

正弦波インバータ発電システムの構築

Development of Sine Wave Inverter Generating System

藤 井 茂* 清 水 元 寿* 中 村 政 史*
Shigeru FUJII Motohiro SHIMIZU Masashi NAKAMURA

要 旨

近年高度の電子機器の非常用電源などとして、波形整形ユニット無しで直接使用できるエンジン発電機が望まれており、このニーズに応えるため正弦波インバータ発電システムを開発した。

この発電システムは、出力電圧と電流を検出し制御部にフィードバックすることにより、負荷変動に対しても正確な正弦波および電圧を維持できる。さらに、他の同じシステムと同期させるため相対電流を検出し、出力周波数の微調整を行った。

以上の結果、このシステムを搭載したエンジン発電機は出力周波数がエンジン回転速度に依存しないため、高速駆動が可能となり大幅な小型軽量化を実現した。また、他の同じエンジン発電機との並列運転が可能となった。

ABSTRACT

In recent years, there has been a demand for engine generators that can be used as emergency power supplies for sophisticated electronic devices without a wave-form restoration unit. In response to this demand, a sine wave inverter generating system has been developed.

This system keeps precise sine wave and voltage output even under changing load conditions by feedback of voltage and current to its control sections. The system also detects the relative current discrepancy between two identical systems and adjusts output frequency finely in order to synchronize.

When this system is installed to an engine generator, output frequency does not depend upon engine speed. As a result, high speed operation is realized and a great reduction in size and weight is achieved. Parallel operation of identical engine generators is also provided.

1. まえがき

広く使われているエンジン発電機は、電機子巻線と界磁巻線から構成されるジェネレータを、エンジンで直接駆動するものである（以後、従来エンジン発電機という）。

従来エンジン発電機で出力する周波数はエンジン回転速度で自律的に決定される。一般的に2極のエンジン発電機の場合には、周波数が50Hzのものは3000rpm、60Hzのものは3600rpmでエンジンは回転している。したがって、従来エンジン発電機の50Hz仕様は60Hz仕様より出力が低い。

また、従来エンジン発電機ではエンジンのガバナ特性のために負荷が変化すると周波数も変化し、出力波形は正確な正弦波とはならない。このことによって照明がちらついたり、使用できない機器もあった。すなわち、従

来エンジン発電機の出力する電圧、周波数、波形といった電気の質は商用電源に比べて低い。

1987年に販売を開始したEX300は、インバータ技術を採用しエンジン回転速度に関係なく一定の周波数を出力し、高回転速度で高出力の小型エンジンと組み合わせて小型軽量化が図られた^{1) 2)}。しかしこのエンジン発電機の出力は矩形波であるため、やはり使用できない機器もあった。

そこで従来エンジン発電機を持つ上記の問題を解消するために、正弦波インバータ発電システムを開発し、これを搭載する新しいエンジン発電機EX500の販売を1996年3月から開始した。この小型軽量化された新しいエンジン発電機EX500の外観をFig. 1に示す。

新しいエンジン発電機は新たな制御を導入し、商用電源並の電気の質を発揮することも可能となった。さらに、

この新しいエンジン発電機では、一台のエンジン発電機では出力が不足する場合に複数のエンジン発電機で高い出力を得る並列運転が可能となった。なお、従来エンジン発電機は個々の発電機がそれぞれ出力周波数を制御しているので、このような並列運転はできない。

本論文はこの新しいエンジン発電機に採用された、正弦波インバータ発電システムについて記述する。



Fig. 1 External View of EX500

2. システム構成

Fig. 2 に示すように、正弦波インバータ発電システムはエンジンで駆動されるジェネレータと、ジェネレータで発電した出力を正弦波へ変換する電力部と、変換を制御する制御部で構成される。制御部では出力する波形の基となる基準波形（正弦波）信号を形成し、電力部では制御部からの基準波形を増幅し正弦波に変換する。増幅は約 20kHz の搬送波を使用するパルス幅変調（Pulse Width Modulation；以後 PWM という）方式のアンプで行う。

2. 1. ジェネレータ

ジェネレータは、三相多極のステータをもつアウトロータ式のマグネットジェネレータである。ジェネレータからは高周波の三相交流が出力され、後述する整流器とインバータによって正弦波を出力する。ロータはエンジンのフライホイールも兼ねていて、軽量化に寄与している。

2. 2. 電力部

電力部は、大きく次の3つに分けることができる。

(1) 直流電源部

ジェネレータからの高周波の三相交流を、ダイオードとサイリスタで整流し、コンデンサで平滑する。サイリスタの導通角を制御することによって、一定の直流電圧

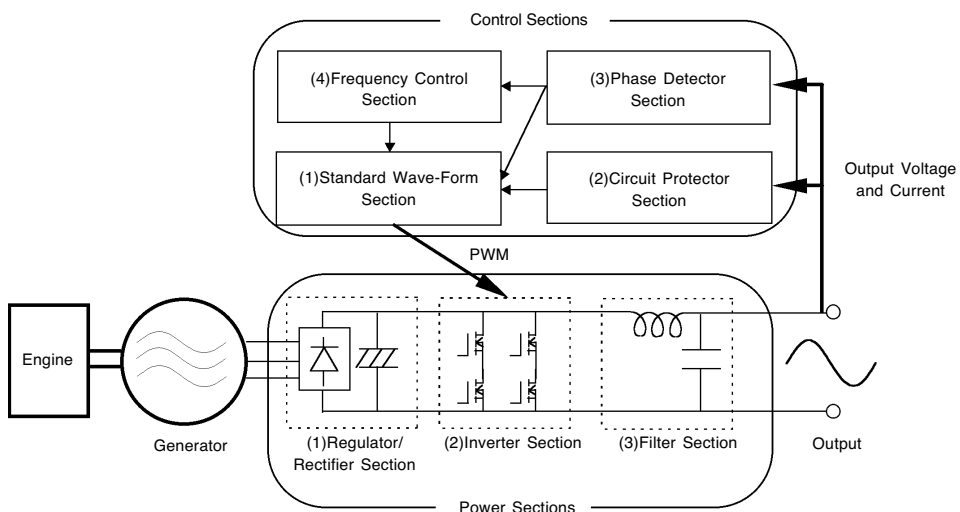


Fig. 2 Structure of Sine Wave Generating System

を得る。入力が高周波の三相交流なので、リップル分の除去がしやすく、正弦波出力の電圧安定に貢献している。

(2) インバータ部

制御部からの基準波形信号にしたがって直流電圧を PWM 変調する。パワー MOS FET を 4 個フルブリッジ接続し、制御部からのパルス信号に基づきスイッチングする。これによって得る信号は、正弦波成分を含んだ大電力信号となる。

(3) フィルタ部

インバータ部で得た信号を復調する。チョークコイルとコンデンサから構成される LC のローパスフィルタである。このフィルタによって PWM 変調の搬送波成分が取り除かれ、50 または 60Hz 正弦波が出力される。

2. 3. 制御部

制御部は、大きく次の 4 つに分けられる。

(1) 基準波形信号形成部

出力波形の基となる 50 または 60Hz の正確な正弦波をつくる。そして、約 20kHz の搬送波で PWM 変調しインバータ部をドライブする。さらに、出力された波形をフィードバックし、負荷の影響による波形歪みを抑制し、正確な正弦波を保つように制御する。

(2) 保護回路部

過電流と過電圧の 2 つの保護回路がある。過電流保護は所定値以上の電流が出力されると、タイマがスタートし、所定時間後出力を停止する。いわゆる、ブレーカ機能である。リセットするには、一旦エンジンを停止させた後、再始動させる。過電圧保護は負荷の影響や、後述の並列運転の同期ずれによって、内部電圧が上昇することがあるので、これも電圧が所定値以上となると同じく出力を停止する。

(3) 位相検出部

出力している電流の位相が、電圧に対して遅れているか、進んでいるかを検出する。並列運転を行う場合や、負荷による電圧変動を抑制するための検出である。詳細は後述する。

(4) 周波数制御部

出力の周波数はエンジンの回転速度には依存しないが、並列運転時に同期するため周波数の制御を行う。詳細は後述する。

Table 1 Voltage Variation Rates of Conventional Generator

Current Loading 15A

	Resistance Load ($\cos\phi=1$)	Capacitance Load ($\cos\phi=0.25$)	Reactance Load ($\cos\phi=0.4$)
Voltage Variation Rate at Rated Load	-6.6%	+42.0%	-11.0%

3. 制御

3. 1. 力率負荷

エンジン発電機が接続される機器は多種類におよぶが、どのような機器でも正常に動作させることが必要である。例えば力率 0 の進相成分だけのコンデンサを接続される場合も考えられる。

従来エンジン発電機の場合、同じ出力電流でも、出力電圧は力率によって大きく変動する。これは、商用電源とは異なり、エンジン発電機では負荷に対するジェネレータの容量が十分に大きくないからである。従来のエンジン発電機の力率負荷特性の一例を Table 1 に示す。

従来エンジン発電機では、リアクタ（遅相）負荷では出力電圧が低下し、キャパシタ（進相）負荷では大幅に上昇するのがわかる。このとき負荷が正常に動作しなくなることもあり、最悪の場合は負荷を破壊することもある。

負荷にかかる電圧 V と発電機の出力電圧 V_0 の関係は次式で表され、負荷の力率による出力電圧の変化は以下のように説明できる。

$$V = V_0 \left| \frac{\dot{Z}}{j\omega\dot{L} + \dot{Z}} \right| \quad (1)$$

ここに $\dot{Z}$: 負荷インピーダンス [Ω]

ω : 角速度

$\dot{L}$: 電機子巻線インダクタンス [H]

$$\text{したがって} \left| \frac{\dot{Z}}{j\omega\dot{L} + \dot{Z}} \right| = A \quad \text{とおくと}$$

$$V = AV_0 \quad (2)$$

抵抗負荷およびリアクタ負荷は $A \leq 1$ なので $V \leq V_0$ となる。

Table 2 Voltage Variation Rates of Sine Wave Inverter Generator

Current Loading 15A			
	Resistance Load ($\cos\varphi=1$)	Capacitance Load ($\cos\varphi=0.25$)	Reactance Load ($\cos\varphi=0.4$)
Voltage Variation Rate at Rated Load	-6.2%	-1.7%	-1.4%

また、キャパシタ負荷は $A \geq 1$ なので $V \geq V_0$ となる。

すなわち、抵抗およびリアクタ負荷に対しては、出力電圧が低下し、キャパシタ負荷に対しては、出力電圧が上昇することが説明できる。

正弦波インバータ発電システムでは、このような出力電圧変動を最小限にするため、波形のフィードバック（波形の変動を抑制することにより、電圧の変動も抑制する）を行っていることは既に述べた。これに加えて、Fig. 2の位相検出部中に力率補正回路を設け、さらに積極的に電圧変動を抑制している。

この補正回路を用いた新しいエンジン発電機の力率負荷に対する電圧変動率の例を Table 2 に示す。これを Table 1 と比較すると、新しいエンジン発電機は従来エンジン発電機に対して、電圧変動率が大幅に改善されていることがわかる。

次に補正回路の動作を説明する。まず電流波形を検出し、この波形を90度進相させる。得られた波形を、電圧波形とミックスし、これを補正值としてフィードバックし、正弦波の基準波形信号とする。

これを式で表すと次のようになる。

$$X(\varphi) = \sin\theta + A \sin\left(\theta + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

X : 基準波形信号

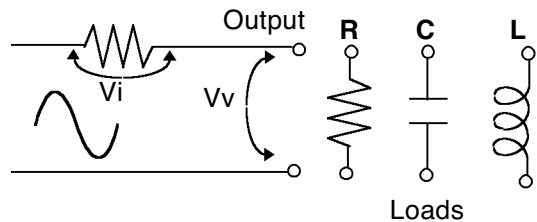
$\sin\theta$: 電圧波形

A : 混合比

φ : 位相角（電流の電圧に対するずれ角）

(3) 式の具体例を、抵抗、キャパシタ、リアクタ負荷に分類し Fig. 3 に示す。 V_v は電圧波形、 V_i は電流波形である。 V_{90} は V_i を90度進相させた波形、 V_x は目標波形 $X(\varphi)$ である。ただし、本回路の効果をわかりやすくするため、混合比 $A = 1$ とした。

Fig. 3 からわかるように、基準波形信号は、抵抗、およびリアクタ負荷の場合には大きくなり、キャパシタ負荷に対しては小さくなる。このようにして、出力電圧の補正制御がリアルタイムで可能である。



V_v : Output Voltage Wave-Form $\cdots \sin\theta$

V_i : Output Current Wave-Form $\cdots \sin(\theta + \varphi)$

V_{90} : 90 Degrees Advanced from V_i $\cdots \sin(\theta + \varphi + \frac{\pi}{2})$

V_x : Target Wave-Form

(Standard Sine Wave-Form Signal) $\cdots X(\varphi)$

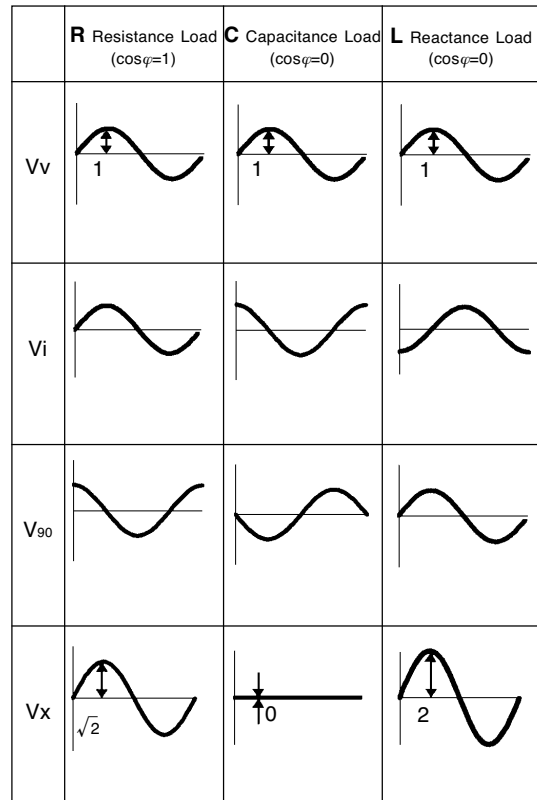


Fig. 3 Example of Power Factor Correcting Control

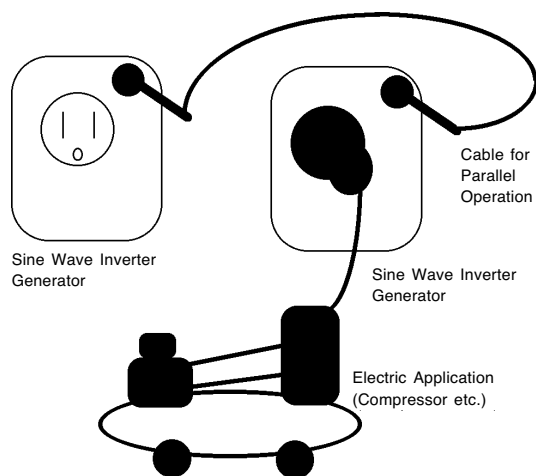


Fig. 4 Parallel Operation of Sine Wave Inverter Generator

3. 2. 並列運転

従来エンジン発電機では、出力の周波数が自律的にエンジンの回転速度で決定されるため、同期して並列運転を行うことは事実上不可能である。

正弦波インバータ発電システムを搭載した新しいエンジン発電機では、Fig. 4のように、エンジン発電機同士を専用のケーブルで接続するだけで、自動的に同期し、2台分の電力を出力することができる。これは、エンジン発電機の位相を互いに合わせる、すなわち、出力の周波数を制御することが可能であるからである。以下にその動作を説明する。

2台のエンジン発電機を“Ａ機”および“Ｂ機”と呼ぶ。

新しいエンジン発電機を起動するとき（単独で運転する場合）、エンジンが一定回転速度以上になると、正弦波発振器がスタートして電力が出力される。並列運転の場合Ａ機の起動は、Fig. 5のように、エンジンが一定回転速度以上になったあと（図中 a 点）、既に起動しているＢ機の出力にタイミングを合わせて正弦波発振器がスタートし、電力が出力される（図中 b 点）。すなわち、Ａ機がまだ出力していないのに、電圧波形検出部がＢ機の出力波形からの電圧波形を検出すると、Ａ機の発振器のスタートタイミングはＢ機の波形で決定される。

なお、電圧波形検出部に波形が検出されない場合は、単独運転と判定し起動する。

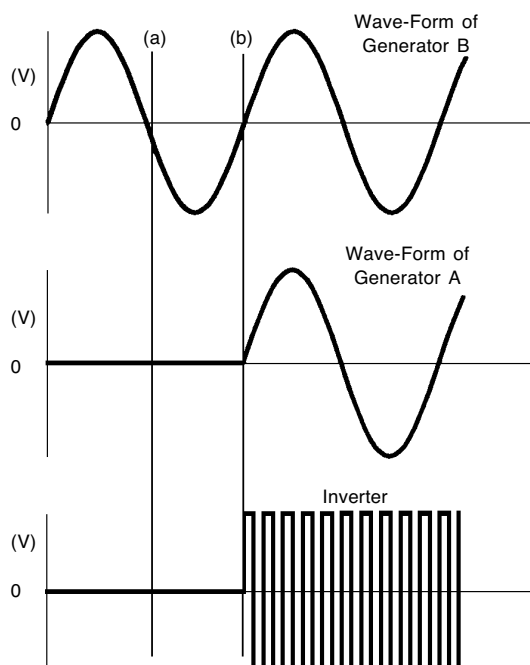


Fig. 5 Starting Timing in Case of Parallel Operation

2台がタイミングを合わせて出力を開始していても、エンジン発電機の個体差によって完全に同期を維持することはできない。出力の同期ずれは、Ｂ機の出力がＡ機へ流入し、内部電圧の上昇により、内部素子の破壊に至る可能性がある。このような不具合を防止するため本システムでは、エンジン発電機同士が互いに出力を合わせようと歩み寄る。

互いのエンジン発電機の出力の同期ずれ、すなわち、出力電圧の位相差によって、Fig. 6のように位相差のある電流が2台のエンジン発電機間に生じる。Ａ機の位相がＢ機より遅れている場合には、電流位相は電圧位相に対して大きな遅れが生じる。

また、Ａ機がＢ機より進んでいる場合には、電流位相は電圧位相に対して大きな進みが生じる。

したがって、電圧と電流の波形を検出し、位相が遅れているか、進んでいるかを判別することによって、Ａ機がＢ機に対してどちらに在るか判断することができる。この情報をもとに互いに出力周波数をわずかに変化し、同期する。

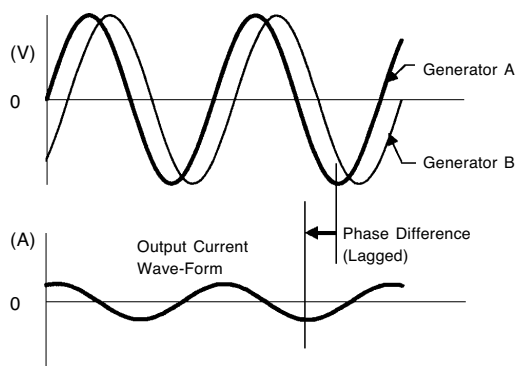
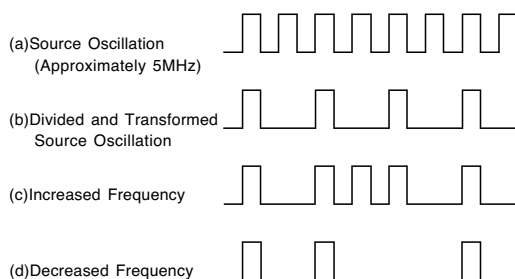


Fig. 6 Resultant Current

例えば、50Hzのエンジン発電機同士で並列運転をした場合、A機がB機に対して遅れていたとする。同期がとれるまで、A機は49.99Hz、B機は50.01Hzで出力し続ける。

具体的制御方法は、Fig. 7のように行われる。出力周波数（50または60Hz）は、水晶の原発振（約5MHz）、すなわちFig. 7(a)を分周して得る。まず(a)を分周変形し、(b)のパルスを得る。出力周波数を変えるときには、パルスを(c)または(d)に示すようにある一定周期（例えば1kHz）に1回パルスの増減を行う。これをを分周すると上記のように僅かに出力周波数が変化する。また周期を変えれば、出力周波数の変化幅が変わる。

このように、新しいエンジン発電機は常に相手側に同期するように互いに制御するので、複数の並列運転が可能である。



e.g. Frequency from Divided (b) / (c) / (d) :
50.00 / 50.01 / 49.99 Hz

Fig. 7 Fine Adjusting of Output Frequency

Table 3 Comparative Specifications of EX500 and EB550

Model		EX500		EB550	
Operating Mode (Engine R.P.M.)		Power (4500)	Silent (3000)	60Hz (3600)	50Hz (3000)
Rated Output [VA]		450	200	550	450
Voltage	Moment [%]	Max.6		Max.15	
Variation	Stability [%]	Max.5		Max.10	
Rate	Stabilizing Time [sec]	Max.1		Max.3	
Frequency	Moment [%]	Max.1		Max.10	
Variation	Stability [%]	Max.1		Max.5	
Rate	Stabilizing Time [sec]	Max.0.1		Max.3	
Wave-Form	Linear Load [%]	Max.5		-	
Distortion	Nonlinear Load [%]	Max.10		-	
Dry Weight [kg·f]		8.5		22.0	
Dimensions L×W×H [cm]		36×19×30		41×27×37	
Volume [ℓ]		20		41	
Noise Level [dB(A)]		58	50	56	54

4. EX500 と従来エンジン発電機

正弦波インバータ発電システムを搭載した新しいエンジン発電機EX500は、前述のインバータエンジン発電機EX300をベースとしたモデルである。

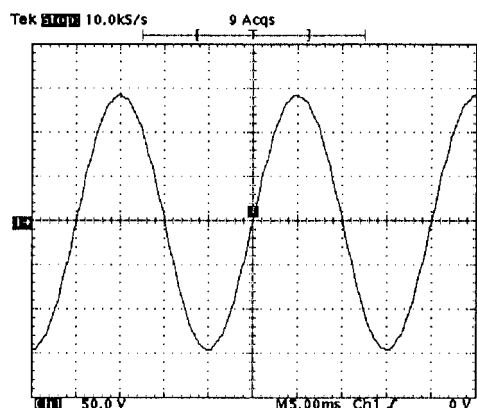
EX500の特徴は、小型軽量、高出力であり、EX300と同様、2段階の出力切り替えが可能である。さらに、波形歪みの少ない高品質な電気を出力し、専用のケーブルの使用により並列運転も可能である。

ほぼ同出力の従来エンジン発電機EB550と新しいエンジン発電機EX500の諸元比較をTable 3に示す。

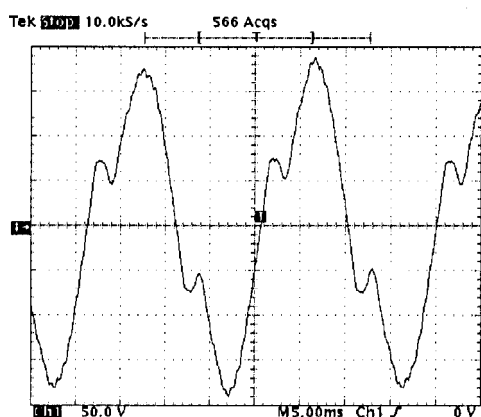
電圧変動については、新しいエンジン発電機は前述の制御回路によって制御されるため、従来エンジン発電機に対して優れた性能を示すことがわかる。

周波数変動は、原発振に水晶を使用しているインバータ方式の採用によりエンジンの回転速度に依存しないため、変動はきわめて少ない。

EX500とEB550の出力波形をFig. 8に示す。どちらの場合も定格出力時の波形である。EX500の歪み率は1.3%であり、商用電源並の波形を出力していることがわかる。



(a)EX500



(b)EB550

Fig. 8 Output Wave-Form of EX500 and EB550
(Rated Output:50Hz, 4.5A)

EX500の重量および容積をEB550と比較すると、重量は約1/3、容積は約1/2となり、他の同出力帯のエンジン発電機の中では最も小型軽量である。

出力周波数がエンジン回転速度に依存しないため、目的に合わせてエンジン回転速度をパワーモード（定格450VA出力）とサイレントモード（定格200VA出力）の2段階に変えることが可能となり、サイレントモードでは50dB(A)の極めて低騒音で運転できる。

5. まとめ

新たに開発した正弦波インバータ発電システムを搭載することによって、次の特徴を持つエンジン発電機が開発できた。

- (1) どのような種類の負荷に対しても正確な正弦波の出力を維持することが可能で、電圧および周波数変動率が低いことにより、高度の電子機器の電源となり得る商用電源並の電気の質を確保できた。
- (2) 出力周波数がエンジンの回転速度に依存しないため高速駆動が可能となり、従来エンジン発電機に比べ、重量が約1/3、容積が約1/2と大幅な小型軽量化が実現された。また、50Hzの定格出力も60Hzの場合と同じ出力にすることができた。
- (3) 出力周波数の微調整により、他の同じエンジン発電機との並列運転が可能となった。

参考文献

- 1) 藤井茂、清水元寿、為近隆男：携帯発電機EX300の開発、HONDA R&D Technical Review Vol.2 (1990) , 59-66
- 2) S. Fujii, “Development of Low Noise Portable Generator for Home Use” SAE Paper 891802 (Presented at the SETC '89)

■ 著 者 ■



藤 井 茂



清 水 元 寿



中 村 政 史