

# 電源電圧の不平衡が三相誘導電動機の特性に及ぼす影響

伊 藤 達 郎\*

## Effect of Unbalanced Source Voltage on Characteristics of Three-Phase Induction Motors

By Tatsurō Itō

Kameido Works, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The paper summarizes the experimental researches the writer conducted on the several types of cage rotor and wound rotor induction motors to see how the characteristics of these motors are affected by the unbalance of source voltage.

In conclusion, it was found that, if the unbalance rate did not exceed 6% and the positive-phase-sequence component of unbalanced source voltage did not give much difference with the rated value, the motors could be free from serious influence over their characteristics, except the current value which would show considerable unbalance in case of small capacity motors, and used for practical service without any inconvenience.

### 〔I〕 緒 言

電力事情の逼迫、配電施設の不備、又は三相電源に対する単相負荷の接続等の原因により、本来定格周波数、定格電圧のもとで運転されるべき誘導電動機が往々にしてこれらとは遙かにかけ離れた条件のもとで使用され問題を起すことがある。

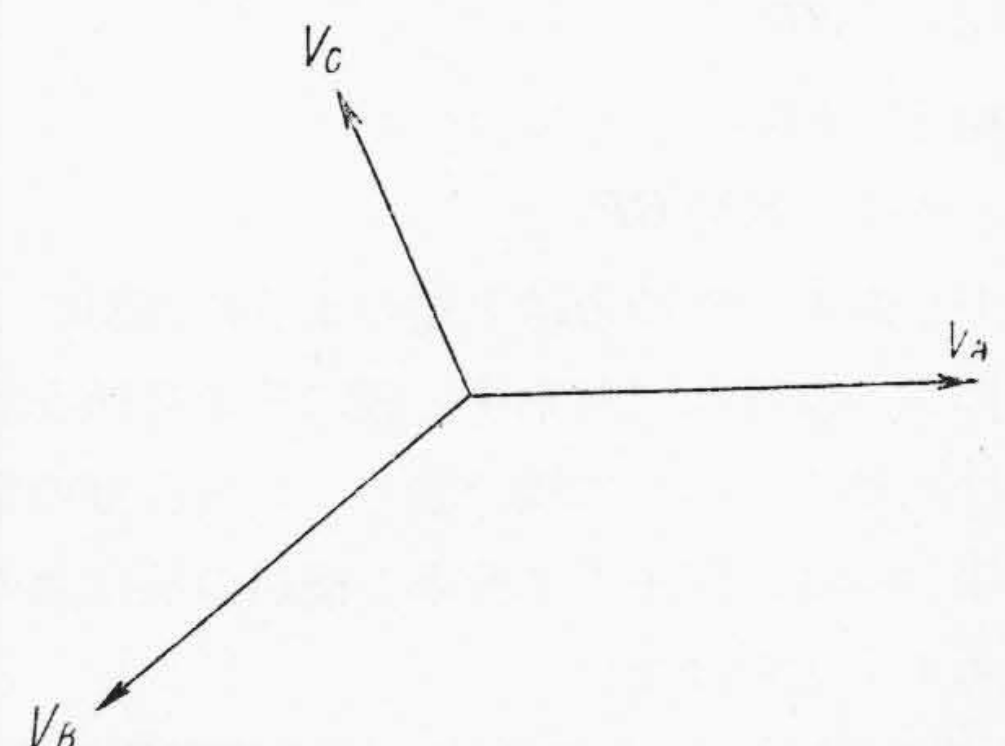
最近の傾向として電源電圧の不平衡を知らないで電動機を使用した結果、電流の著しい不平衡及び過熱に対して需要家の苦情を聞くことがある。

この点を調査する必要を生じたので従来の文献を調べてみたが、電圧不平衡の場合の電動機については、トルク以外の特性はあまり公表されていない。そこで今回下記の諸特性について試験研究を行つたので以下項を追つて電源電圧不平衡の三相誘導電動機特性に及ぼす影響について記述する。

- (1) 無負荷特性
- (2) 全負荷特性
- (3) 温度上昇

### 〔II〕 理 論

三相不平衡電圧はこれを正相、逆相及び零相の各対称分に分割し得ることは周知のところである。本稿ではこれらを第1～3図のように図上から求めてみた。この方法は JEC 同期機標準資料附録 IV に記載されているが簡単に説明するために、三つの電圧の大きさをそれぞれ  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  とし、これらを三辺とする三角形  $CBA$  を画く

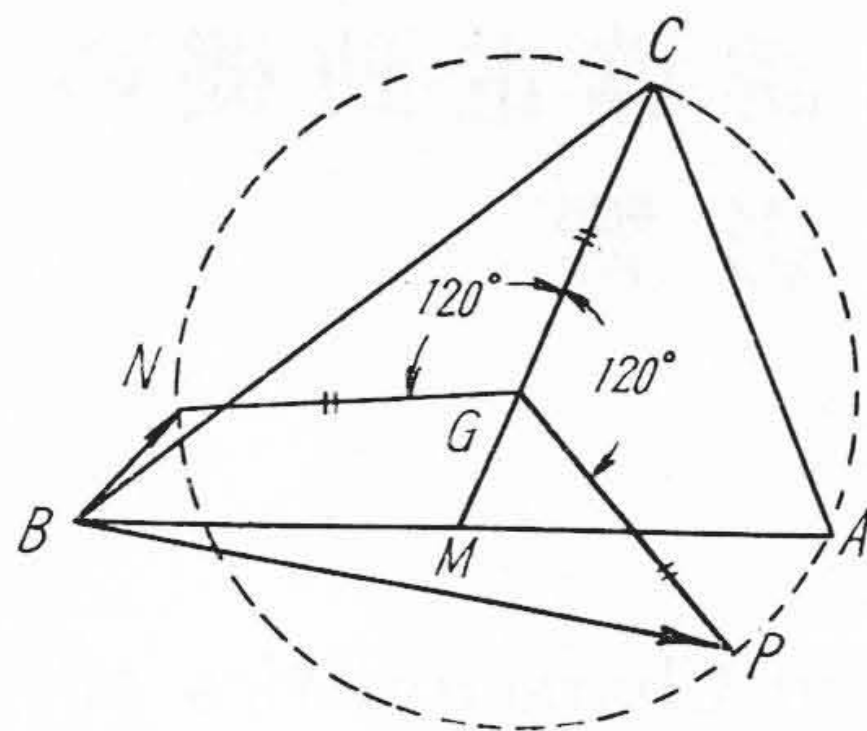


第1図 不平衡電圧のベクトル図

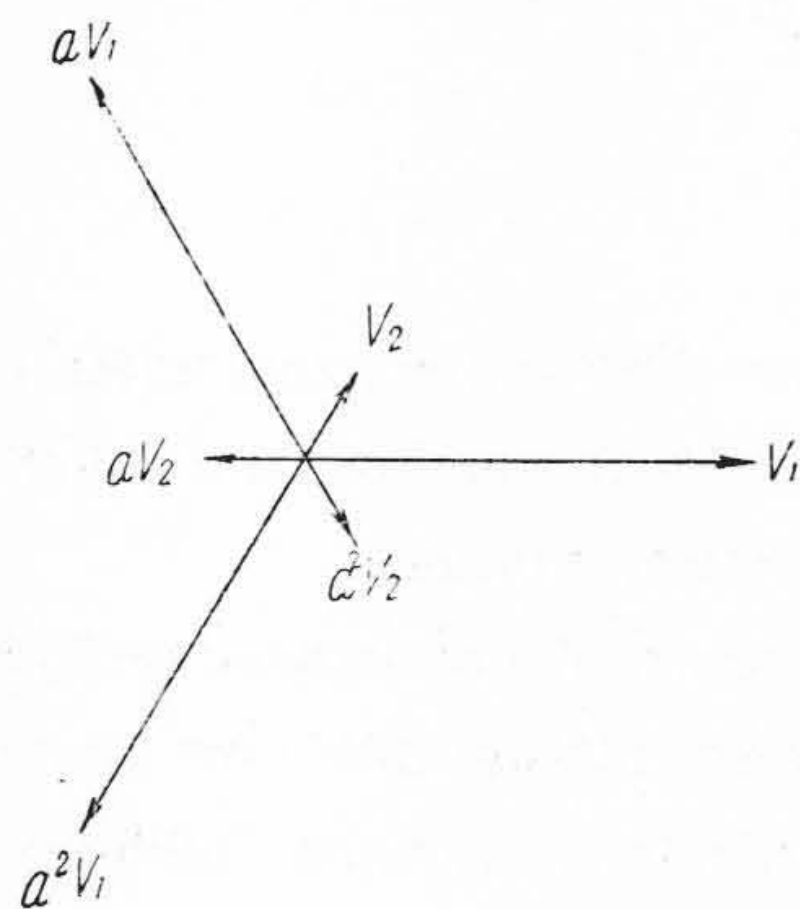
Fig. 1. Vector Diagram of Unbalanced Voltage

\* 日立製作所電戸工場





第2図 不平衡電圧の分解法  
Fig. 2. Decomposing Method of Unbalanced Voltage



第3図 不平衡電圧の正相分及び逆相分  
Fig. 3. Positive Phase Sequence Component and Negative Phase Sequence Component of Unbalanced Voltage

ここに

$$BA = V_A \quad CB = V_B \quad AC = V_C$$

$M$  を  $BA$  の中点とし  $C$  と  $M$  を結び  $GM = \frac{1}{3}CM$  にとれば、 $G$  は  $\triangle CBA$  の重心である。

$CG$  を、 $G$  を中心として左右に各  $120^\circ$  ずつ回転し、 $GN = GC \angle 120^\circ$ 、 $GP = GC \angle -120^\circ$  と取る。この  $N$  と  $P$  とを各  $B$  に結べば

$$\text{正相分} = \vec{BP}$$

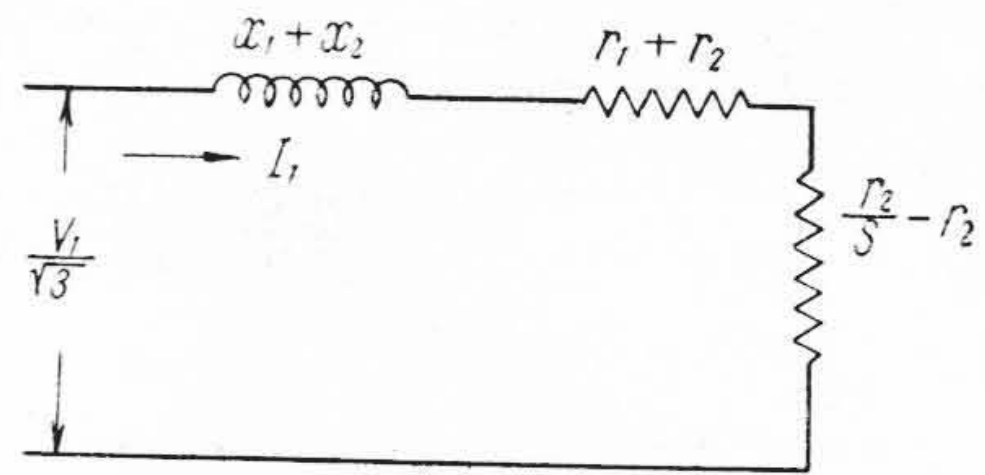
$$\text{逆相分} = \vec{BN}$$

$$\text{不平衡率} = BN/BP$$

なお不平衡率の求め方は上述のように図解によるか又は計算によらなければならず一般にその数値を簡単に知ることとは困難であるが本稿で論じている程度の電圧の不平衡の場合には、電圧不平衡率の概略の値は次の式によつて求めても大差はない

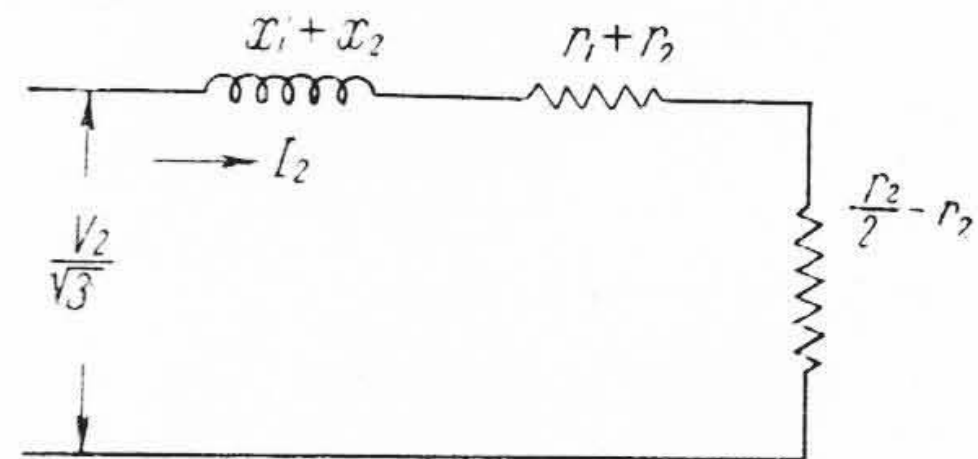
$$\frac{\text{不平衡電圧の最大の数値} - \text{不平衡電圧の平均値}}{\text{不平衡電圧の平均値}}$$

さて誘導電動機を三相電源に接続して運転する場合、線間電圧は零相電圧を含まず、又電動機の中性点は接地



第4図 等価回路

Fig. 4. Equivalent Circuit



第5図 等価回路 ( $S=2$  の場合)

Fig. 5. Equivalent Circuit ( $S=2$ )

しないから零相電流は流れない。従つて不平衡電圧が誘導電動機に及ぼす影響としては、不平衡電圧より正相分及び逆相分を求めて逆相分の電圧は制動作用をなすものとして考察してゆく。

今簡単のため励磁回路を無視した誘導電動機の等価回路を第4図及び第5図のようにし

$V_1$  = 正相電圧 (線間)

$V_2$  = 逆相電圧 (線間)

$x_1$  = 一次巻線リアクタンス

$x_2$  = 一次に換算した二次リアクタンス

$r_1$  = 一次巻線抵抗

$r_2$  = 一次に換算した二次抵抗

$I_1$  = 正相電流

$I_2$  = 逆相電流

$S$  = 滑り

とすれば

第4図から正相インピーダンス  $Z_1$  は

$$Z_1 = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{S}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \dots \dots \dots (1)$$

第5図から逆相インピーダンス  $Z_2$  は、簡単のため、 $S=2$  とおくと

$$Z_2 = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{2}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \dots \dots \dots (2)$$

又第5図及び(2)式から逆相電流  $I_2$  は

$$I_2 = \frac{\frac{V_2}{\sqrt{3}}}{Z_2} = \frac{\frac{V_2}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{2}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2}} \dots \dots (3)$$

となる。



逆相電流  $I_2$  が電動機に流入する結果起る現象としては、一次銅損  $I_2^2 r_1$  (毎相) が生ずる外に、この逆相分に対しては電動機は  $S=2$  附近で回転しているから誘導機が制動機として動作している場合に相当する。この場合誘導制動機は固定子即ち電源からは電氣的勢力を、回転子軸からは機械的勢力を受取り何れも回転子内の銅損として消費される。

以下逆相分に対する基本的な式を 2, 3 あげる。

$P_2$  = 回転子入力

$P_{c2}$  = 回転子銅損

$P_0$  = 出力

とすれば

$$P_{c2} = S P_2 \div 2 P_2$$

$$P_0 = P_2 (1-S) \div P_2 (1-2) = -P_2$$

即ち

回転子入力  $\div$  機械的入力

となり、この 2 つの和が回転子内の銅損として消費されることになるわけである。

従つて機械的入力は第 5 図及び (3) 式から

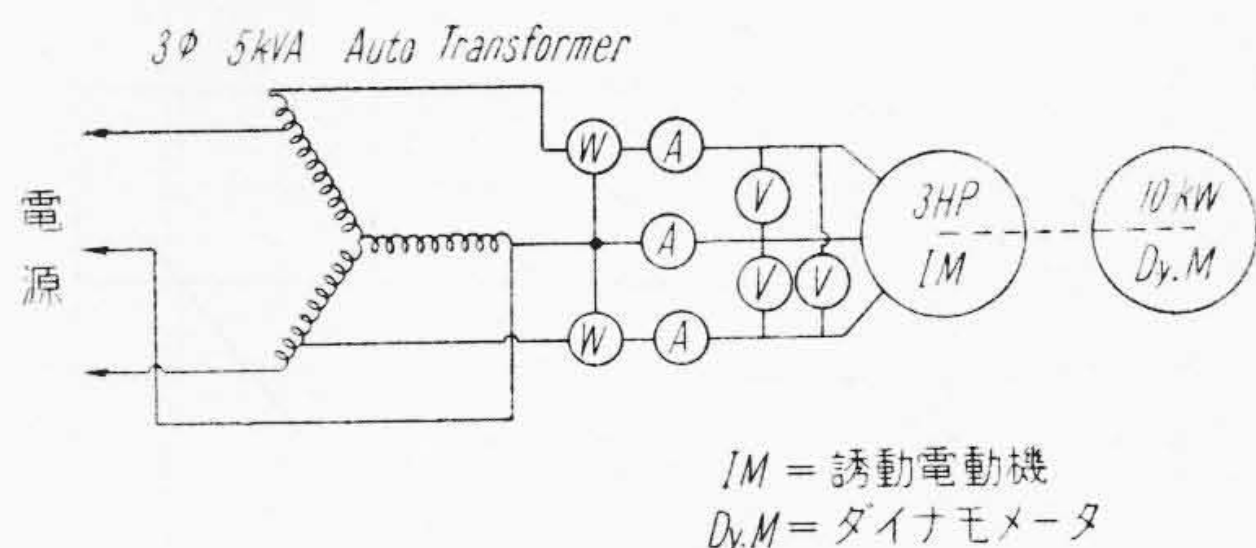
$$\text{機械的入力} = 3 I_2^2 \frac{r_2}{2} = V_2^2 \frac{\frac{r_2}{2}}{\left(r_1 + \frac{r_2}{2}\right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、これだけが電動機としての機械的出力の減少と考えられる。尙この値は同期速度近くで回転している場合 (逆相分に対しては  $S \div 2$  の場合) は、電圧の逆相分  $V_2$  が一定ならば (4) 式から見られるように電動機の負荷の軽重に拘らず略一定値を示す。

逆相電流  $I_2$  について少し説明を補足すれば (1), (2) 両式から判明する通り、 $Z_2$  は  $Z_1$  に比し、その抵抗分が著しく小さいため、全体としての値は  $Z_2 < Z_1$  となる。従つて (3) 式から求められる  $I_2$  は逆相電圧の僅少な値に対しても比較的大きい値となる。又  $Z_2$  は  $Z_1$  に比しリアクタンス分に対する抵抗分の割合が小なるため、逆相回路の力率は低い値をとる。

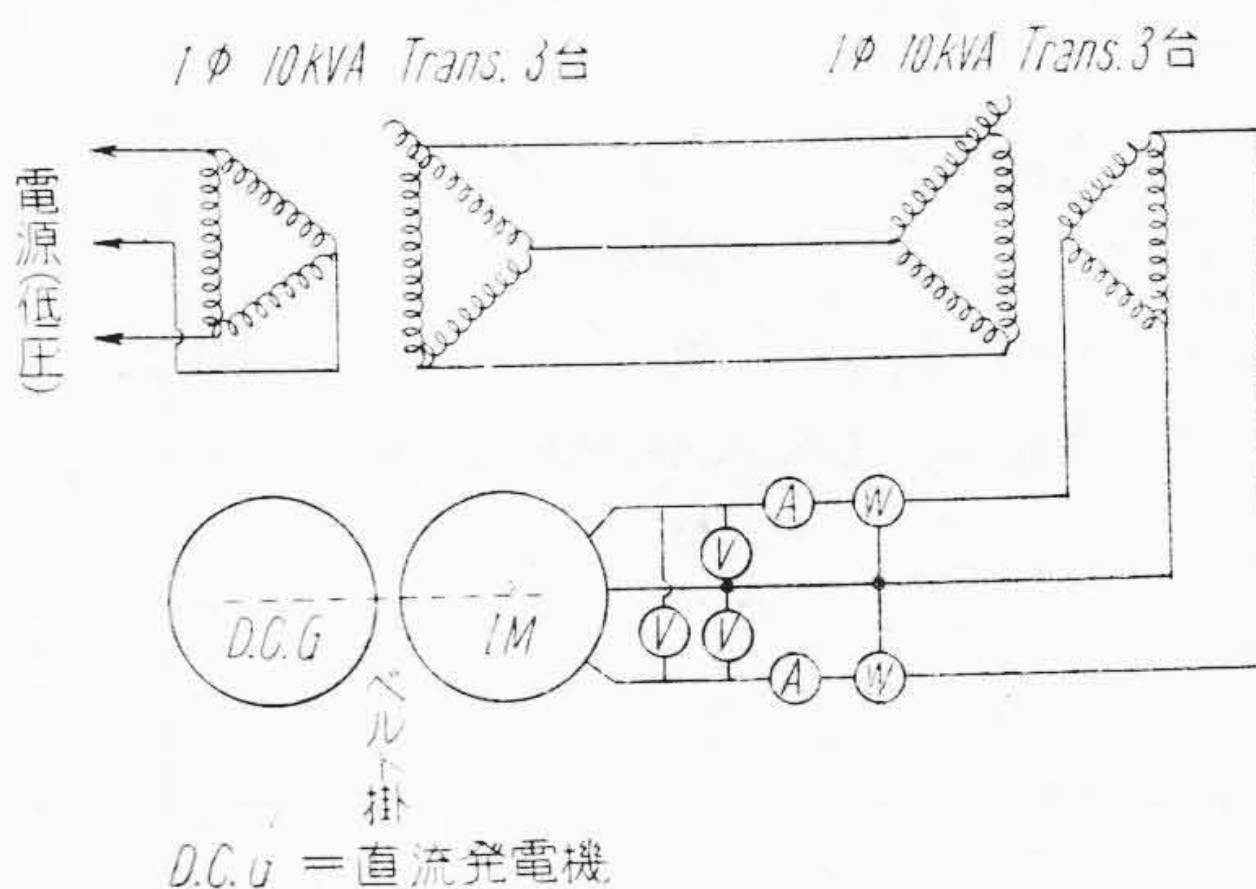
以上の理論から不平衡電圧の電動機特性に及ぼす影響としては一般に次に掲げる事項があげられる。

- (1) 電圧の不均衡により必然的に電流の不均衡を生ずる。
- (2) 電流大となるため銅損が大となり、温度上昇を大ならしめる。
- (3) 効率は出力減少し、入力が増大するために低下する。
- (4) 逆相回路の力率は低い。従つて全体としての力率に影響を与える。



第 6 図(a) 接続図 (1HP 及び 3HP)

Fig. 6.(a) Connection Diagrams (1 HP and 3 HP)



第 6 図(b) 接続図 (3kW 及び 15kW)

Fig. 6.(b) Connection Diagrams (3kW and 15kW)

### 〔III〕 試験法 及び 結果

#### (1) 試験法

##### (A) 供試電動機

籠 形..... 1 HP, 3 HP  
巻 線 型..... 3kW, 15kW

##### (B) 不平衡電源

三相単捲変圧器..... 5 kVA 1 台  
单相変圧器..... 10 kVA 6 台

##### (C) 接 続 図

第 6 図 (a), (b) の通りである。

##### (D) 不平衡電圧の範囲

電源設備の都合上次の範囲にとどめた。即ち三線間の電圧の平均値を 200 V とし、その上下に 3~9% (不平衡率では 2.75~9.7%) 増減せしめた。

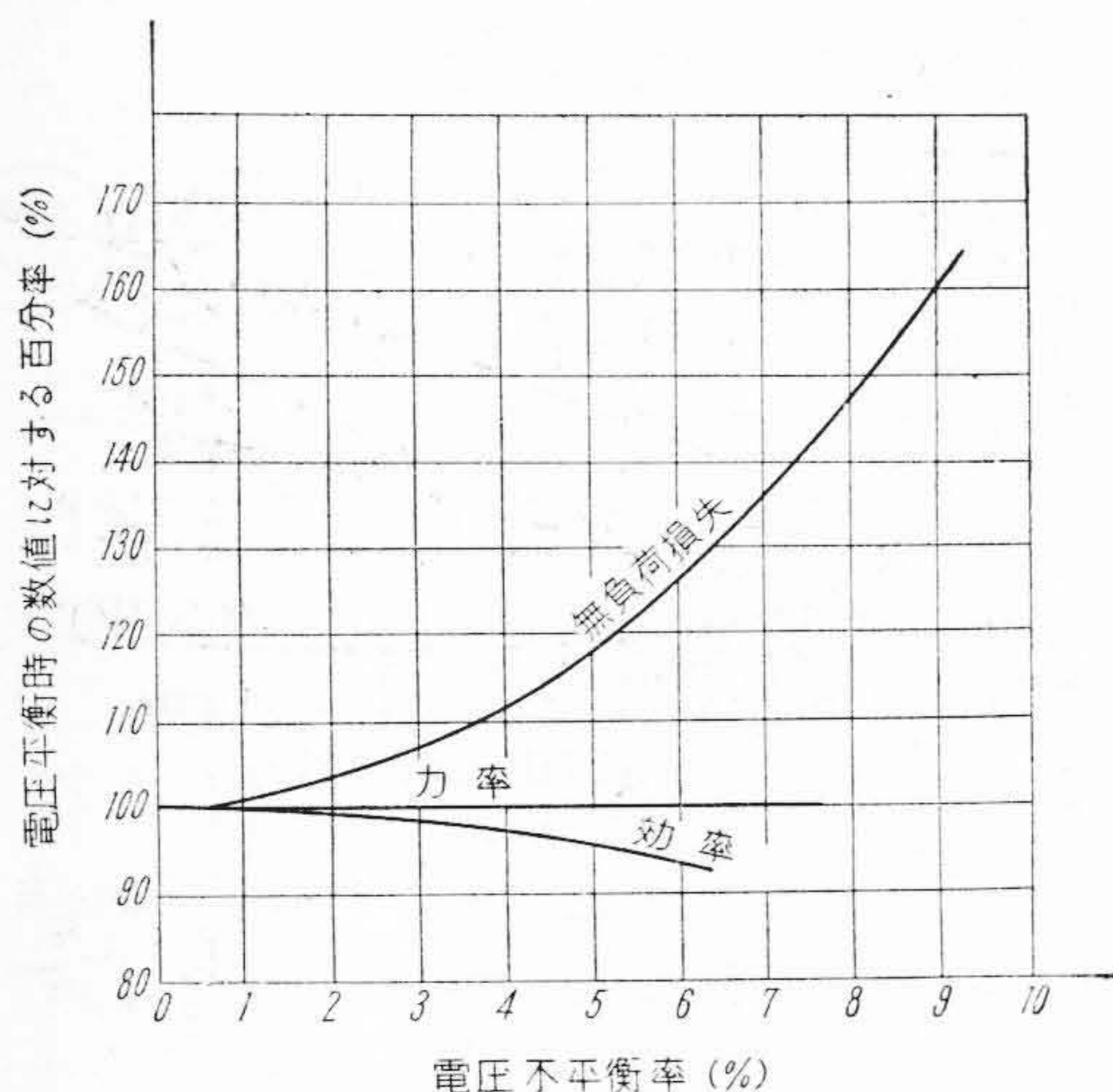
##### (E) 特性試験の種類及び実施事項

次に掲げる a, b, c 3 種類の試験を実施した。

##### (a) 無負荷特性試験

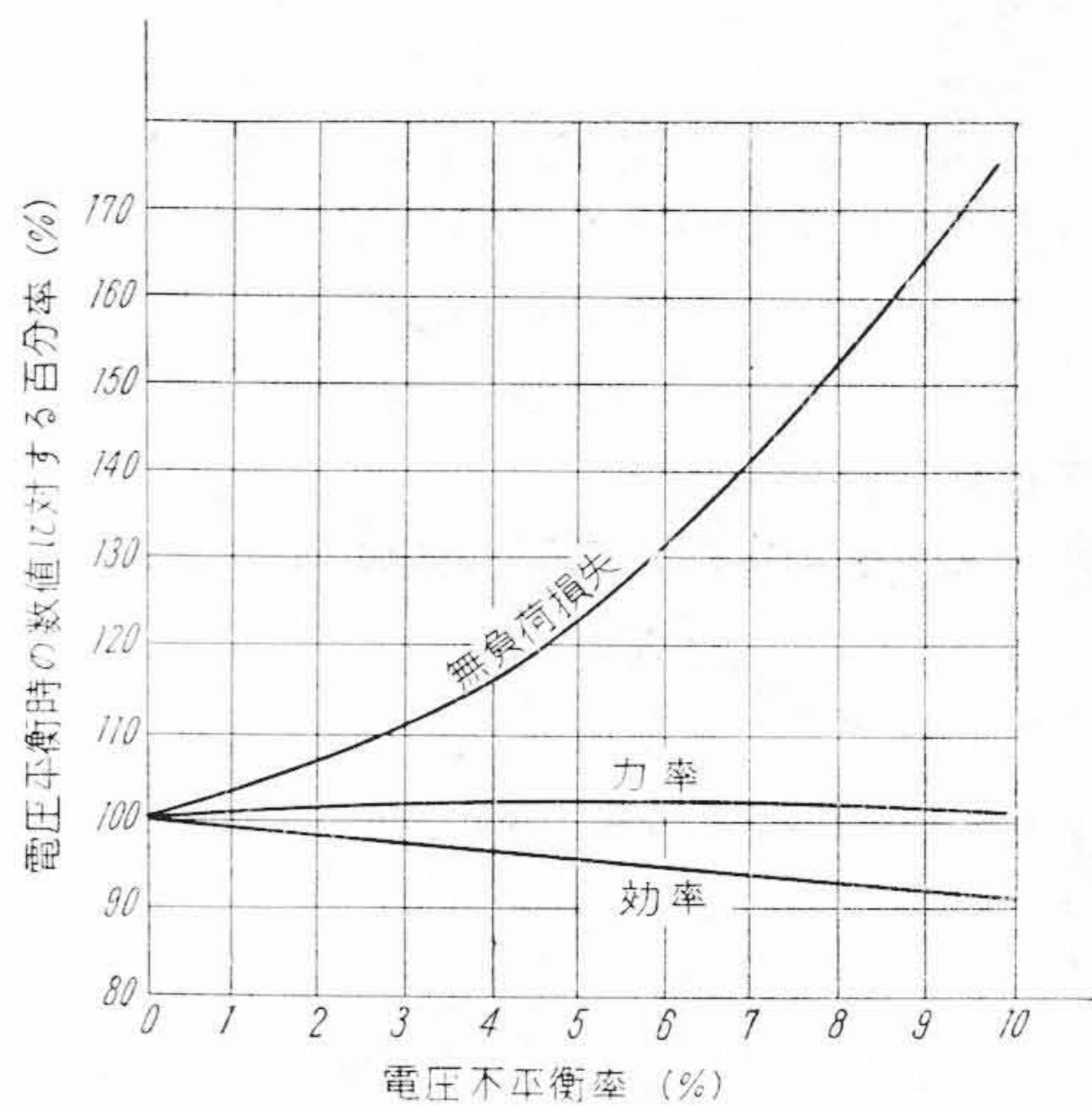
電圧平衡、不平衡の両方の場合の特性値を比較し電流値の増減及び不平衡を規格と対照して検討してみると共に逆相インピーダンスを実測





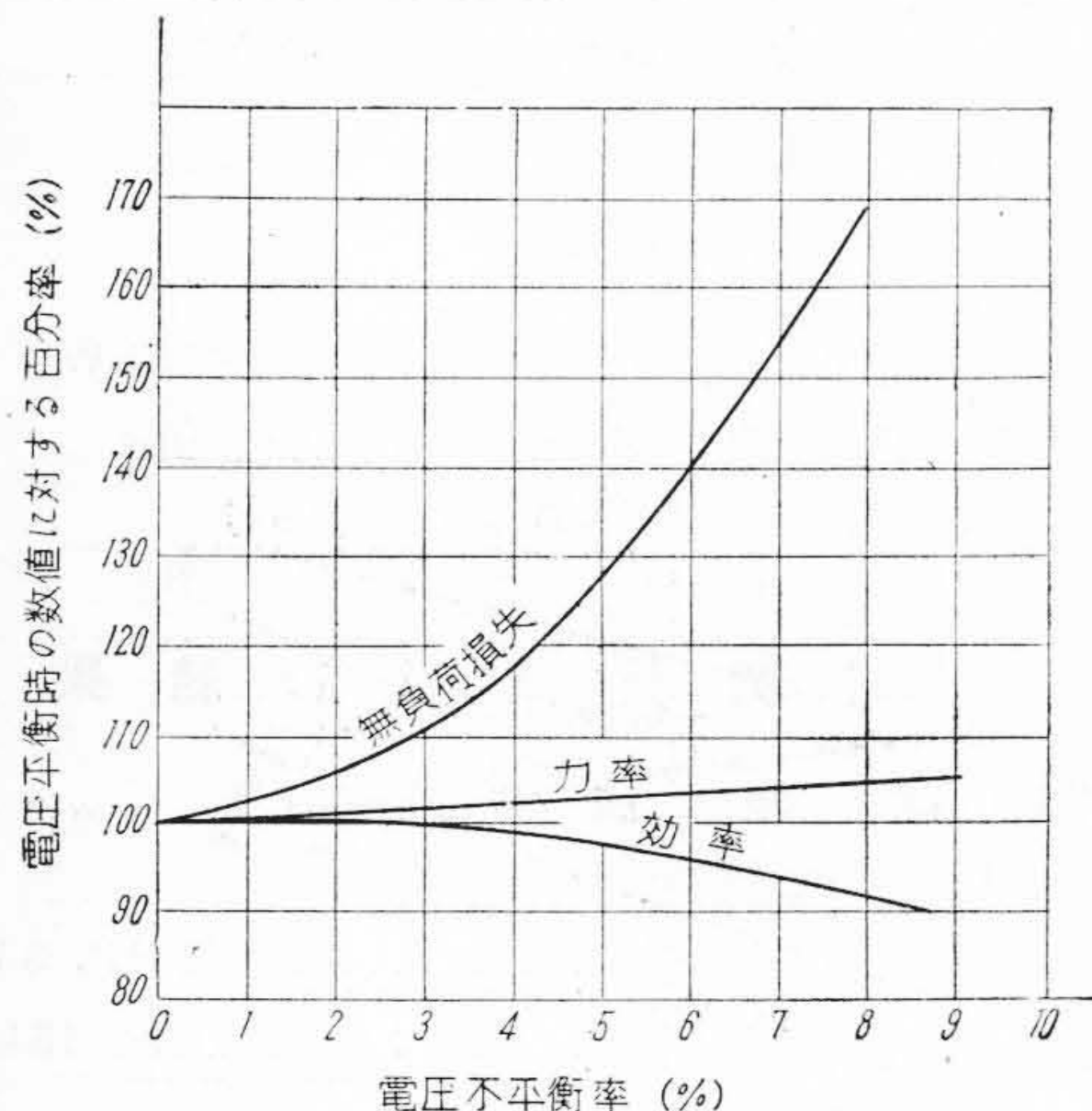
第 7 図 特 性 曲 線 (1 HP)

Fig. 7. Characteristic Curves (1 HP)



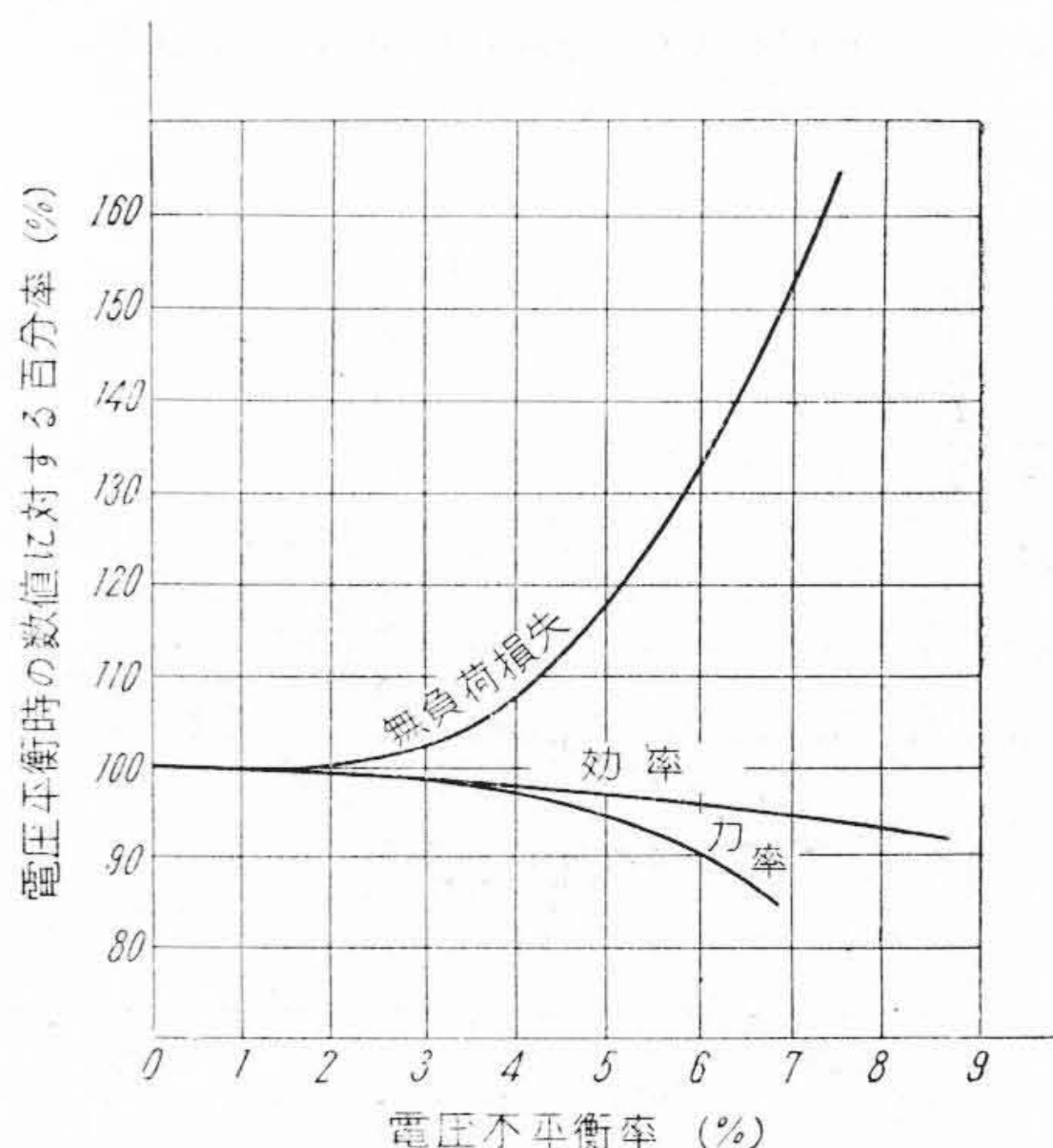
第 9 図 特 性 曲 線 (3 kW)

Fig. 9. Characteristic Curves (3 kW)



第 8 図 特 性 曲 線 (3 HP)

Fig. 8. Characteristic Curves (3 HP)



第 10 図 特 性 曲 線 (15 kW)

Fig. 10. Characteristic Curves (15 kW)

し、電圧不平衡による無負荷損失増加の原因を逆相分による一次銅損、鉄損及び制動作用による二次銅損とに分けて検討した。

#### (b) 全負荷特性試験

籠形電動機はダイナモメータに直結、巻線型の場合は直流発電機にベルト掛けとし、出力を定格値に維持して電源電圧の不平衡による特性の変化を負荷電流、効率、力率及び回転力の諸点から検討を加えた。

#### (c) 温度上昇試験

前項同様ダイナモメータ又は直流発電機により負荷した。但し電圧不平衡の場合は電源容量

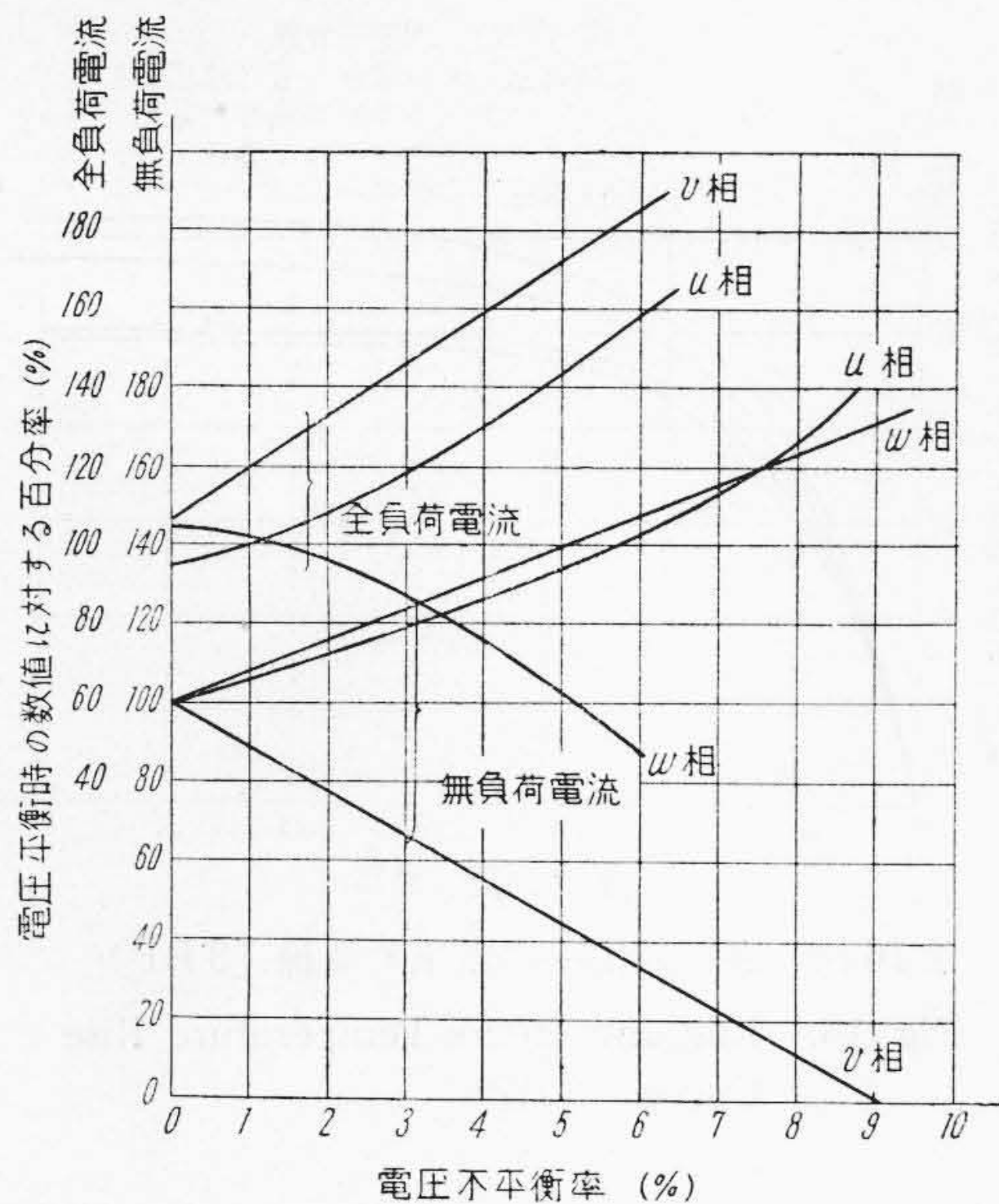
の都合上全機種について温度試験を実施することが不可能であつたから、この不可能のものに対しては効率と滑りとから温度上昇の値を推定した。

更に 3 HP については不平衡電圧のもとに於ける温度上昇を熱電対により測定し、運転時間に対する温度上昇の状況を実測した。

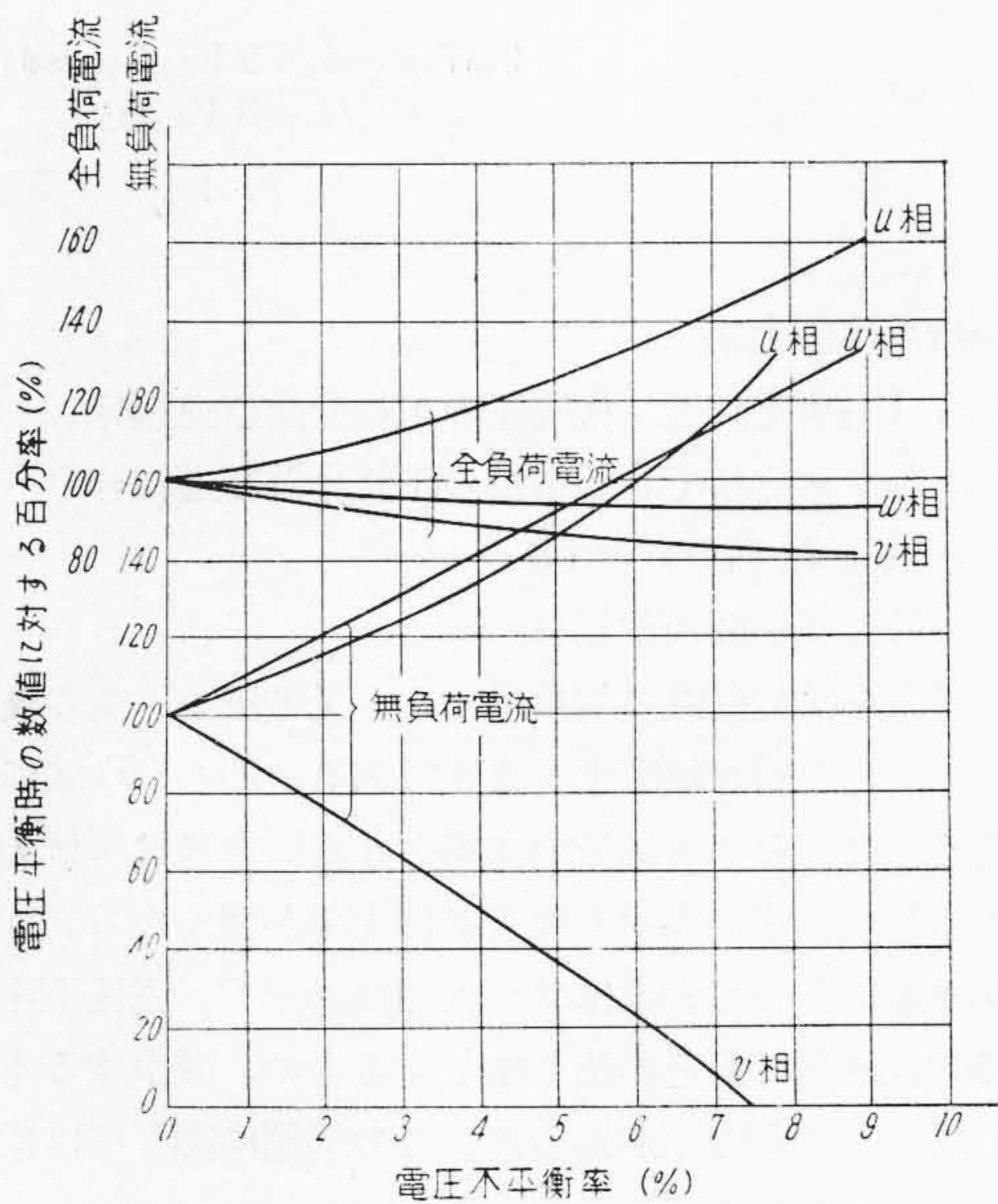
#### (2) 結 果

第 7～10 図に無負荷損失並びに全負荷時の力率及び効率の電圧不平衡による変化を示し、第 11～14 図には無負荷及び全負荷時の各相電流の変化を示した。



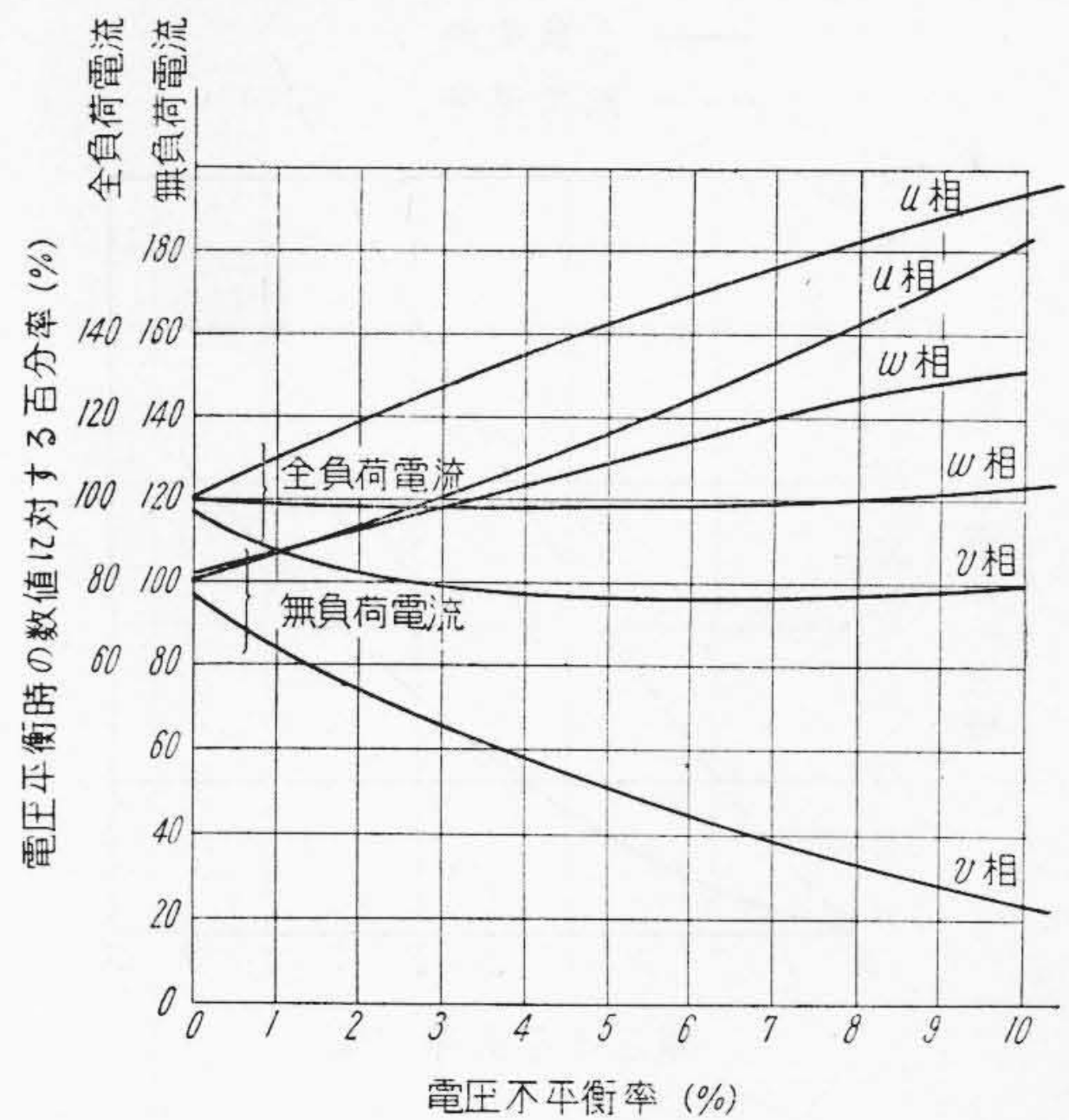


第11図 電圧不平衡率—電流(各相)曲線 (1HP)  
Fig. 11. Unbalance Factor of Voltage-Current (Each Phase) Curves (1 HP)

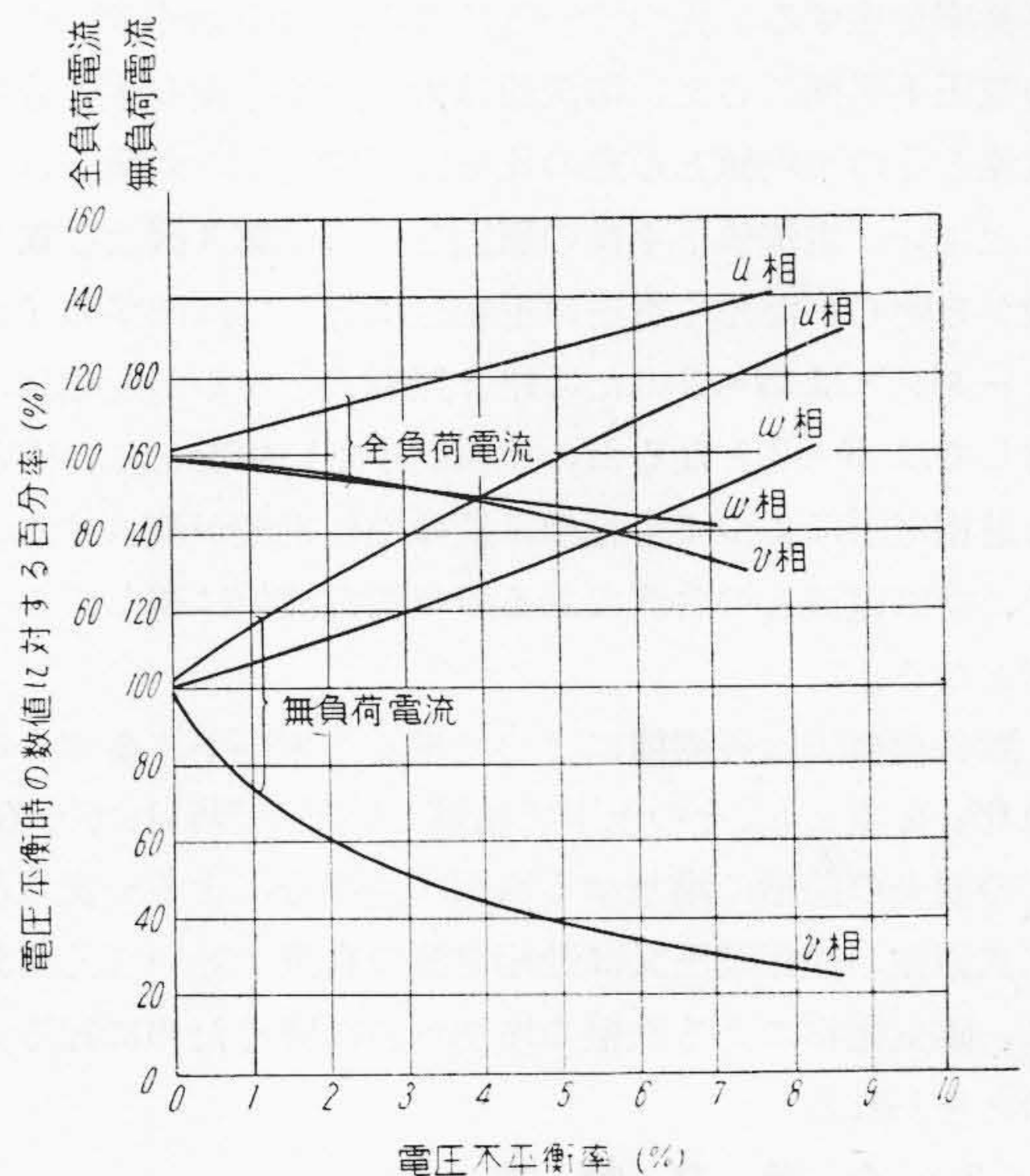


第12図 電圧不平衡率—電流(各相)曲線 (3HP)  
Fig. 12. Unbalance Factor of Voltage-Current (Each Phase) Curves (3 HP)

第15図は第12図の電流を不平衡率で表わしたもので、又第16図は 3HP 電動機の 6.5% の不平衡電圧に於ける温度上昇を、平衡電圧に於ける場合と比較して示した。



第13図 電圧不平衡率—電流(各相)曲線 (3kW)  
Fig. 13. Unbalance Factor of Voltage-Current (Each Phase) Curves (3 kW)



第14図 電圧不平衡率—電流(各相)曲線 (15kW)  
Fig. 14. Unbalance Factor of Voltage-Current (Each Phase) Current (15 kW)

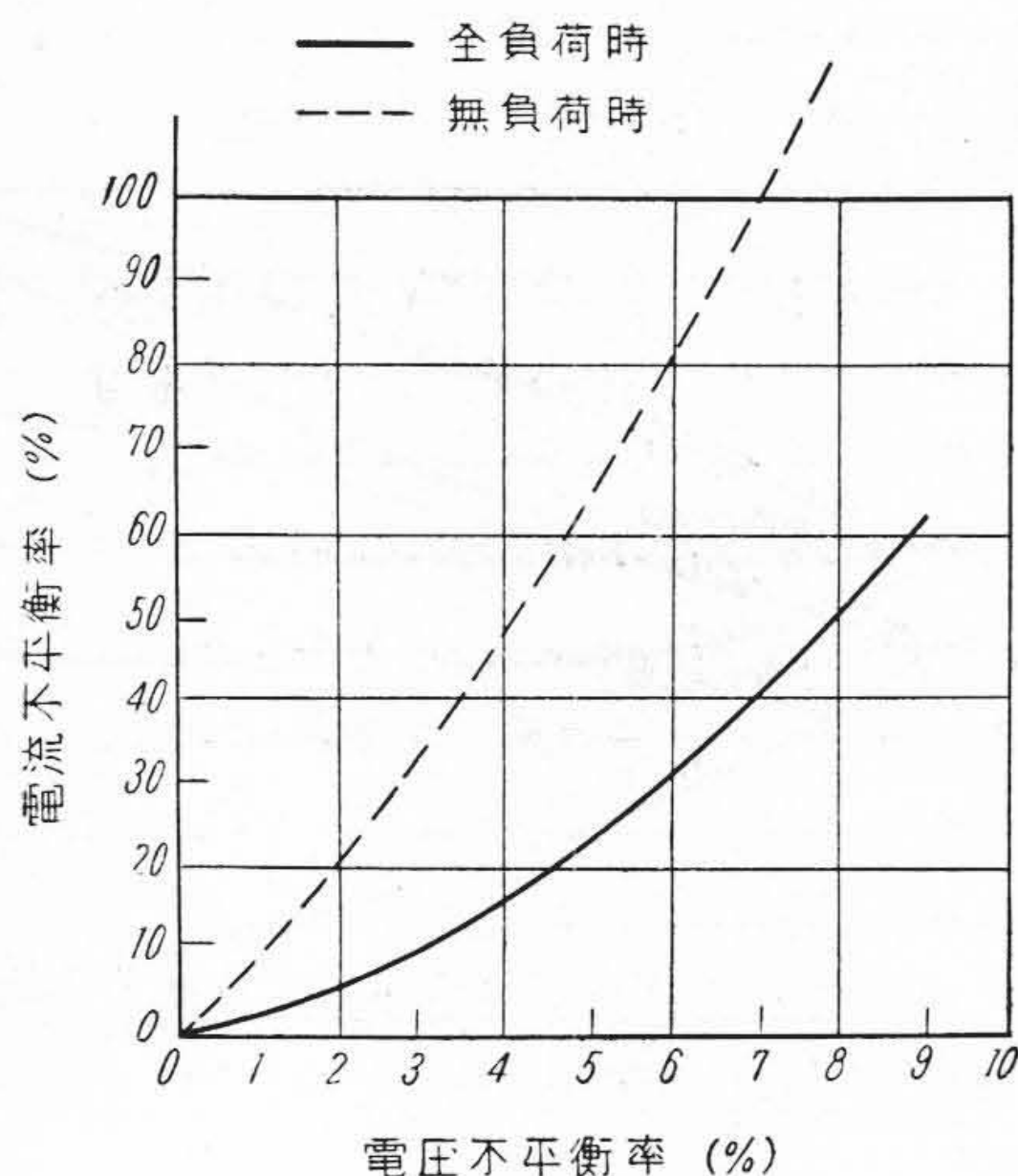
#### 〔IV〕 結果 の 検 討

第7～14図に示された試験結果から次のことがいえる。

##### (1) 無 負 荷 特 性

無負荷電流の不平衡は各機種を通じ諸特性の中で最も顕著に現われる特異現象で図で見られるように、僅か 3





第 15 図 電圧不平衡率—電流不平衡率曲線 (3HP)

Fig. 15. Unbalance Factor of Voltage-Current (Each Phase) Curve (3 HP)

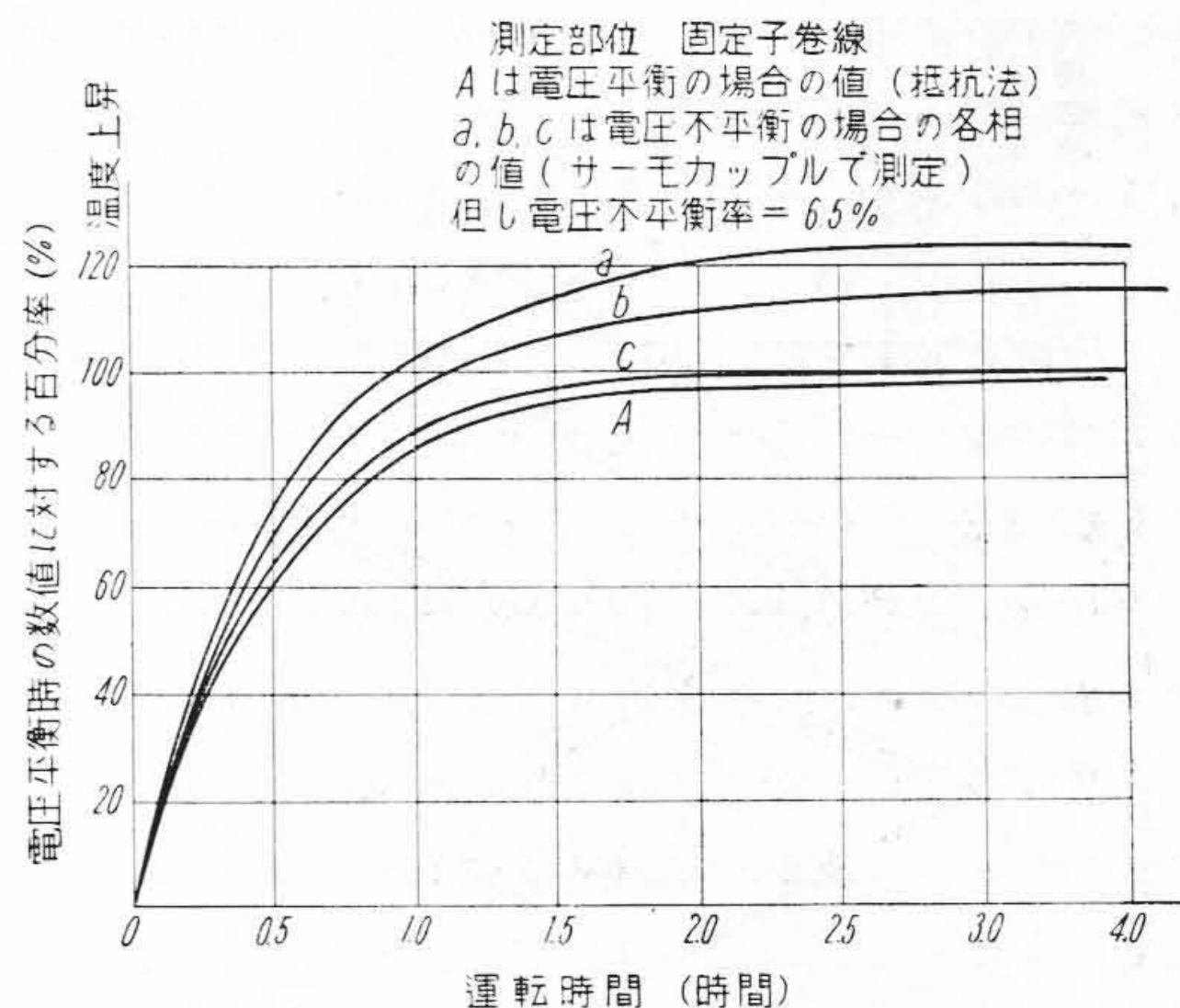
～9% の電圧の不平衡によつて電流値は 22～93% の不平衡率を生ずる。従つて一般にこの場合の如く 3% 程度の電圧不平衡でさえ、電流値は大きな不平衡を生じ各相電流とその平均値との差の比率は規格適用の対照とはなりえない。電流値不平衡の原因としては第 4 図及び第 5 図から明らかな如く電圧の正相分に対しては回路のインピーダンスは  $S \approx 2$  のため略々無限大となるが逆相分に対しては  $S \approx 2$  となるため比較的小さい値をとり、僅かな逆相電圧によつても相当多量の逆相電流が流入するので、励磁電流との合成である無負荷電流値は著しく不平衡となる。

無負荷損失は各機種によつて異なるが電圧不平衡率の概ね 6% を境とし、その上下では夥しい差が現われてくる。この損失の急激に増加する原因は逆相分による一次及び二次銅損が逆相電圧又は逆相電流の自乗で効いてくる外に、磁気飽和による鉄損の増加が急に響くために起るものと思われる。

## (2) 全負荷特性

電流値は無負荷の場合ほどの不平衡は現われず、数% 以下の電圧不平衡率の場合は電流の平均値は電圧平衡の場合と比較して大差はなくなる。この理由は (3) 式から明らかなように、電圧の逆相分の値が一定ならば負荷の大小に拘らず逆相電流  $I_2$  は略一定値をとり、このため全負荷電流の正相分に及ぼす逆相電流の影響が少いからである。

効率は各機種共無負荷損失の場合と同様、概ね電圧不平衡率 6% を境としてこの率未満では 1～2% の低下しか来さないが 6% 以上になると急に悪化し、約 10% 近



第 16 図 運転時間—温度上昇曲線 (3 HP)

Fig. 16. Running Hours-Temperature Rise Curves (3 HP)

く低下するものがでてくる。この原因は電圧不平衡率 6% 以上になると無負荷損失の増加が急に多くなるためである。

電圧不平衡の場合、等価力率の定義は一般に次の式で表わされる

$$\cos \theta = \frac{\text{入力}}{\text{皮相入力}} = \frac{3 V_{\phi 1} I_{\phi 1} \cos \phi_1 + 3 V_{\phi 2} I_{\phi 2} \cos \phi_2}{3 V_{\phi 1} I_{\phi 1} + 3 V_{\phi 2} I_{\phi 2}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに

$\cos \theta$  = 等価力率

$V_{\phi 1}, V_{\phi 2}$  = それぞれ相電圧の正相分及び逆相分

$I_{\phi 1}, I_{\phi 2}$  = それぞれ相電流の正相分及び逆相分

$\phi_1 = V_{\phi 1}, I_{\phi 1}$  間の位相差

$\phi_2 = V_{\phi 2}, I_{\phi 2}$  間の位相差

さて力率は電動機の種類により、又電圧不平衡の度合によつてその値を増減するようである。即ち (5) 式に於て逆相分の力率が正相分の力率より良いときは等価力率がよくなり、その反対の場合には力率が悪くなる。従つて各機種によつて力率は異つた傾向を示し、電圧不平衡率 10% 以内でもその値を増加するもの、減少するもの及び増減するもの等があるが、この問題に関しては尙十分検討の要がある。

最後にトルクは電圧の自乗に略比例するから電圧不平衡率 10% 以下について論じている現在の場合には電圧不平衡の影響は殆ど問題にならない。

尙 3 HP については第 15 図に電圧不平衡率に対する諸特性を曲線で示した。

## (3) 温度特性

電源容量の都合上電圧不平衡率の種々の値のもとにおける温度試験を全機種について実施することは不可能で



あつたが、効率及び滑りから推定すると温度特性も効率と同様に電圧不平衡率約6%を境としてこの率未満では温度上昇の増加は殆んど無視できる程度であるが、この率以上になると概して、温度上昇の増加は急に多くなり、一般に温度特性に余裕のない機種 of 電動機は実用上支障を来すようになる。

尙第16図は3HPについて電圧平衡時及び不平衡率6.5%時の全負荷運転の場合の温度試験の状況を示すもので電圧不平衡時は平衡時に比較してかなりの上昇を示し、又各相での温度上昇は時間の経過と共に接近し飽和するがそれでも最高と最低では相間に於て約8°Cの温度差がある。

## 〔V〕 結 論

電源電圧の不均衡が三相誘導電動機の特性に及ぼす影響については尙広範囲の不均衡の状態について研究するを要し、鉄損及び力率等についてはまだ検討の余地が残されているが一応次のように結論できる。

電圧の不均衡が定格電圧附近で起り、然もその正相分の値が概ね定格値に等しい場合には

(1) 無負荷電流値は電圧不平衡率3%未満で既に数

10%の不均衡を生じうる。従つてこのような場合には電流値の不均衡はJISで定められた規格の対照とはならない。

(2) 無負荷損失、効率及び温度上昇は電圧不平衡率約6%を境としてこの率未満では大なる悪影響は現われないがこれ以上になると特性が悪化し、機種によつては実用上支障を来すものが出るようになる。

(3) 電圧不平衡率6%以上の場合に於ては、たとえ温度上昇に余裕のある電動機でも局部過熱などのために絶縁物の劣化が起つてくるので、この様な条件のもとで使用することは好ましくない。

(4) 概ね6%以下の電源電圧の不均衡率の場合には、電流値に著しい不平衡を生じて一般に実用上には何等支障はない。

## 参 考 文 献

- (1) 別宮：対称座標法解説
- (2) 電気学会：誘導機、交流整流子機
- (3) 高田：誘導電動機
- (4) 蓮見：オーム（昭11-3）
- (5) Lyon: Applications of the method of symmetrical components



特 許 第 194433 号

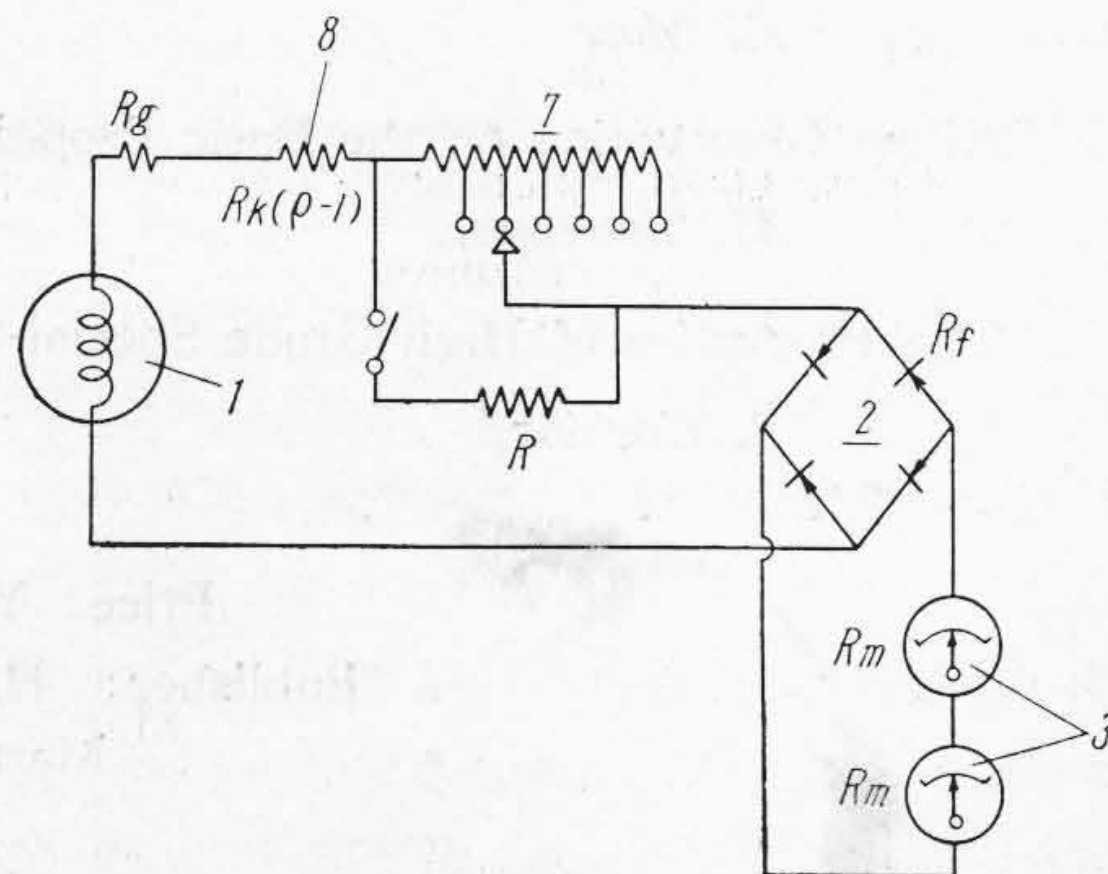
滝 貞 夫

## 異なる車輪径を有する車輛に共用し得る速度計装置

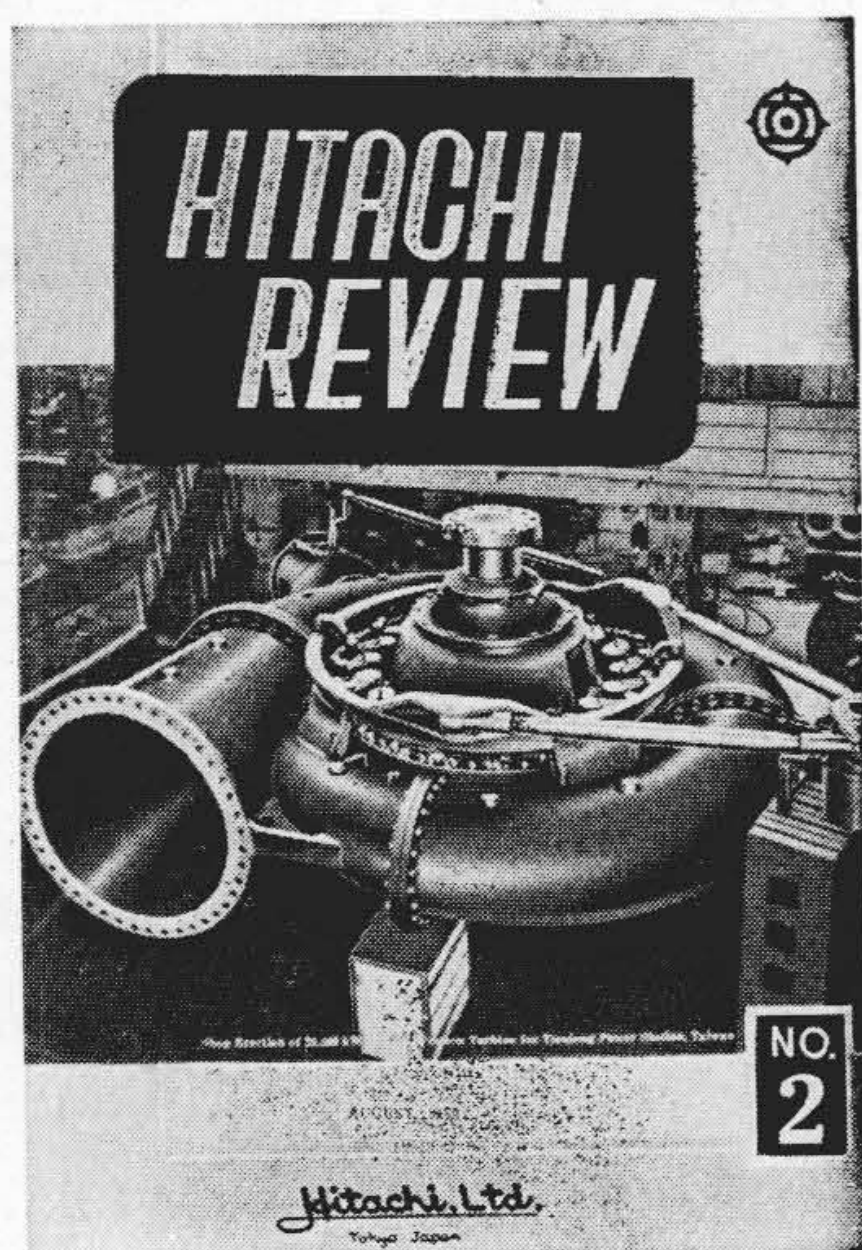
一般に車輛用速度計は、車輛の車輪軸に指速発電機を連繋せしめ発電機の発生電圧が車輪軸の回転数に比例することを利用して、これを電気計器を以て指示せしめて速度を計測する。従つて車輪径の異なる2車輛に於ては車輛速度は同一であつても軸の回転数は車輪径に反比例して異なるから、一方の車輛に適するように設計された速度計装置は他方の車輛にそのまま使用することはできない。このために指速発電機の電気回路に抵抗を挿脱し、両者の場合の抵抗が合致する如く調整する必要がある。又一つの車輛について考えると、車輪は使用中にその外周が次第に磨耗し径が小さくなつて行くものである。従つてこの車輪径の減少による指速発電機の電圧上昇を補償するため、発電機回路に補償抵抗を挿入する必要がある。

この発明は指速発電機(1)の電圧を整流器(2)を経て直流計器(3)を以て指示せしめるようにしたものに於て上記発電機と計器との間に可変補償抵抗(7)を接続し

これと並列に分流抵抗 $R$ を任意に挿脱できるように設けこの2つの並列回路に対して $R_k(\rho-1)$ 、(但し $\rho$ =車輪径の比、 $R_k=R_g+R_f+2R_m$ )なる値の直列抵抗 $\delta$ を接続せしめればよいことを理論的に誘導しこれによつて異なる車輪径の2車輛に共用し得る速度計の構造並びに取扱を簡単ならしめたものである。(田 中)







SUBSCRIBE TO  
**THE HITACHI REVIEW**  
 —ENGLISH EDITION—

One of the most reasonable ways to solve the serious and numerous problem that confront engineers everyday is to exchange their data and views with the researchers of the world. **The Hitachi Review** is planned and published to this end. The first number of the same was issued last January, and the second one is expected to be brought out of the end of July.

The following are the contents of the latter.

- 26,500 kW Francis Turbines and 28,500 kVA Generators for Tien Leng Power Station of the Formosa Electric Power Company .....  
*S. Fukasu, S. Takahashi, F. Saruwatari and S. Hiroyoshi*
- Charge Current Rupturing Characteristics of Contrarc Circuit Breakers.....  
*H. Maki and S. Morita*
- Characteristic Element of Recent Dry Valve Lightning Arresters.....  
*K. Ochi and K. Sugiyama*
- Permanent Magnet—Its Safety Factor and Durability .....  
*M. Tsujita*
- Characteristics, Testing Methods and Quality Control of Hitachi Incandescent Tungsten Lamps..  
*K. Miyagi and E. Taniguchi*
- The Improvement of Strowger Two Motion Switch .....  
*T. Watanabe and M. Kikuchi*
- Air Test of Gas Blowers.....  
*K. Suzuki*
- Study of the Asymmetry of Gear Tooth Profiles Caused by Hob Eccentricity.....  
*K. Morita*
- Improvements on Polyvinyle Formal Insulated Wires and Their Applications .....  
*K. Mase*
- AFew Observation on the Basic Properties of Insulating Varnishes.....  
*M. Tachimori*
- The Properties of High Grade Special Steel Derived from Magnetic Iron Sand .....  
*S. Koshiba*

Price: ¥200 a copy Postage: ¥40

Publisher: Hitachi Hyoron Sha, Hitachi, Ltd.  
 Marunouchi, Tokyo, Japan