

電動機の技術 第8回

—同期電動機—

森本 雅之*

1 はじめに

同期電動機は三相交流による回転磁界と回転子が同期して回転する交流電動機である。回転速度は電機子電流の周波数に比例する。この比例関係を同期という。まず、古くから定速電動機として使われてきた巻線型同期電動機について述べる。さらに、現在、制御用電動機として広く使われている永久磁石同期電動機についても述べる。

2 同期電動機の原理

同期電動機の原理を図1に示す。固定子の電機子巻線に三相交流を流すと回転磁界が発生する。電機子による回転磁界が回転子の界磁磁極を電磁力で吸引して界磁が回転する。回転速度は同期速度 N_0 であり、次の式で示される。

$$N_0 = \frac{120f}{P} [\text{min}^{-1}] \quad (1)$$

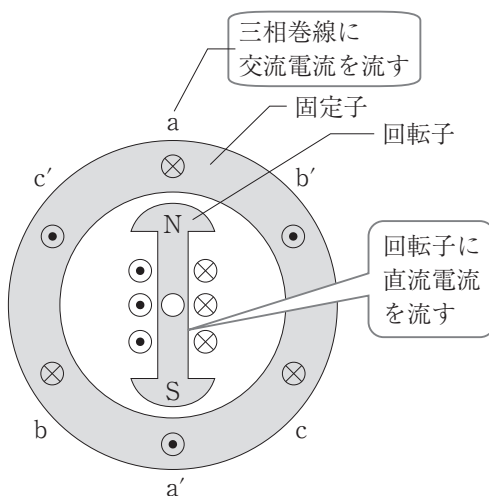


図1 同期電動機の原理

同期電動機の1相分の等価回路を図2に示す。無負荷誘導起電力 E_0 は、電動機が無負荷運転しているときに界磁磁束により誘導される起電力である。回路のインピーダンスを同期インピーダンス Z_s として表す。同期インピーダンスは同期リアクタンス x_s 、電機子の巻線抵抗 r からなる。なお、ここでは界磁は一定と仮定して回路から省略している。

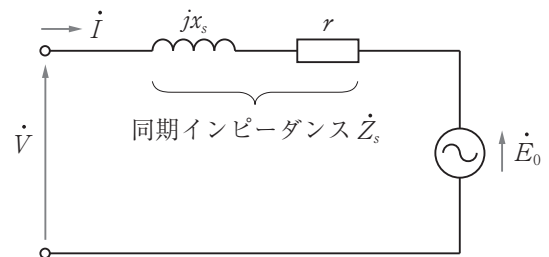


図2 同期電動機の等価回路

この等価回路の電圧方程式は次のようになる。

$$\dot{V} = \dot{E}_0 + \dot{I} \cdot \dot{Z}_s \quad (2)$$

この式は交流の関係式なので電流 \dot{I} を基準としてフェーザ図を書くと図3のようになる。ここで端子電圧 \dot{V} と電流 \dot{I} の角度 θ は互いの位相角を表し、力率角とよぶ。無負荷誘導起電力 \dot{E}_0 と端子電圧 \dot{V} の位相角 δ を内部相差角とよぶ。内部相差角は同期電動機の性能に大きく関係する重要な量である。このフェーザ図から、同期電動機の実出力を求めると次のようになる。なお、ここでは巻線抵抗は無視している。

$$P_o = 3 \frac{V \cdot E_0}{x_s} \sin \delta \quad (3)$$

この式の意味するところは、同期電動機の出力は内部相差角 δ により変化するということである。 $\delta = \pi/2$ のとき出力は最大となる。回転数は一定なので、トルクも最大となる。負荷トルクが電動機の発生できる最大トルク以上になると同期はずれ（脱調）をおこし、停止してしまう。そこで、同期状態から脱出するトルクを脱出トルクとよぶ。同期電動機は $0 < \delta < \pi/2$ で安定運転が可能である。

同期機電動機は磁界をつくるための界磁とエネルギー変換するための電機子から構成される。回転子が界磁の役割をもつ回転界磁型と、回転子が電機子の役割をもつ回転電機子型がある。回転界磁型は大型機では巻線界磁を用いるが、中小型機では永久磁石界磁が用いられることがある。巻線界磁は直流の電磁石であり、回転子巻線への電力供給のためにブラシとスリップリングが必要である。

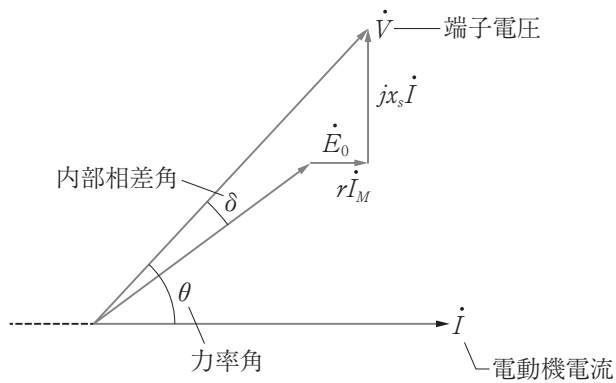
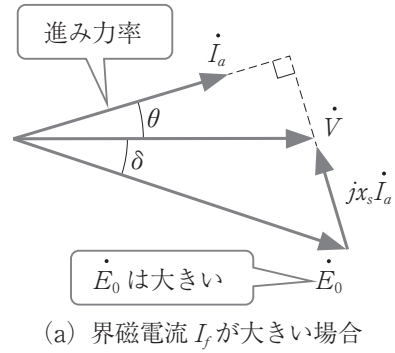


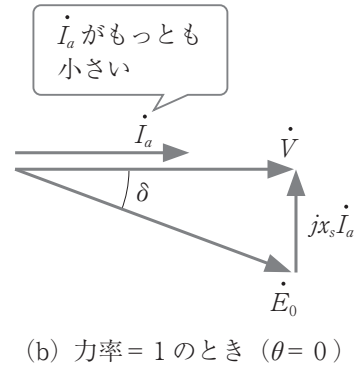
図3 同期電動機のフェーザ図

3 同期電動機の運転

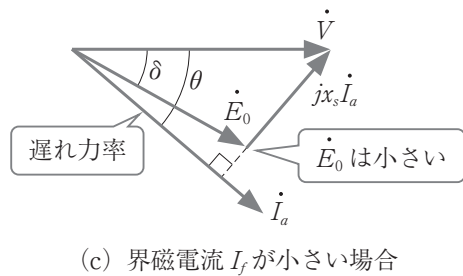
同期電動機を端子電圧一定で、かつ負荷一定として運転し、界磁電流 I_f を調整したときのフェーザ図を図4に示す。図4 (a) は、界磁電流 I_f が大きい場合である。このとき、(b) に示す力率 = 1 の場合と比較すると、誘導起電力 E_0 は大きく、内部相差角 δ は小さくなる。また、電機子電流 I_a は大きくなり、進み力率になる。図4 (b) は、力率 = 1 になるような界磁電流で運転しているときのフェーザ図である。このとき、電機子電流 I_a は最小値である。図 (c) は、界磁電流を小さくした場合である。このとき、誘導起電力は小さくなり、内部相差角 δ は大きくなる。この場合も電機子電流は大きくなり、遅れ力率になる。



(a) 界磁電流 I_f が大きい場合



(b) 力率 = 1 のとき ($\theta = 0$)



(c) 界磁電流 I_f が小さい場合

図4 界磁電流を調節したときのフェーザ図

このような界磁電流と電機子電流の関係を示したのが図5である。図は出力一定の条件で描いてある。この図はその形からV曲線とよばれる。つまり、出力に応じて界磁電流を調節すれば力率 = 1 での運転が可能である。

また、出力がゼロでもV字型を描いていることから、無負荷で運転していても電機子電流が流れていることがわかる。無負荷ということは有効分の電流はゼロ（巻線抵抗分のみ有効電力は消費するが、無視して考える）なので、流れている電流は無効電流である。つまり、無負荷運転で界磁電流を調整すれば無効電流を発生することになり、しかも界磁電流の大きさにより、進み力率や遅れ力率の無効電流が供給できることになる。同期電動機から、このような無効電流を発生させることにより力率を調整することができる。これを同期

調相機とよぶ。同期調相機は系統の無効電力の調整に用いる。しかし最近では、無効電力の調整には回転機ではなく、パワーエレクトロニクス機器を使うことが増えている。

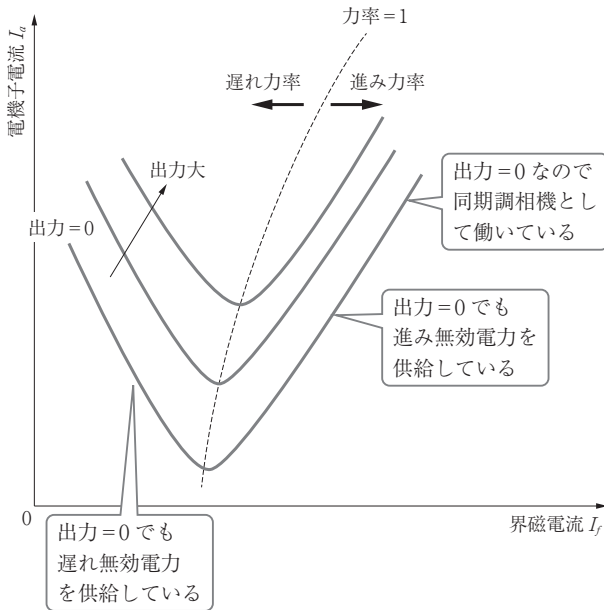


図5 同期電動機のV曲線

同期電動機の運転中に負荷が急変すると、その負荷に相当する内部相差角を中心にして内部相差角に振動が起こる。これを乱調といい、速度や電流が振動する。負荷トルクが脈動する圧縮機などでは、乱調が大きくなるので、GD²の大きいフライホイールを取りつけるなどの対策を行う。乱調による振動が拡大すると、同期はずれしてしまう。そのため、同期電動機の性能指標のひとつとして、定態安定度および過渡安定度が示される。

4 同期電動機の始動と引き入れ

静止している同期電動機に商用電源の三相交流を印加しても同期電動機は始動しない。同期電動機は、同期速度で回転しているときにのみトルクを発生する。すなわち、始動トルクはゼロである。同期電動機がトルクを発生するためには、何らかの方法で始動させる必要がある。その後、同期速度付近まで加速ののち、同期状態に引き入れることが必要である。

同期電動機の始動法で、もっとも一般的に用いられるのが始動巻線である。始動巻線とは、回転

子に界磁コイルのほかに、短絡した、かご形巻線を設ける方法である。始動巻線を図6に示す。始動時には界磁巻線に電流を流さない。この状態で三相交流を電機子に流すと回転磁界ができ、始動巻線によりかご形の誘導電動機として始動加速する。同期速度近くになって界磁巻線に電流を流すと同期電動機としてのトルクが発生し、同期速度まで加速される。これを同期引き入れという。引き入れトルクは定格トルクの50%程度である。同期速度では、滑りがないので、かご形巻線には誘導起電力は発生しない。したがって、かご形巻線には電流は流れない。

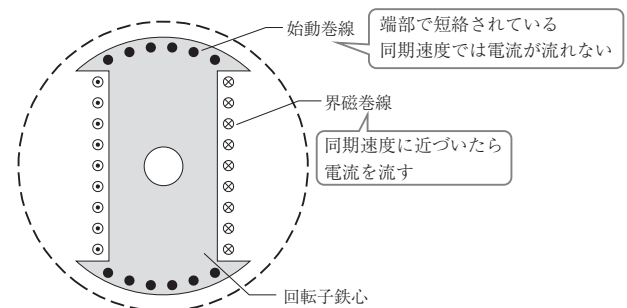


図6 同期電動機の始動巻線

始動巻線は、誘導電動機のかご型巻線として働くので、同期速度以下になると加速トルクを発生し、同期速度以上になると制動トルクを発生する。すなわち、同期はずれを防ぐ機能もある。そのため制動巻線ともよばれ、同期発電機にも使われている。なお、始動時に界磁巻線を開放しておくと、加速中に高電圧が誘導される可能性がある。そのため、始動時には界磁巻線を抵抗で短絡しておくなどの対策が行われる。

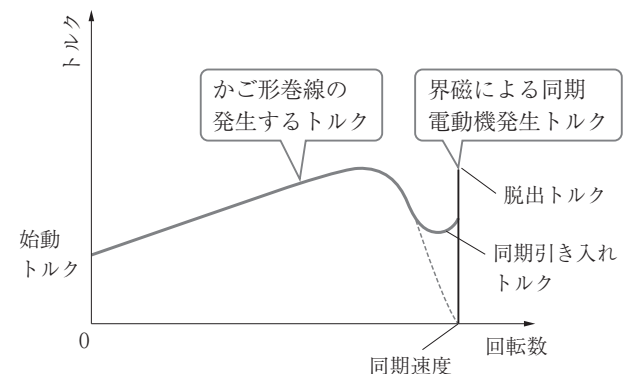


図7 始動巻線による始動トルク

そのほかの同期電動機の始動方法として、インバータを用いて周波数と電圧を徐々に上げてゆく方法や、始動用の小型電動機を別に設けて、同期速度まで無負荷で加速する方法などがある。

5 電機子反作用と短絡比

同期電動機は、回転磁界（電機子磁束）と回転子の磁極（界磁磁束）が同期して回転している。つまり、電機子と界磁は相対的には動いていない。しかし、互いに位相関係がある。界磁と電機子の位相により磁束分布が変化する。図8は同期電動機の磁束の模式図である。界磁は棒状の永久磁石と考える。電機子は1組の巻線とする。ただし、電機子の磁束軸と界磁の磁束軸は一致しておらず、ある位相関係にある。図(a)は界磁の磁束だけを示したものである。磁束は回転子に対して対称に分布している。N極から出た磁束がエアギャップを通り、電機子鉄心を周回してS極にもどる。図(b)は界磁がないとしたときの電機子電流による磁束を示している。左右の巻線による磁束が対称的に分布している。ところが、運転中は、この二つの磁束が同時に存在するので図(c)のような磁束分布になる。

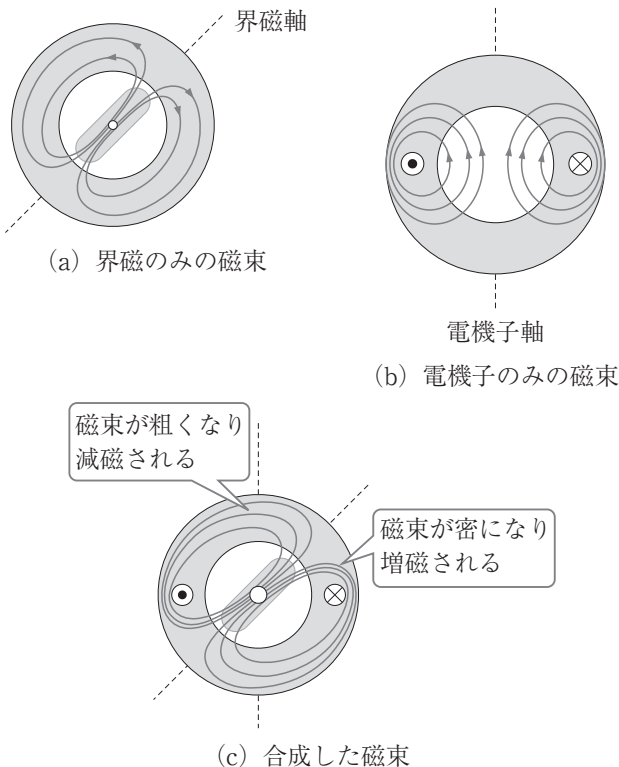


図8 電機子反作用の原因

この様子をエアギャップに沿って切り開いて直線状に展開すると図9のようになる。電機子磁束は界磁磁束より位相が進んでいる。位相差は $(\pi/2 + \text{内部相差角 } \delta)$ である。このとき、合成磁束は位置によって電機子の磁束を増加または減少させている。これを増磁作用または減磁作用という。このように、電機子と界磁の位相により界磁磁束が増減することを電機子反作用とよんでいる。電機子電流による界磁への反作用と考えているのである。前述したV曲線は、進み力率で増磁作用、遅れ力率で減磁作用となるために生じている。電機子反作用により界磁磁束が見かけ上変化してしまう。磁束が変化するので特性も変化する。そこで、電機子反作用による磁束の増減をリアクタンスとして表す。図2の等価回路で用いた同期リアクタンス x_s は、電機子反作用リアクタンスと漏れリアクタンスの和となっている。

同期機の性能指標のひとつとして短絡比がある。短絡比とは、同期発電機が定格速度、定格電圧で無負荷運転しているときに、三相短絡した場合の短絡電流と、定格電流の比である。

短絡比は、同期電動機を同期発電機として動作させたときの界磁電流から測定できる。無負荷誘導起電力を求めるために次のような測定を行う。まず、電機子巻線の端子を開放した状態で、電動機を外部から同期速度で運転する。このとき、誘導起電力が定格電圧になる界磁電流 I_{f1} を測定する。次に、電機子巻線の端子を三相短絡して同期速度で運転する。このとき、短絡電流が定格電流となる界磁電流 I_{f2} を測定する。このときの二つの界磁電流の比が短絡比 K_s となる。

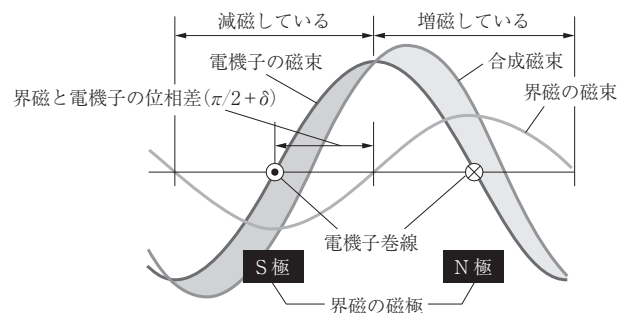


図9 エアギャップの磁束分布

$$K_s = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} \quad (4)$$

短絡比とパーユニット値 (PU) で表した同期インピーダンス Z_s には次の関係がある。

$$Z_s[\text{PU}] = \frac{1}{K_s} \quad (5)$$

短絡比が大きいことは同期インピーダンスが小さいことを意味している。この場合、安定度が高い。逆に短絡比が小さいと同期インピーダンスが大きく、電流や速度の変動が大きい。

6 突極

同期電動機は回転子の形状で分類され、円筒形回転子と突極形回転子に分けられる。図10 (a) に示すのは突極形回転子である。回転子断面が円でなく、円周の一部が突出している。回転子の円周の一部のエアギャップの小さい部分が磁極になっており、磁極以外の他の部分はエアギャップが大きいので磁極とはならない。このような形状を突極と呼ぶ。突極構造では回転子の位置により回転子と固定子の間の磁気抵抗が異なる。回転子位置により磁気抵抗が異なることを突極性があるという。

一方、図10 (b) に示すのは円筒形回転子である。回転子は円筒形の鉄心である。円筒状の鉄心内部のスロットに巻線が巻いてあると考える。このような形状の回転子は回転子の位置により N、S の磁束は変化するが、固定子との間のエアギャップは一様で磁気抵抗はどの方向でも等しい。

突極形の場合、電機子反作用リアクタンス x_s を磁気抵抗の小さい界磁起磁力方向の x_d と、それに直交する方向の x_q の二つの成分に分解して考える。このとき、出力は次のようになる。

$$P_o = 3 \frac{V \cdot E_0}{x_d} \sin \delta + \frac{3}{2} V^2 \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta \quad (6)$$

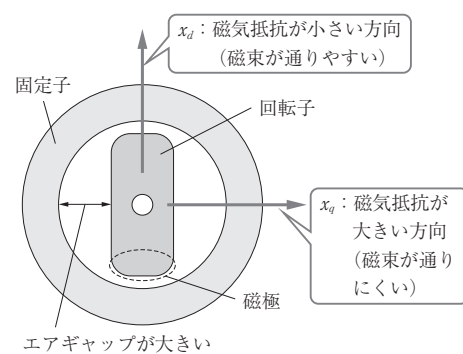
この式の右辺第1項は同期出力とよばれる。第2項は突極による出力である。この出力はマクスウェル応力によるリラクタンストルクである。突極形状を採用することにより、リラクタンストルクが発生し、出力が増加する。

ここで、

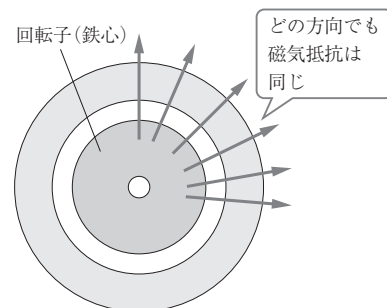
$$x_s = x_d = x_q \quad (7)$$

とすれば、式(6)の第2項はゼロになり、式(3)と同一になる。つまり、突極性のない円筒形回転子の場合の出力である。このように、円筒形機は突極機の特種な場合として扱うこともできる。

突極によるリラクタンストルクのみを利用する同期電動機はリラクタンスモータと呼ばれる。リラクタンスモータの回転子は巻線がなく、突極性のある鉄心のみで構成されている。なお、近年は、SRモータ (第10回に述べる) と区別するため、シンクロナスリラクタンスモータと呼ばれることもある。



(a) 突極形回転子



(b) 円筒形回転子

図10 突極形と円筒形

7 永久磁石同期電動機

永久磁石同期電動機は界磁を永久磁石により構成した同期電動機である。回転界磁形であり、回転子に永久磁石がある。永久磁石同期電動機の原理を図11に示す。回転子(界磁)の磁極の位置に対応して固定子(電機子)の電流による回転磁界を回転させる。界磁は回転磁界とある角度 ϕ をなして、回転磁界に吸引されて回転する。 ϕ により電動機特性が変わるので、 ϕ を一定あるいは望

みの値に調節する必要がある。そのため、永久磁石同期電動機は、界磁の磁極位置により電機子電流の回転磁界が制御できるインバータが必要である。インバータは、回転子の磁極位置の信号に応じて電機子電流の位相を制御する。このように永久磁石同期電動機は、インバータを含めたモータドライブシステムとして考える必要がある。

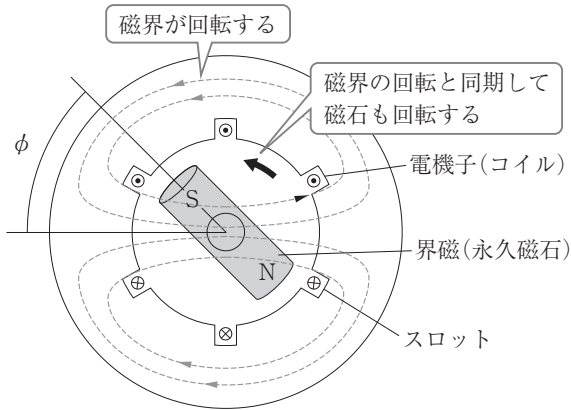


図11 永久磁石同期電動機の原理

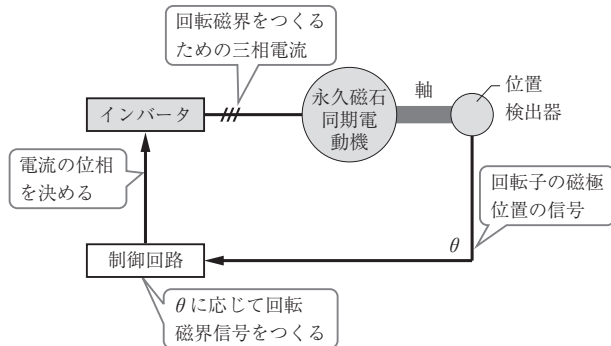


図12 永久磁石同期電動機のドライブシステム

永久磁石同期電動機は、回転子の永久磁石の配置と構造によりSPM（表面磁石型）¹とIPM（埋め込み磁石型）²に分類できる。図13 (a) に示すように、SPMは回転子鉄心の表面に永久磁石が装着されている。したがって、SPMは円筒形同期機として考えればよい。

一方、図13 (b) に示すIPMは、鉄心の内部に永久磁石が埋め込まれている。永久磁石は透磁率が低いので、図 (b) でd軸と示した方向は磁束

が通りにくい。すなわち、この方向のインダクタンス L_d は小さい。q軸と示した方向は鉄心だけなので透磁率が高く磁束が通りやすい。すなわちインダクタンス L_q は大きい。このように回転子の位置により磁気抵抗が異なる。これは突極性があることになる。IPMの永久磁石の配置はかなり自由に配置できる。IPMは同一の永久磁石を使ったとしても永久磁石の形状や配置により突極性が変化する。

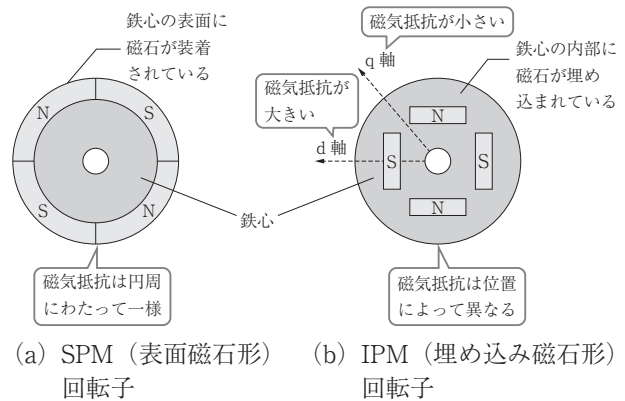


図13 永久磁石同期電動機の回転子

永久磁石同期電動機はIPMとSPMに大別されるが、それぞれの発生トルクが異なる。SPMは、円筒形回転子であり、インダクタンスは回転子の全周方向で一様である。したがって、発生トルクは、電機子コイルに鎖交する永久磁石の磁束数のみで決まる。つまり、電機子電流と界磁磁極の位置関係により鎖交磁束が変化するのでトルクも変化することになる。永久磁石により発生するトルクをマグネットトルクとよぶ。マグネットトルクは電機子電流と界磁がなす角 β がゼロのとき最大となる。これがSPMの発生トルクである。

一方、IPMは突極性があるので、突極性によるリラクタンストルクが発生する。これにマグネットトルクが加わるので、発生トルクは図14で示す合成トルクとなる。

電機子電流 I_q と界磁がなす角を β としたとき、永久磁石同期電動機のトルクは次のように表される。

¹ Surface Permanent Magnet

² Interior Permanent Magnet

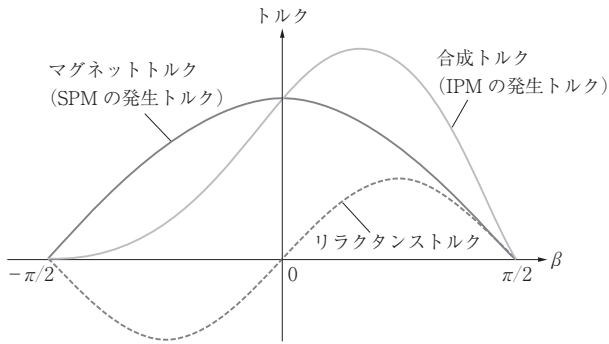


図14 IPMの発生トルク

$$T = \frac{P}{2} \left\{ \Psi I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad (8)$$

ここで、 L_d はd軸方向のインダクタンス、 L_q はq軸方向のインダクタンスである。永久磁石同期電動機の場合、インバータを使用するので周波数が一定でないため、リアクタンスではなく、インダクタンスにより表示する。SPMの場合、インダクタンスが一様な円筒形であり、 $L_d = L_q$ なので、第2項はゼロとなる。IPMの場合は、第1項と第2項のいずれのトルクも発生する。そのため、IPMは出力が増加し、高効率となる。また、低回転でも効率低下が少ないという特徴がある。

8 おわりに

同期電動機は誘導電動機より効率、力率が高いため、特に大型機で使われてきた。近年では、インバータ駆動を前提とした永久磁石同期電動機が家電、電気自動車をはじめ多くの用途で広く使われるようになってきた。そのため、同期電動機という名称は永久磁石同期電動機をさし、あえて巻線界磁型同期電動機と呼ぶ場合すらある。永久磁石同期電動機がクレーン用途にどの程度広まるかは、まだわからないが、今後の電動機の主流となることは間違いない。

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 (2023年4月号)
- 8 同期電動機 (本号)
- 9 電動機の絶縁
- 10 電動機技術の動向