

航空機電動化のための パワーエレクトロニクスシステムの研究開発

横浜国立大学
大学院工学研究院
小原 秀嶺

研究背景・目的

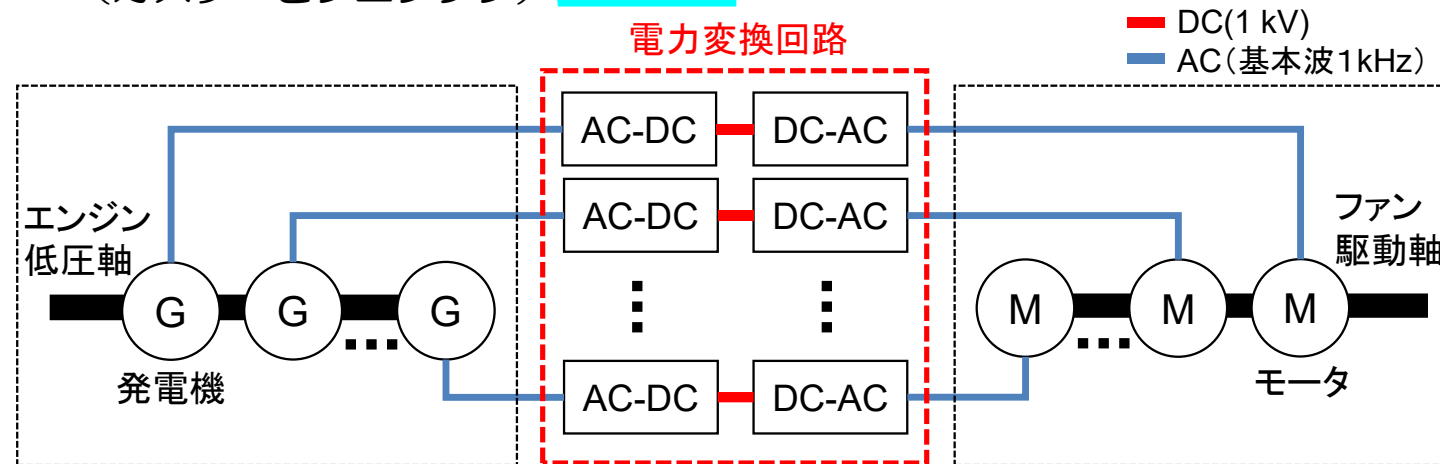
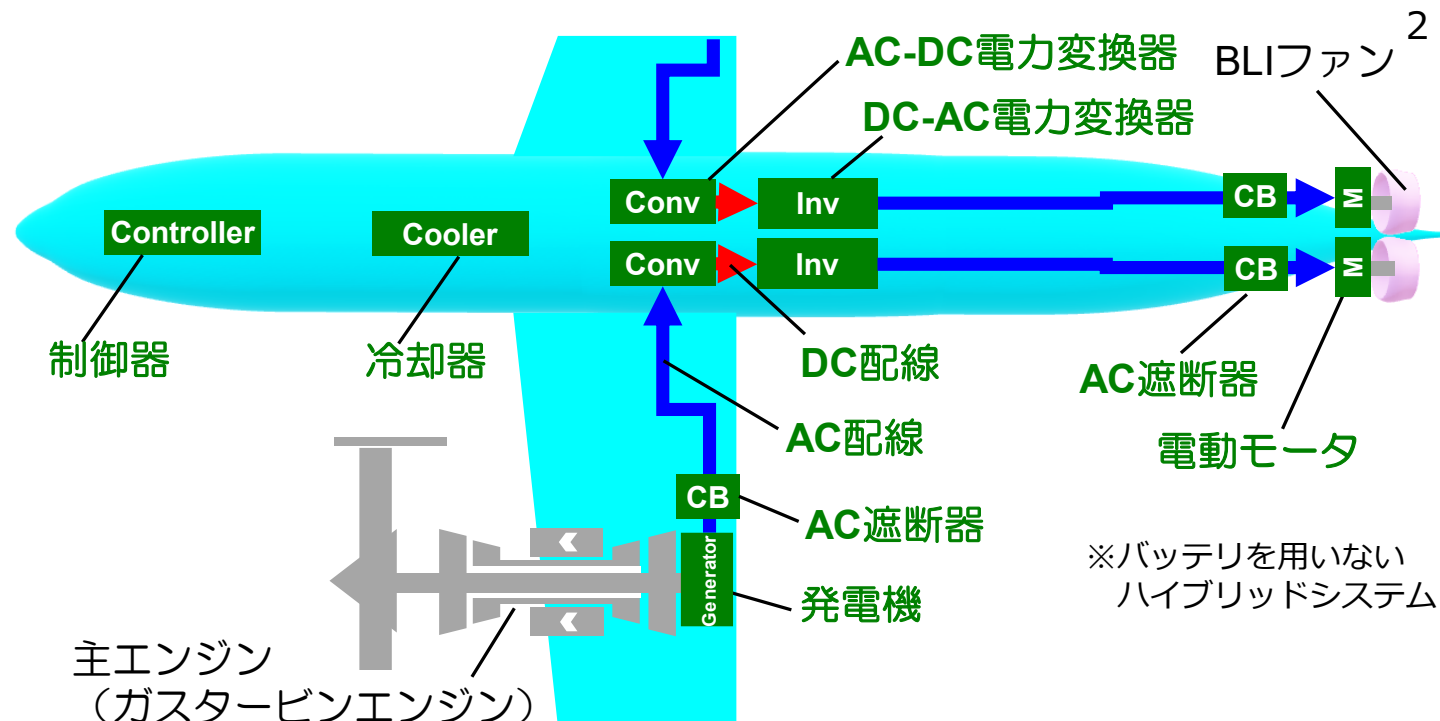
JAXA MEGAWATTプロジェクトと連携

- 航空機由来のCO₂削減手法の一つとして航空機の電動化・ハイブリッド化が提案
- エンジンの動力を発電機で抽出し最適配置した電動ファンを駆動することで推進効率向上
- ターゲット航空機：200人乗り旅客機
- 電動ハイブリッドシステムの採用により数%の燃費向上が期待

2MW（500kW×4台多重接続）システム
(左翼と右翼にそれぞれ 1MW×2台)

**発電機G→AC-DC→
DC-AC→モータM(ファン)**

→ノンフライトエッセンシャルシステム



本研究対象の位置付け

□近年の電動航空機研究状況

	FEATHER (JAXA) ※1	GE (NASA) ※2	イリノイ大学 (NASA) ※3	本研究目標値
状態	飛行経験あり	実験段階(発電機接続)	実験段階(RL負荷)	実験段階(モータ接続)
インバータ方式	Si-IGBT 2L	SiC+Si 3L-ANPC	GaN 9L FCML	マルチレベル回路を検討
DC電圧	128 V	2400 V(±1200 V)	±500 V	1000 V or ±500 V
容量	15 kW *4	1 MW	5.8 kW/ユニット (目標10 kW)	500 kW *4 =2 MW
効率	93%	99.1 %@1.2 MVA	98.5%@2.5 kW (目標 98%以上)	99%~@500 kW
出力密度	4.2 kW/kg	14.3 kW/kg (冷却系含まず)	12 kW/kg (目標12以上)	19 kW/kg 以上 (冷却系含まず)
冷却	液冷	液冷	液冷	液冷

出力密度19kW/kg以上のインバータを検討する
⇒500kW インバータの総質量目標値 26.3kg

1. “航空機用電動推進システム技術の飛行実証” JAXA 研究開発資料 2017
2. D. Zhang, J. He, D. Pan, M. Dame and M. Schutten (GE), "Development of A High-Power Density Megawatt-Scale Medium-Voltage Power Converter for Aircraft Hybrid-Electric Propulsion Systems," 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), Indianapolis, IN, USA, 2019, pp. 1-6, 2019.
3. T. Modeer, N. Pallo, T. Foulkes, C. B. Barth and R. C. N. Pilawa-Podgurski, "Design of a GaN-Based Interleaved Nine-Level Flying Capacitor Multilevel Inverter for Electric Aircraft Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 11, pp. 12153-12165, Nov. 2020.
4. R. Jansen, C. Bowman and A. Jankovsky (NASA), "Sizing Power Components of an Electrically Driven Tail Cone Thruster and a Range Extender," AIAA 2016-3766. 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. June 2016.

効率・出力密度目標値※4

Table 3 Inverter Key Performance Parameters

	Specific Power (kW/kg)	Specific Power (HP/lb)	Efficiency (%)
Minimum	12	7.3	98.0
Goal	19	11.6	99.0
Stretch	25	15.2	99.5

本研究対象の位置付け

□近年の電動航空機研究状況(2020年以降)

	Irt Saint Exupéry ※5	バージニア工科大学 ※6	ハッティンガム大学 ※7	GE ※8	華中科技大学※9
状態					
インバータ方式	SiC 2LVS	SiC 3LT2I	Si IGBT 3LNPC	SiC+Si 3L-ANPC	SiC 3LANPC
DC電圧	540 V	740 V	3 kV	2.4 kV	1 kV
容量	70 VA	200 kW	4 MW	1 MW	1 MW
効率	99.4%	99.07%	92.5%	99%	99%
出力密度	15 kW/kg	19.7 kW/kg	20.8 kW/L	10 kW/kg	18 kVA/kg
冷却	空冷	液冷	空冷	液冷	極低温冷却

5. D. H. Tran, B. Cougo, G. Segond and H. H. Sathler, "Optimal design of a three-phase 540V/70kVA SiC inverter for aircraft applications," 2023 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Venice, Italy, 2023, pp. 1-6, 2023.

6. X. Zhao et al., "Design and Implementation of SiC-Based 200-kW High-Density High-Speed High-Altitude Electric Propulsion AC Drive System," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 12, no. 5, pp. 5176-5199, Oct. 2024.

7. A. Trentin et al., "Research and Realization of High-Power Medium-Voltage Active Rectifier Concepts for Future Hybrid-Electric Aircraft Generation," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 12, pp. 11684-11695, Dec. 2021.

8. D. Pan, D. Zhang, J. He, C. Immer and M. E. Dame, "Control of MW-Scale High-Frequency “SiC+Si” Multilevel ANPC Inverter in Pump-Back Test for Aircraft Hybrid-Electric Propulsion Applications," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 1, pp. 1002-1012, Feb. 2021.

9. R. Chen et al., "A Cryogenically-Cooled MW Inverter for Electric Aircraft Propulsion," 2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), New Orleans, LA, USA, pp. 1-10, 2020.



June 17 - 20 Anaheim, CA

Power Density Analysis of Dual Multilevel Inverters for Hybrid-Electric Aircraft Propulsion Systems



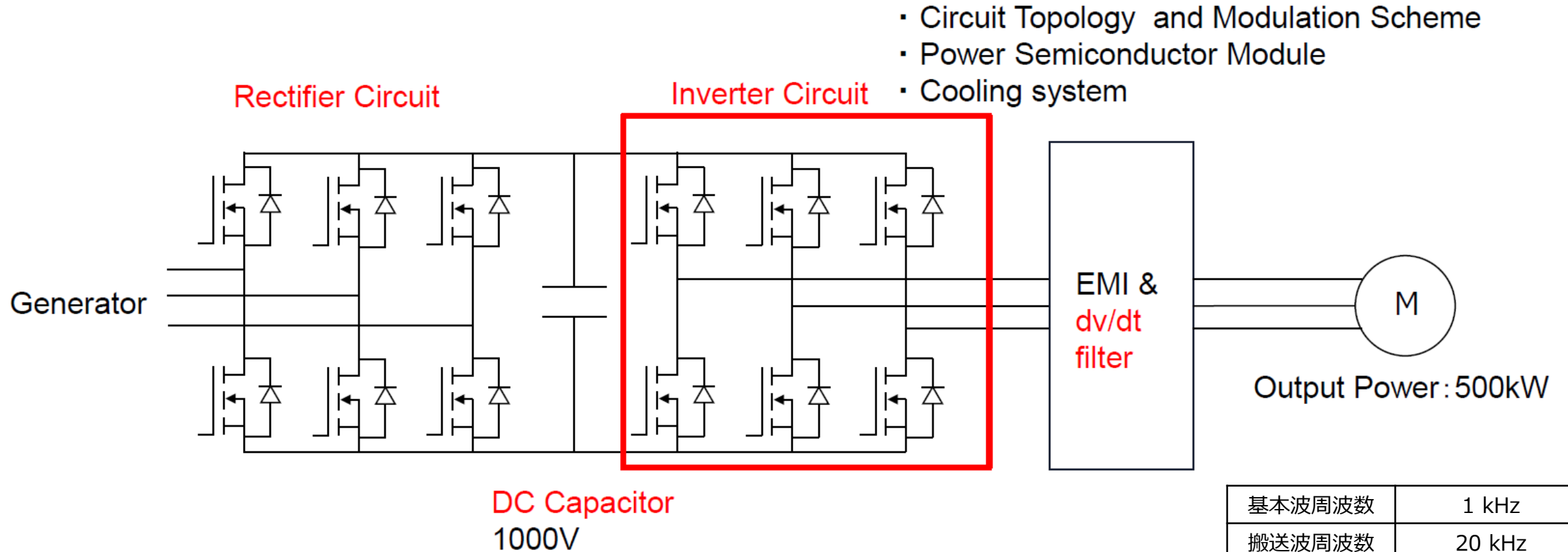
TMU
Power Electronics Lab

YNU
YOKOHAMA National University

Keiji Wada, Katsuya Shingu,
Ryo Shirai, Ryosuke Ota
(Tokyo Metropolitan University)

Yutaro Tawara, Hidemine Obara
(Yokohama National University)

想定するパワーエレクトロニクスシステム



基本波周波数	1 kHz
搬送波周波数	20 kHz
PWM 変調率	0.8
力率	0.8

設計目標値に対するアプローチ

- ①電力変換効率 99 % ⇒ インバータ回路方式ごとの素子損失解析
- ②出力電力密度 19 kW/kg ⇒ 半導体素子の熱解析によるヒートシンク質量の見積もり

パワーエレクトロニクスシステムの効率と重量の算出

半導体モジュール

- ・定格電圧/電流からパッケージ選定
⇒ 体格、質量を決定
- ・シミュレーションモデルを入手



シミュレーションモデル
(電気特性・損失情報を含む)

モジュール体格

ヒートシンク

- ・モジュール体格からヒートシンク体格を決定
⇒ 質量、熱抵抗を算出



ヒートシンク
熱抵抗

回路シミュレータ (PLECS)

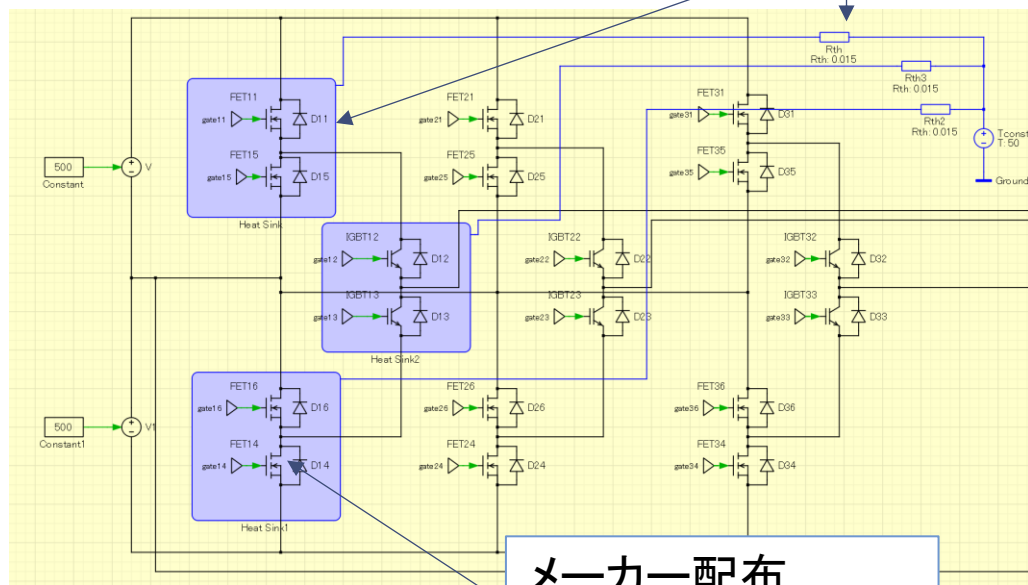
- ・回路損失解析
- ・熱成立性確認

インバータシステムの効率と質量を算出

シミュレーションモデル概要

- 汎用回路シミュレータ PLECSを使用
- メーカー配布モデルにて、導通損失/SW損失の見積もりが可能
- 放熱経路を模擬することでジャンクション温度の見積もりが可能

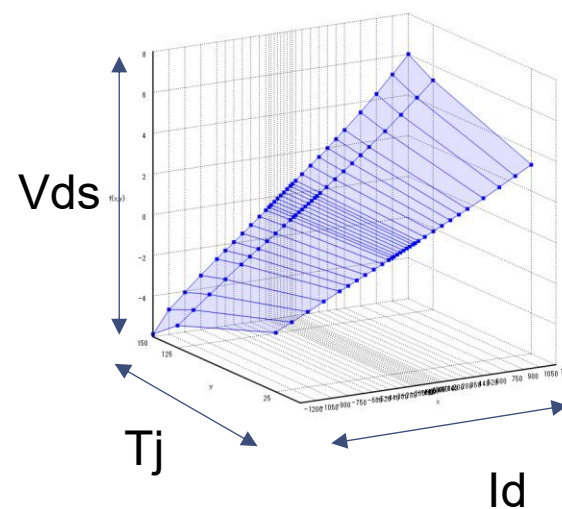
主回路部



ヒートシンクを模擬した
熱回路を形成

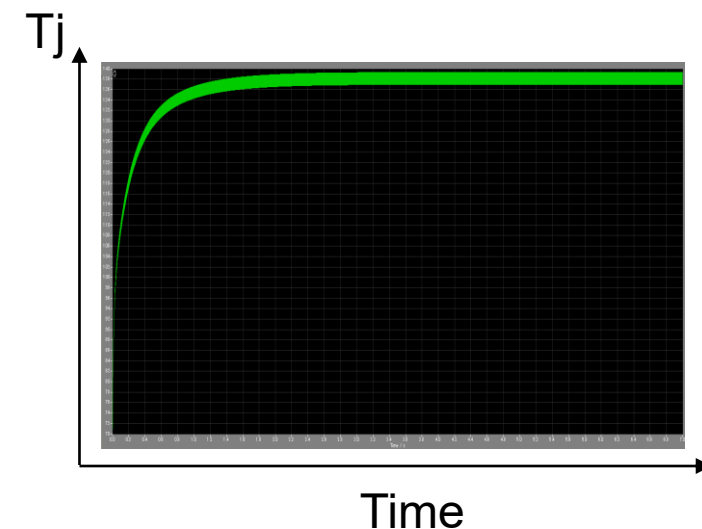
メーカー配布
素子モデルを入力

半導体モデル例 (Vds 特性マップ)



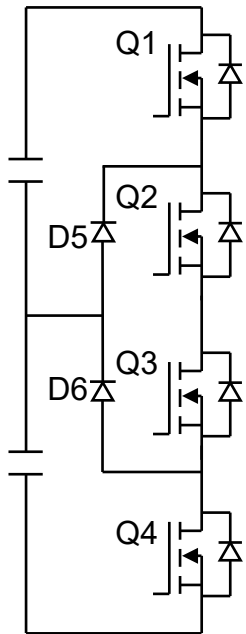
※ターンオン損失・ターンオフ損失も
同様にマップ上で演算

◆アウトプットイメージ (ジャンクション温度)

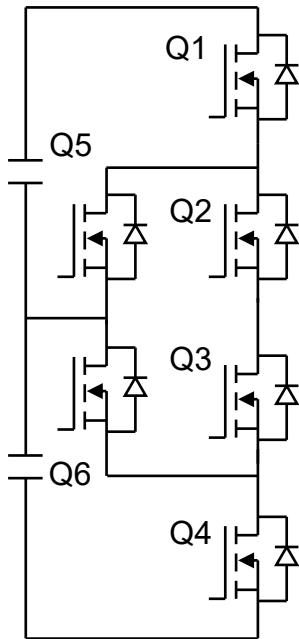


※温度飽和するまで解析を実施

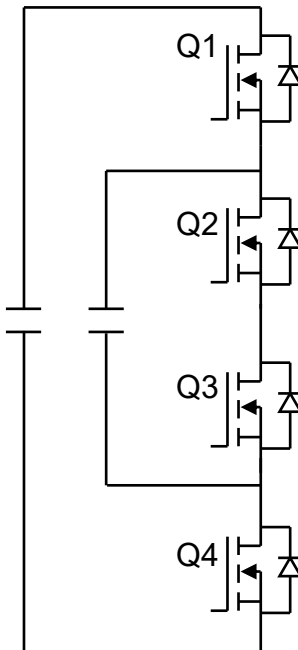
回路構成： 大容量のためマルチレベルインバータ方式の適用が有力



NPC回路



ANPC回路



FC回路

◆使用した半導体モデル

回路方式	Q1,Q4	Q2,Q3	Q5,Q6
NPC	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET	Si-Dioede
ANPC1	SiC-MOSFET	Si-IGBT	SiC-MOSFET
ANPC2	Si-IGBT	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET
ANPC3	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET
ANPC4	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET
FC	SiC-MOSFET	SiC-MOSFET	-

※4種の変調方式で実施

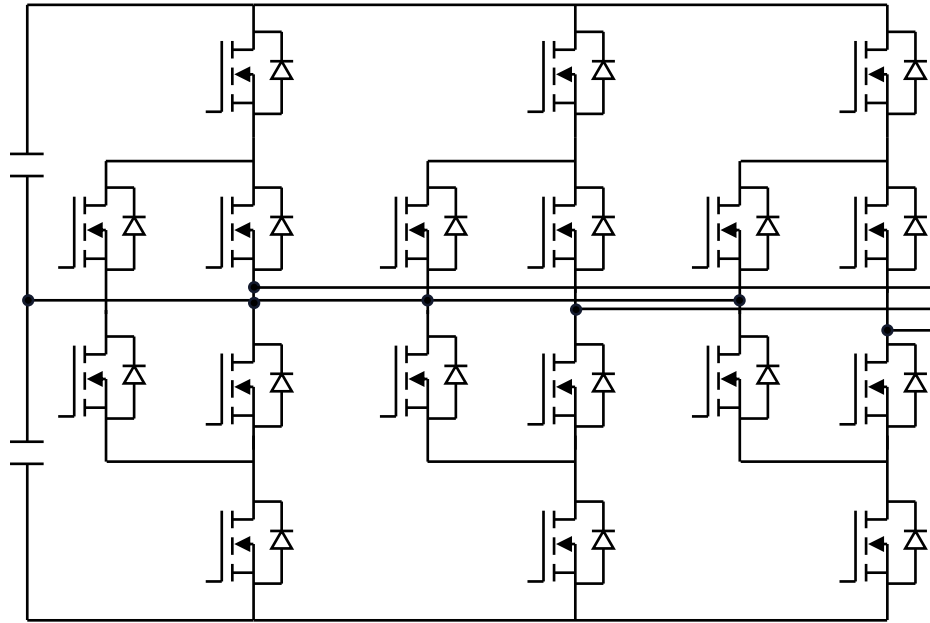
・各種回路方式、変調方式ごとに素子の使い分けを実施

搬送波スイッチング素子⇒SiC-MOSFET

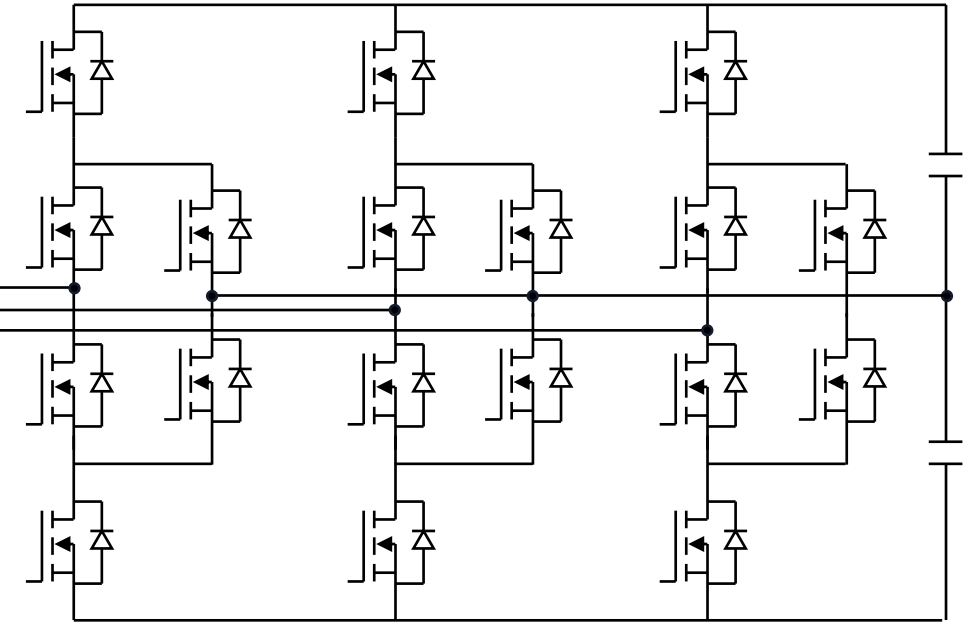
基本波スイッチング素子⇒Si-IGBT

デュアルインバータ回路構成

INV1 (ANPC PWM4)



INV2 (ANPC PWM4)



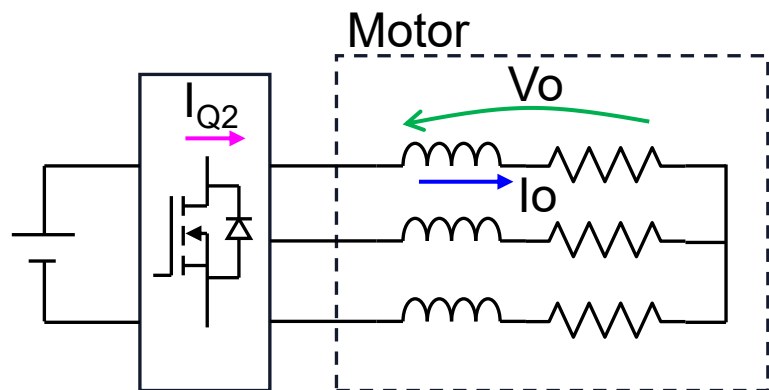
M

オープン巻き線モータ
力率: 0.8
出力電力: 500kW
INV1 INV2位相差: 180°

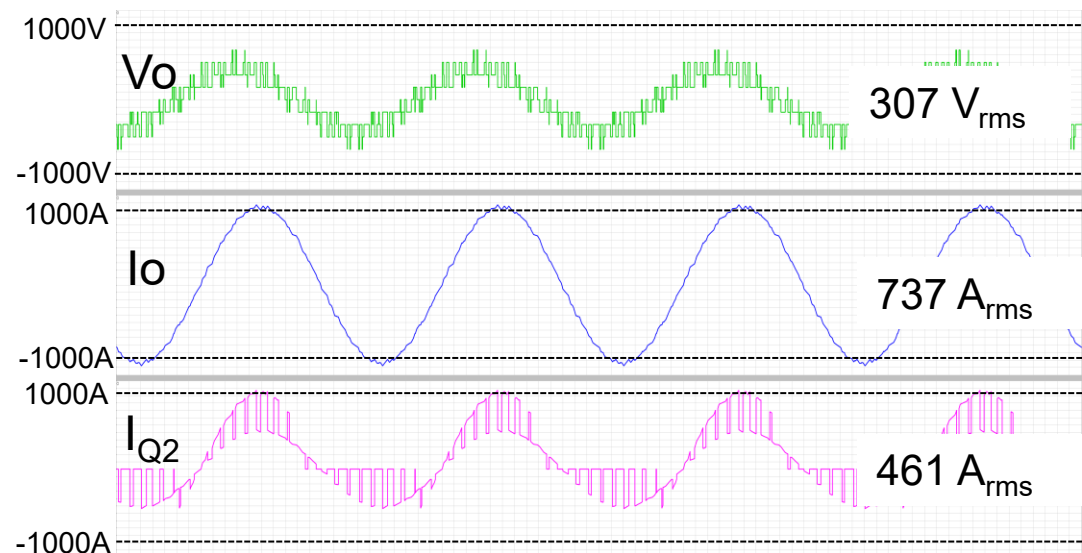
2台のインバータで駆動することでモータ印加電圧を最大2倍
⇒モジュール電流を低減可能

シミュレーション波形

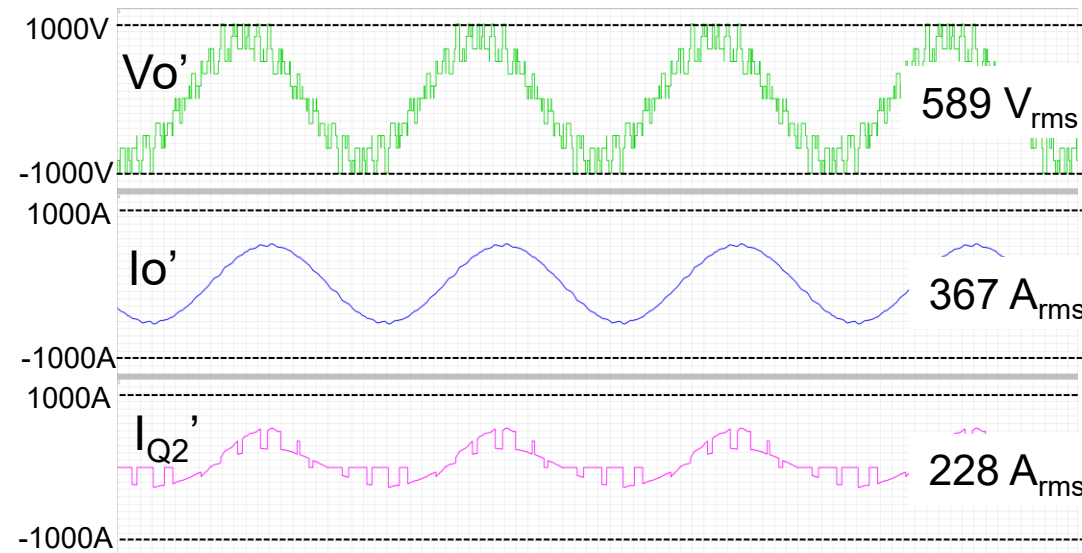
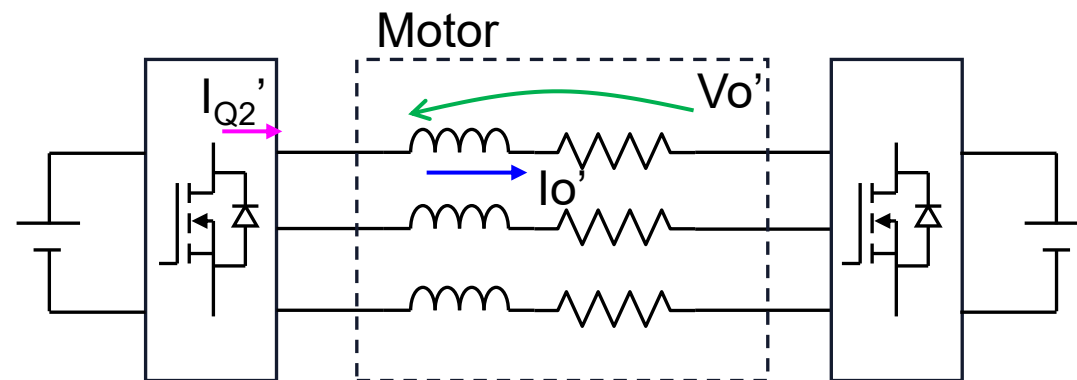
Conventional inverter



I_{Q2} is the current of MOSFETs used in ANPC 3Level inverter









Dual inverter



定格電流の1/2程度のパワーモジュールを使用可能

パワーモジュール選定

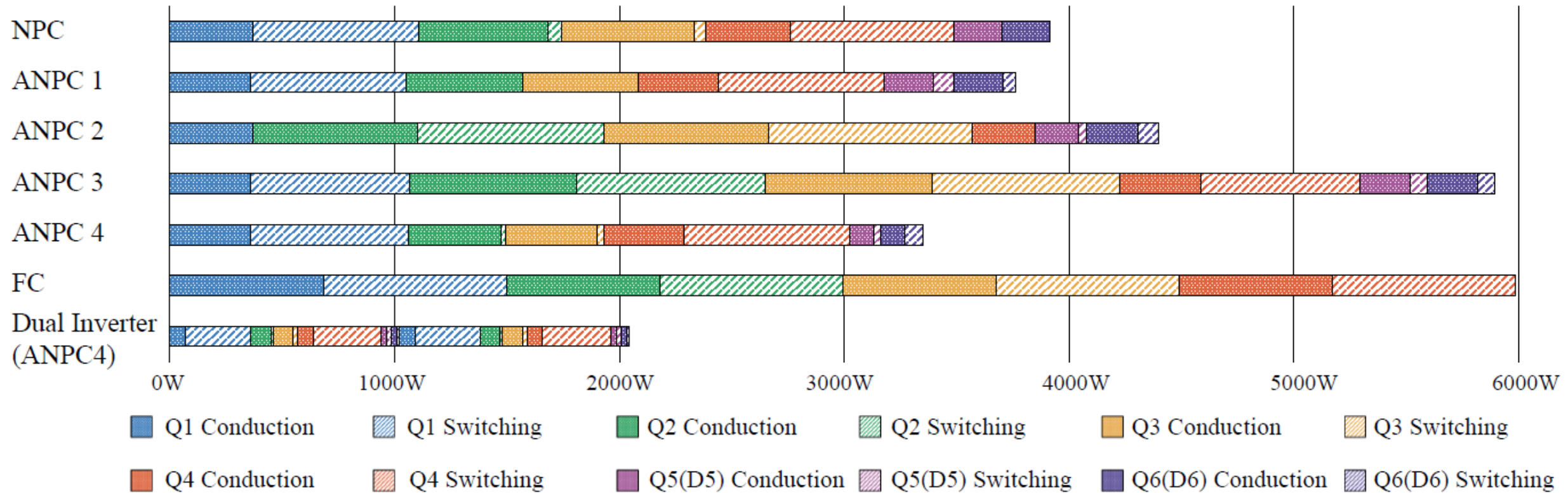
- ・電動航空機向けインバータシステム軽量化のためパワーモジュールを選定

パッケージ	HM	DM	GM	Easy3B	Easy2B	Easy1B
メーカー	Wolfspeed	Wolfspeed	Wolfspeed	Infineon	Infineon	Infineon
型番	CAB760M12HM3	CAB003M09DM3	CAB004M12GM4	FF2MR12W3M1H_B 11	FF4MR12W2M1HP_ B11	FF08MR12W1MA1_ B11A
定格電圧	1200 V	900 V	1200 V	1200 V	1200 V	1200 V
定格電流	760 A	350 A	200 A	400 A	200 A	150 A
質量	179 g	40 g	39 g	78 g	39 g	24 g
定格電流/重量	4.2 A/g	8.8 A/g	5.1 A/g	5.1 A/g	5.1 A/g	6.25 A/g
パッケージ						

ANPC PWM4 構成でのパワーモジュール電流実効値 470 Arms \Rightarrow HMパッケージ適用が必要
 350 A程度のパワーモジュール(DMパッケージ)を適用できれば、モジュール1個当たり75 %軽量化が可能

1素子あたりの電流を低減可能な回路構成を検討 \rightarrow デュアルインバータ方式が一案

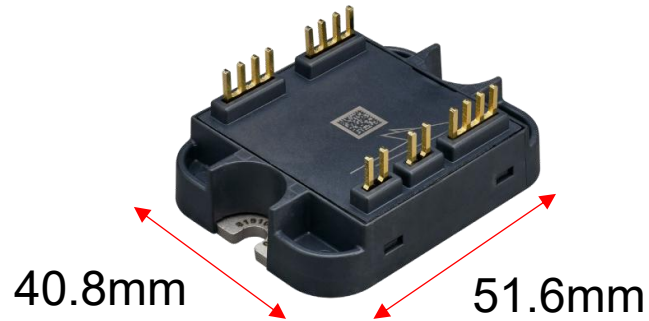
パワー半導体デバイス損失の算定結果



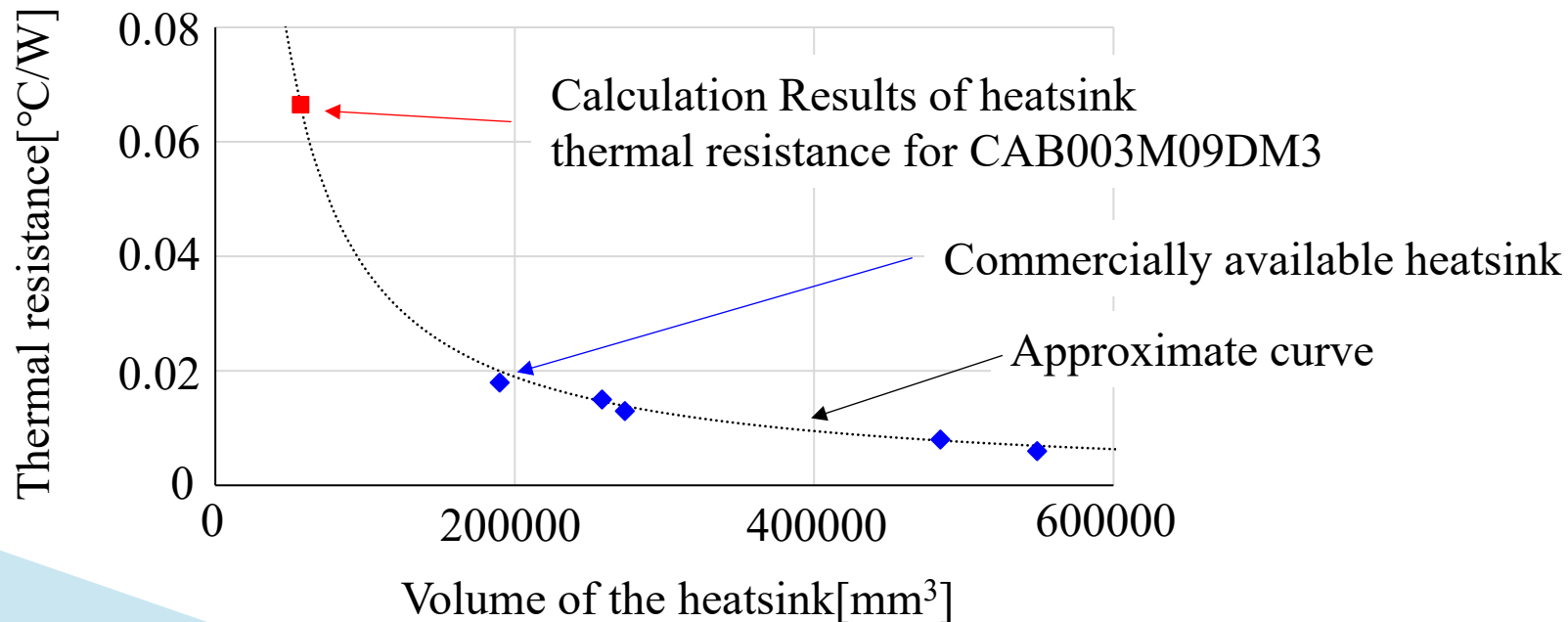
- 今回の条件では、ANPCを用いたデュアルインバータ構成が最も損失を低減可能

ヒートシンク質量見積もり

デュアルインバータ構成
において適用するパワーモジュール



モジュール冷却面積 51.6mm × 40.8mm
⇒60 mm × 50mm =3000mm²のヒートシンク使用を前提として
質量・熱抵抗を見積もる



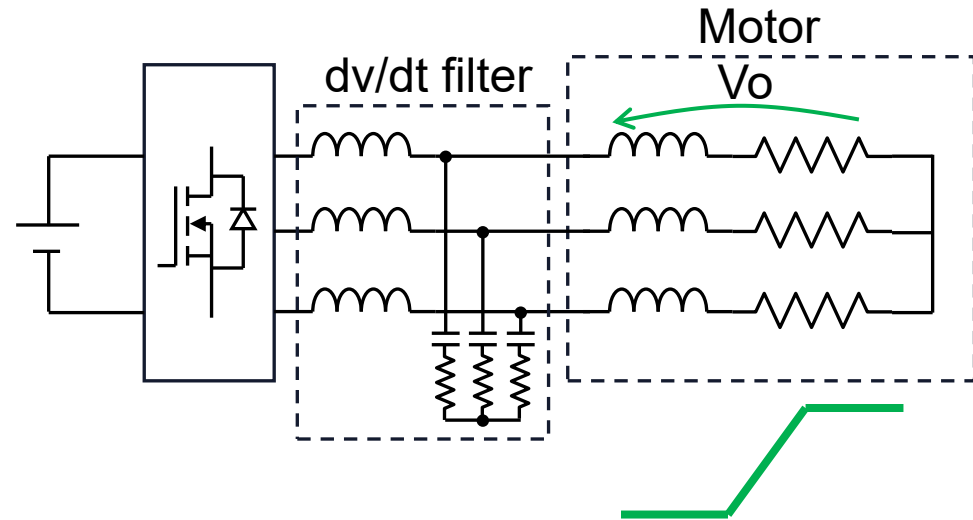
ヒートシンク体格
60 mm × 50mm × 19 mm

市販品の近似曲線熱抵抗を算出
⇒0.067 °C/W

市販品との体積比から質量を算出
⇒150 g

dv/dtフィルタ

3-level ANPC inverter

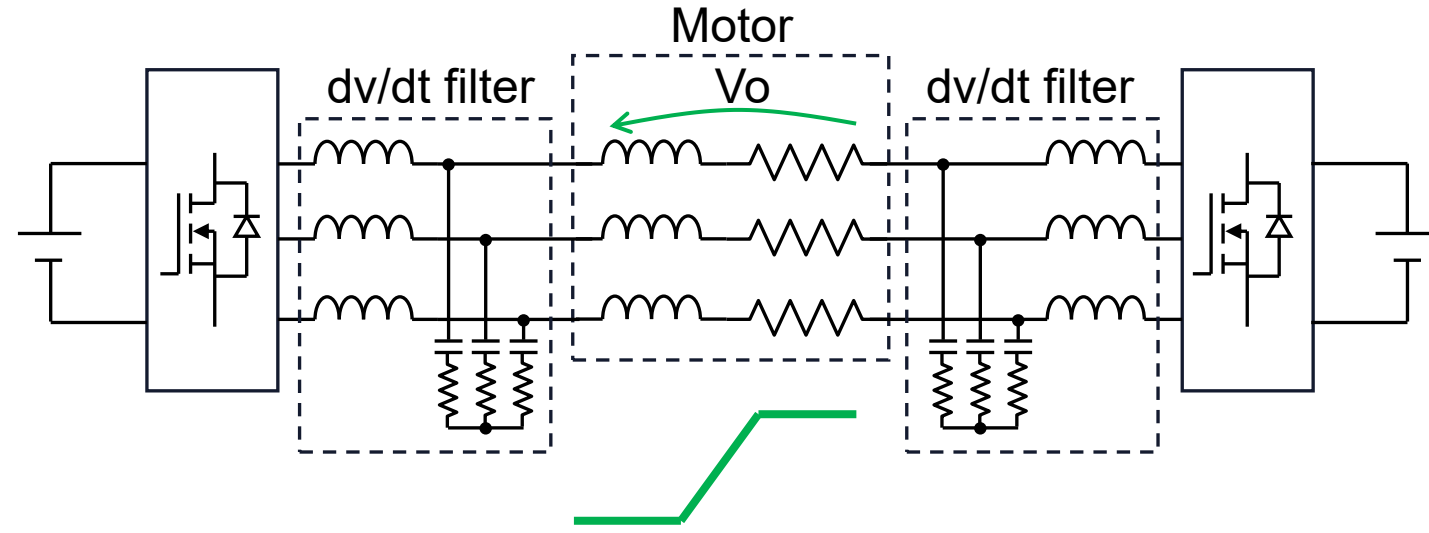


Target: $dv_o/dt = 1.8 \text{ kV}/\mu\text{s}$

- EMI低減のため、出力電圧dv/dtの目標値を $1.8 \text{ kV}/\mu\text{s}$ とするフィルタを設計 (GEを参考)
- ダンピングファクタ (DF) を考慮

$$DF = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Dual ANPC inverter (5-level output)



Target: $dv_o/dt = 1.8 \text{ kV}/\mu\text{s}$

Considered parameters	Value
dv/dt of filter output voltage	$1.8 \text{ kV}/\mu\text{s}$
Voltage drop of filter	Less than 3% for output voltage
Peak current of capacitor	Less than 5% for output current

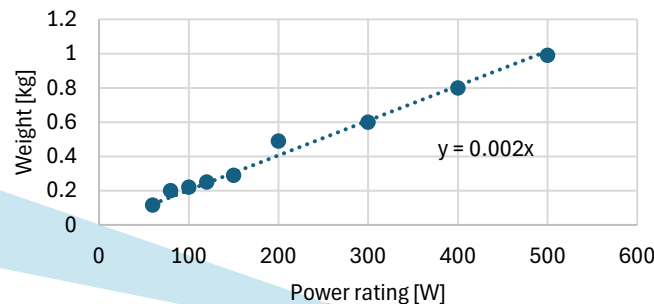
dv/dtフィルタの設計(重量計算)

1.8 kV/μsを実現するLC積

Inverter topology	LC Product [10 ⁻¹⁸ HF]	DF
3-level ANPC and Dual inv. (1 kV _{dc} input)	79,050	0.5
	170,000	0.75
	300,000	1.0
Dual inv. (500 V _{dc} input)	19,350	0.5
	44,000	0.75
	76,000	1.0

3. Register design

実際の抵抗器の特性から算定



Weight-power rating
(TMAOHM IRH/IRV series
metal clad resistor)

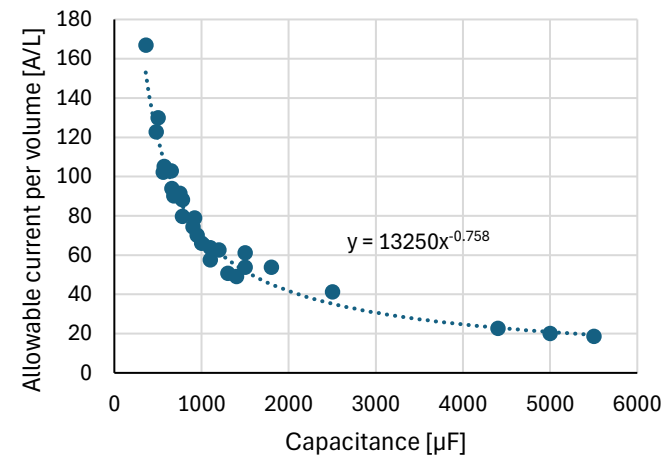
1. Inductor design

エリアプロダクト法により算定 $W = K_w \left(\frac{10000LI^2}{K_u B_m J_w} \right)^{\frac{3}{4}}$

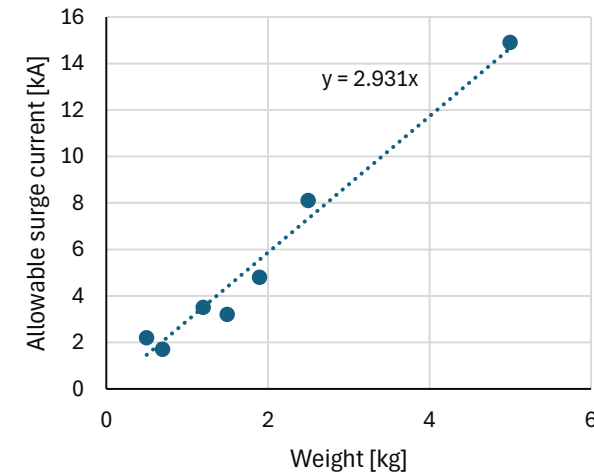
Parameters	Value
Window factor K_u	0.5
Maximum magnetic flux density B_m [T]	1.0(nanocrystalline)
Line current density J_w [A/cm ²]	2.1×10^2 (1 kVdc) 3.2×10^2 (500 Vdc)
Core form factor K_w [g/cm ⁴]	77.6

2. Capacitor design

実際のフィルムコンデンサの特性から算定



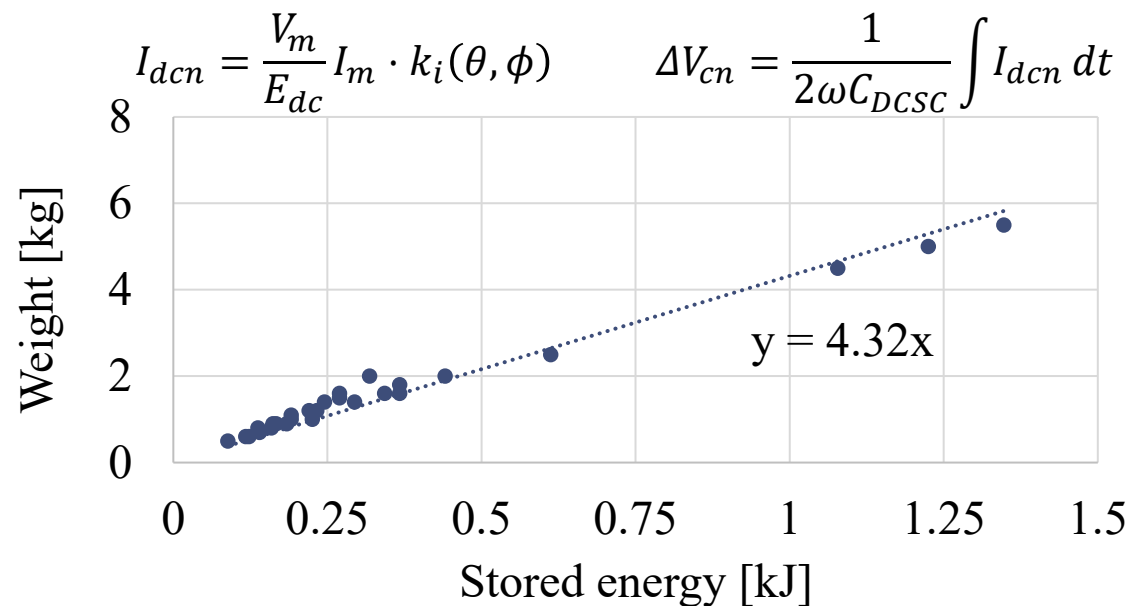
Allowable current ripple per volume
- capacitance (B25690 Series, 700 Vdc)



Allowable surge current - weight
(B25690 Series, 360 μF)

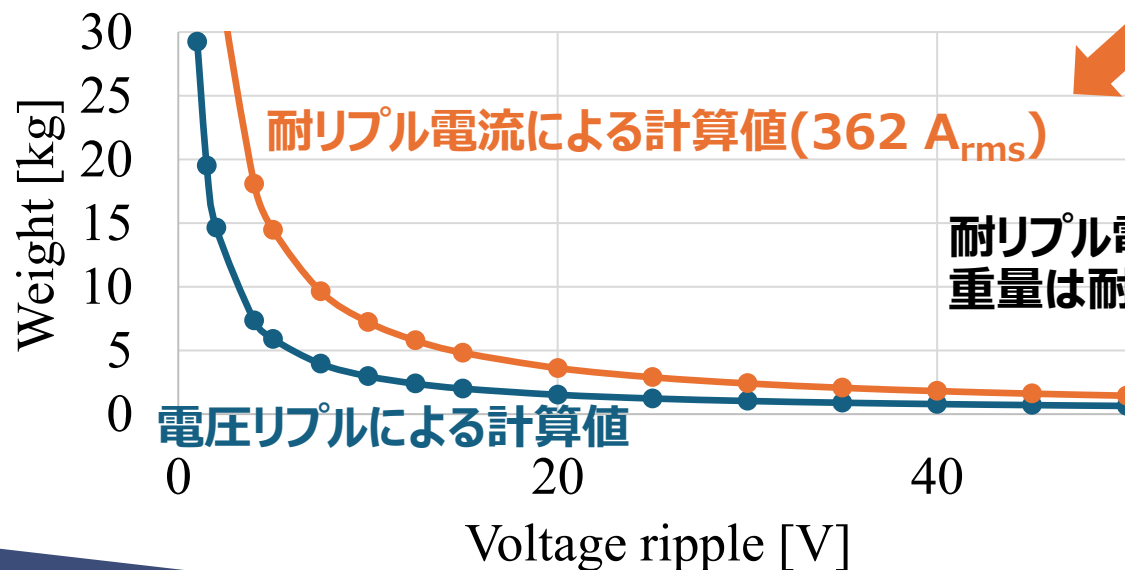
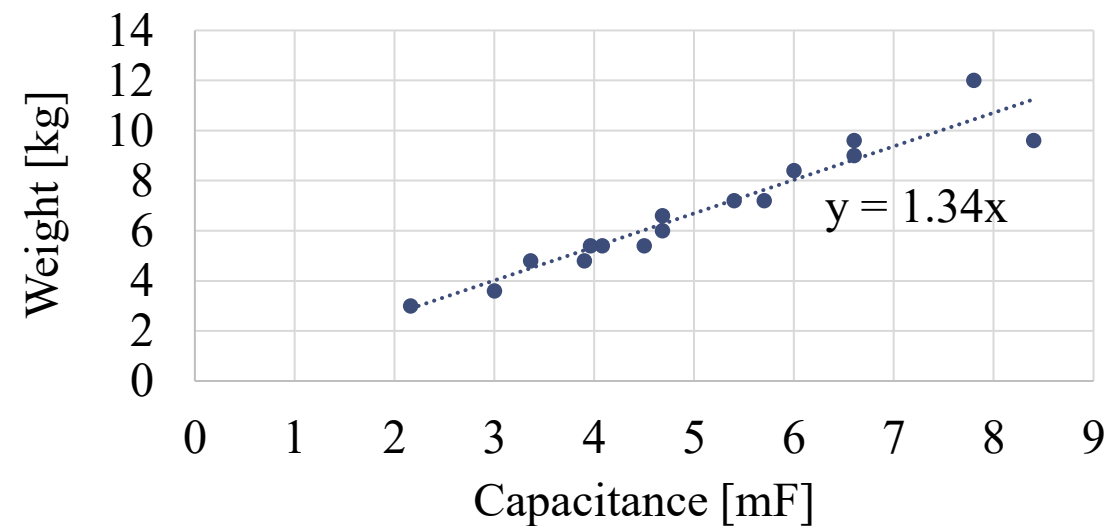
DCリンクコンデンサの設計

電圧リプル（静電容量）による設計



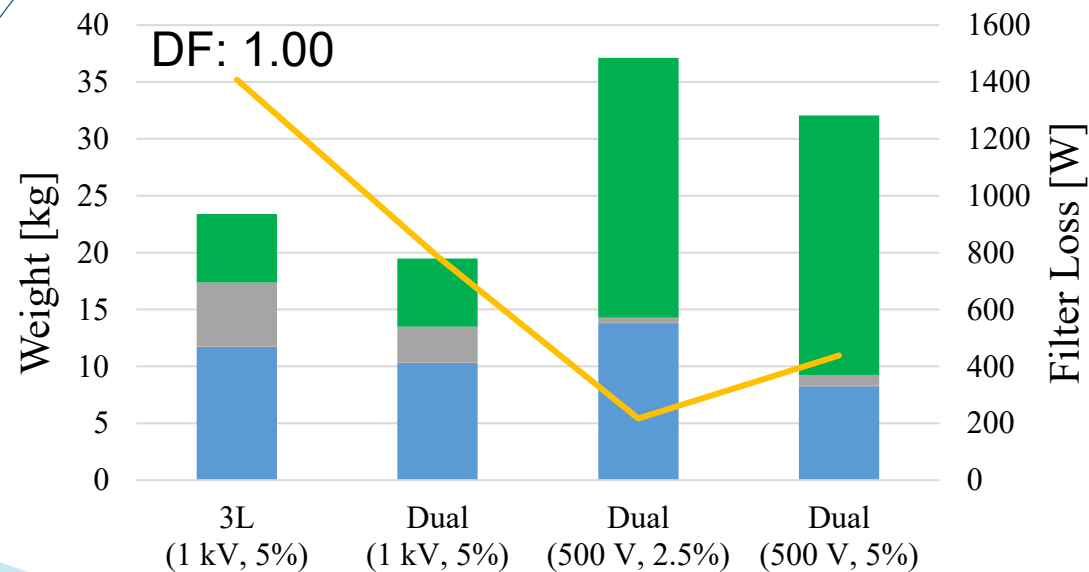
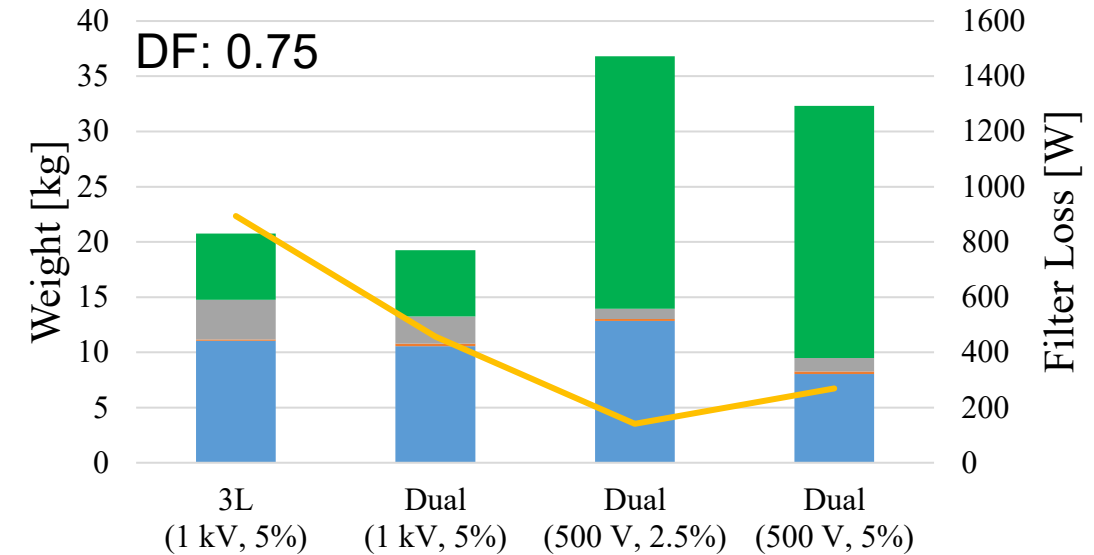
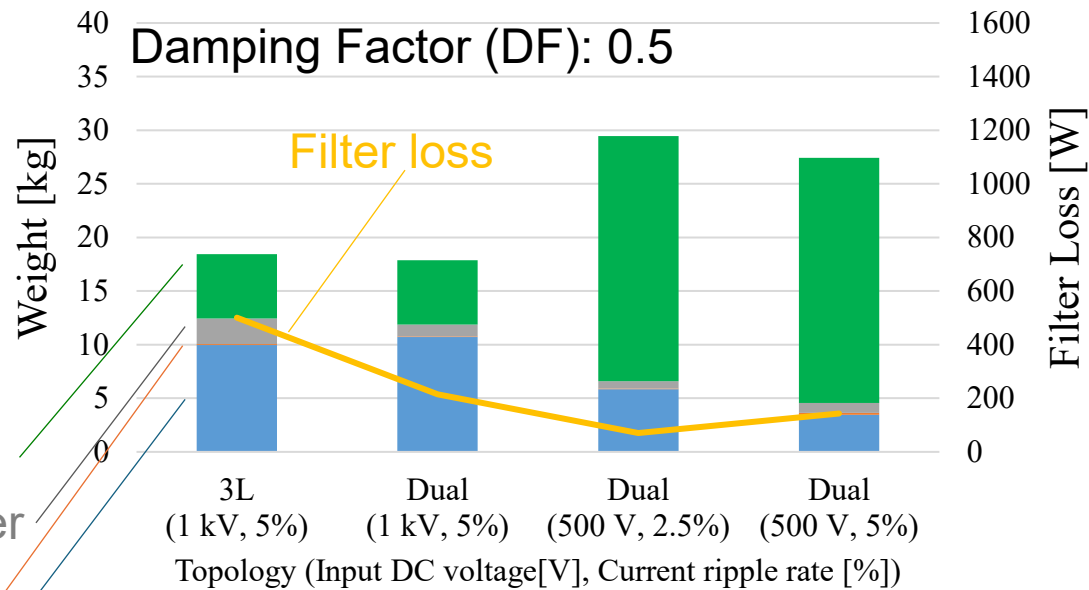
Film capacitors
B25620 series

耐リプル電流による設計



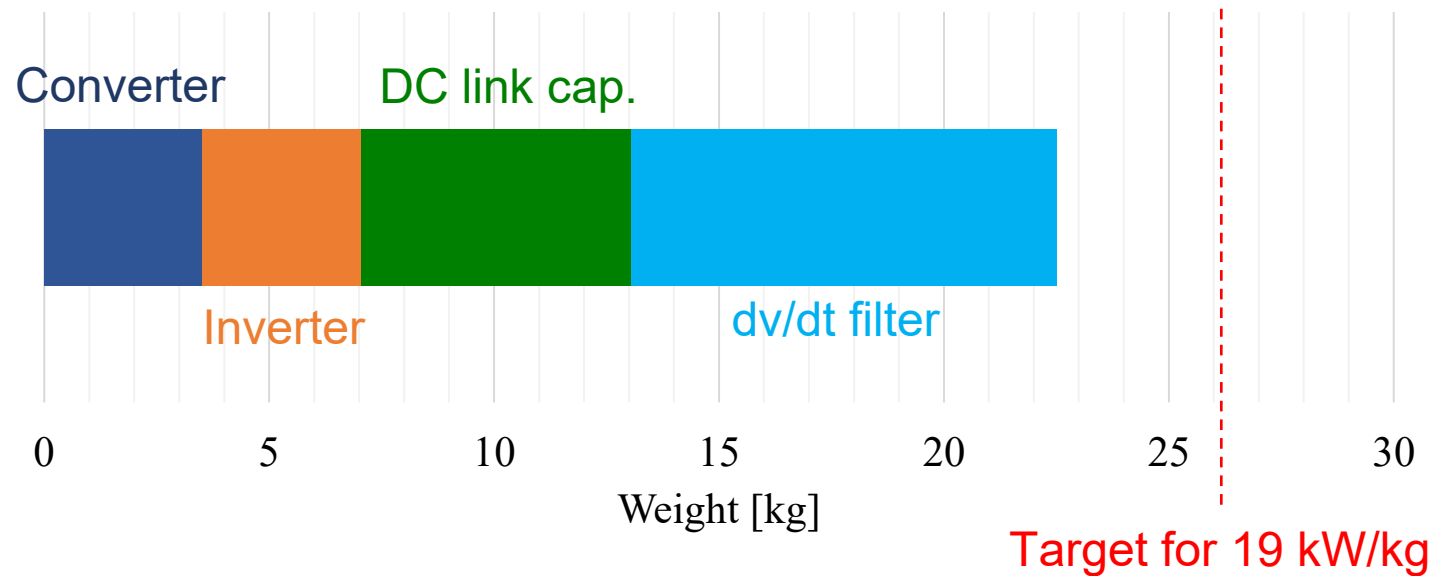
耐リプル電流による制約の方が厳しいため、
重量は耐リプル電流による計算値を適用

DCリンクコンデンサおよびdv/dtフィルタの重量算定結果



- フィルタとDCコンデンサの重量は、トポロジと条件によって異なる
- デュアルインバータでDC電圧を500Vに変更すると、電流が低減できないためDCコンデンサの重量が増加
- デュアルインバータは、DCコンデンサとフィルタの重量を最も軽くできる

ANPCデュアルインバータを用いた際の総重量算定結果



- 出力密度19kW/kgを実現するために必要な目標重量26.3kgの85.6%
- ただし、実際のシステムではケーブル、筐体、冷却水などの他の要素の重量も考慮する必要があるため、さらなる軽量化が必要
 - システム構成、ノイズ（フィルタ）設計などのさらなる検討が必要

まとめ

- ハイブリッド電動航空機向けパワーエレクトロニクスシステムの設計として重量出力密度19kW/kgを目標とした検討を行った
- パワー半導体デバイス+冷却系、DCリンクコンデンサ、dv/dtフィルタの設計手法について検討し、設計例を提示
- 回路構成は「3レベルANPCを用いたデュアルインバータ方式」が有力候補だが、モータも含めたシステム全体を考慮した設計が必要
- 重量出力密度19kW/kgを実現する設計例を示したが、さらなる軽量化設計が求められる

謝辞

本研究の一部は、文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費/宇宙航空脱炭素技術等創出プログラムの支援を受けて行われた。