

〈一般研究課題〉 低環境負荷を実現する自動車用駆動モータの
高性能制御に関する研究
助成研究者 名古屋大学 道木 慎二



低環境負荷を実現する自動車駆動用モータの 高性能制御に関する研究

道木 慎二
(名古屋大学)

High performance control technique of vehicle traction motor drive for reducing environmental load

Shinji DOKI
(Nagoya University)

Abstract:

Recently, vehicle with motors for traction system have attracted attention for reducing environmental load. Power or torque/ weight or volume ratio, however, are not enough for the spread of motor driven vehicle.

In this research, novel torque control method is proposed for the problem. Proposed torque control system has a policy on current control which never suppression any harmonics and put all of limited voltage for just only fundamental.

1. はじめに

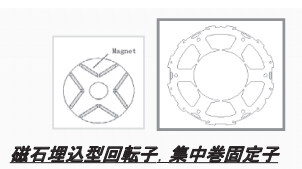
近年の計算機資源の低価格化に伴う磁界解析技術の普及、磁石やケイ素鋼板といった材料の高性能化を背景に、用途に合わせきめ細かく最適設計を行う「用途指向型永久磁石同期モータ」という考え方が一般化しつつある。これにより、永久磁石同期モータは、高効率化、高トルク密度化、高出力密度化など、さまざまな点で著しい性能向上を遂げ、産業機器・家電等の省エネルギー化に大きく貢献している⁽¹⁾⁽²⁾。

これら永久磁石同期モータ(PMSM)は、自動車の環境負荷低減の切り札として、注目を集めている電気自動車(EV)・ハイブリッド電気自動車(HEV)における駆動用としては言うに及ばず、パワーステアリング、コンプレッサ等の従来油圧や機械動力など他の動力源に依存していた車載機器

の動力源として導入も進んでいる。これらは低燃費化に貢献することはもちろんであるが、同時に、内燃機関など他の動力源に比べ著しく時定数の小さなトルク応答、電力としてエネルギーの回収・貯蔵が容易などといったモータの特長を生かした新たな機能(付加価値)の創生につながるものとして、一層の普及が期待されている。

しかし、自動車へのPMSMの普及においては、移動体という性質上、産業機器・家電等に較べて体積・重量当りの出力・トルクに対する要求仕様が著しく厳しいことが課題となっている。

- **磁石の高性能化**
⇒高磁束密度化
- **珪素鋼板の高性能化**
⇒高磁束密度化, 低鉄損化
- **計算機パワーの低価格化による磁界解析の普及**
⇒固定子・回転子形状の見直しによる最適(限界)設計
- **プレス技術の進歩など生産技術の発展**
⇒複雑で最適化された固定子・回転子形状の実現



⇒用途にあわせて最適設計された
(用途志向型)同期モータの登場

図1 高性能化する永久磁石同期モータと技術動向

モータ出力の向上は、最大トルクの増加、最高回転数の向上により実現される。無論、それらは、材料や磁気回路設計といった電気機器としてのモータ自体の設計に大きく依存し、さまざまな研究が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。同時に、モータの最高回転数は、駆動電圧にも大きく左右される。駆動電圧を上昇させるためには、バッテリーセル数の増加、電力変換器による昇圧などのアプローチが考えられるが、いずれもシステムのサイズ、コストの点から、またモータを含めたシステムの高圧化を要求するため、その採用には慎重にならざるを得ない。

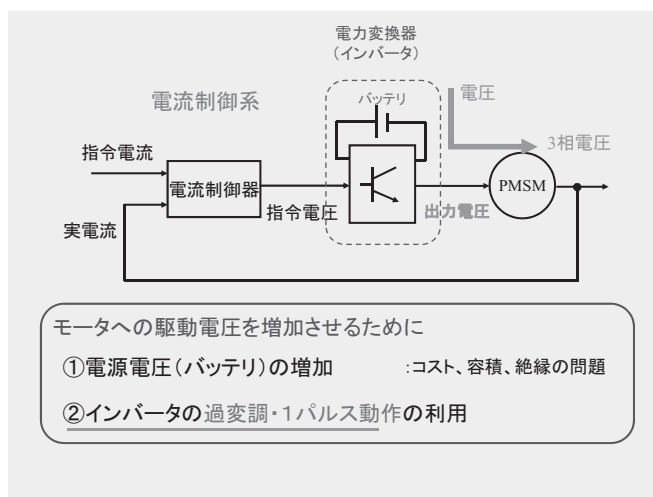


図2 永久磁石同期モータの電流制御系と駆動電圧

一方で、高回転化へのアプローチとして、限られた電源電圧を有効に使いきるための制御技術として、電力変換器(インバータ)を過変調・1パルス動作させる手法がある。鉄道・家電の一部など

では一般的に利用されており、電源電圧の利用率を最大で27%向上させることができる。ただし、制御性能が犠牲になったり、過変調・1パルス動作時とそうでない場合で制御系の切替が必要になるなどの問題がある⁽³⁾⁽⁴⁾。

そこで、本稿では、制御性能を犠牲にすることなく、かつ制御系の切替を行うことなく、過変調・1パルス領域でのモータ駆動を可能にし、モータの高回転化、ひいては高出力化を可能とする制御手法について行なった研究結果を報告する。

2. PMSMの駆動領域と電力変換器の過変調動作によるその拡大

PMSMにおける速度トルク特性を図3に示す。制御されたPMSMでは発生トルクは電流に比例すると考えてよい。そのためPMSMのトルク制御をおこなう場合、図2に示すように電流制御系を構成するのが一般的である。そのため、電圧(=操作量)に余裕のある低速域では、最大トルク=最大電流で決定される。一方、速度が上昇してくると、PMSMの持つ磁石が回転することによりPMSM内部に発生する起電力が速度に比例して増加し、電源電圧(操作量の上限)が一定の場合、PMSMに流しこめる電流の上限値=最大トルクが減少することとなる。このことから、電源電圧がPMSMの最高回転速度の左右する主要因の一つであることがわかる。

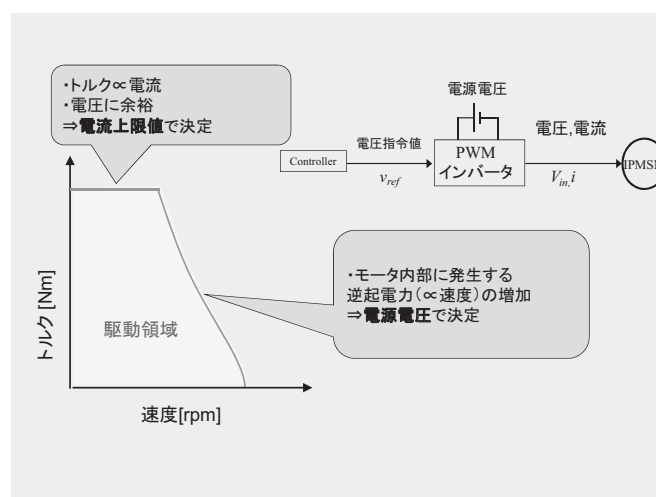


図3 モータの速度トルク特性とその支配要因

また、PMSMの駆動電圧は、バッテリー等の直流電圧を半導体電力スイッチでスイッチングし、任意の振幅、任意の周波数の交流電圧を発生させるインバータにより供給される。通常、スイッチングによる高調波成分の発生を抑制することを目的に、モータの駆動周波数より十分高いスイッチング周波数を設定し、パルス幅変調(PWM)によりスイッチングパターンが決定される。この場合、発生可能な交流電圧の振幅の上限は電源電圧の半分、変調方法を工夫することにより更に15%程度改善することができる。

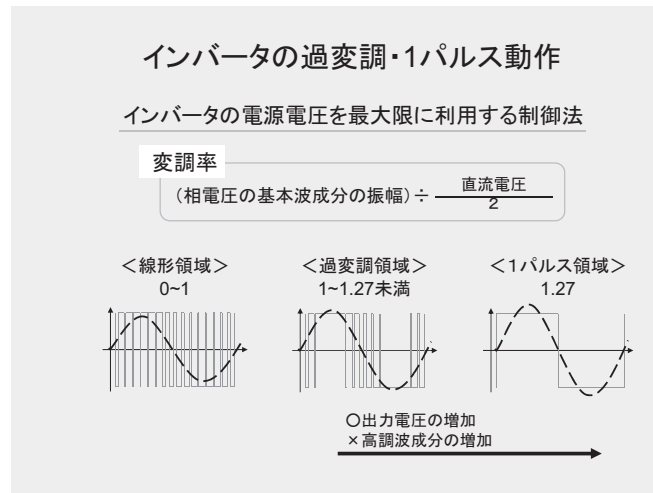


図4 電圧波形と過変調・1パルス動作

しかし、図4に示すように高調波成分の抑制を犠牲に方形波に近い電圧波形を取ることにより、インバータ出力電圧の基本波成分の振幅をさらに増加させることができる。目的周波数で方形波を出力することにより、最大で $4/\pi \approx 1.27$ 倍の電圧となる。インバータのこの動作方法を過変調動作、特に完全に方形波になった状態を1パルス動作と呼び、鉄道・家電の一部などでは一般化している。インバータを過変調・1パルス動作させることにより、電源電圧を変更することなく、駆動電圧を増加させることができ、駆動領域を高速側に拡大することが可能となるのである。

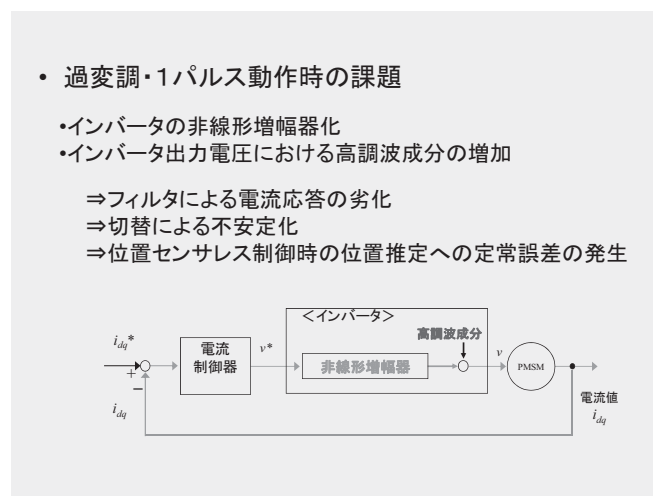


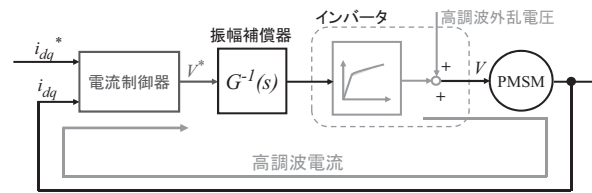
図5 過変調・1パルス動作時の課題

しかしながら、過変調・1パルス動作時には、インバータの非線形動作、低次高調波成分の増加や電圧飽和により電流制御系が不安定化することが知られており、これを回避するため、制御帯域の制限、制御器の切替が必要とされ、高回転化における制御上の問題とされている。

3. 提案手法

通常、何らかの形で発生した高調波成分を抑圧するためには、適切に設計されたフィードバック制御で対応する場合が多い。しかし、過変調・1パルス動作中では、操作量である電圧に余裕のない状態であり、フィードバック制御器により高調波を抑制する適切な操作量が求まったとしても、

その操作量、つまり電圧を実際に発生させることができないばかりか、操作量(電圧)飽和を加速し、結果、制御系の不安定化を招く。



- ①インバータの出力中の高調波成分により、PMSMの高調波電流が発生されて、電流制御系にフィードバックされる
- ②電流制御器がフィードバックされる高調波電流を抑制するため余分な電圧指令値を生成する

図6 過変調領域における不安定の原因

そこで本手法では、制御系の構成に際して、次のようなポリシーを取ることにした。

- ・ 高調波の抑制は行わない、つまり、高調波を抑制するために電圧を利用しない。
- ・ 電圧は基本波成分の制御にのみ限定利用する。

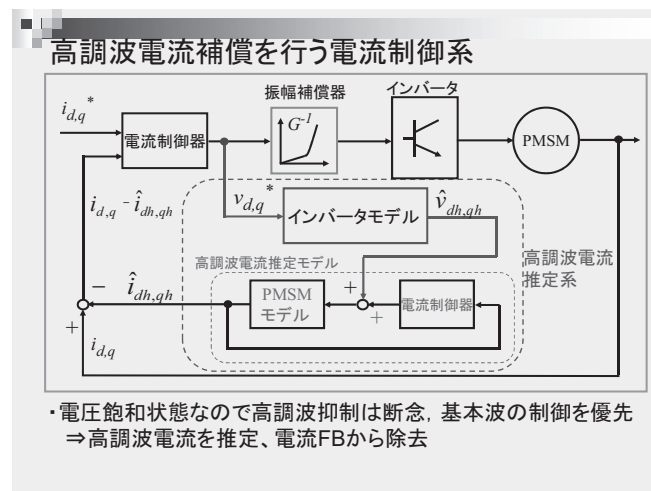


図7 提案システム

この考え方に基づいて構成した、過変調・1パルス領域において動作可能な提案する電流制御系の構成を図7に示す。図6に示す一般的な電流制御系との違いは、インバータで発生する高調波電圧成分による高調波電流成分を推定し、観測電流から減じた上で、電流フィードバックを行うことにある。

高調波電流推定系は、電圧指令値から高調波電圧を推定するインバータモデルと高調波電流から高調波電流を推定する高調波電流推定モデルから構成される。

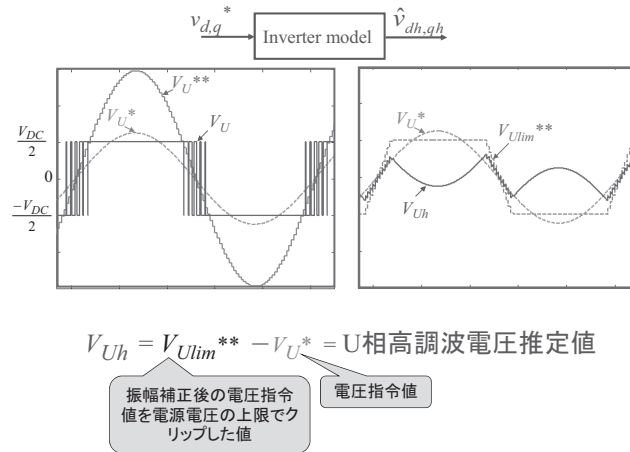


図8 インバータモデル

インバータモデルの動作を図8に示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{dh} \\ \dot{\hat{i}}_{qh} \\ \dot{\hat{e}}_{dh} \\ \dot{\hat{e}}_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\frac{R}{L_d} + \frac{K_{pd}}{L_d}) & 0 & \frac{K_{id}}{L_d} & 0 \\ 0 & -(\frac{R}{L_q} + \frac{K_{pq}}{L_q}) & \frac{K_{iq}}{L_q} & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{dh} \\ \hat{i}_{qh} \\ \hat{e}_{dh} \\ \hat{e}_{qh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_{dh} \\ \hat{v}_{qh} \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} \hat{i}_{dh} & \hat{i}_{qh} \end{bmatrix}$ d-q軸高調波電流 K_{pd} K_{pq} d-q軸の比例ゲイン
 $\begin{bmatrix} \hat{e}_{dh} & \hat{e}_{qh} \end{bmatrix}$ d-q軸高調波電流誤差の積分値 K_{id} K_{iq} d-q軸の積分ゲイン
 $\begin{bmatrix} \hat{v}_{dh} & \hat{v}_{qh} \end{bmatrix}$ d-q軸インバータ電圧の高調波成分 \tilde{R} \tilde{L}_d \tilde{L}_q 抵抗,d-q軸インダクタンス

図9 高調波電流推定モデル

高調波電流推定モデルは、PMSMのモータモデルと電流制御器の閉ループシステムから構成され、図9に示す数式で表現される。

4. 実機実験

実機実験より提案するシステムの有効性を検証する。まず、高調波電流推定系による高調波電流推定のみを行った結果を図10、11に示す。図10では、1600rpmでの速度制御下において、無負荷状態から負荷を加えた際の過渡応答の結果である。過渡時においても、良好な高調波電流の推定が実現できており、フィードバック電流 i_d に含まれる高調波電流成分の大幅な減少($i_d \rightarrow i_d - i_{dh}$)が期待できることが確認できる。また、図10中、負荷印加後においてほぼ1パルス動作に近い状態での定常状態を拡大したものが図11である。フィードバック電流 i_d に含まれるおよそ2.5A程度の高調波電流の振幅を1.0A程度まで減少させることが可能と思われる。

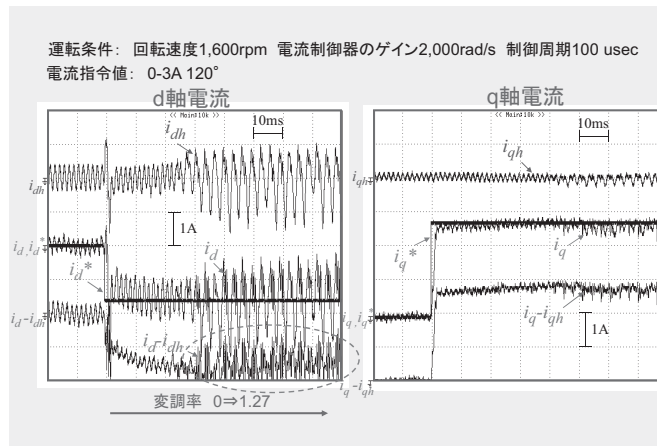


図10 高調波電流推定結果(1)

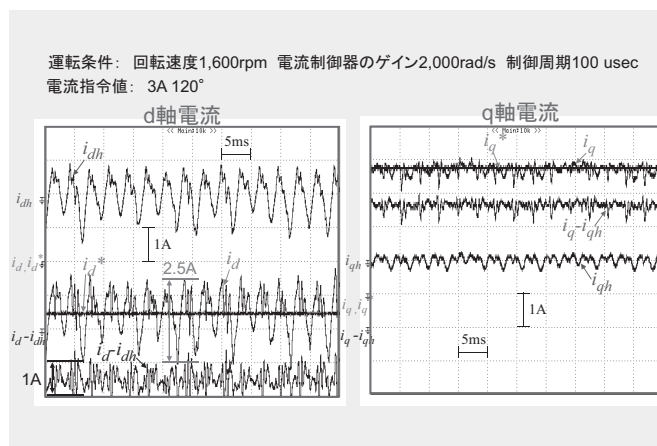


図11 高調波電流推定結果(2)

次に、推定電流を実際に用いて、高調波補償を行った結果を図12、13に示す。図12では、電流制御器のゲインを2500rad/sec、制御周期を400 μ sと取えて不安定化しやすい状態として、提案する高調波補償の効果調べた。その結果、高調波電流補償なしの場合、定常状態であっても高調波成分に起因する電圧飽和が発生し、制御系の不安定化が観測されたのに対して、提案する高調波電圧補償ありの場合、安定した電流制御が継続することを確認した。

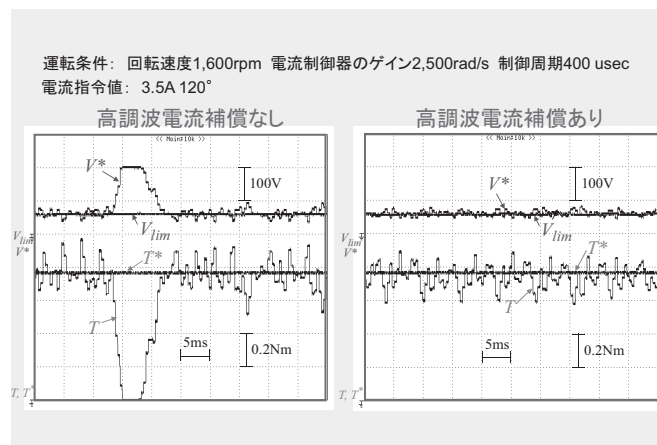


図12 高調波電流補償結果(1)

図13は、図12と同条件下でのトルクのステップ応答の結果である。高調波電流補償なしの場合、過渡時の最後に突然電圧飽和が発生し、その結果、発生トルクが大幅に減少する不安定化現象が生じていることが確認できる。これに対して、提案する高調波電流補償ありの場合、安定なトルク応答が実現できているとともに、電圧指令値 V^* がほぼ電圧上限値 V_{lim} で推移しており、利用可能な電圧を確実に使い切っていることが確認できる。

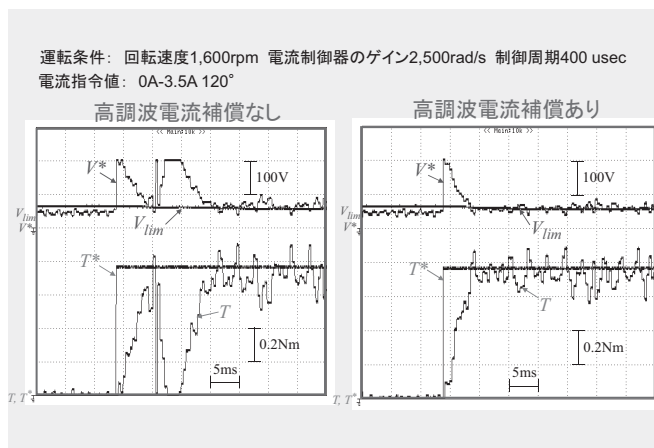


図13 高調波電流補償結果(2)

最後に、最大トルクを維持しつつ、一定の速度変化率で最高速度まで加速させた場合の実験結果を示す。実験に使用したモータパラメータ、及び運転パターンの詳細を図14に示す。これは、自動車であればアクセル全開で最大速度まで加速する状況に相当する。従来手法を用いた場合の結果を図15に示す。過変調領域に入ると、2000rpm程度以降、電流制御が不安定化し、結果、トルク制御も不安定化する様子が確認できる。図16に提案する高調波電流補償を加えた場合の結果を示す。過変調領域に入ったのちも、トルク制限に従い安定にトルクが減少し、最大速度2800rpm程度まで、トルク・電流共に安定に制御されていることが確認できる。

この結果から、今回のケースでは、同じ電源電圧のもと、提案する制御手法を利用することにより、標準的な制御手法に比べ、制御可能速度範囲を4割程度広げられたことになる。

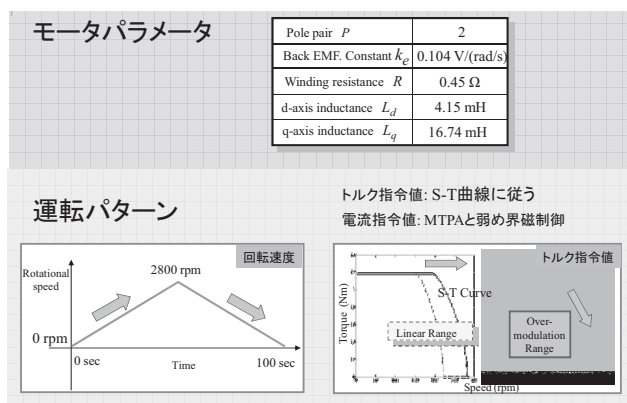
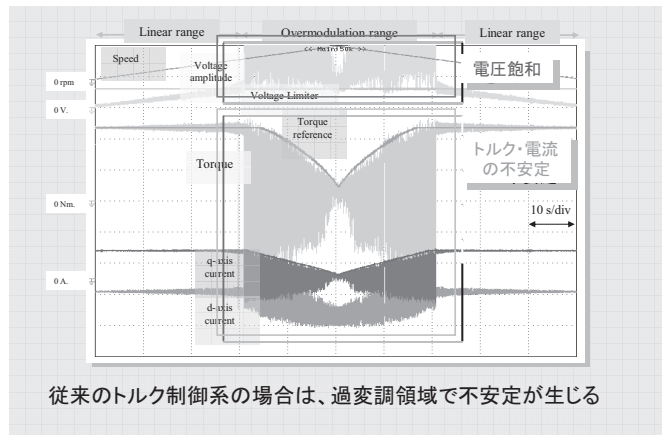
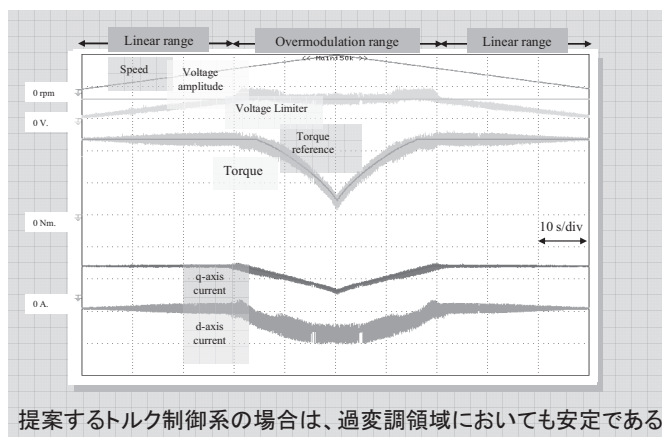


図14 最大トルク発生時における加減速実験の条件



従来のトルク制御系の場合は、過変調領域で不安定が生じる

図15 最大トルク発生時における加減速実験(従来手法)



提案するトルク制御系の場合は、過変調領域においても安定である

図16 最大トルク発生時における加減速実験(提案手法)

5. まとめ

本研究では、制御により、永久磁石同期モータの出力向上を図るべく、限られた電源電圧を有効に使い切るかという視点で、インバータの過変調・1パルス動作時に安定したモータ駆動を可能にする電流制御系について検討した。その結果、限られた電圧を有効利用するために、高調波の抑制は行わず電流の基本波のみを制御するとのポリシーのもと、高調波電流推定系を構成し、観測電流から高調波成分を減じてフィードバック制御をおこなう電流制御系を提案した。これにより、制御系を切替えず、また制御性能を犠牲にすることなく、永久磁石同期モータの駆動可能領域を高速側に拡大することが可能になった。

今後、提案手法の適用拡大を一層拡大するためには、自動車用モータに特徴的な磁気飽和状態での性能向上が重要である。磁界解析等を通じて磁気飽和を把握しつつ、高磁気飽和状態においても、安定して性能を発揮できる制御技術について、今後も研究を継続する予定である。

参考文献

- (1) 「リラクタンストルク応用電動機の要素技術と高性能化」, 電気学会技術報告書, 第1020号 (2005) など
- (2) 「実用面から見たリラクタンストルク応用電動機の用途別最適化技術動向」, 電気学会全国大会

シンポジウム, S16 , pp.S16(1)-S16(23), 2007

- (3) H.Nakai, H.Ohtani, E.Satoh and Y.Inaguma, “Development and Testing of the Torque Control for the Permanent-Magnet Synchronous Motor”, IEEE Trans. of Industrial Electronics, Vol.52, No.3, JUNE 2005
- (4) 中沢洋介他,「電圧固定モードでの誘導電動機ベクトル制御」,電学論D, 118巻9号, 平成10年
- (5) Smith Lerudonsak, M.Kadota, S.Doki and S.Okuma, “ Harmonic Currents Estimation and Compensation Methods for Current Control System of IPMSM in Overmodulation range ”, IEEJ/IEEE Joint IAS Power Conversion Conference ? Nagoya (PCC-Nagoya 2007), 2007
- (6) Smith Lerudonsak, S.Doki and S.Okuma, “ A Novel Current Control System for PMSM Considering Effects from Inverter in Overmodulation Range ”, The 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS'07), 2007
- (7) ラウドンサック サミット他,「過変調領域で動作可能なPSSMの電流制御系」,平成19年度電気関係学会連合大会東海支部連合大会, O-285, 2007