

電動機の技術 第7回

—巻線型誘導電動機—

森本 雅之*

1 はじめに

巻線型誘導電動機は大容量を中心に用いられてきたが、ブラシを有するため、保守性などの点から、かご型電動機に置き換わっている。しかしながら、クレーン用途では、発停が頻繁であり、かご型電動機では発熱が問題となる。そのため、始動電流の割に始動トルクが大きい巻線型誘導電動機が現在も多く使われている。今回は、巻線型誘導電動機の特徴、制御について述べてゆく。

2 巻線型誘導電動機の構造

巻線型誘導電動機は回転子に三相の巻線を用いた電動機である。固定子のかご型誘導電動機と同じ三相巻線である。電動機の原理はかご型と全く同様である。ただし、巻線型誘導電動機はスリップリングとブラシを有する。回転子巻線はY型接続され、他方をそれぞれスリップリングに接続する。3つのスリップリングは軸とともに回転し、固定子側のブラシを介して外部回路に接続できるようになっている。一般には外部に可変抵抗を接続し、二次抵抗の大きさを調節する。

ブラシは常時接触させる場合と、始動時だけブラシを接触し、運転中はブラシ引き上げ装置によりブラシを引き離す場合がある。この場合、始動時は巻線型誘導電動機として高始動トルク、低始動電流の特性となり、始動後はスリップリング間を短絡して、かご型電動機として運転する。そのため、外部回路による制御は行わない。

巻線型誘導電動機はブラシを使用するため、ブラシが摩耗する。さらに、運転中に回路を切り換

えるため、電磁接触器の接点が摩耗する。そのため、保守が課題である。

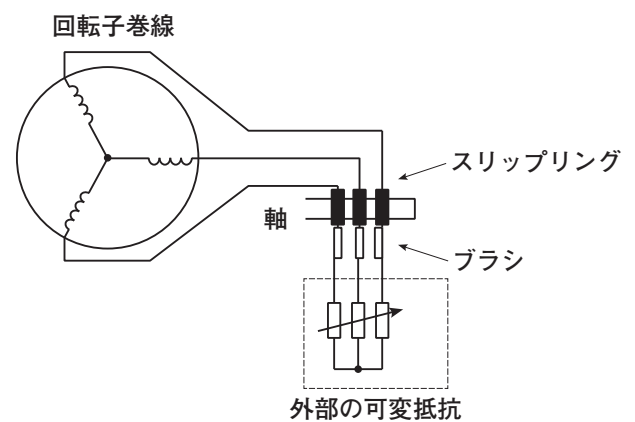


図1 巻線型誘導電動機の回転子

3 巻線型誘導電動機の特徴

巻線型誘導電動機の等価回路、特性は本講座の第5回で述べている誘導電動機そのものである。重複するが、誘導電動機のT型等価回路を図2に示す。

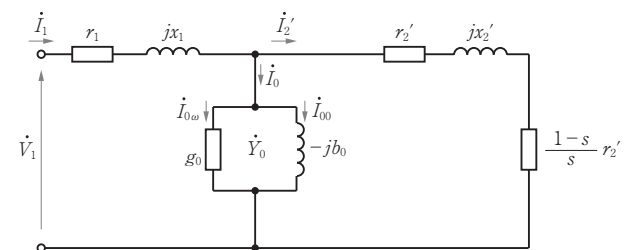


図2 誘導電動機のT型等価回路

* Masayuki Morimoto モリモトラボ

等価回路定数を用いて、誘導電動機のトルクを表すと次のようになる。

$$T = \frac{P_2}{\omega_0} = \frac{3}{\omega_0} V_1^2 \frac{r_2'/s}{(r_1 + (r_2'/s))^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (1)$$

この式は、誘導電動機のトルクが r_2'/s に比例することを示している。さらに、二次抵抗 r_2' が変化しても、滑り s がそれに対応して変化して、 r_2'/s が一定になればトルクは変わらないということも表している。図3に示すように、二次抵抗が2倍になったとき、滑りが2倍のところでは同一トルクである。このような性質を比例推移という。

比例推移により、同じトルクでは r_2'/s が同一になる。さらに、電流、力率などの式にも r_2'/s の形で入っているので、これらの特性も比例推移する。

二次抵抗を大きくすると、トルクの変化に対して速度の変化が大きくなる。すなわち速度制御範囲が広がる。巻線型誘導電動機では、二次巻線に外部から抵抗を接続できる。そこで、外部から二次抵抗値を調節することで望みのトルク特性を得ることができる。この方法により、巻線型誘導電動機の始動特性が改良され、速度制御することが可能である。

なお、外部から抵抗を接続せず、二次巻線を短絡すればかご型電動機と全く同じと考えることができる。

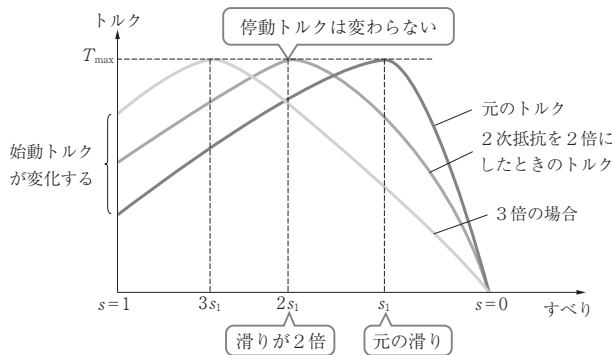


図3 比例推移

4 巻線型誘導電動機の始動と制動

かご型電動機は始動電流が大きいため、負荷の慣性モーメントが大きい場合や、始動頻度が激しい場合に電動機の発熱が大きくなってしまふ。ま

た、始動電流により電圧低下などの電源系統への影響が大きいことがある。そのため、始動特性の改良を目的として巻線型誘導電動機が使われることがある。

巻線型誘導電動機の始動では、図4に示すように、二次巻線に始動用の可変抵抗器を接続する。これを始動抵抗器と呼ぶ。加速に応じて始動抵抗器の抵抗値を小さくしてゆく。これは図3に示した比例推移の原理を利用したものである。例えば、始動電流が定格電流の1.2倍になるような二次抵抗値とすると、始動トルクも定格トルクの1.2倍になる。

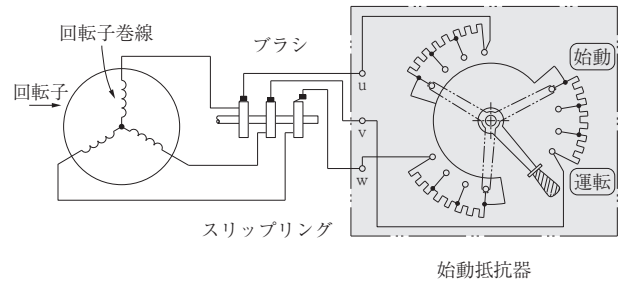


図4 始動抵抗器

一般には抵抗値を段階的に切り換えてゆく。切り替えの段階をノッチと呼ぶ。図5において、抵抗値が最も大きいときが1の曲線であり、始動電流、始動トルクともに最も小さい。2、3と順に抵抗値が小さくなり、6は二次巻線を短絡したときのトルク、電流を示している。始動時には二次抵抗が大きいので、始動電流 I_H が流れ、加速に従い電流が I_L まで低下する。このときに、一段の抵抗を短絡する。これにより、トルク、電流は2の曲線となり、電流がまた I_H まで増加する。さらに加速して I_L まで減少したときに次の段の抵抗を短絡する。これを繰り返してゆく。この様子を図5に示す。このとき、各相の抵抗を同時に短絡する方式と、切り替え中の一瞬の不均衡状態を許容して各相を順次短絡する方式がある。このようにすることにより、始動時の発熱の大部分は始動抵抗器で発生することになる。

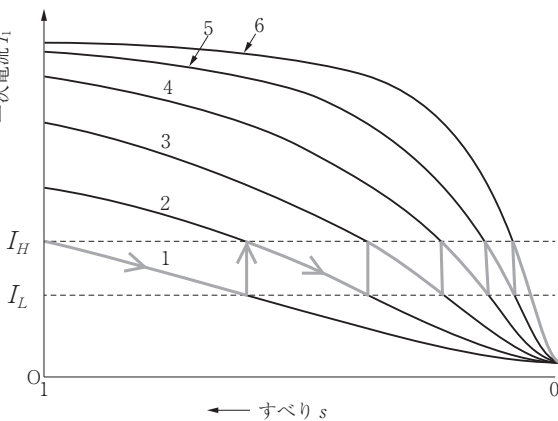
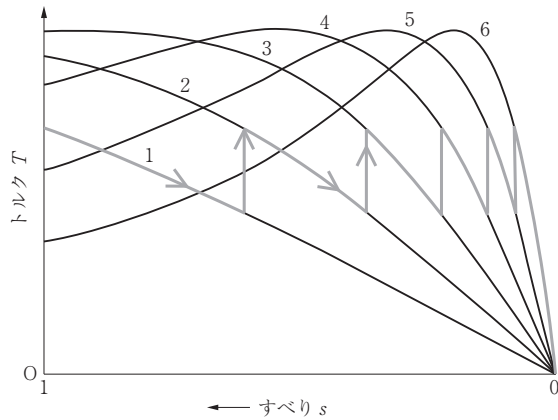


図5 ノッチ切り替えによるトルクと電流の変化

巻線型誘導電動機の制動はかご型電動機と同じ制動法を用いることができる。とくに電気制動のうち、発電制動は巻線型誘導電動機でよく使われる方法である。制動時、巻線型誘導電動機的一次巻線を電源から切り離すと同時に直流励磁を加える。すると、電動機は、一次巻線が直流励磁されているので界磁として働き、二次巻線を電機子とする交流発電機として動作する。二次巻線に誘導起電力が生じ、二次電流として運動エネルギーを電気エネルギーに変換するので制動トルクが発生する。かご型電動機の場合、運動エネルギーは回転子の発熱となるが、巻線型電動機の場合、大部分の電力を消費するのが二次抵抗器となるので回転子の発熱は小さくなる。また、二次抵抗値を調節することが可能なので制動トルクが調節できる。さらに、印加する直流電圧を変更することでも制動トルクの調節が可能である。

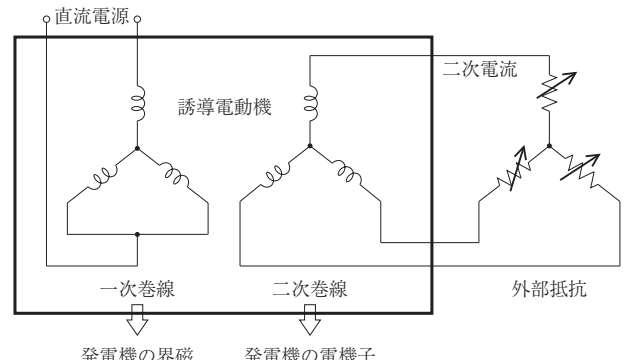


図6 発電制動

さらに、巻線形誘導電動機だけに使用される制動法として単相制動がある。図7に示すように一次側の三端子を図のようにして単相接続に切り替える。この接続では単相誘導電動機として動作する。この状態で、二次側に抵抗を接続して、抵抗値を増加させてゆくとトルクが減少してゆき、やがて逆トルクとなり制動トルクが得られる。これにより大きな制動トルクが得られる。ただし、停止付近の低速度になると制動トルクは小さくなる。

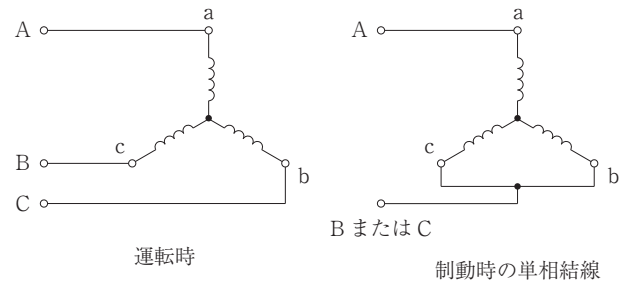


図7 単相制動

5 巻線型誘導電動機 の速度制御

巻線型誘導電動機 の速度制御は、二次抵抗による制御と二次励磁による制御が行われる。いずれも外部回路に接続して行う。

二次抵抗方式による速度制御は外部抵抗を調節することにより、滑りが変化することを利用する。図3に示したトルクの比例推移を利用し、外部抵抗を r_2'/s が一定となるように変化させることにより滑り s を変化させ、速度制御を行う。この方式では、例えば、滑り s を2倍にした場合、二次

抵抗値も2倍になる。したがって二次銅損も2倍となり、損失が増加する。二次銅損の増加分だけ出力が低下し、電動機の効率も低下してしまう。二次抵抗方式に一次電圧制御を組み合わせることにより速度制御時の電動機効率の低下を防ぐことが可能である。

外部抵抗として挿入する抵抗の大きさ R は、負荷が定トルクだと仮定すると次のように求めることができる。

$$R = \frac{sE_2}{I_{2r}} - r_2 \quad (2)$$

ここで、 I_{2r} は定格速度における二次電流、 E_2 は静止時の二次電圧、 r_2 は二次抵抗である。

始動抵抗器を速度制御用の抵抗として使うことも可能である。速度制御により外部抵抗に発生する損失は次のようになる。

$$P_{cR} = I_{2r}^2 R = sE_2 I_{2r} \quad (3)$$

この式の意味するところは、滑り s のとき、その時の二次入力 $sE_2 I_{2r}$ が抵抗で熱として消費され、 $(1-s)E_2 I_{2r}$ が出力となるということである。

二次抵抗方式は抵抗器を段階的に切り替えるが、これを高応答で、さらに抵抗値を連続的に変化させるために、チョッパを使う方式がある。図8に示すように二次電流を整流し、チョッパで平均電圧を制御する。チョッパは直流の電力変換回路であり、デューティファクタ（オン時間の比率）に比例して平均電圧が変化する。これにより二次回路を流れる電流が変化するので、等価的に二次抵抗を変化させることができる。

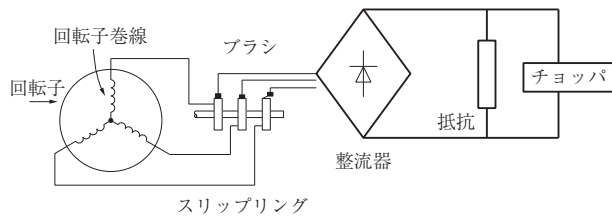


図8 チョッパによる二次抵抗の制御

二次励磁方式は、外部抵抗は使わない。したがって、二次回路の抵抗は巻線抵抗のみとなるので速度制御により損失は増加しない。二次励磁方式には、クレーマ方式、セルビウス方式がある。

クレーマ方式は二次巻線の電流を整流器で直流に変換し、巻線形誘導電動機の軸と直結した直流電動機に電機子電流を供給する方式である。直流電動機は電機子電流に比例するトルクを発生するので、二次抵抗方式では二次銅損となってしまう電力をトルクに変換して電動機の出力に加えることになる。さらに、直流電動機の界磁電流を制御することによりトルクを増減できるので負荷のトルクに合った滑り s に速度制御することもできる。

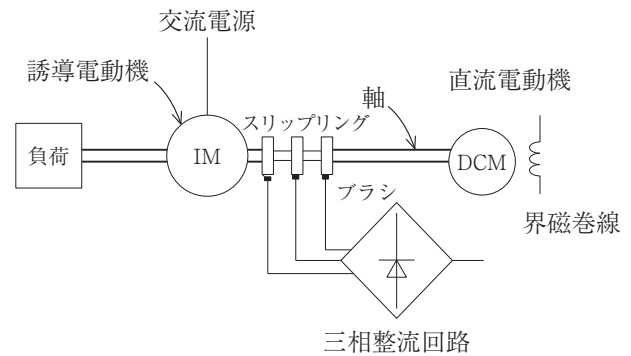


図9 クレーマ方式

セルビウス方式はクレーマ方式と同じように直流電動機を用いるが、直流電動機により新たな誘導発電機を駆動し、発電機出力を電力として電源側に返送する方式である。現在は誘導発電機を使用せず、電力変換器を用いる静止セルビウス方式が用いられている。単にセルビウス方式という場合、静止セルビウス方式を指し、誘導発電機を使う場合は回転型セルビウス方式、M-Gセルビウス方式などと呼ばれることが多い。

セルビウス方式では、巻線型誘導電動機の周波数 sf の二次電流を整流し、その直流をインバータ回路により電源周波数に変換して電源に戻す。当初はサイリスタが使われていたが、現在はトランジスタインバータが使われる。始動は始動抵抗を用いて、加速後、二次巻線の接続をセルビウス方式に切り替える。

超同期セルビウス方式とは、セルビウス方式において双方向の電力変換が可能なインバータを用い、二次巻線にインバータから電力を供給できるようにしたものである。これにより同期速度以上の運転が可能となり、誘導発電機として回生動作も行うことができる。超同期セルビウス方式は二重給電誘導機と呼ばれることがある。可変速方式の風力発電に使われている。

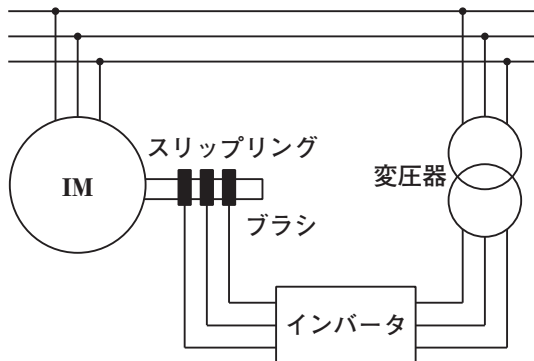


図10 セルビウス方式

6 巻線型誘導電動機の異常現象

巻線型誘導電動機で、スリップリングとブラシ間の接触不良、始動抵抗器の断線などにより回転子巻線の一相が開放され、二次回路が単相となったときに異常トルクを発生する。

このとき、図11に示す T_g のように滑り0.5の付近でトルクの谷を生ずる。これにより、本来負荷トルク T_L との交点である P 点まで加速するはずの電動機は P' 点で運転してしまい、それ以上加速しない。これをゲルゲス現象という。

三相電動機は本来 T_3 のようなトルクを発生するが、回転子が単相となるため、単相交流により新たに T_S の逆相分と呼ばれるトルクを発生する。その結果、合成トルクが T_g となり、トルクの谷が生じる。この現象は、始動抵抗が不平衡な場合にも生じる。

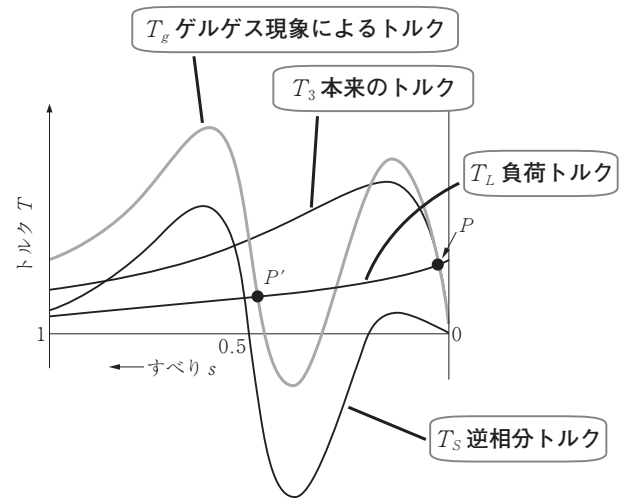


図11 ゲルゲス現象

7 おわりに

今回は巻線型誘導電動機について説明した。巻線型誘導電動機は過去には広く使われてきたが、かご型電動機への置き換えが進んでいる。一方、クレーン用電動機として JEM 規格品が市販されており、それらは巻線型誘導電動機である。ただし、クレーン用途でもかご型電動機をインバータ駆動する方式の採用も増加している。

本講座の掲載予定を以下に示す。

- 1 電動機を理解するための電磁気と電気回路 (2022年4月号)
- 2 電動機の基礎技術 (2022年6月号)
- 3 直流電動機 (2022年8月号)
- 4 直流電動機の制御と永久磁石直流電動機 (2022年10月号)
- 5 誘導電動機 (2022年12月号)
- 6 かご型誘導電動機の駆動と制御 (2023年2月号)
- 7 巻線型誘導電動機 (本号)
- 8 同期電動機
- 9 電動機の絶縁
- 10 電動機技術の動向