

第5章

ステッピング・モータの制御

ステッピング・モータとは／ステッピング・モータの種類／ステッピング・モータの動作／ステッピング・モータの特性／ステッピング・モータ・ドライバ／マイコンによる直接制御／タイマ割り込み利用の可変速制御／TPCとDMA利用の可変速制御

<概要>

制御系は「検出」(センサ：sensor)の部分，「演算・制御」の部分，そして実際に動作をさせるアクチュエータ(actuator)の部分に大別できます。アクチュエータの代表格は，電気エネルギーを運動エネルギーに換える**モータ**(motor：電動機)です。コンピュータによる制御システムが多くなり，直接デジタルなパルスで制御できる**ステッピング・モータ**(stepping motor)の利用が増えました。

指針式のデジタル時計の駆動源に利用されているのもステッピング・モータの仲間ですし，ステッパと呼ばれる超小型のモータもあります。また逆に大型のものでは，油圧と組み合わせた電気-パルス油圧モータなどもあります。

この章ではステッピング・モータの動作原理，特質，制御・駆動方法，その特性などを解説します。

5.1 ステッピング・モータとは

ステッピング・モータ(stepping motor)はステップ・モータとも呼ばれ，また駆動信号源がパルスであること，動作もパルスのことから，**パルス・モータ**(pulse motor)とも呼ばれます。

5.1.1 ステッピング・モータ

ステッピング・モータは与えたパルス信号に応じて，一定の動作量があります。つまり与えたパルスに応じて，微視的には間歇的で，断続的な動きをします。文字どおりステップ状に動作しています。

一般の直流モータなどは，別途回転検出器や速度検出器を備えなければ，実際の動作量はわかりません。しかしステッピング・モータは，後述の脱調や共振が起きないかぎり，制御量と動作量は比例しています。与えた制御量に対応した動作をしますので，**オープン・ループ**(open loop)の制御系を構成できるアクチュエータということもできます。

そのようなステッピング・モータの長所と短所を，メーカーの資料などを参考にまとめておきます。

【長所】

- ① モータの回転角度は，入力パルスに比例する
- ② 静止状態でトルクが最大になる(巻線に通電している場合)
- ③ よいステッピング・モータはステップ角度の誤差が $\pm 3 \sim 5\%$ 程度であり，この誤差はステップ間で累積しないため，高精度な位置決めと動作の反復性をもつ

一方、バイポーラ巻線方式は1本の巻線を有効に利用できることから、小型化も図れ、巻線の巻数を増やすこともできます。結果として同じ大きさのモータならば、高出力のものができます。

両者の区別は、モータから出ているリード線の本数で識別できます。2相モータの場合、ユニポーラ式は6本、バイポーラ式は4本です。

5.1.3 ステッピング・モータの用途

ステッピング・モータは所期の制御量を確実に得たい用途に適しています。回転角度、速度、位置、同期などを要求されるときに効果を発揮します。身近な例でもプリンタ、プロッタ、ハイエンドのオフィス機器、ハード・ディスクやフロッピー・ディスクのヘッド移動、ファクシミリなどに利用されています。また大規模なものでは工作機械の制御などにも利用されています。

5.2 ステッピング・モータの種類

ステッピング・モータは与えたパルスによって動作し、パルスに応じてステップ状に動作するモータです。その動作原理、回転子の構成素材、特質により、以下の3種類に分類されます。

- ① 可変リラクタンス型(VR型)
- ② 永久磁石型(PM型)
- ③ ハイブリッド型(HB型)

5.2.1 可変リラクタンス型

リラクタンス(reluctance)とは磁気的な抵抗のことです。可変(variable)リラクタンスはVR型と略称されます。1838年にDavidsonにより最初のモデルが製作されたもので、スイッチド・リラクタンス・モータ(SRモータ)とも呼ばれます。

図5.2にその断面を模式的に示します。複数の歯をもつ電磁軟鉄製の回転子と巻線などからなる固定子で構成されています。選択的に対向する固定子の巻線に電流を流すことにより、その極が励磁され、磁路が最短に形成されるように回転子が引き寄せられ、回転力を生み出します。原理的に回転子に永久磁石や巻線がなく、モータ構造が簡単で安価、機械的に堅牢、また、回転子の発熱問題がありません。

図に示したように、固定子の極数と回転子の極数の違いにより、細かいステップの動作も可能になります。

回転子は軟鉄ですから、永久磁石の熱減磁の問題がなく高温での運転が可能といった特徴をもっています。その実現には高度な電流制御が要求され、当時の電子技術では大砲の台座を駆動する程度の性能しか出せなかったともいわれています。1950年代には、ステップ・モータとして製品化されていますが、振動、騒音の問題によりモータの主流とはなりません。近年は、シミュレーション技術や制御技術の進展により、極形状・巻線の最適設計、駆動電流の波形制御などによる改良提案がなされ、SRモータが大量生産に向き、低コストで信頼性に優れたモータとして、電気自動車用に注目されています。

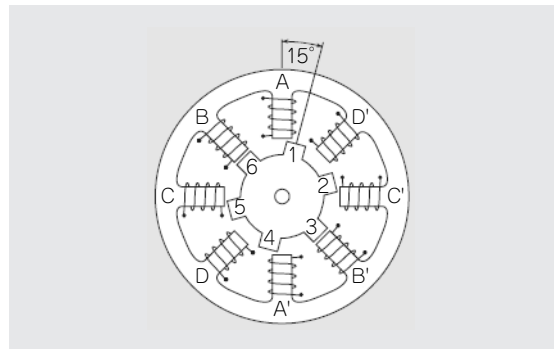


図5.2 VR型モータの断面(模式図)

注) 以降の図5.2～図5.4は新日本無線社資料から引用させていただいた。

- ④ 始動/停止/逆転に対する優れたレスポンスを有する
- ⑤ モータ内に機械的に接するブラシがないため、非常に信頼性が高い。このためモータの寿命は軸受けの磨耗などによる寿命に依存する
- ⑥ モータはオープン・ループ制御が可能なデジタル入力パルスに応答することから、モータ制御がより容易にかつ低コストとなる
- ⑦ 回転軸と直接連結された負荷とは、超低速な同期運転も可能になる
- ⑧ 回転速度は入力パルスの周波数に比例するため、広範囲な回転速度を実現できる

【短所】

- ① 微視的には、断続(ステッピング)動作である
- ② 制御が不適切な場合、脱調や共振が発生することがある
- ③ 超高速での運転は容易でない

5.1.2 モータに関する基本用語

ここで準備として、モータに関する述語の復習をしておきます。モータは一般的には回転の運動エネルギーを得る機械です。回転する部分を**回転子**(rotor：ロータ)と呼びます。回転子を包むように、固定している部分を**固定子**(stator：ステータ)と呼びます。

構造上、固定子に対する電流の供給は容易ですが、回転子に電流を供給しようとする、回転体と固定の部分とを電氣的に接続する機構が必要になります。この部分を整流子と呼びますが、導電体である炭素(カーボン)を使ったブラシ(bush)機構などが利用されますが、前述のようにステッピング・モータにはそのメカニズムは不要です。

固定子の巻線により個別に励磁(電流により磁性を帯びさせること)される部分を相(phase)と呼びます。複数個ある相を順次励磁しますので、磁束は移動し、回転することになります。これを回転磁束(flux rotation)と呼びます。この磁束の回転を追従するように、つまり回転子の磁性体により磁路を形成し、磁束密度を最大にできるように回転子が動き、回転のエネルギーが発生します。

回転させようとする力、偶力を**トルク**(torque)といいます。力学的な力なので、古くは単位に $\text{kgf} \cdot \text{cm}$ を使っていました。重量の単位 kg とは区別し、 f を付加した単位です。回転力は回転中心を支点とした「てこ」とも考えられますので、腕の長さ(cm)も考慮した単位です。MKS単位系では N (ニュートン)で、 1kg の物体に作用して、 1m/s^2 の加速度を与える力のことです。両者の関係は、

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{cm} = 9.8\text{N}$$

です。小型のステッピング・モータでは $1/1000$ の単位 mN で表現する数値の範囲です。

ステッピング・モータはパルス列の与え方によって、左右両方向に回転させることが可能です。通常動作軸(回転力を利用する)方向から見て、右回転、時計方向の回転をCW(clock wise)の回転、反時計方向の回転をCCW(counter clock wise)と呼んでいます。

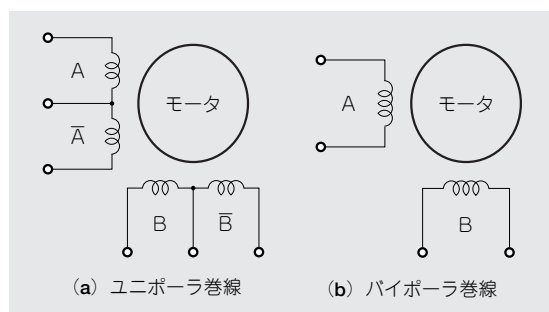


図5.1 ユニポーラ巻線とバイポーラ巻線

固定子を励磁する巻線の方法により、図5.1に示すように、ユニポーラ(uni-polar)巻線モータとバイポーラ(bi-polar)巻線モータがあります。ユニポーラ巻線は中間タップ部分に、たとえば+電源を接続し、巻線のいずれかに通電することによって、S極N極を得ます。バイポーラ巻線方式は、ちょうど直流モータの回転方向を切り替えるのと同じ方法で、Hブリッジなどを利用して電流方向を変えて、極性を変える方式です。駆動回路が簡単になることから、ユニポーラ巻線が多用されています。