

直流送電用交直変換回路の基礎

2023年6月21日

東京都市大学 理工学部 電気電子通信工学科

電力システム研究室

中島 達人

■ 氏名

中島 達人 (なかじま たつひと)



■ 所属

東京都市大学 理工学部 電気電子通信工学科 電力システム
研究室 教授

■ 専門分野

電力システム工学, 電力システム用パワーエレクトロニクス
とくに, 直流送電, 再生可能エネルギー (太陽光発電, 風力発電)

■ 学歴・職歴

1990年 東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻 博士課程修了
東京電力 (株) 入社, 技術研究所に所属

1990~ 同社にて電力系統用パワーエレクトロニクス設備 (直流送電,
太陽光発電, 電池電力貯蔵ほか) の研究開発に従事。

2008年~2011年 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻
特任准教授

2016年~ 東京電力より東京都市大学に転籍。教育・研究に従事。

■ 2023年度のメンバー構成（現在19名）

教員：1名，秘書：1名

博士課程：2名（社会人）

修士2年生：4名，修士1年生：2名

4年生：9名（大学院進学予定7名）

3年生：9月に約10名配属



JERA川崎火力発電所見学

■ 主な研究テーマ

電力系統シミュレーションと実験の二本柱

- 三端子洋上直流送電，離島直流送電の運用制御
- 系統連系インバータによる系統安定化制御
- 高速移動通信によるマイクログリッド制御
- 中古EVバッテリーの需給制御へのリユース

■ これまでの卒業生の主な就職先

東京電力，JERA，日立製作所，東芝三菱電機産業システム，富士電機，明電舎，日新電機，東光高岳，日揮など



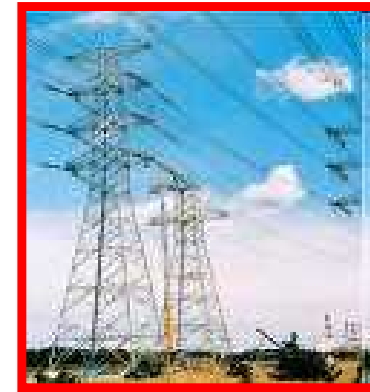
1.5kW風力発電模擬実験装置



リアルタイムシミュレータ

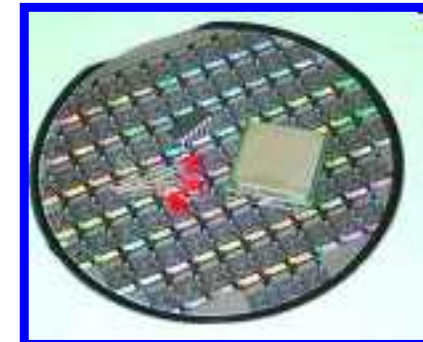
■ パワーエレクトロニクス（半導体電力変換）とは

- 半導体パワーデバイスを用いて,
- 電圧, 電流, 電力, 周波数などを変換したり,
- 回路を開閉する技術



■ パワーエレクトロニクスを支える3つの技術

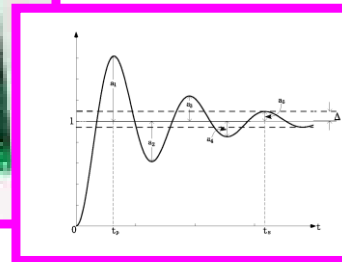
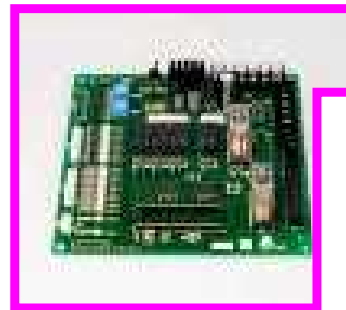
- パワー（電力系統, 電気機械）
- エレクトロニクス（パワーデバイス, 電子回路）
- コントロール（制御）



■ 電力システムへの応用のメリット

従来技術では……

- 発電, 送電, 変電, 配電のどこでも, 電力は50Hzまたは60Hzの交流
- 送電線, 配電線, 変電機器は, 機械的開閉装置（遮断器など）で開閉



パワーエレクトロニクスを適用するメリットは……（目的別の分類）

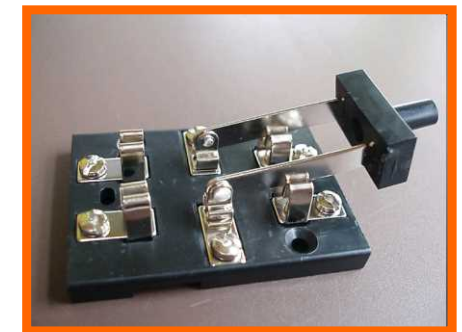
■ 交流と直流を使える。交流も使いやすくなる。

- 交流だけではなく、直流も使えるようになる。
- 交流と直流から、使い方にふさわしいほうを選べる。
- 交流の周波数を変えられる。（例：50Hz→60Hz）
- 電圧、電流も制御しやすくなる。



■ 回路を高速に開閉できる。開閉量を調整できる。

- 回路を高速に開閉できる。（例：数ms以下）
- 開か閉かの2通りではなく、中間状態（0～100%の間）を取らせることもできる。（例：40%だけオンさせる）



パワーエレクトロニクスを適用するメリットは…… (機器別の分類)

■ 電力ネットワークを高度・柔軟に運用・制御できる。

- 直流連系 (周波数変換を含む) , 直流送電
- 分散型電源 (太陽光, 風力) , 電力貯蔵 (蓄電池)

■ 従来技術でも可能だが機能が一層向上する。

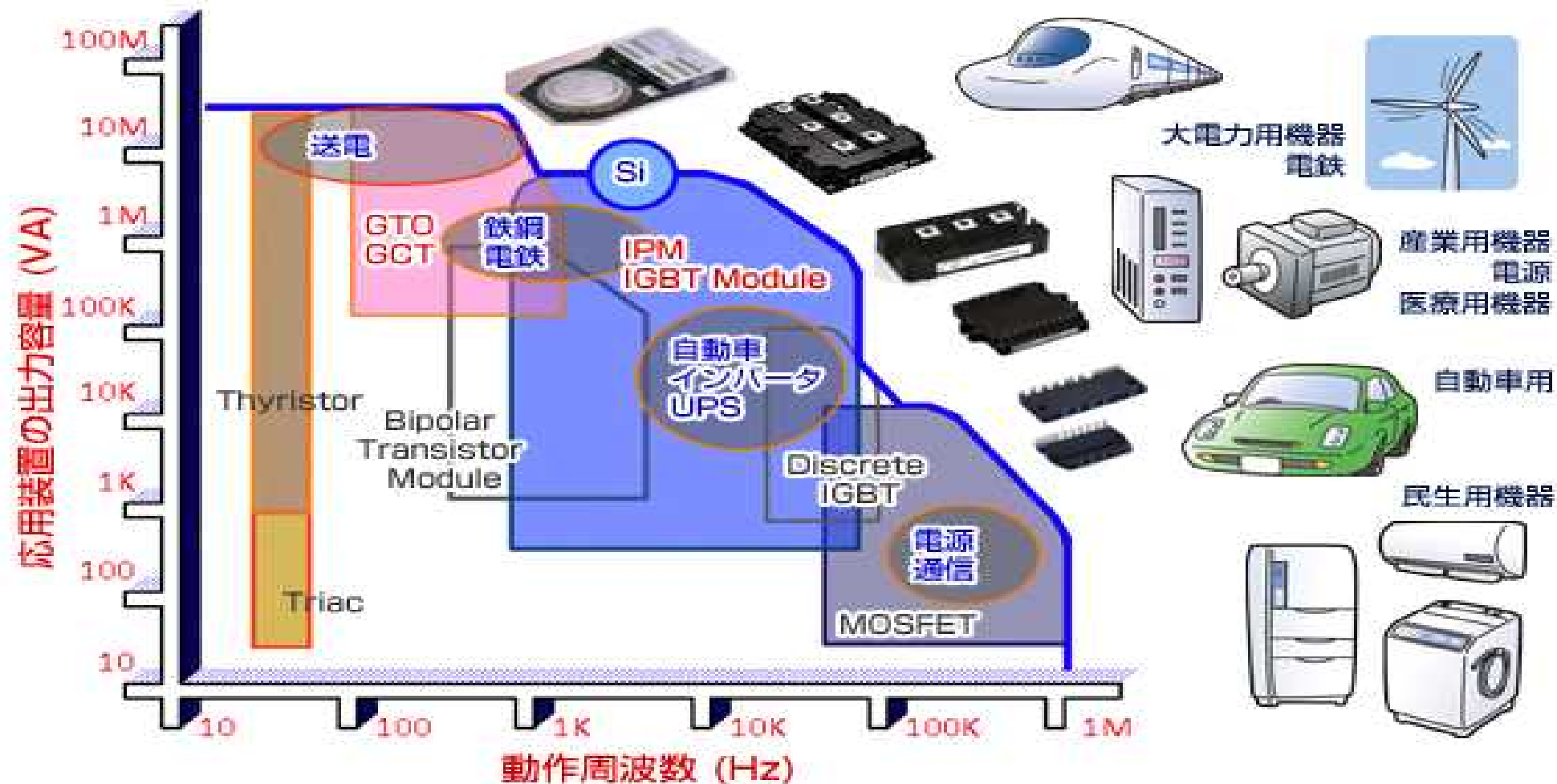
- 可変速揚水水力発電機
- 静止形無効電力補償装置 (SVC, STATCOM)
- 潮流制御装置 (UPFC)
- 電力品質改善装置

(瞬時電圧低下補償装置など)

■ 機器を高効率に運転できる。

- 回転機の高効率運転 (変圧器冷却ファンの可変速運転)

パワーデバイス応用の現状



現在、中・大容量電力変換に適用されているパワーエレクトロニクス技術の発展の殆どが、IGBTやIPM技術の進化にて支えられている。

出典：三菱電機HP

- Si（シリコン）に比べたSiC（シリコンカーバイド）の特長
 - * 絶縁破壊電界強度がSiの10倍 ⇒ 1/10の厚みで同じ耐圧，低損失
 - * ワイドバンドギャップ ⇒ 高温動作可能，発熱への冷却が楽になる
- バンドギャップ：禁制帯と伝導帯とのエネルギー(単位eV)差

■ SiCパワー半導体デバイスの製品例

耐圧3300V 電流容量1500A（DC連続使用）



N700S東海道新幹線



JR山手線

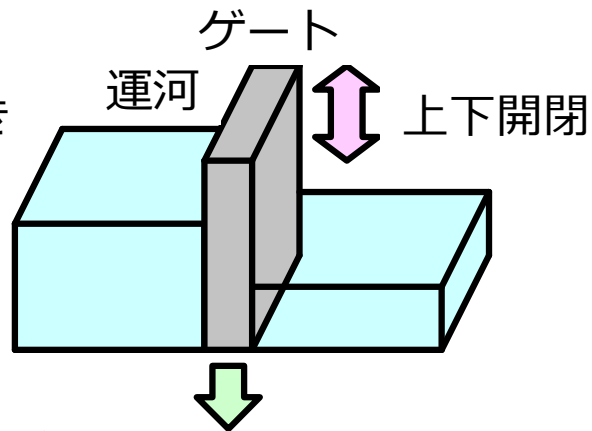
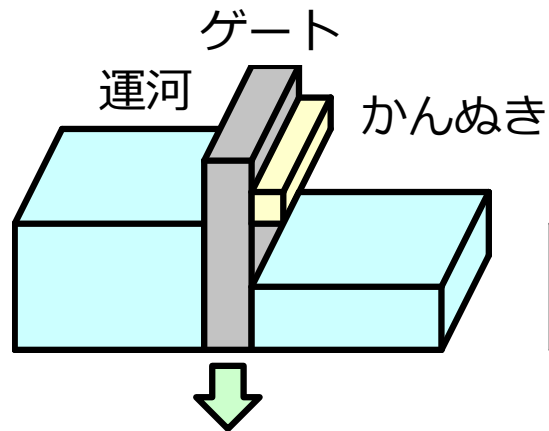
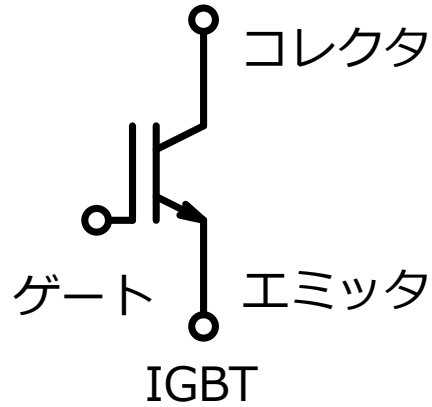
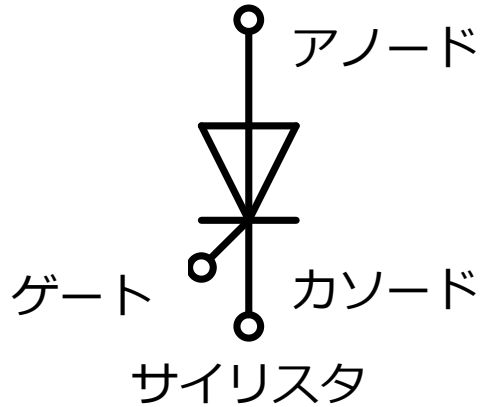


東京メトロ丸ノ内線

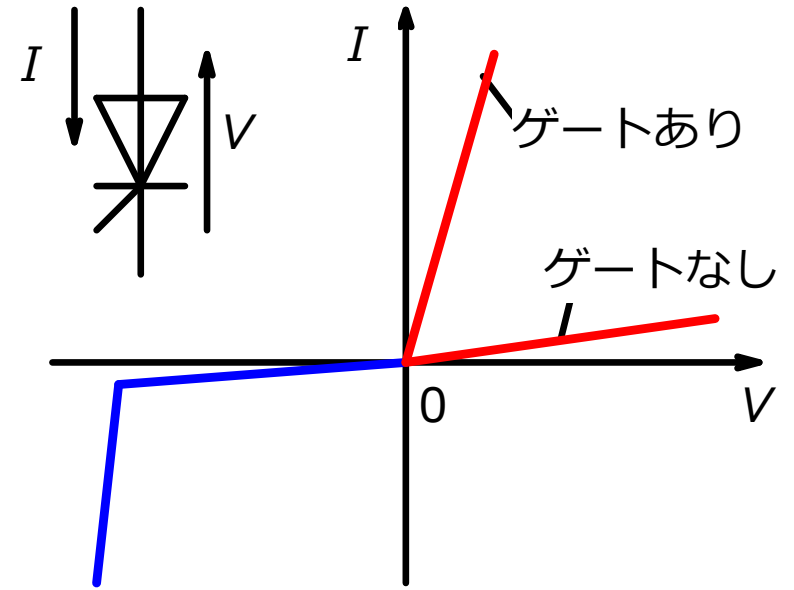
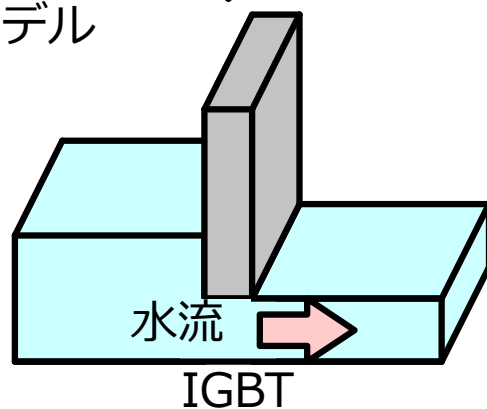
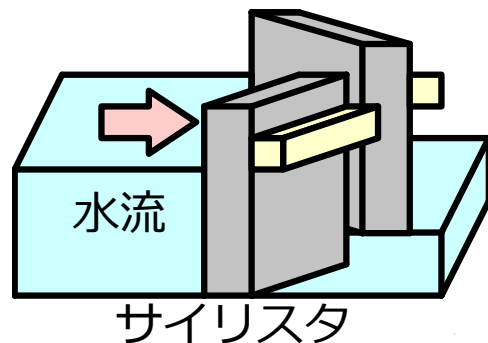
写真出典：各種ウェブ記事より

- 今後の電力系統用パワーエレクトロニクス機器への応用が期待される
 - 直流送電用交直変換器，再生可能エネルギー用系統連系インバータ等

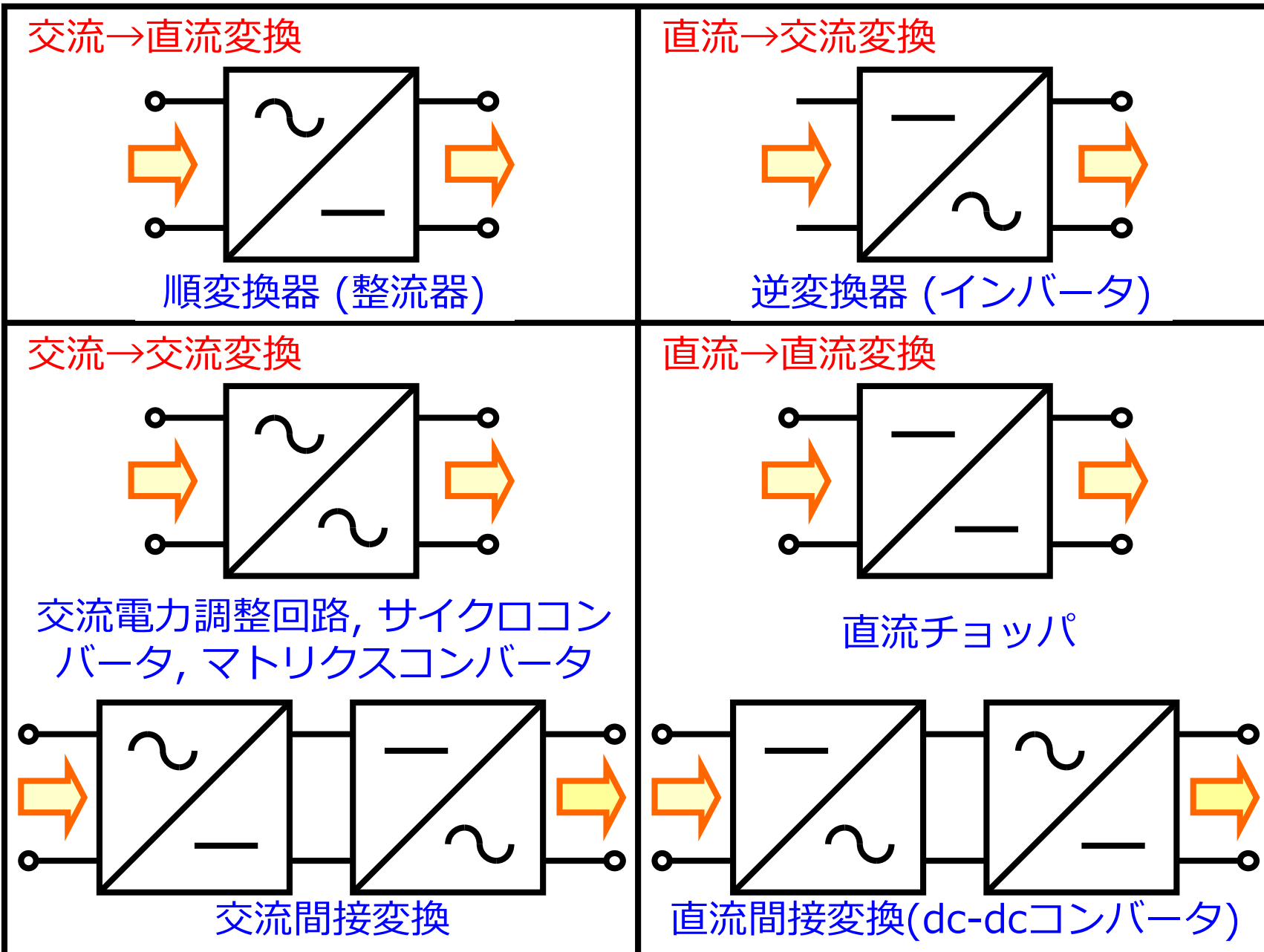
パワー半導体デバイスの動作原理



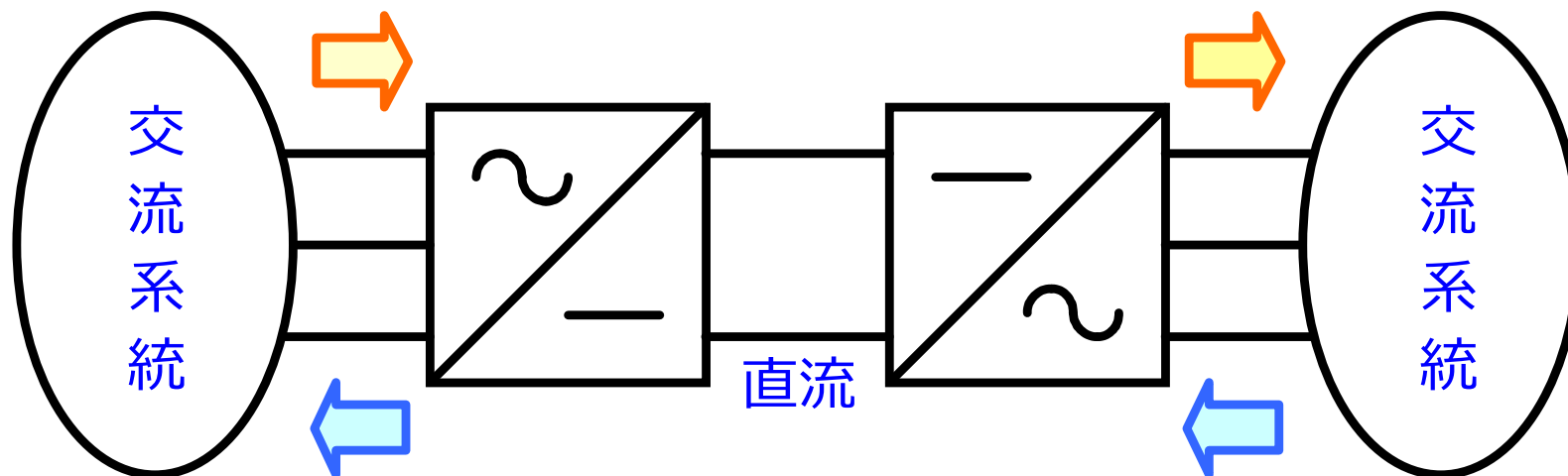
水流モデル



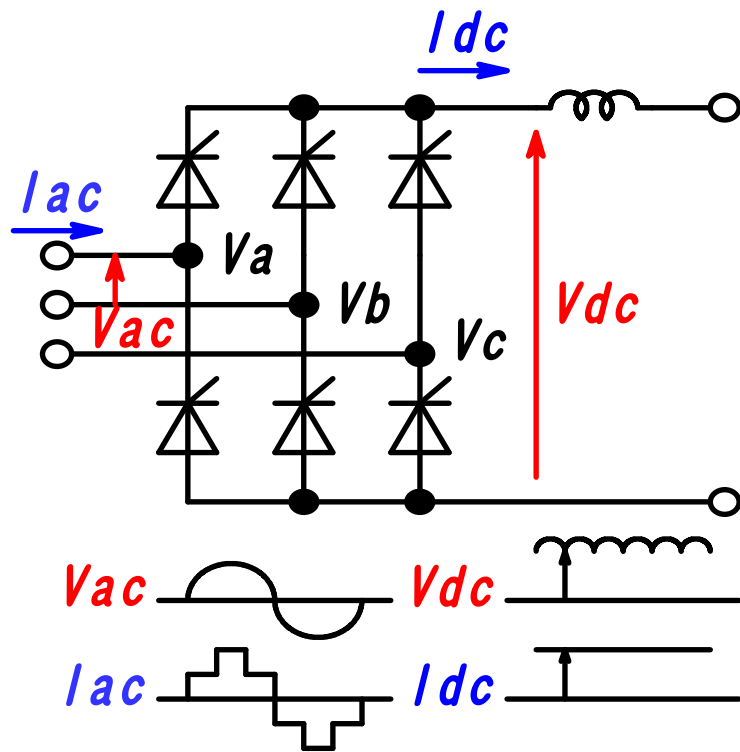
- **サイリスタ**
ゲート信号で大電流をオン可能。いったんオンした後では、自力ではオフ不可能。電圧8kV, 電流4kAクラスまで。
- **IGBT (トランジスタ系)**
ゲート信号で大電流をオン・オフとも可能。電圧4.5kV, 電流3kAクラスまでが多い。



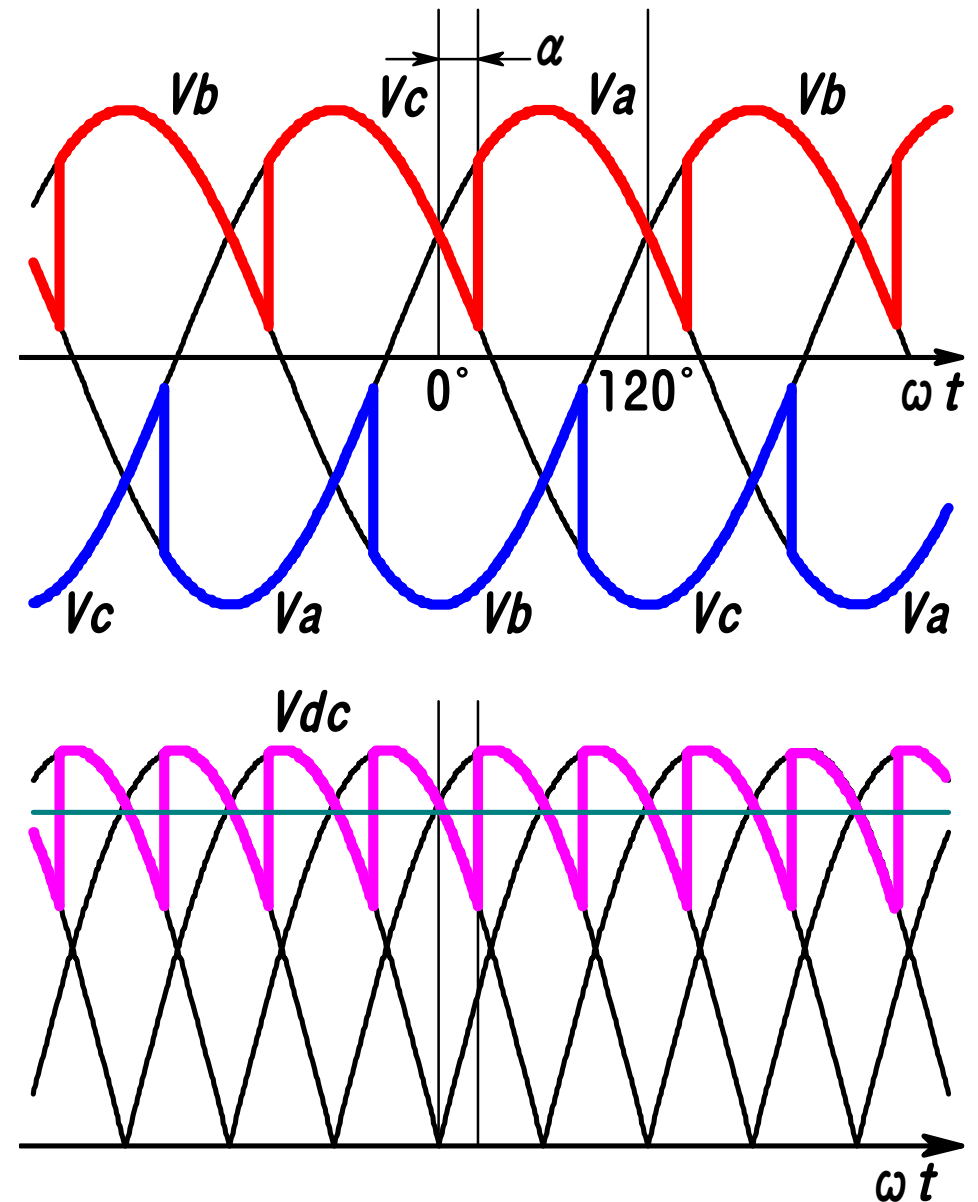
- 電圧や, 周波数, 位相の異なる交流系統の間で電力を送電したい場合に, 交流をいったん直流に変換して送電。
- 順変換器 (整流器) と逆変換器 (インバータ) を組み合わせた交流間接変換で, 交流～直流～交流に変換。
- 交流系統の間は, どちらの向きにも電力を送電可能 (双方向)。
- 直流送電線 (架空送電線, ケーブル) または直流母線が存在。



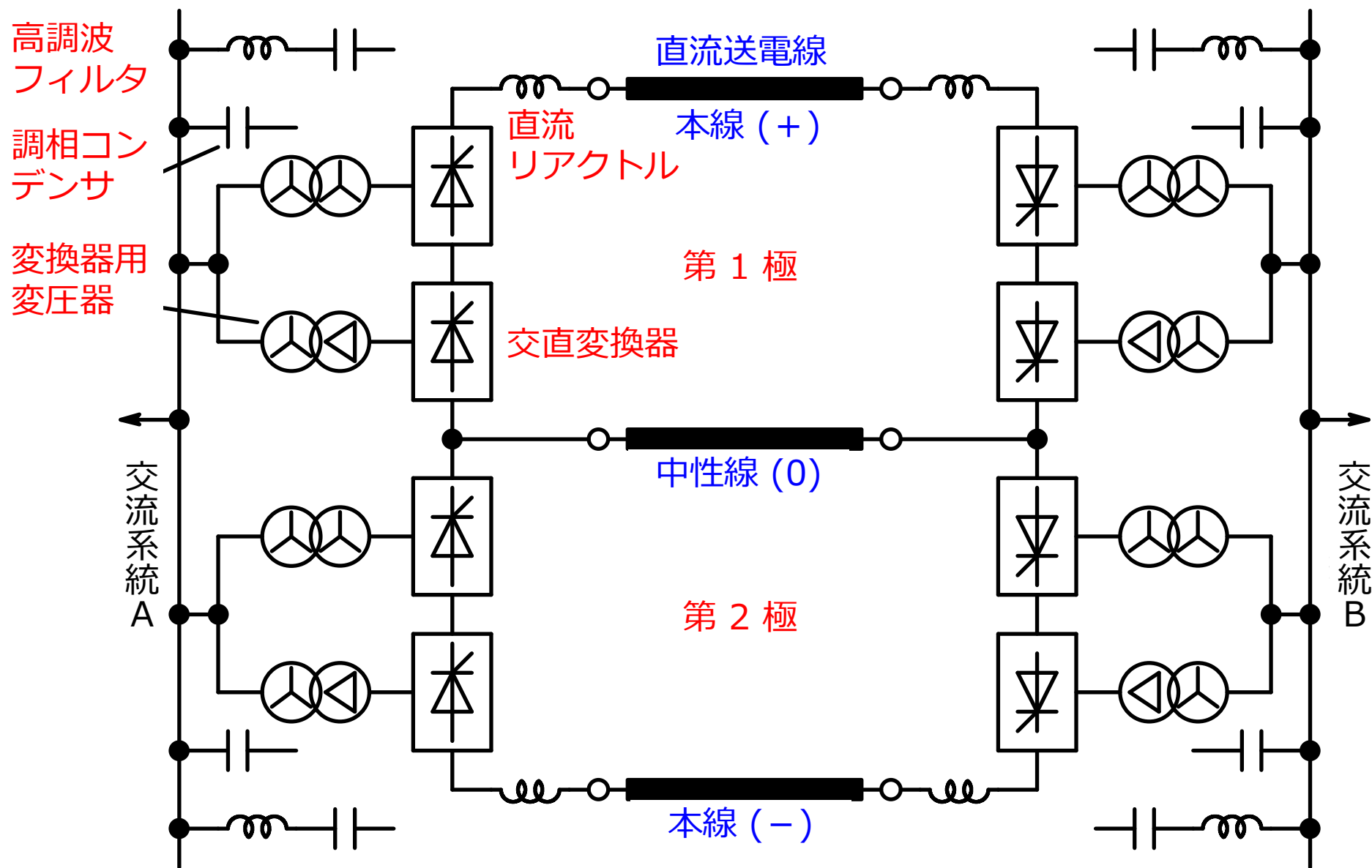
直流送電 (他励式:サイリスタ使用) の動作原理



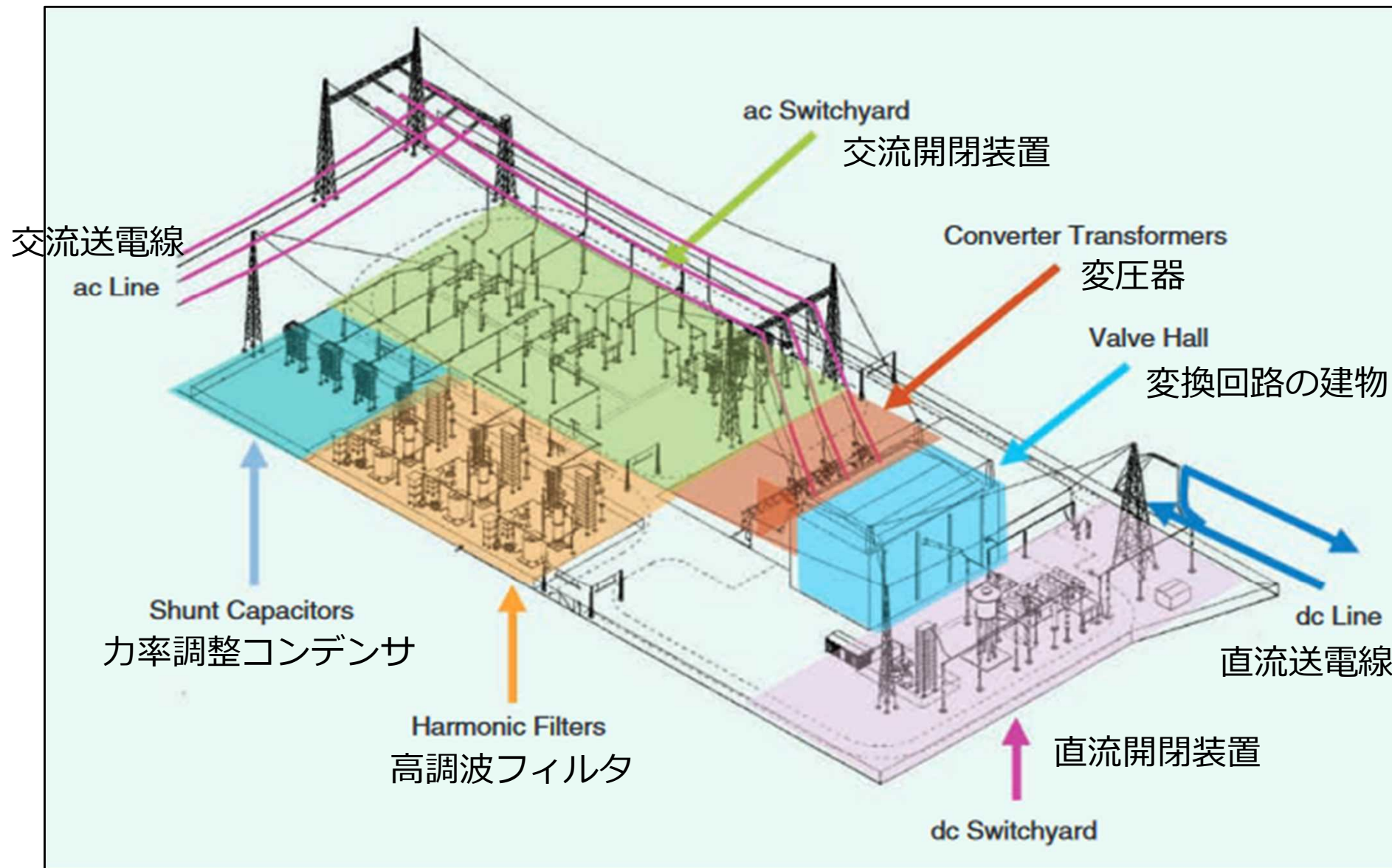
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{ac} \cos\alpha$$



- V_{dc} : 直流電圧 (平均値)
- V_{ac} : 交流電圧 (線間電圧実効値)
- 点弧角 α により直流電圧 V_{dc} を制御
- 直流電圧を順変換器 > 逆変換器に制御。電圧差で順から逆へ電力流れる。



<直流送電 (双極1回線 : 送電線は+0-の3本)>



出典：日立エナジー(ABB)HP

- **大容量化** 数1000MW
- **高電圧化** DC ±1000kV以上
- **長距離化** 架空送電線 1000km級
海底ケーブル 500km級の
長距離や, 水深500m級の深海



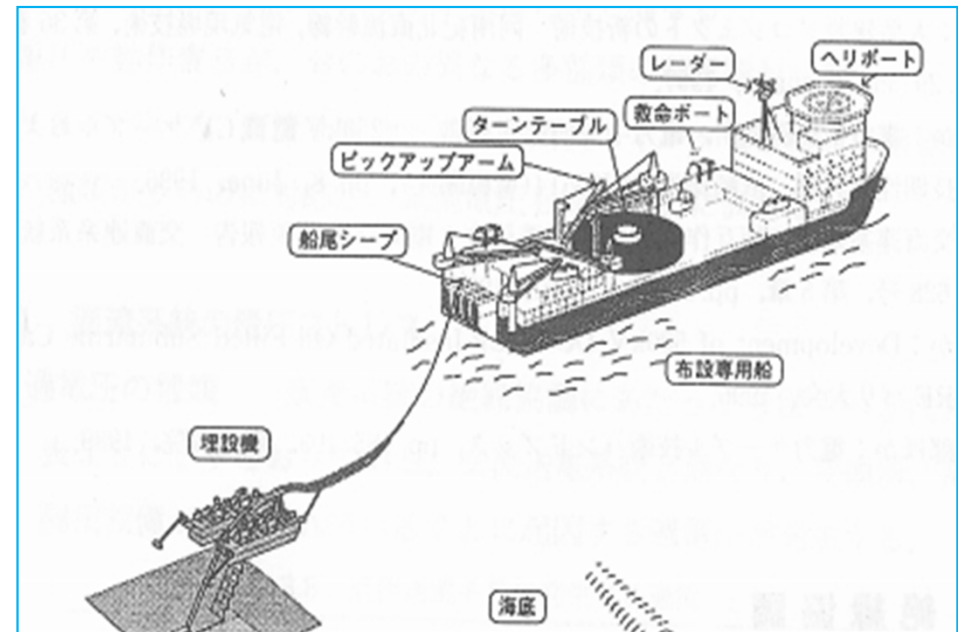
光直接点弧
サイリスタ



I G B T

- **他励式から自励式へ**
サイリスタからIGBTへ。
洋上風力から陸上への送電にも。

- **新興国へも拡大**
立地地点は, 米国, 西欧, 北欧,
日本だけでなく, 中国, インド,
などへ拡大。」



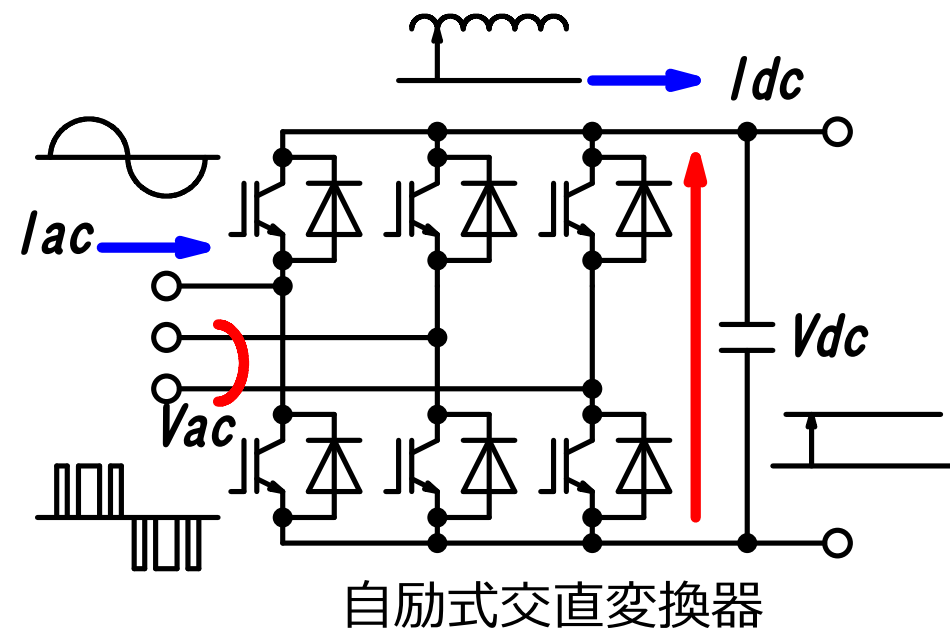
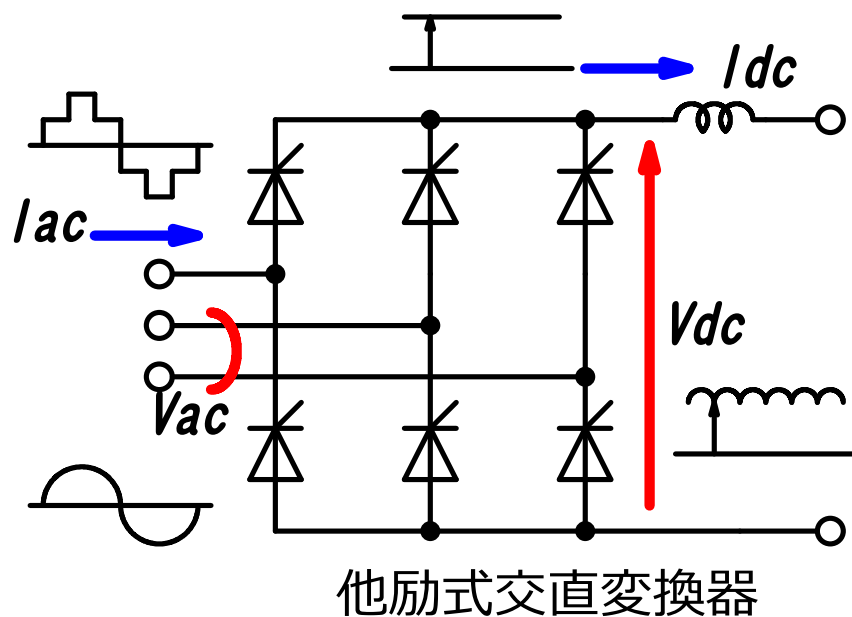
海底ケーブル布設船

■ 直流送電の従来の問題点

- 交流系統事故時に送電が途絶することがある。
- 無効電力の供給，高調波フィルタが必要。

■ 他励式交直変換器 (サイリスタ) から自励式交直変換器 (IGBT) へ

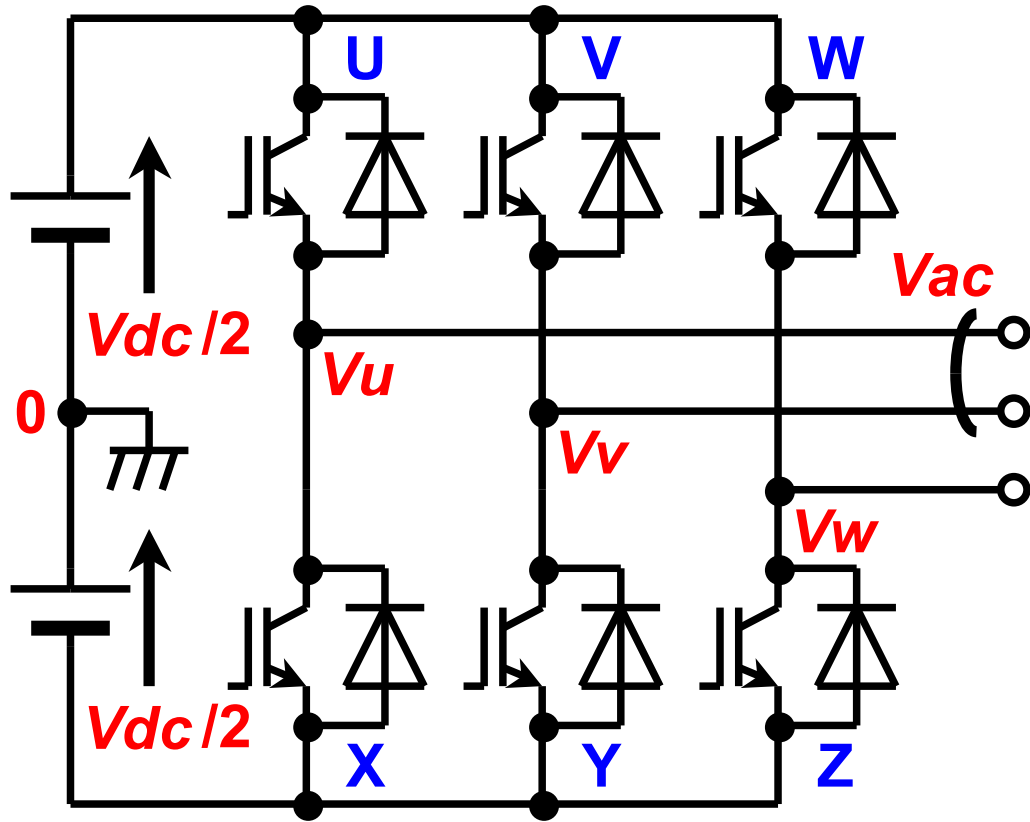
- 交流系統の電圧変化や，系統インピーダンスに影響されない。
- 無効電力，高調波を発生しない。



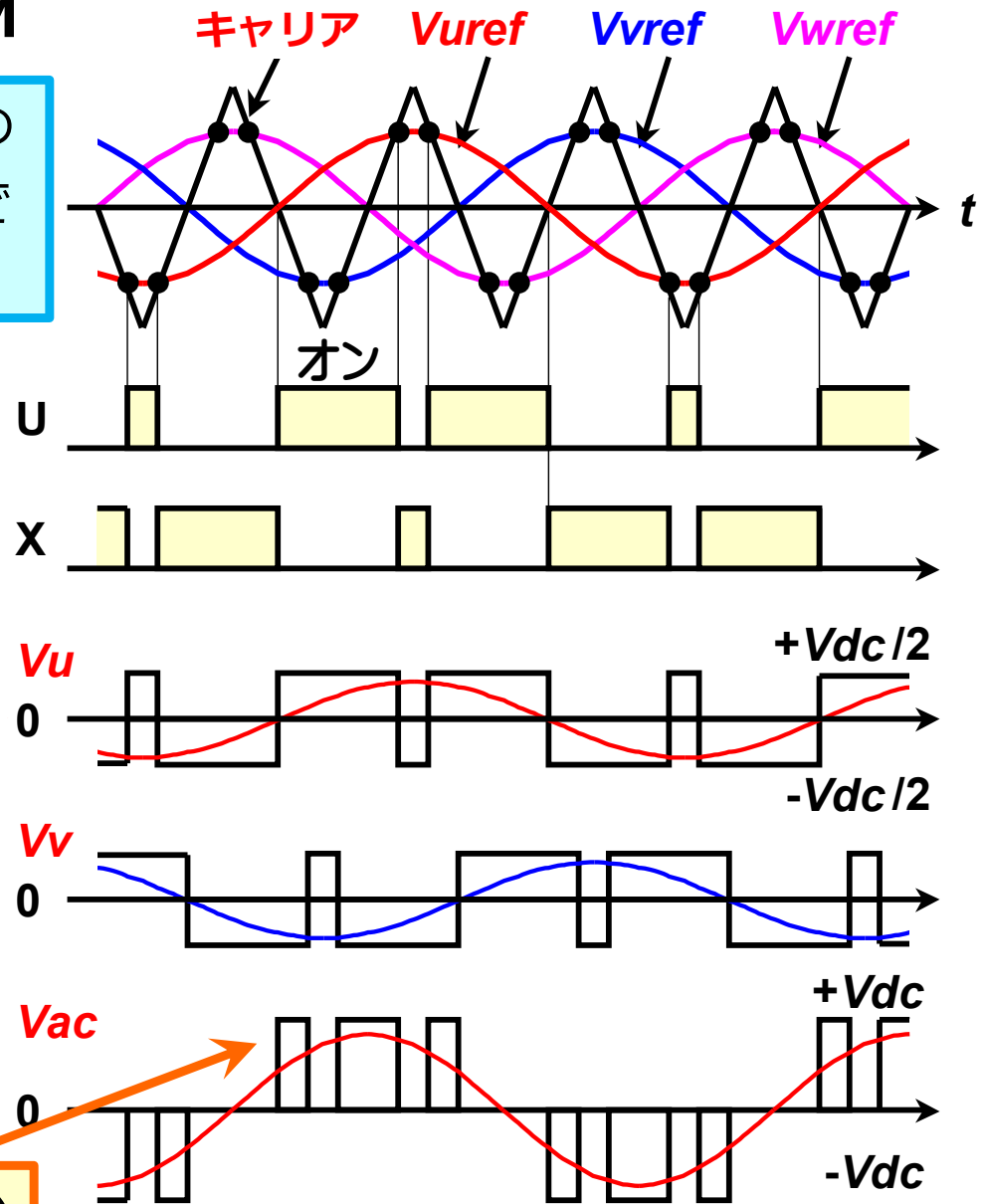
■ 自励式三相交直変換器におけるPWM (パルス幅変調) 制御

スイッチは三相×上下の計6個

三角波と三相の正弦波の交点でオンオフ動作



指令値どおりの正弦波を含む



■ 自励式三相交直変換器の直流電圧と交流電圧の関係

$$V_u [\text{rms}] = \frac{1}{2\sqrt{2}} V_{dc} \cdot m$$

$$V_v [\text{rms}] = \frac{1}{2\sqrt{2}} V_{dc} \cdot m$$

$$V_{ac} [\text{rms}] = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{dc} \cdot m$$

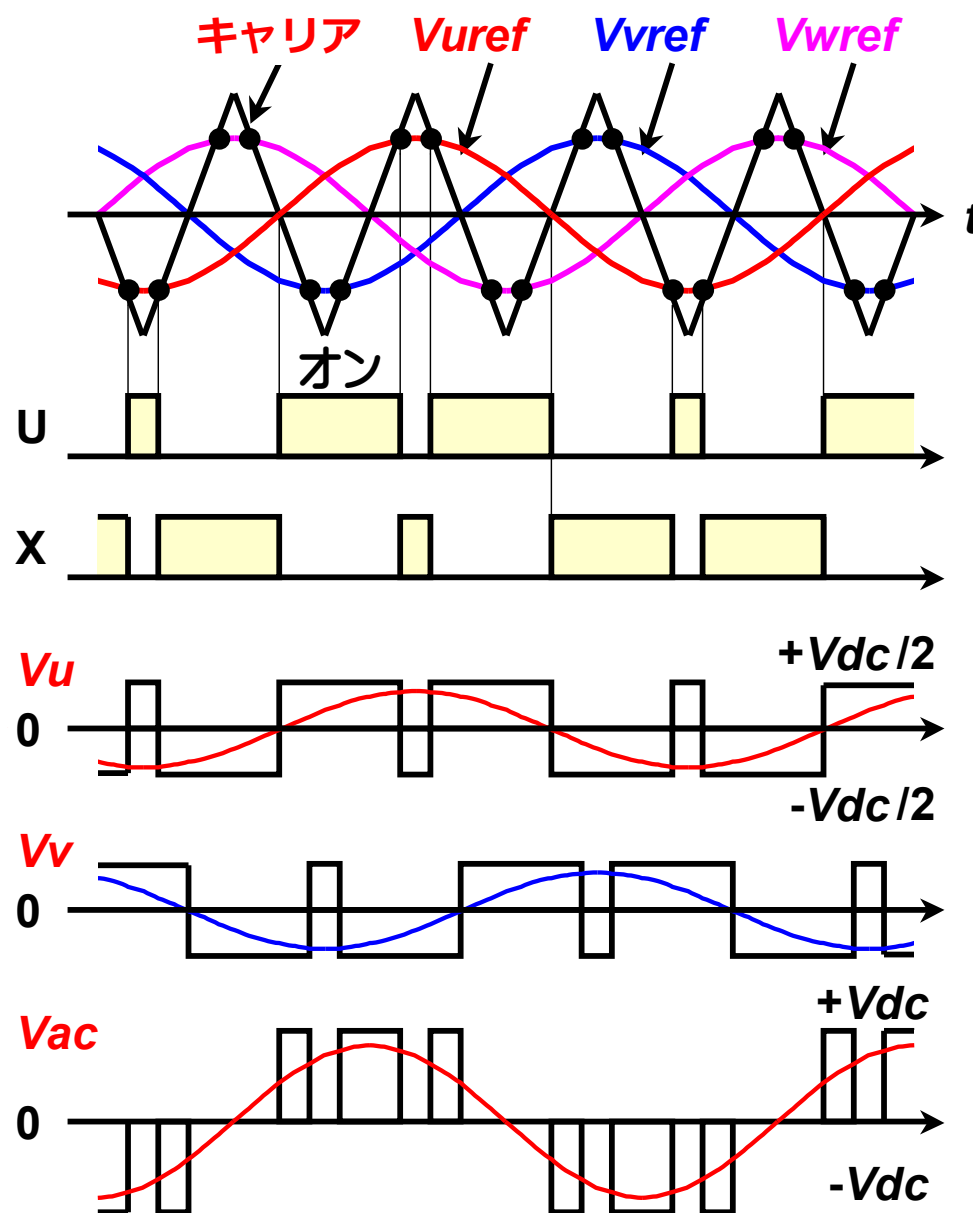
$$m = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{ac} [\text{rms}]}{V_{dc}}$$

■ m : 変調率

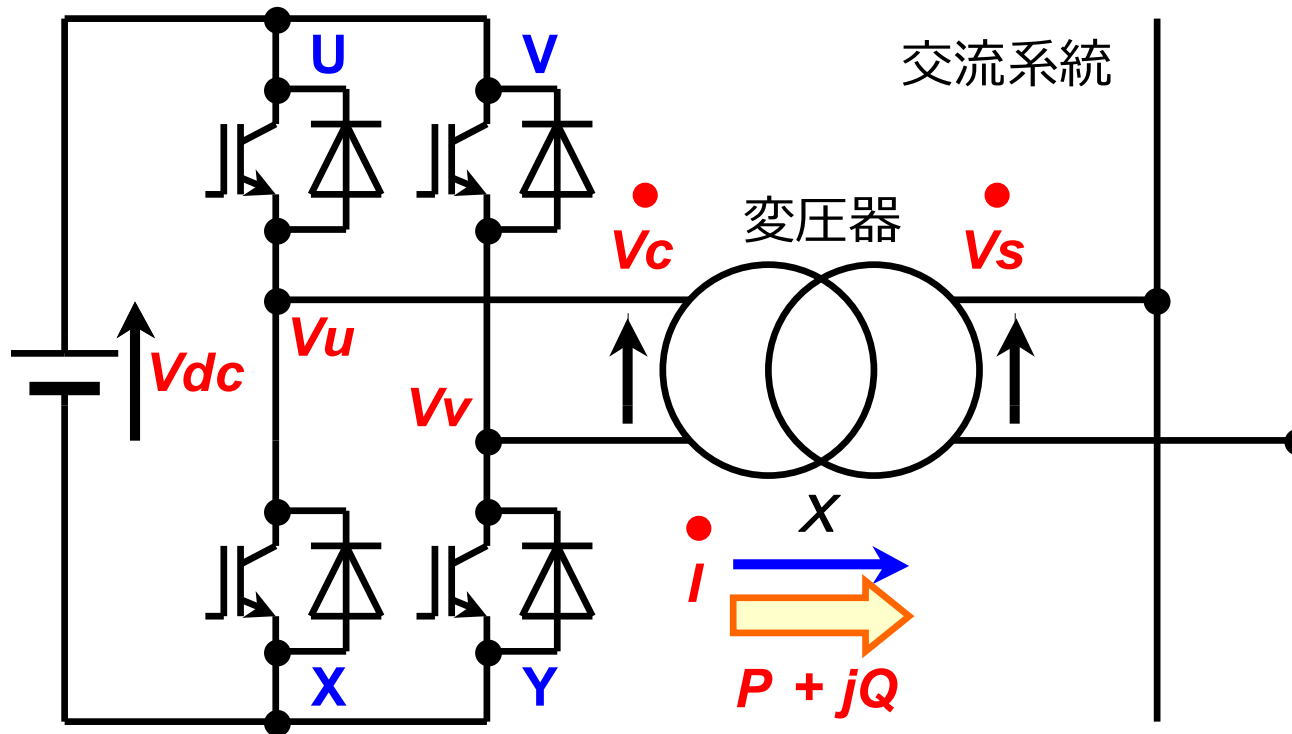
(例) $V_{dc} = 350\text{V}$, $V_{ac} = 200\text{Vrms}$

$$m = 0.93$$

■ 交流電圧の線間実効値に比べて、直流電圧は2倍前後に高い必要あり

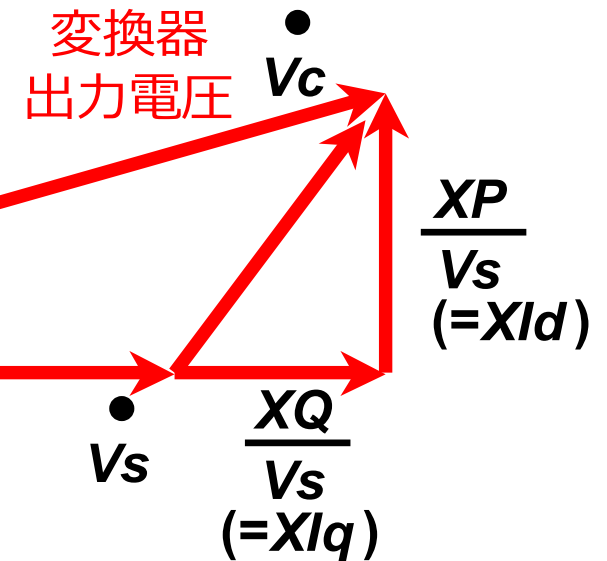


■ 交流出力電圧と, 有効電力, 無効電力の関係



$$P = \frac{V_s V_c \sin \delta}{X}$$

$$Q = \frac{V_s (V_c \cos \delta - V_s)}{X}$$



■ 有効電力 P , 無効電力 Q は変換器出力電圧の振幅 V_c , 位相 δ の関数になっている

■ 交流出力電圧と, 有効電力, 無効電力の関係

$$P = \frac{V_s V_c \sin \delta}{X} \quad Q = \frac{V_s (V_c \cos \delta - V_s)}{X}$$

$$V_c \sin \delta = \frac{XP}{V_s} \quad V_c \cos \delta = V_s + \frac{XQ}{V_s}$$

$$V_c = \sqrt{\left(V_s + \frac{XQ}{V_s}\right)^2 + \left(\frac{XP}{V_s}\right)^2} \quad \delta = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{XP}{V_s}\right)}{\left(V_s + \frac{XQ}{V_s}\right)} \right)$$

■ (例)

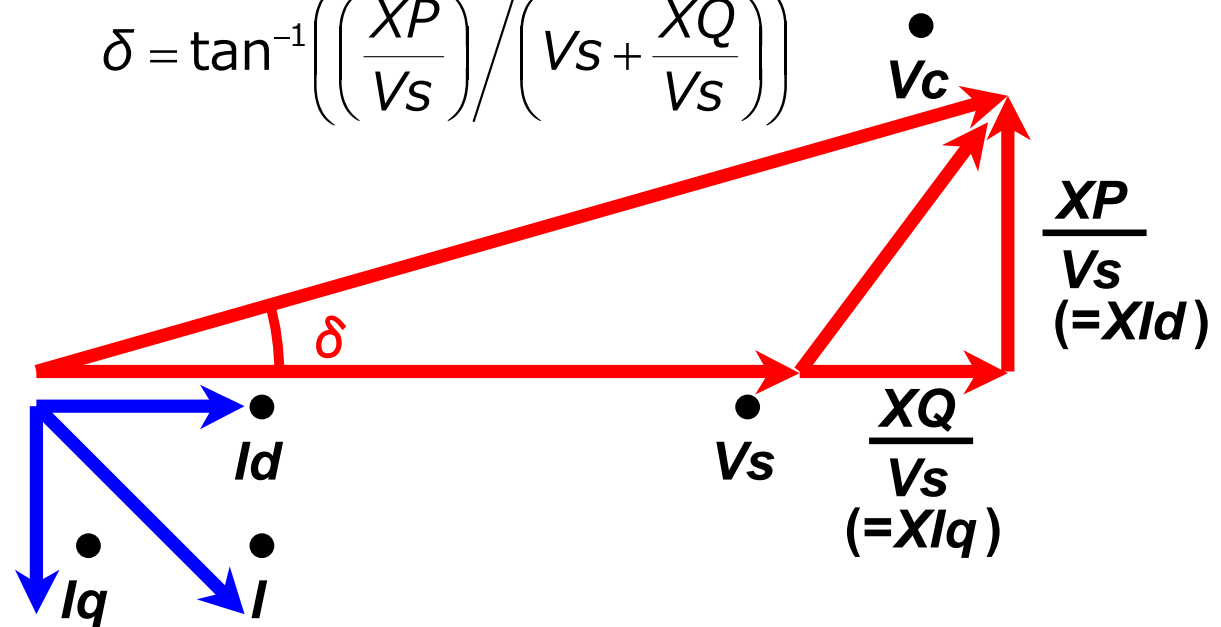
$$P = 1.0 \text{ pu}, \quad Q = 0.0 \text{ pu}$$

$$V_s = 1.0 \text{ pu}, \quad X = 0.10 \text{ pu}$$

のとき,

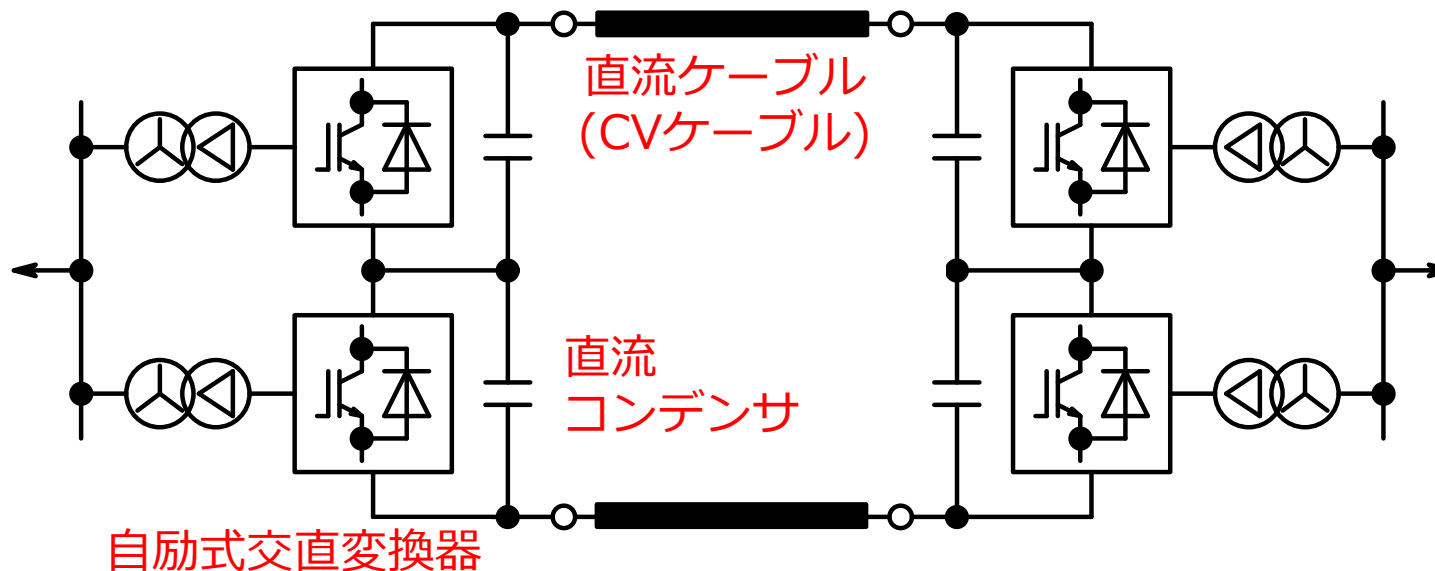
$$V_c = 1.005 \text{ pu}$$

$$\delta = 5.71^\circ$$

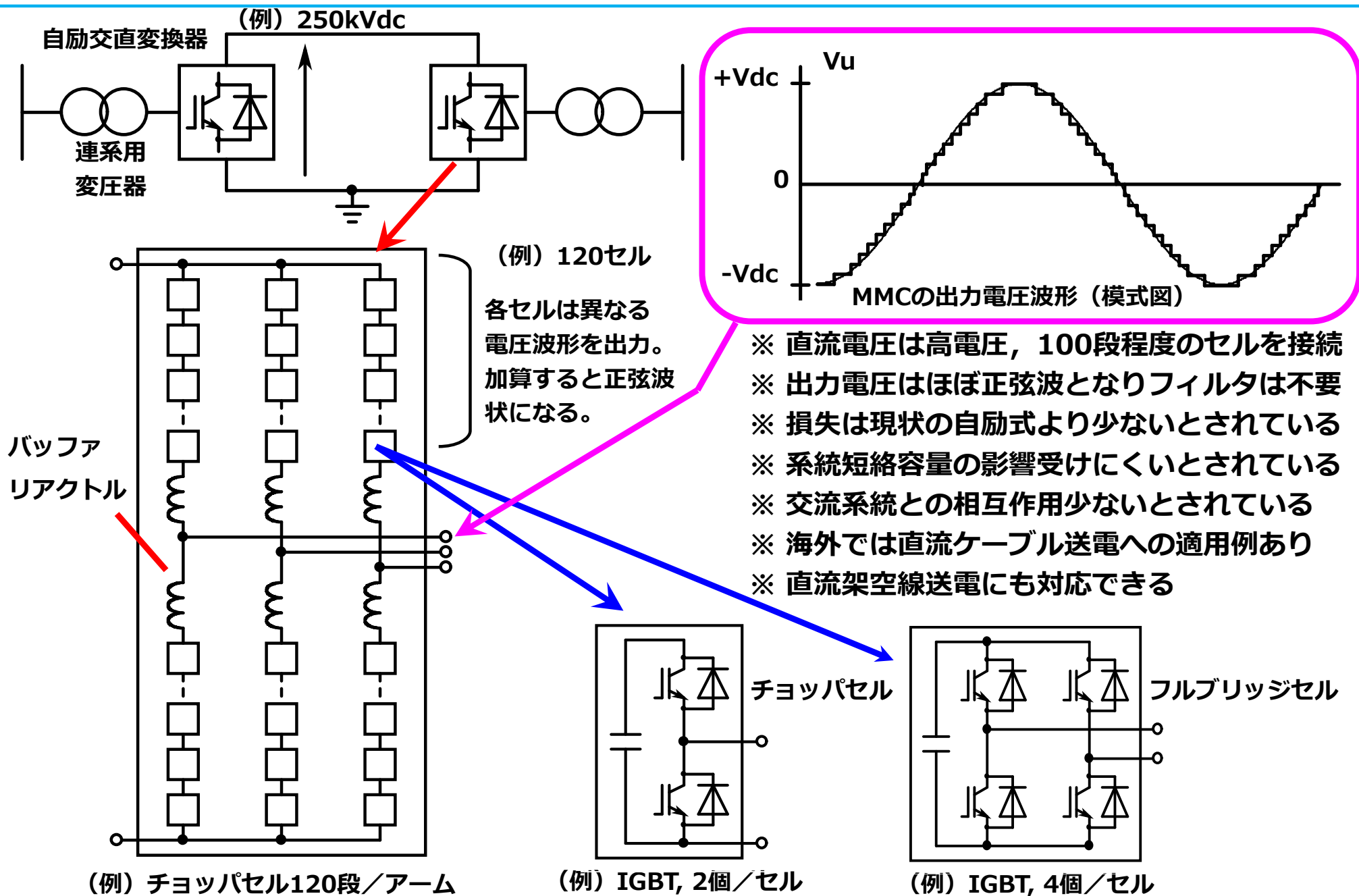


■ 交直変換器から電力系統へ電力を送り出すため, 変換器の交流出力電圧の振幅をわずかに高め, 位相をわずかに進ませるだけでよい

- 自励式交直変換器を用いた直流送電の普及
1000MW以上, $\pm 320\text{kV}$, $\pm 525\text{kV}$ まで大型化。
- ウィンドファームから送電, 海底油田へ送電にも適用。多端子直流送電 (中国, スコットランド)
- MMC (モジュラーマルチレベルコンバータ) の適用

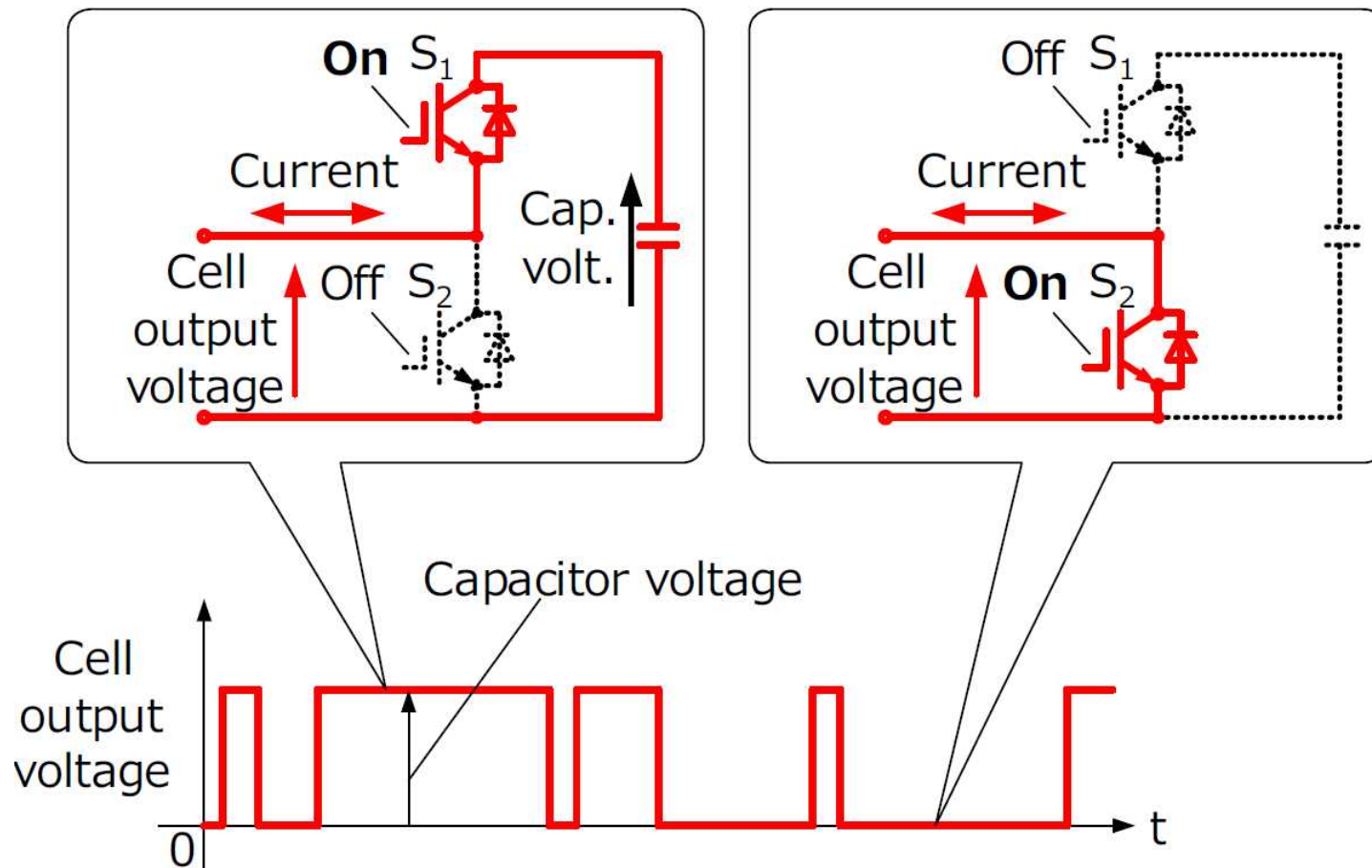


直流連系(送電線無し)への自励式交直変換器(MMC)の適用例



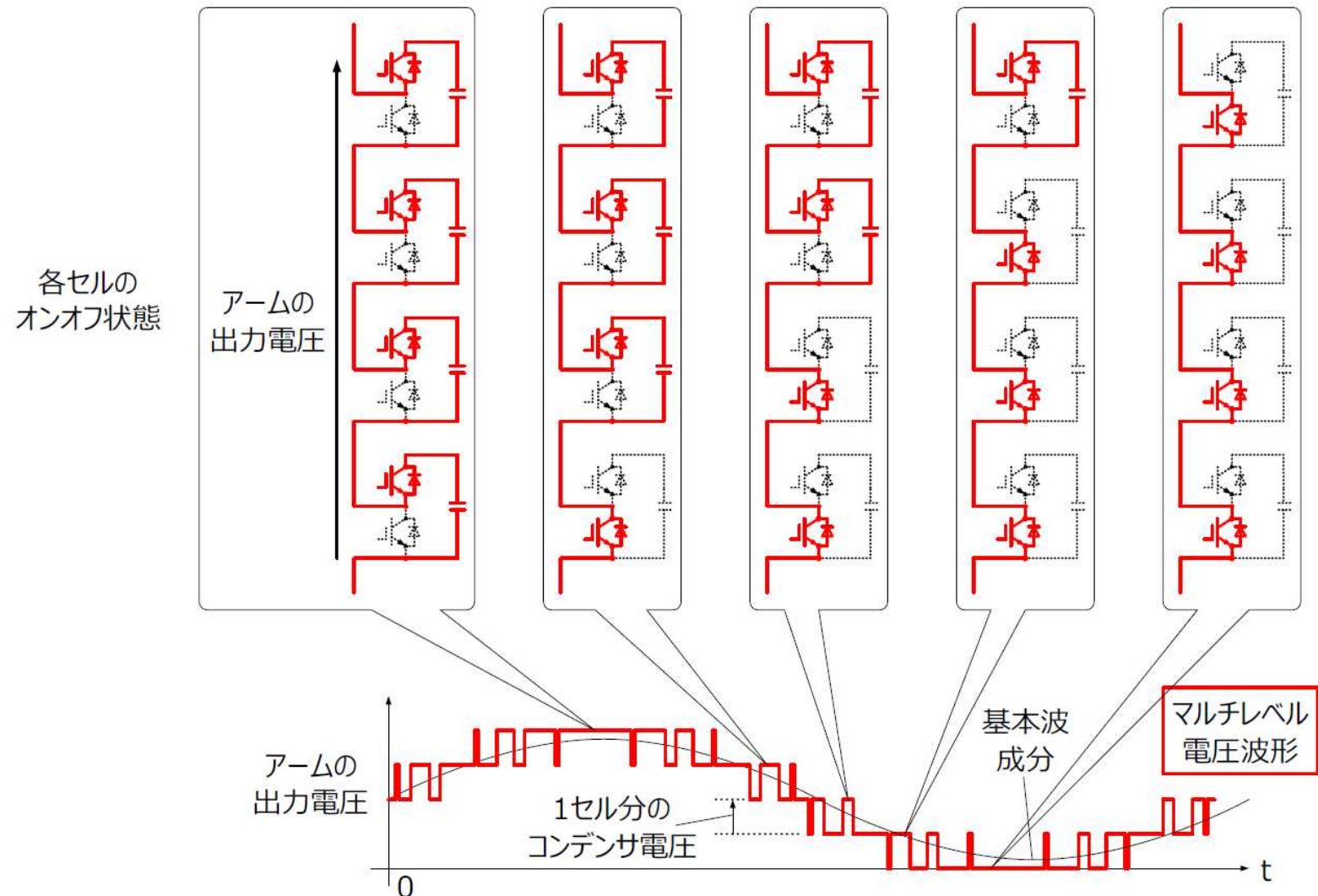
MMCのチョッパセルの動作

- パワーデバイス S_1 , S_2 のオンオフ状態で, 出力電圧を, 正とゼロに制御
 - パワーデバイス S_1 がオン, S_2 がオフ \Rightarrow コンデンサ電圧を出力
 - パワーデバイス S_1 がオフ, S_2 がオン \Rightarrow ゼロ電圧を出力
- ブリッジセルはチョッパセルの並列相当。出力電圧を正, 負, ゼロに制御。



MMCのアーム出力電圧

- 各セルの出力電圧の和 = アームの出力電圧
- コンデンサ電圧を出力するセル数を制御して, アームの出力電圧を制御



MMC各部の概略電圧波形

- 交流成分：上下アームで逆極性, 直流成分：上下アームで同極性
- 交流端子には交流電圧のみ出力される

