

永久磁石同期電動機の複数台並列駆動システムの一手法

学生員 長野 剛 学生員 中島 雄希 学生員 野下 裕市

正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

A Method for a Parallel Operation System of Multiple Units Permanent Magnet Synchronous Motor

Tsuyoshi Nagano, Student Member, Yuki Nakajima, Student Member, Yuichi Noge, Student Member,

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

This paper proposes a parallel operation system of the Permanent Magnet Synchronous Motors(PMSMs). Proposed system consists of two type power converters, a main converter with the V/f control and an auxiliary power converter with the vector control and the damping control. The multiple units PMSMs drive for the parallel operation with the V/f control of the main power converter. When the hunting occurs, the damping control of the auxiliary power converter suppresses the hunting of the PMSM. Proposed system achieves a stable parallel operation with two PMSMs, and the output power of the auxiliary power converter is 50% less than the main power converter with the V/f control.

キーワード：永久磁石同期電動機，並列運転，V/f制御，ダンピング制御

Keywords : Permanent Magnet Synchronous Motor, Parallel operation, V/f control, Damping control

1. はじめに

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。誘導電動機では1台のインバータで複数台の誘導電動機を駆動する群運転が可能であるが、PMSMでは磁極位置に応じて電流を制御しなくてはならないため、1台のインバータで群運転することはできない。そこで、2台のPMSMを駆動可能なキャパシタ中性点を利用したインバータ⁽¹⁾や5レグインバータ⁽²⁾、9スイッチインバータ⁽³⁾などの電力変換回路に関する研究が盛んに行われている。上記の電力変換回路は2台のPMSMを独立駆動可能であるが、PMSMの並列台数が3台以上の場合には上記の電力変換回路を直接適用することは不可能である。また、これらの回路はインバータの電圧利用率が制限されることや、デバイスの電流容量が増加するなどの問題点がある。

本論文では、V/f制御をベースとしたPMSMの複数台並列運転システムを提案する。制御対象であるPMSMに着目し、PMSMに補助巻線を設け、V/f制御により複数台並列運転する。PMSMの制御法には、一般的にベクトル制御が用いられるが、ここでは、より簡便なV/f制御を採用する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。V/f制御はセンサを必要とせず、オープンループでモータを駆動するため、ベクトル制御よりも複数台の並列運転が容易となる。更に、補助電力変換器により補助巻線を介してダンピング制御を行い、問題となる乱調を抑制する。本稿では、まず、提

案するシステムと制御原理を述べ、シミュレーションによりその効果を検証する。その結果、PMSM間の横流を防ぐことができ、ダンピング制御を行う補助電力変換器の容量がV/f制御を行う主電力変換器に比べて単独運転の場合には50%の容量で、2台並列運転時の場合には25%の容量で構成できることを明らかにする。

2. 提案するPMSMの並列運転システムの構成

一般的に1台のインバータによりPMSMを群運転すると、ベクトル制御を用いても、並列動作しているPMSMの磁極位置は必ずしも同一ではないため、磁束方向をd軸、トルク方向をq軸とした直交座標上でPMSMを制御できず、並列運転できない。一方、V/f制御では、通常、単独運転、並列運転に限らず、V/f制御は乱調現象が問題となる。そこで、PMSMの並列運転を可能にし、かつ乱調を抑制するシステムを提案する。

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ものを専用設計する。また、主電力変換器によってPMSMをV/f制御で並列運転する。問題となる乱調に対しては、補助巻線を介して各PMSMに付随する補助電力変換器によって、乱調により生じるトルク振動を打ち消すような電流をPMSMに流すことで、乱調による振動トルクを相殺する。結果、出力トルクおよび回転速度に乱調が生じず、並列運転を可能にする。補助巻線および補助電力変換器は主巻線および主変換器に対し、十分小さい電

力となるように設計する。なお、3 台以上の複数台になっても、同様なシステムで安定化が可能である。この結果、1 台 1 台の PMSM に中容量のインバータを接続するシステムに比べ、大容量の主電力変換器 1 台に複数の PMSM を接続し、小容量の補助電力変換器を接続することで、低コストになる可能性がある。

3. 補助巻線を用いたダンピング制御法

〈3・1〉乱調・脱調

乱調は負荷角が振動する現象である。負荷角の振動に伴い、トルクおよび回転速度が振動する。最悪の場合、この負荷角の振動により負荷トルクが脱出トルクを超え、脱調が起きる。これは単独運転時でも、並列運転時でも同様に生じるが、並列運転時には PMSM 間の横流の影響もあり、より脱調が起きやすくなる。

〈3・2〉ダンピング制御

V/f 制御では、インバータ出力電圧ベクトル方向を δ 軸、 δ 軸より 90° 遅れた軸を γ 軸として制御器の直交座標を定義し、安定化制御と高効率制御を行っている⁽⁴⁾。トルクが有効電力に比例することから、安定化制御は、出力電圧と同一方向成分の有効電力の振動分を検出し、インバータの出力位相を調整する。しかし、本提案システムでは、1 台のインバータで複数の PMSM を駆動するため、個別に有効電力をフィードバックして、出力位相を調整することができない。そこで、補助巻線に接続した補助電力変換器側で、個別に電流制御を行い、ダンピングをかける。各補助電力変換器の座標軸は、通常の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。

d 軸電流指令は最大効率を与えるように制御する方法もあるが、ここでは簡単のため d 軸電流の指令値をゼロとする。一方、q 軸電流指令は、トルクの振動を抑制するため、磁極位置の変動分に応じて逆方向にカウンターを与える。

図 2(a) にダンピング制御のブロック図を示す。磁極位置指令と磁極位置検出値の差を擬似微分して、位置の変動分を取り出し、比例ゲインを乗じて q 軸電流指令とする。しかし、この方法は位置情報を微分するため、ノイズの問題や疑似微分による帯域の制限がある。そこで、位置の微分が速度であることに着目し、図 2(b) のように速度情報を用いて、速度指令と回転角速度の偏差にダンピングゲインを乗算し、q 軸電流指令とする。ここで、ダンピング制御は ASR と同様の構成になるが、制御器を比例制御器とすることで、V/f 制御が設定する速度指令に対して、変動分のみを補償する形で動作する。

〈3・3〉システムブロック図

図 3 に提案システムの制御ブロック図を示す。主電力変換器には V/f 制御、補助電力変換器にはベクトル制御および比例制御の速度制御系を付加している。前述のように、補助電力変換器の速度制御器がダンピング制御器として動作する。なお、磁束情報はここでは簡便のため、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

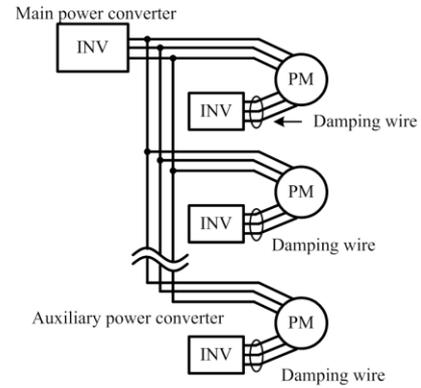


Fig. 1. Configuration of proposed system.

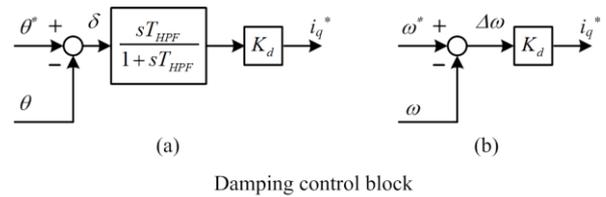


Fig. 2. Damping control block diagram.

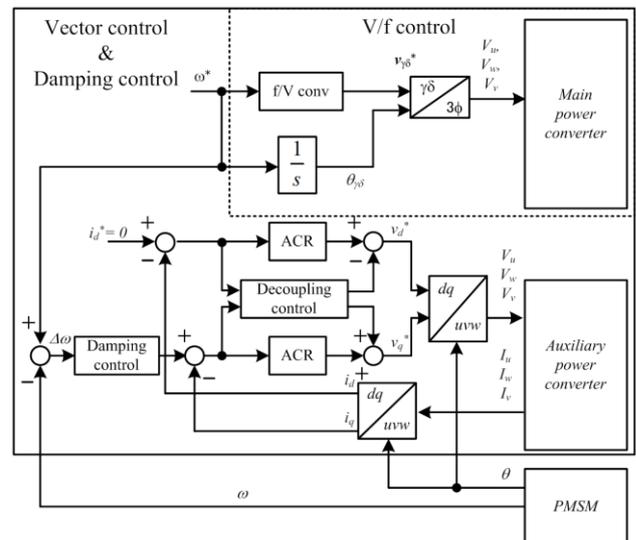


Fig. 3. Block diagram of the proposed system.

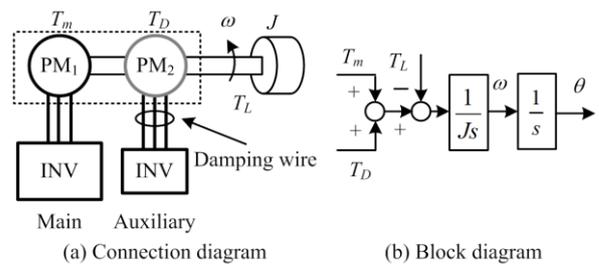


Fig. 4. A Model of the PMSM with damping wires in the simulation.

とも可能である。

4. シミュレーション結果

〈4・1〉ダンピング巻線付き PMSM の模擬方法

図 4 に提案するシステムのシミュレーション検証で使用する

Table 1. Simulation condition.

Rated power [kW]	5.5
Rated speed [min^{-1}]	1500
Rated torque [Nm]	35
Rated current [A]	20
Number of pole pairs	3
d -axis inductance L_d [mH]	4.3
q -axis inductance L_q [mH]	10.2
Armature resistance R_a [Ω]	0.215
Armature flux-linkage [Wb]	0.603
Inertia momet J_m [kgm^2]	0.018

る PMSM のモデルを示す。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。そこでシミュレーションでは、1つの軸で接続された2つの PMSM をモデルとして、制御の検証を行う。このとき、発生トルクは、同図(b)に示すように、 PM_1 と PM_2 で発生するトルクの加算値となる。なお、 T_L は負荷トルクを表している。

(4-2) PMSM 単独運転検証

提案システムのダンピング制御の乱調抑制効果を確認するために、突極比が 2.4、6 極の IPMSM を用い、単独運転時のシミュレーションを行った。ここでは、原理検証をおこなうため、補助巻線と主巻線の容量は 1:1 としている(つまり PM_1 と PM_2 は同一仕様としている)

図 5 に単独運転時のダンピング制御適用前と適用後のモータ加速時のシミュレーション結果を示す。また、表 1 にシミュレーション条件を示す。ダンピング制御適用後のシミュレーションでは負荷として定トルク負荷 35Nm(1p.u.)を加速期間が終了後に加えている。加速時間は定格加速時間の 0.164s とした。

ダンピング制御を適用する前では、加速開始直後から乱調により負荷角が振動することで、トルクと回転速度に振動が発生している。一方、ダンピング制御適用後は加速開始直後に負荷角の振動が見られるものの、ダンピング制御により振動が収束していることがわかる。その結果、トルクおよび回転速度の振動は抑制され、回転速度は速度指令に追従している。また、定格トルクを加速期間終了後に印加し、負荷変動が生じた際にもダンピング制御によるトルクおよび速度変動が抑制された。以上より、ダンピング制御により乱調の抑制が可能であることが確認できる。

補助電力変換器が乱調発生時のみ動作しているか確認するために、出力トルク T と主電力変換器の dq 軸電流寄与のトルク T_m と補助電力変換器の dq 軸電流寄与のトルク(ダンピングトルク) T_D に着目する。

図 6 より、主電力変換器の dq 軸電流寄与のトルク T_m にダンピングトルク T_D を加えることで、トルク T に振動が発生した際に、ダンピングトルク T_D が振動を打ち消すように生じていることが確認できる。

出力電力に着目すると、主電力変換器の出力電力は最大 1[p.u.]出力するのにに対し、補助電力変換器の出力電力は最大

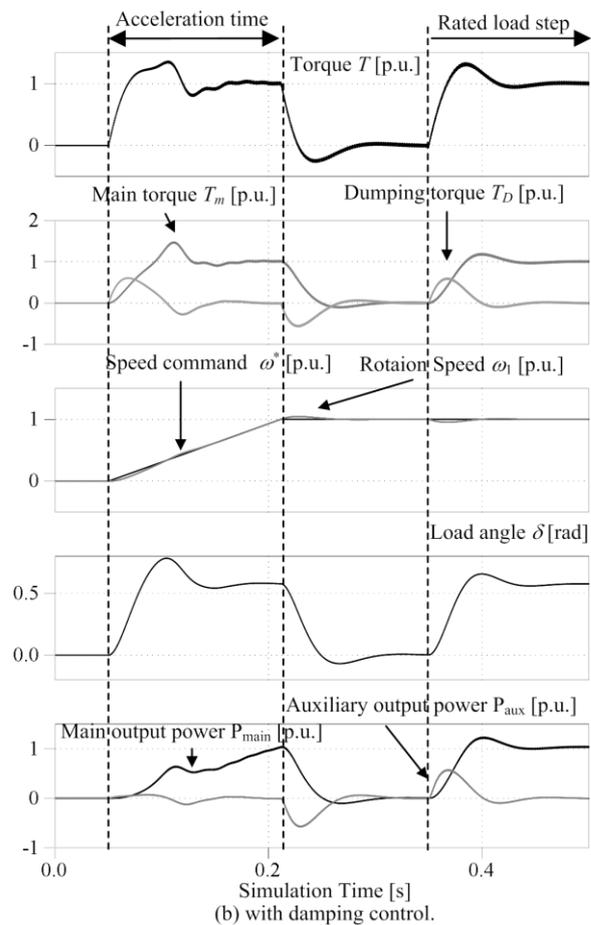
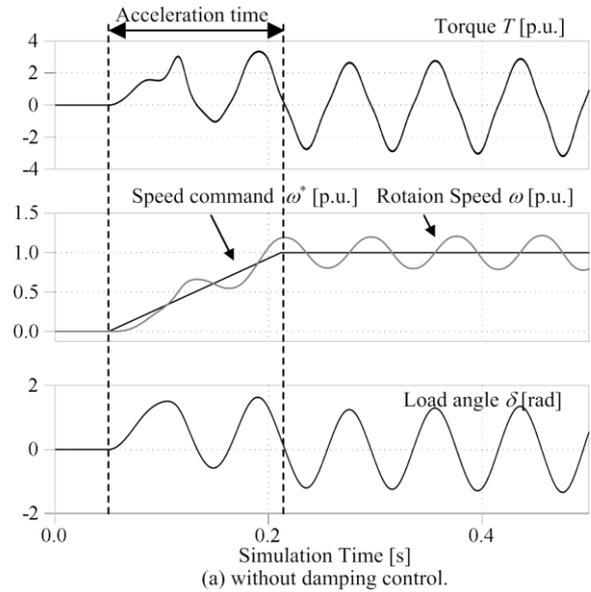


Fig. 5. Simulation result for a single operation without and with damping control.

で 0.5[p.u.]出力している。なお、補助電力変換器の出力電力およびトルク(すなわち q 軸電流)はダンピングゲイン K_d の調節によって変化することを確認している。また、トルクや出力電力に着目すると、振動収束後では補助電力変換器は動作していないため、乱調発生時のみ補助電力変換器が動作し

ていることが確認できる。また、同条件ではダンピングトルクが 0.5p.u.であることから、補助電力変換器の q 軸電流は定格電流の 50%で済むため、主電力変換器に比べて補助電力変換器を小容量で構成可能である。また、前述のとおり、ダンピングゲイン K_d の調整によって q 軸電流は変化するため、今回の条件よりも更に少ない q 軸電流、出力電力でも乱調を抑制することができる。

〈4・3〉 PMSM 並列運転検証

提案システムの並列運転時の安定動作を確認するために、2 台並列運転時のシミュレーションを行った。

図 6 にダンピング制御適用した並列運転時のシミュレーション結果を示す。キャプションのサフィックスは 2 台の PMSM を区別するためにそれぞれ 1, 2 とつけている。尚、シミュレーション条件は単独運転時と同一である。しかし、2 台の PMSM を並列運転しているため、出力電力は 2 台の PMSM の定格出力の合計で基準化している。また、加速時間は 0.164 s とした。

ダンピング制御適用時は単独運転時と同様に加速開始後にトルクや回転速度に乱調が発生するが、その後収束している。また、定格回転速度まで到達後、異なるタイミングで各々の PMSM に定格トルクを入力した場合、負荷変動は生じるものの、問題なく安定動作をしている。更に、同時に負荷バランスが異なる場合でも並列運転ができています。振動収束後では補助電力変換器は動作していないため、単独運転時と同様の結果が得られている。また、加速中でも乱調を抑制し、安定な動作が可能であることが確認できる。

出力電力に着目すると、並列運転しているため、主電力変換器の出力電力は定格出力の 2 倍の電力(1p.u.)を出力しているのに対し、補助電力変換器の出力電力は、それぞれ最大で 0.25p.u.出力している。単独運転時の結果と比較すると、並列台数の増加とともに主電力変換器の容量は増加してしまうが、各補助電力変換器の容量は変化しないことがわかる。更に、単独運転時と同様にダンピングゲイン K_d の調整によって、各補助電力変換器の出力電力、電流は変化するため、各補助電力変換器の容量は主電力変換器に比べて 25%以下の容量で構成できる。これは並列台数が増えても同様であるため、並列台数の増加に伴い、主電力変換器と比較して各補助電力変換器を小容量で構成をできることがわかる。

なお、並列台数が 3 台以上の場合でも同様に並列運転可能なことをシミュレーションで確認している。各々の PMSM でダンピング制御を行うことで乱調を抑えているため、並列台数に制限はない。

5. まとめ

本論文では 3 台以上の PMSM 並列運転を実現することを目的とし、V/f 制御をベースとした PMSM の複数台並列運転システムを提案した。シミュレーションにより提案システムのダンピング制御による乱調を抑制する動作と PMSM の並列運転動作を確認した。また、補助電力変換器の容量は主電力変換器よりも小容量で構成可能であることを明らかにした。

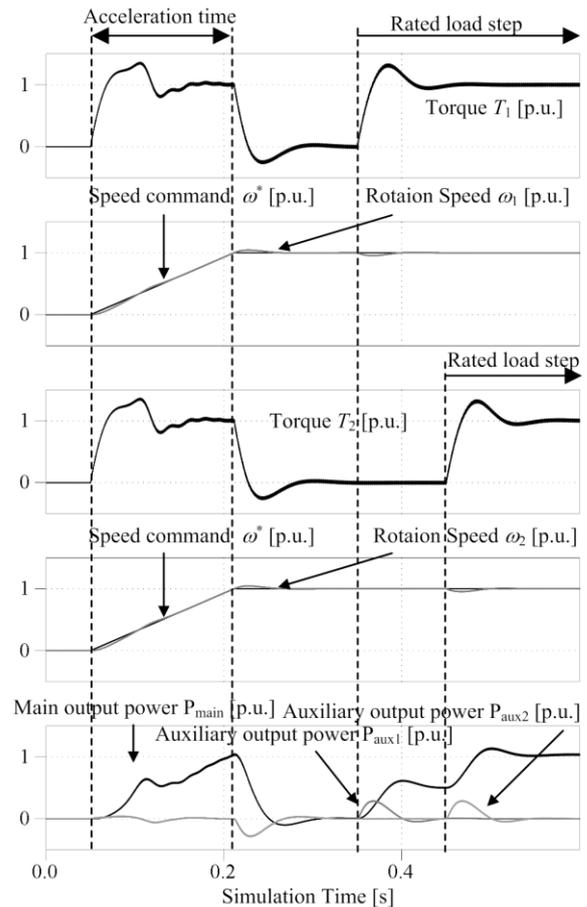


Fig. 6. Simulation results for parallel operation with damping control.

今後の課題は、提案システムの実機検証と補助電力変換器の最小容量検討、高効率制御の導入が挙げられる。

なお、本研究の一部は NEDO 平成 23 年度 課題設定型産業技術開発費助成事業の支援を受けており、関係者各位に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 星, 柴田: 「永久磁石同期電動機の 2 台一括制御用インバータのコンデンサ電圧補償法に関する一考察」, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会, pp.357-358 (2008)
- (2) 岡, 松瀬: 「2 アーム変調適用 5 レグインバータの PWM 制御法」, 電気学会論文誌 D, 129, pp.811-816 (2009)
- (3) 小南, 藤本: 「2 つの負荷に対して振幅・周波数を独立制御可能な 9 スイッチインバータの提案」, 電気学会論文誌 D, 128, pp.561-568 (2008)
- (4) 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」, 電気学会論文誌 D, 122, pp.253-259 (2002)
- (5) P. D. Chandana Perera, F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, P. Thøgersen: 「A Sensorless, Stable V/f Control Method for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives」, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 39, pp.783-791 (2003)