

軽量コンパクトな正弦波インバータ発電機 「EU16i」の開発

Development of Lightweight, Compact Sine Wave Inverter-Equipped EU16i Generator

河内 敏文* 清水 元寿*
Toshifumi KOUCHI Motohiro SHIMIZU
広瀬 忠文* 杉本 幸男*
Tadafumi HIROSE Yukio SUGIMOTO

要 旨

ABSTRACT

定格出力 1.6kVA のクラスとしては、最も軽量コンパクトな正弦波インバータ発電機「EU16i」を開発した。本発電機は、消費電力の大きい家電製品が使用できる出力と優れた可搬性を有するとともに、低騒音、低燃費、低排気エミッション、そして波形ひずみや周波数変動の少ない高品質な電気性能を達成している。高効率で軽量の高速多極オルタネータと正弦波インバータシステムによりエンジンの高回転化と小排気量化が可能となり、さらに軽量樹脂フルカバー構造により、従来機に対し約 1/2 の重量を達成した。また、負荷連動自動回転数制御の電子ガバナ、高効率発電システム、二重防音構造の採用により、従来機に対し実用負荷域で 6～8dB(A)の騒音低減と 20～40%の燃費低減を達成した。規制対応としては、EU 騒音指令 STAGE II及び CARB Tier II/EPA Phase II排気エミッション規制をクリアした。また、この「EU16i」は、北米仕様としては「EU2000i」、他地域への輸出仕様としては「EU20i」の呼称で全世界に販売している。

The EU16i sine wave inverter-equipped generator was developed as the most lightweight and compact in the 1.6 kVA-rated output class. This generator has both superior portability and output capable of powering household appliances with their large power consumption. It also provides low noise level, low fuel consumption, low exhaust emissions, and high-quality electrical performance with low waveform distortion and frequency variation. The efficient and lightweight high-speed multi-pole alternator and sine wave inverter system enable the engine to achieve higher speed and smaller displacement. With a frame that is fully covered with lightweight resin, this generator achieves a weight approximately one-half that of conventional equipment. It also employs an electronic governor with automatic load-dependent speed control, together with an efficient generating system and a two-tiered noise dampening system. These allow this generator to achieve a reduction of 6 - 8 dB (A) in noise level over the practical loading range and improvement of 20 - 40% in fuel consumption compared to conventional generators. The EU16i generator clears the requirements of the EU NOISE DIRECTIVE STAGE II as well as the CARB Tier II/EPA Phase II exhaust emission regulations. The EU16i is marketed worldwide as the EU2000i North American version and as the EU20i version for export to other regions.

1. まえがき

ポータブル発電機は、レジャー、ホームバックアップ等の個人ユースをはじめ、業務用、非常用の電源として、手軽に電気が取り出せる便利さから世界中で普及している。

一方、電気機器は近年コンピュータ等の高度電子制御(マイコン制御)を搭載した商品が広く普及してきており、それに伴って発電機には幅広い機器に適合できる高品質な電気

性能が求められるようになってきた。

また、それだけでなく、環境に対する社会的関心の高まりから、発電機にも低騒音、低燃費、低排気エミッションに対する要求が高まっており、各国での環境に関する規制がますます厳しくなっている。騒音に関しては EU 騒音指令が 2002 年から STAGE I、そして 2006 年から STAGE IIが予定されており、また排気エミッションに関しては 2001 年から EPA(Environmental Protection Agency) Phase

IIに続き、2002年からCARB(California Air Resource Board) Tier IIが施行される。

従来型の発電機は、二極界磁回転型発電システムを搭載しているため、エンジン回転数と出力される交流周波数の同期の関係からエンジン回転数は、50Hz仕様は3000rpmに、60Hz仕様は3600rpmに制約を受ける。このためエンジン及び完成機の容積、重量とも大きく重くなり、さらに50Hz仕様は60Hz仕様より発電出力が15%程度低くなっていた。これにより、消費電力の大きい家電製品が使用できる出力帯(1500～1800VA)の他社製を含めた従来型発電機は、重量が30～40kgあり一人で持運ぶには重く、Hondaにはこのクラスでのポータブルタイプの発電機はなかった。

そこで、本稿では、軽量、高効率のインバータ発電システムと二重防音樹脂フルカバー構造の採用により、クラス最軽量のポータブル発電機 EU16i を開発したので紹介する。

2. 開発コンセプト

EU16i は、1998 年から量産している EU9i^{(1), (2)}で採用した正弦波インバータ技術を核として、可搬性の優れた重量、サイズでありながら、一般家庭で使用されている大型の電気製品が使える出力帯のポータブル発電機を開発コンセプトとした。さらに発電機として高い商品力を目指し、低騒音、低燃費、低排気エミッション、高品質電気性能を狙った。

開発の目標は以下の通りである。

(1)一般家庭で使用されている大型の電気製品に対応でき

る出力で、手軽に持運びができるサイズ、重量であること。

(2)コンピュータ等の電子機器にも対応できるよう、波形ひずみや周波数変動の少ない高品質な電気性能を有すること。

(3)夜間、キャンプ等の様々な状況に対応できる騒音低減と長時間運転可能な燃費低減を達成すること。

(4)環境規制に適合していること。

- ・ CARB Tier II / EPA Phase II 排気エミッション規制
- ・ EU 騒音指令 STAGE II

3. 主要諸元と基本構造

従来型の同クラス発電機 EM1500X は、両手または2人で持運ぶパイプフレーム構造であったが、EU16i は、樹脂フルカバーとし、片手で容易に持運びが可能な薄型構造とした。EU16i 及び EM1500X の外観を Fig. 1 に、また、主要諸元の比較を Table 1 に示す。



Fig. 1 External view of EU16i and EM1500X

Table 1 Comparison of specifications with EM1500X

Model			EU16i	EM1500X	
Engine	Type		4-stroke OHC	4-stroke OHV	
	Displacement (cm³)		98	163	
	Speed (rpm)		* 3 000-5 000	3 000	3 600
			☆ 4 300-5 000		
	Operating noise level (dB (A) at 7m)		* 53-59	63	64
☆ 59					
Generator	Type		Multi-pole field rotary	Double-pole field rotary	
	Excitation method		Magneto	Field current regulation	
	Voltage regulation method		※ PWM	# AVR	
	AC frequency (Hz)		50/60	50	60
	Max. AC output (VA)		2 000	1 500	1 800
	Rated AC output (VA)		1 600	1 300	1 500
	Voltage variation rate	Momentary	10% max.	15% max.	
		Stability	6% max.	7% max.	
	Frequency variation rate	Momentary	1% max.	15% max.	
		Stability	1% max.	7% max.	
	Waveform distortion	Linear load	5% max.	25% max.	
Generating efficiency		81%	78%		
Dimensions	Dimensions L × W × H (mm)		510 × 290 × 425	505 × 420 × 420	
	Dry weight (kg)		21	41.5	

* : ECO-THROTTLE ON
☆ : ECO-THROTTLE OFF

※ PWM = Pulse width modulation
AVR = Auto voltage regulator

EU16i は、出力される交流周波数がエンジン回転数の制約を受けないインバータシステムを採用し、従来機に対しエンジンを高回転化及び小排気量化することによりエンジン本体の小型・軽量化を図った。また、冷却性能と遮音性能の向上及び軽量化を考慮し、従来フライホイールが取り付け位置にフライホイール兼用のアウトロータ式高速多極オルタネータと冷却ファンを配置し、それをアルミニウムダイカスト製のファンカバーと樹脂製のシュラウドで囲う構造とした。そして、このエンジンユニットの上側一箇所、下側二箇所に振動緩衝用のマウントを取り付け三点でフレームに支持し、これを樹脂製のアウタカバーで囲うことにより二重防音構造とした。

各コンポーネントは、コンセント、インバータユニット、オルタネータ、エンジン、マフラを放熱量と温度の低いものから順に縦に並べ本機の全幅を抑えることで、冷却性能と可搬性の向上を図った。また、使用頻度の高い実用負荷領域でエンジン回転数を下げることで大幅な騒音低減及び燃費低減を図り、使用する電気機器の負荷に応じたエンジン回転数に自動制御する負荷連動回転数制御式電子ガバナを採用した。

4. コンポーネント技術

4.1. 高速多極アウトロータ式オルタネータ

EU16i に採用しているオルタネータは Fig. 2 に示すように三相多極のステータを持つアウトロータ式のマグネット



Fig. 2 Alternator

オルタネータで、三相の高周波交流を発生し、インバータに供給する。マグネット材には市販されているストロンチウムフェライトとして最も磁束密度が高い材料を用い、更なる軽量高出力化を実現した。

EU16i(最大出力2kVA)の発電システム重量、量産(EU9i, EU24i, EU28is)のインバータ発電方式(インバータユニット+オルタネータ)の重量と、従来の発電方式(オルタネータ+フライホイール)の重量との比較をFig. 3に、オルタネータ単体性能の比較を Table 2 示す。

同図に示すように、従来の発電方式と比較して1/3以下の軽量化を達成している。量産のインバータ発電方式と比較しても約20%の軽量化(後述するインバータユニットの軽量化も含む)を達成した。

4.2. 32BitCPU 制御式インバータユニット

EU16i(最大出力2 kVA)に搭載しているインバータユニットは、量産のEU9i(最大出力1kVA)に対し、システム構成を全面的に見直し、重量サイズの増加を抑え、出力を倍増している。

EU16i と EU9i, EU28is それぞれのインバータユニットを比較した写真を Fig. 4 に示す。EU9i, EU28is のCPUは従来16ビットであったが、EU16iでは32ビットとし、インバータ部の制御と電子ガバナ部の制御を行っている。EU9i, EU28isのインバータで用いられていたアナログ演算回路のほとんどをCPU内でのソフト処理とすることで、制御回路部品数を大幅に削減し、さらなる小型軽量化に貢献

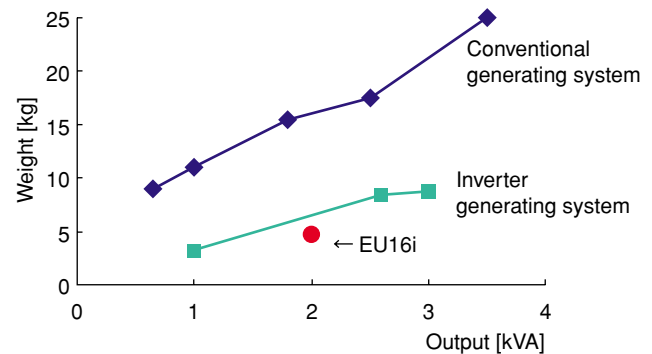


Fig. 3 Max. output and weight of the Power-generating system

Table 2 Comparison of generation-system performance

Model		EU16i		EU9i		EU28is	
Alternator	Revolution (rpm)	4300	5000	5500	6000	3500	3800
	Max. output (W)	2500	3000	1350	1500	4100	4500
	Generating efficiency	88%	88%	88%	88%	87%	87%
	Weight (kg)	2.8		1.8		5.4	
Inverter	Max. output (VA)	2000		1000		3000	
	Rated output (VA)	1600		900		2800	
	Efficiency	92%		90%		90%	
	Weight (kg)	1.9		1.4		3.3	

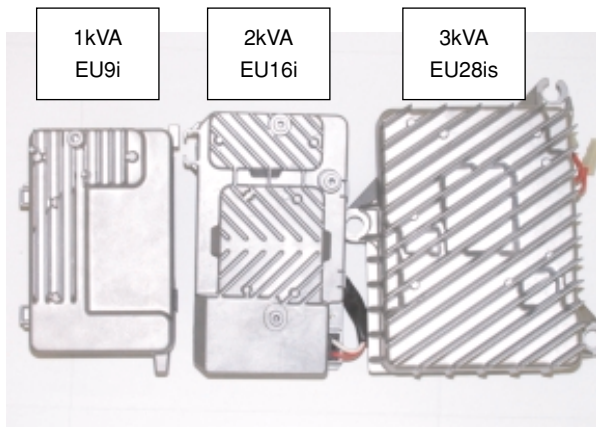


Fig. 4 Inverter unit

している。また、各部の電力損失の低減により変換効率の向上も達成している。システムのブロック図を Fig. 5 に、インバータ性能の比較を Table 2 に示す。

4.2.1. インバータ部の制御

インバータ部では、オルタネータからの高周波交流をいったん直流に整流し、正弦波の交流に変換し出力している。

制御部は、大きく次の四つに分けることができる。

(1) 出力波形制御部

CPU 内で、出力波形の基となる 50Hz または 60Hz の正確な正弦波をつくり、約 20kHz の搬送波による PWM (Pulse Width Modulation) 信号としインバータをドライブする。さらに出力された電圧波形と電流波形をCPUにフィードバックし、負荷機器の影響による波形ひずみを抑制して、

正確な正弦波と適切な電圧を維持するよう制御する。

(2) 保護機能部

過電流、過電圧と過熱に対する保護機能がある。過電流保護には、所定値以上の電流が出力されるとCPUで判断されタイマがスタートし所定時間後出力を停止するブレーカ機能と、出力短絡等での急激な過電流に対しては過電流保護回路により半導体への過電流を抑止するピーク電流制限機能がある。過電圧保護は、負荷の影響や並列運転時に内部直流電圧が上昇することがあるので、CPUが電圧上昇を抑止する制御を行うと共に電圧が所定値以上となると出力を停止する。過熱保護は、過酷な使用環境等でインバータを構成するパワー素子の温度が所定値以上となると出力を停止する。

(3) 整流制御部

SCR(Silicon Controlled Rectifier)の導通角を制御しオルタネータの出力を適正な直流電圧に変換している。起動電力の大きな負荷等で直流電圧が規定値以下になると、インバータの出力を抑制し過度の直流電圧低下を防止し、常にオルタネータの効率の良い領域を使用することで負荷起動能力を高めている。また、回転数に対し直流電圧を増減調整する機能を持ち、回転数可変範囲の拡大に貢献している。

(4) 並列運転制御部

インバータ発電機シリーズには2台の発電機の出力を専用コードでつなぐだけで2倍の出力が得られる並列運転機能が搭載されている。その並列運転を実現するには、2台相互の位相と周波数が一致すること、電圧が一致すること

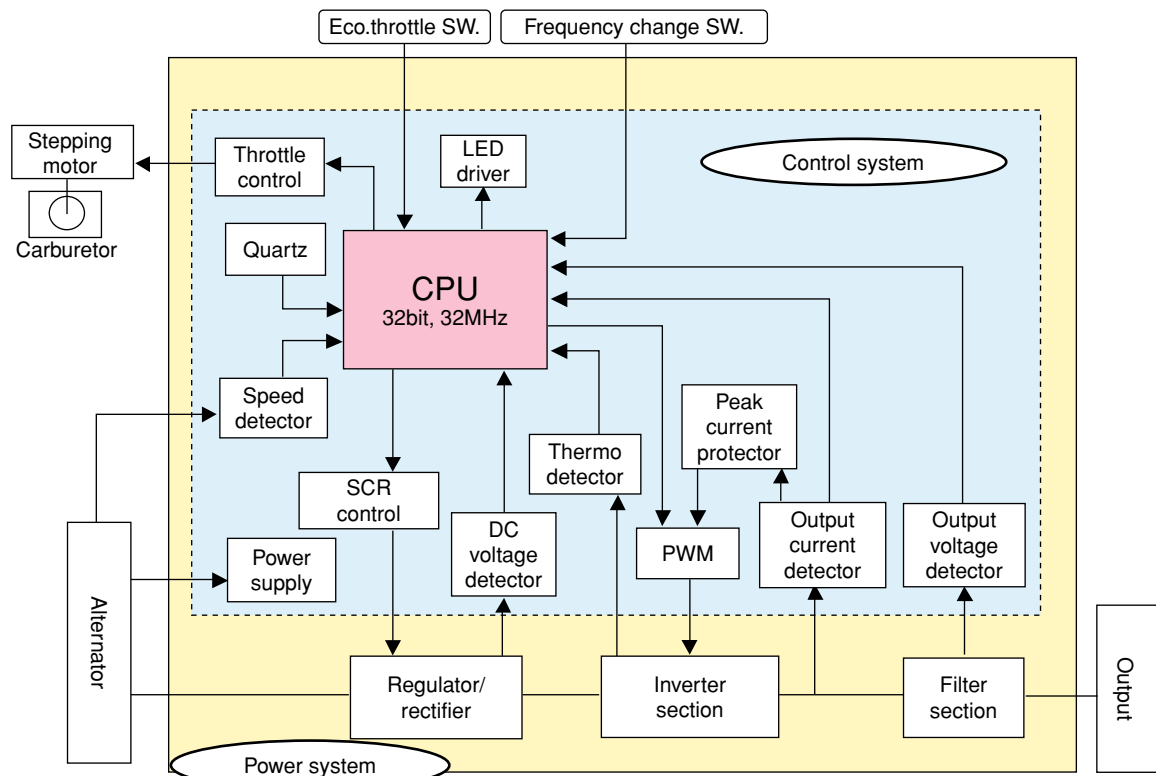


Fig. 5 Block diagram of inverter and speed-control system

が必要になる。

まず、位相と周波数を一致させるため、電圧と電流の位相差を基に CPU がリアルタイムに周波数を微調整している。次に、電圧の一致であるが、電圧差がある分、発電機への負荷の偏りを防止するため、適切な垂下特性と電圧微調整を CPU が行っている。

4.2.2. 電子ガバナ部の制御

電子ガバナは負荷連動回転数制御式で、使用電力に見合ったエンジン回転数に自動制御する。オルタネータの負荷率を基準として回転数を算定することで、実効電力に見合った制御を実現している。回転数制御方式の基本性能向上と、整流制御の改良により、量産の EU9i, EU28is の回転数可変範囲に対し 15% 拡大している。この電子ガバナの搭載により実用負荷域でエンジン回転数を下げ、燃費低減と合わせて騒音低減を図ることができた。従来の発電方式に対する燃費への効果を Fig. 6 に、騒音への効果を Fig. 7 に示す。但し、騒音への効果にはカバーの二重構造の効果を含む。

電子ガバナは、スロットルの制御を行うインバータユニットと、スロットルと同軸上に配置されたステッピングモータから構成している。

(1) 回転数の決定

EU16i のエンジン回転数と発電出力との関係を Fig. 8 に示す。パラメータとして SCR の導通角を用いている。この SCR の導通角を適正值に保つように目標回転数を算定する。

SCR はオルタネータからの高周波交流を規定した直流電圧に整流するために使用している素子である。負荷が大きいと電圧が低下してくるため SCR の導通角が開き、逆に負荷が少ないと SCR の導通角は閉じる。従って、SCR の導通角からオルタネータの出力の余裕度を判別できる。オルタネータの出力は回転数に比例するため、SCR 導通角が大きくなるとエンジン回転数を上げ、オルタネータに規定の余裕を持たせる。逆に SCR 導通角が少なくオルタネータの余裕が大きくなると、エンジン回転数を下げる。このようにオルタネータの余裕度を規定値に保つ制御をすることによって、負荷の消費電力に見合った最適エンジン回転数を決定している。

(2) 回転数制御

エンジンの回転数はオルタネータのサブ巻線から検出している。オルタネータのマグネットは 14 極なので、エンジン 1 回転につきサブ巻線は 7 パルス発生する。単気筒エンジンでは燃焼サイクルが 2 回転毎となるため、14 パルスからエンジン回転数を認識している。

回転数の取り込みは所定の周期ごとに行ない、目標回転数になるよう計算処理しステッピングモータに出力する。スロットルの位置は、常に CPU 内で認識し、エンジン能力を超えた負荷がかかった場合にはインバータの出力電圧を抑制しエンジンがストールすることを防止している。この

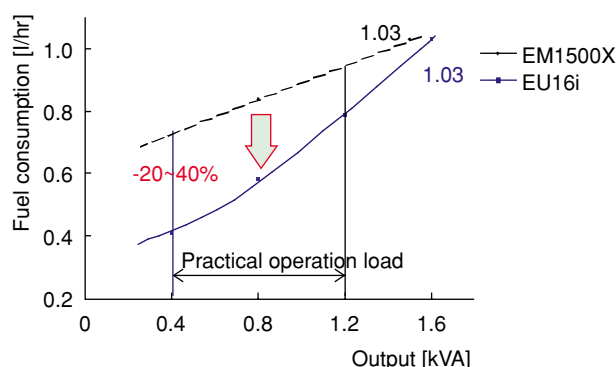


Fig. 6 Fuel consumption

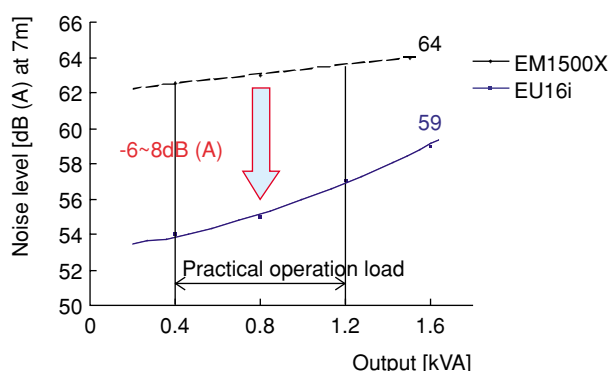


Fig. 7 Noise level

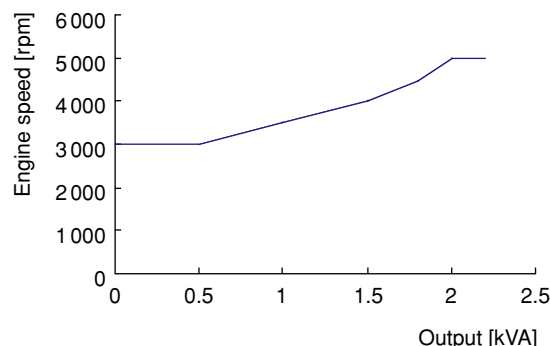


Fig. 8 Engine speed and output

機能により、エンジン能力を最大限、発電出力に利用することが可能となり、高出力化に貢献している。

(3) ステッピングモータ

量産の EU9i と同一のステッピングモータを使用している。ステッピングモータはキャブレタと一体構成で、ステッピングモータ内のリダクションギアで減速し、樹脂のリンクを介してキャブレタのスロットルシャフトに結合している。減速比は、モータ動作が 100 ステップにて、スロットルがほぼフルストロークとなる値に設定されている。駆動は CPU からモータドライバを介して二相励磁で行っている。モータの追従性を向上させるため、駆動信号は加減速のレートを可変している。スロットル位置の検出は、始動初期にスロットルを全開にセット後、CPU 内での保持数値を使用している。

4.3. 搭載エンジン

EU16i 専用エンジン(以下 GX100)はポータブルタイプのインバータ発電機のメリットを活かすべく、

- ・高回転出力特性の向上
- ・小型化、軽量化
- ・騒音低減
- ・CARB/EPA 排気エミッション規制に適合

に主眼をおいて開発した。これらの要求に応えるために採用した主な技術は、(1)ユニブロックシリンダ、(2)エンジン内蔵型タイミングベルト及び高回転対応動弁系構造、(3)排気エミッション低減技術などである。

4.3.1. ユニブロックシリンダ

GX100 は小型・軽量化を目的として、シリンダヘッドとシリンダブロックを一体化したユニブロックシリンダ構造⁽³⁾を採用した。通常のヘッド分割構造に対し、結合部の肉厚増加やヘッドボルト、パッキン類が不要となり、高回転・小排気量化とあわせ、ヘッド及びシリンダブロック重量で約40%の軽量化を達成した。シリンダひずみの要因の一つであるヘッドボルトの締め付け軸力の影響がなくなり、オイル消費およびエミッション耐久劣化に効果をもたらした。更に従来のユニブロックシリンダ⁽³⁾ではスリーブレスアルミニウムシリンダであったのに対し、薄肉鋳鉄製スリーブ鋳込みシリンダとし、排気エミッション劣化を低減させた。Fig. 9 に GX100 のシリンダブロック構造を示す。

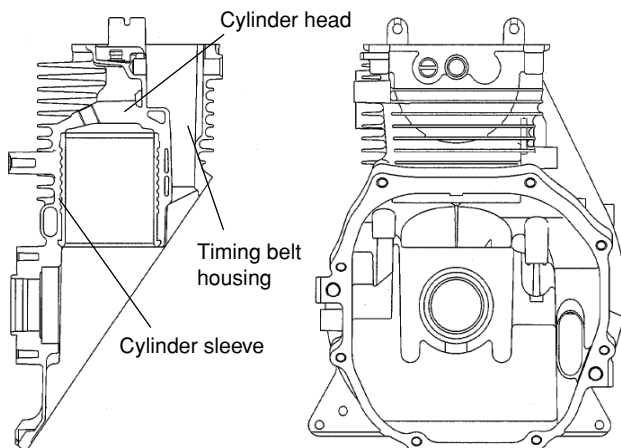


Fig. 9 Cylinder block section

4.3.2. エンジン内蔵型タイミングベルト機構

GX100 では Fig. 10 に示す GC/GCV135・160⁽³⁾で確立した OHC 構造を採用した。エンジン内蔵型タイミングベルト、樹脂一駒カムプリー、L字型ロッカアームの部品構成を採用することにより、騒音低減、小型軽量化、コスト低減を図った。

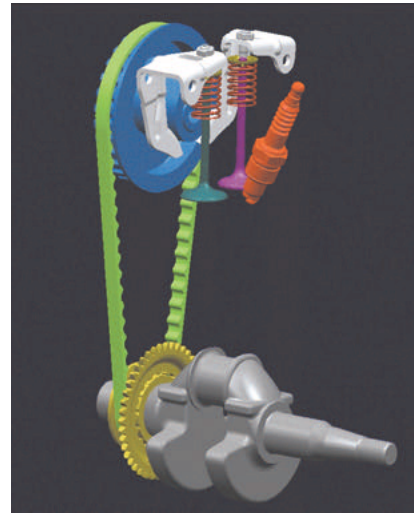


Fig. 10 Valve train

上記 OHC 構造に加え、吸気・排気バルブのステムの細軸化等によるバルブ等価重量の削減をするとともに、ロッカアーム、カムプロフィール、ベルトサイズを最適化することにより、従来型発電機の使用回転数である3600rpmに対して、インバータ発電機の要求特性である5000rpmに見合った動弁系としている。

4.3.3. 排気エミッション低減技術

CARB Tier II /EPA Phase II排気エミッション規制に適合するために、以下の技術を採用した。

- ・小型スパークプラグの採用によるセンタプラグ化
- ・燃焼室外周部のクエンチングエリアの最小化を含む燃焼室形状の最適化

これらの効果により、Fig. 11に示すように本排気量クラスでトップレベルの排気エミッション値を達成できた。

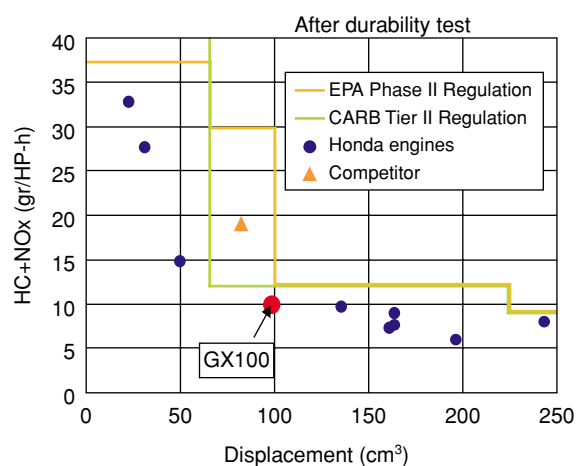


Fig. 11 Emission performance

4.4. フレーム構造

EU16i は軽量化及び騒音低減を図りながら冷却性能を成立させるため、部品配置の最適化と二重防音の樹脂フルカバー構造を採用した。EU16i の軽量樹脂フルカバー構造を Fig. 12 に示す。

EU16i は、出力される交流周波数がエンジン回転数の制約を受けないインバータシステムを採用し、従来フライホイールが付く位置にフライホイール兼用の軽量多極オルタネータを配置した。これにより、エンジン、オルタネータ等のフレームで支持する部品の重量を従来機に対し約53%軽量化できた。

また、エンジンブラケットのほかヘッドカバー、ファンカバーをアルミダイキャスト製とすることにより、エンジン本体の支持機能を持たせ、これらをアウトカバのキャリングハンドル後部及びアンダカバー部にそれぞれマウントを介して支持した。さらに、樹脂製大型フューエルタンクを保持した高強度の樹脂製サブフレームをアウトカバのキャリングハンドル前部とアンダフレームに結合した。この構造の特徴は、本機運搬時のエンジン、オルタネータ、フューエルタンクの重量をキャリングハンドルで直接に保持することにある。

これら部品の軽量化と支持構造の採用は、アウトカバ、アンダフレーム及びその結合部を十分な強度、剛性を持たせながら樹脂化することを可能とし、本機全体重量の低減に大きな効果を発揮した。

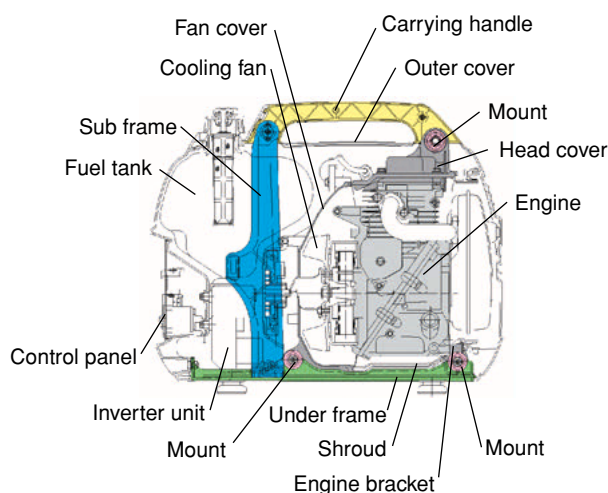


Fig. 12 Lightweight resin full-covered structure for EU16i

アンダフレームは、発電機使用時の強度・剛性を確保するため、樹脂材料及び形状の最適化を行った。アンダフレームへの応力分布をシミュレーション解析し、応力集中箇所の形状を最適化した。シミュレーション解析結果を Fig. 13 に示す。

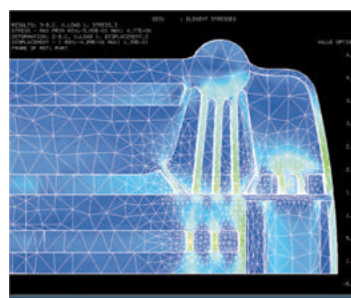


Fig. 13 Analysis of simulated under frame

各部品の配置は冷却効率を考慮し、発熱の少ないインバータユニットから順に、オルタネータ、エンジン、マフラを一行に配置した。そして、冷却風の流れを一方向にし、発熱の少ない部品から順に冷却風を流すことにより冷却風量を低減させた。高発熱体であるオルタネータ、エンジン、マフラは、熱風が再循環しないようにシール性を高めたファンカバー及びシュラウドで囲い、さらにアウトカバで被う二重構造とした。これにより、従来機種はエンジン冷却用とオルタネータ冷却用の二つのファンを持っていたが、これを一つのファンに集約し、軽量コンパクト化をはかった。また、アウトカバ後方にも外気の吸入口を設けることにより、カバー内後部からの冷却風の流れをつくり、エンジンのふく射熱によるアウトカバの温度上昇を防止するとともにキャブレタの冷却をおこなった。完成機冷却構造を Fig. 14 に示す。

完成機騒音の低減を図るため、インバータユニットを冷却ファンの前面に配置することにより、ファン騒音の低減を図った。さらに、消音ノーズ付き大型エアクリーナ、大型マフラ、電子ガバナ、不等ピッチ冷却ファンを採用した。

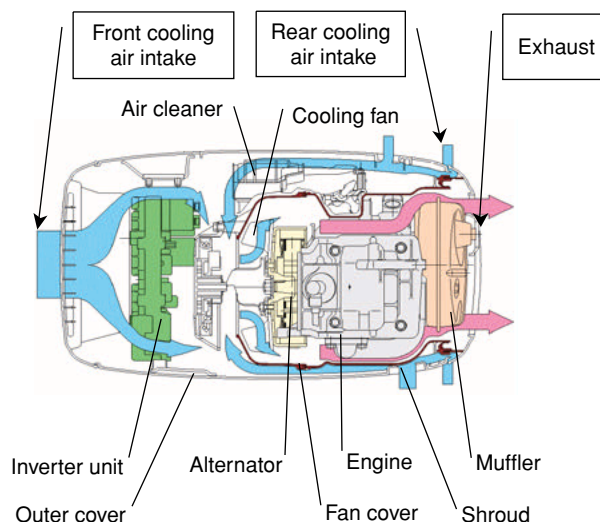


Fig. 14 Cooling system of the completed machine

以上の構造により、従来機である EM1500X に比べ実用負荷域で6～8 dB(A)の騒音低減を達成し、2006 年に予定されている EU 騒音指令 STAGE II の規制値をクリアした。また、同様に重量についても約 1/2 の軽量化を達成した。EM1500X とのコンポーネント重量の比較を Fig. 15 に示す。

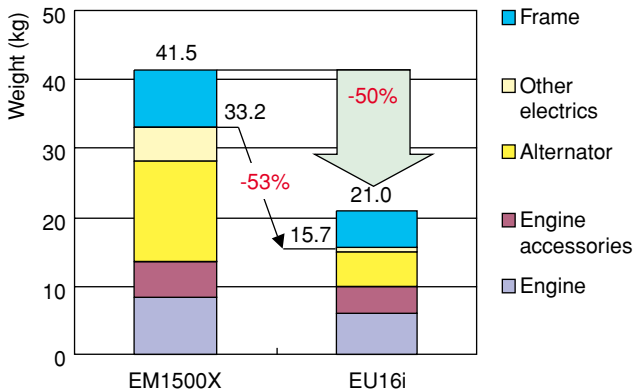


Fig. 15 Comparison of weight between EU16i and existing EM1500X

5. まとめ

従来の汎用エンジンに対し、高回転型の小型4ストロークエンジンとフライホイール兼用の高速多極アウトロータ式オルタネータを組み合わせ、さらに正弦波インバータ制御及び軽量樹脂フルカバー構造の採用により、優れた可搬性と消費電力の大きい家電製品が使用できる出力及びコンピュータ等の電子機器が使用できる高品質な電気性能を有したポータブル発電機 EU16i を開発した。

- (1) 従来機種に対し、約 1/2 の乾燥重量 21kg と全幅を抑えたスーツケーススタイルのデザインにより、優れた可搬性を実現した。
- (2) 波形ひずみ率2.5%以下、周波数変動率1%以下の商用電源同等以上の電気性能を達成した。
- (3) 従来機種に対し、実用負荷域で6～8 dB(A)の騒音低減と 20～40%の燃費低減を達成した。
- (4) 2006 年 EU 騒音指令 STAGE II 及び 2002 年 CARB Tier II/2001 年 EPA Phase II エミッション規制に適合させた。

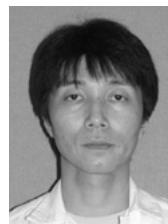
日本国内仕様の EU16i は、北米仕様としては EU2000i、その他の輸出仕様としては EU20i の呼称で発売しており、今後全世界のお客様に喜んで頂ける商品となることを確信している。

本開発にあたっては、社内外の方々の多大な協力を頂いた。ここに改めて感謝の意を表する。

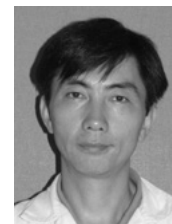
参考文献

- (1) Tanaka, Y., Kouchi, T., Ito, K., and Nakamura, M.: Development of the Lightweight and Compact Portable Generators-GENE21 Series, HONDA R&D Technical Review, Vol.11 No.2, p.15-22 (1999)
- (2) Kouchi, T., Ito, K., and Nakamura, M.: Development of Lightweight and Compact 1kVA-class Portable Generator, SAE Paper 1999-01-3304
- (3) Suzuki, T., Hojo, H., Inoue, S., Moriyama, H., Fujinaga, Y.: Development of General Purpose OHC Engine with Built-in Timing Belt, HONDA R&D Technical Review, Vol.10, p.122-127 (1998)

■ 著 者 ■



河内 敏文



清水 元寿



広瀬 忠文



杉本 幸男