

報告：「寺子屋 BM 塾」 2014 年後期講座

寺子屋 BM 塾 塾長
元・日立金属(株)
徳永 雅亮

第 16 期 BM 初心者講座：

「磁気回路を知りその応用製品を理解しよう！」

磁気回路を用いた機器や部品を基礎的に理解するために、①「磁気回路の基礎」、②「インダクタ・リアクトルの基礎」、③「モータの基礎」の 3 テーマを取り上げた。

第 1 講

2014 年 9 月 26 日（金）@東陽テクニカ

講義：各論「磁気回路の基礎」

講師：福島 貫（福島研究所）



概要：磁力応用製品を設計する際に必要な、磁路設計および電磁石の吸引力の簡易計算についてやさしく説明する。

受講生数：51 名

記事：磁気回路は電気回路と同様に扱うことが可能で、その解析にオームの法則やキルヒホッフの法則を使うことが可能である。先生が強調されたのは、①強磁性体と非磁性体の透磁率の比が 10^3 程度で、電気回路における導体と絶縁体の導電率の比 10^{20} に比較してはるかに小さいこと、②強磁性体が磁気飽和現象を示し、磁束密度によって磁気抵抗が変化することの 2 点である。

上記の差によって、磁気回路を電気回路に置き換える場合、①漏洩磁束と②磁束密度によって磁気抵抗が変化することを考慮する必要が発生する。漏洩磁束は「假定磁路法」によって対応する。漏洩磁束の通路を 5 つの形状に分けて計算する。強磁性体部分の磁束密度が計算前には不明であるために、最初の計算では強磁性体の透磁率を 10^3 として強磁性体部分の磁気抵抗を算出して、計算を開始する。計算で得られた磁束密度を用いて強磁性体各部分の磁気抵抗

を求め、得られた新しい磁気抵抗を用いて再計算を行う。

再計算を繰り返すことによって計算を収束させる必要があるが、計算結果は振動する。これを回避するために、新しい磁気抵抗を定義する際に補正係数を用いて収束させるという手段を用いている。補正係数の物理的な意味は不明であるが、0.2 程度とし 20 回以上の計算を行うと実用上問題のない計算が可能となる。

鉄心部の初磁化曲線を用いて透磁率を計算し、磁束密度を変数とする透磁率の配列変数を作成して、計算に用いている。起磁力 10^4 A を越える場合の磁束密度は近似式を用いている。主極を有する円筒状の電磁石駆動の吸着磁石の計算では 30 元の連立方程式を解き、補正係数を 0.2 とし、20 回以上の再計算で解を得ている。

電気回路と磁気回路の本質的な差を理解し、漏洩磁束を評価する必然性を理解することができたが、計算手法は電流による起磁力に主体が置かれていた。永久磁石による起磁力の場合も論理的には電流による起磁力と同様に扱えるはずであるが、もう少し簡略化した手法も可能ではないかという感想を持った。先生の手法はオーソドックスではあるが、計算手法における補正係数の意味が理解できず、消化不良の部分が残った。

第 2 講

2014 年 10 月 24 日（金）@東陽テクニカ

講義：各論「インダクタ・リアクトルの基礎」

講師：山口 正洋（東北大学）



概要：コイルやトランス等の磁心の原理および DC-DC コンバータなどの回路技術をやさしく説明する。

受講生数：49 名

記事：コイルという構造を持つ受動素子もその機能によって、インダクタ（インダクタンス L という機能を有するもの）やリアクトル（リアクタンス / 交流抵抗という機能を有するもの）があり、さらにチョークコイルはコンデンサと共に用いられるローパスフィルタ用インダクタである。コイルには空心のものとコアを用いたものがあり、コアの材質も多岐にわたる。

最初に磁気回路と電気回路の比較を行い、電気回路の導電率 (σ) と磁気回路の透磁率 (μ) が対応することを説明された。山口先生は現在ワンチップ電源の研究をされており、最新の動向を最後に説明して頂いた。

インダクタに正弦波電流が流れると波形は変わらないが、電流は位相が 90° 遅れる。インピーダンス ωL を持つため周波数 (ω) が高くなると波形振幅は減少する。方形波電圧を加えた場合の電流波形は時間とともに増大する積分波形になる。電流波形の傾斜は V/L になる。整流回路においてチョークコイルはコンデンサと共に用いられ、LC ローパスフィルタを構成する。スイッチング電源では Diode とローパスフィルタによるチョッパー型コンバータが構成される。コイルにはインダクタンス (L) と同時に寄生成分として、直列抵抗分や並列容量分が含まれる。従って、コイルのインピーダンスの周波数依存性を測定すると、自己共振周波数までは ωL に依存し、インダクタとして機能する。自己共振周波数を超えるとコンデンサの領域になる。コイルの Q 値は基本的に寄生成分としての直列抵抗分や並列容量分を小さくすることによって、大きくすることができる。

トランスもコイル部品の 1 つであり、変圧器、変流器およびインピーダンス変換に用いられる。パルストランスは磁性体に Mn-Zn フェライトを用い、伝送帯域を広げ、小型化が計られている。

磁心（磁性体コア）はコイルに挿入し、インダクタンスを増加させる。インダクタンスが実効透磁率に比例するからである。磁性体に設けられるギャップは透磁率を下げるが、B-H 曲線の勾配をなだらかにし、磁気飽和しにくくする。ギャップによる磁気漏洩はノイズの原因になるので、薄い銅版によるシールドで対策する。コアの種類はフェライト、パーマロイ、鉄系アモルファス、センダスト、電磁鋼板と種々の透磁率と飽和磁束密度を持つ材質から選択される。

DC-DC コンバータは非絶縁型と絶縁型に分けられる。非絶縁型はバックコンバータとも呼ばれ、パワー MOS-FET の ON、OFF の時間を変えて出力電圧を制御する。インダクタはセンダストを用いたものが知られ、周波数が上昇すると小型化が可能となる。MHz クラスのものでは効率が 93% 程度まで向上する。周波数が高い場合にはワンチップ電源化が可能となる。絶縁型は

フォワードコンバータと呼ばれる。用いるコイルはトランスであり、1次側と2次側は絶縁されている。コンバータの平滑回路に用いられるチョークコイルにも励磁電流は流れている。用いられるトランスには巻線抵抗、漏れインダクタンス、ストレ容量や等価抵抗があり、トランスの高効率化を妨げている。

最後に PwrSoc (Power Supply on Chip)2014 の話題を伺った。PwrSoc は IEEE Power Electronics Society による隔年開催のワンチップ電源に関する学界、産業界を横断し、行政を包含する会議である。Intel や Qualcomm が CPU ビジネスをリードするためにシステマ的な検討を行っている。山口先生の発表は Fe-Si-B-C 超急冷フレークを磁心とした SiP(System in a Package) のための DC-DC コンバータ用インダクタに関するものである。インダクタは 3x1x1(mm) 寸法で、0.5 μmH の特性を有する。本分野においてもパーマロイ、Mn-Zn フェライト、Ni-Zn フェライト、Co-Ni-Fe、グラニューラーフイルム等多くの磁性材料が期待されているとのことである。

山口先生の講義は歯切れが良く、聴講者に違和感なく浸透したのではないだろうか？多様なコイルの使い方や理解するには電気回路の知識が重要であることも理解できた。

第3講

2014年11月21日(金) @東陽テクニカ

講義：各論「モータの基礎」

講師：松井 信行 (中部大学)



概要：用途指向型モータについて「学術的」ではなく、「利用者サイド」が知りたいところと言及するという観点で説明する。

受講生数：42名

記事：まず、最初に古典的モータは汎用モータとして扱われてきたのに対し、近代モータはパワエレクトロニクス制御と一体化し、磁気現象、回路技術および材料技術を含めた総合システム製品であることを教わった。次に、モータの種類と歴史的背景をレビューした。巻線界磁直流モータが1800年代初頭に発案され、次いでスイッチトリラクタンスモ

ータ、巻線界磁同期モータ、シンクロナスリラクタンスモータ、誘導モータ等が発案され、1900年始めには直流モータ、同期モータ、誘導モータが市場に製品として現れていることがわかる。①永久磁石モータは磁気作用がノンリニアで解析的に解けない、②いい磁性材料がない、③制御技術がないとの理由で埋込磁石同期モータが世に出なかった経緯がある。

直流モータ(DCM)の駆動原理はモータ学習を始める際の不可避のテーマである。界磁回路、電機子回路および整流子(ブラシ)から構成され、界磁回路の発生する磁束と電機子に流れる電流の相互作用によってトルクが発生する。電機子が1極の場合、コイルの電流が反転するπ/2においてトルクのデッドポイントが発生する。デッドポイントを回避するためには整流子を含めた電機子の多極化が必要になる。DCMにおいてもモータ速度に比例した逆起電力の発生を考慮する必要がある。

DCMの速度変動率は電機子抵抗、電機子電流および電機子電圧の関数であるが、速度変動率を敢えて大きくし、センサ能力を持つ応用としてトルクリミッタがある。最大効率動作点は回転子電流(Ia)が[(電機子動力+鉄損+銅損)/(電機子抵抗)]^{1/2}になる1点に現れる。

ブラシ付きDCMの問題点として①給電が直流、②直流の機械的スイッチを行うために、ブラシの機械的磨耗(火花やブラシ粉末ごみの発生)が挙げられる。交流モータの代表格は誘導モータである。

誘導モータは固定子の回転磁界発生から勉強する。分布巻3相コイルによる3相巻線による回転磁界をまず理解しなければならない。

3相巻線を3相交流で励磁すると、合成磁束の最大値は各相磁界の1.5倍の大きさで、各相磁界と同じ角速度で回転する。誘導モータの回転子がかご型導体(コイル)である。以下のシナリオで誘導モータは回転する。

① 停止している回転子コイルを固定子巻線

から発生する磁力線が切る。

- ② 閉じた回転子コイルに誘導電流が流れる。
- ③ 回転子に発生した誘導電流と回転磁界間にフレミングの左手則によるトルクが発生する。
- ④ 閉じた回転子コイルは回転し始める。
- ⑤ 同期速度になると回転子コイルの電流はゼロになり、トルクがゼロになる。
- ⑥ この結果回転速度が低下し、一定のすべりのある状態で定常回転する。
- ⑦ 定常状態においては回転子コイルには電流が流れ、トルクが発生している。

松井先生のご講義は学生さんの理解を促すような工夫がされており、筆者は初めて誘導モータの回転原理を厳密に理解することができた。塾生からの「丁寧な講義内容が大変理解し易い。」との意見と熱い希望もあり、2015年度BM塾に再度登壇をお願いする予定である。

2015年前期講座予定

第17期は第16期に引続き、「磁気回路を知りその応用製品を理解しよう」と題して、磁気回路とその応用製品である「モータ」と「永久磁石のセンサー応用」について基礎を中心にご講義頂く。特に松井先生は合わせて3回の講義となる予定であるが、期待が大きい。

第1講

2015年5月22日(金) @東陽テクニカ

講義：各論「モータの基礎 II」

講師：松井 信行 (中部大)

第2講

2015年6月26日(金) @東陽テクニカ

講義：各論「永久磁石のセンサー応用の基礎」

講師：石山 和志 (東北大)

第3講

2015年7月24日 @東陽テクニカ

講義：各論「モータの基礎 III」

講師：松井 信行 (中部大)

授業風景

