

位相制御式レギュレート レクチファイアを用いた ACG の開発

Development of ACG Using Regulator Rectifier with Phase Control

藺 田 豊*

Yutaka SONODA

尾 辻 美 紅*

Miku OTSUJI

小 野 和 彦*

Kazuhiko ONO

大 内 勝 博*

Katsuhiro OUCHI

要 旨

近年の希土類金属の価格変動リスクを回避するために、従来材料であるフェライト磁石を用い、希土類磁石を用いたものと同様な発電量を得ることのできる、二輪車用交流発電機を開発した。フェライト磁石を二輪車用発電機に適用する場合、サイズを大きくすることは、質量や慣性モーメントが増加するためできない。そこで我々は、電流の制御方式を短絡制御式レギュレート レクチファイアから位相制御式に変更し、また、位相シフト範囲を適切にコントロールすることによって電流増加を実現した。位相コントロール用センサには、高温度に対応するため新しい構成を適用した。これらにより、フェライト磁石を用い、サイズを変えることなく、希土類磁石を用いた場合と同等の発電量を実現した。

ABSTRACT

To get free from the risks that arise from price variations of rare-earth metals, an alternative current generator for motorcycles was developed using conventional ferrite magnet while keeping the same amount of electricity generation as that of using rare-earth metal. For the application of ferrite magnet to a motorcycle, the way of having a larger size cannot be allowed because of the increases of the mass and moment of inertia associated with that. Accordingly, in our development, the increase of electricity generation was realized by changing the current control from regulated short-circuit rectifier method to phase shifting method with a precise control of the effective range of phase shifting. For that purpose, newly developed configuration was implemented to the sensor for phase control to have it under permissible temperature range against resulting high installation temperature. Through those measures, it was achieved by using ferrite magnet to generate a compatible amount of electricity generation to that of using rare-earth metals without changing the dimensions of the generator.

1. ま え が き

希土類金属は、2010 年を始めとしてその価格が高騰し、現在も価格変動のリスクにさらされている。こうした背景に起因して、二輪車用の交流発電機 (ACG) に用いられる磁石材に対しても、脱希土類が急務とされる状況になっている。その実現手段としてフェライト磁石を用いた ACG の採用が挙げられるが、希土類磁石を用いた ACG と比較して一般的に発電量が低いため、従来手法の制御では、特に低回転域の発電量が不足してしまう。発電量を増加するためには、ACG 全体の寸法を大きくするというのが一般的

な手法であるが、質量や慣性モーメントが増加してしまうため、軽量、コンパクト化が強く要求される二輪車への適用は困難であった。そこで、我々は発電制御方式を短絡制御式レギュレート レクチファイア方式から位相制御式に変更することで、低回転域の発電量を確保し、希土類磁石を用いた ACG と同等のサイズを実現した。本論文ではこの開発を可能とした技術要素である、二輪車で初めて採用された発電量増加を可能とする位相制御と、発電量増加に伴う発熱量増加に対応するための新しい磁極位置検出手法について報告する。

*二輪 R&D センター

2. 位相制御式レギュレート レクチファイア

従来二輪車で採用されてきた短絡制御式レギュレートレクチファイアでは、全波整流範囲と短絡範囲の割合を変化させることで充電電流を変化させ、充電電圧を制御している (Fig. 1)。一方、位相制御式レギュレートレクチファイアでは、ACG の誘起電圧にバッテリー電圧を印加し、またその際の位相を変化させることで発電電圧を制御し、定電流に近い電流を発生させる。この方式を用いることにより、短絡制御式に比べ発電量を増加させることができる (Fig. 2, Fig. 3)。

Fig. 4 に単相 ACG の等価回路を示す。この回路の左側は誘起電圧 E 、インダクタンス L を含む ACG を示し、右側はバッテリーおよびインバータで構成された、出力電圧 V の交流電源を示している。制御方式は位相制御であり、誘起電圧 E の位相に対して出力電圧 V の位相を制御することで、目標とする電流 I を得る。

次に、 E 、 V の周波数が等しい条件において、 V の電圧位相を変化させたときに電流 I がどのように振る舞うかを説明する。等価回路の電圧方程式から電流を求めると以下の式となる。ただし、角周波数を ω とする。

$$\dot{E} = j\omega L \dot{I} + \dot{V} \quad (1)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{V}}{j\omega L} \quad (2)$$

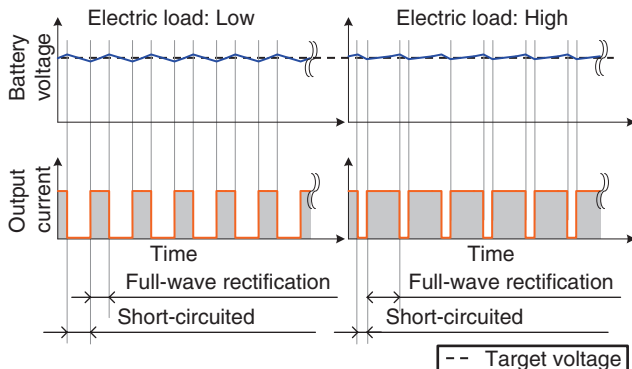


Fig. 1 Schematic illustrations of charging currents under short-circuit type control in different load conditions

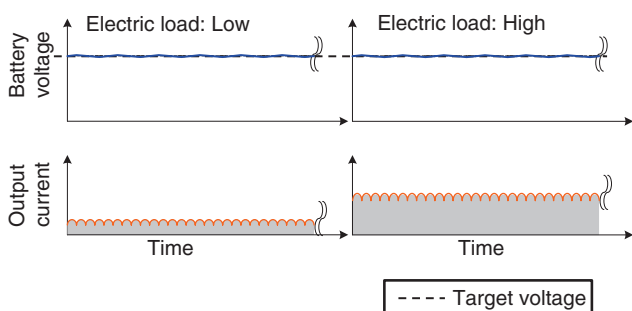


Fig. 2 Schematic illustrations of charging currents under phase control in different load conditions

式 (2) で、 ω 、 L 、 E を一定値とし、 V の位相を変化させると、電流 I の値を変化させることができることがわかる。これをベクトル図で表現すると、Fig. 5 のようになる。 E を基準として、 V の位相を変化させたとき、電流 I の大きさ、位相が変化することがわかる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

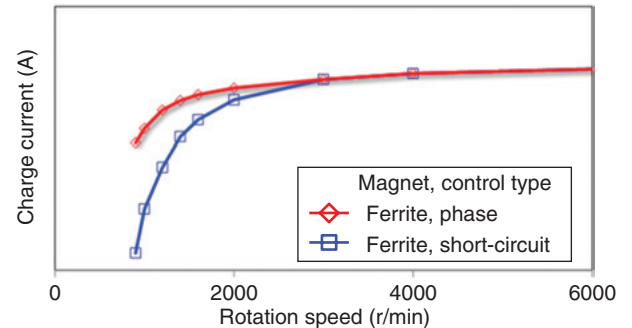


Fig. 3 Characteristics of charge currents under different types of control

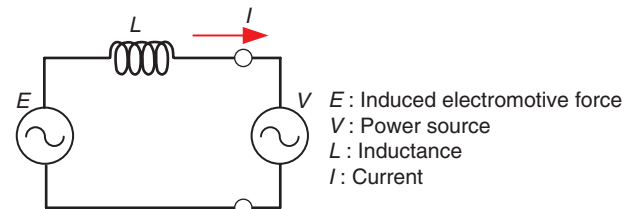


Fig. 4 Circuit composed of two AC power sources and inductance

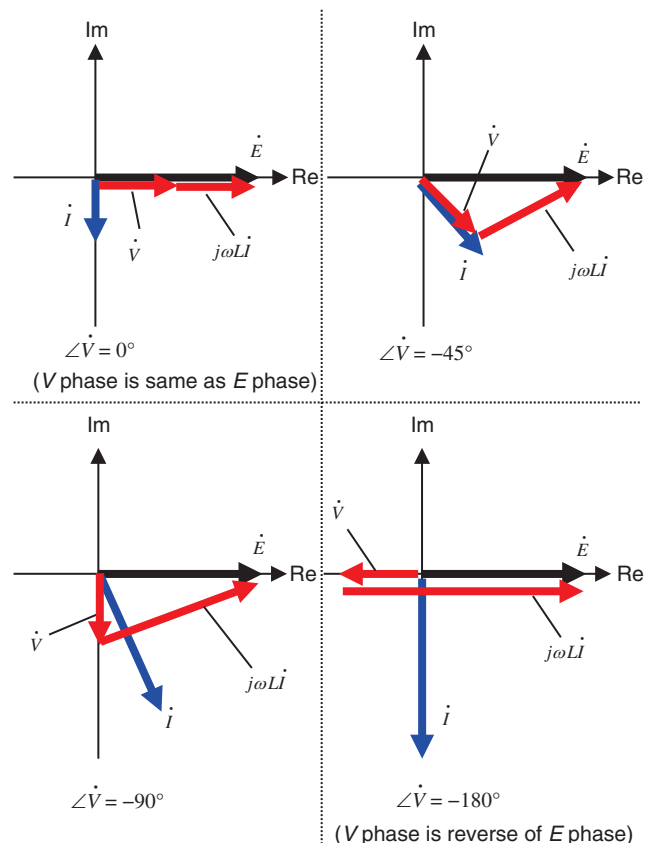


Fig. 5 Vector diagrams with varied phases of supply voltage of V

このように、位相制御方式を用い、電源電圧 V の位相を変えることによって電流制御をおこなうことができる。なお、実際に使用される回路においては、電源電圧 V の位相を決定するために誘起電圧 E の位相、もしくは磁極位置を検出する手段が必要である。また、発電機の巻線抵抗や V と I の力率も考慮する必要があるため、実際の式の記述内容はここに述べた説明よりも複雑となる。

3. 発電量増加可能な位相制御

位相制御方式では、制御をおこなう位相範囲の選択が出力特性に大きな影響を与えることがわかっている。我々はこの位相範囲をより遅角方向へ広げること、短絡制御式に比べより大きな発電量を得ることを可能とした。Fig. 6 に、誘起電圧に対して印加するバッテリー電圧の位相を変化させたときの、出力電流特性を示す。この図からわかるように、位相差 0° の点から、進角方向 (右方向) へいくほど出力電流は低下し、遅角方向 (左方向) へいくほど出力電流は増加する特性を持っている。この特性を利用してバッテリー電圧が一定となるようフィードバック制御をおこなう。しかし、位相差 -68° で 22.5 A となるのを境に、それよりさらに遅れた位相角においては、ACG に流れる線電流は増加するものの、出力電流が低下傾向となり、制御系が正帰還の状態になってしまうため、ACG 発熱量の増加や制御系の不安定性を招く可能性がある。これらを防ぐためには、制御をおこなう位相範囲を常に適切な範囲内に留める必要がある。また、そうした制御を可能とするためには、制御の基準位置である誘起電圧の位相、もしくは磁極位置を精度良く検出する必要がある。

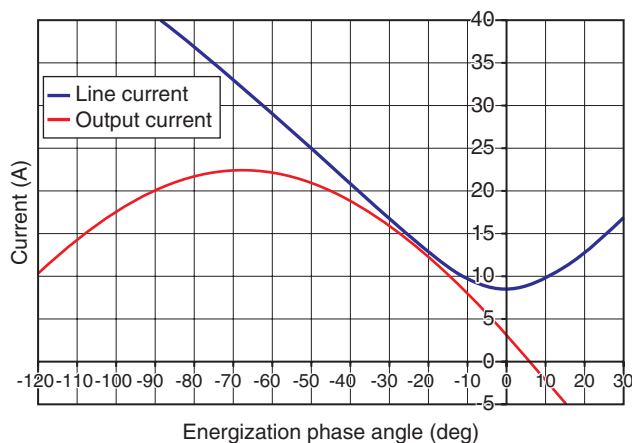


Fig. 6 Characteristics of charging currents to the phase of line current

4. 発電量増加による発熱に対応できる新しい磁極位置検出手法

制御の基準位置を精度良く検出する手法としては ACG

のステータコイル間にホールセンサを配置し磁極の位置を検出する手法などが採用されている。しかし、低回転時の発電量を増加させた場合、コイル温度は 200°C を超える可能性があり、その場合、センサ素子の温度は耐熱温度である 150°C を超えてしまう (Fig. 7, Fig. 8)。

そこで、我々は新たな磁極位置検出手法の検討をおこなった。検討をおこなう際に、既存のエンジンに対する形状変更が最小限となること、現在量産されているセンサが流用可能なこと、転倒によるセンサ破損のリスクが最小限となるセンサ配置を採ること、位置検出精度は $\pm 10^\circ$ 以内のことという四つの要件を設けた。

さまざまな手法の検討をおこなった結果、フライホイール外周上の磁石と同じ角度位置に突起を設け、一つのホールセンサのみによって誘起電圧位相を検出する手法を試みた (Fig. 7)。この手法の長所は、温度の低い位置を選び、一つのホールセンサのみを配置すればよい点である (Fig. 8)。しかし短所として、そのままでは磁極位置の検出ばらつきが $\pm 43^\circ$ 以上と大きく、要求精度を満たすことができない (Table 1)。これは主に ACG やエンジンカバーなどの複数の部品の機械的公差が積み上がることによるものであり、この手法を採用するためには何らかの補正手法が必要となる (Fig. 9)。

そこで我々は、全波整流をおこなうときに、ACG 各相の線電流と誘起電圧の位相の間には、周波数に応じて変化する一定の関係性に着目した。コイルを流れる線電流は、フ

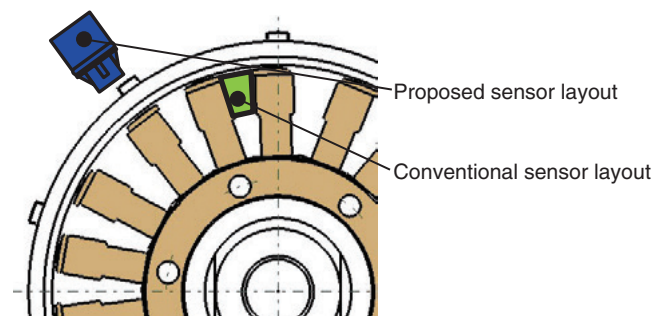


Fig. 7 Comparison of sensor configurations between in-stator location and out-of-flywheel location

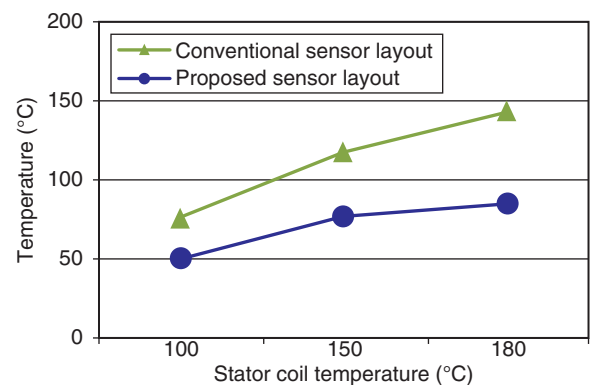


Fig. 8 Comparison of sensor temperatures

Table 1 Comparison of accuracies of detection angles

Sensor layout	Proposed layout		Conventional layout
	Before correction	After correction	
Detection error angle (°)	±43.5°	±4°	±3°

ライホイールが回転した際にステータコイルより生じる誘起電圧に起因して発生するため、誘起電圧周波数や充電電流が流れる経路の抵抗によって、線電流と誘起電圧の間に一定の位相差が生ずる。Fig. 10 の単相等価回路において ACG より発生する誘起電圧 E は

$$\dot{E} = (j\omega L + R)\dot{I}$$

L : ステータコイルのインダクタンス

R : 回路の負荷抵抗

と表すことができ、

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{j\omega L + R}$$

となる。このときの誘起電圧と線電流の位相差 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

となる。

実際には、Fig. 11 図中 (a) に図示した ACG が発電した

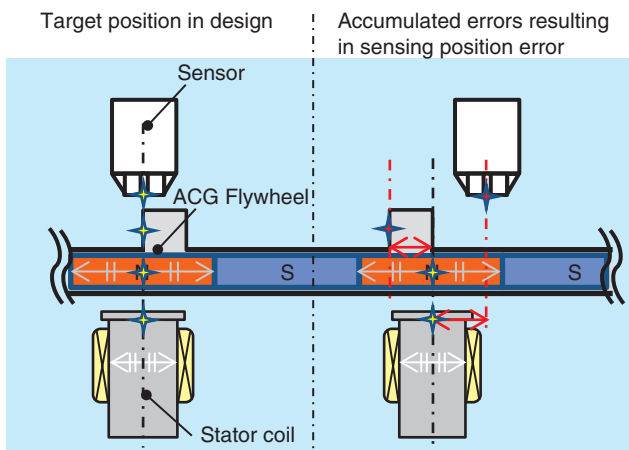


Fig. 9 Source of errors affecting detection angle accuracy of out-of-flywheel type sensor configuration

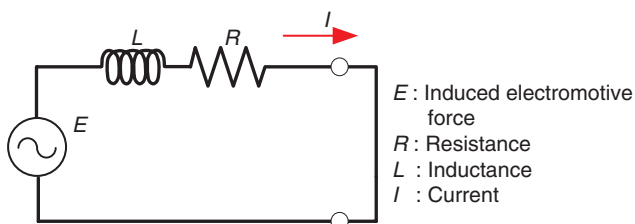


Fig. 10 Equivalent circuit of ACG (single-phase)

際の磁極センサー線電流位相と、Fig. 11 図中 (b) に示した各回転数における誘起電圧－線電流位相差の特性マップの特性値との位相差 θ を求める。これにより、Fig. 11 図中 (c) に示した制御の基準位置となる磁極センサー誘起電圧位相差を求めることができる。

ただし、Fig. 12 に示すような完成車等価回路の負荷抵抗 R_2 については車両側の電気負荷の変動により変化するため、レギュレート レクチファイアの出力端子間電圧を測定することにより抵抗 R_2 変化分の位相変化量の補正をおこなった。これらの補正をおこなった結果を Table 1 に示す。補正後の検出精度は、対象とする遅角方向の位相範囲内において $\pm 4^\circ$ となり、要件を満たす範囲まで精度向上することができた。

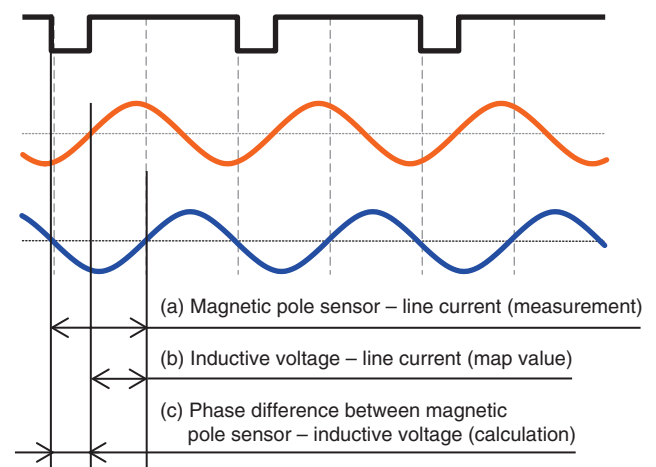


Fig. 11 Timing chart illustrating error compensation

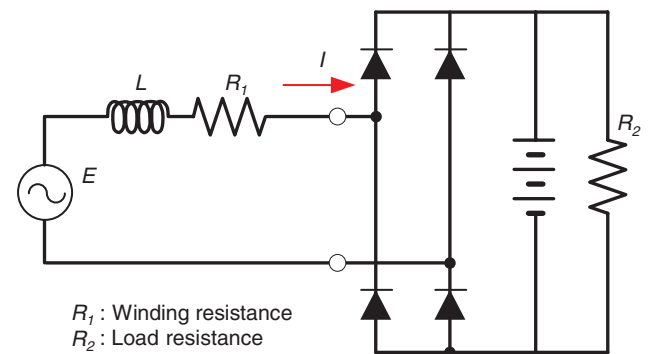


Fig. 12 Equivalent circuit of total charging system applied to the production design (single-phase)

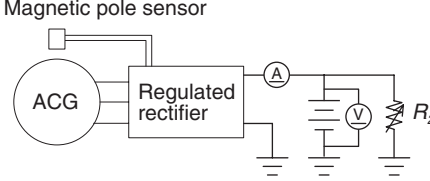
5. 位相制御式システムの効果確認

位相制御式レギュレート レクチファイアによる出力電流向上効果を確認するため、希土類磁石 ACG とフェライト磁石 ACG および、短絡式レギュレート レクチファイア

Table 2 Combinations of ACG and regulated rectifier

Combination		Short-circuit (1)	Short-circuit (2)	Phase control
ACG	Outer diameter	$\phi 132.5$	$\phi 132.5$	
	Magnet type	Rare-earth magnet	Ferrite magnet	
Regulated rectifier	Control method	Short-circuit control		Phase control

Table 3 Test conditions

ACG temperature	Stator coil temperature 120°C
Ambient atmosphere temperature	Room temperature
Test equipment	Motor bench
Test circuit	

と位相制御式レギュレート レクチファイアを Table 2 で示すように組合せ、出力電流特性測定および比較をおこなった。Table 3 には測定条件を、Fig. 13 には測定結果を示す。

今回の測定条件においては、位相制御式は短絡制御式 (1) よりも、全域で出力電流が上回っている。

3000 r/min 以下の低回転域で位相制御式は短絡制御式 (2) よりも出力電流が高く、特にアイドリング回転数である 1000 r/min では短絡制御式 (2) に対し 2.3 倍の出力電流を得られた。3000 r/min 以上の高回転域では、希土類短絡式とフェライト位相制御式の間に出力電流の差がほとんど見られないことがわかる。これらの結果により、位相制御を用いることにより、ACG 磁石材を希土類からフェライトへと変更することが可能となり、二輪車への適用が可能なシステムを実現できた。

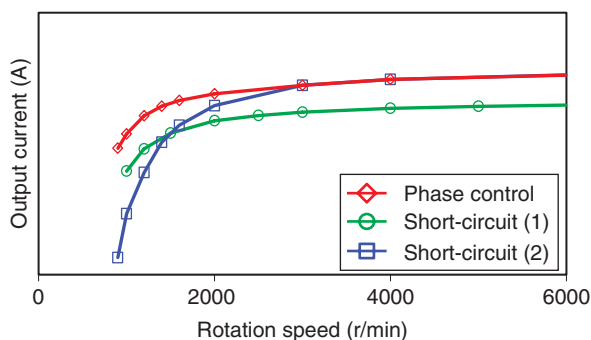


Fig. 13 Characteristics of output current to rotation speed

6. まとめ

我々は、二輪車用 ACG の磁石材にフェライトを採用するために、位相制御方式を採用し、発電量増加可能な位相制御範囲の選択手法と、発電量増加による発熱に対応できる新しい磁極位置検出手法を確立した。本開発により ACG 磁石材に希土類を用いることなく、フェライトによって求められる要件を達成することができるようになった。その結果、希土類磁石の価格変動によって生ずるリスクを回避し、ACG を安定した価格で生産することが可能となった。ここに述べた、位相制御式レギュレート レクチファイアを使ったフェライト ACG は、市販二輪車への適用が既におこなわれており、今後、さらなる適用機種の拡大が期待される。

参考文献

- (1) 宮入庄太: 電機子反作用, 大学講義 最新電気機器学 改訂増補, 丸善株式会社, p.199-201(1979)
- (2) 宇野幸一, 磯部直吉: 波形分析, 改訂 交流回路, 東京電機大学出版局, p.128-131(1991)
- (3) 西方正司: 同期機, よくわかるパワーエレクトロニクスと電気機器, 株式会社オーム社, p.105-110(1995)

■ 著 者 ■



蘭田 豊



小野 和彦



尾辻 美紅



大内 勝博