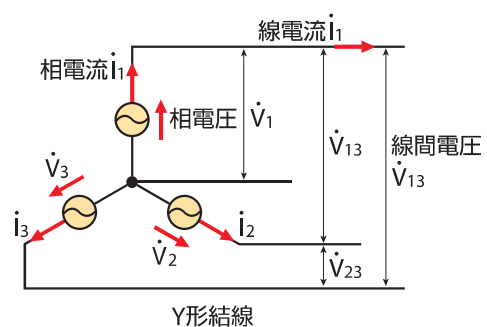
線間電圧 $=\sqrt{3} \times$ 相電圧

線電流 $=$ 相電流

三相電力

$= 3 \times \text{相電圧} \times \text{相電流} \times \text{力率} = 3 \times (\text{線間電圧} / \sqrt{3}) \times \text{線電流} \times \text{力率}$

$= \sqrt{3} \times \text{線間電圧} \times \text{線電流} \times \text{力率}$



Y形結線

② Δ結線(デルタ結線・三角結線)

線間電圧=相電圧

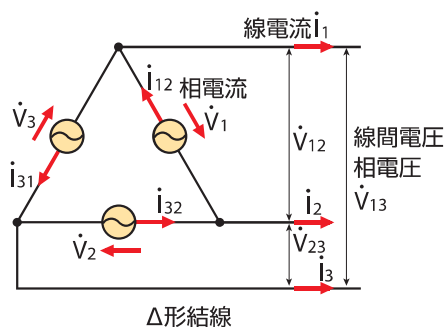
線電流 $=\sqrt{3}\times$ 相電流

三相電力

$=3\times$ 相電圧 $\times$ 相電流 $\times$ 力率

$=3\times$ 線間電圧 $\times$ (線電流 $/\sqrt{3})\times$ 力率

$=\sqrt{3}\times$ 線間電圧 $\times$ 線電流 $\times$ 力率

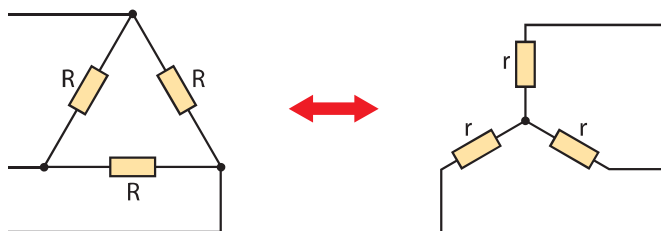


これ重要! Y結線もΔ結線も、線間電圧 V [V]、線電流 I [A] を用いると、
 $P=\sqrt{3}VI\cos\theta$ [W]

8 Δ-Y等価変換

図のような各相の抵抗が等しい平衡三相回路は、次の換算式により、Δ結線からY結線またはY結線からΔ結線へ、等価変換することができる。

$$r = \frac{R}{3}, R = 3r$$



Δ形結線とY形結線の換算

すなわち、各相の元の抵抗値を、**Δ結線からY結線へは1/3倍、Y結線からΔ結線へは3倍**することにより、等価変換することができる。

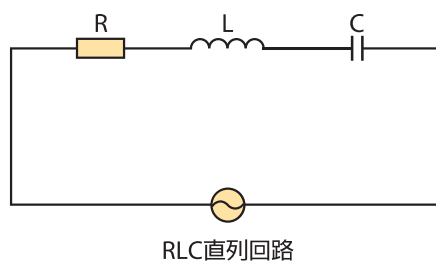
これ重要! Δ-Y等価変換は、各相のインピーダンスが等しい平衡三相回路においても、同様に成り立つ。

9 RLC直列回路のインピーダンス

図のような抵抗 R [Ω]、インダクタンス L [H]、静電容量 C [F] が直列に接続されたRLC直列接続回路のインピーダンス Z [Ω] は、次式で表される。

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \text{ [Ω]}$$

ただし、 ω : 角速度 [rad/s]、 X_L : 誘導リアクタンス [Ω]、 X_C : 容量リアクタンス [Ω]



上図において、電源電圧を V [V]とすると、回路に流れる電流 I [A]はオームの法則により、次式で求まる。

$$I = \frac{V}{Z} \text{ [A]}$$

また、力率 $\cos\theta$ は次式で求まる。

$$\cos\theta = \frac{R}{Z}$$

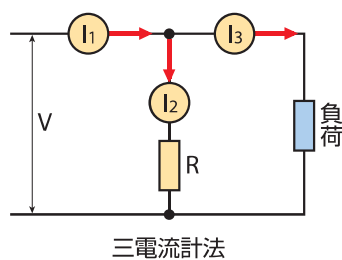
電気計測

1 電力の測定

① 単相交流電力の測定

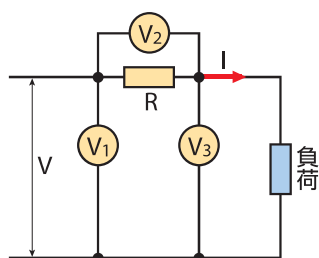
下図のように、負荷に並列に抵抗 R [Ω]を接続したとき、各部に流れる電流 I_1 、 I_2 、 I_3 [A]を用いて、負荷の電力 P [W]は次式で表される。このように各部に流れる2つの電流から単相電力を測定する方法を**三電流計法**という。

$$P = (I_1^2 - I_2^2 - I_3^2) \frac{R}{2} \text{ [W]}$$



下図のように、負荷に直列に抵抗 $R[\Omega]$ を接続したとき、各部にかかる電圧 V_1 、 V_2 、 V_3 [V]を用いて、負荷の電力 P [W]は次式で表される。このように各部にかかる3つの電圧から単相電力を測定する方法を**三電圧計法**という。

$$P = (V_1^2 - V_2^2 - V_3^2) \frac{1}{2R} [\text{W}]$$



三電圧計法

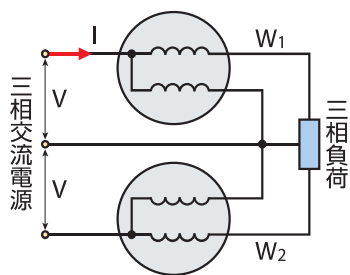
覚え方！

三電流計法、三電圧計法ともに、負荷の電力を表す公式は、
電圧・電流の添え字ではなく、回路図の位置(電源・抵抗・負荷)で覚える。

② 三相交流電力の測定

図のように、2つの単相電力計を接続し、 W_1 、 W_2 [W]の目盛の代数和で三相電力を求めることができる。2つの電力計で三相電力を測定する方法を**二電力計法**という。三相電力 P は次式で表される。

$$P = W_1 + W_2 = \sqrt{3} VI \cos \theta$$



二電力計法

memo

2 電気計器の種類と記号

下表に主な電気計器の種類と記号を示す。

種類	記号	指示	計器の動作原理
可動コイル形		直流 (平均値)	固定永久磁石の磁界と、可動コイル内の電流による磁界との相互作用によって動作する計器
可動鉄片形		交流 (実効値)	軟磁性材の可動片と固定コイル内の電流による磁界との間に生じる吸引力によって動作する計器
電流力計形		交直流 (実効値)	可動コイル内の電流による磁界と固定コイル内の電流による磁界との相互作用によって動作する計器
誘導形		交流 (実効値)	固定電磁石の交流磁界と、この磁界で可動導体中に誘導される渦電流との相互作用によって動作する計器
静電形		交直流 (実効値)	固定電極と可動電極との間に生じる静電力の作用で動作する計器
熱電形 直熱		交直流 (実効値)	導体内の電流の熱効果によって動作する計器
整流形		交流 (平均値×正弦波の波形率)	交流の電流又は電圧を測定するため、直流で動作する計器と整流器とを組合せた計器

3 分流器と倍率器

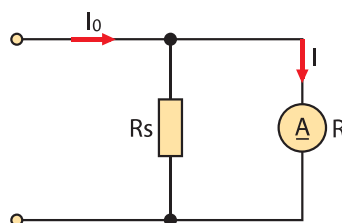
① 分流器

図のように、電流計の測定範囲拡大のため、電流計に並列に接続し、電流計に流れる電流を分流させる抵抗器を**分流器**という。下図の分流器の倍率 m は次式のとおりである。

$$m = \frac{I_o}{I} = \frac{R_s + R}{R_s}$$

I_o : 測定電流 [A]、 I : 電流計の電流 [A]、 R_s : 分流器の抵抗 [Ω]、

R : 電流計の内部抵抗 [Ω]

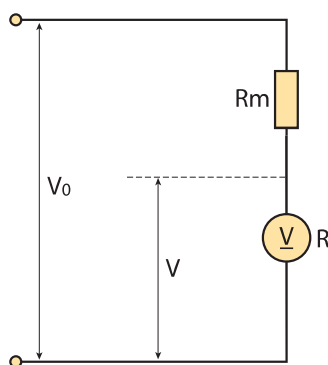


② 倍率器

図のように、電圧計の測定範囲拡大のため、電圧計に直列に接続し、電圧計にかかる電圧を分圧させる抵抗器を**倍率器**という。下図の倍率器の倍率 m は次式のとおりである。

$$m = \frac{V_0}{V} = \frac{R + R_m}{R}$$

V_0 : 測定電圧[V]、 V : 電圧計の電圧[V]、 R_m : 倍率器の抵抗[Ω]、
 R : 電圧計の内部抵抗[Ω]



これ重要！ 分流器・倍率器の倍率から、分流器・倍率器の抵抗値を問う問題が出題される。分流器・倍率器の倍率の公式を暗記していなくても、並列回路では抵抗に反比例して電流が分流し、直列回路では抵抗に比例して電圧が分圧されることから、導出することが可能である。

4 デジタル計器

デジタル計器の特徴は次のとおりである。

- ① 測定値がそのまま数値で表示されるので、個人差による**読取り誤差がなく**、測定時間が短い。
- ② アナログ機器は有効数字が2～3桁程度であるが、デジタル計器は**高精度**の測定の表示（有効数字3～6桁）ができる。
- ③ 測定値がデジタルデータになっているので、測定値の表示だけでなく、**記憶、記録、演算処理**などが容易に行える。
- ④ アナログ計器は単機能のものが多く、デジタル計器は**多機能**でいろいろの物理量を1台の計器で測定できるものが多い。
- ⑤ 入力変換部の**入力抵抗が高いので測定する回路に影響を与えにくい**。
- ⑥ 測定したデータがデジタル化されているので、他の電子機器や**コンピュータなどに接続**することができる。
- ⑦ アナログ計器に比べて**過電圧、過電流などの保護が容易**である。

- ⑧ アナログ計器は測定量の連続的変化を指針の振れで視覚的に判断できるが、デジタル計器では測定量が数値で表示されるため、**変化傾向を直観的に判断しにくい**。
- ⑨ **ノイズの影響を受けやすい**ので、ノイズ対策を要する。



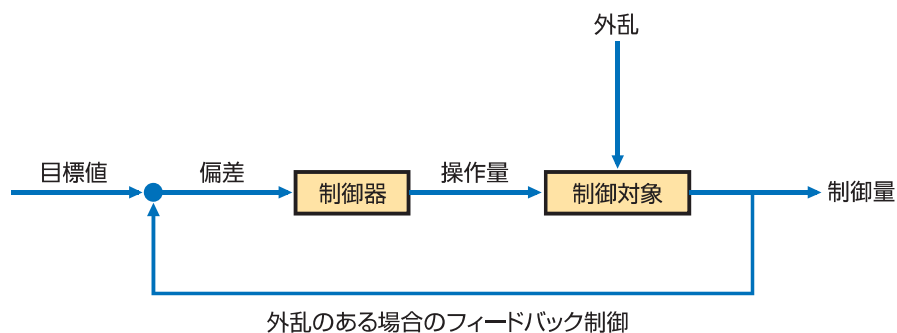
デジタルマルチメーター

自動制御

1 自動制御の種類

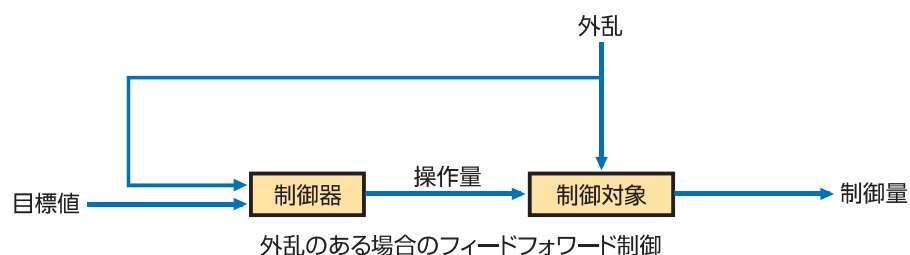
① フィードバック制御

図のように、制御量を目標値と比較し、それらを一致させるように操作量を制御して訂正動作を行う制御を**フィードバック制御**という。回路構成が**閉ループ**という特徴がある。



② フィードフォワード制御

図のように、**外乱が制御量に影響を及ぼす前に先回りして制御器に入力**し、訂正動作を行う制御を**フィードフォワード制御**という。



これ重要！ フィードフォワード制御は、フィードバック制御だけでは外乱に対して操作の遅れが生じるため、フィードバック制御と組み合わせて、フィードフォワード・フィードバック制御として多用されている。

③ シーケンス制御

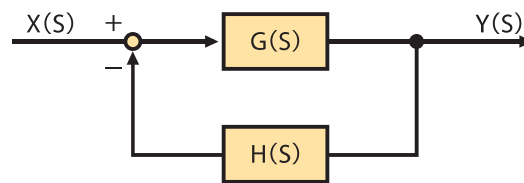
あらかじめ定められた順序に従って、制御の各段階を逐次進めていく制御を**シーケンス制御**という。回路構成が**開ループ**という特徴がある。

2 フィードバック制御の伝達関数

図のようなブロック線図のフィードバック制御の伝達関数は、次式のとおりである。

$$Y(S) = W(S) \cdot X(S)$$

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{G(S)}{1 + G(S)H(S)}$$



3 論理回路

シーケンス回路の基本となる論理回路は、次のとおりである。

① AND回路

入力条件がすべてONになったとき、出力がONとなる回路である。**接点を直列接続**した回路である。

② NOT回路

入力がOFFのとき出力がONとなり、入力がONのとき出力がOFFとなる回路である。否定回路ともいう。

③ NAND回路

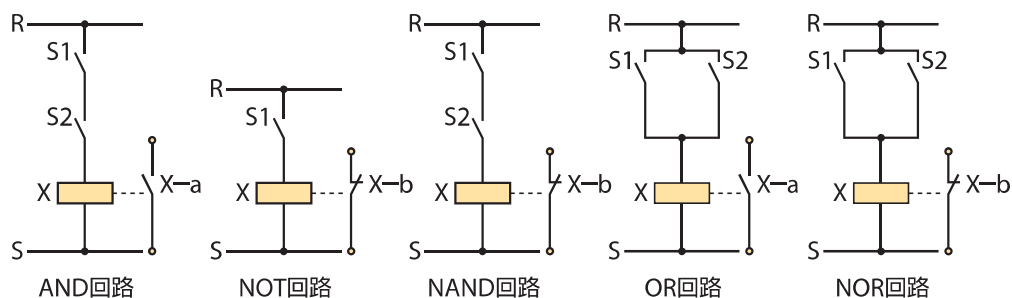
AND回路の出力を否定 (NOT) する回路である。入力条件がすべてONになったとき、出力がOFFとなる回路である。

④ OR回路

入力条件のいずれかONのとき、出力がONとなる回路である。**接点を並列接続**した回路である。

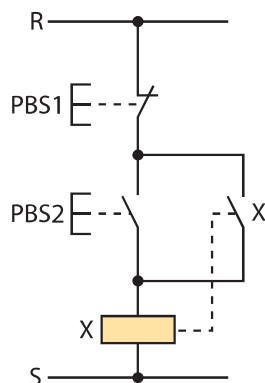
⑤ NOR回路

OR回路の出力を否定 (NOT) する回路である。入力条件のいずれかがONのとき、出力がOFFとなる回路である。



⑥ 自己保持回路

a接点（メーク接点）のPBS2を押してONすることにより、リレーXが励磁され、a接点のスイッチXがONとなり、PBS2から手を離してPBS2がOFFになっても、スイッチXにより**ON状態が保持される回路を自己保持回路**という。回路をOFFするときはPBS1を押してb接点（ブレイク接点）を開放する。



これ重要！ 動作すると接点が閉じる接点をa接点（メーク接点）、動作すると接点が開放する接点をb接点（ブレイク接点）という。

4 制御動作の種類

① 比例動作（P動作）

制御量と目標値との**偏差に比例**した操作量を出力する制御動作を**比例動作（P動作）**という。

② 積分動作（I動作）

制御量と目標値との**偏差の時間積分に比例**した操作量を出力する制御動作を**積分動作（I動作）**という。これにより、**オフセット（定常偏差）をなくすることができる**。

③ 微分動作（D動作）

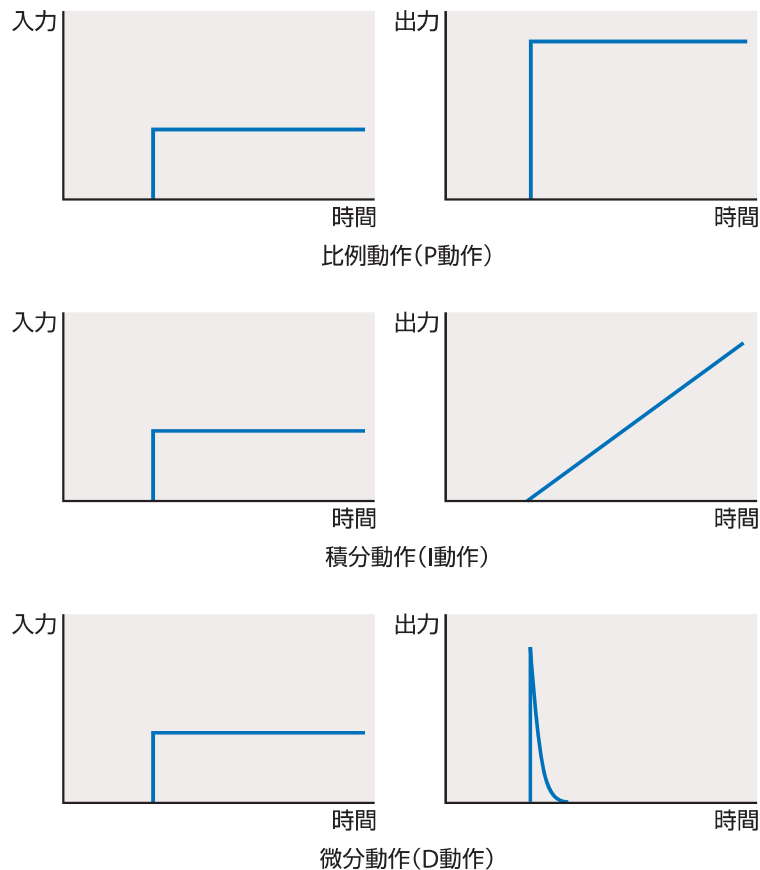
制御量と目標値との**偏差の微分値（速度）に比例**した操作量を出力する制御動作を**微分動作（D動作）**という。

④ PID動作

P動作とI動作とD動作を組合せた制御を**PID動作 (比例+積分+微分動作)**という。一般的に広く用いられている。

5 フィードバック制御系のステップ応答

フィードバック制御のシステムに階段状のステップ入力を加えたとき、どのような出力が応答されるかを示したものをステップ応答という。各制御動作のステップ応答は、次のとおりである。



6 自動制御系の分類

① 目標値による制御

- 定値制御：目標値が一定の制御
- 追値制御：目標値が時間変化する制御
- 追従制御：目標値が任意変化する制御

② 制御量による制御

- **プロセス制御**：制御量が**圧力、流量、水位、温度**などの制御
- **サーボ機構**：制御量が**位置、方位、姿勢、角度**などで、目標値が任意変化する制御
- 自動調整：制御量が主に速度、回転数、トルク、電圧などの制御

過去問題

1Ωの抵抗に5Vの電圧を1分間かけたとき、この抵抗に発生する熱量として、正しいものはどれか。

- (1) 5J
- (2) 25J
- (3) 300J
- (4) 1,500J

解答と解説

正解(4)

ジュールの法則より、発生する熱量 Q [J] は、次式により求められる。

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \text{ [J]}$$

I : 電流 [A]、 R : 抵抗 [Ω]、 t : 時間 [s]。

電流はオームの法則より、

$$I = V/R = 5/1 = 5 \text{ [A]}$$

$$Q = 5^2 \times 1 \times 60 = 1,500 \text{ [J]}$$

過去問題

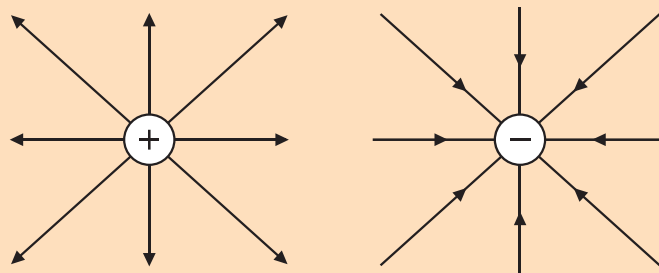
静電界における電気力線に関する記述として、不適当なものはどれか。

- (1) 電気力線は、等電位面と垂直に交わる。
- (2) 電気力線は、負電荷に始まり正電荷に終わる。
- (3) 電気力線の密度は、その点の電界の大きさを表す。
- (4) 電気力線の向きは、その点の電界の方向と一致する。

解答と解説

正解(2)

電気力線は、正電荷から始まり負電荷に終わる。



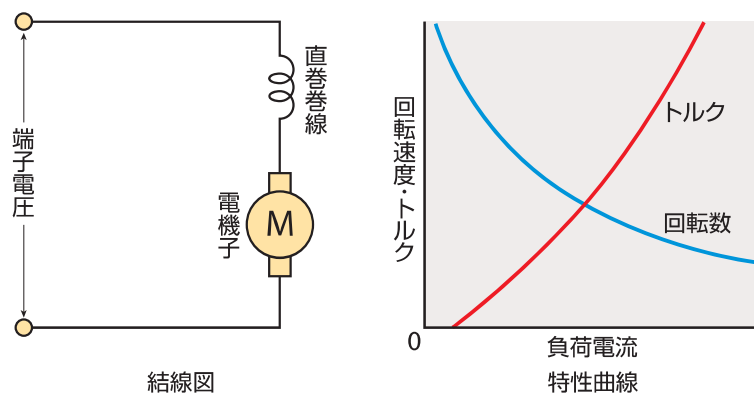
点電荷1個(正、負)の電気力線

直流電動機

1 直流電動機の特性

① 直巻電動機

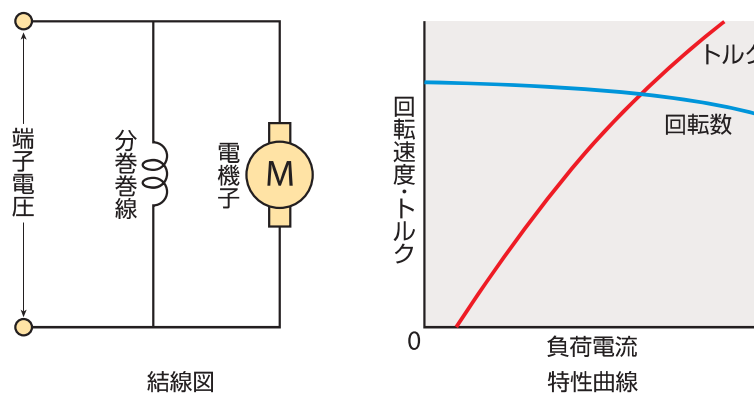
下の結線図のように、**直巻巻線（界磁巻線）**と**電機子**を**直列に接続**する直流電動機を直巻電動機という。下の特性曲線のように、**負荷電流が増加すると回転速度が減少する直巻特性**を持ち、速度が変化する変速度電動機である。



直巻電動機の結線図と特性曲線

② 分巻電動機

下の結線図のように、**分巻巻線（界磁巻線）**と**電機子**を**並列に接続**する直流電動機を分巻電動機という。下の特性曲線のように、**負荷電流が変化しても回転速度はあまり変化しない分巻特性**を持ち、速度がほぼ一定の定速度電動機である。



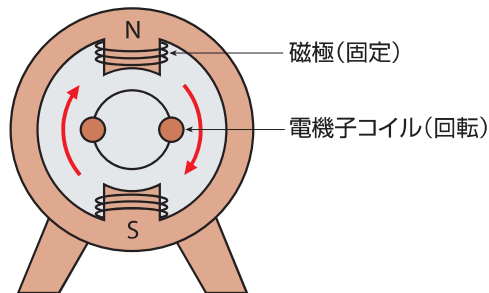
分巻電動機の結線図と特性曲線

同期発電機

1 同期発電機の構造

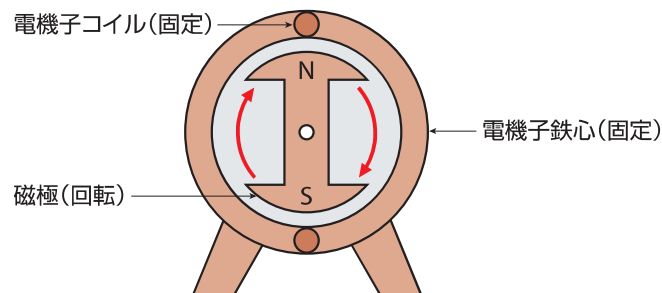
① 回転電機子形

図のように**磁極が固定**されており(これを固定子という)、**電機子が回転**し(これを回転子という)、電機子コイルに交流電圧が発生する。回転子である電機子が大きくなる大容量機には不適であり、特殊用途の小容量機に用いられる。



② 回転界磁形

図のように**電機子が固定**されており、**磁極が回転**し、電機子コイルに交流電圧が発生する。容量の大きな電機子を固定し、回転させる必要がないので、一般用途に広く用いられている。



2 励磁方式

同期発電機の界磁巻線に直流電流(界磁電流)を供給して、磁束を発生させる装置を励磁装置という。励磁方式には次のものがある。

これ重要！ 同期発電機は交流を出力する交流機であるが、励磁に必要な電力は直流である。方向が一定の直流励磁による磁界を回転させることにより、回転運動に由来する交流を発生させている。

① 直流励磁方式

主機に直結した直流発電機により直流電流(界磁電流)を供給する方式である。**整流子・ブラシ・スリップリング**などの摺動集電部があるので、**維持管理に手間**がかかる。

② 交流整流励磁方式

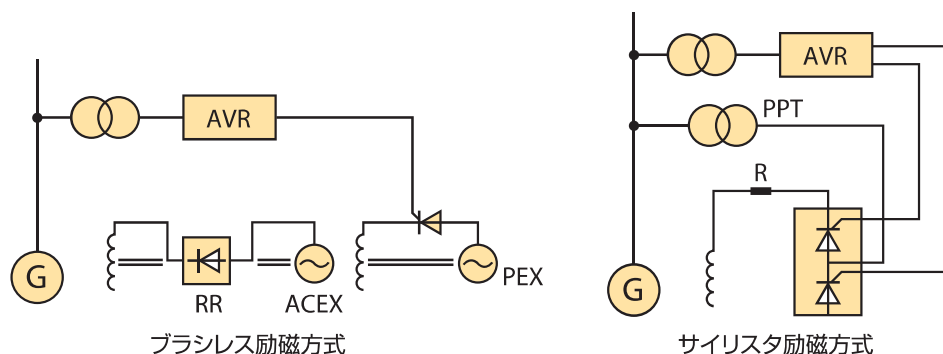
主機に直結した交流発電機の発生する交流を、整流器で直流に変換し、**ブラシ・スリップリングを介して**直流電流(界磁電流)を供給する方式である。

③ ブラシレス励磁方式

主機に直結した交流発電機の出力を、同一回転軸上に取付けた整流器で直流に変換し、スリップリングを介さずに、直流電流(界磁電流)を供給する方式である。励磁用発電機・整流器も主機と一緒に回転しているため、**ブラシなどの摺動集電部を必要としない**。

④ サイリスタ励磁方式

主機の交流出力をサイリスタ整流器で直流に変換し、直流電流(界磁電流)を供給する方式である。**静止機器**であるサイリスタ整流器による方式で、**回転機が不要**であるため、**即応性が良い、維持管理が容易**であるなどの特長を有している。



ただし、AVR : 自動電圧調整装置
ACEX : 交流励磁機
PEX : 副励磁機
RR : 回転整流器
R : スリップリング
PPT : 励磁用変圧器

励磁回路構成図の代表例

これ重要！ 摺動集電部がないのがブラシレス、回転機がないのがサイリスタ。

memo

3 同期速度

交流発電機である同期発電機は、電力系統と連系するために一定の周波数で運転している。電力系統の周波数と同期するための発電機の回転速度を**同期速度**という。同期速度 N_s は、次式で表される。

$$N_s = \frac{120f}{p} [\text{min}^{-1}]$$

N_s : 同期速度 $[\text{min}^{-1}]$ 、 f : 周波数 $[\text{Hz}]$ 、 p : 同期機の極数

4 同期インピーダンス

同期発電機のインピーダンスを**同期インピーダンス**といい、次式で表される。

$$Z_s = \frac{V_n}{(\sqrt{3} \cdot I_s)} [\Omega]$$

Z_s : 同期インピーダンス $[\Omega]$ 、 V_n : 定格電圧 $[\text{V}]$ 、 I_s : 短絡電流 $[\text{A}]$

5 %インピーダンス

線路や機器において、定格電流が流れているときのインピーダンス降下と定格相電圧との比を百分率で表したものを**%インピーダンス(百分率インピーダンス)**という。 %インピーダンス $\%Z [\%]$ は次式のとおりである。

$$\%Z = \frac{Z_s I_n}{\frac{V_n}{\sqrt{3}}} \times 100 [\%]$$

Z_s : 同期インピーダンス $[\Omega]$ 、 V_n : 定格電圧 $[\text{V}]$ 、 I_n : 定格電流 $[\text{A}]$

6 短絡比

線路や機器の短絡電流と定格電流の比を**短絡比**といい、次式で表される。

$$K_s = \frac{I_s}{I_n}$$

K_s : 短絡比、 I_s : 短絡電流 $[\text{A}]$ 、 I_n : 定格電流 $[\text{A}]$

7 短絡比と同期インピーダンス等の関係

短絡比	同期インピーダンス	リアクタンス	安定度	機械
大	小	小	高い	鉄機械
小	大	大	低い	銅機械

8 電圧変動率

発電機や変圧器において、定格負荷から無負荷にしたときの電圧変動の割合を**電圧変動率**といい、次式で表される。

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_n}{V_n} \times 100 [\%]$$

ε : 電圧変動率 [%]、 V_n : 定格端子電圧 [V]、 V_0 : 無負荷端子電圧 [V]

9 並列運転の条件

同期発電機の並列運転の条件は次のとおりである。

- ① 各発電機の**起電力の大きさが等しい**こと。
- ② 各発電機の**周波数が等しい**こと。
- ③ 各発電機の起電力が**同相**であること。
- ④ 各発電機の端子電圧の実効値が等しいこと。
- ⑤ 各発電機の電圧波形が等しいこと。
- ⑥ 各発電機の相回転が同じであること。

これ重要！ 同期発電機の並列運転の条件は、電圧波形が一致すること。

10 安定度の向上策

運転中の同期発電機に負荷変動があっても、安定して運転できる度合いを安定度という。安定度には、**負荷変動が緩やかなときの定態安定度**と、**負荷変動が急激な過渡安定度**がある。安定度の向上策は、次のとおりである。

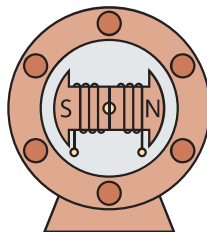
- ① 同期**リアクタンスを小さく**する。
- ② 励磁装置の**応答速度を速く**する。
- ③ 逆相、零相インピーダンスを大きくする。
- ④ 回転部の慣性力を大きくし、**はずみ車効果**を大きくする。

これ重要！ インピーダンスは抵抗とリアクタンスから成り、コイルである巻線のインピーダンスはほとんどリアクタンス成分であるため、同期リアクタンスを小さくすることは、同期インピーダンスを小さくすることになる。

同期電動機

1 同期電動機

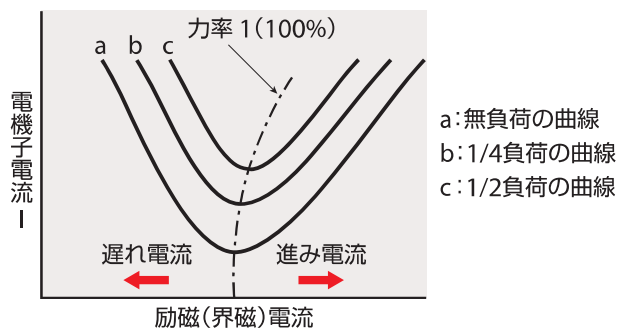
同期電動機と同期発電機は基本構造が同一で、極数と周波数による同期速度で定速回転する。固定子に三相交流電圧を印加すると回転磁界を生じ、この回転磁界により固定子の電磁石が吸引されて同期速度で回転する。



同期電動機

2 同期電動機のV曲線

同期電動機の回転子の界磁巻線の電流（励磁電流または界磁電流）を増減することにより、位相を調整することが可能である。同期電動機の励磁電流と位相特性の関係を表す曲線を**位相特性曲線**という。また、曲線がV字形になることから**V曲線**ともいう。下の図のように、**励磁電流を小さくすると電機子電流は遅れ電流**となり、**励磁電流を大きくすると電機子電流は進み電流**となるため、電機子電流の位相を調整することが可能である。この同期電動機の位相調整機能を利用して位相を調整するものを、**同期調相機**という。同期調相機は、進相も遅相も連続的に調整することが可能である。



同期電動機の位相特性曲線

3 同期電動機の始動法

同期電動機は、固定子による回転磁界に回転子が追従することにより回転する。しかし、始動時は、回転子が停止した状態からでは回転磁界に追従することができないため、始動トルクが生まれず始動することができない。このため、同期電動機を始動するために次のような方法が用いられている。

① 自己始動法

回転子に施されている制動巻線を利用し、**誘導電動機として始動**し同期速度付近まで加速してから回転子側を励磁する方法である。始動トルクが小さいもので無負荷または軽負荷の状態では始動する。小容量の電動機に用いられる。

② 始動電動機法

始動用の直流電動機や三相誘導電動機を直結して始動する方式で、同期速度に達したら同期電動機として運転する。

③ 低周波始動法

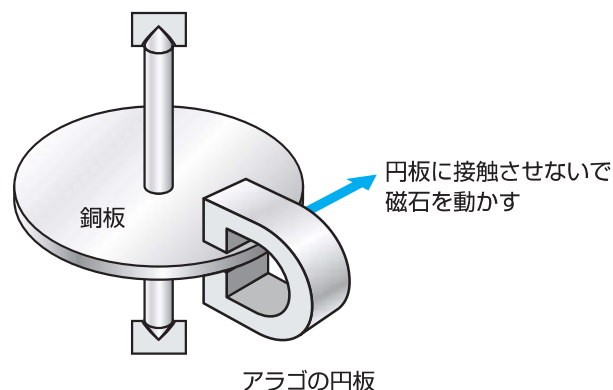
始動用の電動機と直結した2台の同期電動機のうち1台を発電機として**低周波にて運転**し、同期速度に達した後、電源を投入して同期電動機として運転する方法である。

これ重要！ 同期電動機は始動トルクがないため、何らかの方法により同期速度まで加速させる必要がある。自ら始動トルクのある誘導電動機として始動するか、別の始動用電動機で始動してもらうか、磁界にはじめはゆっくり回転してもらうか(低周波)が必要である。

誘導電動機

1 誘導電動機の原理

磁性体ではない導体の銅やアルミでできた円板を、磁石を接触させないように挟んで磁石を動かすと、円板に**うず電流が誘導**される。そして、このうず電流によって、**円板には磁石の移動方向に力が発生**し、円板は磁石に追従して回転する。この円板の原理をアラゴの円板といい、誘導電動機の原理である。

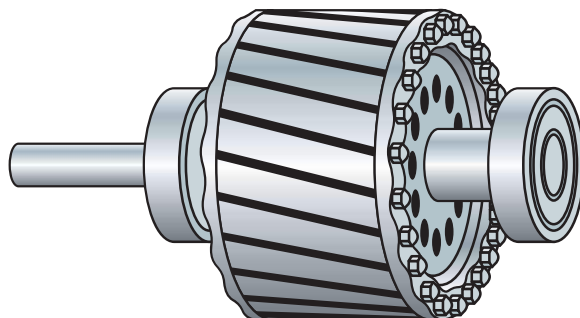


これ重要！ アラゴの円板の原理は誘導形電力量計に应用されている。

2 誘導電動機の種類

① かご形誘導電動機

回転子鉄心の溝に銅棒を差し込み、その両端を短絡環で接続して、かご状にした回転子を持つ誘導電動機である。**構造が簡単で堅固**であるという特長を有している。

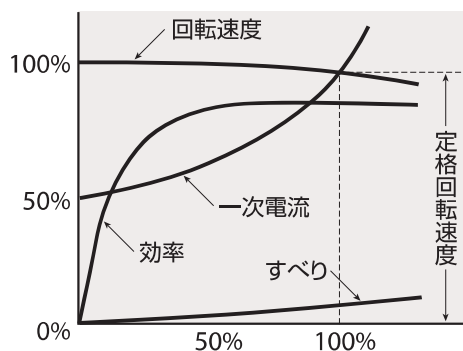


② 巻線形誘導電動機

巻線を施した回転子（巻線形回転子）を持つ誘導電動機である。巻線形回転子は、スリップリングを介して外部回路と接続することができるので、抵抗を接続するなどして、**始動特性の改善や速度制御が可能**である。

3 誘導電動機の出力量特性曲線

誘導電動機の回転速度、効率、一次電流、すべりの諸量が、出力によってどのように変化するかを表すと、下図のとおりとなる。図より、**回転速度はほぼ一定であるが、効率は、軽負荷範囲において急激に低下**する。



誘導電動機の出力量特性曲線

また、すべりは次式で表される。

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

n_0 : 同期速度 (回転磁界の回転速度)

n : 回転子の回転速度