

最近の電源機器

工業技術院電気試験所 宮沢永次郎

1. はじめに

電気で動作するものには必ず電源が必要である。電源という言葉はありふれた単語であり、普通の電気機械器具、装置に用いる電源といえば直流、または単相、3相の交流の何れかに対し何ボルト何ワットということも多くの場合事が足りる。しかし一つの目的に対し開発された装置があったとして、その装置にどのような種類の電源が適し、その装置が最低限の機能を発揮するのにどんな性質の電源でなければならないかと考えて来ると電源という言葉が非常にむずかしくなる。今までも自動電圧調整装置便覧等二、三の書物が発刊されているが、この意味での解答は未だなされていないように思われる。先日でも電気学会のある委員会で微小入力増幅器の技術報告をまとめるに当って、増幅器側からみた電源の仕様を決めることができないだろうかという話になったが、いざ数値を具体的におげるとなると、(たとえばドリフトが 10^{-19} と 10^{-18} Wに対し電源の安定度が何%必要か、周波数との関係は)矢張り未だその段階でないということになってしまった。

たとえば悪いが最近ステレオが普及し数万円のものから数百万円のものまで市販されている。音のひずみその他の要素からこの位以上のものであれば周波数特性がよく、出力も妥当であるからまあ音楽がきけるといふ線で、また使用するレコードまたはテープからも一つの線がでないこともない。しかし電源となると少し観点が異なり、対象とする装置の性能上電源に対する機能が大体分かっておいてもその装置より電源が高価となった場合普通は低級の電源で間に合おうということになりそうである。私の研究室でも交流磁気特性の測定に交流自記磁束計を使っているが、その電源である多周波正弦波発生装置は頭初の購入時に測定器本体と同程度のコストのものにしようという考えからメーカー側も妥協し、それに決めたところが、温度湿度は部屋を空調して安定にしても時によって電源のために測定器のごきげんが悪いという結果になってしまった。実際に使用し両者の結合を考えた上でないと対策が立たないだけに厄介な代物である。

そこで筆者は電源に対し次のように考えてみた。研究

室検査室等の良質の電源を必要とする処は電力もある程度ほしいので3相となり、現技術でできる普通クラスの安定度のものを元におき、これ以上の性能の要求に対してはカスケードに高級品を使用する。前者に対してはVolta, 後者に対しては瞬時応答方式等がある。

この他、時定数、性能等の点から周波数を上げたい場合も生じ、近年磁気式周波数通倍器がこの目的に使はれるようになった。

これらは共に最近になって開発されたものであるから表題を最近の電源機器とした次第である。しかし前に述べたように使用者側の要求度が技術的に明白でないので本文では電源機器の立場から妥当と思われる性能を紹介することにした。

商用電源そのままでは何かと不都合が生じ、その質を改善した電源が欲しい場合に本文が何らかの形で役に立てば幸である。

2. 電源として具備すべき一般事項とその現状

交流電源について考えてみると次の数点になる。

(1) 周波数

火力、水力を問わず発電所の発電機の回転数で決定されるため、特に支障のない限り周波数はそのまま用いる。(一般のものはこの変化を考慮して使用できるよう設計されている) どうしても一定の周波数を希望するときは電動発電機またはインバータを使用する以外方法がない。

(2) 電圧安定度

商用電源そのままでは普通 $\pm 10\%$ 、多いところで $\pm 15\%$ 変化する。これに対し標準形のAVR(交流定電圧装置)は $\pm 1\%$ 、それ以上の要求に対しては0.5, 0.1, 0.05%のものがある。

(3) レスポンス

入力電圧または負荷の変動に対して標準形のAVRが電源周波数の10ないし15サイクル、(鉄共振形で1.5サイクル前後)、速応形といわれるものが2~3サイクルから1/200サイクル程度になっている。

(4) 行き過ぎ量

最初の半サイクルの波高値が定格値の数倍になるが速応形ではほとんどない。(この量が多いと相手の装置の寿命を短くした極端の場合は破損する。レーダー用電

* 東京都千代田区永田町2

源ではこの行き過ぎ量があると使い物にならない)

(5) 波 形

標準形 AVR では波形補正により 5% 以下に押えている。測定などで直接試料に印加する用途に対しては基準波形を別に作った方式を用い、0.5% 以下にしている。

(6) 出力電圧

普通の交流 AVR といわれているものは電圧の実効値が一定になるよう作られているが、現在のところ実効値に対する基準要素の妥当なものがなく、ゼナーダイオードを用い前述のように波形も多少ひずむために問題が多い。使用目的に応じて平均値、波高値等で一定とし実効値に限定しない方がよい場合がある。

(7) 効率、力率

標準形は大体 85% 以上となっている。出力容量によって異なる性質のもので容量の大きい程よくなる。

(8) 負荷の種類

普通抵抗負荷で試験されるのが、電源の種類によっては負荷力率に影響され易いものもあるので、負荷の性質が明らかなきは明示されるのがよい。

(9) 3 相平衡度

3 相電源では上記の他各相の平衡が必要で、後述の Voltan では電圧で 1.5% 以下となっている。なお負荷の不均衡に対して 3 相入力電流が平衡することが望ましい。

3.3 相定電圧装置

3 相の定電圧装置として 3 相単巻変圧器または 3 相誘導電圧調整器をサーボモータで制御するもの、3 相変圧器のタップを変えて行うもの等は従来からあったがこれらは前記の V スポンスおよび行き過ぎ量等の点から好ましくなく、単相定電圧装置を 3 台組合せて解決しよとする試みがしばしば行われたようである。しかし単に 3 台組合せだけでは絶対といってよい程うまく行かない。これはお互いが干渉し合うため、これを除去し単相単体と同様な動作を行わせるための色々な方法が考案されている。その一つに昭 40 年度日刊工業新聞社十大新製品のひとつに選ばれた Voltan 33 があるので紹介しよう。この Voltan 33 は 3 相用に最も適した独自の構造を用いた 3 相並列鉄共振形定電圧装置であって、次に述べる構造となっている。

3.1. 構 造

図 1 に回路図およびリアクトルの構造を示す。<R は 3 相線形リアクトルであって各相の巻線はそれぞれ空隙のある 3 脚鉄心の各脚に施されている(巻線は磁氣的に独立した空隙付鉄心に別々に施してもよい)。SR は 3 相飽和リアクトルであって各相の巻線はそれぞれ 3 脚形鉄心の各脚に施され、その一端は Y 接続されている。3 脚

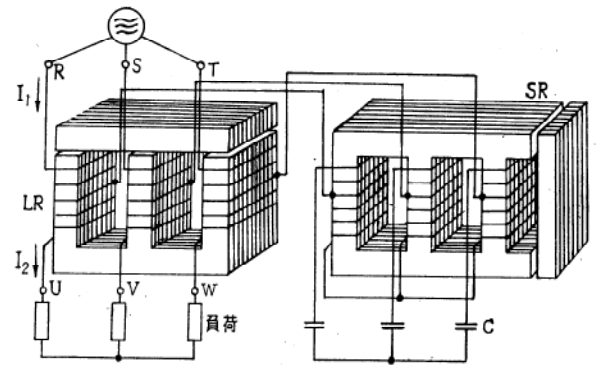


図 1 Voltan33 回路図

形鉄心には更に第 4 脚を附しこれは主磁脚に対し空隙を介して側磁路を構成している。C はコンデンサであって、その一端は Y 接続され、飽和リアクトルと 3 個の並列共振回路を形成している。R, S, T は入力端、U, V, W は出力端である。

3.2. 動作原理

図 1 の 3 相鉄共振回路において 3 相飽和リアクトルの中性点の電位は鉄心構造が 3 脚形であるために他の特許における飽和リアクトルの 1 次巻線を Δ に接続したのと等価になり常に電源電圧の中性点の電位と一致する。従ってその動作の大部分は原理的に普通用いられている単相鉄共振回路を 3 組 Y 接続したのと同じと考えることができる。従って単相鉄共振回路の定電圧原理を Voltan 33 に適用することができ、出力端 U, V, W 間の電圧は何れも一定に保たれることが了解される。

出力波形については図 1 の飽和リアクトルは Y 接続されているから、リアクトル電流には第 3 高調波成分は含まれない。また飽和リアクトルの第 4 脚の空隙を適当に選ぶと第 5 および第 7 高調波成分が非常に少なくなり、飽和リアクトルを流れる電流はほぼ正弦波となる。リアクトル電流が正弦波であればこの電流による線形リアクトル LR の電圧降下も正弦波となり、3 相出力電圧は正弦波となる。そしてこの装置はこの状態で安定な動作を行う。

3.3. 性 能

入出力共に各相平衡しているので一つの相についての特性を示すことにする。図 2 (a) は負荷をパラメータとして入力電圧を変えた場合の出力電圧、図 (b) は入力電圧をパラメータとして負荷を変えた場合の出力電圧である。図に示されていないが約 38V の入力電圧から出力電圧は定電圧となり、出力電圧波形は単相鉄共振装置における如き波形補正回路が全くない図 1 の単純な回路にもかかわらず良好な正弦波が得られまた過負荷に対して垂下特性を持っている。図 3 は入力電圧を 190V から 210V に急

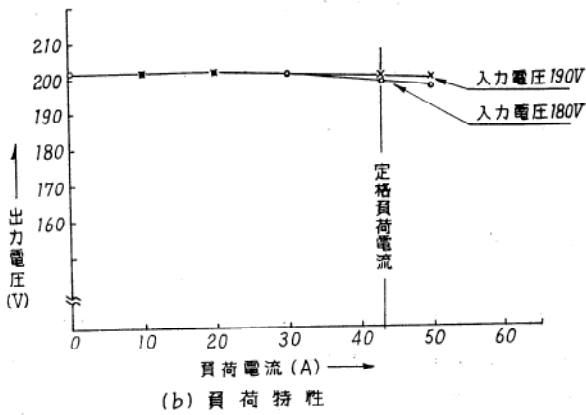
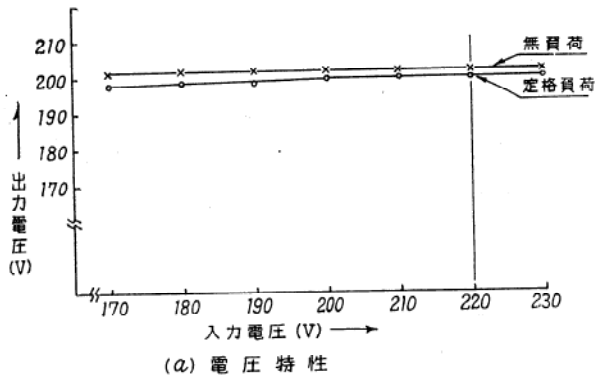


図2 定電圧特性 (15KVA)

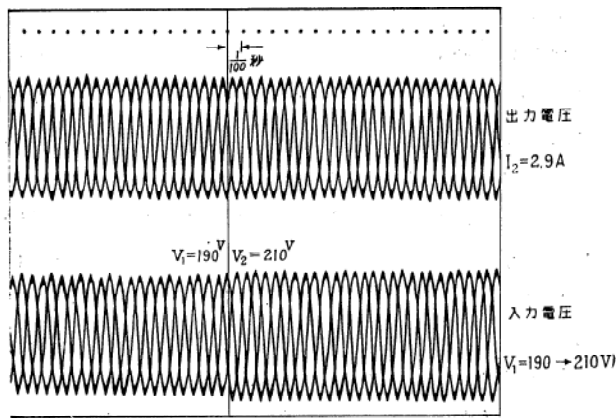


図3 過渡特性 (1KVA, 入力電圧変化の場合)

変させた場合の過渡特性で出力電圧回復時間は20~30ms程度であって他の3相定電圧装置に較べ非常に短い。図4は負荷を無負荷と全負荷の間で急変させた場合の過渡特性で出力電圧の変動はほとんどなく、負荷に悪影響を与える行き過ぎ量も僅少である。定格入力電圧、全負荷における効率、力率は1kVAのものでそれぞれ88.5%および99.5%であり、効率は出力の大きい程よくなり15kVAでは92%を得ている。

負荷の力率については一般に鉄共振形定電圧装置では力率の悪い負荷に対してその定電圧特性が劣化するものであるが Voltan 33 においては図5に示すように負荷力率50%の場合でも全負荷における出力電圧の偏差は僅か

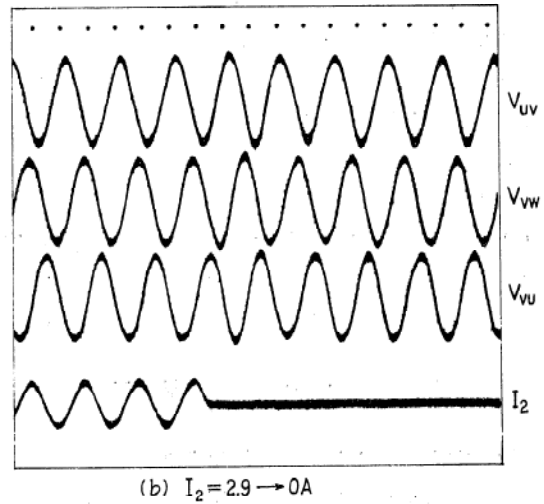
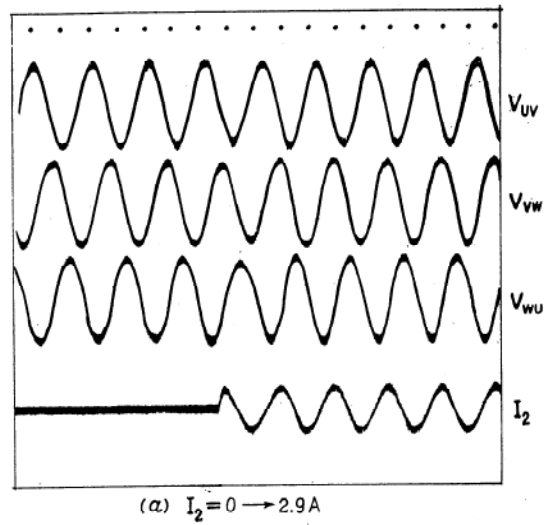


図4 過渡特性 (1KVA, 負荷変化の場合)

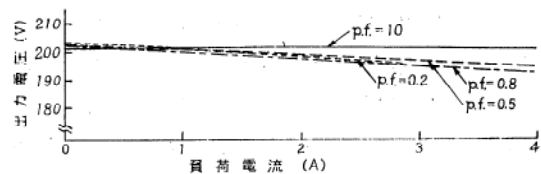


図5 負荷力率特性 (1KVA)

に2.5%である。1kVA負荷力率80%のとき全負荷における効率および入力側の力率はそれぞれ68.9%および99.7%で、力率50%のときのこれらはそれぞれ61%および99.9%となり、負荷力率が低くなると共に効率は減少するが、その入力側の力率は99%以上に保たれている。従って他の装置のような力率改善素子を設ける必要はない。

次に負荷が不平衡の場合について、その極端な例として単相負荷における特性を図6に示す。図(a)は各負荷に対して入力電圧を変えた場合の出力電圧、図(b)は各入力電圧に対し負荷を変えた場合の出力電圧、図(c)は入力電圧を一定値(200V)とし負荷を変えた場合の入力電流

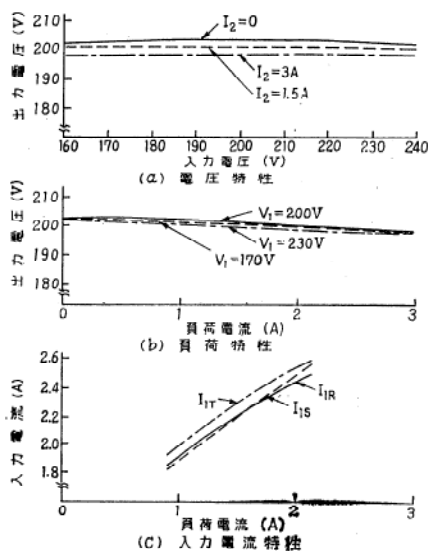


図6 単相負荷の特性 (1KVA)

である。これらの特性は3相平衡負荷の場合よりやや劣るがすぐれた定電圧特性を示している。注目すべきは(c)図に示すように3相飽和リアクトルに3脚形鉄心を使用しているため単相負荷に対しても3相の入力電流が平衡していることである。この平衡特性は電源電圧が変化したときにも同じように保たれる。欠点はこのことから分るように図1の回路で3相用に設計された Voltan 33 を単相負荷で使用する場合出力が3相の場合の $1/\sqrt{3}$ しかとれないことである。これに対する対策も種々検討されているので近く解決されるものと思われる。

3.4. 特徴

以上述べたことから Voltan 33 は次の特徴を持っている。

- (1) 構造が簡単である。
- (2) 堅牢で振動、衝撃に強い。
- (3) 寿命が長い。
- (4) 保守が容易である。
- (5) 極めて安定である。
- (6) 入力電圧波形が相当ひずんでいても出力波形はほとんど完全な正弦波となる。
- (7) 効率が高い。
- (8) 力率が良い。
- (9) 応答速度が速い。
- (10) 出力電圧が平衡している。
- (11) 過負荷に対して垂下特性を持つ。

などであり、更に3相の定電圧装置としての機能を有するのみでなく

- (1) 3相電源で駆動し負荷が不平衡、極端な場合として単相負荷でも定電圧特性を示し、かつ3相の入力電流がほとんど平衡している(この用途に用いるものを

Voltan31と呼ぶ)

- (2) 本文に述べなかったが、単相電源で駆動しても3相の平衡した正弦波定電圧出力が得られる(この用途に用いるものを Voltan 13 と呼ぶ) という極めてユニークな機能を有している。

4. 高性能定電圧装置

はじめに述べたように普通クラスの定電圧装置で元を押えておき、この部分だけはこれだけの性能が必要というところに高性能定電圧装置をカケードに用いるのが一つの考え方である。その理由は定電圧装置の出力容量そのものの容量で操作部を作ると機能的、経済的に不利なので、調整すべき変化分の容量の操作部とする、すなわちブースタ方式とするのが普通である。すると入力電圧の変化幅が少い方が良いので、この点からみても高性能のもの1台よりカスケードに計2台用いることの意味があり、経済的にも釣合うものである。従って高性能のものは負荷は全負荷変るとして入力電圧の変動幅は比較的少なくなっている。

高性能定電圧装置で一番重要なことは入力電圧または負荷の急変に対し出力電圧波形の変化を防ぐことである。ゆっくりした変化はどのような方法をとっても防ぐことができるが、たとえば図7のような電圧波形の変動があった場合、通常の制御系を用い検出器にランプまたはゼナーダイオード、操作部に磁気増幅器またはサイリスタを使った装置では最初の半サイクルの制御は不可能である。この解決法の一つは基準に電源周波数に同期させた振幅一定な理想的正弦波電圧を用い瞬時応答の系とすることである。

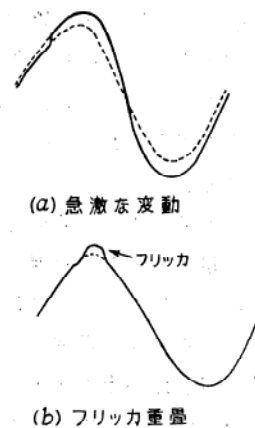


図7 電圧波形変動の一例

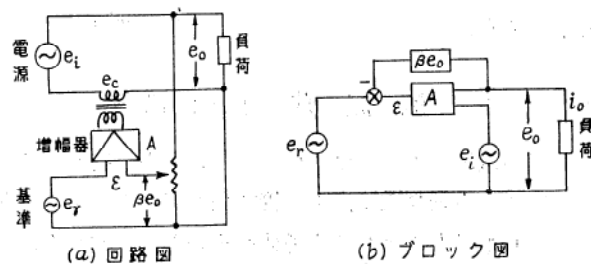


図8 閉ループ制御系

すなわち波形制御 (wave form control) または動的制御 (dynamic control) 方式をとらねばならない。図

8は閉ループ方式にこの制御方式を用いた一例で図(b)から分かるように入力電圧 e_i は外乱の形で入り、外乱はすべて増幅器出力 e_c で打消され出力 e_o は正弦波の一定電圧となる。この場合

$$e_o = e_i + e_c \quad (1)$$

$$e_c = A\varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = e_r - \beta e_o \quad (3)$$

であるから

$$e_o = \frac{A}{1+A\beta} e_r + \frac{1}{1+A\beta} e_i \quad (4)$$

となり、 e_i の最大変化量からループゲインが決定される。ここで問題となるのは図8から分かるように外乱である入力電圧 e_i が出力電圧 e_o より上昇した場合増幅器Aの出力 e_c は負、すなわち増幅器は電力を吸収せねばならない。従って出力容量と増幅器のゲイン零における周波数を高くとらねばならないことから増幅器に電子管を使用するものとするプレート損失が増大することである。プレート損失を減少する方法として

(1) e_i を常に e_o より少な目とし K ($K=e_o/e_i$) があまり負にならぬようにする。

(2) 増幅器のB電源を入力電源と同期して変調し i_o の小さいときに E_B も低下するようにする。(同期B電源方式)

(3) 増幅器の出力管に外部より入力電源と同期した打消電流を流し込み K が負のときでもプレート電流 i_p の向きが逆にならないようにする。(打消電流法) などが考えられる。図9は(3)の方法の一例を示したものである。

これらのことから分かるようにこの形式の定電圧装置は大容量のものが作り難く、今後パワートランジスタの進展により発展が期待される

ものであるが、現在のところ増幅器の出力変圧器に100kcのものを用い、入力電圧変動±10%に対し0.2%、1/10,000秒、2kVAの報告がある。

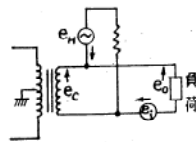


図9 プレート損失軽減回路

5. 周波数通倍器

高周波電源(ここでは商用周波数以上を高周波と呼ぶ)として従来電動発電機、電子管式発振器などがあったが近年静止形のものとして半導体を用いたインバータ、磁心の非直線性を利用した磁気式周波数通倍器が脚光をあびるようになった。インバータについてはGE社の便覧その他に多く紹介されているので磁気式周波数通倍器を紹介することにする。

5.1. 動作原理

この方式の通倍器は n 個(または n 脚)の鉄心を用い各鉄心(脚)に1~2個の巻線を施し、これを2相または3相の交流電源で駆動することによって、各鉄心(脚)に π/n 位相がずれた大いさの等しい起磁力を与え、 n 倍周波数の出力を得るものである。

一例として7倍通倍器を周波数 f なる3相の電源を用いて励磁し、単相の出力を出す場合について説明する。図10は回路図で7個の飽和リアクトルにより構成されてい

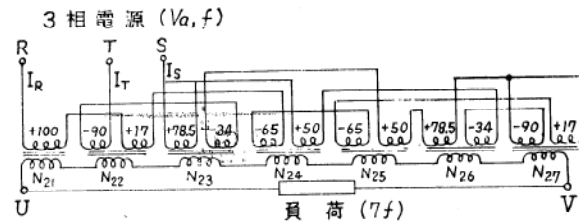


図10 周波数通倍器回路図(7倍)

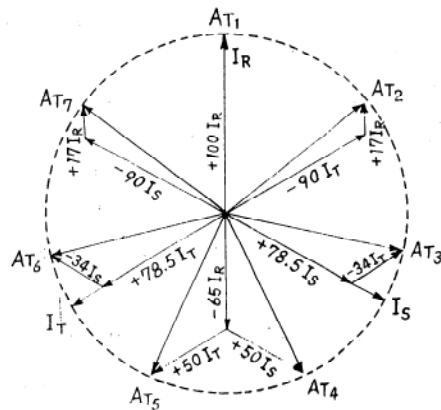


図11 ベクトル図(7倍)

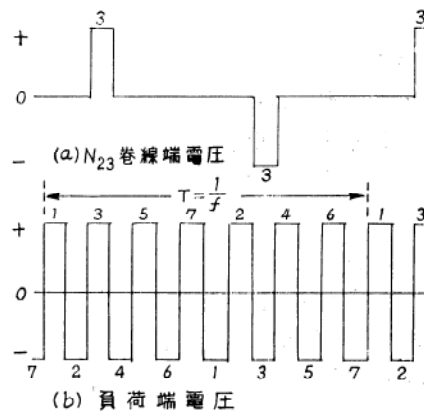


図12 出力電圧波形

る。各リアクトルには図示の巻線(数字は巻数の百分率と極性を示す)が施され、1次巻線はY接続されて各鉄心の励磁起磁力が図11のベクトル図を満足、すなわち各

鉄心の励磁電流と巻数の積である励磁起磁力 (AT) のベクトル和が同じ大きさで位相がお互に π/n 異なるような巻数となっている。そして各鉄心が π/n の期間飽和で残りの $(1 - 1/n)\pi$ の期間飽和するような電源電圧 V_a を印加すると、3相の入力電流 I_R, I_S, I_T はほぼ基本波の正弦波で2次(出力)巻線 N_2 に図12(a)の方形波電圧を誘起する。そこで2次巻線(各鉄心共巻数同じ)を図10のように交互に逆極性になるよう直列に接続すると、出力端 UV に図12(b)の n 倍(ここでは7倍)に通倍された方形波電圧が得られる。図10の巻線および図11のベクトル図に示した数字は各巻線の巻数を百分率で表わしたものである。出力端 UV に負荷を接続すると n 倍周波数の負荷電流が流れ、2次巻線は直列であるから、この負荷電流に基く起磁力が鉄心内の磁束に影響を及ぼし、励磁起磁力との相互干渉のために負荷の増大に伴い、出力電圧は方形波が丸みを帯びた正弦波に近いものとなり、かつ垂下特性を示し垂下を始める負荷のところで最大出力が得られる。電源電圧を増すと出力電圧を増加し垂下点が負荷の大きい方に移動するので最大出力も増すが、過励磁になると励磁電流が増すために効率は減少し最適の励磁電圧 V_a が存在する。他の通倍数についても同様である。(図13および図14)

通倍数を多く必要とし、一段のみで達成できないときは単相出力に相変換回路を設け2相または3相とし、前述の回路をカスケード接続すれば各段通倍数の積の周波数とすることができる。この際各段の通倍器の動作は一段のみで運転した場合の個々の通倍器の動作とはほぼ同じであり、これまで述べて来た原理をそのままあてはめることができる。

5.2. 性能

商用周波数用けい素鋼を用いた約3 kW, 420 c/s 出力(電源周波数60 c/s, 7倍通倍器)の特性を図13に示す。曲線A, B, Cは電源電圧 V_a をパラメータとしたものでAが250V, Cが330Vである。曲線Cの場合出力電圧は負荷電流が約10Aまではほぼ一定(350V)に保た、それ以上の負荷に対し垂下している。効率は最適負荷に対し85%, 最高91%を示している。出力波形は負荷状態でよい正弦波となり、無負荷では方形波の角が丸くなっている。図14に波形の実測値を示す。波形のC, Dは図12の波形とよく合っている。出力端に並列にコンデンサを挿入すると出力電圧を増加し、波形を改善することができ、特に誘導性負荷の場合有効である。本実験は3ないし8 μF のコンデンサを用いた場合である。

5.3. 定電圧特性を持たせた通倍器

図13に示すようにこの方式の通倍器は電源電圧に依りびんであるから安定な動作を行はせるためには入力電圧

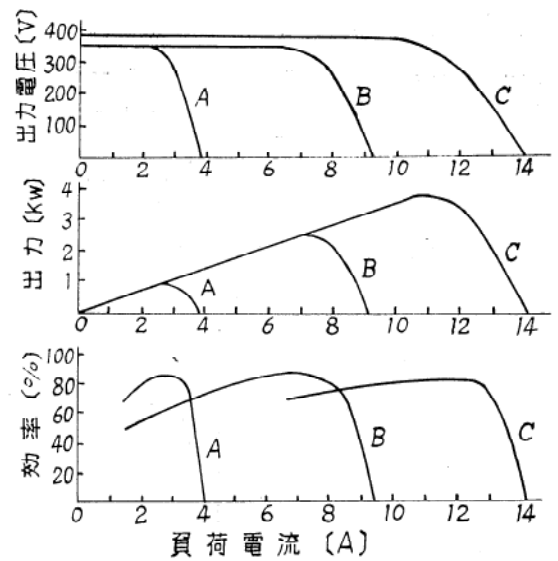


図13 負荷特性 (電源電圧 $V_a, C > B > A$)

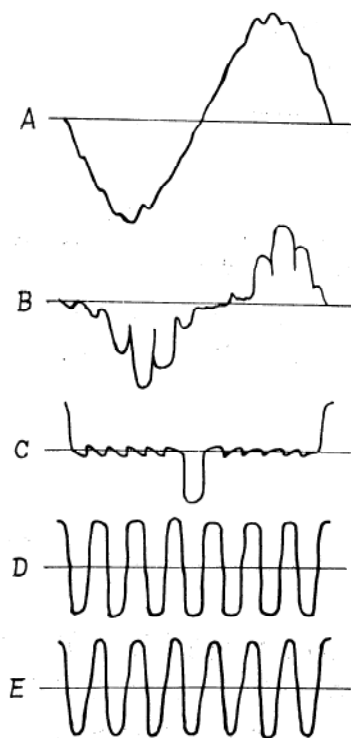


図14 波形(A)1次線間電圧(B)1次相間電圧(C)2次電圧(1鉄心の)(D)UV端出力電圧(無負荷)(E)UV端出力電圧(全負荷)

をある程度一定に押える必要がある。これには幸い通倍器自身が飽和リアクトルであるから、これと並列にコンデンサを、入力側に直列に線形リアクトルLRを挿入すれば3.2.の動作原理から出力に定電圧を持たせることができ、また入力側からみた力率を改善することができる。図15はこの回路図を示し、図16はLR, およびCを用い

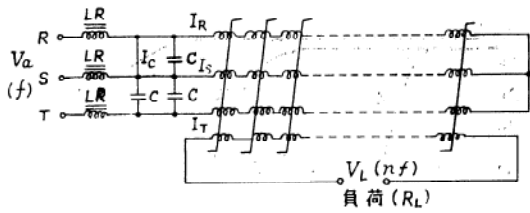
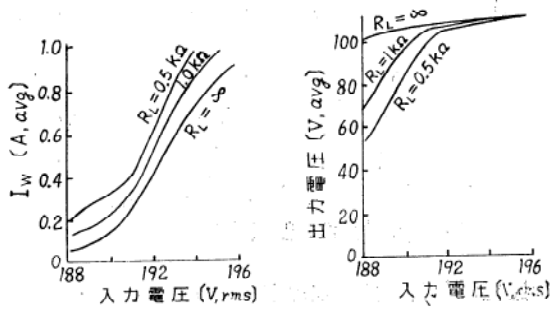
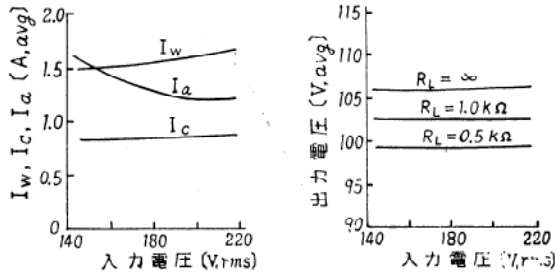


図15 定電圧特性を持たせた通信器回路



(a) LR, C 回路なしの場合



(b) 図21回路の場合

図16 定電圧特性電源：400c/s, 出力
3600c/s, $1W=1R=1s=1r$

た場合と用いない場合の比較を示す。鉄共振作用を利用することによって約 192V 以下で急に出力の減少するのを 140V まで安定な出力の得られることが了解される。

5. あとがき

電源特に安定化装置についての現状、古くからあったにもかかわらず最近またみなおされて来た鉄共振装置、電子技術の進歩によって工業化された瞬時応答超精密定電圧装置、および電力用周波数通倍器についてその概要を紹介した。電源に対して操作部にどのような部品が最適であるか、トランジスタ、サイリスタ、磁気増幅器などについて床面積、重量、経済性、出力レベルの限界の点から比較検討した論文もあり、材料、技術などの進歩に伴ってその境界も少しずつ変っているようである。しかし私の知っている範囲では心臓部ともいべき検出器、すなわち transducer のこの面での研究に進歩が少ないようである。技術が高度化するにつれて新しいアイデアの生れることを期待するものである。

なお鉄共振装置については相変換その他の面白い装置も開発されている。これらについては次の機会に報告したい。最後にデータを使用させて頂いた方々に感謝します。