

# 直流送電システムに関する シミュレーション技術

NEDO特別講座 産学合同セミナー  
2024年02月28日

電力中央研究所 上席研究員  
菊間 俊明

 電力中央研究所

# はじめに

## ・時間解析シミュレーションの概要

- ・瞬時値解析と実効値解析
- ・シミュレーションの具体例

## ・シミュレーションモデルの解説

- ・素子モデル
  - ・スイッチングモデル
  - ・平均化(平均値)モデル
  - ・電流源モデル
- } 瞬時値
- 実効値

# はじめに

---

本稿では時間解析シミュレーションの概要とシミュレーションモデルの解説をおこなう

解析モデルに関しては多様なモデルがあり、本稿述べるモデルは一例である

また、解析モデルおよびその使い方に関してはケースバイケースなことが多い

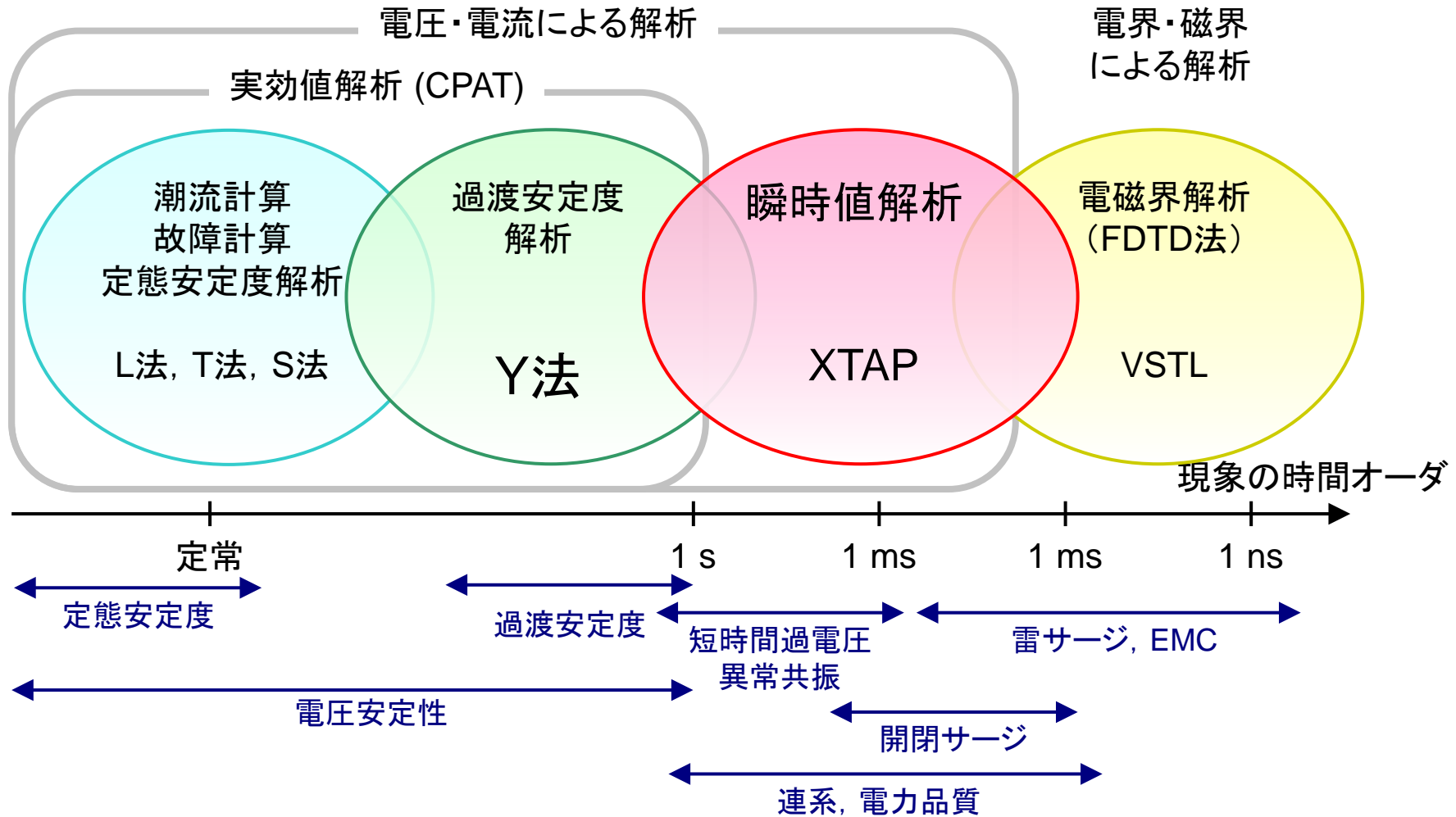
解析者が解析手法と解析モデルの内容を理解し、適切に解析を行うことが重要である

---

- ・時間解析シミュレーションの概要

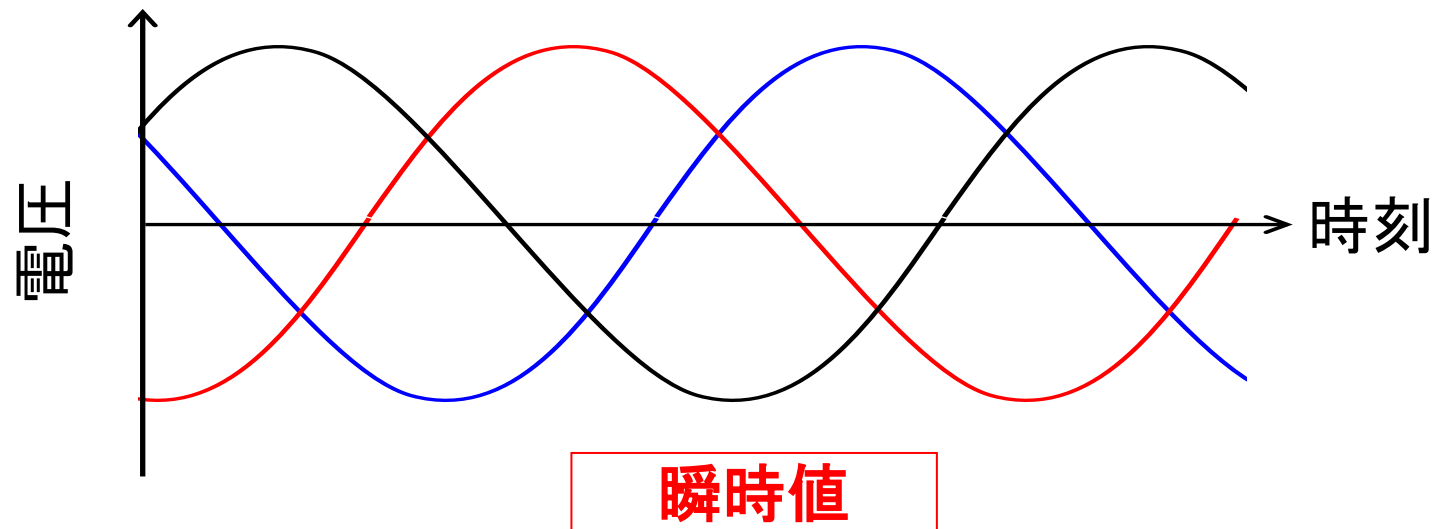
- ・シミュレーションモデルの解説

# 電力系統解析の種類



※電中研NEWS, No 470 (2011)を参考に作図

# 瞬時値解析・実効値解析



波形ベースの解析が瞬時値解析となる

# 瞬時値解析・実効値解析

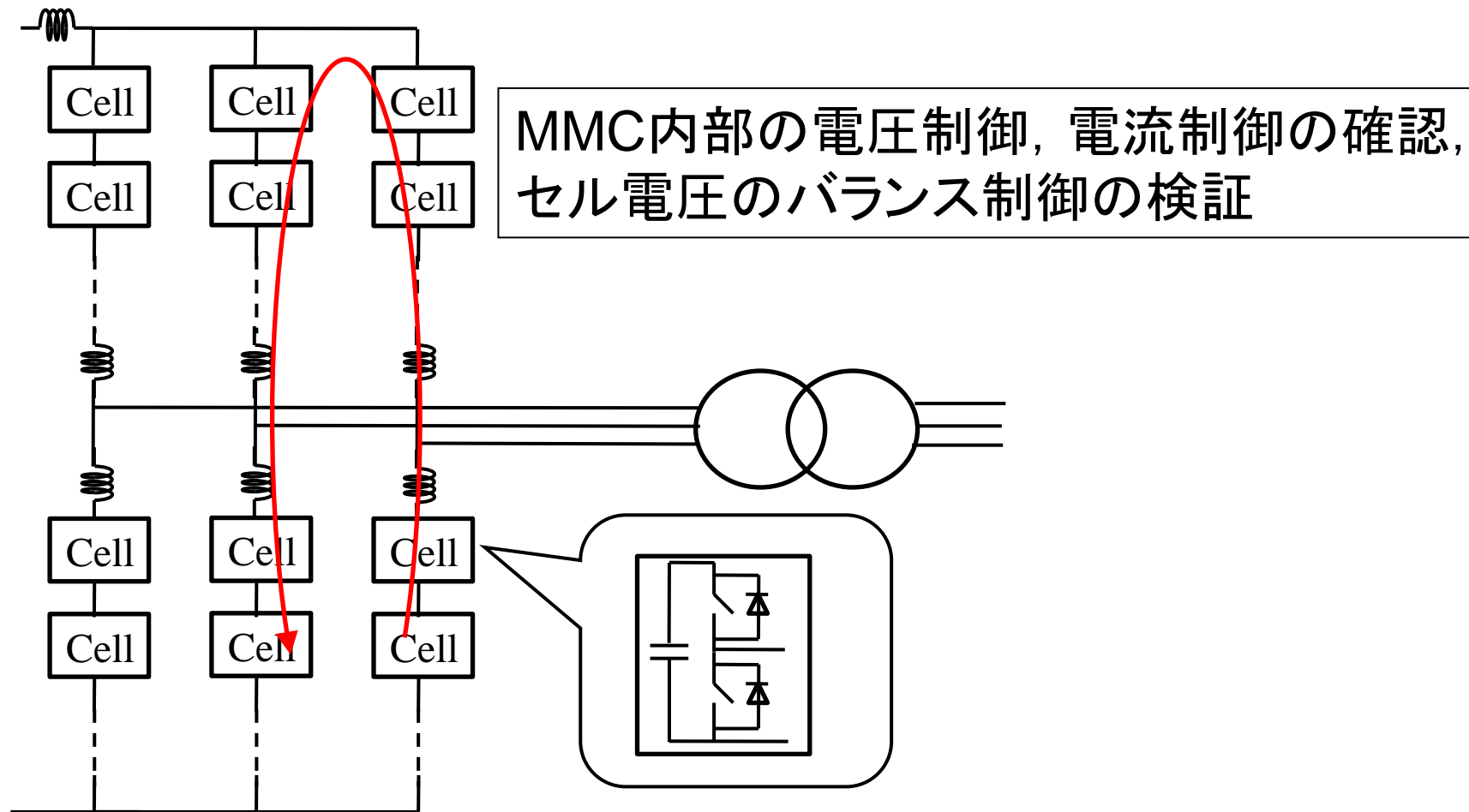
## 実効値

- ・正弦波形を模擬する必要がないため計算時間刻みが大きい(例えば, 10 ms)
- ・変換器回路を大幅に簡略化(例えば, 電流源として模擬)して解析
- ・解析対象とする系統は大規模
- ・一回の解析にかかる時間は小

## 瞬時値

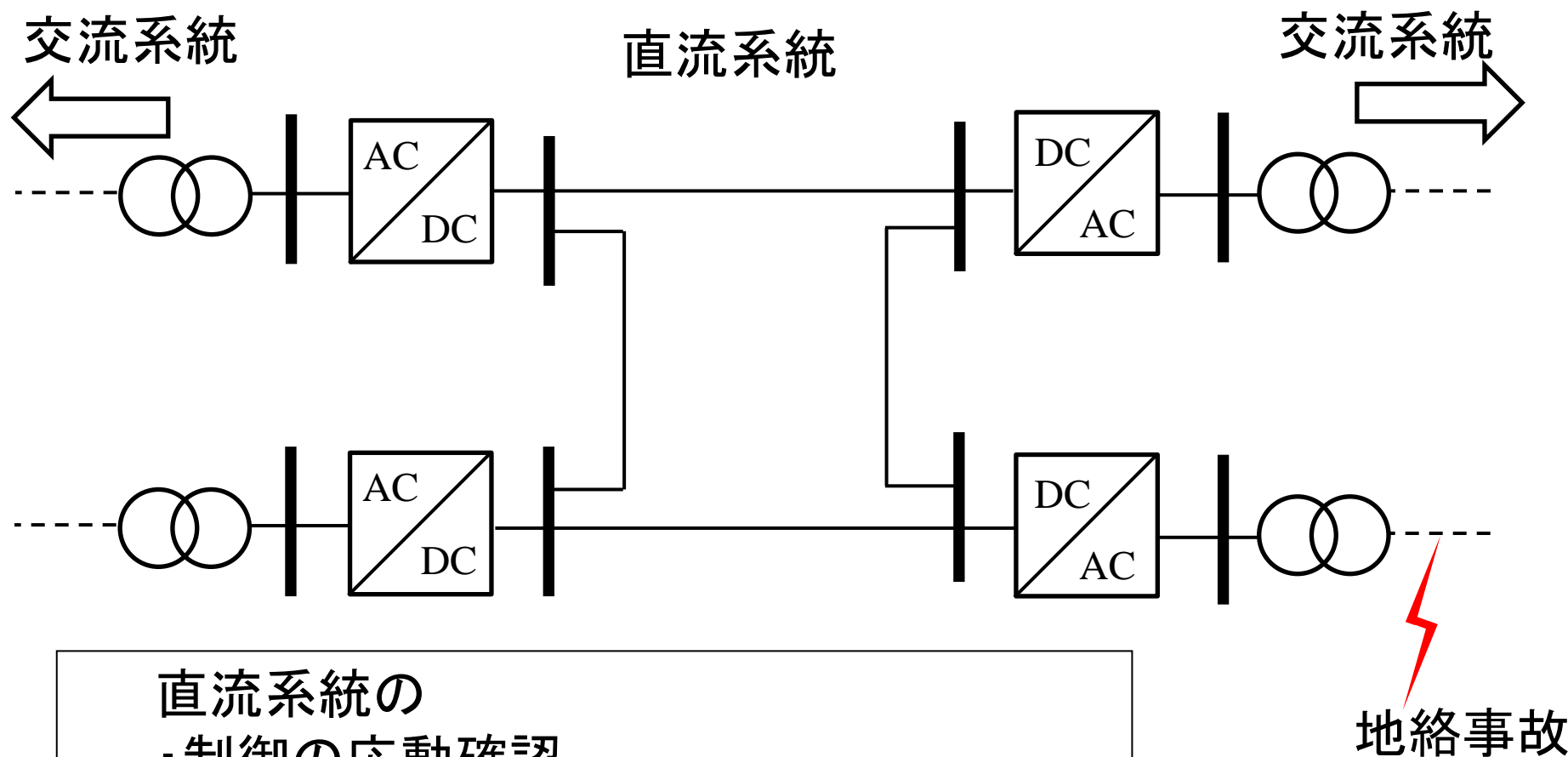
- ・正弦波形を模擬する必要があるため計算時間刻みが小さい(例えば, 10  $\mu$ s)
- ・変換器回路をそのまま解析, または, ある程度簡略化して解析
- ・解析対象とする系統は小～中規模
- ・一回の解析にかかる時間は中～大

# 瞬時値解析の具体例1





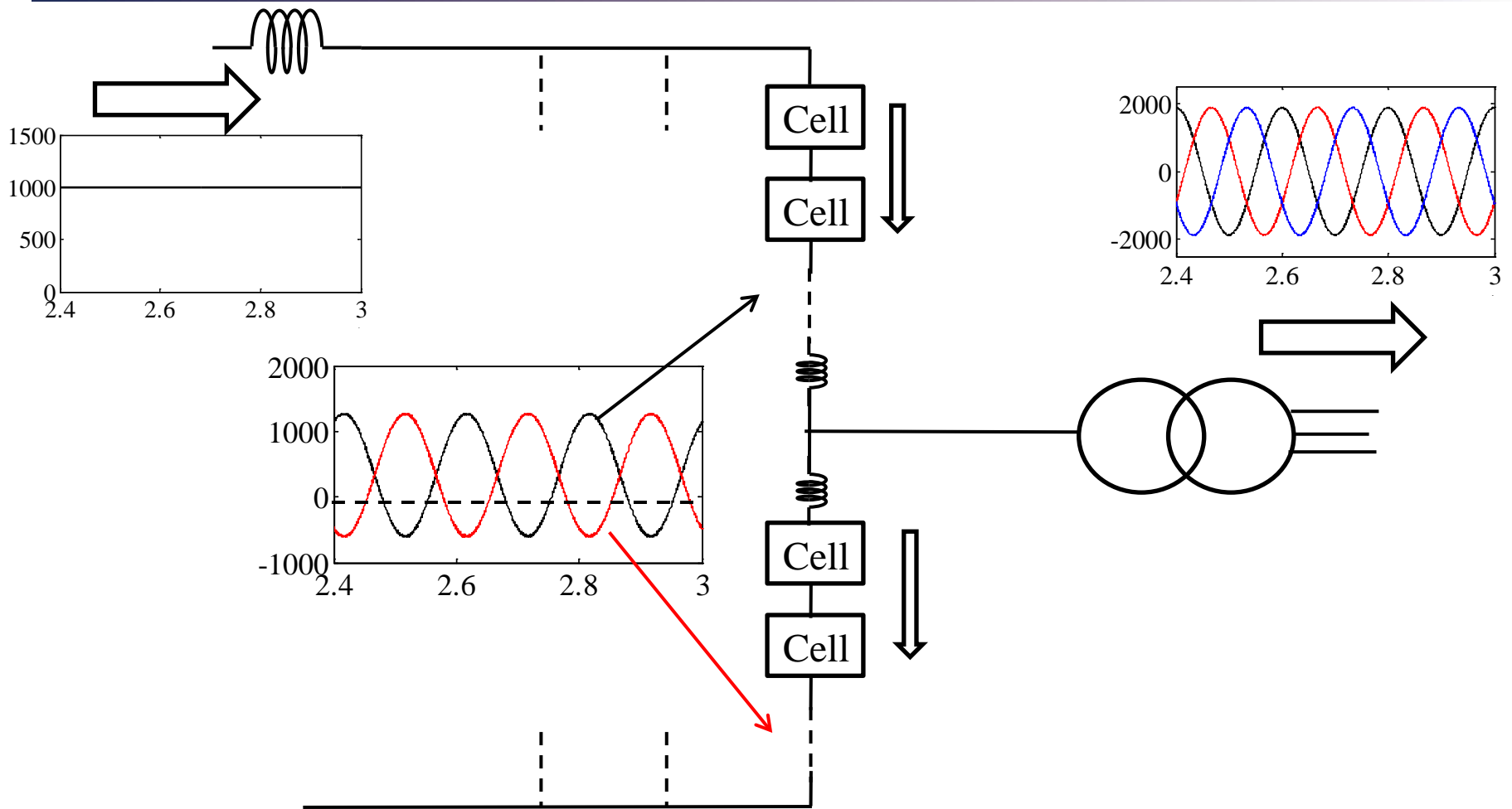
# 瞬時値解析の具体例2



直流系統の

- ・制御の応動確認
- ・擾乱時の運転継続性能の確認  
(図は4端子の直流多端子の例)

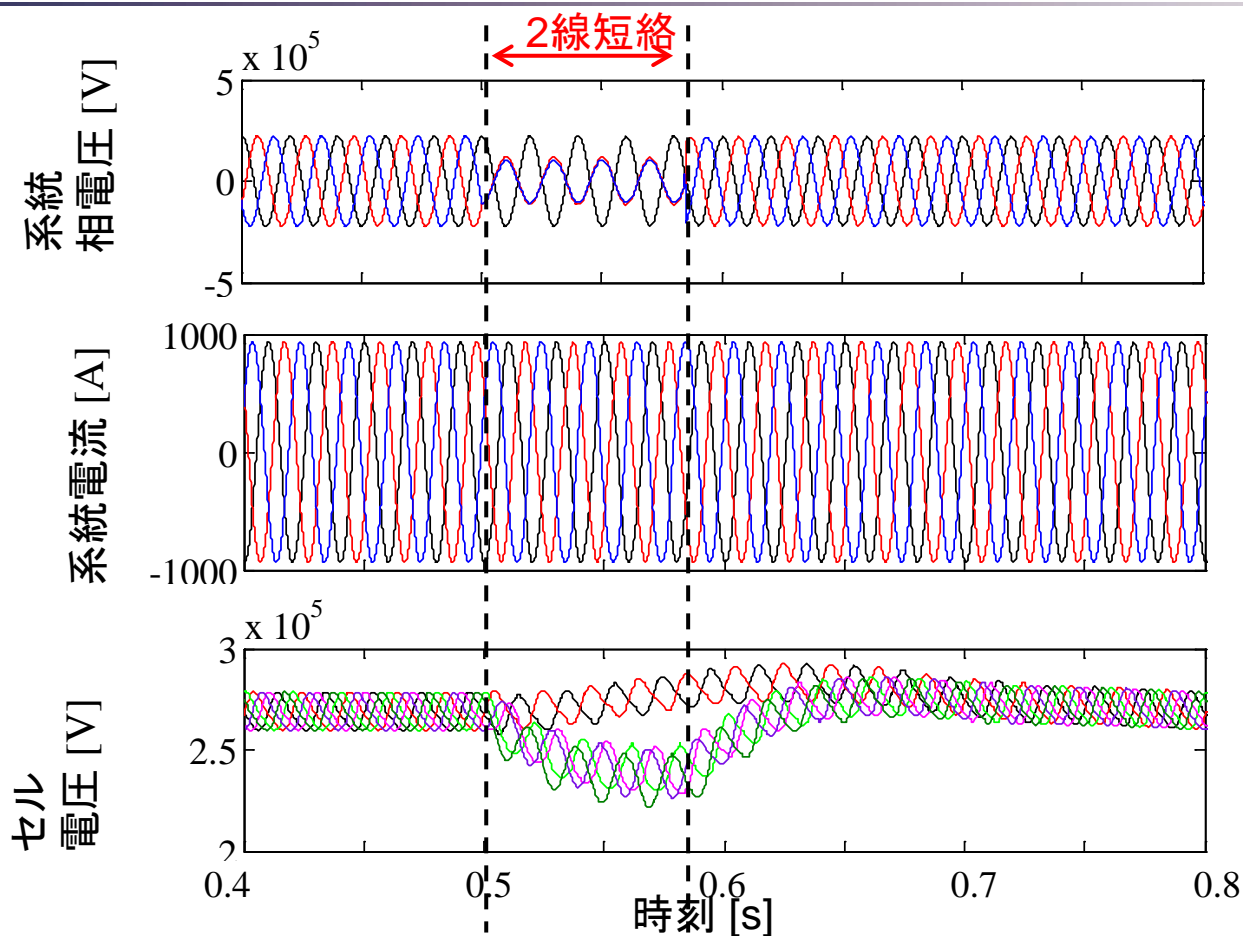
# MMC-HVDCの各部電流波形



各アームには交流+直流の電流が流れる

(交流電流に直流分のバイアスがかかった波形が見られる)

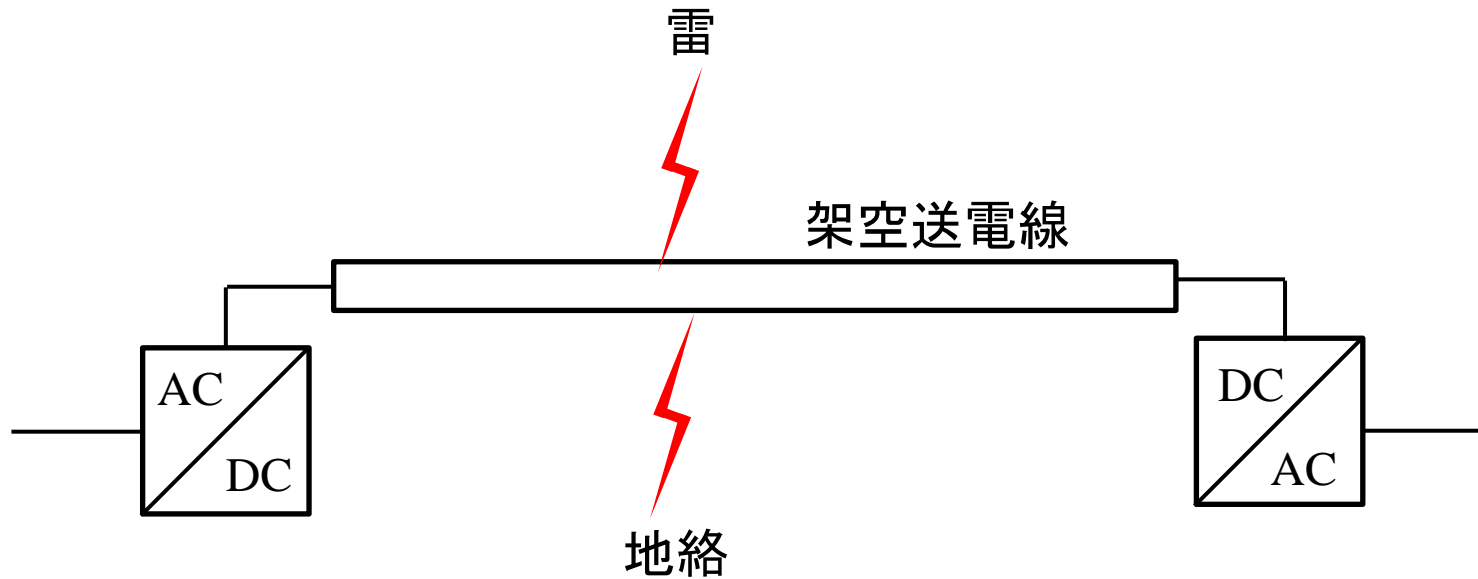
# MMC-HVDCのシミュレーション波形



交流系統側擾乱(2線短絡)の例

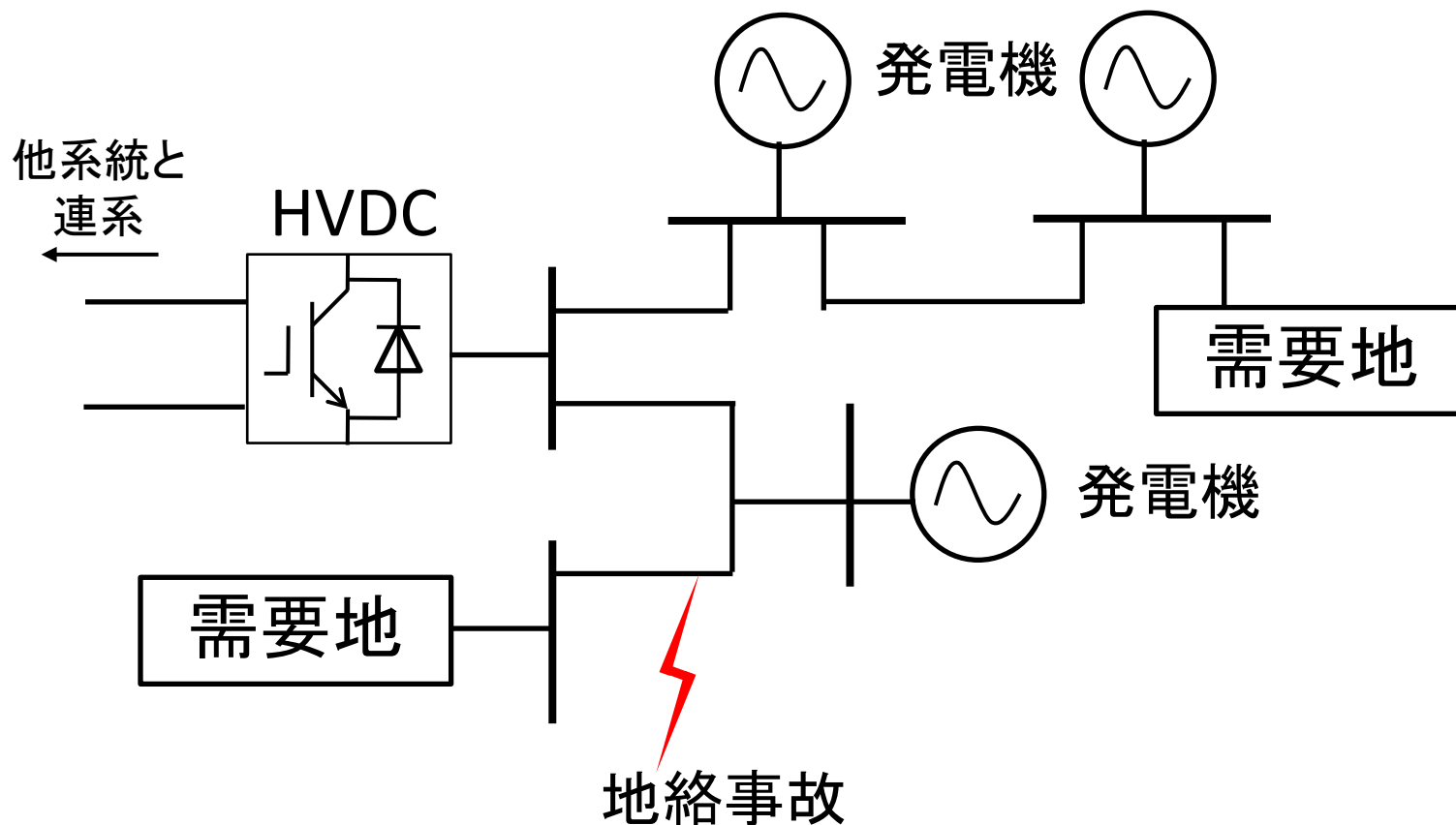
セル電圧の変動やばらつきが大きいと直流送電システムは安定運転できないため、シミュレーションで確認する必要がある

# 瞬時値解析の具体例3



送電線のサージ解析

# 実効値解析の具体例1



多数台の発電機，変換器が連系された電力システムの解析  
→ 系統擾乱時の過渡安定度・周波数安定度の確認

---

- ・時間解析シミュレーションの概要

- ・シミュレーションモデルの解説

# 変換器のモデリング

直流送電システムに適用される変換器を解析する上で、どの程度細部の特性まで模擬するか詳細度に応じてモデルを使い分ける必要がある

どのようなモデルが適しているかはケースバイケースのため解析実施者が考える必要がある

また、今回解説するモデルはあくまで一例であり、実際はより多様なモデルがある

# 変換器のモデリングの詳細度

素子モデル

スイッチングモデル

平均化モデル

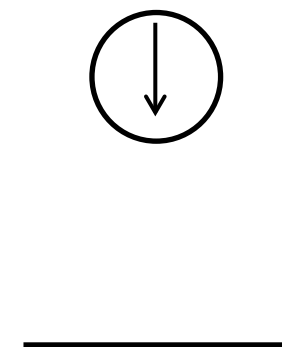
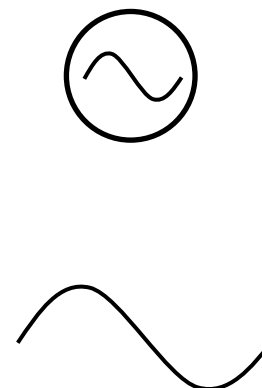
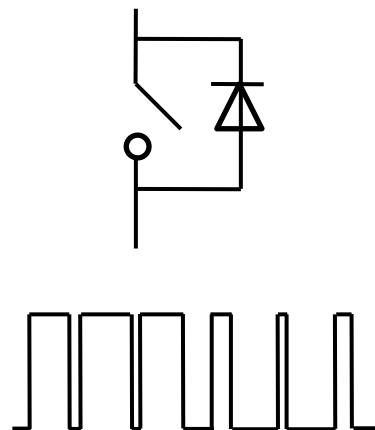
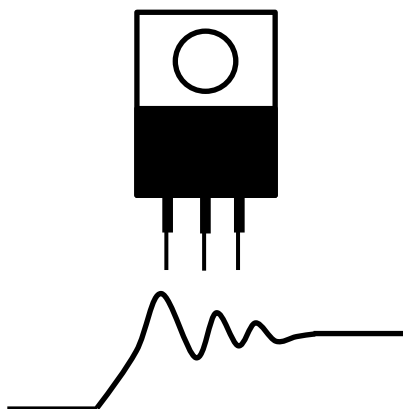
電流源モデル

詳細

簡略

瞬時値モデル

実効値モデル



省略事象  
半導体素子の振舞  
寄生成分  
etc

省略事象  
スイッチング動作  
etc

省略事象  
電流制御系  
etc

$\Delta t$ : ns程度

$\Delta t$ :  $\mu$ s程度

$\Delta t$ : 数十 $\mu$ s程度

$\Delta t$ :  $\leq 10$ ms程度

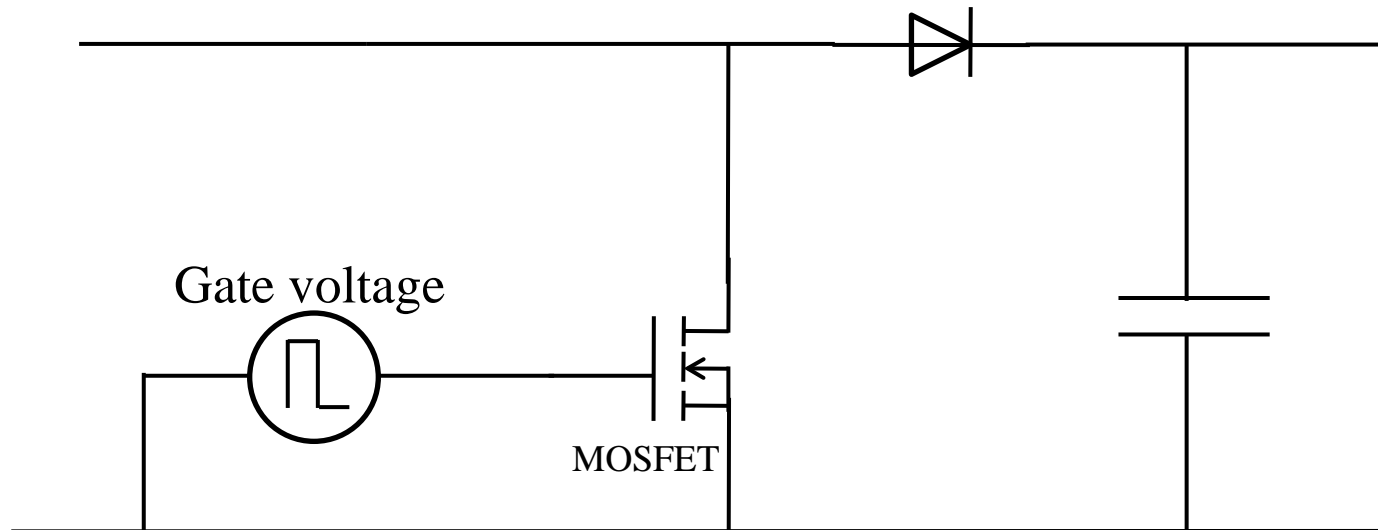


# 素子モデル

半導体素子はスイッチとしての役割をもつが、  
現実の半導体素子の振る舞いは理想スイッチと異なる

このため、スイッチングは瞬時に完了せず、ある程度時間がかかる  
また、スイッチングの際に損失も発生する

実際の回路には寄生インダクタンス、容量、抵抗が存在するため電力損失、共振、オーバーシュートが発生する

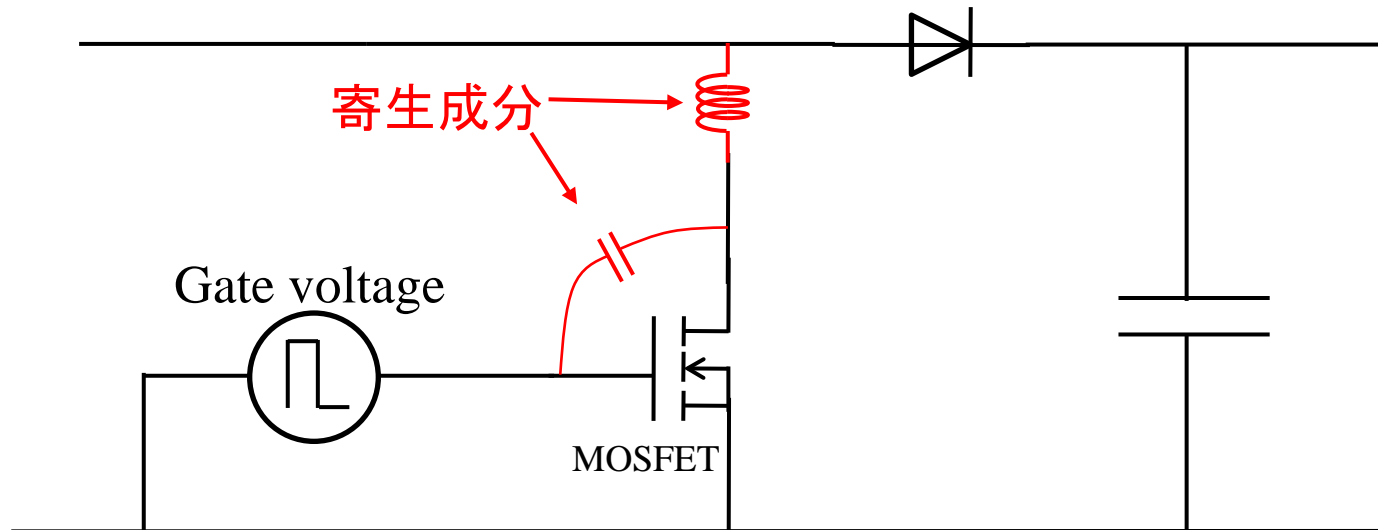


# 素子モデル

半導体素子はスイッチとしての役割をもつが、  
現実の半導体素子の振る舞いは理想スイッチと異なる

このため、スイッチングは瞬時に完了せず、ある程度時間がかかる  
また、スイッチングの際に損失も発生する

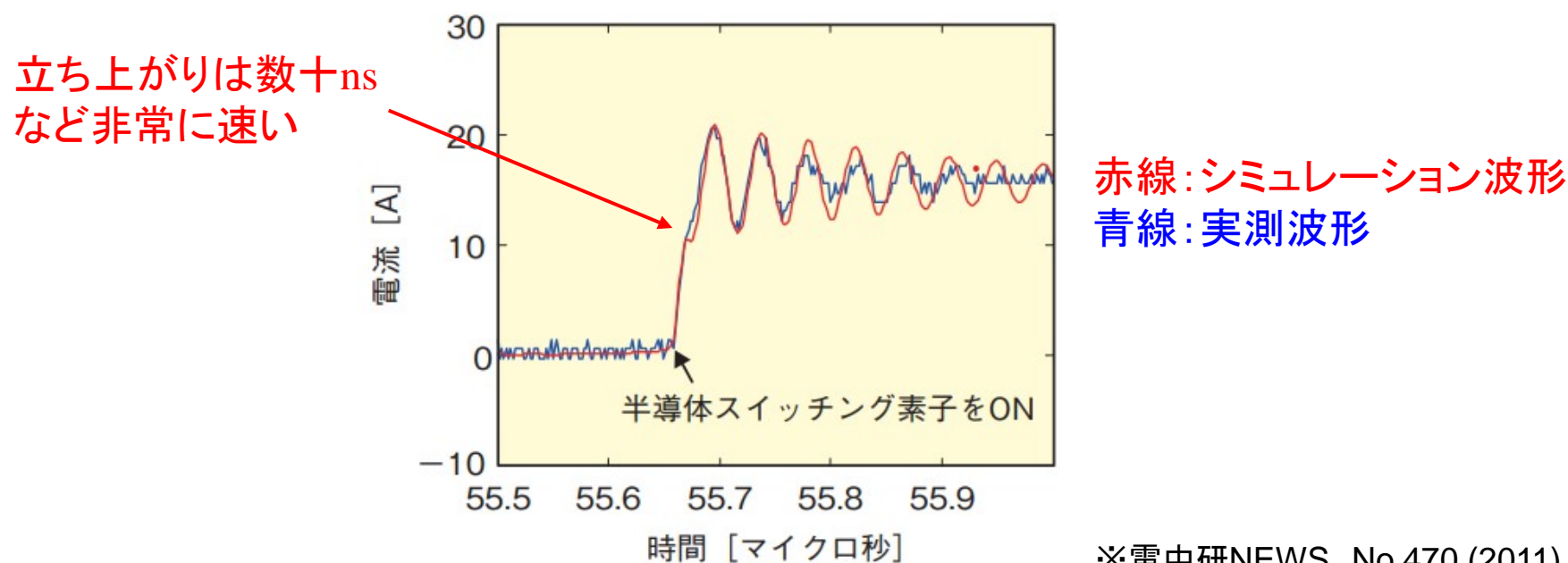
実際の回路には寄生インダクタンス、容量、抵抗が存在するため電力損失、共振、オーバーシュートが発生する



# 素子モデル

素子のスイッチングはnsオーダーの時間領域であり、詳細に模擬する場合は相応の計算時間刻みが求められる

計算時間刻みの問題から計算コストは極めて大きい



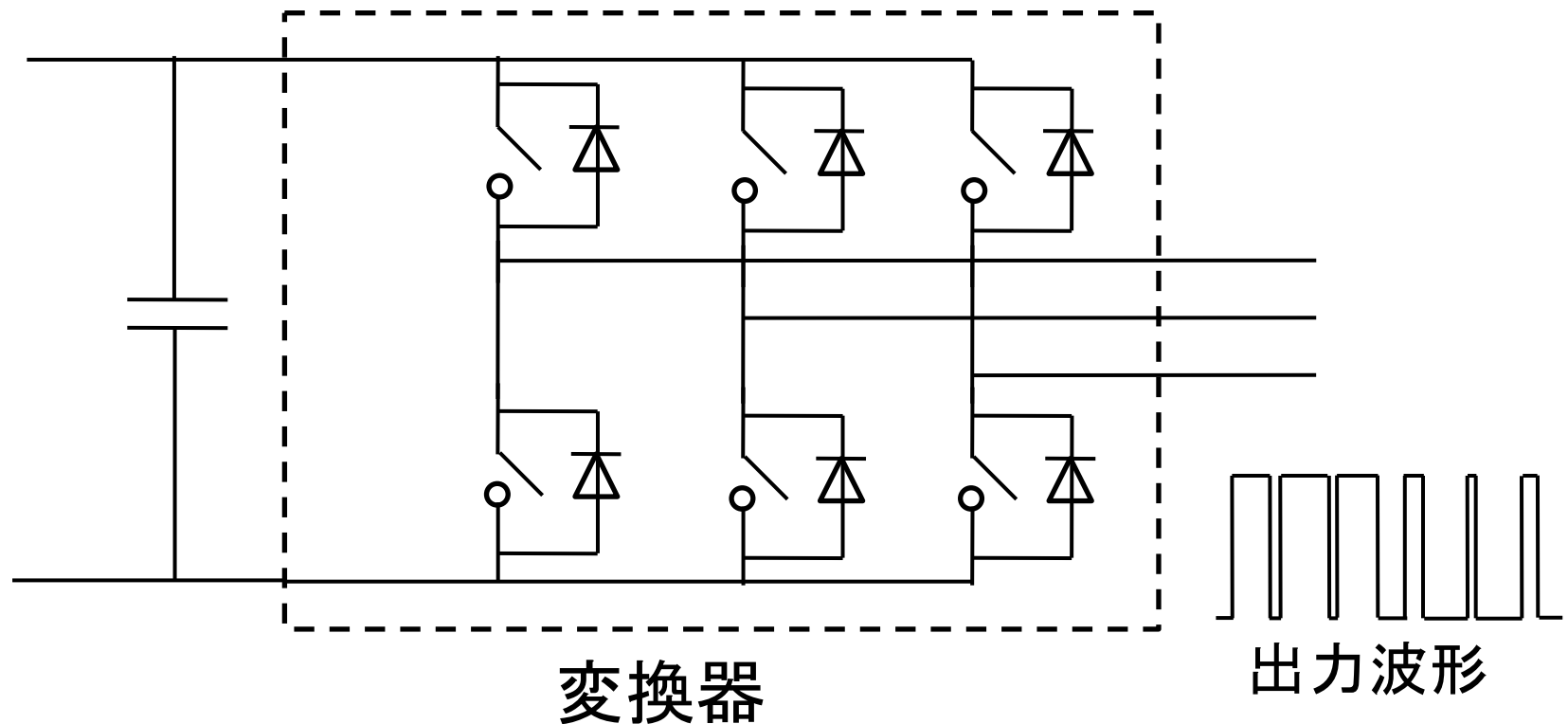
※電中研NEWS, No 470 (2011)

# スイッチングモデル

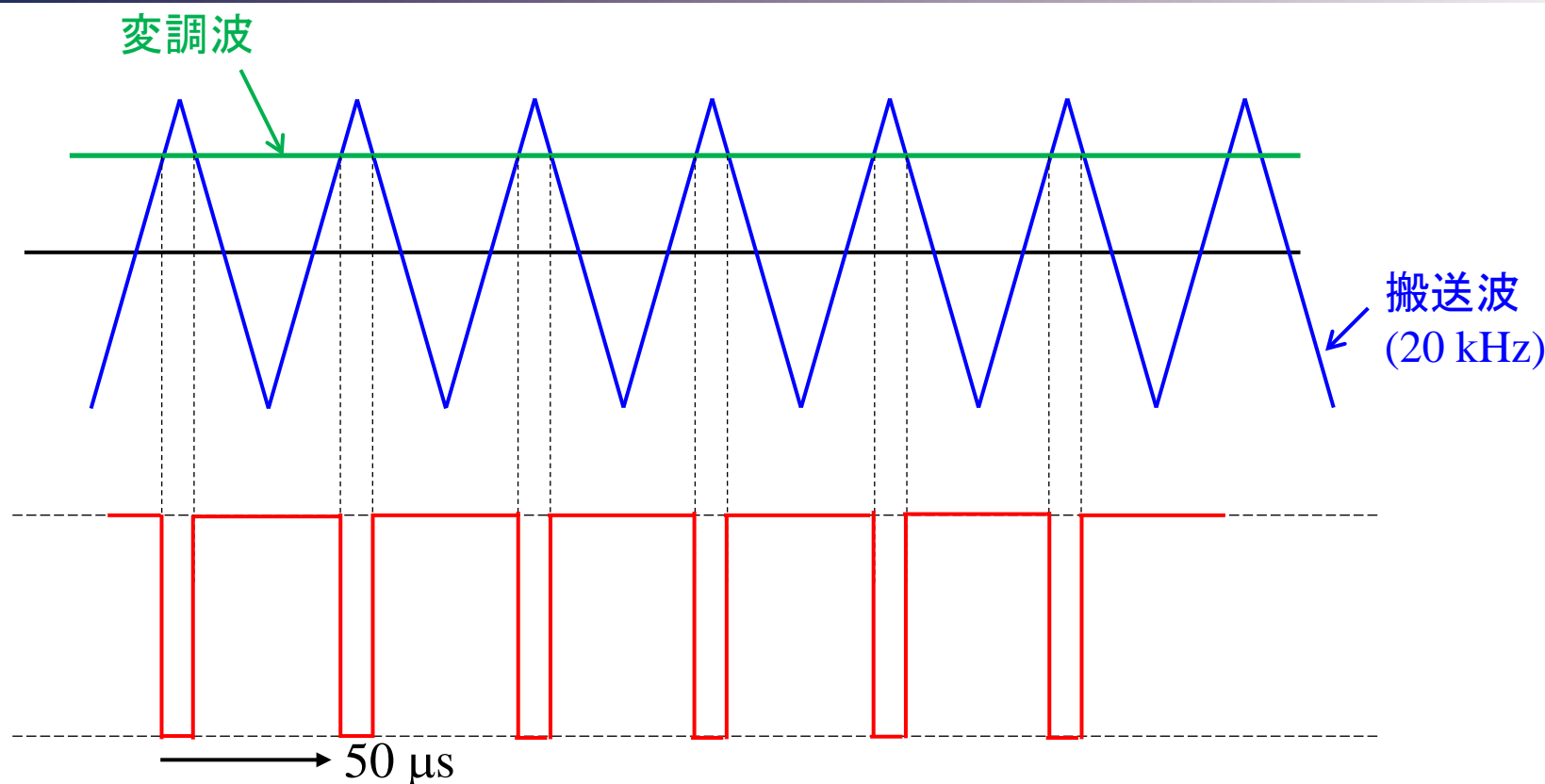
実機のスイッチング動作を再現しており実機と同じ矩形波が出力される

半導体素子は理想スイッチとして模擬される

以下は2レベル変換器の例



# スイッチングモデル(搬送波20 kHzの場合)



PWM搬送波の周波数を20 kHzとした場合、1回のON,OFFは約50  $\mu$ sの期間で行われる

これを表現するためには、例えば計算時間刻み1  $\mu$ sなど、50  $\mu$ sよりも大幅に小さな時間刻みを用いる必要がある

# スイッチングモデル

スイッチングモデルを使用した場合,

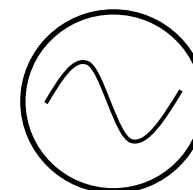
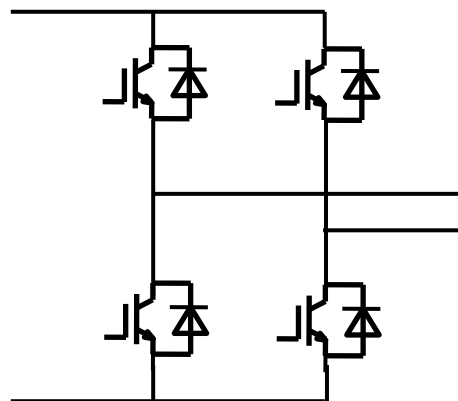
メリット

- ・PWMを含む多くの現象を模擬可能

デメリット

- ・計算コストが高い  
(PWM搬送波の周期よりも, 計算時間刻みを細かくとる必要がある)

# 平均化モデル



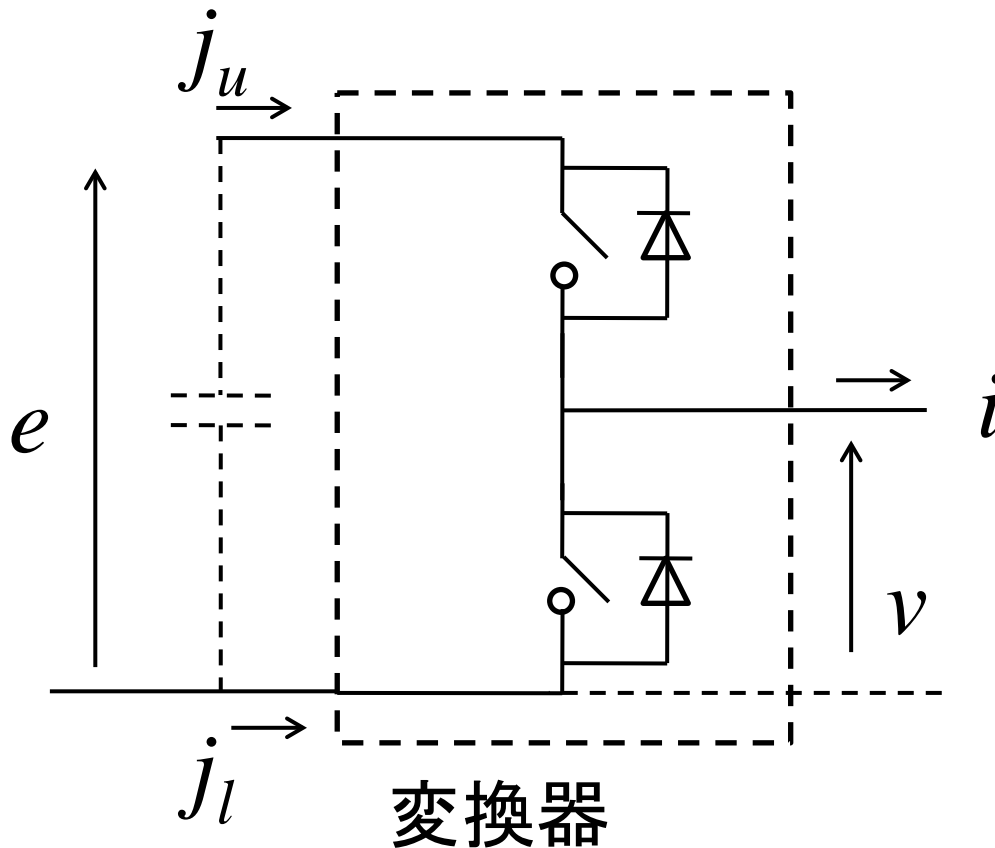
瞬時に制御可能な  
理想電圧源に見える

変換器はPWMによる制御を行っている

搬送波が20 kHzの場合、 $50 \mu\text{s}$ ごとにスイッチング動作を行っているため、非常に高速な制御が可能

変換器は系統から見て瞬時に制御可能な理想電圧源に見える  
そこで、実際に変換器を制御可能な電圧源としてモデリングする方法を平均化(平均値)モデルと呼ぶ

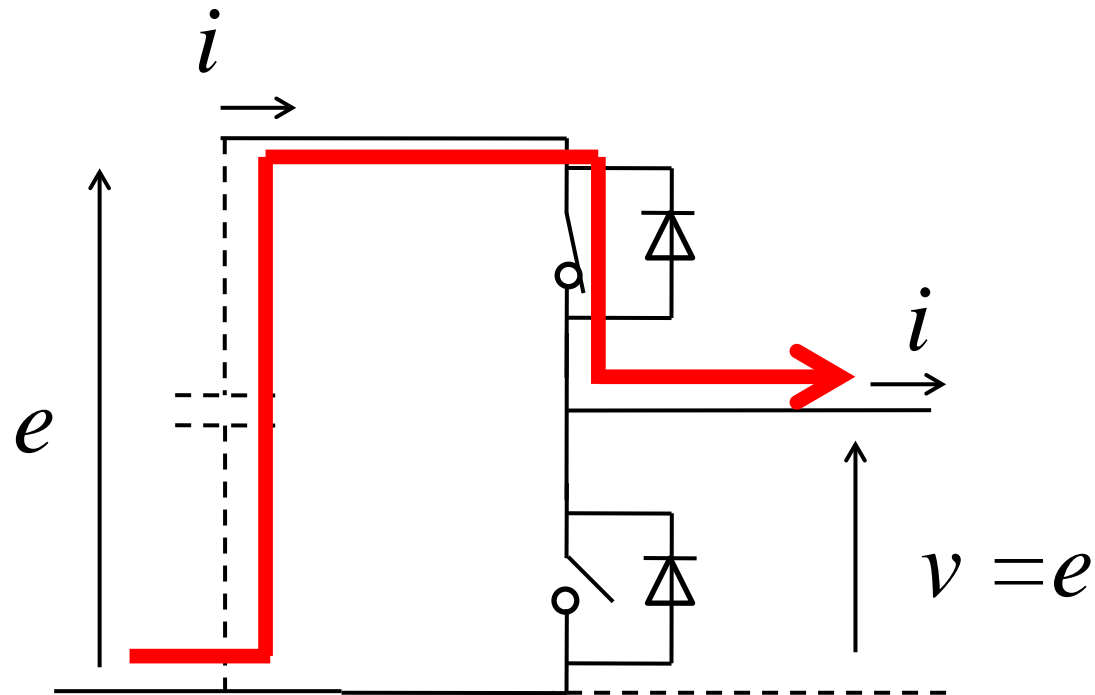
# 平均化モデル(单相)



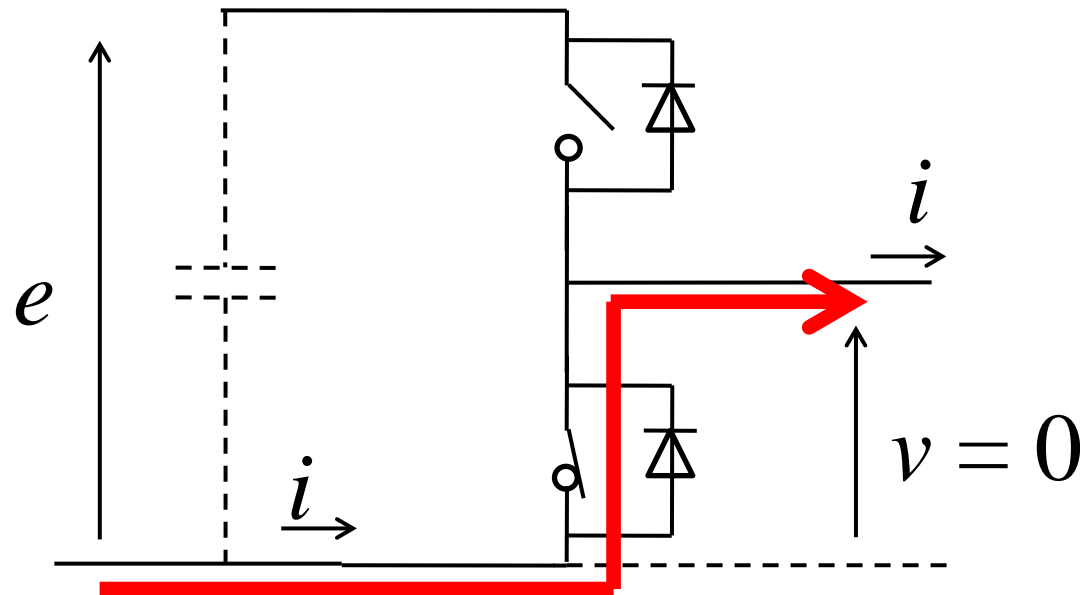
$j_u$ : 直流電流  
 $j_l$ : 直流電流  
 $i$ : 交流電流  
 $e$ : 直流電圧  
 $v$ : 交流電圧



# 平均化モデル(単相:上アームONの場合)



# 平均化モデル(单相:下アームONの場合)



PWM周期 $T$ のうち上アームがONの時間を $T_u$ ,  
 $T$ と $T_u$ の比( $T_u / T$ )を $k$ とおく。

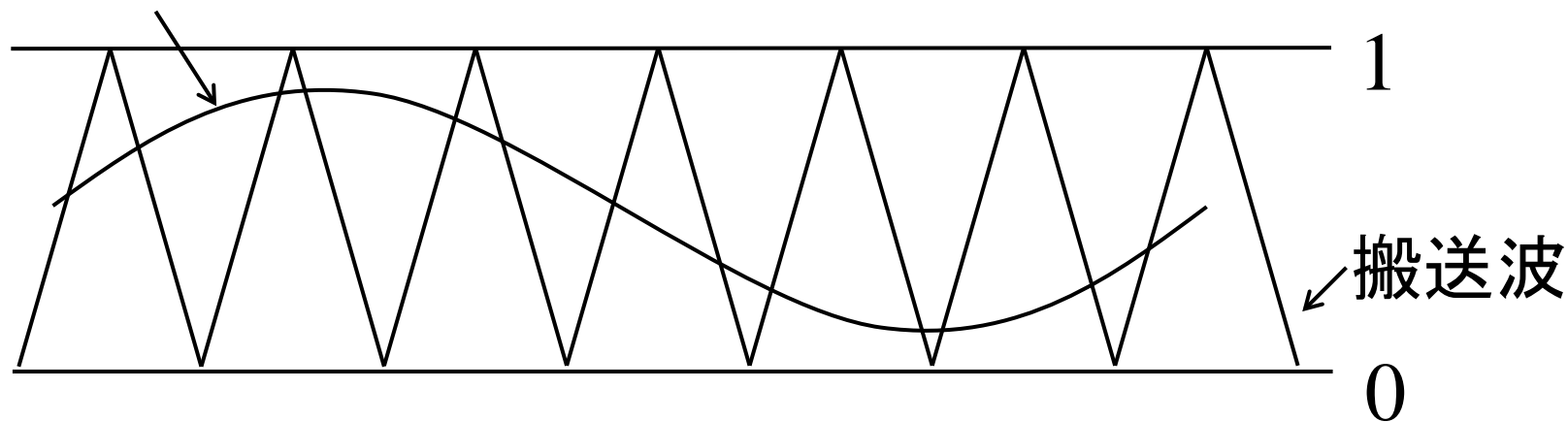
$$v = k \cdot e$$

で表される。ここで、

$v$ =交流電圧,  $e$ =直流電圧,  $k \approx$ 変調度(ただし,  $0 \sim 1$ の間)

# PWMの変調波

変調波(変換器に出力させたい波形)



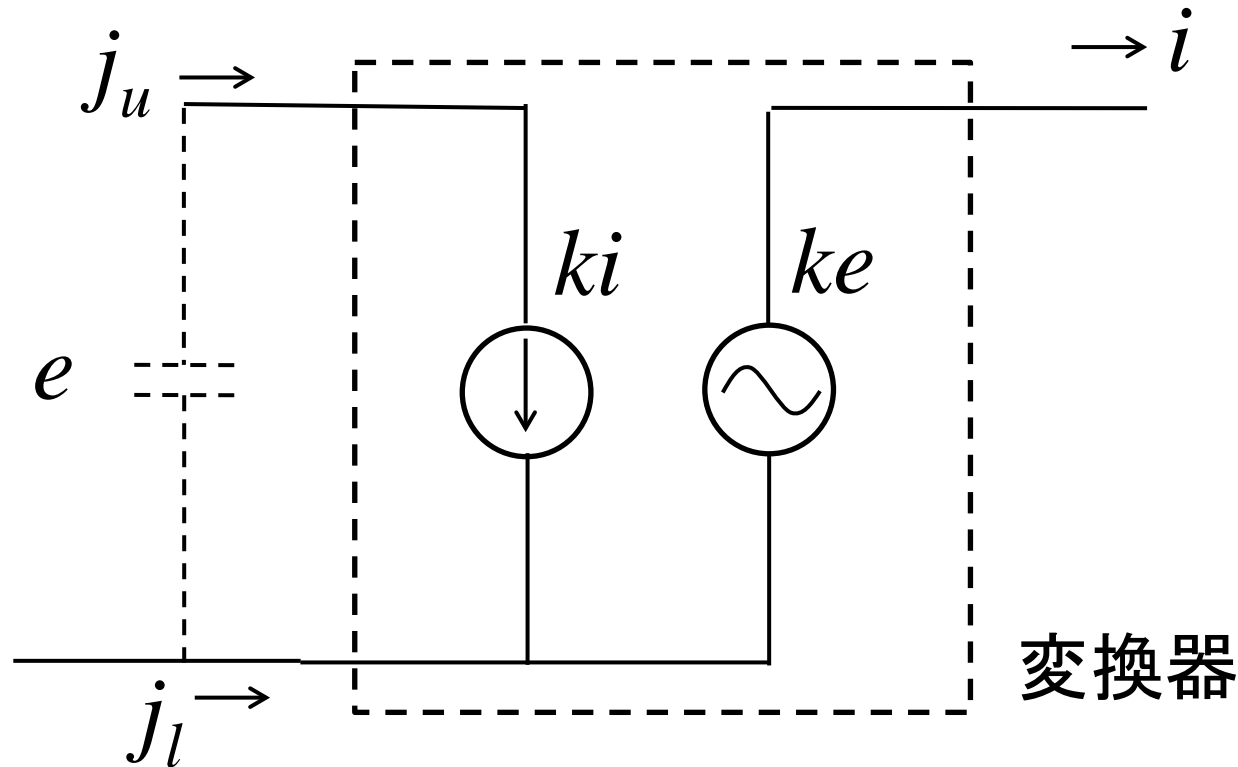
PWMの変調波は0~1の間にあるものとして定義する

# 平均化モデル(単相)

周期 $T$ の間に平均的に出力される直流電流 $j_u, j_l$ は

$$j_u = k \cdot i$$

$$j_l = (1 - k) \cdot i$$



# 平均化モデルの式

同様に三相の場合，平均化モデルは以下のように定式化される ( $k_a, k_b, k_c$  は各相の変調率)

$$v_a = k_a \bullet e$$

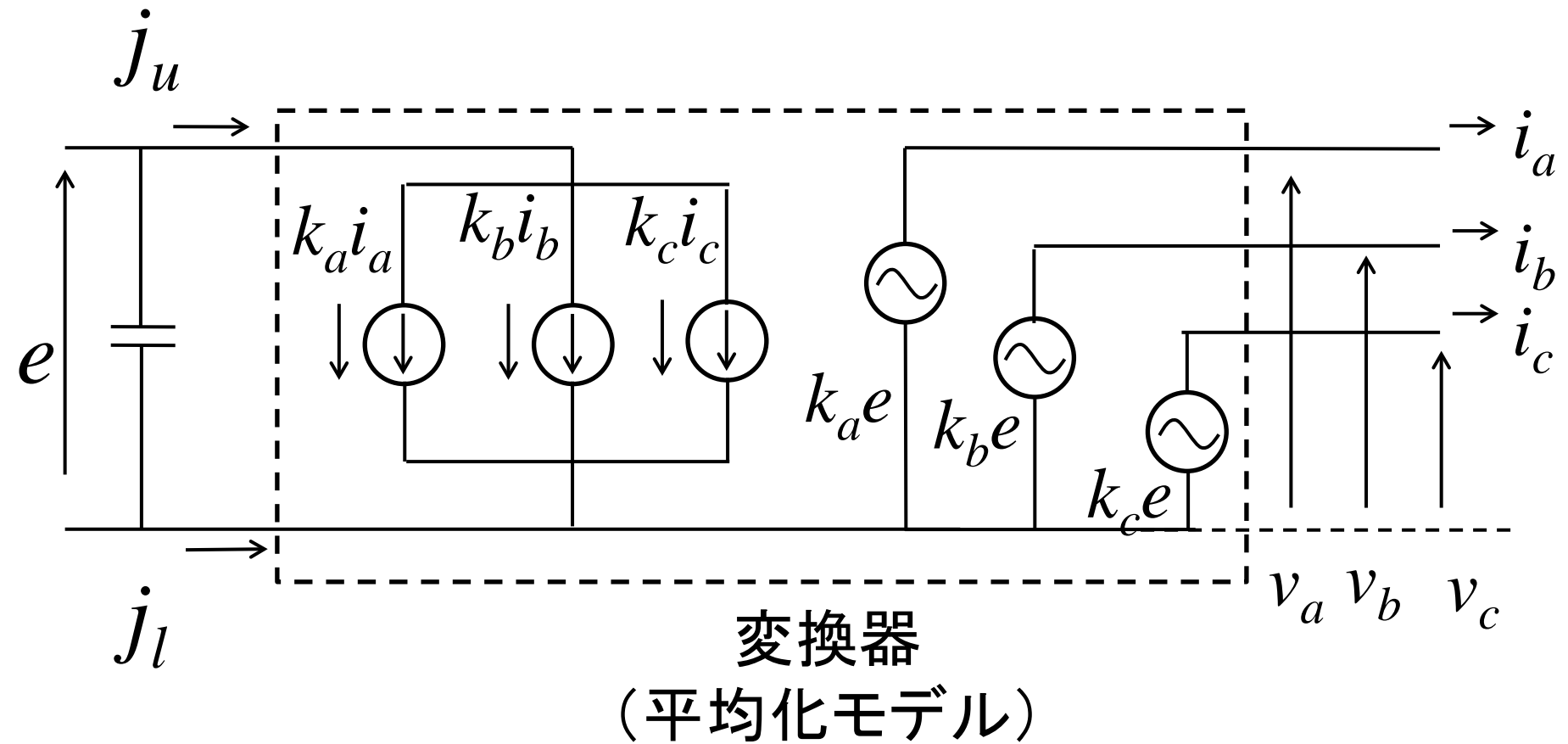
$$v_b = k_b \bullet e$$

$$v_c = k_c \bullet e$$

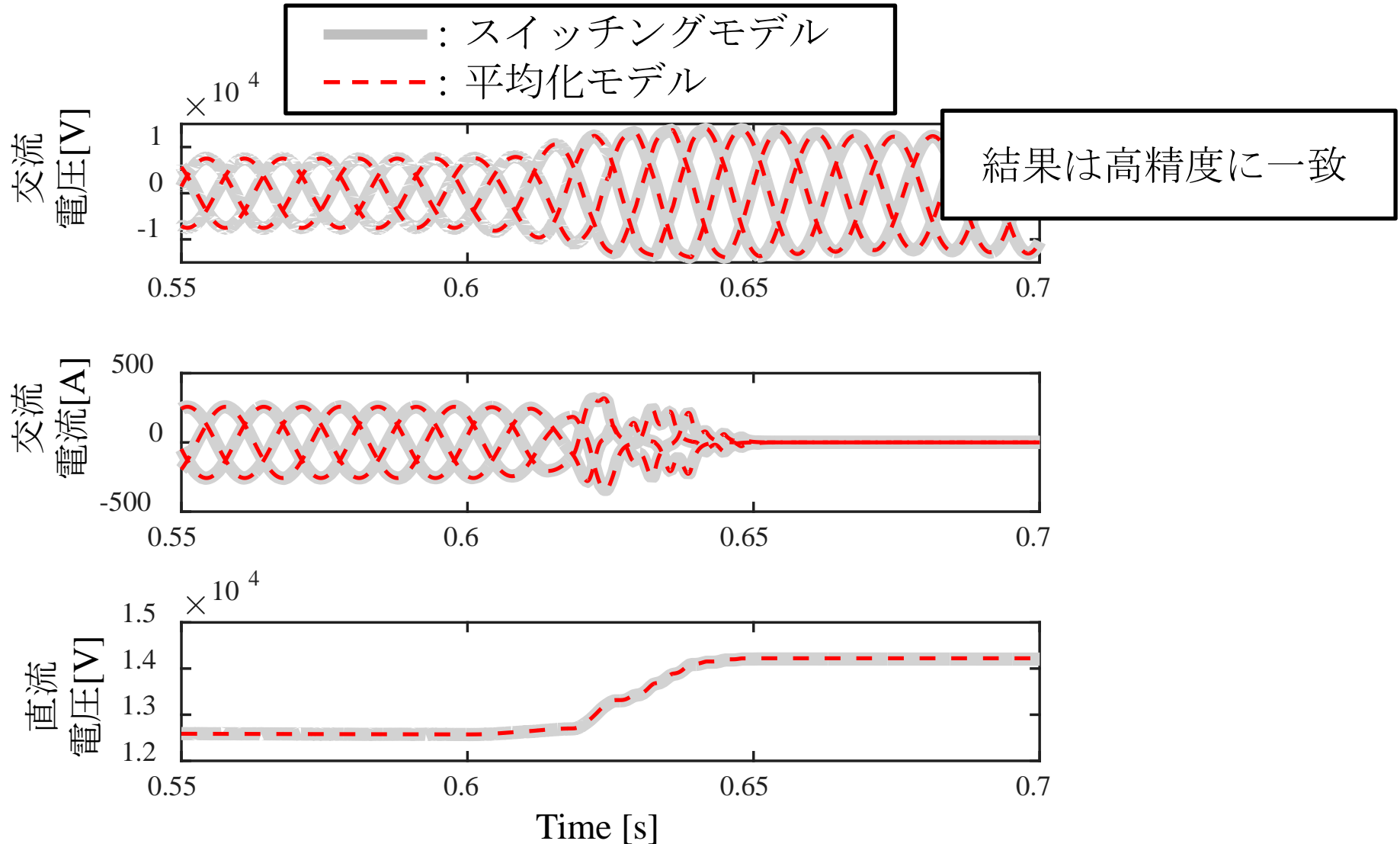
$$j_u = k_a \bullet i_a + k_b \bullet i_b + k_c \bullet i_c$$

$$\begin{aligned} j_l &= (1 - k_a) \bullet i_a + (1 - k_b) \bullet i_b + (1 - k_c) \bullet i_c \\ &= i_a + i_b + i_c - j_u \end{aligned}$$

# 平均化モデル(全体図)



# XTAPによる解析結果



# 平均化モデル

## 平均化モデルを使用した場合

### メリット

- ①PWM(及びそれから発生する高い周波数の高調波)以外の多くの現象を模擬可能
- ②計算コストはスイッチングモデルより大幅に軽くなる

### デメリット

- ①PWMの変調周波数と同程度の非常に速い現象(例えば20 kHz)などの解析をするには不向き



# 平均化モデル補足

---

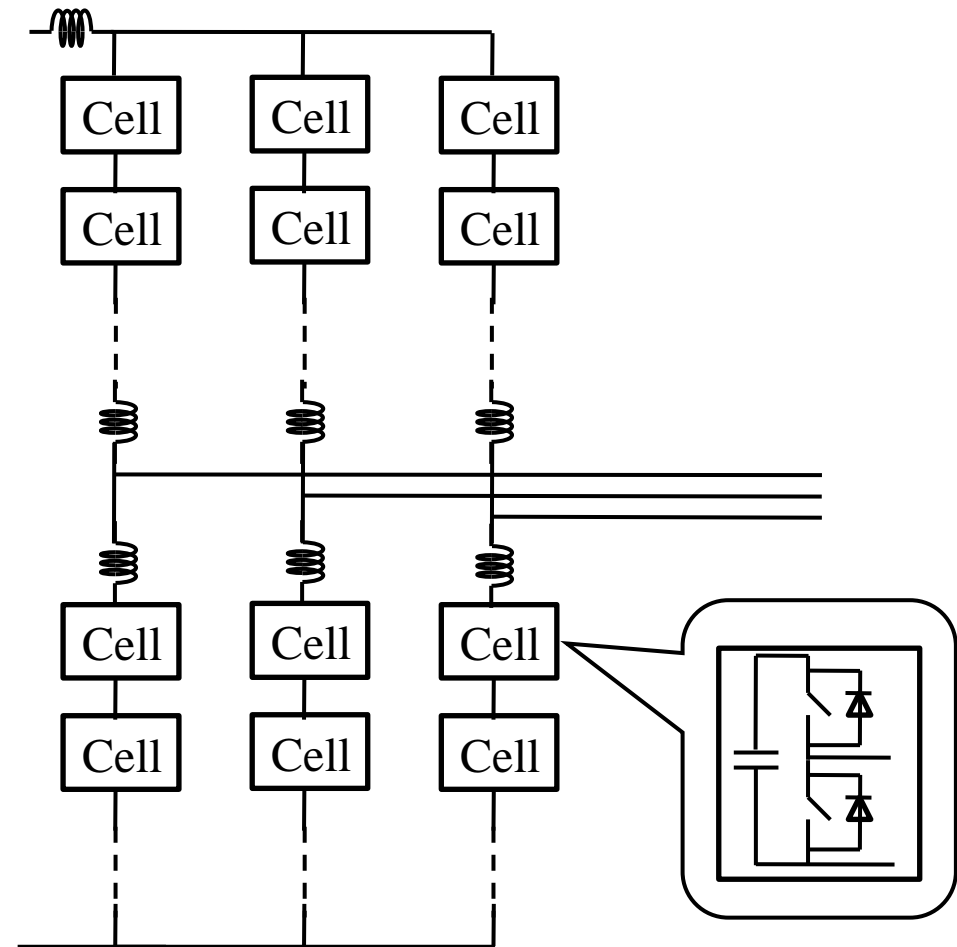
先程までのスライドで示した平均化モデルは一例である、厳密には様々な平均化モデルの形があり、

- 1.どの程度実機と異なるか
- 2.どの程度の高速化が可能か

はモデル化の方法により異なる

# MMCの平均化モデル

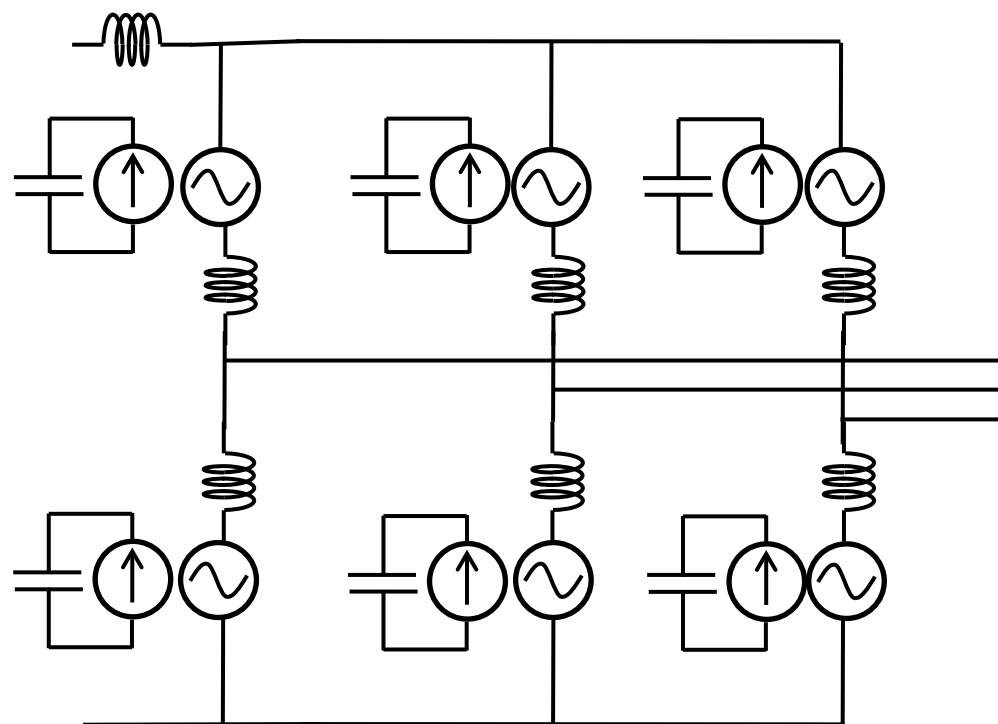
MMCは大電力用途では  
100セル以上となるため、  
解析対象となる回路規模が  
非常に膨大となる



# MMCの平均化モデル

MMCのアームを電圧源  
に変換することで, MMC  
にも平均化モデルの考え  
方を適用可能

循環電流や(段間バラン  
スを除く)セルバランス制  
御なども模擬可能なため,  
高い精度でMMC  
の挙動を模擬可能

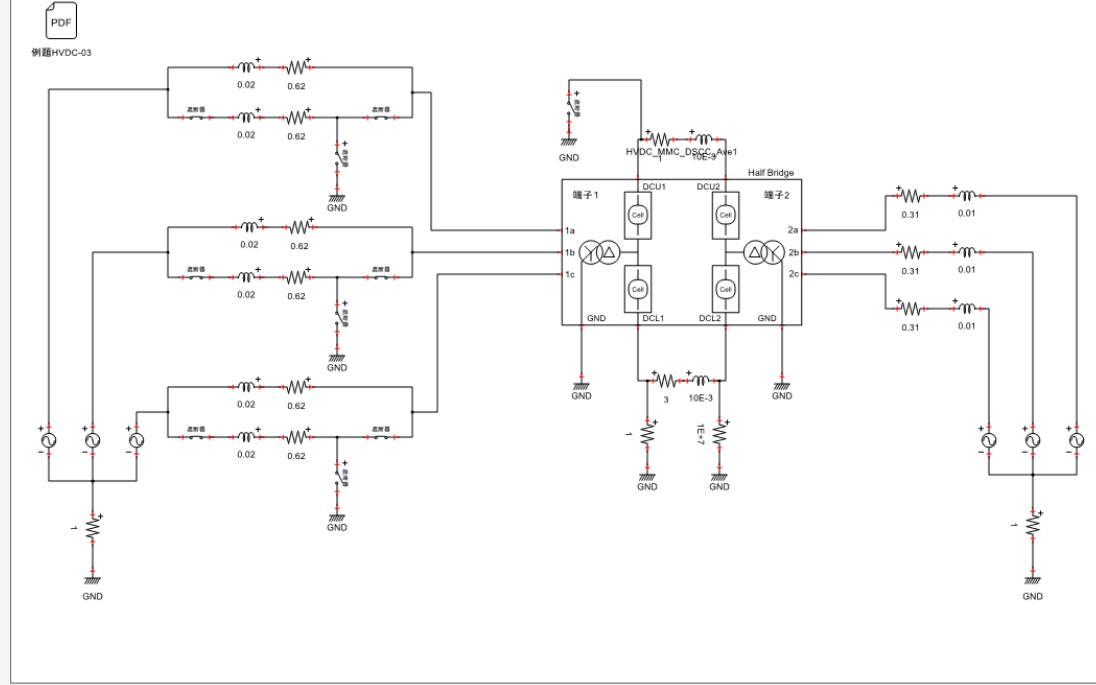


# XTAPにおけるMMCモデル



- 00 接地・端子
- 01 RLC
- 02 電圧源・電流源
- 03 スイッチ
- 04 プローブ
- 05 送配電線
- 06 変圧器
- 07 発電機
- 08 直流送電・周波数変換所・FACTS
- 09 PV
- 10 電動機・負荷
- 20 潮流計算・定常初期化用補助部品
- 30 単相実効値模擬部品
- 40 音響開放ブロック
- 41 四端子算ブロック
- 42 制御開放ブロック
- 43 制動制御ブロック
- 44 時間遅れブロック
- 45 論理開放ブロック
- 46 特殊開放ブロック
- 47 信号源ブロック
- 48  $\alpha\beta$ -dq-pw変換回路
- 49 DLL
- 80 発変電所耐雷設計
- 81 配電線耐雷設計
- 82 開閉サージ性過電圧の解析
- 83 配電スマート化
- 98 その他
- 99 ユーザ定義部品

例題名：ハーフブリッジMMC型HVDCモデル(平均化モデル) 番号：HVDC-03-A (例題ファイル: Ver.1.2)



# MMCの平均化モデル

電力中央研究所が開発している瞬時値解析ソフトXTAPではMMCのスイッチングモデル(HVDC-03B)と平均化モデル(HVDC-03A)の例題を用意している

MMC-HVDCシステム スwitchingモデル(セル10段)

計算時間刻み:  $1 \mu\text{s}$

計算時間: 908秒

MMC-HVDCシステム 平均化モデル

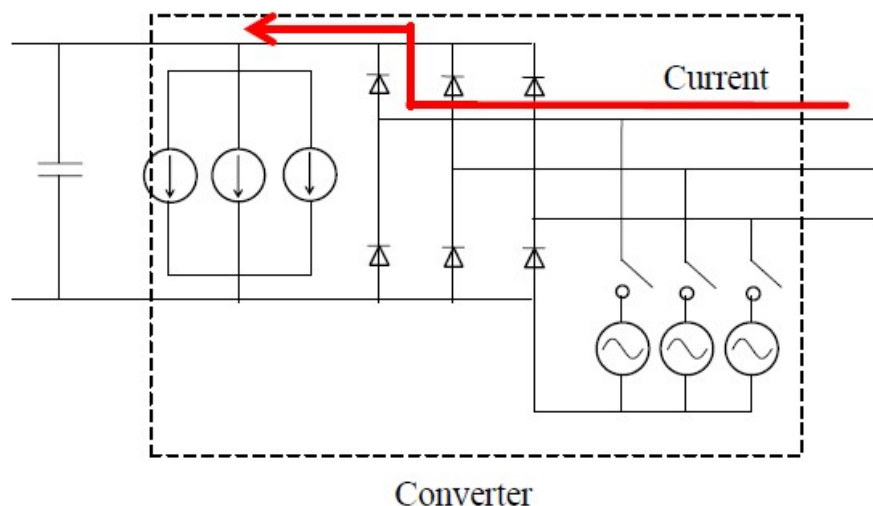
計算時間刻み:  $10 \mu\text{s}$

計算時間: 15.7秒

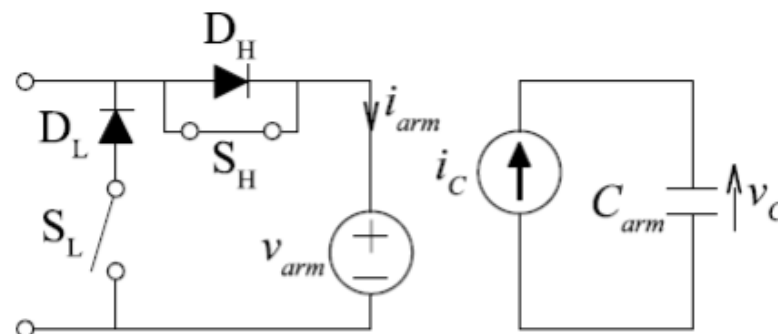
**57.8倍の高速化**

# 平均化モデルにおけるゲートブロック(GB)の模擬

## 2レベルにおけるGBの模擬※1



## MMCにおけるGBの模擬※2

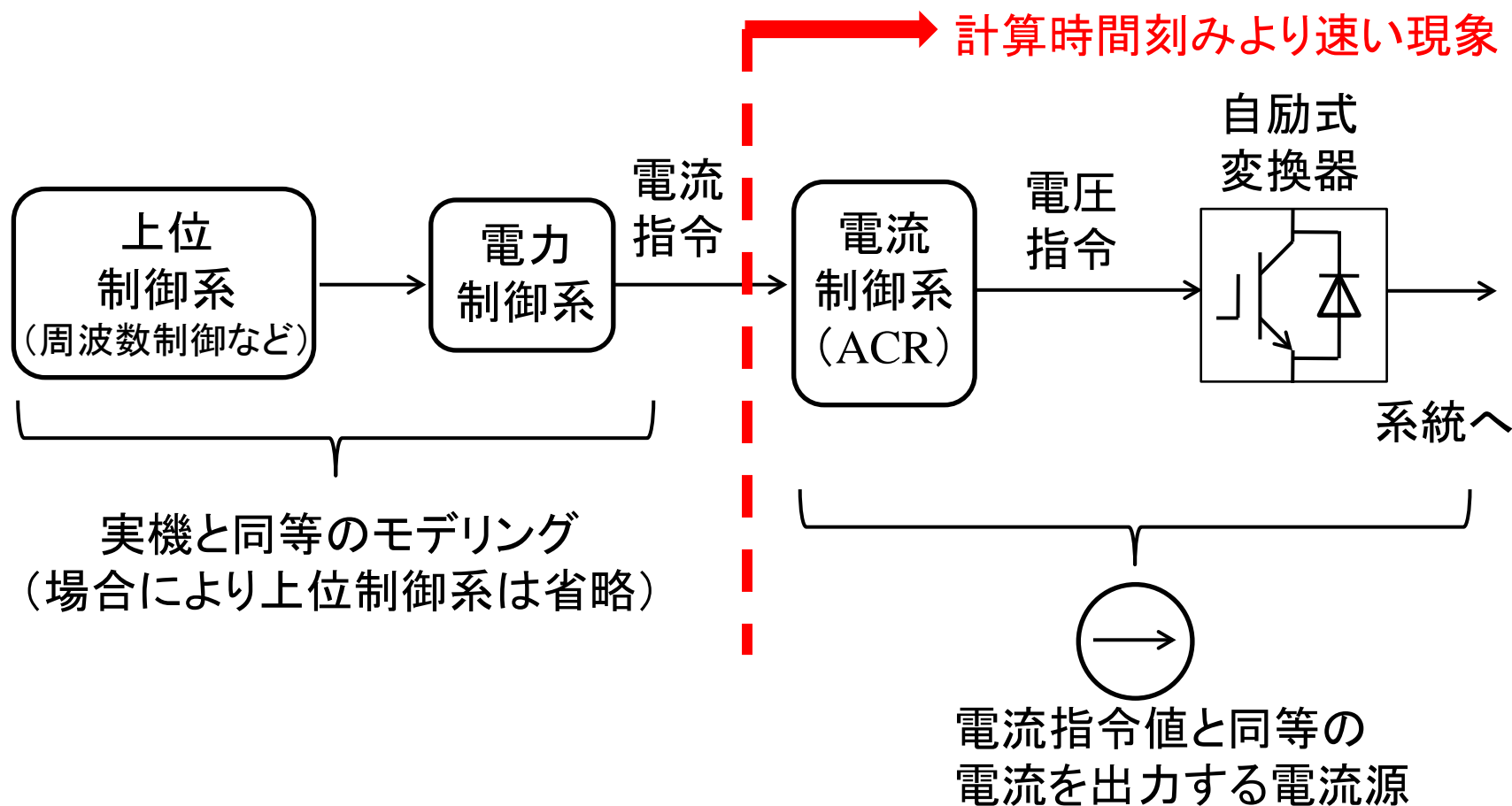


スイッチやダイオードの付加により平均化モデルでもGB操作が模擬できることが知られている

※1 菊間俊明, 岡田有功, 「高速な瞬時値解析を可能とする交直変換器の整流回路付平均化モデル」, 平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会(2016)

※2 佐野憲一朗他, 「モジュラーマルチレベル変換器のゲートブロック中の現象解析を可能とした瞬時値解析用平均値モデル」, 平成26年電気学会全国大会, Vol. 6, No. 179, pp. 333-334 (2014)

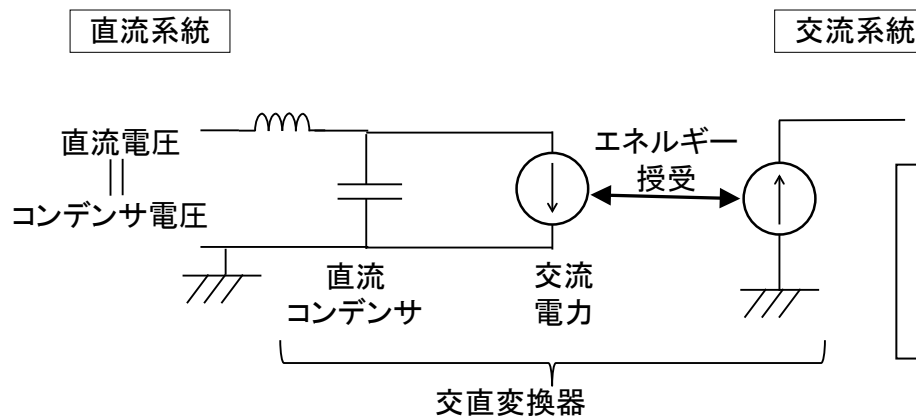
# 電流源モデル(実効値解析)



実効値解析は計算時間刻みが例えば10 msなど比較的大きいため、それより応動の速い制御(ACR等)・現象は省略される

# 直流送電用自励式変換器の実効値解析モデル

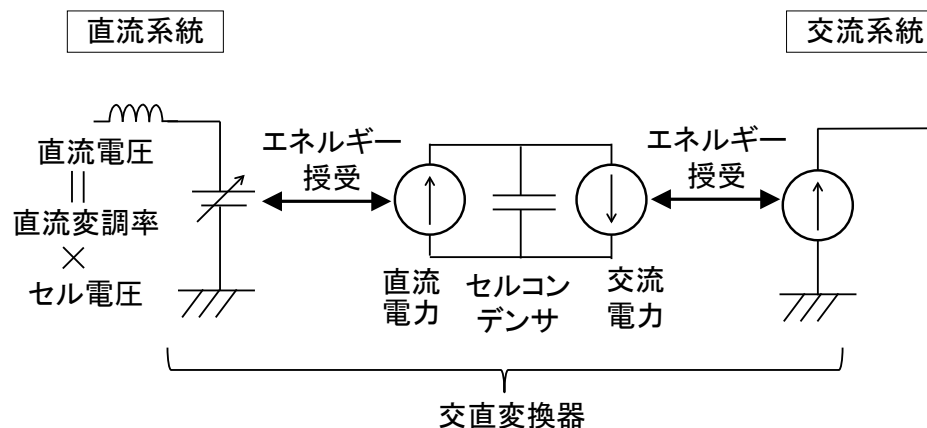
## 2レベル (概要)



交流系統側から見て  
変換器は電流源としてモデリングされる

2レベル変換器は直流コンデンサ電圧が  
直流系統に直接出力される

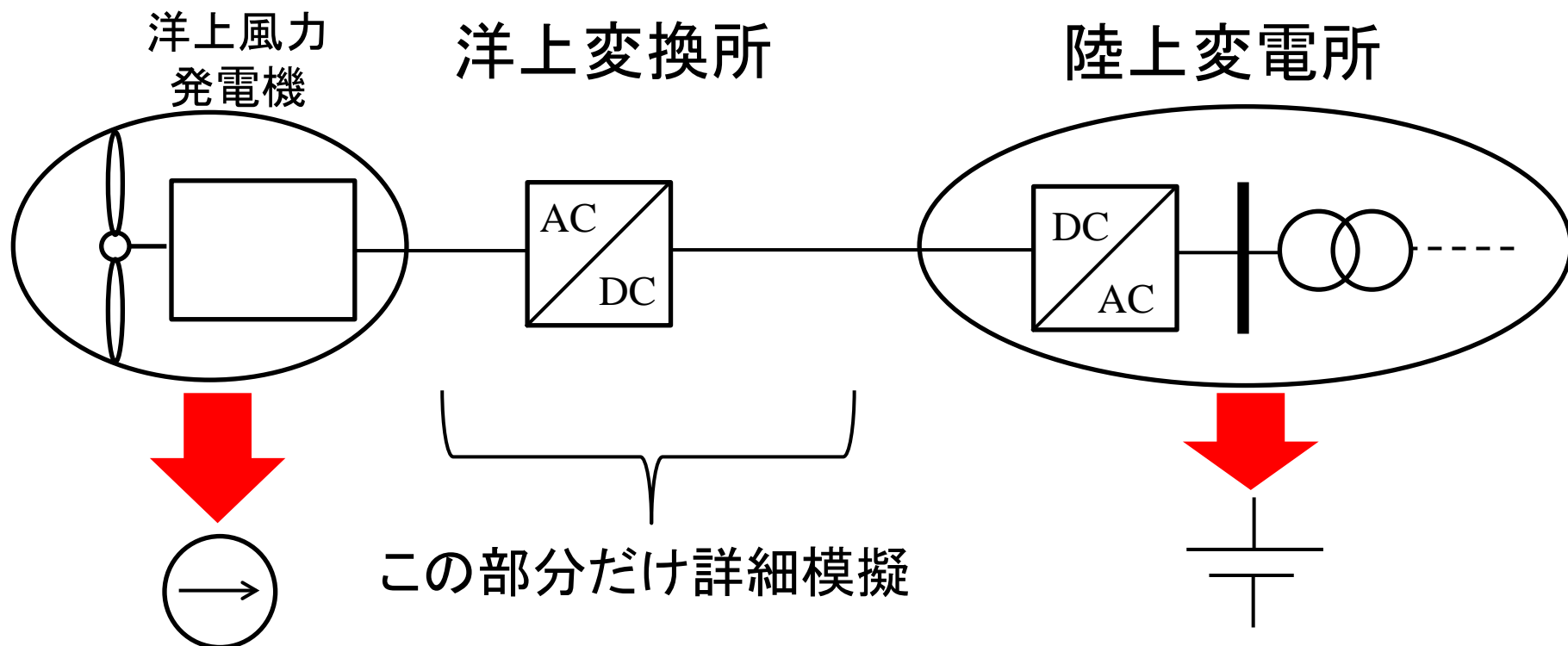
## MMC (概要)



MMCはセルコンデンサが半導体素子を介して接続されるため直流電圧がセル電圧と独立に制御できる



# 用途に応じた簡略化の例



用途に応じて、あまり重要でない部分を電圧源や電流源や抵抗で模擬することはケースに応じて行われる  
 例えば洋上変換所のみが重要な場合はその他の要素は簡略化する  
 ただし、解析目的にとって重要な性質を省略していないかどうか解析者の責任で判断する必要がある

# まとめ

---

時間解析シミュレーションの概要とシミュレーションモデルの解説をおこなった

解析はケースバイケースで柔軟に対応することが重要

そのためには、解析者が解析手法とモデルの内容を理解していることが重要

ありがとうございました