

## 第293, 294回 群馬大学アナログ集積回路研究会 公開講演会報告

君子の交わりは淡きこと水の如し

### スイッチング電源のためのインダクタと変圧器の基礎

講師： 松田順一氏（群馬大学）

日時： 2016年01月08日（金） 15:00~17:00

場所： 群馬大学 共同研究イノベーションセンター3F 研修室

1) 磁気学の基礎

2) 磁気回路

- ・ 磁気抵抗、磁気回路のキルヒホッフの法則、  
エア・ギャップがあるインダクタの磁気回路

3) 変圧器のモデル

- ・ 理想変圧器、磁化インダクタンスを考慮、漏れインダクタンスを考慮

4) 磁気デバイスの損失

- ・ コア損失、低周波銅損

5) 巻き線の渦電流

- ・ 表皮効果 ・ 近接効果（変圧器内の近接効果解析、近接効果低減策、  
PWM高調波起因の近接効果による損失）

6) 磁気デバイスの適用

### スイッチング電源のためのインダクタと変圧器の設計

講師： 松田順一氏（群馬大学）

日時： 2016年01月14日（木） 15:00~17:00

場所： 群馬大学 共同研究イノベーションセンター3F 研修室

- ・ フィルタ・インダクタの設計
- ・ フィルタ・インダクタのモデル化、設計要因、設計手順
- ・ 多数巻き線磁気デバイス（変圧器、結合インダクタ）の設計
- ・ 各巻き線に対するコアウインドウ面積の割当
- ・ 結合インダクタの設計要因と設計手順（銅損考慮）
- ・ 例1：2出力フォワード・コンバータの結合インダクタ設計
- ・ 例2：連続モード・フライバック・コンバータの変圧器設計
- ・ 変圧器の設計
- ・ 変圧器の設計要因と設計手順（銅損とコア損失考慮）
- ・ 例3：単一出力絶縁型Cukコンバータの変圧器設計
- ・ 例4：多出力フルブリッジ降圧コンバータの変圧器設計
- ・ ACインダクタの設計・ACインダクタの設計要因と設計手順概要



司会進行は伊藤和男先生にお願いした。松田先生とは長い付き合い。





# ファラデーの法則とレンツの法則

面積  $A_c$  内の全磁束  $\Rightarrow \Phi(t)$

誘起電圧  $v(t)$

誘起電流  $i(t)$

短絡ループ

磁束  $\Phi(t)$

誘起磁束  $\Phi'(t)$

ファラデーの法則

$$v(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

( $\Phi(t)$ と $v(t)$ の極性  $\Rightarrow$ フレミングの右手の法則)

均一磁束の場合

$$v(t) = A \frac{dB(t)}{dt}$$

レンツの法則

この電流を流す。磁束変化に反対の磁束変化を起す。



- 講演資料

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~kobaweb/lecture/2016-1-8matsuda.pdf>

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~kobaweb/lecture/2016-1-14matsuda.pdf>

- インダクタの設計には磁気学の知識が必須。  
が、それだけではインダクタは設計できない。

- 「回路での物理はマックスウエルの方程式である。しかし どんな部品をどのように配置、接続して 目的を達成するかは マックスウエルの方程式は教えてくれない。そこに目的と構造を関係付ける工学の活躍の場が広がっている。大学では数学と物理をしっかり教えておけばよい という意見もあるがとんでもない。」(東大名誉教授 北森俊行先生)

- 正規の大学の講義では電磁気学で磁気は勉強の機会がある。  
がそれを用いた工学設計の話はほとんどない。  
今回の講演会はそれをカバーしている。

- スイッチング電源回路用インダクタ設計 ⇒ 「見えるアナログ設計」  
理想条件における理論解析 いくつかの理論式  
寄生効果を考慮したシミュレーションによる検証  
実物を設計・実現・測定評価  
「現象に理屈あり」

- 産業界からの参加者の感想

「表皮効果、近接効果では 弊社大型大電流スイッチングトランスで苦労しているところですので 大変興味深い内容でした。特に銅損の各種グラフですが (中略) 電流スイッチングトランスでは どこかに、最大効率が有るのだらうと、試行錯誤をしておりましただけに衝撃的でした。リッツ線のメーカーHPの紹介も 松田先生メーカーご出身ならではのお気遣いと感激いたしました。」

「詳細に検討された内容のご講演であり、実際のトランス設計にどのように適用して行くかが難しい所だと認識しております。小生はトランス設計ツールを使用する方法でトランス設計やチョーク設計は行っていましたが、ツールのマニュアルには松田先生のご講演内容が記述されており、この様な事に考慮が必要との安易な認識で良く理解しないでツールを使用しておりました。再認識させられました。」

- 「自然は急激な変化を嫌う」「安定を好む」

### レンツの法則

「誘導電流は、その電流によって生じる磁界が、  
外力から加えられた磁界の変化を妨げるような向きに流れる」

インダクタを流れる電流 ⇒ 急には変化できない。

### 作用・反作用の法則

⇒ 変化を打ち消す作用=変化が起きた時、  
変化前の状態を持続しようとする作用

慣性力=変化を打ち消す力

走っていて急に止まろうとしても、慣性力(変化を打ち消す作用)が働くため  
急には止まれない

### 安定平衡状態



- 自然界は変化を打ち消すように動く。社会の流れもそうかもしれない。

フランス 王政 ⇒ フランス革命・共和制 ⇒ ナポレオンの出現  
⇒ 王政復古

しかし、自由、平等、友愛の精神が普及し、元には戻れない

- 電気と磁気は別々のものと考えられていた。  
が やがて相互に関係しあうことがわかる。  
マイケル・ファラデーの電磁場理論をもとに 1864 年  
ジェームズ・クラーク・マクスウェルはマクスウェルの方程式を導出し  
古典電磁気学を確立。

微分積分学の基本定理 (ニュートン、ライプニッツ)

「微分と積分が互いに逆の操作・演算である」

関数を積分し微分するともとの関数になる。この定理が発見されるまでは、  
微分法と積分法は何の関連性も無い全く別の計算だと考えられていた。

計測工学と制御工学は表裏一体

カルマン教授により、カルマンフィルタ（観測・計測の問題）と  
最適レギュレータ（制御の問題）が数学的に双対であることが示される。

- 講演でも引用されていた非常に良い電源回路・インダクタ設計の教科書

[1] R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics

Second Edition, Springer Science + Business Media, 2001.

[2] 落合政司「スイッチング電源の原理と設計」オーム社 (2015)

(写真提供 石川信宣 文責 小林春夫)