

単相インバータを冗長系に持つ三相無停電電源装置

正員 山田 外史 (金沢大)
 正員 別所 一夫 (金沢大)
 正員 原田 耕介 (九州大)

1. まえがき

鉄共振形定電圧装置は、構造が簡単で信頼性が高く、雑音吸収性、ならびに過負荷保護特性が本質的に備わっており、広く電源装置として利用されている。

鉄共振回路の電源装置への新しい応用として「トライポート」と名づけられた無瞬断形無停電電源装置が開発された^{(1)~(4)}。この装置の主素子の変圧器は単相定電圧変圧器と基本的には同じであるが、磁気分路を介して出力端子と並列に結合される2組の入力端子(入力ポート)を持ち、両入力ポートには商用交流電源と待機用のインバータが接続される。通常の動作状態では負荷電力は常に商用電源から供給され、停電するやいなやインバータ電源が無瞬断で電力を供給することを特長としている。この装置は鉄共振回路の特質に加え、従来の方式に比較して効率⁽¹⁾、並びに信頼性⁽⁴⁾の面でも改善が行なわれている。

トライポートの基本形は単相形であるが、大容量の場合三相方式が用いられる。この場合、単相トライポートを3個組合わせる⁽³⁾。しかし、三相方式では待機要素として三相インバータを必要とし、回路構成が複雑となる。これに対し、本稿で述べる三相無停電電源装置では変圧器を三脚磁心構造とし、2組の入力ポートのうち一方は三相鉄共振形定電圧動作を示す三相入力ポート、他方は鉄共振形単相-三相変換器として動作させるための単相入力ポートである。この場合、単

相ポートに単相インバータが接続され従来の三相方式で用いられる三相インバータは不要となる。通常の動作中では、三相定電圧装置として動作し三相入力ポートから負荷電力を供給する。停電中は、単相-三相変換器により蓄電池を電源として単相インバータから三相負荷に電力を供給する。

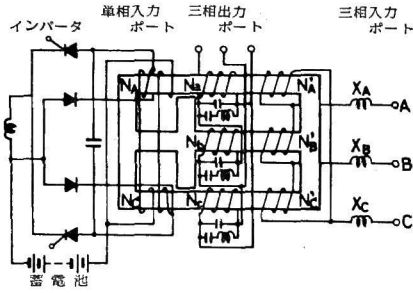
以下、等価回路を用い、変圧器の定常状態における動作解析、入出力ポート間の電力の流れ、および停電時ならびに給電再開時のインバータの制御法を説明し、そのときの波形を示す。

2. 無停電電源用変圧器とその等価回路

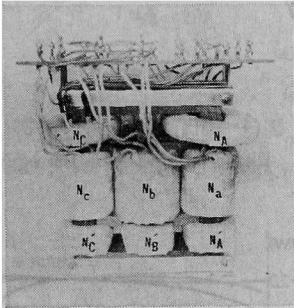
図1(a)は新しい無停電電源装置の主回路を示す。(b)図は実験に用いた変圧器の写真である。 A, B および C は三相入力ポートで3組のリアクタンス X_A, X_B, X_C と巻線 N_A', N_B', N_C' を通して三相電源と結合される。他方、直列接続された巻線 N_A, N_C は単相入力ポートに結合され、商用電源の停電時に蓄電池を電源として単相インバータにより方形波交流が入力される。この巻線はセンタタップ形となっている。中央の3組の巻線 N_a, N_b, N_c は出力巻線であり、この巻線端子は三相出力ポートに結ばれる。この巻線の部分の磁心断面は他の部分より小さく製作され、出力巻線から飽和リアクトルの特性が得られる。この出力巻線に接続したコンデンサと、この飽和リアクトルは並列鉄共振回路を構成する。共振回路と並列に接続された $L-C$ の直列共振回路は飽和リアクトルに発生した高調波を減少させるための直列共振フィルタで、第3調波に同調されている。この変圧器の動作を理解するための等価回路を図2に示す。但し、この場合単相入力ポートに加える電圧は正弦波とし、巻線 N_a, N_b, N_c 、および $N_A', N_B', N_C', N_A, N_C$ の漏れ磁束は無視す

Three-phase Uninterruptible Power Supply Using a Stand-by Inverter of a Single Phase. By Sotoshi Yamada, Member, Kazuo Bessho, Member (Faculty of Engineering, Kanazawa University), Koosuke Harada, Member (Faculty of Engineering, Kyushu University).

山田外史: 正員, 金沢大学工学部電気工学科
 別所一夫: 正員, 金沢大学工学部電気工学科
 原田耕介: 正員, 九州大学工学部電子工学科



(a) 構造



(b) 試験用変圧器

出力電圧：100V，入力電圧：100V，容量：600VA
 周波数：60Hz，幅：28cm，高さ：26cm，深さ：16cm
 重量：32kg

図1 無停電電源装置用変圧器

Fig. 1. New transformer for uninterruptible power supply (UPS).

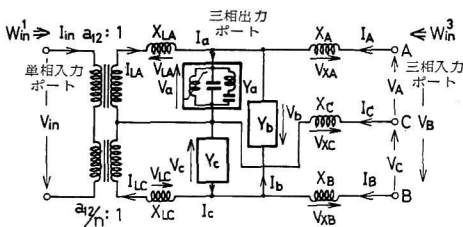


図2 簡易等価回路

Fig. 2. Simplified equivalent circuit.

る。 \dot{X}_{LA} , \dot{X}_{LC} は変圧器の2組の磁気分路のリアクタンスを示す。 \dot{Y}_a , \dot{Y}_b , \dot{Y}_c は、並列鉄共振回路と直列共振フィルタを含めたアドミッタンスである。

本装置は三相定電圧変圧器と単相-三相変換器の両機能を有する。等価回路において3組の共振回路 \dot{Y}_a , \dot{Y}_b , \dot{Y}_c とリアクタンス \dot{X}_A , \dot{X}_B , \dot{X}_C から成る回路が三相定電圧動作を示す。また、単相-三相変換器は、3組の共振回路、リアクタンス \dot{X}_{LA} , \dot{X}_{LC} と2個の理想変圧器により構成される。3組の共振回路は両機能に対して共通素子として働く。三相出力には、三相、単相入力ポートどちらからでも電力を供給できる。

3. 変圧器の定常特性

〈3・1〉 特性の解析 ここでは図2に示した等価回路により、図1の変圧器の三相および単相入力と三相出力の間の定常特性の解析を行なう。磁心の飽和を利用する鉄共振回路においては、その電圧、電流はひずみ、高調波を含むが、解析を容易にするため各波形をその実効値が同じ正弦波とし、その位相は基本波の値と同じと仮定して電圧、電流をベクトルで表す。図2の等価回路におけるリアクタンス \dot{X}_{LA} , \dot{X}_{LC} ならびに巻線 N_a , N_b , N_c が巻かれている飽和磁路の等価リアクタンスは、付録に示すように正弦波電圧を印加したときの電流実効値を測定し、これから求める。

図2に示す各電圧、電流は実効値を大きさとするベクトルとする。アドミッタンス \dot{Y}_a , \dot{Y}_b , \dot{Y}_c には並列鉄共振回路のアドミッタンスを含むため、この値は出力電圧の関数となる。

図2の等価回路から入力電流 \dot{I}_A , \dot{I}_B および \dot{I}_C に関し、

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_A & 0 & -\dot{X}_C \\ -\dot{X}_A & \dot{X}_B & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{V}_A - \dot{V}_a \\ \dot{V}_B - \dot{V}_b \\ 0 \end{pmatrix} \dots (1)$$

が得られる。但し、三相入力電源は対称三相交流とする。3個の並列鉄共振回路に流入する電流 \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c は、その端子電圧 \dot{V}_a , \dot{V}_b , \dot{V}_c の絶対値のおおのの関数としてアドミッタンス \dot{Y}_a , \dot{Y}_b , \dot{Y}_c を用いて、

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{Y}_a \dot{V}_a \\ \dot{I}_b &= \dot{Y}_b \dot{V}_b \\ \dot{I}_c &= \dot{Y}_c \dot{V}_c \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

で表わせる。三角結線を考慮し三相出力電圧に関し、

$$\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = 0 \dots (3)$$

となる。単相入力ポート側においては2個の理想トランスの作用により二次側電流 \dot{I}_{LA} , \dot{I}_{LC} に関して、

$$\dot{F} = \dot{I}_{LA} - n \dot{I}_{LC} = 0 \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{LA} &= \dot{I}_a - \dot{I}_b - \dot{I}_A \\ \dot{I}_{LC} &= \dot{I}_c - \dot{I}_b + \dot{I}_B \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

の条件式を満足する必要がある。

単相入力ポート電圧、電流は、

$$\begin{aligned} G &= \dot{V}_{in} + \left\{ a_{12} (\dot{V}_a + \dot{X}_{LA} \dot{I}_{LA}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{a_{12}^2}{n} (\dot{V}_c + \dot{X}_{LC} \dot{I}_{LC}) \right\} = 0 \dots (6) \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{in} = \dot{I}_{LA} / a_{12} \dots (7)$$

と表わされる。三相入力ポート、単相入力ポートの電力は、

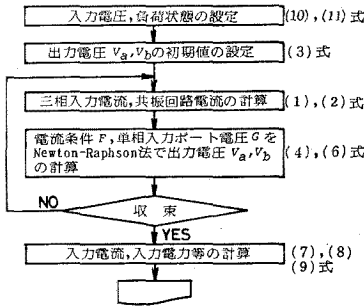


図 3 フローチャート

Fig. 3. Flow chart.

$$W_{in}^3 = Re(-\dot{I}_A \dot{V}_A^* + \dot{I}_B \dot{V}_C^*) \dots\dots\dots (8)$$

$$W_{in}^1 = Re(\dot{I}_{in} \dot{V}_{in}^*) \dots\dots\dots (9)$$

と表わされる。三相および単相入力ポートの電圧は、位相角 θ を用いて次式で表わす。

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_A &= V_{in}^3 e^{-j(2/3)\pi} \\ \dot{V}_B &= V_{in}^3 \\ \dot{V}_C &= V_{in}^3 e^{j(2/3)\pi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\dot{V}_{in} = V_{in}^1 e^{j\theta} \dots\dots\dots (11)$$

(2) 式の鉄共振回路の特性を示すアドミッタンスは端子電圧に依存し非線形を示すことから、(10), (11) 式を与えるだけでは (3), (4), (6) 式を満足する解を導くことはできない。図 3 に計算機による数値解析法のフローチャートを示す。この計算手順は、出力電圧の初期値を与えて、(4), (6) 式の複素連立方程式を Newton-Raphson 法を用いて新しい近似値の出力電圧を解き、収束するまで繰り返す。

この計算においては三相平衡出力電圧の状態を求めするため、三相出力電圧に対応した飽和脚の磁束が常に正の飽和から負の飽和までふれるようにその出力電圧の初期値を選ぶ。また、繰り返しの途中において出力電圧が飽和脚の磁束飽和値以下に対応した値になった場合には、繰り返し計算を停止してあらためて初期値を設定する。

図 4 は、図 2 の等価回路に基づき三相出力電圧が確立した状態でのベクトル図を示す。

試作した変圧器の回路定数 (付録参照) に基づいてその基本的特性を求めると。図 5 は三相入力ポートのうち B 相電圧 V_B に対する単相入力ポート電圧 V_{in} の位相差をパラメータとした無負荷特性である。但し、三相入力電圧は対称三相の定電圧源とする。同図では三相出力ポートは開放状態であるが、変圧器の損失を表わす等価損失抵抗として出力共振回路に並列に $Y_{Loss} = 0.009S$ が挿入されている。

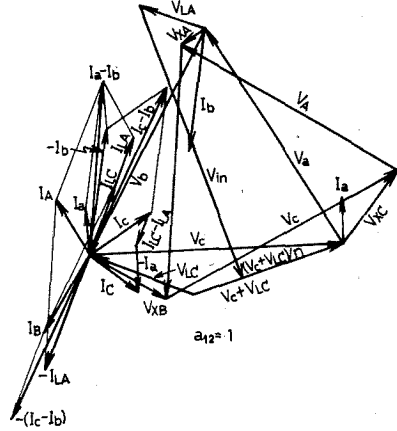


図 4 等価回路のベクトル図

Fig. 4. Phasor diagram of the equivalent circuit.

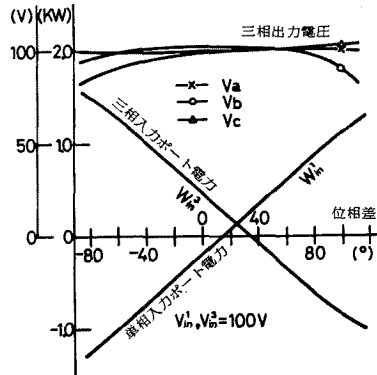


図 5 位相差 θ に対する特性 (計算値)

Fig. 5. Characteristics among one output and two input ports for phase difference θ .

位相差 θ の変化に伴って 2 組の入力ポート間の電力の流れは大きく変化する。この電力の流れの方向はおおむね位相の進んでいる入力ポートから遅れている入力ポートに流れ、両入力ポートの電力の和は内部損失 (解析では等価損失抵抗での電力) を示す。100V に設定された三相出力電圧は両入力ポート間の電力の流れの増大に伴い不平衡となり、特に、入力電力が 1kW 程度以上では不平衡は著しい。それ以下では 5% 以内である。

図 6 は、三相入力ポート電圧の変動に伴う電力の流れを示す。電圧の上昇に伴い同一位相差 θ に対し両入力ポートの電力値は増加するが、その割合は大きくなく位相に対する特性は同じ傾向を示す。すなわち、三相電源が変動しても位相差 θ によりその電力の流れは任意に制御できる。

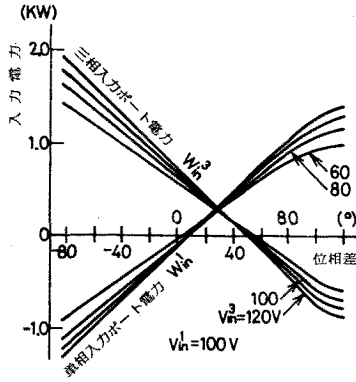


図 6 三相入力電圧をパラメータとした入力電力特性(計算値)

Fig. 6. Characteristics of input powers for three-phase input voltage as a parameter.

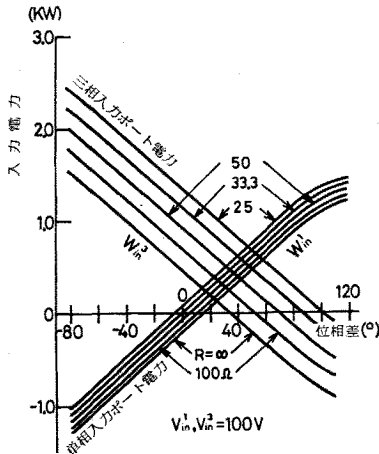


図 7 負荷抵抗をパラメータとした入力電力特性(計算値)

Fig. 7. Characteristics of input powers for resistive load as a parameter.

図 7 は、三相出力ポートに純抵抗負荷を接続した時の位相差 θ に対する電力の流れを示す。負荷の増加に伴い両入力ポートからの電力曲線は平行移動するように増大する。負荷の大小にかかわらず位相差 θ の変化に対する電力の変化量は変わらない。

2組の入力ポートと出力ポートの間の電力の流れは入力電圧、入力ポート間の位相差ならびに負荷などにより変化するが、電力の流れを調節することに関しては両入力ポート電圧間の位相差が重要である。すなわち、位相差 θ を制御することで入出力ポート間の電力の流れの方向、その量を容量内で自由に変化させることができる。また、図 1 のように単相入力ポートにイ

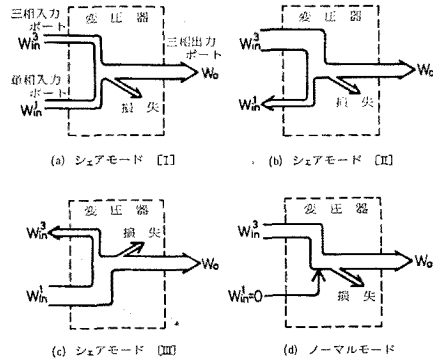


図 8 電力の流れに対するモード

Fig. 8. Modes for power flow.

ンバータを接続した場合、位相はゲート信号の位相を調節することにより容易に制御でき、その回路も比較的容易に製作できる。

図 5～図 7 の入出力ポート間の電力の流れを整理すると図 8 となる。位相差 θ により電力の流れはシエアモード(I)～(III)と変化する。シエアモード(II)(III)においては、一方の入力ポートからの電力は負荷に供給されるとともに残りの電力は他の入力ポートより流出する。シエアモード(I)では負荷電力は両入力ポートからの電力で分担する。これらのモードは位相差 θ を調整することで連続的に推移させることができる。シエアモード(I)と(II)の境を、特にノーマルモードと言う。このときの電力の流れは図 8(d) に示す。ノーマルモードでは、全負荷電力は三相入力ポートに接続された商用電源から流入し、単相入力ポートからの電力は零となっている。しかし、単相入力ポートには電源が接続され、待機状態にある。負荷の変化に伴いノーマルモードに保つためには図 7 に示すように、位相差は負荷に応じて制御されなければならない。無停電電源装置においては、ノーマルモードは正常な動作状態に対応する。

〈3.2〉 実験結果 図 1 に示す試作器を用いて等価回路で行なった結果と比較しながらその特性を検討する。図 9 は、無負荷状態で 2 組の入力ポート電圧を定格の $V_{in}^1 = V_{in}^3 = 100V$ としたときの両入力ポート間の位相差 θ に対する実験結果を示す。この実験結果と図 5 の計算値を比較すると良い一致を示すことが分る。同図の直流出力電圧は三相出力を全波整流して得た平均電圧である。同装置を整流電源として用いることによりリップルの少ない DC 無停電電源装置が得られる。

図 10 は、直流出力端に純抵抗負荷を接続したとき

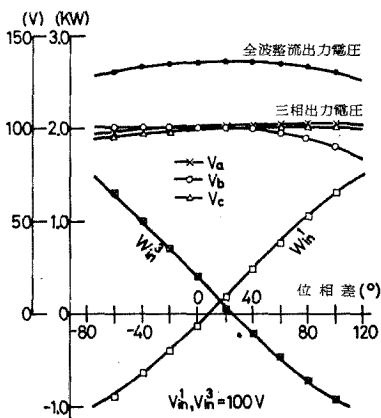


図 9 位相差 θ に対する無負荷特性 (実験値)
 Fig. 9. No-loaded characteristics for phase difference θ .

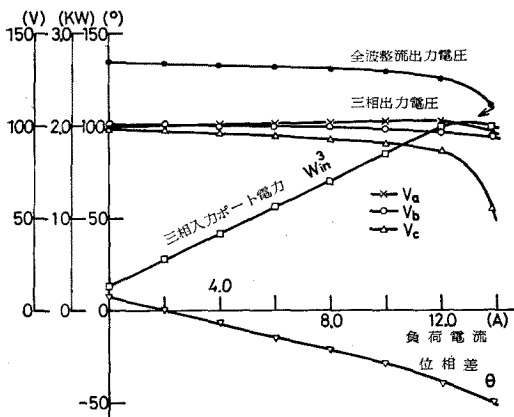


図 10 ノーマルモードでの負荷特性 (実験値)
 Fig. 10. Load characteristics on the normal mode condition.

の負荷特性を示す。但し、この負荷特性においては、図 8 (d) に示したノーマルモードを保つように位相差 θ を制御している。同図に示す位相差は負荷に対するノーマルモードに保つための値を示す。

4. 無停電電源装置の構成

以上説明した変圧器により無停電電源装置を構成した場合の電力の流れを図 11 に示す。本装置においては三相商用電源は三相入力ポートに接続されており、通常の動作状態ではその入力ポートより三相負荷電力をすべて供給する。他方の単相インバータが接続された単相入力ポートは待機状態にあり、入力電力の零のノーマルモードとして動作している。そのためにインバータの周波数は商用電源と同期させ、その位相はイ

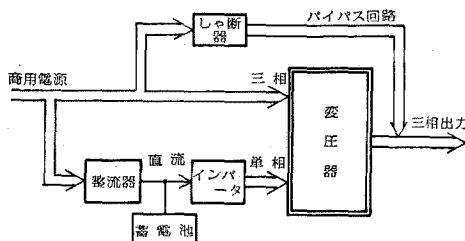


図 11 無停電電源装置の構成
 Fig. 11. Block diagram of a new uninterruptible power supply.

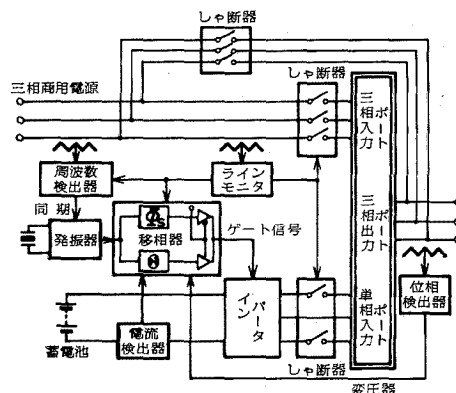


図 12 制御回路の概略図
 Fig. 12. Block diagram of control circuit.

ンバータに流れる直流電流を監視することで電力の流れが零となるように制御される。インバータの電源の蓄電池は、商用電源よりその通電中に整流器を通して十分充電された状態に保たれる。

商用電源が停電したときは、単相インバータが単相-三相変換器を通して三相負荷に全電力を供給する。また三相商用電源の電圧が降下し商用電源のみでは負荷に電力が供給できなくなったときにおいても、ノーマルモードからシェアモード (I) に移行して両入力ポートから電力で負荷電力を確保できる。図 11 のバイパス回路は、定電圧回路が垂下特性を示し電力の供給できないような重負荷を短時間支えることが必要な場合、商用電源を直接負荷に結ぶ予備回路である。

図 12 は図 11 の電力の流れを持つ無停電電源装置の制御回路のブロック図を示す。この回路は、基本的には単相出力の従来のトライポートシステムと同一であるが⁽²⁾、ここでは位相制御回路が与えられている。ノーマルモードの動作時においては、内部発振器 OSC は商用電源周波数に同期する。また、インバータからの電力を零近く保つため、直流電流検出器からの信号により位相器 θ でその位相角 θ が調整される。商用

電源が停電したときには、発振器 OSC は同期から外れ 59.87Hz の固有の周波数信号を発生する。この周波数は、水晶発振器の発振周波数を分周することにより得られる。このとき、位相は次章にて説明するように出力電圧の波形の過渡現象を少なくするために位相を瞬時に推移する必要がある。この動作は位相器を θ から ϕ_s へ切り換えることで達成される。この操作手順により、三相出力電力は単相インバータからの電力に無瞬断で切り換えられる。

商用電源が復帰したとき、商用電源のラインモニタ回路からの信号により、周波数検出器が動作し発振器 OSC は再同期される。その後、位相器は ϕ_s から位相制御が可能な位相器 θ に再度切り換えられ、三相商用電源は再び投入されノーマルモードの状態に保持される。

以上は概略的に無停電電源装置のシステム構成を示したが、停電および電源復帰の瞬時の過渡特性、動作原理は次章に示す。

5. 過渡特性

〈5・1〉 商用電源停電時 三相商用電源が通電中、待機素子の単相インバータが接続された単相入力ポートは、商用電源が停電、または異常状態となるや全負荷電力を供給する。

鉄共振回路を応用した機器においては入出力間において負荷の増大に伴い出力電圧は入力電圧に対して位相遅れを生ずる。図 13 に示す ϕ_1 はノーマルモードで動作中の三相入力ポートに対する出力ポート電圧の位相遅れを示す。 ϕ_2 は三相入力ポートが開放された状態、すなわち単相入力ポートのみが接続されているときの入力電圧 V_{in} に対する三相出力中 b 相電圧 V_b の位相遅れを示す。ノーマルモードで動作中の単相インバータは図 10 に示すような位相差を生じるように位相制御されている。そのため、停電した瞬間、そのときの負荷に対応した出力電圧と入力電圧の位相差が ϕ_1 に一致しないため出力波形にひずみを生ずる。このとき、波形にひずみを生じることなく出力電圧を瞬時に三相入力ポートから単相入力ポートに移すためには、インバータの位相を瞬時に出力電圧 V_b に対応した ϕ_2 の位相差となるように位相を移すことが必要であるが、このための移相角は図 13 に示す ϕ_s で与えられる。図 12 のブロック図において、停電の瞬間、移相器 θ から ϕ_s が設定された位相器 ϕ_s へのゲート信号の切り換えが行なわれる。図 14 は、商用電源を開放したときの波形である。停電の瞬間、波形のひずみはほとんど見受けられず、特に振幅の変化は生じな

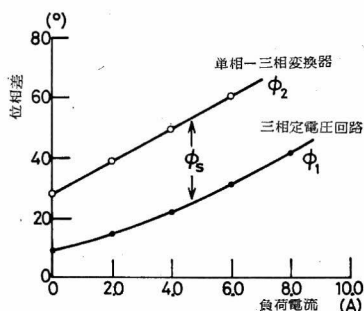


図 13 三相定電圧回路、および単相-三相変換器における入出力電圧間の位相差特性
Fig. 13. Characteristics of each phase difference between an output and an input voltage on a three-phase constant voltage transformer and a single to three-phase converter.

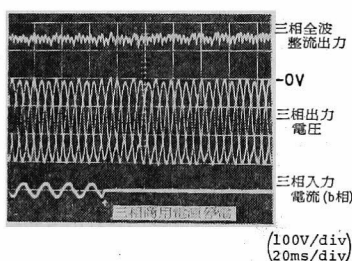


図 14 三相電源停電時の波形

Fig. 14. Transient waveforms as a three-phase source fails.

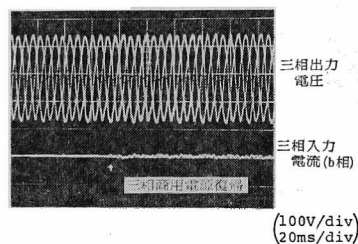


図 15 三相電源再開時の波形

Fig. 15. Transient waveforms as a three-phase source returns.

いことが分る。

〈5・2〉 商用電源復帰時 商用電源が復帰すると再びノーマルモードの状態に動作を移さなければならない。復帰時には停電時と異なり通電を検出した後に一定期間をかけて推移を行なうことで出力電圧の過渡的なひずみを抑制できる。

まず発振器 OSC は商用電源と再同期される。その後、三相出力電圧と商用電源が同位相になるようにイ

ンバータの位相を制御する。この操作終了後、しゃ断器を ON にして三相商用電源が再投入される。このとき、三相商用電源からの入力電力は零であり、過渡現象はほとんど生じない。この瞬間の波形を図 15 に示すが、波形のひずみはほとんど観測されない。再開路後、ノーマルモードの状態に推移するためインバータのゲート信号の位相を移す。この位相の調整は期間が長いほど波形の過渡現象に与える影響は少ない。

同装置は鉄共振回路に基づいているので、入力電圧急変時、負荷急変時などに対する応答は、鉄共振形定電圧変圧器などと同じく負荷時では 1, 2 サイクル以内の応答を示す。

6. ま と め

以上、三相、単相の二つの入力と三相出力を持つ鉄共振形変圧器の構成と動作について説明した。これにより三相無停電電源装置を構成すれば、蓄電池、単相インバータを待機素子とする全構成の簡略化が可能となる。

同装置の定常特性を解析した結果、両入力に電源が接続された場合には両電源の位相差が特に入力電力の流れた影響を持ち、この位相差を制御することにより各入力からの電力量、またはその流れの方向を変化させることができる。

また、無停電装置としての応用に、三相電源の停電により単相インバータに切り換える際の過渡現象ならびに三相商用電源が復帰するときの状態を実験的に調べ、インバータの位相を適切に制御することにより過渡現象のほとんどない無瞬断の無停電電源装置が得られることが分った。

この変圧器の出力電圧は、磁心の飽和特性のみにより定電圧特性を得ているために、三相出力電圧は正確には平衡三相とはならない。これらの点については、検討中である。(昭和 56 年 12 月 22 日受付)

文 献

- (1) J.J. Suozzi: "System consideration of Triports" *Proc. INTELEC 78*, 46 (1978-10)
- (2) R. Rando: "AC Triport-A new uninterruptible AC power supply", *ibid.*, 50 (1978-10)
- (3) C.W. Boettcher: "A 15kVA, three-phase Triport-A new approach to UPS", *ibid.*, 59 (1978-10)
- (4) 原田: 「新しい無停電電源システム——トライポート——」
電学誌 100, 41 (昭 55-1)

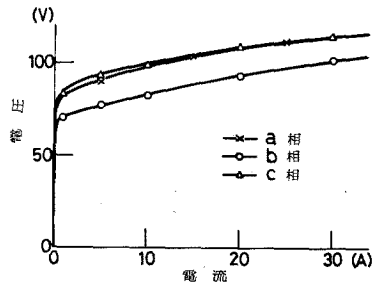
- (5) 別所・山田: 「直列巻線形単相-三相変換器における相順の安定化と CAD」電気学会磁気応用研 AM-78-18 (昭 53)

付 録

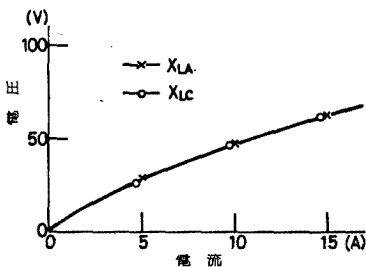
簡易等価回路における素子の値 図 2 の簡易等価回路の 3 組の鉄共振回路の飽和リアクトル、およびリアクタンス X_{LA}, X_{LC} の特性は、変圧器から実測される。各脚の可飽和リアクトルはその出力巻線から正弦波電圧を印加して電流値を実効値で測定され、その結果を付図 1 に示す。磁気分路の特性である X_{LA}, X_{LC} のおのおのは N_A, N_C 巻線より他の巻線は短絡して測定され、出力巻線に変換する。この結果を付図 2 に示す。

共振回路用コンデンサは、実際にはコンデンサ巻線を設けることにより、その耐電圧に適した値に選ばれている。直列共振回路のインピーダンスも含めて出力巻線での等価な容量値は次の値である。

$$C_a = 263 \mu F, C_b = 732, C_c = 342$$



付図 1 磁心の各脚の等価飽和リアクトル特性
app. Fig. 1. Characteristics of equivalent saturable reactors of each leg on 3-legged transformer.



付図 2 磁気分路の特性
app. Fig. 2. Characteristics of equivalent reactors of magnetic shunts.