

# 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

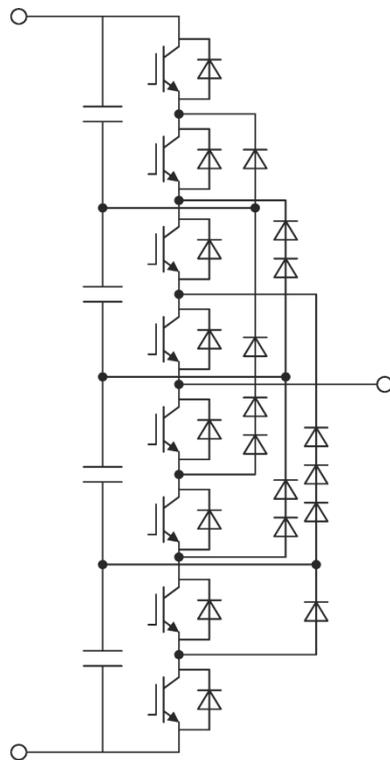
---

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

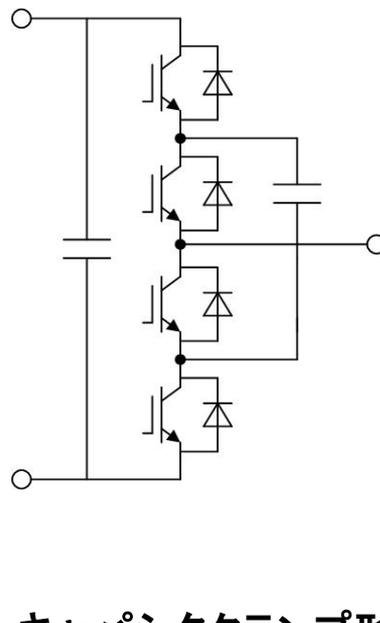
2025年4月24日

# トランスレスマルチレベル変換器

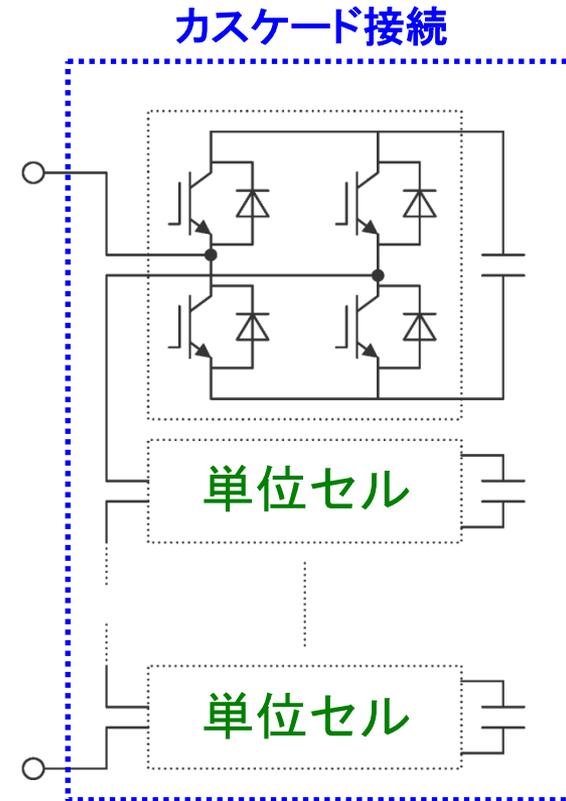
利点： 変圧器未使用で**高圧化**・**大容量化**・**高調波低減**が可能



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

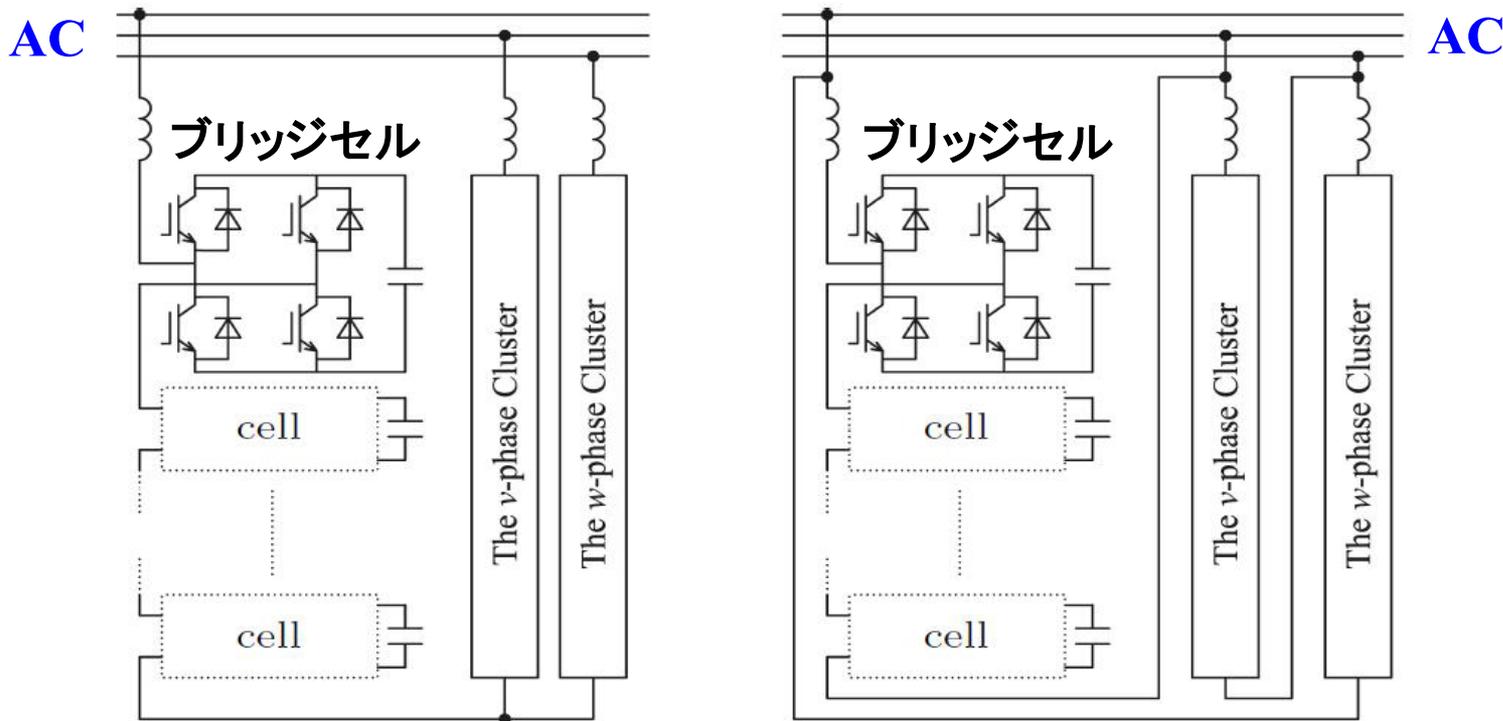
単位セル

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)

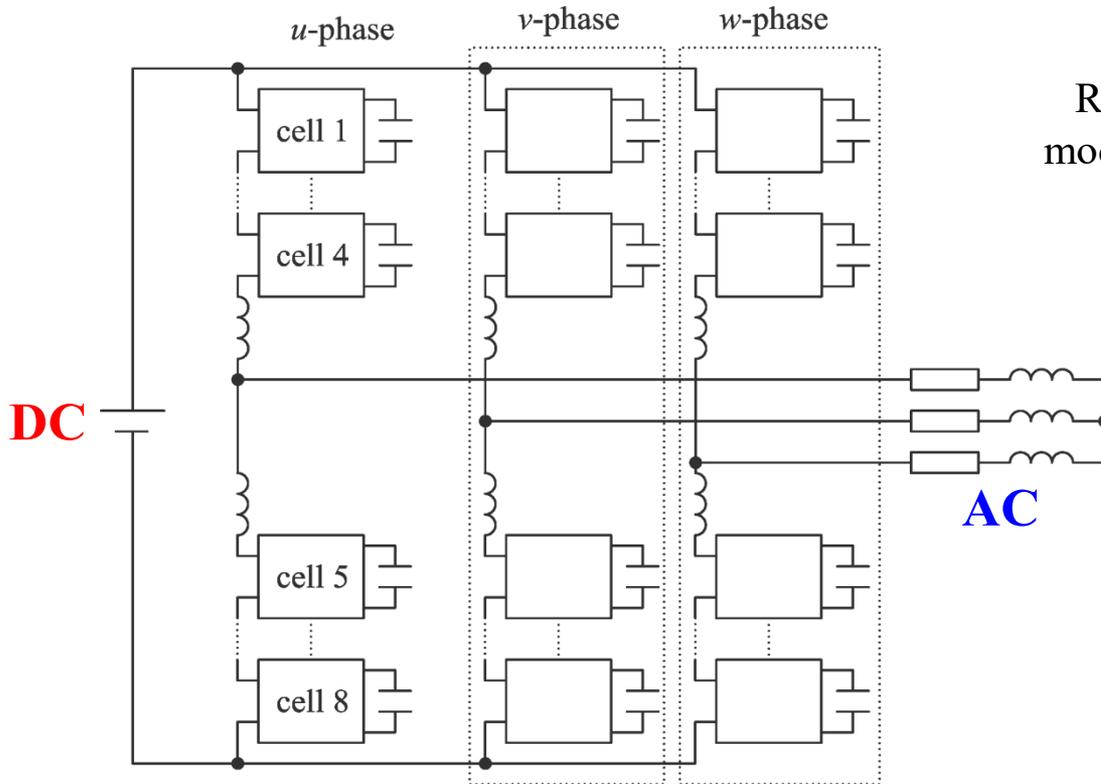
デルタ結線MMCC (SDBC)

----- 応用 -----

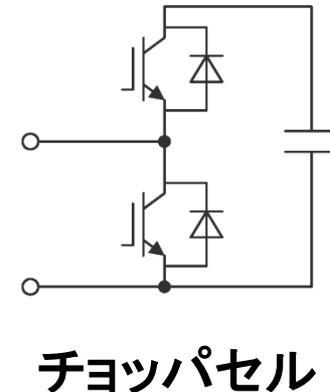
□ 自励式無効電力補償装置STATCOM  
(STATIC synchronous COMPensator)

実用化例多数有

# MMCCの歴史(2000年代初頭)



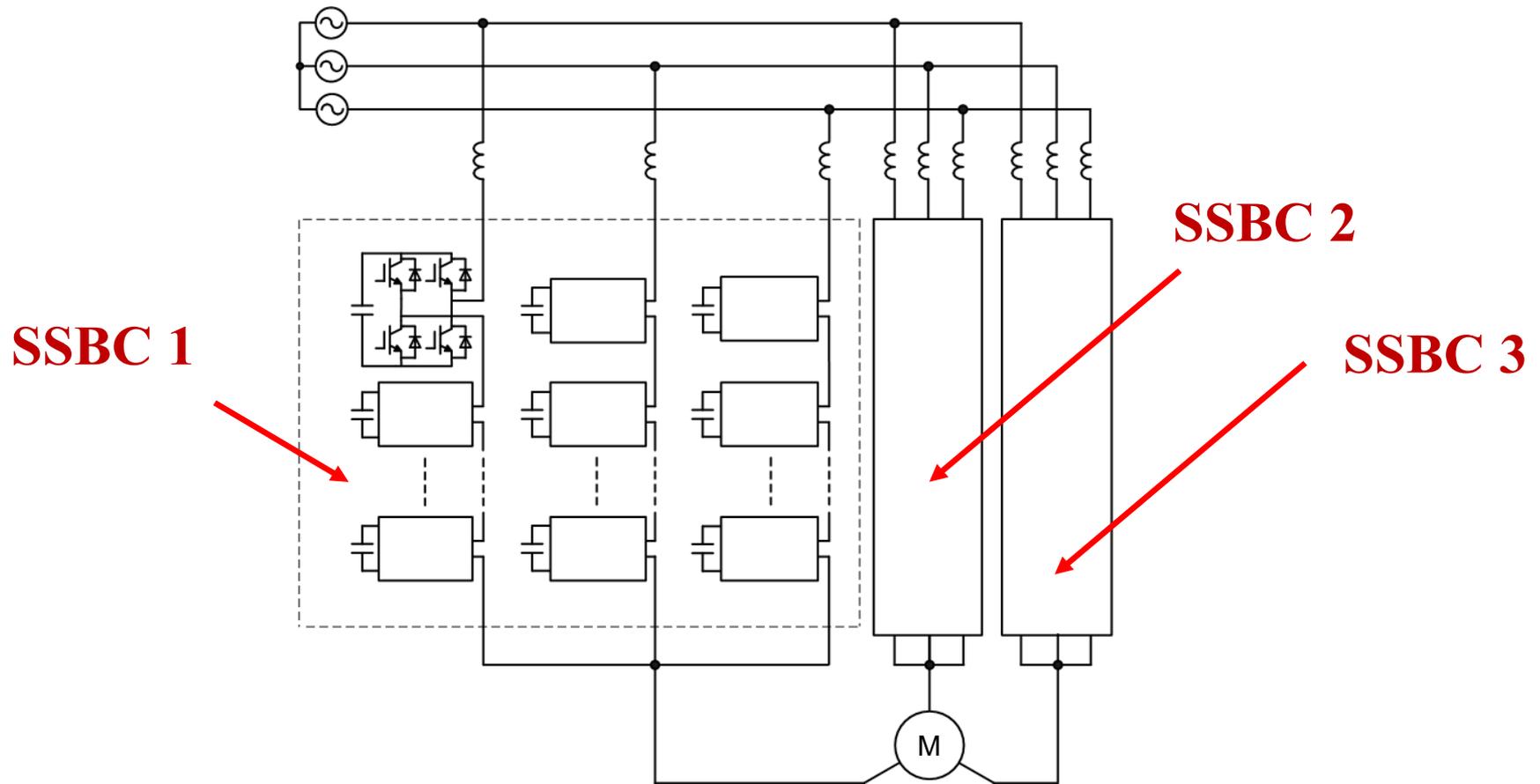
R. Marquardt, and A. Lesnicar, 'A new modular voltage source inverter topology,' in *Conf. Rec. EPE 2003*, CD-ROM.



二重スター・チョツパセル方式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

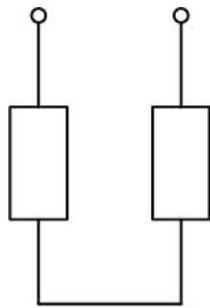
モジュラー・マトリックスコンバータとも呼ばれる

# モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器の構成

---

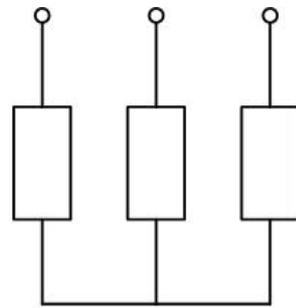
# MMCCの結線

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)



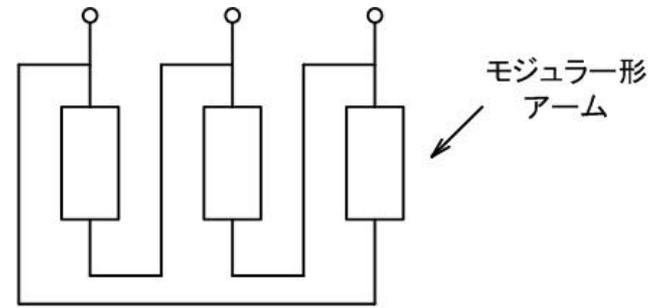
(a)

V結線



(b)

スター結線

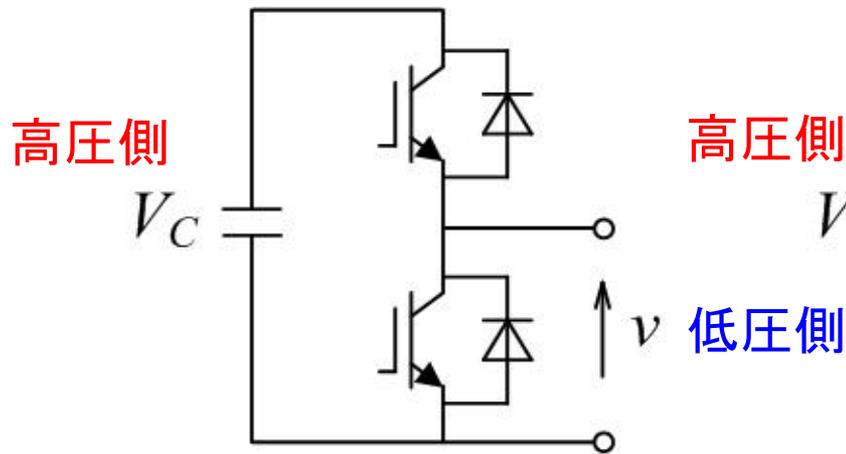


(c)

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

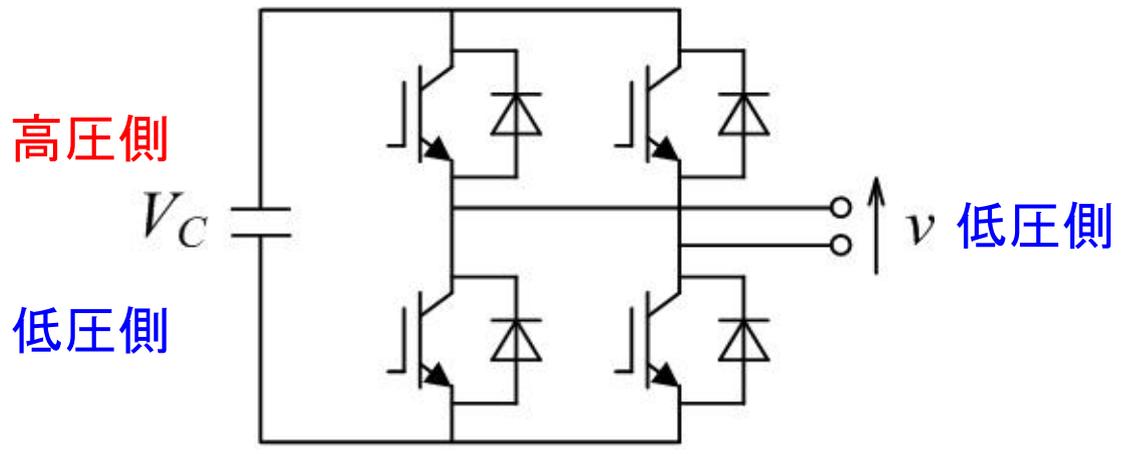


チョツパセル

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

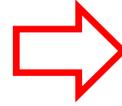
低圧側電圧

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

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:  $-V_C \leq v \leq V_C$

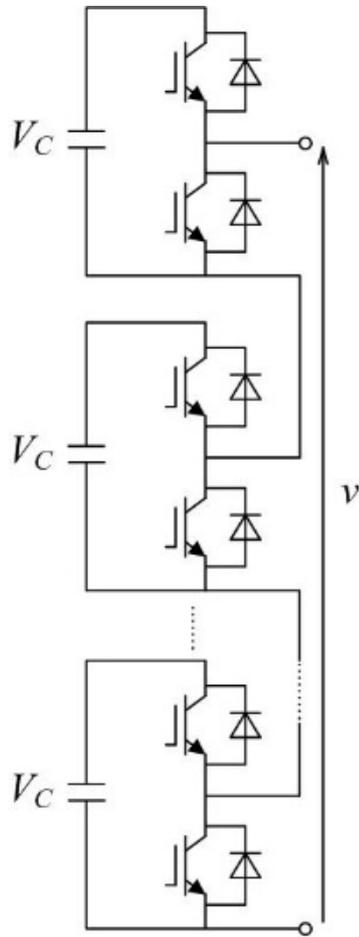
---

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

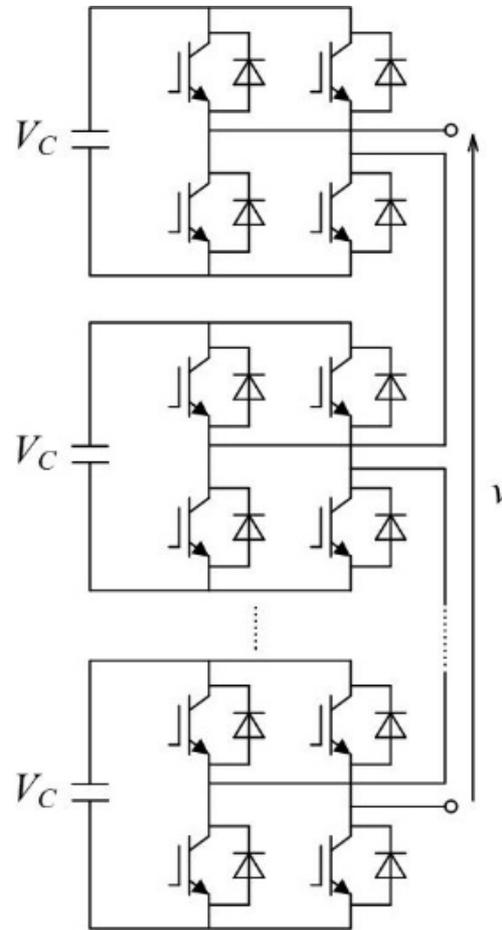
ブリッジセル: 正負両極性だが, 使用・導通デバイス数は2倍

---

# 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

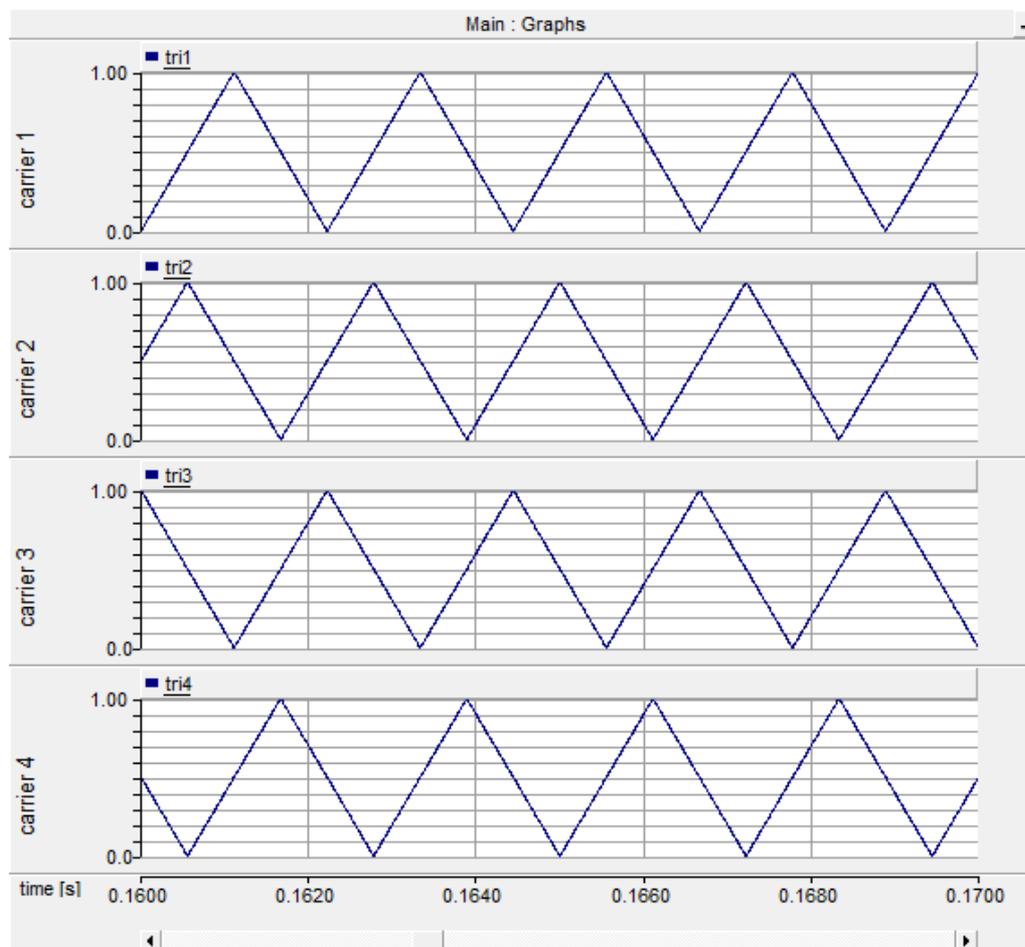
# 位相シフトPWM

キャリア1 ( $0^\circ$ )

キャリア2 ( $90^\circ$ )

キャリア3 ( $180^\circ$ )

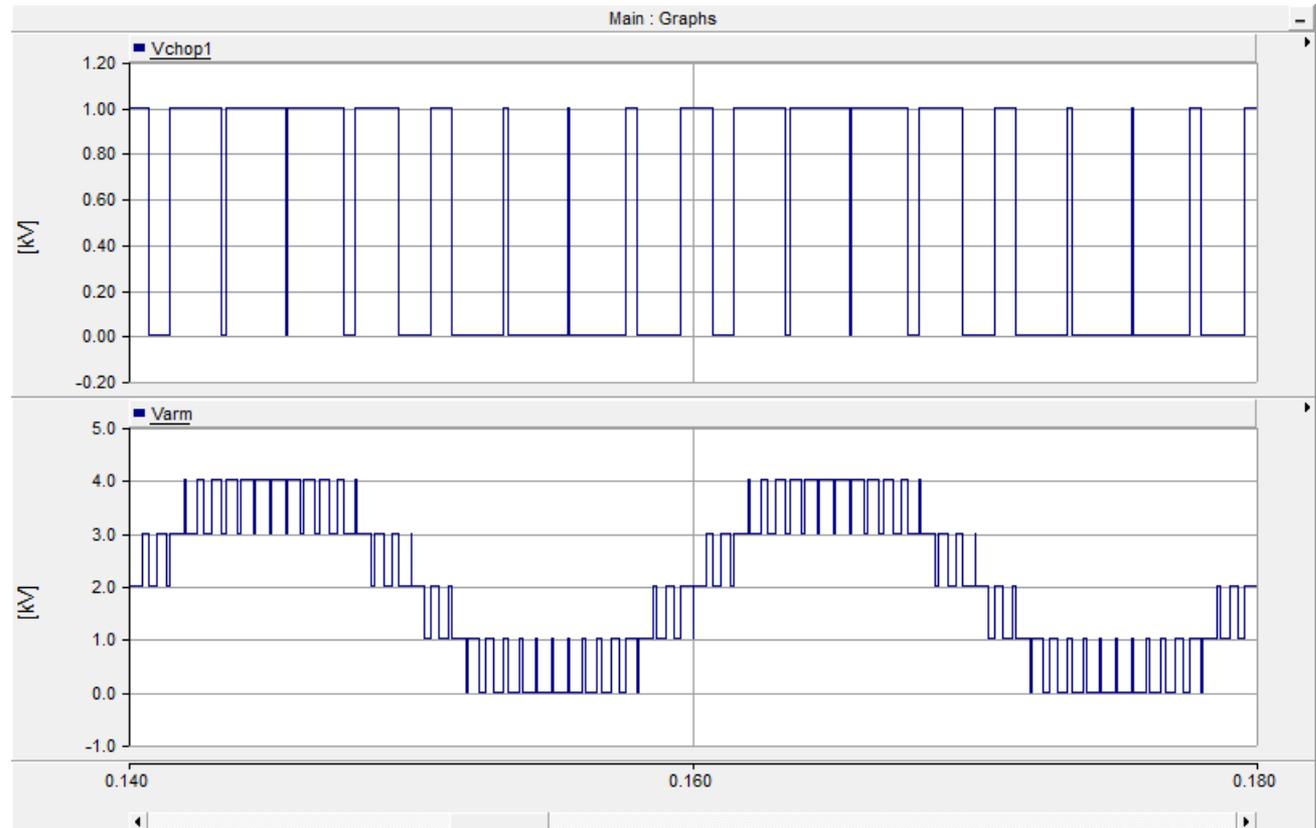
キャリア4 ( $270^\circ$ )



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

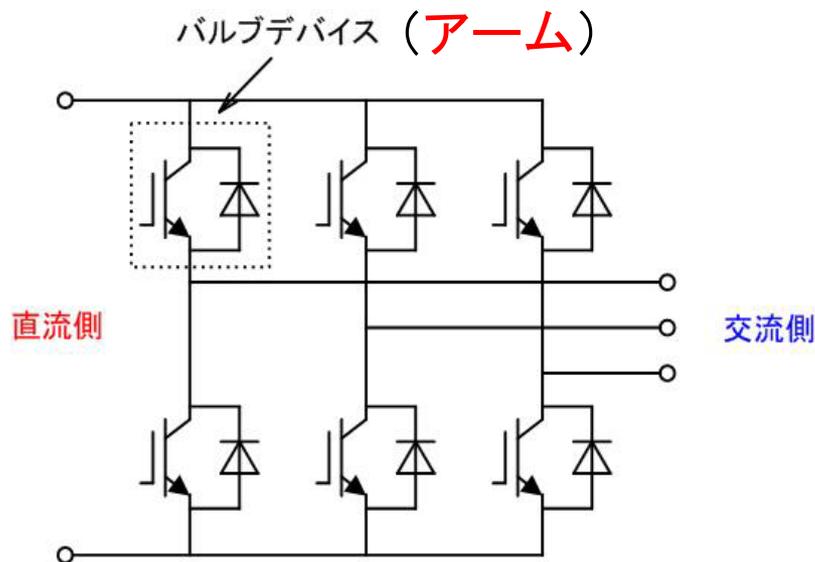
チョッパセル1の  
端子電圧



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

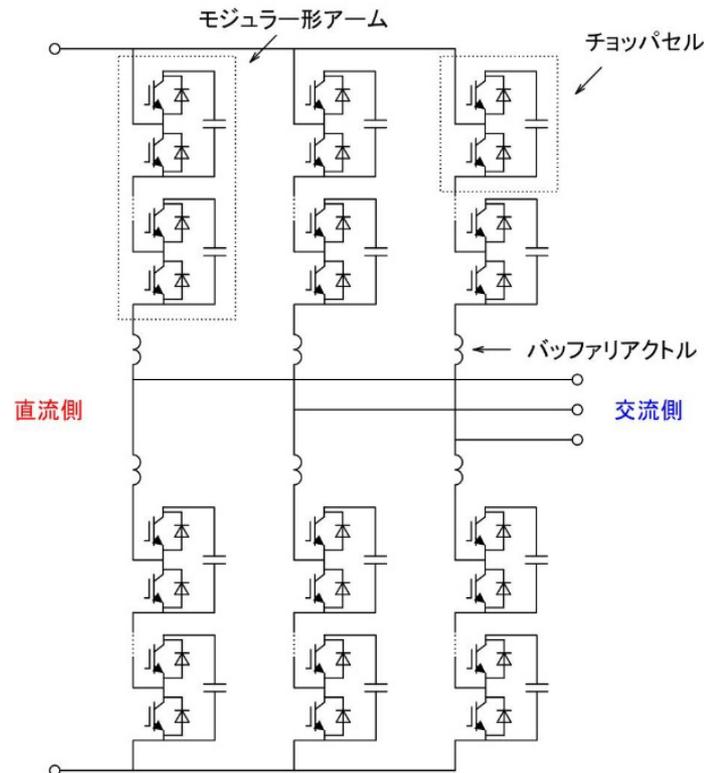


一般的な三相2レベル変換器

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



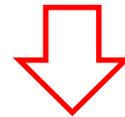
MMCCのアーム



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**

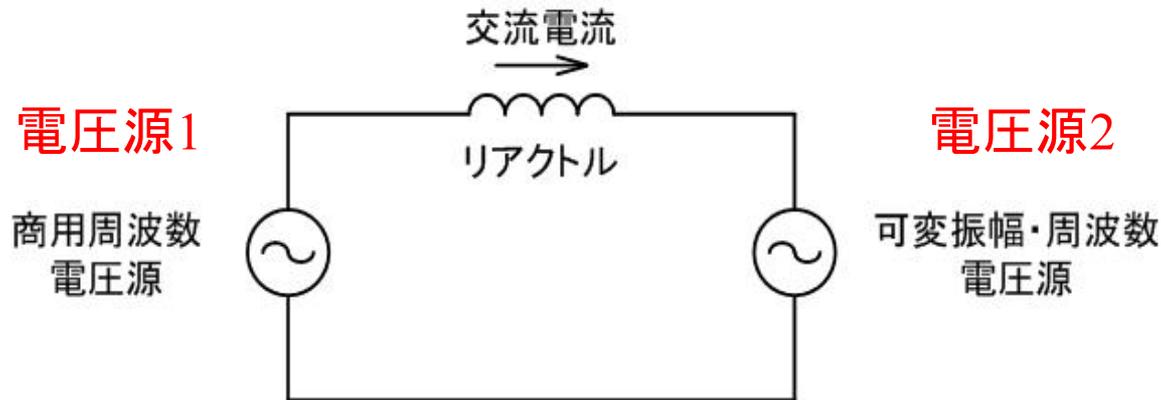
MMCCの直流コンデンサ電圧一定制御の実現



**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

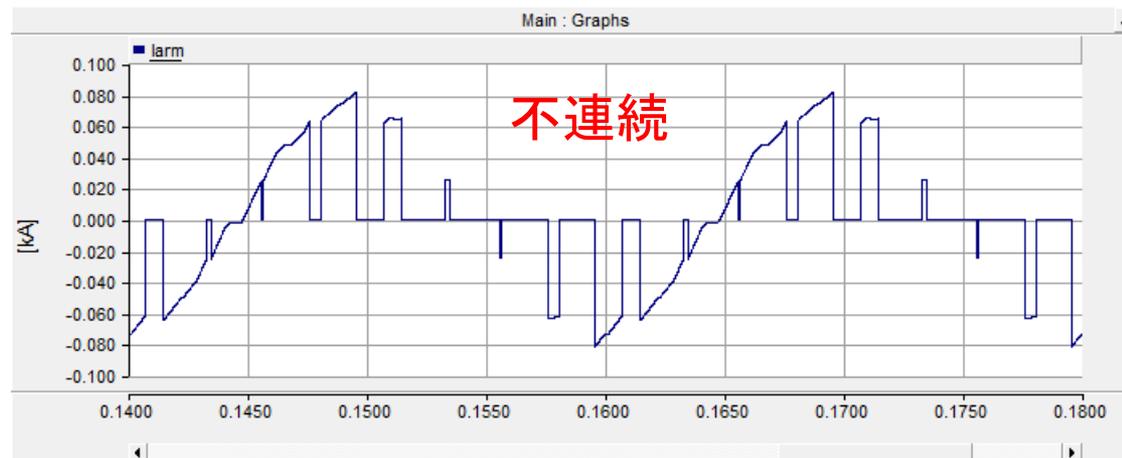


2個の電圧源を有する回路

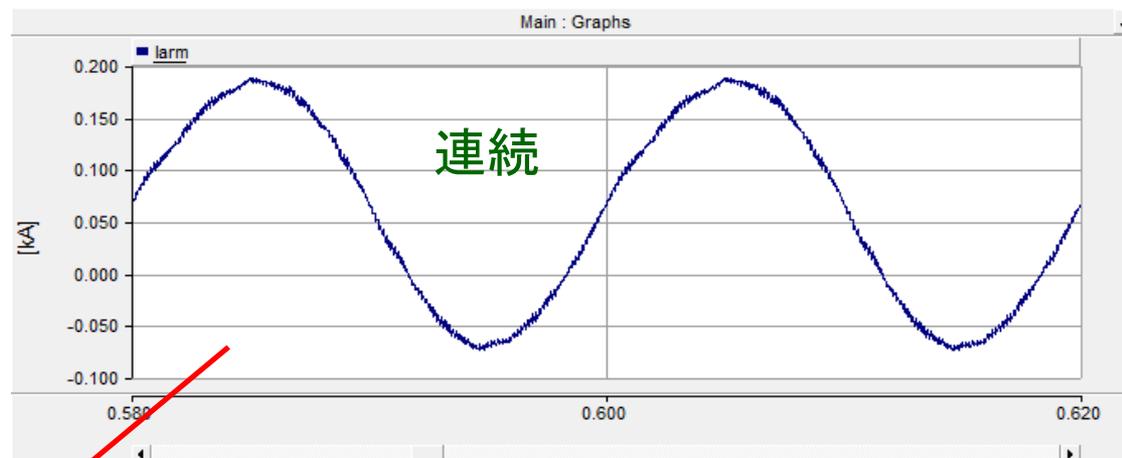
複数の電圧源 ⇨ リアクトルを介して接続  
(バッファリアクトルとも呼ばれる)

# 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)

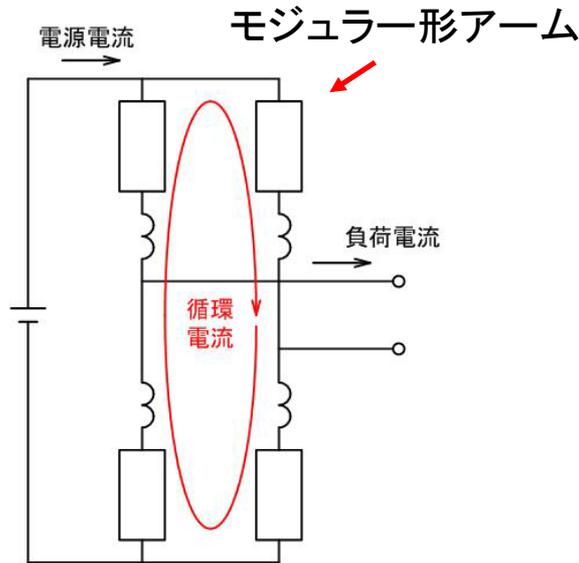
---

# 循環電流

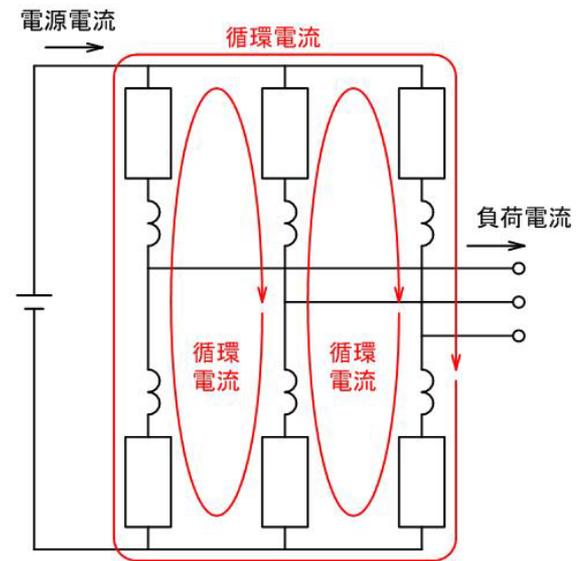
循環電流



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

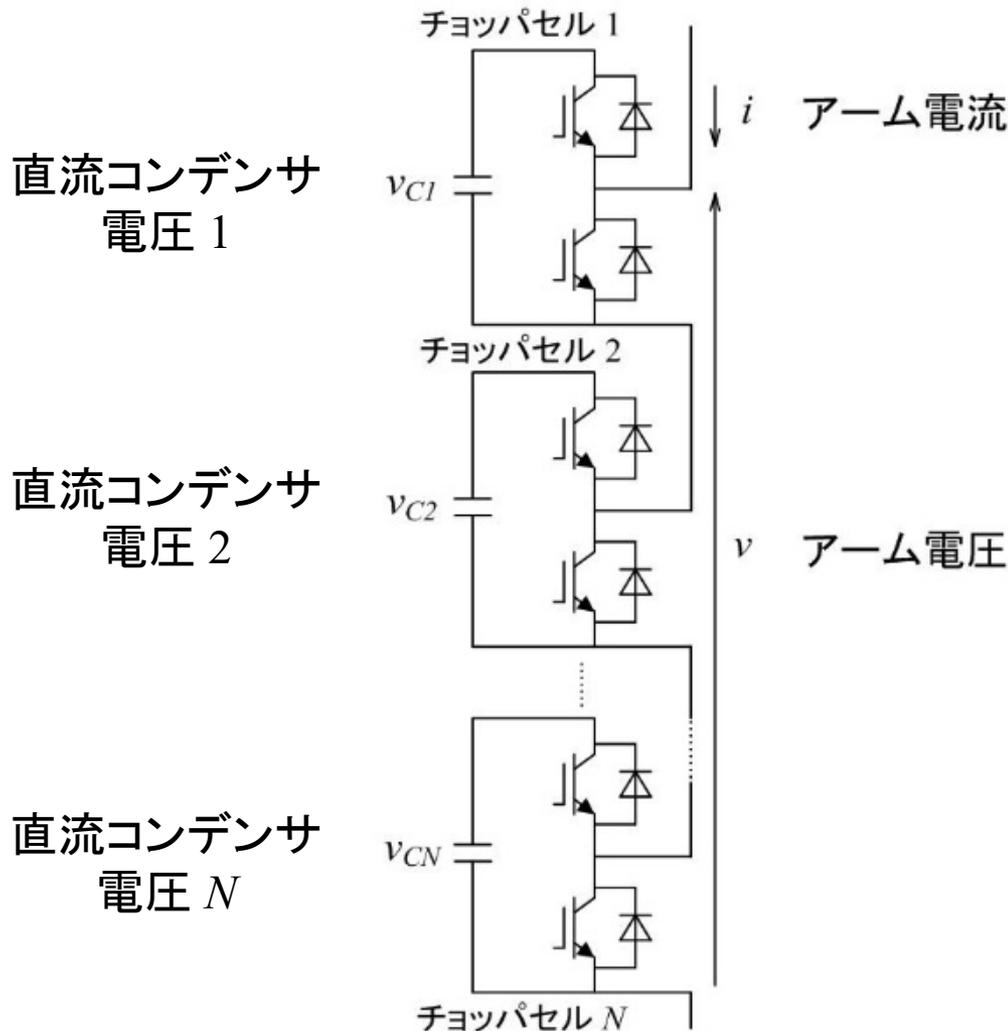
単相フルブリッジ構成MMCC  自由度: 1

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)

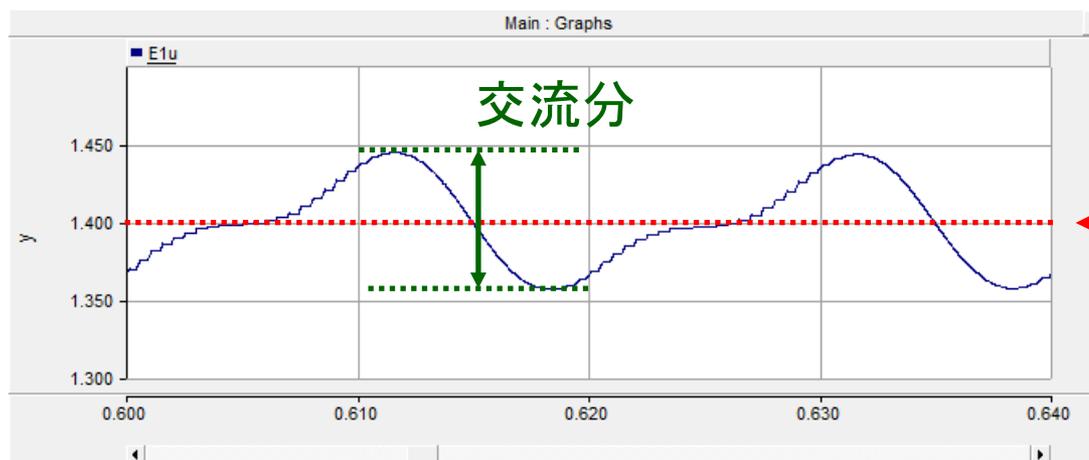
# 直流コンデンサ電圧の交流分

----- チョップパセル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

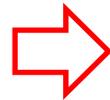


直流分

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



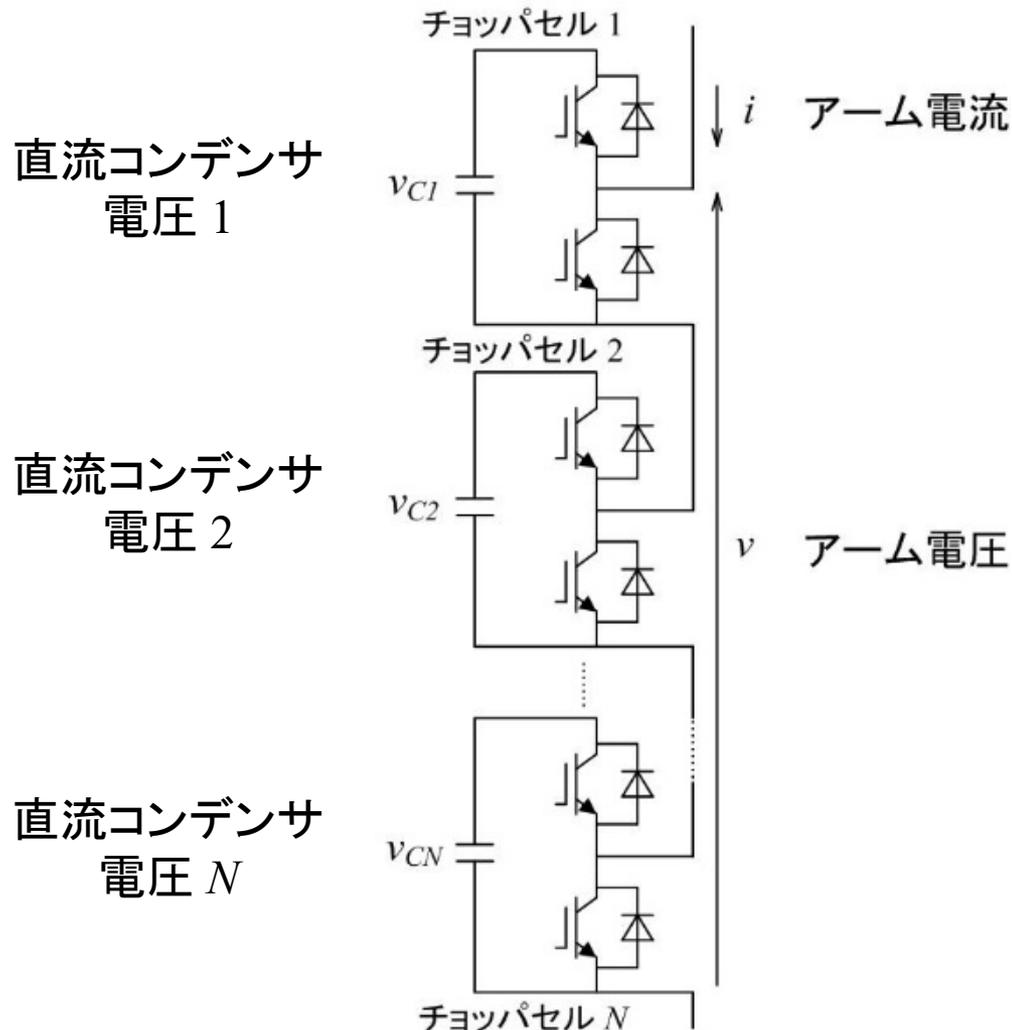
1. パワーデバイスの過電圧
2. 各チョッパセルの過変調
3. 制御系の安定性低下  
(制御系の外乱として作用)

## 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



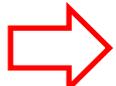
独立に制御不可  
(独立変数不足)



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



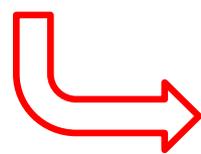
# 高圧・大容量モータドライブへの 応用

---

# 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<sup>[1]</sup>



全電動機数の0.03%<sup>[1]</sup>

世界の全消費電力量の10.4%を消費<sup>[1]</sup>

1年あたり約4万台が出荷<sup>[2]</sup>

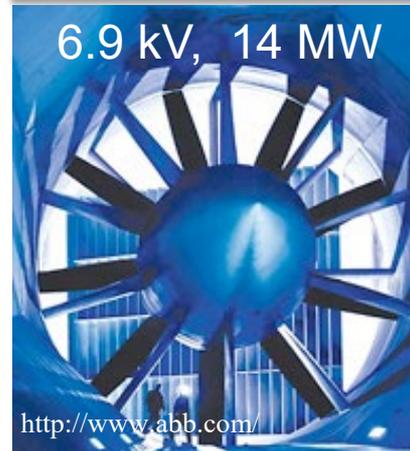
鉄鋼圧延主機



ミル(粉碎機)



風洞実験ファン



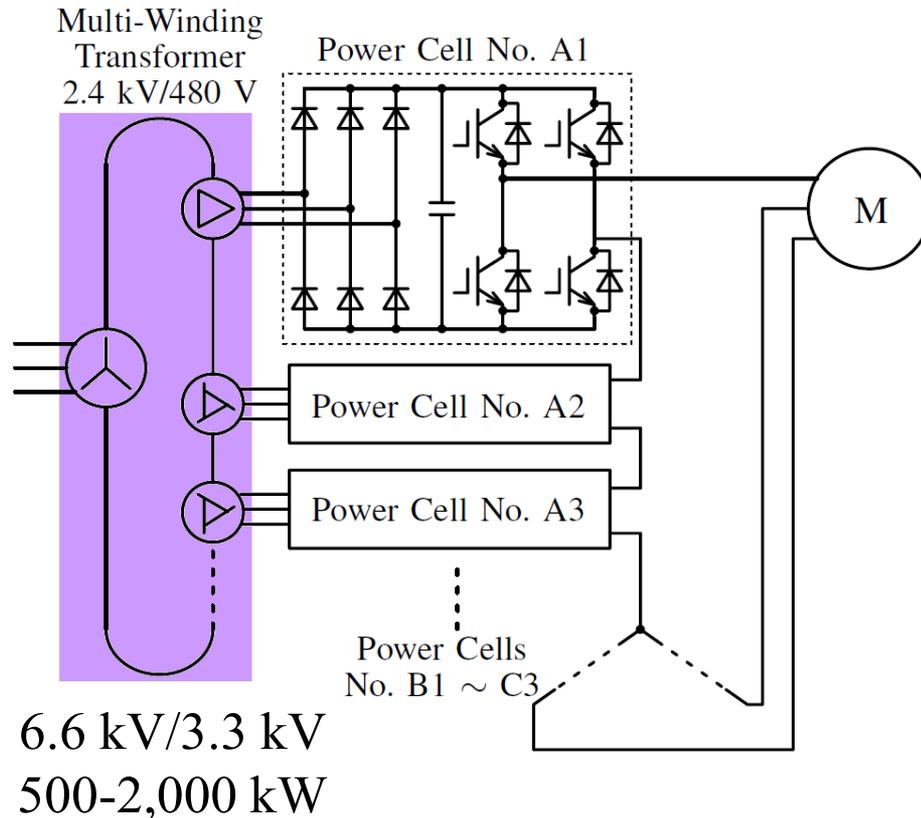
LNGコンプレッサ



[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

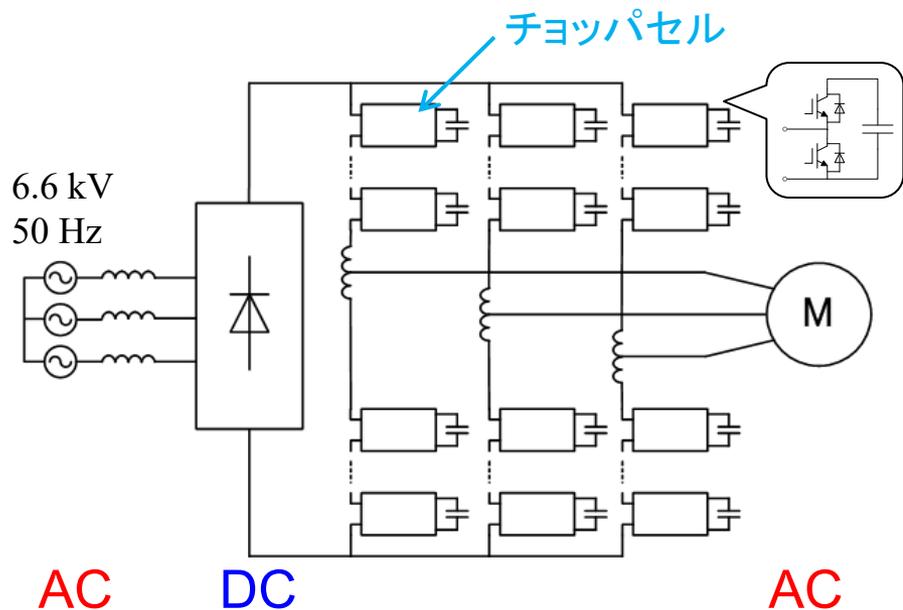
P. W. Hammond, "A new approach to enhance power quality for medium voltage ac drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 1, pp. 202-208, 1997

**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<sup>[6]</sup>

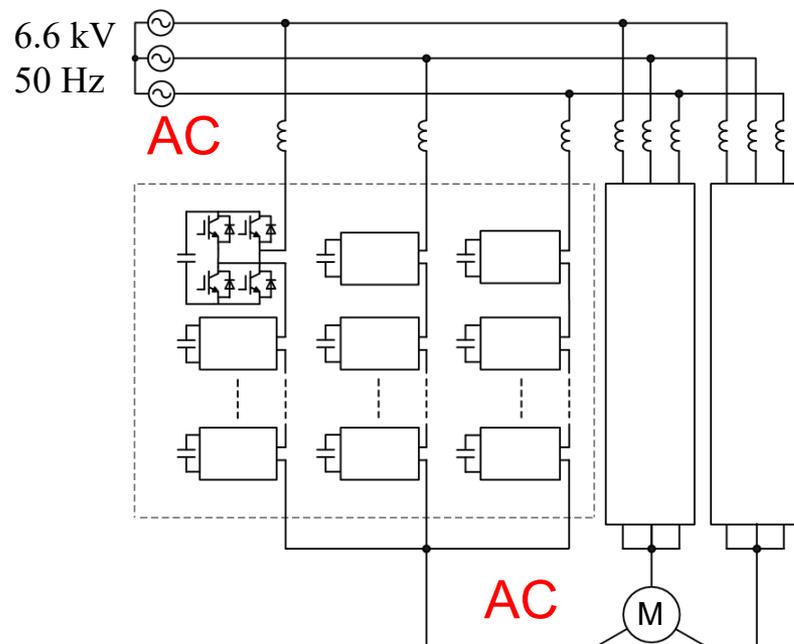
/ Double-Star Chopper Cells



- 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<sup>[7]</sup>

/ Triple-Star Bridge Cells



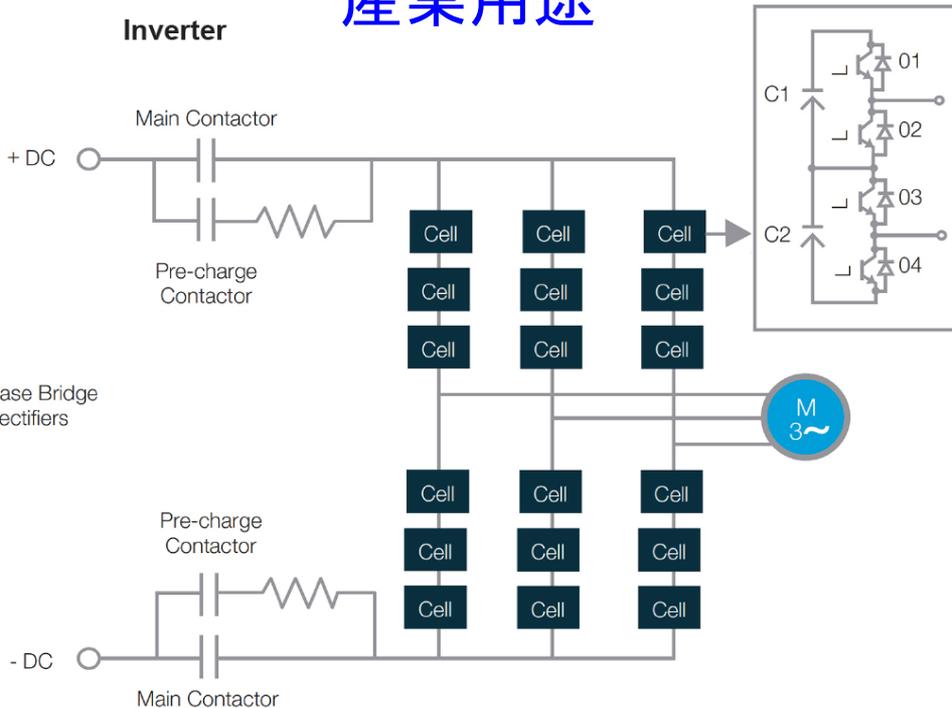
- 系統電流正弦波・回生可能
- 制御法が複雑
- 実装が困難

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

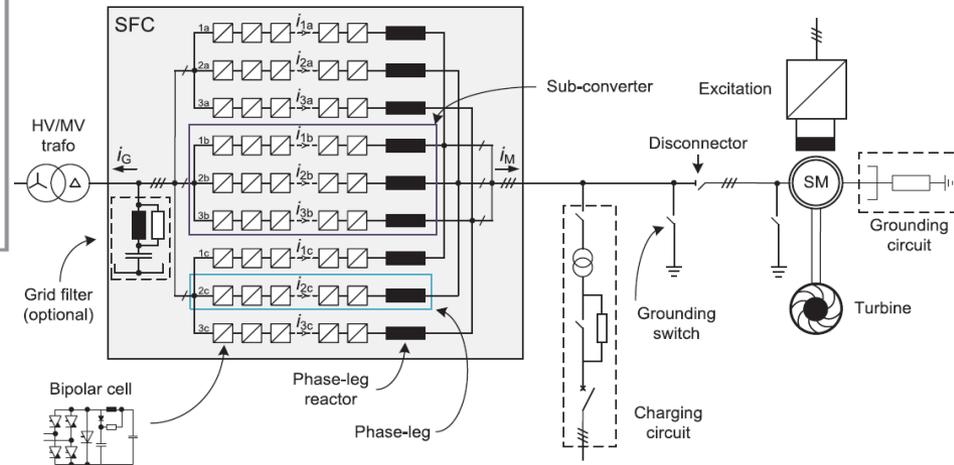
[7] R.W. Erickson and O.A. Al-Naseem, "A new family of matrix converters," in *Conf. Rec. IEEE-IECON 2001*, vol. 2, pp. 1515–1520, 2001.

# 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](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

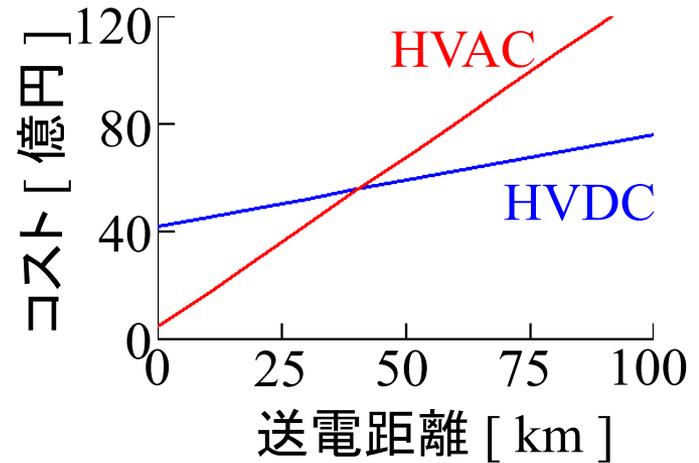
---

# 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

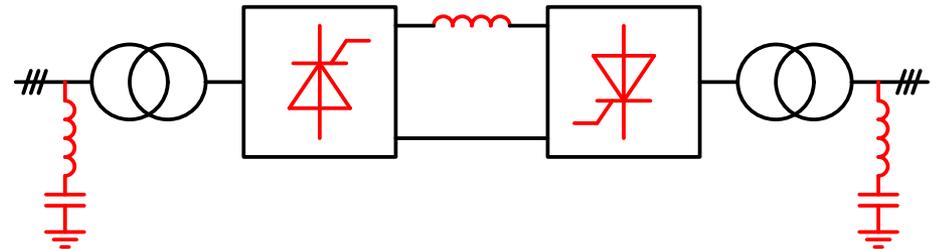
送電距離 vs.コスト (ケーブル送電) [2]



## 従来のお励式HVDCシステム

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

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)

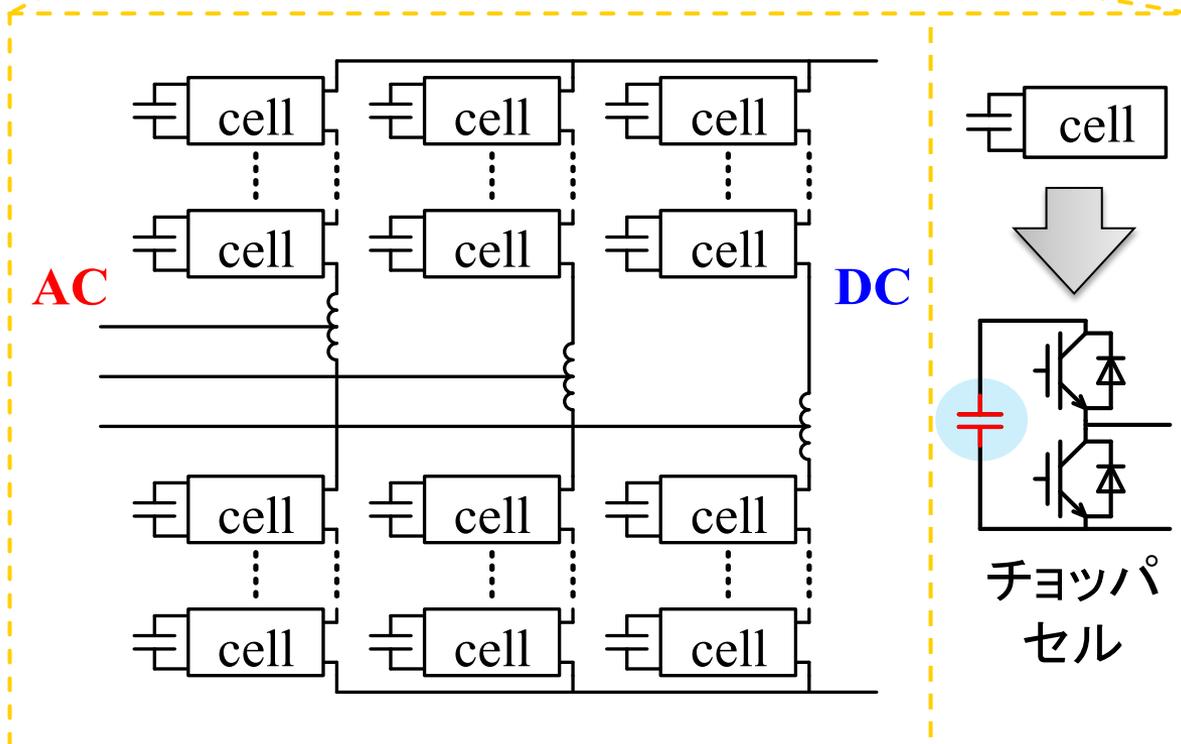
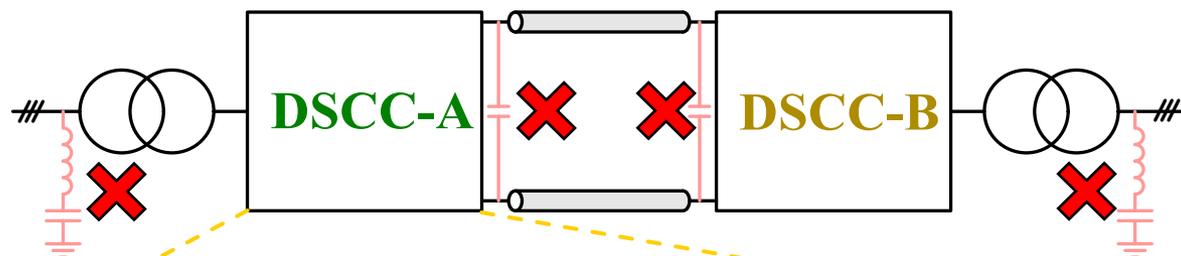
# DSCCを用いたHVDCシステム [1]

## 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

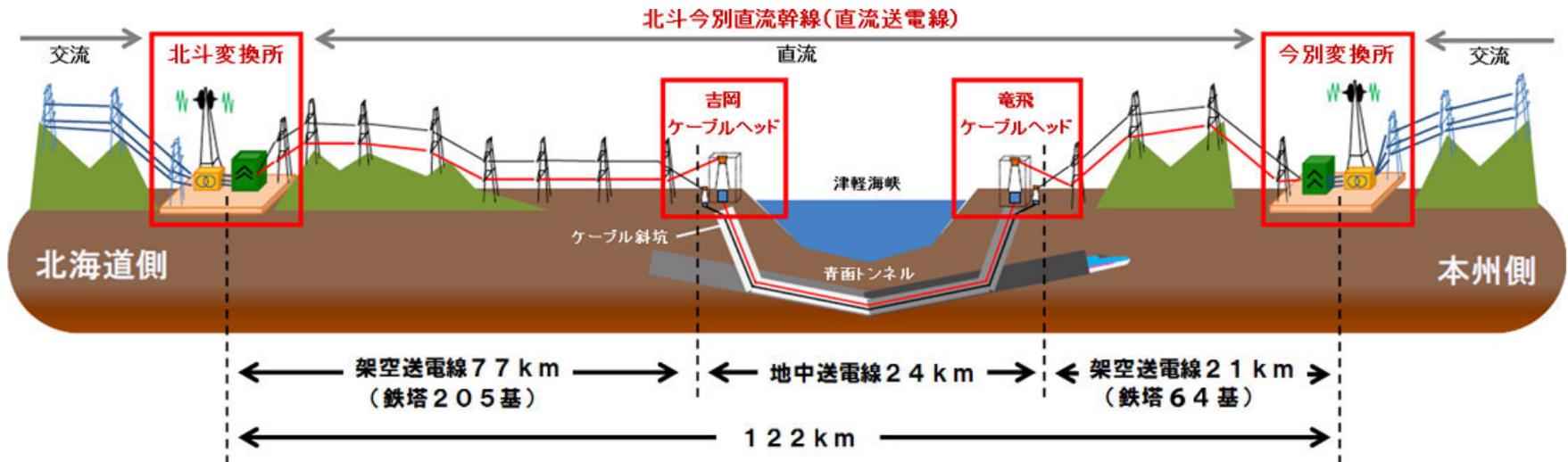
2010年に運転開始

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<sup>[1]</sup>**

---

ご清聴ありがとうございました