

『Meet up Chubu』 vol.13 モビリティ with Map-NAGOYA

モータ制御の観点から見る電気自動車と モータ制御技術の紹介

中部大学 工学部 電気電子システム工学科

松本 純

atsushi@isc.chubu.ac.jp

1. 自動車における電動化の要求

2. モータ制御の難しさ

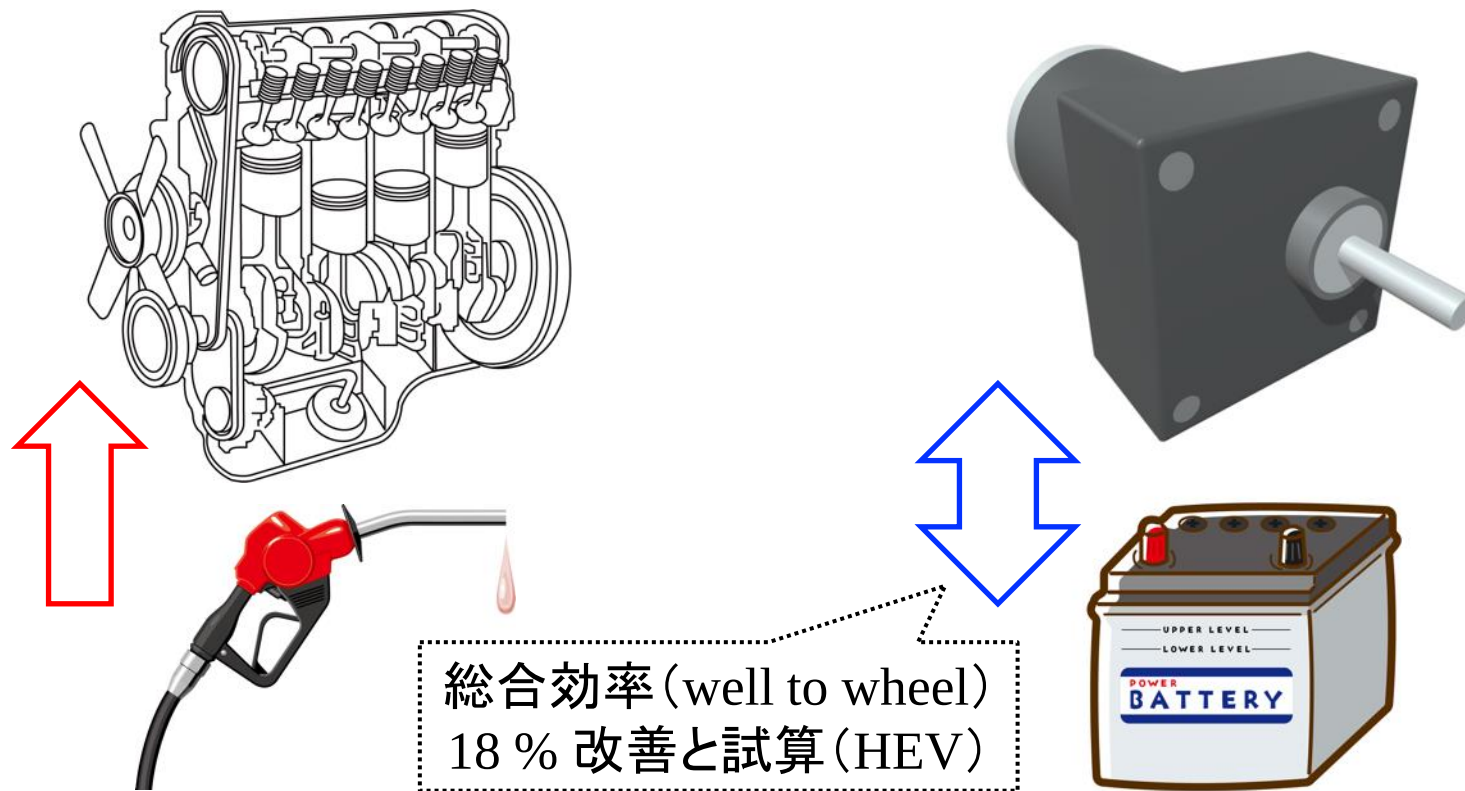
3. モータ制御技術の紹介

4. まとめ

1. 自動車における電動化の要求

3

□ ガソリン自動車と電気自動車の駆動システムの違い



不可逆な燃焼によって動力を得る
(ガソリンには戻せない)

惰行運転からのブレーキでは
電力としてエネルギーが戻る

出典: T. Teratani, et al. Energy-saving Technologies for Automobiles.
IEEJ Trans Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3, No.5, pp. 162-175 (2008)

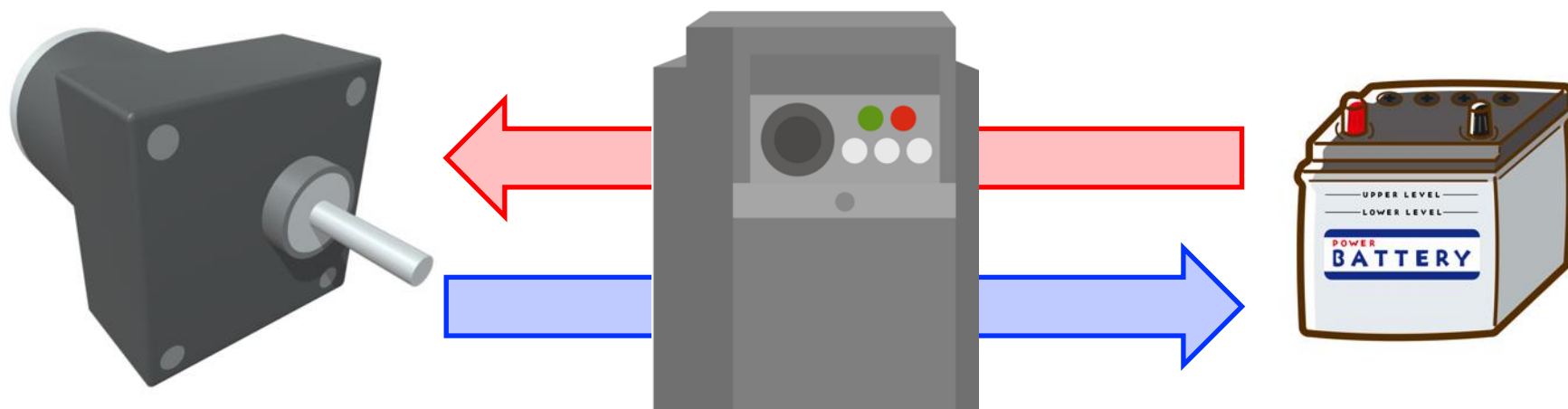
1. 自動車における電動化の要求

4

□ モータによるエネルギー(電力)マネジメントの概要

加速する場合には、必要なだけのエネルギーを**供給**し、
減速する場合には、余剰エネルギー(回生エネルギー)を**回収**

これを管理するのが、インバータ + コントローラ



加減速運転する場合、エネルギーマネジメントは必須
モータ・バッテリー単体だけでは、高効率に駆動することはできない

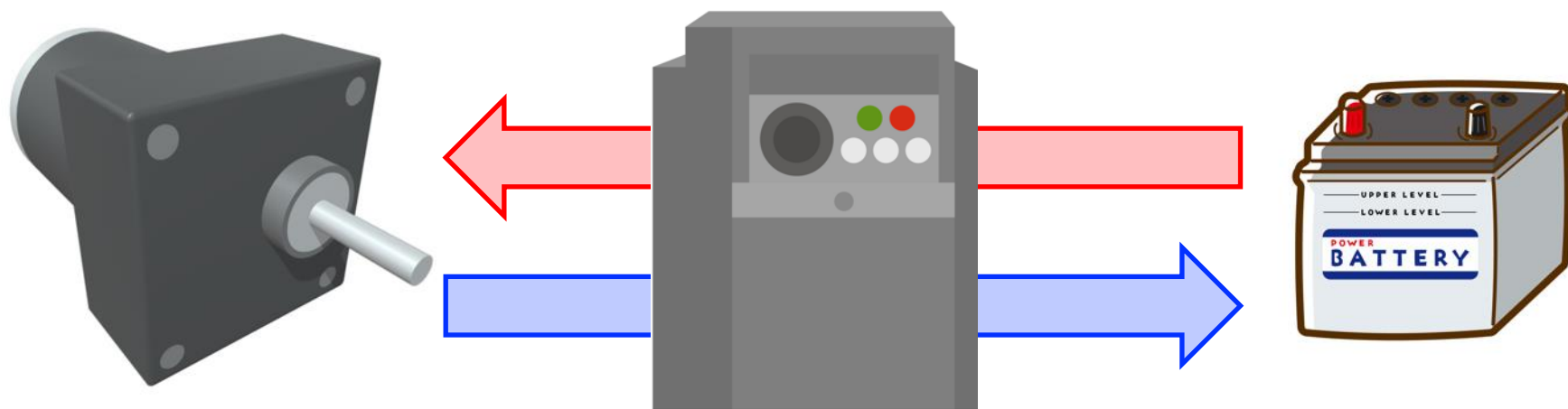
1. 自動車における電動化の要求

5

□ 回生エネルギーの回収には、パワーエレクトロニクス技術も必要

(下り坂を除けば) **供給エネルギー** $\geq$ **回生エネルギー**

※ 抵抗による損失あり



「モータの回転による発電エネルギー」と「巻線の磁気エネルギー」に加えて
「インバータを用いた昇圧回路」を構成

(電力 = 電圧 × 電流 のため、電流を減らして電圧を上昇)

バッテリーの充電が行えるまで電圧を上昇させ、回生エネルギーを回収

インバータ および コントローラ(制御技術) も重要な役割を担う

1. 自動車における電動化の要求

6

□ 電動化に向けた課題

① 装備品の電動化

課題：モータ制御用装置・配線の重量低減、低コスト化

油圧ブレーキと同等の性能を得るには、大電流(太い導線)が必要
コストも増大する傾向にあり

② 動力源の電動化

課題：モータ・バッテリーの性能向上、充電設備の充実

モータの出力密度、バッテリーのエネルギー密度が不足

満充電に必要な電力は一般的な家庭での消費電力の2～3日分

電気自動車の普及には、さらなる性能向上・低コスト化が必要

1. 自動車における電動化の要求

7

□ モータの高出力密度化

永久磁石同期モータ(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)

現状、小形・軽量で高出力化が図りやすいモータ

電流を流す
「巻線」

電流を流して磁界を発生させる「固定子(電磁石)」

「永久磁石」

固定子を電磁石化すると、
回転子の永久磁石と吸引・反発が生じ、
トルク(回転力)が発生

回転させて動力を得る「回転子」

ハイブリッド自動車や電気自動車(プリウス、リーフなど)に採用

□ モータの高出力密度化

限られたスペースで、軽量かつ高出力

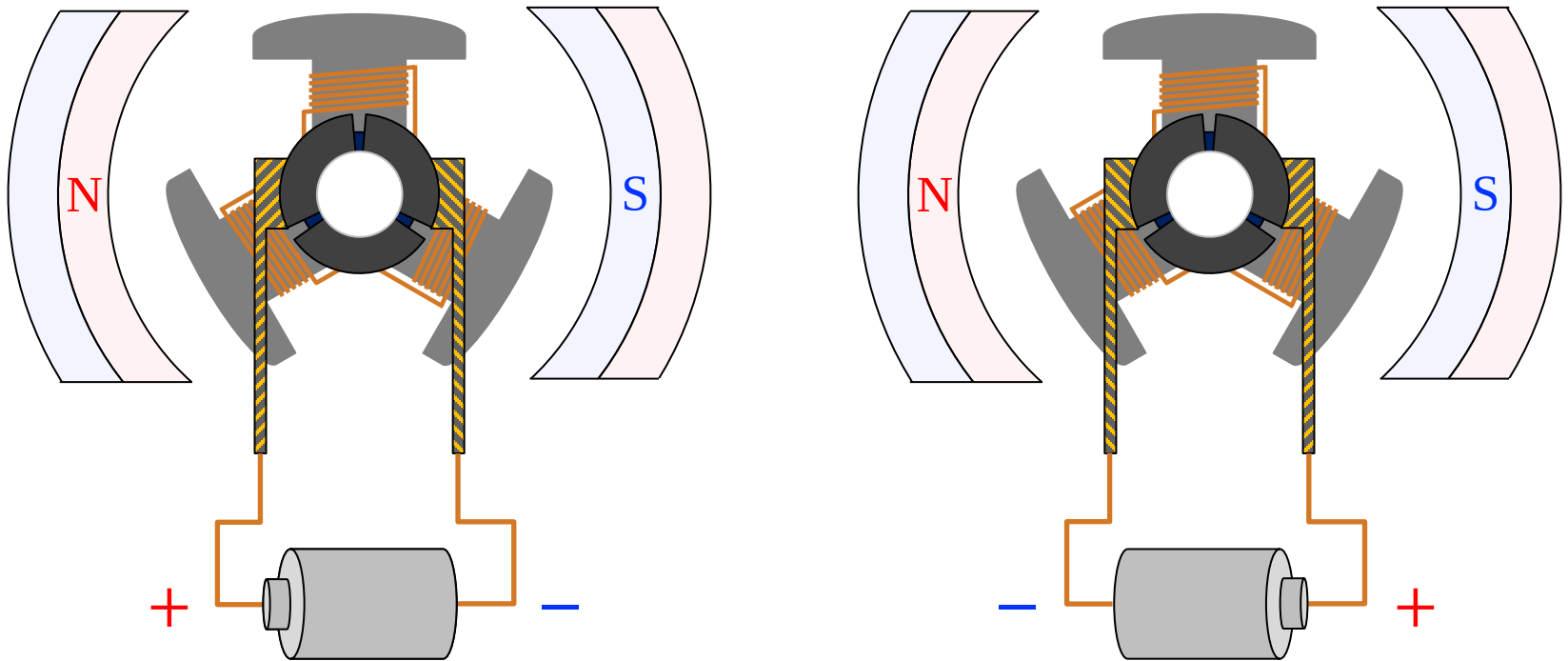
- ✓ EV用(日立製作所・日立Astemo製 60 kW、2.5 kW/kg)
- ✓ 1人乗り用電動航空機用(Siemens製 261 kW、5.2 kW/kg)
- ✓ スーパーカーPHEV用(YASA製 100kW、14 kW/kg)

高出力化に向けた要素技術は日夜発展
進化したモータの性能を引き出すためにも、制御技術を発展させる

出典：日立製作所 ニュースリリース(2021年9月30日発行)
(<https://www.hitachi.co.jp/rd/news/press/2021/0930.html>)

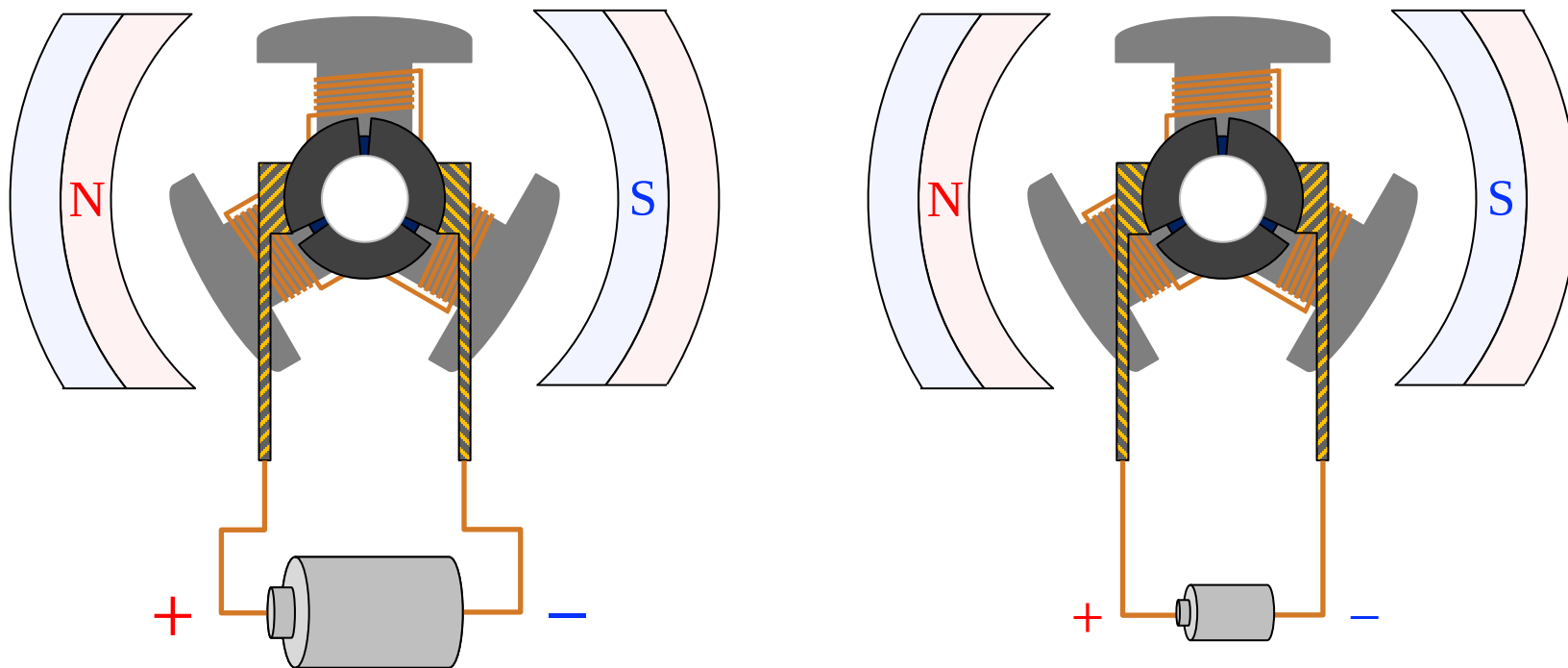
出典：寺尾 悠, 大崎 博之:「電動推進航空機用超電導回転機の技術動向」,
低温工学, Vol. 57, No. 2, pp. 71-78 (2022)

1. 回転方向を制御する



発生させる磁界を逆向きにすれば良い
電源電圧の向きを反転させる

2. 回転速度を制御する

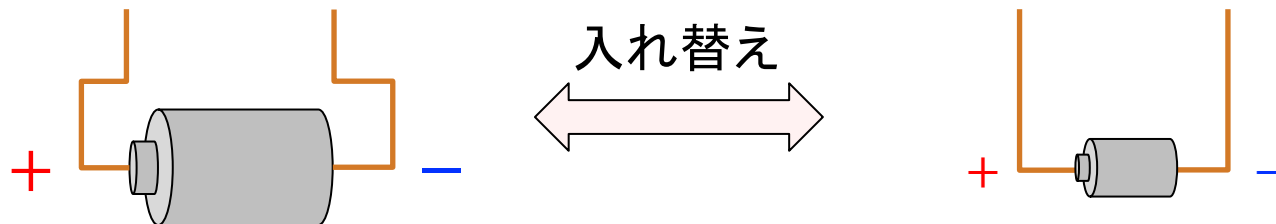


速度を抑えるなら、発生させる磁界を弱めれば良い
より低い電源電圧を用意する

逆転のために・・・



速度制御のために・・・



人手作業では、あまりにも大変、ヒューマンエラーも多発

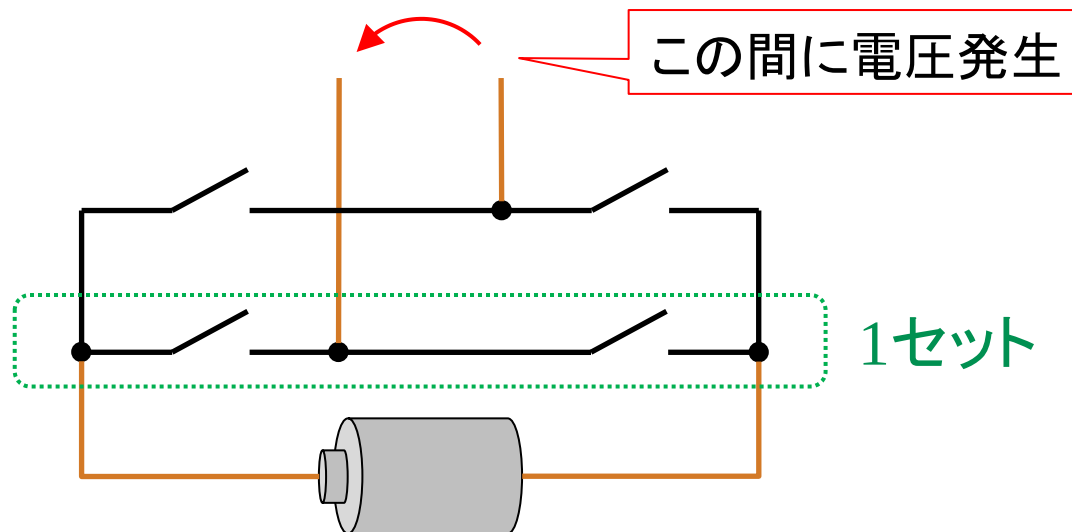
- ✓ 自動化したい
- ✓ 単一の電源で実現したい

「インバータ」と「PWM 制御」

3. インバータ

目的：電源を入れ替えずに逆転を実現する

- ✓ 複数スイッチ(例:4つ)で構成(「IGBT※など」を利用)
- ✓ 電源＋側 → スイッチ → スイッチ → 電源－側 (1セット)
これが2組あり、真ん中から出力端子が出ている

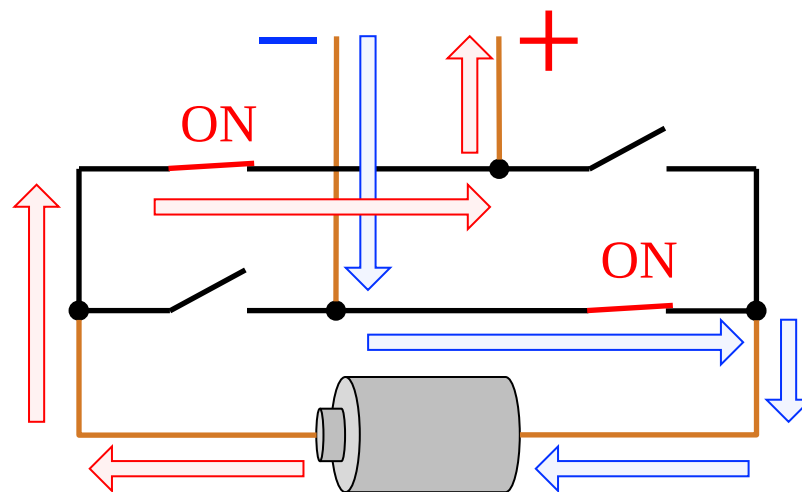
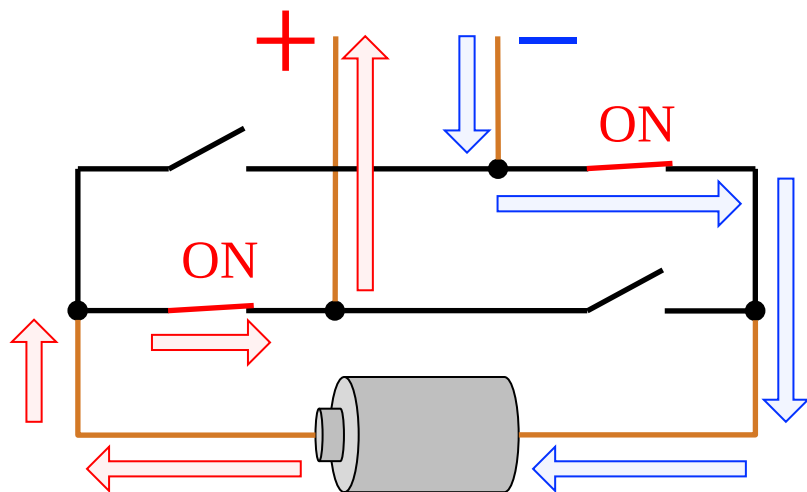


※ IGBT: 半導体で構成された素子、電氣的にオン・オフの制御が可能

3. インバータ

目的：電源を入れ替えずに逆転を実現する

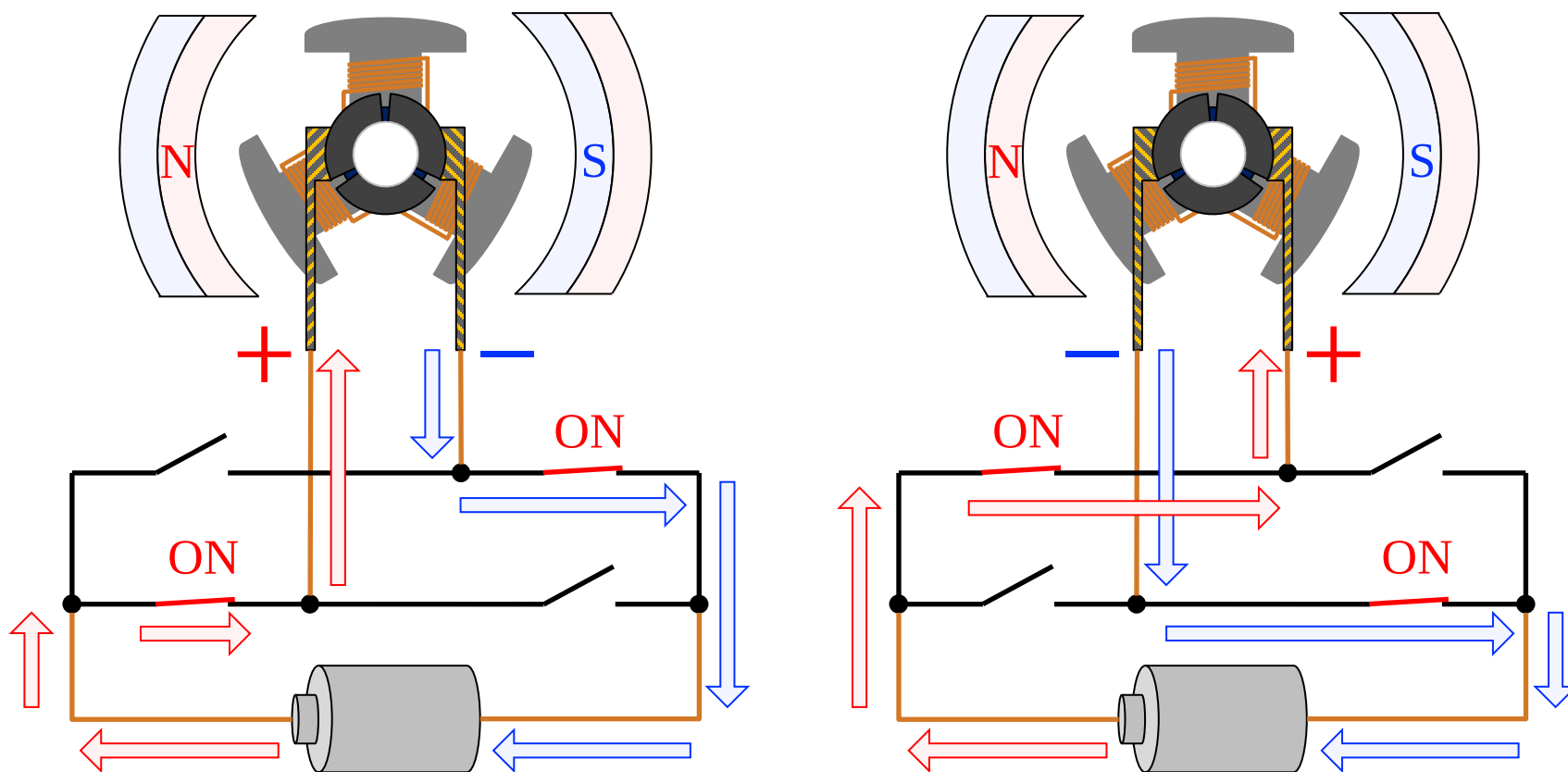
- ✓ スイッチを制御すれば、正負の両方の電圧を印加可能
(ただし、互い違いにONさせる)
- ✓ スイッチの制御は「マイコン※」によって実現



※ マイコン：電子機器を管理する集積回路

3. インバータ

目的：電源を入れ替えずに逆転を実現する



印加電圧を逆転させることが可能

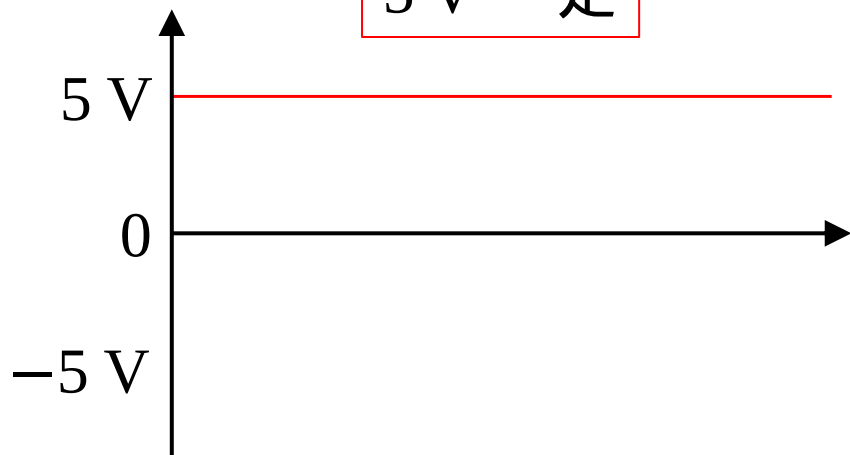
4. PWM制御（パルス幅変調：Pulse Width Modulation）

目的：単一の電源で速度制御を実現

コンセプト：平均電圧で考える（慣性で急変しないため）

※ 縦軸：印加電圧、横軸：時間

5 V 一定

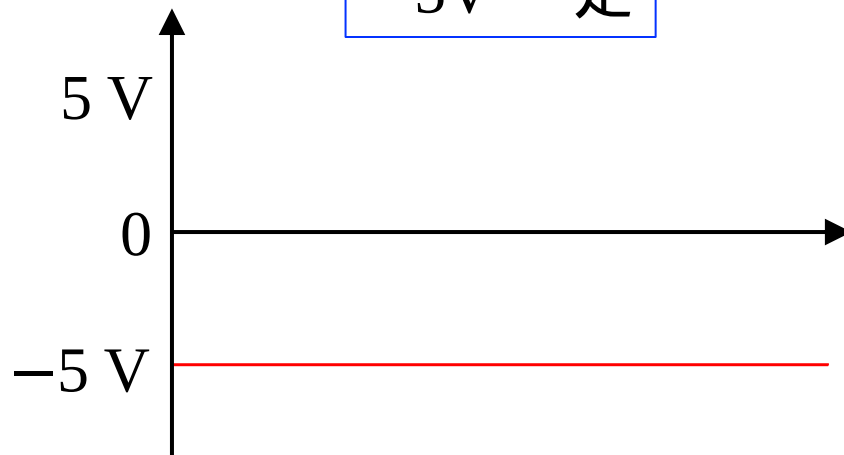


平均電圧：5 V



直接接続

-5V 一定



平均電圧：-5 V



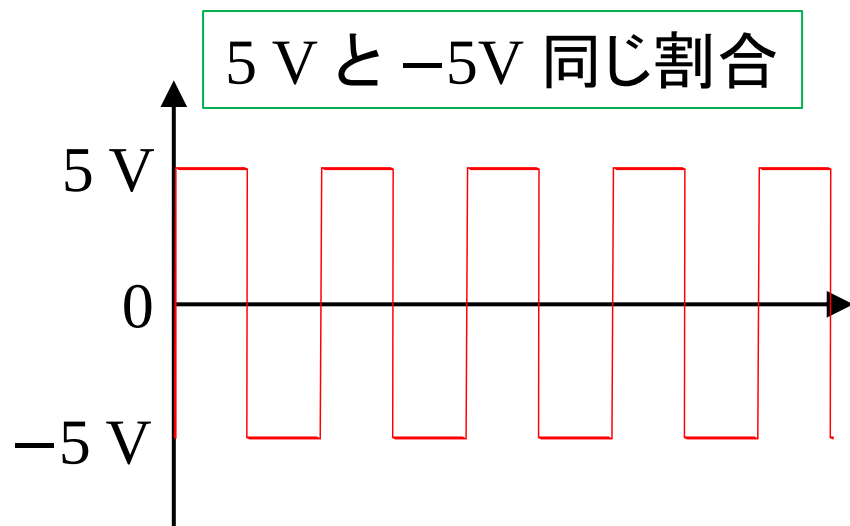
逆向きに
接続

4. PWM制御（パルス幅変調：Pulse Width Modulation）

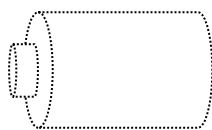
目的：単一の電源で速度制御を実現

コンセプト：平均電圧で考える（慣性で急変しないため）

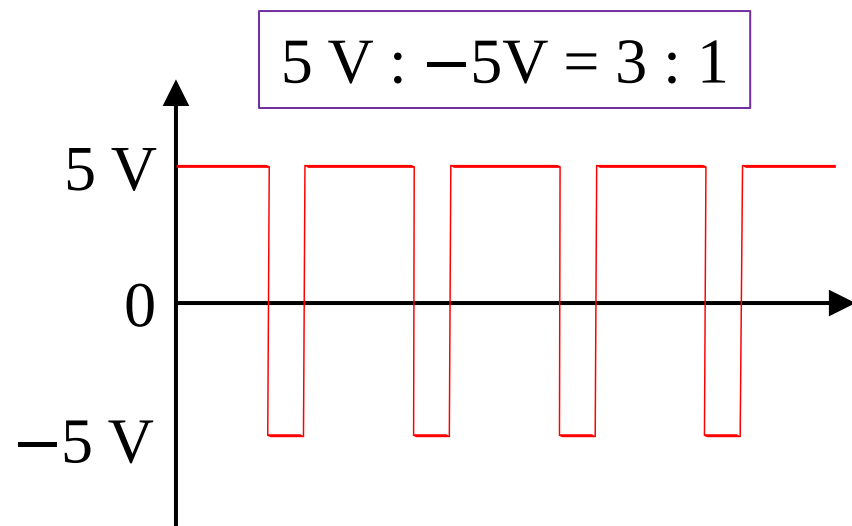
※ 縦軸：印加電圧、横軸：時間



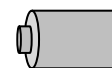
平均電圧：0 V



電源なし
と同じ



平均電圧： $5 \times \frac{3}{4} + (-5) \times \frac{1}{4} = 2.5 \text{ V}$



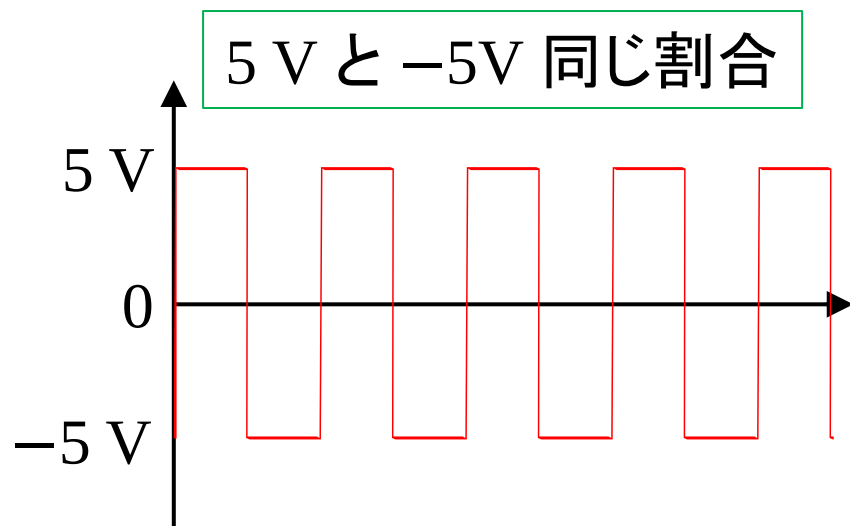
低い電圧源
と同じ

4. PWM制御（パルス幅変調：Pulse Width Modulation）

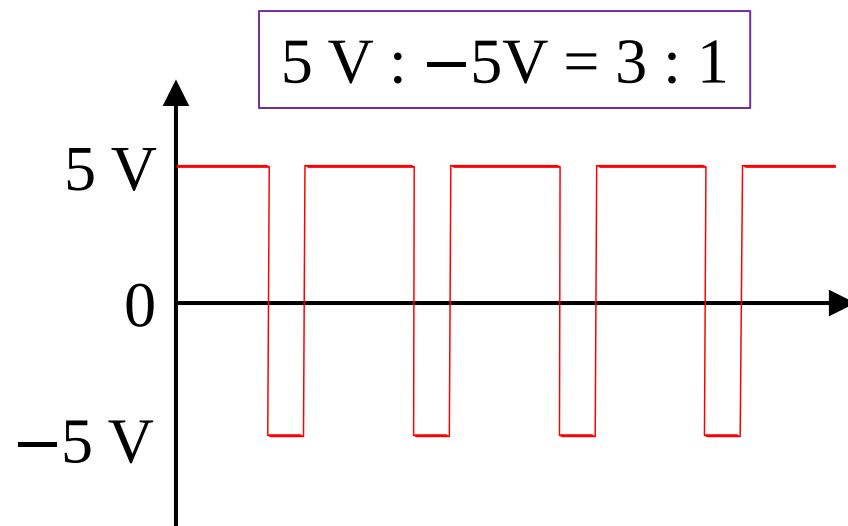
目的：単一の電源で速度制御を実現

コンセプト：平均電圧で考える（慣性で急変しないため）

※ 縦軸：印加電圧、横軸：時間



平均電圧：0 V



平均電圧： $5 \times \frac{3}{4} + (-5) \times \frac{1}{4} = 2.5 \text{ V}$

5 V側と -5V側の利用する割合（パルス幅）を調整すれば
平均電圧を低くできる → **速度制御が可能**

2. モータ制御の難しさ

18

□ エネルギー(電力)マネジメントの考え方

① どちら方向に、② どの強さの 磁力を発生させるかが重要

電流を流す
「巻線」

電流を流して磁界を発生させる「固定子(電磁石)」

「永久磁石」

✓ 要求トルク(回転力)

✓ 要求回転数(速度)

に応じて、流す電流を制御

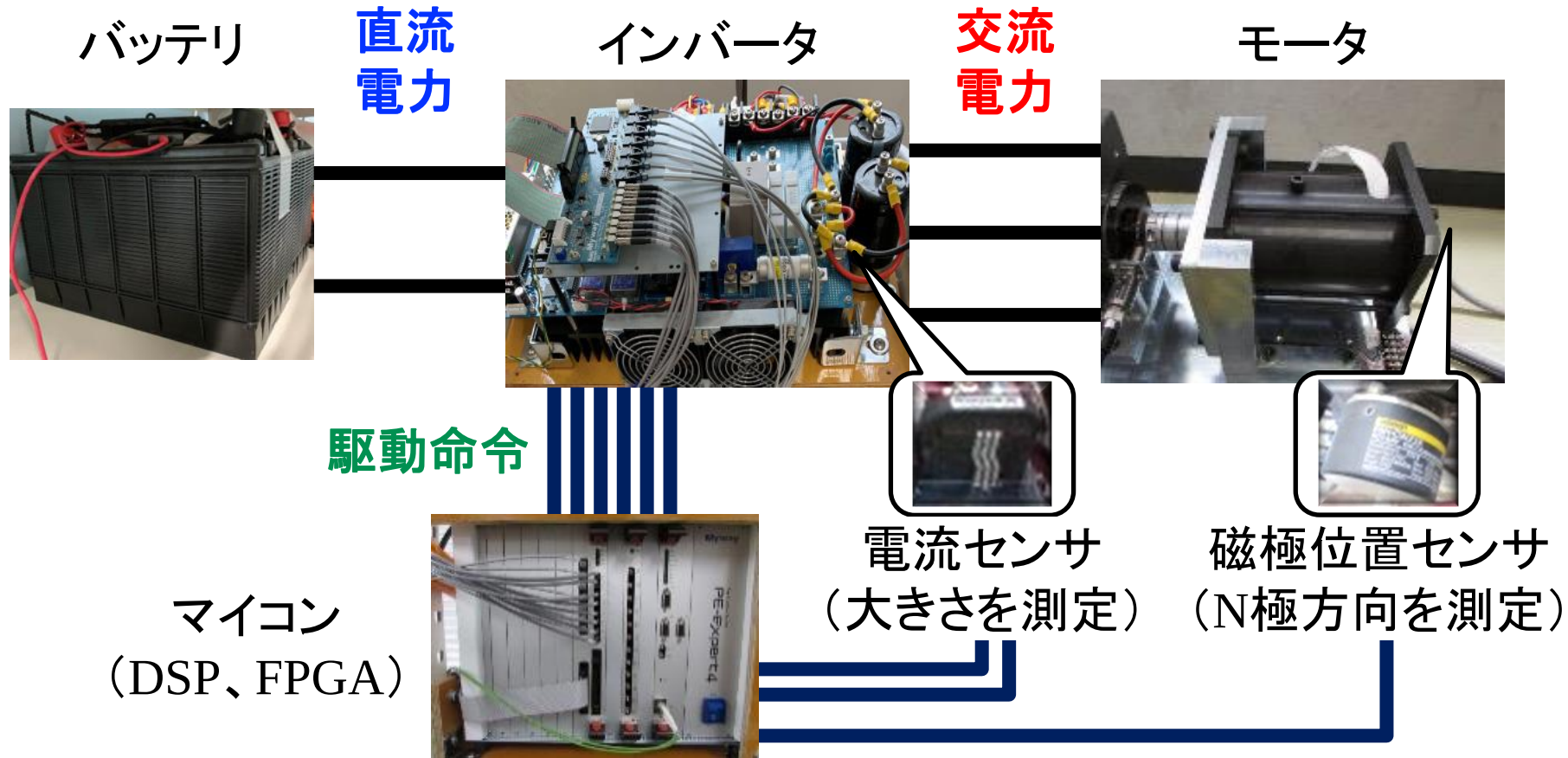
回転させて動力を得る「回転子」

如何に適切なマネジメントができるかが、高効率・高出力駆動の鍵

2. モータ制御の難しさ

19

□ モータドライブシステムの全体構成



モータ・インバータ・バッテリーも重要だが、センサ関連技術も重要
これらを(ある程度は)統合的に把握しなければならない

2023年2月7日

三菱重工業が国産初のジェット旅客機「スペースジェット」開発中止を発表
(2008年に開発開始、当初は2013年に納入予定だった)

三菱重工業としては、戦闘機の製造実績あり（零戦も設計）
民間旅客機であるボーイング787の約35%の部品は日本製

容易に完成できるかと思いきや、
型式証明取得のための設計変更・改良点は900点以上
(中には、制御アルゴリズムに関する言及もあり)

部品を揃えるだけでなく、「制御」についてもノウハウを蓄積すべき

出典：「MRJ開発遅延の真相、知見不足で8年を浪費 直面した900件以上の設計変更」、
日経クロステック(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/03423/>)

2. モータ制御の難しさ

21

□ モータ制御分野における恒久的な課題1

✓ 高効率・高出力駆動の実現

バッテリーから取り出せる**電力**には限りがある
如何に必要な**電力**を瞬時に取り出すか？

バッテリー



➤ **電力** は 1秒間の消費量(≈ **電圧** × **電流**)

電圧: 電気を送り出すための力 (1.5V(乾電池)、100V(コンセント) など)

電流: 実際に流れる電気の量 (500mA(USB2.0)、30A(ブレーカ)など)

電圧、**電流**をそれぞれどれだけ必要とするか、決定する必要あり

- **電圧**が**高すぎる**と、**電流**が流れすぎて発熱、焼損する恐れあり
- **電圧**が**低すぎる**と、**電流**が流れず、モータを回転させられない

モータの駆動状態に応じて、電圧・電流を調整する必要あり

2. モータ制御の難しさ

22

□ モータ制御分野における恒久的な課題1

モータの駆動状態に応じて、電圧・電流を調整する必要あり

➤ **モータ**と**発電機**(ジェネレータ)は表裏一体

モータ: **電圧**を印加すると、**回転運動**が生じる

発電機: 回転させることで、**電圧**が生じる



モータを回転させると、これに応じて**電圧**が発生してしまう

回転速度に応じて、印加する**電圧**を**高く**しないと、**電流**が流れない

電流が流れないと、トルクが発生せず、回転速度が上昇しない

速度に応じて**電圧**を、トルク(回転力)に応じて**電流**を調整する

如何に高速に、必要最低限に調整できるかが、制御技術のノウハウ

□ モータ制御分野における恒久的な課題2

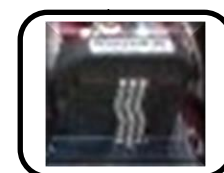
✓ 各種センサなしでも高効率駆動を実現

センサの欠点

- モータ駆動システムの**大型化**
(センサ本体、配線の引き回し)
- 耐環境性の**低下**
(高温・高圧下などでは使用不可)
- コストの**増加**
(モータの数だけセンサも必要)



磁極位置センサ
(N極方向を測定)



電流センサ
(大きさを測定)

センサが故障しても、最低限の駆動を維持できることが望ましい
(出力は低下しても、航行は可能 など)

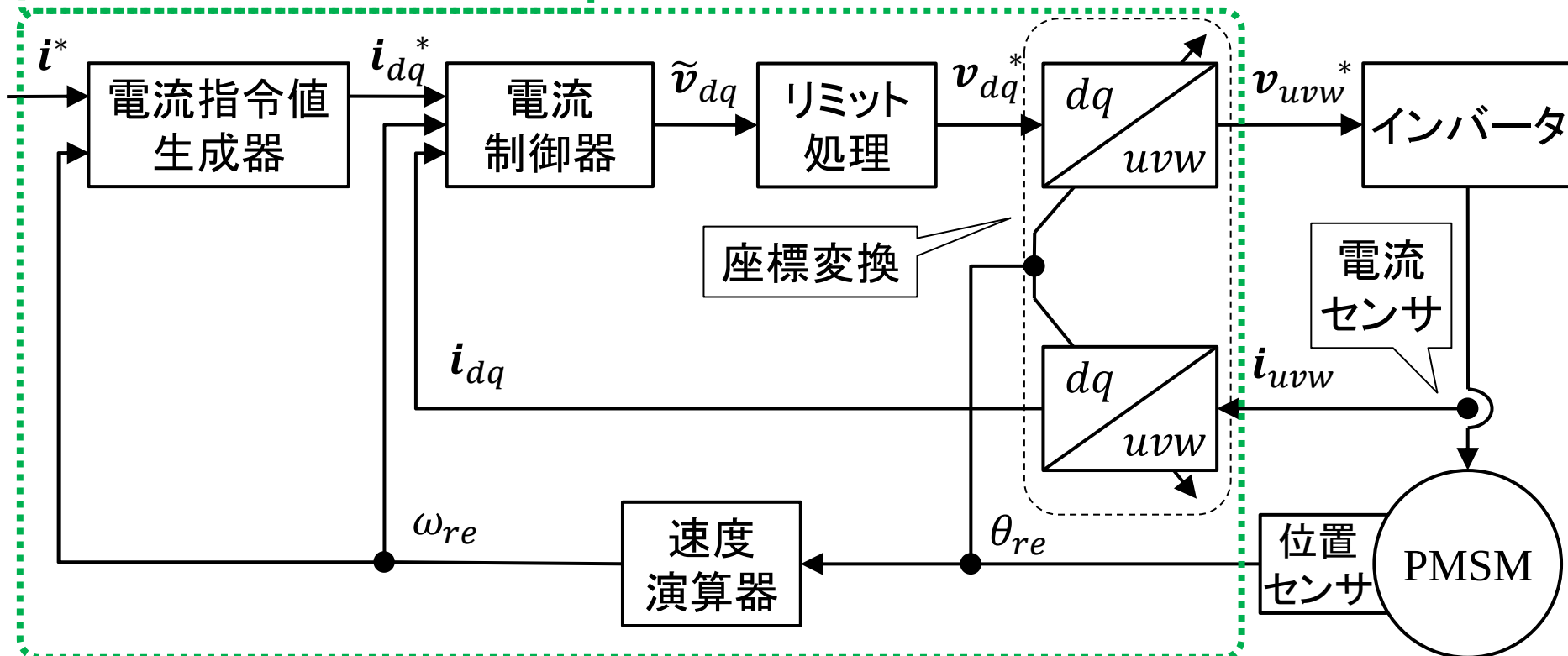
センサレス制御、冗長設計の実現も「制御技術」のノウハウ

2. モータ制御の難しさ

24

□ 基本的なモータ制御システムの構成

マイコン(DSP)により実装



基本的な構成でも、数多くの制御器を組み合わせることでモータを駆動

制御器設計法はあるものの、調整にはノウハウが必要

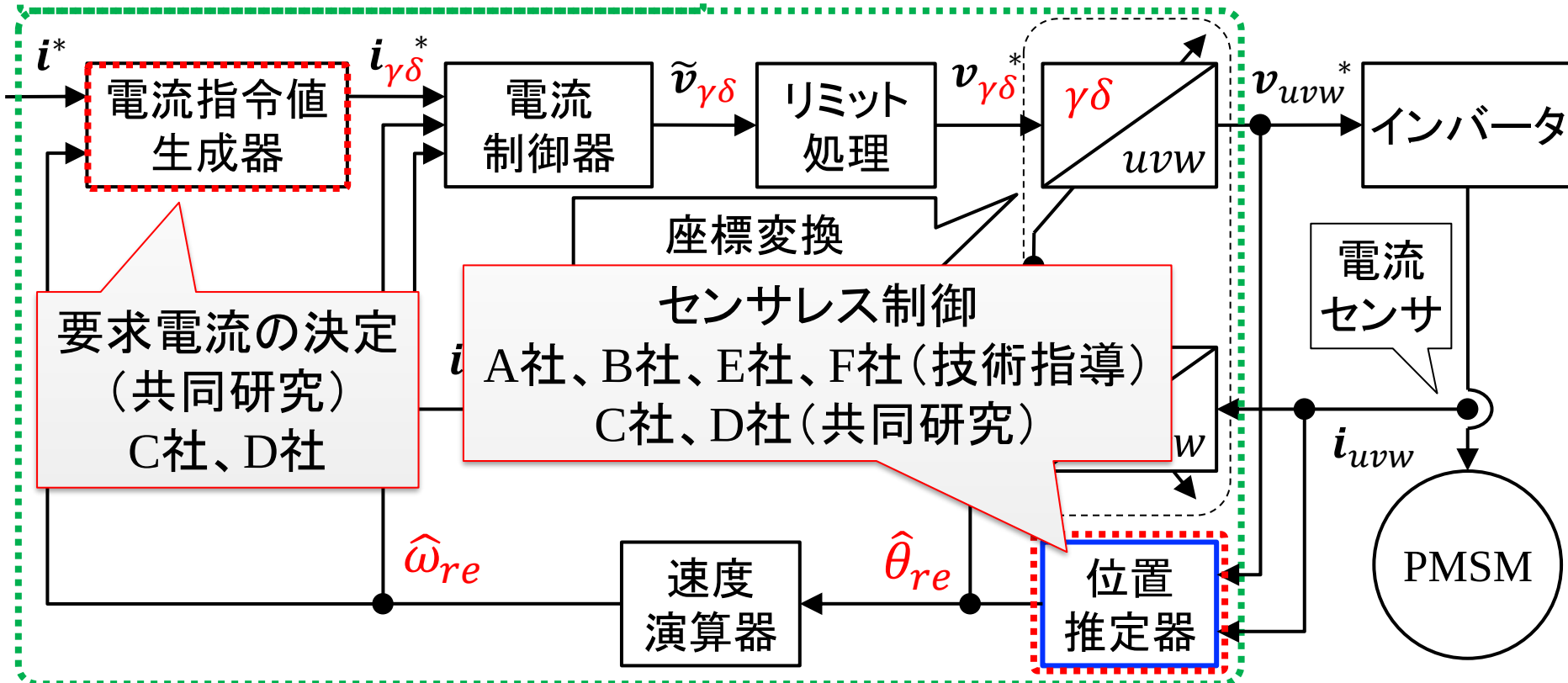
2. モータ制御の難しさ

25

□ これまでに対応してきた案件

DSP または マイコンにより実装

全般的な内容(技術指導)
B社、E社、F社

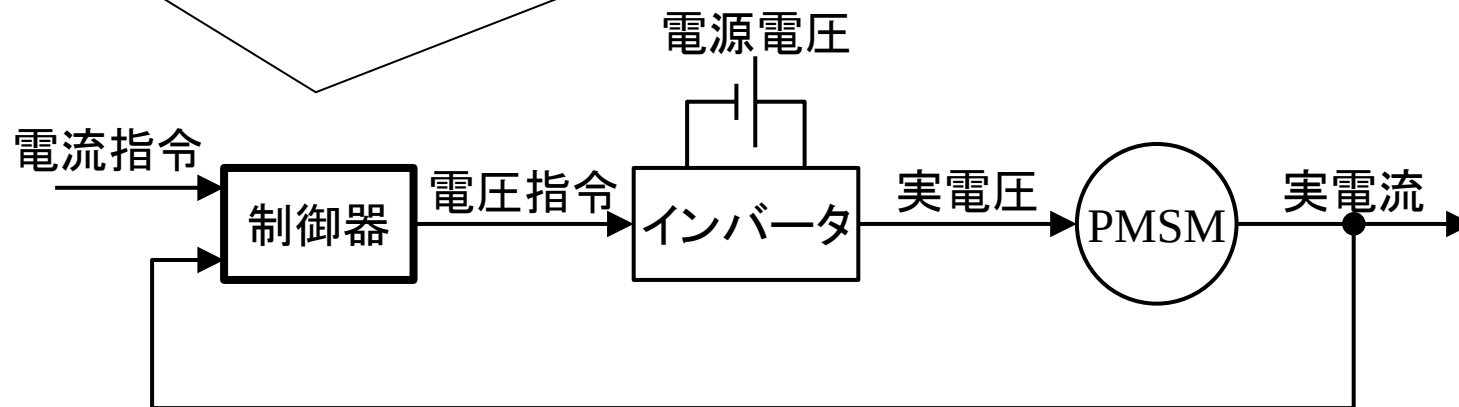
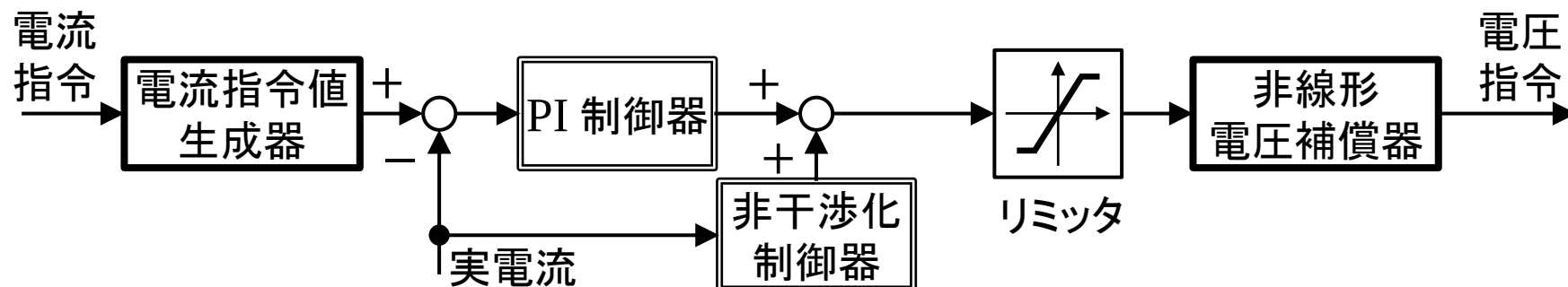


動力源代替では冗長設計、補機類ではセンサレス制御の要求多数

3. モータ制御技術の紹介

26

□ 一般的なモータドライブシステム、電流制御系の構成

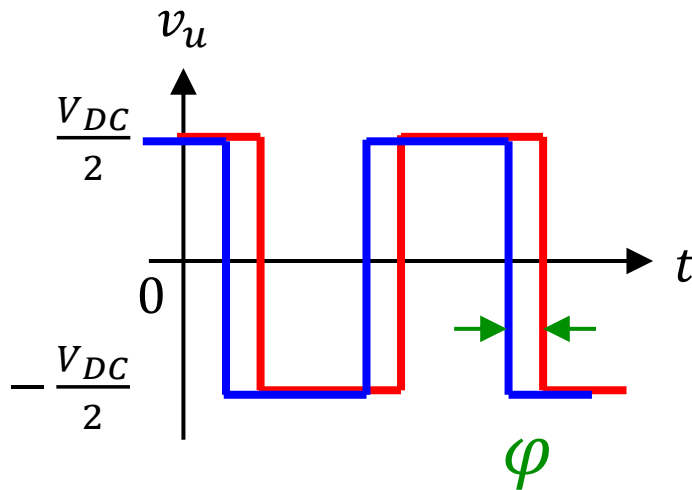
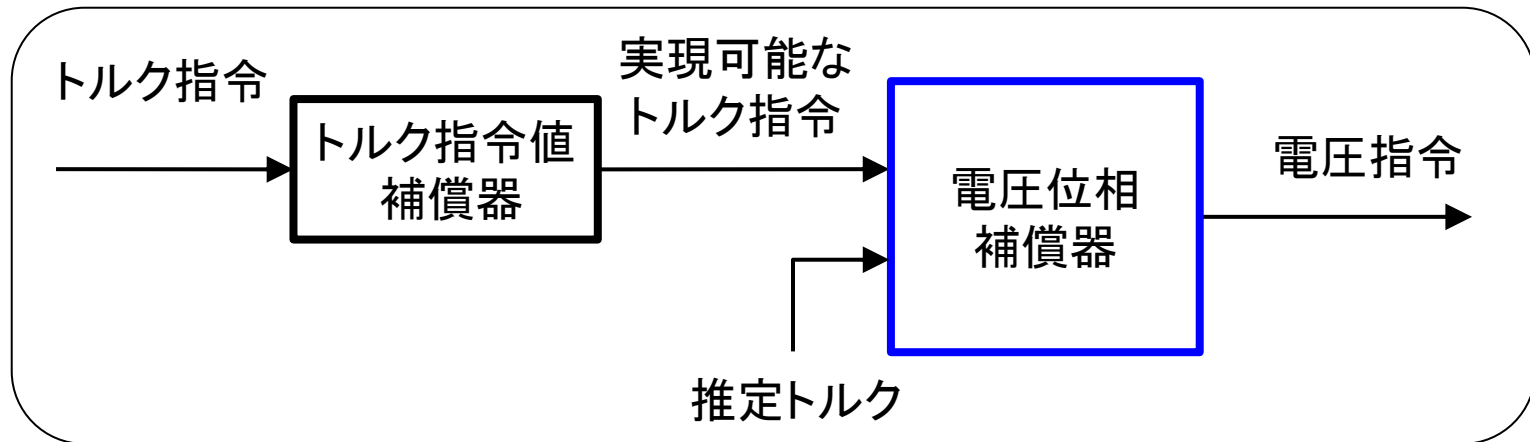


実電圧の実効値が最大となる矩形波駆動の実現には
「非線形電圧補償」、「高調波電流対策」の設計が煩雑

3. モータ制御技術の紹介

27

□ 電圧位相制御系の適用



操作量は位相指令 φ^* のみ
(電圧の大きさは固定)

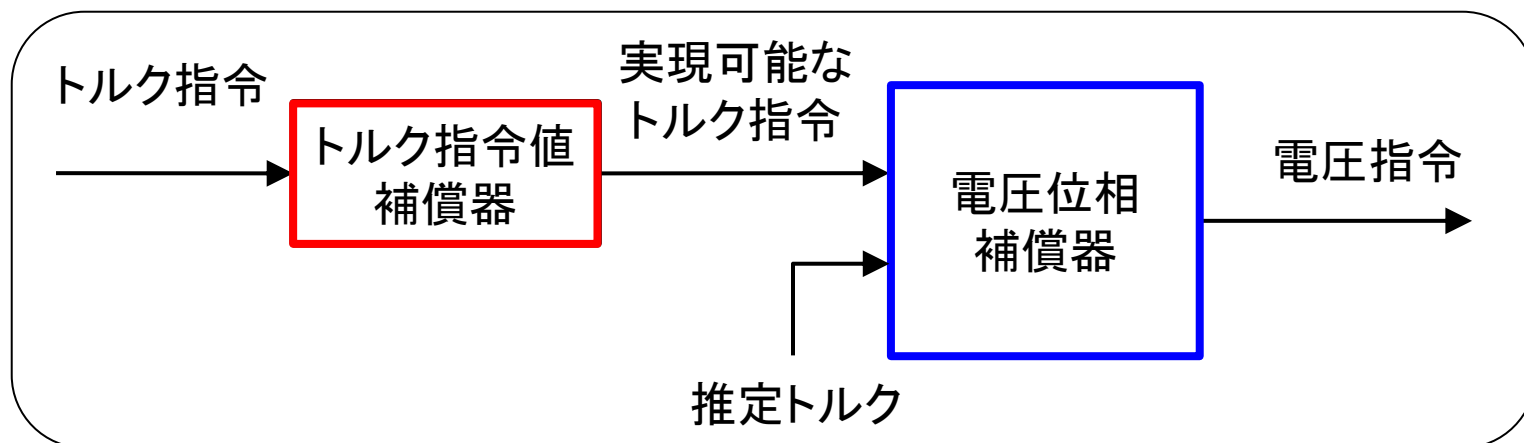
トルク指令値と推定トルクの
偏差が零となるよう動作

矩形波駆動の実現が容易

3. モータ制御技術の紹介

28

□ 電圧位相制御系の適用



- ✓ 電圧利用率の改善
- ✓ 駆動可能領域の拡大

など、有効性は広く示されている

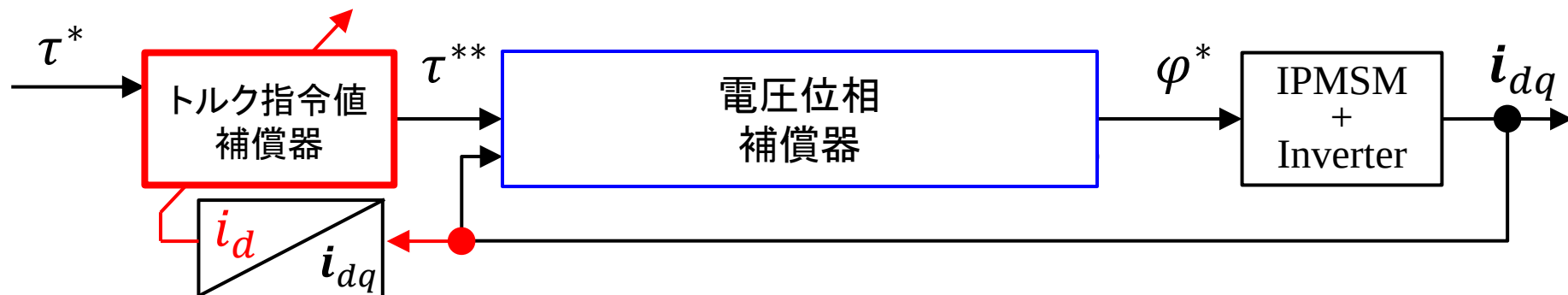
ただし、実現可能なトルク指令値への補正はほぼフィードフォワード制御
(ルックアップテーブル作成の煩雑さ、ロバスト性低下)

電圧位相制御系のためのフィードバック型弱め磁束制御を提案

3. モータ制御技術の紹介

29

□ 必要なエネルギー(電力)を供給するために



トルク指令値 およびトルク推定値 は以下のように計算

$$\tau^{**} = P_n \{ (L_d - L_q) \mathbf{i}_{d(\text{LPF})} + K_E \} i_q^*$$

$$\tau = P_n \{ (L_d - L_q) i_d + K_E \} i_q$$

提案法

$$\tau^{**} - \tau = P_n \{ (L_d - L_q) (\mathbf{i}_{d(\text{LPF})} i_q^* - i_d i_q) + K_E (i_q^* - i_q) \}$$

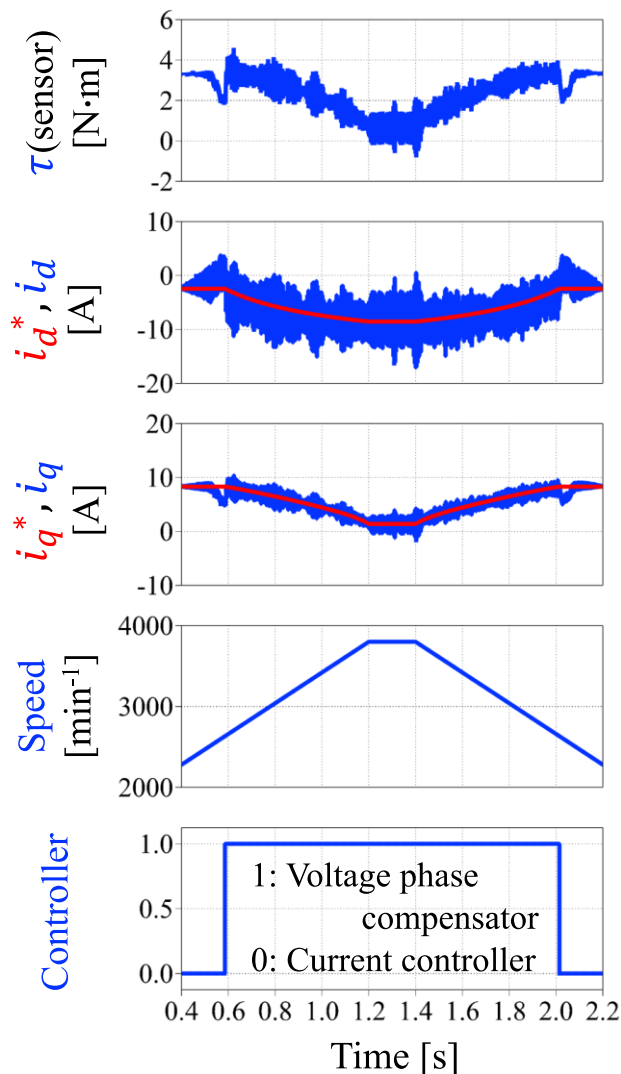
$$\approx P_n \{ (L_d - L_q) i_d + K_E \} (i_q^* - i_q) \quad \text{--- } i_q \text{ 制御とほぼ等価}$$

i_q が実現されるように位相を操作すれば、 i_d も流れるはずという発想

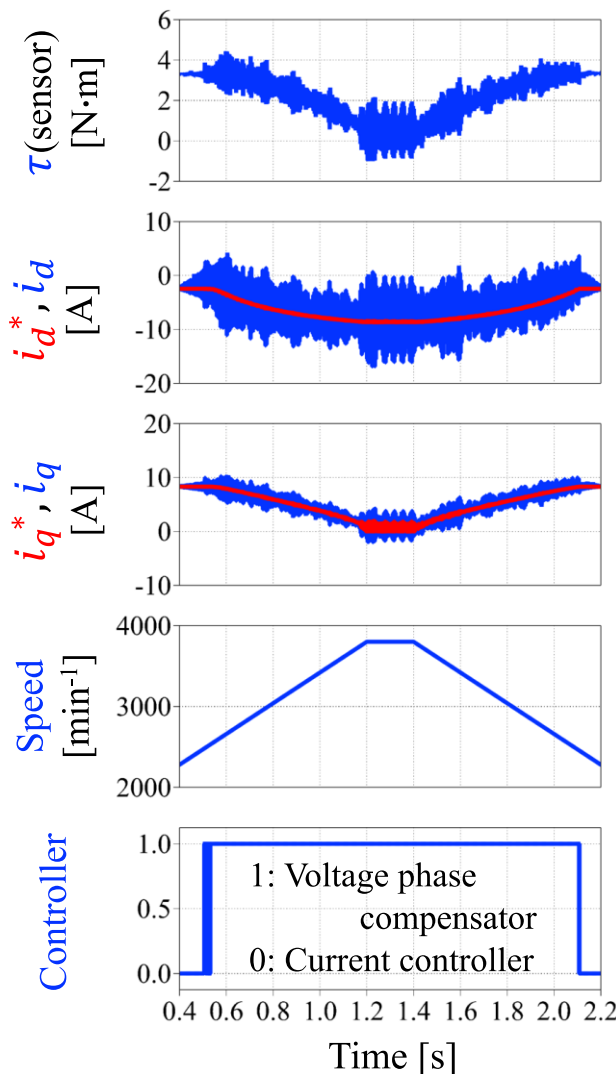
3. モータ制御技術の紹介(シミュレーション)

30

従来法



提案法



速度の上昇とともに
電圧位相制御系へ移行

提案法の方が
早めに移行し、
ベクトル制御への
切り替えも遅い
といった違いあり

提案法においても
従来法 とほぼ同様の
トルク・電流特性を実現

3. モータ制御技術の紹介(シミュレーション)

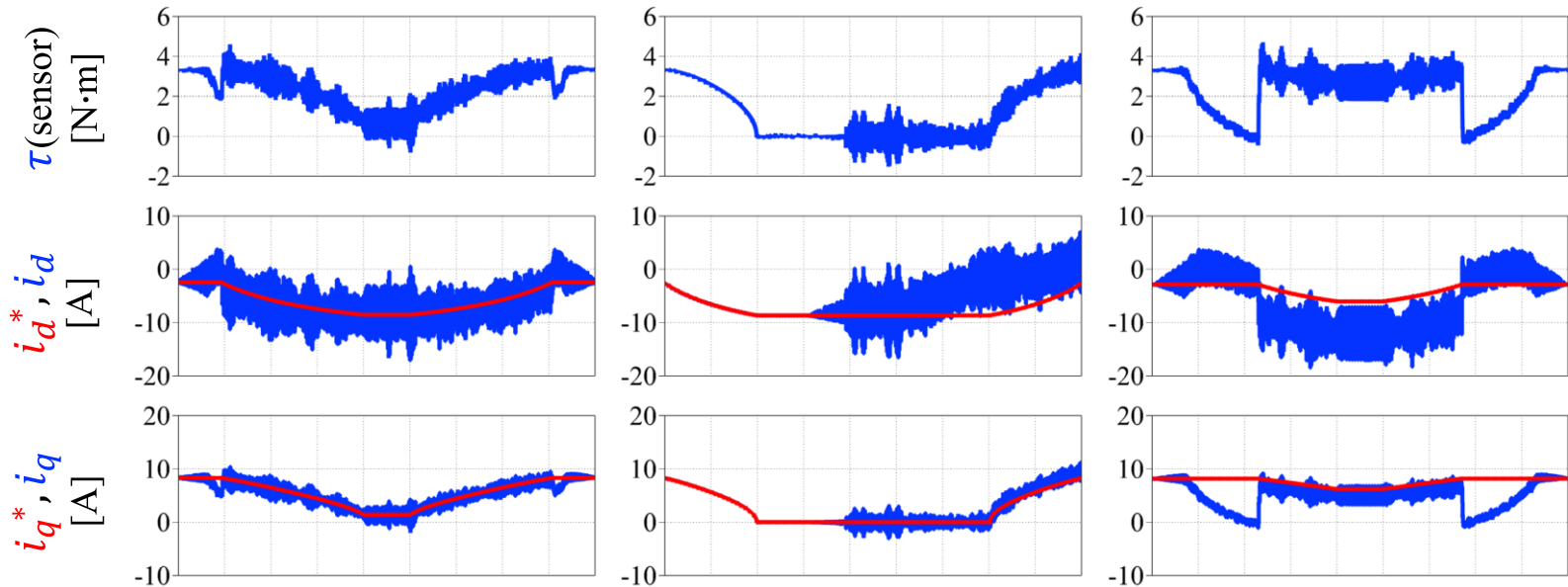
31

従来法

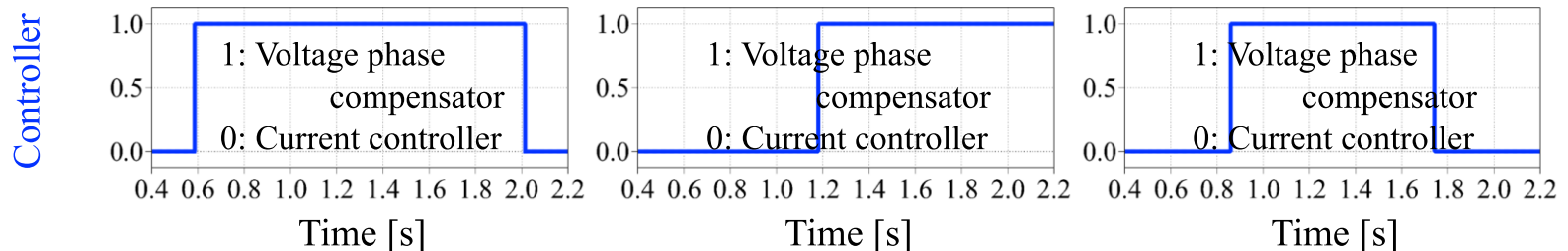
真値

$K_E \times 1.2$

$K_E \times 0.8$



制御器内の誘起電圧定数 K_E をすべて変更
実現不可能なトルク指令値を生成し、駆動可能領域縮小



3. モータ制御技術の紹介(シミュレーション)

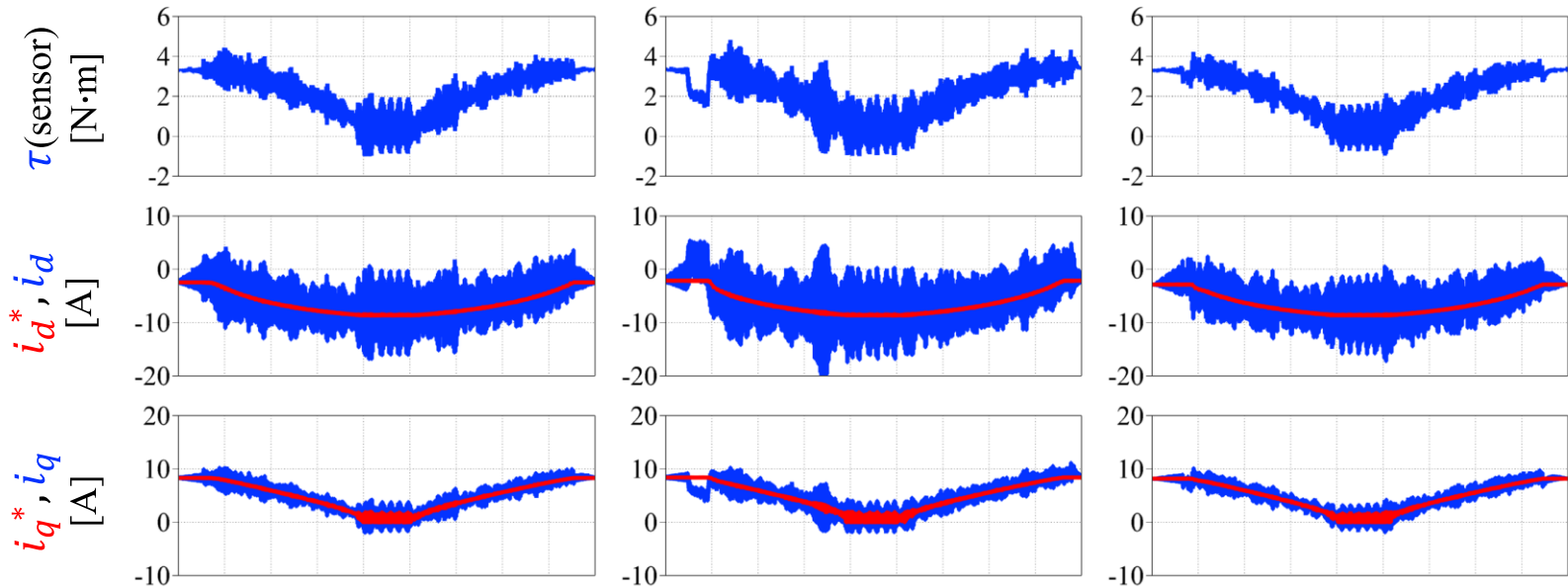
32

提案法

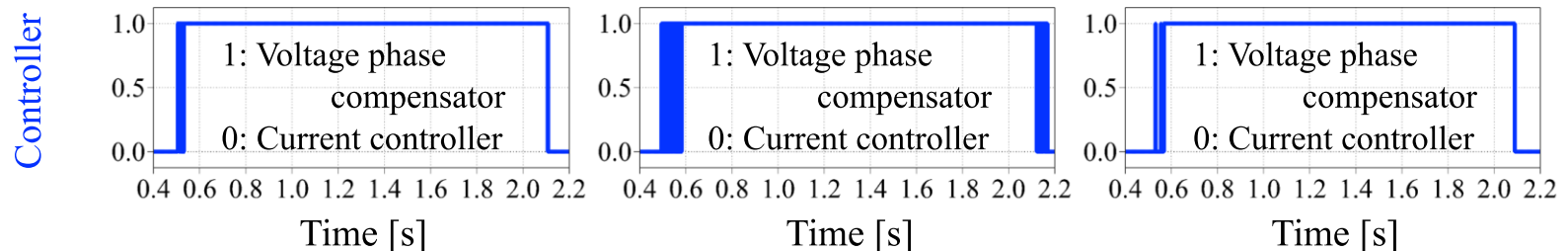
真値

$K_E \times 1.2$

$K_E \times 0.8$



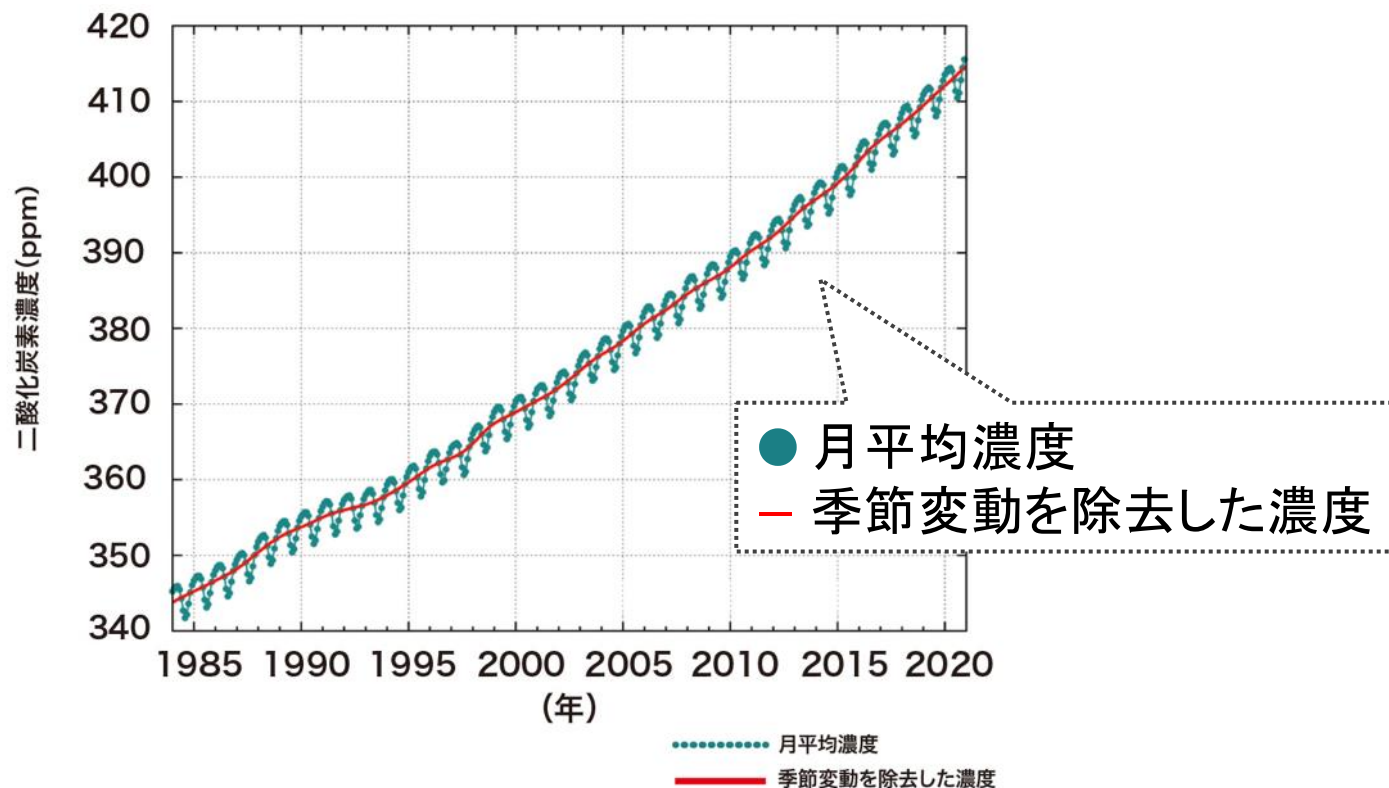
制御器内の誘起電圧定数 K_E をすべて変更
実現可能なトルク指令値を生成し、駆動可能領域はほぼ同様



- 回生エネルギーの回収が高効率に大きく寄与
- 現在では、エネルギーマネジメントは必須
- これらを統合する頭脳となる、制御技術もノウハウを蓄積すべき
- モータ制御は、
高出力密度化したモータの性能を如何に引き出すか
冗長設計の実現、センサレス駆動の実現 が恒久的な課題
- 高出力駆動を実現する制御法を紹介

ご清聴ありがとうございました

□ 地球全体の二酸化炭素濃度の経年変化



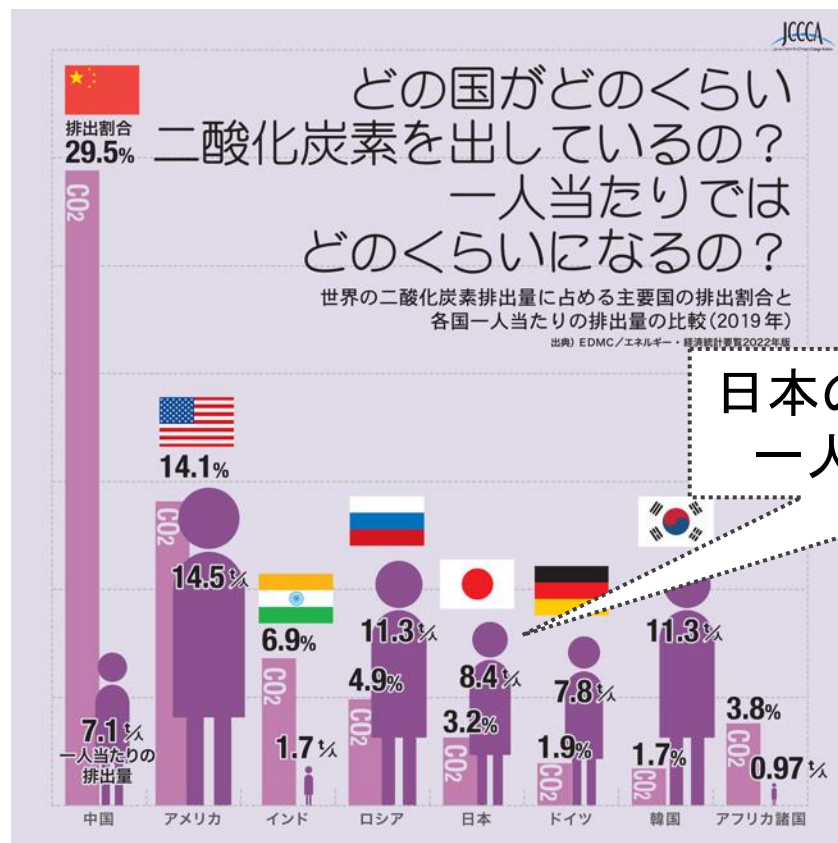
出典：温室効果ガス世界資料センター(WEDCGG)

「地球全体の二酸化炭素の経年変化」(気象庁ホームページ)

全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト(<https://www.jccca.org/>)

ほぼ単調増加しており、地球環境問題として懸念

□ 世界の二酸化炭素排出量に占める排出割合



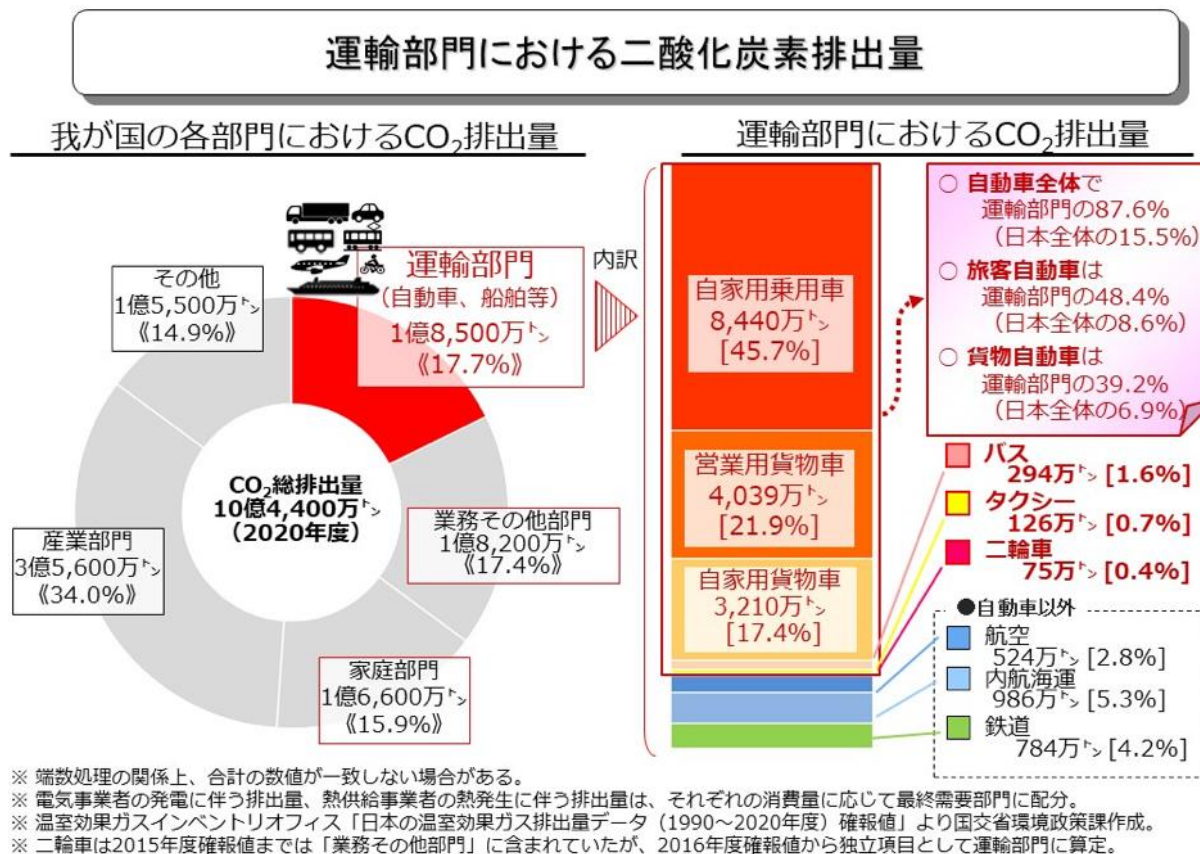
日本の総排出量は世界5位
一人当たりでは世界4位

出典: EDMCエネルギー・経済統計要覧2022年版

全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト(<https://www.jccca.org/>)

世界の主要国として、排出量削減に向けた努力が必要

□ 日本におけるCO₂排出量の内訳

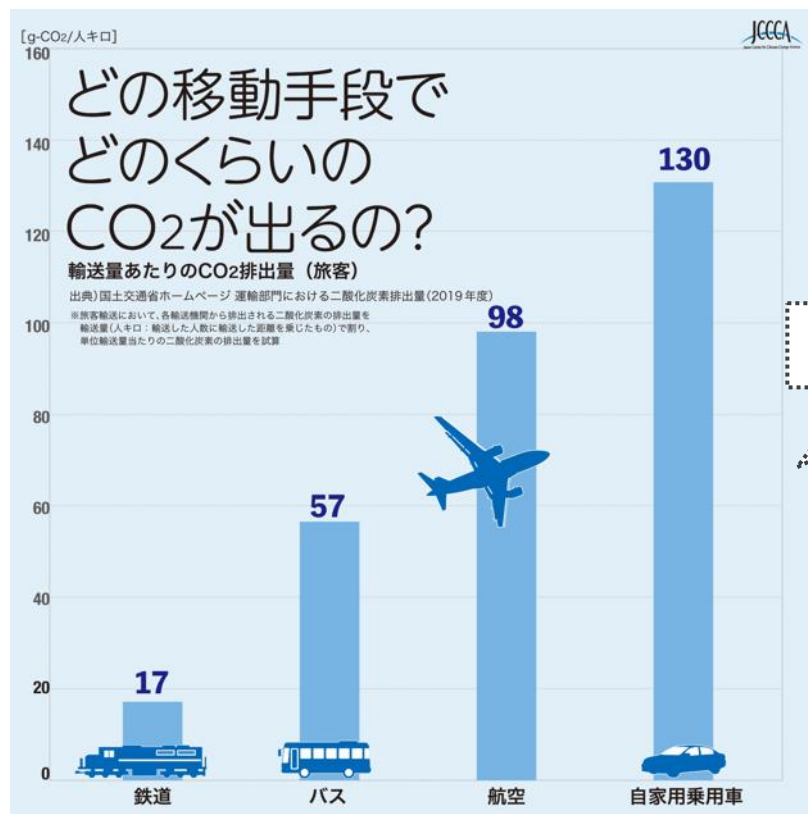


出典：国土交通省ウェブサイト 運輸部門における二酸化炭素排出量

(https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html)

自家用乗用車が大半を占めており、削減は必須

□ 交通手段別のCO₂排出割合



排出量／輸送量

出典：国土交通省ウェブサイト 運輸部門における二酸化炭素排出量（2019年度）
全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト (<https://www.jccca.org/>)

昨今注目されている航空機よりも、自家用乗用車の方が排出

□ 自動車の電動化に向けた検討

① 装備品の電動化

利点: 燃費向上、整備性向上

油圧システムでは作動油配管の接続部分にも圧力がかかるため、作動油漏れがないか頻繁な整備が必要、比較的に重量増大

② 動力源の電動化

利点: 燃費向上、整備性向上、振動・騒音・CO₂排出量の低減

モータを分散配置することで、小形化・軽量化、冗長設計が可能
エンジンと比較して、モータで発生する振動は少なく、高効率

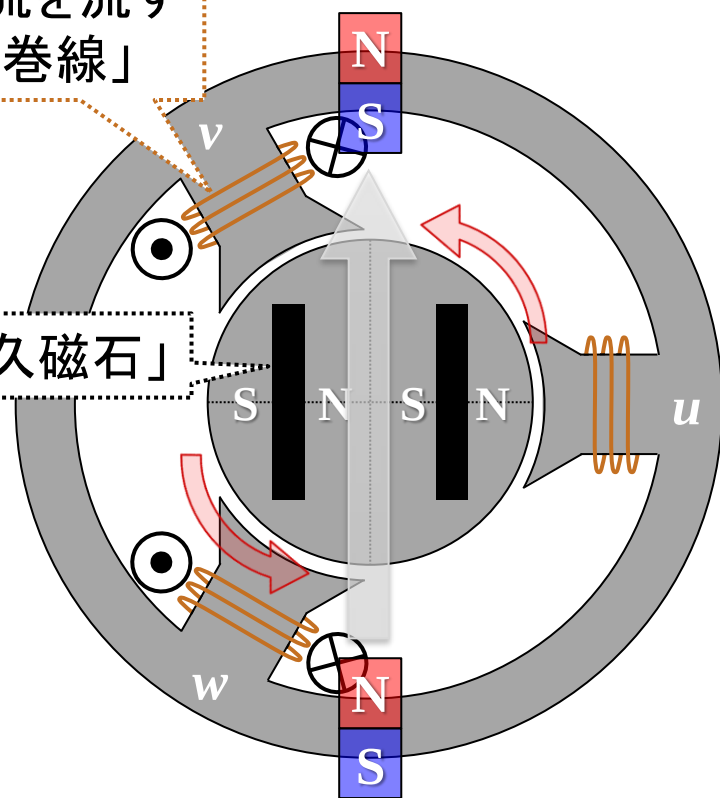
これらの利点を享受すべく、電動化が推進

□ モータの高出力密度化

高出力化に向けて発展させるべき課題

電流を流す
「巻線」

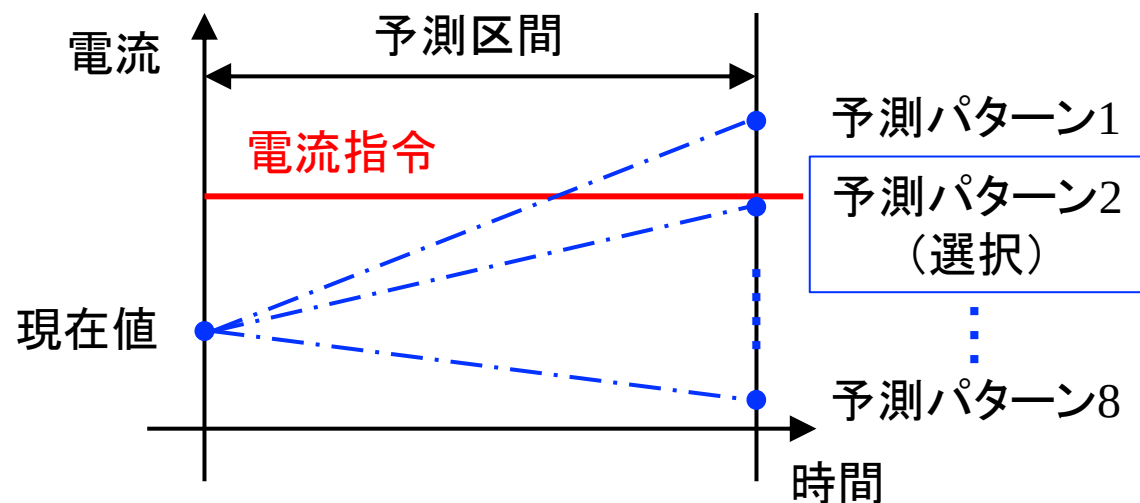
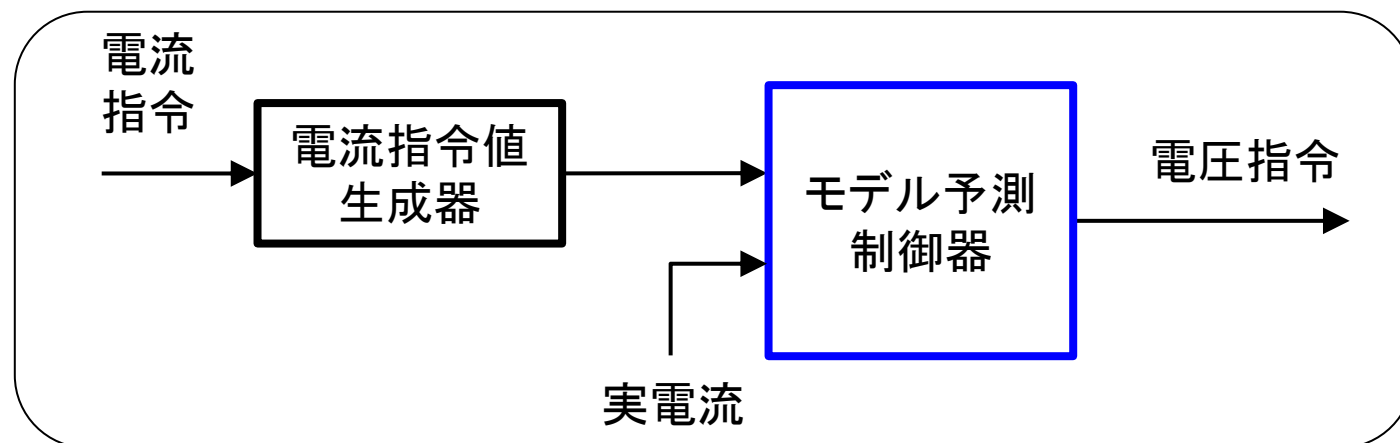
「永久磁石」



- ✓ 永久磁石の性能改善
磁力の強さ、減磁耐性
- ✓ 電流密度の向上
発熱への対策(冷却)
- ✓ 固定子(鉄心)材料の性能改善
飽和磁束密度の向上
(大電流を流して電磁石化しても
その磁力の強さには限界がある)

モータそのものの性能改善も今後の課題

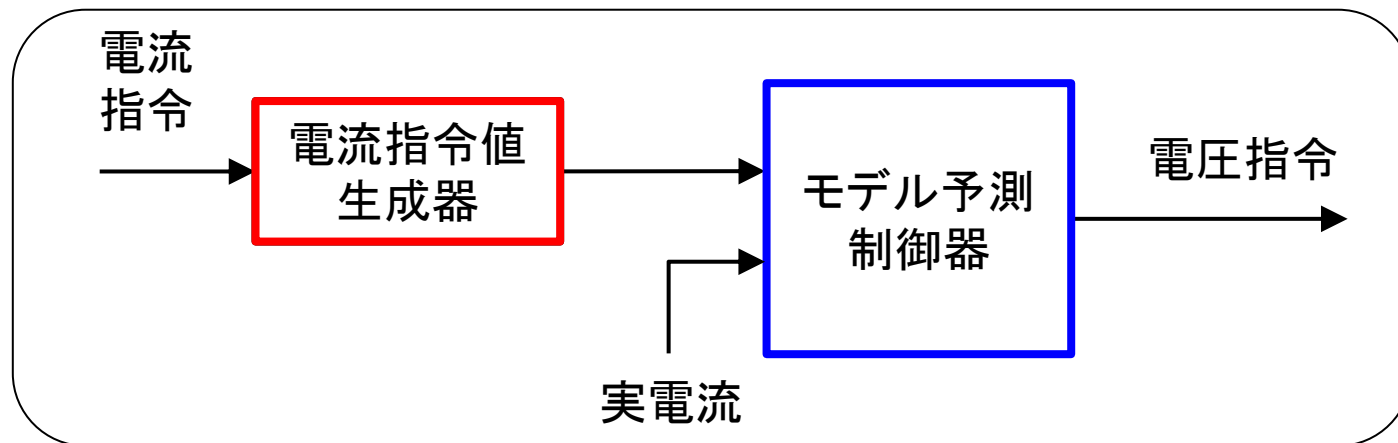
□ モデル予測制御に基づく電流制御系の適用



2レベル三相電圧形
インバータの場合
瞬時空間電圧ベクトルは
 $2^3 = 8$ 通りのみ

最も偏差が小さくなる
瞬時空間電圧ベクトルを
探索して駆動に用いる手法

□ モデル予測制御に基づく電流制御系の適用



- ✓ 電流応答の大幅な改善
- ✓ 駆動可能領域の拡大

など、有効性は広く示されている

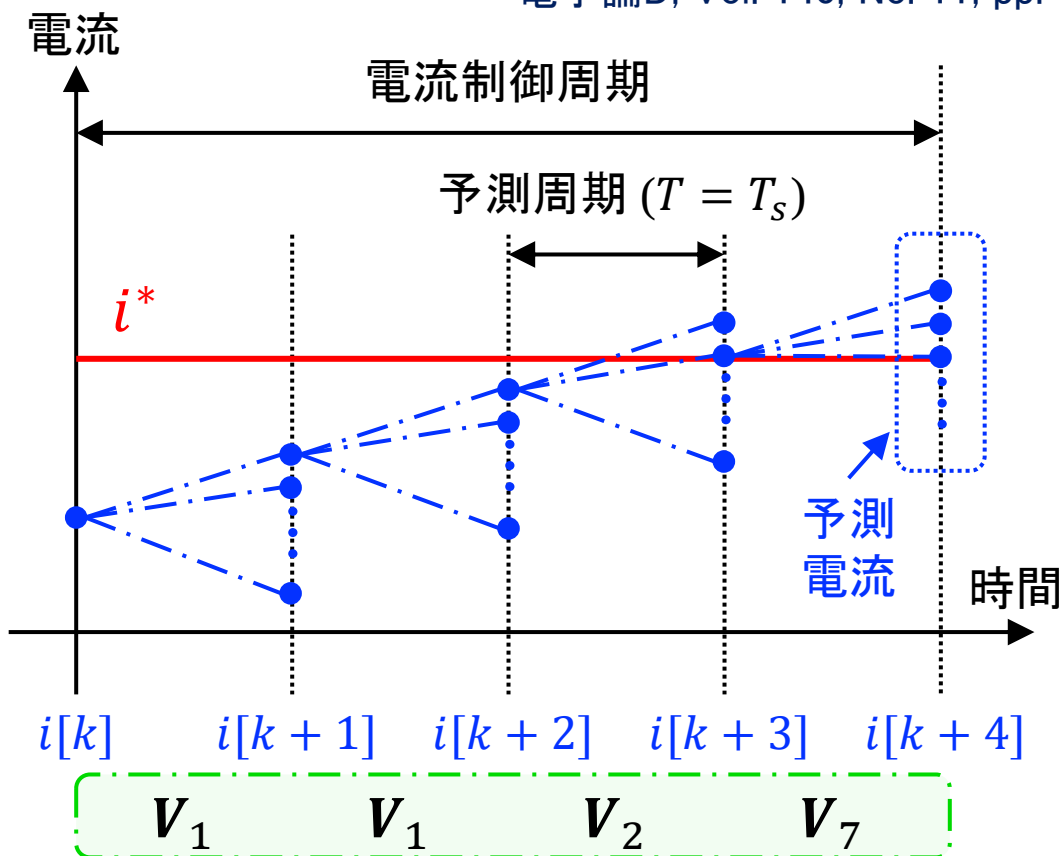
ただし、電流指令値の生成はほぼフィードフォワード制御
(ルックアップテーブル作成の煩雑さ、ロバスト性低下)

モデル予測制御系のためのフィードバック型弱め磁束制御を提案

□ 電流制御周期と予測周期との関係

サンプリング周期 T は任意性あり、電流脈動抑制には短い方が有利※

嶋岡 雅浩・道木 慎二:「PMSM電流制御系構築のためのモデル予測制御の設計法」,
電学論D, Vol. 140, No. 11, pp. 793-806 (2020)



T を電流制御周期の $1/4$ として

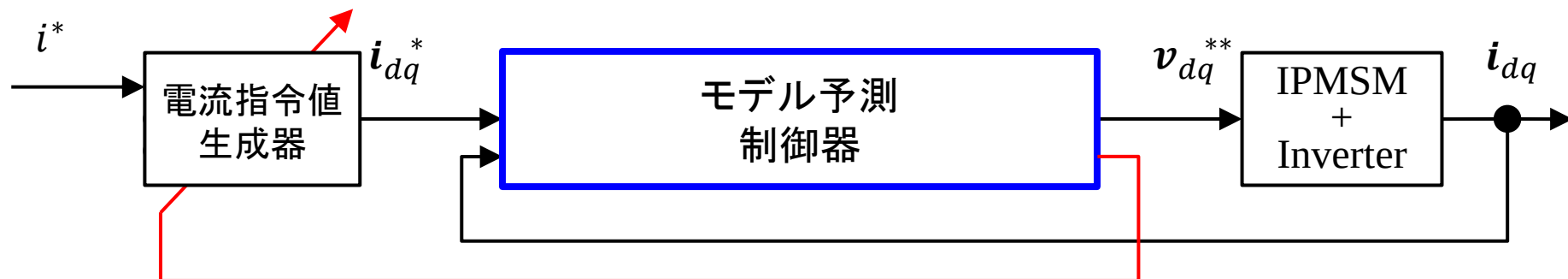
電流指令値に最も追従する
パターンを探索で求める

このパターンの $d-q$ 換算値を

それぞれ単純平均したものを
各軸の電圧指令値として利用

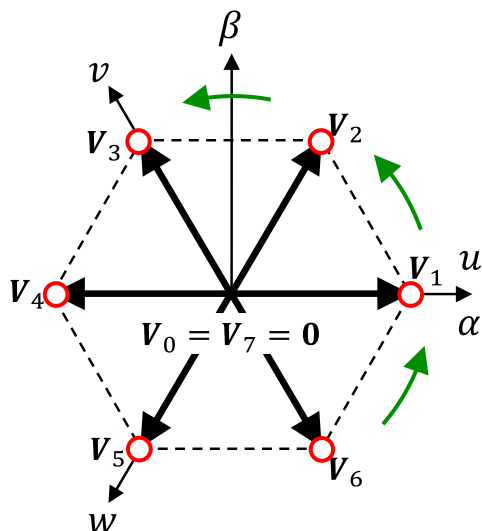
(PWM の方式は変更せず)

□ 提案法のコンセプト



瞬時空間電圧ベクトルの時系列パターン (例: $V_1 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_7$)

従来法と同様、何かしらの電圧情報をフィードバックすることを考える

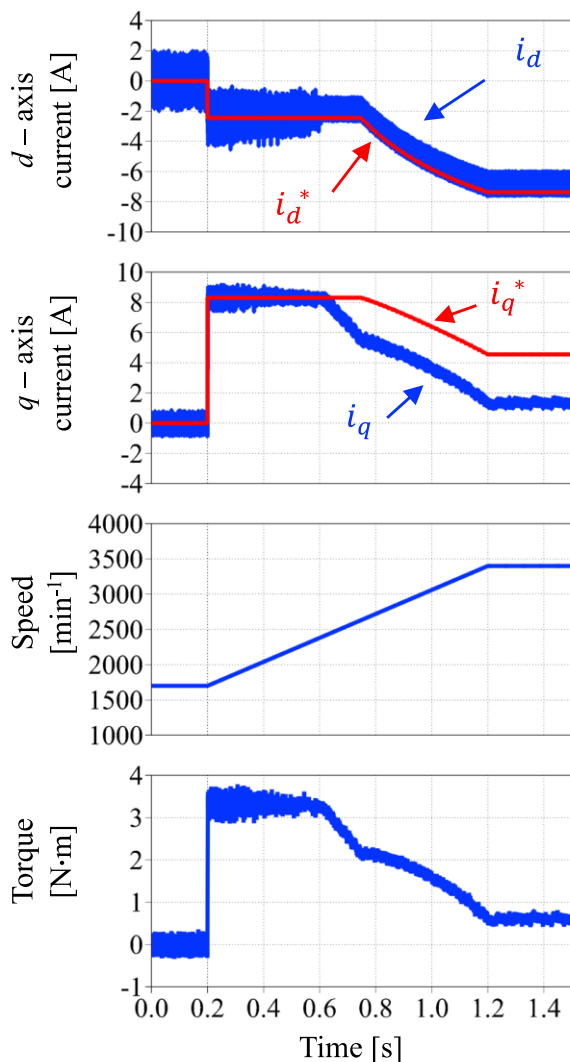


弱め磁束制御時には、電圧を最大限利用するはず

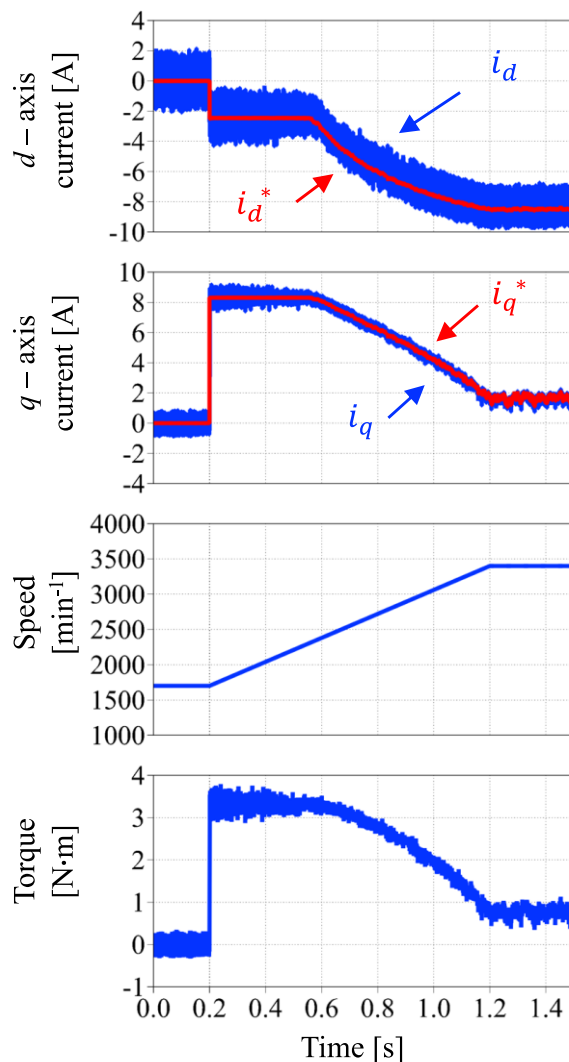
理想的には、 V_1 から V_6 を順番に推移
(V_0, V_7 が選択されれば、電圧に余裕あり)

瞬時空間電圧ベクトルの時系列パターン の
フィードバックが有効

従来法(電圧方程式)



提案法



考慮する区間

50 μ s (4予測周期)

重み付け(マージン計算)

同一ベクトルの連続 -0.5

ベクトルの切り替わり $+0.5$

V_0, V_7 の選択 $+1.0$

速度の上昇に伴い、
弱め磁束制御を実施

提案法は実現可能な
電流指令値に修正

提案法の
妥当性を確認