

# 積算電力計による電力算定と虚負荷試験装置について

梅 沢 守

## Studies on the Estimate of the Electric Power with the Watt-Hour Meter and the Image Load Apparatus.

Mamoru UMBSAWA

### I. 概 要

電力を測定あるいは算定するのに 下記の如く種々の方法があるが、その中でも、本稿の積算電力計による方法は 積算電力計が安価であることに加えて 計器自身の最近の精度の向上のため精度の高い電力算定が可能なので、電気安全保守現場や中高等学校の実験室や家庭などのように研究用でない測定や変化する瞬時電力でなければ、充分、その利用性が大であると確信するので、ここに 報告する。

さらに、その発展的段階において 必要となるであろう 総合負荷装置の代用品として、虚負荷試験装置(回路)の簡易化に成功し、且つ、積算電力計の負荷としての応用も、充分、その性能が満足できたので これも合わせて 報告する。

### II. 電力を測定する種々の方法の得失

はじめに、商用周波数・電圧のもとでの負荷について、電力測定の方法として 次の如く 列記される<sup>1)</sup>。

(1) 電力計による、(2) 力率計による、(3) 三電圧計法あるいは三電流計法、(4) シンクロスコープによる方法各種、(5) 普通積算電力計と無効積算電力計との利用、(6) その他。

ここで、数[w]より数[kw]までの広範囲に高精度に、且つ、手軽に測定できる最善の方法は、(1)の電力計を使用する方法である。しかし、上に述べたような現場では、電力計が高価で、その上一台の電力計の測定可能な負荷電流の範囲が限られてるので、負荷電流が広範囲に及ぶ場合は、電力計が数台必要であるので、電力計法は経済的な方法ではない。

そこで、これに代わる経済的な方法として、1台の電圧計(または1台の電流計)と無誘導抵器のみの利用によって電力算定が可能とされる(3)の三電圧計法(または三電流計法)が考えられるが、次の理由で 本方法も適当でない。

(イ) もっとも 精度のあげられる測定条件(たとえば、三電圧計法では、直列電圧計の指示が等値)を上記の現場では、自由に満足させうるとは限らない。

(ロ) 負荷の力率が低くなるにつれて、電圧計(または電流計)自身の固有誤差によって、算定

値の誤差が増大してしまう。なお、この理論的証明が文献 7) になされてる。

次に、方法 (4) も、ブラウン管の画面上の測定という点で 誤差が大であり、適当な方法でない。さらに (普通型積算電力計+無効積算電力計) の方法も然りである。その理由としては、

(イ) 無効電力量計の三相用は一般に市販されてるが、単相用は特註品となる。

(ロ) 当本法は、計器の kwh 目盛を読む必要があり、長期に及ぶ場合の平均電力の算定には適するが、短時間に測定したい場合は不適當である。

さて、商用周波数・電圧のもとでの電力測定法として 上記の方法があげられたが、前記の現場で適當と思われる方法が、当稿の積算電力計による電力算定である。

### III. 積算電力計による電力の算定

積算電力計を電力算定に利用する場合、その長所としては、

- (1) 積算電力計 1 台の価格が低い。
- (2) 測定しうる電流の範囲が電力計のより広く、且つ、電流レンジの切換の必要が皆無であるので、積算電力計 1 台ですむ。
- (3) 負荷を低力率化しても、算定値は高精度が保れる。(§3.1~§3.4 参照)
- (4) 電力算定のための測定回路の結線が単純である。
- (5) (II) 章の (2)~(7) の方法に比べて、附属品・計器の必要は無し。
- (6) 計器自身の構造が堅固で、多小の乱雑な扱いに耐える。
- (7) 電圧変動も考慮した平均電力が得られる。

である。次に、短所としては、

- (1) 測定に長時間 (40~120秒位) を要す。
- (2) 直読値でなく数値計算する必要がある。
- (3) 瞬時電力の測定の際、一定電圧に保持する必要がある。
- (4) 刻々と変化する瞬時電力の測定は困難である。
- (5) 積算電力計の内部損失は大である。

があげられるが、これらの欠点が許される現場においては、次節以降に示す如く、高精度な結果が得られるので、その利用は適當と考える。

#### § 3.1 単相・力率 100% の場合の誤差率—電流特性

単相回路において、電力  $P_e$  [w] の負荷に積算電力計を接続した場合、1 時間円板を回転させた時のその回転数を  $R$  [回] とすれば、

$$R = P_e [\text{w}] \times 1 [\text{h}] \times K [\text{回/kwh}] \times 10^{-3} \quad (1)$$

但し、ここで、 $K$  は計器定数で、1[kwh] 当りの回転数。

さらに、 $t$  [sec] 間で、円板  $N$  回転したとすれば、1[h] 経過後の回転数  $R$  は

$$R = N \times 60 \times 60 / t \quad (2)$$

従って、電力の算定式は

$$P_c = K \times 3.6 \times 10^6 \times N / t \quad (3)$$

で与えられる。

ここで、使用した測定回路は電力計と積算電力計の並列回路で、実際には切換えスイッチによって、夫々、瞬時電力、円板の回転所要時間を測定できる。電力計、電圧計の各コイルの消費電力の補正を容易にするため、電力計の電圧コイルを電流コイルより負荷側に接続するので、補正式は次式となる<sup>2)</sup>。

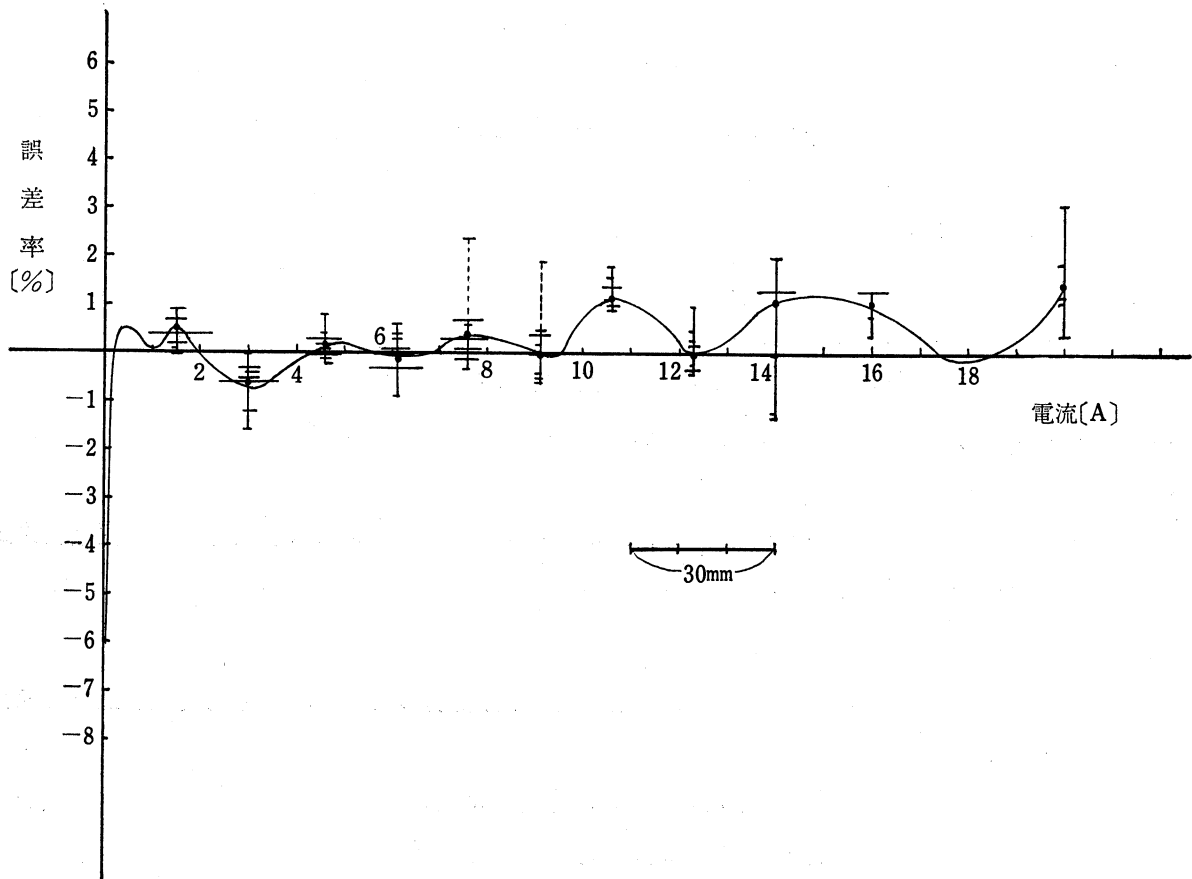
$$P_i = P - V^2 (1/r_v + 1/r_p) \quad (4)$$

但し、 $P$  は電力計の指示値 [w]、 $V$  は電圧計の指示値 [V]、 $r_v$ 、 $r_p$  は、夫々、電圧計、電力計の内部コイル、抵抗値 [ $\Omega$ ] であって、誤差率  $\epsilon$  [%] を次式とすれば

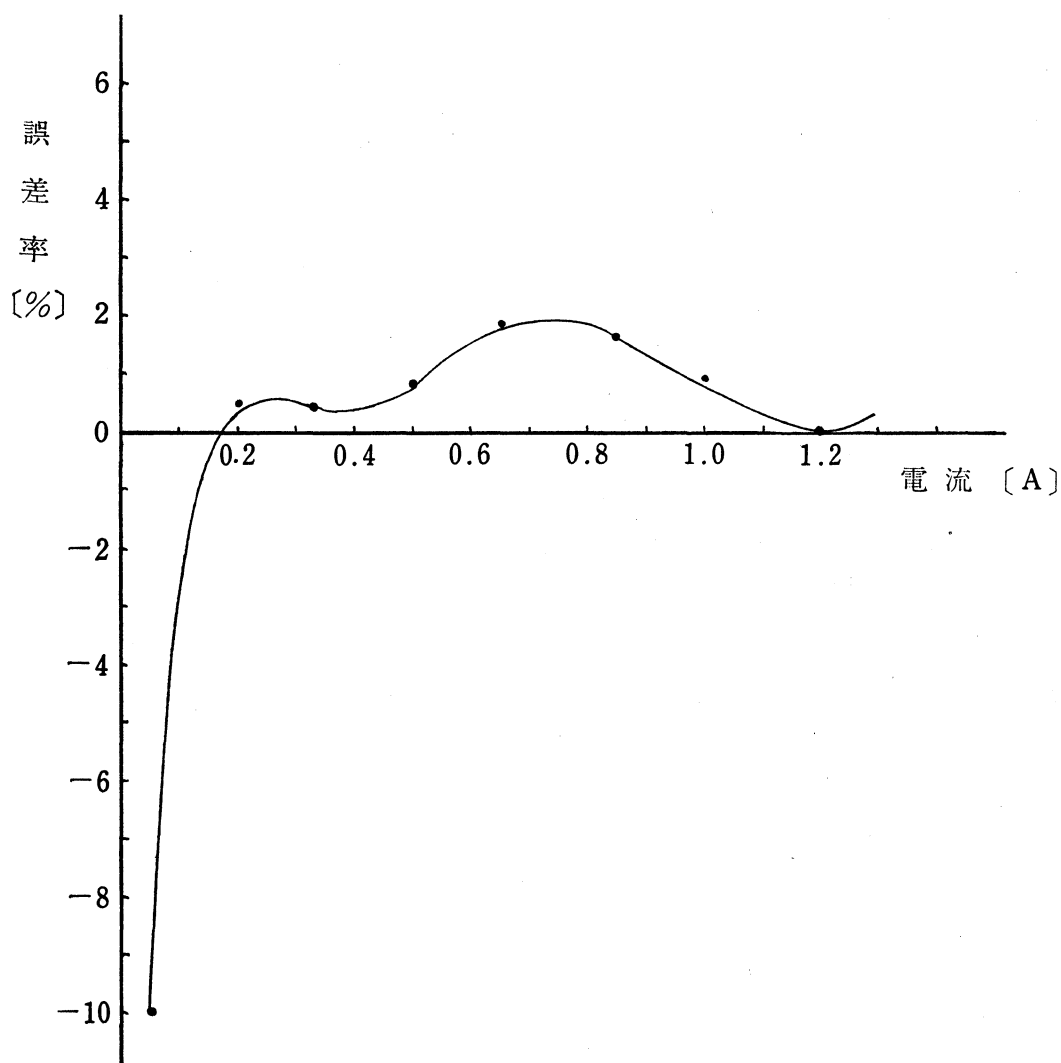
$$\epsilon = (P_c - P_i) / P_i \times 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

となり、 $P_i$  はここで真の電力値とみなすことにする。

なお、測定に際して、電圧調整はスライダックの手動操作によったため、電源電圧変動に対する 1[sec]~8[sec] 程の調整遅れがあったと思われる。



図(1) 電流特性 (力率100%)



図(2) 小電流特性(力率100%)

〔結果〕電力計と積算電力計の測定値から、式(3)、(4)、(5)を用いて誤差率—電流特性曲線をえがくと図(1)の結果が得られるが、小電流の場合でもかなりの精度が得られることを示すため、小電流特性曲線を図(2)に示す。なお、図(1)において、水平線の長さ1[mm]が各電流値において、誤差率が同値となった回数1回を意味する。曲線はその平均値をグラフ化したものである。

さて、1.5[A]~10[A]までは、ごく少数のデータを除けば、誤差率1[%]以内に含まれる。0.5[A]~15[A]の範囲では2[%]以内にあり、以上の事はストップウォッチによる時間測定というステップの存在にもかかわらず、高精度が得られているのである。

当稿で使用した積算電力計の定格電流は30[A]であり、その2[%]が定格始動電流と規格に定められてるが<sup>3)</sup>、それ以下の0.33[A]でも、誤差率がほぼ2[%]以内におさまる。即ち、定格始動電流程度の小電流でも、この電力算定法が可能であることを意味している。しかし、0.1[A]以下では、やはり、10[%]となり、これ以上は実用の限度を越える。ここで、電流減少に伴って誤差

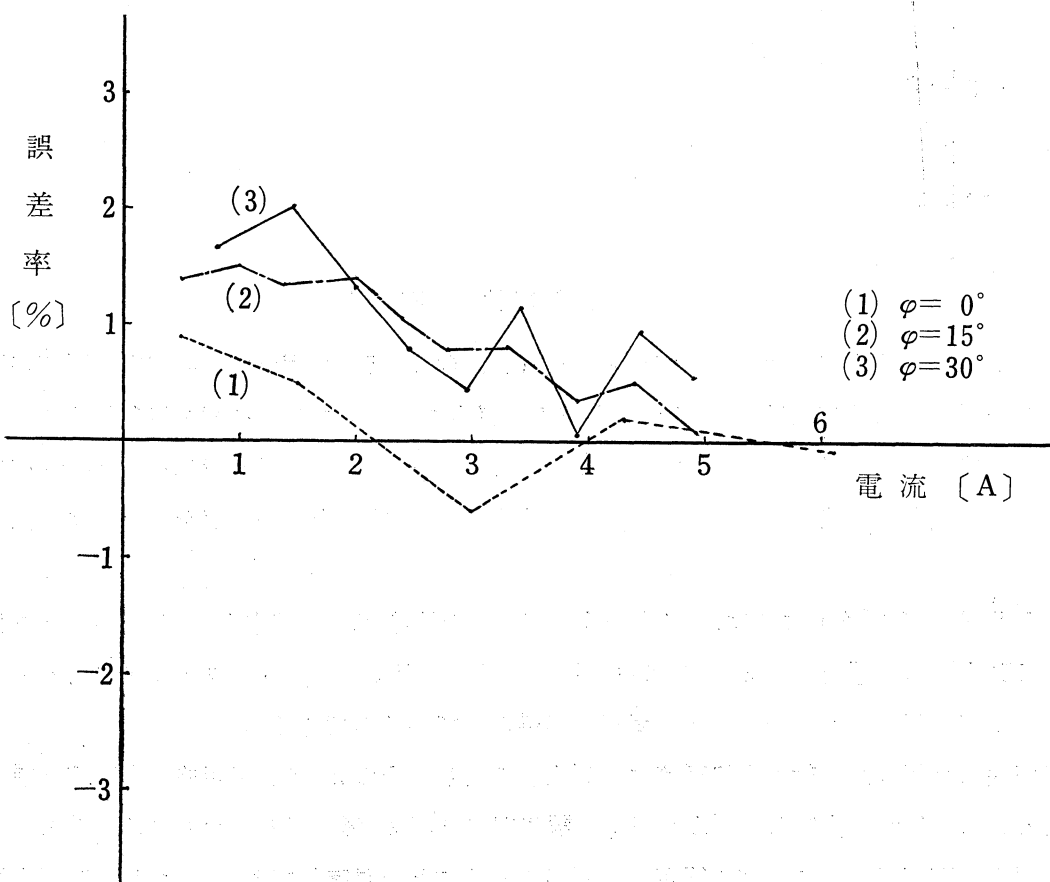
の増加原因は 駆動トルクの減少と 回転軸部の機械摩擦によるはずで、軽負荷調整装置あるいは磁気分路の調整で、これらの補償も可能である。

また、10[A] 以上で 誤差の増加の原因は 上の場合と異なり 高速回転数の数え誤まりや時間の測定誤差などで、測定者に原因する所が大であり、誤差率の算出結果が 広範囲に及ぶのが特色である。

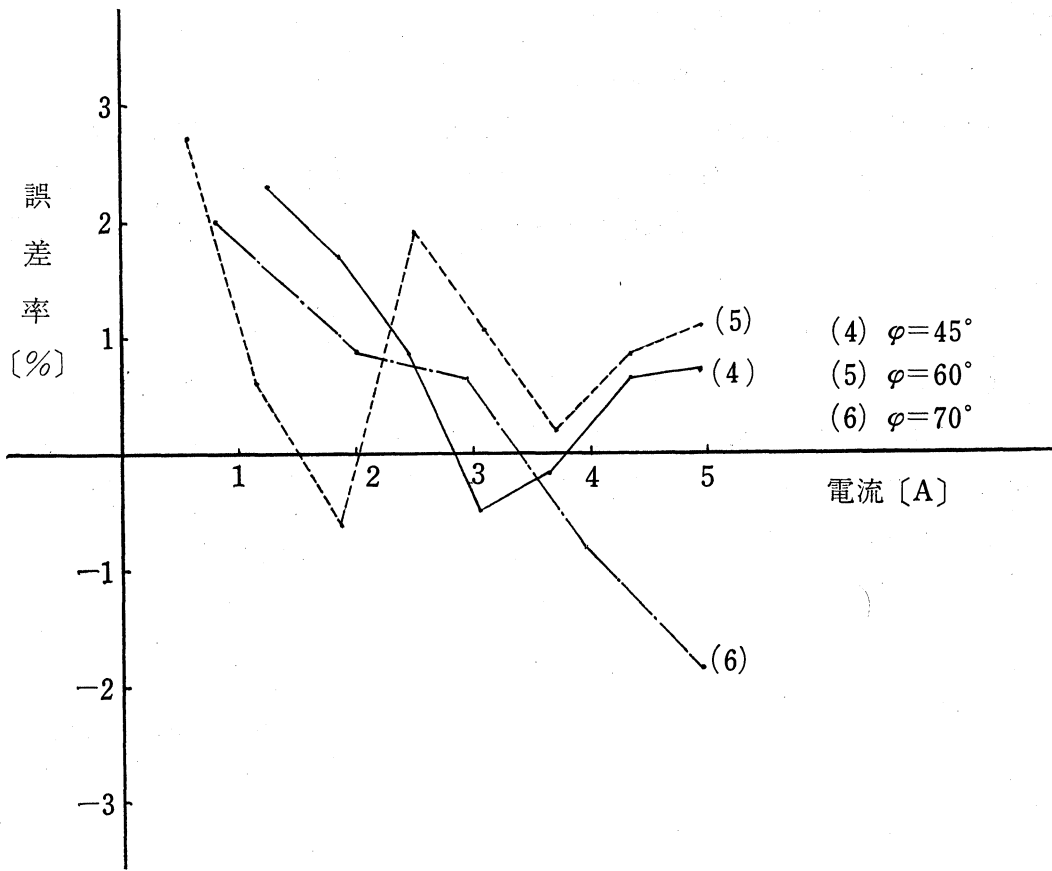
次に「測定時間と精度」あるいは「測定円板回転数と精度」の関係については、測定時間 3[sec] ~ 300[sec], 回転数 1/8[回] ~ 60[回] を各種試みたが、精度はそれらに余り影響しない結果を得た。外乱による算定値の平均化作用や 測定時間の有効数字を鑑みれば 長時間の測定で精度の向上と予想されるが、測定者の疲れによる測定ミスや 外乱の異質化などから、40 [sec] ~ 120 [sec] が適当と考えられ、短時間測定という点で 著者は 40[sec] 程度が最適と考える。回転数についても、これを大に取り過ぎるのも、回転速度の小的时候は勿論 大の時も 誤差を増大させるのである。なお、回転数は、最小 1 回転は 機構上必要である。

### § 3.2 単相負荷で力率を変化させた場合の誤差率—電流特性

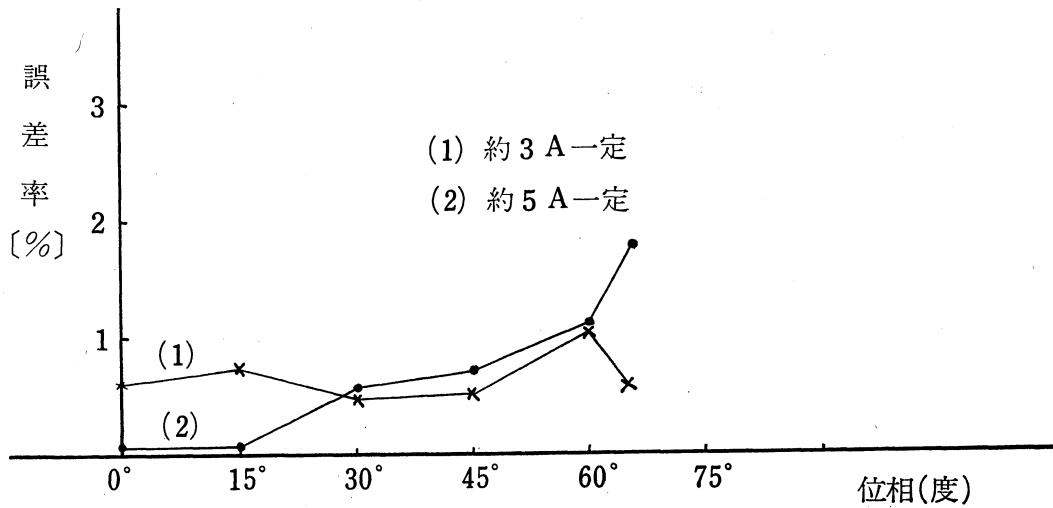
前節に、力率 100[%] の場合のみ考えたが、本節では、力率を低くした時の積算電力計による電力算定法の誤差について述べる。なお、測定の際、理想的には、綜合定負荷装置があれば便利である



図(3) 各力率における電流特性(1)



図(4) 各力率における電流特性(2)



図(5) 誤差率—力率特性

が、ここでは第IV章に示される虚負荷装置を利用して、ある一定電圧のもとで一定力率に保ちながら電流を変化させた場合の誤差率—電流特性をもとめてる。但し、前節と異なる点としては、「誤差率を算定する際に真値として、虚負荷結線された単相電力計の指示値を補正した値を、採用した。」の点にある。

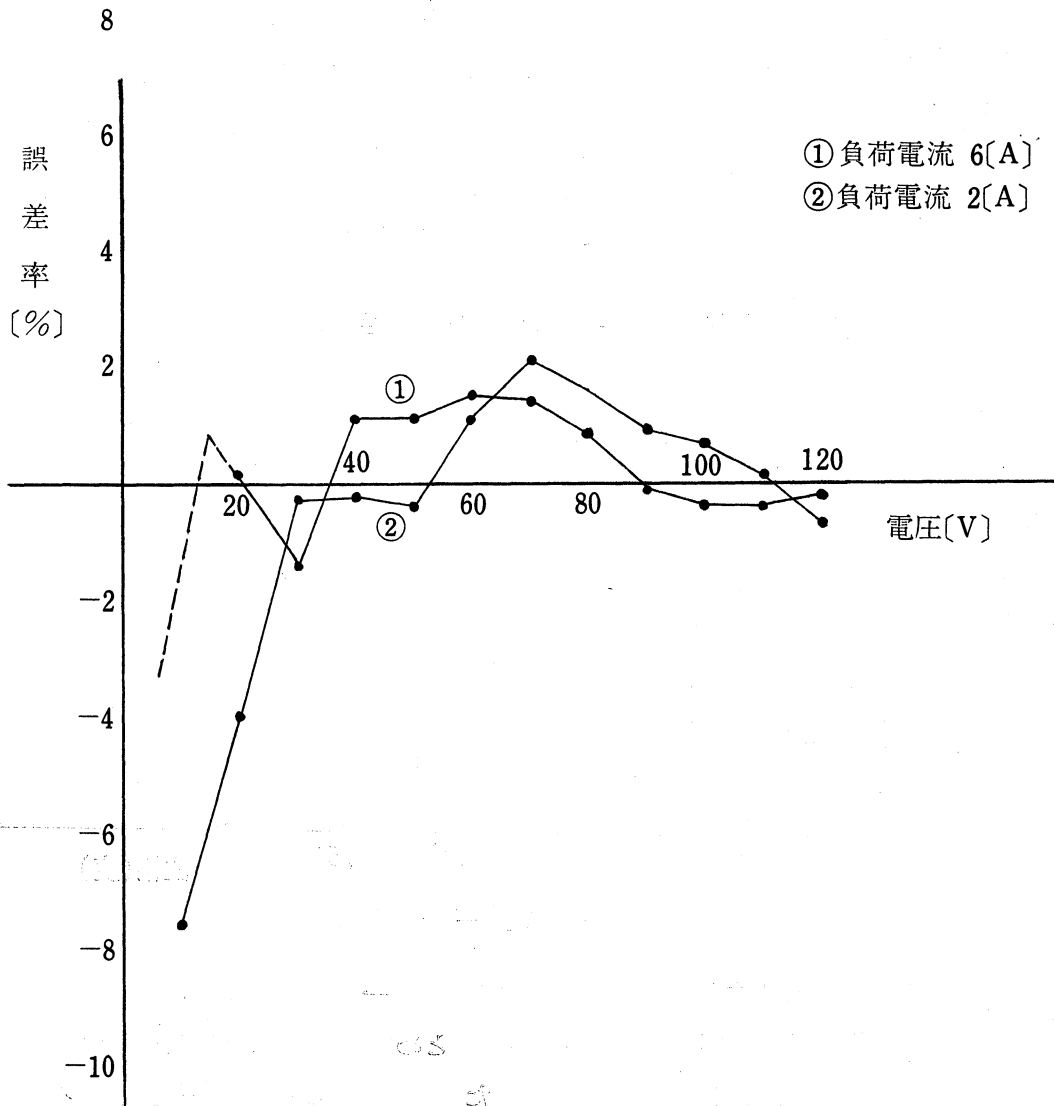
〔結果〕位相差が  $(0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 70^\circ)$  の場合の電流特性曲線を、図(3)、図(4)に示した。各力率において、その折線の形状は一定してないが、大方、力率が低下する程 誤差の増大の傾向がみられる。なお、図(5)は図(3)(4)から、電流を一定とし、グラフ化したものである。

また、力率 30[%] (位相差約  $70^\circ$ ) までの全力率において、誤差率の平均値が 3[%] 以内で、最大誤差率でも 4[%] 内にある結果が得られたので、この程度まで低力率化しても 普通電力計の精度とそれ程の大差がないといえる。

### § 3.3 電 圧 特 性

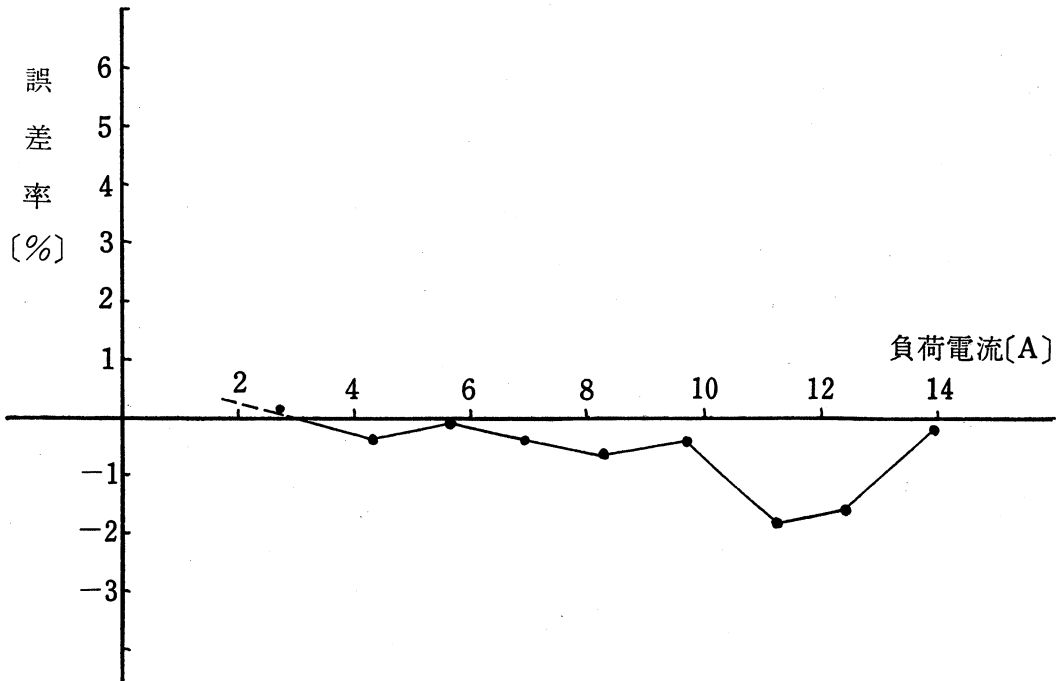
規定した電圧値に対して、電力計の補正式が変化する以外、前節までと異なる点はない。

〔結果〕力率 100[%] の抵抗負荷に対して、図(6)に示される結果を得た。40[V]~120[V]の範囲においては、ほぼ、2[%] 以下の平均誤差率で、且つ、最大誤差率も 3[%] 以内であるので、積算電力計によって その定格電圧以外の電圧でも 電力の算定が可能である。

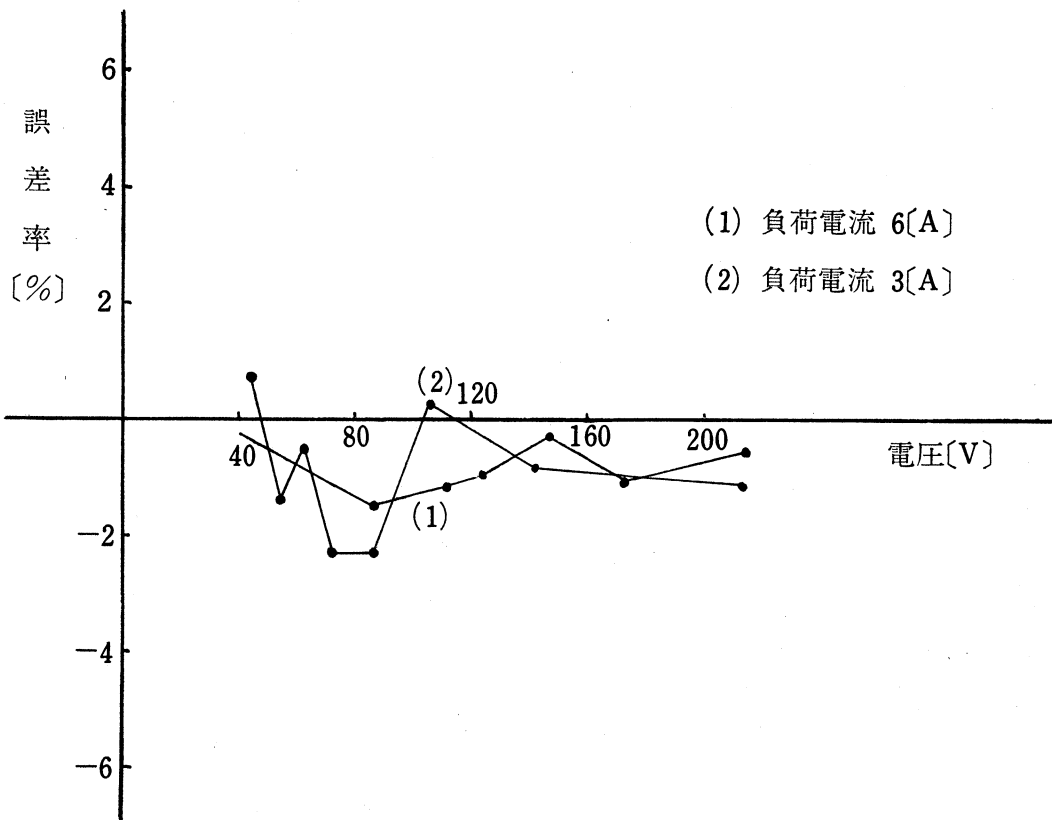


図(6) 電 圧 特 性

さて、単相誘導電動機は そのインピーダンス電圧が 20~40[%] であるが、電力量計の電圧特性において 20[V]~120[V] の範囲では 4[%] 以内の誤差率なので、電動機の拘束試験におい



図(7) 三相抵抗負荷に対する電流特性



図(8) 三相負荷電圧特性



て、短絡電力の算定が可能である。さらに、§3.2 より、無負荷試験の無負荷電力もその算定が可能であるから、結局、電動機の特特性試験において、普通型と低力率用の電力計を二種類使用しなくとも、積算電力計1台で ある程度の精度をもつ等価回路や円線図が決定できる。

### § 3.4 三相積算電力計による三相電力の算定

三相電力の算定式は、単相の場合と同様にして

$$P_c = 3.6 \times 10^6 \times N / T k$$

である。なお、測定は内部抵抗の表示されていない三相電力計を使用したこと、且つ、被測定電力が大で電力計の内部損失は無視できうるので、ここでは、あえて、補正せず、電力計の指示値をそのまま、真値  $P_c$  とみなす。誤差率は式 (5) で算出する。

[結果] まず、電流特性については、図 (7) に示されるとおり、3[A]~10[A] の範囲では 誤差率 1[%] 内にあり、それ以外でも 4[%] 内ある精度で、満足できる結果である。次に電圧特性の結果は、図 (8) に示される如く、この場合も、測定可能である全電圧範囲において、誤差率 4[%] 以内にあるので、高精度や直読を必要としない測定に 充分使用できる。但し、これらは、力率 100[%] の負荷の場合であって、低力率化につれて 精度の低下も考えられるが、この点について次の機会にゆずりたい。

なお、図 (1)~図 (8) は、各電流値 (または電圧値) における誤差率の平均値をもって、グラフ化したものである。

## IV. 単相虚負荷装置

### § 4.1 実負荷装置との比較

以上のような負荷特性試験を能率よく実施するためには、従来の単独な負荷抵抗器やリアクトルなどでは 不充分であって、次の条件の一方を満足できる、総合負荷装置の利用が望ましい。何故ならば、この二条件のうち 一方が可能であれば、他方は図形的に求められる。

(1) 一定電圧のもとで、電流一定に保ちながら、力率を 0~100[%] まで連続的に変化できる。

(力率特性)

(2) 一定電圧のもとで、力率一定に保ちながら、電流を零から定格電流まで、連続的に変化できる。(電流特性)

さて、この一条件を満足させるには、実負荷と虚負荷の二方法に分かれるが、まず、実負荷である総合負荷装置について考える。

筆者の試みた総合負荷装置の試作回路では、力率を一定に設定しても 電流の増減につれて 力率が変化してしまい、その精密調整は困難であった。また、実用的にいても (特に積算電力計の各種特性試験の場合)、実負荷をかけることは、たとえば、力率 100[%] の負荷で 100[V], 30 [A] の計器試験を1時間実施したとすれば、3[kwh] の電力量の消費となり、多数の計器の試験であればかなりの電力不経済となる。

一方、虚負荷装置であれば 下にも示す如く 2個の電源を備え、計器の電圧コイル・電流コイルに、夫々、指定された電圧・電流を 位相差を与えて供給するので、電圧コイルの電流は微小で、且つ、電流コイルの電圧も微小である。即ち、もっとも最大損失となる位相差が  $0^\circ$  の場合でも、その消費電力は 実負荷装置と比べて 充分 無視できる。その上、実負荷装置と同様の特性試験を実施できる利点がある。

第二の利点としては、電圧・電流を個々に制御するので、一方の調整が他方に影響を及ぼさない点にあり、各要素の精密調整が容易である。

しかし、虚負荷であるがために、積算電力計の機械的欠陥や耐圧不良など 見落とす恐れもあるが<sup>3)</sup>、電力を算定するには、これは欠点にはならない。

#### § 4.2 虚負荷試験法の種類

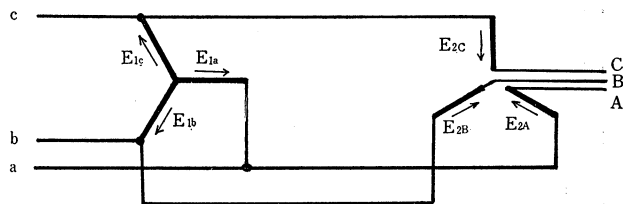
虚負荷試験装置の種類として、各種の文献を参照し 私見が加えられるならば、下記の如く整理できる。

- (1) 直流電動機に直結された、2台の同期発電機（1台の発電機の固定子は、位相調整のため、回転可能な構造をもつ）を運転する方法<sup>3)</sup>。周波数を可変できる点が優れてるが、設備費が高価である。
- (2) 移相変圧器<sup>5)</sup> を利用する。
- (3) コンデンサ（あるいはリアクトル）と抵抗の移相回路の虚負荷結線する方法。
- (4) 三相巻線型誘導電動機の利用<sup>5)</sup>。
- (5) 三相誘導電圧調整器（IVR）の直列巻線・分路巻線を 切離すことによって、（4）と同様の原理を利用する方法<sup>5)</sup>。IVRの内外部の改造の必要がある。
- (6) 無誘導抵抗器と、三相对称電源の各相の電圧が、 $120^\circ$  ずつの位相差がある点を利用した方法。但し、 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の位相差の不連続変化のみ可能<sup>3)</sup>。さらに、変圧器の六相結線によれば  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $75^\circ$  の位相も得られることは確実であるが、位相調整が不連続である欠点に加えて、IVRが非対称負荷を担うことになり 2次側で規定電流に設定すれば 1次側の電流が 定格の2～3倍となり、IVRの振動が激しくなり 不都合である。
- (7) IVRの電圧調整の原理の利用（§ 4.3の方法）。

#### § 4.3 虚負荷試験回路

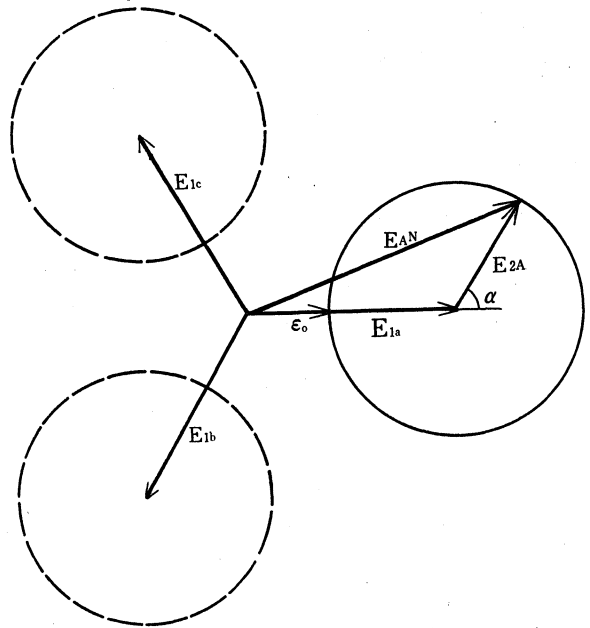
前節の（7）の方法が 従来の方法に比べて 下記の如く 種々の利点があり、さらに、その性能（精度・使用法）も 他に劣らないので、方法（7）について、述べることにする。

〔原理〕三相誘導電圧調整器の内部結線図とそのベクトル図が、図（9-a）、図（9-b）に示されてる。但し、 $E$ は相電圧、 $V$ は線間電圧である。ベクトル図によれば、IVRの回



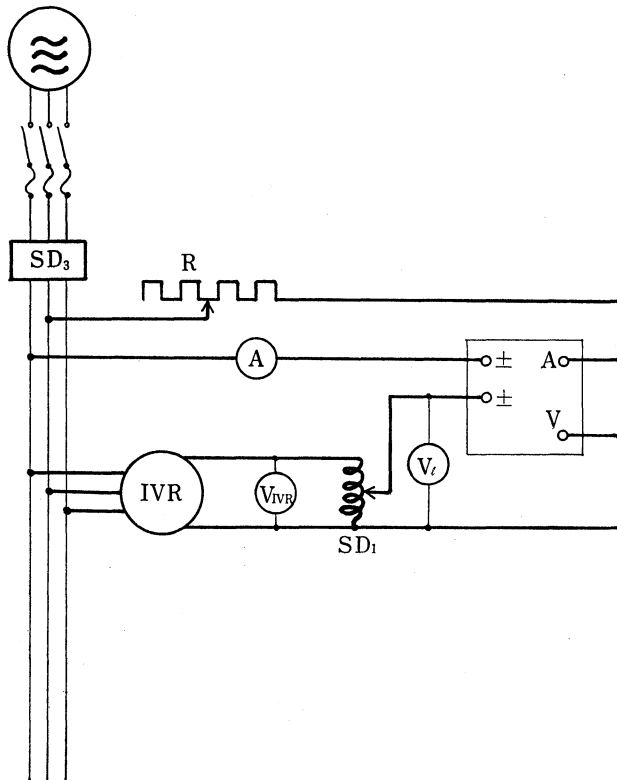
図（9-a）

転子の回転角度に応じて、2次回転子相電圧  $E_{2A}, E_{2B}, E_{2C}$  が1次相電圧  $E_{1a}, E_{1b}, E_{1c}$  との位相を  $0^\circ \sim 360^\circ$  まで変化するので、2次出力電圧  $E_{AN}, E_{BN}, E_{CN}$  も1次相電圧とある値の範囲で位相を変えうる。(ここで、ある値は、「IVR固有の値である」図(9-b)の  $\epsilon_0$  の設計値に応じて変化する。) さらに、対称三相交流で波形歪みがなければ、線間電圧で考えても同様である。即ち、IVRのハンドル操作によってその出力電圧を調整することは、1次線間電圧と2次線間電圧の位相差を連続可変することになる。

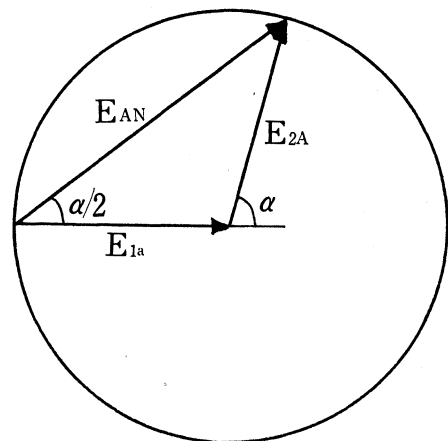


図(9-b)

〔結線図とその使用法〕 ⊕④, ⊕⑦端子は、積算電力計(あるいは、単相電力計、あるいは力率計)の電流コイル、電圧コイル用の端子であり、図(10)に示される如く、一端子共通せずに結線して、夫々のコイルに、設定値の電流、電圧を与える。Rは無誘導抵抗器が理想的で、電流可変用として使用する。電圧計  $V_{IVR}$  はIVRによる昇圧がスライダック  $SD_1$  の定格入力電圧



図(10) 虚負荷回路



図(11)

を超過する恐れがあるため、それを指示するための計器。三相スライダック  $SD_3$  は、そのための降圧装置である。

使用法としては、まず、電流計  $A$ 、電圧計  $V_i$  の指示が、設定された電流、電圧値になるように、 $R$  と  $SD_1$  を用いて調整する。一方、位相差の設定は、 $IVR$  のハンドルの指標によって、その概略値は容易に調整できる。即ち、本稿で使用した、 $IVR$  の特性値としての  $\epsilon_0$  が、定格電圧に対して 図 (11) の如く ベクトル図上で 充分 無視できる測定値を得たので、位相差は

$$(\text{位相差}) = \frac{1}{2} \times (\text{回転子の回転角 } \alpha^\circ) \quad (7)$$

で決定できる。従って、ハンドルに指標を取付けておけば、位相差の概略値が直読できる。

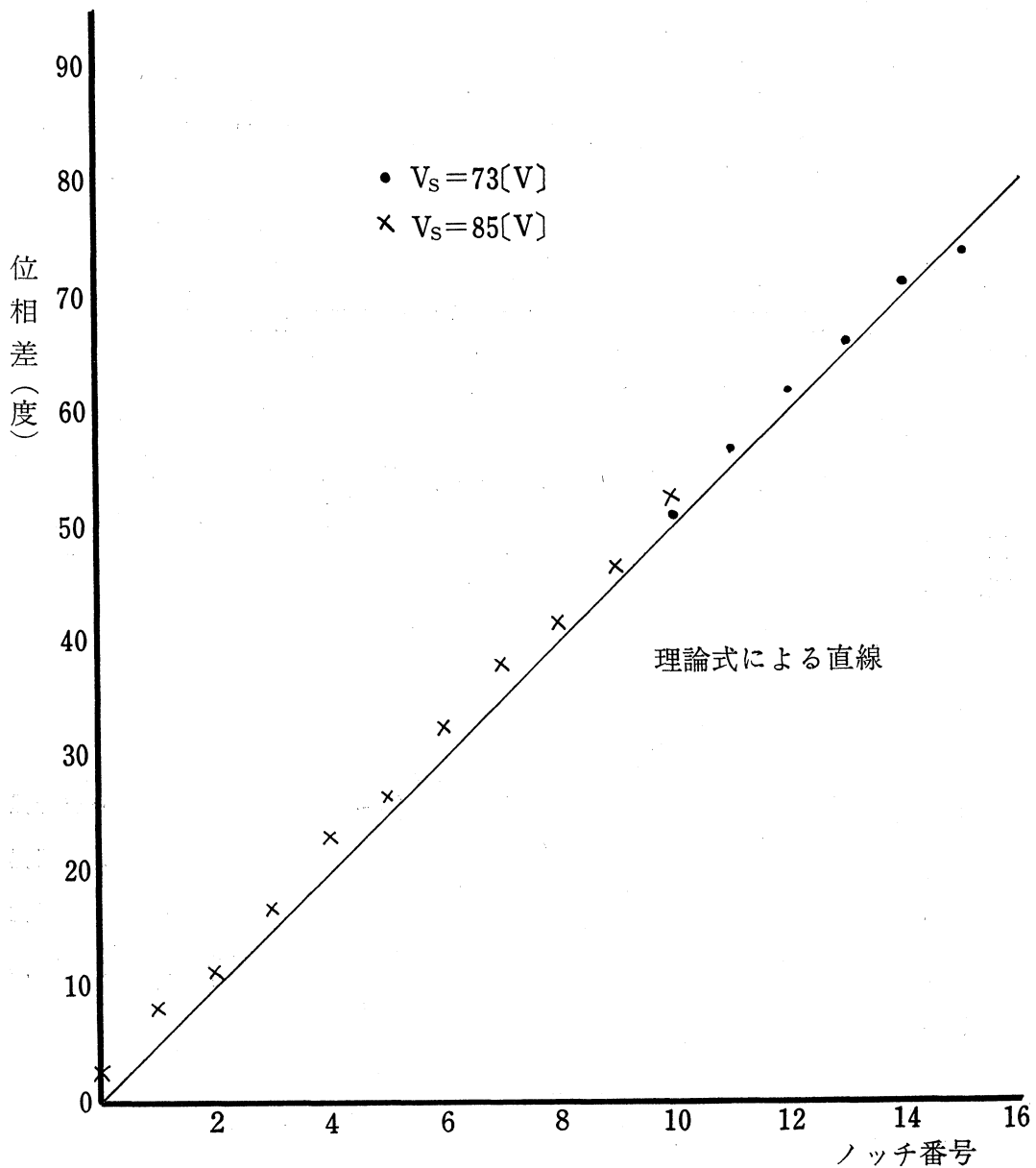
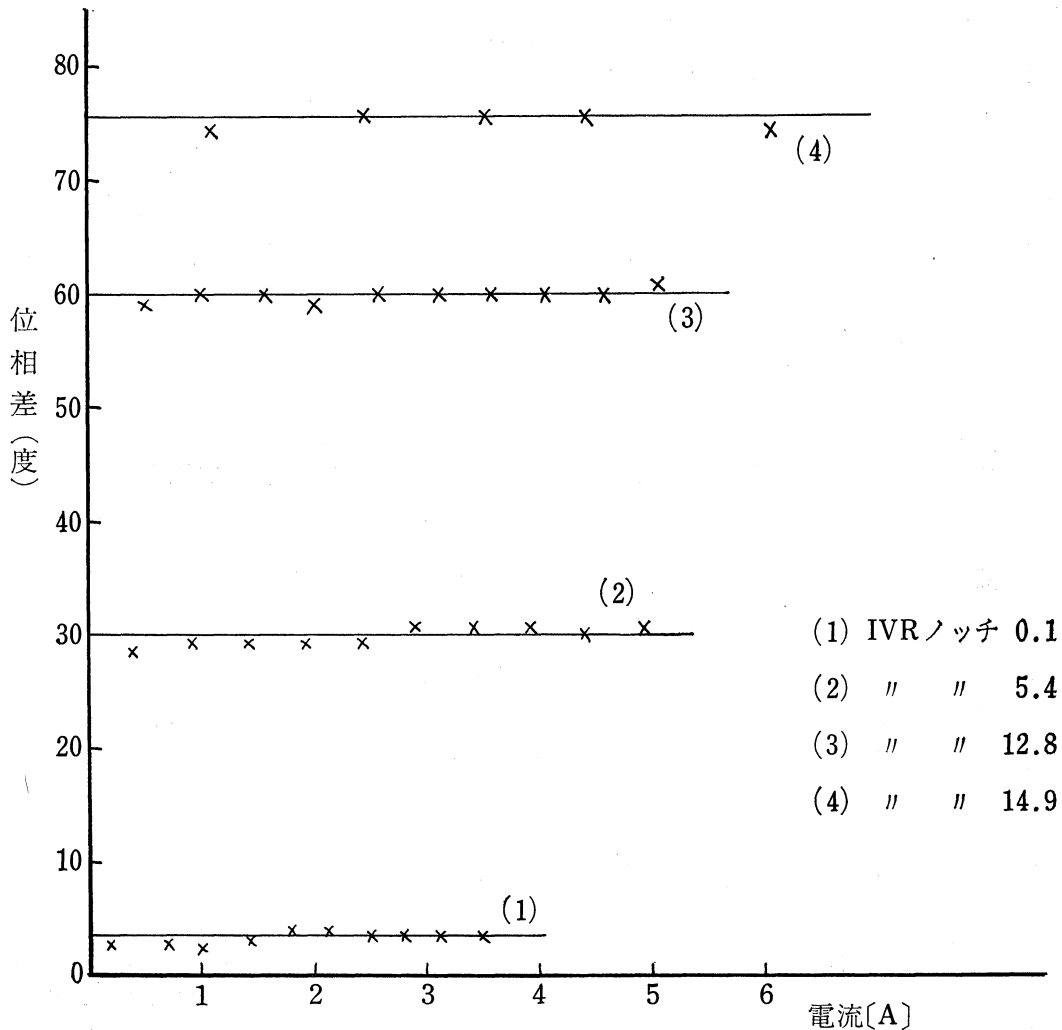


図 (12) 電流一定力率特性 (100V 1A一定)

さて、電源の三線のうち、二線の接続の交換のみで、「進み」の位相差も設定できることは、次のように説明できる。

即ち、図(9-b)に示す様に1次側ABCの電源が印加された時、2次側の巻線の軸が1次巻線の軸より機械角で $\alpha^\circ$ だけ進んでいけば、2次巻線に生ずる電圧 $E_2$ は1次巻線の $E_1$ より $\alpha^\circ$ だけ進んでいる。故に、この場合、遅れ位相である。そこで次に、逆の相順ACBの電源にすれば機械角的には前と変わりなく電氣的に2次巻線軸が1次巻線の軸より $\alpha^\circ$ だけ遅れて、 $E_2$ は $E_1$ より $\alpha^\circ$ だけ遅れる。換言すれば二線の交換によって「進み」の位相が得られたのである。但し、電源の各相間の不平衡やIVR内部の不平衡などから、二線の入れ換えによって、遅れ角と全く同値の進み角が得られるとは限らず、精密調整を要する場合はIVRの少々調整操作が必要である。

〔特性〕電流を一定にした力率特性は図(12)に示す様に、理論値との誤差が小さく満足できる結果を得ている。なお、二種の測定値に分れてるのは、力率を高くするにつれてIVRの出力電圧が高くなり、スライダックの定格入力電圧を越えてしまい一旦、 $SD_3$ の再調整を必要とする



図(13) 力率一定電流特性

からである。図 (12) においては1 [A] の場合のみ示したが、他の場合でも、大差はない。

次に、力率を一定にした電流特性であるが、やはり、図 (13) に示されるとおり 満足できる結果が得られ、電流を連続的に変化させても 力率の変動は少ない。なお、その時、IVRのノッチ調整は不要であるが、必要あれば微調整操作は容易である。

〔当虚負荷装置の長短〕はじめに、長所としては、

- (1) § 4・1 の二条件の力率特性と電流特性が、共に可能である。
- (2) 操作は、電流特性の場合は、特に、容易であって、 $R$  のみの操作でよい。この時の力率の変化は無視できる。力率の再調整も可能である。
- (3) 電流特性において、位相差を連続可変できる。「遅れ」、「進み」の位相の切換えも容易である。
- (4) 短所の (2) は、抵抗器、コンデンサ、リアクルで、代用が可能である。
- (5) IVRの指標によって、与えられた位相差に設定するのが 容易である。
- (6) IVR以外に、特殊あるいは高価な、設備・機械を 必要としない。
- (7) IVRは、ギャップが存在するため 三相不平衡負荷であれば 機械的に弱いが、IVRの2次側が 電圧コイルに接続するのみ故 電流が微小で 三相不平衡は無視でき、IVRの振動は極めて微弱である。

次に、短所としては、

- (1) 結線が、従来の方法より、やや複雑である。
- (2) IVRの $\epsilon_0$ の設計によっては、位相 $0^\circ$ あるいは $90^\circ$ 近傍の特性が 実現できない事がある。

## V. 結 言

本稿の虚負荷装置について、「IVRの改造の必要がなく 回路の工夫によって、充分、その性能を満足させる事ができ、且つ、その操作は容易である。」と結論できる。

更に、この装置を積算電力計の負荷に使用して、「積算電力計による電力算定法が、高力率は勿論低力率でも、その性能が満足できる。」と結言できる。

終わりに、本稿の三相誘導電圧調整器の購入で、ご援助いただいた、当技術科、西田政善教授に深く謝意を表するとともに、中村虎重教授はじめ技術科教官各位のご協力を厚く御礼します。

## 参 考 文 献

- 1) 電気計測便覧：山内，オーム社.
- 2) たとえば電気工学実験：荒畑・三田，コロナ社.
- 3) 積算電力計の理論：飯田，電気書院
- 4) 山菱電機(株)カタログ：No. UL-2.
- 5) 電機概論：後藤，丸善.
- 6) 電気機器工学：電気学会.
- 7) 電気計算：池田，電気書院.

### Summary

The Image Load Apparatus in this paper has the next merits;

(a) By means of my-devised circuit, it does not need the expensive and particular parts except a three-phase induction voltage regulator.

(b) Its operation, especially, of the current-characteristics (constant power-factor), is simple and easy.

(c) Its characteristics is not worse than that of the other image load apparatus.

Besides, making use of this apparatus as the load of a singlephase watt-hour meter, I found that the METHOD (on the estimate of the electric power with the WH-meter) is superior to others from the synthesistic view of economy, wide-range and accuracy, even if the power-factor of the load becomes low (up to 30%).