

技術論文

電動化車両における, モータ, インバータの各設計変更に伴うCN (Carbon Neutral) の相互影響予測

岩月 健
Ken Iwatsuki

黒川 顕史
Akifumi Kurokawa

桂田 竜児
Ryuji Katsurada

概要

本稿では, 関連部品の特性およびMGの駆動状態が損失に与える影響を考慮した簡易MGモデルを構築し, 車両モデルと接続することで, 車両全体のCO₂排出量を定量的に算出可能な評価モデルを構築した. 本モデルにより, 部品構成, 設計条件および制御条件の違いが, 車両全体のCO₂排出量に及ぼす影響を車両視点で一貫して評価することが可能である.

本モデルは, 車両視点に立脚したシステム検討を可能とし, OEMとの仕様最適化検討やシステム価値の定量的評価に活用できる. 今回はその一例として, 部品(モータ評価用インバータ向けパワー半導体)および制御の変更が車両全体のCO₂排出量に与える影響について示す.

1. はじめに

カーボンニュートラル実現に向け, あらたな価値を創造し, 電動化を加速させることが求められている. 電動化に対応するため, 1人乗りの小型車両としては電動スクーターや超小型EV, 大型車両としては電動バスやトラックなどが挙げられ, それぞれに数ワットから数百キロワットの駆動モータが搭載されている. 車両の利用形態も多様で, 通勤のような低・中速域を主とするケースから, 長距離運送用の高速域を主とするケースまで存在する. また, PE要素部品(例: モータ・インバータなど)は, 車両全体の性能および効率に多大な影響を及ぼす重要部品である. このため, 出力や使われ方の異なるこれらの電動化システムの開発には多くの工数が必要となる.

これらの部品による車両全体への影響を開発初期段階で評価可能なマルチドメイン開発環境の構築が求められており, このような開発環境が整備されれば, CO₂排出量削減を目的とした車種ごとのモータ・インバータ設計や制御技術設計, ならびにシステム最適化の検討が実現可能となる.



図1 資源循環システム

2. 開発のねらい

マルチドメイン開発環境として, モータ, インバータの設計変更に伴う, 車両への影響 (CO₂排出量) を可視化できるモデル環境を整備した. (図2参照)

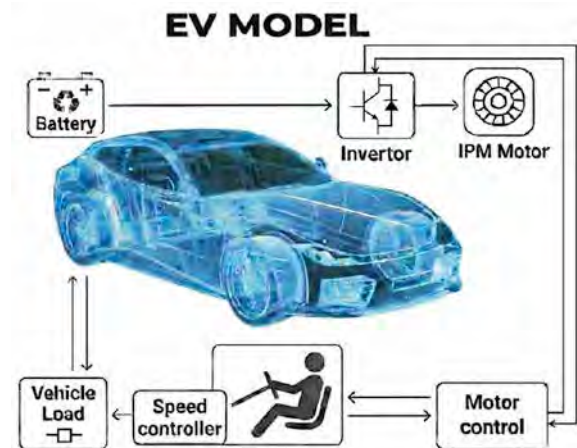


図2 EVモデル

本稿では, 本モデルを適用したシステム最適化の実例として, インバータスイッチングに起因するスイッチング損失およびモータ損失に焦点を当てる. さらに, ハードウェア構成および制御手法の変更がCO₂排出量へ与える影響について詳細に考察する.

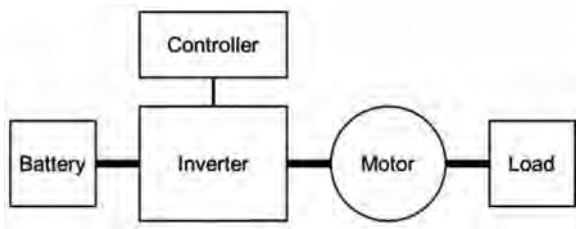


図3 制御モデル

電動車両において、モータ、インバータを駆動制御する際、バッテリー直流電圧を交流電流に変換する手法としてゲート信号をPWM制御することが一般的である。そのPWMスイッチング周期(周波数)が及ぼす影響は、図4で示すように、スイッチング周波数の高い場合、モータ損失(CO₂排出量)低減に有利になるが、インバータでは低い周波数の方がインバータ損失(CO₂排出量)低減に有利になる。両者の最適条件は異なるため、全体設計ではバランスを考慮する必要がある。

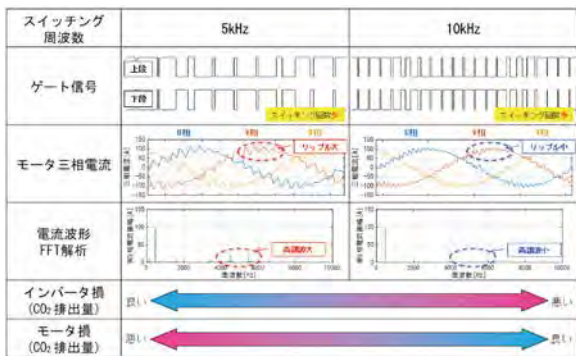


図4 スwitching周期(周波数)が及ぼす影響

3. 電動主要部品とCN(Carbon Neutral)の相互影響

今回モデル化したモータとインバータの主要諸元を表1に示す。モータの種類はHEV, EV用のモータとして最も普及している埋込磁石形同期モータ(IPMSM)である。

IPMSMの主要特性(トルク, 三相電流入力時の端子電圧)はd-q軸座標系等価回路を用いると比較的簡単に導出できる。図中の各記号は, v_d, v_q : d軸, q軸電圧[V], i_d, i_q : d軸, q軸電流[A], R_a : 電機子巻線抵抗[Ω], ω_e : 電気角速度[rad/s], L_d, L_q : d軸, q軸インダクタンス[H], Ψ_a : 鎖交磁束[Wb]である。

表1 モータ仕様(試作品)

IPMSM/Inverter	
Phases	3 phases
Poles	4 poles
Max Power	150kW
Power Module	Si-IGBT/SiC-MOSFET

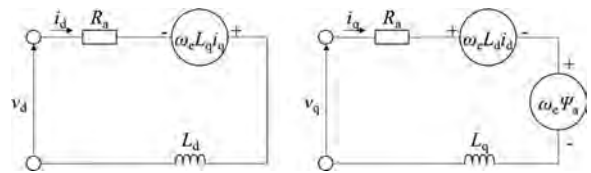


図5 IPMSMのd軸q軸等価回路

図5 IPMSMのd軸q軸等価回路

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = P_n \{ \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (2)$$

本項では、ハード面(パワー半導体の違い)と制御面(スイッチング周波数の違い)の2視点から、CO₂排出量への影響を全3事例で整理する(表2)。

表2 CO₂排出量の影響事例

事例1	走行モードと各部品の特性を考慮した半導体の選定(ハード面)
事例2	インバータを駆動する際のスイッチング周波数による、CO ₂ 排出量への影響(制御面)
事例3	CO ₂ 排出量を最小化できる可変スイッチング方式の提案(制御面)

3.1 事例¹⁾パワー半導体と走行パターンによる、CO₂排出量への影響

3.1.1 検証パターンの説明

本事例は、以下の特徴のある市販品2種類のパワー半導体と2種類の走行パターンの組合せでCO₂排出量を算出する。

表3 パワー半導体(PE)の説明

項	名称	特徴
PE1	Si-IGBT※1	市場において多くのBEVで採用
PE2	SiC-MOSFET※2	高い耐熱性や省エネルギーにより、次世代電動化システムに期待

※1 Silicon-Insulated Gate Bipolar Transistor;

富士電機株式会社製: 2MB1800XXF170-50

※2 Silicon Carbide Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor;

三菱電機株式会社製: FMF1200DXZ-24B

表4 走行パターン(PT)の説明

項	名称	特徴
PT1	WLTC※3	都市部, 郊外, 高速道路の3つのセグメントで構成され, 現実の運転条件を反映. 低中高速バランスがよい
PT2	HWY※4	高速道路での連続した高速走行をシミュレート. 60km/hが90%を占める

※3 Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle

※4 Highway Fuel Economy Test

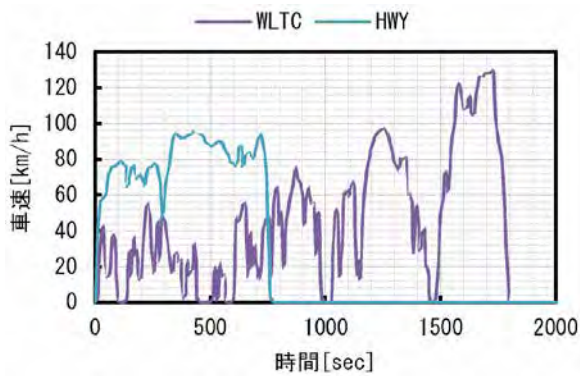
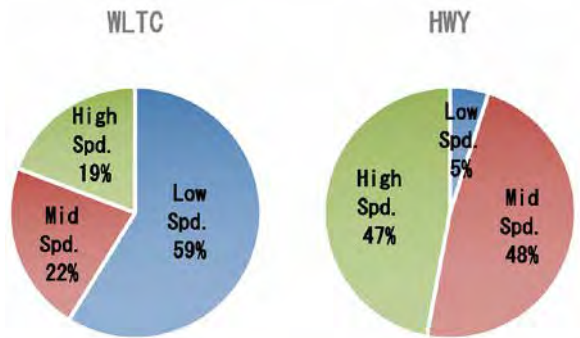


図6 WLTC,HWY走行パターン比較



項目	内容
Low Spd.	0 to 50 km/h
Mid Spd.	50 to 80 km/h
High Spd.	80 to 130 km/h

図7 WLTCとHWY走行パターンの速度割合

CO₂排出量を算出するために、それぞれの車両走行パターンから、モータトルク、回転数の関係を導出する。(図8,9)

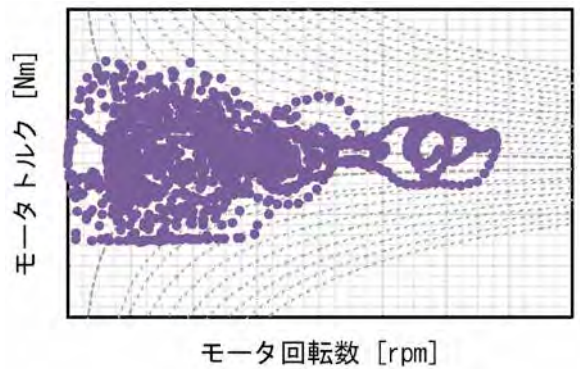


図8 WLTC(トルク-回転数軌跡)

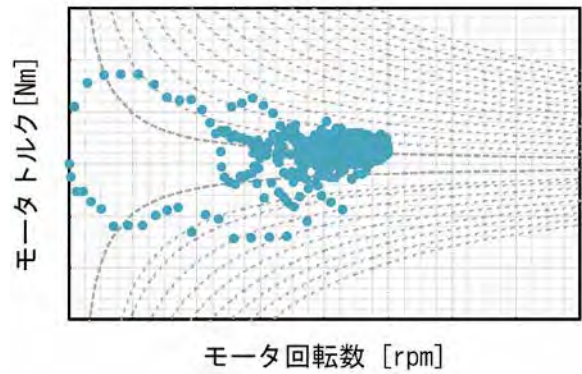


図9 HWY(トルク-回転数軌跡)

3.1.2 CO₂排出量比較結果

図10と図11にCO₂排出量のハード比較結果を示す。それぞれの走行パターン下で発生するCO₂排出量がSi-IGBTからSiC-MOSFETに変更することで低減していることがわかる。

(損失からCO₂排出量への換算は環境省が提示している,CO₂排出係数を参考にした)

特に,図12からわかるように, WLTCとHWYの間には,26%のCO₂排出量に乖離が発生した.この結果から,高速巡行するような車両では,SiC-MOSFETの変更効果が低いことが推測できる。

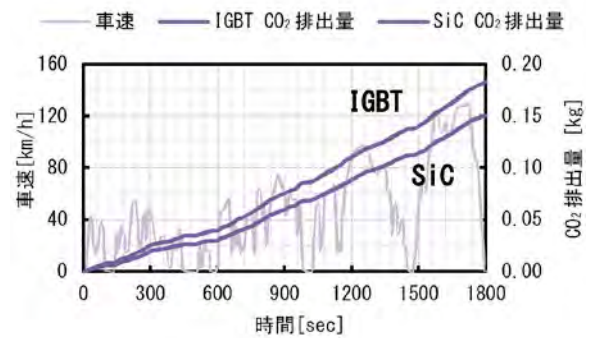


図10 WLTC(PE毎-CO₂排出量)

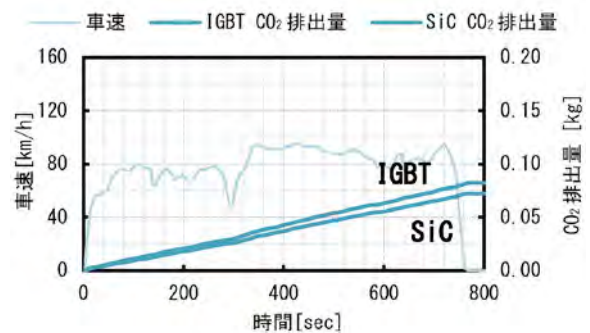


図11 HWY(PE毎-CO₂排出量)



図12 Si-IGBT vs SiC-MOSFET CO₂排出量の[kg]

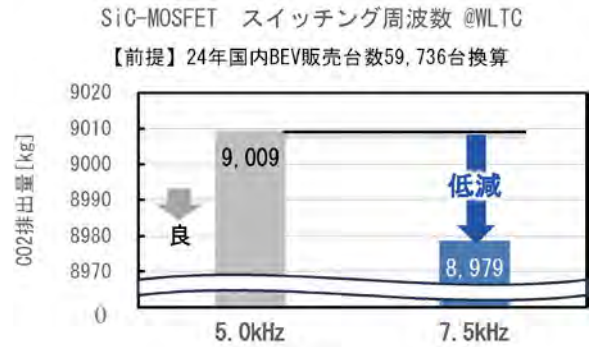


図14 2種のスイッチング周波数のCO₂排出量比較

3.2 事例²⁾スイッチング周波数変更のCO₂排出量への影響

前節にて、CO₂削減量効果の高いWLTCに関して、さらなる考察をすすめる。

電動化システムでは、インバータでPWM制御を行い、モータに交流電流を流している。この電流には高調波が含まれており、発生する損失はスイッチング周波数によって変化する(図4)。また、モータ損失は式(3)で表され、一般的に電流高調波が少ないほうが鉄損は少なくなる。

$$\text{モータ損失} = \text{銅損}_{※1} + \text{鉄損}_{※2} \quad (3)$$

$$(\text{※1}: P_{Cu} = I^2 R, \text{※2}: P_{Fe} = k_h B^2 f + k_e B^2 f^2)$$

I:モータ電流

R:モータコイル抵抗値

k_h:ヒステリシス損の係数

k_e:渦電流損の係数

B:磁束密度

f:磁束密度変動周波数

(電気角基本周波数+PWM由来の高周波成分を含む)

3.2.1 CO₂排出量比較結果

電動駆動システムモデルにて、2種(5kHzおよび7.5kHz)のスイッチング周波数を設定し、WLTCパターンを走行させ、CO₂排出量を算出した(図13)。

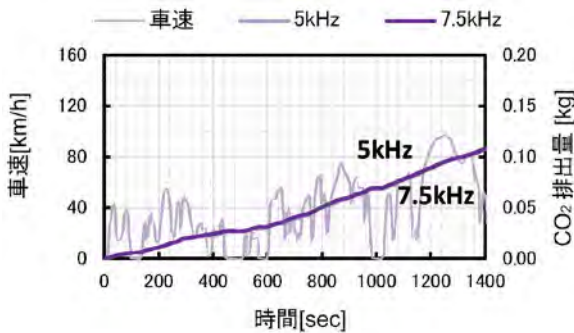


図13 WLTC下の2種のスイッチング周波数でのCO₂排出量

図14に示す比較結果から、7.5kHzスイッチング周波数は、WLTC走行パターンにおいては、30kg(0.33%)のCO₂削減に貢献できる仕様であることが明確となった。

3.3 事例³⁾CO₂排出量を最小化できる可変スイッチング方式の提案

3.3.1 スwitching周波数の改善可能性予測

本件は小型車両に着目し、より街乗りに近い走行パターンである“UDDS”(表5)を対象に、事例(2)で使用した2種のスイッチング周波数の結果を用い、動作点ごとにシステム損失の差分(7.5kHz時損失 - 5kHz時損失)を算出した。この結果が正負に振れることから、動作点ごとに最適なスイッチング周波数があると予測を立てることができる。

表5 走行パターンの説明

No	名称	特徴
PT3	UDDS※5	主に市街地走行を模擬しており、低速・頻繁な停止・発進が多い

※5 Urban Dynamometer Driving Schedule

例えば、図16内①のような動作点では、システム損失低減量[W](右軸)が負を示す領域がある。このことから5kHzスイッチング周波数は、7.5kHzスイッチング周波数よりも、損失が大きいことがわかる。

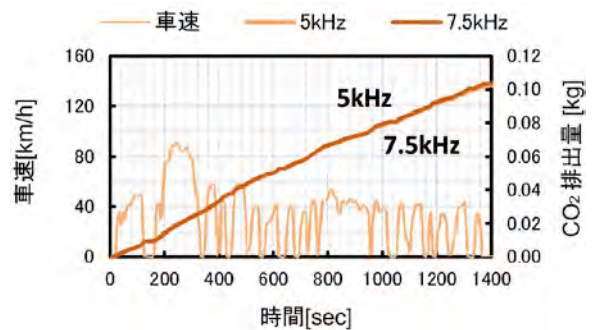


図15 UDDS下の2種スイッチング周波数CO₂排出量比較

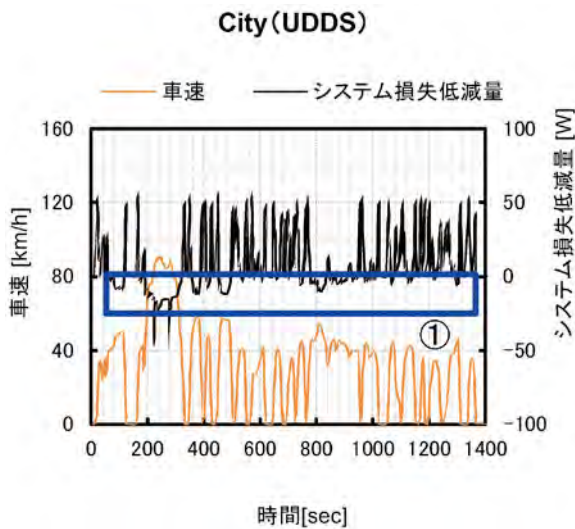


図16 UDDS(システム損失低減量)

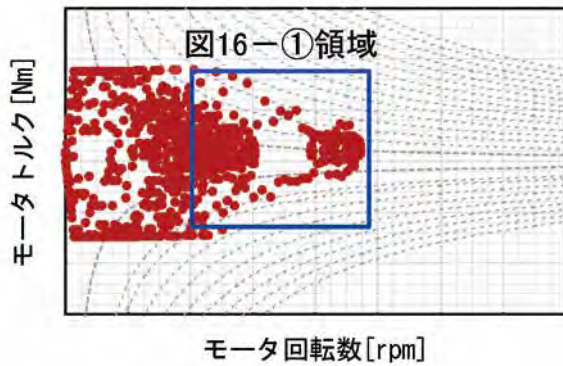


図17 UDDS(トルク - 回転数軌跡)

3.3.2 可変スイッチング周波数の改善可能性予測

前述での予測を踏まえ、システム損失が最適となるよう図18のように動作点ごとに異なるスイッチング周波数を設定しCO₂排出量を算出すると、98kg(1.74%)のCO₂削減に貢献できる仕様であることが明確となった(図19)。

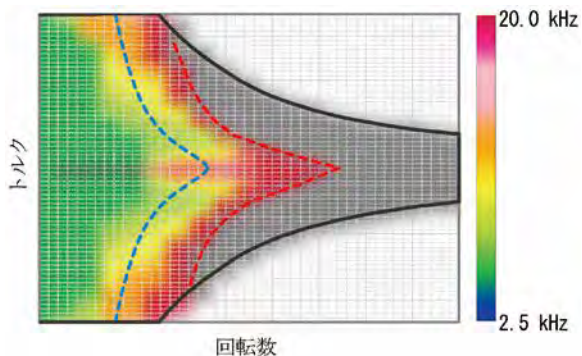


図18 可変スイッチング周波数マップ(トルク - 回転数)

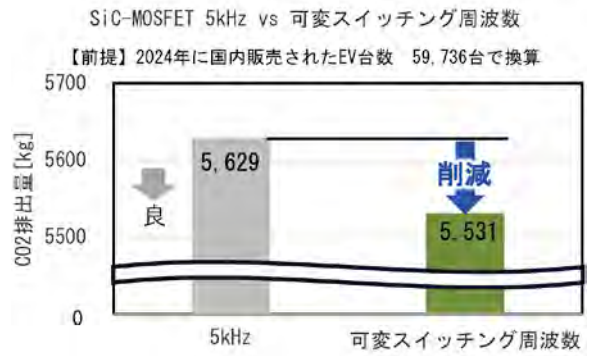


図19 5.0kHzと可変スイッチング周波数の比較

4. まとめ

今回開発したモデル環境を用いてCO₂排出量を推定することで、OEMとの仕様検討時に数値によるメリット・デメリットの評価が可能になる。また、試作前の制御やハードウェア検討にも活用できると考える。

本論文ではスイッチング周波数の変更影響について、CO₂排出量に注目して解析を進めたが、スイッチング周波数の変更は、熱マネジメント、NV、トルク応答性に関しても寄与を持つことが知られているため、システム最適設計のためにはマルチフィジックス環境が重要であると考える。

今後さらに激化するeAxle開発競争においても、今回の開発で得た知見を活かしつつ、新技術を積極的に採用し競争力向上に努めたい。

参考文献

- 1) 株式会社アイシン 技術開発「電動化への取り組み」
<https://www.aisin.com/jp/technology/electric/>
- 2) 株式会社アイシン ニュース「統合報告書2025」
<https://www.aisin.com/jp/news/2025/010386.html>
- 3) 環境省 温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度
<https://policies.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/calc.html>



岩月 健
第2先行開発部
第2先行制御開発室
モータ制御開発に従事



黒川 顕史
第2EV技術部
コンポーネント開発室
駆動モータ開発に従事



桂田 竜児
第2先行開発部
第2先行制御開発室
モータ制御開発に従事



加藤 浩一
第2先行開発部
第2先行制御開発室
モータ制御開発に従事



榎木 善徳
第2先行開発部
第2先行制御開発室
モータ制御開発に従事



新美 秀顕
第2EV技術部
コンポーネント開発室
MGハード電磁気設計に従事