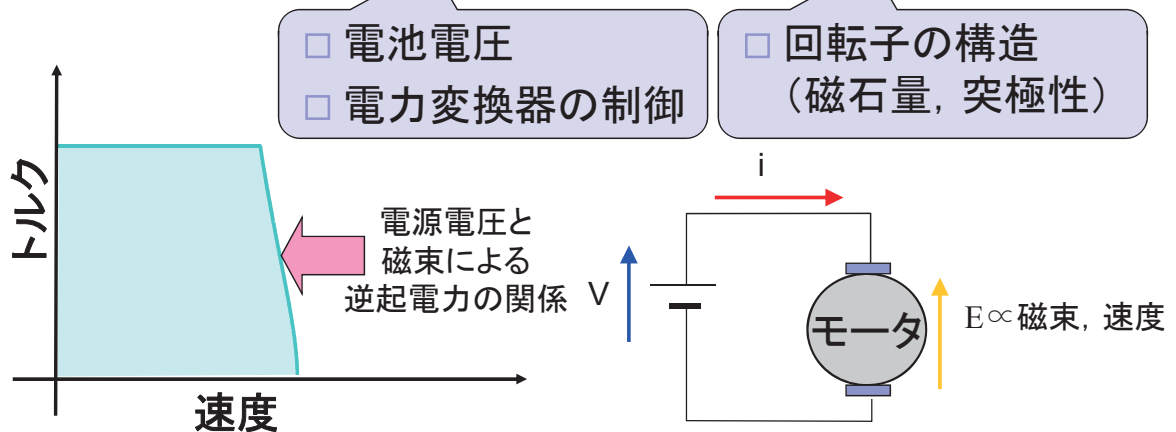


モータ駆動システムの速度トルク特性

■ 速度の上限は何で決まるのか

$$\Rightarrow \underbrace{\text{電流}}_{\propto \text{トルク}} \propto \underbrace{(\text{電源電圧})}_{\text{一定値}} - \underbrace{(\text{磁束による逆起電力})}_{\text{速度・磁束に比例}}$$



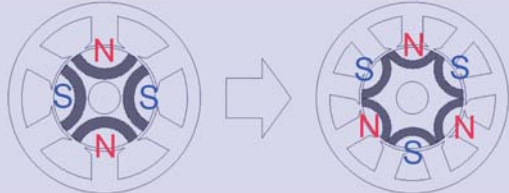
1. 自動車用モータ(永久磁石同期モータ)の原理
2. インバータによるモータ駆動
3. 自動車用モータの制御法
 - 瞬時トルク制御～ベクトル制御～
 - 駆動範囲の拡大～過変調・1パルス制御～
 - 堅牢性とシステムの簡素化～センサレス制御～
4. 自動車用モータ技術の現状・課題

自動車用モータ駆動システムの特徴

- 小型・軽量(高トルク・高出力)化への極めて高い要求
 - 高トルク化
 - 多極化
 - 磁気飽和領域の積極的な利用
 - 定格の考え方
 - 高出力化
 - 高速化

自動車用モータ駆動システムの特徴

- 小型・軽量(高トルク・高出力)化への極めて高い要求
 - 高トルク化
 - 多極対化
 - ⇒電氣的なギア
 - ⇒電源周波数の上昇
 - 磁気飽和領域の積極的な利用
 - 高出力化
 - 高速化



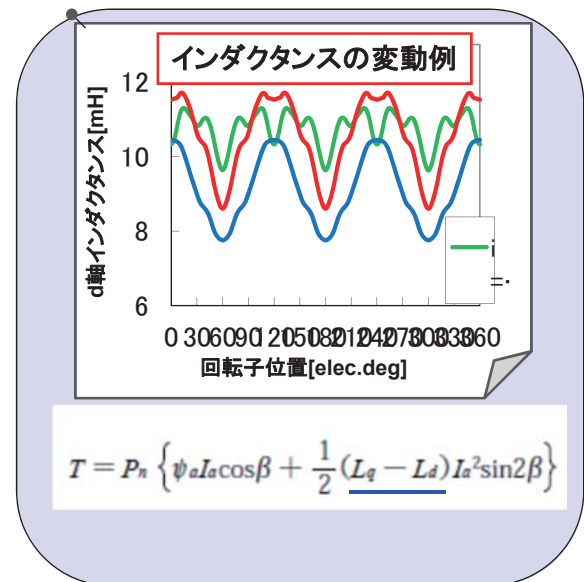
極対数:一回転当たりの極対(N極S極)の数

$$T = P_n \left\{ \psi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\}$$

自動車用モータ駆動システムの特徴

■ 小型・軽量(高トルク・高出力)化への極めて高い要求

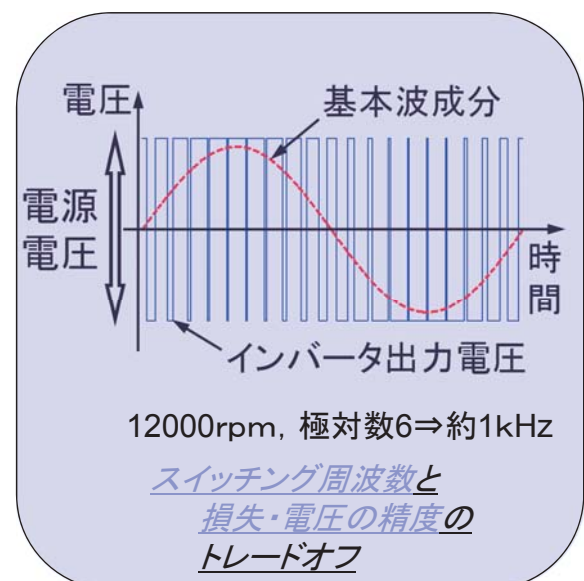
- 高トルク化
 - 多極対化
 - 磁気飽和領域の積極的な利用
⇒モータ状態に依存した
インダクタンスの大幅な変化
- 高出力化
 - 高速化



自動車用モータ駆動システムの特徴

■ 小型・軽量(高トルク・高出力)化への極めて高い要求

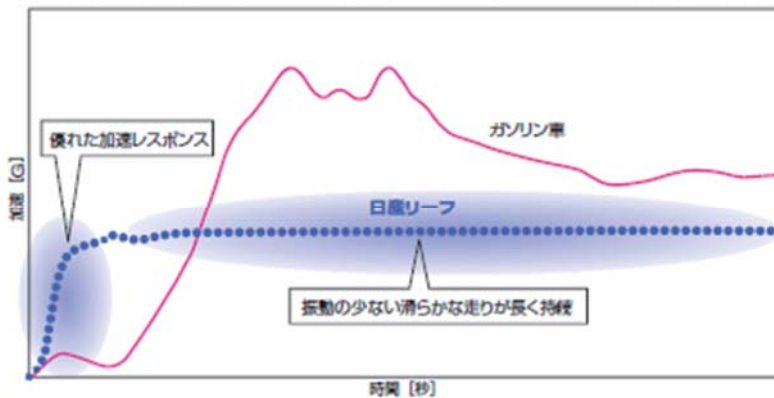
- 高トルク化
 - 多極化
 - 磁気飽和領域の積極的な利用
- 高出力化
 - 高速化
⇒減速機の必要性
⇒電源周波数の上昇



自動車用モータの制御法

- 瞬時トルク制御～電流ベクトル制御～
⇒ 交流モータを直流モータ化

トルクと電流の比例関係を実現

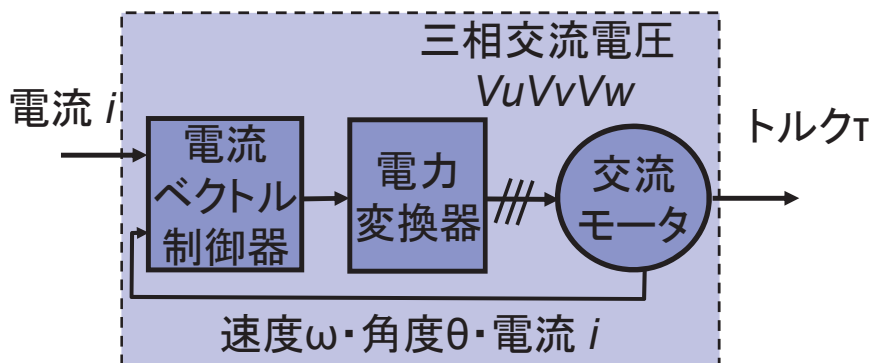


内燃機関と一桁違うトルク応答が可能⇒高度な車両安定制御が可能に
Nissan LEAF press information から抜粋

自動車用モータの制御法

- 瞬時トルク制御～電流ベクトル制御～
⇒ 交流モータを直流モータ化

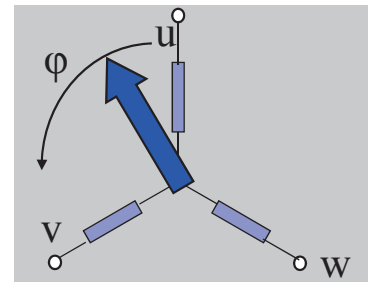
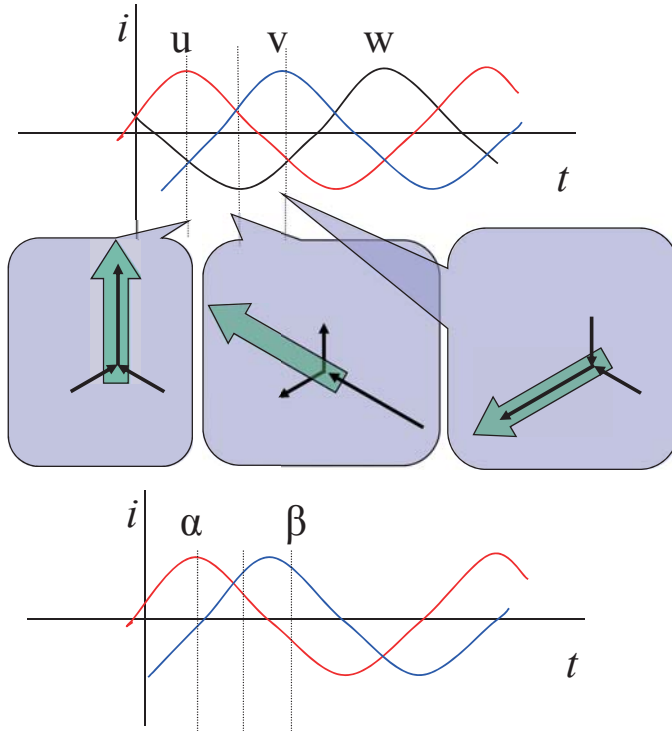
トルクと電流の比例関係を実現



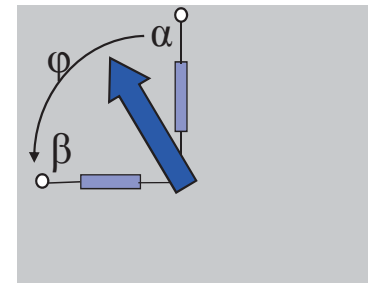
電力変換器: 10KHzのスイッチング周波数
制御周期: 100μs → 電流制御帯域: 2000rad/s

ベクトル制御のための準備(1)

三相-二相変換

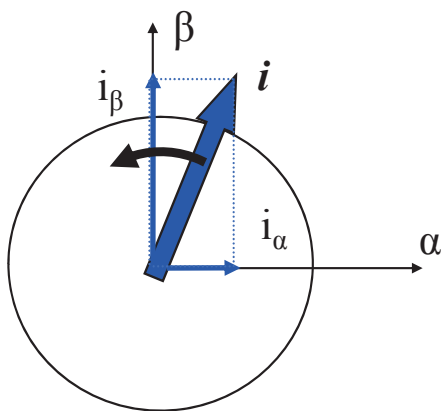


三相交流と
等価な二相交流が
存在する

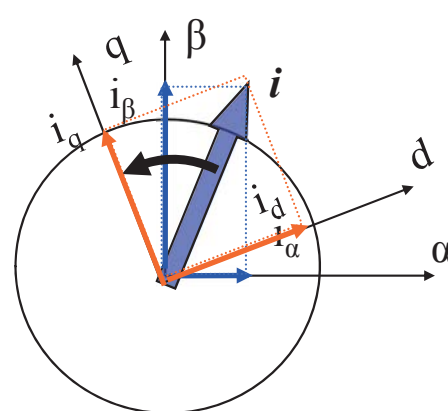


ベクトル制御のための準備(2)

二相表現と座標系



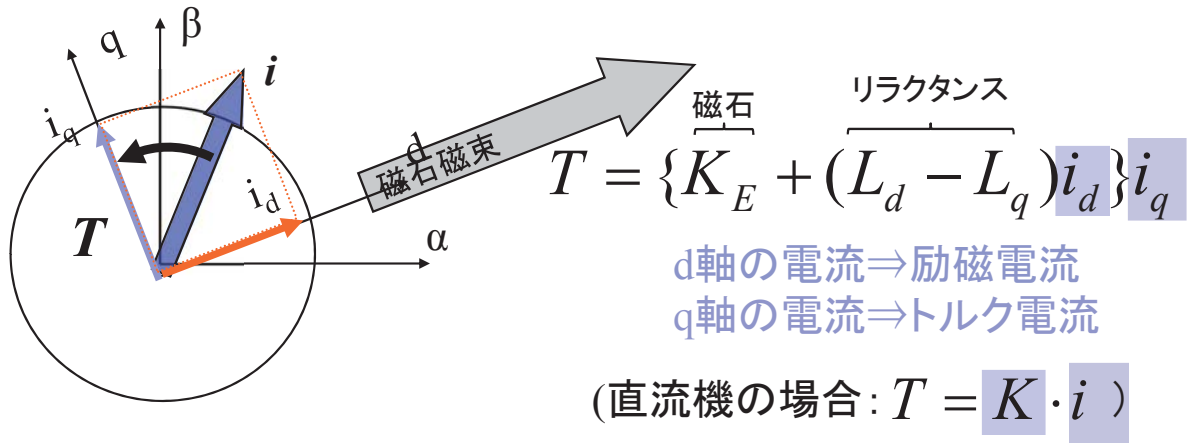
静止(α - β)座標系



回転(d - q)座標系

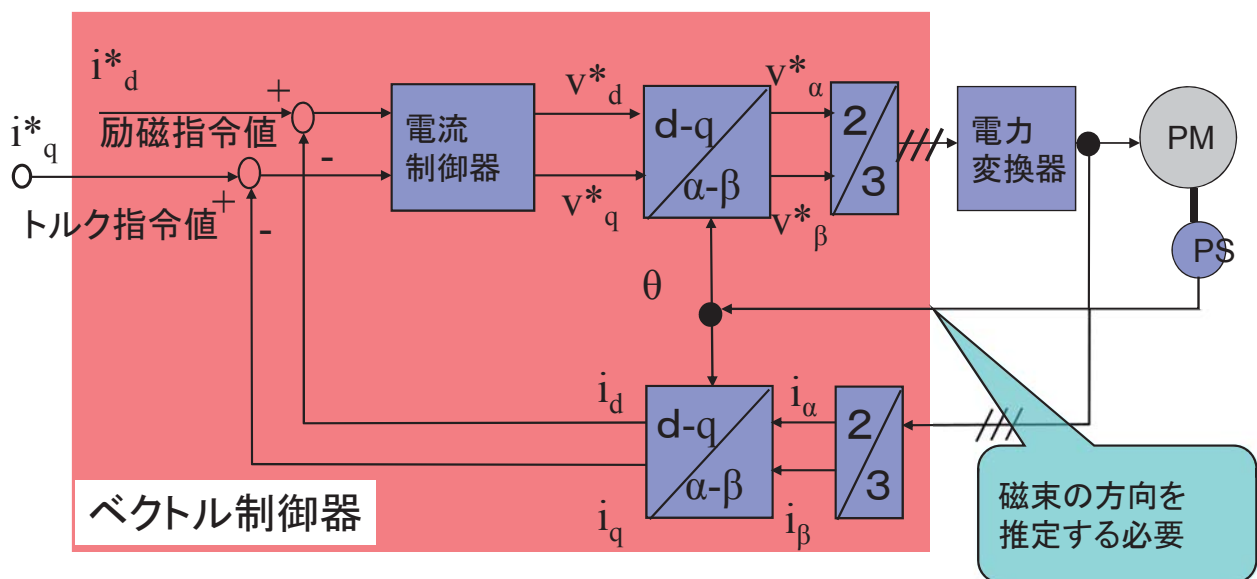
回転子に鎖交する磁束方向をd軸

IPMモータのベクトル制御とトルク



トルク制御 = d軸電流とq軸電流の制御

ベクトル制御系の構成



電力変換器: 10KHzのスイッチング周波数
制御周期: 100 μ s

電流制御帯域: 2000rad/s

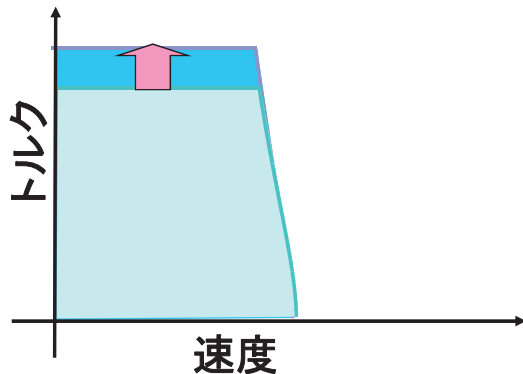
自動車用モータの制御法

■ 最大トルク(/電流)制御

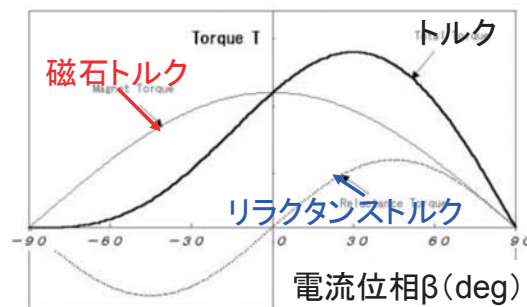
⇒トルク上限の拡大 □リラクタンストルクを活用

$$T = P_n \left\{ \psi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\}$$

$$\text{電流位相}\beta = \tan^{-1} -i_q/i_d$$



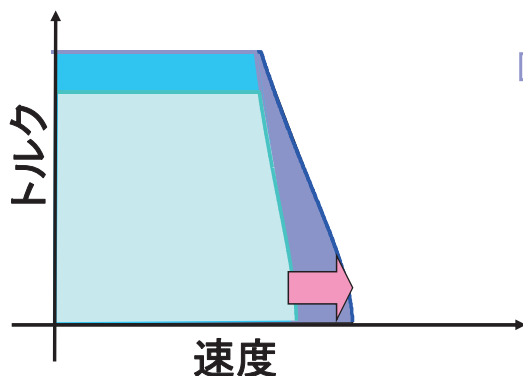
- 励磁電流 i_d とトルク電流 i_q の割合（電流位相）の制御により、「磁石トルク」と「リラクタンストルク」の和を最大に



自動車用モータの制御法

■ 弱め磁束制御

⇒速度上限の拡大 ~その1~



- 磁束を弱め、逆起電力を抑制
- 電流の一部が磁石磁束を打ち消すように、電流位相を制御（最大トルク制御時に比べ i_d の割合増加）

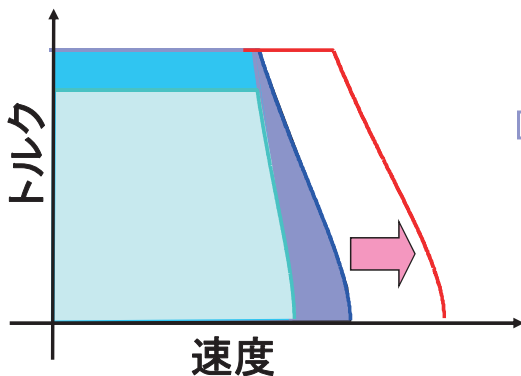
自動車用モータの制御法

■ 過変調・1パルス制御

⇒速度上限の拡大 ~その2~

□ 電力変換器の制御による
電池電圧利用率の改善
(27%↑)

□ 電圧波形の方形波化による
制御性の低下



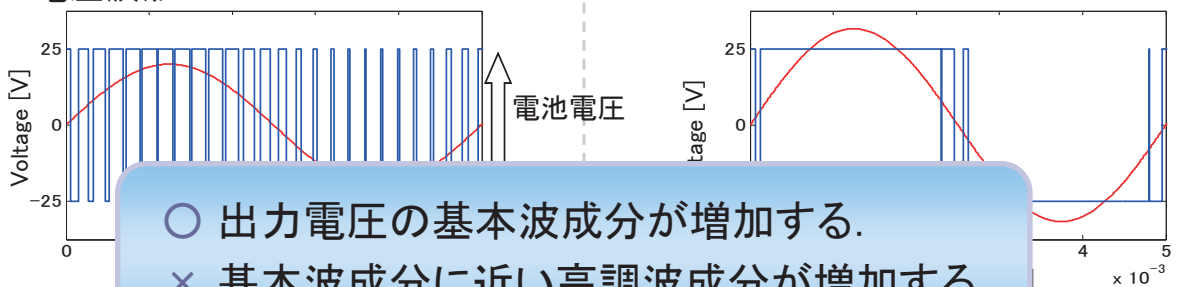
過変調領域の利用による電圧利用率の改善

□ 線形領域

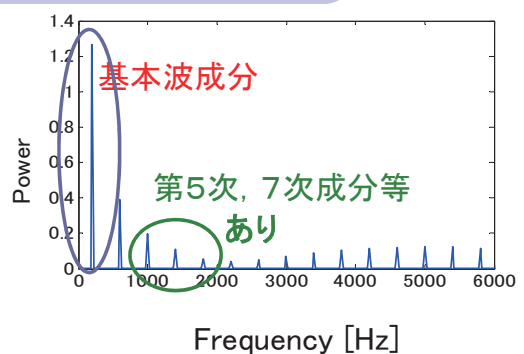
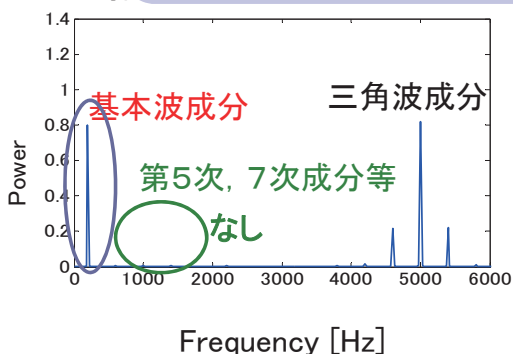
□ 過変調領域

➤ 電圧波形

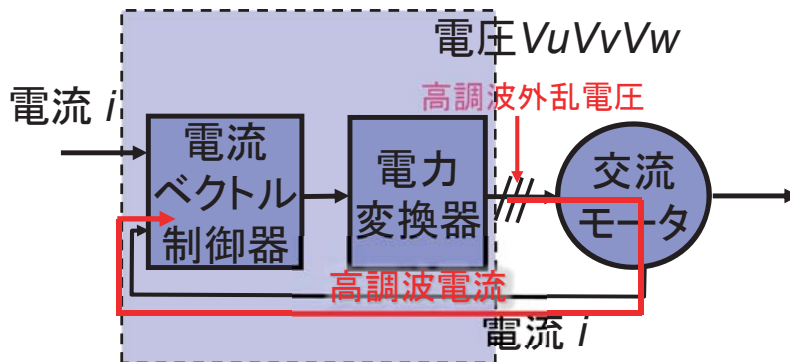
— インバータ出力電圧 — 出力電圧の基本波成分



➤ FFT解



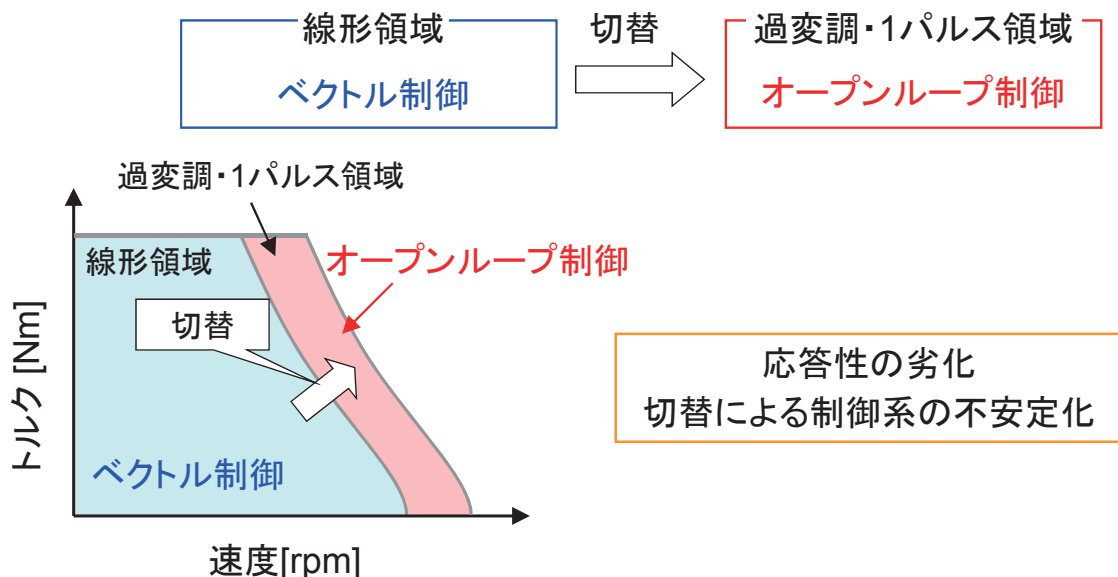
過変調領域における制御性の低下



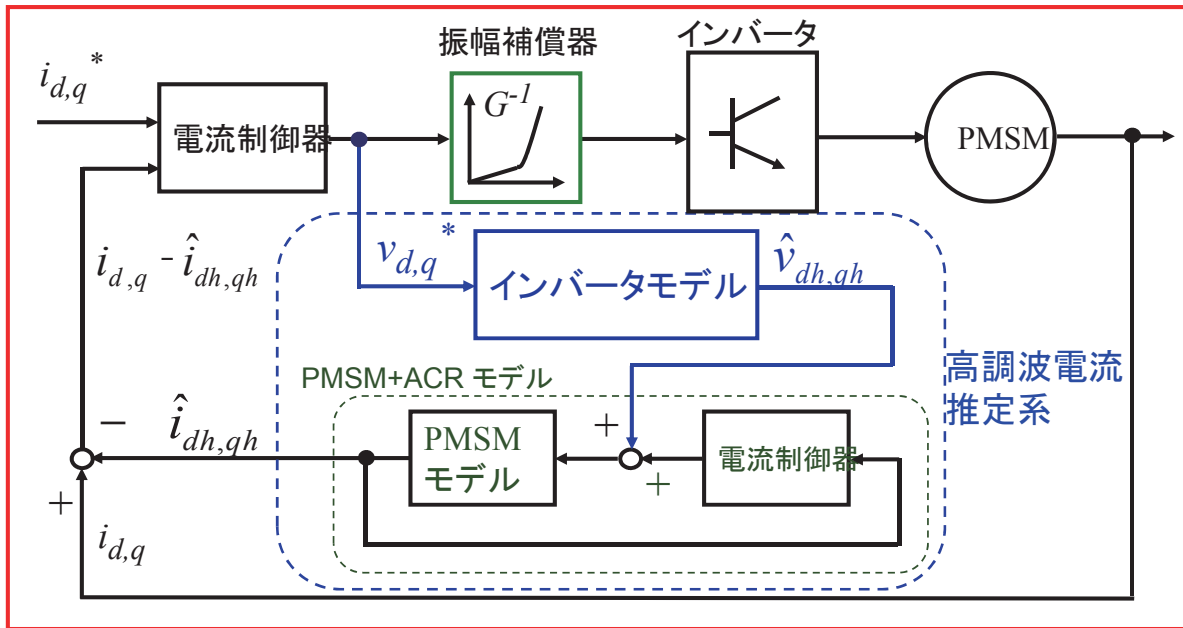
- ①電流制御器がフィードバックされる高調波電流を抑制するため余分な電圧指令値を生成する
- ②過変調領域においては、インバータが既に電圧飽和領域の近傍で動作する
- ③余分な電圧指令値によって、インバータが飽和になり基本波成分を制御するための電圧が不足し、定常誤差発生

過変調・1パルス領域での電流制御(その1)

ベクトル制御の過変調・1パルスへの駆動領域の拡大



過変調・1パルス領域での電流制御(その2)

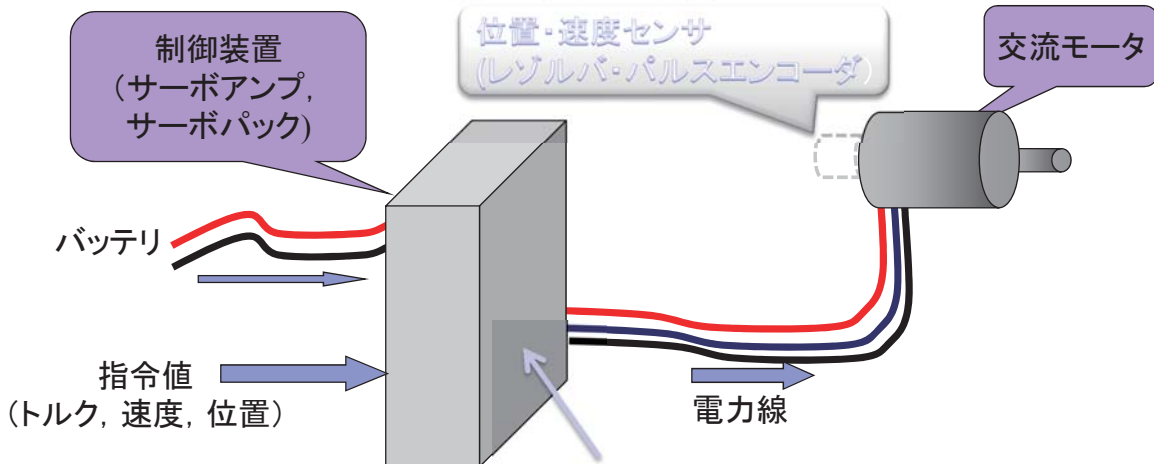


高調波電流の推定を行い、電流フィードバックから除去する

自動車用モータの制御法

■ 位置・速度センサレス制御

⇒コスト, 堅牢性, 設置の都合上, 位置・速度センサレスでの制御への要求



モータの数式モデルを利用し, 制御装置内で
電圧電流から, 位置・速度を推定

自動車用モータの制御法

■ 位置・速度センサレス制御

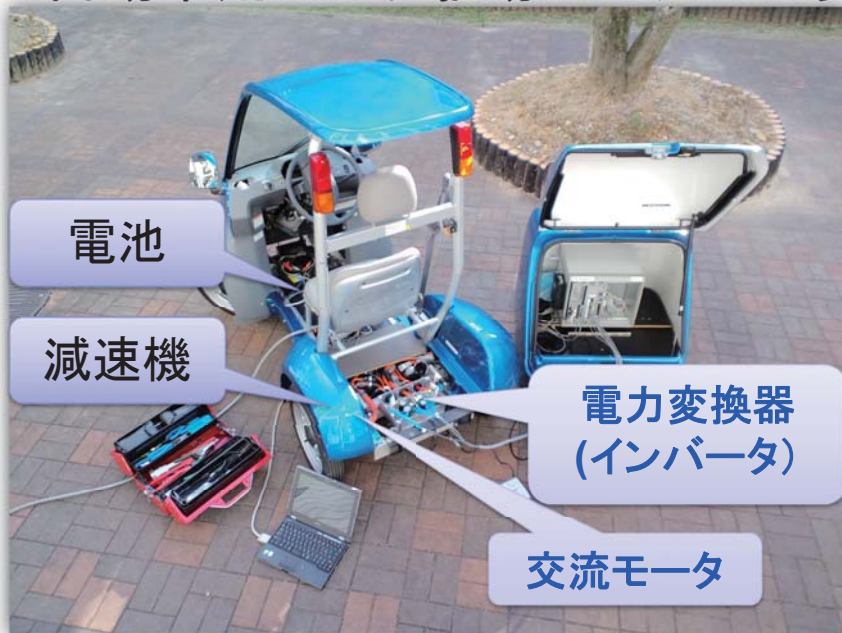
制御装置内で電圧電流から，位置・速度を推定し，位置・速度センサを排除

- ✓ 堅牢性，システムの簡素化に貢献
- ✓ 家電・一般産業機器では普及
- モータを選ぶ
- プロセッサ・電流センサへの負担増
- センサ付に比べ応答・安定性などが劣化

⇒現在はポンプ・コンプレッサ用として実用化，
駆動用への適用は研究段階

1. 自動車用モータ(永久磁石同期モータ)の原理
2. インバータによるモータ駆動
3. 自動車用モータの制御法
 - 瞬時トルク制御～ベクトル制御～
 - 駆動範囲の拡大～過変調・1パルス制御～
 - 堅牢性とシステムの簡素化～センサレス制御～
4. 自動車用モータ技術の現状・課題

自動車用モータ駆動システムの現状・課題



- エンジンやATと異なり、部品として入手が容易

- 購入すればだれでもEVは作れるのでは？

* 水平分業化への懸念
(ポータブル音楽プレーヤ, 液晶TVと同じになりませんか?)
⇒YESでもありNOでもある

自動車用モータ駆動システムの現状・課題 ～産業用部品と自動車用部品の比較～

産業用汎用インバータ



- 出力 3.7kW (連続)
- 体積 5L
- 空冷

HEV用インバータ

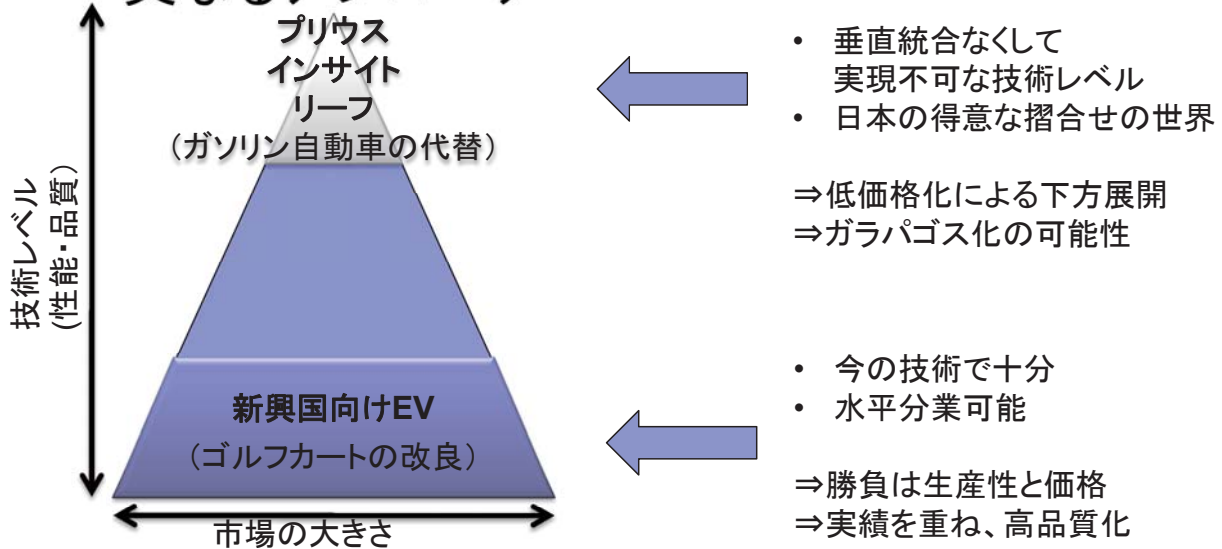


- 出力 百数十kW(短時間)
- 体積 5L
- 水冷

* 桁違いのスペック←設計思想(定格、熱)が全く異なる
⇒各部品の摺合せ、専用設計の必要性

* 単純な流用では『自動車』としての性能が不足

自動車用モータ駆動システムの現状・課題 ～異なるアプローチ～



* どのゾーンを狙うかで全く異なる戦略

* 「上から下へ」なのか「下から上」なのか、
⇒技術以外(政策・市場)の影響大

自動車用モータ駆動システムの現状・課題 ～希土類磁石問題～

■ 磁石レスモータはありか？

- SRM(スイッチトリラクタンスモータ)
- SynRM(シンクロナスリラクタンスモータ)
- IM(誘導電動機)

⇒原理的に性能では磁石有には劣る。

- 用途が限定的
- 省希土類or希土類レス磁石モータの目はあり

自動車用モータ駆動システムの現状・課題 ～高効率化・高出力密度化と熱～

- モータや電力変換器にも熱力学
 - 体積当たりの出力密度増＝体積当たりの発熱増
 - 動作温度の上限(減磁、巻線等の絶縁喪失)
 - 高出力密度化と冷却技術は一体で
- 効率が良すぎるのも考えもの
 - 効率が90%=排熱が10%=暖房が賄えない
 - 暖房のためのエンジン稼働や電力消費

自動車用モータ駆動システムとしての最適とは？

まとめ

- モータからモータ駆動システムへ
⇒モータ+電力変換器+制御
- 自動車用モータ駆動システムの特徴
⇒小型・軽量(高トルク・高出力)化への高い要求
⇒高性能モータの性能を引き出す様々な制御技術
- 自動車用モータ駆動システムの現状・課題
⇒ガソリン自動車の代替？ orゴルフカートの改良？