

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560316

研究課題名（和文） 超高制御帯域の電流制御系を持つ高性能 AC サーボシステムの開発

研究課題名（英文） Development of High Performance AC Servo System having Current Control Systems of Ultra-High Control Band

研究代表者

上町 俊幸 (KANMACHI TOSHIYUKI)

石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：50280334

研究成果の概要（和文）：瞬時空間ベクトルインバータに基づく AC サーボシステムにおいて、新しい空間ベクトル変調や、FPGA を用いた制御演算のハードウェア処理などの手法により、制御遅れ時間を短縮することで、非常に高い制御帯域としても安定に動作する電流制御系を構築し、これにより高速応答を実現する高性能サーボシステムを開発した。

研究成果の概要（英文）：In AC servo system based on a space vector modulation inverter, a current control system with ultra-high control band is constructed by shortening control delay time with techniques such as new space vector modulation and hardware processing of the control algorithms using FPGA. By using this current control system, the high performance AC servo system, which realizes quick and stable current and speed response, is developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

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：電気機器

## 1. 研究開始当初の背景

小型、軽量化が可能な AC サーボシステムは、制御系をデジタル化することで、制御性、信頼性が向上し、産業ロボットや医療ロボットなど、様々な機器の駆動源として用いられている。これらの機器の性能は、サーボシステムの性能に依存するところが大きいため、サーボシステムに対する要求も厳しく、過去にサーボシステムの高速度化、低コスト化を目的とした研究が、国内外で広く行われてきた。今後、産業ロボット、医療ロボットを更に高性能、高機能とするには、電流制御帯

域を上げて高速応答を可能にするなど、サーボシステムの高性能化が必要不可欠と言われている。しかし、デジタル制御系では、制御遅れ時間を持つため電流制御帯域が数千[rad/s]程度に制限され、高速電流制御が可能なサーボシステムを構成できない。これが、各種機器の高機能化を妨げる要因となっている。

一方、サーボシステムの構成要素である PWM インバータには、一般に制御が容易なキャリア変調インバータが用いられる。しかし、このキャリア変調インバータは、モータ

の急加速時などに電圧飽和が生じ易く、かつ電圧飽和が生じると、出力電圧が位相誤差を持つなど、出力電圧の操作性が悪くなる問題点がある。これに対し、瞬時空間電圧ベクトルインバータ(以下 SVM インバータ)は、電圧飽和時の操作性が良いことから、国内外で SVM インバータを用いたサーボシステムの開発が行なわれている。しかし、SVM インバータは、制御法が複雑であり、電流制御系を構成した際、サンプリングから電圧出力までの制御遅れ時間が長くなる。そのため、高帯域の電流制御系を構成することができないなどの理由から、広く普及していないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、サーボシステムの電流制御帯域を制限する要因が、デジタル制御や SVM インバータに起因する制御遅れ時間であり、この制御遅れ時間を短縮できれば、制御帯域の問題を解決できるという考えに基づき、SVM インバータの持つ電圧飽和時の制御性の良さと、非常に高い電流制御帯域を同時に実現する高性能な AC サーボシステムの開発を目的とする。

(1) 制御遅れ時間を短縮できる新しい SVM インバータのスイッチング制御法において、SVM 演算を FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いてハードウェア処理することで、SVM 演算による遅れ時間を短縮し、高い制御帯域においても安定な動作を実現する。

(2) FPGA を用いた SVM 演算に、インバータ電圧飽和を考慮した制御法を取り入れることで、電圧飽和や操作量飽和に起因した振動を抑え、安定な動作を実現する。

(3) FPGA で構成した新しい SVM インバータと電圧飽和を考慮した制御法を、これまでの誘導電動機サーボシステムから永久磁石同期電動機(以下 PMSM)サーボシステムに適用し、効率の良い PMSM サーボシステムにおいても、高い電流制御帯域での安定した動作を実現する。

(4) インバータ電圧飽和が生じたとき、あえて出力電圧の位相を変えることで、出力電圧を大きくし、過渡応答特性を改善する。

(5) SVM 演算部に加え、電圧飽和を考慮した電流制御系も FPGA を用いてハードウェア処理することで、制御遅れ時間をさらに短縮し、より高い制御ゲインにおいて安定した動作を実現する。

(6) 電動機の特性方程式から次のサンプリング点の電流を予測し、これを制御することで制御遅れ時間の影響をなくし、高い制御帯域での電流制御を実現する。

## 3. 研究の方法

(1) 誘導電動機の世界速度サーボシステムにおいて、これまで DSP(Digital Signal Processor)で行っていた SVM 演算を FPGA (APA300: Actel 社)を用いて構成した。また、このシステムを用いて速度制御実験を行い、ステップ指令に対する過渡時の電流制御特性を観測して、FPGA により制御遅れ時間を短縮したことの有効性を検証した。

(2) FPGA で SVM 演算を構成したシステムに、電圧飽和を考慮した制御法を取り入れた。また、このシステムを用いて速度制御実験を行い、電圧飽和時の速度制御特性を観測して、電圧飽和を考慮した制御を加えたことの有効性を検証した。

(3) FPGA による SVM 演算と、電圧飽和を考慮した制御法を、0.5[kW]の PMSM の速度サーボシステムに適用した。また、このシステムを用いて速度制御実験を行い、過渡時の電流制御特性と電圧飽和時の速度制御特性を観測し、提案手法の有効性を検証した。

(4) 電圧指令がインバータ電圧出力限界に達したとき、簡単なアルゴリズムにより出力電圧の位相を変え、出力電圧を大きくする手法を、FPGA を用いた PMSM サーボシステムに適用した。また、このシステムを用いて速度制御実験を行い、速度の過渡応答特性を観測して、提案法の有効性を検証した。

(5) これまで SVM 演算のみを FPGA でハードウェア処理していたが、これに加えて座標変換と電流制御系も FPGA を用いて構成した。また、このシステムを用いて電流制御実験、速度制御実験を行い、過渡時の電流制御特性と電圧飽和時の速度制御特性を観測し、FPGA により制御遅れ時間を短縮することの有効性を検証した。

(6) 1.5[kW]の誘導電動機サーボシステムにおいて、次のサンプリング点の電流を予測し、これを制御するアルゴリズムを構築した。また、このシステムを用いて速度制御実験を行い、過渡時の電流制御特性を観測して、提案法の有効性を検証した。

#### 4. 研究成果

(1) 図 1 は、電流制御帯域を 8000[rad/s]と高くし、速度指令を 350[rpm]から 1500[rpm]にステップ状に変化させ、回転角速度  $\omega_m$  とトルク分電流  $i_{1q}$  を観測した結果である。FPGA で処理することで制御遅れ時間が 19.8[ $\mu$ s]に短縮され、8000[rad/s]という高い制御帯域でも安定した電流制御が行われていることを確認した。

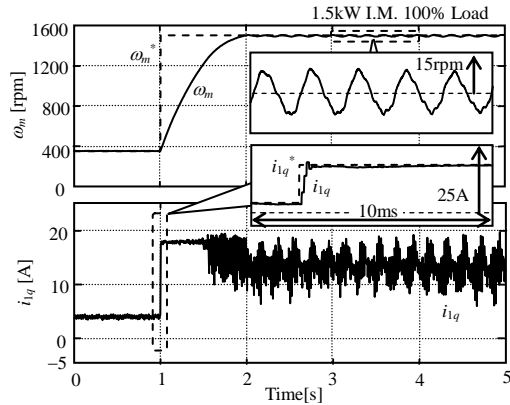


図 1 FPGA で SVM を構成したシステムの速度ステップ応答

(2) 図 2 は、電圧飽和を考慮した制御法を取り入れたシステムで、速度指令を 350[rpm]から 1500[rpm]にステップ状に変化させたときの、回転角速度  $\omega_m$  とトルク分電流  $i_{1q}$  を観測した結果である。図 1 では、過渡時に電圧飽和が発生した影響で、速度が 1500[rpm]に達したあと  $\omega_m$  に大きな振動が見られるが、図 2 では電圧飽和を考慮したことで、 $\omega_m$  が 1500[rpm]に達したあとも大きな振動もなく、安定した速度制御が行われていることを確認した。

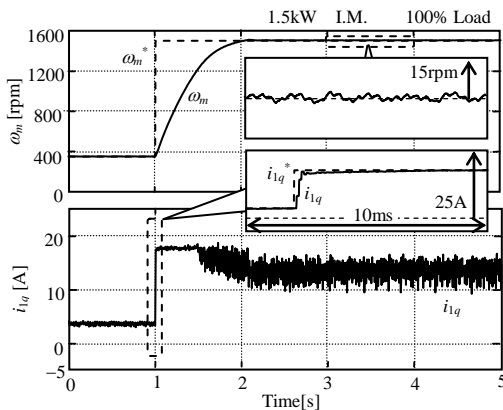


図 2 電圧飽和を考慮した制御法を加えたシステムの速度ステップ応答

(3) 図 3 は、従来の SVM と電圧飽和を考慮しない PMSM の速度サーボシステムにおいて、速度指令を 400[rpm]から 2000[rpm]にステップ状に変化させたときの、回転角速度  $\omega_m$  とトルク分電流  $i_q$  を観測した結果である。

図 3 では、過渡時に電圧飽和が発生した影響で、速度のオーバーシュートが大きくなり、整定時間が 325[ms]となっている。また、電流制御帯域を 18850[rad/s]と高くしているため、電流が振動し、安定に動作していない。

これに対し、FPGA による SVM と電圧飽和を考慮した制御法を用いると、図 4 に示すように、飽和の影響を抑えたことで整定時間が 275[ms]に短縮され、電流応答にも振動が現れなくなった。このことから、安定した電流制御と、高速な速度制御が実現できていることを確認した。

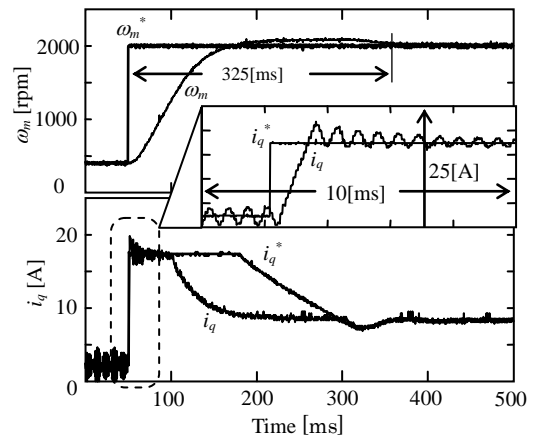


図 3 従来の SVM と電圧飽和を考慮しない PMSM サーボの速度ステップ応答

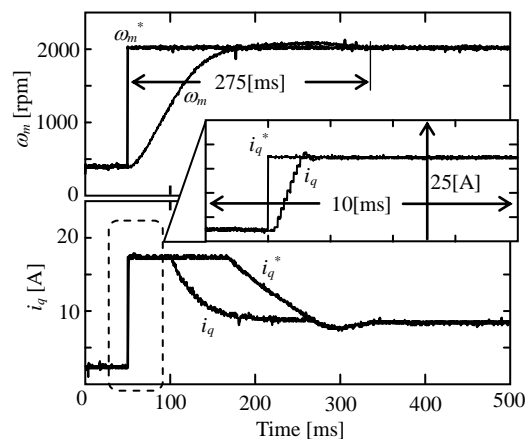


図 4 FPGA による SVM と電圧飽和を考慮した PMSM サーボの速度ステップ応答

(4) 図 5 は、電圧飽和時に出力電圧の位相を変えない従来の SVM を用いた PMSM の速度サーボシステムで、速度指令を 200[rpm]から 2000[rpm]にステップ状に変化させたときの、回転角速度  $\omega_m$  とトルク分電流  $i_q$  を観測した結果である。速度が大きくなると電圧飽和が生じるため  $i_q$  が  $i_q^*$  に追従できないことが分かる。このため、十分な加速トルクが得られず、整定時間が 183[ms]となっている。

これに対し、電圧飽和時に出力電圧の位相を変える手法を用いた結果が図 6 である。この手法を用いると出力電圧が大きくなるため、 $i_q$  の偏差を小さくできる。これにより、従来法より大きなトルクが得られることから、整定時間が 155[ms]に短縮され、高速な速度制御が実現できていることを確認した。

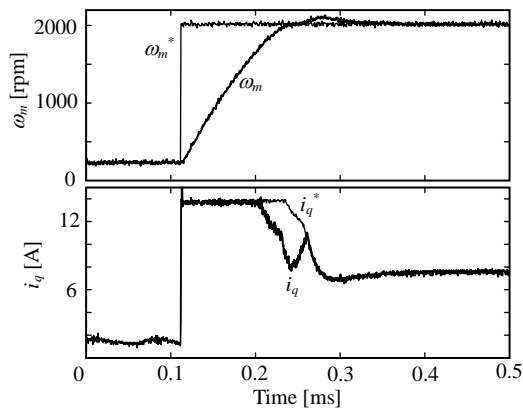


図 5 電圧飽和時に位相を変えない従来の手法による速度ステップ応答

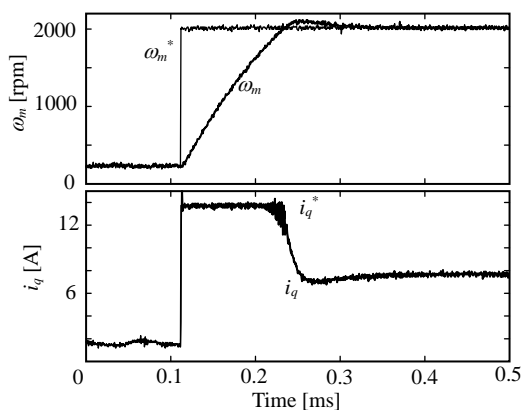


図 6 電圧飽和時に位相を変えた提案手法による速度ステップ応答

(5) 図 7 は、全ての制御演算を DSP で行うシステムにおいて、電流制御帯域を 12000[rad/s]として電流制御を行ったときの電流応答を観測した結果である。DSP では 11[ $\mu$ s]の制御遅れ時間があるため、電流制御帯域を高くするとオーバーシュートが現れることが確認できた。

これに対し、電流制御演算、SVM 演算および座標変換を FPGA で行うシステムでは、制御遅れ時間が 6[ $\mu$ s]に短縮され、図 8 のようにオーバーシュートのない、安定した電流制御が行えることを確認した。

図 9 は、FPGA で構成した電流制御系が、電圧飽和を考慮しない従来の制御法の場合で、電流制御帯域を 16000[rad/s]として速度制御を行い、速度応答と電流応答を観測した結果である。電流のステップ指令が与えられたとき、電圧飽和が生じ、その影響で電流応答にオーバーシュートが生じている。

これに対し、FPGA で構成した電流制御系が電圧飽和を考慮した制御法の場合は、図 10 のように、電流のステップ指令に対して、オーバーシュートのない安定した電流制御が行えることを確認した。

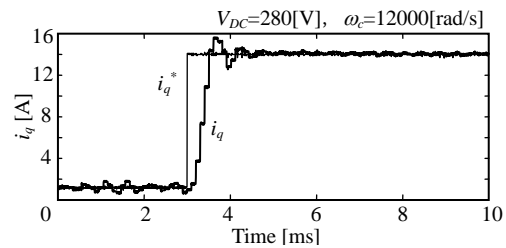


図 7 FPGA を用いないシステムの電流応答

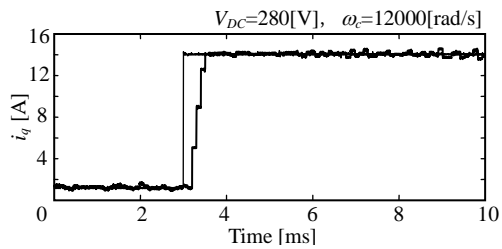


図 8 FPGA を用いたシステムの電流応答

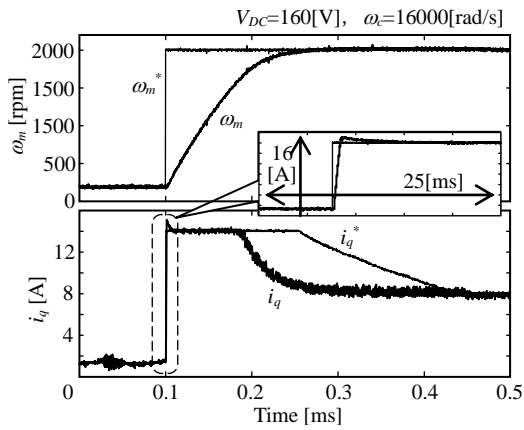


図 9 電圧飽和を考慮しない従来の制御法による速度ステップ応答

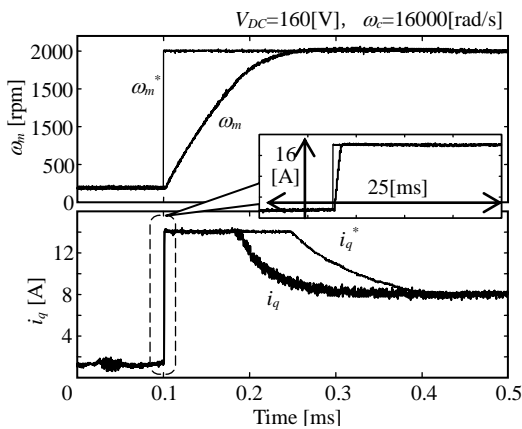


図 10 電圧飽和を考慮した制御法による速度ステップ応答

(6) 図 11 は、全ての制御演算を DSP で行う誘導電動機の世界速度サーボシステムにおいて、電流制御帯域を 8000[rad/s]として速度制御を行ったときの速度応答と電流応答を観測した結果である。DSP の処理時間に伴う制御遅れ時間のため、電流制御帯域を高くすると、定常状態であっても電流が振動的になっている。これに対し、1 サンプル先の電流を予測して制御した結果が図 12 である。予測電流を制御することで、制御遅れ時間を 0 とすることができ、オーバーシュートや振動のない安定した電流制御が行えることを確認した。

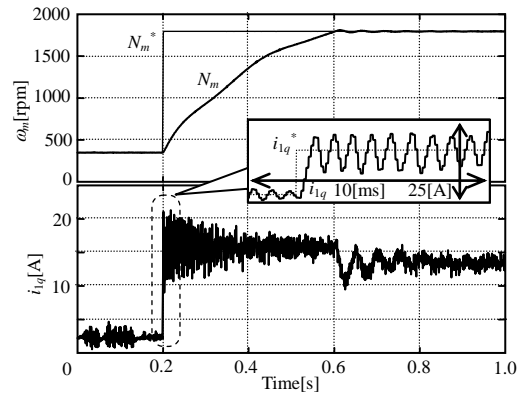


図 11 電流予測を用いない従来システムによる速度ステップ応答

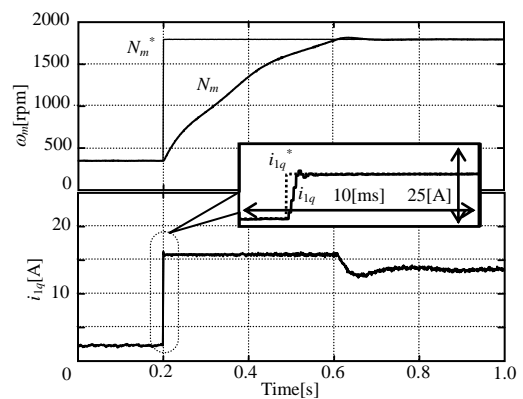


図 12 電流予測を用いたシステムによる速度ステップ応答

## 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 8 件)

- ① 高橋建治, 大石潔, 上町俊幸, 加速トルクと電圧飽和を考慮したインバータ変調法に基づく速度サーボ系の実験的検証, 平成21年産業応用部門全国大会, 平成21年9月2日, 三重大学(三重)
- ② 山崎雅和, 上町俊幸, 高橋建治, 大石潔, 制御遅れ時間の短い瞬時空間ベクトルインバータに基づく誘導電動機サーボシステムの過渡応答特性の改善, 平成21年度電気関係学会北陸支部連合大会, 平成21年9月12日, 北陸先端科学技術大学(石川)
- ③ 山崎雅和, 上町俊幸, 高橋建治, 大石潔, 制御遅れ時間の短い瞬時空間ベクトルインバータに基づく誘導電動機サーボシ

- テムの過渡応答特性の改善，電気学会北陸支部フロンティアセミナー，平成22年1月22日，富山国際会議場(富山)
- ④ 山下達也，上町俊幸，DSPを用いたPM同期モータのベクトル制御システムの開発，平成21年度北陸地区学生による研究発表会，平成22年3月6日，金沢工業大学(石川)
- ⑤ 上町俊幸，高橋建治，大石潔，FPGAに適した空間ベクトル変調に基づくサーボシステムの過渡応答特性の改善，平成23年電気学会全国大会，平成23年3月16日，大阪大学豊中キャンパス(大阪)
- ⑥ 上町俊幸，FPGAによる空間ベクトル変調とACサーボの過渡特性の改善，電気学会東京支部新潟支所特別講演会，平成23年8月18日，長岡技術科学大学(新潟)
- ⑦ 浅井謙司，上町俊幸，高橋建治，大石潔，FPGAを用いた空間ベクトル変調に基づくSPMSMサーボシステムの過渡応答特性の改善，平成23年度電気関係学会北陸支部連合大会，平成23年9月17日，福井大学(福井)
- ⑧ 上町俊幸，大石潔，高橋健治，FPGAによる空間ベクトル変調と電圧飽和対策を持つSPMモータの速度サーボシステム，平成24年産業応用部門全国大会，平成24年8月 講演予定

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計1件)

名称：交流電動機の制御装置および制御方法

発明者：大石潔，上町俊幸，長野鉄明，原川雅哉，早坂恵美子

権利者：三菱電機株式会社，長岡技術科学大学，国立工業高等専門学校機構

種類：特許

番号：特許第4915003号

取得年月日：平成24年2月3日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

上町 俊幸 (KANMACHI TOSHIYUKI)

石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：50280334