

特集 車両用交流発電機の高性能化*

Development of a Higher Performance Alternator

梅田 敦司
Atsusi UMEDA

松原 慎一
Shinichi MATSUBARA

The substantial improvement in output current of the alternator caused some problems such as the increase of volume, weight, and driving torque of the alternator and higher noise. To overcome these problems, we used high space factor square coils (Segment Conductors) to constitute a stator which is the main part of the alternator, and placed stators in two lines so as to cause a phase difference. As a result, we could reduce the copper loss by half which was the cause of the generation loss of the alternator, as well as reduce resistance of air flow and cancel electromagnetic pulsation.

Key words : Electric generator, Alternator, High performance alternator, Segment Conductor, High power, High efficiency, Low noise

1. はじめに

近年、環境保護・省資源がより重要となる中で、今後の車両はより燃費向上が必要となってきた。その一方、快適を求める顧客ニーズは高まっており、それに対応した電気使用量は増加傾向にある。この電気分のエネルギーは、燃費を悪化させてしまうため、より良い車両を提供するためにはこの相反する課題を解決しなければならない。

そのために車両用発電機には、エンジントルクから電気エネルギーへの変換効率の向上や車両軽量化に貢献するための小型・軽量化が求められている。また、燃費向上のためのエンジンの低アイドル回転化に対応するために、Table 1に示すように発電能力の低い低速回転域で従来に増した発電電流の供給も要求されている。

らない。自己発熱増加するに伴う冷却性の向上や、発電量増加に伴う発電騒音の悪化に対する対策である。特に車両用発電機の発電騒音はエンジン騒音に対し突出した周波成分を持つため、レベルは低くても耳障りな音として問題となる (Fig.1)。

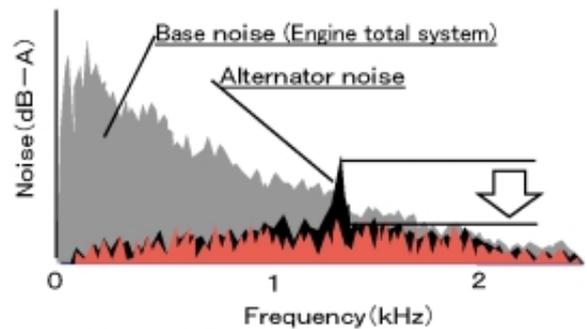
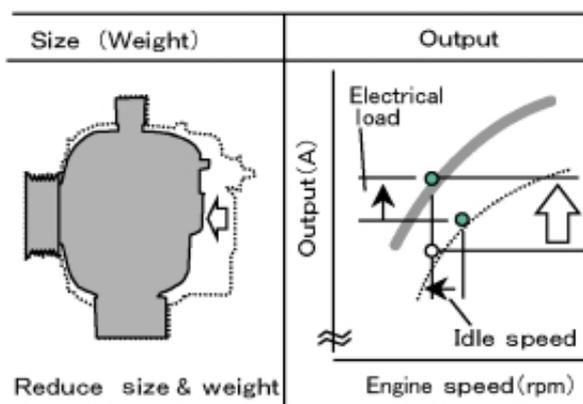


Fig.1 Noise in cabin (at idle)

Table 1 Output and size (weight)



しかし発電機はこれらの要求に対応しながら、これに伴い発生する発電機自身の課題も解決しなければなら

我々はこれらのニーズと課題に対する対応を検討した結果、そのすべてに固定子(ステータ)がかかわり、最も大きい支配要因であることを見出し、これを重点に改良し車両用発電機の開発を進めた。

以下にその開発過程を説明する。

2. 車両用発電機概要

車両用交流発電機はエンジンに搭載され、バッテリーの充電、電気負荷への電力供給を行う。一般に車両用発電機は三相同期発電機であり、高速回転を考慮したランデル型回転子と、その磁束を受けて発電する三相巻線の固定子、交流を全波整流し直流に変換する整流器等で一体に構成される。また電力制御は、バッテリー電圧を検出し、ブラシを介してロータ電流を増減し、

* (社)日本能率協会の了解を得て、第21回モータ技術シンポジウム(2001.4)資料より一部加筆して転載

界磁源の磁束量を調節することで行われる (Figs.2, 3 & 4).

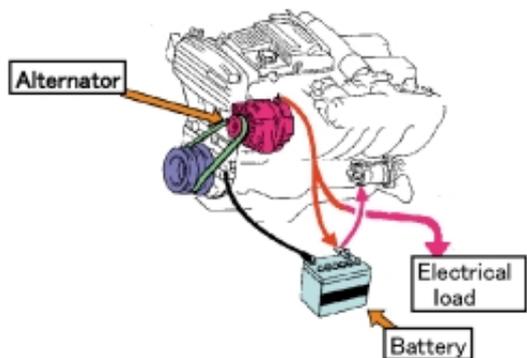


Fig.2 Alternator for vehicle

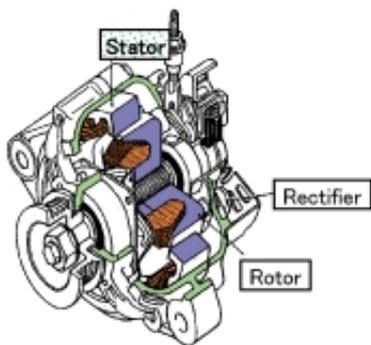


Fig.3 Structure of alternator

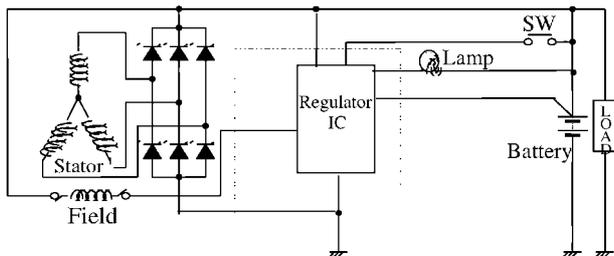


Fig.4 Circuit of alternator

3. 開発方針

前述してきたように、小型・軽量化と高出力、高効率、低騒音、高冷却性の両立を基本方針として開発を進めた。

出力、効率、温度上昇を単純化した基本式を以下に示す。

$$\cdot \text{出力電流} \propto \left| \frac{\text{誘導起電力} \dot{E} - \text{端子電圧} \dot{V}}{\text{同期インピーダンス} Z} \right| = \frac{|\dot{E} - \dot{V}|}{\sqrt{r^2 + w^2 L^2}}$$

(r: 固定子抵抗 w: 角速度 L: インダクタンス)

$$\cdot \text{効率} = \frac{\text{出力}}{\text{入力}} \times 100 = \frac{\text{出力}}{\text{出力} + \text{損失}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\cdot \text{温度} = \text{熱抵抗} R \cdot \text{発熱量} W + \text{周囲温度} T$$

ここで、出力電流の支配要因は固定子のインピーダンスであり、特に周波数の低い回転域では、固定子抵抗が支配要因である。また効率改善には損失の低減が必要であるが、Fig.5に示す損失内訳をみても分かるように、損失の主要因は固定子銅損である。また損失=発熱であり、温度低減のためには発熱を下げるのが有効である。

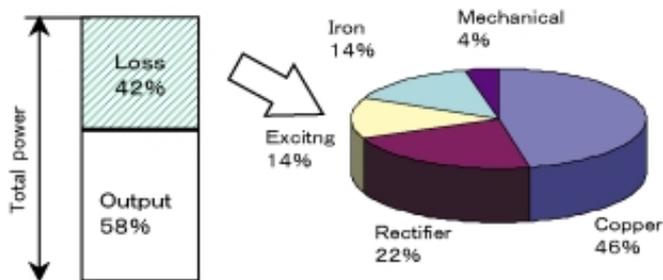


Fig.5 Analysis of loss

すなわち、これらの特性改善には固定子抵抗の低減が有効であることが分かる。

一方、発電機特有の磁気騒音の発生源である振動は、固定子と回転子間の磁気力の時間的な変化で発生する。回転子は直流励磁であることから、固定子の磁束脈動が原因であり特に電機周波数の6次成分が主成分であることが知られている (Fig.6)。

以上より、固定子は高出力、高効率、低騒音、冷却性のすべてにかかわる部品であることから、今回は固定子を重点に開発した。

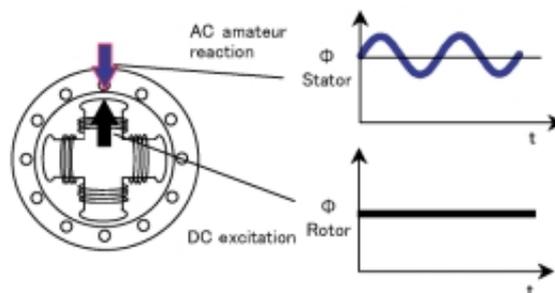


Fig.6 Stator reaction

4. 課題解決へのアプローチ

4.1 固定子コイル抵抗低減

コイル抵抗は下式で示され、この改善のためにはコイル長の短縮、導体断面積の向上が必要となる。

$$R(\text{コイル抵抗}) = k(\text{抵抗率}) \cdot \frac{\text{コイル長さ}}{\text{コイル導体断面積}}$$

車両用交流発電機の固定子巻線は、一般に巻線係数の良い全節巻きが選択され、回転子磁極ピッチに対し同寸のピッチでまかれている。当然三相巻線であるため各相の位相差は $2/3$ であり必然的に各相の巻線は $1/3$ だけ重なってしまう。具体的には、Fig.7に示すように多数のコイルを内径側より順次鉄心内に挿入させるため、先に挿入されたコイルと後から挿入されるコイルが重なってしまう。

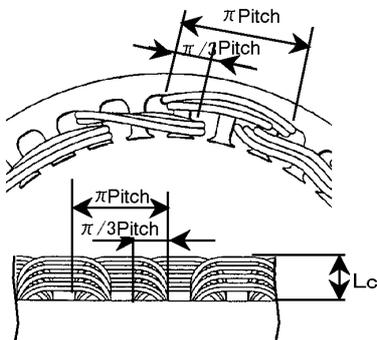


Fig.7 Appearance of coil end

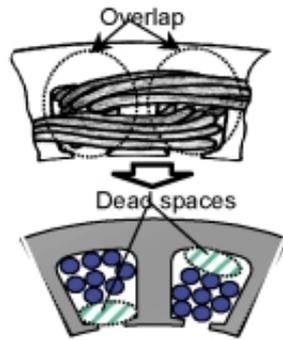


Fig.8 Cross section of coil

その結果、スロット内にはFig.8に示されるような空間（デッドスペース）が生じ、コイル導体断面積の拡大を妨げていた。また、重なり部分の導体間の接触ストレスを回避するためにコイルエンド長さ L_b を十分とる必要があり、全体のコイルが長くなるため固定子抵抗を悪化させていた。例えば、鉄心スロット内における導体断面積を示す指標として占積率があり、

$$\text{占積率} = S1/S2$$

($S1$: 固定子鉄心スロット内コイル総断面積

$S2$: 固定子鉄心スロット面積)

で示されるが、占積率の年代推移はFig.9に示されるように、数々の改良がなされているにもかかわらず、占積率の向上は頭打ちになっており、総スロット面積の半分も満たされていない。

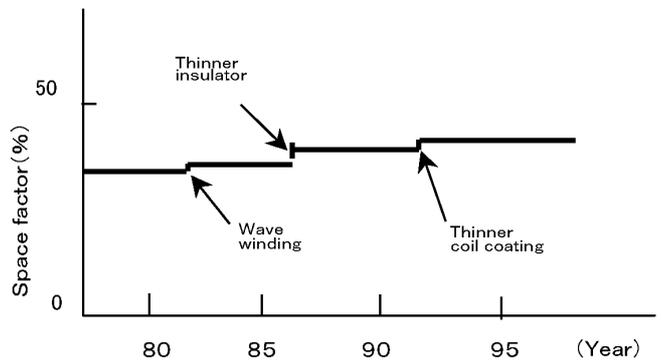


Fig.9 Transition of space factor

このように、コイルの抵抗低減に当りコイル長短縮、コイル導体断面積の拡大を図ろうとしても、前述のコイルエンドの重なりが障害となって、結果として抵抗低減が図れない。これに対し、我々はコイル抵抗を低減するために、その主原因であるコイルエンドの重なりを廃止する巻線方式として以下を考案した。

Fig.10に示すように、スロット内でコイルを2層化し、外径側コイルが $1/2$ 離れた位置で、所定幅 t の範囲内で折り返し、同様に $1/2$ 離れた位置のスロットに内径側コイルを収納する。この形態ですべてのコイルを形成すればFig.10に示されるように、コイルエンド同士への干渉はなくなり、コイルエンド高さは短縮でき、スロット内のデッドスペースも解消される。

更に、コイル断面形状を丸型から角型に変更することで、コイル導体断面積即ちスロット占積率も向上できる。

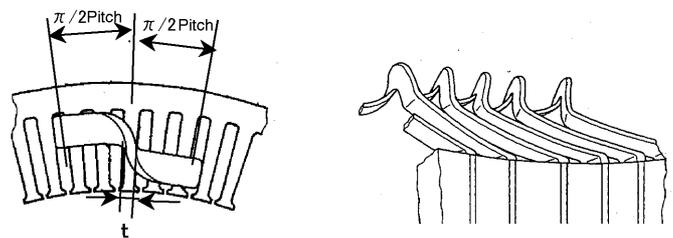


Fig.10 Idea of lap-less winding

4.2 冷却性向上

車両用発電機は一般に最も発熱の大きい固定子巻線に冷却ファンが対向するように構成される。冷却においてもコイルエンドの重なりは通風抵抗となり冷却の妨げになっていた。これに対し上記コイルエンドの重なりを廃止した巻線方式をとれば、Fig.11に示すようにコイルエンド形状がメッシュ状となり、コイル間の隙間が確保できる。この結果、固定子コイルの放熱性と通風性が改善され、冷却性が向上すると予想される。また、コイル抵抗の低減に伴い、自己発熱も大幅に抑制される。

これにより空冷方式で成立可能と推定した。

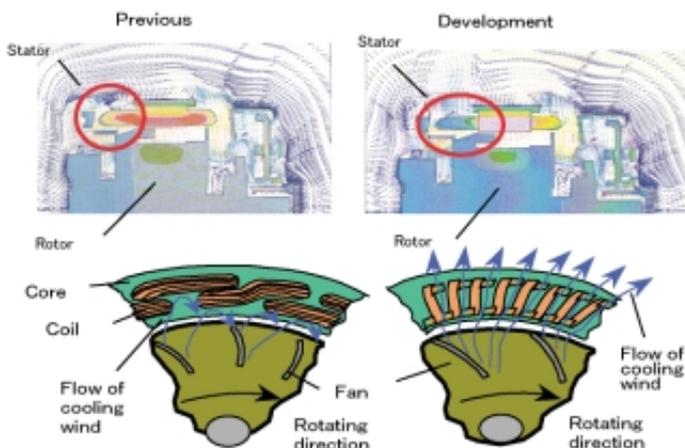


Fig.11 Cooling improvement

4.3 磁気加振力低減

車両用発電機の磁気騒音の低減はハウジングの剛性向上など、主に伝達系の改良で対応されてきた。しかし、低減効果も飽和状態であるため、根本的な発生源の低減に取り組んだ。

前述のように発電機特有の磁気騒音の主要因は固定子の発生する反作用起磁力の高調波成分である。また主成分は電気周波数6次成分が大半を占め、エンジン騒音の周波数成分に対し高い周波数のため耳障り音として問題となっている。そこで、この6次成分をターゲットとして低減を検討した。

反作用起磁力の6次成分の時間的変化は電気角60°周期で変化している。これに対し、位相差30°反作用起磁力を加えてやれば起磁力変動は相殺できるはずである。

そこで具体的な構成として、Fig.12に示す回路を考案した。すなわち、反作用起磁力6次をそれぞれ発生

する三相巻線を位相差30°で二重配置し、相互の反作用起磁力を打ち消し合うようにさせた。これにより、発生源が低減できるため、磁気騒音の低減が期待できる。

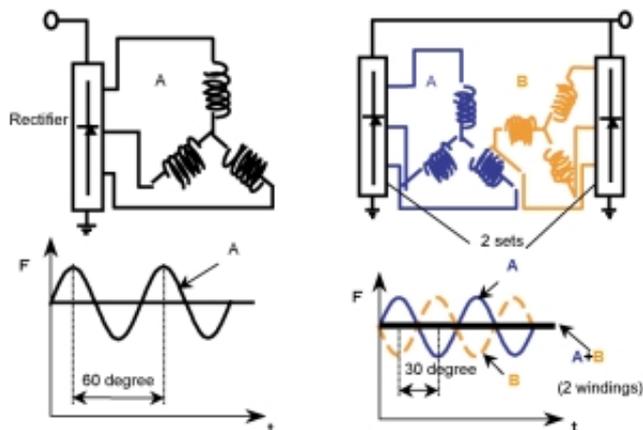


Fig.12 Electromagnetic pulsation

また、従来の巻線では3相巻線の2重化は構造複雑となり、前述のコイルエンドの重なりを助長させ発電機特性の悪化が懸念されるが、前述のコイルエンド重なりを解消する巻線と組み合わせれば発電機特性を向上させた上で、磁気騒音の低減が可能であると推定した。

5. 構想の具体化

前述した新巻線を連続線による巻線方式で達成することは極めて困難である。これは、従来の径方向内側からのコイル挿入方式ではスロット開口幅より細いコイルしか挿入できない、先に入れた外径側の線の奥に内側の線を入れることができない等のためである。そこで、発想を転換し、分断されたコイルを個別に成形して軸方向から挿入することでこれを解決した。

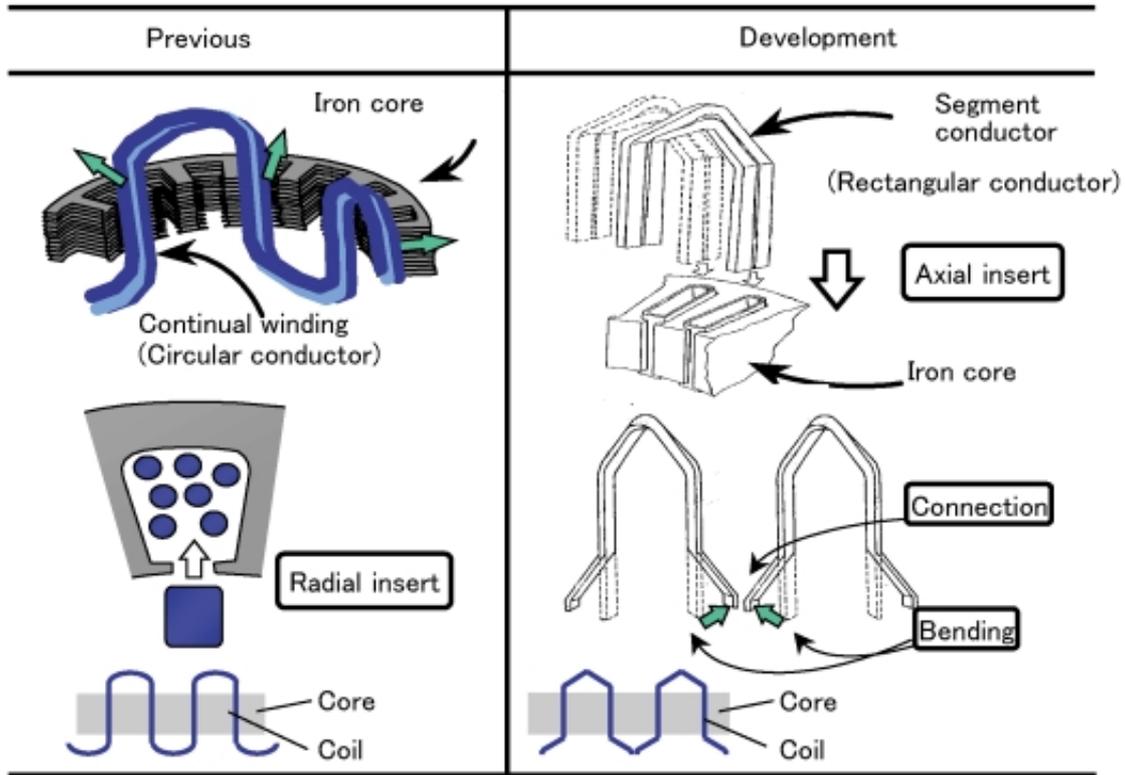
5.1 セグメントコンダクタの組付

一連の固定子コイルを、Table 2に示すように、ひねり加工を施した複数のU字型導体（セグメントコンダクタ）に分割し、コンダクタをすべて重ねた後、軸方向から挿入することにより、太い角型コイルのスロット挿入、コンダクタの整列挿入を可能にした。

5.2 セグメントコンダクタの結線

複数のU字型導体の結線は、それぞれの端部を折り曲げ、二つの端部を接合することで可能となる。なお、接合部は絶縁性確保のため、コーティングを施す。

Table 2 Manufacturing method

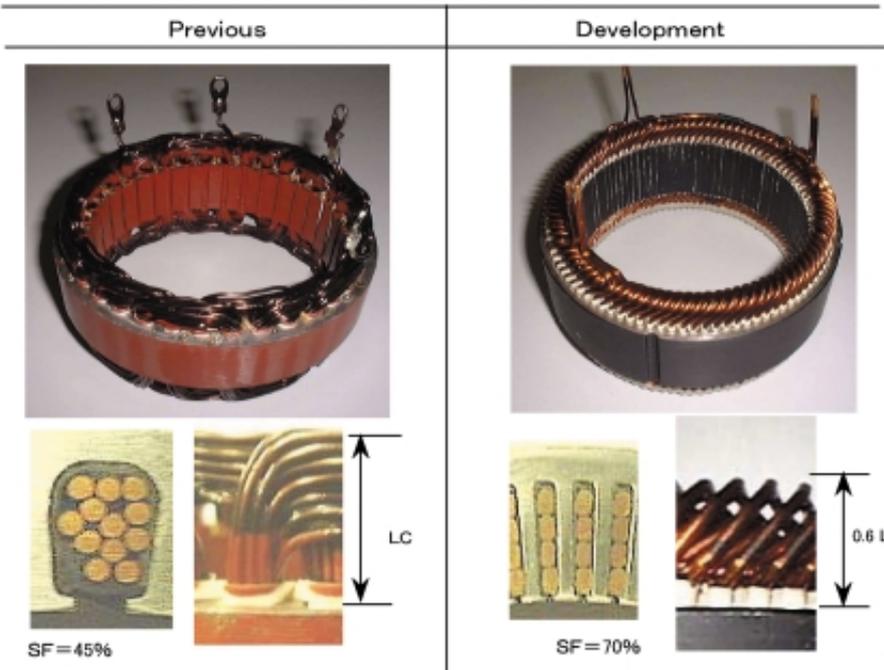


6. 開発結果

6.1 構造

今回開発した固定子と従来型固定子の比較をTable 3に示す。

Table 3 Stator difference of previous and development



6.2 発電機特性

Fig.13に示すように、外径、全長、重量のすべてにおいて従来品に対し低減できた上に、以下に述べる性能向上が実現した。出力性能については、Fig.14に示すように、固定子コイル抵抗の低減かつ固定子コイル冷却性向上により、エンジンアイドル回転域での出力は従来品に対して、50%向上した。

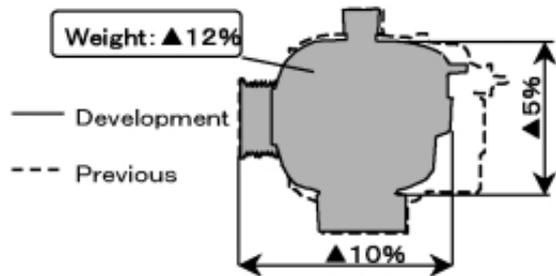


Fig.13 Size and weight

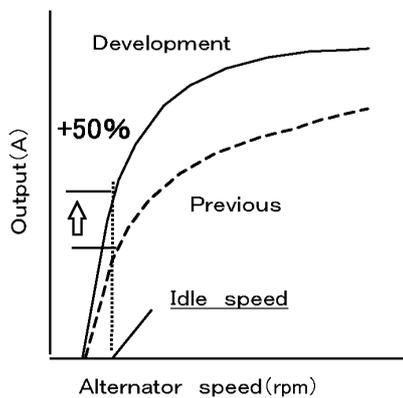


Fig.14 Output

また、効率については、Fig.15に示すように、固定子コイル抵抗低減による発電時の銅損の大幅な低減と、鉄芯の改良による鉄損の低減により効率は従来品に対して、絶対値で10%向上した。

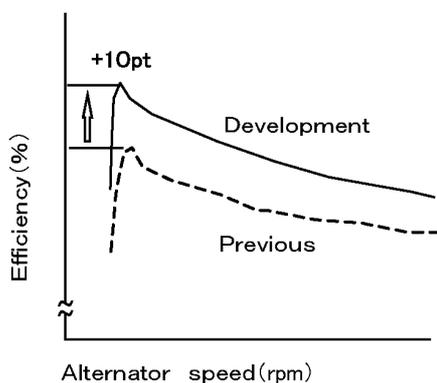


Fig.15 Efficiency

電磁騒音は、Fig.16に示すように、位相差30°の巻線を二重配置することで、磁気騒音は、従来品に対して、10dB低減した。また、冷却性の向上により、ファン能力を必要最小限に抑えることにより、ファン音も改善できた。

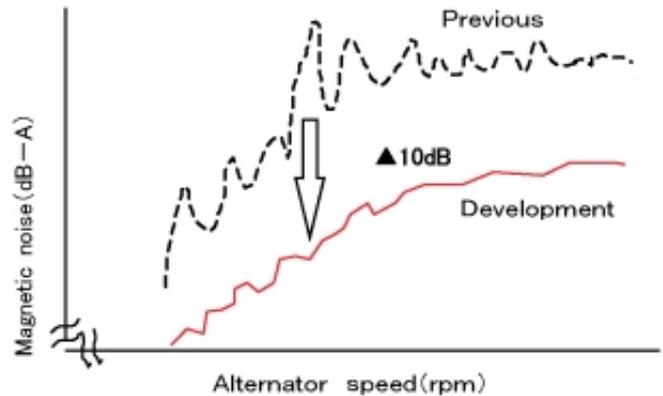


Fig.16 Noise characteristics

冷却性においては固定子コイルをセグメントコンダクタ化することで、固定子コイルの抵抗、すなわち自己発熱を低減した。また、コイルエンドのメッシュ形状化により放熱性と通風性が改善され、空冷方式の維持が可能となった。

7. おわりに

セグメントコンダクタでコイルを構成することにより、連続線では限界に近づいていた固定子の低抵抗化を実現できた。これにより、小型・高出力、高効率の車両用発電機を開発し、車両システム変更の無い空冷方式で実現させた。更に反作用起磁力を相殺する巻線を盛り込むことにより、根本的な振動発生源を撲滅し、低騒音化も実現した。本車両用交流発電機により、約2%程度の実用燃費向上が見込まれる。また一般的な車両走行条件では1台あたり年間約31kgのCO₂が削減されると推定される。本技術を適用した発電機は定格130A、150Aの大容量タイプを2000年より量産している。また、マイルドハイブリッド車用のモータジェネレータにも本技術は採用されており、回転電機の新しい潮流となりつつある。

<参考文献>

- 1) 松原他：乗用車交流発電機の高性能化，2000年自動車技術会春季大会 20005052
- 2) 石川他：Development of a More Efficient & Higher Power Generation Technology for future electrical systems, SAE convergence 2000
- 3) 永井他：Acoustic Noise Reduction in Automobile Alternator By Costrained Layer Damping of the Stator. SAE 920407
- 4) 二村他：Size and Weight Reductions in Charging and Starting System Components. SAE 1985
- 5) 梅田他：車両用交流発電機 特開平11-15 5270，等



<著者>



梅田 敦司
(うめだ あつし)
電機技術2部
車両交流発電機の開発・設計
および要素技術の開発に従事



松原 慎一
(まつばら しんいち)
電機技術2部
車両交流発電機の開発・設計に従事