

# 複数台運転を想定した永久磁石同期電動機の直入れ運転の基礎検討

学生員 長野 剛 正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

## Investigation of Direct Grid Connection of Permanent Magnet Synchronous Motor for Multi-parallel Motor Drive System

Tsuyoshi Nagano, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper discusses a direct grid connection of permanent magnet synchronous motor (PMSM) for multi-parallel motor drive system. It is difficult to connect PMSM to the power grid directly due to the resonance between a synchronous reactance and the inertia moment. In order to solve this problem, the direct grid connection system which consists of an auxiliary inverter of small capacity and a matrix converter is proposed for PMSM. The experimental results demonstrate that PMSM is connected to the power grid without the rush current and the speed vibration by the matrix converter and the auxiliary inverter.

キーワード：永久磁石同期電動機，直入れ運転，マトリックスコンバータ，ダンピング制御

Keywords : Permanent Magnet Synchronous Motor, Direct grid connection, Matrix converter, Damping control

### 1. はじめに

一定速度で駆動されるファン，ポンプなどでは誘導電動機(以下，IM)の直入れ運転が幅広く利用されている<sup>(1)</sup>。一方で，近年，省エネルギーの観点から，永久磁石同期電動機(以下，PMSM)の駆動方法に関する研究が盛んに行われている。一般に PMSM では磁極位置に応じて，電流を制御しなければ，乱調が発生するため，IM のように直入れで駆動できない。一方で PMSM の乱調を抑制する手法として，PMSM の電流情報を利用した制御が提案されている<sup>(2)</sup>。しかし，この手法では常時インバータで駆動する必要がある。この手法では，直入れ運転時に乱調を抑制できないため，PMSM の直入れ運転には適用できない。そこで著者らはこれまでに補助インバータを用いた PMSM の乱調抑制法について提案している<sup>(3)(4)</sup>。著者らが提案している手法は PMSM の複数台並列運転を目的とした手法であるが，乱調を抑制する点で直入れ運転時にも同様の効果が得られる<sup>(4)</sup>。しかし，直入れ運転切り替え時の大きな突入電流により PMSM の減磁を招くおそれがある。

一方，近年，交流から交流に直接電力を変換するマトリックスコンバータが注目を集めている<sup>(5)(6)</sup>。著者らはこれまでに PWM 運転から直送モード切り換え時の突入電流を回避するため，マトリックスコンバータの直送モード移行制御を提案している<sup>(7)</sup>。入力と出力を直接接続し，スイッチング動作を行わない直送モードでは電圧利用率が 1 になる。そのため，電圧利用率が 0.866 で制限される通常の PWM 運転から直送モードに切り換える際にモータ端子電圧が急上昇する。また，切り換え時に入力電圧と出力電圧に位相差があると，大きな突入電流が発生する。著者らが提案した直送モード移行

制御を IM に適用することで，突入電流なくスムーズに直送モードに移行し，直入れ運転ができていたことを実機検証により確認している。

そこで本論文では，補助巻線と補助インバータによるダンピング制御とマトリックスコンバータの直入れ移行制御を適用した PMSM 直入れ運転手法を提案する。補助巻線および補助インバータは乱調を抑制する分の容量でよいため，モータ容量の 1/10 程度でよい。また，PMSM を駆動するための電力供給は直入れにより行う。なお，提案システムは，負荷はファンやポンプなどで低速で動作するアプリケーションを想定しており，定格負荷点で端子電圧が系統電圧の時，PMSM が最大効率となるように設計されていることを前提とする。本論文では，まず，提案システムの概要について述べる。次に MG セットによるダンピング制御を適用前後での加速試験を示す。その後，直入れ移行制御の実機検証を示す。

### 2. PMSM 直入れ運転システム

#### (2-1) 提案システム

図 1 に提案システムの構成を示す。PMSM は別途にダンピング制御用の補助巻線を設けた，直入れ用のモータとして専用設計する。補助巻線は主巻線と同スロットに設置する。提案システムではモータ始動用のマトリックスコンバータと乱調抑制用の補助インバータの 2 種類の変換器を用いる。マトリックスコンバータは大容量を想定しており，複数台の PMSM の群運転を想定し，V/f 制御にて制御する。一方，各 PMSM に付随する補助インバータは，補助巻線を介して乱調により生じたトルク振動を打ち消すトルクを出力するように電流制御を行う。ここで，補助巻線および補助インバータ

は主巻線およびマトリックスコンバータに対し、十分小さい定格容量に設計する。その結果、提案システムでは出力トルクおよび回転速度に乱調が生じない安定な並列運転および直入れ運転を可能にする。なお、各補助インバータが各モータで生じる乱調を抑制するため、3台以上の並列運転でも同様のシステムで安定化が可能である。この結果、各PMSMに中容量の電力変換器を接続するシステムに比べ、大容量の電力変換器1台に複数のPMSMを接続して小容量の補助インバータを用いる提案システムは低コスト化が望める。

### 〈2.2〉提案システムの制御

図2にマトリックスコンバータに適用する直入れ移行制御の状態遷移図を示す。速度制御モード(モードI)は、始動時などでPMSMの回転速度を定格回転速度まで加速させるモードである。回転速度が定格回転速度まで加速すると、状態は出力位相制御モード(モードII)に移行する。出力位相制御モードでは、PI制御器を用いて出力電圧位相を入力電圧位相と一致させる。次に、出力電圧振幅制御モード(モードIII)に移行し、マトリックスコンバータをACチョップ動作させ、出力電圧振幅を入力電圧に一致させる。本論文では、モードII、モードIIIを総称して移行制御モードと呼ぶ。この移行制御の後、直送モード(モードIV)に移行する。

図3にPMSMのモータ端子間電圧と回転速度の関係を示す。PMSMの定格電圧は直送モードを想定して系統電圧と同じ電圧とする。速度制御モードにおいて、マトリックスコンバータの最大電圧利用率は0.866であるため、通常のPWM運転から直送モードに急に切り換えると、出力電圧の振幅が入力電圧の振幅まで急上昇する。さらに、入力電圧位相と出力電圧位相が異なると大きな突入電流が発生し、過電流が生じる恐れがある。そこで、速度制御モードから直送モードへの移行は、移行制御モード(出力位相制御モードおよび出力電圧振幅制御モード)を介し、出力電圧を入力電圧、すなわち系統電圧まで徐々に上昇させることで、突入電流を回避する。

図4に提案システムの制御ブロック図を示す。マトリックスコンバータにはV/f制御、補助インバータにはベクトル制御および比例制御の速度制御系を付加する。各補助電力変換

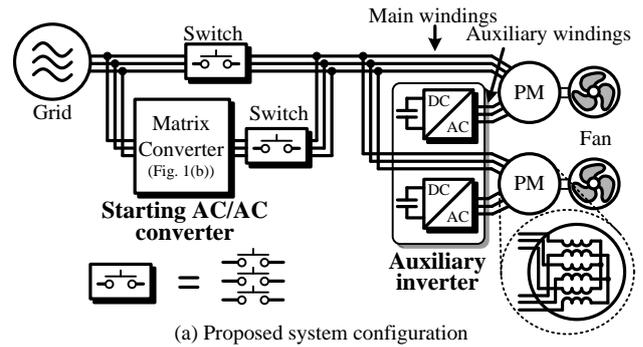


Fig. 1. Configuration of the proposed system.

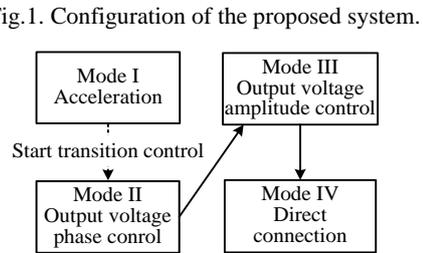


Fig. 2. State transition diagram of the control mode.

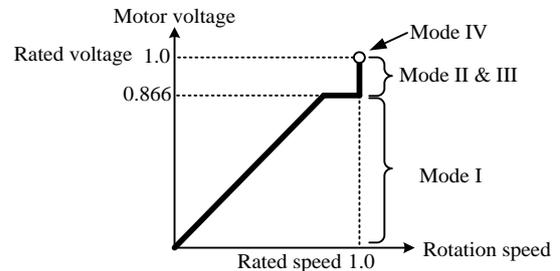


Fig. 3. Relationship between motor voltage and rotation speed in each mode.

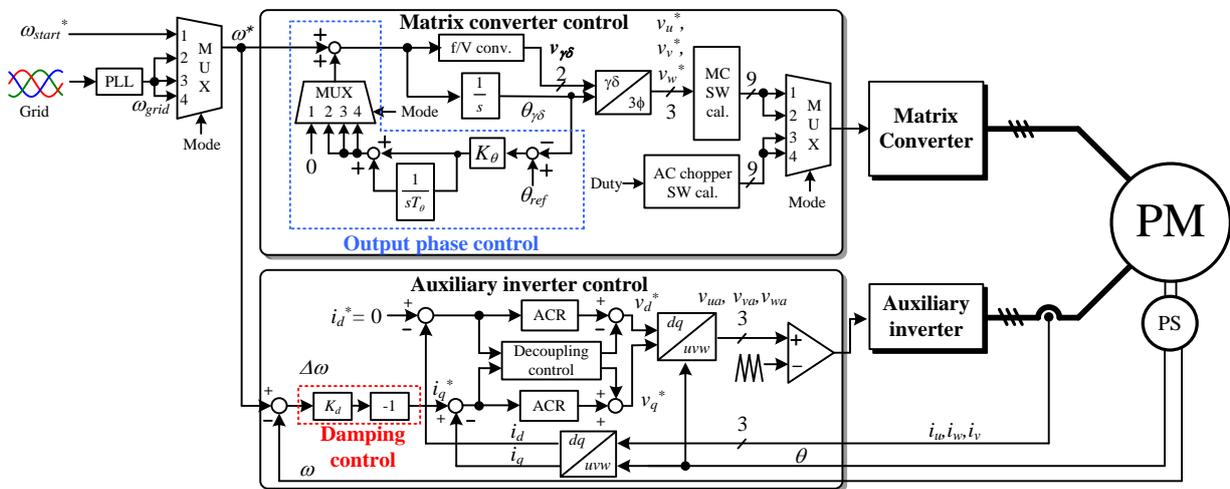


Fig. 4. Control block diagram for the proposed system.

器の座標軸は、通常ベクトル制御と同じく、d 軸を永久磁石がつくる磁束ベクトルと一致させる。V/f 制御では、出力電圧ベクトル方向を  $\delta$  軸、 $\delta$  軸より  $90^\circ$  遅れた軸を  $\gamma$  軸として制御器の直交座標を定義する。そのため、dq 座標系と制御器の  $\gamma\delta$  座標系では常に負荷角分のずれが生じている。速度指令  $\omega^*$  と実回転速度  $\omega$  と負荷角  $\delta$  の関係を(1)式に示す。

$$p\delta = \omega - \omega^* \dots\dots\dots(1)$$

乱調発生時には負荷角が振動する。そこで、(1)式より負荷角の微分  $p\delta$  が制御器の速度指令  $\omega^*$  とモータ座標系の角速度  $\omega$  の差であることに着目し、図 4 に示すように速度指令と回転角速度の偏差を入力として、負荷角の変動  $p\delta$  を補償する q 軸電流指令  $i_q^*$  を生成する。なお、磁極位置の情報は簡便のため、センサ付きを仮定するが、センサレスベクトル制御の技術を用いて推定することも可能である。以下に各モードにおける PMSM の制御方法について述べる。

〈2.3〉 モード I 速度制御モード

始動時は速度制御モードを開始する。速度制御モードは複数台並列運転を想定し、マトリクスコンバータを V/f 制御により駆動し、回転速度を定格回転速度(系統と同じ周波数)まで加速させるモードである。

〈2.4〉 モード II 出力電圧の位相制御モード

PWM 運転から直送モードへの切り換え時に発生する突入電流を回避するには、モード切り換え時に入力電圧と出力電圧の位相と振幅を一致させる必要がある。出力電圧の位相制御モードでは、まず出力位相制御で入出力の電圧位相を一致させる。この出力位相制御は、図 4 に示すように PI 制御器を用い出力位相  $\theta_{out}$  を入力位相指令値  $\theta_{ref}$  に一致させる。

〈2.5〉 モード III 出力電圧の振幅制御モード

モード II で入出力電圧位相が一致したことを検出して自動でモード III へと切り替え、マトリクスコンバータを AC チョップ動作させ、出力電圧の振幅を上昇させる。

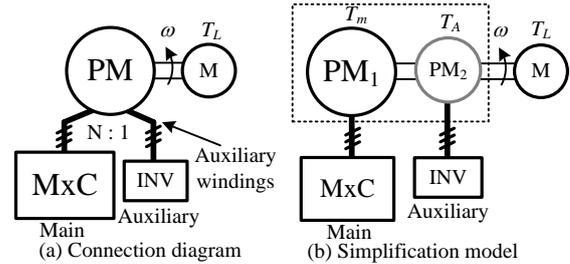
AC チョップ動作は、マトリクスコンバータのスイッチングパターンを AC チョップのスイッチングパターンと対応させることで、AC チョップと同様の動作を行うモードである。スイッチ  $S_{sv}$  が常時オンのままでデューティ指令を 0.866 から 1 まで増加させることで、出力電圧の振幅を徐々に増加させる。デューティ指令が 1 に達した時、スイッチ  $S_{ru}$ 、 $S_{tw}$  は常時オンとなり、直送モードに自動的に移行する。

〈2.6〉 モード IV 直送モード

直送モードは PMSM を系統に直接接続するモードである。マトリクスコンバータのスイッチは  $S_{ru}$ 、 $S_{sv}$ 、 $S_{tw}$  が常時オン、それ以外のスイッチは常時オフとなり、PMSM は系統に直接接続される。

3. ダンピング制御による乱調抑制の実験結果

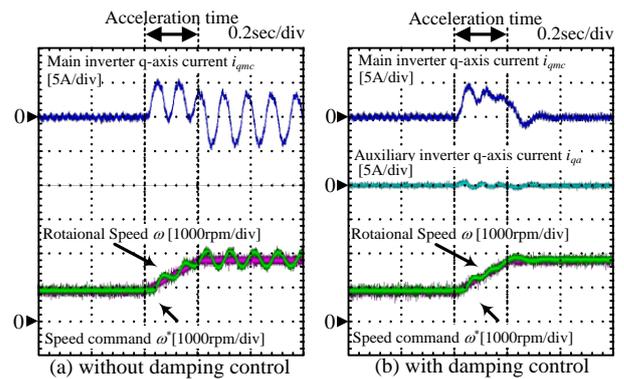
図 6 にダンピング制御の乱調抑制効果を確認するための実機構成を示す。提案システムでは、通常の PMSM と異なり、ダンピング巻線を設けた特殊な PMSM を使用する。そのため、本来、主巻線と補助巻線の間には磁気的な相互干渉が生



Figs. 6. Simulation and experimental model of the PMSM in addition auxiliary windings for damping control.

Table 1. Experimental condition

	PM <sub>M</sub>	PM <sub>A</sub>
Rated power [W]	1500	750
Rated speed [min <sup>-1</sup> ]	1800	
Rated current [A]	8.2	4
Number of pole pairs	3	3
Armature resistance [Ω]	1.55	1.98
d-axis inductance [mH]	11.5	15.2
q-axis inductance [mH]	23	33.2
Electro-motive force constant [Vs/rad]	0.368	0.338
Inertia moment [kgm <sup>2</sup> ]	0.0051	0.0026



Figs.7. Acceleration test with/without the damping control.

じるため、制御が複雑化する。そこで今回は磁気的相互干渉を無いものとし、MG セットの構成で制御の実機検証を行う。

図 7 にダンピング制御適用前後での加速試験結果を示す。図 7(a) はダンピング制御適用前、図 7(b) はダンピング制御適用後の実験結果である。加速試験では 900 r/min から 1800 r/min まで 0.2 sec で加速している。また、本実験ではトルクを直接観測することができないため、代わりに各モータの q 軸電流を観測することで抑制効果を確認している。ダンピング制御を適用していない図 7(a) では、マトリクスコンバータにより従来の V/f 制御にダンピング制御を付加せずに駆動している。そのため、加速直後に回転速度に 300 r/min の大きな振動が発生し、乱調が起きている。そこで、補助巻線と補助インバータを用いたダンピング制御を適用すると、図 7(b) のように、加速直後に補助インバータがトルク制御を行い、乱調を抑制する。そのため、主電力はマトリクスコンバータから供給されているにもかかわらず、加速直後の振動はほぼ発生しておらず、図 7(a) と比較して定常時の速度振動は 300 r/min からほぼ 0 r/min に抑制できており、マトリクス

スコンバータのq軸電流は振動せず、良好な結果が得られる。以上の実験結果からダンピング制御の乱調抑制効果を確認できる。

#### 4. 直入れ移行制御の実機結果

図8にモードIIの出力位相制御の実験結果を示す。出力位相制御開始から0.7sで入出力位相差がゼロに収束することがわかる。また、出力位相制御を開始した直後に出力電流が0.4 p.u.から0.6 p.u.まで上昇するが、すぐに収束している。

図9に出力位相制御から出力電圧振幅制御、さらに直送モードに移行した時の実験結果を示す。ACチョッパ動作時に出力電圧波形の包絡線が正弦波のPWM波形となり、V結線ACチョッパと同じ動作をしていることが確認できる。また、ACチョッパのデューティ指令を増加することで、徐々に出力電流の振幅が大きくなり、最終的に直送モードに移行している。さらに、ACチョッパ動作の開始時や直送モードの切り換え時に、出力電流を急峻に変化させることなくモードが切り換わっていることがわかる。

図10にq軸電流に着目した出力位相制御から出力電圧振幅制御、直送モードに移行した時の実験結果を示す。出力位相制御から出力電圧振幅制御、直送モードに移行中に補助インバータのq軸電流がほぼ流れていない。このことから、モードIIからモードIVの間は補助インバータがほぼ動作させずに移行可能であることがわかる。しかし、実際に負荷が接続されている状態では直入れ運転へ移行中に負荷変動により乱調が生じる場合があるため、補助インバータは常に動作させる必要がある。

以上の実験結果から、提案システムにより乱調による速度振動およびトルク振動を発生させずに、突入電流なくスムーズにPMSMの直入れ運転が可能であることを確認した。

#### 5. まとめ

本論文では3台以上のPMSM複数台並列運転を想定したPMSMの直入れ運転システムを提案した。MGセットを用いた実験結果から、提案システムにより突入電流なくスムーズにPMSMの直入れ運転が可能であることを確認した。

今後の課題は、補助巻線を付加したPMSMの設計、製作および実機検証が挙げられる。

#### 文 献

(1) 藤田, 電気機器, 森北出版, p. 42 (1991)  
 (2) 伊東, 豊崎, 大沢: 「永久磁石同期電動機のV/f制御の高性能化」, 電学論D, 122, pp.253-259 (2002)  
 (3) T. Nagano, et al. "Verification of Parallel Connected Multiple Motor Drive System with Numbers of Permanent Magnet Synchronous Motors", 15th European Conference on Power Electronics and Applications (2013)  
 (4) 長野, 伊東: 「補助インバータとモータ補助巻線を用いた永久磁石同期電動機の直入れ運転の基礎検討」, 平成24年度電気関係学会全国大会, 4-118, pp.198-199 (2013)

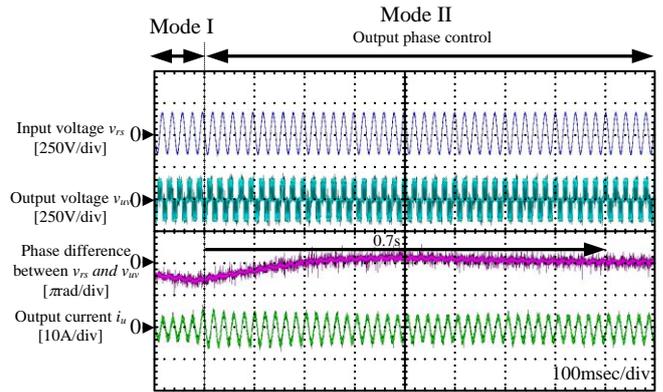


Fig.8. Experimental result of the output phase control in motor-generator set. There is no rush current in this process.

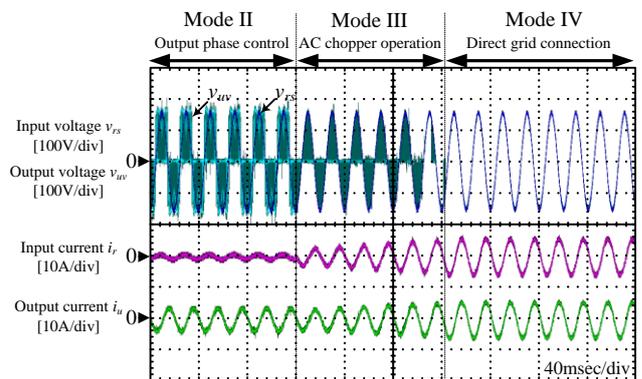


Fig.9. Experimental result of the transition from the output phase control mode to the direct grid connection mode in motor-generator set.

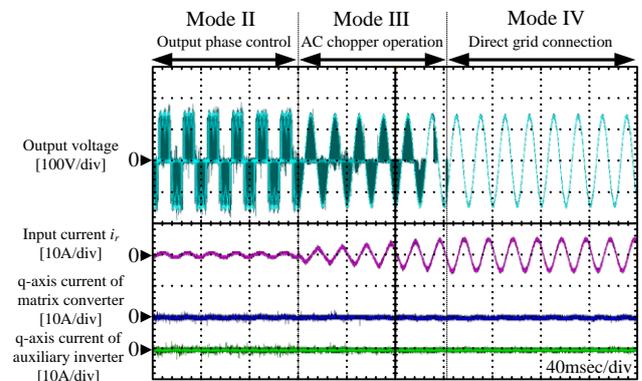


Fig.10. Experimental result focused on each q-axis current of the transition from the output phase control mode to the

(5) P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham: "Matrix Converters: A Technology Review", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 49, No. 2, pp. 274-288 (2002)  
 (6) T. Friedli, J. W. Kolar: "Milestones in Matrix Converter Research", IEEJ Journal I. A., Vol. 1, No. 1, pp. 2-14 (2012)  
 (7) 折川, 高橋, 五十嵐, 伊東: 「フライホイール駆動用マトリックスコンバータの突入電流レス直送モード移行制御」, 電学論D, Vol. 134, No. 1, pp. 82-89 (2013)