

[電気計測 II 目次]

第4章 測定一般	1
第5章 電気量の測定	9
第6章 磁気量の測定	31
第7章 物理化学量の電気計測	43

第4章 測定一般

4.1 デジタル測定 (第3章3.2.5参照)

最近の半導体技術の進歩 etc. → デジタル表示・デジタル処理が全盛

測定器 . . . アナログ計器 → デジタル計器

アナログ計器とデジタル計器の勝負

項目	アナログ	デジタル
速応性に優れる	×	○
変化量の見やすい	○	×
使い良い (熟練性を要しない)	×	○
読み取り精度が高い	×	○
表示がかわりにくい (安定している)	○	×
大量生産性に優れる	×	○
補助電源が必要	×	○

- ・アナログ計器 電磁力で指針を振らせる 基本的には電流計
- ・デジタル計器 入力電圧と基準電圧の差を 基本的には電圧形パルス数に変換して電圧を測定

代表的なデジタル電圧計の原理

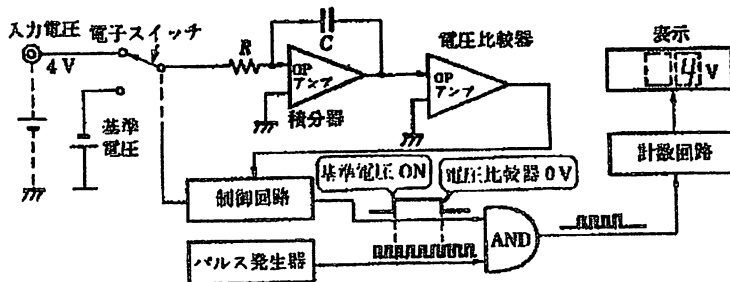
(1) 計数形 . . . 図3.20(P.43), 図4.1

のこぎり波電圧の 0(V)~測定電圧までに要する時間 (パルス数) で測定

(2) 逐次比較形 . . . 図3.21(P.43)

零位法と同様に, 内部の可変基準電圧と比較して差が 0 のときの基準電圧で測定

(3) 二重積分形



二重積分形の原理図

入力電圧の積分値（平均値）から基準電圧まで積分回路の出力電圧が降下（上昇）するのに要する時間をパルス数で計数し、そのパルス数から測定電圧を得る。

4.2 分流・分圧・変成

(1) 分流器

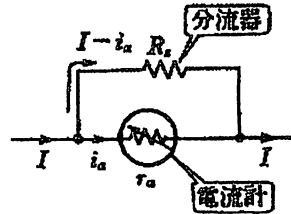
定格を超える電流の測定 → 分流器を並列に挿入する

電流計の両端にかかる電圧と分流器の両端にかかる電圧が等しいので、

$$i_a \cdot r_a = (I - i_a) \cdot R_s$$

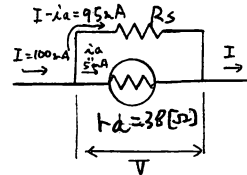
$$\therefore I = \{(r_a + R_s) / R_s\} \cdot i_a$$

すなわち、実際の計器に流れる電流 i_a の $\{(r_a + R_s) / R_s\}$ 倍の電流が測定されることになる。



$$\frac{I}{i_a} = \frac{r_a + R_s}{R_s} \quad \text{分流比(倍率)}$$

(例) 5mAの直流電流計を100mAの直流電流計にする。どのようにすればよいか。但し、電流計の内部抵抗 r_a は 38Ω とする。



キルヒホッフの法則から

$$5\text{mA} \times 38 = 95\text{mA} \times R_s$$

$$\therefore R_s = 2[\Omega]$$

$I = 100[\text{mA}]$, $i_a = 5[\text{mA}]$, $r_a = 38[\Omega]$ より
公式から

$$\frac{100\text{mA}}{5\text{mA}} = \frac{38 + R_s}{R_s} \quad (\therefore R_s = 2[\Omega])$$

(答) $R_s = 2[\Omega]$ の抵抗を分流器として接続すれば良い。

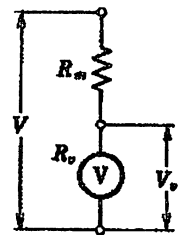
(2) 分圧器 (倍率器)

定格を超える電圧の測定 → 分圧器を直列に挿入する

分圧器に流れる電流と電圧計に流れる電流が等しいので、

$$V_v / R_v = (V - V_v) / R_m$$

$$\therefore V = \{(R_m + R_v) / R_v\} \cdot V_v$$



すなわち、実際に計器にかかる電圧 V_v の $\{(R_m + R_v) / R_v\}$ 倍の電圧が測定されることになる。

$$\frac{V}{V_v} = \frac{R_m + R_v}{R_v} \quad \text{分圧比(倍率)}$$

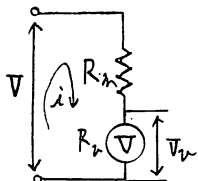
※抵抗の代わりにコンデンサーを使用する「容量分圧器」もある。

(電気計測 I プリント P67 参照)

※同じ計器に複数の分流器, 分圧器を入れて, これを切り替えることで, 1台で多重範囲の測定が可能な「多重レンジ電流計」「多重レンジ電圧計」もある。

→ 「多重レンジ電流計」+ 「多重レンジ電圧計」+ 「抵抗計」= 「テスター」

(例1) 10Vの電圧計で100Vの電圧計にする。どのようにすればよいか。但し, 電圧計の内部抵抗 R_v は20k Ω である。



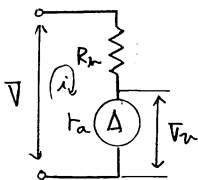
$V = 100[V], V_m = 10[V], R_v = 20[k\Omega]$ より
公式から

$$\frac{100}{10} = \frac{R_m + 20}{20} \therefore R_m = 180k\Omega$$

(答) $R_m = 180k\Omega$ の抵抗を分圧器として直列に接続すればよい。

電流を i とおくと $V_m = R_v \cdot i \therefore i = \frac{V_m}{R_v} = 0.5mA$
よて抵抗 R_m は $V = (R_m + R_v)i \therefore R_m = 180k\Omega$

(例2) 5mAの直流電流計を10Vの電圧計にする。どのようにすればよいか。但し, 電流計の内部抵抗 r_a は40 Ω とする。



$V = 10[V], i = 5[mA], r_a = 40[\Omega]$ より
オームの法則から

$$10 = (R_m + 40) \times 5 \times 10^{-3} \therefore R_m = 1960[\Omega]$$

(答) $R_m = 1960[\Omega]$ を電流計に分圧器として直列に接続すればよい。

(例3) 上記(例2)の電圧計で, 指示値3mAのとき, 測定電圧は何Vか。

比例式から

$$\frac{5[mA]}{10[V]} = \frac{3[mA]}{x[V]}$$

$$\therefore x = 6[V]$$

(3) 変成・・・商用周波数などの交流用

高電圧用の分圧器・・・抵抗が大型化

大電流用の分流器・・・分流が大きくなり発熱が大きい

さらに, 人体との接触による感電事故の危険性が大きい

→ 計器用変成器の使用

☆計器と測定回路との間の絶縁・保護にもなる

①変流器(CT)・・・次頁図及び図4.5

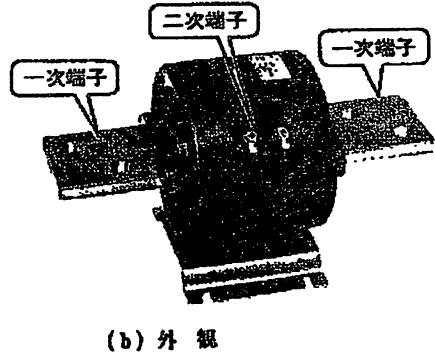
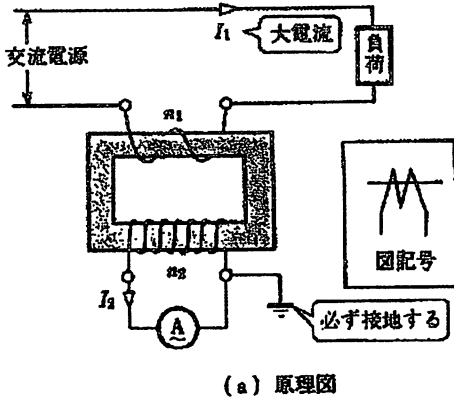
1次線の電流・・・ I_1 2次線の電流・・・ I_2 1次線の巻数・・・ n_1 2次線の巻数・・・ n_2

公称変流比 $K_n = \frac{n_2}{n_1}$

真の変流比 $K = \frac{I_1}{I_2}$

理想的には $K_n = K$ 現実には励磁電流などのため $K_n \neq K$

理想と現実の違いの度合い……比誤差 = $\frac{K_n - K}{K} \times 100 (\%)$



変流器の原理図と外観

☆取扱い上の注意

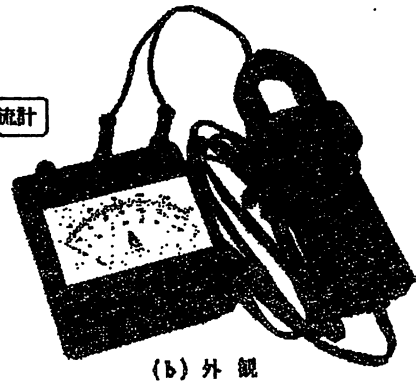
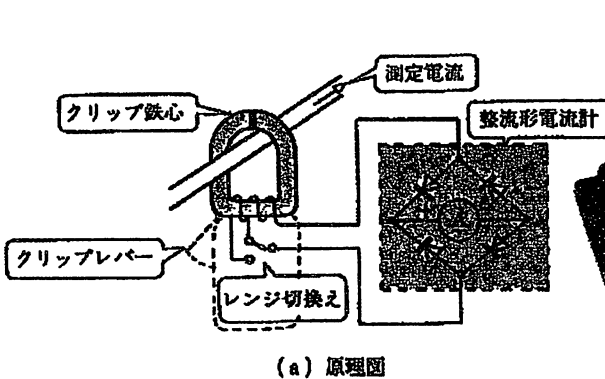
2次側を開放したまま1次電流を流してはいけない

○変流器を固定して設置する場合など

電源をOFFにして設置ができる → 配線を切断して設置できる →
上図のような1次端子付き変流器が使用できる。

○配電盤のチェックなど

電源をOFFにして設置ができない → 配線を切断して設置できない →
下図のようなクリップ変流器付き電流計を使用する。



クリップ変流器付き電流計の原理図と外観

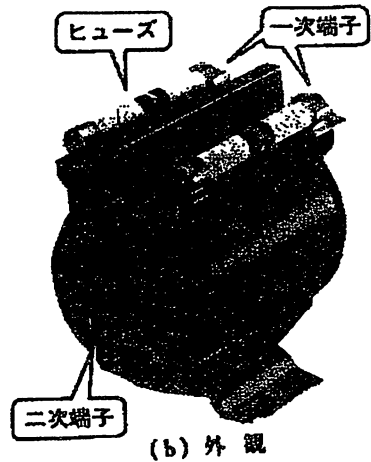
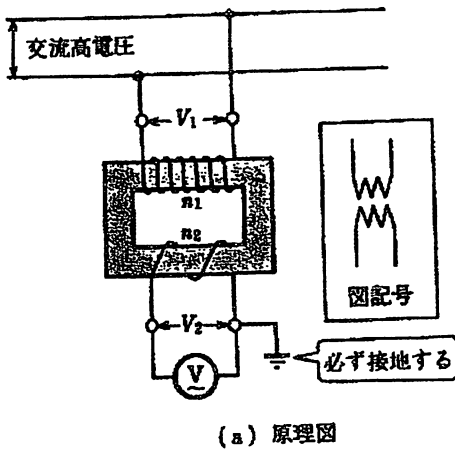
②変圧器(PT)・・・下図及び図4.3

1次線の電圧・・・ V_1 2次線の電圧・・・ V_2 1次線の巻数・・・ n_1 2次線の巻数・・・ n_2

公称変圧比 $K_n = \frac{n_1}{n_2}$ 真の変圧比 $K = \frac{V_1}{V_2}$

理想的には $K_n = K$ 現実には励磁電流などのため $K_n \neq K$

理想と現実の違いの度合い・・・比誤差 = $\frac{K_n - K}{K} \times 100$ (%)



変圧器の原理図と外観

☆取扱い上の注意

2次側を短絡したまま1次電圧をかけてはいけない

○変流器，変圧器の比誤差を小さくする方法

- ・巻数比を加減して必要とする変流比，変圧比とする。
- ・低損失コアを使用する。
- ・巻線の配置を工夫する。 など

③容量電圧変成器（コンデンサー形計器用変圧器）(PD)・・・次頁図及び図4.4

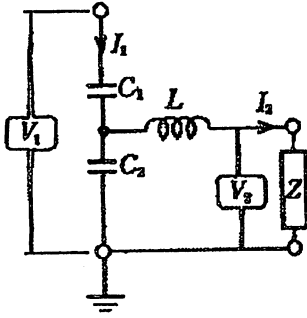
測定電圧が数十kV以上 → 変圧器(PT)の巻線間の絶縁が困難

→ このままでは高価となる

→ 容量電圧変成器（コンデンサー形計器用変圧器）(PD)の使用

- ・絶縁性が良い
- ・安価

※基本的には容量分圧器（電気計測 I プリントP67参照）と同じ



負荷Zに直列にインダクタンスLを接続して、Lと(C₁+C₂)を共振させて、Zの大きさ、すなわち負荷に流入する電流の大きさに無関係に、V₁/V₂の値が決定するようになっている。

この図で、V₁とV₂の関係を求めると、

$$V_2 = V_1 \times \frac{1}{\frac{1 - \omega^2 L(C_1 + C_2)}{j\omega C_1 Z} + \frac{C_1 + C_2}{C_1}}$$

となる。ここで、 $\omega^2 L(C_1 + C_2) = 1$ (*) となるようにLを選ぶと、

$$V_2 = V_1 \times \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

となり、V₂はZの大きさに無関係になる。→V₁を測定して、V₂がわかる。

しかし、条件式(*)に周波数ωを含む→周波数特性は悪い。

④ 直流変流器(DC CT)、直流変圧器(DC PT)・・・図4.6、図4.7

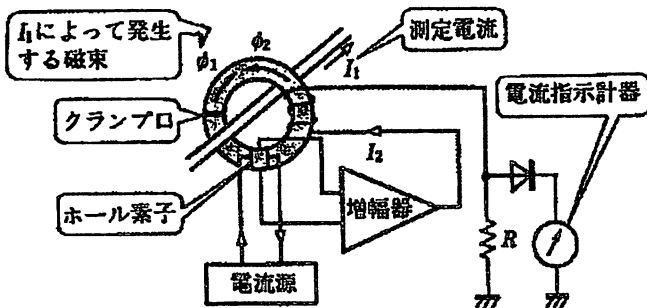
直流は電流変化がない→発生する磁界に変化がない→2次側に電流が流れない

そこで・・・交流電源を設けて発生する磁界をわざと変化させる

○ 直流の電流で鉄芯の透磁率が変化し、2次コイルのインダクタンスが変わることを利用。

○ DC PTのときは、直流を測定電圧V₁と抵抗Rから作り出す。

この他、ホール効果を用いた変流器もある。← 交直両用

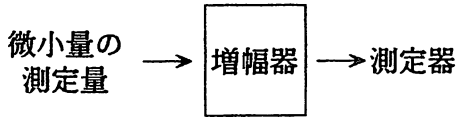


(a) 原理図



(b) 外観

4.3 増幅

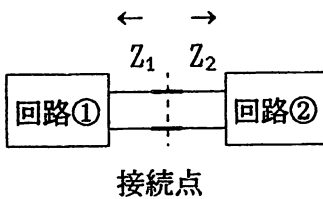


- ・増幅率が一定（線形）
- ・周波数特性，位相特性が良い
- ・小型，低消費電力 など

昔・・・真空管回路 ちょっと昔・・・トランジスタ回路 今・・・IC回路
 (特にオペアンプ)

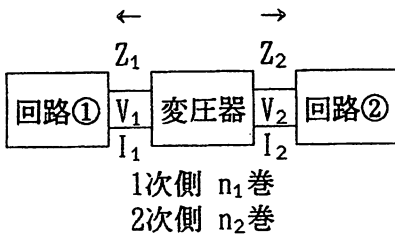
オペアンプ回路の特徴・・・回路の特性や増幅率は外部に接続する部品の定数で決定

4.4 インピーダンス整合（マッチング）



$Z_1 \neq Z_2$ だと反射波が生じ，有効な信号の伝達ができない → マッチングが必要（特に高周波で）

(1) 変圧器による方法



$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 \quad \dots\dots ①$$

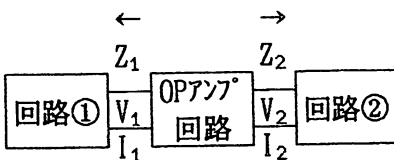
$$V_1 = \frac{n_1}{n_2} V_2 \quad \dots\dots ②$$

②/① より

$$\therefore Z_1 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 Z_2$$

☆変圧器を接合点に入れることで整合が実現

(2) オペアンプによる方法



OPアンプ回路例・・・図4.11, 図4.12, 図4.13

☆OPアンプ回路を接合点に入れることで整合が実現

4.5 フィルタ・A-D変換と雑音

(1) フィルタ

○フィルタとは・・・希望する周波数成分（通過域）のみを通過させる回路
→ 希望帯域以外の雑音を除去できる

○フィルタの分類

①構成要素による分類

(イ) 受動フィルタ (Passive Filter)

R, C, Lの受動素子により構成・・・簡単、良い特性を作るのは難しい
通過域でも減衰有り、電源必要無し

(ロ) 能動フィルタ (Active Filter)

トランジスタやIC（特にオペアンプ）とR, Cで構成
・・・やや複雑、良い特性を得易い
増幅作用有り、電源必要
Lを使わないので小型化が可能

(ハ) メカニカルフィルタ, 水晶フィルタ・・・急峻な特性が得られる 設定値を変更しづらい

(ニ) デジタルフィルタ

デジタル回路により構成・・・回路変更が簡単（プログラムでも可能）
電源必要

②通過域での分類

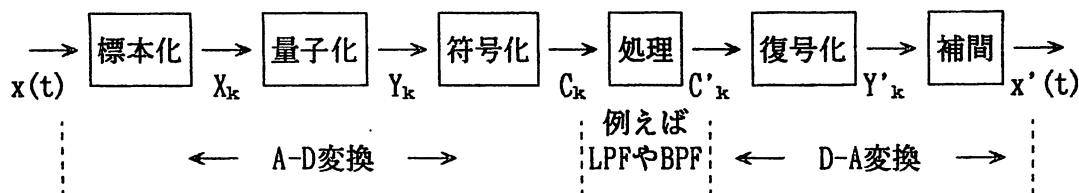
(イ) 低域フィルタ (Low Pass Filter : LPF)・・・図4.14

(ロ) 高域フィルタ (High Pass Filter : HPF)・・・図4.15(a)

(ハ) 帯域フィルタ (Band Pass Filter : BPF)・・・図4.15(b)

(2) A-D変換, D-A変換

測定量をアナログ値のまま処理するより、A-D変換後にデジタル値として処理した法がプログラマブルにできるので良い場合が多い。



A-D変換, D-A変換の流れ

第5章 電気量の測定

5.1 電流・電圧の測定

- (1) 普通電流・電圧の測定
 - (2) 微小電流・電圧の測定
 - (3) 大電流・高電圧の測定
 - (4) インパルス電圧・電流及び波高値の測定
 - (5) 高周波電圧・電流の測定
- 以上の6項目は電気計測 I で取り扱った。

(6) 三相電圧・電流の測定

○三相交流とは・・・

・瞬時電圧が $v_a(t)$ の位相を基準にして

$$v_a(t) = \sqrt{2} |V| \sin(\omega t)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2} |V| \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2} |V| \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

ベクトル表示

$$V_a = V$$

$$V_b = V \exp(-j \cdot 2\pi/3)$$

$$V_c = V \exp(-j \cdot 4\pi/3)$$

で記述される3つの電圧は、大きさが等しく互いに $2\pi/3$ [rad] の位相差を持つ
 → 対称三相交流

・三相電流も同様に記述できる。

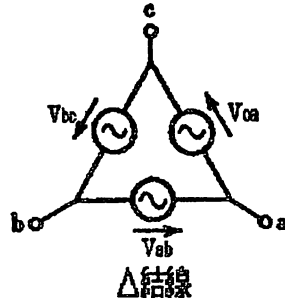
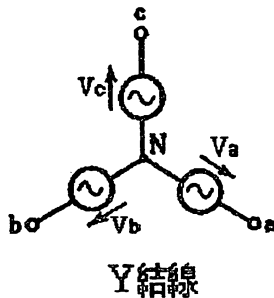
・対称三相電圧を $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$, そのベクトル表示を V_a , V_b , V_c とすると,

$$v_a(t) + v_b(t) + v_c(t) = 0 \quad V_a + V_b + V_c = 0$$

・対称三相電流を $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, そのベクトル表示を I_a , I_b , I_c とすると,

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \quad I_a + I_b + I_c = 0$$

・左図のように結線するのを Y (星形) 結線と呼ぶ。右図のように結線するのを Δ 結線と呼ぶ。



・ V_a , V_b , V_c を相電圧, 共通端子 N を中性点と呼び, V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} を線間電圧と呼ぶ。

・ 線間電圧 V_{ab} は相電圧 V_a に比べて, 大きさが $\sqrt{3}$ 倍, 位相が $\pi/6$ 進んでいる。

○平衡三相の電圧・電流の測定

対称三相電源に平衡負荷が接続されている場合、1相分の電圧・電流を前述の交流電圧・電流の測定方法で求めれば良い。また、位相まで考えにいれる場合は、1相分の位相が分かれば、他の2相はそれぞれ $2\pi/3$ 、 $-2\pi/3$ ずらせば良いことになる。

○不平衡三相の電圧・電流の測定

電源が対称三相であっても負荷が不平衡であるときは、不平衡三相になる。この場合は、対称座標法の理論を用いて測定する。

すなわち、

①図5.17(a)に示す回路で測定される電流 I を式(5.17)に代入することで零相電流 I_0 が求まる。

②図5.17(b)に示す回路で測定される電流 I を式(5.18)に代入することで零相電圧 V_0 が求まる。

③図5.18(a)に示す回路で測定される電圧 V を式(5.19)に代入することで正相電流 I_1 が求まる。

④図5.18(b)に示す回路で測定される電流 I を式(5.20)に代入することで正相電圧 V_1 が求まる。

⑤図問5.5(a) [P117]に示す回路で測定される電圧 V を式(5.21)に代入することで逆相電流 I_2 が求まる。

⑥図問5.5(b) [P117]に示す回路で測定される電流 I を式(5.21)に代入することで逆相電圧 V_2 が求まる。

⑦以上により求めた零相、正相、逆相の各電流・電圧値を式(5.15)に代入することで各相の相電流・相電圧が計算される。

式(5.16)で定義される不平衡率によって不平衡の度合いが表現される。

5.2 電力の測定

(1) 電流計・電圧計法

○負荷で消費される電力 P → 負荷に流れる電流 i と負荷に印可される電圧 v を電流計及び電圧計でそれぞれ測定すれば、 $P=vi$ で計算できる。 → 間接測定

○電流、電圧を同時に測定するための結線方法……図5.19のように2通りある。

どちらも電流計、電圧計が理想的であるとすれば指示値は等しくなる。しかし、実際には内部抵抗により、

(a)回路……指示電圧が負荷に印可される電圧より大きめに表示される

(b)回路……指示電流が負荷に流れる電流よりも大きめに指示される。

そこで……式(5.22)のように

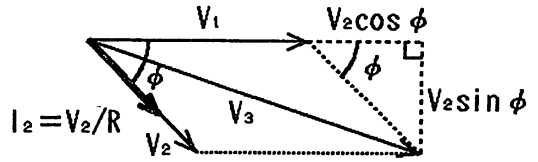
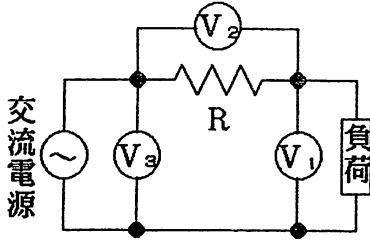
(a)回路…… $i^2 R_A$ だけ電力が大きく測定される。

(b)回路…… v^2/R_v だけ電力が大きく測定される。

$R_A \rightarrow 0$, $R_v \rightarrow \infty$ に作られる……近似的に電力が求まる。

○交流の場合・・・電流*i*(*t*)と電圧*v*(*t*)の間の位相差φから力率cosφを計算し、
 $P=VI\cos\phi$ で有効電力を測定する。(V, I:実効値)

(2) 三電圧計法・・・3つの電圧計で単相電力を測定する方法 (実効値)



上図のように負荷に3つの電圧計*V*₁～*V*₃と抵抗*R*を接続する。電力計は全て理想的とする。

ベクトル図より、

$$\begin{aligned} V_3^2 &= (V_1 + V_2 \cos \phi)^2 + (V_2 \sin \phi)^2 \\ &= V_1^2 + V_2^2 + 2V_1 V_2 \cos \phi \\ \therefore \cos \phi &= \frac{V_3^2 - V_1^2 - V_2^2}{2V_1 V_2} \end{aligned}$$

負荷に流れる電流*I*は抵抗*R*に流れる電流と等しいゆえ、 $I = V_2/R$ である。従って、負荷で消費される電力*P*は

$$P = V_1 I \cos \phi = V_1 \times \frac{V_2}{R} \times \frac{V_3^2 - V_1^2 - V_2^2}{2V_1 V_2} = \frac{V_3^2 - V_1^2 - V_2^2}{2R}$$

で求まる。

同様な考え方で、3つの電流計による三電流計法もある。

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



(3) 電力計による測定

$$\begin{aligned} (\text{電力の測定}) &= (\text{電流} \times \text{電圧の測定}) \\ &= (\text{電流} \times \text{抵抗} \times \text{電流の測定}) \\ &= (\text{電流}^2 \times \text{抵抗の測定}) \end{aligned}$$

→ 2乗目盛計器 (駆動トルクが電流の2乗に比例する計器) を使用すれば良い。

→ 電流力計形計器、誘導形計器、熱電形計器が使用できる。

①電流力計形電力計

○電流力計形計器(教科書P35, 電気計測 I プリントP27)・・・

固定コイルと可動コイルに流れる電流の積に(ほぼ)比例した駆動トルクを得る。

→

・電圧計にするとき・・・次頁図(a)のように、固定コイル、可動コイルを直列に

し、さらに直列抵抗 r を通して、測定電圧 e を加える。

$$T_D = K(e/r)^2 \cos(\alpha - \theta) \doteq K'e^2 \cdots \text{測定電圧の2乗に比例した駆動トルクを得る。}$$

→ 2乗目盛(実効値指示)

・電流計にするとき……同図(b)のように、固定コイル、可動コイルを直列にし、同じ電流 i を流す。

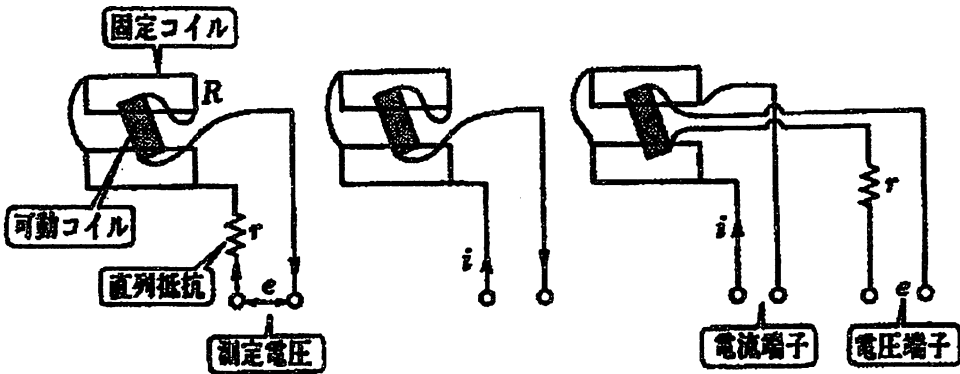
$$T_D = Ki^2 \cos(\alpha - \theta) \doteq Ki^2 \cdots \text{測定電流の2乗に比例した駆動トルクを得る。}$$

→ 2乗目盛(実効値指示)

・電力計にするとき……同図(c)のように、固定コイルに電流を、可動コイルに電圧を加える。

$$T_D = Ki(e/r) \cos(\alpha - \theta) \doteq K'ie \doteq K'P \cdots \text{測定電力に比例した駆動トルクを得る。}$$

→ 等分目盛



(a) 電圧計の接続 (b) 電流計の接続 (c) 電力計の接続

電圧端子の接続の仕方は図5.20のように2通りがある。

(a)の場合……固定コイルに可動コイルに流れる電流も流れる

(b)の場合……可動コイルに固定コイルにかかる電圧も加わる

→ いずれも誤差となる……対策……図5.21のような巻戻しを行う

②誘導形電力計

○誘導形計器(教科書P38, 電気計測IプリントP34)……

2つの磁界を発生させるそれぞれの電流の積に比例した駆動トルクを得る。

→

・電流計にするとき……次頁図(a)のように、測定電流を分流し、コイル2に直列接続した抵抗 R により I_1 と I_2 の間に位相差を作り出す。

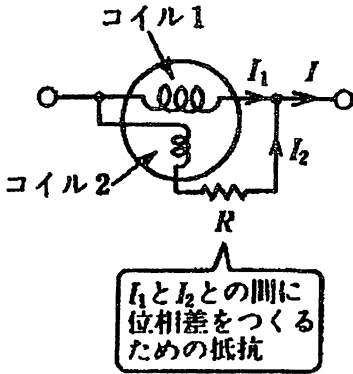
$$T_D = K\omega I^2 \sin \beta = K'I^2 \cdots \text{測定電流の2乗に比例した駆動トルクを得る。}$$

→ 2乗目盛(実効値指示)

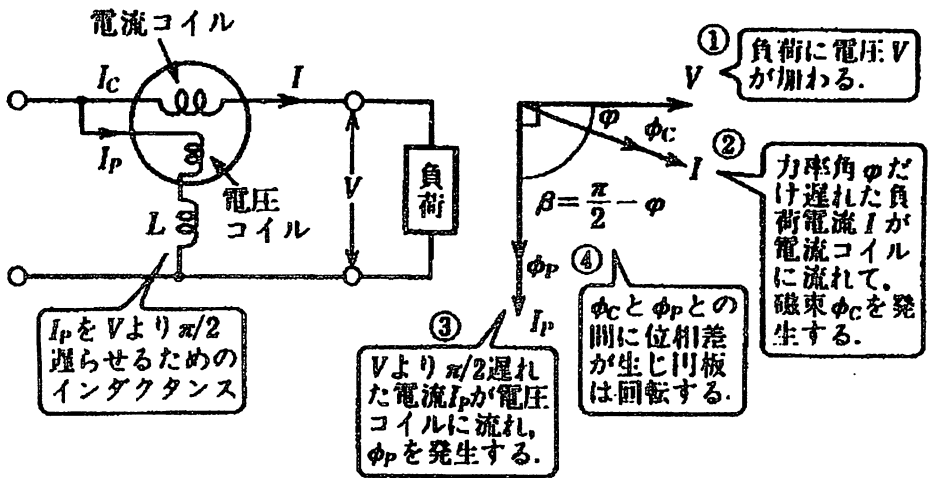
・電力計にするとき……同図(b)のように、電流コイルに負荷電流 $I=I_c$ を通し、電圧コイルにはそのインダクタンス L を大きくして負荷電圧 V より $\pi/2$ 遅れた電流 $I_p=V/(\omega L)$ を流れるようにする。負荷の力率角を ϕ とすれば(c)のベクトル図より I_c と I_p の位相差 β は $\beta=\pi/2-\phi$ となる。

$$T_D = K\omega I_c I_p \sin \beta = (K/L) IV \sin(\pi/2 - \phi) = K' IV \cos \phi = K' P$$

……測定電力に比例した駆動トルクを得る。
→ 等分目盛



(a) 電流計の結線



(b) 電力計の結線

(c) 電力計のベクトル図

※誘導形電力計は後述の積算電力量計に利用されている。

③熱電電力計

○熱電形計器(教科書P37, 電気計測 I プリントP30)……

測定電流の2乗に比例した熱線による発熱量に比例した電流を熱電対により得て、これを可動コイル形計器で読み取る。

→

・電流計にするとき……教科書P37図3.12

$T_D = KI^2$ ……測定電流の2乗に比例した駆動トルクを得る。
→ 2乗目盛(実効値指示)

・電力計にするとき……教科書P91図5.23

$T_D = K_1 VI \cos \phi + K_2 I^2 = K_1 P + K_2 I^2$ (問題5.6解答参照)
…… $K_2 I^2$ を差し引くことで電力Pを求めることができる。

※低電圧，低力率，高周波の電力測定によく用いられる。

(4) 皮相電力，無効電力の測定

負荷にかかる実効値電圧 V ，流れる実効値電流 I ，位相差(力率角) ϕ のとき，

有効電力 $P = VI \cos \phi$ [W]……電力計等で測定

無効電力 $P_r = VI \sin \phi$ [var]……無効電力計(図5.24)で測定や $P_r^2 = P_a^2 - P^2$ で計算

皮相電力 $P_a = VI$ [VA]…… V と I を別々に測定して計算

※電力の有効利用のチェックや力率 $\cos \phi$ の測定のために無効電力や皮相電力の測定は重要である。

【MEMO】

(5) 三相電力の測定

○不平衡三相の場合

一般に、「ブロンデルの定理」により、n相n線式の電力はn-1個の单相電力計を用いて、その指示値に代数和で求めることができる。

→ 三相三線式の場合、2個の单相電力計を図5.25のように結線して求められる。

・・・二電力計法・・・三相電力計

$$P = V_{ac} I_a \cos \phi_a + V_{bc} I_b \cos \phi_b$$

V_{ac}, V_{bc} : 線間電圧
 I_a, I_b : 相電流
 ϕ_a, ϕ_b : 線間電圧と電流の位相差

(上式の証明)

図5.25において、

- v_a, v_b, v_c : 各線の負荷の中性点に対する瞬時電圧
- i_a, i_b, i_c : 各線の負荷に流れる瞬時電流
- p_a : i_a と $(v_a - v_c)$ すなわち v_{ac} から計算される瞬時電力
- p_b : i_b と $(v_b - v_c)$ すなわち v_{bc} から計算される瞬時電力
- ϕ_a : i_a と $(v_a - v_c)$ すなわち v_{ac} との間の位相差
- ϕ_b : i_b と $(v_b - v_c)$ すなわち v_{bc} との間の位相差

とすると、

$$p_a = i_a \cdot (v_a - v_c) = i_a \cdot v_{ac} \quad p_b = i_b \cdot (v_b - v_c) = i_b \cdot v_{bc}$$

中性線がないので、

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

従って、

$$\begin{aligned}
 P &= (\text{三相電力}) = (i_a \cdot v_a + i_b \cdot v_b + i_c \cdot v_c \text{の平均値}) \\
 &= \{i_a \cdot v_a + i_b \cdot v_b + (-i_a - i_b) \cdot v_c \text{の平均値}\} \\
 &= \{i_a \cdot (v_a - v_c) + i_b \cdot (v_b - v_c) \text{の平均値}\} \\
 &= (p_a + p_b \text{の平均値})
 \end{aligned}$$

$$\therefore P = V_{ac} I_a \cos \phi_a + V_{bc} I_b \cos \phi_b$$

となる。

○平衡三相の場合

1相の電力Wを3倍すれば良い。

$$W = V_0 I \cos \phi \quad V_1 = \sqrt{3} V_0 \quad V_0: \text{相電圧} \quad V_1: \text{線間電圧} \quad \phi: V_0 \text{ と } I \text{ の位相差}$$

とすれば、

$$P = W_a + W_b + W_c = 3W = 3V_0 I \cos \phi = \sqrt{3} V_1 I \cos \phi$$

で求まる。

(6) その他の電力測定法

① ホール効果電力計・・・図5.26

ホール素子の起電力 V が磁束密度 B と電流 I の積に比例することを利用する。

$$B = k_1 \times (\text{負荷電流}) \quad I = k_2 \times (\text{負荷電圧})$$

とすれば、

$$V = k_3 \times (\text{負荷電流}) \times (\text{負荷電圧}) = P \quad (\text{但し, } k_3 = k_1 \times k_2)$$

$$P = I \cdot V$$

$$V = B \cdot I$$

となり、起電力 V を測定すれば電力 P が求まる。

② デジタル電力計

負荷電流に比例した電圧と負荷電圧をオペアンプ回路で乗算し、これをデジタル電圧計で表示する。

5.3 積算量の測定

○積算計器・・・ある時間中の色々な量を積算する計器

(代表例) 電力量計・・・各家庭に設置されている電気メータ

電力の売買、取引の料金を計算する基礎になる計器だから計量法によって厳しく取り締まられている。

○積算計器の構成

- ① 駆動装置・・・計量する量(電力、無効電力、電流など)に比例する駆動トルクを発生する回転部
- ② 制御装置・・・回転部に金属円板をつけ、これに制動用の永久磁石をつけて、回転力に比例した制御力(制御トルク)を発生させる部分・・・うず電流制動装置と同原理
- ③ 計量装置・・・計測量に比例する回転円板の回転数を測り、表示させるために歯車装置。表示装置には、自動車の走行距離メータのような数字車による数字表示の現字形と、指針表示の指針形がある。

(1) 電力量計

○直流用・・・電池の充放電，電気化学工場，電気鉄道などで使用
 ※整流子電動機形電力量計・・・図5.27

電動機(モーター)の回転速度が可動コイルに流れる電流と固定コイルで発生する磁界の積に比例することを利用

・駆動トルク

固定コイル・・・負荷電流 i

可動コイル・・・負荷電圧 e に比例した電流 $i_e = e/R$

→ $T_D = K_1 i i_e = K_1' i e = K_1' P$ 電力Pに比例

・制御トルク

$T_c = K_2 n$ 回転速度nに比例

$T_D = T_c$ のとき $n = KP$ 電力Pに比例する回転速度n

この回転速度での円板の回転を歯車を使用して積算→電力量(単位:kWh)

※水銀電動機形電力量計 もある

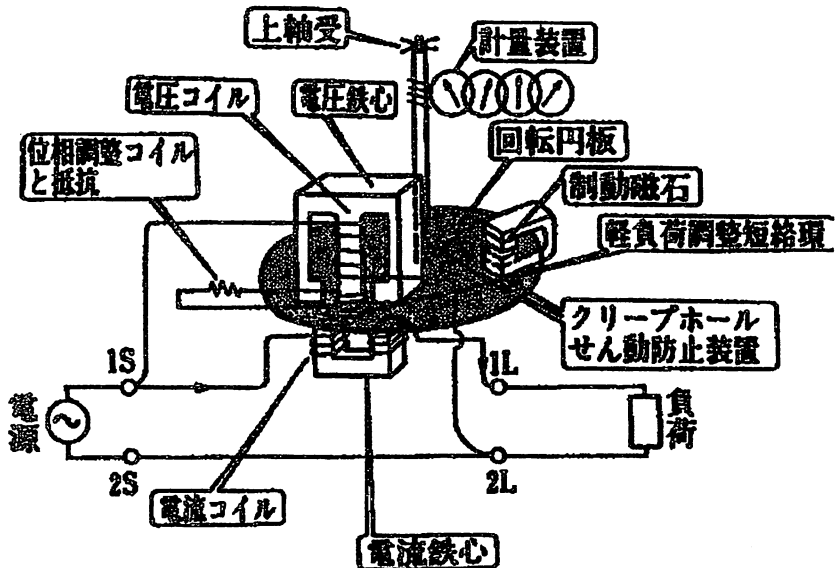
○交流用・・・一般家庭でも使用

※誘導形電力量計・・・図5.28

移動磁界式誘導形計器を応用

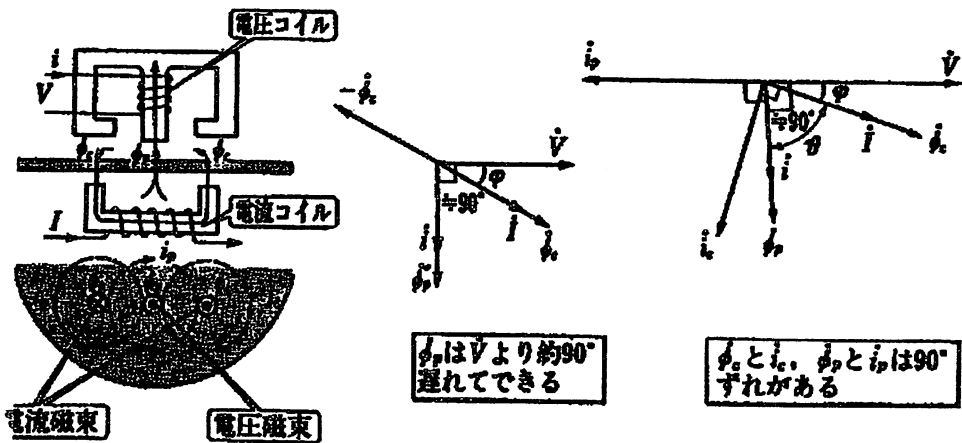
☆原理

・駆動トルク



誘導形電力量計構造図

(電圧コイル・・・細い銅線が多数回巻いてある)
 (電流コイル・・・太い銅線で巻数が少ない)

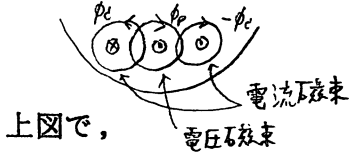


(a) 移動磁界発生原理図

(b) 磁束のベクトル図

(c) 円板上の磁束、電流関係図

原理説明図



上図で、

V : 電力量を測ろうとする回路の電圧

I : 電力量を測ろうとする回路の電流

φ : V と I の位相差

ϕ_p : 電圧コイルによる磁束で、円板を貫いている部分の磁束

ϕ_c : 電流コイルによる磁束で、円板を貫いている部分の磁束

$-\phi_c$: ϕ_c と反対向きの磁束

i_c, i_p : それぞれ ϕ_c, ϕ_p の変化で、円板中に誘導されて流れるうず電流

とする。

(イ) 図(b)の磁束のベクトル図からもわかるように、巻数が多く、インダクタンス分が大きいので、電圧コイルには、ほぼ電圧より 90° 遅れた電流が流れ、これと同相の電圧磁束 ϕ_p ができる。

(ロ) 従って、円板を貫く電圧磁束・電流磁束は、 $\phi_c \rightarrow \phi_p \rightarrow -\phi_c$ の順に遅れて発生するので、移動磁界となる。

(ハ) この移動磁界に円板がくっつくように回転する。

① ϕ_p と i_c 及び $-i_c$ の間に働く力は次頁図(a)のように円板中央方向になる。

② ϕ_c と i_p の間に働く力は同図(b)のように円板中で左方向になる。

③ $-\phi_c$ と $-i_p$ の間に働く力も②と同様に左方向となる。

(ニ) 上記①による平均トルク

$$T_p = k_p \phi_p i_p \cos(90^\circ - \theta) = k_p \phi_p i_p \sin \theta \quad \text{右方向トルク}$$

②による平均トルク

$$T_c = k_c \phi_c i_p \cos(90^\circ + \theta) = -k_c \phi_c i_p \sin \theta \quad \text{左方向トルク}$$

③による平均トルク

$$T_c' = k_c \phi_c i_p \cos(90^\circ + \theta) = -k_c \phi_c i_p \sin \theta \quad \text{左方向トルク}$$

(※) 円板に働く右方向の合成駆動トルクは

$$T_D = T_p - T_c - T_c' = k_p \phi_p i_p \sin \theta + 2k_c \phi_c i_p \sin \theta$$

i_c ϕ_c , i_p ϕ_p , V と ϕ_p の位相差 90° , ϕ_p V , ϕ_c I とすると,

$$T_D = k \phi_p \phi_c \sin \theta = k' V I \sin \theta = k' V I \sin(90^\circ - \varphi)$$

$$\therefore T_D = k_1 V I \cos \varphi = k_1 P \quad \dots\dots \text{電力}P\text{に比例}$$

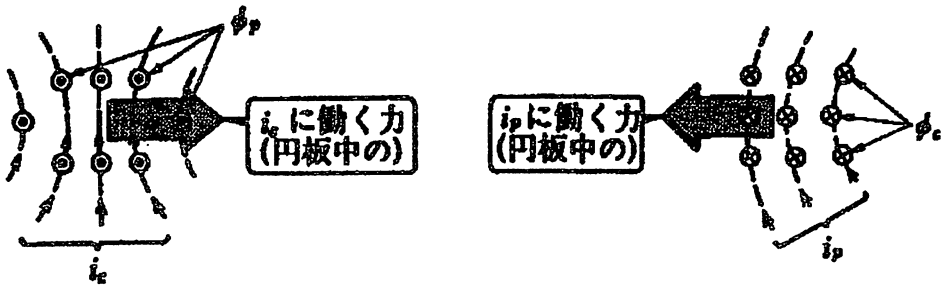
となる.

・制御トルク T_c

$$T_c = K_2 n \quad \dots\dots \text{回転速度}n\text{に比例}$$

$$T_D = T_c \text{のとき} \quad n = KP \quad \dots\dots \text{電力}P\text{に比例する回転速度}n$$

この回転速度での円板の回転を歯車を使用して積算 → 電力量(単位:kWh)



(a) i_c に働く力

(b) i_p に働く力

円板を貫く磁束とうず電流の間の力の関係

☆誘導形電力計の調整装置

①位相調整装置

原理説明では……電圧磁束 ϕ_p は測定回路の電圧 V より 90° 位相が遅れていると理想的に取り扱った。

しかし現実には…コイルの抵抗成分のため、 90° の位相角ではなく、 $80 \sim 86^\circ$ となる。

→ 誤差の原因

対策：図5.29のような補助的なコイルを巻き、位相差が 90° となるように調整

②軽負荷補償装置

軸受や歯車の摩擦による誤差は円板の回転速度（負荷の大小）に関係なく一定
→ 負荷が小さい（軽負荷）ほど誤差の割合が大きくなる

対策：板を打ち抜いて作った銅リングの短絡円環を電圧鉄心の一部にかける
→くま取りコイル作用で移動磁界が作られ摩擦トルクが補償される

③潜動防止装置

②の効果が大きすぎると電圧を加えるだけで円板が回転してしまう

対策：円板に「クリープホール」という小穴を開ける
→うず電流の通り道の抵抗を大きくして駆動力を妨げられ補償される

④過負荷補償

過負荷（負荷が大きい）のとき、制御トルクの影響が大きくなる
→ 誤差の原因となる

対策：制御用の制動磁石の位置をより円板中心に近づける
→制御トルクが小さくなり、誤差が補償される

(2) 無効電力量計

電力量計の駆動トルク T_D

$$T_D = k \phi_p \phi_c \sin \theta = k' V I \sin \theta$$

が基本。

有効電力量計では、 $\theta = 90^\circ - \varphi$ となるようにコイルを調整

$$T_D = k' V I \sin(90^\circ - \varphi) = k' V I \cos \varphi = k' P \dots \dots \text{有効電力に比例}$$

無効電力計では、 $\theta = 180^\circ - \varphi$ となるように位相調整を行う

$$T_D = k' V I \sin(180^\circ - \varphi) = k' V I \sin \varphi = k' P_r \dots \dots \text{無効電力に比例}$$

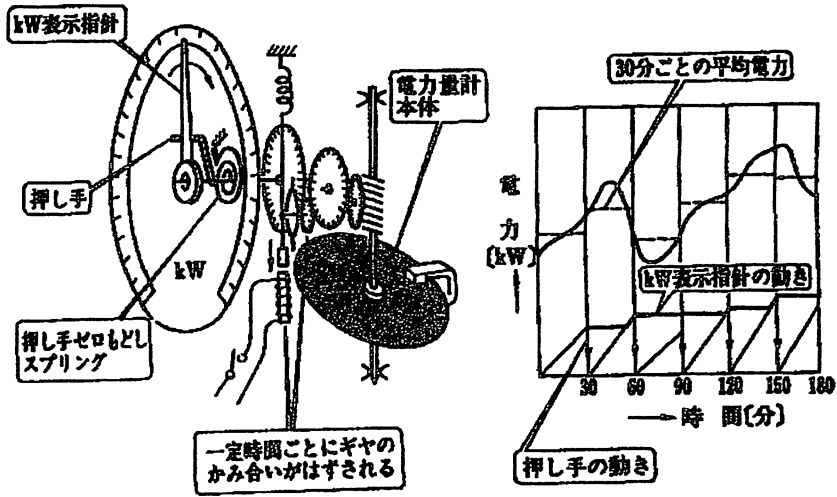
(3) 最大需用電力量計……図5.30

ある一定の時間(15, 30, 60分など)内での最大需用電力量を指示

← 短時間に発生する大きな需用電力も考慮した発電電設備の管理のため

※積算形

電力量計 + 最大需用表示器 で構成される。



(4) 電力量計の試験

○負荷の接続法による分類

- ①実負荷法……実際に負荷に電力を消費させて測定する方法
 - ・経済的に無駄
 - ・負荷の値を調整することが難しい
- ②虚負荷法……電流コイルに電流を流す電源と電圧コイルに電圧を加える電源を別々に用意し、かつ位相器によってその間の位相を調整する方法
 - ・多数の計器を同時に試験できる

○試験内容による分類

- ①潜動試験……無負荷で定格電圧が110[%]になったとき潜動の有無を調べる
- ②始動電球試験…無負荷・定格電圧で始動電流が一定値以下であることを確かめる試験
- ③計量装置試験…計量装置の歯車比が正しいかどうかを調べる試験
- ④誤差試験
 - (a) 秒時計法……円板がN回転するのに要する時間を正しい場合と比較する方法
 - (b) 回転標準器法…被試験器の回転数がNのときの電力量の標準計器である回転標準器の回転数 N_0 を調べる方法
 - (c) マスタメータ法…被試験計器と同一形式、同一定格の計器をマスタメータとして、あらかじめその特性を試験しておき、被試験計器20個程度をこれに接続して比較する方法

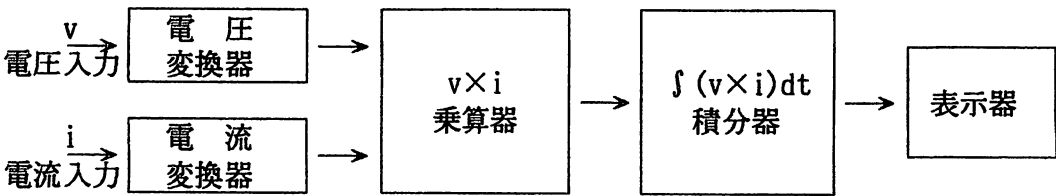
(5) 電子式電力量計

最近の電子技術の進歩により、電力量計も電子式になりつつある。

○特徴

- ・電圧，電流，周波数特性などが優れている。
- ・計量器自体の電力損失が少ない。
- ・負荷電流の波形，負荷の不平衡，外部磁界，温度変化に対する特性変動が少ない。
- ・1台の計器中に電力量・無効電力量・最大需用電力量・平均力率など多くの機能を組み込める。
- ・長期間安定している。機械的可動部がないので特性変化が少ない。
- ・電源からのノイズ，空中からのノイズ等の外部雑音に対する対策が必要
- ・停電に対する対策が必要

○原理図



【MEMO】

5.4 力率・位相の測定

(1) 力率の測定

①有効電力，無効電力，皮相電力による測定

(a) 単相の場合

有効電力 $P = VI \cos \phi$ 無効電力 $P_r = VI \sin \phi$ 皮相電力 $P_a = VI$

より，
$$\cos \phi = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} \quad (-1 \leq \cos \phi \leq 1)$$

(b) 三相の場合

三相有効電力 $P = V_{ac} I_a \cos \phi_a + V_{bc} I_b \cos \phi_b$

(単相電力計を用いた二電力計法による測定)

三相無効電力 $P_r = V_{ac} I_a \sin \phi_a + V_{bc} I_b \sin \phi_b$

(単相無効電力計を用いた二電力計法による測定)

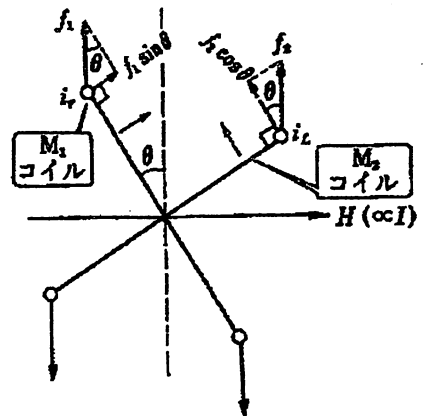
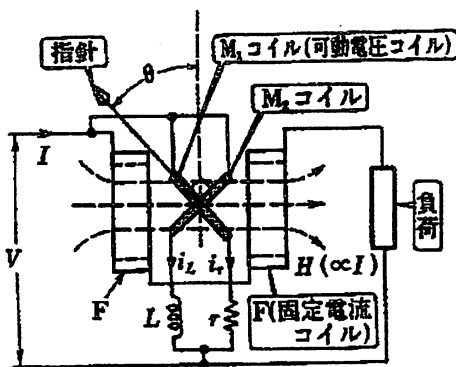
より，
$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}} \quad \dots\dots \text{ 等価力率}$$

平衡三相の場合は， $P = \sqrt{3} V_l I \cos \phi$ ， $P_r = \sqrt{3} V_l I \sin \phi$ より，

$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{3} V_l I}$$

②力率計による測定

(a) 電流力計形単相力率計… 図5.31



固定コイルF……負荷電流I

可動コイルM₁……線間電圧Vと同相の電流i_r

” M₂…… ” π/2位相が遅れた電流I_L (=V/(jωL))

各可動コイルの駆動トルクは、

$$T_{D1} = K_1 i_r \cos \phi \sin \theta \quad T_{D2} = K_2 i_L \cos(\phi - \pi/2) \cos \theta = K_2 i_L \sin \phi \cos \theta$$

有効電力を意味する 無効電力を意味する

交差可動コイルは $T_{D1} = T_{D2}$ となる点で静止するから、 $i_r = i_L$ 、 $K_1 = K_2$ となるようにコイルを作れば、

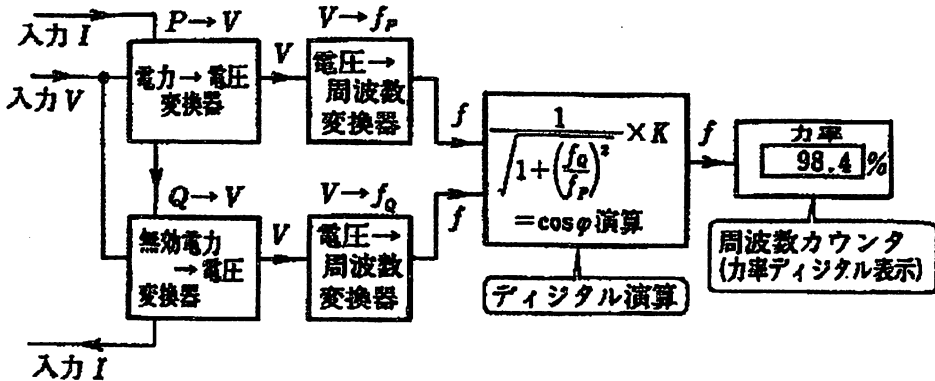
$$\cos \phi \sin \theta = \sin \phi \cos \theta \quad \therefore \tan \phi = \tan \theta \quad \text{すなわち} \quad \phi = \theta$$

つまり、交差コイルのふれ角 θ は位相角 ϕ を示すので、これを力率 $\cos \phi$ で目盛りば良い。

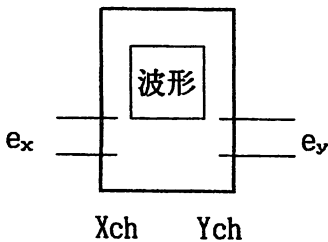
(b) 電流力計形三相力率計…図5.32

やはり、 $\tan \phi = \tan \theta \quad \therefore \phi = \theta$ となり、ふれ角 θ から力率 $\cos \phi$ が測定される。

(c) デジタル力率計



(2) 位相の測定

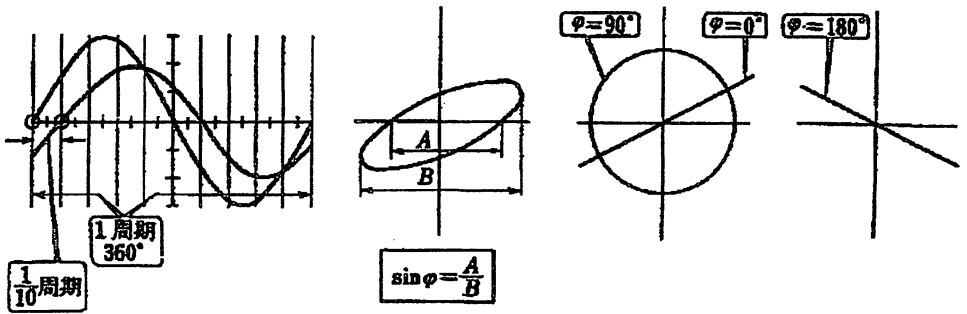


$$e_x = E \sin \omega t \quad e_y = E' \sin(\omega t + \phi)$$

周波数が同じで位相差がある二つの入力

(a) 波形観測方式

2つの現象が見られる二現象オシロスコープを使い、次頁の図のように二つの波形の差を読み取る。今、二つの波形に周波数は等しいので、その周期を T とし、づれを l とすれば、



(a) 波形観測方式

(b) リサージュ図形による方式

$$\phi = 1/T \times 360^\circ$$

で位相差が計算される。図の場合は、 $1/T=1/10$ なので、 36° の位相差となる。

(b) リサージュ図形による方法

X-Yモードにして、 e_x 、 e_y を入力すると、図(b)のようなリサージュ図形が得られる。この図形からA、Bを読み取り、 $\sin \phi = A/B$ となる ϕ を計算する。但し、 $A \geq 0$ 、 $B \geq 0$ で読み取ると、 $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ となってしまうので、リサージュ図形の傾きの方向から、 $-90^\circ \leq \phi \leq 0^\circ$ もしくは $90^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ と正しい位相に合わせる必要がある。

(c) 方形波による測定…図5.35, 図5.36

(a)の方法を改良した方形波による測定方法もある。

(3) 同期検定, 相順表示

①同期検定

交流発電機の並列運転… E , ω , ϕ を一致させる必要がある。

E …電圧計で確認できる。

ω , ϕ …同期検定で確認

(a) リサージュ図形による方法

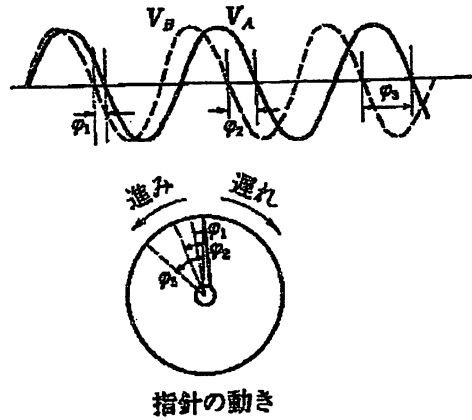
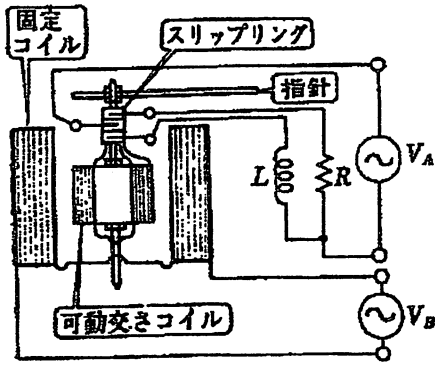
リサージュ図形により二つの発電機が同期しているかどうかを確認する。

(b) ランプによる検出…図5.37

ランプの点滅により二つの発電機が同期しているかどうかを確認する。

(c) 同期検定器による検出

電流力計形力率計と同原理の同期検定器の指針の動きにより二つの発電機が同期しているかどうかを確認する。



②相順表示

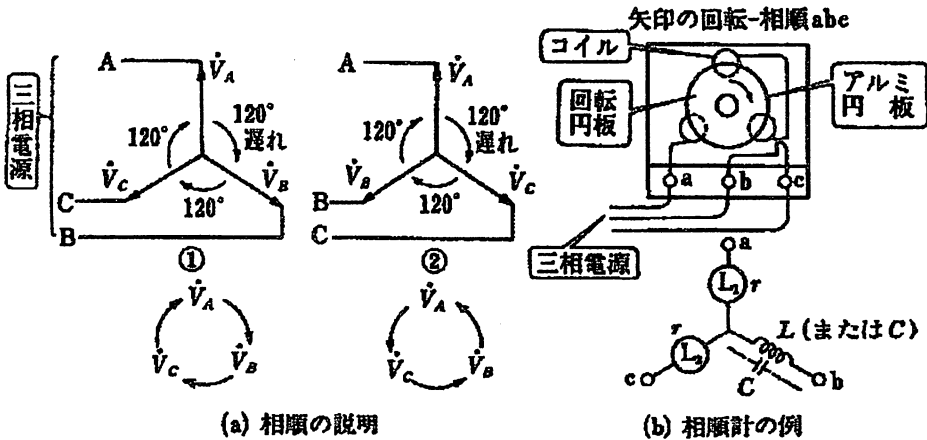
三相交流発電機の並列運転・・・各発電機のE, ω , ϕ を一致させるだけでなく、相順の一致も必要になる。

(a) 回転磁界と円板利用の相順計

下図(b)の上図において、円板が矢印の方向に回転したら、相順はa→b→cで、逆転すればa→c→bである。

(b) ランプでの検出・・・図5.38

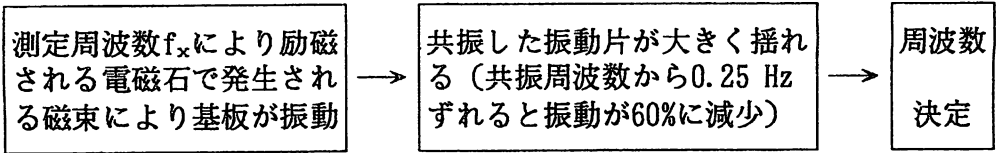
下図(b)の下図のように、 $r[\Omega]$ の電球2個と、 ωL (または $1/(\omega C)$) [Ω]のリアクタンス1個をつなぎ、 $r = \omega L$ (または $r = 1/(\omega C)$) にしておく。相順がa→b→cならば L_1 が明で L_2 が暗、逆ならば L_1 が暗で L_2 が明となる。



5.5 周波数の測定, 波形観測

(1) 商用周波測定

① 振動片形周波数計・・・図5.39



特徴：

- ・ 電圧の大きさや波形の歪みの影響が少ない。
- ・ 動作が安定
- ・ 簡単な構造
- ・ 不連続な表示

② 電流計形周波数計・・・図5.40

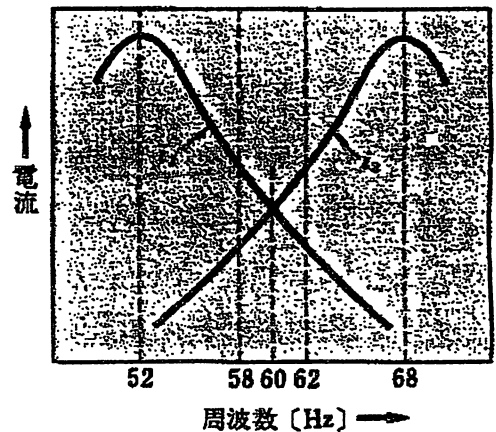
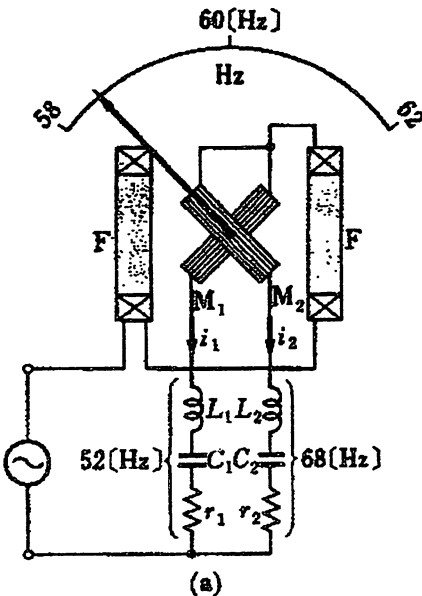
C_0 に流れる電流による回転力とRLC回路に流れる電流による逆方向の回転力とのつりあいの位置 θ から周波数が式(5.45)で決定される。

特徴：

- ・ 電圧の大きさに関係ない。

③ 比率計形周波数計

目標とする周波数(50Hz or 60Hz)の前後の周波数に共振したRLC回路に流れる電流の強弱に合わせて振れ角 θ が決定。

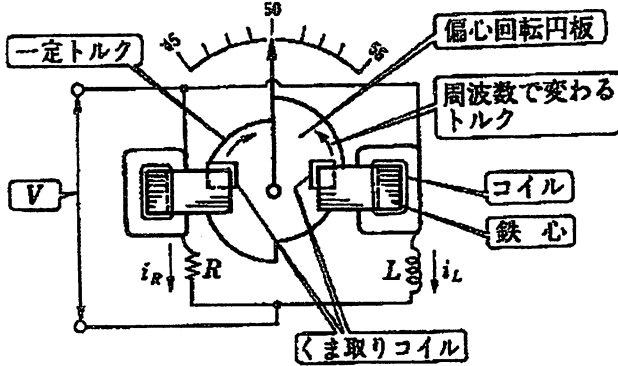


特徴：

- ・ 電圧の大きさに関係ない。

④誘導形周波数計

2個のくま取りコイルと回転円板から構成されている。各くま取りコイルによる円板駆動力が互いに反対になるように配置されている。周波数が変わるとL側のリアクタンスが $X_L = 2\pi fL$ であるので電流が変化し、R側の電流は一定なので、振れ角 θ が周波数により決定される。



$$i_R = \frac{V}{R} : \text{一定}$$

$$i_L = \frac{V}{2\pi fL} : f \text{で変わる}$$

特徴：

- ・電圧の大きさに関係しない。
- ・大ざっぱな表示でよい配電盤用などに適している。
- ・校正(構造)が簡単

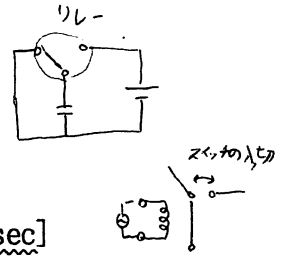
(2) 可聴周波及び高周波の測定

①コンデンサー充放電による方法・・・図5.41

SW-Kを測定周波数 f_x で切り替える(リレーを使用)。

1回の充電電荷 $CE [c]$ \rightarrow 1秒間の充電電荷 $f_x CE [c/sec]$
 $\rightarrow [A]$

$\therefore I = f_x CE \rightarrow$ 電流Iを測定すれば周波数 f_x が求まる。



特徴：

- ・リレーを電子的に構成すれば 10^5 Hz程度まで測定可能。

②周波数ブリッジによる方法・・・図5.42, 図3.33(c)など

ブリッジの平衡条件から周波数を計算できる。

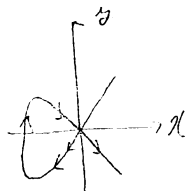
特徴：

- ・精密測定が原理的に可能。
- ・可聴周波数(20kHz程度まで)用。

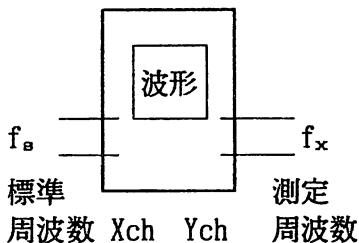
③リサーチ図形による方法・・・図5.43

曲線がx軸を切る回数 n_x 曲線がy軸を切る回数 n_y とすると

$$f_x = (n_x/n_y) f_s$$



$$\left. \begin{array}{l} \lambda_x = 3 \\ \lambda_y = 2 \end{array} \right\} \frac{\lambda_y}{\lambda_x} = 1.5$$



周波数比	位相		
	0°	45°	90°
1.5			
2			
3			

特徴：

- ・標準周波数発振器が用意さえできれば、数Hz～数十MHzまで測定可能。

④周波数カウンタ・・・図5.44

測定周波数 f_x に比例したパルス列に変換 → 固有周期 T の間のパルス数をカウント
 → 周波数 f_x を計算・(デジタル)表示

特徴：

- ・数Hz～数十MHzまで測定可能。
- ・読み取り精度が $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 程度と高い。
- ・電源が必要。

⑤LC吸形周波数計・・・図5.45

RLC直列回路に高周波電圧を加え、可変のCまたはLを調整して電流が最大となる状態、すなわち共振状態にする。(高周波電流計としては熱電形等が使用される)

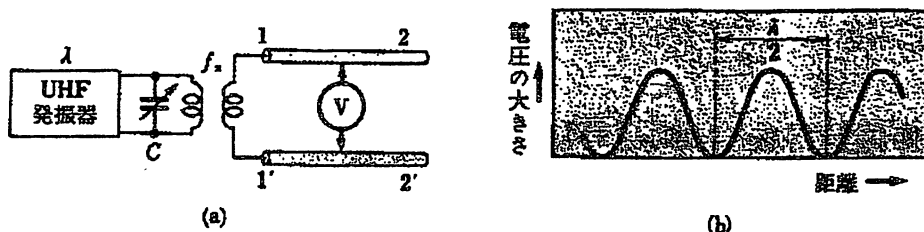
→

このときの可変のCまたはLの値と固定のLまたはCの値から式(5.45)を用いて周波数を決定する。(可変のCまたはLに目盛がつけられ、周波数が直読できるようになっている。)

特徴：

- ・高周波用(数十MHz程度まで)
- ・構造及び取扱いが簡単。
- ・高調波による誤差がない。
- ・比較的大きな出力の電波の周波数測定に適している。
- ・感度や確度が悪い。(確度は1~2%程度)

⑥ レッヘル線形周波数計



2本の平行導線上に定在波が発生して、その電圧分布は図(b)のようになる。そこで、高周波電圧計(熱電形計器など)を平行線上を移動させ、出力が最大となる2点間の距離 $\lambda/2$ (λ :空中での波長)を測定し、

$$f_x = 3 \times 10^8 / \lambda$$

から測定周波数を求める。

特徴：

- ・数十MHz~数GHzまで測定可能
- ・出力最大となる2点間の距離を複数求めることで、精度の向上が可能。

⑦ ヘテロダイン周波数計・・・図5.46

測定周波数 f_x と正確に値がわかる可変局部発振周波数 f_0 とを混合して、差成分 $f_x - f_0$ を作りだす。 $f_x - f_0 = 0$ となったとき、スピーカーから低音が聞こえ、 $f_x - f_0 = 0$, すなわち $f_x = f_0$ となった(ゼロビート)ときはスピーカーの音が聞こえなくなる。従って、このときの局部発振周波数 f_0 が測定周波数となる。

特徴：

- ・可変局部発振器が安定に動作するならば、数百Hz程度まで測定可能。
- ・構成が複雑で、取扱いも難しい。
- ・高調波による誤差(測定ミス)が生じやすい。
- ・微弱な出力な電波の周波数測定に適している。
- ・感度、確度が高い。(確度は 10^{-5} 程度)
- ・電源が必要。

第6章 磁気量の測定

6.1 磁界・磁束の測定

磁界 H と磁束密度 B の間には、 $B = \mu H$ (μ :透磁率)なる関係があるので、 B もしくは H が測定され μ が既知ならば、 H もしくは B も測定できる。

また、磁束 ϕ と磁束密度 B の間には、 $\phi = BS$ (S :面積)なる関係があるので、 ϕ もしくは B が測定され S が既知ならば、 B もしくは ϕ も測定できる。

①磁力計による磁界測定方法・・・図6.1

永久磁石による磁界の測定方法

・・・地磁気の水平成分が既知ならば、磁力の発生源からの磁界が測定できる。

$$H_m = H_y \cdot \tan \theta \quad [A/m]$$

H_m : 測定磁界

H_y : 地磁気の水平成分

θ : 合成磁界と地磁気の水平成分とのなす角
(振れ角)

→磁石の磁気モーメントの測定に応用される

・図6.1の棒磁石の磁気モーメント M の測定

$$H_m = \frac{m}{4\pi\mu_0(d-1)^2} + \frac{-m}{4\pi\mu_0(d+1)^2} = \frac{4mld}{4\pi\mu_0(d^2-1)^2}$$
$$= \frac{M}{2\pi\mu_0d^3} \quad M=2ml$$

ここでは、 $(1+x)^n = 1+nx$ ($|x| \ll 1$)を利用して、
 $(d^2-1)^2 = d^4\{1-(1^2/d^2)\}^2 = d^4\{1-2(1^2/d^2)\} = d^4$ ($d \gg 1$)
と近似している

よって、求める磁気モーメント M は

$$M = 2\pi\mu_0d^3 \cdot H_m \quad [A \cdot m^2]$$

②ガウス計による磁界測定方法・・・図6.2

狭い空間の磁界測定に適している・・・発電機や電動機の回転子と固定子の間の磁界の測定など

使い方・原理

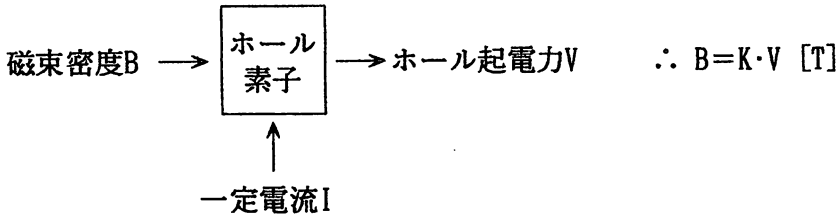
(イ) 真ちゅう保護管を測定磁界中に差し込み、軸を中心に回転させる。

(ロ) 図6.2(b)の状態の時、小磁石 m は右に回転しようとするトルクが最大となり、バネによる制御トルクとつりあい、最大振れ角となる。

(ハ) このときの振れ角 θ と既知の磁石の磁気モーメント等から、式(6.3)

により磁界Hが測定される。

③ホール効果を利用した磁束密度測定方法・・・図5.13(P83)
狭い空間の磁界測定に適している



④磁気変調器による磁界測定方法・・・図6.4
B-H曲線の飽和状態によるひずみを利用した磁界測定方法

⑤その他の磁界測定方法

- (i) 核磁気共鳴吸収(NMR)・・・図6.5・・・精度の高い磁界の測定用
- (ii) 超伝導量子干渉素子(SQUID)・・・極めて感度の高く精度の高い磁界測定用

⑥衝撃検流計による磁束密度測定方法・・・図6.7

衝撃検流計・・・普通の検流計に比べて周期が著しく長い

→ 検流計の周期に比較して継続時間の短いパルスの電流を検流計に流した場合、検流計可動部は直ちにパルスの電流に応答できず、電流通過後はじめて可動部は振れを生じ、減衰振動となる。この減衰振動の最初の振れ θ_m は、検流計を通過した電流の積分、すなわち電荷に比例する。

衝撃検流計の振れ角 θ_m は、通過した電荷Qに比例する

$\theta_m = K \cdot Q$ K: 衝撃定数

そこで、図6.7のような回路により、コイルC内部の磁束密度Bが次のようにして測定される。

(A) 衝撃定数Kの決定

(i) 探りコイルC₀を測定対象コイルCの内部に挿入する。また、スイッチSをどちらかに接続する。

(ii) 衝撃検流計BGの振れが0であることを確認した後、スイッチSを切り替え、巻数Nのコイルに流れる電流の向きを反転させる。

(A) 巻数 N_0 のコイルに起電力 $e=Mdi/dt$ (M : 相互インダクタンス)がパルスのように発生し、それにより衝撃検流計BGにパルスの電流 i が流れる。

このとき、衝撃検流計の最大振れ角を θ_{m1} とすれば、

$$\theta_{m1} = K \cdot Q \quad (K: \text{求めるべき衝撃定数}) \cdots \cdots (i)$$

である。また、電荷と電流の関係から、

$$Q = \int_0^t i dt = \int_0^t (e/R) dt = (1/R) \int_0^t (Mdi/dt) dt = (M/R) \int_{-I}^I di = 2MI/R \cdots \cdots (ii)$$

I : 電流計Aの読み
R : 抵抗値

(i), (ii)より、

$$K = R \theta_{m1} / 2MI$$

と衝撃定数 K が、衝撃検流計の振れ角 θ_{m1} と電流計の値 I から計算される。

衝撃定数は、測定ごとに決定する必要がある。

(B) 磁束密度 B の測定

(イ) 次に、探りコイル C_s をコイル C の内部から一瞬に引き抜く。

これにより、探りコイルに交わる磁束が ϕ から0に変化し、時間変化 $d\phi/dt$ に比例した電流 i が衝撃検流計に流れる。

(ロ) 検流計の最大振れ角 θ_m を読みとる。

検流計に流れる電荷 Q は、

$$Q = \int_0^t i dt = (n/R) \int_0^t (d\phi/dt) dt = (n/R) \int_0^\phi d\phi = n\phi/R \cdots \cdots (iii)$$

n : 探りコイルの巻数
R : 抵抗値

また、振れ角 θ_m と電荷 Q との間の関係は、

$$\theta_m = K \cdot Q \quad (K: \text{上記(A)の方法で決定した衝撃定数}) \cdots \cdots (iv)$$

(iii), (iv)より、

$$\phi = (R/nK) \theta_m \quad [\text{Wb}]$$

と、最大振れ角 θ_m から磁束 ϕ が求まる。

探りコイルの断面積を S とすれば、コイル C 内部の磁束密度 B は、

$$B = \phi/S = (R/nKS) \theta_m \quad [\text{T}]$$

となる。

⑦磁束計による磁束密度Bの測定方法

磁束計……衝撃検流計の可動部分を制御トルクが0と見なせるような構造にしたもの。

$$\phi = \frac{G}{n} \theta_m \quad [\text{Wb}] \quad \begin{array}{l} G : \text{駆動トルク計数} \quad n : \text{探りコイルの巻数} \\ \text{抵抗}R\text{に無関係} \quad \theta_m : \text{最大振れ角} \end{array}$$

探りコイルの断面積をSとすれば、コイルC内部の磁束密度Bは、

$$B = \frac{G}{nS} \theta_m \quad [\text{T}]$$

となる。

⑧積分器を用いる磁束密度測定方法……図6.9

コイルCの内部から探りコイルC₀を一瞬に引き抜く。

これにより、巻数nの探りコイルに交わる磁束がφから0に変化し、時間変化dφ/dtに比例した電圧v_Aが発生する。

$$v_A = n \cdot d\phi / dt$$

従って、この電圧v_Aをオペアンプ回路を用いた積分器で積分すると、

$$v_o = (1/RC) \int v_A dt = (n/RC) \int d\phi = (n/RC) \phi \quad (R, C: \text{回路定数})$$

$$\therefore \phi = \frac{RC}{n} v_o \quad [\text{Wb}]$$

すなわち、積分器の出力電圧を測定すれば、磁束φが求まることになる。
探りコイルの断面積をSとすれば、コイルC内部の磁束密度Bは、

$$B = \frac{RC}{nS} v_o \quad [\text{T}]$$

となる。

【MEMO】

6.2 材料磁化特性の測定

磁束密度 B [T]，磁界の強さ H [A/m²]のとき，

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad \mu: \text{材料の透磁率} \quad \mu_r: \text{材料の比透磁率} \quad \mu_0: \text{真空透磁率}$$

である。従って，

材料磁化特性の測定 → 材料の透磁率の測定 → B と H の関係の測定 →

初期磁化曲線とヒステリシスループの測定

・・・図6.11

(1) 直流磁化特性

①環状試料法・・・図6.12

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad \text{磁束の透磁率}$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{増分の透磁率}$$

試料は環状にする → 材料中の磁束密度 B が均一になる

測定手順と原理

(1) 材料の消磁

S_2 を開放した状態で R_1 を調整し， S_1 を切り替え I_1 を反転させながら磁化電流 I_1 を減少させ0に近づける → $H=B=0$ の状態にする（消磁する）。

(2) 初期磁化曲線の測定

(a) S_2 は開放のまま， I_1 を小さな値にするように R_1 を調整する。 S_1 close $\frac{I_1}{2}$

(b) S_1 を切り替えて磁束を ϕ から $-\phi$ に変化させる。 S_1 open $\times 3 \quad \frac{1}{T} \Leftrightarrow \frac{1}{T}$

(c) このとき，磁束の変化量 $\Delta\phi$ は $\Delta\phi = 2BA$ (B :磁束密度， A :試料の断面積)であるので，磁束計(BG)の振れ角を θ とすると，

$$\Delta\phi = (G/N_2) \theta = 2BA \quad \therefore B = \frac{G}{2N_2 A} \theta \quad [\text{T}] \quad (N_2: \text{2次側巻数})$$

となり，磁束密度 B が測定される。また，

$$Hl = N_1 I_1 \quad \therefore H = (N_1/l) I_1 \quad [\text{A/m}^2] \quad (l: \text{磁路長}, N_1: \text{1次側巻数})$$

と磁界 H が測定される。

(d) 次に， I_1 を順次大きくしていき，(a)，(b)，(c)を繰り返して(H, B)グラフが飽和状態になるまで測定を行う。 → 初期磁化曲線が描ける。

- ・初透磁率 …… $H=0$ での傾き
- ・最大透磁率 ……最大の傾き
- ・微分透磁率 ……各点での傾き

(A) ヒステリシスループの測定

(a) S_2 を閉じ、 R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え、何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_1, B_1) = (H_m, B_m)$ の状態(図6.12(b)の点a)にする。

(b) S_2 を開放する。→ I_1 が減少する。→ H_1 が H_2 に減少する。→ B_1 が B_2 に減少する。→ 磁束の変化が $\Delta\phi = (B_1 - B_2)A$ となる。従って、

$$\Delta\phi = (G/N_2)\theta = (B_1 - B_2)A \quad \therefore B_2 = B_1 - \frac{G}{N_2 A} \theta \quad [\text{T}]$$

と B_2 が求まる。また、

$$H_2 l = N_1 I_1 \quad \therefore H_2 = (N_1/l) I_1 \quad [\text{A/m}^2] \quad (I_1 \text{は減少後の電流値})$$

と H_2 が求まる。

このようにして、 $(H, B) = (H_2, B_2)$ が測定される。

(c) 次に、再び S_2 を閉じ、 R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え、何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_2, B_2)$ の状態にする。

(d) (b)と同様にして $(H, B) = (H_3, B_3)$ を測定する。

(e) これを繰り返して、図6.12(b)の点a→点c→点a' と (H, B) をプロットする。

(f) 今度は、 S_2 を開き、 R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え、何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_1, B_1) = (-H_m, -B_m)$ の状態(図6.12(b)の点a')にする。

(g) S_2 を閉じる。→ I_1 が増加する。→ H_1 が H_2 に増加する。→ B_1 が B_2 に増加する。→ 磁束の変化が $\Delta\phi = (B_2 - B_1)A$ となる。従って、

$$\Delta\phi = (G/N_2)\theta = (B_2 - B_1)A \quad \therefore B_2 = B_1 + \frac{G}{N_2 A} \theta \quad [\text{T}]$$

と B_2 が求まる。また、

$$H_2 l = N_1 I_1 \quad \therefore H_2 = (N_1/l) I_1 \quad [\text{A/m}^2] \quad (I_1 \text{は増加後の電流値})$$

と H_2 が求まる。

このようにして、 $(H, B) = (H_2, B_2)$ が測定される。

(h) 次に、再び S_2 を開き、 R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え、何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_2, B_2)$ の状態にする。

(i) (g)と同様にして $(H, B) = (H_3, B_3)$ を測定する。

(A) ヒステリシスループの測定

(a) S_2 を閉じ, R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え, 何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_1, B_1) = (H_m, B_m)$ の状態(図6.12(b)の点a)にする.

(b) S_2 を開放する. $\rightarrow I_1$ が減少する. $\rightarrow H_1$ が H_2 に減少する. $\rightarrow B_1$ が B_2 に変化する. \rightarrow 磁束の変化が $\Delta\phi = (B_1 - B_2)A$ となる. 従って,

$$\Delta\phi = (G/N_2)\theta = (B_1 - B_2)A \quad \therefore B_2 = B_1 - \frac{G}{N_2A}\theta \quad [T]$$

と B_2 が求まる. また,

$$H_2l = N_1I_1 \quad \therefore H_2 = (N_1/l)I_1 \quad [A/m^2] \quad (I_1 \text{は減少後の電流値})$$

と H_2 が求まる.

このようにして, $(H, B) = (H_2, B_2)$ が測定される.

(c) 次に, 再び S_2 を閉じ, R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え, 何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_2, B_2)$ の状態にする. (最終的には I_1 は(b)のときと同方向)

(d) (b)と同様にして $(H, B) = (H_3, B_3)$ を測定する.

(e) これを繰り返して, 図6.12(b)の点a \rightarrow 点c と (H, B) をプロットする.

(f) $H=0$ の点(図6.12(b)の点c)にたどりついたら, 今度は, S_2 を開き, R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え, 何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_1, B_1) = (0, B_r)$ の状態(図6.12(b))にし, 最終的には電圧の向きが(b)のときとは反対になるように S_1 を設定する.

(g) S_2 を閉じる. $\rightarrow I_1$ が増加する(向きは(b)のときと反対). $\rightarrow H_1$ が H_2 に増加する. $\rightarrow B_1$ が B_2 に変化する. \rightarrow 磁束の変化が $\Delta\phi = (B_1 - B_2)A$ となる. 従って,

$$\Delta\phi = (G/N_2)\theta = (B_1 - B_2)A \quad \therefore B_2 = B_1 - \frac{G}{N_2A}\theta \quad [T]$$

と B_2 が求まる. (θ が負の方向に振れたら $\Delta\phi$ は負として取り扱う). また,

$$H_2l = N_1I_1 \quad \therefore H_2 = (N_1/l)I_1 \quad [A/m^2] \quad (I_1 \text{は増加後の電流値})$$

と H_2 が求まる.

このようにして, $(H, B) = (H_2, B_2)$ が測定される. 磁界の向きは(b)のときと反対

ゆえ、 $H \leq 0$ にプロットする。

(h) 次に、再び S_2 を開き、 R_1 で I_1 を調整しながら S_1 を切り替え、何回か I_1 を反転させながら $(H, B) = (H_2, B_2)$ の状態にする（最終的には I_1 は(g)のときと同方向）。

(i) (g)と同様にして $(H, B) = (H_3, B_3)$ を測定する。

(j) これを繰り返して、図6.12(b)の点 $c \rightarrow$ 点 a' と (H, B) をプロットする。

(k) 今度は、 I_1 を(g)と同方向にして、(a)~(e)を繰り返し、点 $a' \rightarrow$ 点 c' をプロットする。

(l) I_1 を(k)と逆方向にして、(f)~(j)を繰り返し、図6.12(b)の点 $c' \rightarrow$ 点 a と (H, B) をプロットする。

→ ヒステリシスループが描ける

- ・ 残留磁束密度…… $H=0$ のときの磁束密度の値 B_r
- ・ 保持力 …… $B=0$ とする逆磁界の大きさ H_c

【MEMO】

(j) これを繰り返して、図6.12(b)の点a'→点c'→点a と(H, B)をプロットする。

→ ヒステリシスループが描ける

- ・ 残留磁束密度……H=0のときの磁束密度の値 B_r
- ・ 保持力……B=0とする逆磁界の大きさ H_c

② 透磁率計……図6.13

環状試料法……内部の磁束密度Bは一定になるが、試料の作成や巻線が困難

→ 棒状試料と継鉄により閉磁路を構成する……透磁率計



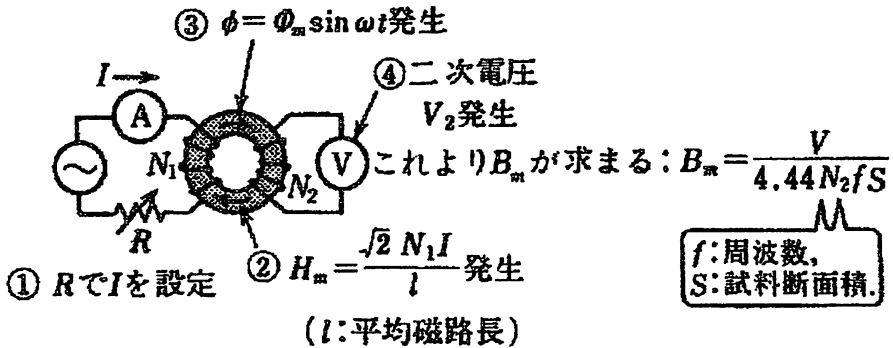
試料中の磁束密度が一定になるように調整する必要がある。

(2) 交流磁化特性

◎ 交流磁界中での磁性材料の特性は、うず電流損やヒステリシス損などにより直
流磁界中での特性とかなり違う → 交流磁化特性も別に測定する必要がある

① 環状試料法

(1) 初期磁化曲線の測定



①②③④の順で操作し、得られる B_m 、 H_m から交流磁化曲線(初期磁化曲線)を描くことができる。

ここで、 $\sqrt{2}$ は実効値を波高値(最大値)にするための係数、 $4.44 = 4 \cdot F$ で $F = 1.11$ は正弦波の波形率である(波形率=実効値/平均値)。

(ロ) ヒステリシスループの測定……図6.14 (図6.18, 図6.19)

オシロスコープをX-Yモードにして、

- ・磁界Hに比例した励磁電流 I_1 に相当する R_1 の両端の電圧をX-ch (横軸)
 $H = k_1 I_1 = k_2 \times (R_1 \text{の両端の電圧})$
- ・磁束密度Bに比例した2次コイルの出力電圧の積分値 v_n をY-ch (縦軸)
 $B = k_3 \int edt = k_4 v_n$

にそれぞれ入力し，リサージュ図形を描かせる → ヒステリシスループ
プログラマー

励磁電流の周波数

10^{-1} [Hz] 以下……直流磁化特性 → X-Y記録計で記録・・・自記磁束計
 数十Hz以上 ……交流磁化特性

- ・オシロスコープでの直視
- ・図6.19のようにサンプリング
 を行いX-Y記録計で記録

②交流ブリッジによる磁化特性の測定・・・図6.17

平衡状態で，式(6.22)の関係がある．ここで，磁化電流 I_m は無効電流なのでコイルにかかる電圧 V_{cb} と位相が 90° 違う (図6.17(b)参照) ．

また，平衡しているので点bと点cの電位が等しい → 式(6.24)の関係がある．
 よって，

$$H_m = \frac{N \omega L_x}{\sqrt{(\omega L_x)^2 + R_x^2}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

と最大磁界 H_m が求まる．

また，最大磁束密度 B_m は式(6.23)より，

$$B_m = \frac{\omega L_x I_1}{4FfAN} = \frac{\pi L_x}{2FAN} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

と求まる．

以上より， L_x ， R_x ， I と諸定数が決定すれば H_m と B_m が測定できる． L_x と R_x は平衡条件より式(6.21)で求まる． I は電流計で測定する．

【MEMO】

6.3 鉄損の測定

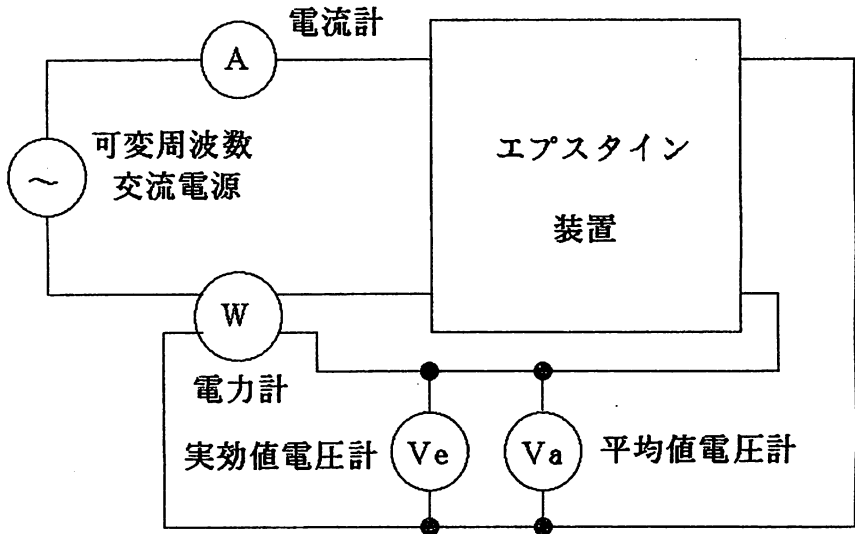
◎ 鉄損 = ヒステリシス損 + うず電流損 → 熱となる損失分

(参考)

銅損・・・(コイルなどの) 直流抵抗成分による損失

(1) エプスタイン法・・・図6.20

◎鉄芯(エプスタイン装置・・・図6.20(a), 図6.22)を励磁して所要の磁束密度を与え, 電力計によって鉄損を測定する。



W : 電力計の読み V_e : 実効値電圧計の読み

R_w : 電力計の電圧コイル側の内部抵抗 R_e : 実効値電圧計の内部抵抗

R_a : 平均値電圧計の内部抵抗

とすれば, 求める鉄損 W_c は

$$W = W_c + \underbrace{V_e^2/R_w + V_e^2/R_e + V_e^2/R_a}_{\text{各メーターで消費される電力}}$$

$$\therefore \boxed{W_c = W - V_e^2(1/R_w + 1/R_e + 1/R_a)} \quad [W]$$

また, 鉄損に関係の大きい最大磁束密度 B_m は,

$$B_m = \frac{V_e}{4FNfA} = \frac{V_e}{4(V_e/V_a)NfA} = \frac{V_a}{4NfA}$$

(F: 波形率 = V_e/V_a N: 2磁コイルの巻数 f: 励磁周波数 A: 磁芯の断面積)

で求まる。

注意: 最大磁束密度を求める必要がないときは, 平均値電力計を接続する必要がない。→ $R_a = \infty$ として取り扱える

◎ ヒステリシス損とうず電流損の分離

・ ヒステリシス損 W_h …… ヒステリシスループの面積に関する

$$W_h = \oint H dB = k_1 B_m^{1.6} \dots \dots \text{スタインメッツの実験式}$$

$$= k_2 f$$

$$\therefore W_h = k_h f B_m^{1.6} \quad [W/m^3]$$

・ うず電流損 W_e …… うず電流 i_e による銅損 (抵抗損)

$$W_e = k_3 i_e^2 = k_4 f^2 \quad (e = -d\phi/dt, \quad i_e = e/r_e, \quad e = k_5 f)$$

最終的には

$$\therefore W_e = k_e f^2 t^2 B_m^2 \quad [W/m^3]$$

今, 周波数 f によらず最大磁束密度 B_m が一定であるとすれば, エプスタイン装置全体でのヒステリシス損 W_h とうず電流損 W_e は

$$W_h = K_h' f \quad [W] \quad W_e = K_e' f^2 \quad [W]$$

となる。よって,

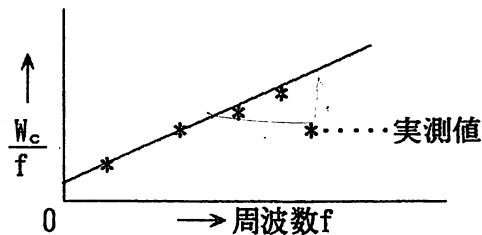
$$W_c = W_h + W_e = K_h' f + K_e' f^2 \quad \dots \dots \text{①}$$

鉄損 W_c をヒステリシス損 W_h とうず電流損 W_e に分離するには, 定数 K_h' と K_e' 及び周波数 f がわかればよいことになる。

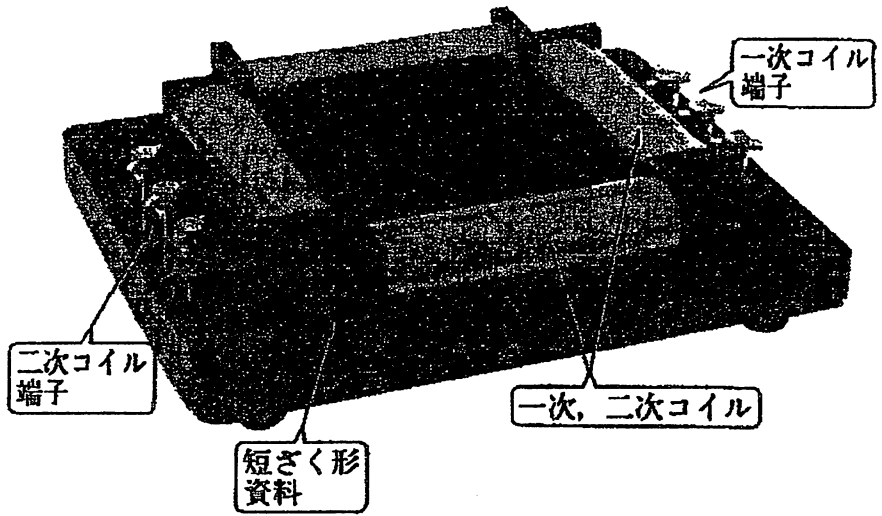
式①の両辺を f で割ると,

$$W_c/f = K_h' + K_e' f$$

2点以上の (f, W_c) をエプスタイン法で測定し, $(f, W_c/f)$ を求め, グラフを描き, その補間直線の傾きから K_e' が, y切片より K_h' が計算される。



→ 各周波数 f での鉄損 W_c , ヒステリシス損 $W_h = K_h' f$, うず電流損 $W_e = K_e' f^2$ が測定されることになる。



エプスタイン装置はJISにより規格化されている(JIS C 2250)。50cmエプスタイン装置と25cmエプスタイン装置がある。25cmの方は、25cm×3cmの短冊形試料2kgを4等分して閉磁路を作る。

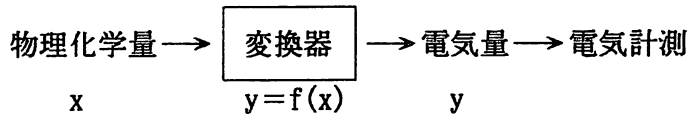
(2) ブリッジ法・・・図6.17・・・高周波領域での鉄損 W_c の測定

$$W_c = I_1^2 (R_x - R_d) = I^2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \left(\frac{R_1}{R_2} R_3 - R_d \right)$$

I_1 : コイルに流れる電流 I : 測定電流 (ブリッジ全体に流れる電流)
 R_x : コイルの等価抵抗 (平衡条件で求まる抵抗) R_d : コイルの直流抵抗
 $R_1 \sim R_3$: ブリッジの各抵抗

[MEMO]

第7章 物理化学量の電気計測 (応用電気計測)



対象となる物理化学量 x を直接測定する代わりに、変換器によって、ある関係が成り立つ電流量 $y=f(x)$ を電気計測で測定し、逆の関係を考えることで、 $x=f^{-1}(y)$ を測定する考え方を応用電気計測と言う。

◎代表的な対象となる物理化学量

- ・変位 (長さ) ・力, 歪み ・振動 ・圧力 ・流量 ・温度 ・放射線
- ・ガスの種類, 質量 etc.

重要なことは、特性の良い変換器を設計することである。

- ・構成が簡単 ・変換範囲が広い ・線形に変換される 等

7.1 変換器・・・表7.1

(1) 抵抗変換器

- ①すべり抵抗線上の接点の位置の変化 (変位) → 抵抗変化 → 電位変化
- ②歪みによる抵抗の長さが変化 → 抵抗変化 → 電位変化
- ③温度の変化 → 金属の抵抗変化 → 電位変化

(2) インダクタンス変換器・・・図7.1, 7.2

磁路中に置かれた磁性材料 (鉄芯) の変位 → 相互インダクタンスの変化
→ 2次側出力電圧の変化

(3) 容量変換器・・・図7.3

コンデンサーの電極板の変位 → 静電容量の変化

(4) 圧電変換器

圧電効果……圧電素子 (水晶, ロッシェル塩など) に力を加えると電圧が発生する

圧電素子に加えられる力の変化 → 電圧変化

↑
圧電効果

(5) 光電変換器・・・図7.5, 7.6, 7.7

光の変化 → (光電変換器) → 電圧, 電流などの変化

- ・光電管 ・ホトトランジスタ, ホトダイオード ・光電池
- [光電子放出効果, 光起電力効果, 光導電効果などを利用]

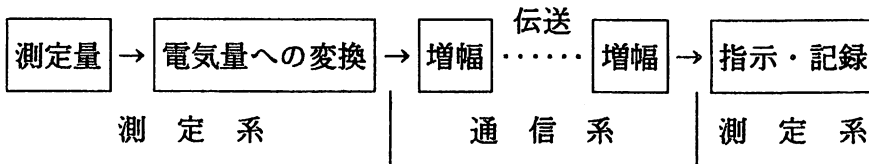
(6) 磁気歪み変調器
 強磁性材料の形の変化 → 磁化特性の変化
 ↑
 磁気歪み

(7) 熱変換器
 熱の変化 → 熱起電力の変化
 ↑
 ゼーベック効果……熱電対……図7.8

(8) エレクトレット変換器……図7.9
 エレクトレットにかかる変位や振動の変化 → 電圧の変化

7.2 変位の測定 ～ 7.9 ガス分析
 省略

7.10 遠隔測定 (テレメタリング) ……図7.47



(1) 電圧・電流による方式……図7.48, 7.49
 測定量を電圧や電流に変換して伝送・記録 → 近距離伝送向き

(2) 平衡方式……図7.50, 7.51, 7.52
 送信側と受信側で平衡状態にし, 平衡条件などにより受信側で送信側の測定量を知る. → 中距離伝送向き

(3) 周波数・パルス・位相などによる方法……図7.53, 7.54
 測定量を周波数, パルス, 位相などに変換して伝送し, 受信側で逆変換する
 → 長距離伝送向き

$$P = \frac{A(t)}{AM} \sin \left(\frac{\omega(t)t}{FM} + \frac{\phi(t)}{PM} \right)$$

以上

【MEMO】

① 送受信器
 ② 送信機 受信機