

電気自動車の駆動系 -どんなモータが最適か-

堀 洋一 (東京大学工学部電気工学科)

Power Train for Electric Vehicle - What is the Best Motor for EV? - Yoichi Hori (University of Tokyo, Dept. of Elec. Eng.)

1. まえがき

電気自動車用モータにはどのようなものが適しているのだろうか。本稿では、なるべく一般に言われていることを述べたいと思う。主として、同期モータ(SM)と誘導モータ(IM)の特性比較を行い、その制御法を概説する。最近注目される制御法についてもふれる。

下表は、約2年半ほど前の電気学会シンポジウムで、松瀬のまとめたACドライブ(交流機駆動)の産業応用事例である。電気自動車は、低公害を利点として機械動力代替の有力項目となっている。

来世紀にかけて、電気自動車用モータとその制御技術が非常に大きなマーケットを得ることは間違いない。最終的には自動車会社が、エンジンという自動車の中心部を置き換える(単に置き換えるという発想は適切ではないかも知れないが)モータコントローラを外製するという事はありえないかも知れない。しかし、現時点において、電気技術者(とくにパワーエレクトロニクス技術者)がこの分野へどのように貢献できるかを考えてみることは意義深いことであると思う。

最近のACドライブ応用事例^[1]

	応用事例	主な効果	
DCモータ代替	高速移動素材の同期回転刃切断装置	省保守	
	輪転印刷機の駆動装置 製紙機のセントドライブ駆動装置	高性能 省保守	
	電車	省保守, 高性能	
機械動力代替	電気自動車 船舶の電気推進システム 高速大容量コンプレッサ駆動装置	低公害 高性能 耐環境性	
	拡大技術	船舶の加勢駆動装置 大形車両の加勢・回生ブレーキ装置 大容量ACモータドライブ産業機器 大形機器冷却ファンの省エネ制御	耐環境性 低公害 省保守 省エネルギー
高度化技術		船舶の補助駆動装置 リニアエレベータ	高性能 省スペース
		センサレスベクトル制御搬送装置 高速工作機械スピンドル 鉄鋼ミル 油圧エレベータポンプAC化 ダイナモメータ	高性能 省力, 省保守 新機能 高性能

2. 電気自動車用モータの比較

下表に電気自動車に適していると考えられるモータの特性比較を示す。DCMはさておき、将来有望なモータはSMまたはIMと考えられる。SRMも重量あたりの出力が大きく高速運転が可能なので有望視する意見もあるが、賛否両論で定説はない。一般に、SMは効率や制御装置の簡単さに優れ、IMは堅牢性や高速性に優れるということになっている。

各種モータの代表的な特性比較^[1]

	DCM (直流モータ)	SM (永久磁石形同期モータ)	IM (誘導モータ)	SRM (スイッチリリクティモータ)
最大効率[%]	85-89	95-97	94-95	90未満
効率[%] (10%負荷)	80-87	90-92	79-85	78-86
最大回転数 [rpm]	4,000 -6,000	4,000 -10,000	9,000 -15,000	15,000 未満
費用/軸出力 [\$/kW]	10	10-15	8-12	6-10
制御装置コスト	1	2.5	3.5	4.5
堅牢性	良	良	最良	良
信頼性	普通	良	最良	良

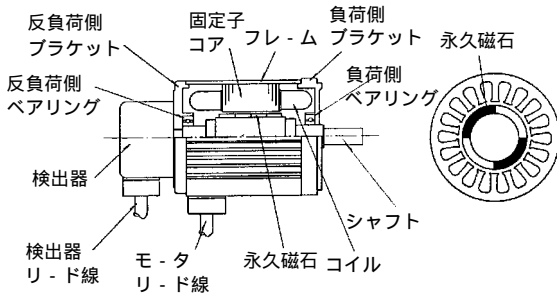
次ページに、SMとIMの構造図、電圧電流のベクトル図を示し、両者の特徴を表にして比べてみる。SMとIMの固定子は基本的に同じであるが、SMの回転子が永久磁石であるのに対し、IMの回転子は導体であって最も単純である。

SMの回転子は回転磁界に同期して回る。トルクは内部誘起電圧と電機子電流の位相差によって生じる。原理的な損失はない。しかし正確な回転子位置を常に検出してフィードバックする必要があり、とくに始動時の制御が難しい。

IMの場合、回転子は必ず回転磁界より遅れすべりを生じる。すべりはトルク発生の源であるが、同時に熱損失を生じ、IMの効率を悪くする原因となる。SMの永久磁石に相当する励磁電流を、IMでは常に供給しなければならないためである。

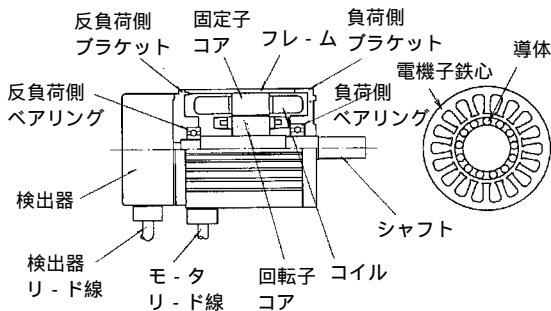
永久磁石の透磁率は真空や空気と同じである。磁気回路の点では永久磁石はギャップと同じであり、磁気抵抗の大きい部分の長さは永久磁石の厚みとギャップの和となる。従って、SMではギャップの管理が楽である。IMやSRMのギャップは狭ければ狭いほどよい。とくにSRMのロータの加工精度はSMの10倍必要であるという話もある。

同期モータ(SM)の構造



出典: "モータガイド", 日経メカニカル, 1992.8

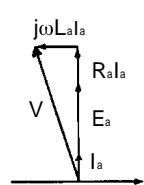
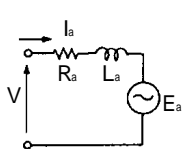
誘導モータ(IM)の構造



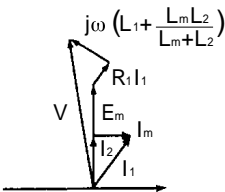
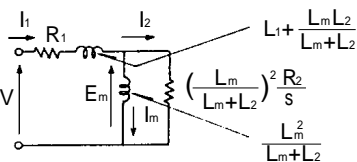
出典: "モータガイド", 日経メカニカル, 1992.8

SM, IMの等価回路とベクトル図

同期モータ(SM)



誘導モータ(IM)



出典: "モータガイド", 日経メカニカル, 1992.8

この等価回路やベクトル図からもわかるようにSMの制御は簡単である。基本的にはDCMの整流子とブラシを半導体におきかえただけである。(俗にブラシレスDCモータという。)

これに対しIMの制御は非常に高級である。いわゆるベクトル制御の適用によって初めて使いものになる。しかしなお、温度による定数変動などの問題をかかえている。後述のように現在ではほぼ克服されつつあるが、できるだけ簡単なアルゴリズムですなわち安い値段でこれを実現する必要がある。

SM, IMの特性比較

	同期モータ(SM)	誘導モータ(IM)
適性容量	数十W~数十kW	数百W以上
寸法・重量	小()	中~小()
構造	かなり簡単()	非常に簡単()
耐環境性	かなりよい()	非常によい()
メンテナンス	いくらか必要()	不要()
生産性	よい()	非常によい()
位置センサ	要()	不要()
速度センサ	不要()	要()
寿命	軸受寿命まで	軸受寿命まで
モータ定数	高圧低電流可	高圧低電流可
高速回転	やや劣る()	可能() (弱め界磁可能)
停電時非常制動	可能()	やや困難()
永久減磁	あり()	なし()
温度特性	なし()	あり()
コントローラ	1モータ毎に1つが必要()	複数モータを同時制御可能()

なおここでは積極的にはとりあげていないが、東電のIZAのように、ホイールに埋めこんだDDタイプのSMによって減速機を用いることなく直接4輪を独立駆動して成功した例がある。

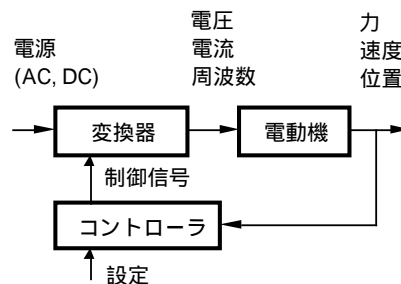
常識的には、モータのパワーを同一にすれば高速回転をさせればさせるほどモータ重量は軽くなるから、IMなどを高速回転させ固定の減速ギアを用いるGMのインパクトのような方式が有利である。IZAの場合は高性能永久磁石やモータ自体の綿密な設計に助けられたと見るべきである。

しかし、永久磁石が依然高価であるとはいえ、その進歩の恩恵を受けることのできるSMをできるだけ高速回転させる方式にも捨て難い魅力がある。

3. 可変速駆動系の構成

可変速駆動系はどんなものでもおおよそ下図のような構成をとる。モータ、変換器、そしてコントローラである。モータの種類によって名前がつけられている。

可変速駆動系の構成



3.1 無整流子電動機の制御法

一般に永久磁石界磁のSMを使用しトルク指令に応じて電機

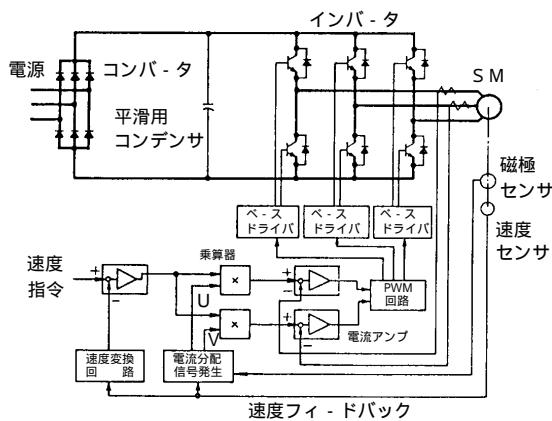
子電流の大きさと位相を制御する。ブラシレスDCモータ(BLDC)ともいう。その制御方式の種類は以下のとおり。

1. $i_d=0$ 制御
 - ・ 減磁起電力をゼロとする
 - ・ トルクは電流に比例
 - ・ 負荷増大に伴い端子電圧上昇
2. 力率 1 制御
3. トルク線形化制御
4. 鎖交磁束一定制御
5. 最大トルク制御 ・ リラクタンストルクを利用

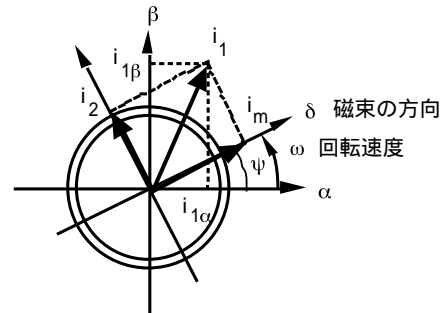
問題点は以下のとおりである。

1. 低電源力率と高調波 DCMと同じ問題である
2. 過負荷耐量, 弱め界磁特性 DCMに劣る
(とくに, 永久磁石形SMでは弱め界磁をする
と減磁の問題がある.)
3. トルク脈動が大きい

同期モータ(SM)の制御ブロック図



ベクトル制御の原理



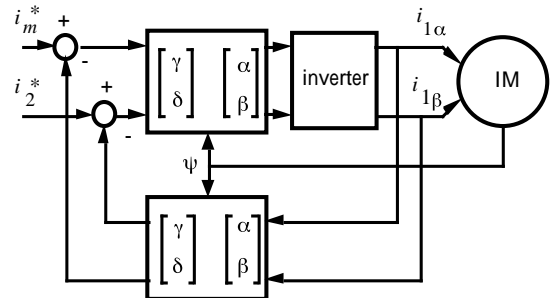
1次電流 $i_1 = i_m + i_2$
(i_m : 磁束電流, i_2 : 2次電流)

トルク $T = K i_m \times i_2$

ベクトル制御の原理 i_m と i_2 を独立に制御

直流モータで, 界磁と電機子電流を独立に制御することに対応。ただし, 操作できるのは, $i_{1\alpha}$ と $i_{1\beta}$ だけである。また, 励磁電力は電源から100%供給しなければならない。

ベクトル制御の基本構成



i_m や i_2 の基準値は, 上位の速度制御系や界磁制御系によって決められる。

ベクトル制御の種類

- (1) 直接形ベクトル制御
ホール素子等を用いる。IMの製造工程になじまず, IMのメリットを殺す。ただし, 非常に高性能になる。
- (2) すべり周波数制御形ベクトル制御
電流・電圧から磁束を演算する。定数変動に弱いので, 抵抗を適応同定して実用。磁束演算により分類される。
 - ・ 電圧モデル: 純粋積分によるドリフトが問題
 - ・ 電流モデル: 2次抵抗の変動に弱い
 - ・ 磁束オブザーバ: 両者の長をミックス。最近では速度センサレス制御にも応用されている。

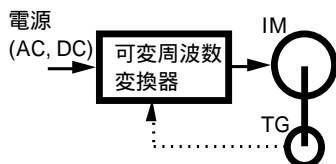
3.2 IMの可変速駆動

IMの可変速駆動系の構成は次のようになる。速度情報の必要性は要求する制御性能のレベルに大きく関係する。大勢は速度センサレス化の方向にある。

可変周波数電源にもいくつかの種類が考えられる。電気自動車用は将来ともほとんどすべて電圧型インバータであり, しかもIGBTが多用されるであろう。

つづいてベクトル制御の原理と基本的な構成図を示しておく。2次電流と2次磁束の直交性と, 2次磁束の大きさの時間変化(がないこと)は全く等価である。2次磁束上の座標系(-軸)でベクトル制御理論が展開される。

IMの可変速駆動系



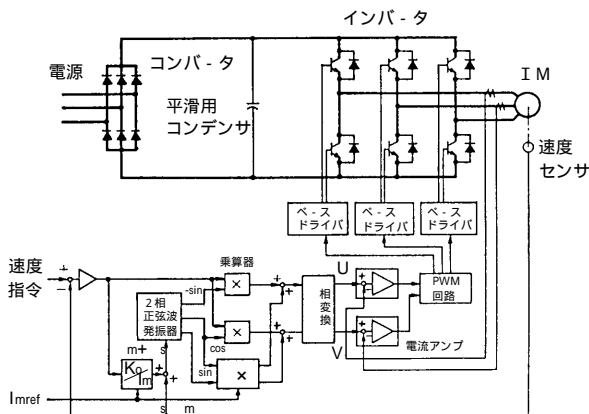
- 速度情報
- ・ 簡単な開ループ制御では不要
 - ・ すべり周波数制御では必要
 - ・ ベクトル制御では絶対必要
 - ・ しかし, 速度センサレス制御はすでに実用レベルに達している

4. 注目される新しい制御技術

IMのベクトル制御は効率が悪いことになっているが, これは励磁電流を一定に保つせいである。励磁電流を可変にして最大効率運転を行えば, 効率はSMに優るとも劣らない。[2] 逆に, SMにおいても, 永久磁石材料の進歩により, 弱め界磁が可能になり高速運転も可能になってきている。

さらに, センサレス制御(SMでは位置, IMでは速度)の最近の進歩は注目に値する。[3] 近いうちに, SM, Mいずれにお

誘導モータ(IM)の制御ブロック図



いても、モータへ行くワイヤは高圧低電流の細い線が3本というのが常識になるだろう。

このような最近の制御技術の動向を少し述べておきたい。

4.1 SM制御の新しい技術

(1) 位置センサレス制御

- ・ 台形波着磁形（非導通アームから逆起電力観測）
- ・ 正弦波着磁形（モータモデルにもとづいて推定）
- ・ 初期位置の検出がなお問題
(IPMなら可能性あり・SPMでは困難)

(2) 弱め界磁制御

(減磁に強い磁石材料の発達により可能になった)

4.2 IM制御の新しい技術

(1) 定数同定, オートチューニング

最近の産業用ドライブでは当然の機能。

(2) 速度センサレス制御

適応同定を用いたものが実動。1:100~1:200程度の速度制御がすでに可能で、電気自動車には十分。

(3) IMの効率最大運転(右上の図を参照)

IMは負荷の軽いときには励磁電流を絞って消費電力を下げるのが可能である。電気自動車の場合、全負荷で長時間運転することはまずないから、低負荷時の効率改善は大きな意義をもっている。

IMの簡易等価回路を使い、1次電流 i_1 一定の条件のもとでトルク T を最大にする i_2 と i_m を求める。ベクトル制御は省エネルギーの点では失格である。

以上のように、SMとIMの長所短所は最近の制御技術の進歩によって従来とはかなり異なってきている。

もっとも、最適なモータの種類をただひとつに決める必要は全くないのであって、SM、IM、SRMなどが共存するのが健全な姿であると思われる。

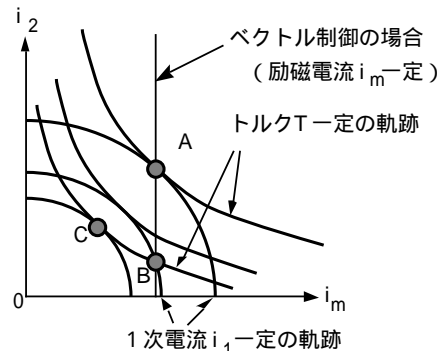
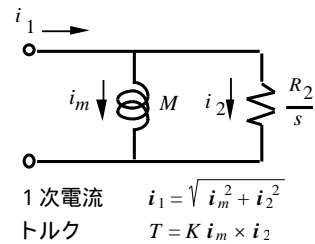
5. パワーエレクトロニクス技術者の貢献

5.1 モータそのもの

大量のモータが作られるから、従来のモータとは異なる自由な設計が可能である。たとえば、固定ギア付きSM形ホイールンモータを高速回転させるような方式もよい。

SMの場合、高価な永久磁石の量をどのくらいにするかが重要

IMの効率最大化運転の考え方



な問題である。効率の悪い低速高トルク域を重視すれば磁石は多い方がよい。しかし、弱め界磁も強め界磁も電力を食うから、適当な中速中トルク域で何もなくてよいように選ぶ手もある。磁石の量が減らせればSMの採用にはずみがつく。

DCMは本当にだめか、という意見もある。数年で車を買換えるとするとブラシの寿命もその程度でよい。変換器や制御面でDCMはかなり有利である。

5.2 新しい制御方策

電気モータはエンジンに比べると格段に速応性が高く、精密なトルク制御が可能である。これを利用し、たとえば電気鉄道ではごく普通に行われている高度な空転/粘着制御に範を求めた新しいABSが考えられる。現在のABSはブレーキ系統のみを用いた単純なものであり応答も遅い。加速時を含む空転制御は電気自動車において初めて可能になる。

非常に摩擦係数の小さいタイヤで走行できれば、エネルギー消費の大きな部分を節約できることになる。ABSには低精度エンコーダを用いた瞬時速度検出技術も役に立つだろう。

5.3 コンセプト

ガソリン車とはまったく別の乗り物と考えて、家電感覚で電気自動車を作れないだろうか。セカンドカーなら1~2人乗りがいいかも知れない。米国でのコンパクト車のように、アマチュアが自動車を作る可能性もある。デザインの幅が広がり小さいメーカーも参画しやすくなるのは確実である。

参考文献

- [1] 松瀬: ACドライブの新分野への応用とその課題, 平成5年電気学会全国大会シンポジウム, S.10-1, 1993.
- [2] 水野他: 誘導電動機と永久磁石式電動機の定出力運転領域における特性比較, 電気学会産業電力電気応用研究会資料, IEA-93-20, 1993.
- [3] 松井, 堀: モータコントロールの新しい技術, 電気学会論文誌, Vol. 113-D, No.10, pp.1122-1137, 1993.
- [4] 堀: 電気自動車用モータ・コントローラの最新技術, 自動車技術会 No.9405 シンポジウム, 1994.
- [5] 丹下, 伊藤: EV用モータ/コントローラ, '94 CONVERGENCE.