

「NEDOプロジェクトを核とした人材育成，産学連携等の総合的展開
(NEDO特別講座) / 多用途多端子直流送電システム」

産学合同セミナー (2024年 6月17日)

多端子直流送電用電力変換器の応用としての 電力系統制御の可能性

徳島大学 大学院社会産業理工学研究部
理工学域 電気電子系
北條 昌秀

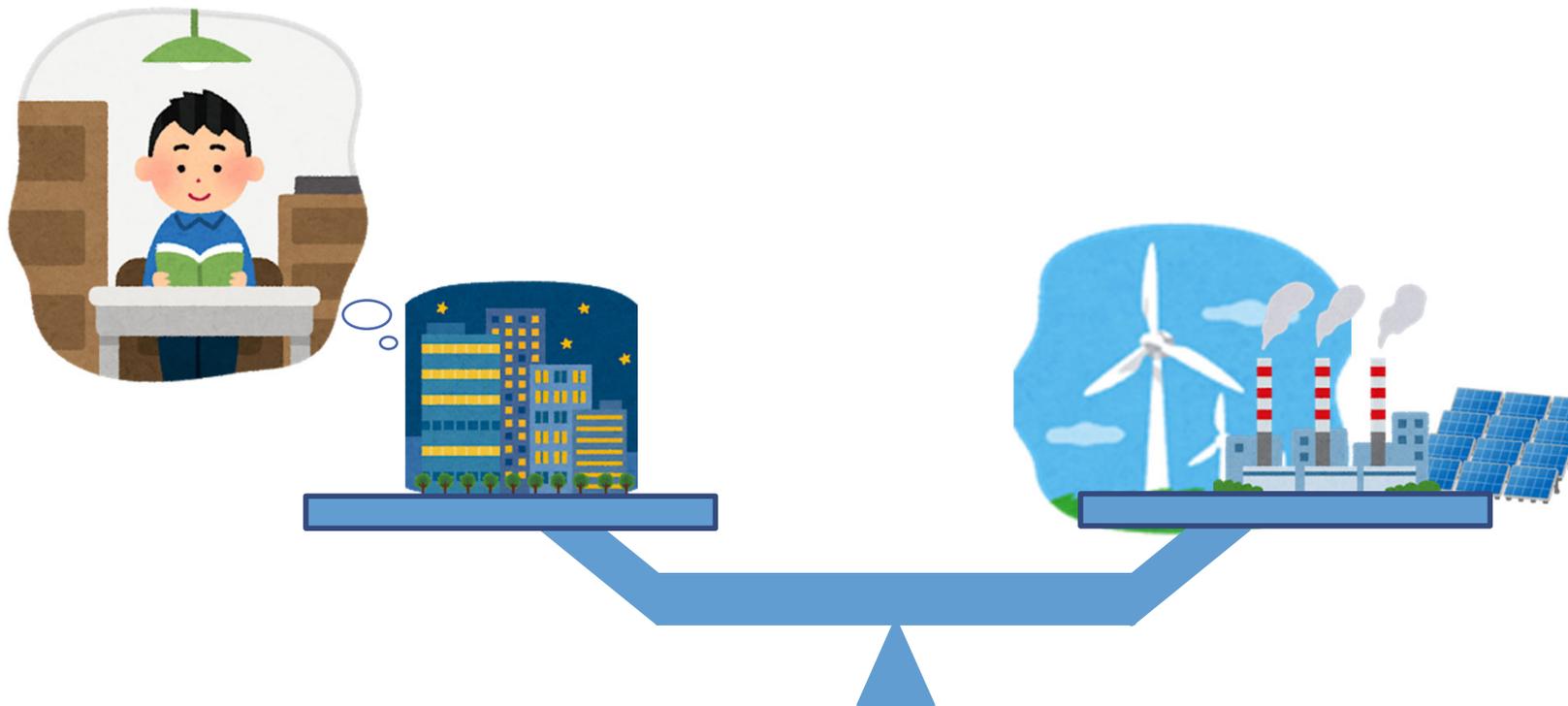
講演内容

- はじめに
- 電力システムの周波数制御について
- 直流送電用電力変換器の特徴
 - 他励直流送電方式
 - 自励直流送電方式
- 直流送電用自励変換器による系統制御の可能性
- 電力システムの安定化制御について
- まとめ

はじめに

電気は生もの

- 電気エネルギーは，蓄えるのが難しい。
- 電源と需要地を**しっかり柔軟に繋ぎ**，需給バランスを維持する必要がある。

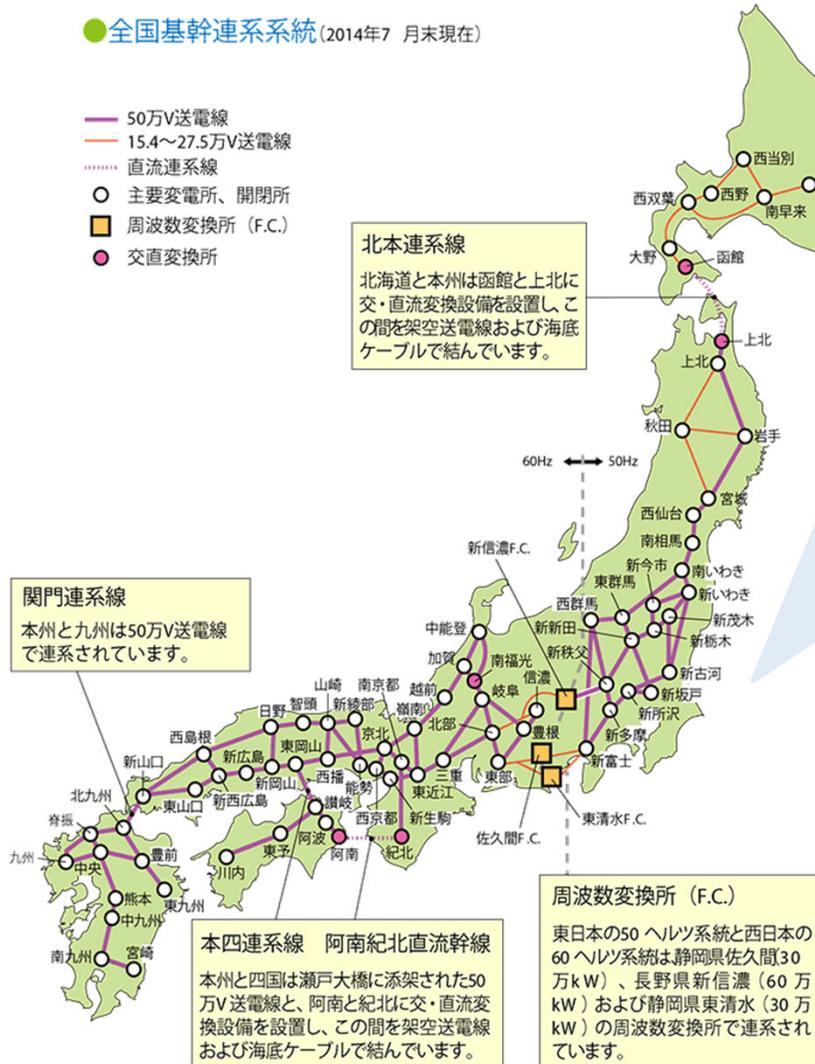


日本の送電ネットワーク

電気事業連合会 website より

<http://www.fepec.or.jp/enterprise/supply/soudensen/>

●全国基幹連系系統 (2014年7 月末現在)

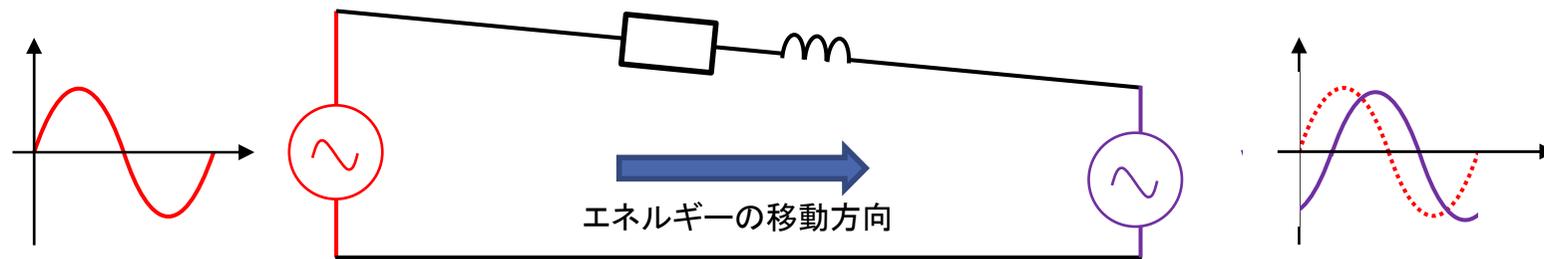


交流送電 直流送電

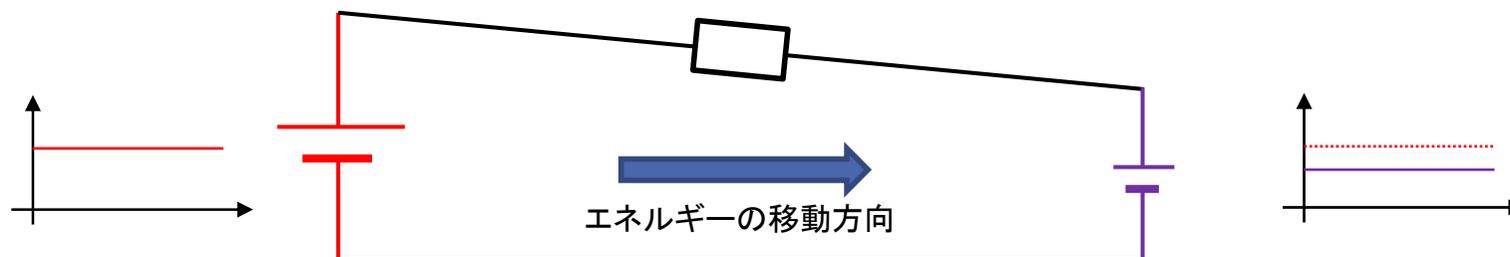
- 2000年
阿南紀北直流幹線の運用開始
- 1990年代
FACTS (Flexible AC Transmission Systems) として大容量パワエレ機器による系統制御の研究が活発

送電時の交流と直流の違い

- **電気エネルギー**が送られるのは、
 - **交流**では、**位相の進んでいるほうから遅れているほうへ**
※ ただし、定常的なエネルギー授受は、**同じ周波数であることが条件**



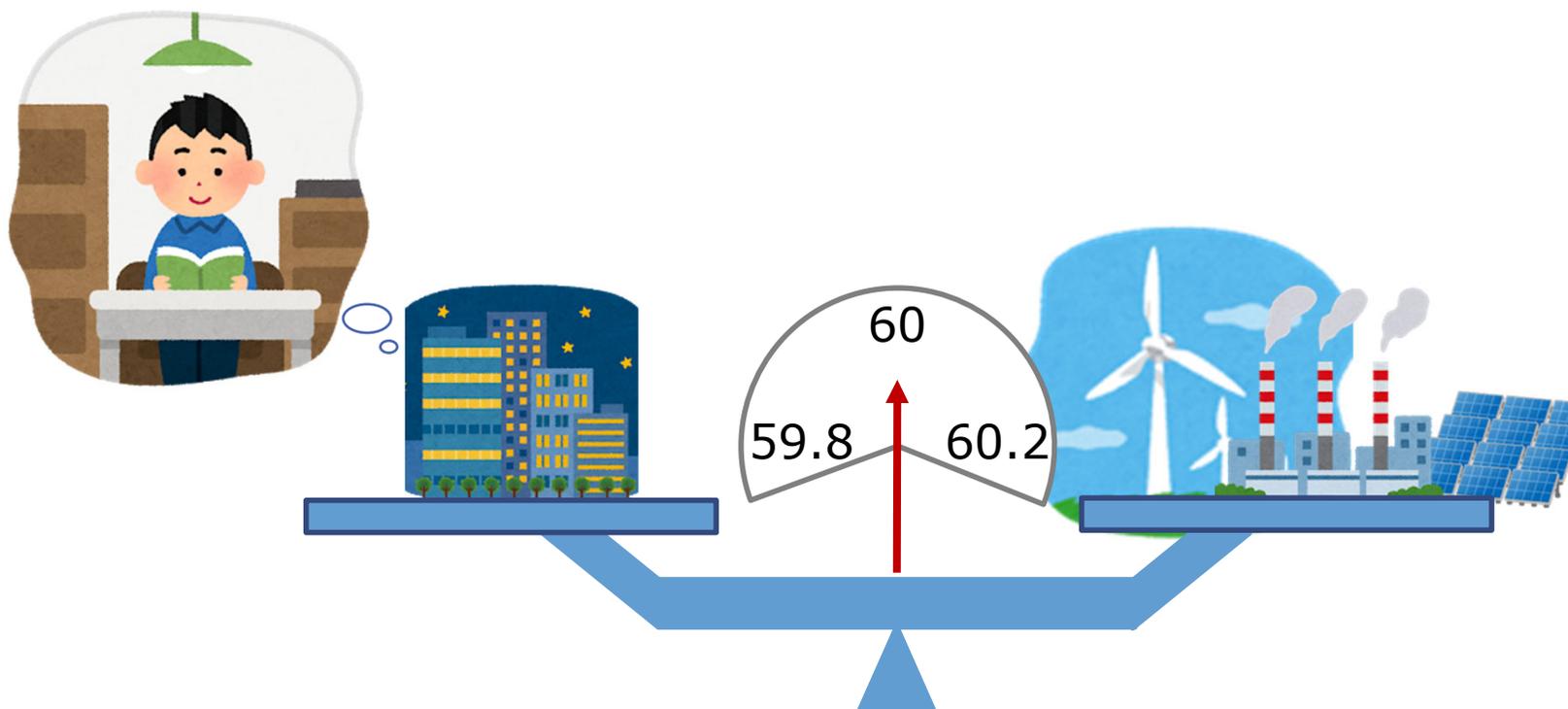
- **直流**では、**電圧の高いほうから低いほうへ**



電力系統の周波数制御について

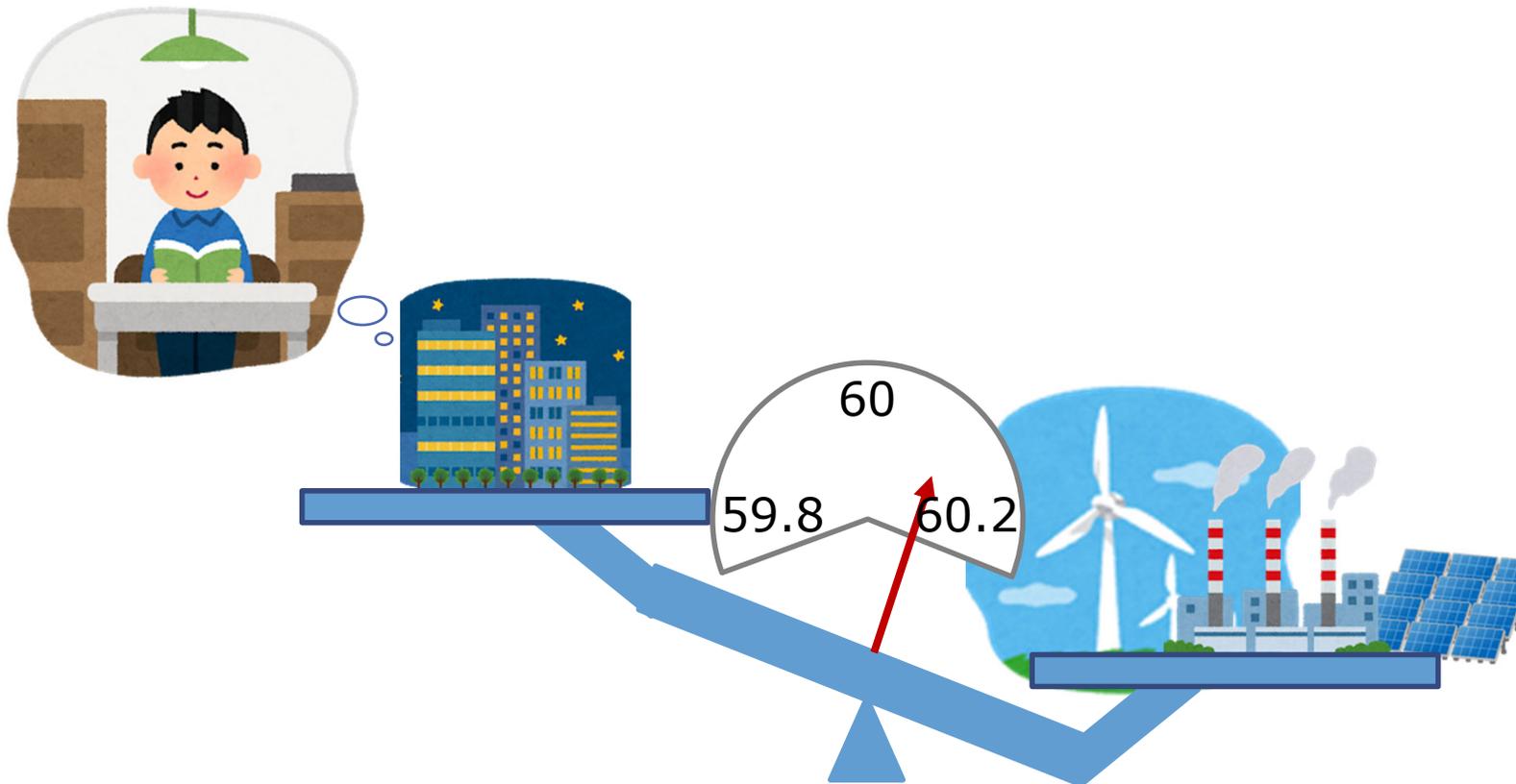
交流系統では周波数が重要な意味を持つ

- 周波数で全系の需給バランスがわかる



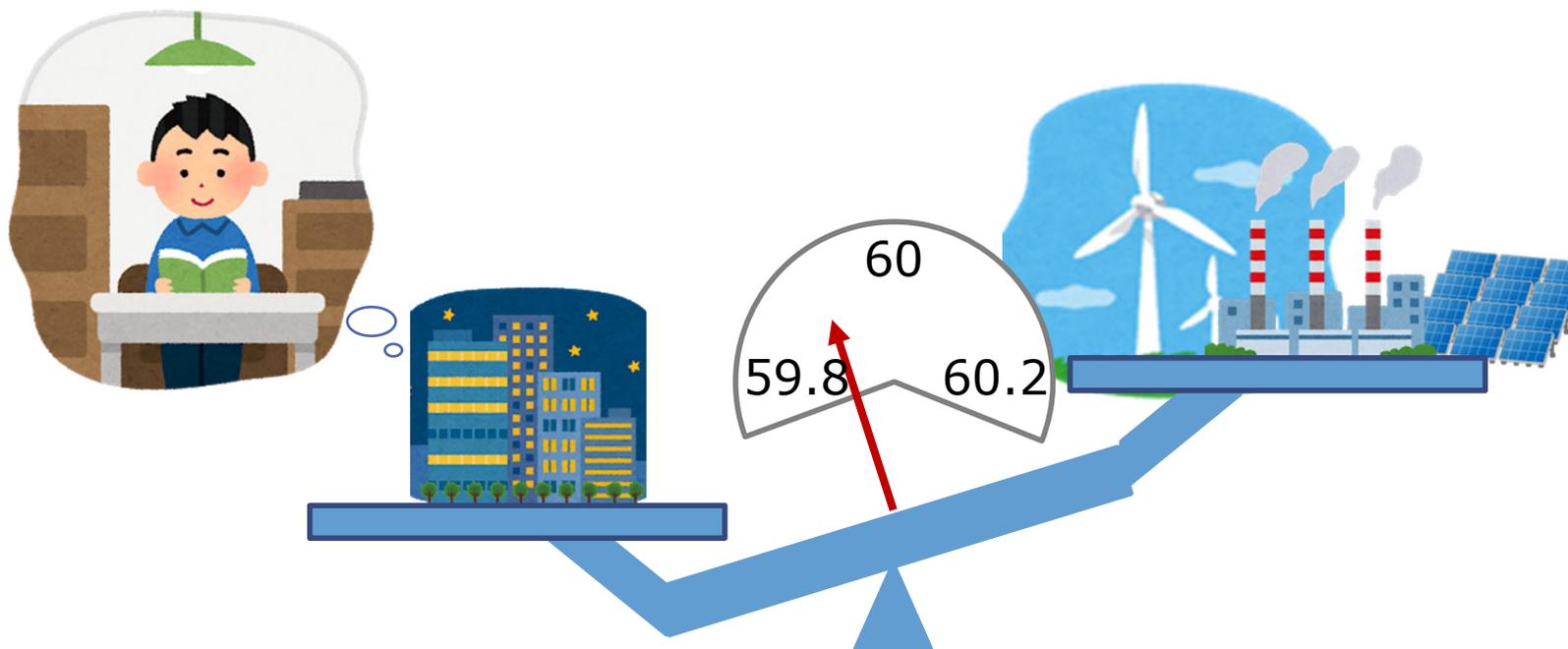
交流系統では周波数が重要な意味を持つ

- 周波数で全系の需給バランスがわかる



交流系統では周波数が重要な意味を持つ

- 周波数で全系の需給バランスがわかる



交流系統では周波数が重要な意味を持つ

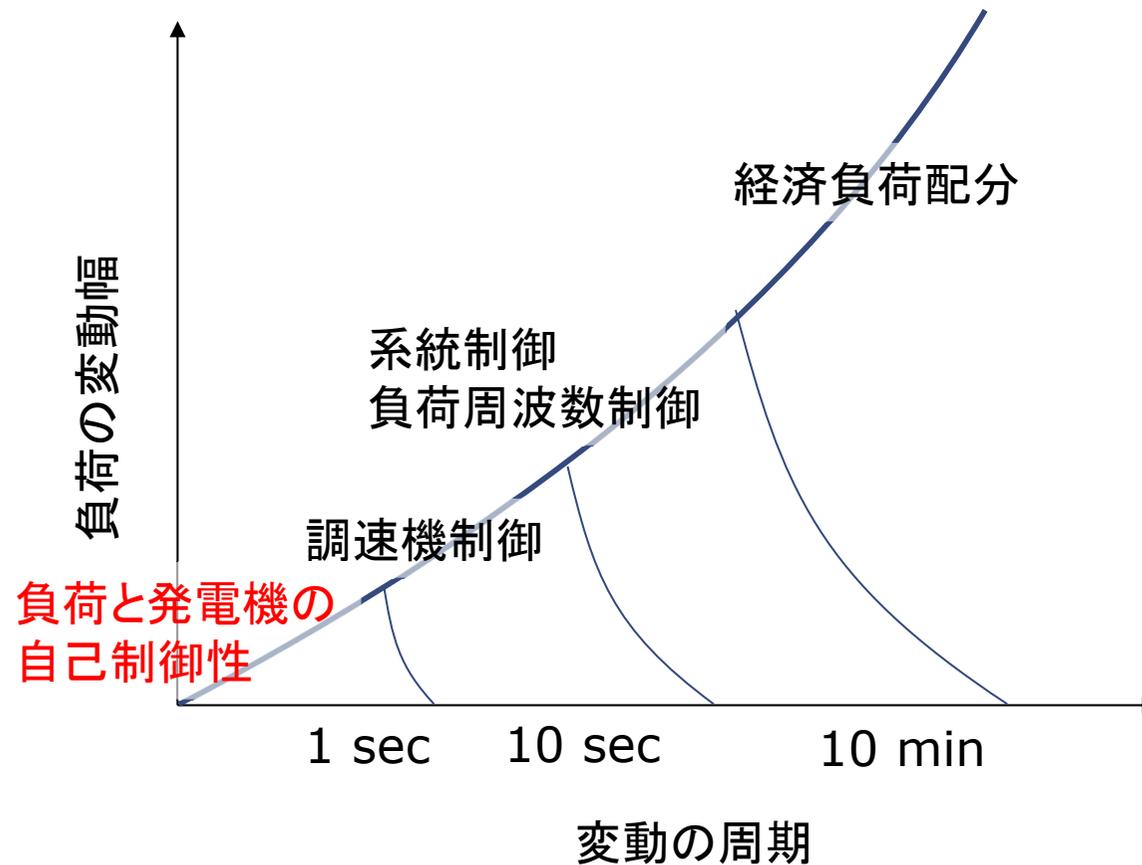
- 周波数で全系の需給バランスがわかる
- 安定した周波数は、製造設備の電動機の安定駆動に必須
- 時計としても機能
- 発電機の機械系にとっては、周波数変動は好ましくない

交流系統では周波数が重要な意味を持つ

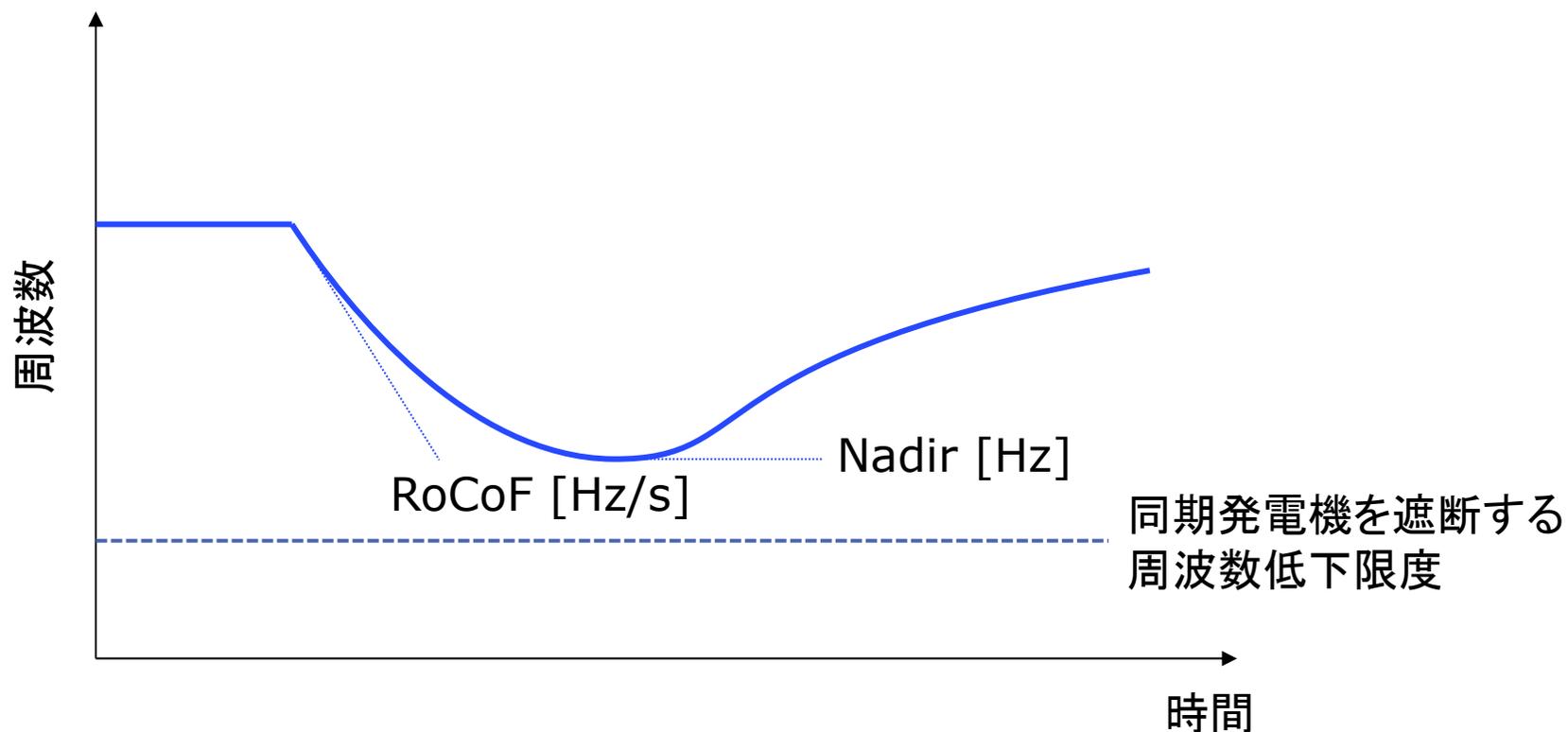
- 周波数で全系の需給バランスがわかる
- 安定した周波数は、製造設備の電動機の安定駆動に必須
- 時計としても機能
- 発電機の機械系にとっては、周波数変動は好ましくない

これらの理由から、電力系統の周波数は、その基準値から一定の範囲内にあるように制御されてきた。

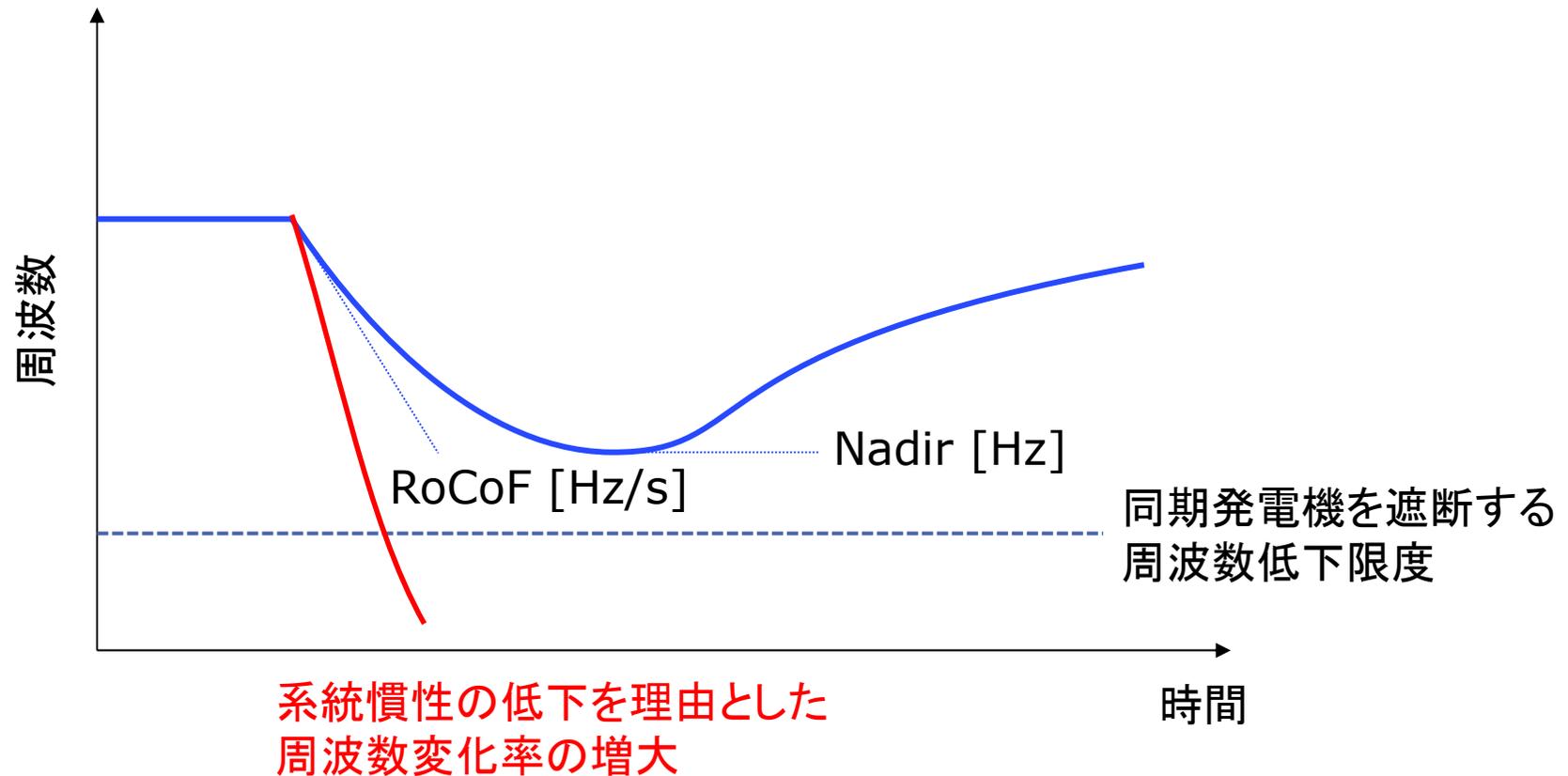
負荷変動に対する周波数制御の分担



周波数の時間変化の様相について



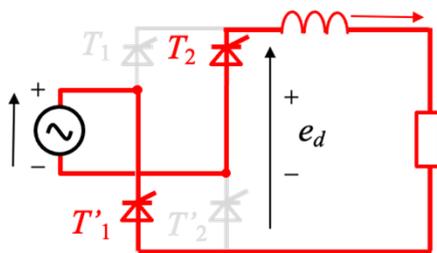
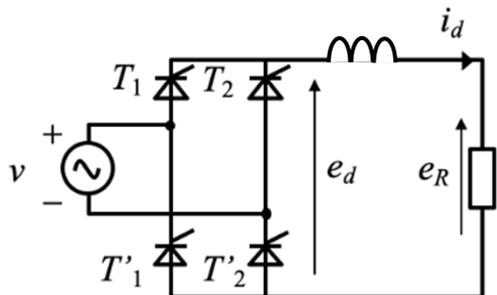
周波数の時間変化の様相について



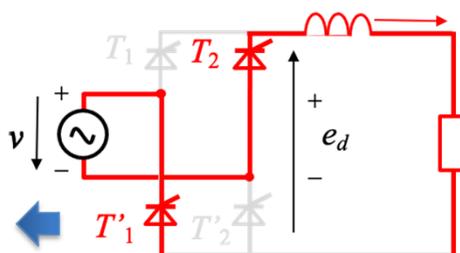
直流送電用電力変換器の特徴

- 他励直流送電方式
- 自励直流送電方式

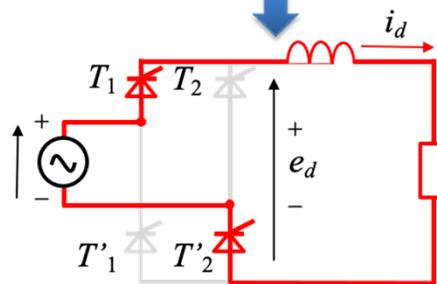
サイリスタ単相整流回路により交流から直流へ



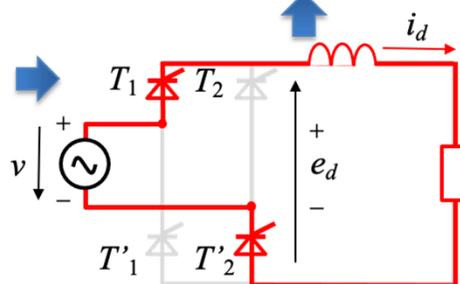
① $0 \leq \theta < \alpha$



④ $\pi + \alpha \leq \theta < 2\pi$

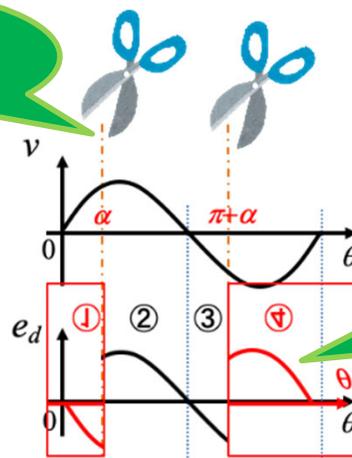


② $\alpha \leq \theta < \pi$



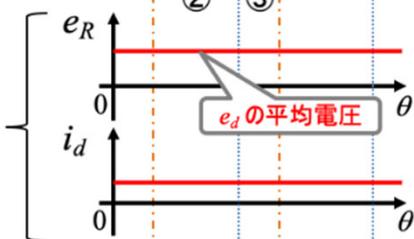
③ $\pi \leq \theta < \pi + \alpha$

点弧角で切って、

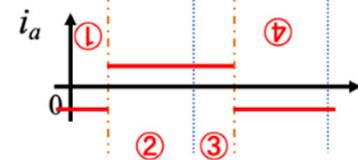


サイリスタの組み合わせの切り替わり点を境に、切り取って反転

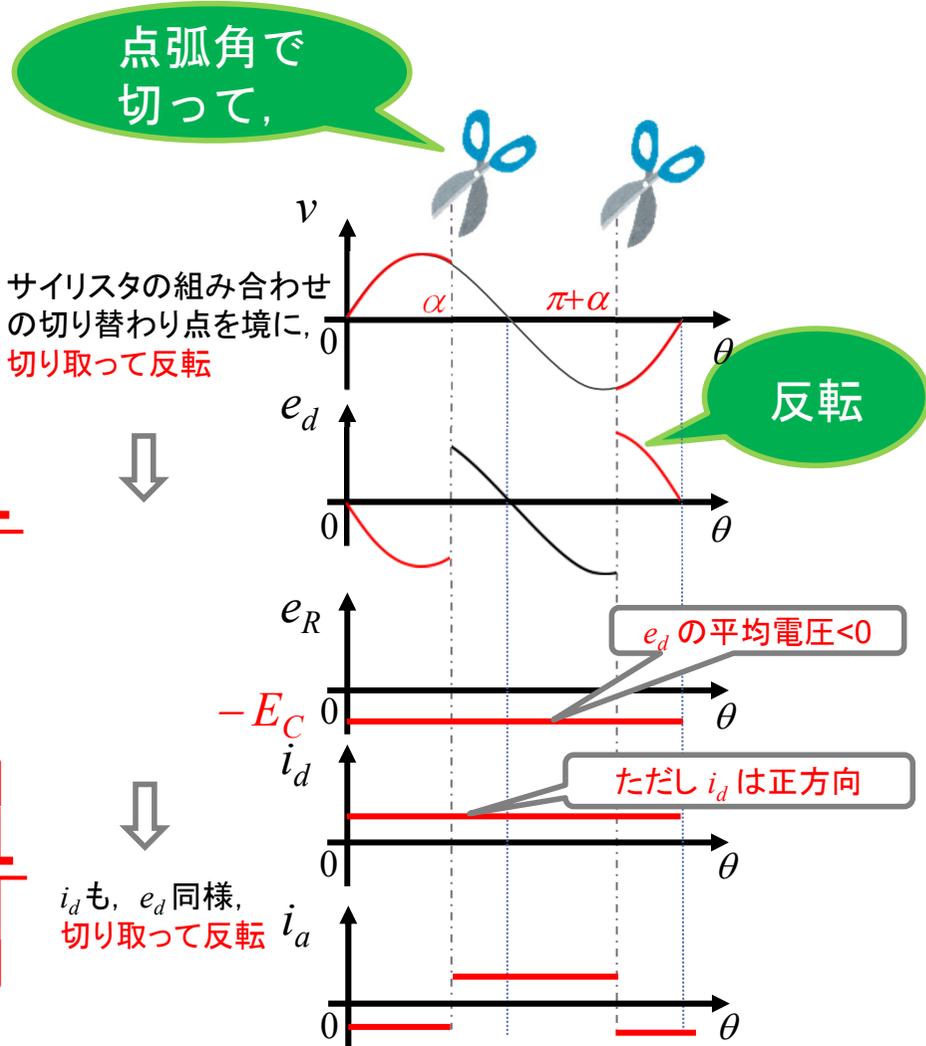
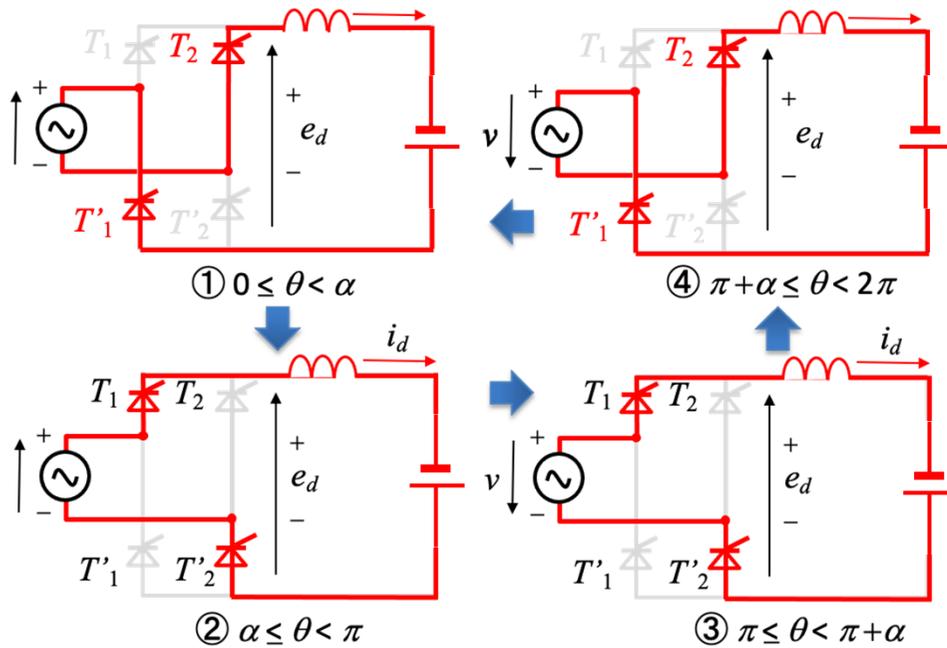
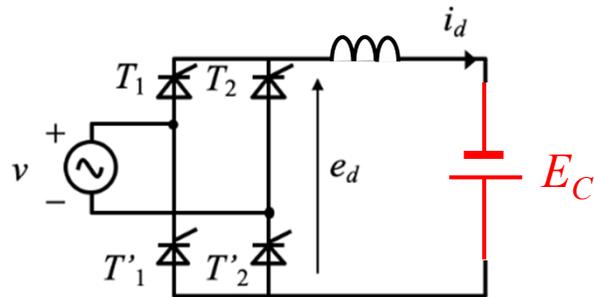
オームの法則



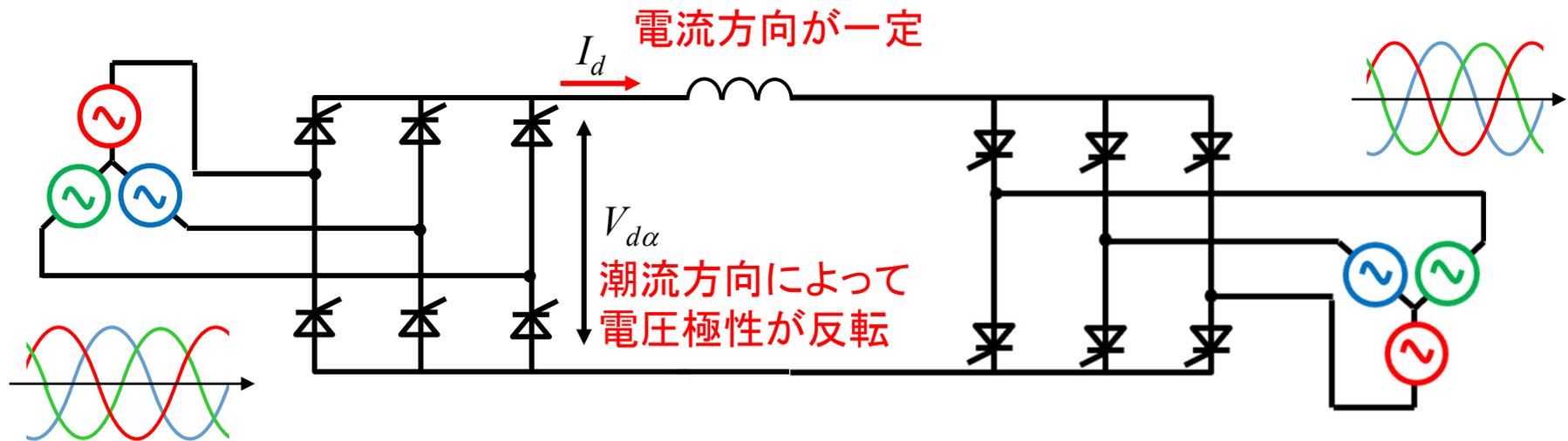
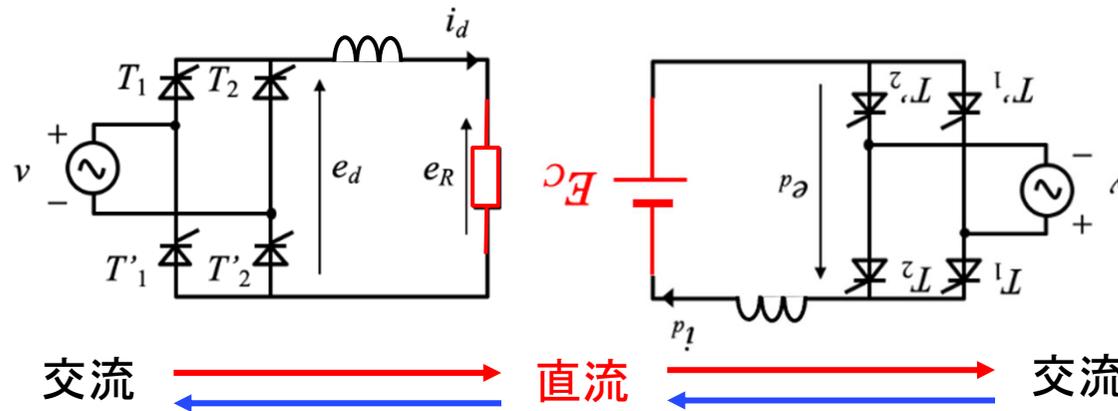
idも、ed同様、切り取って反転



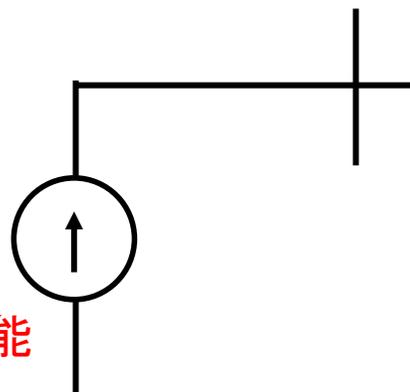
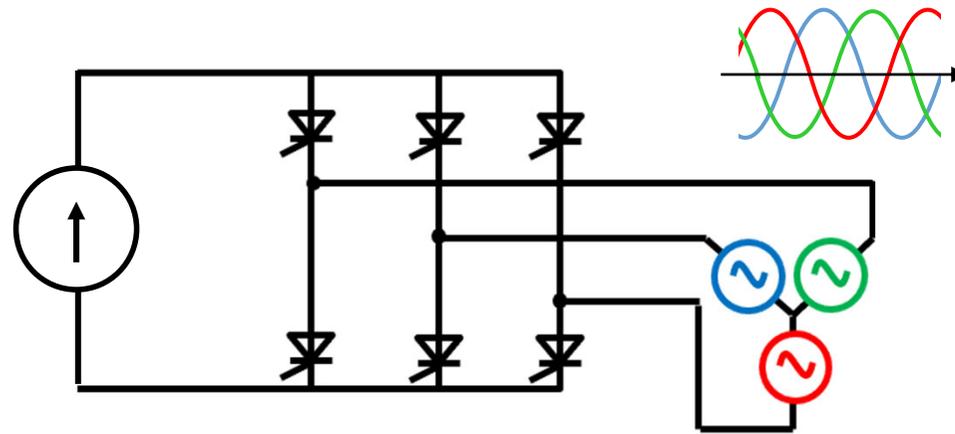
サイリスタ単相整流回路により直流から交流へ



他励交直変換器による直流送電



他励交直変換器による電力系統制御



電流源として機能

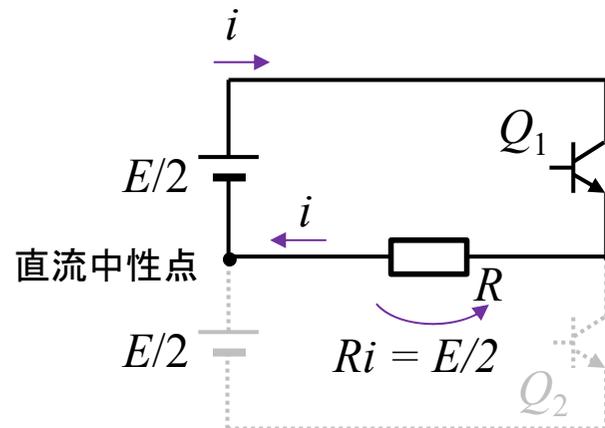
ただし、

- ・ 位相制御に伴って必ず遅れ無効電力を伴う
- ・ 高調波フィルタが必要

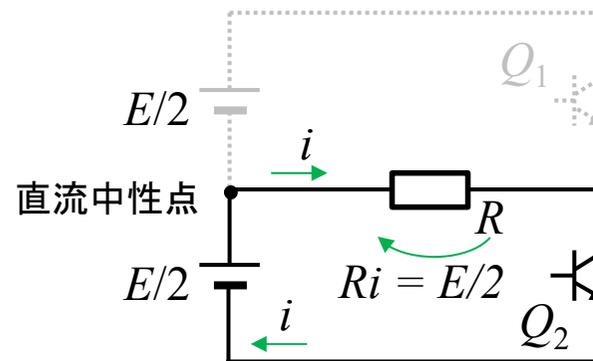
直流送電用電力変換器の特徴

- 他励直流送電方式
- 自励直流送電方式

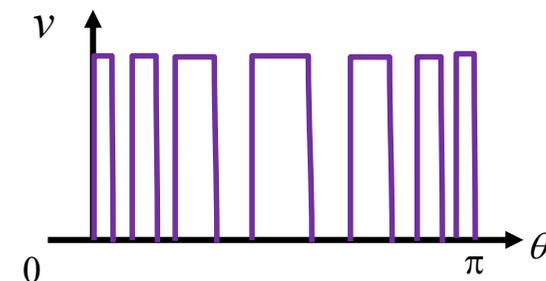
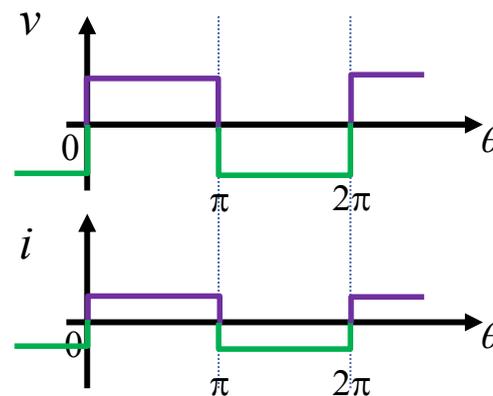
自励交直変換器の基本



モード1 (Q_1 :オン, Q_2 :オフ)

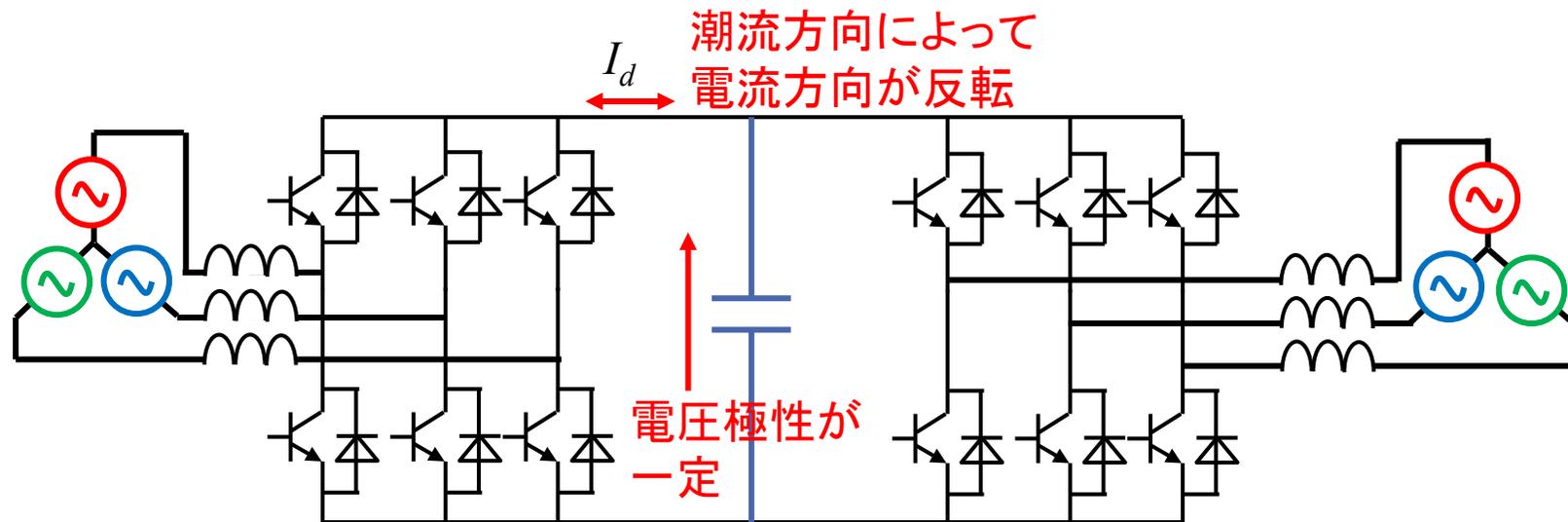
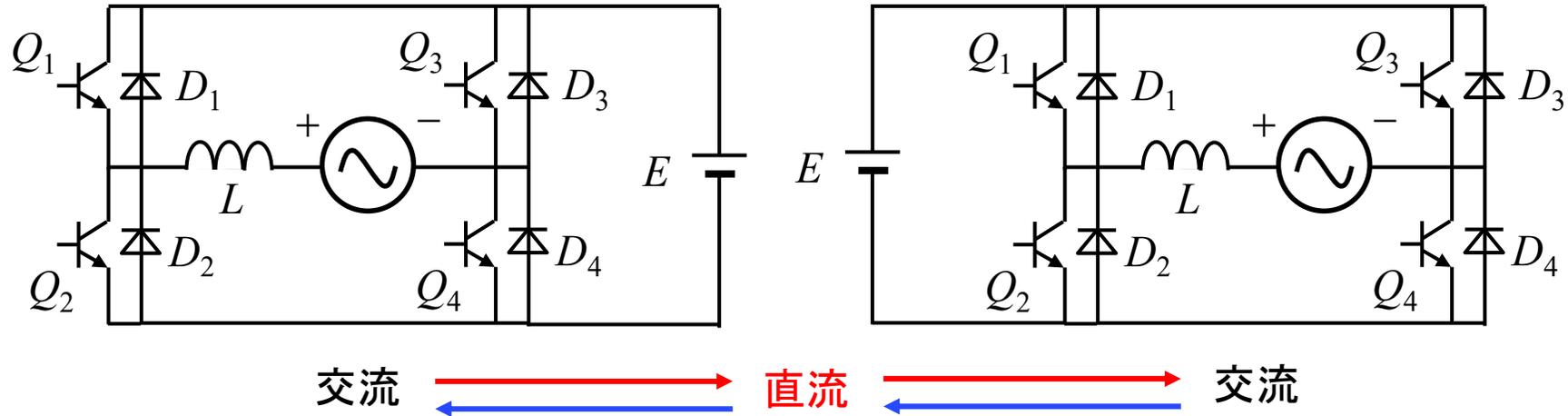


モード2 (Q_1 :オフ, Q_2 :オン)

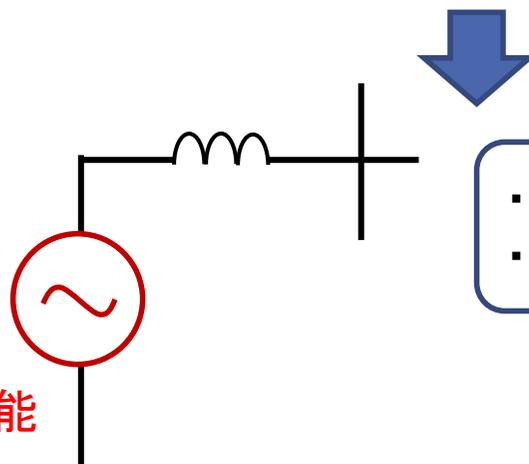
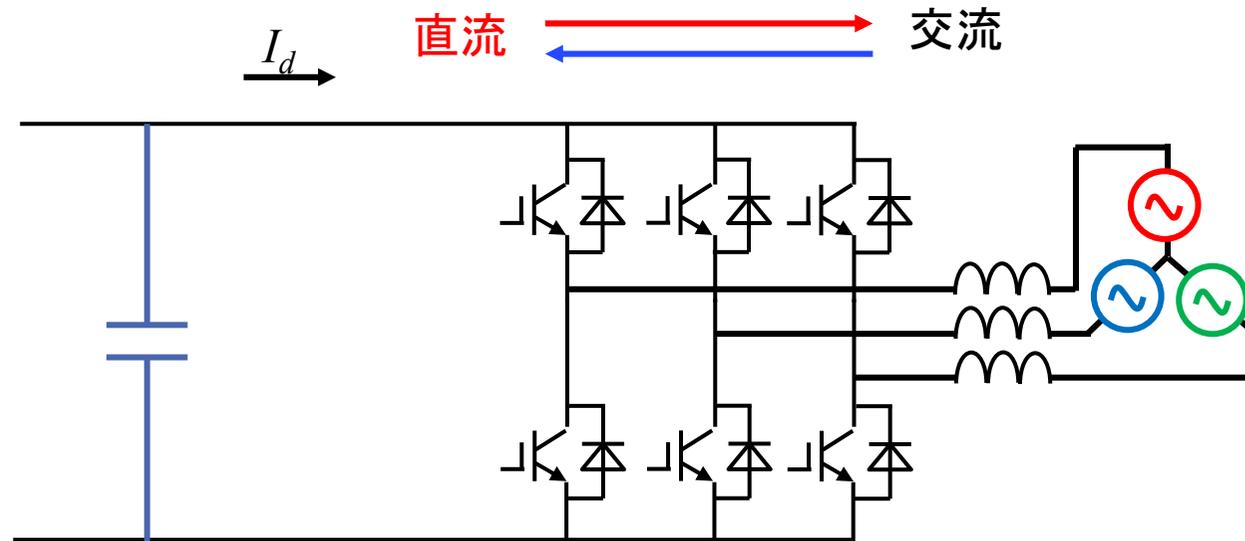


正弦波に近づくようにパルス幅制御 (PWM制御) することも可能

自励交直変換器による直流送電



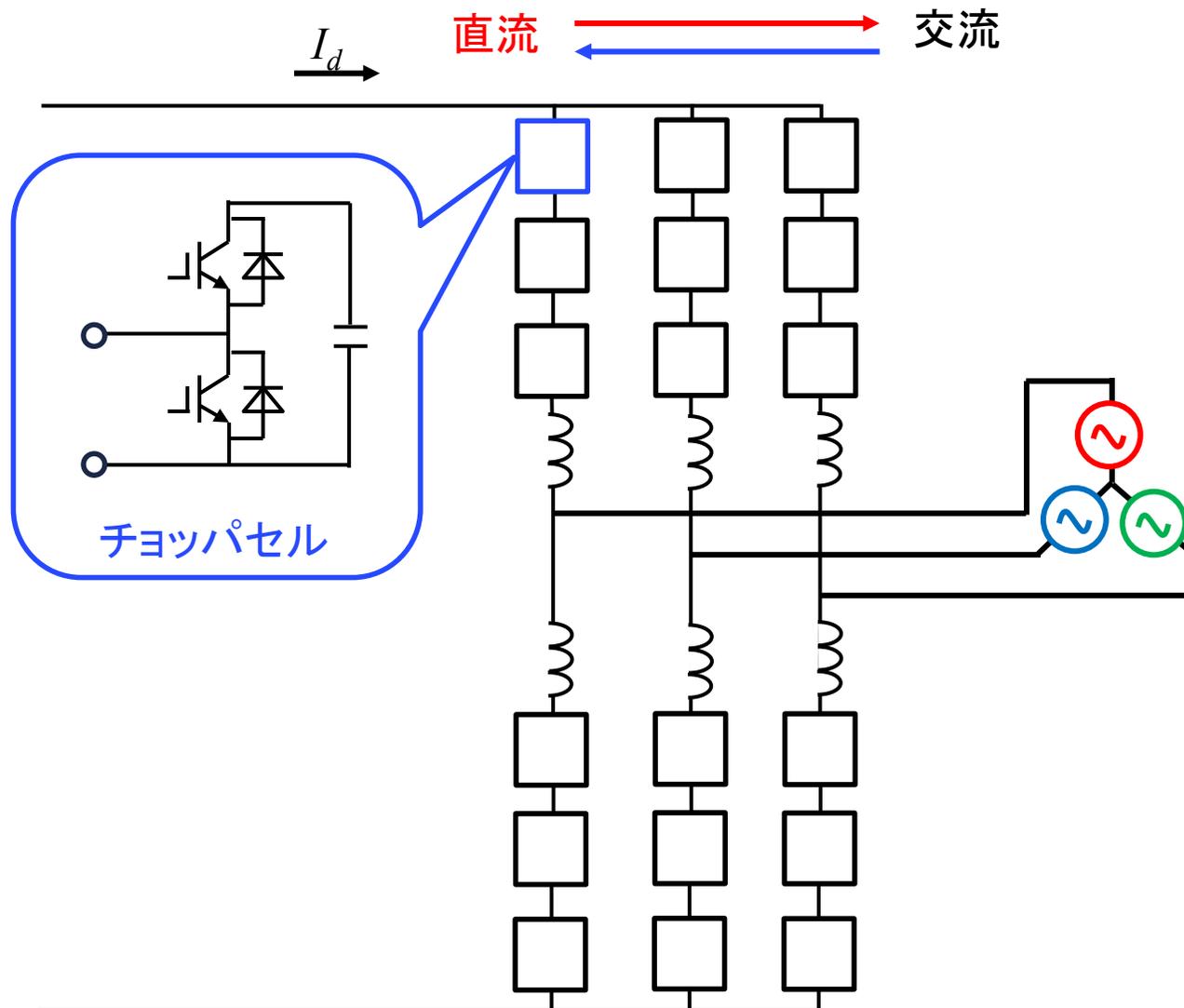
自励交直変換器による系統制御



電圧源として機能

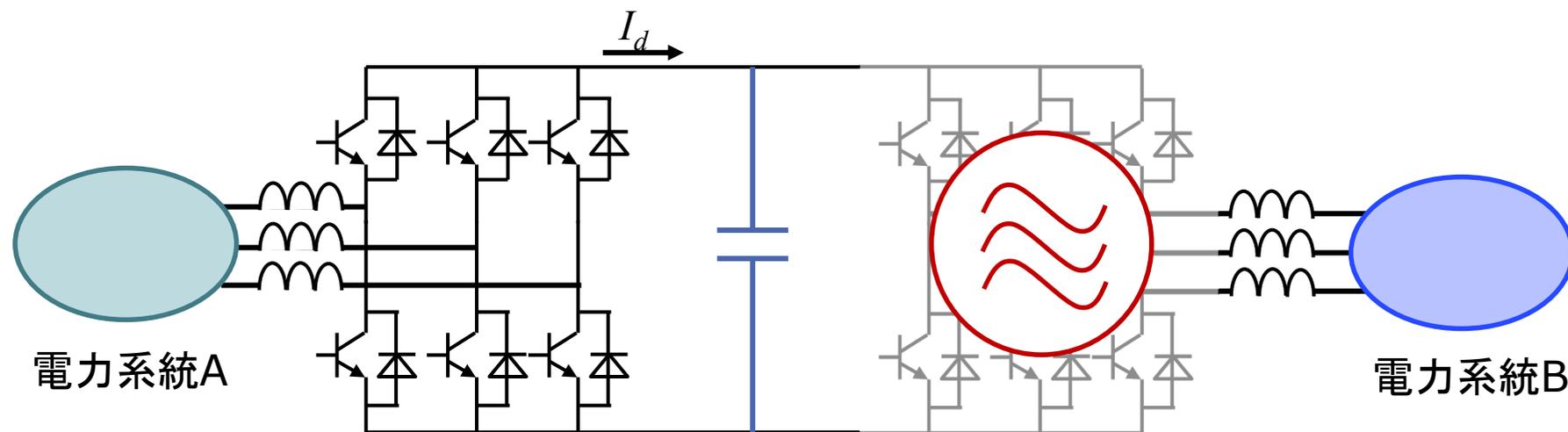
- ・ 無効電力を要さず、むしろ制御も可能
- ・ 変換器構成により高調波フィルタが不要

自励交直変換器の構成法

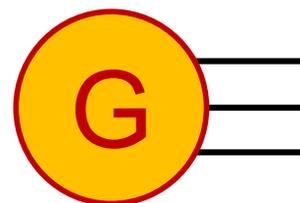


直流送電用自励変換器による系統制御の可能性

自励変換器の可能性

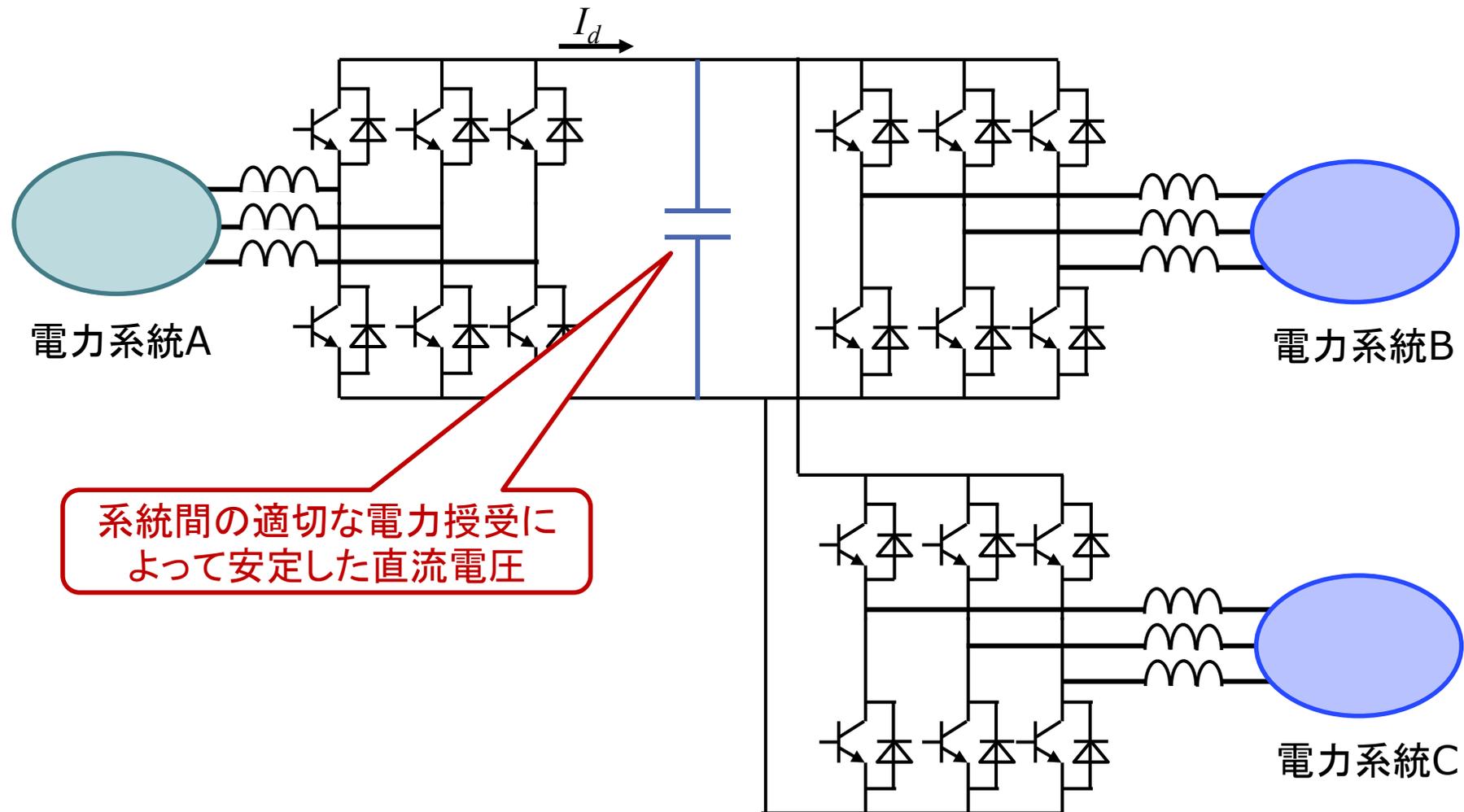


所望の三相電圧源に制御

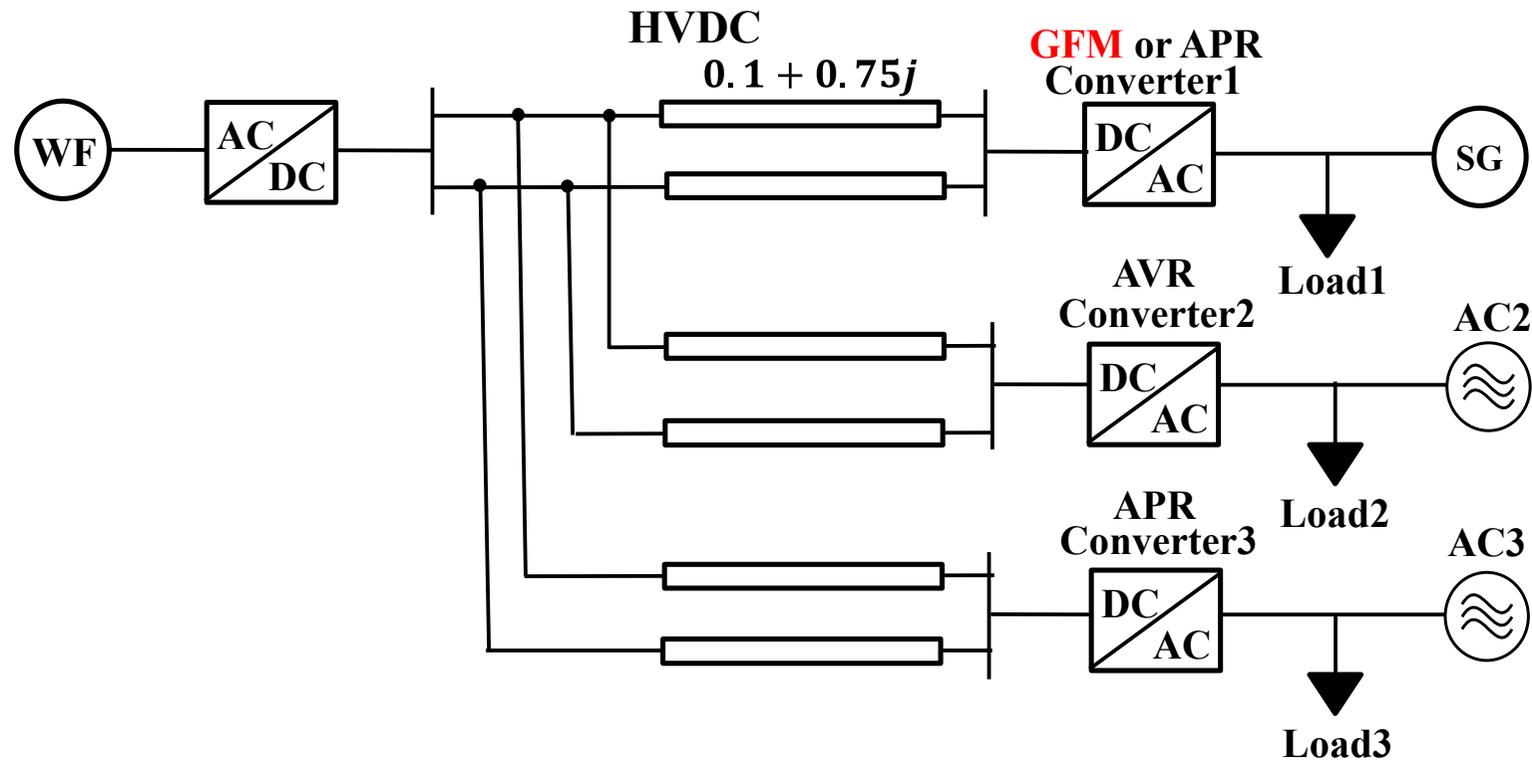


発電機のように振る舞わせる
ことも可能に(VSG)

多端子直流送電への期待



多端子直流送電に関する研究例



越澤仁，北條昌秀：「洋上風力発電を連系した多端子直流送電システムによる系統間の電力融通動作の基礎検討」，令和5年電気学会電力・エネルギー部門大会

シミュレーション結果

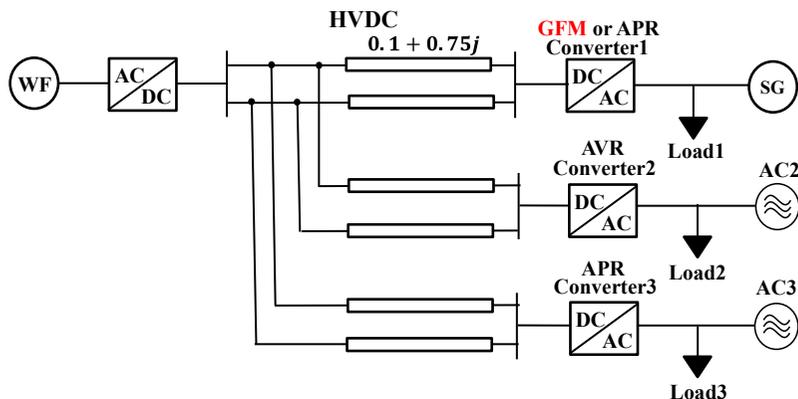
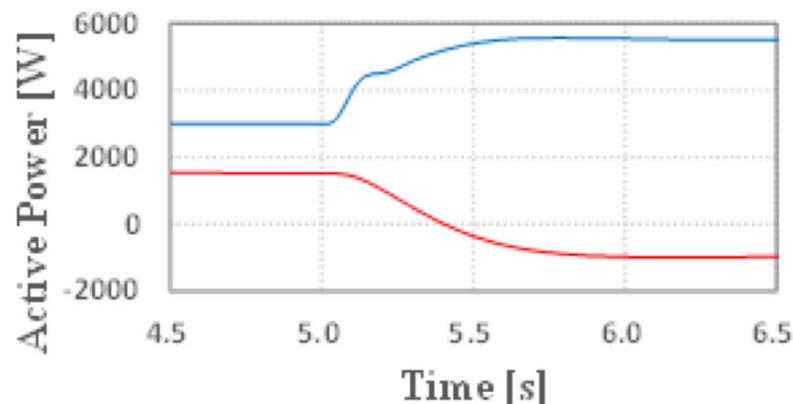


図16-1 シミュレーションに使用した定数

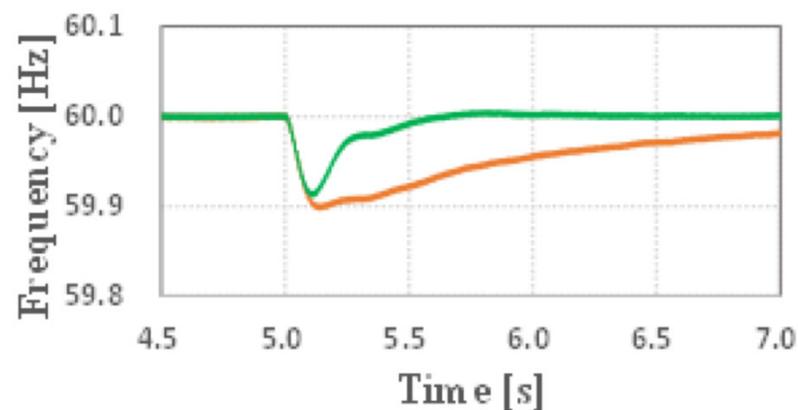
表16-1 シミュレーションに使用した定数

DC voltage	400V
AC voltage (line to line)	200V
DC line inductance	2mH
DC line resistance	0.1Ω
Filter capacitor	8.8μF
Filter inductance	2mH
AC line inductance	2mH
Back inductance	2mH
Operating frequency	60Hz
Switching frequency	3.6kHz
Load	3.01Ω, 2.62mH



— Converter 1 — Converter 2

図16-2 変換器の有効電力出力



— K = 0 — K = 1

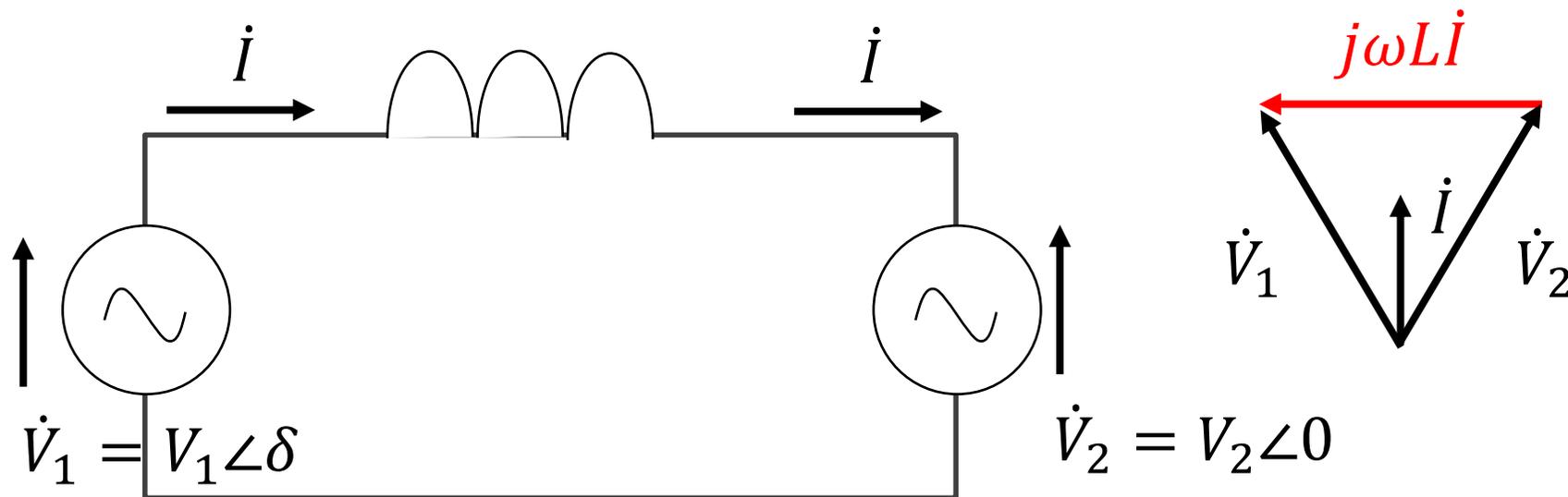
図16-3 同期発電機 (SG) で模擬した電力システムの周波数

電力系統の安定化制御について

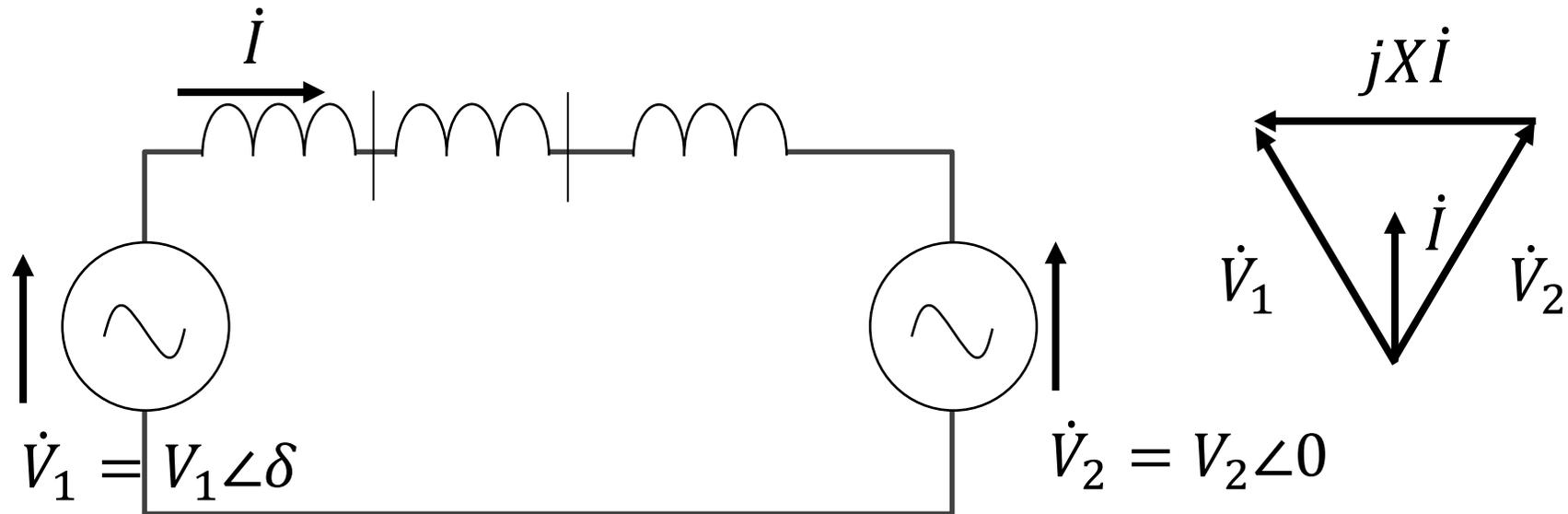
電力潮流

- 交流電気回路では，位相の進んでいる方から遅れている方へ電気エネルギーが送られる（有効電力が流れる）。

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$



一機無限大母線系統モデル



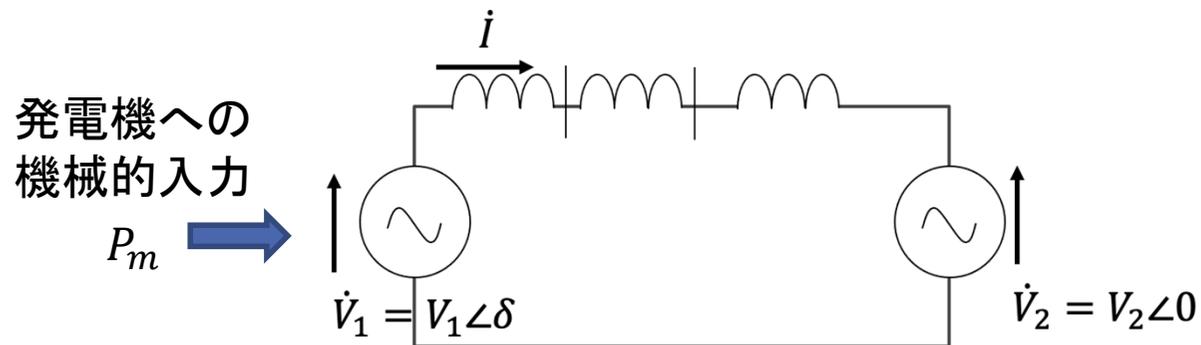
同期発電機

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

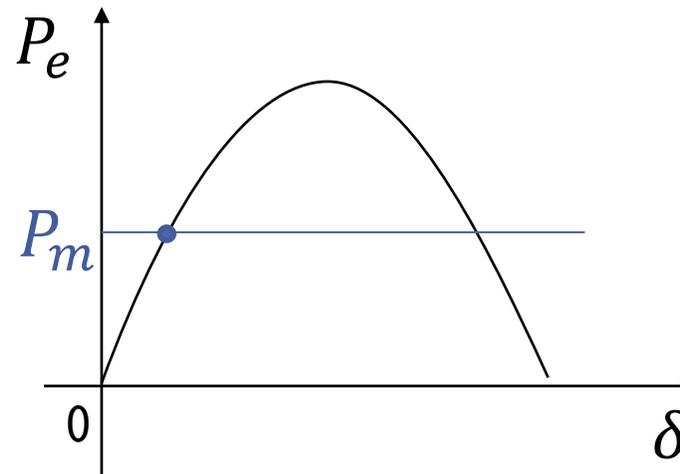
無限大母線

振幅も周波数も変化しない
理想電源

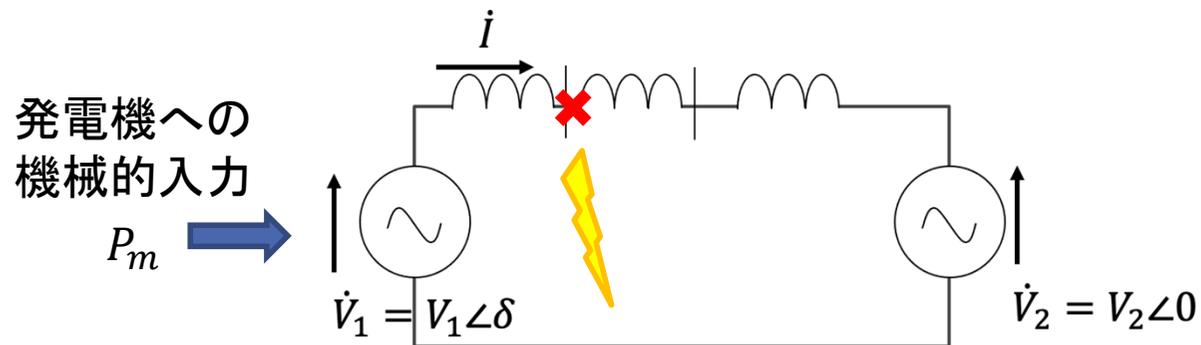
一機無限大母線系統（平常時）



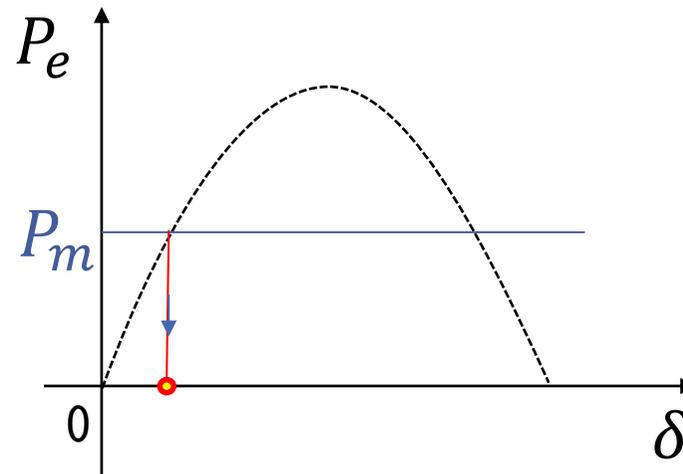
発電機出力 $P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$



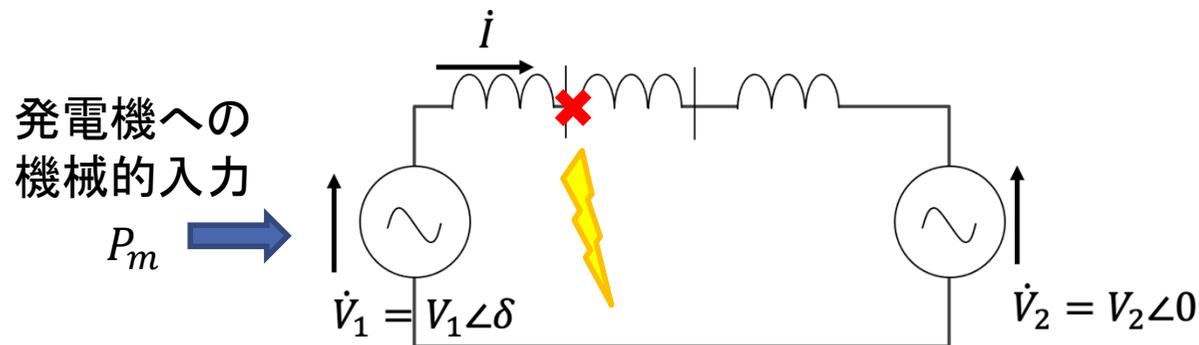
一機無限大母線系統 (短絡故障発生)



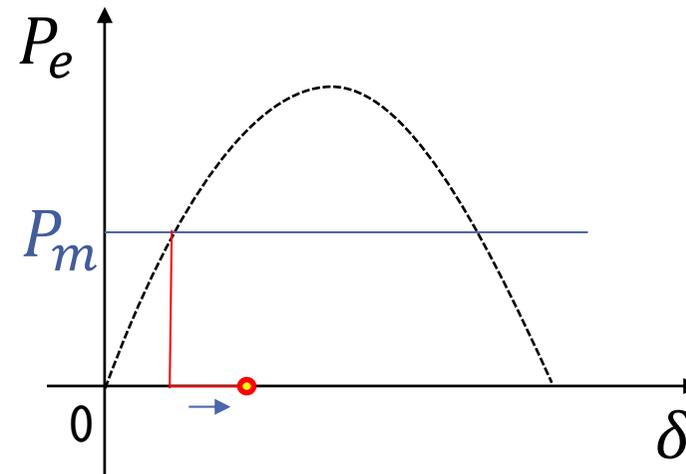
発電機出力 $P_e = 0$



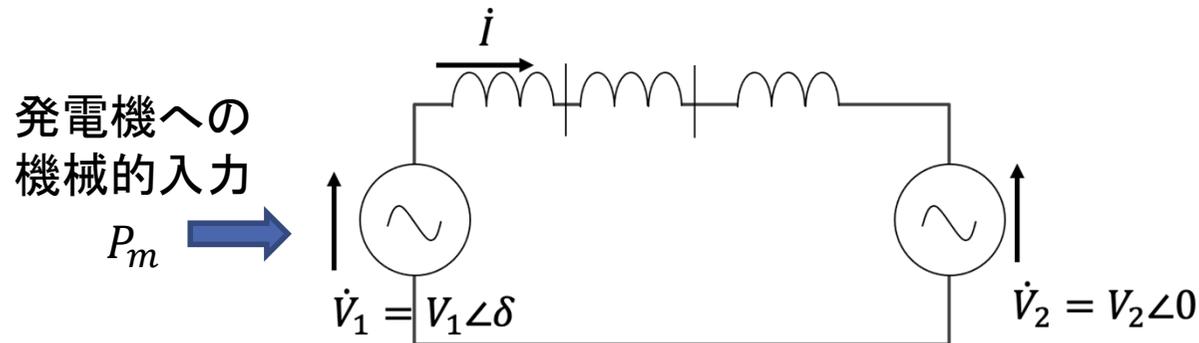
一機無限大母線系統（短絡故障継続中：発電機加速）



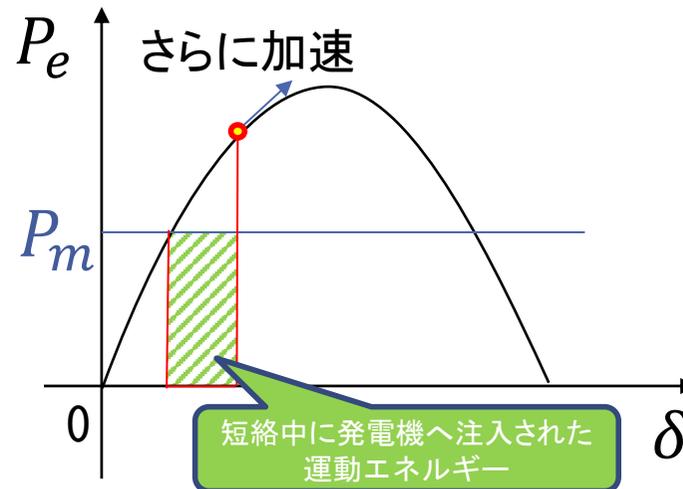
発電機出力 $P_e = 0$



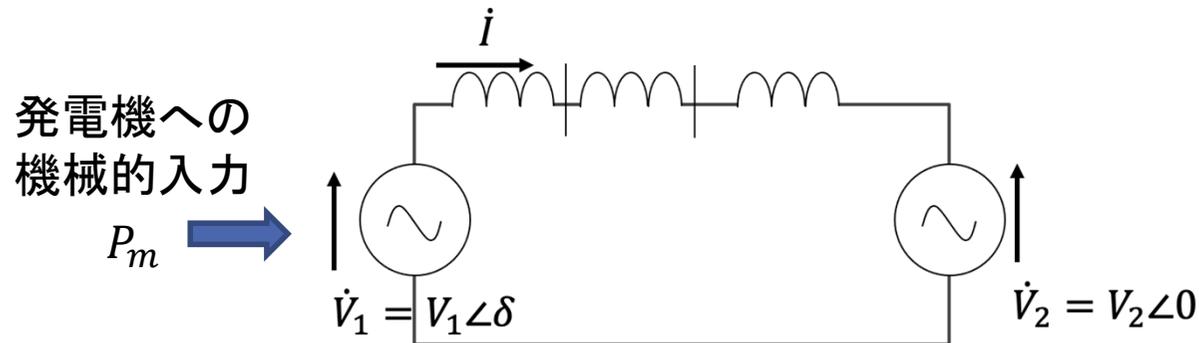
一機無限大母線系統（短絡故障除去＝復旧）



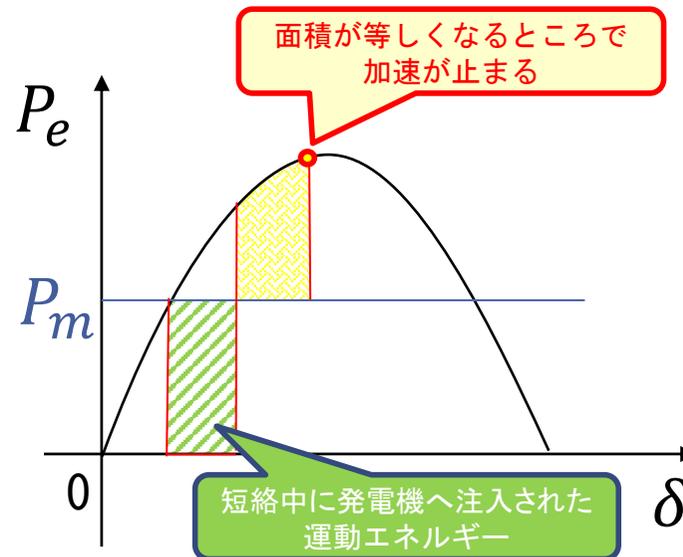
発電機出力 $P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$



一機無限大母線系統（短絡故障除去＝復旧）

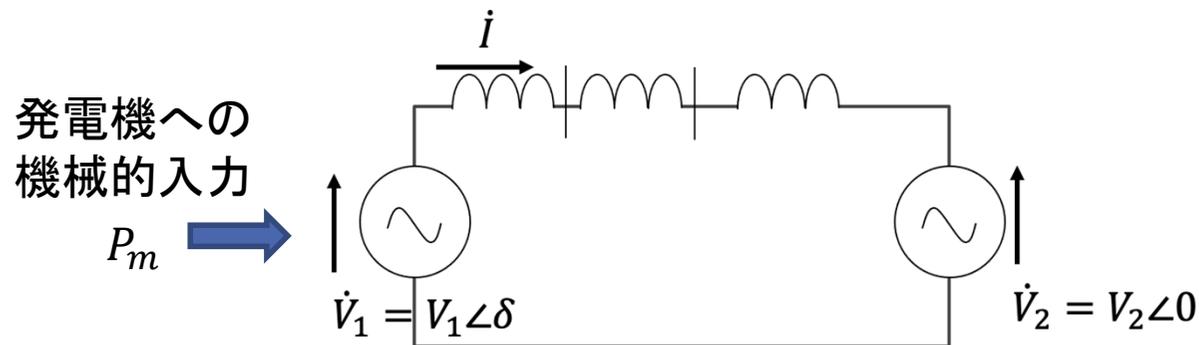


$$\text{発電機出力 } P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

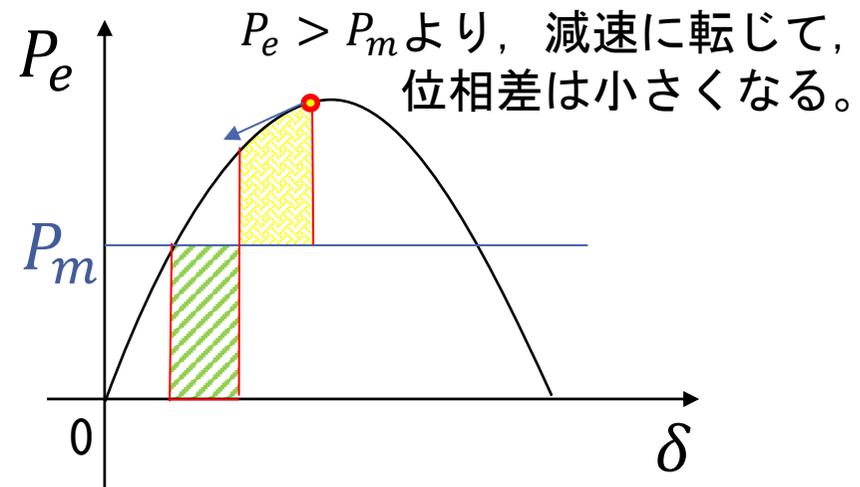


等面積法

一機無限大母線系統（短絡故障除去＝復旧）

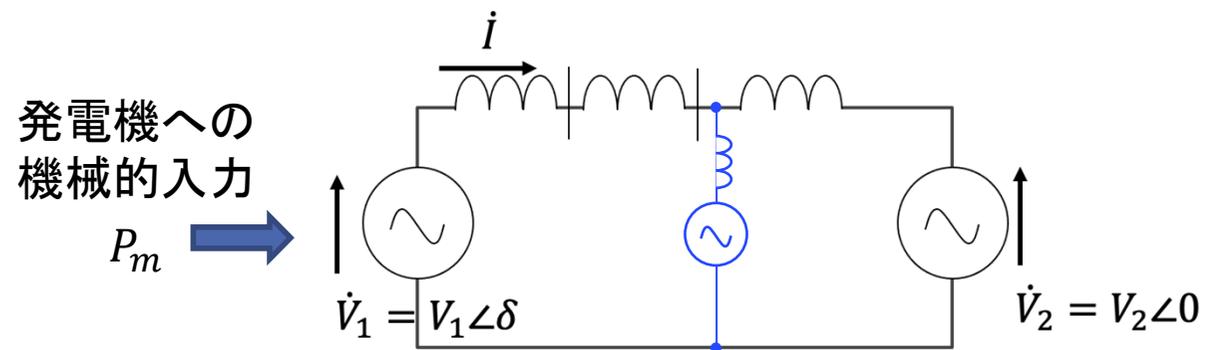


発電機出力 $P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$

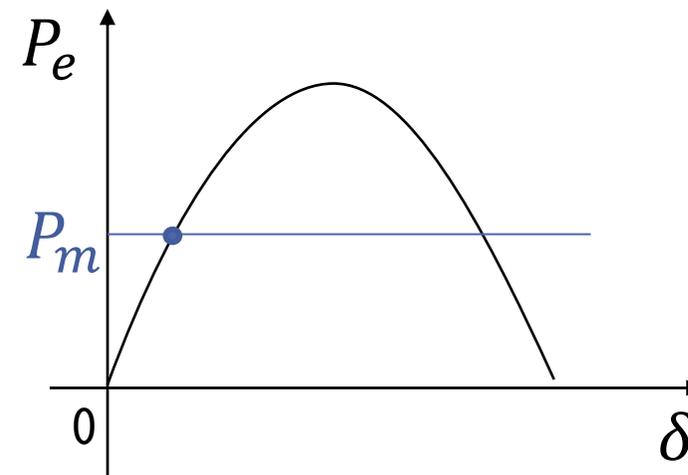


等面積法

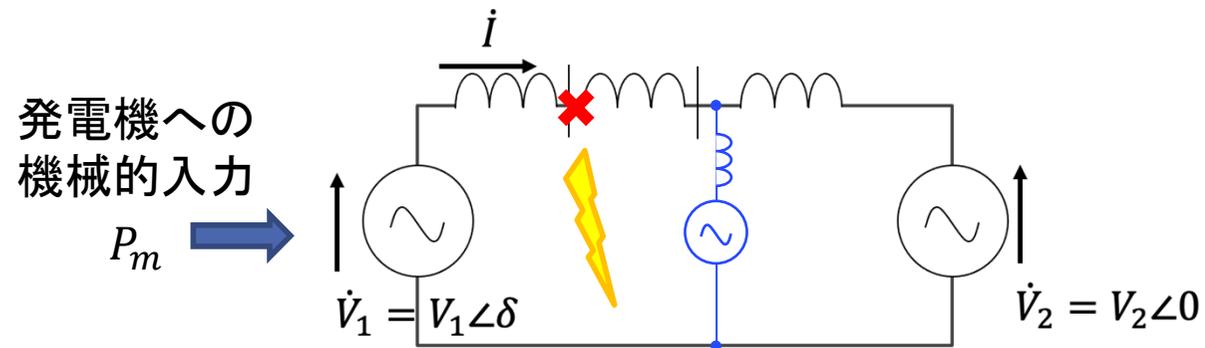
【変換器付】 一機無限大母線系統（平常時）



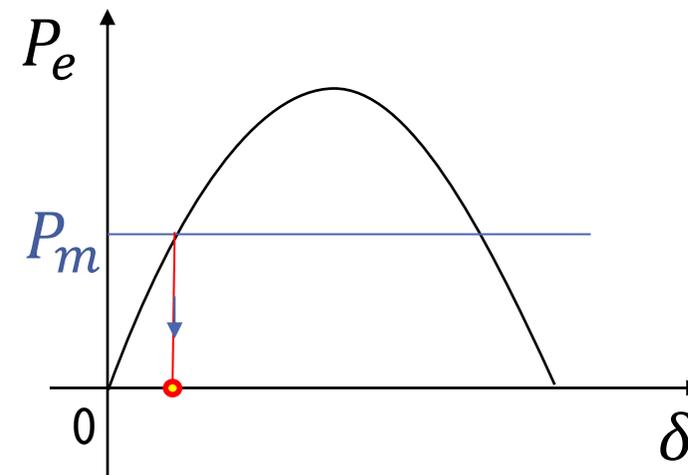
発電機出力 $P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$



【変換器付】 一機無限大母線系統（短絡故障発生）

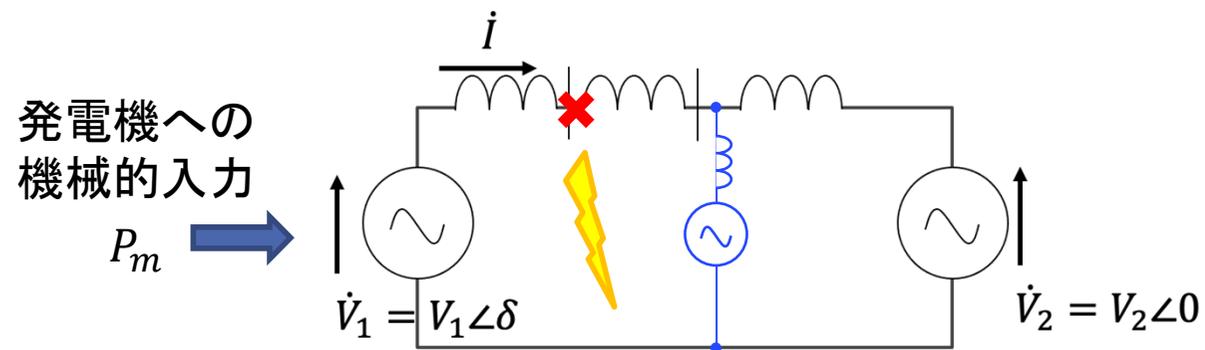


発電機出力 $P_e = 0$

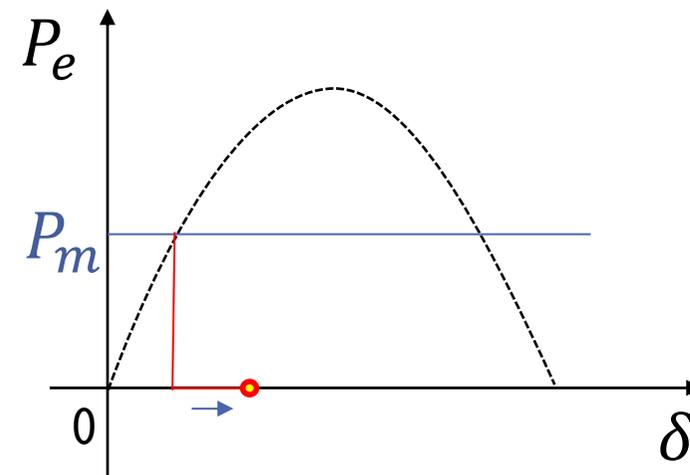


【変換器付】

一機無限大母線系統（短絡故障継続中：発電機加速）

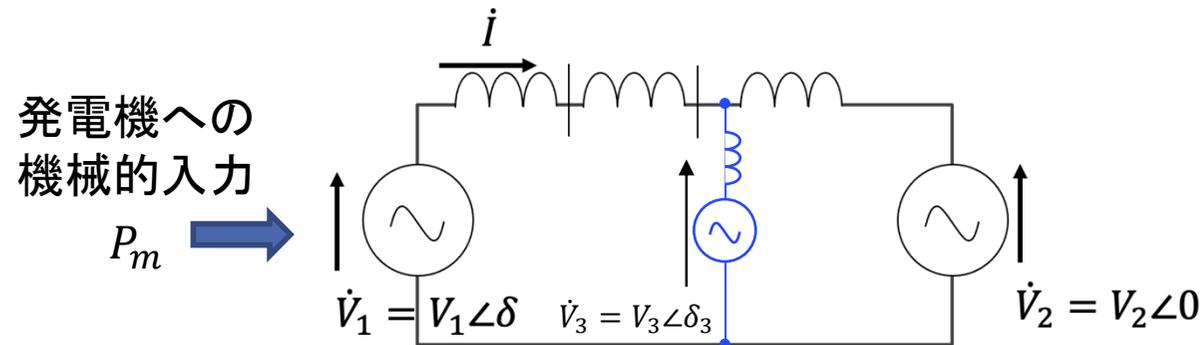


発電機出力 $P_e = 0$

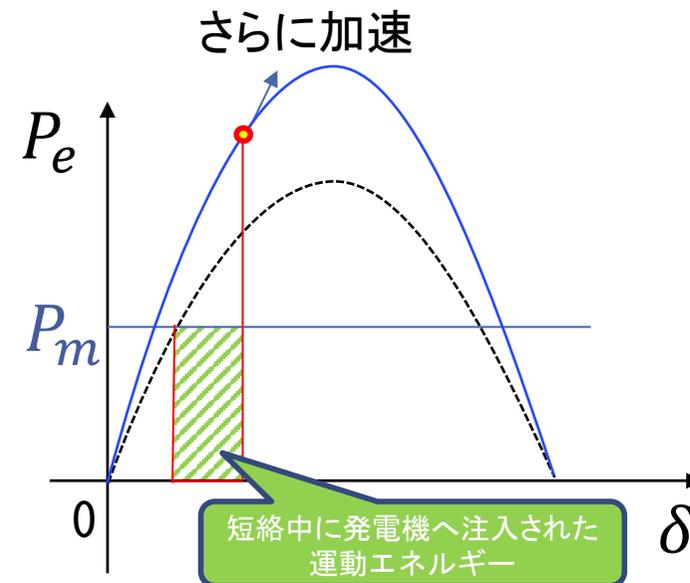


【変換器付】

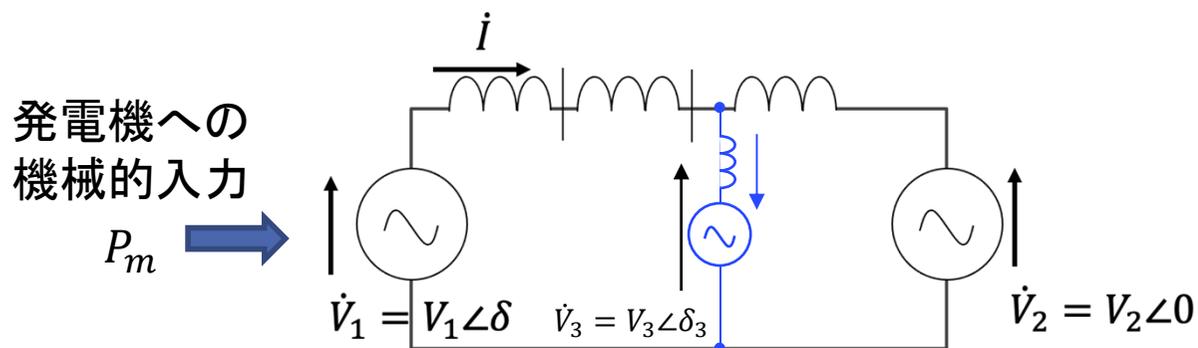
一機無限大母線系統（短絡故障除去＝復旧）



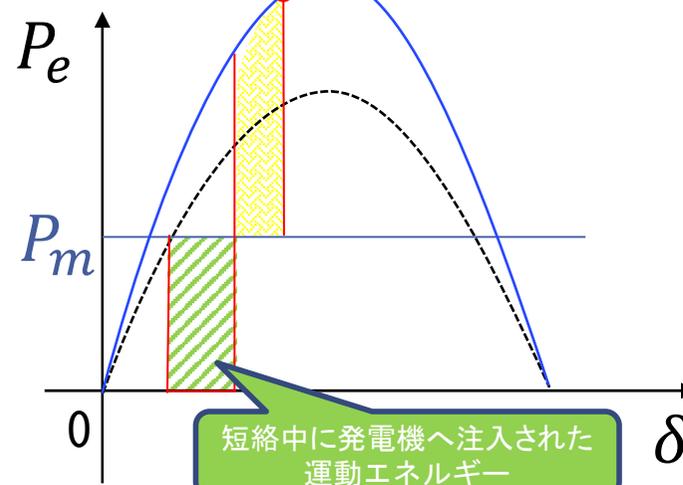
$$\text{発電機出力 } P_e = \frac{V_1 V_3}{X'} \sin \delta'$$



【変換器付】 一機無限大母線系統（短絡故障除去＝復旧）



発電機出力 $P_e = \frac{V_1 V_3}{X'} \sin \delta'$



まとめ

- 交流電力系統における周波数制御の重要性と、制御分担について解説
 - 系統慣性の低下に伴う周波数変動の様相変化には注意が必要
- 多端子直流送電用自励交直変換器について、（直流送電からのエネルギー供給による）安定な背後電圧を活用した柔軟な系統制御の可能性
 - 慣性低下に対して高速な周波数制御や系統安定化制御の可能性
- 今日の電気エネルギーの安定供給を堅持しつつも、再生可能エネルギーのさらなる活用を実現するために

参考文献

- 関根泰次・林宗明・芹澤康夫・豊田淳一・長谷川淳:「電力系統工学」、コロナ社、1979年
- 加藤政一:「詳解電力系統工学」、東京電機大学出版局、2017年
- 横山明彦:「先端電力システム工学」、数理工学社、2022年
など

直流送電や、大容量パワーエレクトロニクス機器を用いた
系統制御に興味を感じて頂けたなら幸いです。