

### 第3回講義「電気回路とラプラス変換(過渡解析)」

電気回路の基礎から応用までを体系的に学び、実践的な回路設計や解析のスキルを習得することを目的とする。

まず、キルヒホッフの法則やオームの法則を用いた直流・交流回路の解析方法を学び、重ね合わせの理やテブナン・ノートン変換を活用して回路を簡略化する技術を習得する。次に、ラプラス変換を用いた過渡解析を中心に、初期値や最終値を考慮した過渡応答の計算方法を学び、フィルタ特性や周波数特性の解析を通じて、回路の動作を深く理解する。さらに、従属電源の仕組みや役割、MOSFET の小信号モデルを用いた電流・電圧の関係や回路設計の基本を学び、ソース接地、ドレイン接地、ゲート接地回路の特性と用途についても理解を深めます。これらの知識を基に、実際の回路における過渡応答や周波数特性を計算し、フィルタ回路の設計や特性解析を行うことで、電気回路の応用力を養う。

#### 1. 定常状態の電気回路解析

##### 1.1 直流回路解析

キルヒホッフの法則、重ね合わせの理、テブナンの定理とノートンの定理

##### 1.2 交流回路解析

交流電源のフェーザ表記、コンデンサのインピーダンス、電圧と電流の位相差  
コイルのインピーダンス、コイルとコンデンサの共振、電力損失、周波数応答

##### 1.3 フーリエ級数

フーリエ級数展開、周期波形の実効値、定常状態の電気回路解析のまとめ

#### 2. 電気回路の過渡解析

##### 2.1 線形回路の過渡解析

回路における複素角周波数応答、入力信号のラプラス変換

##### 2.2 微分と積分のラプラス変換

##### 2.3 回路方程式のラプラス変換

一次/二次伝達関数の過渡応答、無駄時間遅れのラプラス変換  
ラプラス変換のまとめ、部分分数展開時の係数の求め方

##### 2.4 過渡応答の初期値と最終値

##### 2.5 初期値を考慮した過渡解析

初期値の取り扱い、初期値のある回路の過渡解析

##### 2.6 フィルタ回路

伝達関数  $G(j\omega)$  の周波数特性、二次の低域通過フィルタ、高次の実用的なフィルタ  
フィルタ回路実装時の注意

##### 2.7 電気回路の過渡解析のまとめ

#### 3. 電子回路の基礎

##### 3.1 MOSFET の小信号等価回路

##### 3.2 ソース接地・ドレイン接地・ゲート接地回路

##### 3.3 抵抗付加 MOSFET の小信号特性

##### 3.4 出力容量を考慮した回路の利得

### 第4回講義「スイッチング回路の要、半導体パワー素子」

半導体パワーデバイスの基礎から応用までを網羅的に解説する。

まず、半導体の物性や基本構造である pn 接合、バイポーラ素子、MOSFET の動作原理を理解することを目指す。次に、縦型パワーMOS、IGBT、化合物半導体パワー素子などのパワーデバイスについて、その特性や動作解析を詳しく説明した後、スイッチング速度や寄生容量、寄生インダクタンスがデバイス性能に与える影響、電力損失やチップ温度についても触れる。また、WBG 半導体デバイスとして SiC や GaN の特性や構造、製造技術の現状を紹介し、これらの材料が持つ高速性、高耐圧性、高温動作の利点を解説する。さらに、パワーモジュールの設計や熱伝導率、過渡熱解析、定常熱解析、熱抵抗の評価方法についても取り上げることで、半導体パワーデバイスの設計・運用に必要な知識を体系的に学ぶ。

#### 1. 半導体物性

##### 1.1 シリコン結晶中の電子および正孔濃度

##### 1.2 半導体の電気伝導

- 1.3 衝突電離(インパクトイオン化)現象
- 1.4 電子と正孔の再結合
- 2. パワー半導体素子の基本デバイス構造
  - 2.1 ダイオード
    - pn 接合の空乏層幅と静電容量、pn 接合ダイオードの耐圧、ダイオードの電圧・電流特性、現実の pn 接合ダイオード特性、ダイオードの種類
  - 2.2 ダイオードの用途
    - 整流回路、pn 接合ダイオードの逆方向回復特性、PiN ダイオード
  - 2.3 電流を制御する基本素子構造
    - バイポーラ素子、MOS 型デバイス
- 3. パワー半導体デバイス
  - 3.1 縦型パワーMOS 素子
    - 縦型パワーMOS 素子、スーパージャンクション縦型パワーMOS 素子
    - トレンチ構造縦型パワーMOS 素子、アバランシェ降伏
  - 3.2 IGBT
    - IGBT のラッチアップ、IGBT と縦型パワーMOS 素子の使い分け
- 4. 化合物パワー半導体デバイス
  - 4.1 SiC デバイス
    - SiC ショットキー障壁ダイオードの用途、SiC ショットキー障壁ダイオードの構造
    - SiC 縦型パワーMOS 素子
  - 4.2 GaN デバイス
    - GaN デバイス、GaN デバイスの特性劣化、GaN デバイスの逆方向電流特性
- 5. 回路中のパワーデバイスの過渡応答
  - 5.1 縦型パワーMOS 素子の端子間容量
  - 5.2 ゲート容量の回路特性への影響
  - 5.3 縦型パワーMOS 素子のターンオン・ターンオフ過程
    - ゲート容量と配線インダクタンスの共振(リンギング)、ゲート駆動法の工夫
  - 5.4 GaN デバイスの課題
  - 5.5 ダブルパルス試験
    - ターンオフ過程、ターンオン過程
- 6. パワーデバイスの熱解析
  - 6.1 熱伝導の物理
  - 6.2 発熱素子温度の定常解
  - 6.3 発熱素子温度の過渡解
    - 熱インピーダンス、熱インピーダンスのパラメータ抽出法
    - パルス発熱時の最大上昇温度、繰り返し発熱によるチップ温度の上昇

## 第5回講義「ミクロな目で見る誘電体と磁性体」

誘電体と磁性体のミクロな性質を理解し、それらが電子部品に与える影響を探ることを目的としている。具体的には、コンデンサやコイル・トランスの構造、動作原理、材料特性について詳しく解説する。コンデンサでは、電解コンデンサ、フィルムコンデンサ、積層セラミックコンデンサの種類や用途、実装時の注意点、誘電体の分極特性、誘電損失、複素比誘電率などを取り上げている。また、コイル・トランスに関しては、磁性体材料の物性、蓄積エネルギーと損失、磁気回路の考え方、漏洩インダクタンスの影響、エアギャップの役割などを詳述している。さらに、練習問題を通じて、実際の設計や計算方法を学び、電子部品の性能や信頼性を向上させるための知識を深めることを目指す。

- 1. コンデンサ
  - 1.1 誘電体の物性
    - 原子レベルで見た分極の種類、誘電体の分極と複素誘電率
  - 1.2 コンデンサ
    - コンデンサの周波数特性、コンデンサの用途、コンデンサの種類

- 1.3 電解コンデンサ  
湿式アルミ電解コンデンサの電気特性、湿式アルミ電解コンデンサの寿命  
導電性高分子電解コンデンサ、電解コンデンサの漏れ電流と誘電吸収
- 1.4 フィルムコンデンサ  
フィルムコンデンサの種類と材料、各種フィルムコンデンサの特徴  
誘電吸収と絶縁抵抗、自己修復
- 1.5 セラミックコンデンサ  
常誘電体セラミックコンデンサ(クラス1)、強誘電体セラミックコンデンサ  
強誘電体セラミックコンデンサの特性、セラミックコンデンサのまとめ
- 1.6 異種コンデンサの並列接続による反共振現象
- 2. コイル
  - 2.1 磁性の起源  
軟磁性体、フェライトの構造とその特性、電源回路における磁性体の役割
  - 2.2 コイルの蓄積エネルギーと電力損失  
蓄積エネルギー、コイルの電力損失
  - 2.3 現実のコイルにおける注意事項  
自己共振周波数、インダクタンスの電流依存性
- 3. インダクタと磁気回路
  - 3.1 コイルの磁気エネルギー  
磁性体コイル、エアギャップのある磁性体コアのコイル
  - 3.2 市販コイルの構造
- 4. トランス
  - 4.1 トランスの等価回路モデル
  - 4.2 トランスの作製  
材料(磁性体コア、被膜銅線)の選択、銅線の巻き方、静電遮蔽

## 第7回講義「学び直しの制御理論(古典制御)」

制御理論の基礎から応用までを体系的に学び直すことを目的としている。

古典制御理論を中心に、ラプラス変換や周波数領域解析を用いた伝達関数の理解、過渡応答、負帰還、根軌跡法、PID 制御などの基本的な概念と手法を解説する。

特に、フィードバック制御の安定性判定法としてラウスの安定判別法やナイキストの安定判別法を取り上げ、システムの安定性を保証するための手法を詳しく説明する。また、PID 制御のパラメータ調整法として Ziegler-Nichols 法を紹介し、実用的な制御器設計の方法を学ぶ。これらの内容を通じて、制御理論の基礎を理解し、実際のシステム設計や解析に応用できるスキルを習得することを目指す。

- 1. 古典制御
  - 1.1 システムの伝達関数
  - 1.2 極の最適配置
  - 1.3 支配極
- 2. ボード線図
  - 2.1 交流入力信号に対する過渡応答
  - 2.2 伝達関数(周波数特性)のベクトル軌跡と極座標表記
  - 2.3 ボード線図  
伝達関数の周波数応答、零を含む伝達関数の周波数応答
- 3. 負帰還(フィードバック)
  - 3.1 負帰還システムの伝達関数
  - 3.2 ブロック線図の合成法
  - 3.3 フィードバック制御
  - 3.4 システムの動作安定性の判別法  
ラウスの安定判別法、ナイキストの安定判別法
  - 3.5 ループ補償

- 3.6 指令値追従性
- 3.7 コンバータに適した開ループ伝達関数
- 3.8 外乱・ノイズの抑制
  - 外乱・ノイズの影響、二自由度制御系による指令値への追従性の改善
- 4. 根軌跡法
  - 4.1 根軌跡の描画法
  - 4.2 根軌跡のイメージ
  - 4.3 根軌跡法の活用例
- 5. PID 制御
  - 5.1 PID 制御の概要
  - 5.2 パラメータ調整法
  - 5.3 PID 制御器の周波数特性

## 第 8 回講義「電磁干渉(EMI)の正しい理解」

電磁気学の基礎をもとに、電磁妨害(EMI)や電磁両立性(EMC)についての理解を深めることを目的とする。

電磁界の近傍界と遠方界の特性を解説し、電気双極子や磁気双極子が作り出す電磁界の影響を考察する。特に、電流ループによる磁界の発生やインダクタンスの役割、配線間の相互作用によるクロストーク、電磁遮蔽の重要性について詳しく説明する。また、プリント基板設計における EMI 抑制のための具体的な方法として、幅広配線やリターン電流の近接配線、ホットループ面積の削減、バイパスコンデンサの配置などを紹介し、電源分配回路網(PDN)の設計や電源フィルタの役割、コモンモードおよびノーマルモード電流の低減方法について説明する。これらの知識を通じて、電磁妨害を抑制し、電子機器の性能向上と信頼性確保を目指す技術を学ぶ。

### 1. 電磁界の発生メカニズム

- 1.1 交流電磁界
  - 放射電磁界と近傍電磁界、波動インピーダンス、回路の電気双極子と磁気双極子
- 1.2 放射電磁波の伝搬

### 2. 近傍電磁界による電磁障害

- 2.1 配線のインダクタンス
  - 自己インダクタンス、相互インダクタンス
- 2.2 電磁障害(EMI)の低減法
  - プリント基板の活用、電流ループ面積の削減、ホットループ面積の削減
  - 入力コンデンサの対称配置による磁界の相殺
- 2.3 スイッチング素子のインダクタンス低減法
- 2.4 コモンモード電流による EMI
- 2.5 配線間のクロストーク
  - 配線間のクロストーク(ノイズ伝搬)、クロストーク(誘導伝搬)の低減法

### 3. 放射電磁界の遮へい

- 3.1 放射電磁波の金属表面での反射と透過
- 3.2 電磁波の金属中での減衰
- 3.3 金属板による近傍電磁界の遮へい効果
  - 電気双極子起因の近傍電磁界の遮へい、磁気双極子起因の近傍電磁界の遮へい

### 4. 伝導性ノイズの低減法

- 4.1 電源ラインフィルタ
  - チョッピング波形に含まれる高調波、電源ラインフィルタの構成
  - コモンモードノイズの透過率、ノーマルモードノイズの透過率
- 4.2 電源分配回路網
- 4.3 プリント基板レイアウトの基本
  - スイッチング電流経路の特定と GND 配線、コンバータのレイアウト
  - パワー段のレイアウト、制御 IC の配置、パワー GND とアナログ GND

## 5. 分布定数回路

### 5.1 特性インピーダンスと反射係数

### 5.2 伝送線路を伝わる電圧・電流の速度

### 5.3 伝送線路のインピーダンス

終端短絡時の入力インピーダンス、終端開放時の入力インピーダンス、定在波の発生

## 第9回講義「アナログ回路基礎とオペアンプの活用法」

アナログ回路の基礎から応用までを体系的に学ぶことを目的とする。具体的には、制御 IC のデータシートを読み解く力を養い、安定した電源の下で所望の伝達関数を実現するための素子構成を学ぶ。講義では、電源回路、オペアンプ、スイッチング電源におけるアナログ回路、微小信号の計測法など、アナログ回路の重要なトピックを網羅的に取り上げる。オペアンプの理想的な特性や負帰還の効用、位相補償回路の設計、MOSFET の小信号等価回路、カレントミラー回路や参照電圧源の作り方など、具体的な回路構造や動作原理について詳しく解説する。また、微小信号の計測における課題や解決策、計装アンプの設計、心電信の検出方法、さらにはデジタル回路設計の応用例としてインバータチェーンやデジタルアイソレータ、遅延セルなども紹介する。これらを通じて、アナログ回路の設計・解析能力を高めることを目指す。

### 1. オペアンプ

#### 1.1 オペアンプの概要

#### 1.2 オペアンプの電源回路

カレントミラー回路、PTAT 回路、参照電圧源回路、参照電流源回路

#### 1.3 オペアンプ内部の構成

差動増幅回路、利得段、出力段

#### 1.4 オペアンプの周波数特性

寄生容量の影響、二段構成 OTA の内部位相補償

### 2. 理想オペアンプを用いた回路

#### 2.1 反転増幅回路

#### 2.2 非反転増幅回路

#### 2.3 ユニティゲイン回路

#### 2.4 加算・減算回路

#### 2.5 積分回路

#### 2.6 微分回路

#### 2.7 TIA 回路

### 3. フィルタ回路の実現法

#### 3.1 オペアンプ 1 個を使用した二次伝達関数の生成法

#### 3.2 オペアンプ 3 個を使用した二次伝達関数の生成法

一次伝達関数の実現法、二次伝達関数の実現法

#### 3.3 バイカッドフィルタ

Tow-Thomas のバイカッド、状態変数型伝達関数

### 4. 現実のオペアンプ

#### 4.1 DC 利得の影響

反転増幅回路の利得、反転積分回路の利得

#### 4.2 オペアンプの帯域の影響

#### 4.3 オフセット電圧の影響

### 5. オペアンプ応用回路(センサ信号の計測)

#### 5.1 センサ信号の計測

電圧信号のセンシング、電流信号のセンシング

#### 5.2 計装アンプ

#### 5.3 外部位相補償

### 6. デジタル機能を生かした電子回路

#### 6.1 インバータ

- 6.2 インバータ・チェイン  
ディジタル・アイソレータ、PLL
- 6.3 コンパレータ  
増幅器型コンパレータ、正帰還型コンパレータ、ヒステリシス・コンパレータ  
UVLO 回路
- 6.4 LDO レギュレータ

## 第 10 回講義「コンバータの種類とその制御」

DC-DC コンバータの基本的な動作原理と制御方法について学ぶ。非絶縁型コンバータ(降圧、昇圧、極性反転)および絶縁型コンバータ(フライバック、フォワード)の回路構成や動作原理を理解し、それぞれの伝達関数を導出する。また、コンバータの動特性解析や安定動作のための準備として、大信号・小信号回路解析を行う。さらに、コンバータの制御方法として電圧モード制御、電流モード制御、リップル制御(ヒステリシス電圧制御、コンスタント・オン時間制御)について詳しく解説し、それぞれの利点と欠点を比較する。最後に、閉ループ特性を考慮したコンバータの設計や、出力インピーダンスの低減による安定性向上について学ぶ。これらを通じて、効率的で安定した電力変換を実現するための知識と技術を習得することを目指す。

### 1. コンバータの種類

- 1.1 非絶縁型コンバータ  
降圧コンバータ、昇圧コンバータ、極性反転コンバータ
- 1.2 絶縁型コンバータ  
フライバックコンバータ、フォワードコンバータ、絶縁型コンバータのまとめ

### 2. パワー段の伝達関数

- 2.1 PWM スイッチの小信号等価回路
- 2.2 連続伝導モード(CCM)におけるパワー段の伝達関数  
降圧コンバータ、昇圧コンバータ、各種コンバータの伝達関数
- 2.3 不連続伝導モード(DCM)の伝達関数  
DCM-PWM スイッチの小信号等価モデル、DCM の降圧コンバータの伝達関数  
各種 DCM 動作コンバータの伝達関数
- 2.4 絶縁型コンバータの伝達関数  
フライバックコンバータの伝達関数、フォワードコンバータの伝達関数

### 3. ループ補償回路

- 3.1 ループ補償回路
- 3.2 極・零対の導入による位相ブースト
- 3.3 ループ補償回路の設計手順
- 3.4 Type-2 のループ補償回路
- 3.5 Type-3 のループ補償回路

### 4. 電圧モード制御

- 4.1 電圧モード制御系の回路構成  
PWM の伝達関数、電圧モード制御の開ループ伝達関数、開ループ伝達関数
- 4.2 降圧コンバータの各種閉ループ伝達関数  
入出力間の伝達関数、出力インピーダンス

### 5. 電流モード制御

- 5.1 電流モード制御
- 5.2 開ループ伝達関数
- 5.3 電流モード制御システムの安定性  
コンバータの安定動作条件、電圧モード制御ループの周波数特性  
二重帰還による安定なシステム動作
- 5.4 電流モード制御の回路方式  
ピーク電流モード制御回路、平均電流モード制御回路

### 6. リップルベース制御

- 6.1 コンスタントオンタイム制御  
リップル検出回路、スイッチング周波数
- 6.2 ヒステリシス制御  
基本動作、スイッチング動作周波数、改良版ヒステリシス制御
- 6.3 リップルベース制御法のまとめ

## 第 11 回講義「現実のコンバータの課題と対策」

コンバータの設計や運用における課題とその対策について詳しく解説する。主に電力損失の要因を「スイッチング損失(Dynamic loss)」と「導通損失(Static loss)」に分類し、それぞれの詳細なメカニズムを説明する。また、コンバータ回路で発生する「リングング」現象を抑制するためのスナバ回路の設計とその効果についても触れる。さらに、電力損失を低減するための非絶縁型および絶縁型コンバータの設計手法、トランスに起因する問題(漏洩インダクタンスや磁気飽和)への対応策、入力フィルタの設計と安定性解析、そして高周波ノイズやEMI対策についても詳しく説明する。最後に、電流・電圧の計測方法や帰還回路の設計に関する技術的な詳細も含まれている。

### 1. スwitchング電源回路における電力損失

- 1.1 ダイナミック電力損失  
パワーMOS 素子のオンオフ動作特性、ドレイン電流/電圧変動時間  
パワーMOS 素子のダイナミック電力損失、ゲート駆動回路の電力損失  
ドレイン容量の充放電による電力損失、ダイオードの逆回復時の電力損失
- 1.2 定常(スタティック)電力損失  
パワーMOS 素子のオン抵抗損失、ダイオードの電力損失

### 2. スナバ回路

- 2.1 RC スナバ  
寄生素子パラメータの抽出、スナバの抵抗とキャパシタの適正值
- 2.2 充放電型 RCD スナバ
- 2.3 放電阻止型 RCD スナバ

### 3. 非絶縁型コンバータの電力損失の低減法

- 3.1 パワーMOS 素子の電力損失  
ターンオフ時の電力損失、ターンオン時の電力損失
- 3.2 同期整流方式  
デッドタイムの設定、SR パワーMOS 素子のダイナミック消費電力  
ブートストラップ回路、ハイサイドのパワーMOS 素子のターンオフ過程  
パワーMOS 素子のゲート抵抗、SR パワーMOS 素子の条件、逆方向電流の防止

### 4. 絶縁型コンバータ

- 4.1 フライバックコンバータの基本動作  
漏えいインダクタンスの影響、RCD クランプ、RCD クランプの電力消費  
ダイオードの RC スナバ、同期整流方式のフライバックコンバータ
- 4.2 フォワードコンバータ  
動作原理、コアリセットの方法

### 5. 入力フィルタ

- 5.1 入力フィルタ付きコンバータの伝達関数  
理想的なコンバータの入力インピーダンス、入力フィルタのインピーダンス
- 5.2 現実のコンバータの入力インピーダンス
- 5.3 ダンパ付き入力フィルタ

### 6. コンバータ特性に影響する部分回路

- 6.1 ポスト LC フィルタ
- 6.2 シャントレギュレータ TL431
- 6.3 フォトカプラ

## 第 12 回講義「コンバータの実例(Buck, Flyback)」



降圧(Buck)コンバータとフライバック(Flyback)コンバータの設計と応用について詳しく解説する。具体的には、Buck コンバータの設計準備として、インダクタンスやコンデンサ容量の見積もり、PCB レイアウトの基本、評価カード 1290A の回路分析、LTC3775 を用いた設計方法を紹介する。また、フライバックコンバータの評価ボードを基にした回路図作成や素子パラメータの導出、多出力フライバックコンバータの課題であるクロスレギュレーションの改善方法についても触れる。さらに、コンバータの応用例として、Li イオン電池を用いた LED ドライバーの設計や非反転 Buck-Boost コンバータの動作原理を説明し、効率的な電力変換技術の実践的な知識を提供する。

### 1. コンバータ設計の準備

Buck コンバータの設計例  
PCB レイアウトの基本  
フィードバックループ(Fast lane の活用)

### 2. Buck コンバータ評価ボードの分析

回路図と部品の配置  
使用素子とその特徴

### 3. 補助資料

Low drop-out 基準電圧

### 4. Flyback コンバータ評価ボードから学ぶ

評価ボードを参考に回路図を作成する  
素子パラメータの導出について

### 5. 多出力 Flyback コンバータ

### 6. コンバータの応用例

Li イオン電池用 LED ドライバー

## 第 13 回講座「力率補正回路と環境に優しい(LLC)」

力率補正回路(PFC)、ソフトスイッチング回路、超高速応答電源について詳しく解説する。

まず、PFC では電流と電圧の位相差をゼロにし、無効電力を抑制することで効率的な電力利用を目指す。PFC 回路には CrCM(臨界伝導モード)や CCM(連続伝導モード)などの方式があり、それぞれの特徴や課題について説明する。次に、ソフトスイッチング回路では、スイッチング損失を抑えるための技術として ZVS(ゼロ電圧スイッチング)や LLC 回路を紹介し、その動作原理や設計例を示す。最後に、超高速応答電源として、POL(Point of Load)や多相降圧コンバータ、TLVR(トランス・インダクタ電圧レギュレータ)の特性や設計の利点を解説する。これらの技術は、効率的な電力変換や高精度な電力供給を実現するために重要であり、特に大電力用途や高速応答が求められる場面での応用が期待されている。

### 1. 力率改善回路

#### 1.1 力率改善回路

力率の定義、力率改善回路の効用

#### 1.2 力率改善回路の構成

降圧コンバータ方式の PFC 回路、昇圧コンバータ方式の PFC 回路  
PFC 回路の制御帯域

#### 1.3 PFC 回路の動作

臨界導通モード(CrCM)、CCM(連続導通モード)-平均電流制御 PFC 回路  
CCM-ピーク電流制御 PFC 回路、CCM-PFC 回路の電力損失、PFC 回路実装時の追加部品

#### 1.4 インターリーブ方式の PFC 回路

#### 1.5 ブリッジレス PFC 回路

### 2. 共振ソフトスイッチ回路

#### 2.1 ソフトスイッチの種類

#### 2.2 共振スイッチ

##### 2.2.1 電流共振スイッチ

##### 2.2.2 電圧共振スイッチ

#### 2.3 共振スイッチのコンバータ回路応用

電流共振スイッチを用いた降圧コンバータ回路



電圧共振スイッチを用いた降圧コンバータ回路

2.4 電流共振スイッチと電圧共振スイッチの使い分け

2.5 共振スイッチを用いたコンバータの制御

電圧モード制御、電流モード制御

### 3. LLC 回路

3.1 LLC 回路を構成する要素回路

スイッチネットワーク、共振タンク、整流回路

3.2 LLC 回路の基本回路動作( $\omega_s = \omega_{r1}$ )

3.3 LLC 回路の回路動作( $\omega_s \neq \omega_{r1}$ )

基本動作ステージ、動作ステージと共振周波数

$\omega_s < \omega_{r1}$  における動作モード、 $\omega_s > \omega_{r1}$  における動作モード

3.4 基本波近似による動作解析

換算負荷抵抗、入出力伝達関数の計算、入出力伝達関数の回路パラメータ依存性

3.5 電力損失のおもな要因

パワーMOS 素子のスイッチング損失、循環電流による導通損失

3.6 LLC 回路の制御

3.7 同期整流方式の LLC 回路

### 4. 位相シフト・フルブリッジ回路

4.1 PSFB 回路の動作概要

PA レグの遷移期間、電流反転期間、電力転送期間、AP レグの遷移期間( $t_3 \sim t_4$ )

電流循環期間( $t_4 \sim t_5$ )

4.2 デューティ比損失

4.3 整流ダイオード(二次側)のサージ電圧

4.4 カレントダブラー方式

4.5 PSFB 回路のまとめ

PSFB 回路の課題、LLC 回路との比較

### 5. 車載充電器(OBC)

5.1 リチウムイオン電池: 構造と性能

5.2 リチウムイオン電池の特性

温度特性、電池の劣化、等価回路モデル

5.3 充電器

リチウムイオン電池の充電方法、充放電保護回路、セル電圧の均等化

5.4 電圧均等化回路の概要

スイッチトキャパシタ方式、フライングキャパシタ方式、極性反転コンバータ方式

5.5 OBC とその動作

充電専用 OBC、双方向 OBC

### 6. 高速電圧レギュレータ

6.1 多相レギュレータ

2 相レギュレータのリプル電流、多相レギュレータのリプル電流

6.2 結合型多相降圧レギュレータ

6.3 トランス・インダクタ電圧レギュレータ(TLVR)

TLVR の動作原理、補償インダクタ  $L_c$  の役割、TLVR の拡張性

### 7. 高速ゲート駆動回路

7.1 高速ゲート駆動回路の課題

7.2 電流源を用いたゲート駆動回路

電流源ゲート駆動回路 I、電流源ゲート駆動回路 II

7.3 LC 共振ゲート駆動回路

7.4 アクティブゲート駆動回路

開ループのアクティブゲート駆動回路、閉ループのアクティブゲート駆動回路

**第 14 回講義「デジタル制御(現代制御+GaN ゲート駆動)」**

デジタル制御の基礎から応用までを体系的に学ぶ。デジタル制御は、アナログ制御と異なり、デジタル信号処理を活用して高精度かつ柔軟な制御を実現する技術である。講義では、 $z$  変換やラプラス変換を用いた数値計算の基礎を学び、デジタル制御器の構造や動作原理、デジタル PWM や AD コンバータの仕組み、量子化誤差や遅延時間の影響について解説する。また、現代制御理論に基づく数値計算法を用いて、システムの状態空間表現や状態方程式の時間推移を計算する方法を学ぶ。さらに、スイッチング電源やモーター駆動におけるデジタル制御の応用例として、Predictive 電流制御や最速応答制御、ゲート駆動回路の設計についても取り上げる。これにより、デジタル制御の利点と課題を理解し、実際の応用に役立てる知識を習得することを目指す。

1.  $z$  変換の基礎
2. デジタル制御器(ハードウェア)
  - 2.1 デジタル制御とは
  - 2.2 AD コンバータ
  - 2.3 デジタル位相補償回路
  - 2.4 デジタル PWM
  - 2.5 デジタル制御の問題点
3. デジタル制御の効用
  - 3.1 Predictive 電流制御
  - 3.2 最速応答制御(Time Optimum Control)
  - 3.3 Digital assisted ゲート制御
4. 現代制御入門
  - 4.1 システムの状態空間表現
  - 4.2 状態方程式の自由応答(時間推移)
  - 4.3 入力を考慮した状態方程式の時間推移
5. 現代制御に基づく離散時間計算
  - 5.1 連続時間処理から離散時間計算へ
  - 5.2 スwitching電源の状態方程式(Buck コンバータ)

**第 15 回講義「インバータの種類とその動作原理」**

インバータの種類とその動作原理について詳しく解説する。インバータは電圧や周波数を自在に変換し、モータの回転数やトルクをきめ細かく制御する重要な役割を果たす。講義では、インバータの基本構造や動作原理、PWM 制御法、デッドタイム補正、インバータが引き起こすモータ故障の原因と対策、フィルタの役割、そして多値レベルインバータのトポロジーや利点・課題について説明する。また、インバータの課題として滑らかな回転、高効率駆動、高信頼性・ノイズ低減が挙げられ、それを実現するための技術的な工夫や設計方法を紹介する。さらに、インバータの出力電圧生成法や空間ベクトル PWM、多値インバータの動作原理についても触れる。これらの内容を通じて、インバータ技術の基礎から応用までを体系的に学ぶ。

1. チョッパ回路(ブリッジ)とその動作
  - 1.1 矩形波の形成法
  - 1.2 高調波とその低減法
2. 三相インバータ(6 ステップインバータ)
  - 2.1 相電位、中性点の表記法
  - 2.2 高調波の見積もり
3. PWM 制御法
  - 3.1 正弦波 PWM
  - 3.2 空間ベクトル PWM
4. インバータのデッドタイム補正
5. インバータ起因のモータ故障
  - 5.1 モータ巻線の絶縁破壊
  - 5.2 ベアリング損傷

- 6. フィルタ
- 7. インバータモジュール
  - 7.1 ゲート駆動回路
  - 7.2 過電流検出
- 8. 多値レベルインバータ
  - 8.1 多値レベルインバータのトポロジー
  - 8.2 PWM 多値レベル電位の生成法(変調法)

## 第 16 回講義「各種モータとその駆動方法」

モータの種類とその駆動方法について詳しく解説する。まず、剛体回転系の力学やトルク生成に基づくモータの分類、三相交流モータによる回転磁界の生成方法など、モータの基本的な動作原理を学ぶ。その後、直流モータ、交流モータ(永久磁石同期モータ、リラクタンスモータ、誘導モータ)の構造や動作原理、制御方法について詳しく説明する。また、モータの効率向上のための技術や、モータの位置センサの役割と種類についても触れる。さらに、インバータやベクトル制御を用いたモータの効率的な駆動方法や、モータのトルク特性、始動時の課題とその解決策についても解説する。モータの設計や制御に関する理論的背景から実用的な応用まで幅広く学べる内容となっている。

- 1. 予備知識
  - 1.1 剛体回転系の力学
  - 1.2 トルク生成に基づくモータの分類
  - 1.3 回転磁界の生成法(交流モータ)
- 2. 各種モータ
  - 2.1 直流モータ
    - 動作原理[一卷線永久磁石モータ、二巻線モータ]
  - 2.2 交流モータ
    - 永久磁石同期モータ、リラクタンスモータ、誘導モータ

## 第 17 回講義「モータ駆動」

モータ駆動における制御理論と技術について詳しく解説する。具体的には、トルク、 $\alpha\beta$  静止座標、dq 回転座標を基盤としたベクトル制御(FOC)や直接トルク制御(DTC)、モデル予測制御(MPC)、状態オブザーバを用いた制御方法を取り上げる。FOC では永久磁石同期モータや誘導モータの物理モデルを基に、最大トルク効率や弱め磁界を考慮した電流指令生成と制御を行う。一方、DTC は高速応答性を重視し、座標変換を不要とする簡便な制御方式である。また、MPC はトルクリップルや電流誤差を最適化する高度な制御法で、予測と最適化を繰り返しながら制御を行う。さらに、状態オブザーバを用いて磁極位置や角度誤差を推定する方法も紹介し、センサレス制御の実現に向けた技術的な課題とその解決策についても触れる。

- 1. 永久磁石同期モータ
  - 1.1 物理(数式)モデル
  - 1.2 電流指令(最大トルク効率、弱め磁界)
  - 1.3 ベクトル制御(FOC)
- 2. 誘導モータ
  - 2.1 物理(数式)モデル
  - 2.2 ベクトル制御(FOC)
  - 2.3 直接トルク制御法(DTC)
- 3. センサレス制御
  - 3.1 角度誤差および磁極位置推定
  - 3.2 オブザーバによる磁極位置推定

以上