

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760192

研究課題名（和文）

電流形単相 - 三相直接変換器を用いた高効率モータドライブシステムの開発

研究課題名（英文）

Development of current-fed single-phase to three-phase matrix converter

研究代表者

芳賀 仁 (HAGA HITOSHI)

仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工学科・助教

研究者番号：10469570

研究成果の概要（和文）：本研究は電力変換器を有するモータドライブシステムの省エネルギー・省資源化を目的に、直接電力変換および電流型電源入力に着目したシステム構成の提案および制御方法の開発を行う。提案システムは、電力変換器の省エネルギー・省資源化に加えて、電源高調波対策およびモータの省エネルギー化、低騒音化も実現できる特長をもつ。提案システムの有用性は、パソコンを用いたシミュレーション結果および実機装置の開発を用いた実験結果により明らかにされた。

研究成果の概要（英文）：This project has proposed a development of motor drive system to improve system efficiency and size of the system. The proposed system has special features that high efficiency of the power converter, small size of the power converter, high power factor at the source side, high efficiency and low noise of the motor. The utility of the suggestion system was clarified by the simulation result and the experiment result.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学 パワーエレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：パワーエレクトロニクス，マトリックスコンバータ，直接電力変換，インバータ，モータ制御，IPMSM，省エネルギー，省資源

## 1. 研究開始当初の背景

省資源・省エネルギー問題は、地球規模で取り組むべき重要な課題として位置づけられている。特に家庭では、エアコン分野の消費電力量の割合が大きいことから、圧縮機に用いられているモータドライブシステムの

省エネルギー・省資源化技術の開発が求められている。これまで、モータドライブシステムの低損失・省資源技術として様々な構成が検討、提案されている。図1は従来のエアコンで用いられている回路構成例を示すが、電解コンデンサ、リアクトルそしてスイッチン

グ素子が必要になる。これまで研究代表者は、図2に示すエアコン向けモータドライブシステムの省エネルギー・省資源化を実現する回路方式を提案している。この方式は、チョッパ回路レス化と電解コンデンサレス化ができ、インバータ制御により電源高調波レス化とモータの可変速駆動を同時に実現できる特長がある。

また最近では、双方向スイッチ回路を用いた直接電力変換技術（マトリクスコンバータ）の研究開発が国内外で行われるようになり、エレベータ用途で実用化されている。直接電力変換技術は、電源電圧を出力電圧に直接変換できるため、これまで汎用インバータで必要とされていた電解コンデンサが必要なく、さらに変換効率も改善できる特長をもつ。

このように、電力変換器単体での研究は進んでいるが、電源と負荷（モータ）も含めたシステム全体で評価した場合、以下に示す課題が挙げられる。

- (1) 出力電圧の電圧利用率が低いため、電源電圧が200Vなど低電圧を用いてシステムを設計するうえで、従来のBTBシステムと比べてモータ電流を大きくする必要があり、したがって、モータ銅損が増加する。
- (2) 入力電流波形を改善するために入力フィルタまたは大型のリアクトルが必要になり、部品点数増加、装置大型化の要因になる。
- (3) PWMに起因する出力電圧歪みが原因で、キャリア周波数によるモータ鉄損が顕在する。

したがって、システム全体の省エネルギー化・省資源化を推進するには電源、負荷の影響も考慮した回路技術の提案が必要になる。

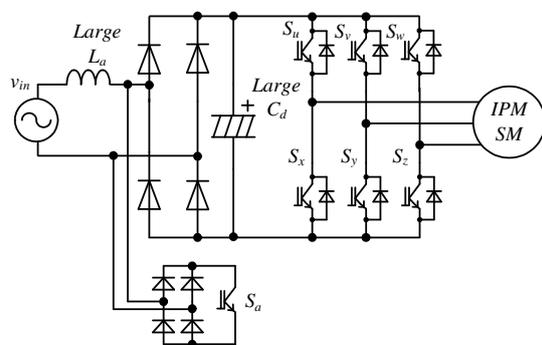


図1 従来の電力変換器構成

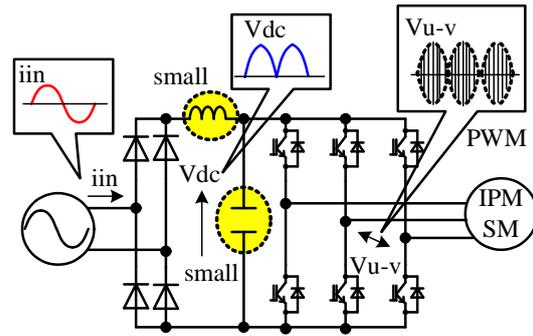


図2 電解コンデンサレスインバータ

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、電源および負荷の影響も考慮した省エネルギー化、省資源化を実現するモータドライブシステムの提案および制御方法の開発を行う。

図3は提案する電流単相 - 三相直接変換器を示す。図1に示す従来の1パルス整流方式と比較するとコンデンサ容量を1/100以下に低減、リアクトル容量も1/3以下に低減でき、さらに電源高調波レス化もできる。

提案システムは入力側のリアクトルによって電流源入力となり、出力側のキャパシタによって電圧型出力となることから、昇圧機能を有している。昇圧機能を利用することで、負荷モータの少ない電流での高速駆動が可能となる。さらに出力電圧および電流波形にPWM成分の少ない波形が得られるため、高調波に起因するモータ鉄損と銅損を少なくできる特長をもつ。提案システムは電流源入力のため入力にリアクトルを必要とするが、図2に示す電圧型回路構成でも入力波形改善のためのリアクトルが必要になる。

本研究では、図3に提案するモータドライブシステムの開発を行う。まず、提案システムの制御法の開発として、入力力率改善および負荷モータの可変速駆動を同時に実現する各素子のスイッチングパターンの構築法について検討する。

次に、提案する制御法の有効性を確認するために、シミュレーションを用いた検証を行う。最後に、実機装置の開発および実験による提案システムの有効性を実証する。

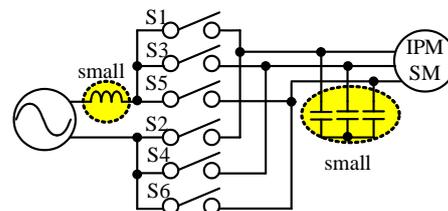


図3 提案するモータドライブシステム

### 3. 研究の方法

#### (1) 入出力波形制御方法の開発

提案システムは双方向スイッチ回路を6つ有する単相 - 三相マトリクスコンバータに基づいており、考えられるスイッチングパターンは64通りある。しかしながら提案システムは電流型入力と電圧型出力を有するため(1)式に示す電源解放と負荷短絡を禁止条件として考慮しなければならない。

$$\begin{cases} S_1 + S_3 + S_5 = 1 \\ S_2 + S_4 + S_6 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

したがって、実際に使用できるパターンは9パターンになる。

変換器の制御はモータの可変速運転と入力側の電源高調波レス化を同時に実現するスイッチングパターンにて行う。本研究では制御法の検討として、図4に示す仮想間接電力変換器を用いた仮想間接変換制御法を用いて行う。

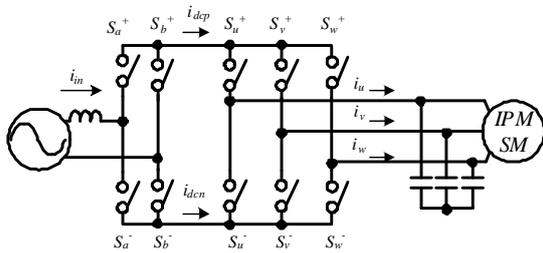


図4 提案する仮想間接変換器

図3において、入出力電流の関係式は(2)式で表される。

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{in} \\ -i_{in} \end{bmatrix} \quad (2)$$

一方、図4において仮想間接変換器の直流バス電流と入力電流の関係式は(3)式で表され、出力電流と直流バス電流の関係式は(4)式で表される。

$$\begin{bmatrix} i_{dcp} \\ i_{dcn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a^+ & S_b^+ \\ S_a^- & S_b^- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{in} \\ -i_{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_u^+ & S_u^- \\ S_v^+ & S_v^- \\ S_w^+ & S_w^- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dcp} \\ i_{dcn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3), (4)式より仮想間接変換器の入出力電流の関係式は(5)式として表される。

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_u^+ & S_u^- \\ S_v^+ & S_v^- \\ S_w^+ & S_w^- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a^+ & S_b^+ \\ S_a^- & S_b^- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{in} \\ -i_{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$

したがって、2つの回路の間には(6)式の関係がある。

$$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_u^+ & S_u^- \\ S_v^+ & S_v^- \\ S_w^+ & S_w^- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a^+ & S_b^+ \\ S_a^- & S_b^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

図5は提案方式の制御回路ブロック図、そして図6は仮想間接変換器の回路構成を示す。仮想整流器のスイッチングパターンはダイオード整流回路を想定して入力電流の極性に同期してスイッチングする。仮想インバータの制御は、三相電流型インバータの三角波比較方式PWMに基づいて行う。

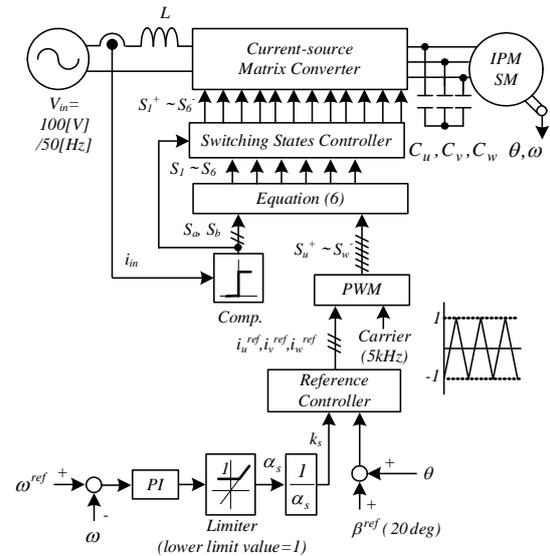


図5 制御回路ブロック図

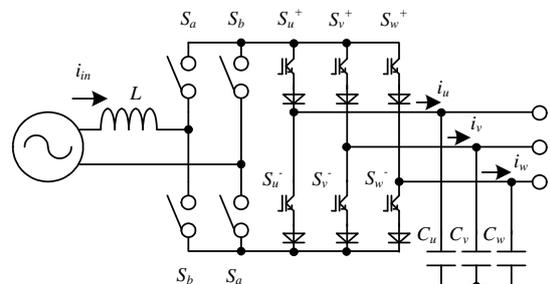


図6 仮想間接変換器の構成

出力電流指令値  $i_{uref} \sim i_{wref}$  の振幅は、速度 PI 出力を用いて計算する。速度上昇に伴い振幅を減らして変調率を下げている。変調率の低下に伴い電流型インバータの昇圧動作が利用できる。出力電圧の上昇を利用して

高速運転する。なお本研究では、双方向スイッチ回路は、入力電流の極性と S1～S6 の信号に応じてスイッチングする。図 7 は電流型インバータの PWM 方法を示す。PWM は 2 アームを用いて行い、PWM する素子の選択は図 7 に示す領域で分割して決められる。

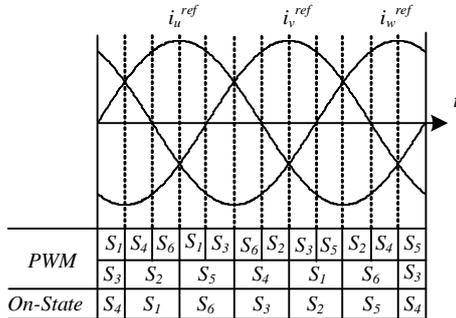


図 7 PWM 素子の選択

#### 4. 研究成果

##### (1) 仮想間接制御法の有効性の確認

提案システムの制御法の有効性を確認するために、R-L 負荷接続時の実験による検証を行った。図 8 は仮想間接変換器の実験で用いたシステム構成を示す。

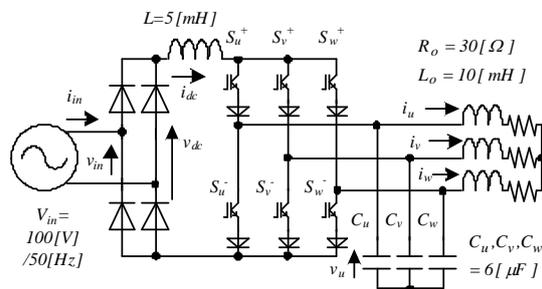


図 8 検証に用いた仮想間接変換器の構成

図 9 は、仮想間接変換器を用いた入力波形そして図 10 は提案回路の入力波形をそれぞれ示す。また、図 11 および図 12 は出力電圧と出力電流波形の実験結果を示す。提案回路のスイッチングパターンを構築する上で用いた仮想間接変換器の動作と同等の入出力波形が、提案回路でも同様に得られていることが確認できた。

入力力率は仮想間接変換器の実験結果で 355(W) の負荷電力にて 98.0% を得た。

仮想インバータの変調率は 0.9 で、出力線間電圧の実効値は 107.5(V) であり、仮想間接変換器における昇圧動作を確認できた。

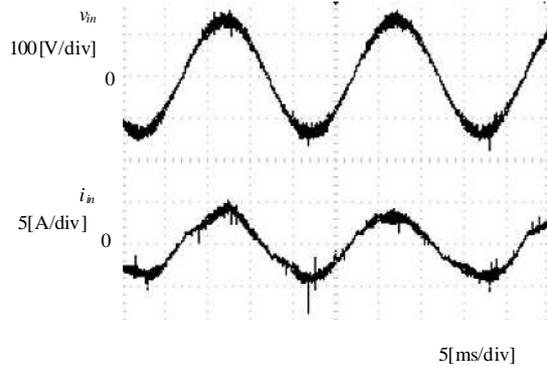


図 9 仮想間接変換器を用いた入力波形

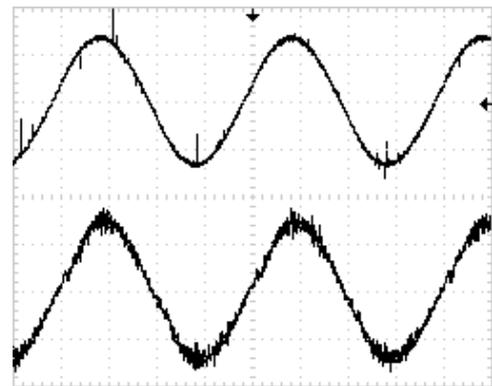


図 10 提案システムを用いた入力波形

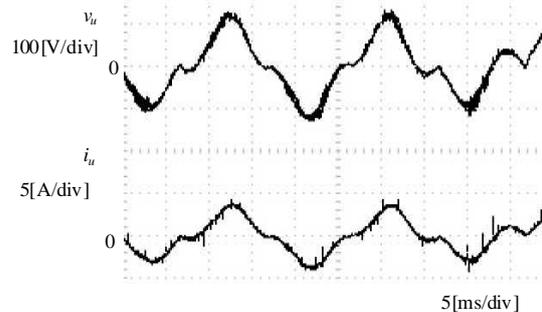


図 11 仮想間接変換器を用いた出力波形

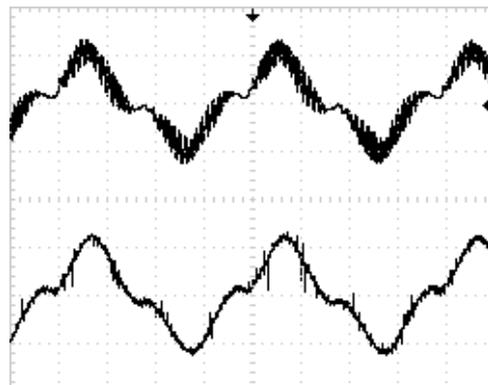


図 12 提案システムを用いた出力波形

(2) モータ駆動時の特性

モータ接続時の提案方法の基本動作を確認するために、回路シミュレータ Psim を用いた検討を行った。表 1 はシミュレーションで用いたモータパラメータを示す。

図 13 は、提案システムの速度応答波形を示す。速度指令は 200[rad/s]を与えており、負荷トルクは 5[Nm]を加えている。三相出力電力は単相入力電圧に同期した多くの脈動成分を有している。それゆえ、IPMSM にトルク脈動が現れる。しかしながらモータの慣性モーメントがあるため IPMSM の速度は脈動を有しながら平均的に制御できる。

表 1 モータパラメータ

Stator resistance	1[Ω]
d-axis inductance	8[mH]
q-axis inductance	20[mH]
Magnet flux	0.38[wb]
Pole number	4
Inertia moment	$1.8 \times 10^{-2}$ [kgm <sup>2</sup> ]

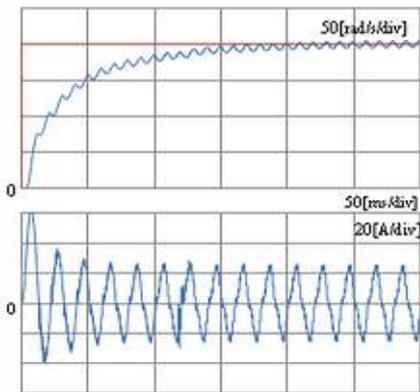


図 13 速度応答波形

図 14 は入力電圧と入力電流波形を示す。入力電流波形は高調波成分の少ない良好な波形を得ている。入力力率は 85.0%を得ている。

図 15 は 1 相分の出力電圧と出力電流波形をそれぞれ示す。変調率は 0.5 で動作しており、電源電圧 100(V)に対して出力線間電圧実効値は 168(V)を得ている。提案システムは昇圧動作を用いながら IPMSM を駆動できていることが確認できる。さらに、出力キャパシタにより PWM 成分を平滑できるため出力電圧と電流波形は PWM 成分の少ない波形が得られている。なお、出力波形に含まれる振動成分は主に電源脈動による振動である。この脈動成分は図 2 に示す従来の電解コンデンサレスインバータシステムでも生じており、提案方式と図 2 の方式の出力波形を比較すると、提案方式には PWM 成分が少ないため高調波鉄損、および高調波銅損を少なくできる期待があ

る。そして、提案方式は図 2 および従来のマトリックスコンバータ方式と比較して、昇圧動作によって電圧利用率を大きくできることから、システム設計において、モータ側の出力電流低減が可能になる。これより、銅損の少ないモータ設計が可能になる。

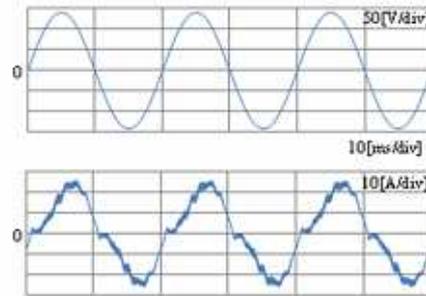


図 14 入力電圧と入力電流波形

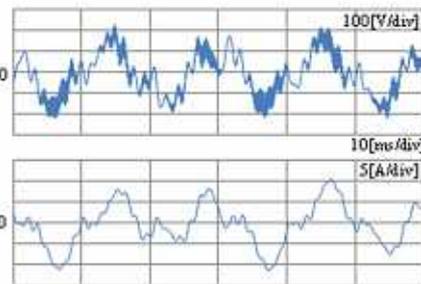


図 15 出力電圧と出力電流波形(U相)

図 16 は提案システムの力率特性を示す。なお、特性は回路は図 8 に示す仮想間接変換器を用いた結果を示しており、変調率は 0.9 一定にして実験した。負荷電力の増加に伴い力率は減少するが、今回評価したすべての電力エリアで 90%以上の高力率を得ている。

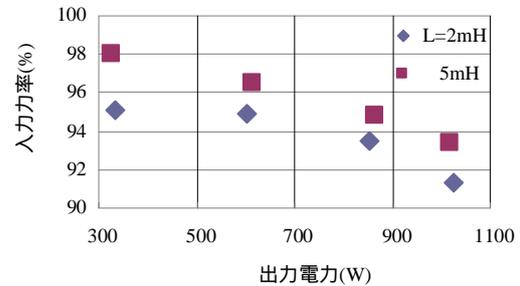


図 16 力率特性

以上、本研究で得られた成果として、モータドライブシステムの省エネルギー・省資源化を実現する回路技術の研究において、電流型回路トポロジーに着目した直接変換回路の提案および制御法の開発を行った。提案シ

システムおよび制御法の基本特性はシミュレーションおよび実験により明らかにできた。今後、本研究で提案した回路技術の実用化に向けた検討を進めることで、モータドライブシステムの省エネルギー・省資源化への貢献が期待できる。

#### 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)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計4件)

- H. Takahashi, R. Hisamichi, and H. Haga,  
“ High Power Factor Control for  
Current-Source Type Single-phase to  
Three-phase Matrix Converter ”, IEEE  
Energy Conversion Congress and  
Exposition(ECCE) 2009, 2009年9月23  
日, Double Tree Hotel (San Jose, USA)  
久道, 芳賀, 「電圧形/電流形切替え機能  
を有する単相 - 三相マトリクスコンバー  
タ」, 平成 21 年電気学会産業応用部門大  
会, 2009年8月31日, 三重大学(津市)  
高橋, 芳賀, 「電流形に着目した単相 - 三  
相電力変換器の検討」, 平成 21 年電気学  
会全国大会, 2009年3月18日, 北海道  
大学(札幌市)  
高橋, 芳賀, 「電流形構成に着目した単相  
- 三相マトリクスコンバータの制御法」,  
第14回高専シンポジウム in 高知, 2009  
年1月24日, 高知市文化プラザ(高知市)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

なし

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

芳賀 仁 (HAGA HITOSHI)

仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス  
工学科・助教

研究者番号：10469570

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし