

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820094

研究課題名(和文) 車上搭載用高性能永久磁石発電機のための高効率整流回路

研究課題名(英文) Highly efficient rectifier circuit for high performance permanent magnet synchronous generators on vehicle

研究代表者

磯部 高範 (Isobe, Takanori)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：50545928

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：移動体上での発電機として期待される永久磁石同期発電機(PM発電機)向けの高効率整流システムを提案し実証を行った。この整流システムは高効率なダイオード整流回路に直列無効電力補償装置としてGCSC(gate controlled series compensator)を接続したものである。提案した整流システムは発電機の運転特性の点ではPWMコンバータと同等な能力を持ち、発電機の高効率運転が可能である。また電力変換器の損失の点ではダイオード整流器に準ずる高い効率をもつ。これらのことを3 kWのPM発電機を用いた実験によって実証した。

研究成果の概要(英文)：This work proposes a highly efficient rectifier system for permanent magnet synchronous generators (PMSGs), which is attractive to be applied to on-vehicle power generation. The proposed rectifier system consists of a diode rectifier, which is known as highly efficient, and a gate controlled series compensator (GCSC) as a series reactive power compensator. The proposed rectifier has the same capability with a PWM rectifier from the point of generator operation; therefore, the generator can be operated efficiently. At the same time, the proposed rectifier has a high efficiency of power conversion stage, which is almost same as the one of the diode rectifier. Those were confirmed in experiments using 3 kW PMSG.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：永久磁石同期発電機 整流回路 無効電力

1. 研究開始当初の背景

(1) 自動車の電気自動車化・ハイブリッド化に伴い車上のエンジンを動力源とする発電機の重要性が高まっている。例えばシリーズ・ハイブリッドでは全パワーが発電機を通過するので高効率化がシステム効率の向上の大きなカギである。また電気自動車であっても航続距離を伸ばすための「レンジ・エクステンダー」といった補助エンジン・発電機を搭載する場合もある。また航空機においても装備品の電気化に伴い必要な発電容量はますます増加している。これら移動体における発電システムに求められる特性として、小型・軽量であることと高信頼であること、そして当然高効率であることが求められる。このような要求に対し、出力密度の大きい(すなわち回転機としての性能が高い)PM 発電機の使用は有利である。

(2) しかし整流回路として広く用いられているダイオード整流回路は PM 発電機に使用できない。同期発電機では同期リアクタンスと呼ばれる成分の影響で、電流の増加とともに発電機電圧が下がってしまい出力電力が低下する。そこで一般的には無効電力の供給が可能な PWM 整流回路を用い、発電機電圧を一定に制御することで発電機能力の最大を出力するようにする。出力の向上だけでなく、少ない電流で同じ出力をとる運転が可能なので発電機の効率も向上する。

2. 研究の目的

(1) 前述のように PM 発電機では電圧調整と高効率運転のために比較的高価な PWM 整流回路を用いなければならない。そのためシステム全体としての魅力に欠け、採用が進んでいるとは言い難い。本研究課題では、ダイオード整流回路に直列無効電力補償を組み合わせて、PM 発電機を高効率でかつ最大能力を発揮させることが可能な、シンプルかつ高効率な整流回路を開発することを目的とする。

(2) 直列補償回路を用いる最大の理由は、半導体容量の削減とそれによる高効率化である。無効電力分のみを取り扱う直列補償回路は発生電圧が低いため、低耐圧で損失が少ない半導体スイッチを用いることができる。またダイオードブリッジは IGBT よりも導通損失が少なく、IGBT を用いたアクティブ整流回路よりも高効率化が期待できる。

(3) 本研究課題では図 1 に示す「2 スイッチ式直列補償回路」の採用を検討する。これは電力系統制御の分野で GCSC (Gate Controlled Series Compensator) [1] として知られるものとほぼ同様の動作をする。交流回路の基本波周波数でスイッチングすることで、図 1 に示すようにコンデンサの充放電パスを制御する。

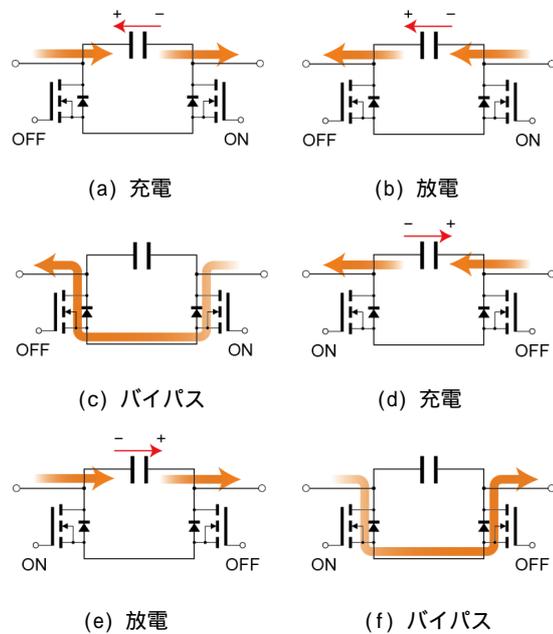


図 1 直列補償装置 GCSC の電流パス

(4) この直列補償回路の特徴の 1 つは、補償回路の等価容量が実装されているコンデンサと同じ程度になるとき、回路を通過する電流は半導体スイッチをほとんど流れないことである。実装されているコンデンサを直列コンデンサとみれば、その容量を可変にする分だけ半導体スイッチに電流が流れる、ともいえる。本研究課題ではシリーズ・ハイブリッドやレンジ・エクステンダーといった出力変動の少ない発電機をターゲットに考えており、実装するコンデンサの容量を適切に選定すれば、直列補償装置にかかる半導体損失を極めて小さくすることができると期待できる。

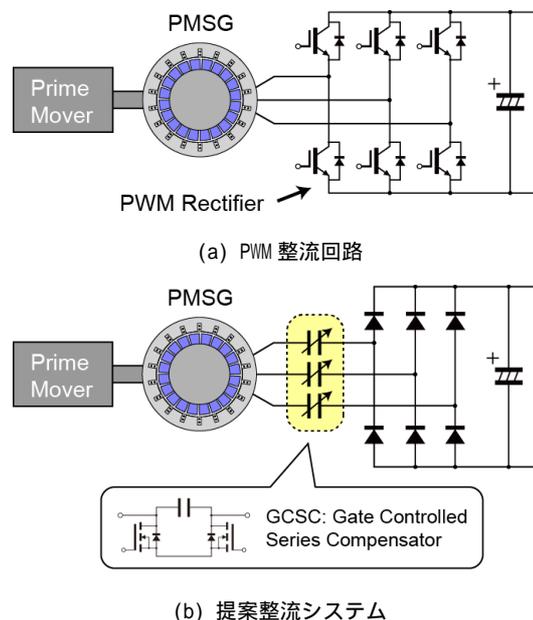


図 2 比較・検討を行う整流システム

Induction motor (as prime mover) Torque sensor Tested PMSG

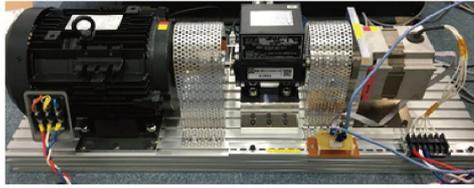


図3 製作したモーターテストベンチの外観

表1 供試発電機の諸元

Rated speed	6000 min ⁻¹
Rated frequency	400 Hz
Rated voltage	400 V
No load voltage	360 V
Synchronous reactance	6.91 mH
Winding resistance	1.15 Ω

3. 研究の方法

(1) 本研究では図2に示すPWM整流回路と、GCSCを発電機に直列に接続したものにダイオード整流回路を用いた提案方式について、電力変換器の効率と発電機の効率に着目して比較検討を行った。また、無効電力補償の効果を確かめるため直列補償装置を用いないダイオード整流回路についても実験を行った。

(2) 駆動対象として図3に示すようにPM発電機を誘導電動機で駆動するテストベンチを製作した。またPM発電機の諸元を表1に示す。容量はスケールダウンしたモデルであるが、回転数と電圧については想定する実機に近い値となるよう設計した。なお、この発電機は試設計であるため定格出力については定めがないが、巻線の設計等を勘案すると概ね3 kW程度である。

(3) PWM整流回路と提案整流システムについての試作を行った。GCSC部の外観を図4に、使用した部品の仕様について表2および表3に示す。この発電機に対し、提案整流システムでは整流後の直流電圧は509~445 Vの間で制御することで制御する。またPWM整流回路では589 V一定の直流電圧とする。したがって、PWM整流回路およびダイオード整流回路には1200 V耐圧の半導体デバイスを使用した。

(4) 一方GCSCについては同期リアクタンスでの電圧降下の半分に対応する電圧が発生する。同期リアクタンスで降下する電圧は一般的に定格電圧の数十パーセントであり、また使用した発電機では最大85 V程度であると試算できた。よって200 V耐圧の半導体デバイスが利用でき、MOSFETの使用が可能である。MOSFETの使用により、電流定格(すなわちチップ面積)の大きいデバイスを採用することでオン抵抗を極めて低くすることが可

Gate drive circuit Capacitors (8.5 μF)

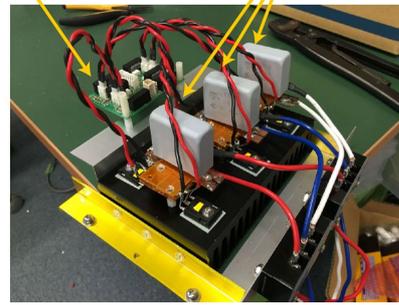


図4 製作したGCSC(三相分)の外観

表2 提案整流システムの仕様

MOSFETs for GCSC	Type	IRFP4668PbF
	V _{DSS}	200 V
	I _D	130 A
	R _{DS(on)}	8.0 mΩ
Capacitors for GCSC	Type	FM339M X2
	Capacitance	10 μF (nominal)
		8.5 μF (measured)
	Voltage	310V (ac)
Diode rectifier	Type	MSD30-12
	V _{RRM}	1200 V
	I _D	30 A

表3 PWM整流回路の仕様

IGBTs	Type	FGA15N120ANTDTU
	V _{DSS}	1200 V
	I _D	15 A
FRDs	I _F	15 A
Switching frequency		10 kHz
Dead-time		4 μs

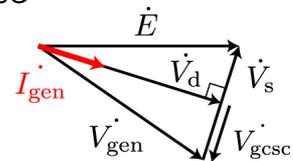
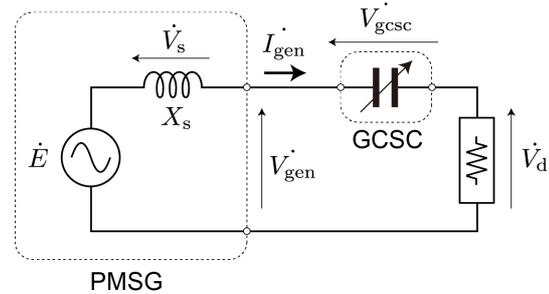
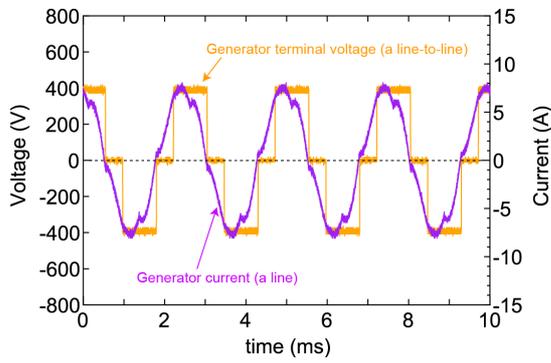


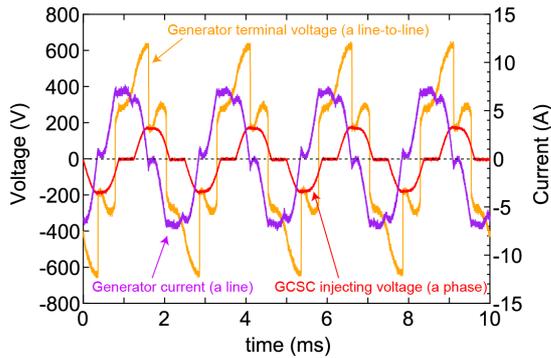
図5 提案する直列補償の制御法

能になる。GCSCはスイッチング周波数が非常に低いので、電流定格の大きいデバイスの選定によるスイッチング損失の増加・ドライブ損失の増加といった懸念はない。

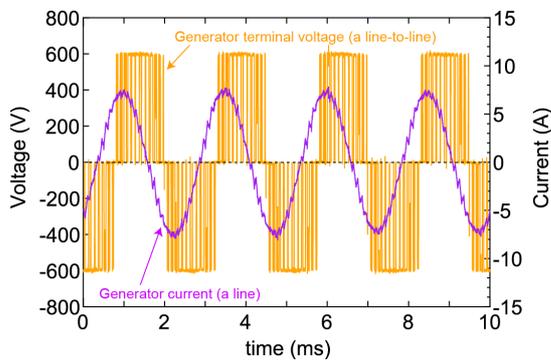
(5) 提案整流システムの直列補償制御法について図5に示す。直列補償の補償量制御によってGCSC電圧が制御でき、その結果発電機端子電圧がある範囲で制御可能である。本研究では、定格回転数時において負荷電流が



(a) Diode rectifier



(b) Proposed rectifier



(c) PWM rectifier

図6 各整流システムの動作波形 (3 kW)

変わった場合でも常に発電機端子電圧が一定となるよう制御することを提案する。そのようにすることで、すべての負荷範囲で定格電圧を最大に利用することができるからである。また無負荷時の電圧は補償により制御はできず無負荷誘導機電力が発電機端子電圧となることから、すべての負荷範囲で発電機電圧が無負荷誘導機電力に一致するように制御する。逆にいうとシステム的设计として無負荷誘導機電力に過不足ない定格電圧を持つ発電機を設計することが必要である。

4. 研究成果

(1) 各整流システムの3 kW出力時の動作波形を図6に示す。GCSCの動作としては期待通りの動作波形が得られた。また、GCSCに発生する電圧は発電機電圧に比べて低く、事前に計算した電圧に概ね一致した。提案整流システムの電圧・電流波形はPWM整流回路

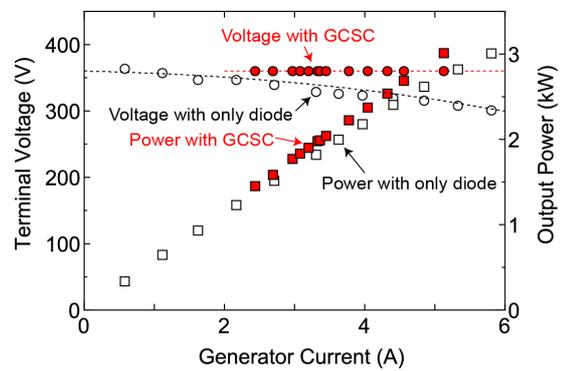


図7 補償の有無による発電機電圧・出力特性

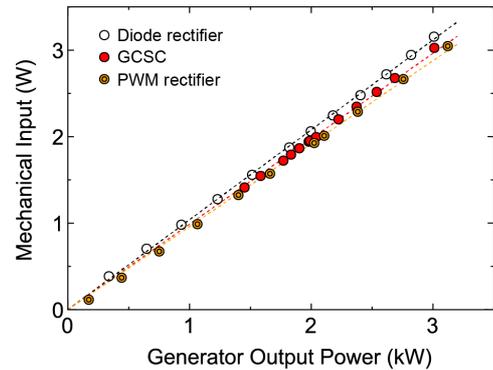


図8 発電機への機械入力

のそれに比べてかなり歪んでいる。しかし電流波形の歪みは補償なしのダイオード整流回路のそれと同程度であり、騒音等も特段大きいということはない。

(2) 補償なしのダイオード整流回路と補償有りの提案整流システムにおいて、発電機電圧と出力電力の特性を比較し図7に示す。点線は発電機の実験から得られた値(同期リアクタンス・巻線抵抗)から求めた理論曲線である。補償によって発電機端子電圧が一定に制御できたことが示されている。また、同じ出力を得るための電流が少ないため発電機の効率は補償によって高くなることが予想される。なお、ここには示さないがPWM整流回路によって発電機端子電圧を同じ電圧に一定にした実験を行ったが、提案整流システムとほぼ同様の特性を示した。

(3) 図8に電気出力を得るために要した機械入力を示す。この機械入力はテストベンチに設置したトルク計と回転数計によって求めたものである。同じ電気出力を得るのに機械入力が小さいということが、発電機の効率が良いことを意味する。GCSCによる直列補償の導入によって、補償なしのダイオード整流回路に比べて発電機の効率が向上していることがわかった。またPWM整流回路によってもほぼ同等の発電機効率向上が確認できた。

(4) 図9に電力変換器部(各整流システム)

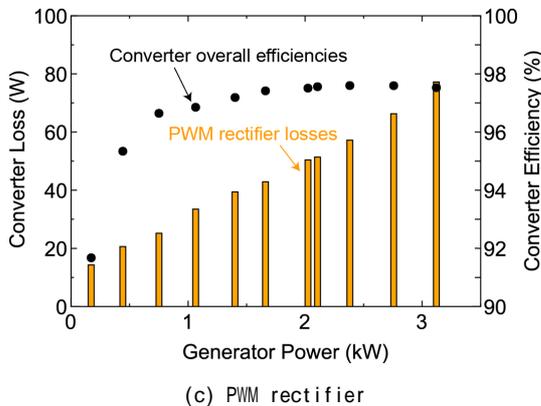
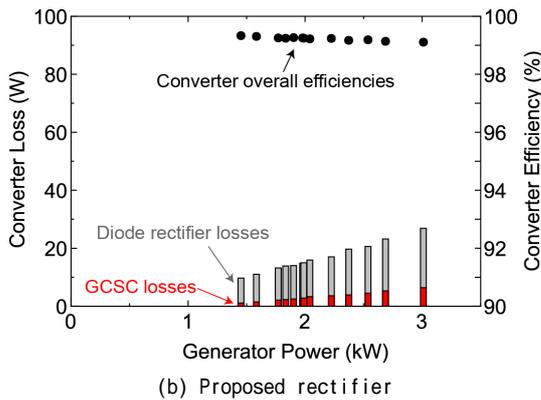
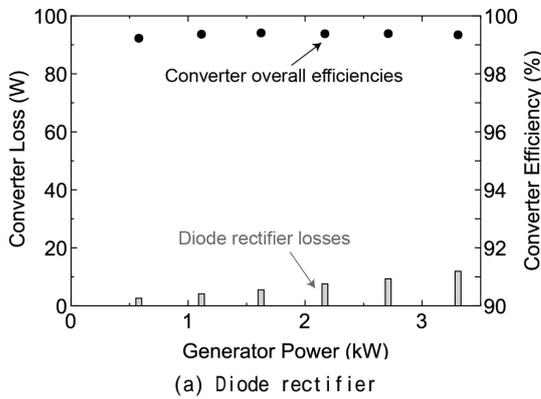


図9 電力変換器の効率と各部の損失

の効率と各部損失の測定結果を示す。ダイオード整流回路の効率は99.5%程度と非常に高い効率であることが確認できた。また提案整流システムにおいてもそれに次ぐ効率(99%以上)であることを確認した。GCSCによって追加で発生する損失は3相全体で数W程度と、きわめて少ないことから、損失の面ではほぼダイオード整流回路と同じといってよい結果である。一方PWMコンバータでは効率が97%台と、一般的な電力変換器と同等の効率であるが、提案整流システムに比べるとやや劣る結果であることがわかった。

(5) 以上をまとめると、提案整流システムは発電機の運転特性の点ではPWMコンバータと同等な能力を持ち、発電機の高効率運転が可能であり、また電力変換器の損失の点ではダイオード整流器に準ずる高い効率をもつことが実証できた。

(6) しかしながら研究を通していくつかの課題とシステムが本来持つ機能の制限が確認できた。ひとつは提案制御システムには昇圧能力が無いので、低速回転時には低い直流電圧しか得られない点である。この特性により応用先は回転数があまり変化しない応用に限定される。

(7) また電力の制御をするために、直流電圧を制御する必要がある。このことは、ダイオード整流回路と同じであるが、負荷の種類によってはもう1段の電力変換器を必要とすることになる。

(8) さらには GCSC の制御範囲の制約である。軽負荷時には GCSC の運転可能範囲を超えるため補償を有効にすることができなかった。軽負荷時には補償によるメリットが少ないため、補償を無効にすることは検討すべきである。その場合、軽負荷時に無効にする特別なシーケンスが必要である。また、実験では波形の確認により GCSC の運転範囲内に入っているかどうか確認して調整を行ったが、実システムにおいては GCSC の運転範囲の制限を検知するためのセンサ等、なんらかのハードウェアも必要であると考えられる。

<引用文献>

[1] G. G. Karady, T. H. Ortmeyer, B. R. Pilvelait and D. Maratukulam, "Continuously regulated series capacitor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, No. 3, pp. 1348-1355, (1993).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計4件)

T. Isobe, Y. Yamada and H. Tadano, "Compensated Permanent Magnet Synchronous Generator for Power Generation in EV and HEV," in *EVTc2016*, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 25-27 May 2016

Y. Yamada, T. Isobe, R. Shimada, and H. Tadano, "Efficiency Evaluation of Rectifier System for PMSG with Highly Efficient Series Reactive Compensator," in *The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2015)*, Pattaya (タイ王国), 25-28 October 2015

山田庸介, 磯部高範, 嶋田隆一, 只野博, "ダイオード整流回路と直列無効電力補償回路を組み合わせた永久磁石同期発電機向

け整流回路の損失分析,”平成 27 年電気学会産業応用部門大会,大分大学旦野原キャンパス(大分県大分市),2015 年 9 月 2 日~9 月 4 日

山田庸介,磯部高範,只野博,“永久磁石発電機のための直列無効電力補償回路の検討,”パワーエレクトロニクス学会第 206 回定例研究会,同志社大学今出川校地良心館(京都府京都市),2014 年 12 月 20 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部 高範 (ISOBE, Takanori)
筑波大学・数理物資系・准教授
研究者番号: 5 0 5 4 5 9 2 8