U.D.C. 621.317.725.025.087.9：621.3.037.37

平均値電圧記録計の一考察

A Study of Average Voltage Recorder

笹間純也* 奥村武洋* 梅津広*
Junya Sasama Takehiro Okumura Hiroshi Umetsu

要　旨

電気事業法の改正に伴い電圧管理が強化されることになり，各電力会社において電圧管理を推進する方向にある。

今回，新しい原理に基づく平均値電圧記録計を開発した。本器は15分あるいは30分間の電圧平均値をディジタルに印字記録する記録計である。

本論文は平均値電圧記録計の動作原理および各部構成要素につき検討結果を取りまとめたものである。

1. 緒　　言

昭和39年7月11日公布の電気事業法第26条により一般電気事業者はその供給する電気の電圧および周波数を通商産業省令で定める値に維持し，その測定結果を記録しておかねばならなくなった。通商産業省令においては30分間の電圧平均値が一定範囲内にあるよう規定しているが，従来広く用いられているアナログ記録計から30分平均値を求めた場合，精度的に劣る難点がある。

今回，これらの要求に合致した新しい原理に基づくJRE形平均値電圧記録計を開発した。本器は15分または30分間の電圧平均値をディジタルに印字記録する記録計である。

以下本器の動作原理および各構成要素について検討した結果を報告する。

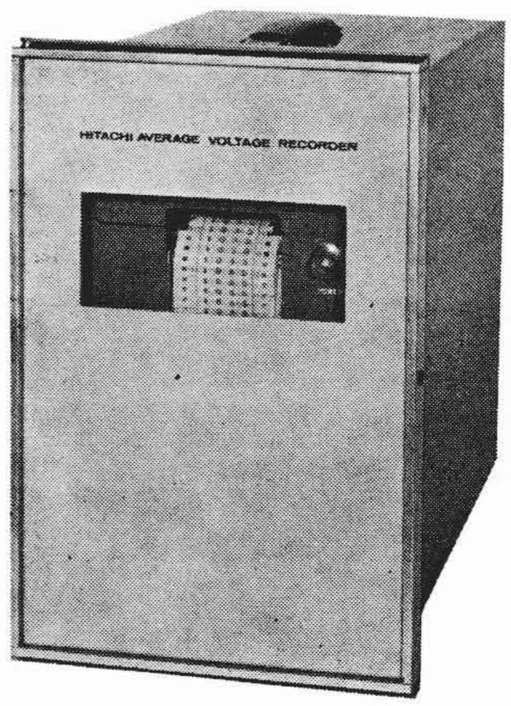

図1　JRE形平均値電圧記録計

2. 動　作　原　理

図2により動作原理を説明する。

交流測定電圧を入力回路で変圧整流して直流電圧に変換し，インピーダンス変換回路を通じてパルス発生回路に加え，入力電圧に比例したパルス周波数に変換する。このパルスをフリップフロップ回路により適当な周波数に低減して電磁カウンタを駆動させる。

一方，同期電動機，カム機構により構成される限時機構により一定時間 T_0（たとえば15分あるいは30分）経過するとハンマ，カム機構により構成される印字機構が働き電磁カウンタの数字を記録紙上に打刻印字し，その後直ちにゼロ払いを行ない再びカウントするよう構成する。

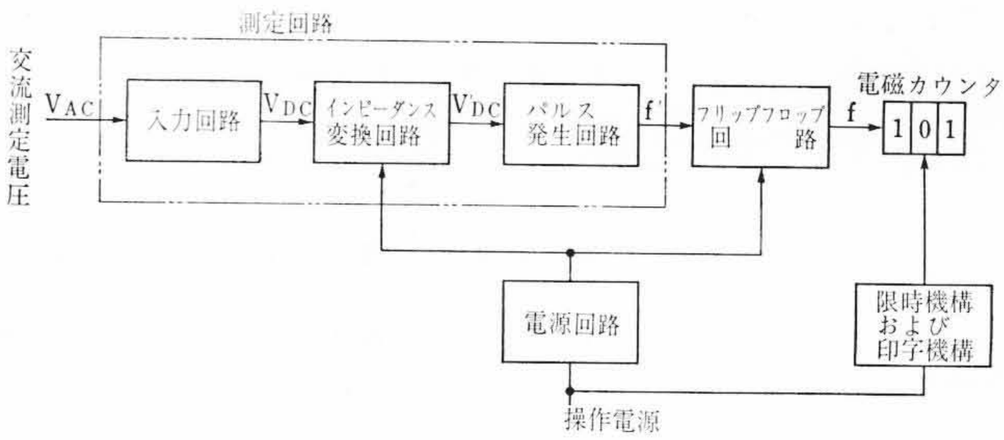

図2　動　作　原　理

いま入力回路中の整流器の順方向電圧降下およびインピーダンス変換回路としてのエミッタホロワのエミッタベース間電圧降下などを無視すると最終段の出力周波数 f は交流測定電圧 V_{AC} に比例する。

$$f=kV_{AC} \quad \cdots\cdots(1)$$

（1）式を0から T_0 分まで積分すると

$$\int_0^{T_0} f\,dt=K\int_0^{T_0} V_{AC}\,dt \quad \cdots\cdots(2)$$

$K=1/T_0$ なるよう K を定めておけば電磁カウンタの T_0 分時における表示値は（2）式に等しいから

T_0 分時における電磁カウンタの表示値 $=\int_0^{T_0} f\,dt$

$$=1/T_0\int_0^{T_0} V_{AC}\,dt \quad \cdots\cdots(3)$$

となり，この表示値を打刻印字すれば T_0 分間の電圧平均値が印字記録される。

3. 測　定　回　路

3.1 入　力　回　路

入力トランスは巻線抵抗の温度係数が0.38%/degもあるので温度誤差を低減するため二次換算抵抗を小さく，二次電圧を高くするよう設計し，ブリッジ全波整流方式とした。したがってトランスによる温度誤差と整流器による温度誤差が互いに打ち消し合って−0.1%となるよう決定した。

3.2 インピーダンス変換回路

インピーダンス変換回路としてエミッタホロワを用いるとトランジスタの Veb（ベース，エミッタ間電圧）の温度影響をもろに受け，この誤差が本器の場合0.6～1.0%にもなるので，この対策として図3のようにNPNとPNPのトランジスタを用い温度影響を互いに打ち消すようにしている。

* 日立製作所那珂工場

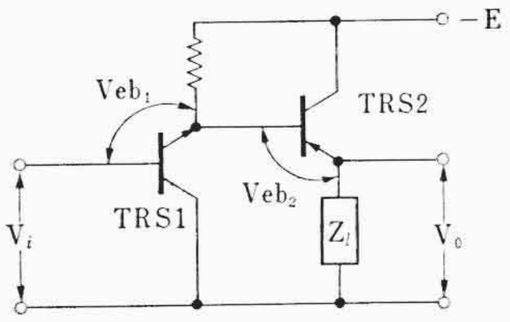

図3　インピーダンス変換回路

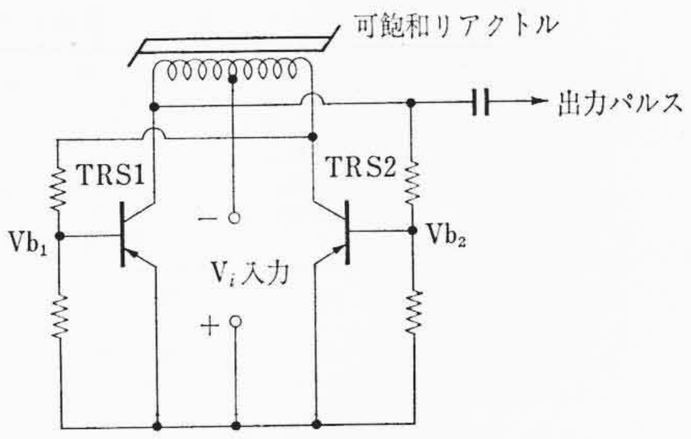

図4　パルス発生回路

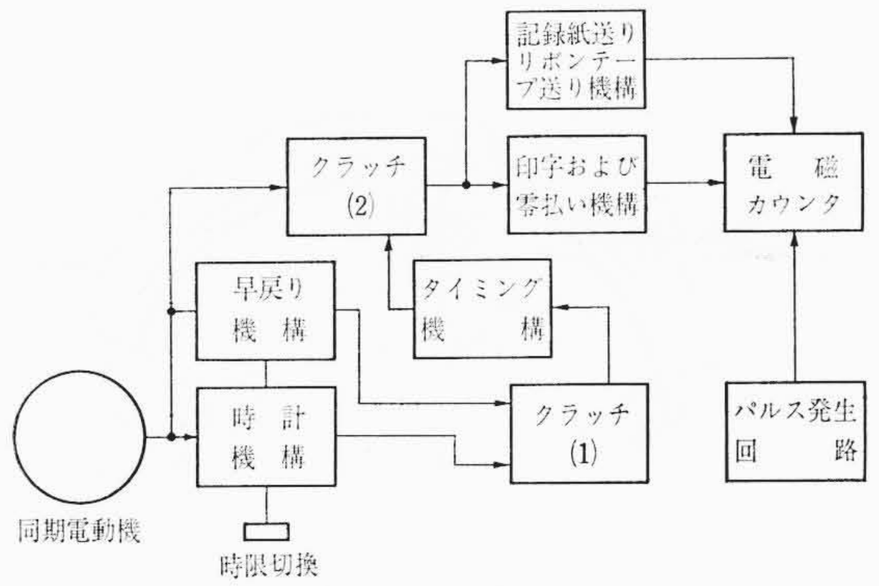

図6　機構部動作原理

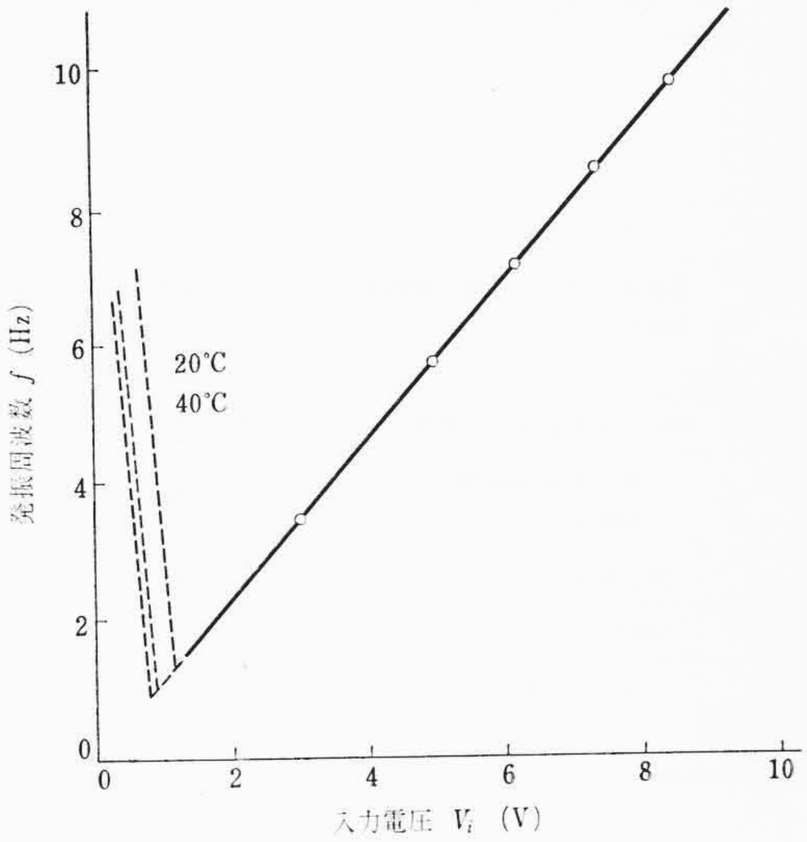

図5　発　振　特　性

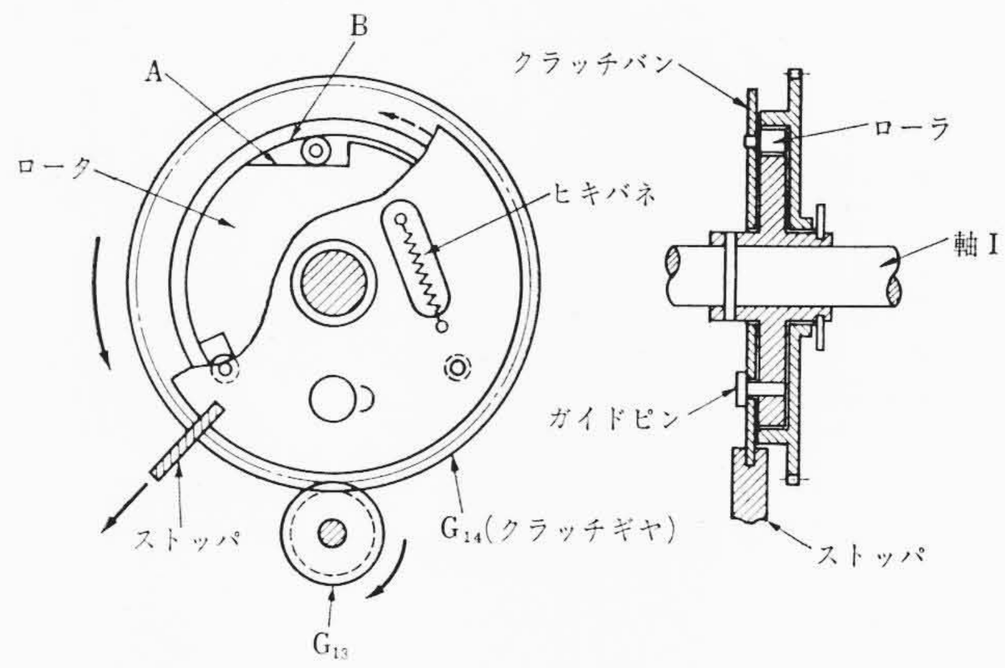

図7　クラッチ機構

この場合の入出力関係は近似的に

$$V_0 \fallingdotseq Vi + Veb_1 - Veb_2 \quad \cdots\cdots(4)$$

となる。

トランジスタの Veb の温度変化は種類に関係なく 2～3 mV/℃ で一定である[1]から(4)式の Veb_1 と Veb_2 は互いに打ち消し合ってほとんど問題にならなくなる。

3.3　パルス発生回路

パルス発生回路としては図4に示すような磁気マルチ発振回路を使用する。この回路は過去多くの研究がなされ，テレメータ[2]，流量積算計[3]など広く用いられている。変換回路については種々検討すべき点もあるが，すでに種々報告されているので詳細はほかの文献にゆずり，本稿ではこの変換方式が入力電圧の平均値によって発振するのでフリッカーなどの影響を受けず有利であることを示すのみにとどめる。

トランジスタ磁気マルチ回路が発振している場合には

$$Vi = N d\phi/dt \quad \cdots\cdots(5)$$

が成立し，磁束 Φ が飽和状態から反対方向の飽和に達すると導通状態が反転し，この変化に要する時間が半周期となる。

よって(5)式を $-\Phi$m から $+\Phi$m まで積分すれば

$$\int_0^{T/2} Vi\,dt = N\int_{-\Phi m}^{+\Phi m} d\phi = 2N\Phi m \quad \cdots\cdots(6)$$

となる。ゆえに出力周波数 f は

$$f = 1/T = \frac{1}{4N\Phi m} \times \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} Vi\,dt \quad \cdots\cdots(7)$$

となり，出力周波数は入力電圧の平均値に比例し，リップル，フリッカーなどの影響を受けず，平均値電圧を求める本器への利用には有利である。

4. 機　構　部

4.1　機構部動作原理

図6により説明する。

図2の周波数低減回路よりの出力パルスを電磁カウンタにより計量する。

一方，同期電動機の回転出力は時計機構によりある一定の規定時間 T_0 でクラッチ(1)が1回転するよう制御される。次にクラッチ(1)が1回転するとタイミング機構が動作してクラッチ(2)がはいる。クラッチ(2)が働くと電磁カウンタへの入力パルスはしゃ断され，電磁カウンタの計量値を印字機構により記録紙上に打刻，印字記録するとともにゼロ払いを行ない記録紙を1ステップ送り，印字用リボンテープが1ステップ送られ，一巡動作を完了する。

タイミング機構はある一定時間ごとにクラッチ(2)を動作させて常に時限を一定に保つ必要がある。もし測定開始時においてタイミング機構の位置が狂っていると最初の一周期の測定値は意味がなくなる。それゆえ最初にタイミング機構の位置を規正する必要がある。もしタイミング機構が適正位置になければ自動的に早戻り機構が動いてタイミング機構を適正位置に戻す。

4.2　クラッチ機構

クラッチ機構には種々の方式があるが，本記録計においてはローラクラッチ方式を採用した。使用条件としてはクラッチがはいると同時にギヤ G_{13} からの回転は軸 I に伝達される。クラッチ動作はクラッチ板のみぞにストッパーがはいっているときはクラッチ板に取り付けてあるローラが時計方向に移動し，ロータの接触面 A 面および ギヤ G_{14} の接触面 B 面よりローラのかみ合いがはずれるためギヤ G_{13} から G_{14} への回転は軸 I の回りを空転する。

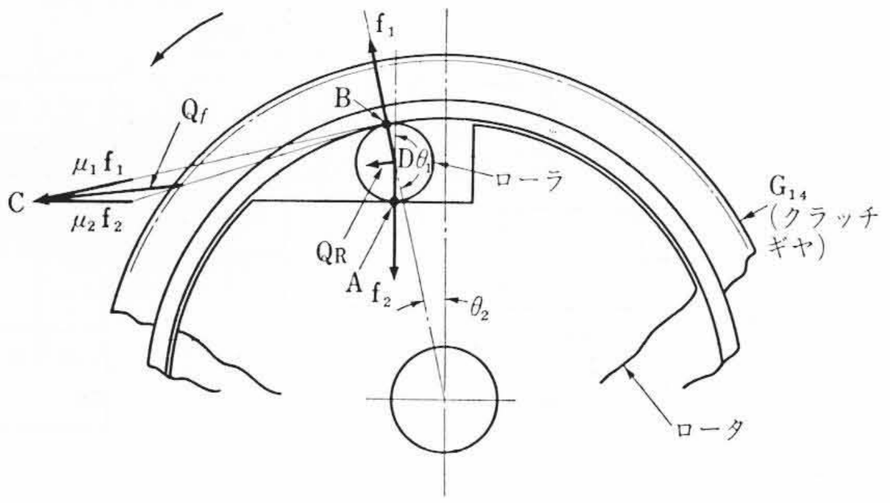

図8　クラッチのローラの力関係図

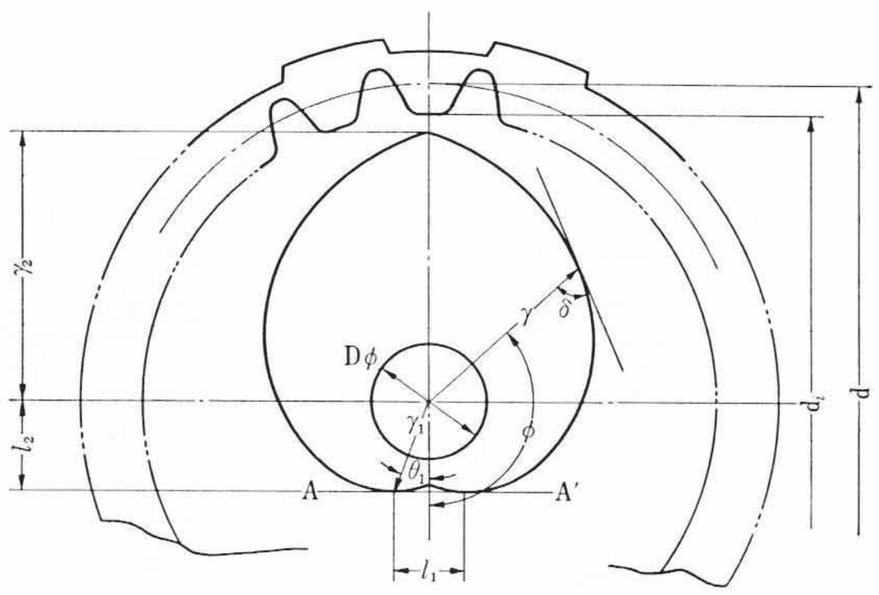

図9　印字用文字車構造図

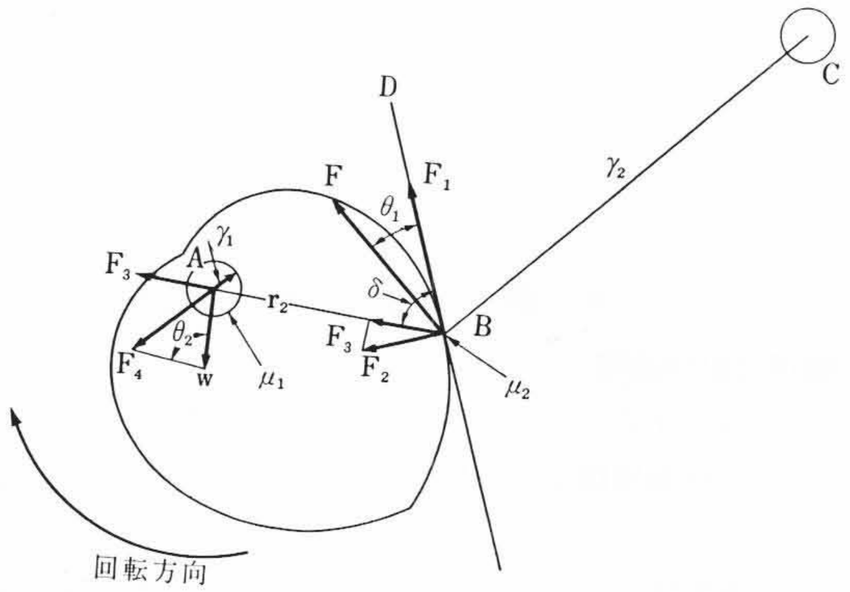

図10　ハートカムの力の関係図

いまストッパがクラッチ板のみぞよりはずれると引きバネによりクラッチ板に取り付けてあるローラが反時計方向に瞬間的に移動し，ロータの接触面A面およびギヤG_{14}の接触面B面にかみ合い，ギヤG_{13}の回転はギヤG_{14}からローラを介してロータに伝達され，軸Iは回転し始める。またクラッチが回転してストッパがみぞにはいると前述と逆の動作が行なわれ，ギヤG_{14}から軸Iへの回転はしゃ断される。

次にロータとローラのかみ合角度につき検討する。

図8においてギヤG_{14}，ローラおよびロータを同一材料とすればギヤG_{14}とローラ間，ローラとロータ間の摩擦係数は等しく，これをμとおいてローラ軸受の摩擦損失を無視すると，摩擦力$\mu_1 f_1$と$\mu_2 f_2$は等しく

$$\mu_1 f_1=\mu_2 f_2=\mu f \quad \cdots\cdots(8)$$

摩擦力の合力Q_fは

$$Q_f=\sqrt{2(\mu f)^2-2(\mu f)^2\cos\theta_1}=\sqrt{2}\ \mu f\sqrt{1-\cos\theta_1} \quad \cdots(9)$$

またμfを生じさせるために$f(=f_1=f_2)$なる力が加わり，この場合Q_Rは

$$Q_R=\sqrt{2}\ f\sqrt{1+\cos\theta_1} \quad \cdots\cdots(10)$$

表1　標準仕様および試験結果

項　目	標　準　仕　様	試　験　結　果
操作電源	AC 100 V	
測定電圧範囲	AC 80～120 V	
周波数	50 または 60 Hz	
測定方式	整流式	
駆動方式	同期電動機	
記録方式	4けたディジタル印字 ただし最小けたの数値0.5Vで1カウント	
記録紙	折畳式　幅 5.5 mm 長さ 15 分印字で1個月/巻	
記録紙送り	ステップ式　5.8 mm/1 ステップ	
時限	15 分および 30 分切換え	
許容誤差	100Vの ±0.5%±1 カウント	OK
使用温度範囲	0～40℃	
温度影響	20℃±20℃ にて ±1% 以下	20℃±20℃にて±0.3%以下
波形影響	基本波の 15% の第3高調波を含む電気を加えた場合 ±5% 以下	基本波の 15%の第3高調波を含む電気を加えた場合 ±2% 以下
磁界影響	50 e の磁界を加えた場合 ±1% 以下	影響なし
耐振動性	16.7 c/s 複振幅　1 mm 振動を加え ±1% 以下	異常なし
耐衝撃性	20 g 衝撃を2回加え ±1% 以下	異常なし
絶縁抵抗	500 V メガーにて 100 MΩ 以上	OK
絶縁耐力	AC 1,500 V　1 分間	OK
重量	約 11.5 kg	

よってギヤG_{14}を回転した場合ギヤG_{14}とローラがスリップしないで同時に回転する条件として

$$Q_f \geq Q_R \quad \cdots\cdots(11)$$

であればよい。一方

$$\theta_1=180^\circ-\theta_2 \quad \cdots\cdots(12)$$

であるから，結局

$$\cos\theta_2 \geq \frac{1-\mu^2}{1+\mu^2} \quad \cdots\cdots(13)$$

4.3　ゼロ払い機構

ゼロ払い機構は一定時間内に電磁カウンタにより計量された計量値を印字記録した後，計量値をゼロ払いするものである。ゼロ払いの方式としては種々あるが，本器ではハートカム方式を採用した。

ハートカムの形状および印字用文字車のゼロ払いに要するトルクにつき検討する。

ハートカムの形状は一般に次式で与えられる。

$$\gamma=C\theta^{k\phi} \quad \cdots\cdots(14)$$

C, kはハートカムの形状，寸法により定まる定数で次のようにして求められる。ϕ_1においてγ_1，ϕ_2においてγ_2と2個所の寸法が規定されれば，

$$\gamma_2/\gamma_1=\theta^{k(\phi_2-\phi_1)} \quad \cdots\cdots(15)$$

なる式が成立し，次式によりkが求められる。

$$k=\frac{1}{\phi_2-\phi_1}\times\log\gamma_2/\gamma_1 \quad \cdots\cdots(16)$$

Cはkが求まれば(14)式より求められる。

次にハートカムを回すのに必要なトルクを検討する。

ハートカムにゼロ払いレバーにて力を加えた場合のベクトル図は図10のようになる。

図10において$\mu_1=\mu_2=\mu$とすると，ハートカムを回そうとするモーメントM_F，B点の負荷モーメントM_{f1}，およびA点の負荷モーメントM_{f2}はそれぞれ

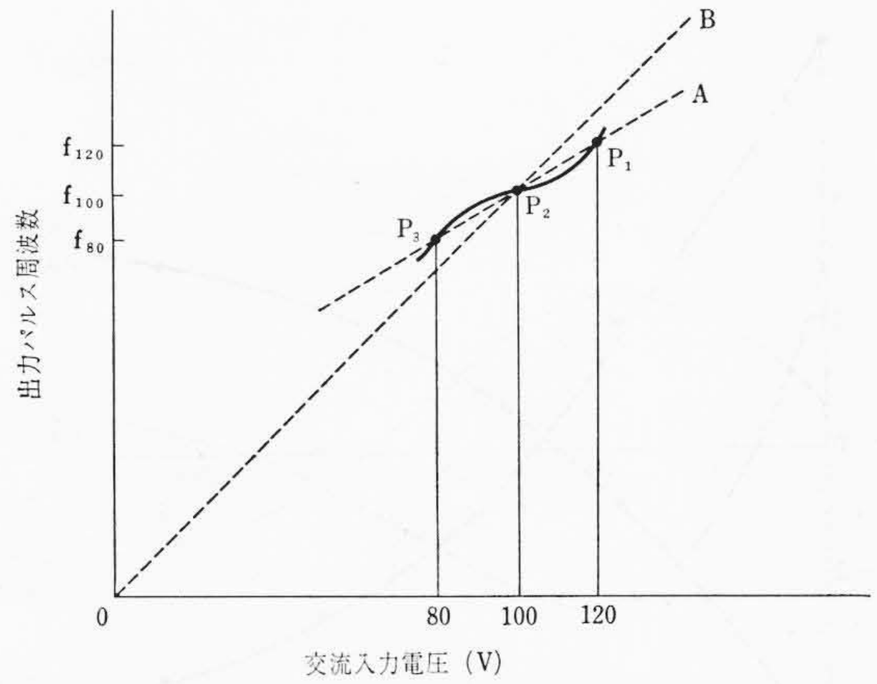

図 11　交流入力電圧対出力周波数関係図

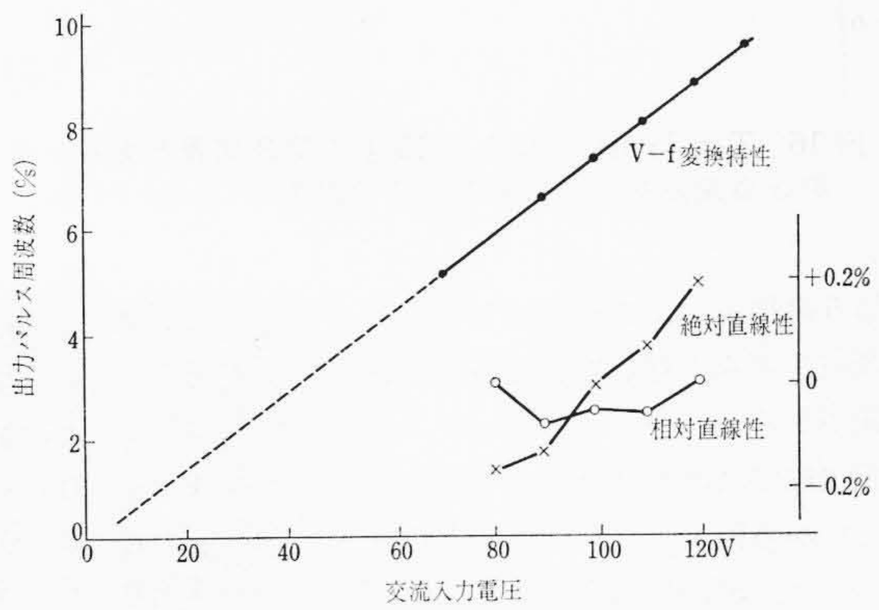

図 12　交流入力電圧対出力周波数特性

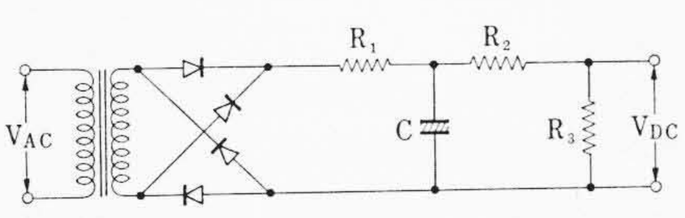

図 13　整　流　回　路

$$M_F = F\gamma_2 \sin\theta_1 \cos\delta \quad \cdots\cdots (17)$$

$$M_{f1} = \mu F\gamma_2 \sin\theta_1 \sin\delta \quad \cdots\cdots (18)$$

$$M_{f2} = \mu\gamma_1\sqrt{(F\sin\theta_1\sin\delta)^2 + W^2 - 2FW\sin\theta_1\sin\delta\cos\theta_2} \quad \cdots\cdots (19)$$

となる。ハートカムを回すためには

$$M_F \geq M_f = M_{f1} + M_{f2} \quad \cdots\cdots (20)$$

$$F \geq \frac{W\mu\gamma_1{}^2\sin\delta\cos\theta_2}{\sin\theta_1\{\mu^2\sin\delta(\gamma_1{}^2-\gamma_2{}^2)-\gamma_2{}^2(\cos^2\delta-\mu\sin 2\delta)\}} - \frac{\mu\gamma_1 W\sqrt{\sin\delta(\cos^2\theta_2-\mu^2\gamma_1{}^2)+\gamma^2(\cos^2\delta+\mu^2\sin^2\delta-\mu\sin 2\delta)}}{\sin\theta_1\{\mu^2\sin\delta(\gamma_1{}^2-\gamma_2{}^2)-\gamma_2{}^2(\cos^2\delta-\mu\sin 2\delta)\}} \quad \cdots\cdots (21)$$

でなければならない。

(21)式において δ はハートカムの形状が(14)式で与えられると

$$\delta = tan^{-1}\,1/k$$

で常に一定となる。

5. 特 性 の 検 討

表 1 に本器の標準仕様および試験結果を示す。

5.1 直　線　性

誤差にはディジタル計器であるがゆえに生ずる本質的な 1 パルスの誤差と直線性による誤差とに区別される。ここでは測定結果に基づいて直線性誤差を検討する。

表 2　測定回路全体の温度特性（20℃ 基準）

温度＼入力電圧	80 V	100 V	120 V
0℃	−0.16%	−0.15%	−0.15%
40℃	−0.3%	+0.1%	+0.15%

表 3　入力回路の温度特性(20℃ 基準)

温度＼入力電圧	80 V	100 V	120 V
0℃	−0.16%	+0.02%	+0.1%
40℃	−0.15%	−0.2%	−0.2%

表 4　パルス発生回路の温度特性（20℃ 基準）

温度＼入力電圧	80 V	100 V	120 V
0℃	−0.08%	−0.31%	−0.43%
40℃	0	+0.14%	+0.14%

図 11 において測定範囲 80～120 V で実線のような結果が得られたとすると 80 V，120 V に対応する点 P_1, P_3 を結んで得られる直線 A と実曲線との差を相対直線性，中心の 100 V に対応する点 P_2 と原点を結んで得られる直線 B と実曲線との差を絶対直線性と呼び両者を区別する。

相対直線性は測定範囲 80～120 V がパルス発生回路の狭い部分に相当するから問題にするほど大きくないことは図 12 の測定結果からもわかる。相対直線性が 0.1% 以内であるのに対し，絶対直線性は 100 V を中心にして直線的に悪くなっている。これは図 11 の直線 A が原点を通らないからで，これは定電圧回路により逆バイアスをかけ補償できる。

本器は積分値を求めるのであるから絶対直線性が問題であり，これは前述のように初期調整によりじゅうぶん低減できる。

5.2 温　度　特　性

入力トランス，整流器，インピーダンス変換回路およびパルス発生回路はそれぞれ温度特性を有し互いに打ち消し合うものもある。打ち消し合うのをうまく利用すれば温度補償ができるが，それぞれのばらつきを考えると製品ごとに調整することにもなりかねないので個々に温度影響を押える必要がある。

測定回路全体としての温度特性は表 2 に，入力回路およびパルス発生回路単独の温度特性は表 3，表 4 に示すとおりである。

以上の結果を見るに，インピーダンス変換回路としての改良形エミッタホロワ回路の温度補償回路はじゅうぶん効果が上がっていることがわかる。

入力回路の温度特性は 3.1 にて ±0.1%/20℃ 程度と予想されたが，表 3 の結果をみると 0.2% 以下にはいっており目的は達せられている。

パルス発生回路は表 4 に示すように非常に良好な温度特性結果が得られている。(7)式よりパルス発生回路の出力周波数は磁心の飽和磁束の温度影響を受けるが，本器に使用したコアは −0.05%/deg 程度の温度影響を受けるから出力周波数としては 20℃ 変化に対して +1% の温度影響を受けることになる。

一方，可飽和リアクトルの巻線抵抗も温度によって変化し，入力電流も温度に影響される。

この両者によって

$$-(R\,\Delta I_{in} + I_{in}\,\Delta R) = \Delta V$$

R：巻線抵抗　　I_{in}：入力電流

ΔI_{in}：入力電流変化分　　ΔR：巻線抵抗変化分

の温度影響を受ける。

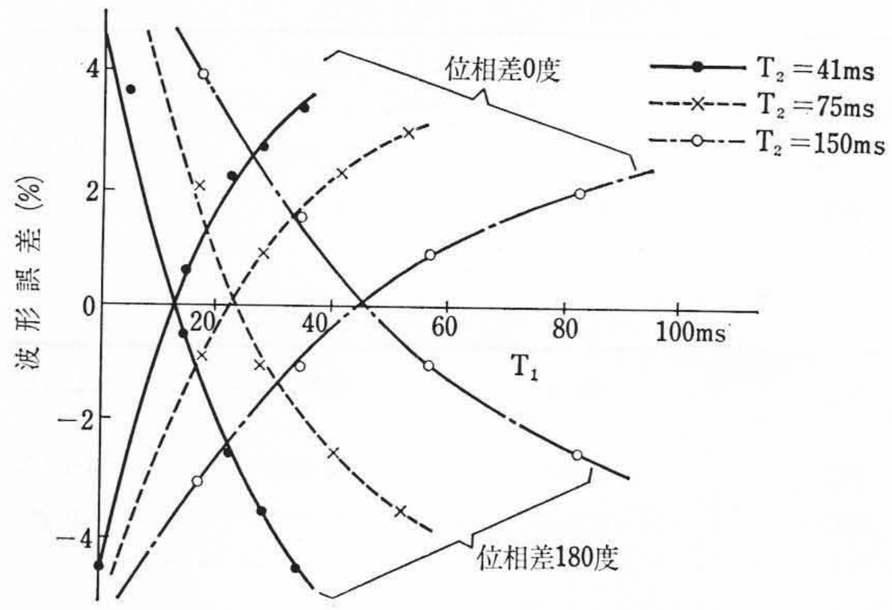

図14　15%の第3高調波を含んだひずみ波による波形影響

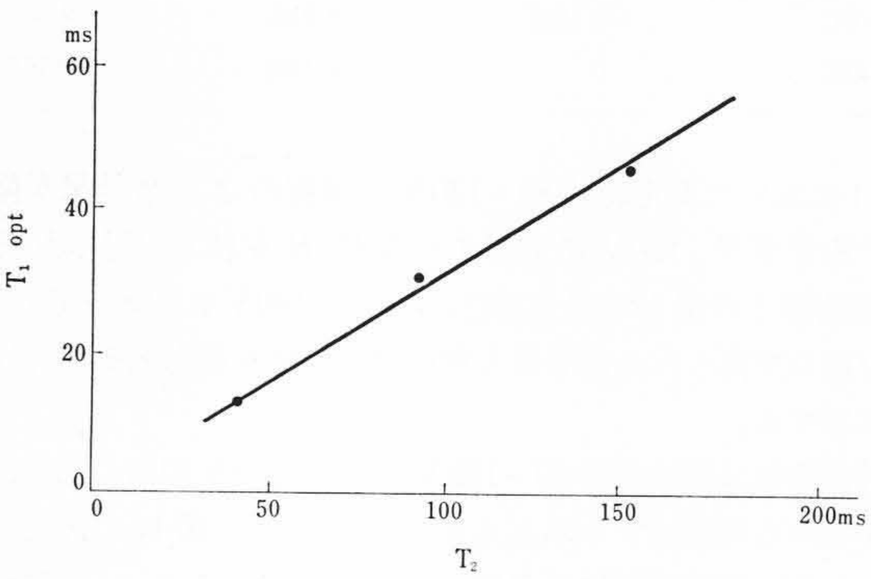

図15　T_2 と $T_{1\,opt}$ の関係

これと飽和磁束の温度影響とが打ち消し合い好結果を得ている。

5.3 波形影響

図13のように測定回路は交流入力を整流して直流電圧に変換しているため直接波形影響を受ける。

送配電線の電圧波形は一般にひずんでおり，大きいときにはひずみ率5%以上にも達する。特に夜間などは大きく問題となる。

波形影響については整流形計器の場合規定がないので可動鉄片形計器の規定に準じ15%の第3高調波を含むひずみ波に対し影響を検討する。

図13の整流回路において任意の C の値に対し，R_1, $R_2'(R_2+R_3)$ を適当に選ぶと波形影響を改善できることが実験的に確かめられる。

いま充電時定数 $T_1=R_1//R_2'\times C(R_2'=R_2+R_3)$，放電時定数 $T_2=R_2'C$ とし T_2 を一定にして R_1 を変えて T_1 を変化させ，基本波の15%の第3高調波を含むひずみ波を印加し，T_1 と T_2 の関係を調べると図14のような結果が得られる。

この結果を要約すると

（1）　位相差0°の場合には T_1 を大きくすると誤差は正方向より減少しゼロ線を横切って負方向に増加する。

（2）　位相差180°の場合には全く反対に負方向よりゼロ線を横切って正方向に増加する。

（3）　位相差の異なる二つの誤差曲線はゼロ線付近で交さする。このときの時定数を $T_{1\,opt}$ とすれば $T_{1\,opt}$ と T_2 の間には図15のような関係がある。

（4）　$T_1=0$ では T_2 が小さいほど誤差は小さいが，誤差幅を一定にした場合には T_2 が大きいほど誤差幅に対応する $T_{1\,opt}$ の両側の幅が大きい。

以上のように T_1, T_2 を適当に選べば第3高調波を含むひずみ波に対してその影響を改善するのに非常に効果があるが，これがそのまま第5高調波およびそれ以上の高次の高調波ひずみに対して有効かどうかは問題である。

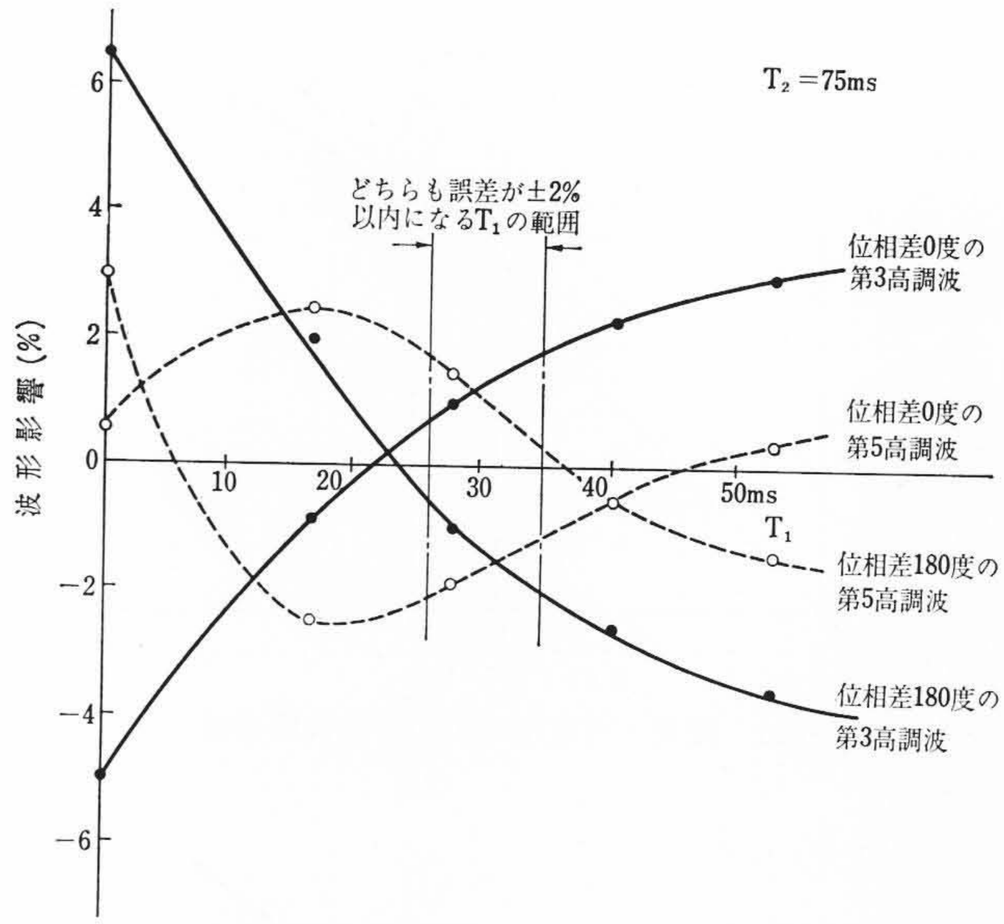

図16　T_2=75 ms の場合の15%の第3高調波あるいは第5高調波を含むひずみ形波の影響

送配電線では第5高調波まで考慮すればよいから図14の T_2=75 ms の場合について15%の第5高調波を含むひずみ波を加えて測定した。この結果を第3高調波の場合と比較して示したのが図16である。

図より波形影響が最小になる T_1 の値は第3高調波と第5高調波とでは異なる。それゆえ最適 T_1 を決めるにはこの点を考慮せねばならない。

第3高調波のみを考えれば $T_{1\,opt}$=23 ms となるが，第5高調波を考慮すると波形影響としてはある幅を考えねばならない。いまこの幅を2%にとると $T_{1\,opt}$=26～35 ms となる。

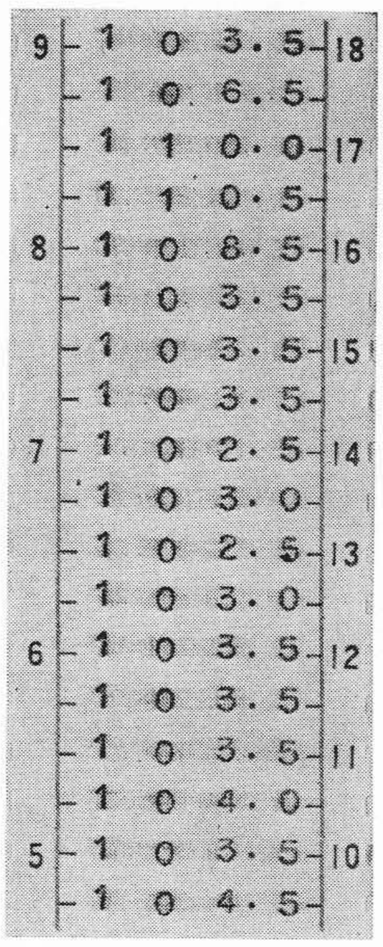

図17　記　録　例

6. 結　　言

以上の検討結果に基づき製作されたJRE形平均値電圧記録計による測定結果の例を示すと図17のようになる。

上述のように，本器は15分あるいは30分間の電圧平均値を直接ディジタルに印字記録することができ，従来広く用いられてきたアナログの電圧記録から求める電圧平均値に対し数段よい精度を得るばかりでなく，直接ディジタル印字記録されているのでデータ整理に非常に有効である。したがって今後さらに広く活用されるものと期待される。

終わりに臨み，本器の開発にあたり種々ご助言いただいた北海道電力株式会社，中部電力株式会社，九州電力株式会社の各位に対し深甚なる謝意を表する次第である。

参　考　文　献

（1）　戸室晃一：　トランジスタ直流増幅器　69（昭41産報）
（2）　笹間純也ほか：　日立評論　43, 420（昭36-3）
（3）　菅原　徹ほか：　日立評論　50, 781（昭43-9）