

1.4 電気モータのしくみ

(堀, 古関)

概要

通勤電車や高速鉄道に見られるように、電気モータは交通機関にも広く用いられている。重量あたりの出力はガソリンエンジンをはるかに越える。最近では、パワーエレクトロニクスの進展によって、直流モータにかわって交流モータが用いられるようになり、飛躍的なパワー密度の向上がはかられている。本節では、いろいろな電気モータのしくみや特徴を述べ、乗物に用いられる電気モータの特徴や最近の進歩について説明する。

1.4.1 電気モータのしくみと種類

(1) トルクの発生

電気モータは、磁界中の導体に流れる電流に生じる電磁力を回転力(トルク)に変え、電気エネルギーを機械エネルギーに変換する電気機械である。力の発生は、図1.4.1に示すフレミングの左手の法則による。磁界 B 内におかれた電流 I には電磁力 F が発生し、力の大きさは両者の積に比例することはよく知られている。

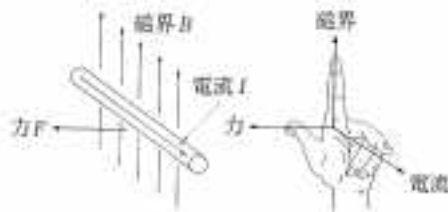


図1.4.1 フレミングの左手の法則¹⁾

(2) 直流モータ (DCM: Direct Current Motor)

電磁力の発生原理をそのまま利用したのが図1.4.2の直流モータである。磁界中に置かれた左右のコイルには上下方向の力が生じて軸を回転させるトルクとなる。ところがこのままではコイルが真上真下の位置になったところでトルクはゼロとなり、さらにその地点を過ぎるとトルクの向きは逆になり、回転は止まってしまう。そこで、回転コイルに整流子、電源側にはブラシを設けて、コイルが真上真下の位置をよぎる際に電流の向きを逆転させる。これを整流とい

う。回転子には同一方向の力が発生するようになり、モータは回転を続ける。

実際の直流モータでは、空間の利用率を上げるため多数個の導体と整流子を設け、導体は鉄心の溝に埋めて用いる。磁界を発生する仕組みは界磁と呼び、電磁石または永久磁石が用いられる。回転コイルと鉄心を電機子と呼ぶ。

界磁コイルを電機子コイルと直列に接続した直流直巻モータは、きわめて簡単な制御によって、乗物駆動用として望ましい速度・トルク特性(#1)を実現することができたため、鉄道用モータとして長く不動の地位にあった。新幹線のような交流電力を受電するものでも、0系、100系、200系、400系などでは直流モータを用いているのである。

直流モータの整流子とブラシは接触しながら回転するため常に摩耗し、保守がたいへんである。また、大きな電流を切り換えるため、高速域ではフラシオーバ(火花)の危険がつきまとう。これらの理由から直流モータの最高回転速度は低く抑えられ、結果として、重量あたりの出力の低いモータとなってしまう。

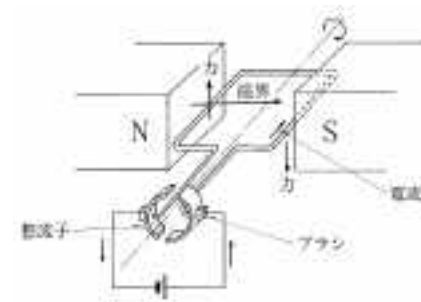


図1.4.2 直流モータの原理と仕組み¹⁾

(3) 誘導モータ (IM: Induction Motor)

誘導モータ (IM) は、家電製品をはじめ身の回りの至るところで用いられている。その原理は図1.4.3に示すアラゴの円盤である。金属の円板の表面に沿って磁石を動かすと円板が磁石について回る。これは磁石の移動によって円板に誘導電流と呼ばれる電流が流れ(これを電磁誘導と呼び、誘導(induction)モータの語源となっている)、磁界との間に電磁力が生じるためである。

¹⁾ 乗物に適した速度・トルク特性については、3.X 節(電気自動車の将来性)の3.X.3を参照。直流直巻モータが長く使われてきたが、VVVF方式の実用化とともに過去のものとなりつつある。

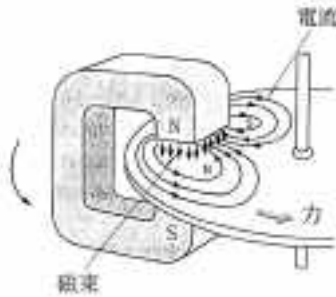


図1.4.3 アラゴの円板¹⁾

実際のIMでは、図1.4.4に示すような固定子巻線によって磁界を作り、等価的な磁石として用いる。120°ずつずらして巻いた3相巻線(図ではA, B, Cと記述)に位相が120°ずつずれた3相交流電流を流すと、三つの巻線によって生じる合成磁界は一定振幅かつ一定速度で回転する。

図1.4.4の下半分にN-Sと記した場所に、あたかも実際の磁石が存在するように見え、これが時間の経過とともに時計方向に回転するよう見えるのである。これを回転磁界と呼ぶ。内側に存在する回転子には、アラゴの円板と同じ原理によって誘導電流が流れ、回転磁界に少しずつ遅れながらついて回るわけである。

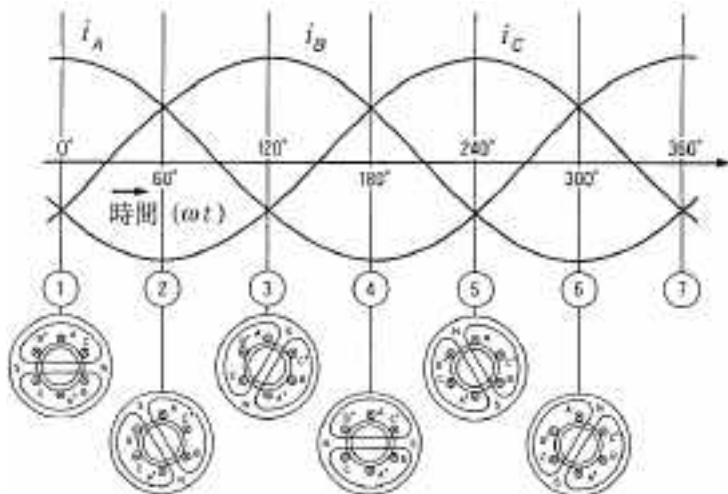


図1.4.4 3相交流による回転磁界の発生¹⁾

実際の回転子には鉄心の溝に埋めた導体バーの両端をリングで短絡したかご形の構造が用いられる(図1.4.5)。直流モータでは、整流・ブラシという複雑な機械構造をもった接触部分があるのに対し、誘導モータでは物理的な接触部分はベアリングだけであるからきわめて頑丈であり、10,000rpm以上の高速回転をするものも容易に作るができる。モータの出力は回転速度×トルクであるから、乗物においてもIMを使用することができれば劇的な軽量化が達成できることは古くから知られていた。

しかし、問題は電源である。かつては、回転磁界を作るための電源は、他の交流発電機によって得られる3相交流しかなく、IMはこれにただ接続し定速で回転させるだけの用途にしか使えなかった。しかし、サイリスタ、パワートランジスタ、GTOサイリスタなどを用いたインバータ(直流交流変換装置)によって可変電圧可変周波数(VVVF: Variable Voltage Variable Frequency)の交流が容易に得られるようになり、ベクトル制御(後述)などの制御法も成熟したことから、圧延機、NC工作機械など、高精度を要する用途にも広く用いられている。

乗物用には、当初ベクトル制御のような精密な制御は不必要とわれてきたが、乗り心地を重視する電気自動車ではごく自然に使われ、鉄道でも高性能な粘着制御を目的としてしだいに適用される傾向にある。

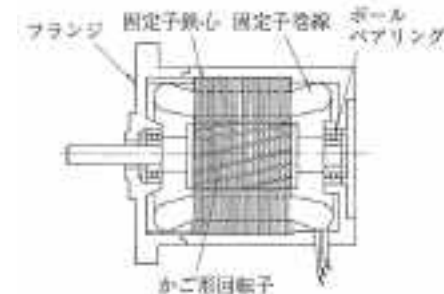


図1.4.5 誘導モータの構造¹⁾

(4) 同期モータ (SM: Synchronous Motor)

同期モータは図1.4.6のように、誘導モータと同じ構造の固定子の中に、電磁石または永久磁石の回転子を置いた構造である。同期モータは回転磁界と同じ速度で回らないとトルクを発生することができず、脱調という現象を生じる。

回転子は、回転磁界に対してある位相角だけずれて回転し、トルクも

応じて発生する。同期モータも、近年のインバータ技術の進展によって、高性能サーボ用途にさかんに用いられるようになってきており、よく、ブラシレスDCモータ（BLDCモータ）と呼ばれている。

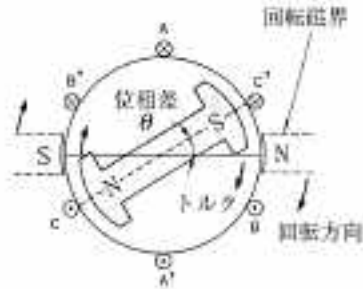


図1.4.6 同期モータの原理と構造¹⁾

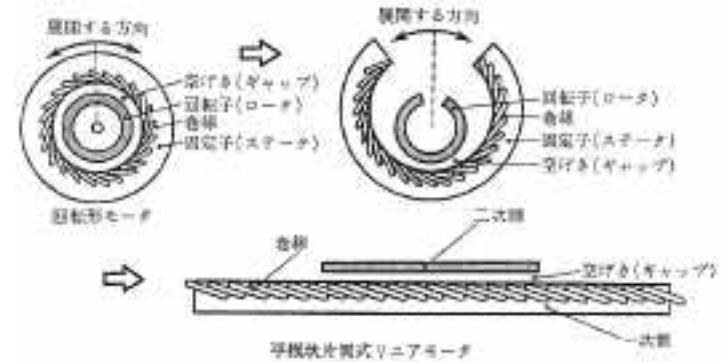


図1.4.7 リニアモータの原理²⁾

(5) リニアモータ

山梨の試験線で、東海旅客鉄道株式会社と鉄道総合技術研究所が共同で試験を行っている超高速磁気浮上鉄道、「リニア・エクスプレス」が世間の注目を集めているが、磁気浮上鉄道と、その推進装置としてよく用いられるリニアモータは、概念としては別のものである。

リニアモータとはここまで述べてきたモータを直線状に展開したものである。リニアモータのほとんどは交流モータで、誘導形のものをリニア誘導モータ（LIM: linear induction motor）、同期形のものをリニア同期モータ（LSM: linear synchronous motor）と呼んでいる。また、主たる駆動用のエネルギーを供給する部分（誘導形ならば一次側、同期形ならば電機子）が、動く車両側にあるものを車上一次形、レール側にあるものを地上一次形と呼ぶ。

車上一次形は、圧倒的に長いレール側が簡単な構造になるため、全体システムがより安価に構成できる反面、動く側に大きなエネルギーを転送し、かつその変換器も車上に持たねばならないため、どうしても車両側が重くなってしまう傾向にある。このため、経済性をより厳しく要求される速度領域の低い都市、郊外型の地下鉄や中速域の空気・磁気浮上鉄道などの交通システムには車上一次形のLIMが用いられる。

一方、時速400km/hの営業運転を視野において開発されているJRのリニアエクスプレスやドイツのトランスラピッドなどの都市間の磁気浮上鉄道では、地上一次形のリニア同期モータが用いられている。

交通へのリニアモータの利用のねらいとしては、建設費用の削減効果が挙げられる。たとえば、大阪や東京ですでに実用化されているリニア地下鉄では、トンネルを小型化したり、カーブの際の曲率半径を小さくしたりできる。

鉄道は、その駆動力やブレーキ力を最終的には鉄レールと鉄車輪の摩擦力（鉄道の分野ではこれを粘着力と呼んでいる）に依存している。リニアモータは直接駆動力を発生できるため、粘着限界から解放され急勾配の設定が可能で、ドイツAEG社のM-Bahnや広島のスカイレールではその特長が活かされている。

また、接触部を介さずに直接駆動力を発生できるという点は、空気浮上や磁気浮上による車両支持との組み合わせに適している。HSST、JRのMAGLEV、Transrapidなどでは磁気浮上技術との組み合わせによって、従来の鉄道の限界を超えた高速化を実現しつつある。さらにこれらのシステムでは、動力や荷重の分散化が可能となるので、土木構造物の負担が減り建設コストの削減にも寄与している。

さらに、リニアモータの応用によってはじめて可能となるもの、たとえば、超高層ビルの自走式エレベータのような新しいシステムも提案されている。

一方、リニアモータの欠点としては、回転形のモータにくらべて、可動部と固定部の間隔が大きくなってしまいうので、力率や効率が悪くなってしまうこと、鉄道の場合には、在来の鉄道システムとの互換性が乏しいことがあげられる。

これらは前述の長所との比較の中で、技術的に容認できる範囲にある、あるいは解決が可能であるという判断がなされた結果として、過去30年以上の歴史の中で精力的に開発が進められているといえる。

1.4.2 電気モータの分類

表1.4.1は電気モータの分類例を示したもので、駆動する電源の種類によって三つに分けている。この中で乗物駆動用としては、誘導モータ（IM）と永久磁石界磁式同期モータ（PMモータ: Permanent Magnet Motor）がとくに有望である。図1.4.8は主なモータの構造を示したもので、PMモータはさらに、磁石をロータ表面に取りつけたSPMと、ロータ内部に磁石を埋め込んだIPMとに分類される。

表1.4.1 電気モータの分類³⁾

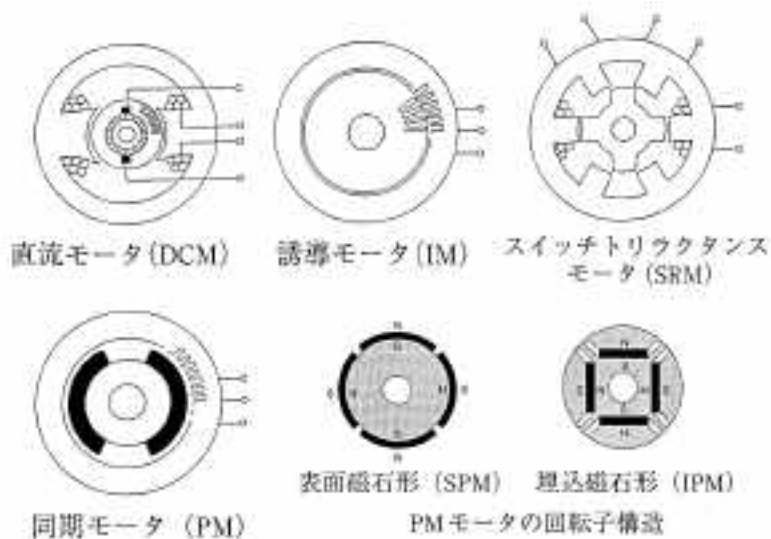
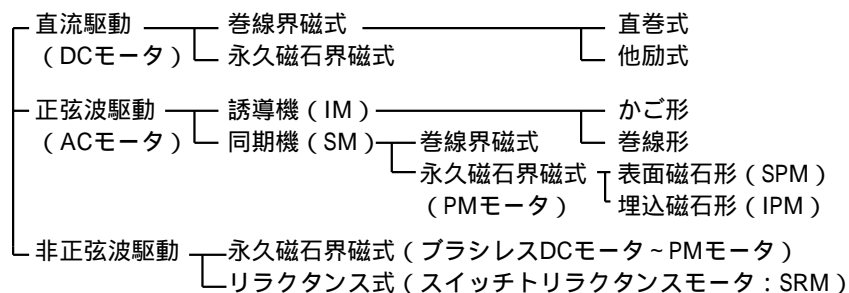


図1.4.8 主な電気モータの構造（断面図）⁴⁾

SPMはトルクリプルが小さいため高性能サーボ用途に適しているが、磁石がはがれ落ちやすく高速回転には向いていない。IPMは、磁石を回転子内に埋め込むため高速回転が可能であり、磁石形状や磁束の通り道の工夫によって大きなリラクタンストルクを発生する。リラクタンストルクは永久磁石による主トルクに足されるため、高出力かつ高効率なモータとなる可能性がある。

1.4.3 鉄道車両用主電動機の進歩

表1.4.2は、東海道新幹線の代表的な形式である、0系、100系、300系の比較を行ったものである。0系と100系はともに直流直巻モータを用いており（#2）、重量あたりの出力は小さい。100系では、0系に比べて5%程度の小型化と25%の出力アップを達成した。電動車数は削減され2階建て新幹線が実現した。

1990年に登場した300系最大の目玉は、誘導モータを主電動機とすることによって劇的な軽量化を達成したことである。100系の直流モータに比べて30%も高出力になっているにもかかわらず重量は半分以下である。300系はさらに電動車数を減らした10M6Tの編成で270km/hの最高速度を得て、東京大阪間を2時間30分で結んだ。究極の駆動方式が実現したのである。

さらに、300系のモータでは1.30kg/kWであったが、最新のE1系新幹線のモータでは1.19kg/kWまで軽量化されている。電気自動車用モータではこの数値は、0.5kg/kWに達するものもある。しかしこれは短時間定格である。新幹線用モータは連続定格であり、1.19kg/kWという数値は立派である。

300系の誘導モータの軽量化については以下のような話が知られている。300系の開発が始まってからも誘導モータの軽量化はどんどん進み、量産車にいた

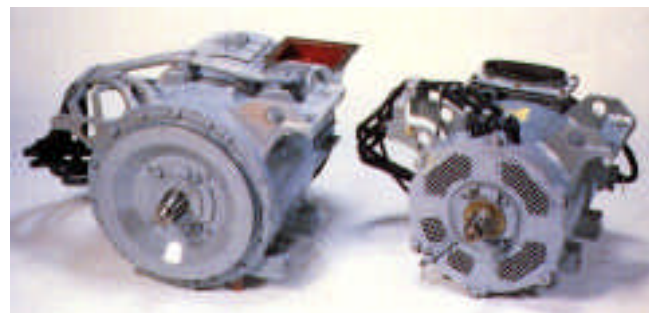


図1.4.9 新幹線0系および300系の主電動機

てモータをもたないT車（#3）の軸重の方が大きくなってしまった。T車に設けるディスクブレーキは熱容量の観点からあまり小さくできないためである。当初はM車の方が重かったのが開発途中で逆転し、加速もブレーキもできる軸の方がブレーキしかできない軸より軽いという奇妙なことになったわけである。

表1.4.2 東海道新幹線主電動機の進歩

形式	0系	100系	300系	
登場年	1964	1986	1990	
編成	16M	12M4T	10M6T	
編成重量(t)	970	925	710	
最高速度(km/h)	220	230	270	
編成定格出力(kW)	11,840	11,040	12,000	
駆動方式	低圧タップ制御	位相制御	インバータ制御	
ブレーキ方式	発電，ディスク	発電，ディスク， うず電流	回生，ディスク， うず電流	
主電動機	種類	直流直巻モータ	直流直巻モータ	誘導モータ
	出力(kW)	185	230	300
	重量(kg)	876	825	390
	出力当たり重量(kg/kW)	4.74	3.59	1.30

#2 電気鉄道の電化方式には、直流と交流がある。直流は600V, 750V, 1500V, 3000Vがあり、交流は16-2/3Hz, 50Hz, 60Hzで、電圧は20kV, 25kVなどがある。わが国の幹線では、ほとんど直流1500Vか、交流（50Hzまたは60Hz）の20kV（在来線）、25kV（新幹線）が用いられる。直流電化は電車側の設備が簡単になるので都市内鉄道のような高密度線区に適し、交流電化は、車両設備は大きくなるが変電所間隔を長くできるので、長距離の都市間鉄道に適している。

しかし、電気モータについては、電化方式にかかわらず、ごく最近まで直流モータが用いられてきた。直流電化の場合は抵抗制御または各種チョップ制御、新幹線のような交流電化の場合は、変圧器のタップ切り替えやサイリスタの位相制御を用いた電圧制御が用いられている。これらはすべて直流モータを用いているのである。インバータを用いて誘導電動機を駆動する最近のVVVF方式では、直流電化の場合、架線は直接インバータに接続されるが、交流電化の場合は、いったん整流器を用いて直流に変換した上でインバータに接続する。架線の交流がそのままモータに接続されるのではないから注意してほしい。

#3 電車の場合、モータをもたない車両をT車（Trailerの頭文字）、モータをもつ車両をM車（Motorの頭文字）という。表1.4.2の編成欄のM.Tも同じ意味で用いている。

1.4.4 可変速駆動系の構成

(1) 可変速駆動系の一般構成

電気モータを用いて可変速駆動を行うシステム、すなわち可変速駆動系はどんなものでもおよそ図1.4.10のような構成をとる。モータ、変換器、そしてコントローラの3要素から成っている。

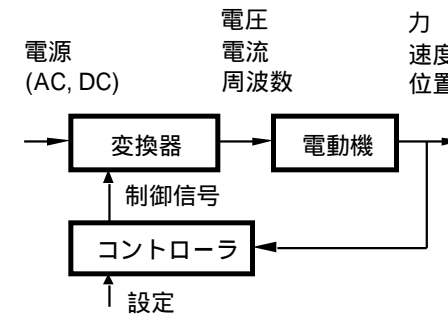
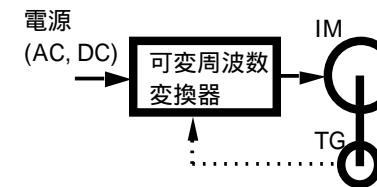


図1.4.10 可変速駆動系の構成

(2) IMの可変速駆動

IMの可変速駆動系の構成は図1.4.11のようになる。速度情報（速度センサ）はベクトル制御では不可欠であるが、V/F制御のような簡単なものでは不要である。



- 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

図1.4.11 IMの可変速駆動系

ベクトル制御の原理は図1.4.12に示すとおりで、1次電流 i_1 の成分 i_m （磁束分電流）と i_2 （トルク分電流）を独立に制御するものである。これは直流モータでは簡単なことである。界磁と電機子は物理的に分かれているので、それぞれの

電流（磁束分電流とトルク分電流）を独立に制御することに何の問題もない。しかし、IMでは磁束分電流とトルク分電流は一緒になっており、簡単には分離できない。しかも3相交流というややこしいものとして供給するしかない。

ベクトル制御とは、このように複雑なACモータを、DCモータに化けさせる座標変換の技術であるといってもよい。また、励磁電流 i_m も電源から供給しなければならないので、PMモータに比べると効率を低下させる要因となる。

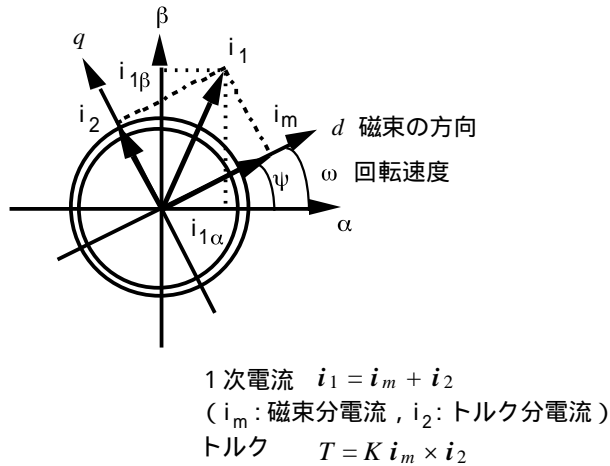


図1.4.12 ベクトル制御の原理

(3) 同期モータの制御

一般に永久磁石界磁式同期モータ（PMモータ）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）ということも多い。その制御方式としては、d軸電流（減磁起電力）をゼロにする $i_d=0$ 制御が一般的である。トルクはq軸電流に比例するが、負荷の増大に伴い端子電圧が上昇するという問題がある。

そのほかにも、力率1制御、トルク線形化制御、鎖交磁束一定制御などがある。最大トルク制御と呼ばれる手法は、主トルク以外に、リラクタンストルクを利用して大きなトルクを得るものであり、とくにIPMにおいて注目されている技術である（図1.4.8参照）。

PMモータ制御の問題点は以下のとおりである。まず、電源力率が低くなることや高調波の問題はDCモータと同じである。過負荷耐量や弱め界磁特性はDCモータに劣り、とくに、永久磁石界磁形では弱め界磁をすると減磁（磁石が弱ること）という問題がある。またIPMではトルク脈動が大きい。これは昔からある根本的な問題であり、原理的にゼロにすることは困難である。

1.4.5 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 i_m の大きさを一定に保つせいである。励磁電流を変可にして最大効率運転を行えば、効率はPMモータに優るとも劣らない。また、PMモータにおいても、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。これらは従来いわれてきたIMやPMモータの常識とは反することがらである。

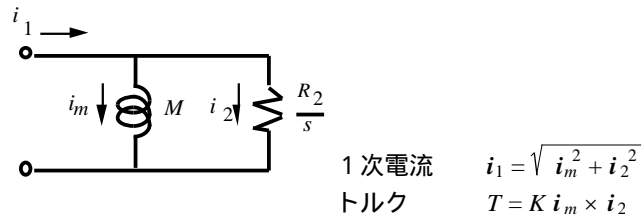
さらに、装置の小型化や低価格化、さらに、信頼性向上をねらって、センサレス制御（IMでは速度センサレス、PMモータでは位置センサレス）がさかんに研究され、実用化の域に達しつつある。いずれ、IM、PMモータのいずれにおいても、モータへのびるワイヤは、モータを駆動するための高電圧低電流の細い線が3本というのが常識になるだろう。

ここではこのような最近の制御技術のなかで、乗物にとって重要性の大きい、IMの効率最大化制御について考え方を述べておこう。

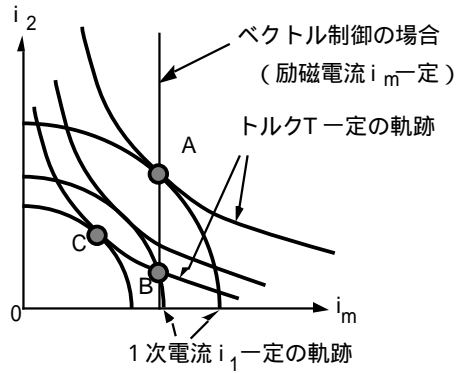
IMは負荷の軽いときには励磁電流を絞って消費電力を下げるのが可能である。たとえば電気自動車の場合、全負荷で長時間運転することはまずないから、低負荷時の効率改善は、限られた電池のエネルギーを有効活用するために、たいへん大きな意義をもっている。

IMの簡易等価回路を使い、1次電流 i_1 の大きさ一定の条件のもとでトルク T を最大にする i_2 と i_m を求めると、図1.4.13から両者の大きさをほぼ同一に保てばよいことがわかる。これはベクトル制御とはずいぶん異なる制御論理である。ベクトル制御では2次磁束の大きさ（ i_m に対応する）を一定に保つことが条件である。ところが効率最大化制御では i_m をひんぱんに変化させるわけであるから、過渡状態におけるトルク制御特性は当然犠牲になる。しかし著しい劣化でなければ問題ない。効率の方を優先させるわけである。実際、 i_m の高速制御についてもさかんに研究され、乗物として問題ないレベルに達している。

この制御法の具体例については、5.X.4 にて紹介しているので参照されたい。



(a) 誘導モータの簡易等価回路と電流の関係



(b) 1次電流一定およびトルク電流一定の軌跡

(B点とC点では同じトルクを発生するが、C点の方が1次電流が小さいことがわかる。)

図1.4.13 IMの効率最大化制御の考え方

参考文献

- 1) 大西: モータの分類と原理, 日経メカニカル, pp.46-60, 1992.8.24
- 2) リニアモータとその応用, 電気学会, 1984
- 3) 水野: EV用モータについて, '96モータ技術シンポジウム, 1996
- 4) 武田: リラクタンス併用PMモータの動向, '97モータ技術シンポジウム, 1996