

系統連系インバータの種類と VSGインバータ

2025年6月23日
長岡技術科学大学
三浦友史

1. 再生可能エネルギーの大量導入の課題
2. 系統連系インバータの分類
3. なぜ今、慣性が供給できるグリッドフォーミングインバータ（GFM）が必要か
4. 仮想同期発電機制御の動揺方程式と制御
5. VSG制御インバータの実際と課題，応用

1. 再生可能エネルギーの大量導入による課題

- 2050年カーボンニュートラル
- 2030年総発電量に占める再エネの比率を36～38%
- 分散電源の割合が増加➡インバータ連系電源（非同期電源）の増加



新たな問題発生（慣性不足，保護協調，通信など）



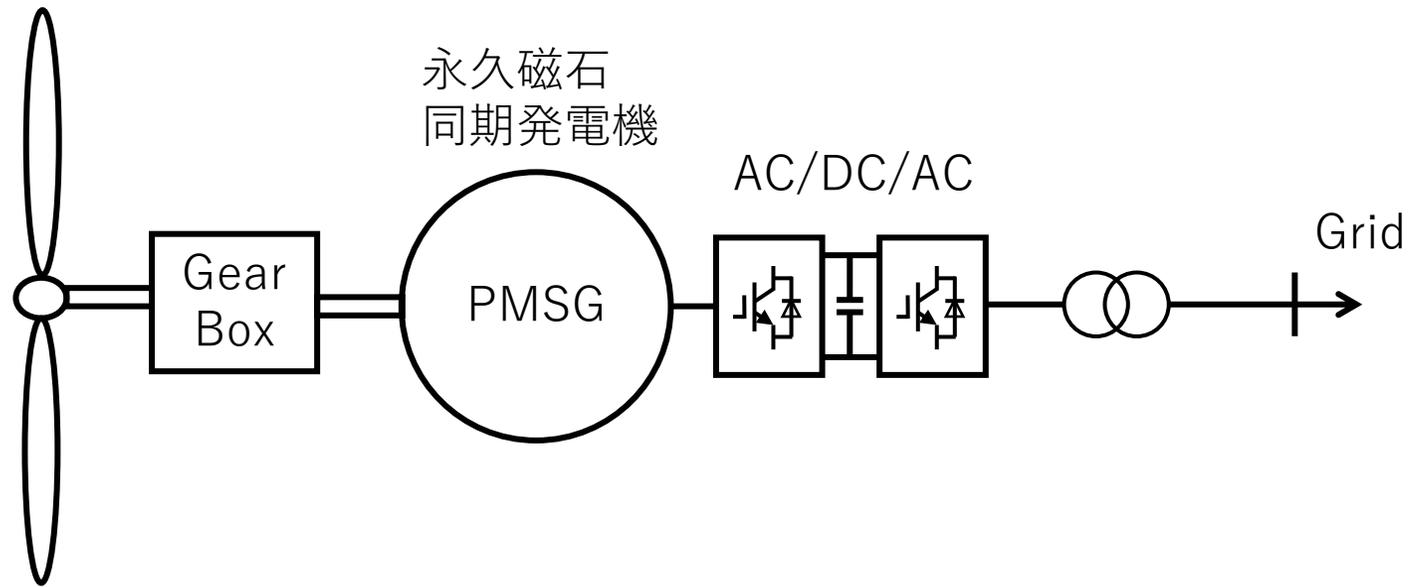
系統連系インバータの機能が求められている

例：NEDO「再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代電力ネットワーク安定化技術開発」

- **太陽光発電**：最大電力点追従(MPPT)制御，定電圧制御，有効電力・無効電力制御，事故時運転継続 (FRT)
- **風力発電**：MPPT制御，ソフトスタート，FRT
- **燃料電池**：有効電力制御・出力電流のリプル低減
- **蓄電池**：充電・放電制御，高効率

電力系統に連系する場合，「**系統に優しい**」ことが求められる

- Type 4 Wind Turbine (Full converter): 変換器容量が発電容量100%



- 分散電源の発電電力を系統に出力
 - ✓有効電力・無効電力制御
 - ✓低高調波出力
 - ✓出力抑制
 - ✓電圧サポート (101+/-6V, 202+/-20V)
 - ✓周波数サポート (+/-0.2Hz, +/-0.3Hz, +/-0.5Hzなど)
 - ✓安定性 (複数台運転, 種々な電源との並列運転)
- 事故時の対応
 - ✓過電流抑制
 - ✓単独運転検出
 - ✓事故時運転継続機能 (Fault Ride Through, FRT)

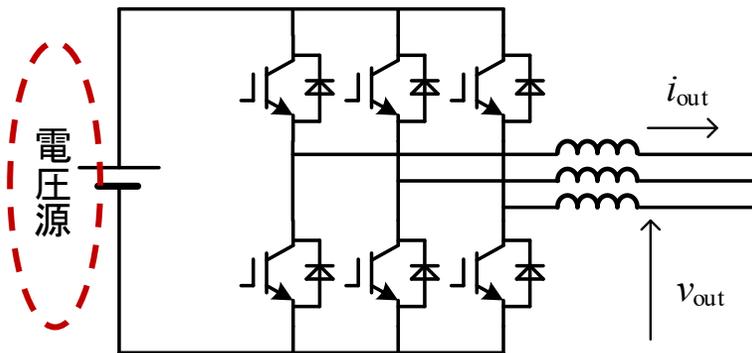
機能によって分類

※将来の電力系統では通信を用いた, より高度な機能が要求される

2. 系統連系インバータの分類

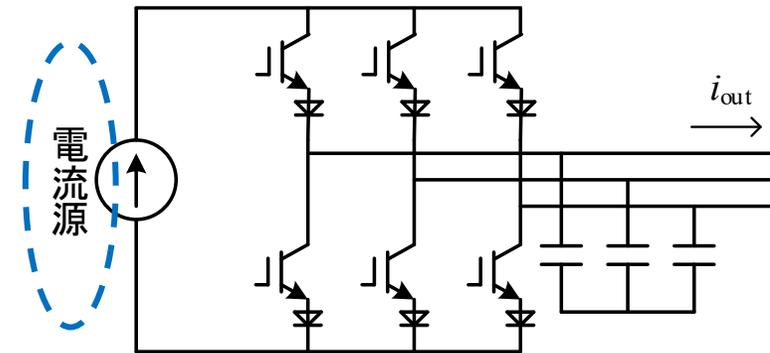
電圧（源）形インバータ (Voltage-Source Inverter, VSI)

- 直流側が**等価電圧源**（**直流電圧源 or キャパシタ**）
- リアクトルで系統連系
- PCSなどで多く採用



電流（源）形インバータ (Current-Source Inverter, CSI)

- 直流側が**等価電流源**（**直流電流源 or 直流リアクトル**）
- キャパシタで系統連系



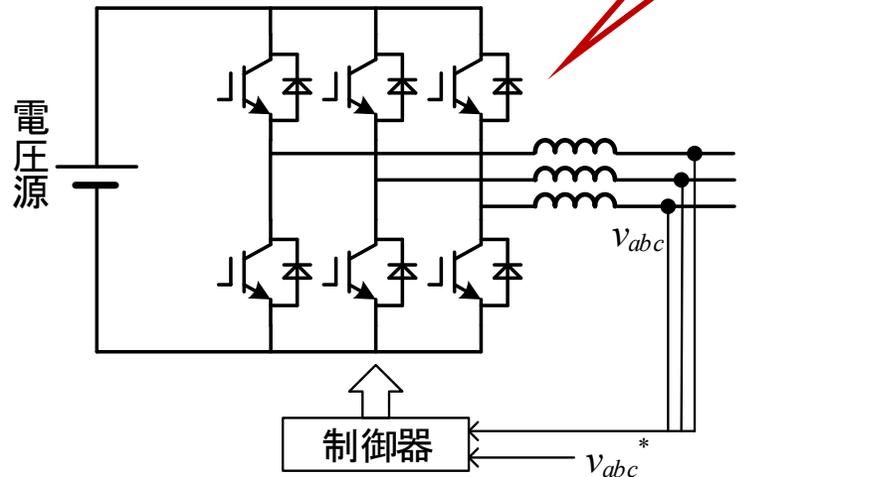
電圧形インバータ (VSI)

電圧制御型インバータ

- 出力電圧を制御

→ **電圧源**として機能

- 電圧を確立可能
- GFMとして注目

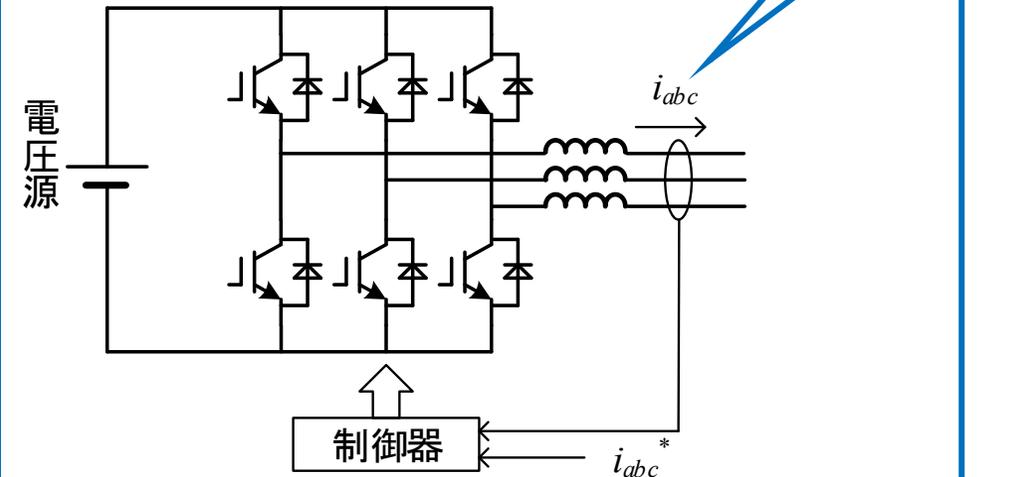


電流制御型インバータ

- 出力電流を制御 (電力制御)

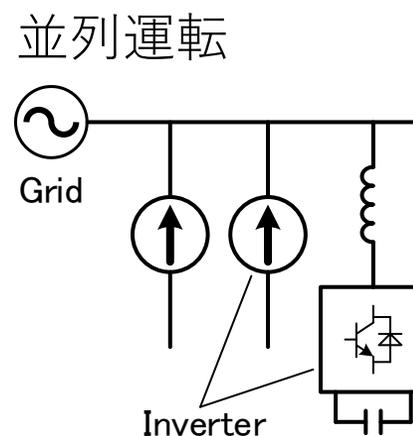
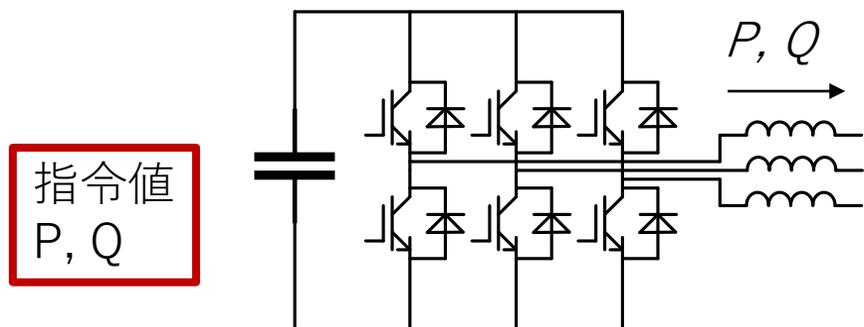
→ **電流源**として機能

- 分散電源のPCSに多く採用
- 電圧が確立していることが前提



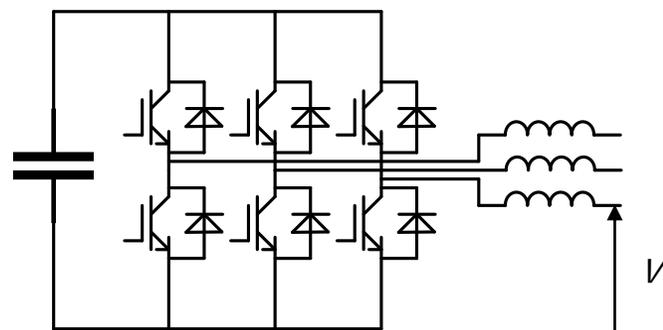
※ 電流形インバータも同様な分類が可能

- 電流源（定電力源）として機能
- 高速な電流制御（電力制御） → 分散電源のPCSに使用
- 並列運転が容易
- 電流制御型の場合，系統電圧が確立している必要がある → 停電時，自立運転が困難
- 基本的に系統電圧の位相情報が必要（PLLによる位相検出）

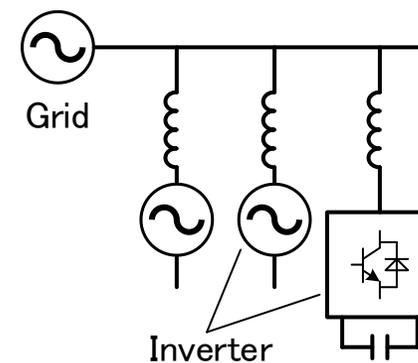


- 電圧源として機能
- 電圧制御型の場合，自立運転が可能
- 並列運転が難しい
- 瞬低時に過電流

指令値
 V , f , 位相



並列運転



GFM (Grid-Forming Inverter)

- 電圧制御型
- 自立運転して系統を構成できる(電圧と周波数を自分で決めることができる)
- PLLは不要
- Droop特性などで並列運転 (自律運転)

➡ 近年注目されている

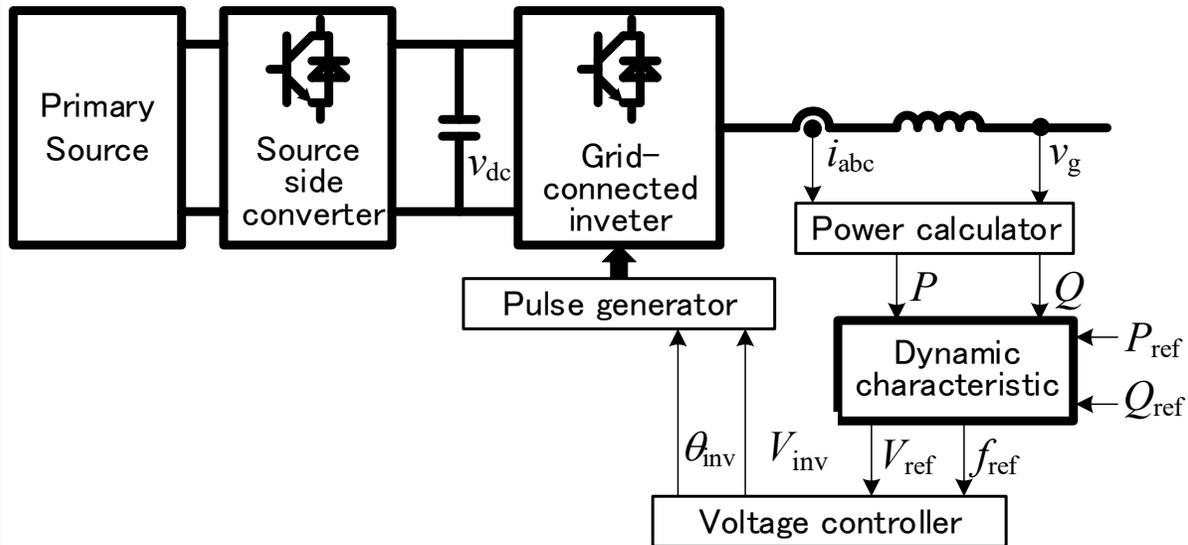
GFL (Grid-Following Inverter)

- 電流制御型
- 一般の分散電源のPCSに採用
- 並列運転が容易
- 系統に同期して運転されるため (PLL必要), 連系する系統電圧の周波数と電圧が確立している必要がある
- 自立運転して系統を構成できない

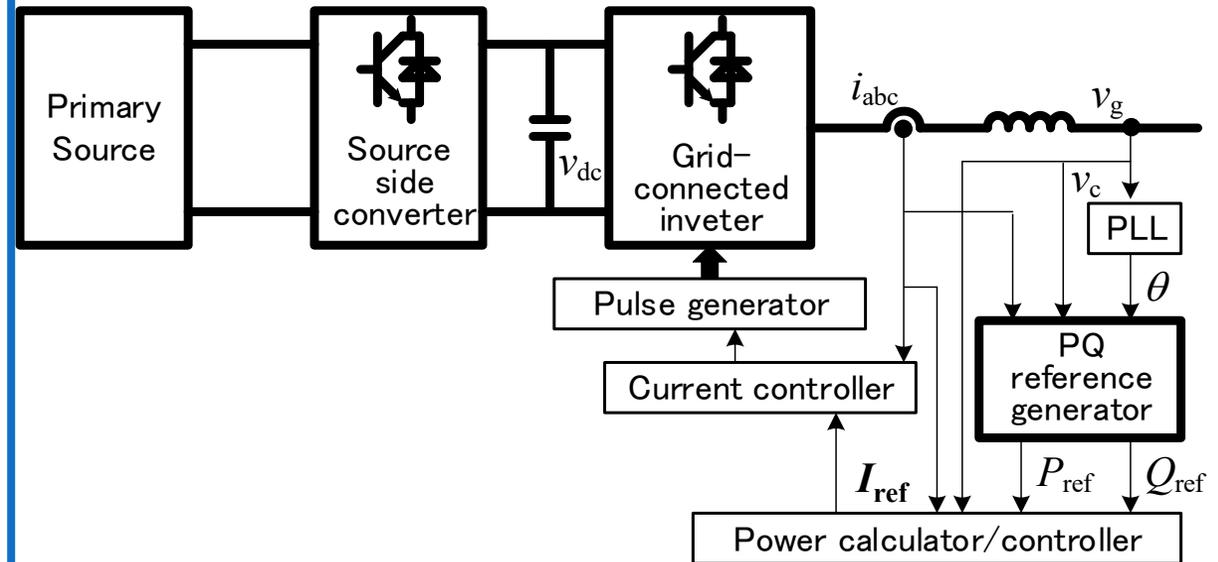
• VSG制御インバータは同期発電機のようにふるまう ➡ GFM

基本的な制御系：GFMとGFL

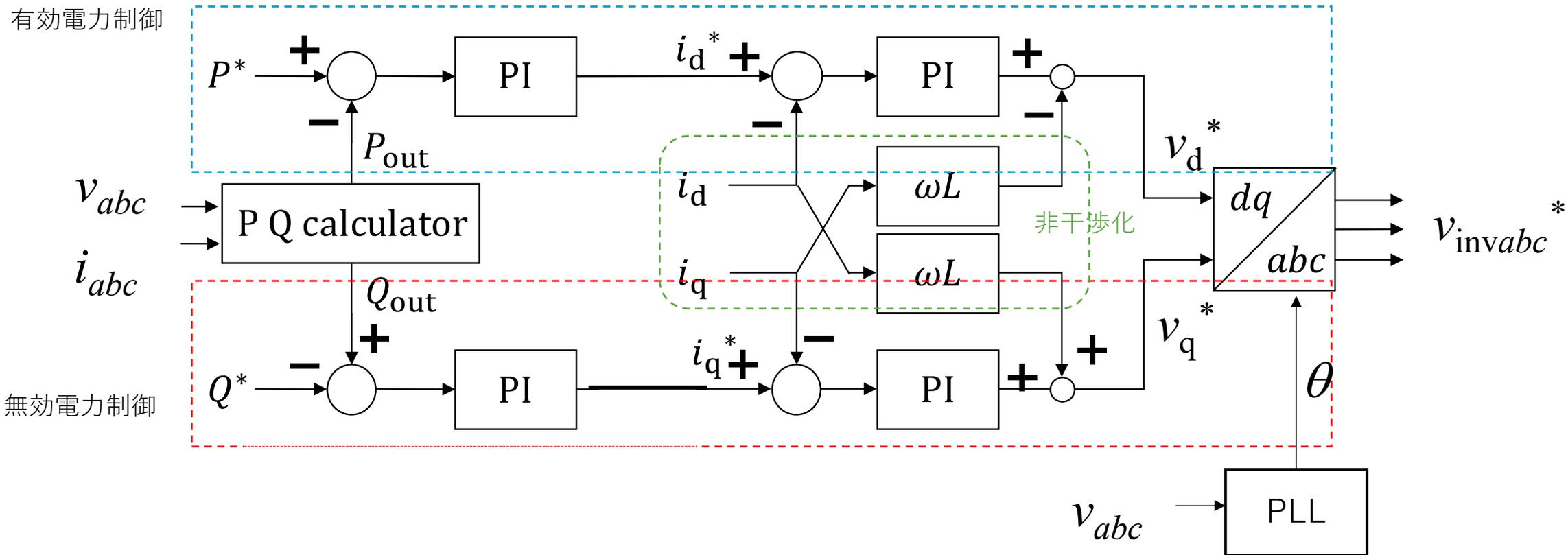
- Grid-Forming Inverter(電圧制御型)



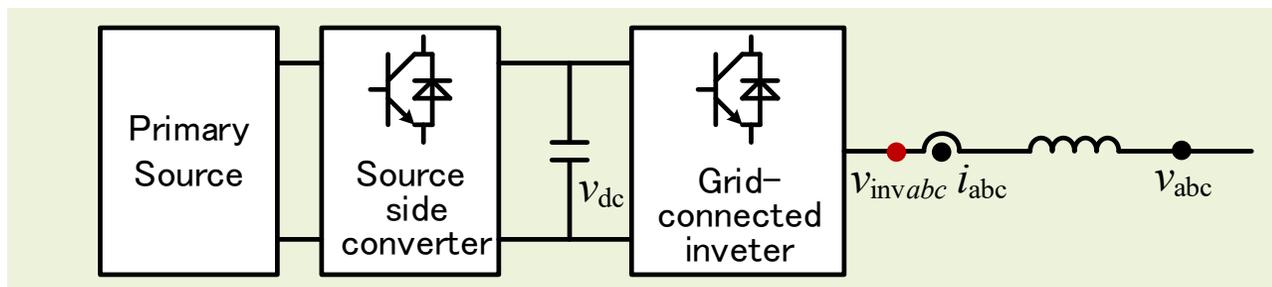
- Grid-Following Inverter(電流制御型)



基本的な電力・電流制御の一例

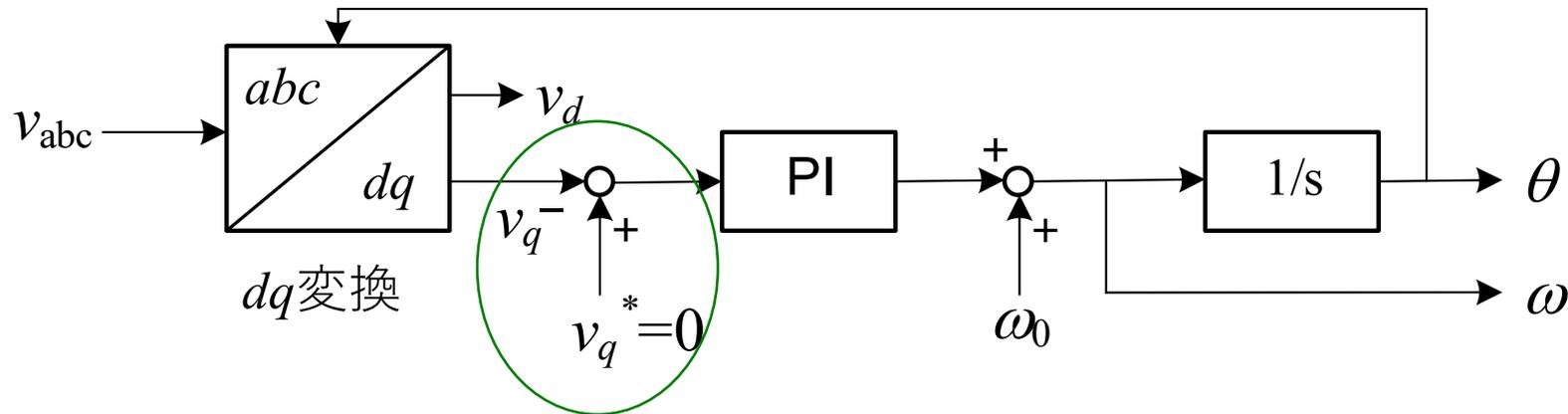


PLLによって電圧位相を検出



- 系統連系の場合, 有効電力・無効電力制御のために, 相電圧の周波数と位相を検出する → 停電時運転不可
- 系統の電圧が確立している必要がある
- PLLの応答が, インバータ運転の安定性に関わるので注意する

■ 系統連系インバータでよく採用されるPLL



q 軸電圧を0にするPI制御

※ dq 変換の際に, d 軸の向きを確認する

3. なぜ今、慣性が供給できるグリッドフォールディングインバータ (GFM) が必要か

質問:

なぜ今GFM (Grid-Forming) インバータが話題なのでしょうか？

回答:

GFMインバータは、電力系統に十分な慣性を供給する機能を持たせることができるからです。

(一般的にGFLインバータでは、PLLなどの影響で効果的に慣性を供給するのが難しい)

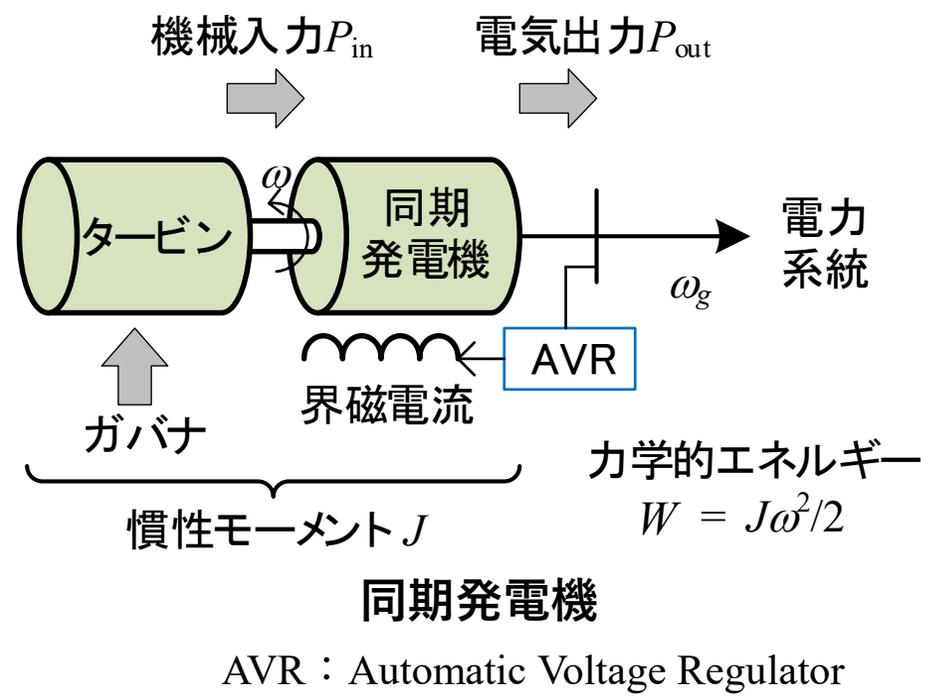
同期発電機の動揺方程式 と同期機の回転数

動揺方程式 Swing Equation

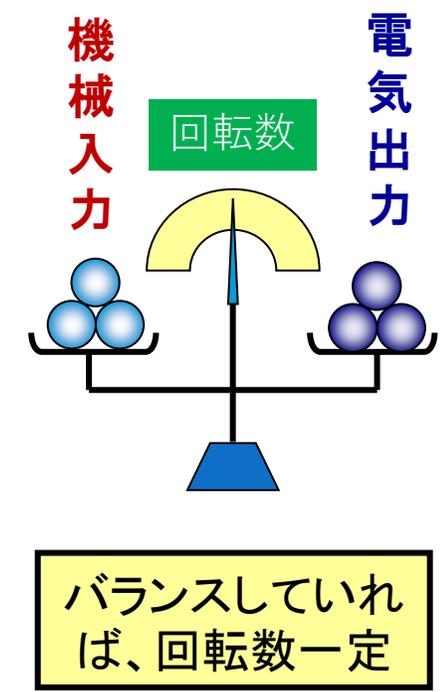
力学的エネルギー W に関する式より

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = \underline{J \omega} \frac{d\omega}{dt} = P_{in} - P_{out}$$

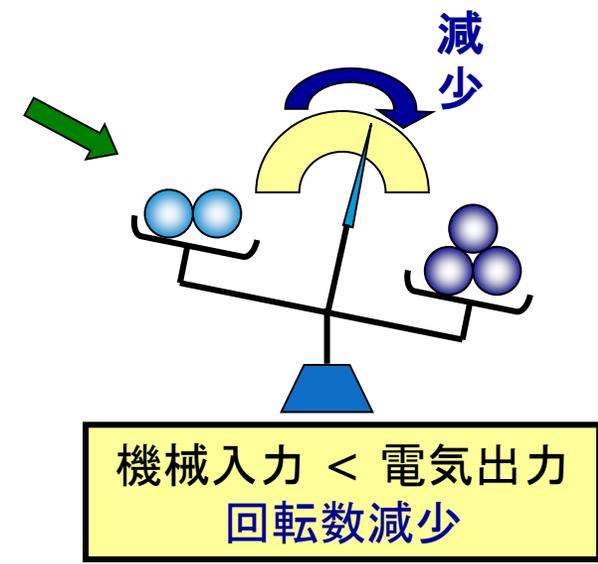
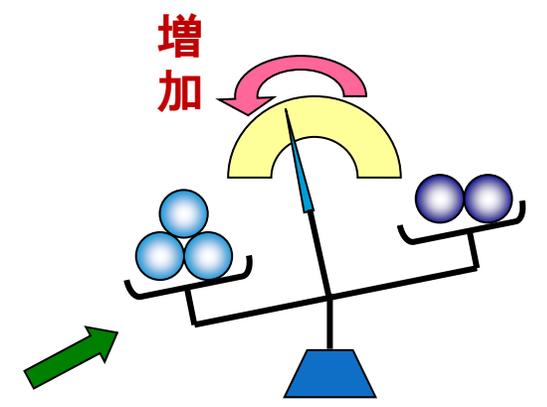
慣性定数
 $M = J\omega$



- J : 慣性モーメント
- ω : 回転子の角速度
- P_{in} : 機械入力
- P_{out} : 電気出力
- D : 制動係数
- ω_g : 系統角周波数

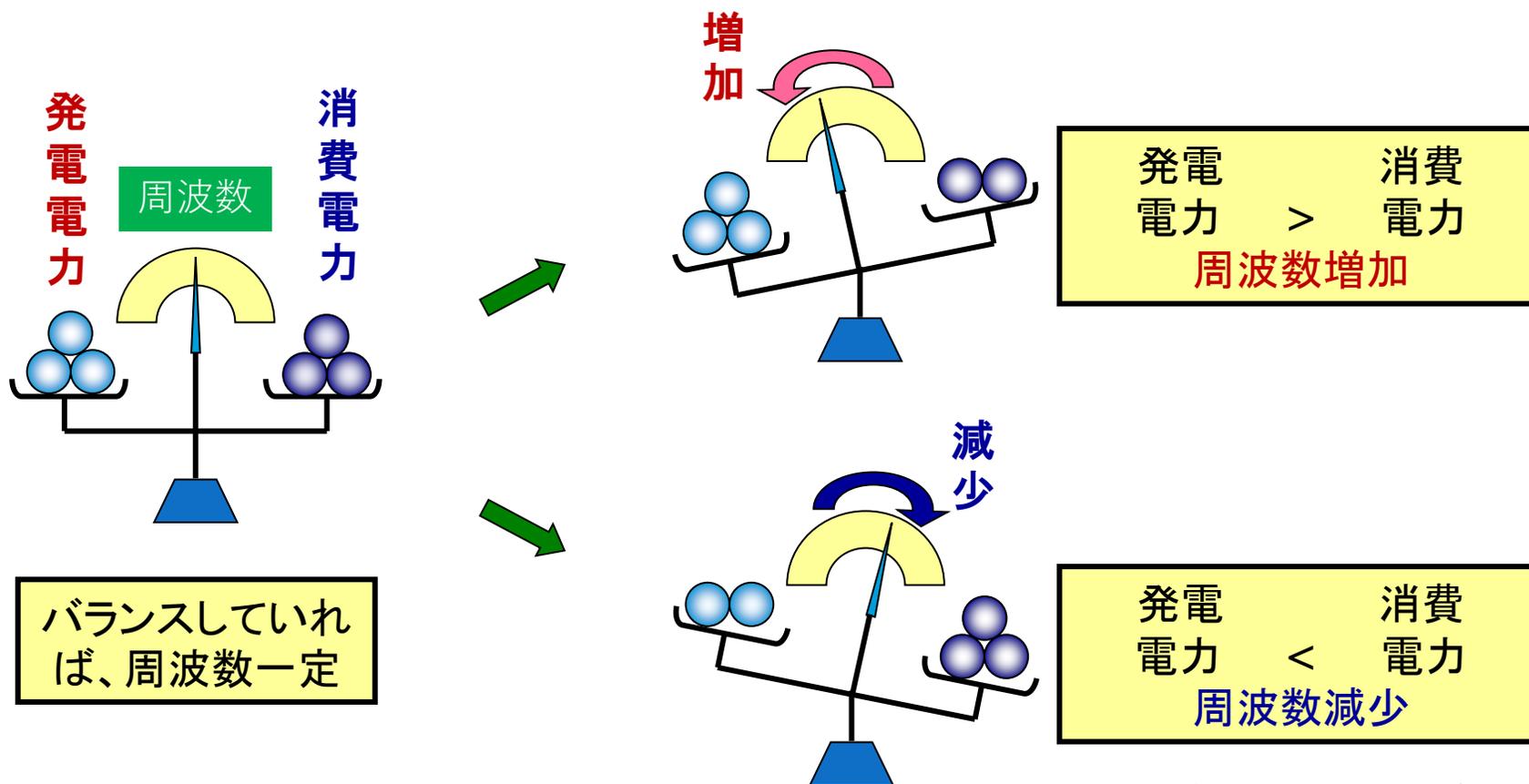


機械入力 > 電気出力
回転数増加



■周波数不安定性：同時同量の原則

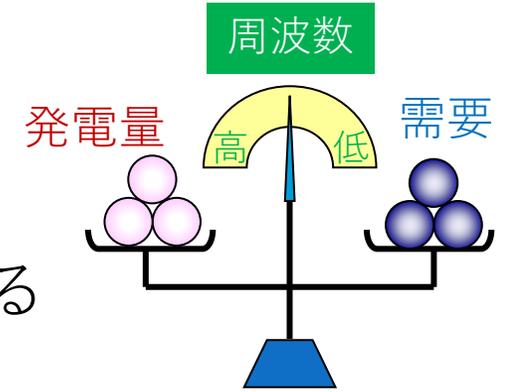
- 電力系統の周波数は系統全体の発電電力と消費電力のバランスにより決定



・北海道大停電 (2018)

システムの慣性とは、電力変動に対する過渡的な周波数の変動しにくさ

システム周波数は、 $(\text{発電量}) = (\text{需要})$ であれば一定値維持



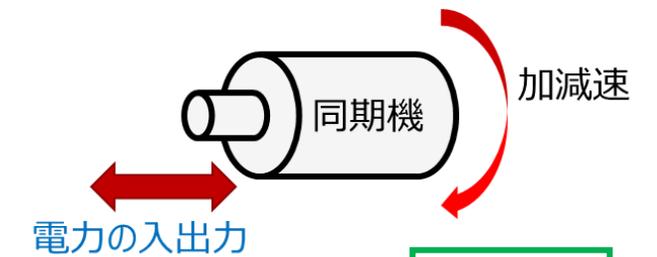
→ 電源脱落など擾乱でバランスが崩れると周波数は変動する
システムの慣性によって周波数の変化率を抑制

同期発電機の慣性

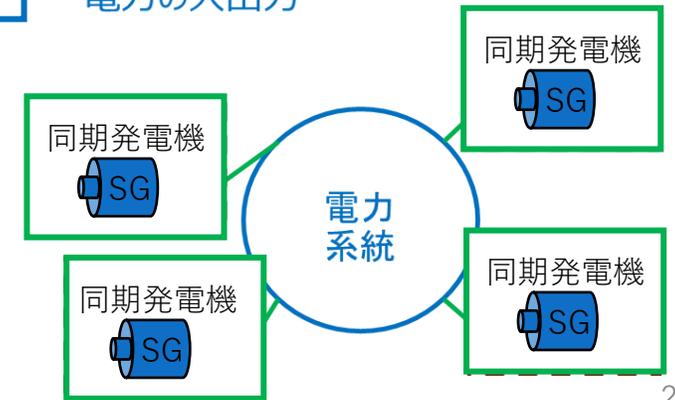
回転子が加減速して、擾乱を吸収

→ 太陽光発電などの大量導入でインバータ連系の分散電源が増加し、同期発電機の割合が減少すると周波数が変動しやすい
(離島などの小規模システムで顕著)

2016年にはオーストラリアにて慣性不足が原因と言われる停電発生



インバータには、慣性・同期化力がない



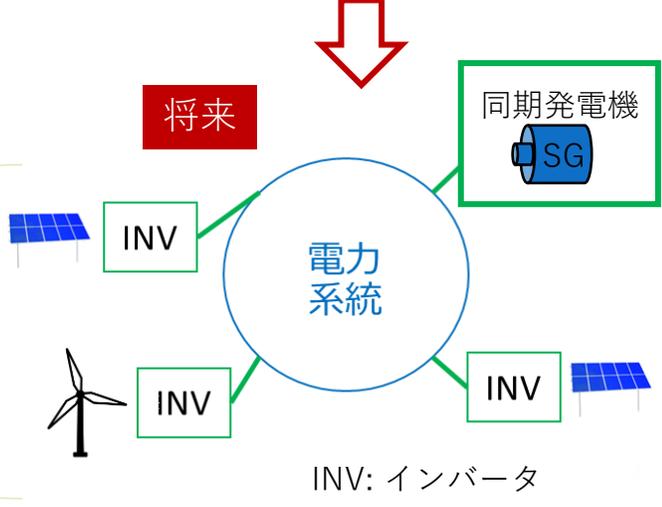
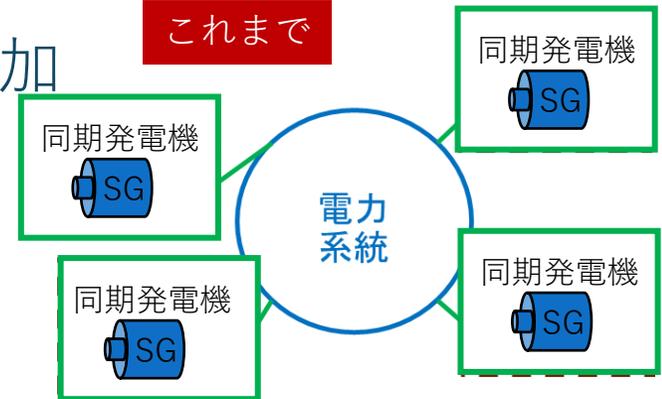
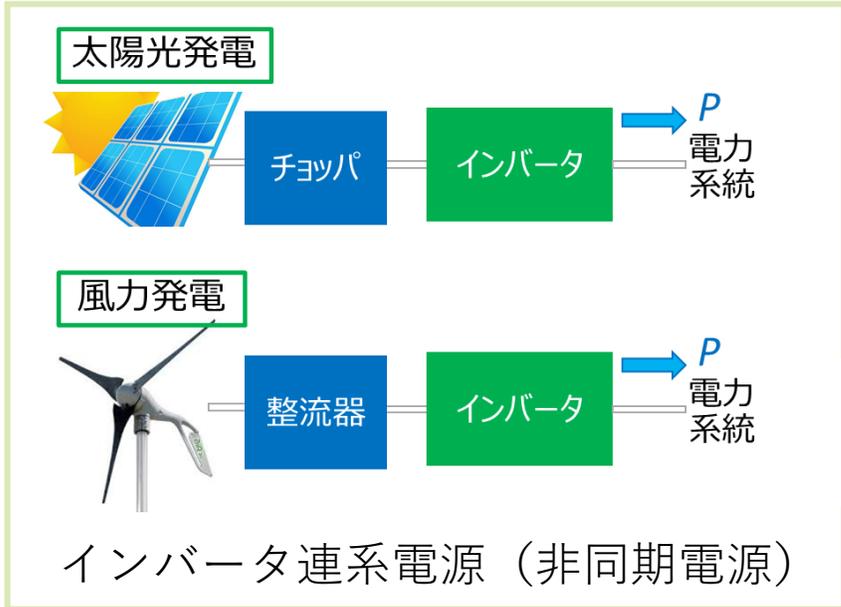
分散電源（太陽光，風力等）の系統への大量導入 （非同期電源割合の増加）

- 不安定な電力供給
- 同期機ではなくインバータ連系による分散電源の増加
 - 慣性（系統周波数の変動しにくさ）の不足
 - 慣性力市場

• 2030年再エネ比率目標36～38%
• 2050年カーボンニュートラル

パワーエレクトロニクス機器が大きな役割を果たす電力系統

Electronic Power Grid
Electronified Power System



課題	概要
<u>周波数安定性</u>	● 同期発電機が相対的に減少し、系統慣性が低下することで、事故時の周波数維持能力が悪化する
電圧安定性	● 同期発電機が相対的に減少し、これまで同期機が担っていた電圧維持能力が減少する
同期安定性	● 同期発電機が相対的に減少し、同期化力が減少することで同期安定性が低下し、同期発電機の脱調が発生しやすくなる
系統保護	● PCSの従来の保護機能（単独運転検出）や要件（FRT要件）と干渉し、新しい機能と両立ができない ● 同期発電機が相対的に減少し、短絡電流の供給源が減少してしまうことで、系統事故時の事故検出が難しくなる

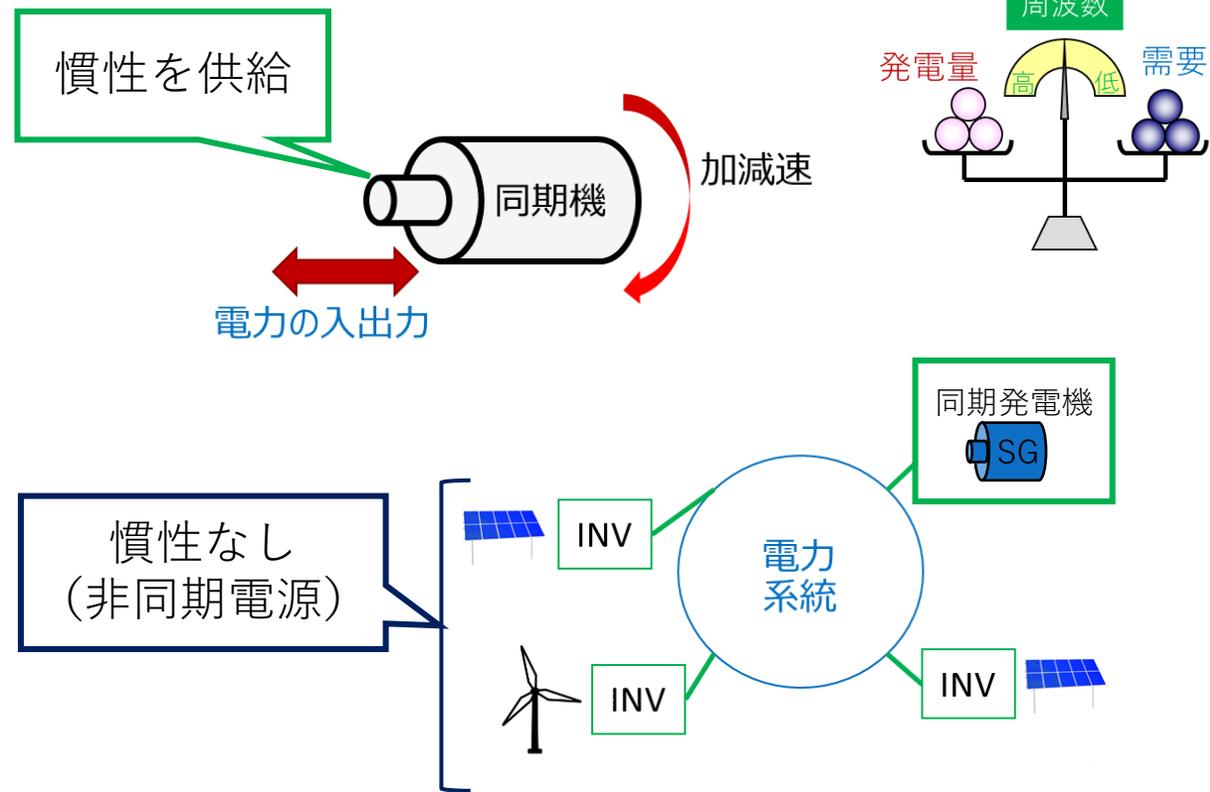
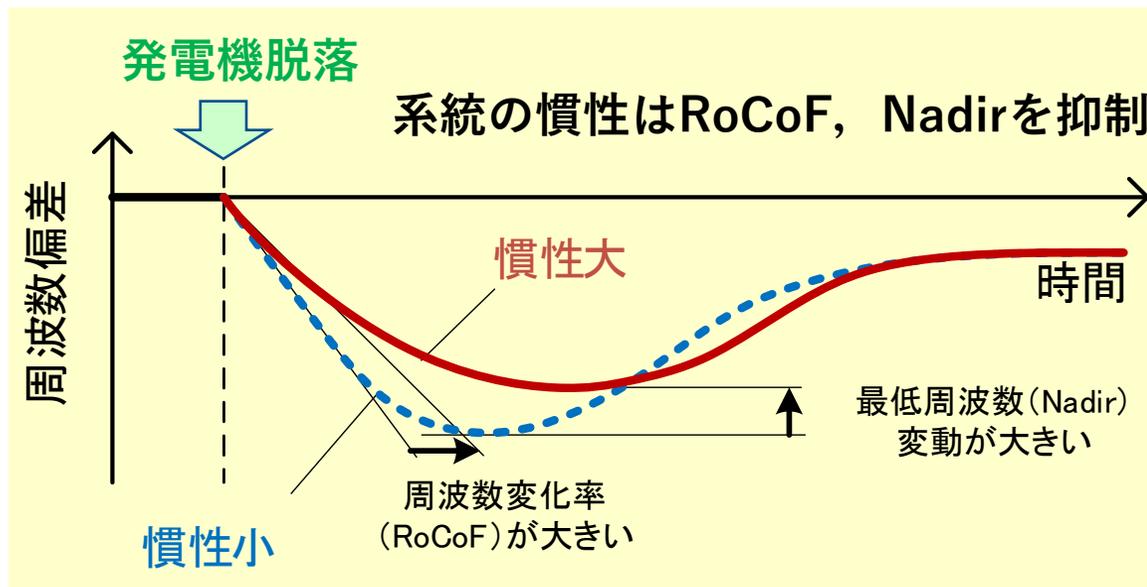
電源脱落など擾乱でバランスが崩れると周波数は変動する

RoCoF (Rate of Change of Frequency) : 周波数変化率

Nadir : 周波数最大偏差



大きいと、発電機・分散電源脱落



- ✓ 再エネ電源導入による非同期電源の割合増加
- ✓ 直流送電 (HVDC) 電力の増加



慣性力不足が深刻

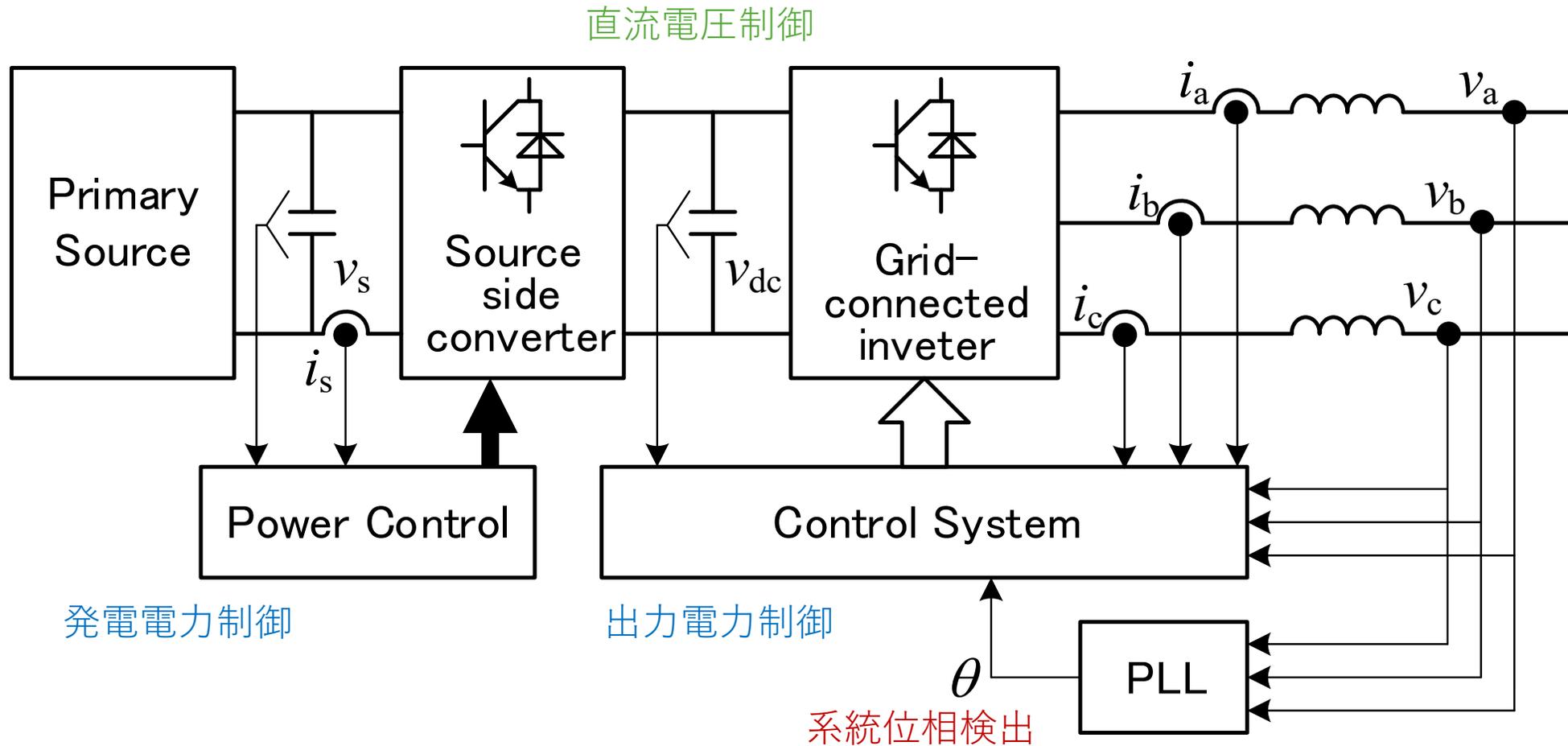
質問:

GFMインバータは、回路方式が変わるのでしょうか

回答:

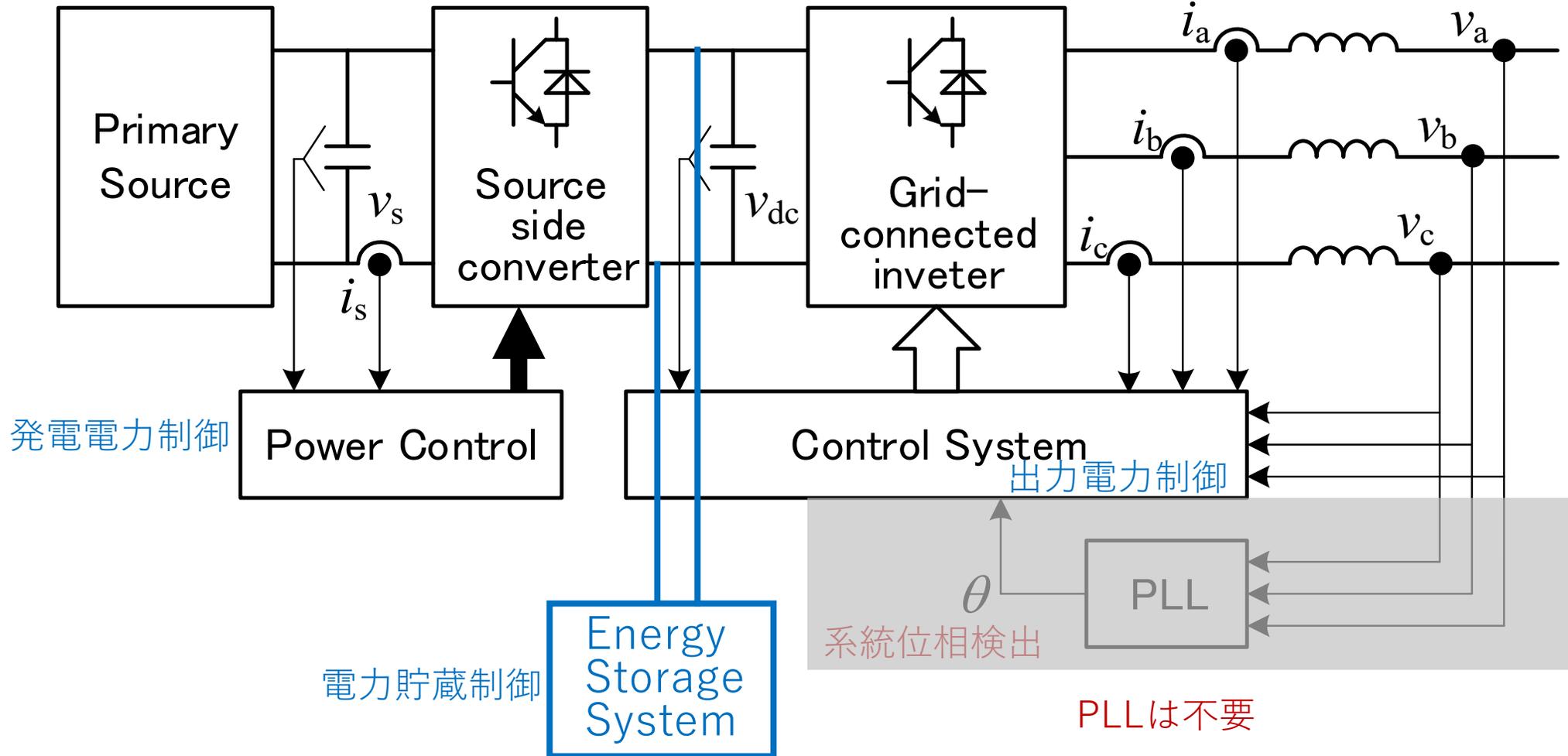
基本的には変わりません。しかし、エネルギー貯蔵要素（装置）が必要です。制御方式が電流制御形から電圧制御形に変わります。

従来の分散電源の基本的な構成



GFMインバータの基本的な構成

直流電圧制御



電力貯蔵装置とその制御が必要

4. 仮想同期発電機制御の 動揺方程式と制御

質問:

GFMインバータと仮想同期発電機制御(Virtual Synchronous Generator, VSG)インバータは何が違うのでしょうか

回答:

GFMインバータはシステムを構成できるインバータと定義するならば, VSGインバータは慣性をもつGFMインバータの一種であると考えられます

仮想同期発電機制御 (VSG)の導入

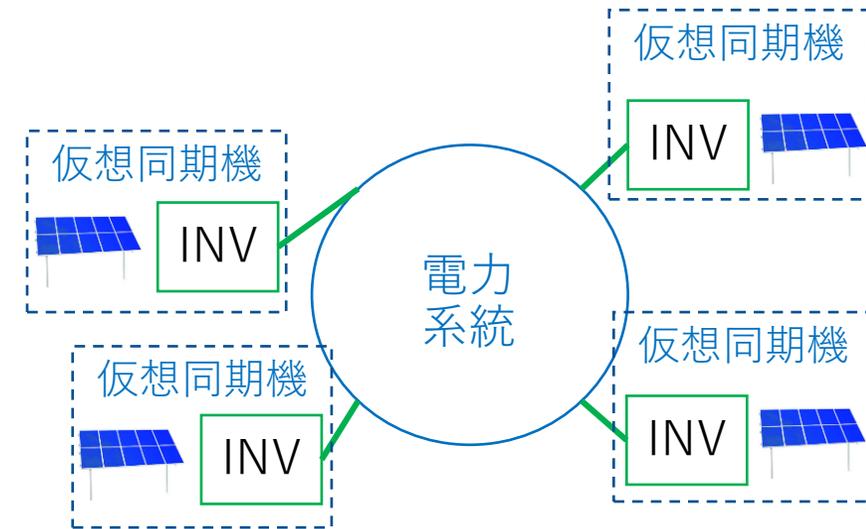
- 多くの分散電源はインバータを通して電力系統に連系される (電流制御)
- ➔ 従来の同期発電機とは異なる特性 (慣性・同期化力がない)
- 電力系統は不安定になる

解決策



仮想同期発電機制御
(Virtual Synchronous Generator, VSG)

- インバータは制御によって同期発電機のように振る舞う
- 同期発電機のパラメータは自由に決定できる
- 同期化力により, PLL不要 → 自立運転への無瞬断切り替え



電力系統の慣性のサポート



チョッパ

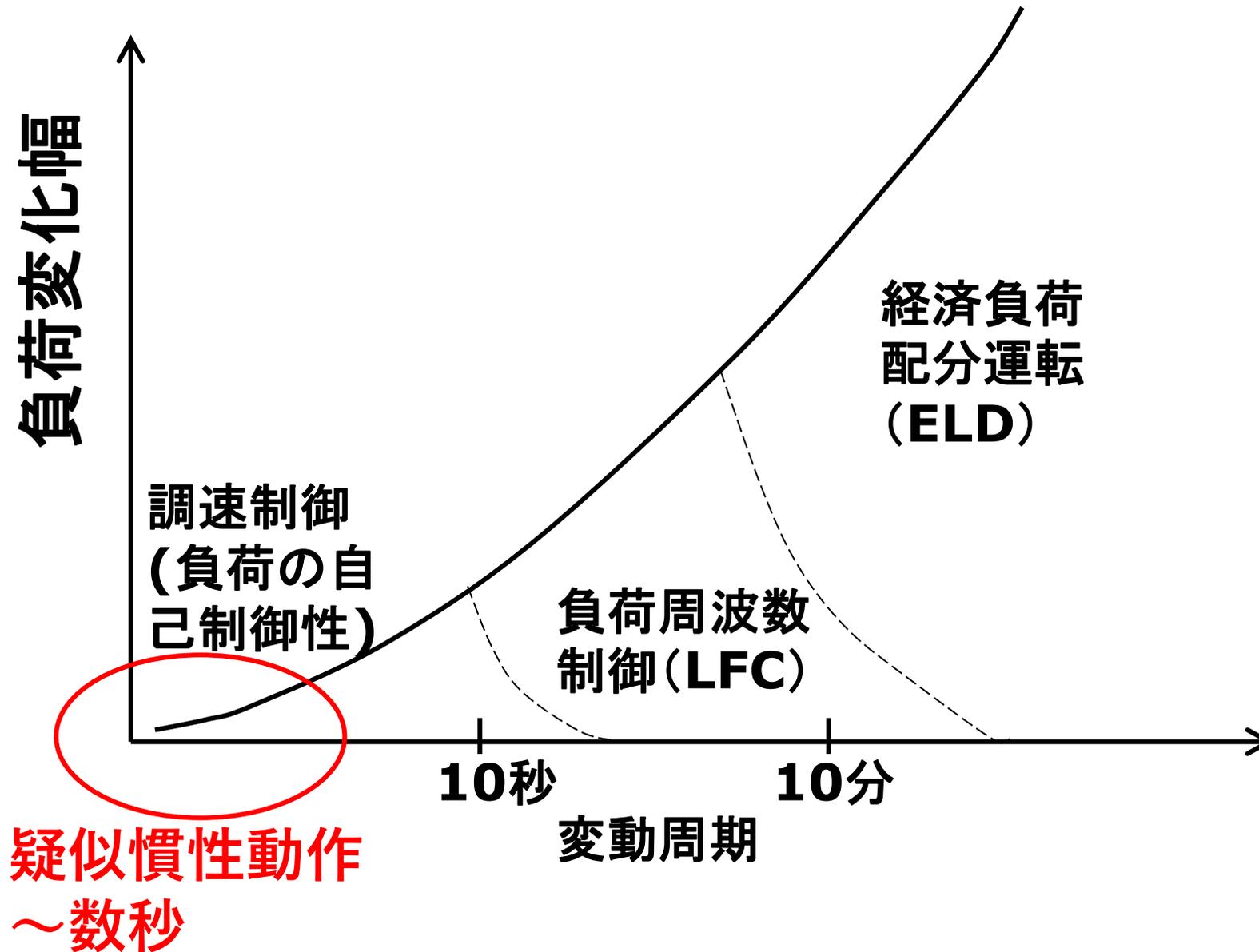
インバータ

電力系統

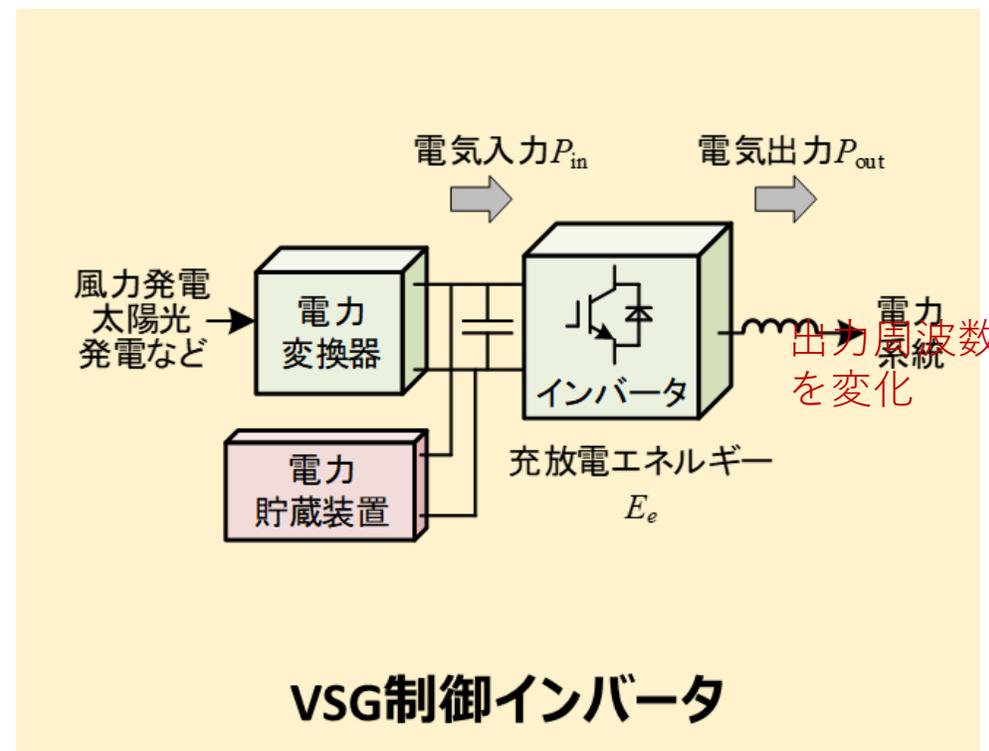
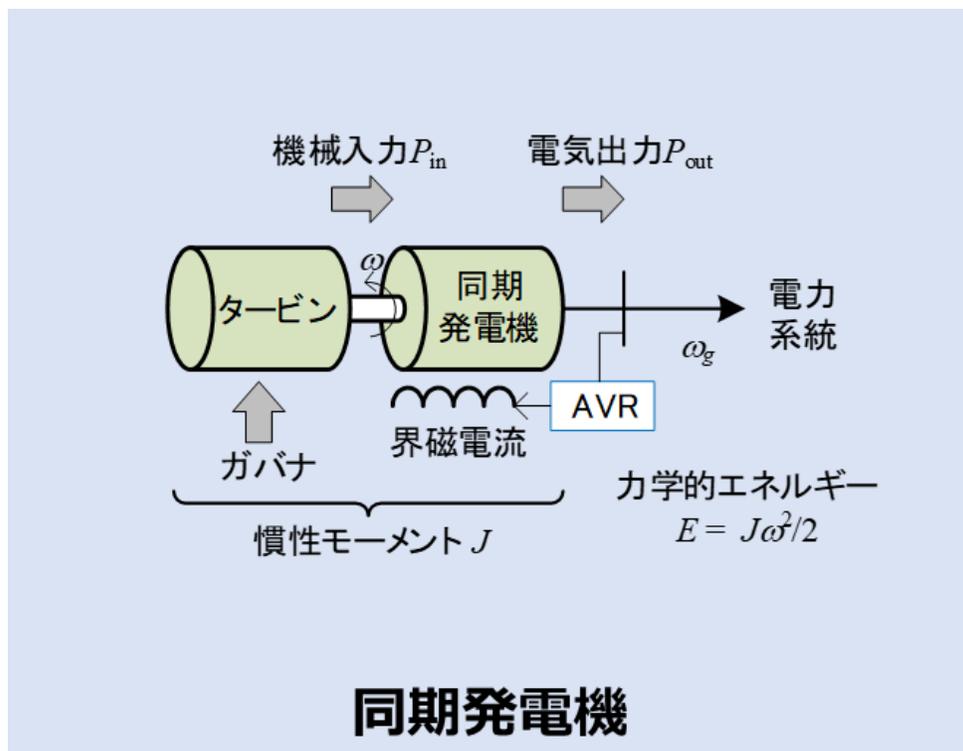
電力貯蔵装置追加

電力貯蔵装置

VSG制御適用



- インバータは制御によって同期発電機のように振る舞う
(仮想同期発電機VSG(Virtual Synchronous Generator)制御)
- 慣性サポート動作 (疑似慣性動作) が可能
- 電力貯蔵装置 (ESS) が必要



同期発電機の動揺方程式 (1)

力学的エネルギー W に関する式より

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = \underline{J \omega} \frac{d\omega}{dt} = P_{in} - P_{out} - \underline{D \omega (\omega - \omega_g)}$$

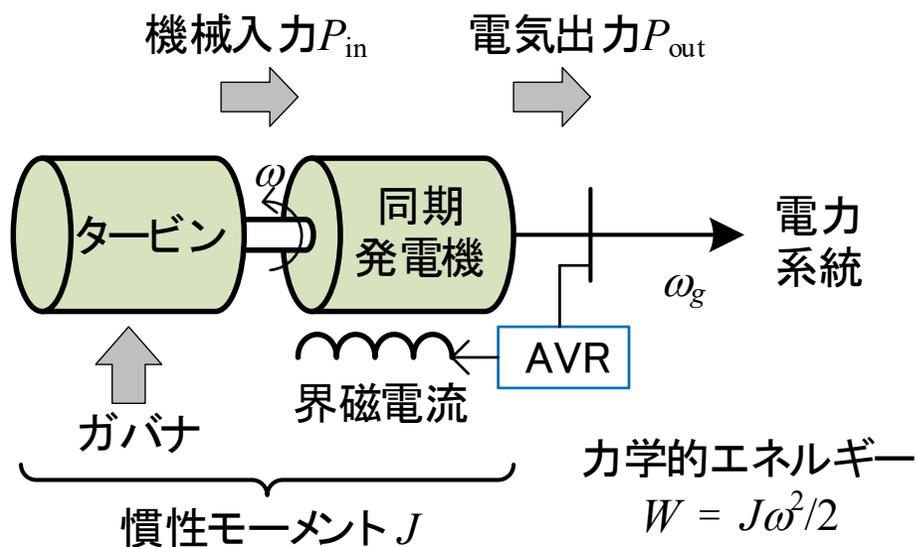
慣性定数

$$M = J \omega$$

数秒～十数秒

制動力

動揺方程式
Swing Equation



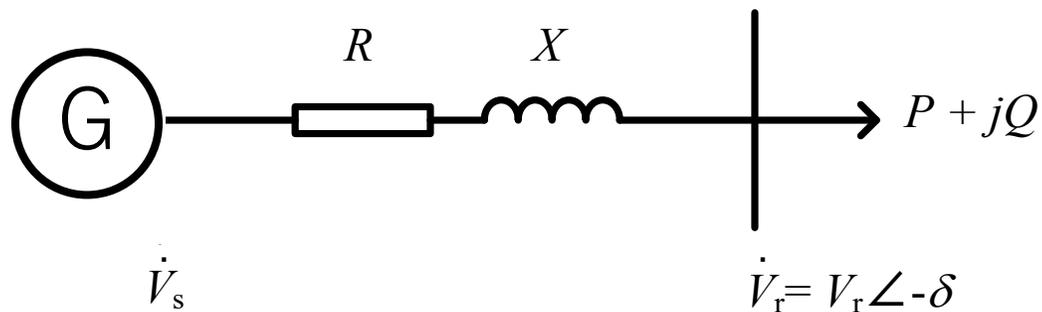
- J : 慣性モーメント
- ω : 回転子の角速度
- P_{in} : 機械入力
- P_{out} : 電気出力
- D : 制動係数
- ω_g : 系統角周波数

同期発電機

AVR : Automatic Voltage Regulator

- インピーダンス $R+jX$, 送電端電圧を $V_s = V_s e^{-j0}$, 受電端電圧を $V_r = V_r e^{-j\delta}$ とすると,

$$P + jQ = \dot{V}_r \dot{I}^* = V_r e^{-j\delta} \left(\frac{V_s - V_r e^{-j\delta}}{R + jX} \right)^* = \frac{V_s V_r e^{-j\delta} - V_r^2}{R - jX}$$



$$Q = \frac{V_s V_r}{X} \cos \delta - \frac{V_r^2}{X}$$

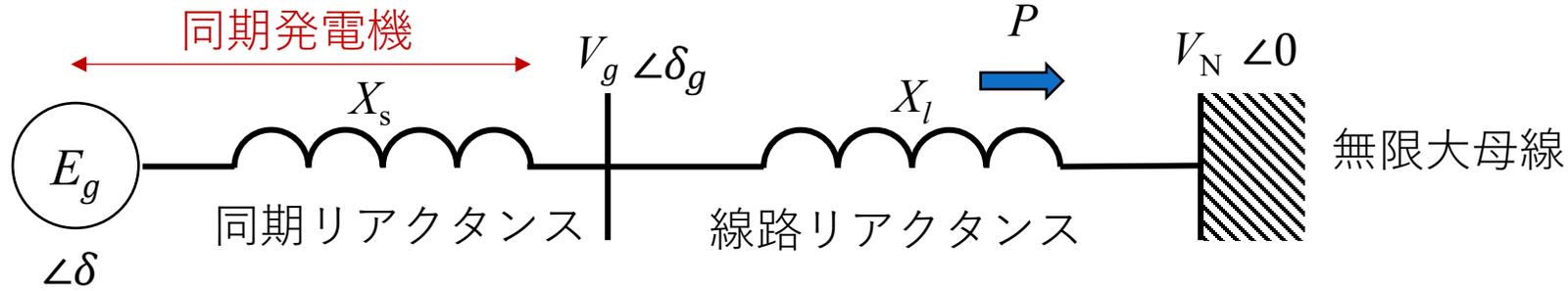
$$P = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta$$

* $R \sim 0$ と仮定

* 相角 δ は通常小さい

同期発電機の有効電力出力

■ 一機無限大母線モデル



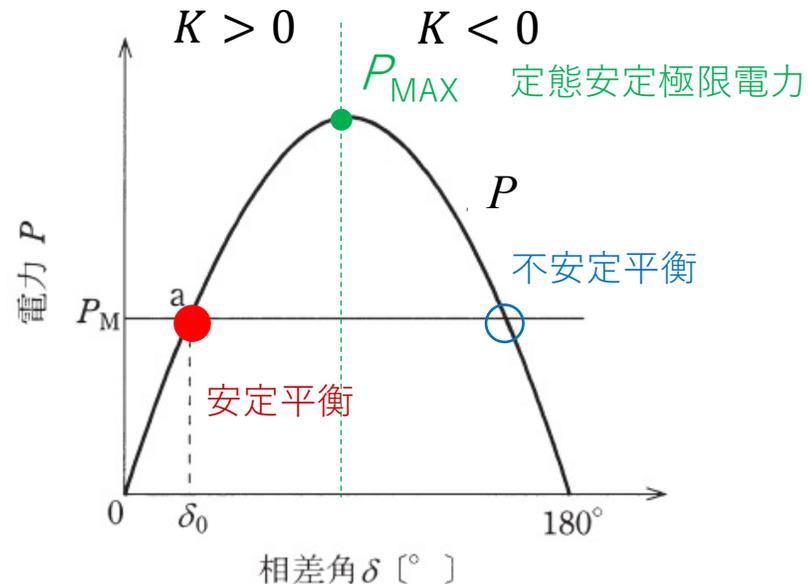
$$P = \frac{E_g V_N}{X_s + X_l} \sin \delta$$

$$P = \frac{V_g V_N}{X_l} \sin \delta_g$$

同期化力

$$K = \frac{\partial P}{\partial \delta} = P_{MAX} \cos \delta$$

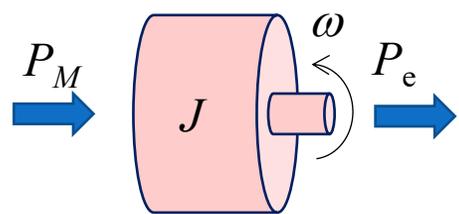
K が正ならば安定
 K が負ならば不安定



電力相差角曲線

同期機の動揺方程式 (2)

$$P_e = \frac{V_g V_N}{X_l} \sin \delta$$



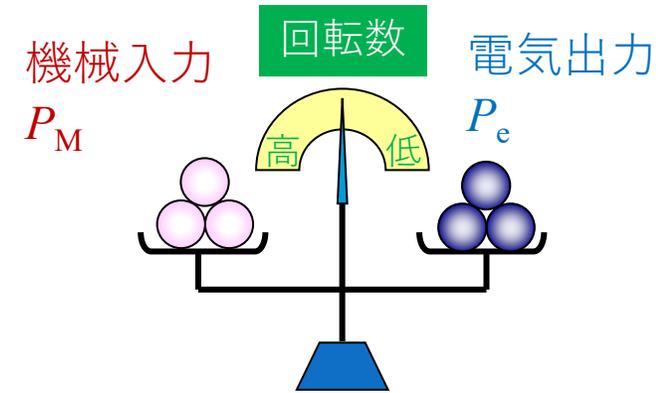
$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = J \omega \frac{d\omega}{dt} = J \omega \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = P_M - P_e$$

同期機の場合 ω を一定値として扱い、
 $J\omega = M$ を定数として扱う (**M:慣性定数**)

$$M \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = M \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_e$$

$P_M > P_e$: 加速
 $P_M < P_e$: 減速

ω : 回転子の角速度
 δ : 相対回転角
 P_M : 機械入力
 P_e : 電気出力



- $P_e = E_g V_N \sin \delta / X$ であるが、 δ が小さい場合は線形近似 $P_e = E_g V_N \delta / X$ となる
- $P_e = P_M$ 近傍で小信号 $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ として線形化すると、同期化力 K を使って

$$M \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} = -K \Delta\delta$$

ばねと同じ振動方程式
 (実際には制動がある)

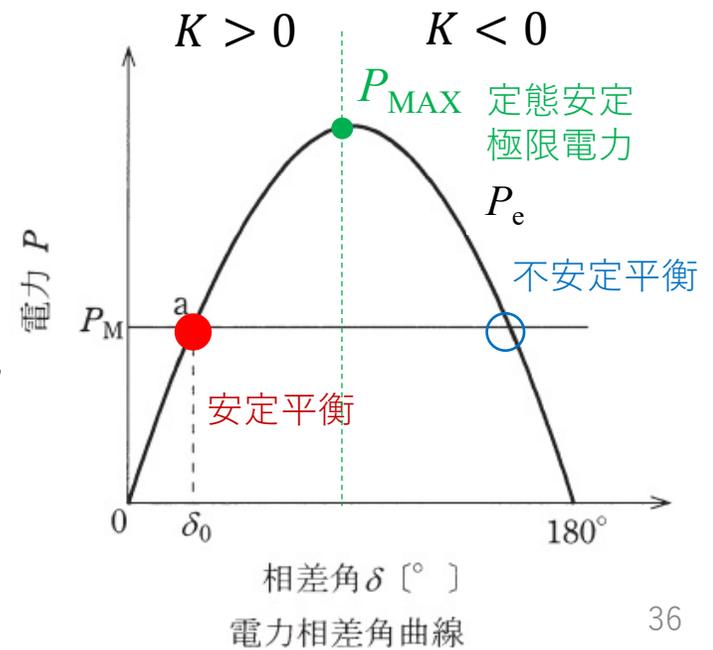
同期化力 $K = \frac{\partial P}{\partial \delta} = P_{MAX} \cos \delta$

特性方程式の解は $s = \pm j\omega_r \left(= \left(\frac{-K}{M} \right)^{0.5} \right)$

$$P_e = \frac{V_g V_N}{X_l} \sin \delta$$

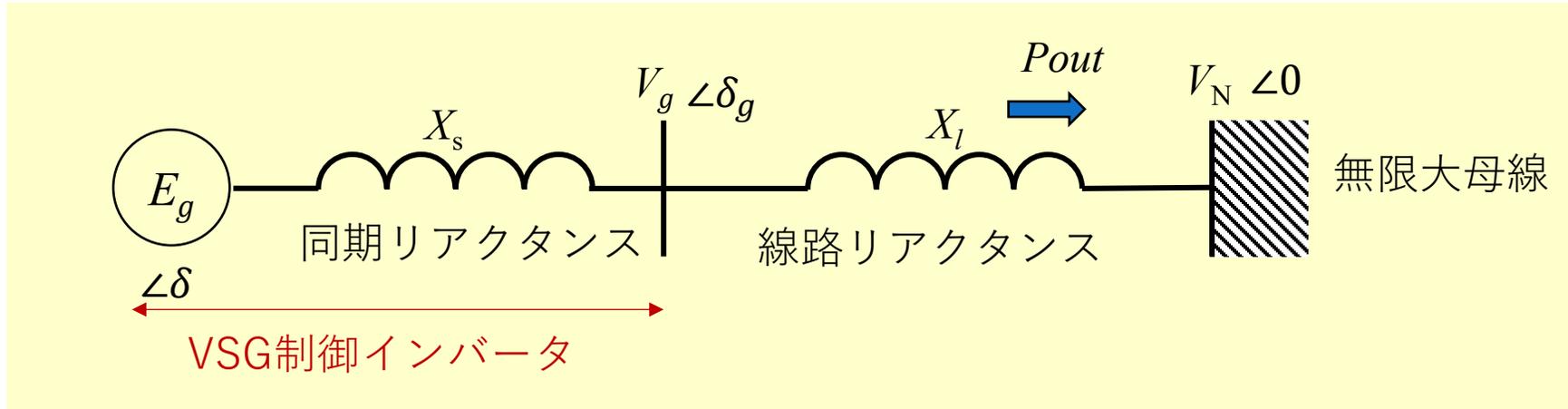
Kが正ならば安定
Kが負ならば不安定

Kが負だと発散する→不安定



同期機の動揺方程式 (3)

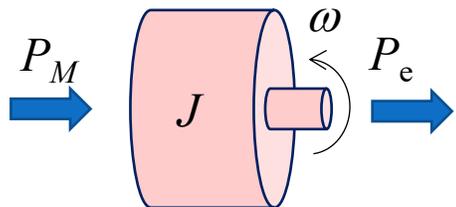
■ 一機無限大母線モデル



標準 2 次遅れの伝達関数として設計可能

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{out} = \frac{V_g V_N}{X_l} \sin \delta_g \approx \frac{V_g V_N}{X_l} \delta_g \\ J \omega_g \frac{d\omega}{dt} = P_{in} - P_{out} - D \omega_g (\omega - \omega_g) \end{array} \right. \Rightarrow G(s) = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{V_g V_N}{X_l}}{J \omega_g s^2 + D \omega_g s + \frac{V_g V_N}{X_l}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \\ \zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\omega_g X_l}{J V_g V_n}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{V_g V_n}{J \omega_g X_l}} \end{array} \right.$$

※ P_{in} は VSG 制御インバータにおいては出力電力指令値



$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega^2 \right) = J \omega \frac{d\omega}{dt} = J \omega \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = P_M - P_e$$

ω を一定値として扱い、 $J\omega = M$ を定数として扱う (M :慣性定数)

■動揺方程式 (Swing Equation)

$$M \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = P_M - P_e$$

■単位慣性定数 H

$$H[s] = \frac{\text{同期速度}\omega_s\text{において回転系に蓄積される回転運動エネルギー[MJ]}}{\text{同期機の定格容量}S_{mach}\text{[MVA]}}$$

すなわち

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}}$$

M について求めると

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach}$$

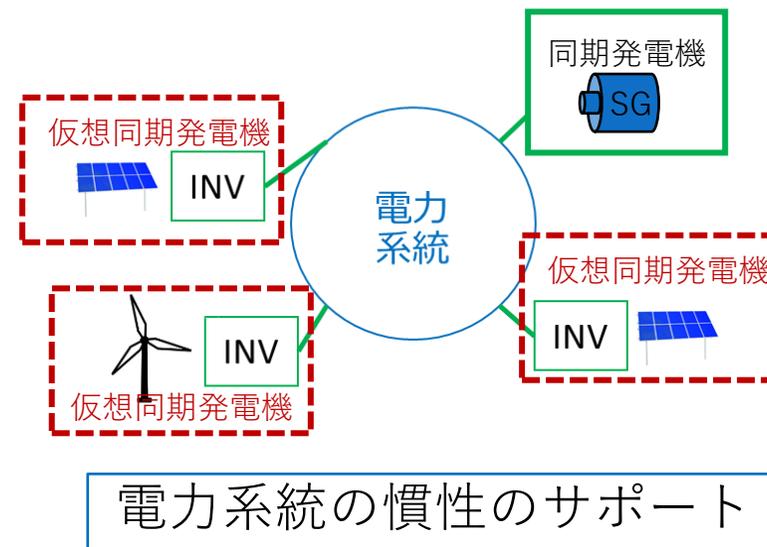
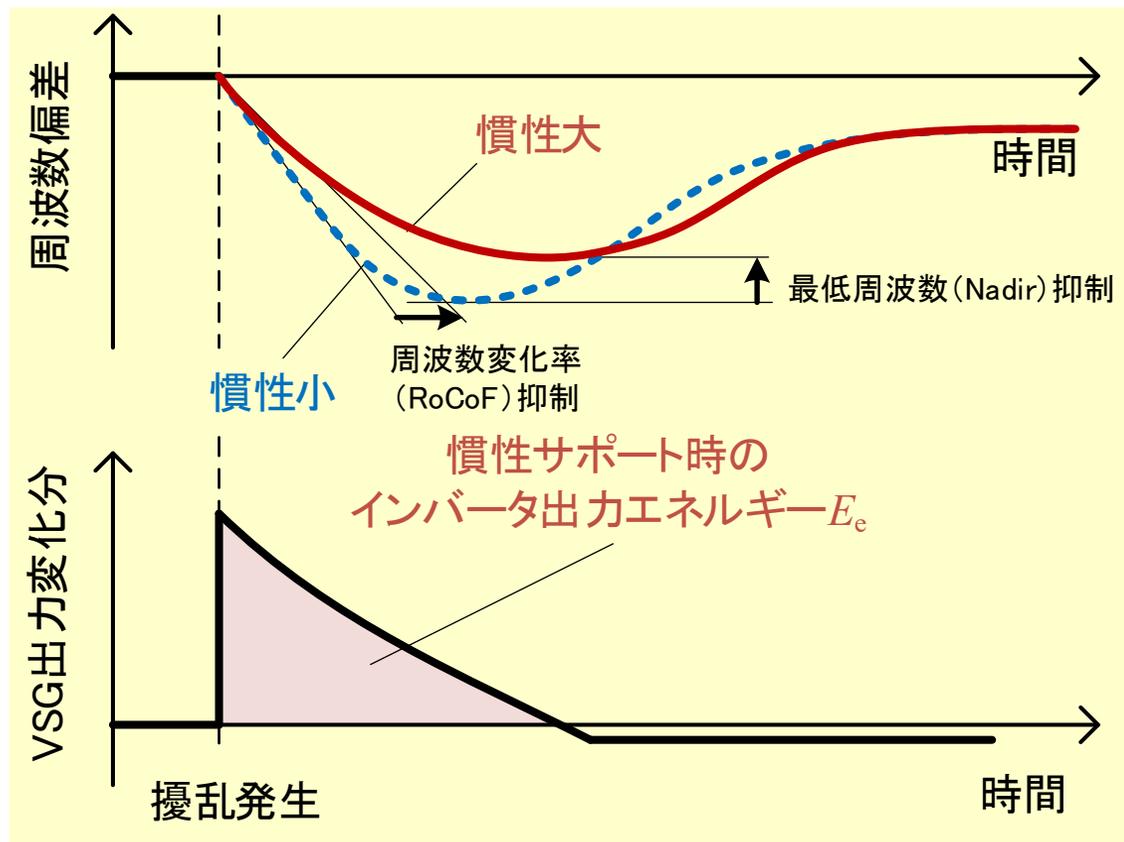
単位法を用いて動揺方程式は

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_e \text{ [pu]}$$

■代表的な H の値

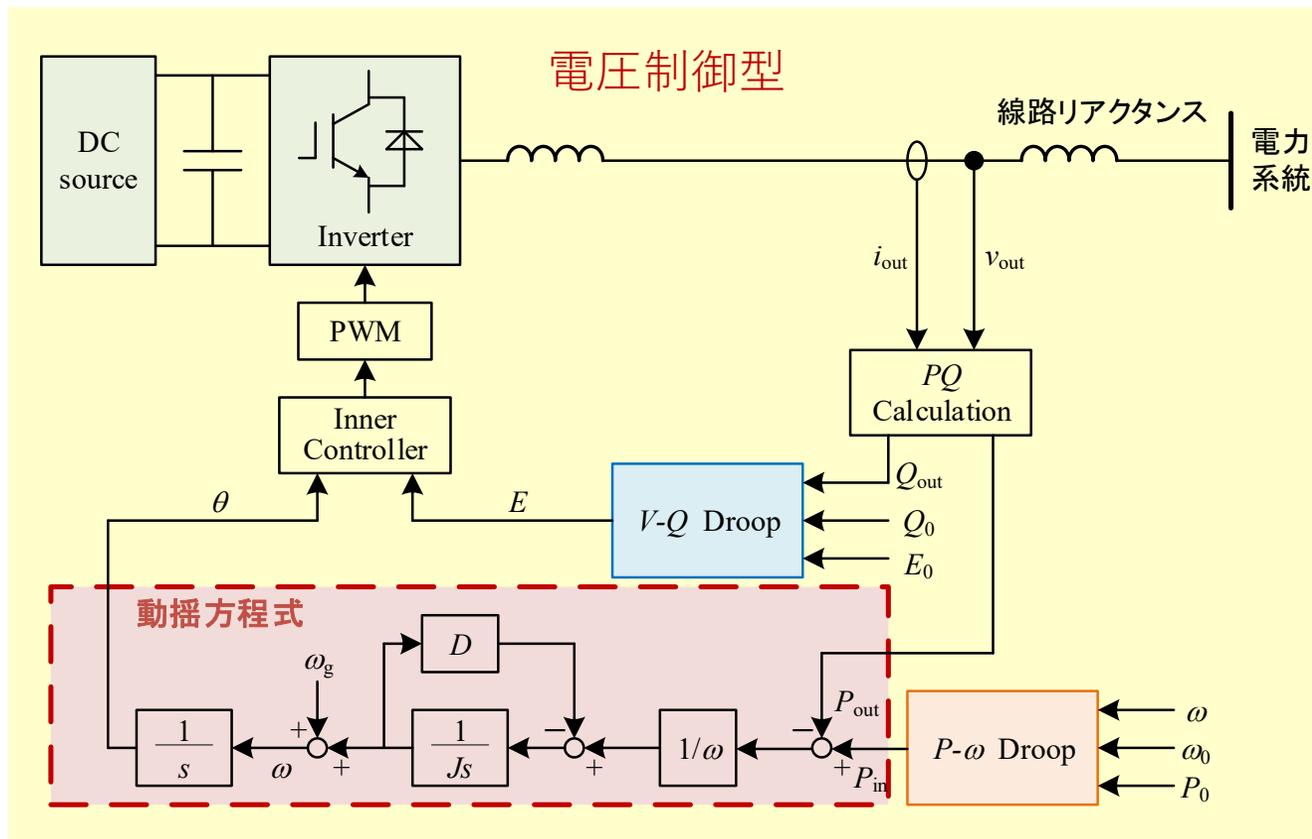
タービン発電機：6～9秒

水車発電機：2～4秒



- 最低周波数 (Nadir) の変動幅低減
- 周波数変化率 (Rate of Change of Frequency, RoCoF) の緩和
 - ➔ 発電機・分散電源の脱落を防ぐ

一般的なVSG制御とドロップ特性制御



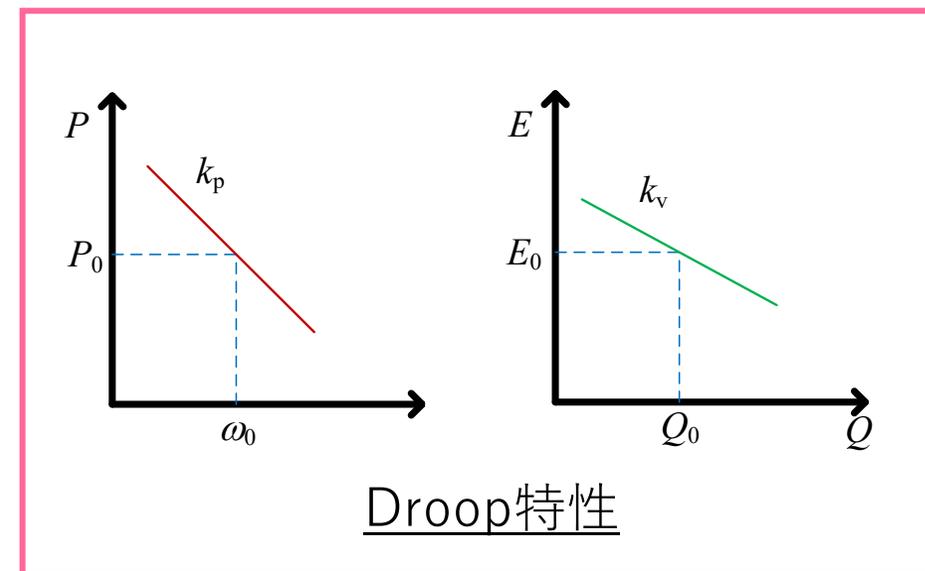
J : 慣性モーメント
 ω : 回転子の角速度
 P_{in} : 機械入力
 P_{out} : 電気出力
 D : 制動係数
 ω_g : 系統角周波数

P_0 : 定格有効電力
 Q_0 : 定格無効電力
 ω : 回転子の角速度
 k_p, k_v : ドロップ係数
 E : 出力電圧振幅
 θ : 出力電圧位相

Droop特性 (垂下特性)

$$P - \omega: \quad P_{in} = P_0 + k_p(\omega_0 - \omega)$$

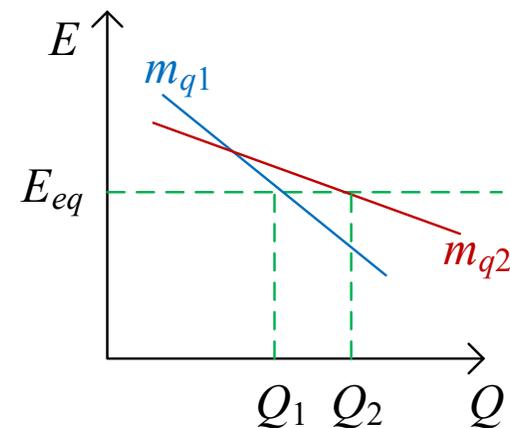
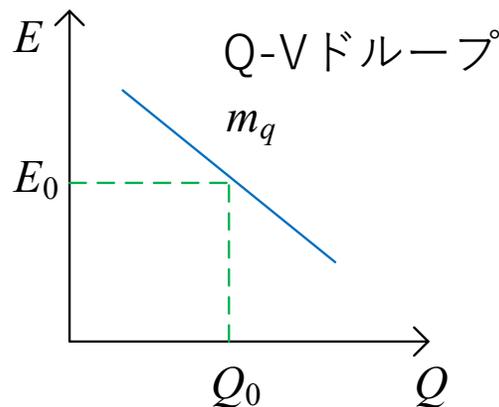
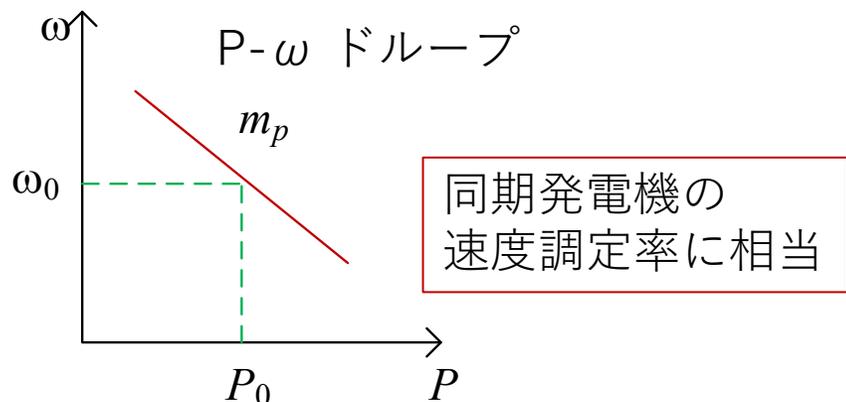
$$V - Q: \quad E = E_0 + k_v(Q_0 - Q_{out})$$



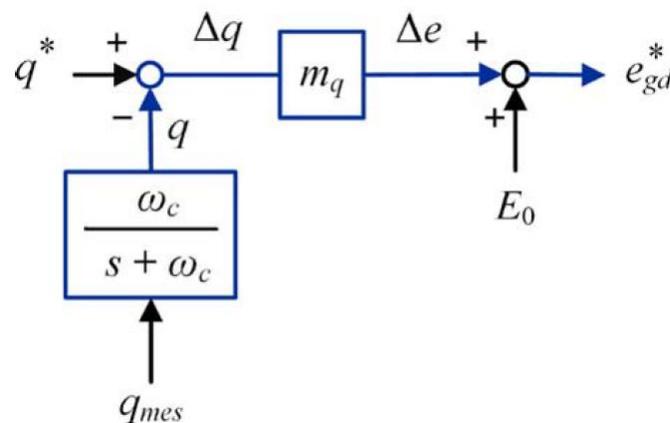
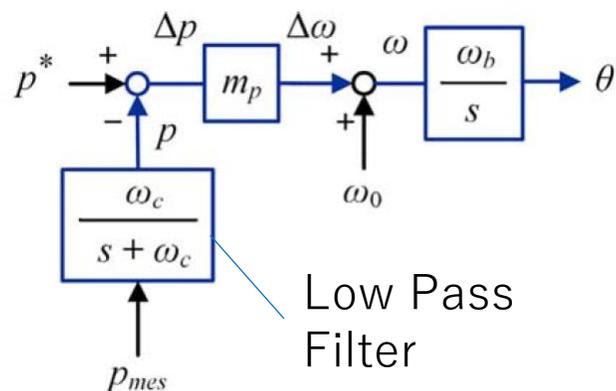
Droop特性

垂下特性（Droop特性）と自律制御

- あらかじめ決められた特性によって，指令値を自身で決定する
- 特性（傾きによって自律的に負荷分担が行われる

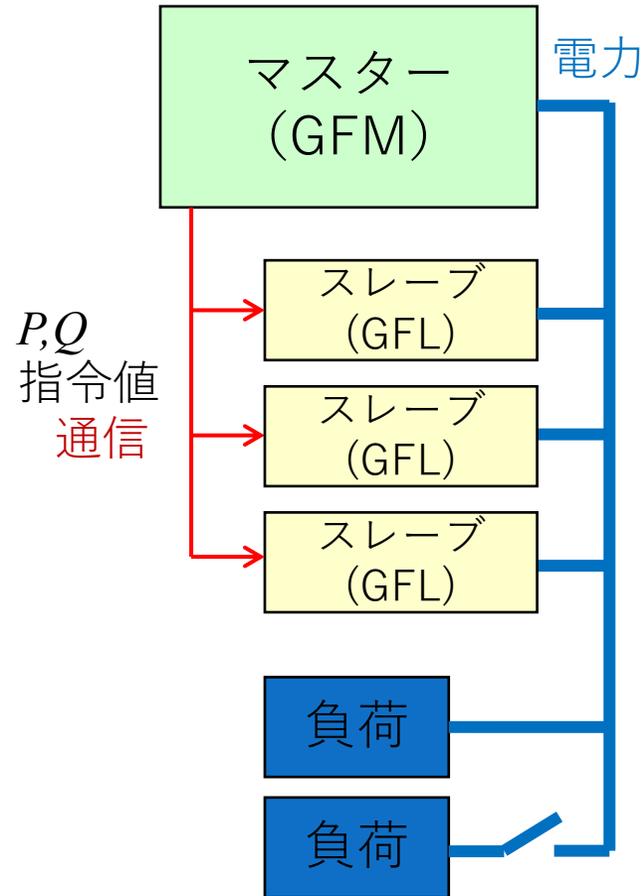


Q-Vドループによる無効電力分担



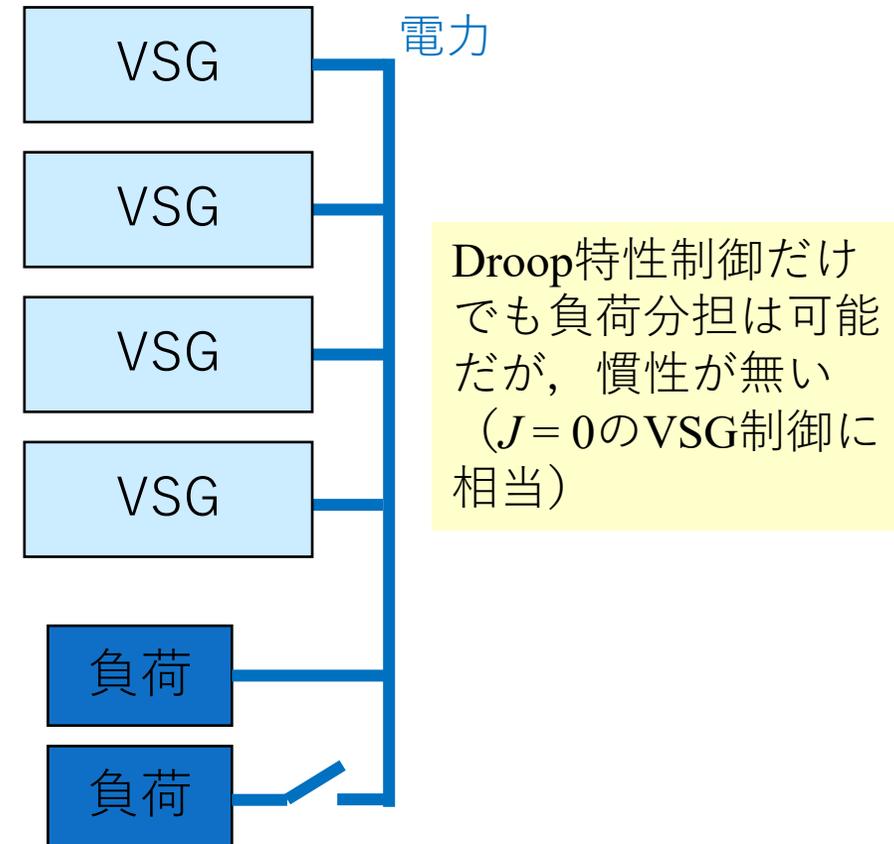
- 自律的な負荷分担が可能
- 平衡電圧点 or 平衡周波数点が変わってしまう

マスター・スレーブ方式



- マスター電源の負担大・容量大
- 協調制御には通信必要

VSG制御による自律分散制御



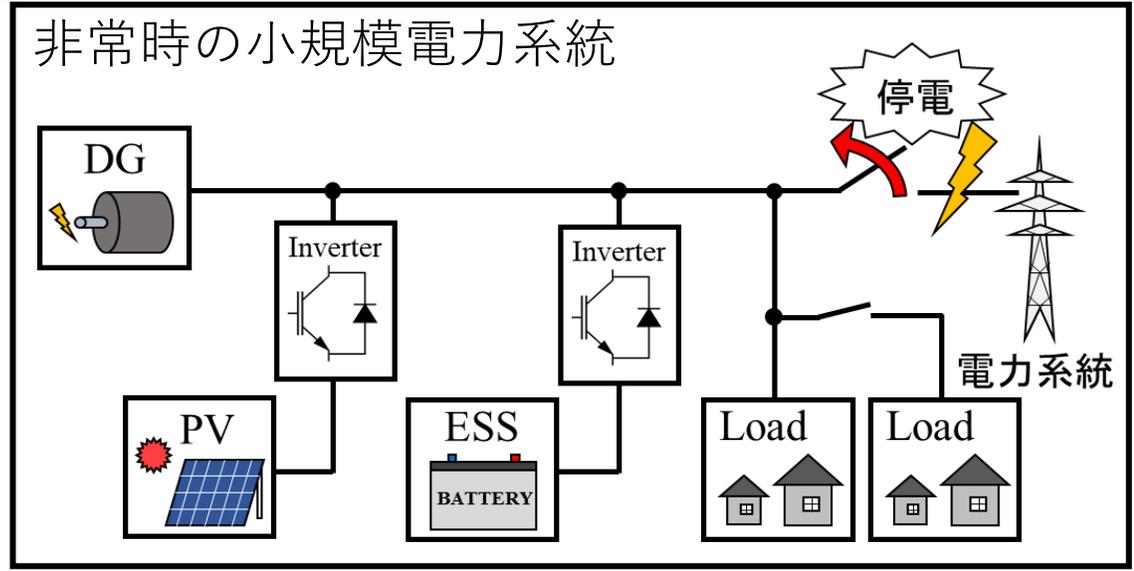
- Droop特性による P, Q 指令値・負荷分担
- 自律分散制御で通信不要

- 将来の再エネ電源の割合が高い電力システムの慣性サポート
- インバータ連系の**分散電源**の割合が大きな小規模系統（マイクログリッド，離島，非常用系統）の分散電源や蓄電池システム
- インバータ連系**負荷**の割合が大きな系統（電気自動車充電器，工場）
- 船舶・航空機内給電

• **直流送電システム（交流連系側）**

など

小規模電力系統におけるVSGインバータ



DG：非常用同期発電機

PV：太陽光発電

ESS：電力貯蔵装置（蓄電池）

Load：負荷

*分散電源
電流制御インバータによって系
統連系

発電機の容量 **小** 電流制御が適用された分散電源の容量 **大** 発電機の負担・回転数変動大 ⇒ 電力系統が不安定

仮想同期発電機(VSG)制御を電力貯蔵装置 (ESS) インバータに適用

電力貯蔵装置が電力系統の変動電力（負荷, 太陽光発電による電力変動）を補償 ⇒ 発電機の回転数変動（電力系統全体の慣性不足によるもの）を低減

同期発電機と分散電源の安定な並列運転の実現

再エネ導入率



	方式①：電流制御方式 (GFL)	方式②：電圧制御方式 (GFM)
応答速度	速 (0.1 ~ 1 s)	瞬時 (~0.1 s)
効果	中	大
開発期間	中：2 ~ 3年	長：5年以上
特徴	従来の制御方式に機能を追加 ↓ 従来のPCSからの移行が容易	新しい制御方式 ↓ 系統連系規程等のルール面も含め、考え方の見直しが必要
電圧階級	高圧・特高 *低圧についても高速な単独運転検出 (200 ms) との両立が可能な場合は可	

5. VSG制御インバータの 実際と課題, 応用

質問:

GFMインバータの技術的課題には、なにがあるのでしょうか？

回答:

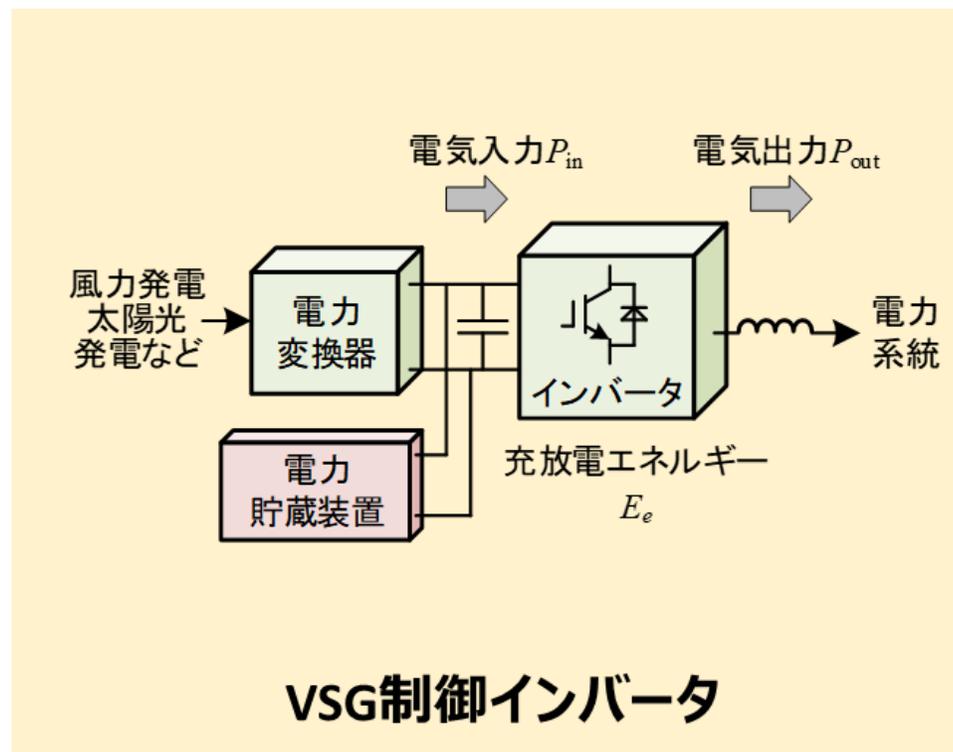
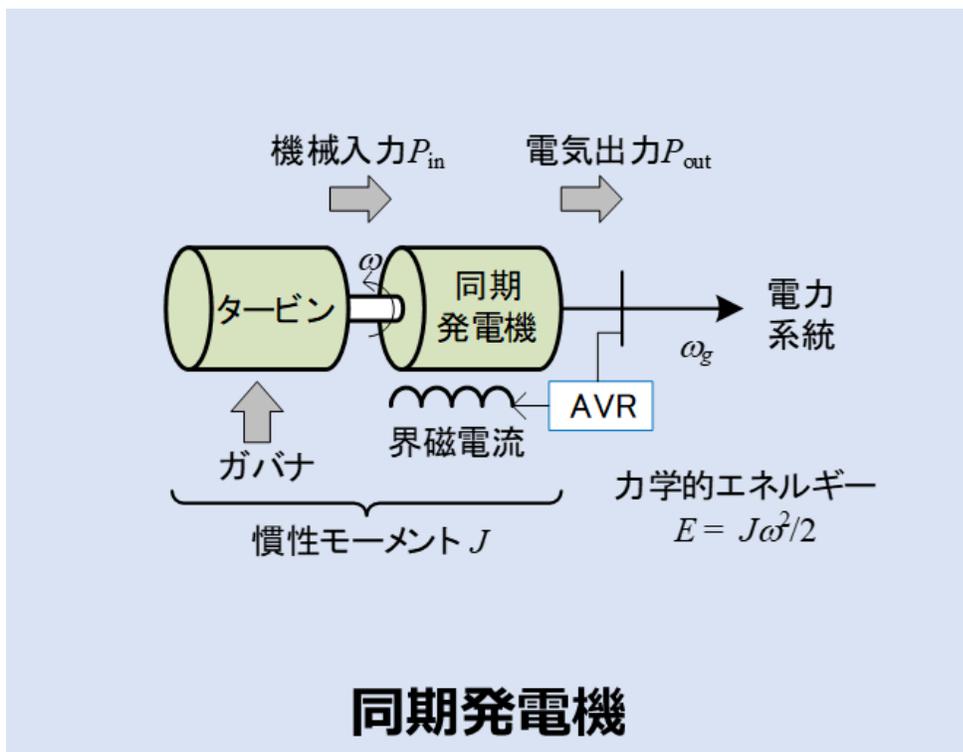
電力貯蔵装置，過電流抑制，系統連系要件，低周波電力振動など，多くの課題が存在します。規格の制定も問題です。

課題：電力貯蔵装置

VSG制御（疑似慣性動作）には電力貯蔵装置が必要

- 慣性動作時，同期発電機の回転子に蓄積されていた力学的エネルギーが電力系統に充放電される → 相当する電力貯蔵が必要

$$\Delta E = \frac{1}{2}J(\omega^2 - \omega_0^2)$$



例1：直流リンクのキャパシタを利用

大容量キャパシタ C_{dc} に蓄積されるエネルギーを使用

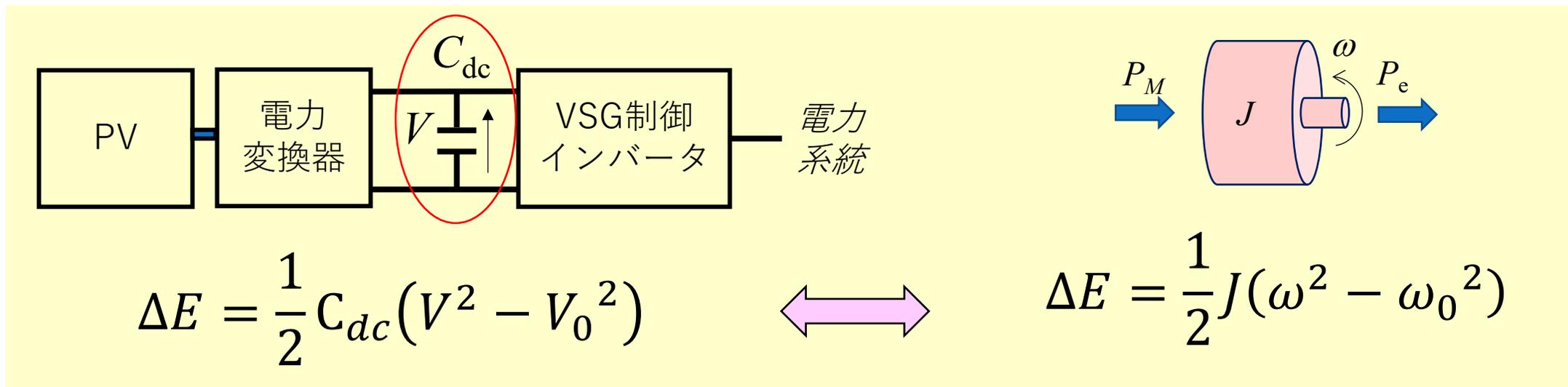
■利点

- 蓄電池など不要（コスト低）

■欠点

- 使用可能なエネルギーが小さい

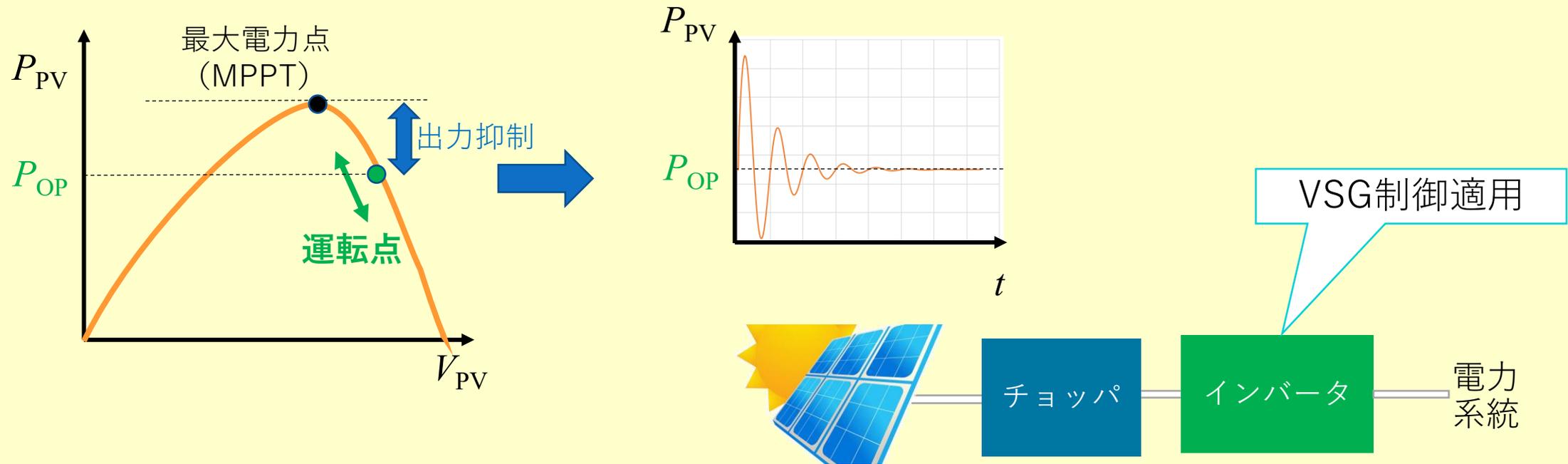
➡ **複数の**インバータで分散して分担



- 原動機（太陽電池なども含む）の発電電力を高速に制御できるのであれば，出力を制御する（発電電力増減の余力が必要）

➡ 電力貯蔵装置は不要

■ 太陽光発電の出力制御の例



太陽光（50 kW以上）	<p>【ハードウェア】従来PCSと同じ 【疑似慣性量】PCS容量に依存 電源脱落時：PCS容量 x 数秒（出力抑制状況による） * 必要な出力抑制量：最大10%程度 負荷脱落時：PCS容量 x 数秒</p> <p>慣性低下が問題となる状況では，需給バランス等により一定量の出力抑制が発生。<u>この抑制を活用して疑似慣性を供出</u>（慣性対策のための<u>新たな抑制は不要</u>）</p>
蓄電池（50 kW以上）	<p>【ハードウェア】従来PCSと同じ 【疑似慣性量】PCS容量に依存 電源脱落時・負荷脱落時：PCS容量 x 数秒</p>

例 3 : 風車の慣性を利用

風車に蓄積されるエネルギー（慣性エネルギー）を使用

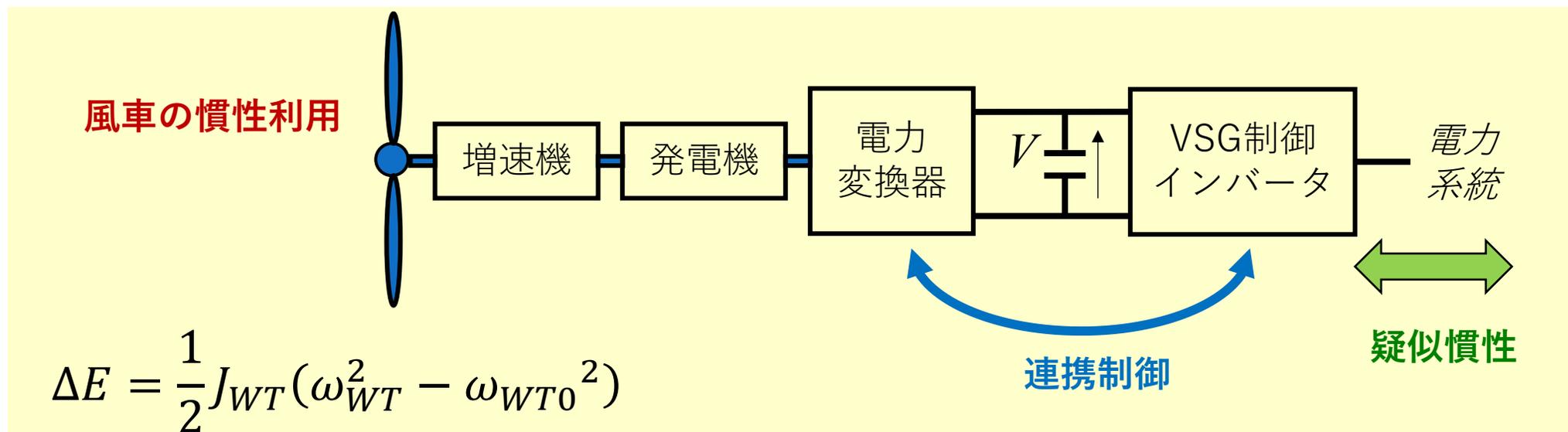
➡ 電力貯蔵装置は不要

■利点

- 蓄電池など不要（コスト低）

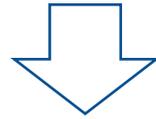
■欠点

- 風車が加減速し最適回転数を外れるので，発電量を増加させ安定させるまで時間を要する
- 制御が複雑



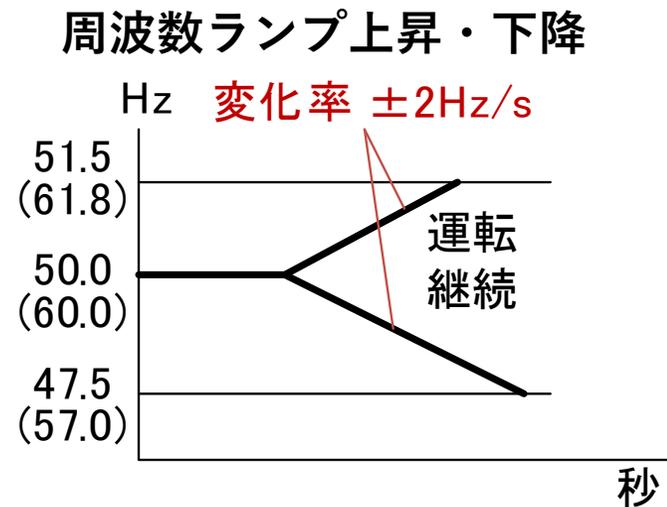
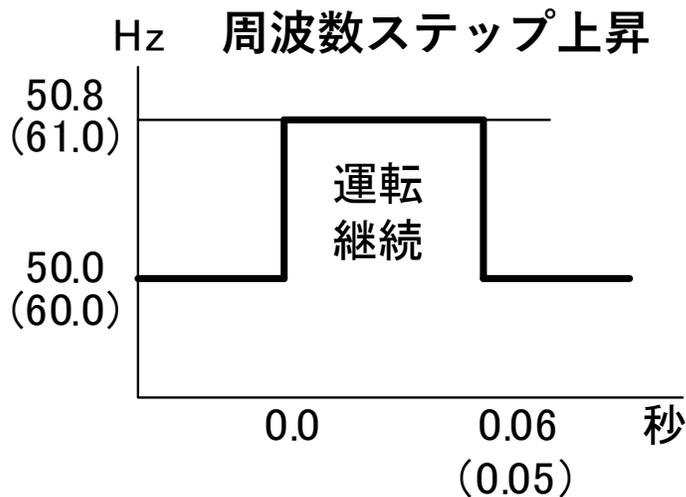
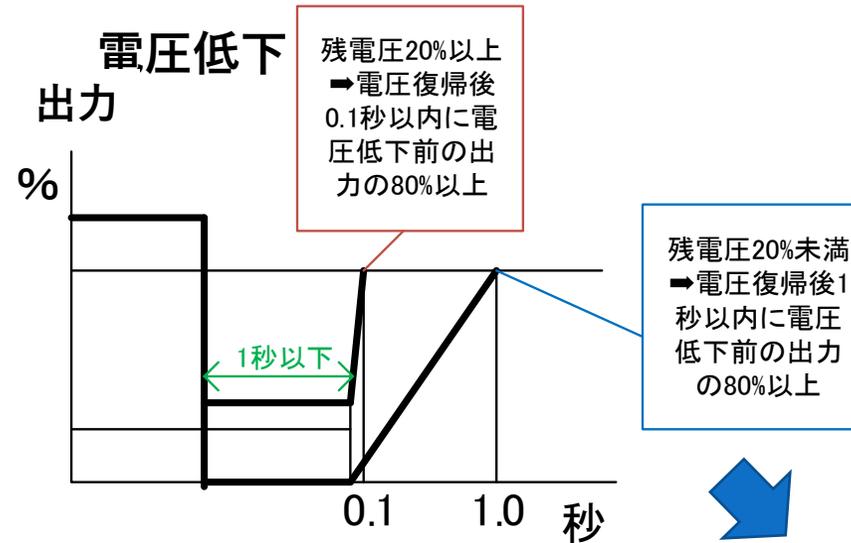
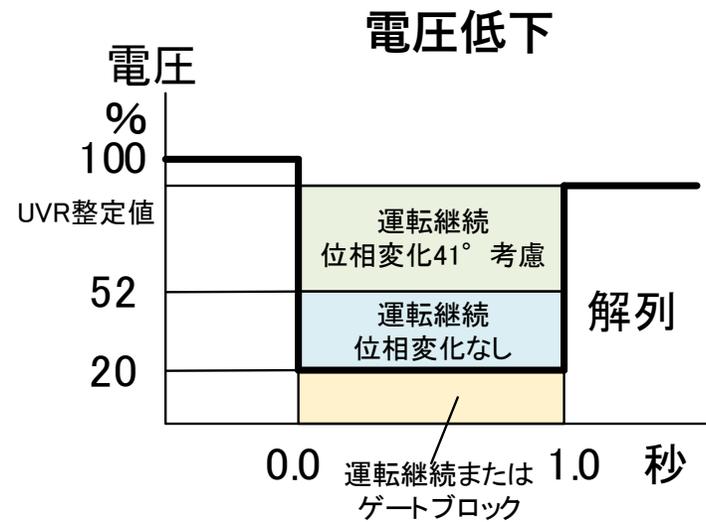
課題：系統連系要件

- 発電設備に対して、瞬時電圧低下時の運転継続や電圧復帰直後の速やかな出力復帰特性及び周波数変動時の運転継続（FRT, Fault Ride Through要件）に関する規定



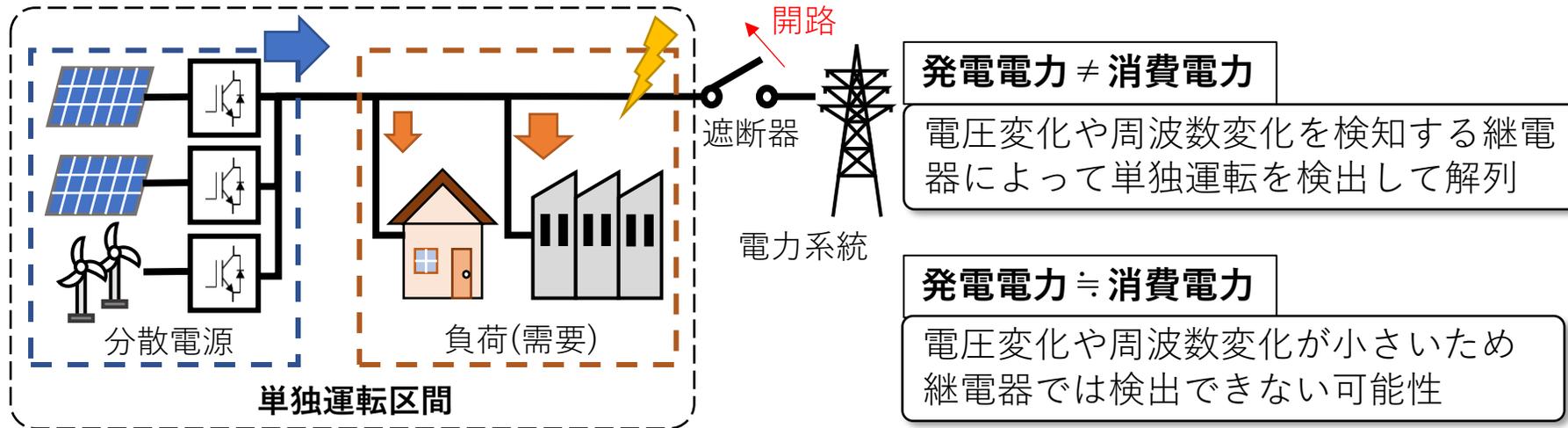
- 瞬時電圧低下（瞬低）などの擾乱による分散電源の一斉脱落を防ぐ
- 瞬低時の運転継続機能はLVRT（Low Voltage Ride Through）とも呼ばれる

■ 低圧配電線連系の单相太陽光発電設備に対するFRT要件の例



VSGインバータは速やかに出力を増加できない可能性がある

単独運転…発電設備の運転による電力供給のみで通電している状態



単独運転の危険性

感電、連系機器の損傷、事故調査や消防活動への影響、再閉路時の位相差による事故など

分散電源などの発電設備は単独運転防止対策を採る義務がある

逆変換装置に適用される単独運転検出方式

単独運転検出方式

- 受動的方式…単独運転移行時の電圧・周波数変化を検出
- 能動的方式…出力電力や位相に変動を常時与えることで単独運転移行時の変動を検出

ステップ注入付周波数フィードバック方式

主に**ステップ注入部**と**周波数フィードバック部**から構成

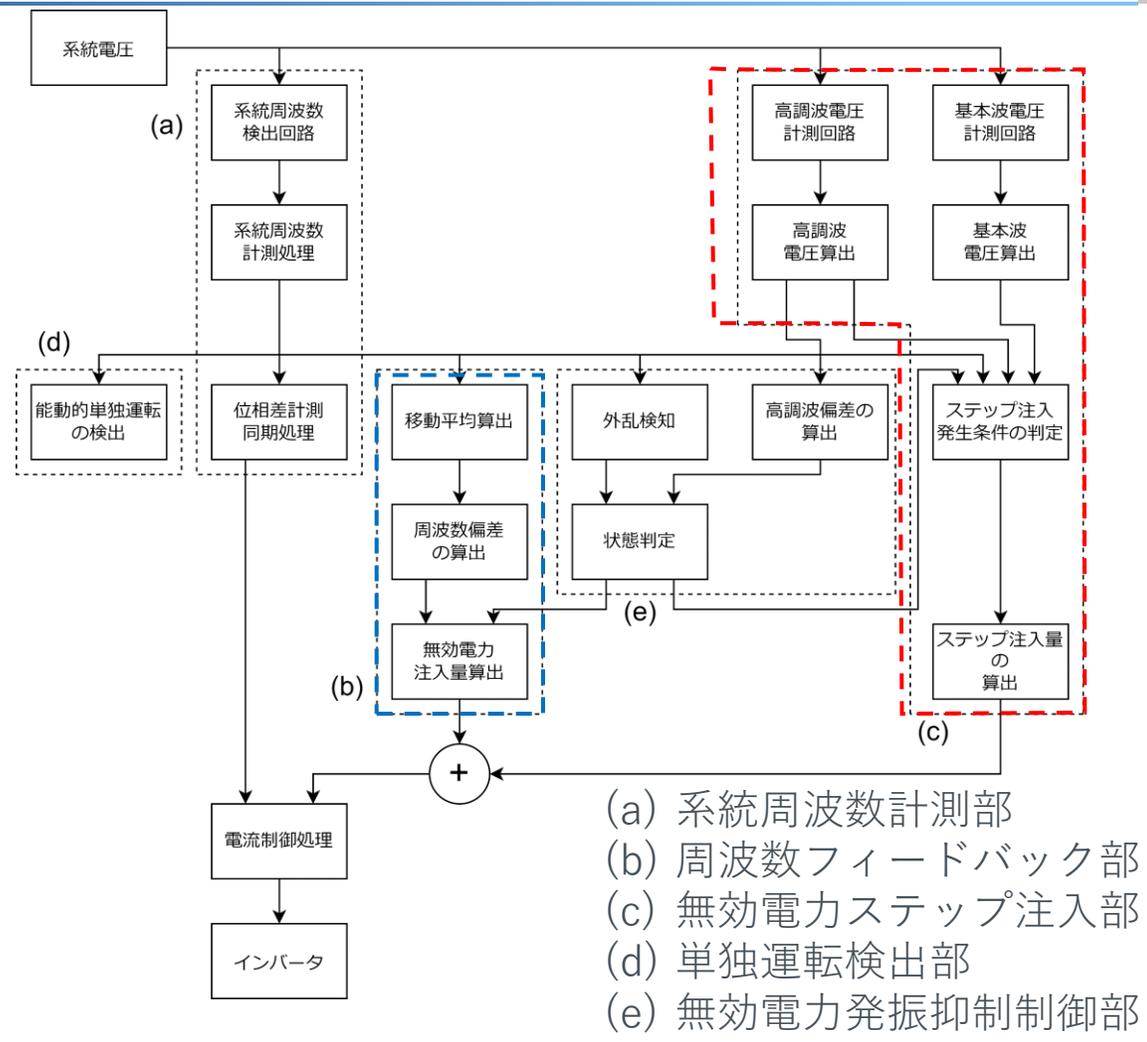
ステップ注入部

周波数変動が少ない場合に無効電力を出力
 →周波数が低下する方向に無効電力を出力
 →周波数フィードバック部が機能

周波数フィードバック部

周波数変動を検出
 →周波数変動を大きくする方向に無効電力を出力

単独運転を検出できない可能性がある



ステップ注入付周波数フィードバック方式の構成^[1]

[1] 日本電機工業会(2015年) JEM1505, 『低圧配電線に連系する太陽光発電用三相パワーコンディショナの標準型能動的単独運転検出方式(ステップ注入付周波数フィードバック方式)』

- 接地
- 保護リレーの設置
- 出力電圧制限・出力電力制限
- 過電流抑制
- 力率一定制御・無効電力制御



インバータは
事故電流を十分に
供給できない可能性がある

将来的には通信を用いた制御が行われる可能性

課題：過電流対策

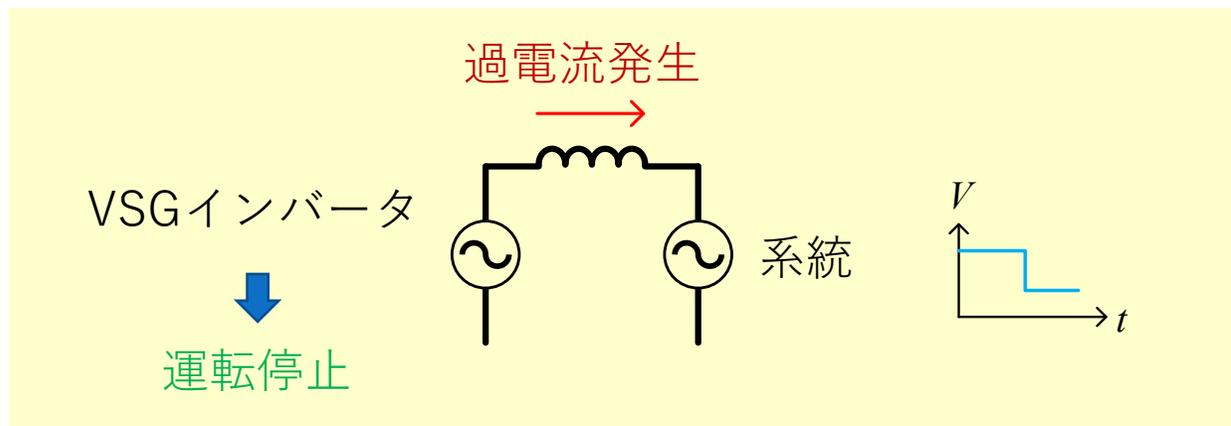
VSG制御は電圧源 → 出力電流は負荷・系統電圧によって決定

●事故時や瞬時電圧低下時に過電流発生

→ 過電流でインバータ運転停止

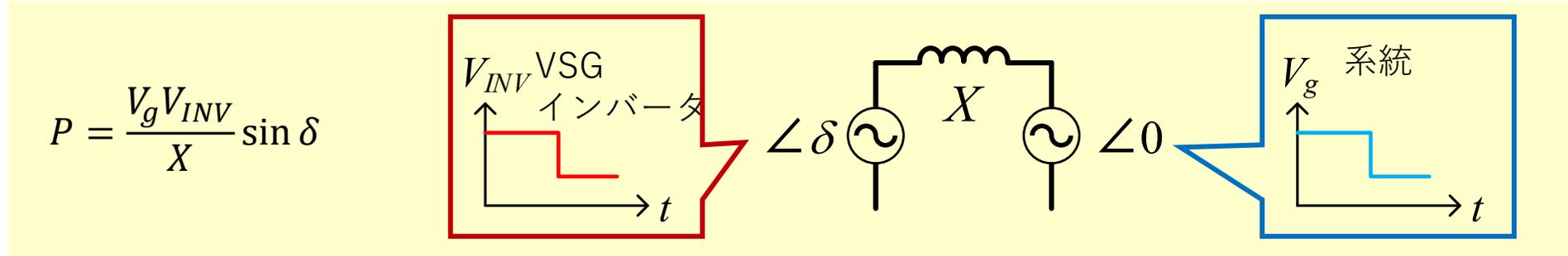
✓事故時運転継続機能(Fault Ride Through, FRT)

✓低電圧時運転継続(Low Voltage Ride Through, LVRT)



1. 出力電圧を系統電圧低下にしたがって低下させる

系統電圧振幅（実効値）を検出し比例して出力電圧を低下させ、出力電力を減少させる



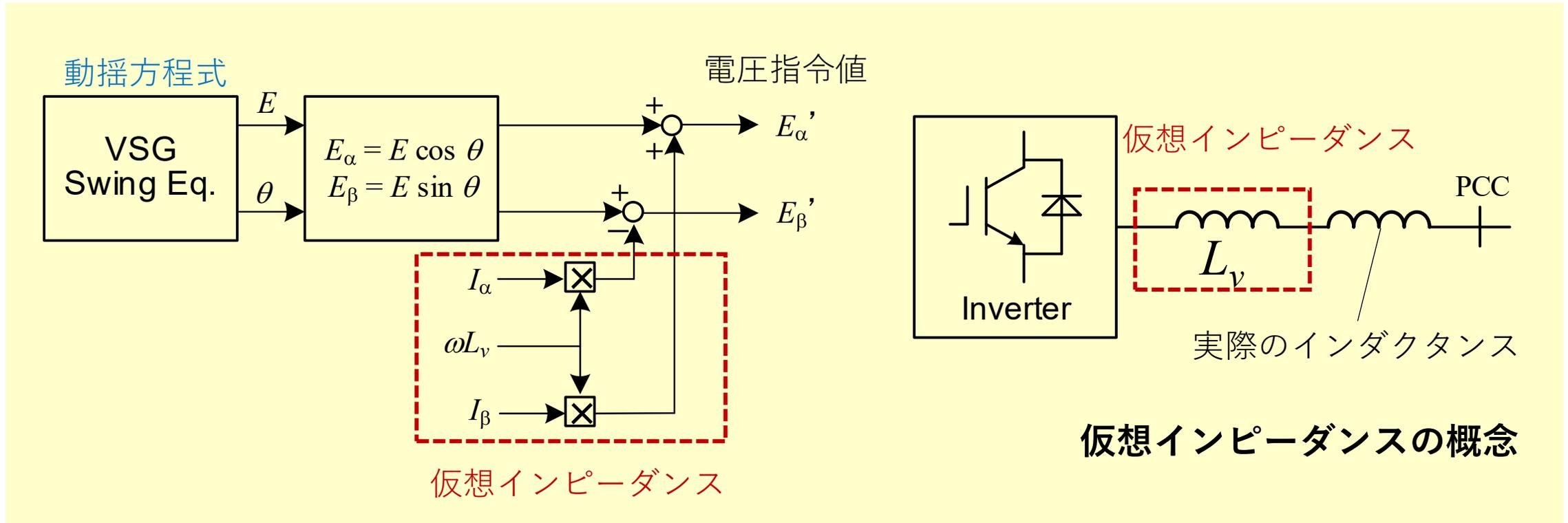
2. 仮想インピーダンスを設ける

制御系で仮想的に出カインピーダンスを設け過電流を抑制する

3. 電流制御（電力制御）を行う

電流型VSGであれば、あるいは後段に電流制御ループがあれば、電流フィードバックを行い過電流を抑制する

- 制御系において仮想的に出カインピーダンスを挿入し過電流抑制
- 連系インピーダンスを変更できるためインバータの運転安定性に寄与可能（仮想インダクタンス，仮想キャパシタンス）

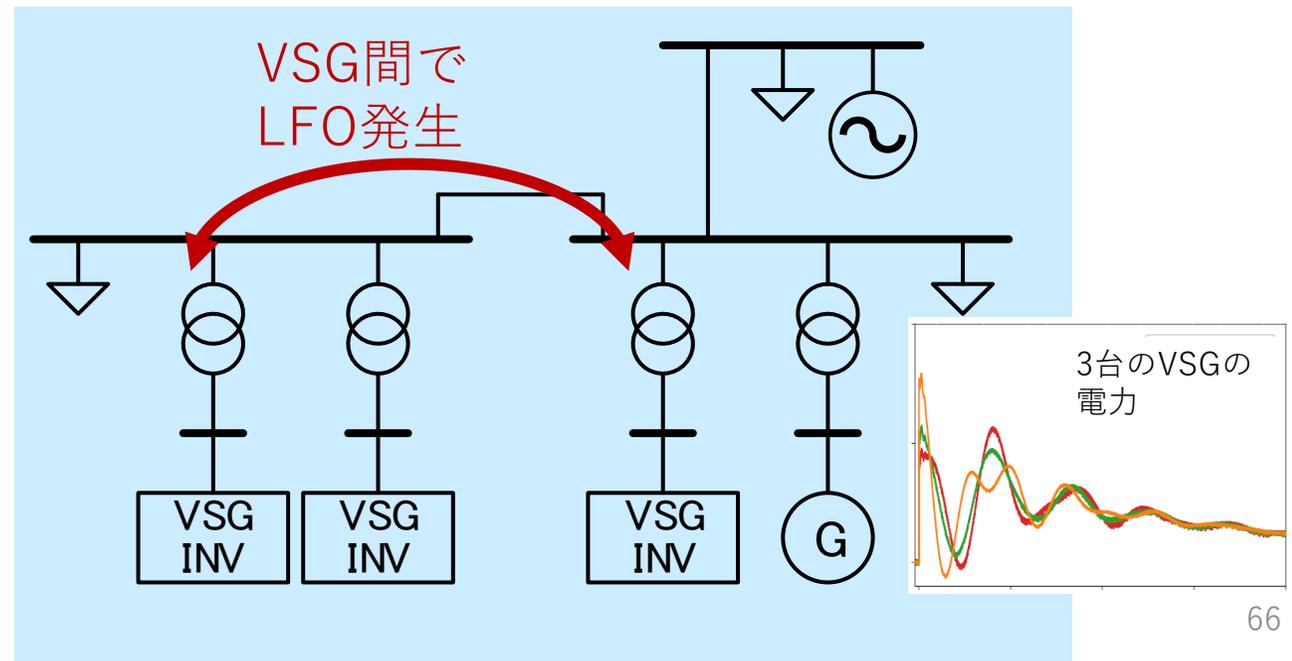
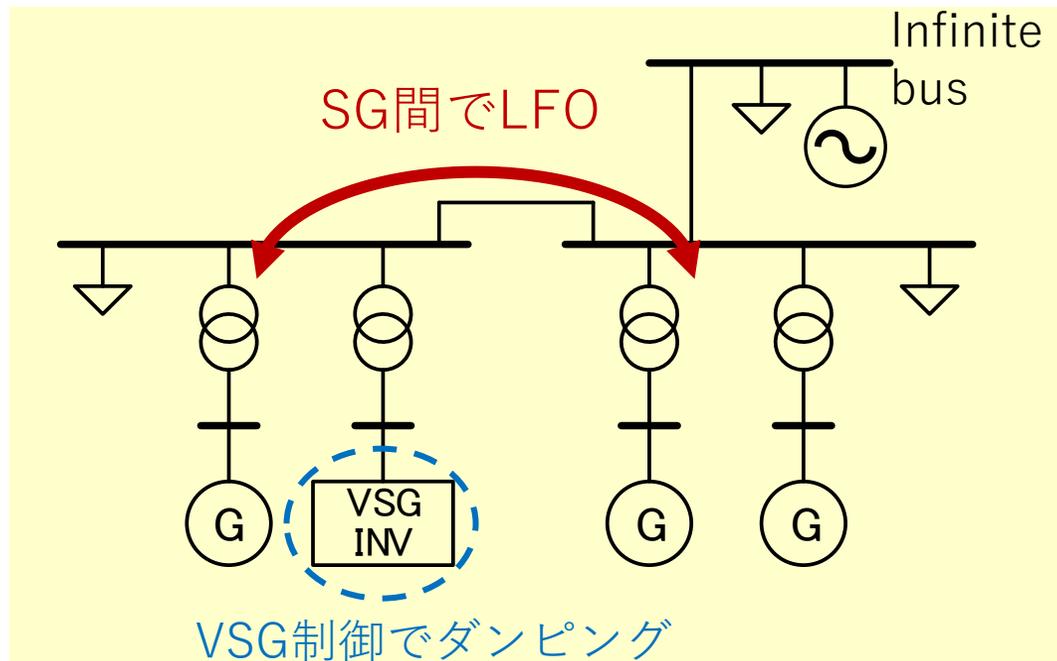


課題：低周波電力振動

Low Frequency Oscillation, LFO

低周波電力振動 (Low Frequency Oscillation, LFO)

- 同期発電機と同様に，複数の同期発電機・VSGインバータが存在する場合に，複数の振動モードが存在し，低周波の電力振動（LFO）が発生する可能性がある
- VSG制御によってLFOをダンピング（同期発電機に比べ効果的にダンピング可能。適応制御など） → 制御パラメータを不適切に設定すると悪影響



まとめ

- インバータ連系による再生可能エネルギー電源の大量導入による電力システムの慣性不足の問題解決のために、仮想同期発電機（VSG）制御をはじめとするGFMインバータが注目されている
- インバータ連系のためには疑似慣性動作をできることが要求されるようになると予想される
- 直流送電も非同期電源であり、慣性を供給できないが研究は進められている