

# 第4編 電 氣



中央操作室

# 第1章 電気通論

## 第1節 電気と磁気

### 1 静電気

エボナイト棒を絹布でこすると、エボナイト棒も絹布も軽い物体を吸い付けるが、これはエボナイト棒に負の電気が、また、絹布に正の電気が現れたためである。このように物体が電気を帯びることを帯電という。

帯電した2つの物体を近づけると相互に力が働くが、同じ極性のもの同士は反発し合い、異なる極性のもの同士は引き合う。また、この力は帯電体の持つ電気量に比例し、両帯電体間の距離の2乗に反比例する。これを電荷に関するクーロンの法則といい、次式で表される。

$$F_e = K_e \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \text{ [N]} \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし  $F_e$ : 2つの帯電体間に働く力 [N]

$Q_1, Q_2$ : 帯電体のそれぞれの電気量 [C] (クーロン)

$r$ : 帯電体の距離 [m]

$K_e$ : 比例定数で帯電体が真空中 (空気中でもほぼ同じ) にあるとき  $9 \times 10^9$

### 2 抵抗

パイプの中を水が流れる場合、パイプの太さ、長さ、および内面の状態などに応じて水流は抵抗を受けるが、電線の中を電流が流れる場合にも同様に電氣的な抵抗を受ける。これを電気抵抗または単に抵抗といい、オーム [ $\Omega$ ] なる単位を用いる。抵抗は電線の長さに比例し、断面積に反比例する。

すなわち、導体の長さ  $l$  [m]、断面積  $S$  [ $\text{m}^2$ ] とするとき抵抗  $R$  [ $\Omega$ ] は次式で表される。

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S} \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、 $\rho$ : 導体 1 [m] 当たりの抵抗で固有抵抗という [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]。

$\sigma$ : 導電率といい単位は [ $1/(\Omega \cdot \text{m})$ ] であって  $\sigma = 1/\rho$  の関係がある。

$l$ : 導体の長さ [m]

$S$ : 導体の断面積 [ $\text{m}^2$ ]

一般に金属導体の抵抗は温度の上昇とともに増加し、炭素や電解液の抵抗は減少する。導体の温度が  $1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] 上るときに抵抗が増す割合をその導体の抵抗の温度係数といい、通常  $a$  で表す。  $0$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] における抵抗を  $R_0$  [ $\Omega$ ]、  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] における抵抗を  $R_t$  [ $\Omega$ ] とすると、実用上次の式が成り立つ。

$$R_t = R_0 (1 + at) \dots\dots\dots (4.3)$$

### 3 電圧と電流

電気も水の場合と同様に高い電位のところから、低い電位のところへ流れるが、この量も水と同様に電位の差の大小、両電位を結ぶ導体の抵抗によって変わる。この電位の差を電位差、一般に電圧といい、ボルト [V] という単位で表す。また、電気回路の中を流れる電気の流れを電流といい、アンペア [A] という単位で表す。

電圧  $V$  [V]、電流  $I$  [A]、抵抗  $R$  [ $\Omega$ ] の間に次の関係がある。これをオームの法則という。

$$I = \frac{V}{R} \quad (R = \frac{V}{I} \text{ または } V = IR) \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

### 4 コンデンサ

2枚の金属板を絶縁物を介して相対させ、これに直流電圧を加えると各金属板に電荷が蓄積される (図4.1 参照)。このように、電圧を加えると電荷が蓄積されるようなものをコンデンサという。

コンデンサに蓄えられる電荷を  $Q$  [C]、加える電圧を  $V$  [V] とすると、

$$Q = CV \text{ [C]}, \quad C = \frac{Q}{V} \text{ [F]} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

なる関係が成り立つ。ここで  $C$  は比例定数で静電容量といい、ファラド [F] なる単位を用いる。1ファラドは、1クーロン (C) の電気量を充電したときに1ボルト (V) の直流の電圧を生ずる2導体間の静電容量である。

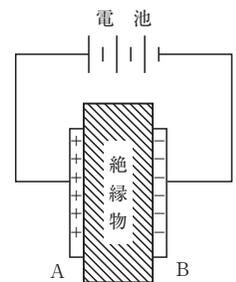


図4.1 コンデンサ

### 5 電流の作用

#### (1) 電流の熱作用

抵抗部分に電流を通ざると熱を発生する。これをジュール熱という。

一般に電気抵抗  $R$  [ $\Omega$ ] の導体中を  $I$  [A] の電流が  $t$  [s] 間流れるとき発生する熱量  $H$  [J] は実験上、

$$H = RI^2t \text{ [J]} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

となる。これをジュールの法則という。オームの法則から  $RI = V$  であるから (4.6) 式は

$$H = RI^2t = VI t = Pt \text{ [J]} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

となる。ここに、

$$P = VI \text{ [W]} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

は、単位時間当たりの電気エネルギーを表すもので、これを電力という。電力の単位にはワット [W] を用い、1 [V] の電圧で1 [A] の電流を流すときの電力に等しい。

また、 $P$  [W] の電力によって  $t$  [s] 間に伝送されるエネルギーを電力量といい、(4.7) 式より  $Pt$  [J] あるいは  $Pt$  [Ws] となる。

$$1 \text{ [Wh]} = 3600 \text{ [Ws]} = 3.6 \times 10^3 \text{ [J]}$$

$$1 \text{ [kWh]} = 10^3 \text{ [Wh]} = 3.6 \times 10^6 \text{ [J]} \dots\dots\dots (4.9)$$

## (2) 電流の化学作用

硫酸銅溶液の中に銅板と炭素棒とを浸けて、銅板を電池の+に炭素棒を-につなぎ、電流を流すと、炭素棒の表面に銅が付着するが、これは電気エネルギーが化学的エネルギーに消費されたためであり、また、電気エネルギーを化学的エネルギーとして蓄えておき、必要なときに再び電氣的エネルギーとして取出すこともできる。これらの作用は電流の化学作用にもとづくものである。各種の電気メッキ、蓄電池等はこのような電流の化学作用を利用したものである。

## (3) 電流の磁気作用

電流の流れている電線のまわりに磁針を置くと磁石が円周方向に振れる。従って、電流には磁石と同じような働きがあることがわかる(図4.2参照)。電流による磁力の強さは電流の大きさに比例し、その時の磁力線の方向は、電流の方向と直角の関係にある。電流の方向と磁力線の方向との関係を、図4.3に示す。

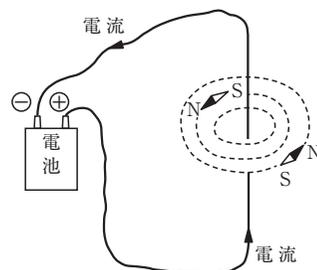


図4.2 電流と磁力線

1つの右ねじについて考えると、右ねじの進む方向に電流が流れる場合、ねじの回転する方向が磁力線の方向になる。これをアンペアの右ねじの法則という。

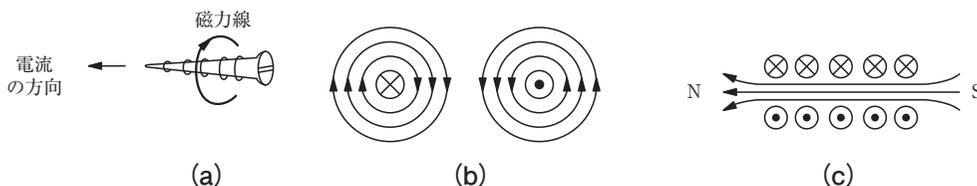


図4.3 電流と磁力線の方向 (アンペアの右ねじの法則)

図4.3 (b) および (c) において、 $\otimes$ 印は紙面(手前)から背面(向側)に向かって電流が流れる方向を示し、 $\odot$ 印は逆に紙の背面より紙面に向かって電流が流れてくる方向を示す。

## 第2節 電磁誘導

### 1 電磁誘導

#### (1) 磁界中を導線が運動する場合の誘導起電力

図4.4のように2つの磁石の間に導体をおいて、磁力線を切るように動かすとその導体に起電力が発生する(図4.4参照)。これが発電機の原理であり、このようにして起こされたものを誘導起電力、電流を誘導電流という。

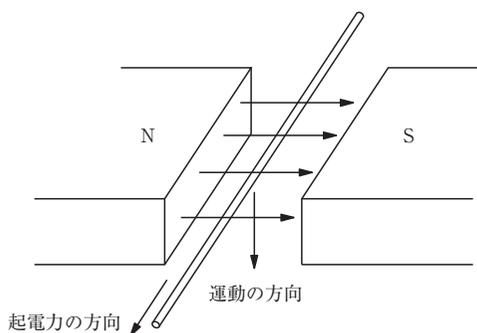


図4.4 磁界中の導体の誘導起電力

右手の人差指，親指，中指をそれぞれ直角になるように曲げ，人差し指を磁力線の方向に，親指を運動の方向に向けると中指の方向が起電力の方向となる。これをフレミング右手の法則といい，右(みぎ)が起電力(きでんりょく)で覚えやすい。

**(2) 電磁力とフレミング左手の法則**

上記の図4.4と同様に，磁力線内に置かれた導体に電流を流すと，この導体は磁力線と直角の方向に力を受ける。これが電動機の原理であり，このような磁力線と電流との間に働く力を電磁力という。

左手の人差指，親指，中指をそれぞれ直角になるように曲げ，人差し指を磁力線の方向に，中指を電流の方向に向けると親指の方向が力の方向となる。これをフレミングの左手の法則という。

**2 自己誘導と相互誘導**

**(1) 自己誘導**

電流の流れている1つの回路は，それ自身の電流の作る磁束と鎖交している。従って，電流が変化するとその磁束が変化するため，この回路に電磁誘導にもとづく起電力が誘導される。このように電流が変化するときその回路自身の中に，その電流による磁束の変化を妨げるような方向の起電力を誘導する作用を自己誘導作用という。

1つのコイルの自己誘導作用による誘導起電力  $e$  [V] は，そのコイルに流れる電流  $I$  [A] が， $\Delta t$  [s] 間に  $\Delta I$  [A] だけ変化したために，そのコイルと鎖交する磁束  $\phi$  [Wb (ウェーバ)] だけ変化したとすると，巻数  $N$  のコイル全体として

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \text{ [V]} \dots\dots\dots (4.10)$$

となる。また一般的には  $\Delta \phi$  は  $\Delta I$  に比例するから

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ [V]} \dots\dots\dots (4.11)$$

この  $L$  を自己インダクタンスと呼び，ヘンリー [H] を単位として用いる。1ヘンリーは，1秒間に1アンペアの割合で変化する電流が流れるときに1ボルトの起電力を誘導するような閉回路(コイル)の自己インダクタンスであり，Hの次元は  $V / (A/s) = V \cdot A^{-1} \cdot s$  である。

**(2) 相互誘導**

電磁誘導の場合，1つの回路に流れる電流の変化のために，この電流による磁束と鎖交する他の回路に起電力を誘導する作用を相互誘導という。

図4.5において，コイルPの電流が  $\Delta t$  [s] 間に  $\Delta I$  [A] だけ変化したため，コイルSと鎖交する磁束が  $\Delta \phi$  [Wb] だけ変化したも

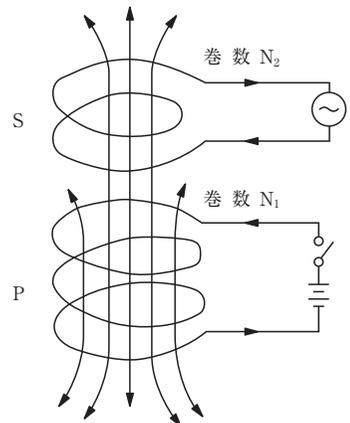


図4.5 相互誘導

のとするとき、Sに誘導される起電力 $e$  [V] はその巻数を $N_2$ とするとき、

$$e = -N_2 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ [V]} \dots\dots\dots (4.12)$$

となる。この比例定数 $M$ を相互インダクタンスといい、自己インダクタンスと同様にヘンリー [H] を単位とする。

## 第3節 直流回路

### (1) 直流回路

電流には大別して直流と交流の2種類がある。

直流とは、乾電池や蓄電池のように + 極と - 極とが常に一定の電源から流れ出る電流で、方向が不変である。この場合の電源を直流電源という。直流電源は、乾電池、蓄電池のほか直流発電機、水銀整流器や半導体整流器のように、交流を整流することによっても得られる。

### (2) 抵抗の直列接続

数個の抵抗 $R_1, R_2, R_3 \dots\dots\dots$ が直列に接続されている場合の電圧、電流、抵抗の関係は、オームの法則により次のようになる (図4.6参照)。

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + V_3 + \dots\dots \\ &= IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots\dots \\ &= I (R_1 + R_2 + R_3 + \dots\dots) \\ \therefore I &= \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots\dots} = \frac{V}{R} \text{ [A]} \dots\dots\dots (4.13) \end{aligned}$$

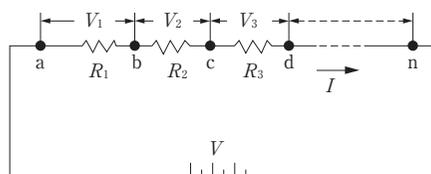


図4.6 抵抗の直列接続

ただし  $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots\dots$  [ $\Omega$ ]

ここで、 $R$ を端子a, n点から見た合成抵抗という。抵抗が直列接続の場合の合成抵抗は、各抵抗の和となる。

### (3) 抵抗の並列接続

数個の抵抗 $R_1, R_2, R_3 \dots\dots\dots$ が並列に接続されているとき (図4.7参照) の電圧、電流、抵抗の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V}{R_2}, \quad I_3 = \frac{V}{R_3} \dots\dots \\ I &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots\dots \\ I &= \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} + \dots\dots \\ \therefore I &= V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots\dots \right) = \frac{V}{R} \text{ [A]} \quad (4.14) \end{aligned}$$

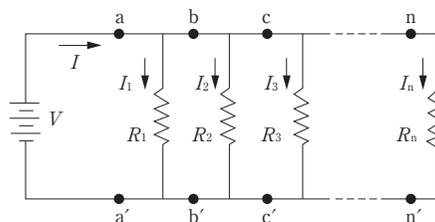


図4.7 抵抗の並列接続

ただし  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} +$

抵抗が並列接続では、合成抵抗の逆数は各抵抗の逆数の和となる。

## 第4節 交流回路

### 1 交流

#### (1) 正弦波交流

直流の場合は電流の方向が一定であり、従って電圧の方向も一定であるが、一方、交流の場合は時間とともに周期的に大きさも流れの方向も変化するが、1周期を平均すると電圧と電流がともに零となる（図4.8参照）。特に図のように正弦波（サインカーブ）状に変化するものを正弦波交流といい、我々の家庭や坑内外でも安全灯などに使用されている。

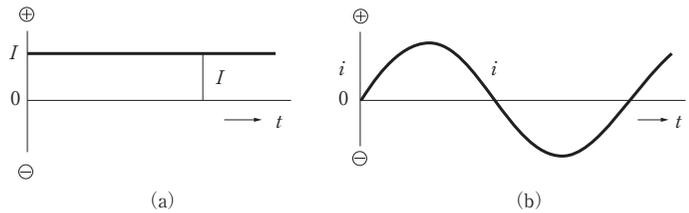


図4.8 電圧・電流の流れ比較：(a) 直流，(b) 交流

交流がその1周期を完了するに必要な時間を周期という。また、1 [s]

間に電圧や電流の方向が変化する数を周波数といい、ヘルツ [Hz] で表す。中部地方より東日本では50 [Hz]，西日本では60 [Hz] が使用され、これらを商用周波数という。

正弦波交流電圧の最大値を  $E_m$  [V]，角速度を  $\omega$  [rad/s] としたとき、電圧の瞬時値  $e$  [V] は次の式で表される。

$$e = E_m \sin \omega t \text{ [V]} \dots\dots\dots (4.15)$$

また周波数を  $f$  [Hz] とすると、 $\omega = 2\pi f$  であるから、

$$e = E_m \sin 2\pi f t \text{ [V]} \dots\dots\dots (4.16)$$

となる。

周期の等しい2つの交流があるとき、図4.9において、 $e_1$ と $e_2$ のような場合を $e_1$ と $e_2$ とは同相であるといい、 $e_1$ と $e_3$ の間には $\theta$ なる位相差があるという。位相差がある場合、 $e_1$ と $e_2$ を基準としたとき、 $e_3$ は $e_1$ より位相が $\theta$ だけ遅れているという。

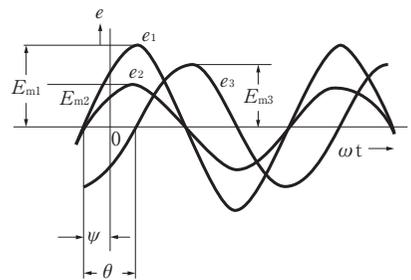


図4.9 位相

また  $\psi$  を  $t = 0$  における位相という。

これらのことを式で表すと、次のようになる。

$$e_1 = E_{m1} \sin (\omega t + \psi)$$

$$e_2 = E_{m2} \sin (\omega t + \psi)$$

$$e_3 = E_{m3} \sin (\omega t + \psi - \theta)$$

(2) 交流の平均値と実効値

交流の単周期の面積と同じ面積で底辺の長さが半周期に等しい長方形を考え、その高さに相当する値をこの交流の平均値と呼ぶ（図4.10参照）。

正弦波交流の場合、最大値を $E_m$ とし平均値を $E_a$ とすると、

$$E_a = \frac{2}{\pi} E_m = 0.637 E_m \dots\dots\dots (4.17)$$

となる。

抵抗に交流電流を流したとき、直流の場合と同様に $R \times (\text{電流の瞬時値})^2$ の熱量を発生する。交流の場合は時間ごとに電流の大きさが異なるから、1周期の間の各瞬時値についてこれを2乗したものを平均して考えれば、電力として直流の場合と同じ効果を表すことになり、取扱いやすいものとなる。いま電流の瞬時値を $i$ とすると、

$$I = \sqrt{(\text{電流の瞬時値})^2 \text{の平均値}} = \sqrt{i^2 \text{の平均値}} \dots\dots\dots (4.18)$$

となる。この $I$ を交流電流の実効値という。電圧の場合も同様である。通常、交流は実効値で表す。交流100 [V] とか10 [A] などというのは、いずれもこの実効値のことである。

正弦波交流の場合、最大値 $E_m$ と実効値 $E$ との関係は、次のようになる。

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m = 0.707 E_m、すなわち E_m = \sqrt{2} E = 1.414 E \dots (4.19)$$

2 交流回路

同一の電気回路でも、交流電圧を加えた場合にはその値が時々刻々に変化するため、直流電圧を加えた場合には起こらない種々の現象が起こる。従って電圧と電流の関係もより複雑である。以下、簡単な場合として正弦波電圧を電気回路に加えた場合の電圧と電流の関係について考える。

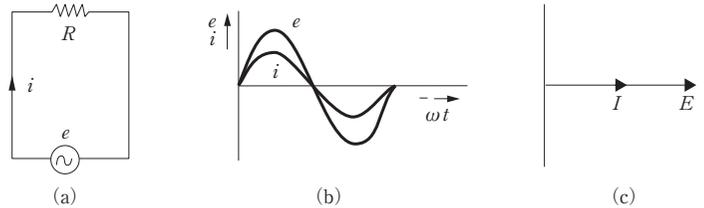


図4.11 抵抗回路の電圧と電流

(1) 抵抗回路

抵抗 $R$ だけの回路（図4.11 (a) 参照）に、 $e = \sqrt{2} E \sin \omega t$ なる交流電圧を加えた場合、この回路に流れる電流を $i$ とすると、

$$i = \frac{\sqrt{2} E}{R} \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t \dots\dots\dots (4.20)$$

$$I = \frac{E}{R} \dots\dots\dots (4.21)$$

となり電圧と電流は全く同相である。電圧と電流の関係を波形およびベクトル図で示すと図4.11 (b) および (c) のようになる。

**(2) 誘導回路**

自己インダクタンス  $L$  [H] のコイルのみからなる回路 (図4.12 (a) 参照) に,  $e = \sqrt{2} E \sin \omega t$  なる交流電圧を加えた場合, インダクタンス  $L$  に電流  $i$  [A] が流れたときに, 自己誘導作用により

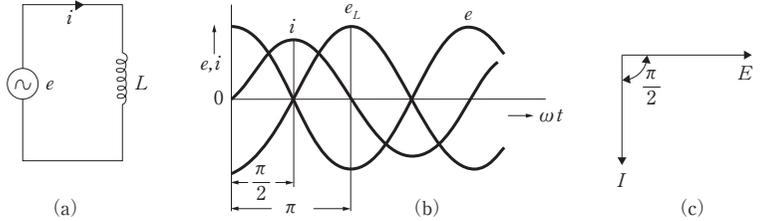


図4.12 誘導回路の電圧と電流

$e_L = -\frac{\Delta i}{\Delta t}$  [V] の起電力  $e_L$  [V] を誘起し, 電源電圧  $e$  と平衡するから,

$e = \sqrt{2} E \sin \omega t = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$  の関係が成り立つ。

これを解いて,

$$i = -\frac{\sqrt{2}E}{\omega L} \cos \omega t = \frac{\sqrt{2}E}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ [A]} \dots\dots\dots (4.22)$$

$$I = \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{X_L} \text{ [A]} \dots\dots\dots (4.23)$$

ただし  $X_L = \omega L = 2\pi fL$  [ $\Omega$ ]

この  $X_L$  を誘導リアクタンスといい, 交流回路のコイルにおける電圧と電流の比を示し, 抵抗と同じオーム [ $\Omega$ ] を単位とする。

(4.22) 式から分かるように電流は電圧より  $\frac{\pi}{2}$  ( $90^\circ$ ) 位相が遅れる。電圧と電流の関係を波形およびベクトル図で示すと図4.12の (b) および (c) のようになる。

**(3) 容量回路**

静電容量  $C$  [F] なるコンデンサのみの回路 (図4.13 (a) 参照) に, 交流電圧  $e$  [V] を印加したとき, コンデンサに蓄えられる電荷  $q$  は,  $q = c \cdot e = \sqrt{2} CE \sin \omega t$  [C] となり時間とともに変化する。一方電荷の

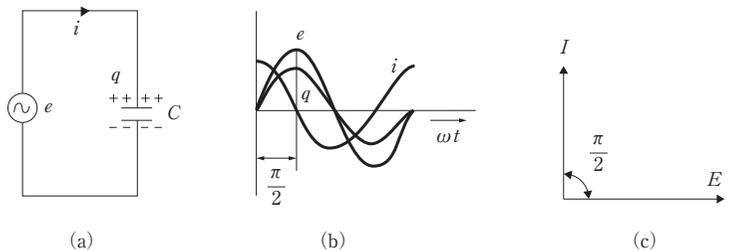


図4.13 容量回路の電圧と電流

時間に対する変化の割合が電流であるから、 $i \frac{\Delta q}{\Delta t}$  となり、この式を解くと、

$$i = \sqrt{2} \omega C E \cos \omega t$$

$$= \sqrt{2} \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (4.24)$$

$$\therefore I = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{E}{X_c} \text{ [A]} \dots\dots\dots (4.25)$$

$$\text{ただし } X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ [\Omega]}$$

この  $X_c$  を容量リアクタンスといい、交流回路のコンデンサにおける電圧と電流の比を示し、単位は  $[\Omega]$  である。(4.24) 式から分かるように電流は電圧より  $\frac{\pi}{2}$  ( $90^\circ$ ) 位相が進む。電圧と電流の関係を波形およびベクトル図で示すと、図4.13の (b) および (c) のようになる。

### 3 記号法による交流回路の計算

#### (1) ベクトルの複素数表示

速度や力などのように大きさと方向とで表わしたものをベクトルという (図4.14参照)。図において  $OX$  を基準とした場合、ベクトル  $A$  は大きさが  $\overline{OP}$  で方向が  $\overline{OX}$  より  $\angle \phi$  なる方向であるから次のように示す。

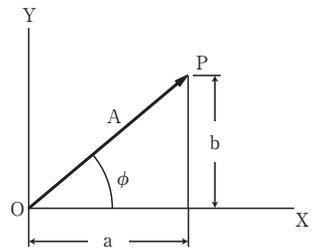


図4.14 ベクトル複素数表示

$$\dot{A} = \overline{OP} \angle \phi = A \angle \phi$$

ベクトルはまた複素数を用いて、

$$\dot{A} = a + j b \dots\dots\dots (4.26)$$

と表すことができる。 $a$  を実数部、 $b$  を虚数部という。ここに  $j$  は虚数単位であり

$$j = \sqrt{-1}, j^2 = -1, j^3 = -j \dots\dots\dots (4.27)$$

である。

ベクトル  $\dot{A}$  を複素数で表した場合その大きさと位相は次のとおりである。

$$\text{ベクトル } A \text{ の大きさ } A = \sqrt{a^2 + b^2} \dots\dots\dots (4.28)$$

$$\text{ベクトル } A \text{ の位相 } \phi = \tan^{-1} \frac{b}{a}, \left(\tan \phi = \frac{b}{a}\right) \dots\dots\dots (4.29)$$

またベクトル  $\dot{A}$  は三角関数を用いて

$$\dot{A} = A \cos \phi + j A \sin \phi = A (\cos \phi + j \sin \phi) \dots\dots\dots (4.30)$$

のように表すこともできる。

(2) 複素数による電気回路の取扱い

① 抵抗のみの回路の場合

先に述べた図4.11 (a) のような抵抗の場合、電圧と電流の関係は式 (4.21) から、

$$\dot{E} = R\dot{I} \quad \text{または} \quad \dot{I} = \frac{\dot{E}}{R} \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

となり、 $\dot{E}$  と  $\dot{I}$  は同相である。

② 誘導のみの回路の場合

先に述べた図4.13 (a) のようなインダクタンスのみの回路の場合、式 (4.23) および図4.12より電流は電圧より位相が $90^\circ = \pi/2$ だけ遅れるから、

$$\dot{E} = j\omega L\dot{I} \quad \text{または} \quad \dot{I} = \frac{\dot{E}}{j\omega L} = -j \frac{\dot{E}}{\omega L} \quad \dots\dots (4.32)$$

③ 容量のみの回路の場合

先の図4.14 (a) のようなコンデンサの場合、式 (4.25) および図4.13より電流は電圧より位相が $90^\circ = \pi/2$ だけ進むから、

$$\dot{E} = -j \frac{\dot{I}}{\omega C} \quad \text{または} \quad \dot{I} = j\omega C\dot{E} \quad \dots\dots\dots (4.33)$$

④ 抵抗、自己インダクタンスおよび容量の直列回路の場合

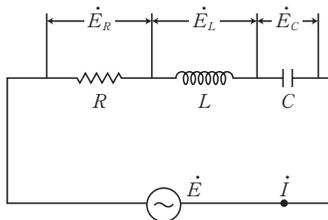


図4.15 R, L, Cの直列回路

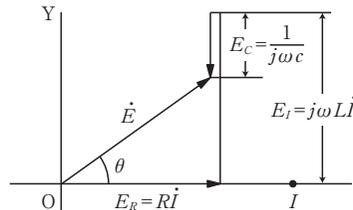


図4.16 R, L, Cの直列回路のベクトル図

図4.15のようなR, L, Cの直列回路の場合には、

$$\dot{E} = \dot{E}_R + \dot{E}_L + \dot{E}_C$$

の関係が成り立つ。この式の $\dot{E}_R$ ,  $\dot{E}_L$ および $\dot{E}_C$ に前項の式 (4.31), (4.32), (4.33) の関係を入れると、

$$\begin{aligned} \dot{E} &= R\dot{I} + j\omega L\dot{I} - j \frac{1}{\omega C} \dot{I} \\ &= [R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})] \dot{I} = \dot{Z}\dot{I} \quad \dots\dots\dots (4.34) \end{aligned}$$

$$\therefore \dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} \quad \dots\dots\dots (4.35)$$

ただし  $\dot{Z} = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = R + jX \dots\dots (4.36)$

$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} \dots\dots\dots (4.37)$

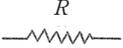
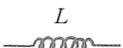
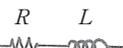
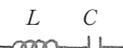
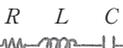
となる。このXをこの回路のリアクタンス、 $\dot{Z}$ をこの回路のインピーダンスという（単位Ω）。インピーダンスの絶対値および位相差は次のようになる。

$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \dots\dots (4.38)$

$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \right) = \tan^{-1} \frac{X}{R} \dots\dots\dots (4.39)$

以上をまとめると、表4.1のようになる。

表4.1 単独回路および直列回路の電流，電圧，インピーダンス

回路	インピーダンス (Z)		電 流 [A]	電 圧 [V]	電圧，電流との 相 差 角 (θ)
	記 号	絶対値 [Ω]	絶 対 値	絶 対 値	
	R	R	$\frac{E}{R}$	IR	0° (同相)
	jωL	ωL	$\frac{E}{\omega L}$	IωL	90° (遅電流)
	-j $\frac{1}{\omega C}$	$\frac{1}{\omega C}$	ωCE	$\frac{I}{\omega C}$	90° (進電流)
	R + jωL	$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$	$\frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$	$I\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$	$\tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$ (遅電流)
	$R - j \frac{1}{\omega C}$	$\sqrt{R^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2}$	$\frac{E}{\sqrt{R^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2}}$	$I\sqrt{R^2 + \left( \frac{1}{\omega C} \right)^2}$	$\tan^{-1} \frac{1}{\omega CR}$ (進電流)
	$j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$\omega L - \frac{1}{\omega C}$	$\frac{E}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}$	$I\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	90° (遅電流)
			$\frac{E}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}$	$I\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)$	90° (進電流)
	$R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$	$I\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ (遅電流)
			$\frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}$	$I\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}$	$\tan^{-1} \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$ (進電流)

## 4 交流回路の電力

### (1) 交流回路の電力

交流回路の電力 $P$ は、次式で表わされる。

$$P = EI \cos \theta \dots\dots\dots (440)$$

すなわち直流の場合の電力と異なり、電圧、電流の実効値の積に更に $\cos \theta$ を乗ずる。ここに $\theta$ は電圧と電流の位相差である。この $\cos \theta$ を力率といい、抵抗 $R$ のみの回路、すなわち電圧と電流が同相の場合は $\cos \theta = 1$ であり、インダクタンスまたはコンデンサのみの回路、すなわち電圧と電流の位相差が $90^\circ$ の場合は $\cos \theta = 0$ となり、その他の回路では $\cos \theta$ は0と1の間の数値となる。

### (2) 有効電力、無効電力、皮相電力

電圧、電流をベクトルで表して、図4.17のようになる場合、電流 $\dot{I}$ のベクトルを電圧 $\dot{E}$ と同相の分 $\dot{I} \cos \theta$ 、および $\dot{E}$ と直角の分 $\dot{I} \sin \theta$ との2つに分ければ、電力 $P$ は $E$ と $\dot{I} \cos \theta$ との積であり、 $\dot{E}$ と同相にある電流の分力と $E$ との積で表される。これを特に有効電力という。

$\dot{E}$ と直角にある電流の分力 $I \sin \theta$ と $E$ との積を無効電力という。無効電力を $Q$ とすれば、

$$Q = EI \sin \theta \text{ [Var]} \dots\dots\dots (441)$$

となる。無効電力の単位としてバル [Var] およびその1,000倍の [kVar] が用いられる。

また、電圧 $E$ と電流 $I$ との積を皮相電力といい、その単位はボルト・アンペア [VA] およびその1,000倍の [kVA] である。いま皮相電力を $S$  [VA] とすれば

$$S = EI \text{ [VA]} \dots\dots\dots (442)$$

となる。なお、皮相電力 $S$ 、有効電力 $P$ 、無効電力 $Q$ との間には次の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} P &= EI \cos \theta = S \cos \theta \\ Q &= EI \sin \theta = S \sin \theta \\ S &= EI = \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (443)$$

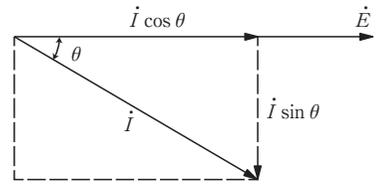


図4.17 無効電力の説明

### (3) 力率

交流回路の電力で述べたように、位相差 $\theta$ の余弦 $\cos \theta$ を力率という。式(441)から分かるとおり、力率は有効電力を皮相電力で除して求められる。すなわち、

$$\text{力率} \frac{\text{有効電力}}{\text{皮相電力}} = \frac{P}{EI} = \frac{EI \cos \theta}{EI} \dots\dots\dots (444)$$

また、位相差は回路中の電圧と電流の比であるインピーダンス $Z$  [Ω]の種類、接続法によって異なり、従って力率も異なってくる。例えば、 $R$ と $L$ の直列回路では次のようになる。

$$\text{位相差} \theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

$$\text{力率 } \cos \theta = \frac{R}{Z} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

## 第5節 三相交流

### 1 三相交流とその結線法

#### (1) 対称三相交流

大きさと周波数が等しく位相差が $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ) ずつである3つの交流を1組として取り扱う場合に、これを対称三相交流といい、この回路を平衡三相回路 (図4.18参照) という。前節で述べた交流を単相交流というが、基本的性質はいずれも同じである。この対称三相交流電圧の波形を、図4.19に示す。



図4.18 対称三相交流

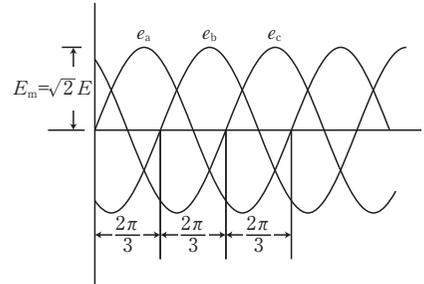


図4.19 対称三相交流波形

#### (2) Y結線

Y字形に結線した三相回路 (図4.20参照) を三相星形結線またはY結線といい、o, o' を中性点、中性点と各端子a, b, cとの間の電圧 $E_a, E_b, E_c$ を相電圧、各端子a, b, c相互間の電圧 $E_{ab}, E_{bc}, E_{ca}$ を線間電圧という。線間電圧は相電圧の $\sqrt{3}$ 倍の大きさを持ち、相電圧より $\pi/6$  ( $30^\circ$ ) だけ位相が進む。

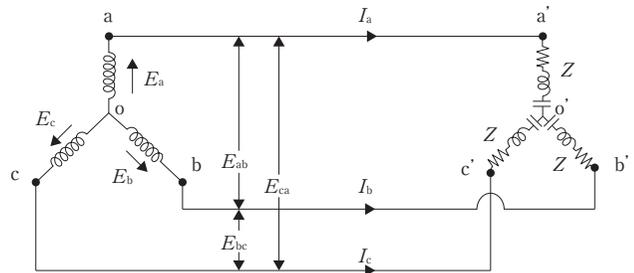


図4.20 Y結線

図4.20において、o-a間に流れる電流を相電流、a-a'間を流れる電流を線電流という。Y結線の場合には、線電流 $I_a$ は相電流 $I$ に等しい。

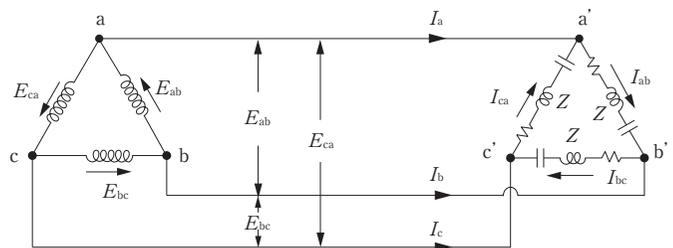


図4.21 Δ結線

#### (3) Δ結線

三角形に結線した三相回路 (図4.21参照) を三相三角結線またはΔ (デル

タ) 結線という。図から明らかなように, 相電圧がそのまま線間電圧となる。 $\Delta$ 結線における線電流は相電流の $\sqrt{3}$ 倍の大きさを持ち, 相電流より $\pi/6$  ( $30^\circ$ ) 遅れる。

## 第2章 電気機器

### 第1節 総説

#### 1 電気機器の分類

電気機器は広義には発電機、電動機、変圧器、整流器等のエネルギーの変換に用いられる機器と、遮断器、開閉器、避雷器、盤等の機器が含まれるが、本章では前者を対象とする。

エネルギーの変換では、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電動機、電気エネルギーの状態を変える変圧器（電圧変化）、整流器（交流電気を直流電気に変換）に分類できる。また変換時の動態から、発電機・電動機は回転機、変圧器や整流器は静止器との分類ができる。

機器の構成は、主要機能面から、①構造部分、②鉄心等の磁気部分、③巻線等の電気部分、に区分できる。

#### 2 電気機器の定格

電気機器の定格とは、その機器に対して指定された回転速度、電圧、周波数、周囲温度などの条件のもとで、機器が使用できる限度である。通常の機器では、使用限度を出力で表し、これを定格出力という。定格出力の単位は、[W] または [kW] である。この場合、機械的出力がある機器（電動機など）では問題ないが、電氣的出力のある機器のうち交流出力のものでは、負荷によって出力側の力率が変動し、[W] または [kW] 値が定まらず、不都合である。そこで電氣的出力のある変圧器では [VA] または [kVA] で表し、交流発電機では [W] または [kW] と力率（定格力率）を併記する方法を用いる。

定格は、一般に、①定格出力または定格容量、②定格電圧、③定格電流、④相数または周波数、⑤定格回転数、⑥定格の種類（連続または短時間）、⑦型式等であり、銘板に表示する。

定格で指定された条件を大きく外れて使用する場合は、特性の変化を来し、不経済な運転になったり、温度上昇が大きく機器寿命を減じたり、焼損をきたす等影響が大きいので、特性変化を認識して使用する必要がある。

電気機器の出力を制限するものにはいろいろあるが、通常の機器では、巻線その他の導電部に施された絶縁体の許容温度が主要なものである。使用上の許容最高温度は絶縁物の劣化に関係する。すなわち、この許容温度を超過すると著しく劣化が進み、すぐ焼損には至らずとも寿命を短くする。一般に、8~10℃超過するごとに絶縁物寿命は1/2になる。機器温度上昇の基準とする媒体温度は、空気では40 [℃]、水では25 [℃] である。

### 3 電気機器の損失

電気機器の損失の主なものを次に示す。

#### (1) 機械損

軸受摩擦損， ブラシ摩擦損， 風損などで速度が一定ならば電流に無関係にほぼ一定である。

#### (2) 鉄 損

磁器回路を構成する鉄心内で磁化の方向が交互に変わるために鉄心部に生ずる損失で， ヒステリシス損と過電流損とから成る。商用周波数では， 残留磁気によるエネルギー損失であるヒステリシス損が鉄損の大部分を占める。

#### (3) 銅 損

銅損は抵抗損とも呼ばれ， 負荷電流および励磁電流による抵抗損（[電流]<sup>2</sup> × [抵抗]）であって電機子巻線， 界磁巻線， 界磁調整器などから生ずる。

#### (4) 漂遊負荷損

上記の損失以外に， 例えば漏れ磁束により構造材料内部（ケース， クランプ， 締付けボルト等）に発生する損失や， 導体断面の電流不均等による銅損など， 測定や計算によって求められない損失がある。これらをまとめて漂遊負荷損といい， 負荷に比例して増減する。

#### (5) 無負荷損と負荷損

以上の損失のうち， 機械損， 鉄損など負荷に無関係にほぼ一定のものを一括して無負荷損と呼び， 銅損， 漂遊負荷損のように負荷によって変化するものを負荷損と呼ぶ。

### 4 電気機器の効率と電圧変動率

#### (1) 効 率

電気機器の効率は次の式で表される。一般にkW入力およびkW出力の百分率で表す。

$$\text{効率} = \frac{\text{出力}}{\text{入力}} \times 100 = \frac{\text{出力}}{\text{出力} + \text{損失}} \times 100 = \frac{\text{入力} - \text{損失}}{\text{入力}} \times 100 \quad [\%] \cdots \cdots (4.45)$$

実負荷にて入出力を実測して得た効率を実測効率といい， 無負荷で測定した過失から約定された方法で算定して得た効率を規約効率という。

#### (2) 電圧変動率

発電機の電圧変動率は， 定電圧特性を有する発電機で使用する。すなわち， 定格状態（交流では指定の力率）における励磁回路をそのままとし， かつ回転速度を一定に保って， 全負荷から無負荷としたときの二次端子電圧の変動率で， 次式で表される。

$$\text{電圧変動率} = \frac{V_o - V_n}{V_n} \times 100 \quad [\%] \cdots \cdots (4.46)$$

ただし  $V_o$  : 無負荷電圧

$V_n$  : 定格電圧

## 5 電気機器の接地

電路に施設する電気機器の鉄台および金属製外箱（外箱のない変圧器，変成器は鉄心）の接地は，電気設備技術基準第29条によって規定されている。充電部（電線等）の絶縁不良で鉄心外箱へ漏えい通電されると外箱等に電圧が現れ，また，充電部からの直接の接触がなくても外箱と大地間には電圧が生ずる。これに対応し，外箱等への人の接触による感電の危害を防ぐため，接地により電圧を安全内に抑制する。

機器の電圧区分と接地工事の種別を，表4.4に示す（詳細：電気設備技術基準）。

表4.4 機器の電圧区分と接地工事

機器区分	接地工事	接地抵抗値
300 V以下の低圧用機器	D種 接地工事	100 Ω以下
300 V超過の低圧用機器	C種 接地工事	10 Ω以下
高圧用または特別高圧用機器	A種 接地工事	10 Ω以下

## 第2節 誘導電動機

### 1 誘導電動機概要

#### (1) 構造

誘導電動機は，交流電源でほぼ定速度特性が得られ，構造が簡単で取扱いも容易であることから，汎用電動機として最も一般に普及している。外部から供給した交流により回転磁界を作る固定子と，回転磁界との相互作用によりトルクを生ずる回転子から成る。

固定子は薄い硅素鋼板を積み重ねた円筒形の鉄心の内側に溝があり，この中に絶縁された巻線を取めて交流電源につなぐ。回転子は同様にドラム形の鉄心の外側に溝があり，この中に回転子巻線を取めたもので，この巻線の種類により，かご形回転子と巻線形回転子の2種がある。かご形は比較的小容量のものに，巻線形は中容量以上のものに用いる。

外被の型により開放型，閉鎖型，全閉型等冷却通風の分類もあり，保護方式により防滴型，水中型，防爆型等の分類がある。

#### (2) 原理 —アラゴ円板

磁性を持たない銅やアルミニウムの円盤が，磁石につられて回転する現象を発見者Aragoの名を取り，アラゴの円板という（図4.22参照）。誘導電動機の説明にはアラゴの円板が最も分かりやすい。

永久磁石でこの円板を挟み，図のように動かすと，円板は磁石の回転方向に回る。これは，磁石の磁束が下から上に向かって円板を切っており，この磁束が動くため，円板にはフレミング右手の法則により電流が流れる。電流が円板に流れると，磁束と円板との間にフレミング左手の法則により円板が回転を始める。従って誘導電動機には回転する磁束と，この磁

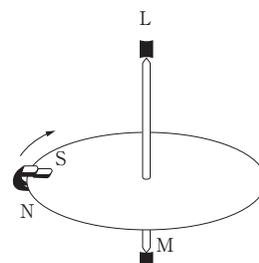


図4.22 アラゴの円板

束の中で回転できる導体が必要である。この回転する磁束を作る巻線を、通常固定子巻線と呼び、交流電圧を印加すると回転磁界ができる。また回転磁界により回転を始める導体を、回転子と呼ぶ。

三相交流を流した場合の、波形および回転磁界を、各々図4.23、図4.24に示す。この場合、ABC各相に図4.25のABC三相交流が流れるものとする。

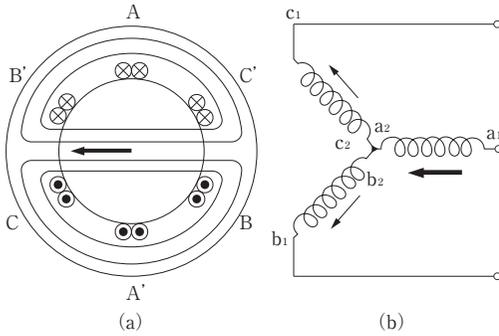


図4.23 三相交流の波形と回転磁界 (図4.25 ①の瞬時)

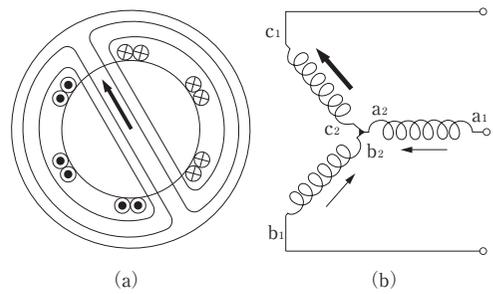


図4.24 三相交流の波形と回転磁界 (図4.25 ②の瞬時)

三相交流を流した場合にできる磁束のようすを、図4.25(a)に示す。図4.25中の①の瞬時を、図4.23(a)に示し、②の瞬時を、図4.24(a)に示したものとする。

図4.23(a)と図4.24(a)とでは、磁束の中心すなわち磁極が $60^\circ$ 回転している。このように図4.25の①から⑥までの磁束の変化をみると1サイクルに磁界が1回転することが分かる(図4.26参照)。

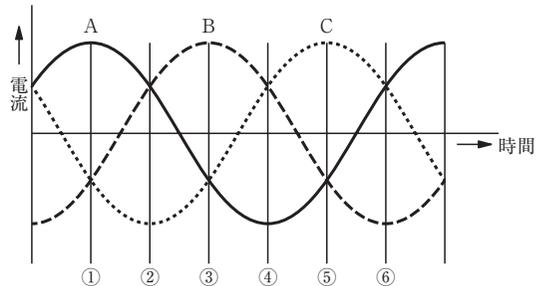


図4.25 三相交流の波形と瞬時値

### (3) 三相誘導電動機の特性

#### 1) 滑り

回転子が回転するためには回転子の導体が磁束を切らねばならない。従って回転子の速度 $N$ は、回転磁界の速度 $N_s$ より幾分遅れることが必要である。この速度の差の同期速度に対する比を滑り $S$ という。滑りは電動機の容量、極数により幾分異なるが、普通3~6%の範囲内にある。

極数が $P$ 、交流の周波数が $f$  [Hz] ならば、

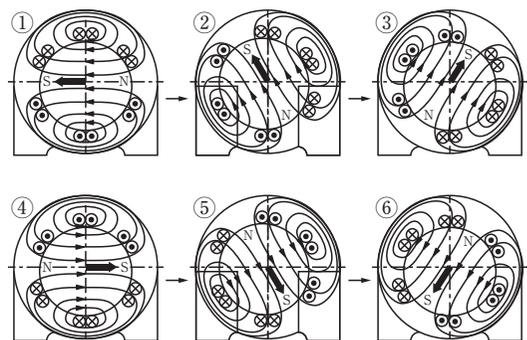


図4.26 三相交流による回転磁界

回転磁界の回転速度  $N_s$  は次式で与えられる。

これを同期速度という。

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \text{ [rpm]} \dots\dots\dots (4.47)$$

滑り  $S$  は、次の式で表される。

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 \text{ [%]} \dots\dots\dots (4.48)$$

回転子の速度  $N$  は、次式で表される。

$$N = N_s (1 - S) = \frac{120 \times f}{P} (1 - S) \text{ [rpm]} \dots\dots (4.49)$$

## 2) 速度特性

三相誘導電動機の一次電流、トルク、出力、力率、効率は、何れも滑りの関数として表される。いま一次電圧を一定に保ち、滑りまたは速度によってそれらの値が如何に変化するかを示したものを速度特性曲線と呼び、誘導機を知る上で極めて重要な曲線である (図4.27参照)。

### 3) トルク特性

巻線形電動機の二次抵抗を変化しても、最大トルクには変化がない (図4.28参照)。二次抵抗を増やしていくと、図中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲと順次トルク曲線が変化する。この変化は二次抵抗に比例し、同一のトルクが異なる滑りの箇所に移動する。これを比例推移という。

### 4) 全負荷電流

全負荷電流は、次の式より求められる。

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} E \cdot \cos \theta \cdot \eta} \dots\dots\dots (4.50)$$

ただし、 $I$  : 全負荷電流 [A]  
 $P$  : 定格出力 [W]  
 $E$  : 定格電圧 [V]  
 $\cos \theta$  : 定格出力時の力率  
 $\eta$  : 定格出力時の効率

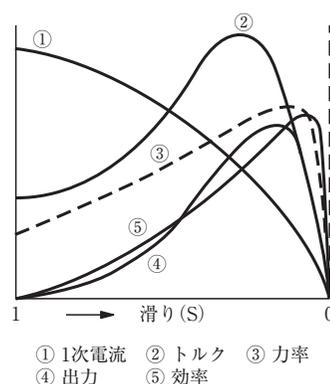


図4.27 速度特性曲線

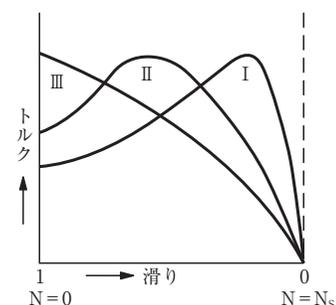


図4.28 トルク特性曲線

## 2 三相誘導電動機の起動

### (1) かご形電動機の起動

#### 1) 直入起動法

電動機を初めから全電圧で起動する方法で、起動装置としては簡単である。しかし、大きな起動電

流（全負荷電流の4～6倍）が流入するので、この大きさと継続時間によっては電動機の温度を異常に上昇させる。線路が十分太くないと、電圧降下が大きく、電磁開閉器の投入ができず、また起動トルク不足で起動不能になる。一般に、小容量でかご形電動機の中では比較的大きな起動トルクを必要とする。

## 2) スターデルタ起動法

固定子の各巻線をYに接続し定格電圧の $1/\sqrt{3}$ の電圧を加えて起動し、定速近くまで上昇した後に $\Delta$ に切り換えて定格電圧を供給する。この方法によれば、起動の際各相の巻線に加わる電圧は運転状態の $1/\sqrt{3}$ となるから、各相巻線の起動電流は $\Delta$ で始動する場合の $1/\sqrt{3}$ になり、電源から流れる線電流は $\Delta$ 起動の場合の $1/\sqrt{3} \times 1/\sqrt{3} = 1/3$ となる。しかし、トルクも $1/3$ に減少する（トルクは電圧の2乗に比例する）。この方式は、軽い負荷で起動する場合に用いる。

## 3) 起動補償器法

起動補償器と呼ばれる三相単巻変圧器を用いる。起動の際には、切換えスイッチにより低い電圧から次第に高い電圧を電動機に供給し、最終速度に近づいたとき、ハンドルを運転側に操作して定格電圧を与えるとともに起動補償器を回路より切り離す。

## 4) リアクトル起動法

起動補償器の代わりに、一次側にリアクトル（静止誘導機器）を直列に挿入する方法で起動し、速度が高まるに従い電流が減じ、リアクトル内の電圧降下が減るのでタップの必要はない。起動補償器と比較して、同じ起動電流に対する起動トルクが著しく低下することが欠点である。ただし、リアクトルは、安価で取扱いが簡単である。特に自動起動が容易で、また起動に際しての衝動が少ない。

## (2) 巻線形誘導電動機の起動

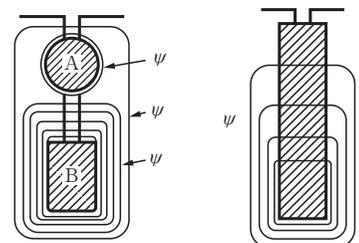
巻線形誘導電動機は、各相の巻線がスリップリングに接続され、スリップリングを経て各相巻線と直列に外部抵抗を入れることができる。このため、抵抗によって電流を制限し、大きなトルクで起動し、速度の上昇とともに各部抵抗を逐次減少して、最後にスリップリングの所で短絡しブラシをあげる装置を設けている。重負荷起動に用いる。

## (3) 特殊かご形電動機の起動

かご形回転子の誘導電動機は、構造が簡単かつ堅固で運転特性もよいが、起動電流が大きいにもかかわらず、起動トルクが貧弱である。巻線形回転子は、起動特性はよいが構造が複雑で運転特性も劣る。ここでは、かご型の構造で始動特性を巻線形に接近させる特殊のかご形電動機について述べる。

### 1) 二重かご形電動機

回転子鉄心の溝内に上下2段に回転子導体ABを納め、外側の導体Aに抵抗大でリアクタンスが小に、内側導体Bは抵抗小でリアクタンスが大になるよう製作されている（図4.29



(左) 二重かご形回転子 (右) 深溝かご形回転子

図4.29 特殊かご形回転子

(左) 参照)。それぞれの両端を短絡環に接続してかご形の回転子を構成する。起動始めは、二次電圧の周波数が高いので、Bのリアクタンスがきいて、ほとんどAに電流が流れ、二次抵抗の高い誘導電動機として動作する。

電動機が加速すると、しだいに周波数が減少して、Bのリアクタンスが減少しAの抵抗より小さくなり、多くの電流がBを流れる。すなわち起動時には電流は抵抗の大きい外側導体に、運転時には抵抗の小さい内側導体に多く流れ、あたかも抵抗挿入の場合と同じ結果になる。

## 2) 深溝かご形電動機

回転の溝を著しく深くした、単一かご形回転子を持つ電動機である(図4.29(右)参照)。この構造にすると、自己インダクタンスは内部が大きく表面は小さく、高周波数時の電流密度は表面が高く内部は著しく減少し、その結果あたかも断面積が減少した働きをし、みかけの抵抗が増してトルクが増す。起動完了後は周波数が減少し、電流分布は平均化され実効抵抗が減少して特性が良好となる。

## 3 誘導電動機の色度制御と運転

### (1) 誘導電動機の色度制御

#### 1) 二次回路の抵抗を加減する方法

巻線形誘導電動機のみで使用される方法で、二次回路の抵抗の変化によるトルク速度特性の比例推移を応用したものである。この目的に用いる抵抗器を速度調整器と呼ぶ。この方法は、二次抵抗損が著しく大きく、効率が低くなる欠点がある。

#### 2) 電源の周波数を変える方法

同期速度は(4.47)式により、

$N_s = 120 \times f / p$  で表され、電源周波数  $f$  を変えると連続的に円滑に速度制御を行える。しかしこの方法は可変周波数の電源(サイリスタによるインバータを電源とするものなど)を必要とし、設備費が大きくなる。現在では比較的安価なものが製造されており、速度制御の主流となっている。

#### 3) 極数を変える方法

誘導電動機の回転数は極数に反比例するので、極数を変えることにより回転数を変えることができる。この場合は、速度の変化は不連続である。また電動機の極数変換装置も複雑になるので、実用されているのは2~3段切換である。主として、かご形電動機に用いられている。

#### 4) 継手を用いる方法

誘導電動機と負荷の間に継ぎ手を設け、誘導電動機は一定速度で回転しておき、継ぎ手を調整することにより負荷の速度を変える。継ぎ手には、電磁継手(うず電流継手)がよい。この方法は、継ぎ手内に損失が多く、冷却に工夫を要するため効率は良くないが、簡単である。一般には定速度特性が

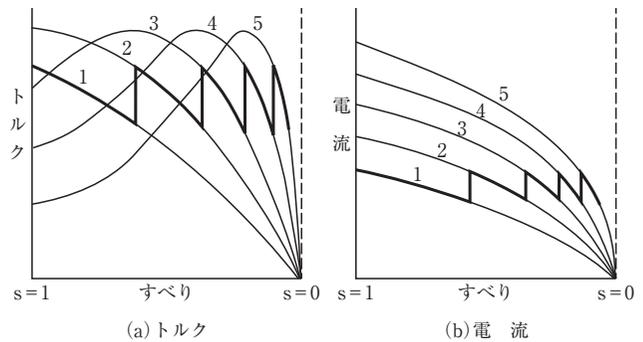


図4.30 速度調整器使用時の起動中のトルクおよび電流の変化

要求されるので、磁気増幅器やサイリスタにより自動速度制御装置を付属し、一体化したものとして使用されている。

## (2) 誘導電動機の運転

### 1) 三相誘導電動機の逆回転

3線のうち2線の接続を交換すれば、回転方向が逆になる。

### 2) 周波数の低下

周波数が低下すると、電動機の手数が減少するから、一般に負荷も減少する。

### 3) 電圧降下

トルクは電圧の2乗に比例するから、起動トルクは著しく減少する。特に、かご形電動機では起動しないことがある。一定のトルクを出すための電流が過大となり電動機は過熱する。また、滑りも多くなり、速度は低下するとともに二次銅損を増し、出力も効率も低下する。

### 4) 電圧の不平衡

電源電圧が不平衡になれば、逆相電圧が現れ、誘導電動機は逆回転磁界を生じ、逆トルクのため電動機の機能は低下し、電流は増加し、過熱の原因となる。

## 4 単相誘導電動機

単相誘導電動機は、二次巻線がかご形であるが、一次巻線は単相巻線であるため起動トルクは発生せず、このままでは起動することができない。そこで、次のような種々起動方式が工夫されている。

- ① (抵抗) 分相起動形
- ② コンデンサ起動形
- ③ くまとりコイル起動形
- ④ モノサイクリック起動形
- ⑤ 反発起動形
- ⑥ 反発誘導起動形

## 第3章 開閉器，制御装置および保護装置

### 第1節 電力開閉

#### 1 電力開閉装置の分類

電気回路を開閉する目的に使用される器具または装置を総称して電力開閉装置という。広義には、遮断器，ヒューズのような器具だけでなく，計測，保護保安装置，接続母線などを組み合わせ，箱に入れて製作したキュービクル，メタルクラッドスイッチギアなどを含めた閉鎖配電盤のことをいうこともある。

電力開閉装置を機構別に大別すると，次の2種類に分けられる。このほか，静止形の開閉装置が小容量のものに使用される傾向にある。

① 対になった接触子の機械的運動によって開閉する機械的開閉装置

② 金属片または帯片の溶断によって過電流を遮断するヒューズ

とに分けられ，ほかに静止形の開閉装

置が小容量のものに使用される傾向にある。

電力開閉装置の基本的なものを，その保有する電流開閉能力によって大別すると，表4.2のようになる。これらの器具は個々に使用目的別に使い分けられるが，いくつかの器具が適当に組み合わせられて使用される場合が多い。またスイッチヒューズのように組み合わせられて製作されるものもある。

表4.2 開閉装置の分類

器具の名称	定常電流			異常電流		
	通常	閉	開	通電	投入	遮断
遮断器	○	○	○	○	○	○
開閉器	○	○	○	○	△	×
断路器	○	△	×	○	×	×
接触器	○	○	○	×	×	×
ヒューズ	○	×	×	×	×	○
設置スイッチ	×	×	×	○	△	×

注：○可能，△場合によって可能，×不可能

#### 2 開閉器の種類

電流の開閉機能上から，断路器，接触器，開閉器，遮断器，ヒューズに分類される。

##### (1) 断路器（ディスコネクティングスイッチ，アイソレータ）

点検などのための回路の切離し，または接続変更等のため，定格電圧のもとに，母線，ブッシング，計器用変成器等の充電電流の開閉をするものをいう。負荷電流の開閉能力はない。

小形のもののはブレード接触で，開閉はフック棒（ディスコン棒）で人力操作する。大形のもののは圧気やスプリング（小形電動機でエネルギーを蓄える）によるものもある。振動時や短絡電流通電時に，電磁力でブレードが外れないようフックが付いているので，フック棒で投入操作をする場合は，フックが掛かったことを確認することが必要である。

負荷電流の開閉能力がないため、誤って負荷電流を開路すると、接触部間がアークでつながり、更に線間短絡をすることもあるため、開閉に際しては、前後の遮断器または負荷開閉器等の開を確認する必要がある。

断路器の定格としては、回路電圧、連続定格電流、短時間定格電流がある。主なトラブルは接触部（可動部を含む）の温度上昇である。バネによる適正な接触圧力の保持と接触面の確保が必要である。小容量の断路器接触部は銅であるが、大容量のものは接触抵抗の小さい銀を用いる。

## (2) 接触器（コンタクタ）、開閉器（スイッチ）

共に負荷電流の開閉を行うが、短絡電流の開閉能力はない。両者の差は、一般的には、接触器は、電磁石、圧気等持続的に加える外力により接触を維持するため、電圧降下、停電、圧気の圧力低下等外力がなくなると自動的に开路となる。これに対し、開閉器は、開または閉の状態をキャッチ機構、バネ、重力等により独立して維持することができる。

### 1) 接触器

主として電動機の頻繁な始動停止に用いる。また、過電流継電器、2E、3E継電器（リレー）との組合せで、電動機の過電流保護を行う。なお定格電流に対する開閉容量、開閉頻度、開閉寿命等により次のように分類されている。

#### ① 電流開閉容量

級別で連続定格電流の何倍可能かの表示をする。交流ではAC0級からAC4級まであり、閉路で連続定格の1.5倍から10（12）倍、遮断能力では1.5倍から8（10）倍までに分類される（（）：低圧の場合）。このように、高倍率であるのは、かご形誘導電動機の始動時には定格電流の5～6倍の始動電流が流れ、更に、運転中逆転すると8～10倍の電流が流れるためである。

直流の場合はDC0級からDC5級まであり、開閉容量は1.1倍から4倍までである。

#### ② 開閉頻度

0号から6号まであり、各々開閉頻度1,200回/1時間から6回/1時間までに分類される。

#### ③ 開閉寿命

0種から6種まであり、機械的には各々1,000万回から5,000回まで、電気的には各々100万回から1,000回までに分類される。

### 2) 開閉器

機械的勢力の変化により開閉を行い、開または閉の状態が外力なしに維持できる開閉機構を有し、負荷電流開閉能力はあるが、短絡電流の遮断能力はない。配電線等で使用される油入開閉器、気中開閉器等が最も一般的であるが、その他、電磁接触器と過電流保護装置（サーマルリレー）を1つの箱に収納したものを交流電磁開閉器（マグネットスイッチ）といい、連続定格電流に対する遮断および開路容量から、A級（10倍以上）、B級（5倍以上）、C級（2倍以上）等に区分される。

またカバー付ナイフスイッチはヒューズ付で短絡電流の遮断能力を有する。

開閉器（スイッチ）という用語は、他の断路器、接触器、遮断器、ヒューズ等と異なり幅の広い使

い方がなされる。小はマイクロスイッチ，リミットスイッチ，タンブラスイッチ等から，大は遮断器に近いSF6吹付けのガス開閉器まであり，名称も消弧方式，用途等で異なる。

### (3) 遮断器（サーキットブレーカ）

保安上最も重要な機器で，短絡，地絡事故発生の際，故障回路を系統から遮断し，故障点の被害拡大を防止するとともに，系統の機能維持（停電区間および系統の電圧降下，サイクルの変数を最小限に抑える）を計るものである。

他の開閉装置と異なる点は，短絡電流の遮断を責務とすることである。短絡電流は負荷と無関係で電源側の回路条件で決まり，負荷電流の10倍ないし20倍に達し，力率も90%遅れに近く，開路条件は極めて苛酷である。

遮断器は大きな短絡電流を遮断するため，遮断時に極間に発生するアークエネルギーをいかに抑え，また，いかに早く冷却，拡散により消弧して極間の絶縁を回復するかに色々な工夫が行われている。すなわち再点弧の起きやすい圧力を避けて，高圧側または真空側にもっていくことにより遮断を容易にする方式が採られる。前者は油入遮断器，後者は真空遮断器で利用されている。なお電界強度を低くするためには開極速度を早くすることが必要である。

なお遮断器の遮断容量不足による遮断失敗は，バックアップの遮断器動作により広範囲の停電をきたすほか，当該遮断器の破損，二次的短絡事故の発生や，油入形の場合は，噴油，タンクの破損，火災の発生の恐れがあるため遮断容量の選定には余裕を持つことが必要である。

遮断器は消弧方式により，油入，磁気，空気，ガス，真空遮断器等に分類される。各々の特徴を次に述べる。

#### ① 油入遮断機（OCB：オイルサーキットブレーカ）

密閉容器内に絶縁油を入れ，この中に接触子を入れたもので，アークにより油が分解し，（約3,000～4,000°K）高圧の水素が発生するが，これは熱伝導がよいため強い冷却作用をする。

小容量の並切形と大容量の消弧室形があり，消弧室のあるものは，アークにより発生した圧力により新鮮な油や，ガスをアークに吹き付けて消弧する。また大容量のものは，接触面積の大きい主接触子と補助接触子（アーク接触子）を持ち，電流容量は主接触子が分担し，アーク処理は補助接触子が分担して，周囲を消イオングリッドで囲み，多数の間隙中にアークを追込み分断して消弧する。

消弧方式には色々な工夫がなされ，最近は安全性の点からも小油量形が使用されている。油入遮断器は低価格であるが，短絡電流を遮断すると油が劣化するため，点検が必要である。現在は製作されていない。

#### ② 磁気遮断器（MCB）

大気圧中で用いられ，磁気吹消コイルを通る短絡電流で発生する強力な磁界で，アークをアークシュート内に押し込んで冷却分断して消弧する。構造が簡単でメンテナンスが容易であり，火災の心配もないため，交流では小容量用によく用いられる。また直流用の高速度遮断器もこの

形である。現在は製作されていない。

③ 空気遮断器 (ACB:エアサーキットブレーカ)

アークに高圧空気 (5~60 kg/m<sup>2</sup>) を音速に近い速度で吹付け消弧するもので、中・大容量向きで大形で構造が複雑である。消弧に使用した空気を大気に放出するため遮断時に大きな音が出る。最近、大容量のものはガス遮断器に、中容量のものは真空遮断器に代わっている。

④ 真空遮断器 (VCB:バキュームブレーカ)

磁器またはガラスの真空容器内に1対の接触子を封入したもので、可動接触子はベローズを介してシールされている。10<sup>-8</sup> mmHg程度の高真空であるため、接触子の金属材料の蒸気によるアークが速やかに拡散して絶縁を回復する。また真空は絶縁がよいため、開極時の極間隙が少なくてすみ、接触器として高頻度開閉にも有利である。小形のものから開発が進み、電圧の適用範囲も3 kVから170 kVまで拡大し、遮断容量も9000 MVAまでが開発されている。コンパクトで、接触子はメンテナンスフリーであり用途は拡大している。

⑤ ガス遮断器 (GCB)

六価フッ素硫黄SF<sub>6</sub>をアークに吹き付けるもので、SF<sub>6</sub>は空気に比べ絶縁耐力が常温常圧で3倍、2気圧で絶縁油に匹敵するほか、2000° K付近で熱解離による冷却効果が大きく消弧能力が優れている。空気遮断器に比べ、同一遮断容量で著しく小形になるほか、消弧に使用したガスは密閉容器内で繰り返し使用するため、遮断時の排気騒音はない。大容量が普通であるが、最近小容量のものも開発されている。

GIS (Gas Insulated Switch gear: ガス絶縁開閉装置) と称し、断路器、計器用変圧変流器、母線、遮断器等一括してガス封入した極めてコンパクトな装置が開発されており、雰囲気の良い所、または据付空間に制約のある所から使用されてきたが、高い信頼性や安全性、保守の容易さから広く普及している。ただし、設備はやや高価である。なお、SF<sub>6</sub>は水分が入ると絶縁物の沿面耐圧が下がるので注意を要する。

⑥ 漏電遮断器

交流600 V以下の電路の地絡保護に用いる電流動作形の遮断器で、ZCT (零相変流器) により地路電流を検出して遮断動作を行う。定格感度電流が30 mA以下の高感度形は感電防止用として用いる。

⑦ ヒューズ

ヒューズは、電路または電気機械器具の保護を目的とするもので、回路を構成する鉛、スズなどの金属可溶体に短絡電流または過電流が流れた際、発熱溶断する。その際発生するアークは金属

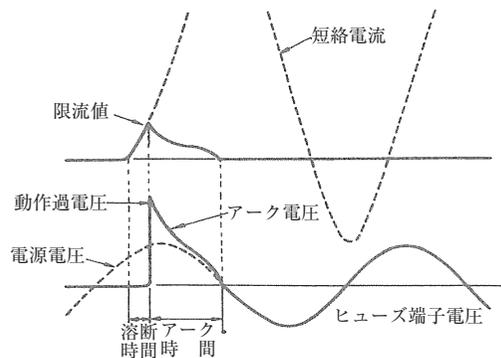


図4.31 限流ヒューズの動作

可溶体を収納する容器および充填物の消弧作用により遮断する。定格電圧は数ボルトから数万ボルト、定格電流も数ミリアンペアから数千アンペアまでである。

用途別には、配電用、電動機用、直流用、通信機用、半導体用等があり、形状別では爪付形、筒形、密閉形、カットアウト形等がある。消弧方式では、自然消弧、磁気吹消、放出、真空形等がある。

電力ヒューズには、機能上、限流形と非限流形があり、現在は限流形が主に用いられる。

これは耐熱密閉筒内に数条のヒューズと石英砂を詰めたもので、過電流でヒューズが溶断し、アーク発生の際、石英砂がアーク断面を制限するとともに、強力な冷却作用でアークドロップをほぼ電源電圧以上に維持し、短絡電流を限流地内に制限して、短絡電流の力率を改善し、容易に電流零点で消弧を完結する（図4.31、図4.32参照）。

ヒューズは機能上、過電流リレーと遮断器の組合せと類似しているが、その得失は、次の通りである。

#### 長 所

- 同一遮断容量に対して、単純、小形、軽量で、格段に安価である（遮断器は遮断容量が大きくなると、価格は急激に増大する）。
- 特に大きな短絡電流の遮断は、確実に動作速度が速く、信頼性が高い。
- 限流ヒューズは遮断器にない優れた限流作用を持つ。すなわち、負荷側の短時間電流容量が軽減できる。

#### 短 所

- 開閉動作ができず、また遮断動作後は都度取替を要する。
- 過負荷が小さく長時間かかって溶断する場合は、熱容量的に苦しく、遮断しにくくなり、また溶断時間が長いと、動作時間のバラツキが大きくなり、三相のうち一相だけが動作し、欠相となることがある。

低圧回路では、昔はヒューズが主流であっ

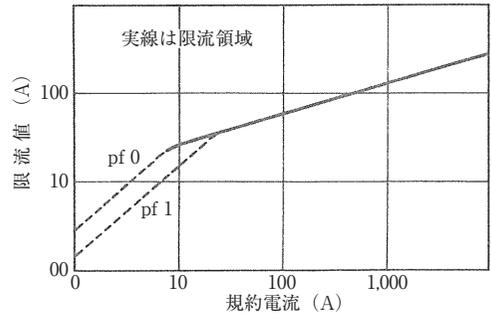


図4.32 限流特性

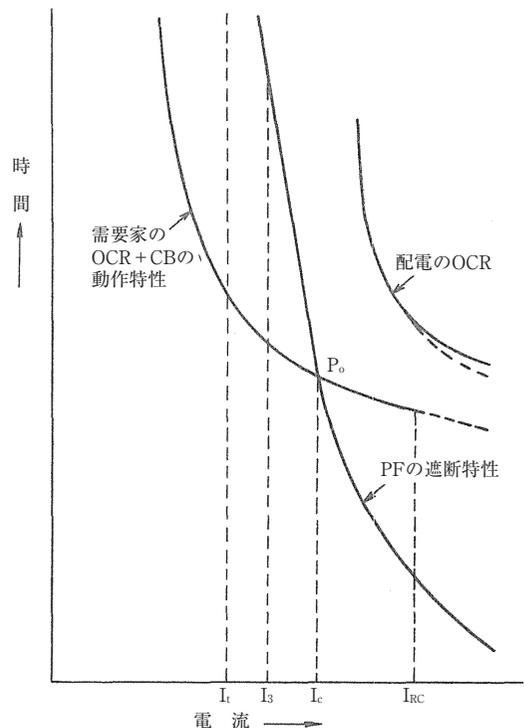


図4.33 限流ヒューズと遮断器の動作時間強調原理図

だが、電気機器の使用は必ずしも常に専門の知識を持つものが扱うとは限らない、不適当なヒューズの使用は大きな事故を招く、動作時の取替えがわずらわしい、また、現在では大量生産による高品位安価な気中遮断器が容易に入手できることのため、低圧回路保護は、気中遮断器が主力となっている。

高圧回路では、限流ヒューズの優れた特性と、故障頻度の少ないこと、取扱者が技術者であることと、経済的理由から、一般需要家は、大形容量遮断器より、むしろ限流ヒューズと小容量遮断器の組合せで、双方の特徴を生かし、保護協調を図る場合が多くなっている。すなわち、短絡事故はヒューズで、小事故の過負荷は小容量遮断器で処理する方式である。この際の各動作時間と電流の特性は図4.33のとおりで、 $I_c$ 以上の電流域はヒューズで、 $I_c$ 以下は遮断器の動作域となる。

なお限流ヒューズの選定については、

- ・変圧器の場合は励磁突入電流を考慮して、連続定格電流の10倍が0.1秒持続するものとし、100回の投入に耐える。
- ・電動機（誘導かご形）の場合は、始動電流を考慮して、連続定格電流の5倍が10秒間持続するものとし、1,000回の投入に耐える。

以上が、一応の基準となっているが、もちろん選定に当たっては個々に検討を要する。

## ⑧ 配電盤

配電盤は、前述の開閉装置のほか計器、継電器、PCT、母線、コントロールスイッチ等を一括して鉄箱内に収納したもので、監視、制御、保護の機能を兼ねている場合が多く、主としてJEM規格で分類されている。

閉鎖形配電盤では、開放点検の際の感電防止に対する安全性の度合により、AよりGまで分類があり、Gは充電部と非充電部の隔壁のほか、インターロックが設けられ、最も厳重な隔離がなされ安全性は高いが、複雑で高価である。アメリカ規格で、メタルクラッドスイッチギアといっているものはG相当である。また電力ヒューズと負荷開閉器または高圧交流電磁接触器を組み合わせたものを、高圧コンビネーションスタータという。

また、低圧用として、過電流引外し装置を持つ気中遮断器を多段積にしたものを、パワーセンタ（またはロードセンタ、コントロールセンタ）という。

## 第2節 保護継電器

### 1 保護継電器の役割

保護継電器は、電力系統、または電気機器の保安装置の一部であり、次のような役割を持つ。

- ① 線路の電気諸量を直接または計器用変成器を介して受け取り、機器、または線路の異常を検出し、故障部位を判断する。
- ② 開閉装置に指令を与え、故障区間を系統より選択遮断する。

- ③ 系統の電圧，場合によっては周波数を正常に維持する。
- ④ 系統内の他設備への被害を避けるとともに，故障発生箇所の被害を最小限に抑える。

継電器は，以上のような責務を負っているため，動作の確実性が強く要求され，温度変化，粉じん湿度，振動，経年変化等によって，その特性が変わらないことが必要である。また実際の動作頻度が少ないため定期的に動作確認テストを行う必要がある。

なお，電気諸量のほかに物理諸量（温度，圧力等）により動作する継電器も機器保護に用いられる。

更に広義の保護継電器としては，ベルトコンベアのスリップリレー，蛇行検出リレー，ベルト縦裂検出リレー，シュート詰まり検出リレー，ホッパーのレベル検出リレー，水位検出リレー，各種のリミットスイッチ類，巻ブレーキの油圧リレー，その他各種の保護継電器が使用されており，単なる保護用のみでなく，自動制御用にも使用されている。

## 2 保護継電器の分類

### (1) 構造による分類

#### 1) 誘導形

分相により移動磁界を発生する固定コイルと，回転アルミ円板より成り，移動磁界の誘導により円板上に渦電流を発生させ，磁界との相互作用により円板を回転させ接点を閉じる。

#### 2) 電流力計形

固定コイルと可動コイルより成り，双方に電流が流れた場合，固定コイルによる磁界により，可動コイルが移動または回転して接点を閉じる。

#### 3) 可動鉄心形

この形は大別して2種ある。1つは電磁形で，ソレノイドが鉄心を吸引する力を利用したもので，プランジャ形，ヒンジ形，回転子形，平衡桿等がある。他の1つは有極形で，永久磁石または電磁コイルで一方向に励磁された磁界の中性線上に可動鉄片と固定電磁コイルを置いたもので，電磁コイル中の電流の極性によって鉄片に及ぼす吸引力の方向が変化する。

#### 4) 可動コイル形

永久磁石の磁界中で可動コイルが回転する形式で，回転機構は可動コイル形計器と同じである。

#### 5) デジタル形

マイクロプロセッサを用いてリレーを構成するもので，保護性能，信頼性，スペース，コスト，保守の省力化などの面で有利であることから，1990年ごろから採用されるようになり，現在では主流になっている。

#### 6) その他

温度の変化による液体または双金属片のわん曲を利用した熱形，発生ガスの機械力を利用したガス形，半導体素子を利用した非接点形等がある。

(2) 機能による分類

1) 過電流継電器

短絡，過負荷保護に用いられる。使用例の多い誘導形過電流継電器は反限時-定限時特性を持つ。変圧器では投入時，定格の10倍位の励磁突入電流が流れることがあり，またかご形誘導電動機では，定格の5倍位の始動電流が流れるため，投入時短時間動作制限の要素を加えたものを使用する。

2) 接地（地絡）継電器

地絡発生時の電圧，電流を検出し動作する。系統の中性点接地方式により，地絡時の電圧，電流の様相が異なるので，接地方式と動作責務を考慮のうえ，適正機種を選定することが必要である。

最も発生頻度の高い一線地絡の場合を考えると，地絡により各相の対地電圧にアンバランスが生じ，系統の中性点と大地間に電位差が生ずる。零相電流は，大部分中性点接地点を通り，中性点抵抗値に支配される。接地故障

の検出は，地絡事故の際発生する特有の，零相電圧，および零相電流の量，並びに零相電圧と零相電流の位相差等により行うが，基本となる零相電圧の取出しは，系統の中性点が容易に得られる場合（変圧器または発電機の中性点が出ている場合）は，これと大地間または計器用変圧器を，スターデルタ結線として，一次側中性点を接地し，二次側のデルタ回路をオープンにした形のオープンデルタの電圧（ブロークンデルタともいう）から得る（図4.34参照）。また零相電流は，零相変流器，または三相分の変流器二次側の残留回路，または三相分の変流器三次巻線の直列接続により得る（図4.35参照）。

主な接地継電器を，次に記す。

① 小勢力過電流形地絡継電器

低抵抗接地系で，地絡饋電線の選択に用いる。低抵抗接地系では，地絡時の零相電流が大きく，主に地絡饋電線のみ流れるので，零相電流の検出のみで選択が可能である。

② 地絡過電圧継電器

オープンデルタ回路より取る電圧継電器で，系統の接地の有無のみを検出す

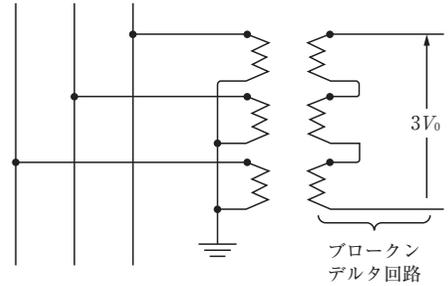


図4.34 零相電圧抽出回路

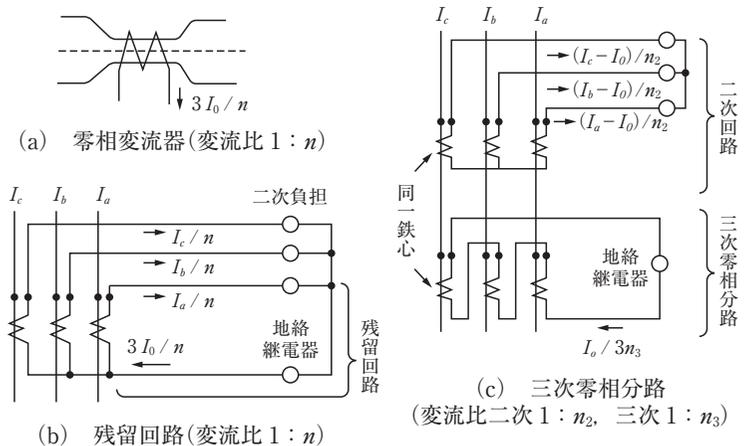


図4.35 地絡継電器駆動回路

る。通常アラームを動作させる。

### ③ 地絡（方向）継電器

非接地系で、地絡饋電線の選択に使用される最も一般的な継電器である。高抵抗接地系でも使用される。零相電圧と零相電流の二要素で作動する一種の電力継電器である。非接地系では電圧と電流の位相が異なるため、位相調整が必要である。回路がやや複雑となる。

### 3) 差動継電器，比率差動継電器

差動継電器は、発電機，送電線，母線の内部故障（短絡，地絡）の検出に用いられる。通常，同相の入出力電流の総和が零となるが，内部故障の際は零とならないことを検出するものである。送電線の場合は，パイロットワイヤ，または電力線の搬送装置が必要である。

比率差動継電器は変圧器の内部故障検出に用い，主変圧器の一次と二次の電流比率が変わった場合作動する。主変圧器がスターデルタの場合は，変流器二次側でもこれに合わせる必要がある。

なお，投入時の励磁突入電流による誤動作防止のため，短時間不動作時間帯が必要である。

### 4) 電圧継電器

過電圧継電器と不足電圧継電器がある。逆欠相継電器もこの分類に入る。

### 5) 2E, 3E継電器

小形の電動機保護に用いる。過電流要素と欠相で動作するものを2E形，逆相要素を加えたものが3E形である。いずれも三相平衡の始動過電流では，動作しない機能を持つ。始動時動作抑制は，投入後10秒間，定格電流の500%が通常であるが，調整可能である。欠相保護は，三相電動機で一相分がスイッチの接触不良等で単相となると，過電流となり焼損する危険があるためである。

### 6) 電力継電器

逆電力継電器も電力継電器の一種で，電力方向が逆転したときに作動する。汽力発電所の発電機の出口に設置され，タービン保護に用いられる例がある。

### 7) 方向継電器

交流では，電圧を基準極性とし，これに対する電流の位相角により方向判別を行う。適用場所，機能により，地絡，短絡，電力，各方向継電など各種継電器がある。

### 8) 温度継電器

#### ① バイメタル形

熱膨張係数に差のある2枚の金属板を張り合わせたもので，温度上昇による変形を利用したものである。簡易な過電流継電器として利用される。

#### ④ 抵抗変形

コイル，軸受保護用として用いられ，測定用との兼用もある。サーミスタもこれに属する。

### 9) ブッフホルツ継電器

変圧器の主槽と油保存装置とを連結する管に設置され，変圧器故障によるガスで動作する。

### (3) 動作時限による分類

1) 反限時

継電器を動作させる勢力が増加するに従い、動作時間が減少する時限特性である。

2) 定限時

継電器を動作させる勢力の大小に関せず、動作時限の一定な時限特性である。

3) 限時一高速度

動作時限に何らの遅延作用を持たず、特に2 Hz~0.5 Hz程度の短時間のものを高速度という。

4) 反限時一定限時

動作勢力のある範囲では、反限時性であり、他の範囲では定限時特性となる時限特性である。

5) ノッチング限時

一定時限において、ある予定回数の動作を行って動作を完了する。ただし、動作完了前に動作の原因がなくなれば直ちに復帰する。補助継電器等では、動作の時限特性と復帰の時限特性との双方を規定している。例えば、限時動作即時復帰、即時動作限時復帰などがある。

### 3 継電器の配置例図

一般的な電力受配電系統における継電器の配置例を、図4.36に示す。設置にあたっては個々の継電器の特性による動作値、動作時限等を整定し、系統全体の協調を保つ。

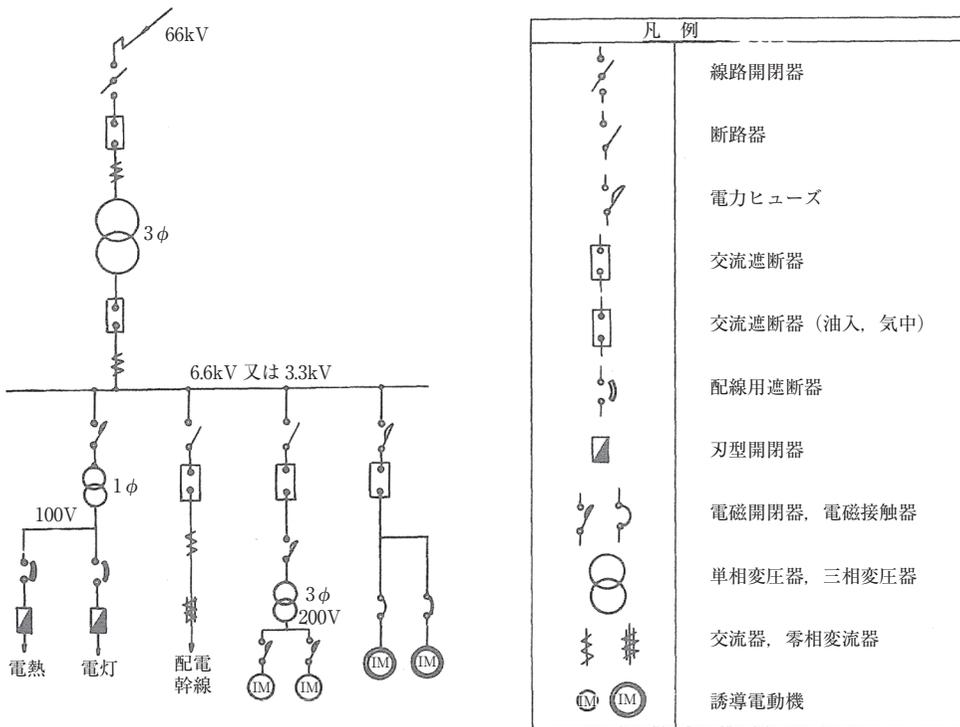


図4.36 継電器の配置例図

## 第3節 電力系統の異常電圧

### 1 異常電圧の発生原因

電力系統から発生する異常電圧の種類は多数あるが、発生箇所別には内部異常電圧（内雷）と外部異常電圧（外雷）がある。また、その性質（周波数や継続時間）別では、次の3つがある。

雷サージ 雷により発生する異常電圧であって、直接送電線や機器に雷撃を受けて発生する直撃雷と、近辺の雷撃によって誘導される誘導雷がある。

開閉サージ 遮断器などの開閉時発生するサージである。

商用周波過電圧 一線地絡、負荷遮断、鉄共振現象によって発生するが、継続時間は数サイクル～数秒間で、過電圧倍数は特別なケースを除くと、有効接地系では1.3倍程度、その他の系統では1.8～2倍程度である。

### 2 異常電圧の防止対策

雷サージについては、進入してきたサージに対し、避雷器により波高値を低減させることがベースであり、ある程度のフラッシュオーバは許容し、事故時の系統操作によって対処するという考え方である。基本的には、発生原因をなくすることができないから、次のような防護対策をとる。

- ① 雷の遮へい効果が十分な架空地線を架設する。
- ② 導体支持点のフラッシュオーバ距離を適当にする。
- ③ 塔脚接地抵抗を十分低くする（接地抵抗の高い土地では、埋設地線を設置する）。
- ④ 避雷器を設置し、波高値を低減させると同時に、2回線送電線では不平衡絶縁方式を採用して事故時に1回線送電を継続する。

開閉サージについては、設計の段階では超高压系では2.8倍、66 kV～154 kVでは3.3倍、11 kV～33 kV系統では4倍を想定しているので、現在の遮断器では特に問題にならない。また、発電機機器に対しては、避雷器によって保護を行っている。

商用周波過電圧については、共振条件を避ける系統構成、発電機に制動巻線取付け、高性能のAVR付加などの方法が採られている。

### 3 避雷器

避雷器は、一般に、保護される機器と大地間に接続する。回路に常規電圧の数倍以上の異常電圧が襲来した場合、その波高値を低減させるだけの電流を大地へ通じて放電させ、機器の絶縁を保護し、放電終了後は続流（異常電圧放電終了後、引き続き電力系統から流れこむ電流）を短時間に遮断して、常態に復する装置である。従って、次のような諸性能が必要である。

- ① 系統異状時の持続性電圧を考え、避雷器定格電圧 × 1.5倍までの商用周波電圧に耐える。
- ② 避雷器の衝撃性過電圧に対する保護効果は、衝撃放電開始電圧並びに制限電圧が低いほど高いので、それらの電圧は通常保護すべき機器の基準衝撃絶縁強度より低くなければならない。

- ③ 定格電圧が加圧された状態で繰り返し動作しても、毎回確実に続流を遮断し、かつ、諸特性が変化しないものとする。

避雷器は、円板状の陶磁質を積み重ねた特性要素と直列ギャップを陶製<sup>がいかん</sup>管内に密閉したものが多く使用されている。特性要素の端子間電圧の上昇を抑制することにより、線路の異常電圧波高値を低減する。サージ電流通過後は、高抵抗となって、系統の正常電圧以下では、直列ギャップで容易に続流遮断ができる程度まで電流を抑制する作用をする。

直列ギャップは、常時開で線路と大地間を絶縁し、漏洩電流を阻止するが、異常電圧が印加されると放電を開始するスイッチの機能を持つ。なおギャップの放電遅れは、線路の異常電圧抑制効果を損うため、トリガ（引金作用）用のニードルギャップに直列抵抗を入れ、主ギャップと並列に接続し、放電遅れを防いでいる例もある。また絶縁性、消弧性がよいため、SF<sub>6</sub>を封入したものもある。

なお、特性要素は従来、炭化けい素が使われていたが、最近是非直線性の優れた、酸化亜鉛を主成分とする半導体を使用されている。これは、直列ギャップ無しでも、常時の漏洩電流が極めて少ないため、ギャップレス形で使用される例が多い。

#### 4 架空地線

架空送配電線路、変電所内母線並びに機器等への直撃雷を防止するために架空地線を用いて、遮へいを行う。架空送配電線路の場合は鉄塔、電柱の最上部に電線に平行して架設し、遮へい角は45°程度かそれ以下のものが多く、変電所では屋外鉄構および鉄塔を利用して、屋外変電設備の上部に張りめぐらした架空地線で遮へいを行う。この場合、網状遮へいを行えば、母線および機器は、その内側に収まるので、ほとんど100%に近い遮へいができる。

遮へい線が断線すると、電力線の短絡や母線短絡等の重大事故を起こす可能性があるため、遮へい線は機械的並びに電氣的強度が十分大きいものを選ぶ。一般に、7本撚亜鉛めっき鋼線を用いる。

木柱線路では1基ごとに接地する場合と数基毎に接地する場合とがある。鉄塔線路では各鉄塔に接地し接地抵抗は、普通20～30 Ωまたはこれ以下とする。避雷装置の接地では、衝撃大電流が流れ、人身事故、機器の絶縁破壊などの危険が発生するので、変電所構内などでは鉄管打ちこみあるいは埋設地線による連接接地を行い、その接地抵抗は数Ω以下にする。

## 第4章 電気応用—照明, 電熱および電池

### 1 照明一般

#### (1) 照明

照明が環境に与える効果は大きく、鉱山では、作業の精確さ、作業員の眼の疲労減少、職場の整理整頓、さらには保安の確保、生産性向上に役立つ。

鉱業上使用する工作物等の技術基準を定める省令技術指針（第2章3）では、常時鉱山労働者が就業する屋内作業面の照度基準を、次のように定めている。

- ・精密な作業           300ルクス以上
- ・普通の作業           150ルクス以上
- ・粗な作業             70ルクス以上

照明計算に使われる用語を下記に、また、各種光源についての照明上の概数を、表4.3に示す。

**光束** 単位 [ルーメン, (lm)], 光源から放射される光のエネルギーを視感度で測ったもので、光を光線の束と考え、束の多小により疑似的にエネルギーの大きさを表す。

**照度** 単位 [ルクス, (lx = lm/m<sup>2</sup>)], 照らされる物体の表面の明るさを照度といい、単位面積に入射する光束で表す。

**光度** 単位 [カンデラ, (cd)], 光源の強さを表し、光源から、ある方向への単位立体角にでる光束で表す。

表4.3 各種測定量の概数

光 束 [lm]		光 度 [cd]		照 度 [lx]	
太 陽	$4.3 \times 10^{28}$	太 陽	$3.4 \times 10^{27}$	直射太陽	$10^5$
月	$8 \times 10^6$	満月	$3 \times 10^{16}$	曇天昼光	$1 \sim 5 \times 10^4$
電球 (100 W)	$1.5 \times 10^3$	電球 (100 W)	130	満月光	0.2
ろうそく	10	ろうそく	1		
マ ッ チ	4				
(発光のとき)	40				(上記いずれも地表面上の照度)

照度の計算は、光度  $I$  [カンデラ] の光源から、距離  $l$  [m] 離れた面が光源に対し、 $\theta$  [度] 傾いている場合の面の照度、 $E$  [ルクス] は次式で求まる（図4.37参照）。

$$E = \frac{I}{l^2} \cdot \cos \theta \quad [\text{ルクス}] \dots\dots\dots (4.51)$$

$\frac{I}{l^2}$  は、面が光源に対し直角の時の照度である。

## (2) 光源

### 1) 白熱電球

通電によりフィラメントを加熱し、その温度放射により発生する可視線を利用するランプで、一般照明には輝度を低くするために、内部をつや消処理したものをを用いる。

### 2) 蛍光ランプ

低圧水銀蒸気の放電では、 $2537 \text{ \AA}$ の紫外線を多量に発生する。これを管内部に塗布し、蛍光物質で可視光線に変換する。効率がよいので、家庭用をはじめ事務所、店舗などの照明に用いる。

### 3) 水銀ランプ

高気圧の水銀蒸気中の放電を利用した照明である。小形、高効率の高光束光源が容易に製作できるので、工場照明、道路照明、広場照明などをはじめ、広く使用されている。

### 4) LEDランプ

LED (Light Emitting Diode : 発光ダイオード) に電圧を印加して電流が流れる際に、電子と正孔がぶつかって再結合して発するエネルギーで発光するランプで、省エネルギー性能と長寿命が特長であり、性能向上と価格低下により、近年急速に普及が広がっている。

### 5) その他の光源

ナトリウムランプ、キセノンランプ、ネオン灯、ネオン電球、ELライト、などがある。

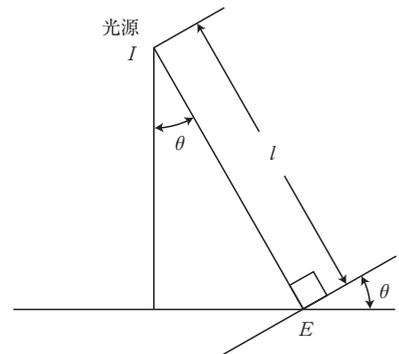


図4.37 照明計算基礎図

## 2 電気加熱

電気加熱とは、電気を熱エネルギーに変換して利用するもので、一般の家庭では電熱器などその応用も広い。電気加熱の方式には次のような種類がある。

### 1) 抵抗加熱

直接電源に繋いだ導体の発生熱で加熱する方式で、家庭用電熱器、鉱山電車で暖房などがある。

### 2) アーク加熱

主としてアークによって発生する熱により加熱する方式で、溶接、アーク炉などがある。

### 3) 誘導加熱

電磁誘導によって発生する熱により加熱する方式で、交番磁界中におかれた導電性物体に生ずるうず電流損またはヒステリシス損によって加熱される。高周波誘導加熱、低周波誘導加熱などがあり、金属の焼入れ、溶解などに使用する。

## 4) 誘電加熱

交番電界中における誘電体の誘電体損による熱を利用する方式で、誘電体は熱的にも絶縁材なので、この方式により内部まで均一に加熱できる。一般には高周波で、高電界の電気で行われる。家庭用電子レンジは代表的な例である。

## 5) 赤外線加熱

赤外線電球で材料の表面を加熱乾燥する方式で、材料表面の塗装乾燥用として、自動車等の塗装仕上げに用いる。

## 3 電池

電池には、使い切りのものと、充電して何度も繰り返して使えるものがあり、前者を一次電池、後者を二次電池という。

電池のなかで、化学作用を利用して電気エネルギーを発生させるものについて考える。構成は、電解質を介在して陽極と陰極とから成り、両極の周囲には起電反応を起こす減極材（活物質）がある。特に電解質が液体の場合、両極の接触を防ぐため隔離板を置く。また、電池の特性として、電池に負荷をかけないときの両端子間の電圧を  $E$ 、負荷をかけたときの両端子間の電圧を  $V$ 、電流を  $I$ 、外部抵抗を  $R$  とすると、電池の内部抵抗  $r$  は、次式で表される。

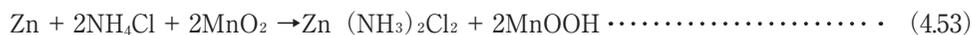
$$r = \frac{E - V}{I} = \frac{E - V}{V} R \dots\dots\dots (4.52)$$

電池の内部抵抗は、電極、電解液および隔離板による。内部抵抗を小さくするには、電極の表面積を大にし、両極間の距離を小にし、電極と減極材との間の接触抵抗を小さくする必要がある。

## (1) 一次電池

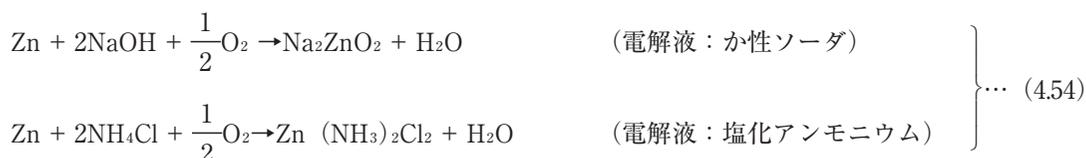
懐中電灯用から始まり、最近の各種電子装置のポータブル化に伴って、その用途が広がりつつある。一次電池には次のようなものがある。

## 1) マンガン乾電池



陰極は亜鉛缶で、これが容器となっており、陽極は炭素棒である。陽極の周囲には、 $\text{MnO}_2$ 、黒鉛、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{ZnCl}_2$  などの減極合剤がある。電解液は  $\text{NH}_4\text{Cl}$  と  $\text{ZnCl}_2$  で、これを、合剤を巻いた綿紙に吸収させあるいはでんぷんを混ぜ、のり状にしている。

## 2) 空気電池



減極剤として空気中の酸素を利用するもので、湿電池と乾電池がある。

陽極には、触媒作用のある炭素を用いる。放電時の電圧変動が少なく、保存性が良いが、強電流放電性能は良くない。電話機、テレメータなど長期間無保守を必要とする場合に用いられる。

### 3) 水銀電池

放電中の電位変動が極めて少なく、容積あたりの電氣量が大きい、重負荷には向かない。保存寿命が長く、保存率の電圧安定性は抜群である。電圧は、1.4~1.35 Vである。環境汚染の問題から、現在はほとんど使用されていない。

### 4) アルカリマンガン乾電池

マンガン乾電池と同じ炭素棒を陽極とし、これを二酸化マンガンをもとした合剤で包み、陰極として亜鉛粉末を用い、電解液として水酸化カリウムなどのアルカリ水溶液を用いたもの。

### 5) リチウム電池

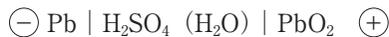
負極にリチウムを用い、正極に弗化黒鉛・二酸化マンガン、電解質には有機溶媒や固体電解質を用いたもの。小型・薄型にでき、寿命も長く、腕時計・電卓などに使用される。

## (2) 二次電池

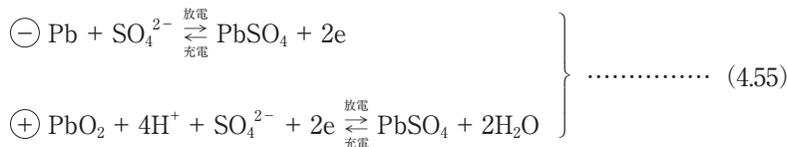
予備電源、非常用電源の据え置き用、自動車の始動、バッテリー電車電源の可搬用などに用いる。単電池あたりの公称電圧は2 Vである。鉛蓄電池のほか、アルカリ蓄電池（ニッケル-カドミウム蓄電池およびニッケル水素電池）やリチウムイオン電池も用いられる。

### 1) 鉛蓄電池

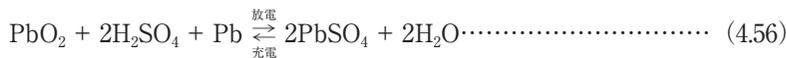
構成：



電池反応：



全反応：



#### 取扱い上の注意

- ① 適切な充電を行う。10~20時間率で完全充電の90%程度に止める（時間率 =  $C/I$  [H]：定電流で充放電を行う電流値を  $I$  [A]，容量を  $C$  [AH] とする）。
- ② 精製水を補充し液切れを避ける。むやみに希硫酸を補給しない。
- ③ 45℃を超えると劣化する。
- ④ 過放電は厳禁である。

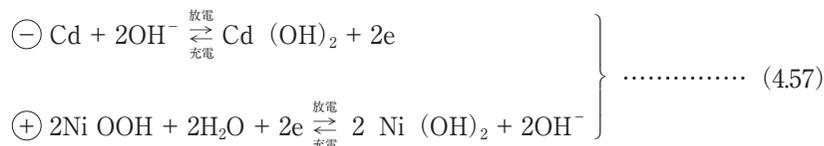
### 2) ニッケル-カドミウム蓄電池

単電池あたりの公称電圧は1.2 Vである。

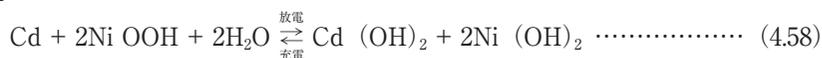
構 成：



電池反応：



全 反 応：



ニッケル-カドミウム蓄電池の内容物を、表4.4に示す。

表4.4 ニッケル-カドミウム蓄電池の内容物質

電 池 部 位		内 容 物 質
⊖ 極 Cd	ポケット式	ポケット加工した多孔銅板（2枚張り合せ）間のポケットにCdと3～30%の鉄粉を混合充てんする。
	焼 結 式	ニッケルあるいは鋼の孔あき板か金網を芯にニッケル粉を焼結、多孔体とし、この多孔中に化学的に充てんする <sup>注)</sup> 。
セ パ レ ー タ		ポケット式：多孔（孔あき）プラスチック板 焼 結 式：ナイロン・ポリプロピレンなどの不織物
⊕ 極 NiOOH	ポケット式 焼 結 式	対応する⊖極と同様の芯体を作り、NiOOHを充てんする <sup>注)</sup> 。
	チューブ式	ニッケルめっき銅板を細いスパイラル状とし、細い中空部にNiOOHを充てん、このチューブを並べる。
電 解 液		比重1.20～1.25（20℃）程度のカ性カリ（KOH） 一般に、水酸化リチウムを数%添加する。

注) 活動質粉体と導電粉体とを合成樹脂結着剤により混練して、たわみ性シートとし、これをエキスパンドメタルのような集電シートに張り付けたものも開発されている。

### 特 徴

- ① 重負荷特性が良く、過酷な充放電に耐える。
- ② 低温特性が良い。
- ③ サイクル寿命が長い。
- ④ 保守が簡単で、堅ろう。

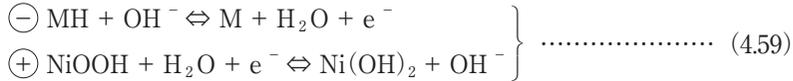
含有するCdが有害であることから、一部の用途を除きニッケル水素電池やリチウムイオン電池等が代わりに使用されるようになっている。

## 3) ニッケル水素電池

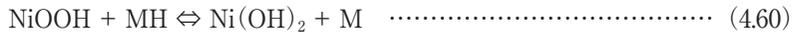
構成；



電池反応；



全反応；

特 徴

- ① 過充電，過放電に強い
- ② エネルギー効率が比較的高い

## 4) リチウムイオン電池

構成；



電池反応；



全反応；

特 徴

- ① エネルギー効率高い
- ② エネルギー密度が高い
- ③ 自己放電が小さい

**4 バッテリー**

車両用のバッテリーは一般に，鉛蓄電池である。バッテリーの目的は，エンジンを始動させ，さらに各種の電装品を作動させるのに必要な電力を発電し，余った電力を貯えておくことである。

**(1) 原 理**

バッテリーは二次電池の1つであり，希硫酸液の中に陽極板（正極）として二酸化鉛，陰極板（負極）として海綿状の鉛，電解液として希硫酸を用いている（図4.38参照）。

充電では、正極・負極の双方から電解液中に硫酸イオンが移動し、放電では、電解液中の硫酸イオンが正極・負極の双方に移動する。

一般には、12Vまたは24Vの鉛蓄電池が使用される（図4.39参照）。

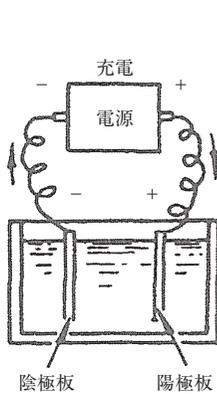


図4.38 バッテリーの原理

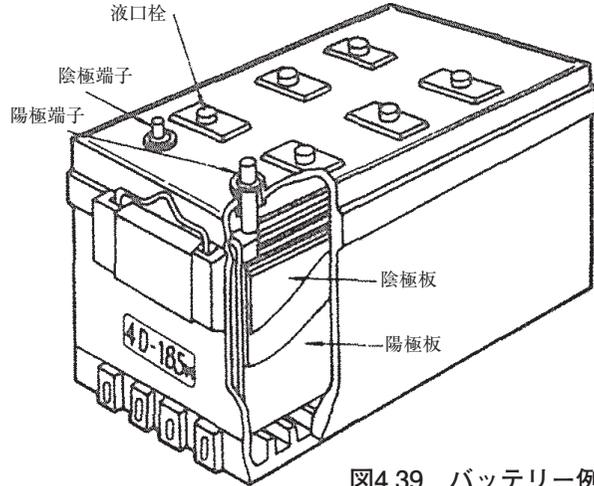


図4.39 バッテリー例

## (2) 容量および電圧

バッテリーの容量は、完全に充電されたバッテリーを一定電流で放電して、放電中の端子電圧が規定の放電終止電圧に達するまでの電気量で表わし、放電電流と時間直列接続の積、すなわちアンペア・アワー（A・H）で表わす。従って、A・Hの大きいものほど型も大きくなり、始動力も強い。

なお、個別のバッテリー容量はバッテリーそのものによって決まるが、他のバッテリーと接続することで容量・電圧を変えられる。

### ① 直列接続

バッテリー2台を直列に接続すると、容量はかわらないが、2倍の電圧を得る（図4.40左図参照）。

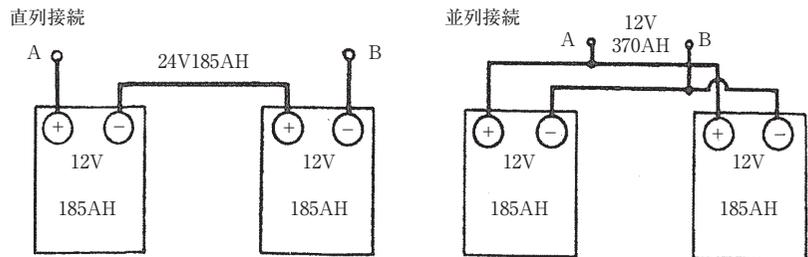


図4.40 バッテリーの直列および並列接続

### ② 並列接続

並列に接続した場合、AB間の電圧は1台のものと同じだが容量は倍になる（図4.40右図参照）。

### (3) 特性

#### ① 電解液比重と放電量

バッテリーの充電および放電状態は、電解液である希硫酸の濃度が変わってくるので、電解液の比重によって判断できる。比重は周囲温度で変動するため、測定した比重は標準温度に換算する必要がある（図4.41参照）。

一般にこの標準温度は20℃で、この20℃における完全充電状態のバッテリーの電解液比重は1.280である。しかし、実際のサービス面でいえば、1.250以上あれば通常の使用に差しつかえない。また、1.220になるとバッテリーは補充電しなければならない。

電解液の比重を20℃の比重に換算するには次式による。

$$S_{20} = S_t + 0.0007 (t - 20) \dots\dots\dots (4.59)$$

ここで、

$S_{20}$ ：標準温度20℃に換算した比重

$S_t$ ：測定比重

$t$ ：測定時の液温

#### ② 容量と電解液温度

バッテリーは化学作用によって放・充電を行うため、気温が低下すると化学反応が鈍くなり、バッテリーの持つ能力が十分に発揮されない。電解液は完全充電状態であれば、ほとんど氷結する可能性はないが（氷結温度-68℃）、充電が不足すればするほど氷結温度は上昇する（図4.42参照）。

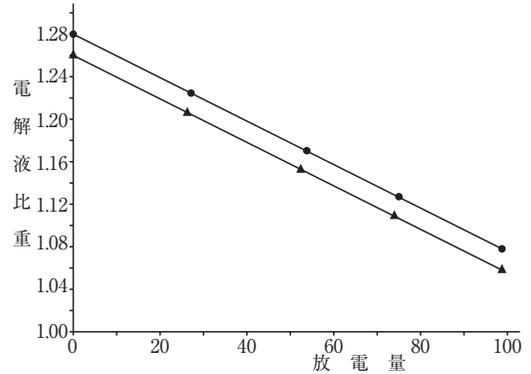


図4.41 バッテリーの電解液比重と放電量

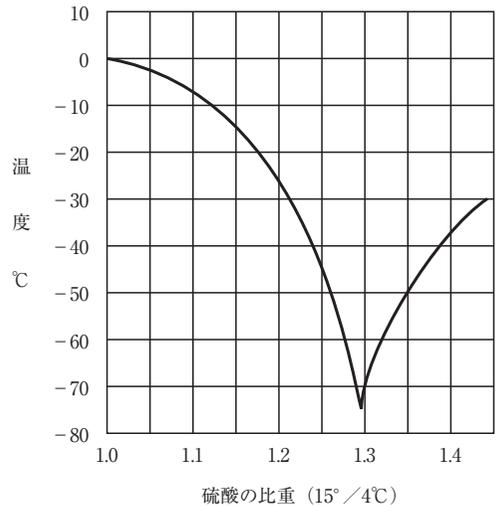


図4.42 電解液の比重と氷結点

## 第5章 設備の保守と保安

鉱山における電気設備の故障並びに災害の防止には、計画、施工、使用、点検整備に当たって、機器、回路の特質を十分に把握し、現場の操業条件、機器移設、系統などの変化に柔軟に対応できる簡明、確実、かつ極力保守に手のかからない機器並びに方式を選ぶ。また、現場適用前には、十分整備、性能確認を行うように努める。

また、操業中においては、点検、整備により事故発生の原因を除くよう心掛ける。保安確保のため、法規、規則を守ることはもとより、これらの法規制が、どのような災害発生を予測して作られたか、その背景を理解することが重要である。

万一故障が発生した際は、被害範囲を最小に抑え、他の災害の誘発を防止するため、保護装置を整え、状況変化に対応した事故・災害防止措置をとる等の絶えざる配慮が必要である。

### 1 検査と整備

#### (1) 使用前検査

鉱山保安法上、特定施設とされる設備の新設・変更の際に鉱業権者が行わなければならない検査で、事前に産業保安監督長に届出した工事計画に従って行われたものであること及び経済産業省令で定める技術基準に適合していることを確認する。

#### (2) 定期検査・日常検査

坑内では、天盤、支保の変動が多く、また比較的狭い空間を利用しているため、電気工作物は常に巡回により異状の有無を検査し、異状があった場合は、直ちに対策して故障や事故を未然に防がねばならない。比較的安全な機器で据付場所の良い箇所ものは、日を定めて定期的な検査を行い、巡回検査によっては検査できない接地抵抗測定、絶縁抵抗測定、内部検査およびギャップ測定などは精密検査として、定期的実施することが必要である。

#### (3) 整備

日常において、いかに検査しても不良点が多くあれば、その対策に苦慮するものである。そのためにも、日頃の整備、とりわけ坑内に持ち込む前の整備が重要である。整備された機器および管理された予備品により、一刻も早く原形復旧の手を打つことが大切である。

### 2 電気災害およびその対策

#### (1) ガス、炭じんの爆発

石炭坑の掘進現場等では、常時はガスがなくても掘進が進むにつれてガス湧出が多くなることも考えられる。そのため可燃性ガス自動警報器を設ける。可燃性ガスの著しい増加による危険の多い個所に設ける場合には、可燃性ガス含有量が1.5 %を超えたときに、その区域または個所に設置された電

気工作物に対する送電を自動的に停止するガス自動警報器を設置し、自動的に電源を遮断し、また、警報を発するようにする。

炭じんが電気により着火することはまれで、ガス爆発後の二次的な着火爆発が多い。散水などにより炭じんを抑えることが必要である。

## (2) 電気による火災

火災要因は、火源と可燃物である。

火源としては短絡、地絡による絶縁破壊時のアーク、過電流持続による導体発熱、導体接続部の接触抵抗増加による発熱等がある。電気溶接機のアークも着火源となる。また、落雷により油入変圧器が破損したり、遮断容量不足の油入遮断器で短絡電流を遮断した際に容器が破損した場合、飛散した油に着火することもある。

火源から可燃性絶縁物（ゴム、ポリエチレン、油等）に着火し、さらに近辺の可燃物に延焼する。電気火災の対策として、次のような事項が考えられる。

### ① 機器、機材の選定

絶縁耐力、電流容量等の仕様に余裕を持たせるとともに、不燃性、難燃性機器機材（乾式変圧器、真空遮断器等非油入形の遮断器、クロロプレン、ビニールシース等の難燃性ケーブル）を採用。

### ② 保護設備

過電流継電器、地絡継電器等により速やかに異常を検出、遮断器で故障回路を遮断し、火源の持続を絶つこと。架空地線等で落雷による異常電圧の防止、更に避雷器により異常電圧を安全に逃がすことによる電気事故の防止。

### ③ 保守管理、施工

導体接続および接地工事を確実に行う。温度上昇の可能性のある箇所は、温度計、サーモラベル等で監視、また定期的な絶縁測定、保護装置の定期的機能の確認等による電気事故の予防。

### ④ 延焼防止

近辺に可燃物を置かないこと。屋内の場合防火構造とすること。適切な機器間隔をとること。メタルエンクローズド形とすることも有効である。

### ⑤ 消火設備

電気設備に使用できる形式のものを、火災発生時近づきやすい場所に設置する。また発電機等の大形機器では、火災発生時自動的に炭酸ガスを機器に噴射する方法も採られる。

### (3) 感電事故

感電事故は、身体の状態あるいは周囲の状況によって著しく異なるが、電撃の強さは人体を流れる電流値によると考えられる。人体の通過電流による反応を表4.5に示す。

人体内の抵抗は150～500 Ωであるが、接触部の抵抗が大きく左右する。汗をかいたり、手足がぬれている場合は抵抗が小さくなり、数十ボルトの低い電圧でもかなりの電流が流れ、致命的となることがある。

表4.5 人体の通過電流による反応

電流の大きさ	感電状態
1 mA	電気をわずかに感じる程度
5 mA	相当の痛感, ケイレンを起こす
10 mA	苦痛に堪えられない
20 mA	筋肉の緊縮により, 自ら回路から離れられない
50 mA	生命の危険大
100 mA	致命的である

感電事故の原因としては、次のような場合がある。

- ① 機器の絶縁が劣化し、かつ金属性の外被が接地されておらず、このため、通常非充電部であるべき外被が、漏電により充電が持続した状態になり、これに人体が接触する。
- ② 高電圧またはサージ電流が低圧回路に進入する。低電圧機器は耐圧強度、絶縁抵抗とも低く、かつ人体が外被や絶縁物に触れる確率が高い。
- ③ 静電気が帯電しやすい状態で、接地していない金属に人体が触れる。

人体が電気導体加電部に触れるケースとして、次のような場合がある。

- ① 電気関係者以外が、誤って危険な高圧機器設置場所に入る。
- ② 電気作業員の感電事故の原因として、次のような場合がある。
  - a) 停電作業開始前の停電確認不十分である。
  - b) 作業場所が狭く、作業中に近辺加電部に触れる。
  - c) 足場等が悪く、転落しそうになり近辺加電部に触れる。
  - d) 停電作業中誤って電源スイッチが投入される。
  - e) 活線作業の場合の絶縁台、手袋、靴等の絶縁が不良である。

電気設備設置場所の湿気が多いと絶縁劣化、感電事故が発生しやすい。この対策には次のような方法がある。

- ① 極力加電部を露出せず、機器を金属外被で覆い、外被の接地を確実にする（坑内では10 Ω以下の接地抵抗とする）。
- ② 漏電した場合、速やかに警報遮断するよう、接地継電器、漏電遮断器等を設置する。絶縁耐力および絶縁抵抗が十分大きな機器を採用するとともに、設備容量に余力を見ることにより絶縁劣化を防止し、かつ定期的な絶縁管理を行う。
- ③ 変圧器は二次側の接地を行うか、混触予防板付のものを用いる。一次二次混触の際は、速やか

に遮断する開閉装置を備える。サージ侵入に対しては、避雷器、サージアブソーバ等を設置し接地を確実にする。

- ④ 静電帯電の起きやすい金物は接地する。
- ⑤ 導体加電部接触による感電防止対策としては、
  - a) 高圧電気設置場所は柵で囲い、警標を掲げ、関係者以外の侵入を禁止する。
  - b) 電気設備設置場所は乾燥した場所を選び、保全作業に必要なスペースをとる。
  - c) またスペースが十分に得られない場合は、近辺加電部を絶縁板等で隔離する。
  - d) 停電作業の際は、事前に検電器で停電を確認、導体部の接地を行う。
  - e) また停電作業中誤って電源スイッチの投入がなされないよう制御スイッチの鎖錠を行い、作業中の警標を掲げる。
  - f) また活線作業は極力回避することが望ましいが、実施の場合は、絶縁台、手袋、靴等の絶縁チェックが必要である。

#### (4) 静電気

静電気は、電気設備とは直接関係はないが、固体（粒子を含む）と固体または液体（粒子を含む）と固体の摩擦、または固体（フィルム等）の剥離等の力学的エネルギーが加えられた際、電荷の分離によって各々が帯電する現象であり、運動が急激であるほど分離する電荷が大きくなる。

一方または双方が絶縁物の場合、帯電量は徐々に増加して電位差が大きくなり、大気等の耐圧限度を超えると火花放電により、蓄積された静電エネルギーを放出する。静電エネルギーはエネルギー量（ジュール）としては大きくないが時間的に局部的に集中して放出されるため、可燃性ガス（メタン）中では着火の原因となる（メタン濃度5～15 %で0.28 mJで着火）。また雷管の誤発や人体への電撃の原因となる。特に、炭坑におけるガス突出の際は問題となる。

静電気災害防止対策としては、次のような事項が考えられる。

- a) 電荷の蓄積を防止するため、風管ホースの金具類を接地する。
- b) 風管、ホース、シート類の素材（ビニール、ゴム等）にカーボン粉等を混入、あるいは表面処理を行って導電性を与えたものを用いる（帯電防止処理という）。
- c) 静電気発生の原因となる風管中の粉じん、圧気中のミスト、鉄錆粉等を除き、清潔に保つ。
- d) 摩擦を起こさないよう、流速を下げる。
- e) 湿度が70 %以上になると表面の絶縁性が下がり帯電し難くなるので、スプレー等で空気を加湿する。
- f) 帯電しやすい風管による静電誘導を防止するため、電線と風管の隔離距離を十分取る。
- g) 雷管については「耐静電気雷管」という、管体と脚線の間に2000 PF、8 kV（64 mJ）を印加した場合に発火しないものを使用する。

なお帯電防止処理した風管は接地しないと、火花放電時のエネルギーが処理しないものより大きくなり、かえって危険となることがあるため、必ず接地することが必要である。

またガス突出の際の救護隊員や雷管取扱者は、導電性のある帯電防止用服・靴の着用が、静電気事故防止に有効である。