

インバータによる籠形3相誘導電動機の運転について

岡 本 弘 ・ 桶 葭 治 彦

Operations of Squirrel Cage Type Three Phase Induction Motor by Several Type of Inverters (especialy V.V.V.F.)

Hiromu OKAMOTO, & Haruhiko OKEYOSHI

For the purpose of the various types of the industrial utility, three phase multistage inverters and P.W.M. (pulse width modulated) inverters have been utilized as an electric energy source, in order to drive the squirrel cage type three phase induction motors. At the field test of actual sets of the inverters and the induction motor, on the case of a group driving of a turbo-blower-fan systems, the enormous large currents or starting noise are generated at a few times. To clarify such the abnormal phenomena, as a fundamental steps of researches, the authors fulfilled several measurements of A.C. input, mechanical transfered power (synchronous watts), D.C. output, and the efficiency by the aids of a dynamic strain meter, and tried to observe the waveforms and contents of higher harmonics amounts of voltages and currents by a synchroscope and higher harmonics monitoring meter. The authors have experienced some new discoveries of predominated higher harmonics and features of simulated waveforms of voltages and currents, by the use of NEC -5200 model-5 personal computer. Tendencies of torque versus frequency variations are clarified by a dynamic strain meter and a quick high recoder connected to a 0.5 (kg-m) torque-transferring meter.

1. 緒 言

筆者は京都工芸繊維大学において、単相マクマレー方式インバータと3相用PWM(パルス幅制御)インバータの回路解析を長年探求していたが、パワーエレクトロニクス技術の進歩につれて、V.V.V.F.(可変電圧可変周波数変換装置)に収納されたPWMインバータを電源として、誘導電動機を異った周波数で運転して、周波数変化に伴なう広範囲の速度制御があらたに開発されて来たのであるが、昭和57~58年の頃在職した(株)三社電機製作所において、当時V.V.V.F.の大容量化、適用負荷系統の大型化に伴ない、工場納入後の実地使用時に未経験の現象に遭遇して、インバータ誘導電動機の系として、起動時の大電流・騒音の原因を探り、その対策を求める緊急課題⁽¹⁾が必要とされた。この現象の原因、対策を確立するため、研究室規模で施行に好適なるSVVM-5型

V.V.V.F. 1台を同社から本学へ赴任と同時に提供を受けた。昭和59年の卒研は電機器実験室の2 HPの誘導電動機を供試機として行なったが、独立の電動発電機を必要とした。そこで昭和60年春、V.V.V.F. と組合わすべき750[W] 3相籠形誘導電動機1台を実験室から受け、これに新たに購入したTMB-0.5型トルク変換器(抵抗線歪計ブリッジ内蔵)と400[W]直流発電機(神鋼電機製)とを直結してベッド上に搭載したものをアルファ計装(株)に発注して、大阪の第壹電機工業(株)にて組立てられ、立会試験の後、同年9月本学に納入され、(北伸計測担当)これに車輪付き木材枠をつけて可搬形として研究に用いて5年目を経過した。昭和61年3月結果を速報⁽²⁾ したこともある。上記の電動発電機と同時に購入したものに、トルク変換器出力電圧を引出す動歪測定器(ミネルヴァ製)とQuick hicorder (ペンレコーダー・放電打点記録式、日置電機製)とがあり、昭和62年からHW-1000型高調波監視計器(デジタル式、日新電機製)、検相器(音羽電機製)、平成元年度からLCR ユニバーサルブリッジ(横河ヒューレットパカード製)、SS 7405型シンクロスコープ(岩崎通信機製)が逐次研究用計測器として寄与している。昭和59年設置のNEC 5200モデル05型パソコン(日本電気製)は終始シュミレーション用に活用した。

問題提起の源泉である(株)三社電機製作所で既往実測から徴するの、インバータ・電動機間の回路に付けるフィルタ用コンデンサの容量値と電動機2次側周波数 f_2 とのある組合わせの範囲で不安定な共振現象を生ずる研究例を基礎として、設置前の予備調査を厳しく行なった結果、その後異常現象は発生せず又受注品の傾向がV.V.V.F. からU.P.S. (無停電電源装置)へと移行したので緊急性は低減したが本学では基礎研究の立場から、この系の運転特性を考慮し測定法に習熟したので、ここに一括して報告する次第である。今迄の結果を概観すると極端な過負荷でないため、異常現象は捕捉できていないが、負荷の不均衡を生ずる素子、器具およびボラロイドカメラ、フード、アダプタの如き観測用補助器具の充実、振動計、騒音計、軸電圧測定などを行なって、測定効率、研究範囲の拡張をも考える必要がある。

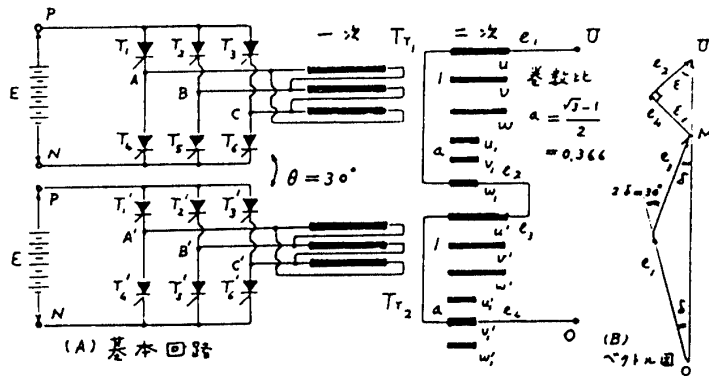
2. インバータ駆動の誘導電動機の理論

2.1 動作領域の拡張(多周波数下での運転)

最近十余年間に亘るパワーエレクトロニクスの勃興に伴い、従来誘導電動機を60又は50[Hz]という単一周波数で動作させ、性能を論じていた時代は去って、V.V.V.F. の特徴たる周波数可変性を電動機に適用して、速度制御と省エネルギー効果を迅速適確に行なうことが可能となった。従来の定速度運転を脱却して変速度運転の領域へ飛躍することとなった。入出力値やトルクの特性を考えるのに60又は50[Hz]の下での同期速度 $N_0 = 120f_0/p$ を基準としたすべり $S = 1 - (N/N_0)$ の変化を考えればよかったが、今後は印加周波数 f' が基準周波数 f_0 の何%かという周波数指数 $a = f'/f_0$ を考える必要が生じたのである。

2.2 3相多重インバータによる等間隔異振幅矩形波電圧パルス列の場合

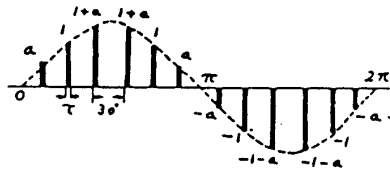
3相多重インバータのうち、最も広く用いられる3相4段多重インバータ⁽³⁾ を第1図に示



第1図 3相4段多重インバータの主要回路と電圧ベクトル図

し、このうち[A]は基本回路と変圧器二次側OU間の電圧ベクトル図を表わす。インバータ用変圧器の上下両変圧器の一次側は $\theta = 30^\circ$ の位相差が設けてあり、一次側はデルタ結線、二次側のU相はジグザグ星形で $u-w-u'-v'$ 相を通して、 e_1, e_2, e_3, e_4 のベクトル和OUを発生する。この場合二次側の巻線2組の巻数比を

$$a = \frac{\sqrt{3}-1}{2} = 0.366$$



第2図 幅 8° 、間隔 30° の矩形波電圧

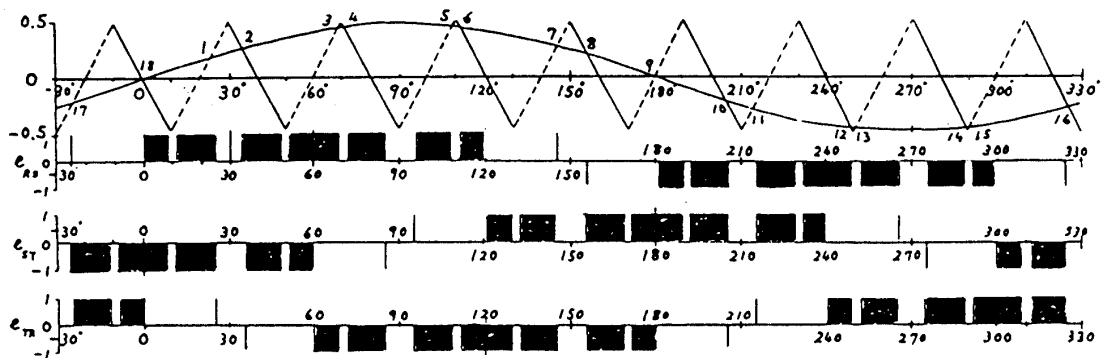
に選んでおく。制御角 $\alpha = 52^\circ$ の矩形波電圧が各相で加減されて、二次側OU間には、パルス幅 $\tau = 60^\circ - \alpha = 8^\circ$ で、パルス間隔 30° の6対の異振幅の矩形波パルス電圧が現れ、振幅の大中小の比は $(1+a):1:a$ の割合となっている。もとの電圧の正弦波の半波に対して現れる6個のパルス列

は第2図の如き正負の交替を以て現れるので、6個のパルスを一括してラプラス変換し⁽⁴⁾ p関数表示すると次式となる。

$$E(p) = \frac{E}{P} \times \frac{(1 - \epsilon^{-\tau p}) \{ a \epsilon^{-\alpha p} + 1.0 \cdot \epsilon^{-\frac{\pi}{6\omega} p} + (1+a) \epsilon^{-\frac{2\pi}{6\omega} p} + (1+\alpha) \epsilon^{-\frac{3\pi}{6\omega} p} + 1 \cdot \epsilon^{-\frac{4\pi}{6\omega} p} + a \epsilon^{-\frac{5\pi}{6\omega} p} \}}{(1 + \epsilon^{-\frac{\pi}{\omega} p})} \quad (1)$$

(1)式で E/P は中位の振幅の矩形波の大きさ、分数式の分子の $(1 - \epsilon^{-\tau p})$ はパルス幅 τ の矩形波を表わし、 $\{ \}$ の中の6項は6つの高さの異なる等間隔波を意味する。分母の $(1 + \epsilon^{-\frac{\pi}{\omega} p})$ は半周期ごとにこの6つのパルスの1群が正負交替して現れることを意味する。後述の電流応答を求めるラプラス逆変換に対して有効である。

2.3 P.W.M. 方式による等振幅、パルス幅・休止区間幅の不等な電圧パルス列の場合



第3図 PWM電圧波形の生成過程 上1列は振幅0.5の正弦波電圧と9個の三角波搬送波、下3列は線間電圧 e_{RS} e_{ST} e_{TR} の波形

第3図はインバータ出力を正弦波と仮定してその1周期(1波長)の間に、3角波搬送波が9個ある場合をモデルとして、PWM波形の生成を説明すると、正弦波形電圧波を3つの3相電圧に選び、

$$l_R = 0.5E \sin \omega t, \quad l_S = 0.5E \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right), \quad l_T = 0.5E \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \quad (2)$$

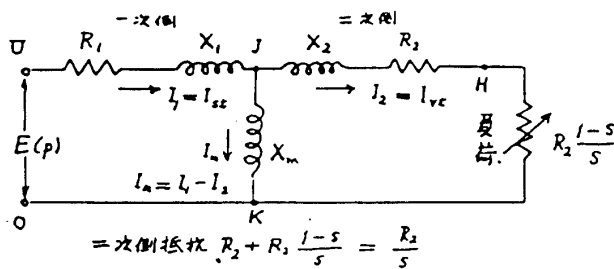
とする。第3図ではその内の一つ l_R を採り、この一波長に三角波搬送波が9個入る場合に、説明の便宜上、 $E = 200 / \sqrt{3} = 115.5(\text{V})$, $0.5E = 57.8(\text{V})$ としておく。三角波の上り勾配の直線(鎖線)と参照波との交点は $y_{2n+1} = \frac{18}{\pi} \sqrt{2} E \left(\theta - \frac{2n-1}{9} \pi \right)$, $(n=1, 2, \dots, 9)$ と $y_{2n+1} = \frac{\sqrt{2}}{2} E \sin \theta$ との交点で、すなわち $\sin \theta - \frac{18}{\pi} \theta = -2(2n-1)$ から求められ、三角波の下り勾配の直線(実線)と参照波との交点は $y_{2n} = \frac{18}{\pi} \sqrt{2} E \left(\theta + \frac{2n-2}{9} \pi \right)$, $(n=1, 2, \dots, 9)$ と $y_{2n} = \frac{\sqrt{2}}{2} E \sin \theta$ との交点につき、すなわち $\sin \theta + \frac{18}{\pi} \theta = +4(n-1)$ から求められる。

そうしておいて、参照波>搬送波の場合； $y = +0.5E$

$$\text{参照波} < \text{搬送波の場合； } y = -0.5E \quad (3)$$

という $\pm 0.5E$ の間を上下する矩形波相電圧 l_R, l_S, l_T を作っておく。その3者の内2つの差をとると線間電圧となり、 l_{RS}, l_{ST}, l_{TR} を図示すると、第3図の下の3列の如き、9個の正又は負の等振幅 E で間隔の異なるパルス列が得られ、これがP.W.M.波形である。

2.4 可変周波数の下における誘導電動機の等価回路と電圧、電流、トルクの解析



第4図 誘導電動機1相分の等価回路

第4図は基本周波数 f_1 の下での3相誘導電動機1相分の等価回路⁽⁵⁾を表わしている。2次側抵抗 R_2 、もれリアクタンス X_2 は巻数比の自乗 $(n_1/n_2)^2$ を掛けて一次側に換する。 R_2 と負荷の等価抵抗 $R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right)$ を一つにまとめると二次側抵抗は R_2/s となり、励磁リアクタンスは X_m で、もれインダクタンスは $L_1 = L_2 = X_1 / (2\pi f_1) = X_2 / (2\pi f_1)$ 励磁インダクタンス $M = X_m / (2\pi f_1)$ となる。

いま閉回路UJHK0に対しキルヒホフ第2則を適用して、固定子電流 $I_{st} = I_1$ 、回転子電流 $I_{rt} = I_2$ を用いて、

$$(R_1 + jX_1)I_{st} + (R_2/s + jX_2)I_{rt} = E(p) \quad (4)$$

また閉回路JHKにも、同じ法則を用いて、

$$jX_m(I_{st} - I_{rt}) - (R_2/s + jX_2)I_{rt} = 0 \quad (5)$$

ただし、すべり $s = 1 - N/N_0 = f_2/f_1$, ここで N_0 = 同期速度 $= 120f_1/p = 1800$ [R.P.M] 供試験について定数値を示すと、 $R_1 = 2.415(\Omega)$, $R_2 = 1.62(\Omega)$, $L_1 = L_2 = 0.0101$ [H]

相互インダクタンス $M = 0.188$ [H]

式(4)(5)の連立方程式を解いて、ラプラス演算子を s と書くとすべり s と混同されるので s の代りに p を用いることとして、次の行列表示で示される。

$$\begin{pmatrix} (L_1 p + R_1), & (L_2 p + R_2/s) \\ -M p, & (L_2 + M) p + R_2/s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s,t}(p) \\ i_{r,t}(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(p) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\text{ここに係数行列式； } \Delta = \begin{vmatrix} L_1 p + R_1, & L_2 p + R_2/s \\ -M p, & (L_2 + M) p + R_2/s \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

すなわち Δ を分解整理して

$$\Delta = \{L_1 L_2 + (L_1 + L_2)M\} p^2 + \{(L_2 + M)R_1 + (L_1 + M)R_2/s\} p + R_1 R_2/s = 0 \quad (7')$$

方程式(7')は2つの異実根を有しこれを α 、 β とすると、

$$\begin{matrix} -\alpha \\ -\beta \end{matrix} \} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (8)$$

$$\text{ただし } A = L_1 L_2 + (L_1 + L_2)M, \quad B = (L_2 + M)R_1 + (L_1 + M)R_2/s, \quad C = R_1 R_2/s \quad (8')$$

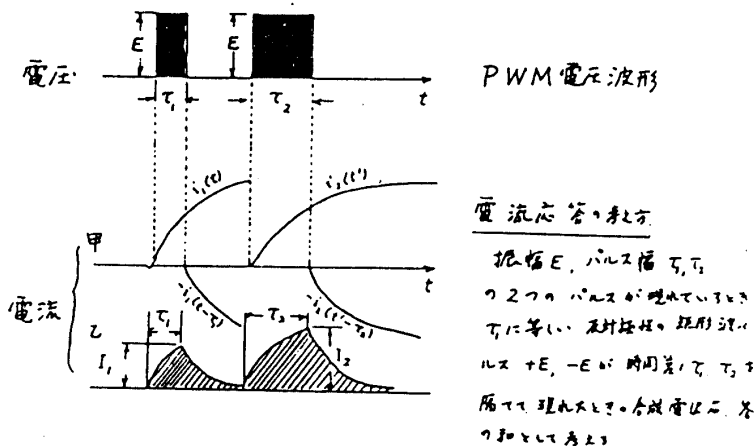
ラプラス逆変換により $i_{s,t}(p)$ 、 $i_{r,t}(p)$ の t 関数表示を記すと

$$\begin{pmatrix} i_{s,t}(t) \\ i_{r,t}(t) \end{pmatrix} = L^{-1} \begin{pmatrix} \frac{(L_2 + M)p + R_2/s}{\Delta} \cdot \frac{E}{p} (1 - e^{-\tau p}) \\ \frac{E}{p} (1 - e^{-\tau p}) \cdot \frac{M p}{\Delta} \end{pmatrix} + L^{-1} \begin{pmatrix} k i_{s,0} \\ k' i_{r,0} \end{pmatrix} \quad (9)$$

(9)式の初期値の項(右辺第2項)は結局0のため、入力電流即ち固定子電流 $i_{s,t}(t)$ を解くには次のラプラス変換公式⁽⁶⁾ を利用することとなる。

$$L^{-1} \frac{p + a}{p(p + \alpha)(p + \beta)} = \frac{a}{2\beta} + \frac{a - \alpha}{a(\alpha - \beta)} e^{-\alpha t} - \frac{a - \beta}{\beta(\alpha - \beta)} e^{-\beta t} \quad (10)$$

また(9)式右辺の $(1 - e^{-\tau p})$ は、パルス幅 τ 、休止区間隔 τ' で矩形電圧パルスの反復発生を表しているから、この電圧パルスに対する電流応答は、 $t = 0$ における矩形波 $+\frac{E}{p}$ の応答と $t = \tau$ における負の矩形波 $-\frac{E}{p} e^{-\tau p}$ との重畳したものと考えることができる。その模様を第5図に表わしている。



第5図 矩形波電圧 E と電流応答 $I(t)$ の波形

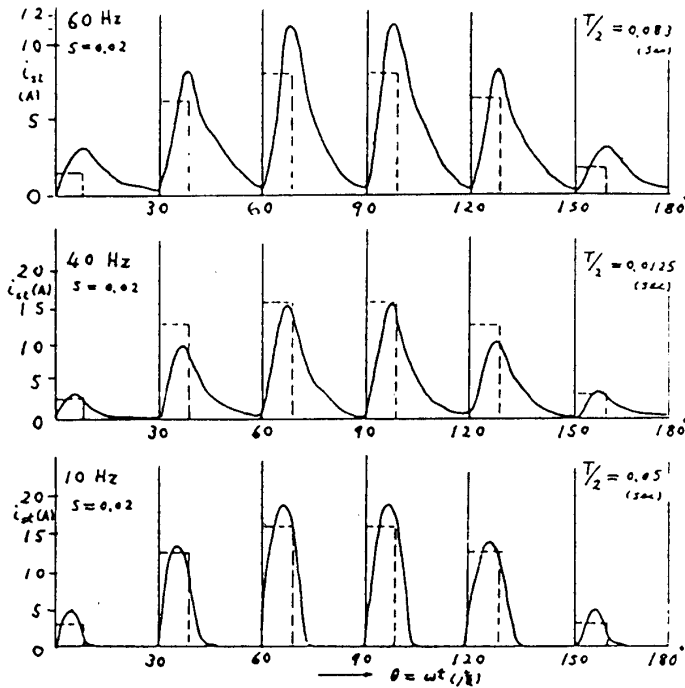
次に(9)式から回転子電流 $i_{r,t}(t)$ の絶対値を求め、これから出発して、 $X_{11} = X_1 + X_m$ 、 $X_{22} = X_2 + X_m$ として、式によりトルク T [N·m] を(11)式で表わし得る。

$$T = \frac{m}{2\pi} \left(\frac{E}{f_1} \right)^2 \frac{f_2 \times X_m^2 / R_2}{OA^2 + OB^2} \quad \dots (11)$$

$$\text{ただし } OA = R_1 + \frac{f_2}{f_1 R_2} (X_m^2 - X_{11} X_{22})$$

$$OB = X_{11} + \frac{f_2 R_1}{f_1 R_2} X_{22}$$

第6図は3相多重インバータの場合⁽⁷⁾につき、各経過周波数ごとにすべり



第6図 3相多重インバータ波形
 $f_1 = 60, 40, 10$ [Hz]

実験観測値に合致したものが得られていない。

3. 実験装置の概要と測定結果の一例

第8図は電動機入力、トルク、回転数と機械的動力、直流発電機出力測定用結線を示し、また、第9図はCT、PTを通してシンクロスコープで電圧・電流波形を、高調波監視計器で電動機の入力電圧・電流の高調波成分の含有状況（電圧は基本波振幅の%，電流はアンペア値）、と位相角(度)(基本波成分との相差角)を測定する結線を示している。

入出力測定に当っては計器の精度の関係上6～60(Hz)の全変化範囲での測定は無理なため、30(Hz)

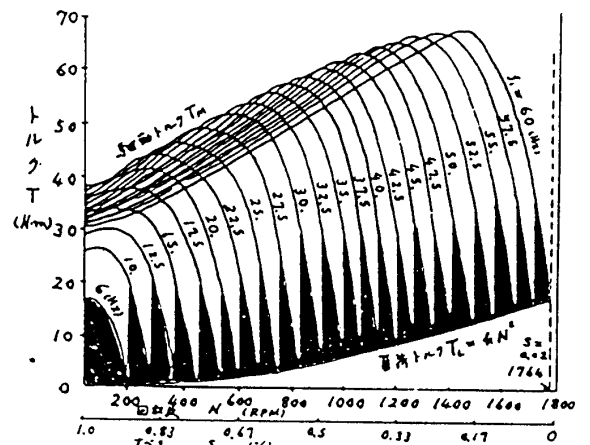
から60(Hz)迄5ヘルツずつ上昇および下降しつつ入出力を測定し、そのつど回転数とトルクを記録する。トルク変換器では抵抗線歪計のブリッジの発生電圧 ΔV がねじれの歪み角 ε に比例し、 ε は $\varepsilon = \pm \frac{8T}{G\pi d_0^3}$ (中実軸)又は $\varepsilon = \pm \frac{8Td_0}{G\pi(d_0^4 - d_i^4)}$ (中空軸)(d_0 =外径, d_i =内径)という関係にあって ΔV を測るとトルク T (N·m)又は T (kg重m)が求められる原理を利用して、 d_0 、 d_i を知らなくても、 1000×10^{-6} の微小ねじり歪みのとき、500(mV)の ΔV が出るように調整してあるので、校正時と測定時のクイックハイコーダのペンの偏れ S_c 、 S_r を読みとることにより直ちに、

$$T = 0.5(\text{kg} \cdot \text{m}) \times \frac{S_r}{S_c} \quad (12)$$

$s = 2$ (%)に達した場合の入力電流パルスの波形のうち、 $f_1 = 60, 40$ および10(Hz)について求めたもので電動機出力2(kW)に対するものである。

次に第7図⁽⁸⁾は6～60[Hz]迄の間を2.5(Hz)ごとに周波数を上げてゆく場合にモータの発生トルク T_M から負荷の反抗トルク $T_L = kN^2$ を差しひいた差が、究極的に駆動トルク $T_p = T_M - T_L$ として図示したもので2.2(kW) (約3 HP)の誘導電動機に対する計算シミュレーションの一例を示す。

P.W.M. 波形の電圧に対する電流応答のシミュレーションで第6図に対応したものを算出するための計算プログラム⁽⁹⁾を作って計算しているが、まだ



第7図 周波数変化による
駆動トルク T の推移

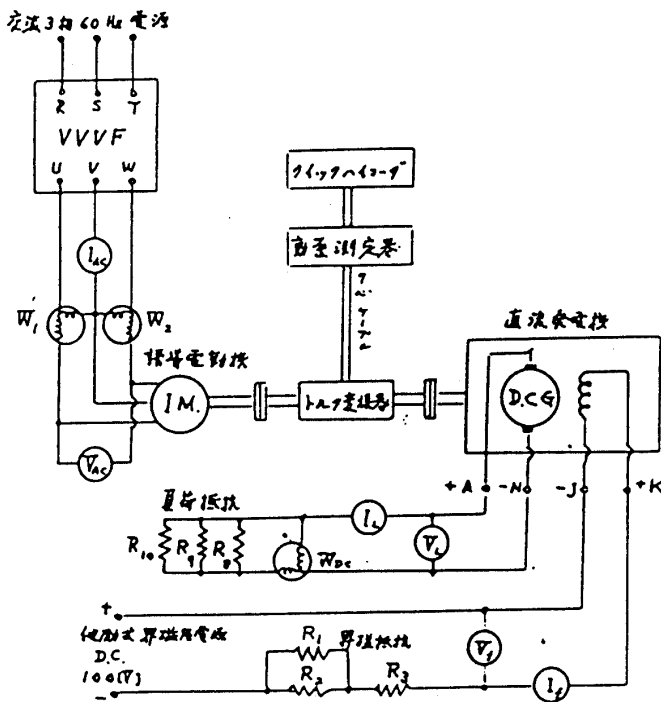
によってTがわかり、これと同時に測定した回転数N[RPM]を用いて、機械的動力 P_m は

$$R_m = \frac{2\pi N}{60} = 0.1047NT(W), \text{ ただし } N(RPM) \quad T(N\cdot m) \quad (13)$$

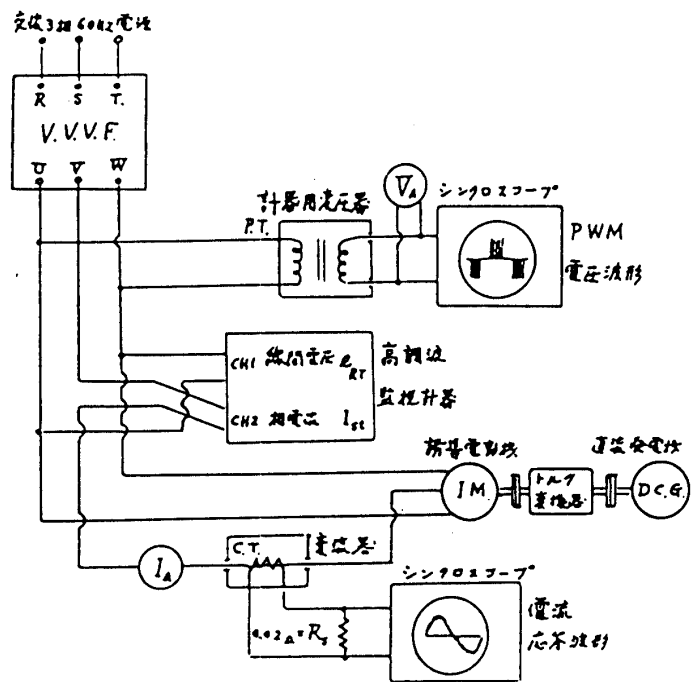
$$= 1.026NT', \quad \text{ ただし } N(RPM) \quad T'(kgm) \quad (13')$$

なおシンクロスコープ使用時CT, PTを用いるのは, V.V.V.F.の回路はつねにフロートさせる必要があって, CT, PTによって測定回路と絶縁することをしないと, 地絡事故時パワートランジスタ素子のモジュールを焼損したその過誤をくり返さないためである。CTの二次側は平時は短絡しておいてカメラ撮影時のみ短絡スイッチを開くようにすべきである。高調波監視計器は4チャンネルの測定端子を有するが, 今回は電圧電流各1個ずつのため, 2チャンネルのみを使用した。

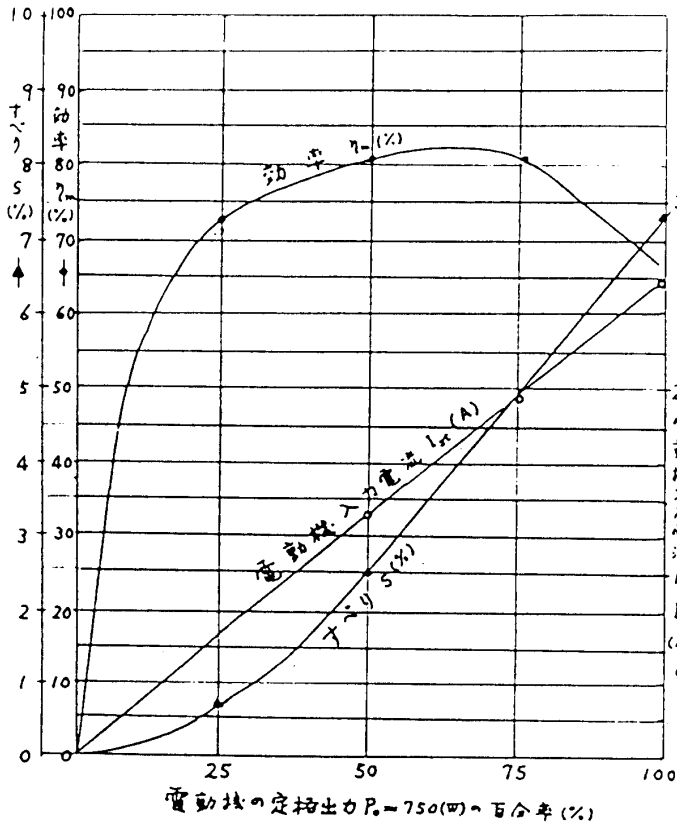
一つの周波数の測定点に際し入出力回路の電圧, 電流, 電力, 回転数, トルク用ハイコーダの操作, 動歪計の校正測定 of 切換え, CTスイッチの開放とカメラのシャッター操作, 高調波監視計器の始動と打出しという風に卒研生3名と筆者とで合図のもと同時観測する必要あり, 協同関係の大切さを感じる。



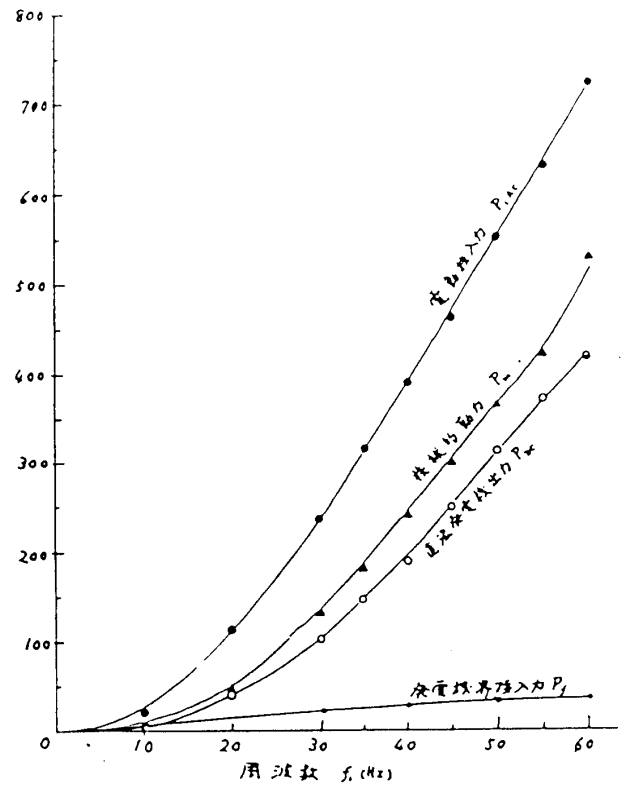
第8図 電氣的入力とトルク測定用結線



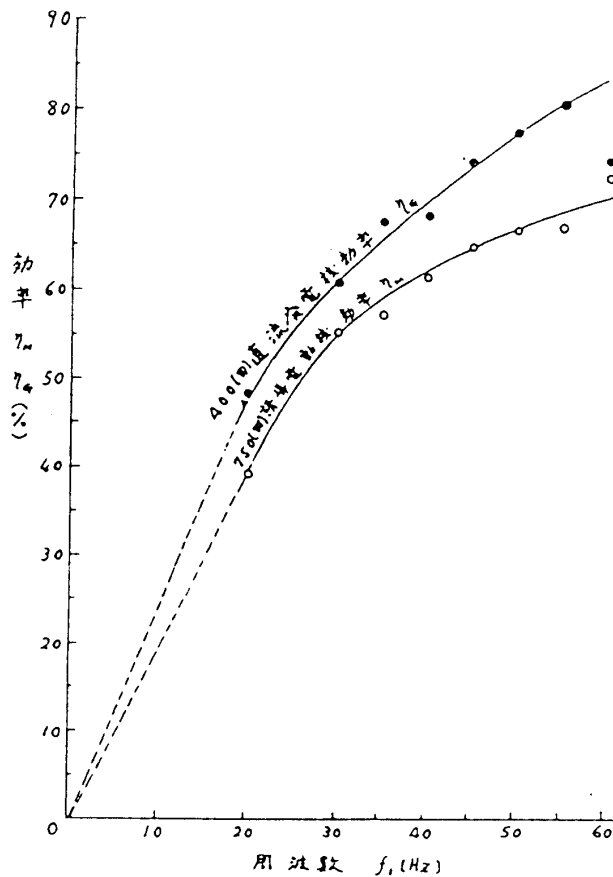
第9図 電圧電流波形と高調波成分測定用結線



第10図 すべり，入力電流，効率の変化



第11図 入力，機械的動力，直流発電機出力，界磁入力の変化



第12図 f_1 と効率 η_g η_m の関係

第10図は，電動機の定格出力750[W]の百分率(%)を横軸にとり，すべり s ，入力電流 I_s [A]，効率 η [%]を縦軸に実験値から描いたもので70%負荷のとき最高の効率82%位でこの種の製品として是認される値である。第11図は多くの実験結果をもとに，周波数 f_1 を横軸に，電動機の入力 P_{iAC} と機械的動力(同期ワット) P_m ，直流発電機の界磁入 P_f ，電氣的出力 P_{DC} を描いている。

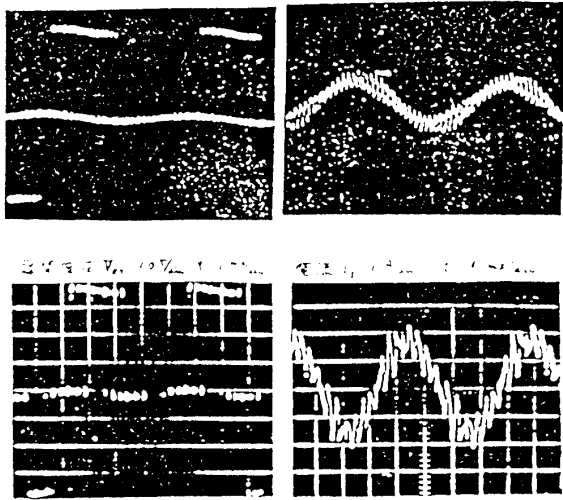
第12図は

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_{iAC}} \times 100(\%) \quad (14)$$

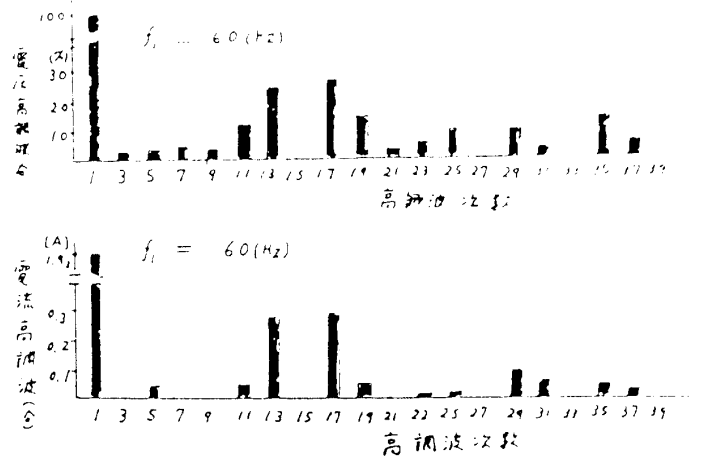
$$\eta_g = \frac{P_{DC}}{P_m + P_f} \times 100(\%)$$

の両式を用いて，効率 η_m と η_g を周波数の変化と共に曲線に表したもので，fractional HPの回転機の効率の低い⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾のは当然のことである。

高調波監視計器は内蔵されたコンピュータによって入力電圧，電流の瞬時値を自動的にサンプリングして，Fourier 分析(調波分析)した結果を電圧百分



第14図 30, 60 [Hz] での電圧電流波形



第13図 $f_1 = 60$ [Hz] での電圧電流高調波含有率

率，電流[A]値で，1～39調波迄の奇数次高調波に関して，含有率・位相角をそろえて，幅の狭い折りたたみ記録紙にデジタル値として打出すもので，今回はどの周波数に対しても，電圧・電流とともに，第13，17次調波が多く含まれていることが，第13図からよく判る。但し位相角の現れ方については明確な規則性が発見できなかった。奇数次調波のうち $(6n-1)$ 次 $3n$ 次 $(6n+1)$ について逆相分電流の回転方向の相違やある次数の強調又は打消効果を理論的に調べる必要がある。

第14図は一例として30(Hz)と60(Hz)の場合の電圧電流波形のオシログラムであって，60(Hz)では搬送周波数15(Hz)であるのに，30(Hz)では搬送周波数が30(Hz)(f_1 上昇時)，又は21(Hz)(f_1 下降時)のためPWMパルス数の相違が現れている。

4. 結言ならびに謝辞

毎年卒研生の協力を得て，前年度成果を基盤として進歩すべきが当然乍ら，文献の渉猟，測定の繰返し確認のため進度急速ならずシミュレーションの検証の進展が望まれる。振動騒音⁽¹²⁾⁽¹³⁾，軸電圧の測定，不平衡負荷⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾による異常現象の発生解明をも急ぎたいと考えている。インバータ班として研究に従事された小倉俊夫，川崎文彰，前田和明，山本将平，多鹿守，亀本英樹，柳岡正人，竹内宏之，森田貞行，小野沢光洋，古川和弘，榎本崇広，町田宗俊の13名の卒業生の諸氏および現在真摯に取り組む中の大西道明，市川和生，宮永和良の3君の努力に対し，深甚な謝意を表する次第である。尚実験装置の保管・組立てのため保田襄似教授，加藤芳信助教授の格別のご配慮にあづかったことならびに㈱三社電機製作所 顧問 金沢忠雄氏，アルファ計装㈱社長 篠原 鋭氏のご高配を受けたことを記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 佐藤則明,石田宗秋,岩田幸二,; Stability of Inverter-fed Induction Motor Drive System 日米セミナーS 6.3,1981Nov.pp.217-226
- (2) 岡本, 亀本, 多鹿, 柳岡: 3相インバータと誘導電動機との結合系の起動時の解析(第4報) 昭和61.4 電気学会全国大会 No.636. p 75.(千葉県習志野市).(日大習志野学舎)
- (3) 河野則勝: 3相多重インバータの出力波形中の高調波低減について. ㈱三社電機製作所社内資料 昭和57.4月
- (4) 岡本, 井上, 浦野, 勝島: 3相多重インバータと誘導電動機との結合系の起動時の電流波形解析, 昭58.秋.電気関係学会関西支部連大. G 3A -28 p.G 93.
- (5) J.M.D.Murphy: "Thyristor Control of A.C.Motors" Pergamon Press 1973. 初版p.88とp.105
- (6) 仁田工吉: "自動制御教程" 実教出版(株)刊.昭57.3月第5版公式集.p.202
- (7) 岡本, 浜田, 井上, 浦野, 勝島, : 3相多重インバータと誘導電動機との結合系の起動時解析(第3報).昭59.秋.関西支部連合大会 G 3-9 pG 95.
- (8) 岡本, 井上, 浦野, 勝島, : 同上題目(第2報)昭59.3月電気学会全国大会(中央大学)No.588 p .711
- (9) 岡本, 桶葭, 大西, 市川, 宮永: PWMインバータ駆動誘導電動機の運転特性(第1報)平成元. 10月電気関係学会北陸支部連合大会 A -9.p .9.(福井工大)
- (10) 竹内寿太郎「電機設計学」オーム社昭54.p .117.
- (11) 広瀬敬一編「電機設計概論」電気学会p .89.
- (12) 電気学会: "電気学会技術報告Ⅱ部241号" 昭.62.1月.pp .11-19.
- (13) 電気学会: "電気学会技術報告Ⅱ部287号" 昭.62.12月.pp .7-26.
- (14) 電気学会: "電気学会規格JEC-37(1979)誘導機昭.55.6月.pp .41-46.
- (15) 山村 昌: "交流回路と交流機のスパイラルベクトル理論" 電気学会雑誌.平成元.7月 Vol.109.No.7 pp .517-524.
- (16) W.Nurnberg: "Die Asynchronmaschine" Springer Press, 1979.pp.151-177

以上