

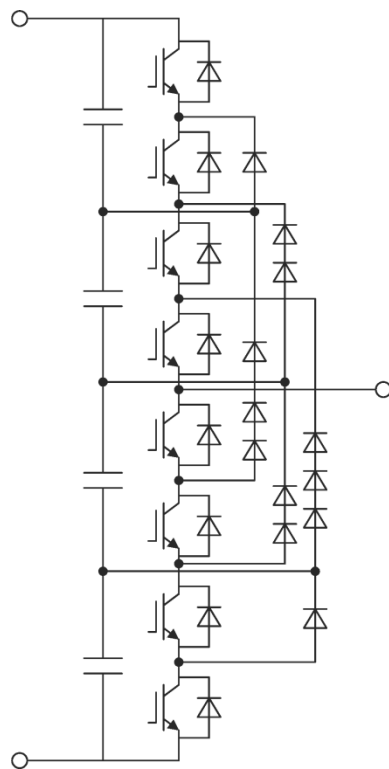
モジュラー・マルチレベル・カスケード 変換器の構成と制御

NEDO特別講座 産学合同セミナー
東京科学大学 工学院 電気電子系
萩原 誠

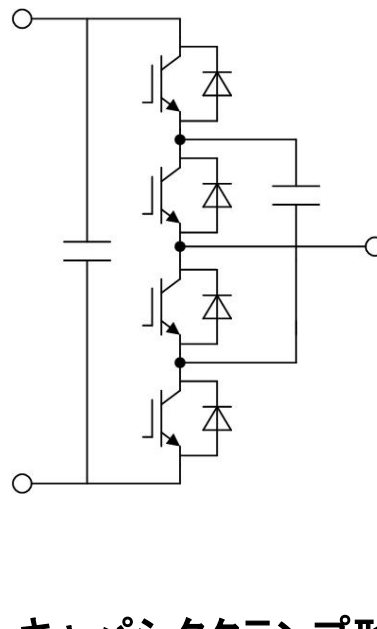
2025年4月24日

トランスレスマルチレベル変換器

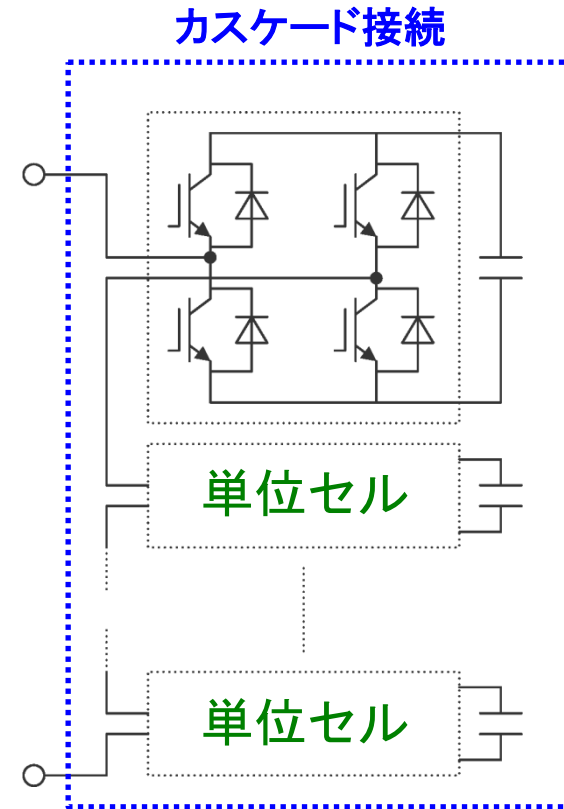
利点： 変圧器未使用で**高圧化・大容量化・高調波低減**が可能



ダイオードクランプ形



キャパシタクランプ形



カスケード接続

単位セル

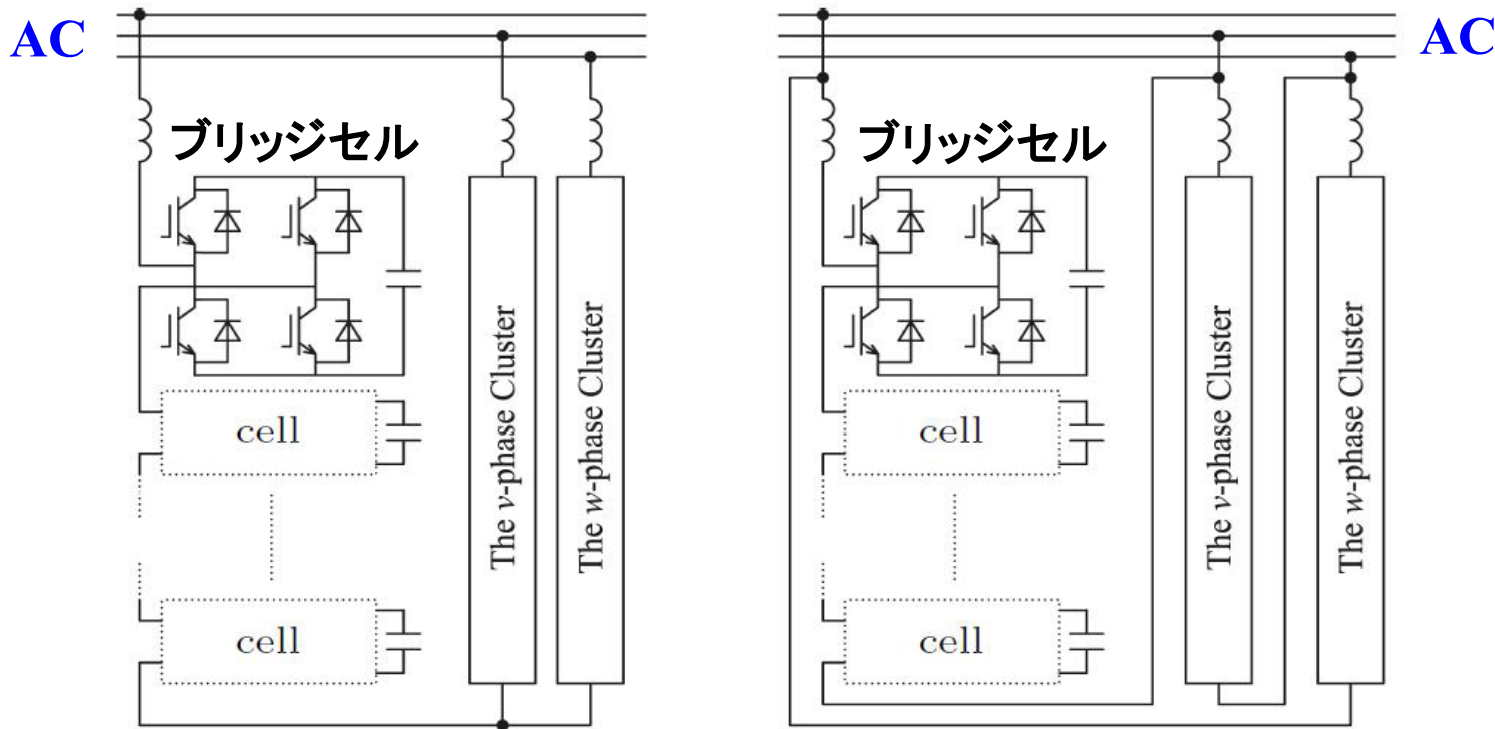
単位セル

カスケード形



モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器(MMCC)

MMCCの歴史(1990年代)



スター結線MMCC (SSBC)

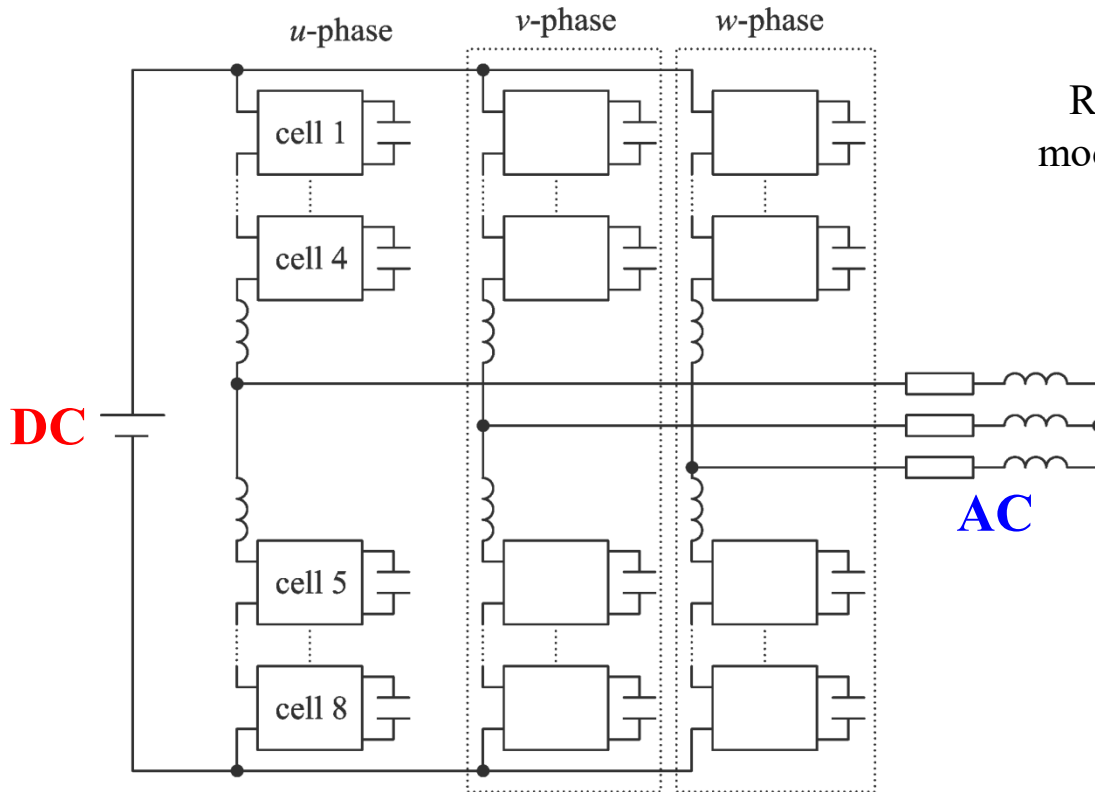
デルタ結線MMCC (SDBC)

----- 応用 -----

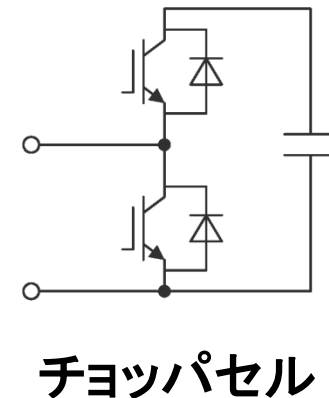
□ 自励式無効電力補償装置STATCOM
(STATIC synchronous COMPensator)

実用化例多数有

MMCCの歴史(2000年代初頭)



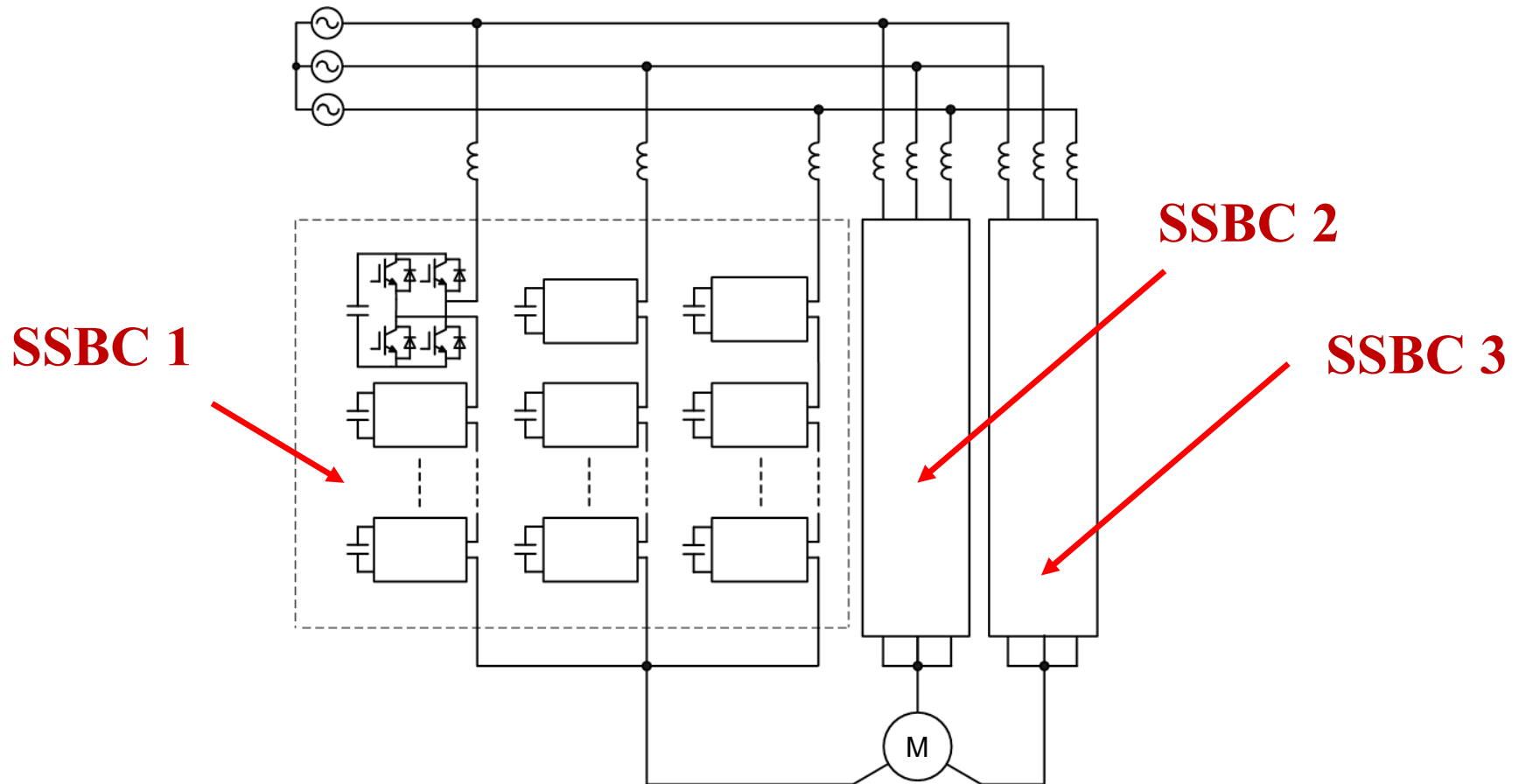
R. Marquardt, and A. Lesnicar, 'A new modular voltage source inverter topology,' in *Conf. Rec. EPE 2003*, CD-ROM.



二重スター・チョップパセル方式MMCC(DSCC)の回路構成

モジュラー・マルチレベル変換器(MMC)の名称でも呼ばれる

MMCCの歴史(2010年以降)



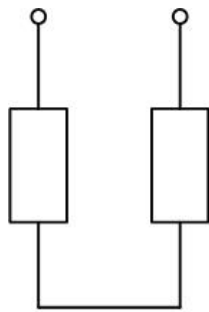
三重スター・ブリッジセル方式MMCC(TSBC)の回路構成

モジュラー・マトリックスコンバータとも呼ばれる

モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器の構成

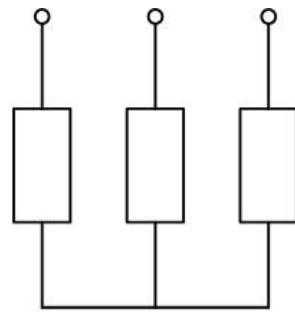
MMCCの結線

MMCC ⇒ 複数のモジュラー形アームで構成
(多数の結線方法, 結線毎に異なる特徴)



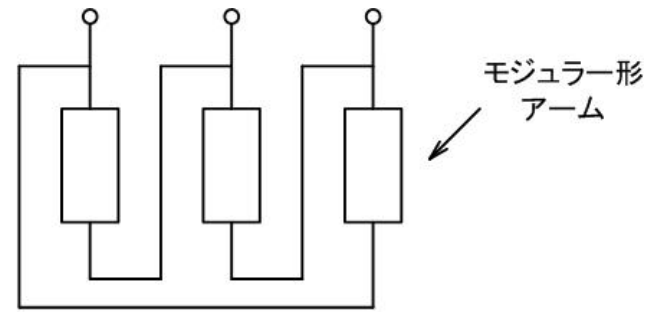
(a)

V結線



(b)

スター結線

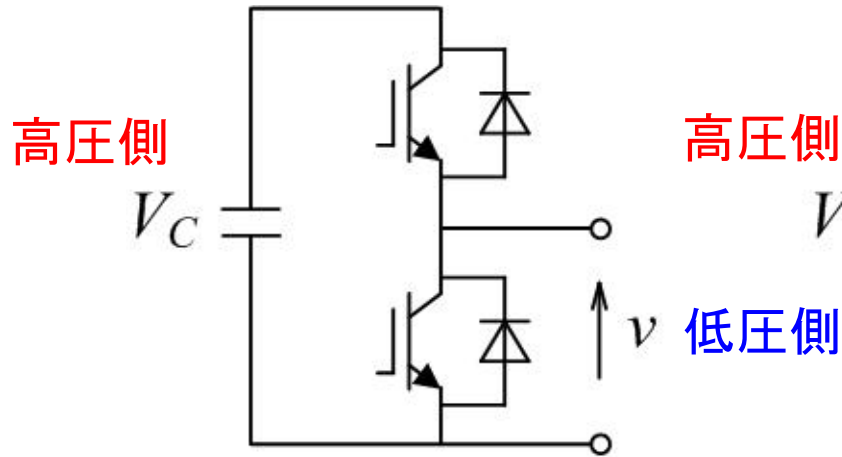


(c)

デルタ結線

モジュラー形アーム ⇒ 単位セルのカスケード接続

単位セルの構成

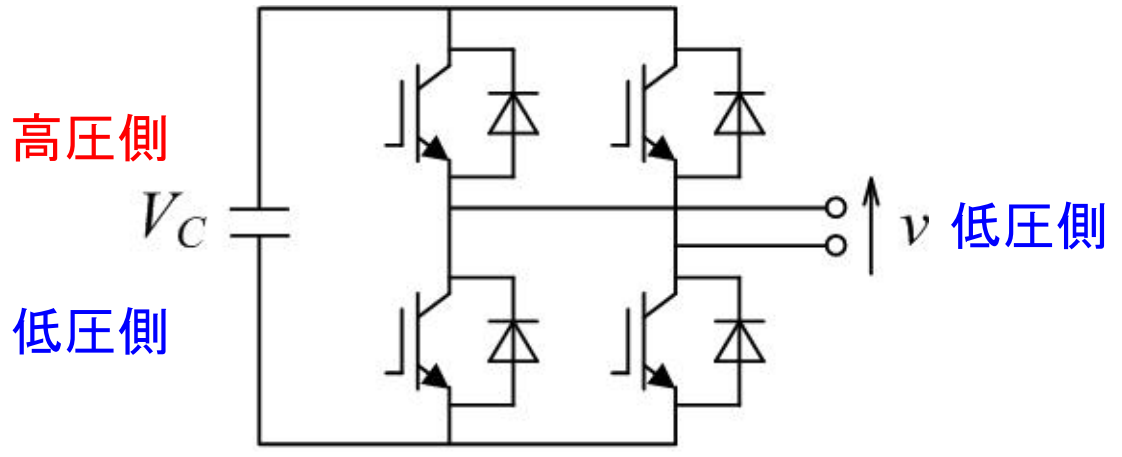


チョツパセル

低圧側電圧

$$\left\{ \begin{array}{l} v = V_C \\ \text{or} \\ v = 0 \end{array} \right.$$

正極性のみ



ブリッジセル

低圧側電圧

$$\left\{ \begin{array}{l} v = V_C \\ v = 0 \\ v = -V_C \end{array} \right.$$

正負両極性

チョツパセルとブリッジセルの比較

使用パワーデバイス数



チョツパセル: 2個

ブリッジセル: 4個

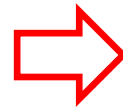
導通パワーデバイス数



チョツパセル: 1

ブリッジセル: 2

制御可能な電圧範囲
(PWM制御適用時)



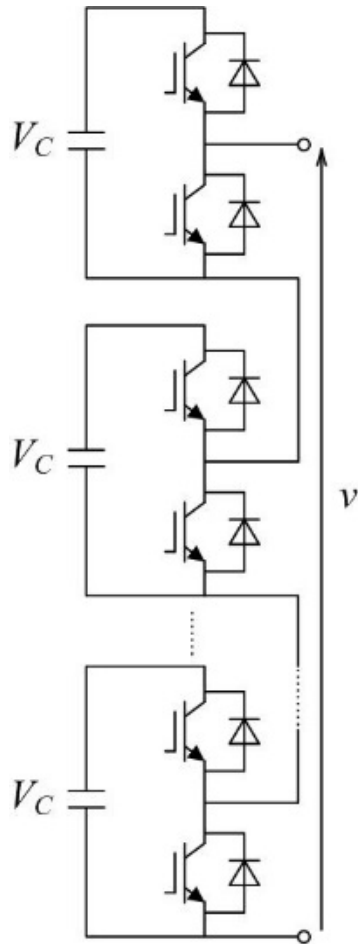
チョツパセル: $0 \leq v \leq V_C$

ブリッジセル: $-V_C \leq v \leq V_C$

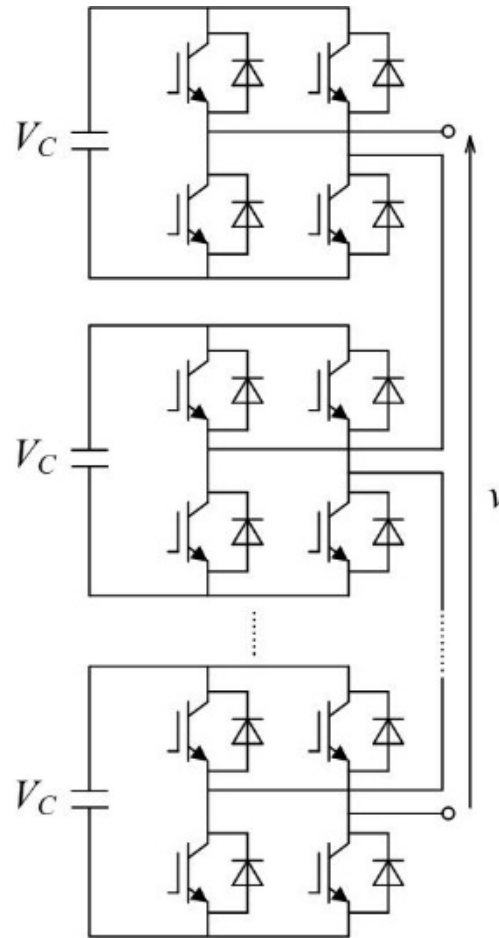
チョツパセル: 正極性のみだが, 使用・導通デバイス数は少ない

ブリッジセル: 正負両極性だが, 使用・導通デバイス数は2倍

モジュラー形アームの構成



チョッパセル使用時



ブリッジセル使用時

同一構成のセルを
多段カスケード接続

モジュラー形アームの利点

- アーム当たりの単位セル数を調整することで、**高圧化**が実現可能
- 同一構成の単位セルを使用するため、**冗長性と信頼性の向上**に繋がる
- 他のマルチレベル変換器方式と比較し、**実装が容易**
- 変換器が発生する**高調波電圧と電磁ノイズの低減**が可能
- **制御性向上**が可能

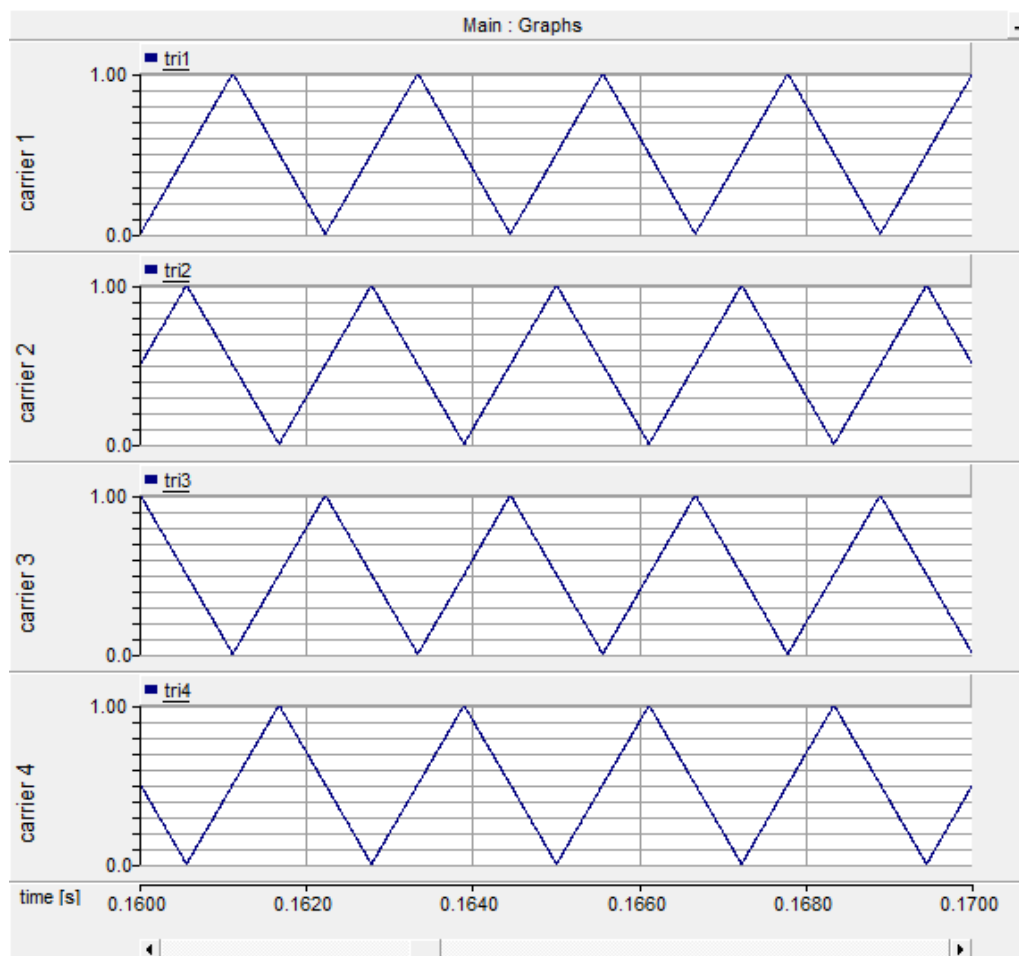
位相シフトPWM

キャリア1 (0°)

キャリア2 (90°)

キャリア3 (180°)

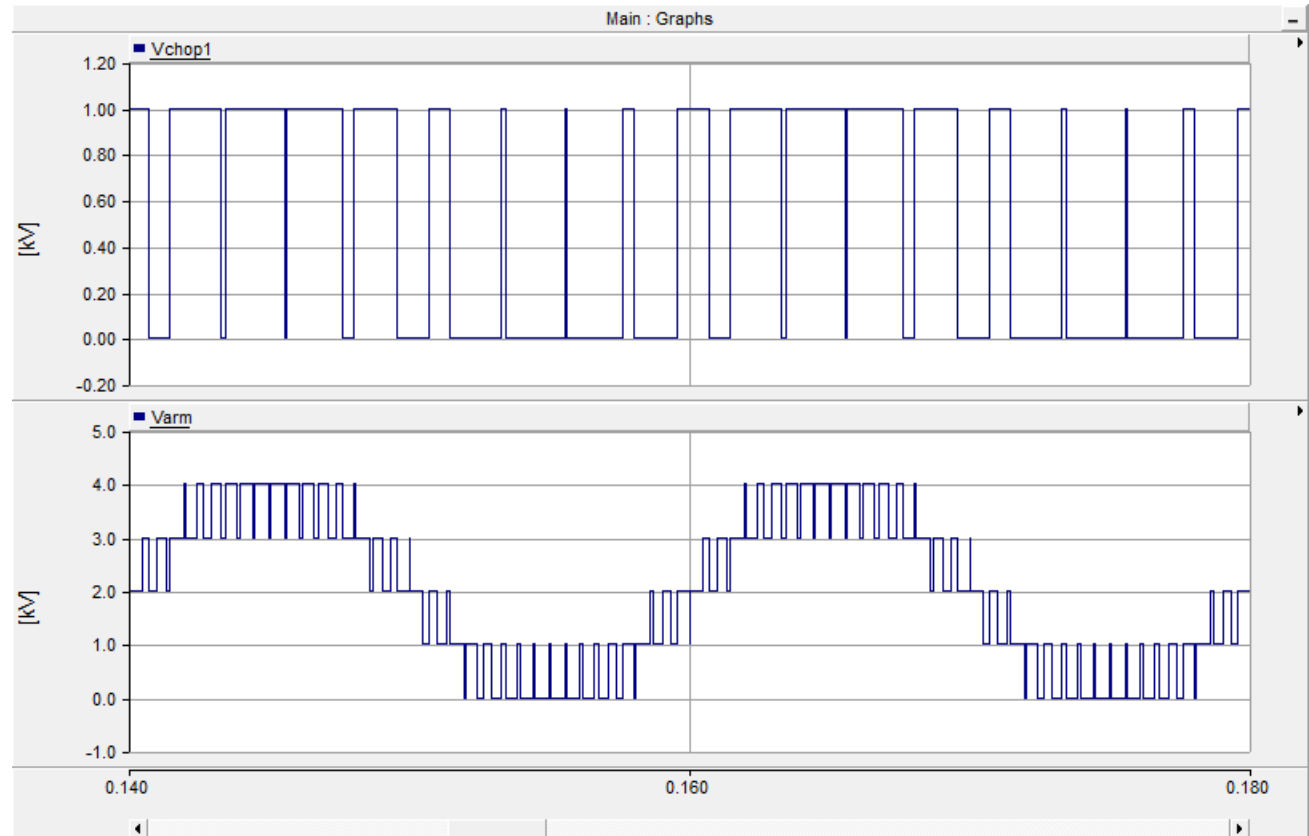
キャリア4 (270°)



位相シフトPWM: 各三角波キャリアの初期位相を移相

位相シフトPWMの電圧波形改善効果

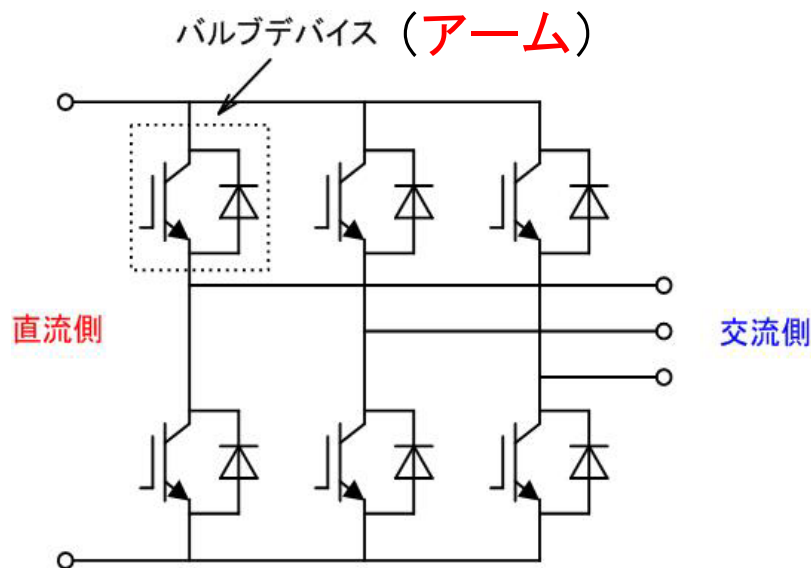
チョッパセル1の
端子電圧



チョッパセルの
電圧総和
(セル数:4)

位相シフトPWM ⇒ 出力電圧の**正弦波化**

アームの動作モードの比較

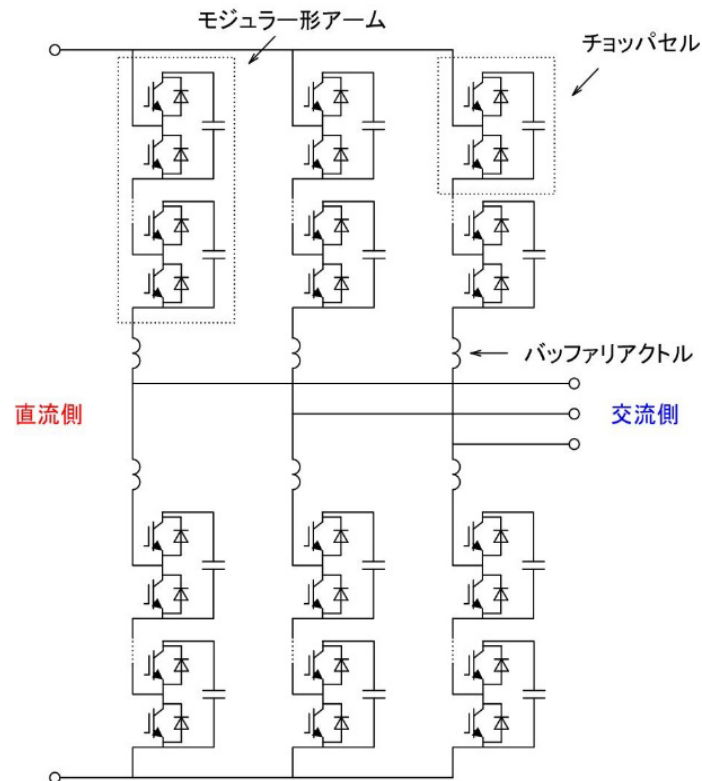


一般的な三相2レベル変換器

オン時 (零インピーダンス)
オフ時 (無限インピーダンス)



可変インピーダンス




MMCCのアーム



電圧源動作

電圧源動作の実現条件

電圧源動作  アーム電圧の**振幅**・**位相**・**周波数**が、アーム電流の状態に関わらず一定となる



電圧源動作の実現手法

1. 各セル直流側に絶縁直流電源(2次電池を含む)を別途配置
(装置の**高コスト化**, **大型化**)

2. 各セル直流コンデンサ電圧の直流分を、**一致値に制御**

MMCCの直流コンデンサ電圧一定制御の実現



最も重要(世界中で各種制御法の提案・検討)

バッファリアクトルの必要性

MMCC ⇨ 複数のモジュラー形アーム ⇨ 複数の電圧源

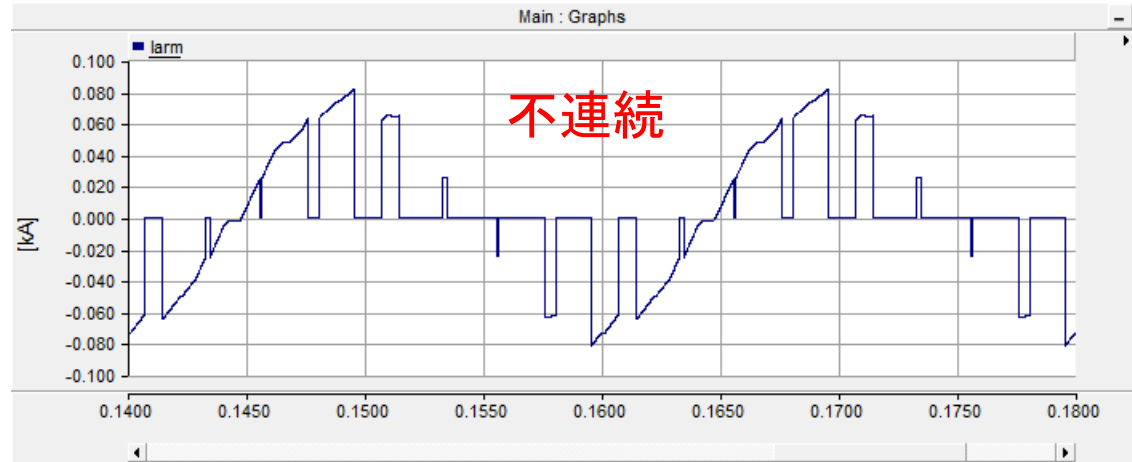


2個の電圧源を有する回路

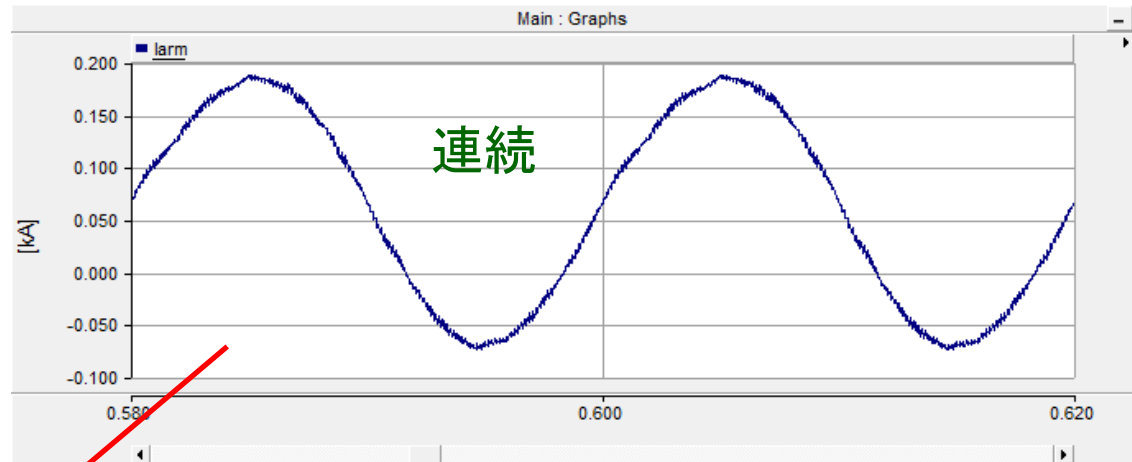
複数の電圧源 ⇨ リアクトルを介して接続
(バッファリアクトルとも呼ばれる)

アーム電流の連続性

アーム電流波形
(三相2レベル変換器)





アーム電流波形
(MMCC)





単一・もしくは複数の周波数成分で構成

アーム電流の構成成分と制御

アーム電流の構成  

- ・電源電流成分
- ・負荷電流成分
- ・循環電流成分

(三種類のいずれか、もしくは複数)

上記三成分の何れか  **フィードバック制御が適用**
 フィードバック制御の目的

ロバストな制御系の実現

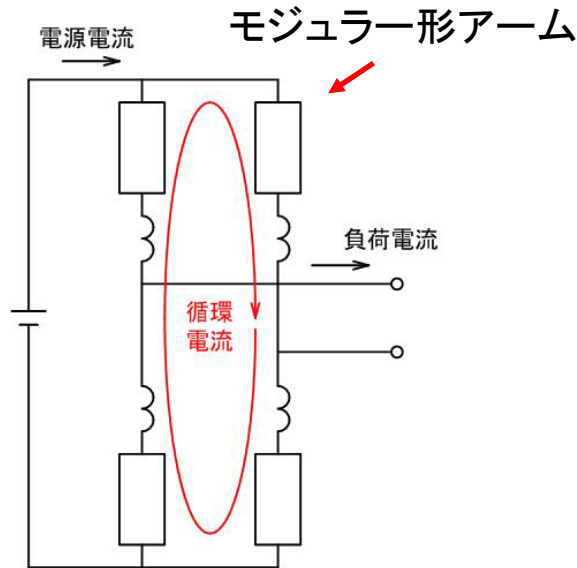
(制御系の遅延・バルブデバイスの個体差の影響を受けにくい)

循環電流

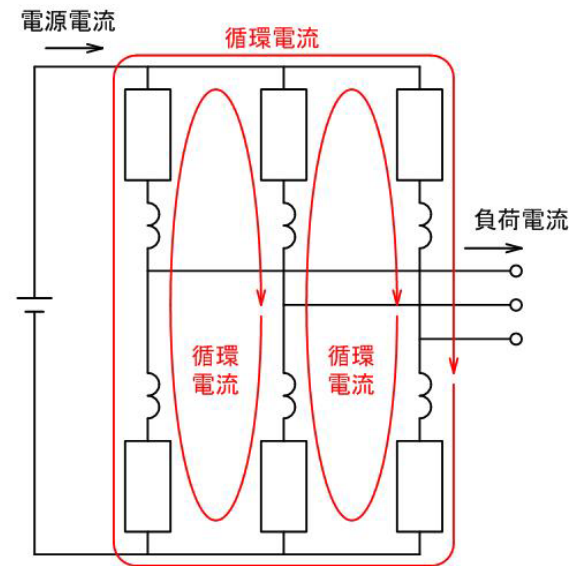
循環電流



閉ループ内(変換器内)を循環し、
電源・負荷に現れない成分




単相フルブリッジ構成MMCC



三相フルブリッジ構成MMCC

一般的な三相2レベル変換器 ⇒ 循環電流は生じない

循環電流の特徴と自由度

- 循環電流の特徴  1. **直接検出不可** (定義の必要性)
2. **自由度**が存在
3. 制御に利用可能

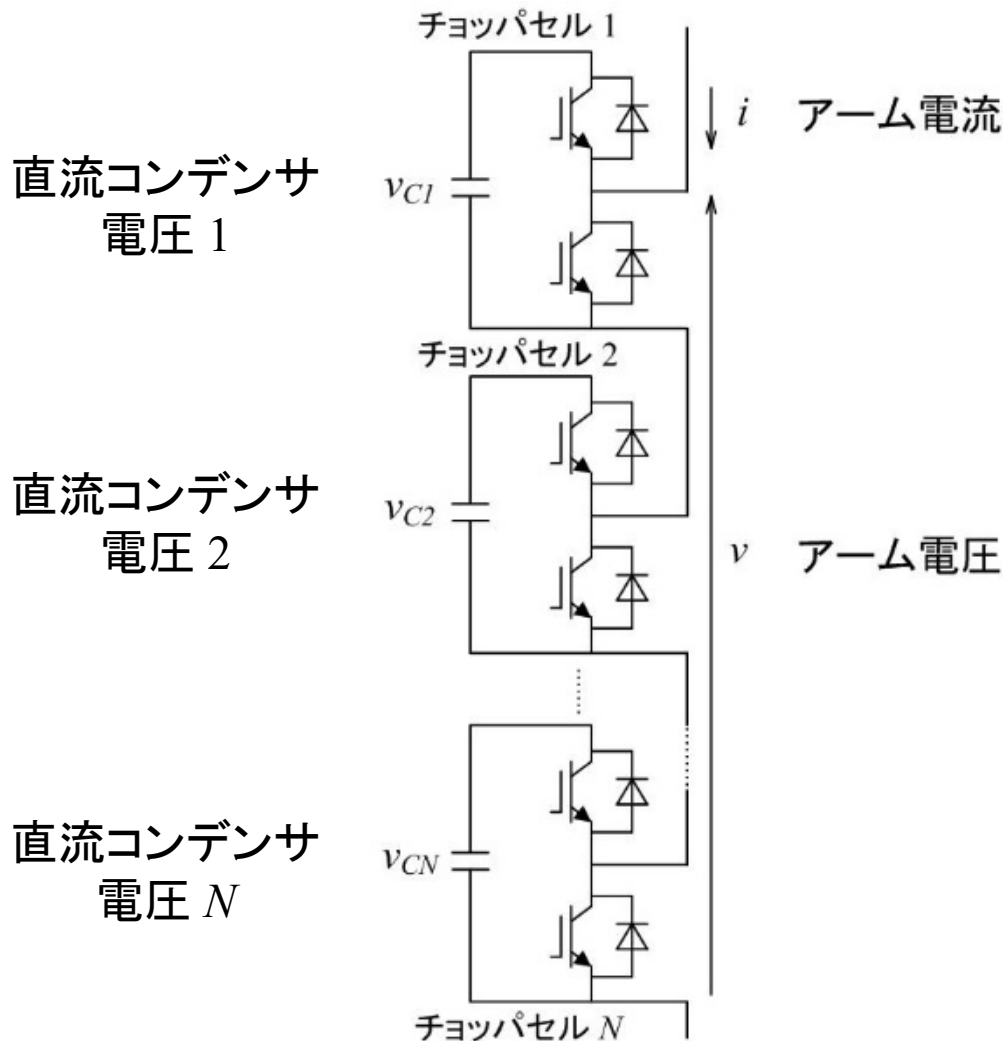
単相フルブリッジ構成MMCC  自由度: **1**

三相フルブリッジ構成MMCC  自由度: **2 or 3**
(キルヒホッフの電流則より)

循環電流の自由度が零のMMCC  **SSBC**
(単一スター構成MMCC)

循環電流制御  アーム間の電圧バランス, 電圧脈動抑制

アーム電力の必要条件



アーム電力(瞬時値)



$$p_{arm} = vi$$

(複数の周波数成分で構成)

アーム電力の条件



$$(p_{arm})_{dc} = 0$$

(直流コンデンサ電圧を制御する為)

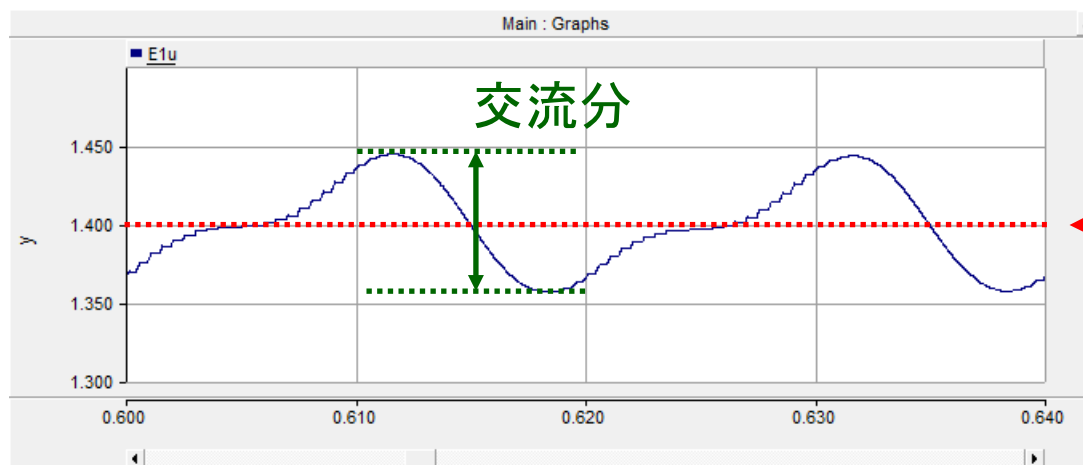
直流コンデンサ電圧の交流分

----- チョップセル1の電圧方程式 -----

$$C v_{C1} \frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{1}{N} v_i$$

静電容量 C 、直流コンデンサ電圧 v_{C1} 、カスケード数 N 、入力電圧 v_i 、共に交流分を含む

直流コンデンサ電圧
波形



交流分 ⇒ 基本波(50 Hz), 2次(100 Hz)等で構成

交流分の問題点と抑制法

問題点



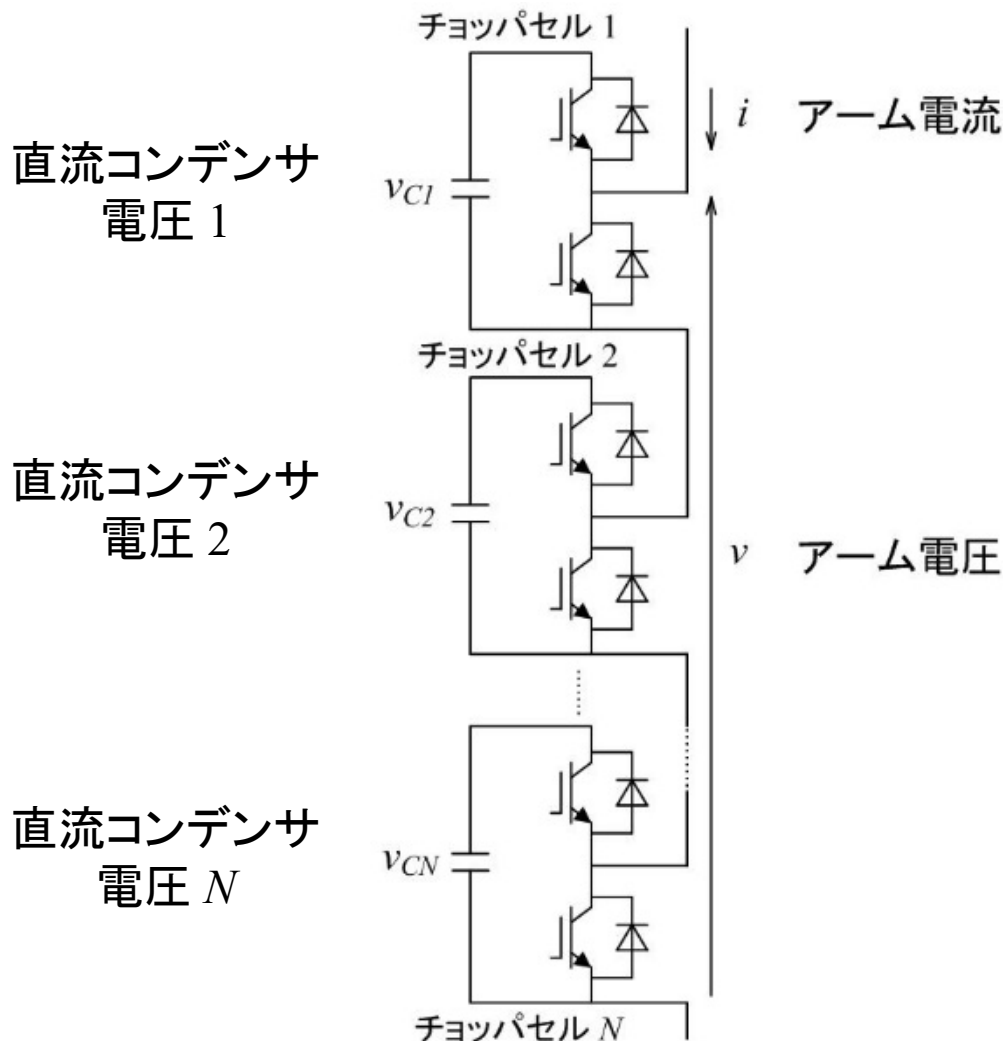
1. パワーデバイスの過電圧
2. 各チヨツパセルの過変調
3. 制御系の安定性低下
(制御系の外乱として作用)

抑制法



1. 静電容量の増大
(高コスト化, 高重量化)
2. 制御による抑制(循環電流重畳)
(損失増大)

直流コンデンサ電圧の平均値制御



各コンデンサ電圧




独立に制御不可
(独立変数不足)



算術平均値を制御

$$v_{Cave} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_{Cj}$$

平均値制御を適用しないとどうなる？

v_{Cave} の直流分  増加, もしくは減少
(一定に制御不可)

変動要因

1. 各アーム内で発生する損失
(導通損, スイッチング損失)
2. アーム電力 $(p_{arm})_{dc}$ の過渡的変動
(負荷急変時, 系統事故時)
3. **アーム間の電力授受** (MMCC固有の現象)

アーム内の電圧バランス

同一アーム内の各直流コンデンサ電圧



理想的には同一値，現実には**アンバランス**が発生

(原因: 静電容量とパワーデバイスの**個体差**)

アンバランス抑制 ⇒ 各セルの通電率を**微調整**

1. **ソーティング**を使用する手法

2. **線形モデル**を使用する手法

(フィードバック系を構成)

提案するMMCCの分類と名称

モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器

名字: Family Name



Modular Multilevel Cascade Converters (MMCC)

- Single-Star Bridge-Cells (MMCC-SSBC)
単一スター・ブリッジセル
- Single-Delta Bridge-Cells (MMCC-SDBC)
単一デルタ・ブリッジセル
- Double-Star Chopper-Cells (MMCC-DSCC)
二重スター・チョッパセル
- Double-Star Bridge-Cells (MMCC-DSBC)
二重スター・ブリッジセル
- Triple-Star Bridge-Cells (MMCC-TSBC)
三重スター・ブリッジセル

名前: Given Name

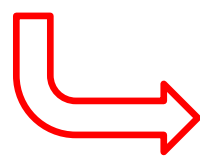


高圧・大容量モータドライブへの 応用

高圧大容量交流電動機需要

高圧・大容量: 3.3 – 13.8 kV, 1 – 120 MW 程度

375 kW以上の電動機: **世界に約60万台^[1]**



全電動機数の0.03%^[1]

世界の全消費電力量の10.4%を消費^[1]

1年あたり約4万台が出荷^[2]

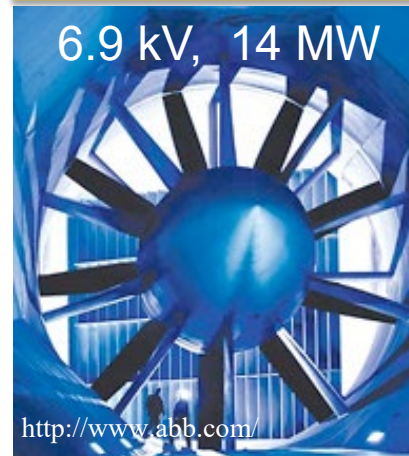
鉄鋼圧延主機



ミル(粉碎機)



風洞実験ファン



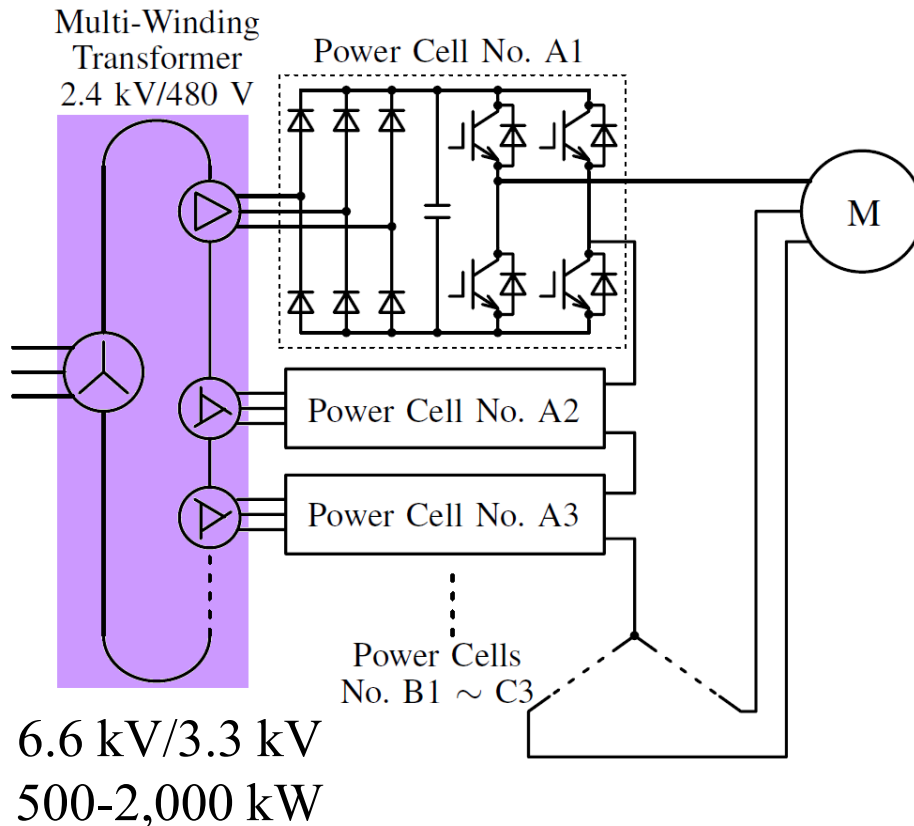
LNGコンプレッサ



[1] Organisation for Economic Co-operation and Development / International Energy Agency, 2011.

[2] IMS research, “Industrial motors & drives global market update,” 2012.

従来の高圧可変速ドライブシステム



特徴

- 電氣的絶縁
- 高調波電流の低減
- 各素子耐圧の低減
- 高重量・高コスト

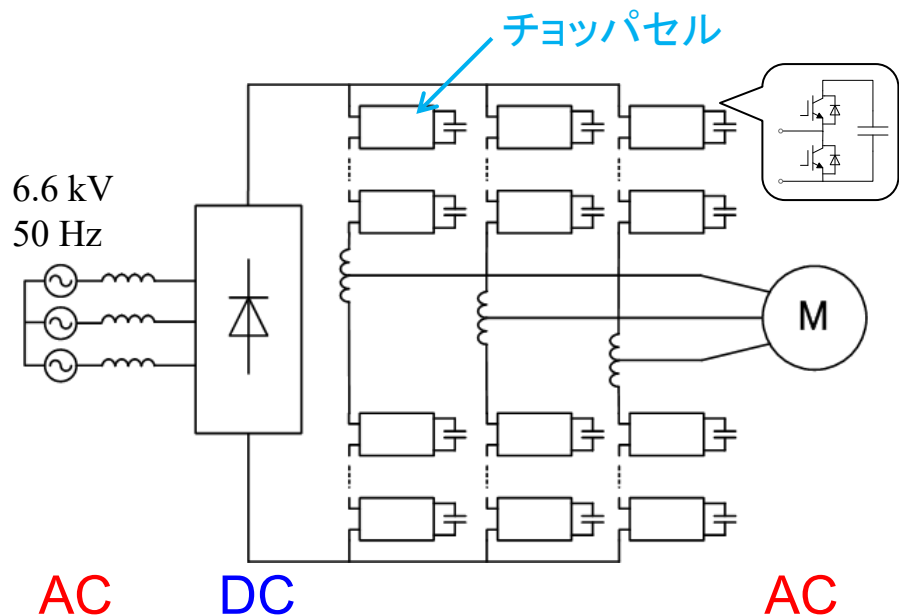
P. W. Hammond, "A new approach to enhance power quality for medium voltage ac drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 1, pp. 202-208, 1997

DSCC, TSBCの可変速ドライブシステムへの適用

MMCCによるモータ駆動

DSCC^[6]

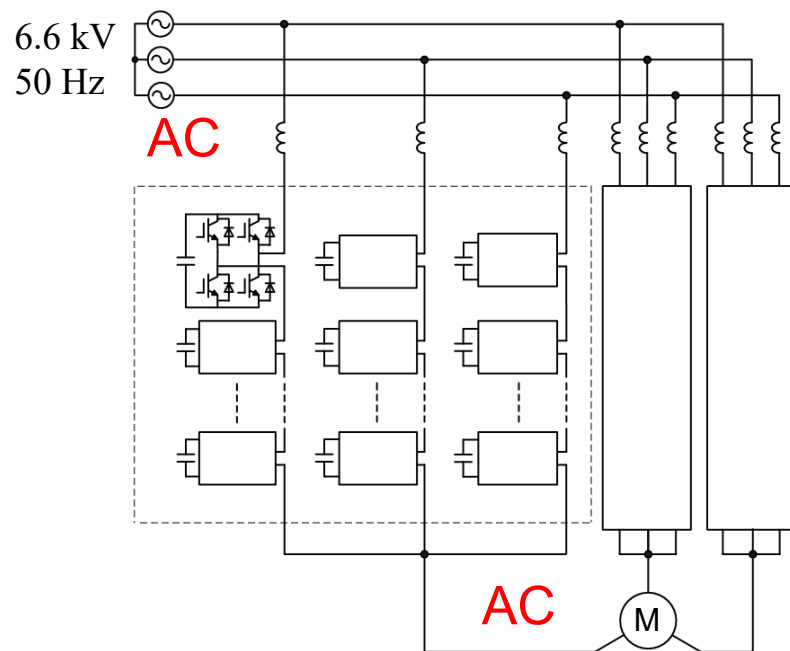
/ Double-Star Chopper Cells



- 一部のメーカーで製品化
- モータ低速時の特殊制御によりデバイス電流増大

TSBC^[7]

/ Triple-Star Bridge Cells



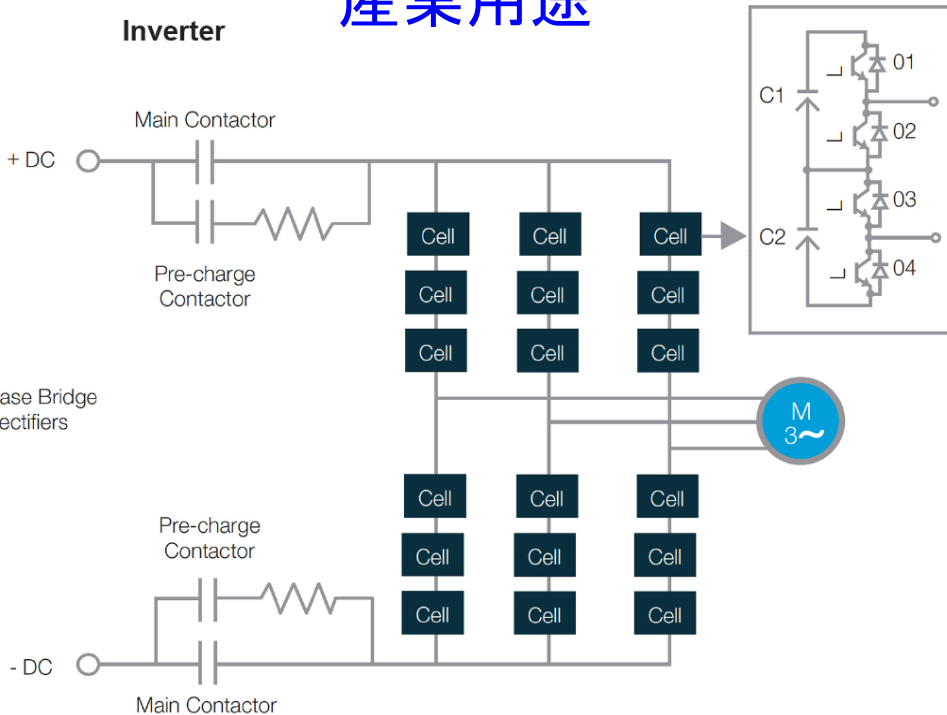
- 系統電流正弦波・回生可能
- 制御法が複雑
- 実装が困難

[6] R. Marquardt, "Stromrichterschaltungen mit verteilten Energiespeichern," Offenlegungsschrift, DE 10103031 A1, 2001, 2002. (in Germany)

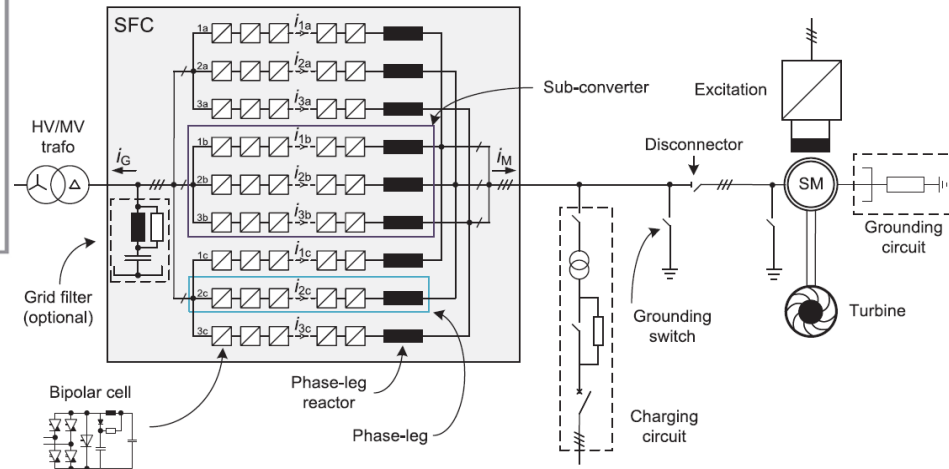
[7] R.W. Erickson and O.A. Al-Naseem, "A new family of matrix converters," in *Conf. Rec. IEEE-IECON 2001*, vol. 2, pp. 1515–1520, 2001.

MMCCモータドライブの実用化例

産業用途



揚水発電用途



日立エナジーによる世界初のMMC型揚水発電用可変速モータドライブシステム

(Power: 300 MVA)

ベンシャウ社によるMMCモータドライブシステム

(7.2 kV – 35 kV, 225 – 9000 kVA)

https://benshaw.com/downloads/brochures/Benshaw-M2L-Brochure_EN.pdf

A. Christe, A. Faulstich, M. Vasiladiotis, and P. Steinmann, "World's First Rated Direct ac/ac MMC for Variable-Speed Pumped-Storage Hydropower Plants," IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 70, No. 7, July, 2023.

SDBC変換器の無効電力補償装置 (STATCOM) への応用

SDBCの実用化例1(三菱電機社)



米国DE社納めのSTATCOM



STATCOM SMが配置されたバルブ室

出典：三菱電機技報2018年1月号

概要

米国電力会社DE社に導入

系統電圧安定化が目的

故障時のセル交換が用意

据付が容易で工期短縮が
可能

今後はHVDCに技術を適
用予定

SDBCの実用化例2(東芝社)



無効電力補償装置用SDBCの外観

<https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/jp/technology/corporate/review/2025/02/2-6.pdf>

2024年8月運開, バッファリアクトルレスによる省スペース化

四国電力中村変電所

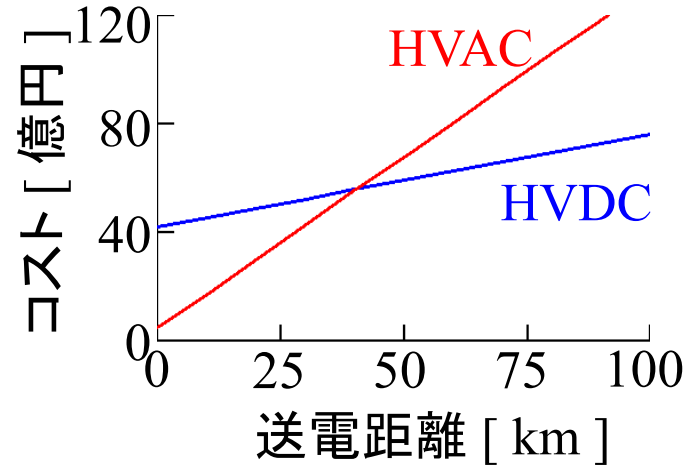
直流送電 (HVDC) への応用

高圧直流送電システム (HVDCシステム)

HVDCシステムの特長 [1]

- 長距離送電に適する
 - 低コスト
 - 安定性の制約なし
- 非同期連系が可能

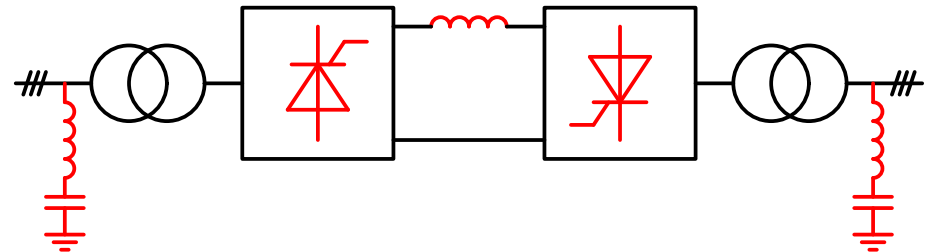
送電距離 vs.コスト (ケーブル送電) [2]



従来のお励式HVDCシステム

特長	<ul style="list-style-type: none"> ● 大容量 紀伊水道: 1.4 GW [3]
課題 [1]	<ul style="list-style-type: none"> ● 低力率 ● 大型な高調波フィルタ

他励式変換器を使用



[1] J. Arrillage, Y.H. Liu, and N.R. Watson, "Flexible power transmission: The hvdc options," 2007: Wiley

[2] D. Hur, "Economic Considerations Underlying the Adoption of HVDC and HVAC for the Connection of an Offshore Wind Farm in Korea," *JEET Trans. Electric Power Engineering*, vol.7, no.2 (2012-8)

[3] 堀内, 野呂, 田辺, 「広く適用されている高電圧・大容量基幹系統用パワーエレクトロニクス装置」, 東芝レビュー, vol. 55, no. 8 (2000)

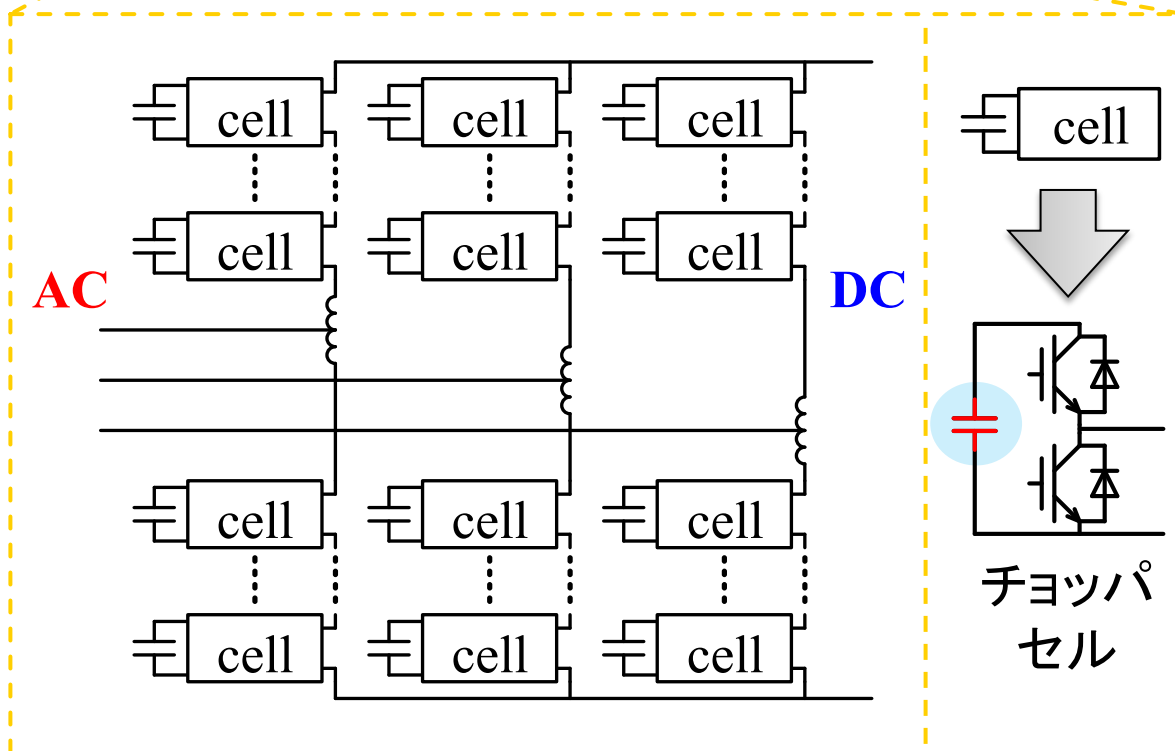
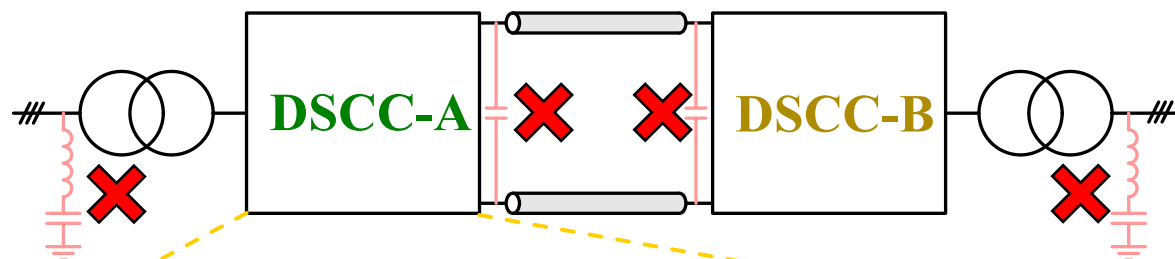
DSCCを用いたHVDCシステム [1]

DSCC

- 有効・無効電力を**独立制御**可能
- 交流電圧が**マルチレベル**波形
- セルのコンデンサが**エネルギーバッファ**

DSCCを用いたHVDCシステム

- 系統安定度の**向上**
- 高調波フィルタが**不要**
- 直流電力と交流電力を**独立に制御**



DSCCの直流送電への最初の適用例

変換所名		Pittsburg	Potrero
交流側	系統電圧	230kV	115kV
	系統周波数	60Hz	60Hz
	短絡容量	63kA	63kA
	無効電力(最大負荷時)	±145MVar	±170MVar
	無効電力(最小負荷時)	±300MVar	±300MVar
直流側	出力	400MW	
	直流電圧	±200kV	
	最大直流電流	1050A	
送電距離		86km	



システム仕様と結線ルート

----- 特長 -----

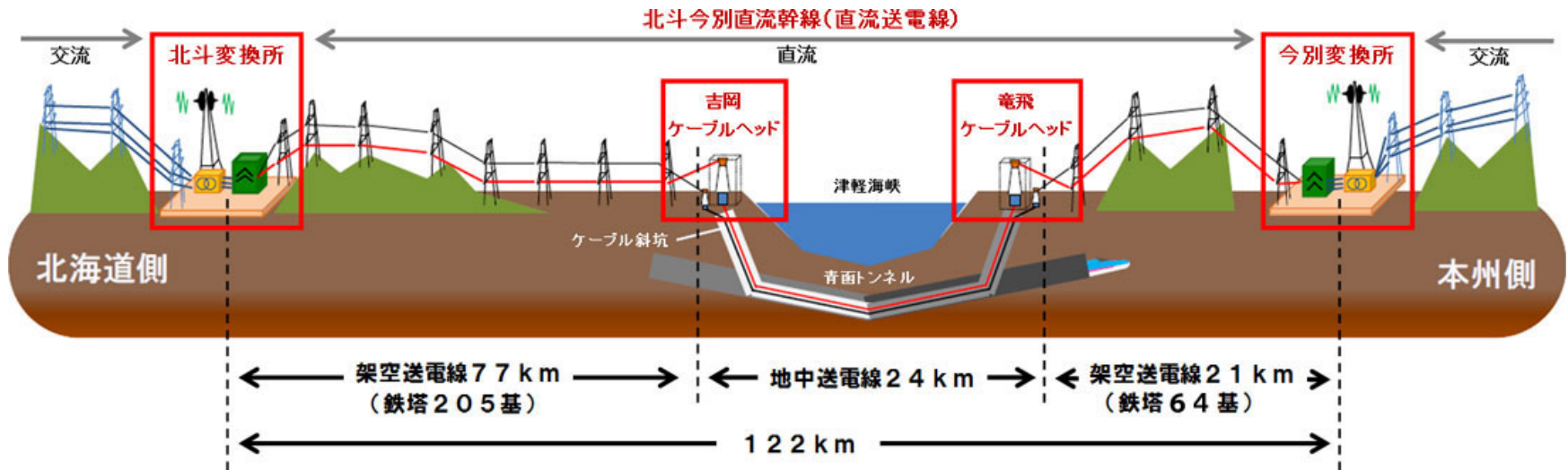
世界初のDSCCを用いた直流送電システム

2010年に運転開始

ピッツバーグからサンフランシスコに電力を供給(86 km)

日本では北本連系設備として2019年運開

日本における適用例



出典:北海道電力HP

特長

目的: 北海道の電力品質の更なる安定化

定格電力: 300 MW, 単極, +250 kVdc, 1200 Adc

2019年3月運開, **新々北本2028年3月運開予定^[1]**

ご清聴ありがとうございました