



HIROSHIMA UNIVERSITY

# grid-forming電力変換器に関する研究動向

関崎 真也 (広島大学)

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

2025年12月11日 産学合同セミナー

# 講演内容

背景

GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

GFMにおける電流制限

GFMプロジェクト・GFM製品

近年のGFM制御に関する動向

GFMに関する展望

# 講演内容

## 背景

GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

GFMにおける電流制限

GFMプロジェクト・GFM製品

近年のGFM制御に関する動向

GFMに関する展望

# 背景

## ➤ 再エネ導入に伴う問題

- ◆ 周波数安定性
- ◆ 過渡安定性
- ◆ 定態安定性

悪化

有効な解決手段（の一つ）：  
grid-forming (GFM) インバータ

## ➤ GFMインバータ

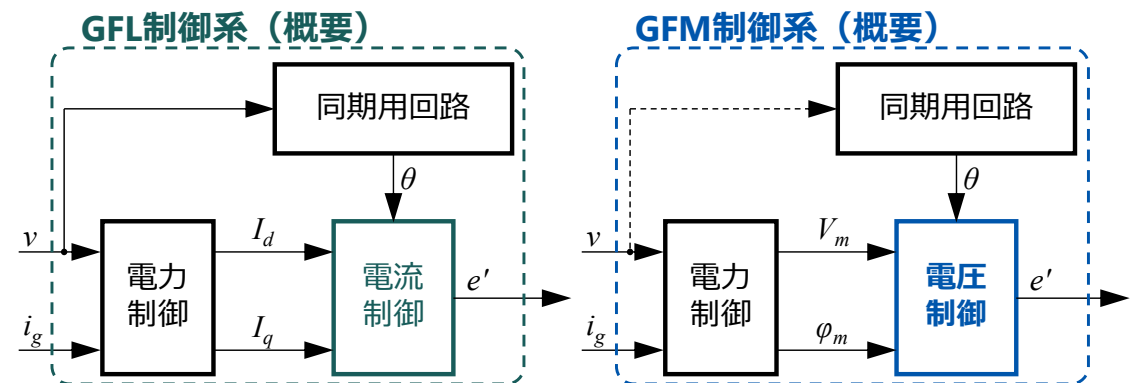
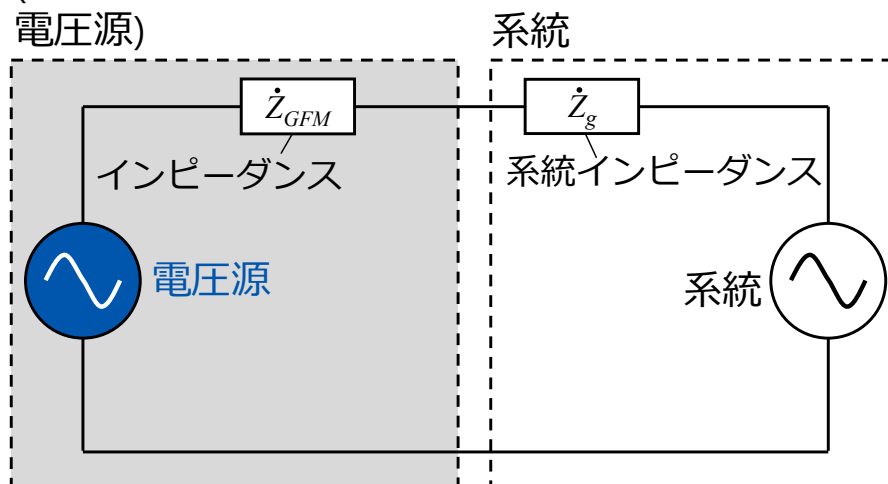
- ◆ （インピーダンスを持つ）**電圧源**として振る舞う\*

⇔ grid-following (GFL) インバータ：**電流源**として制御\*

- ◆ 電圧・周波数を自ら生成．同期機と同様に自立運転が可能

\*H. Wu and X. Wang, "Control of grid-forming CVCs: a perspective of adaptive fast/slow internal voltage source," *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 38, no. 8, pp. 10151–10169, (2023)

### GFMインバータモデル (インピーダンスを持つ 電圧源)



R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu and S. Engelken, "Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 93–109, (2021).

# 背景

## ➤ GFMインバータの利点

- ◆ Phase locked loop (PLL)\*に起因するweak grid\*\*における不安定性を回避

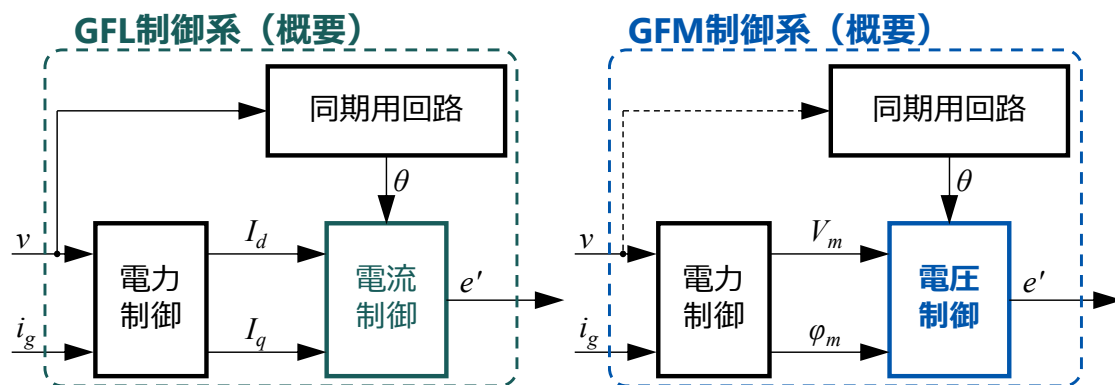
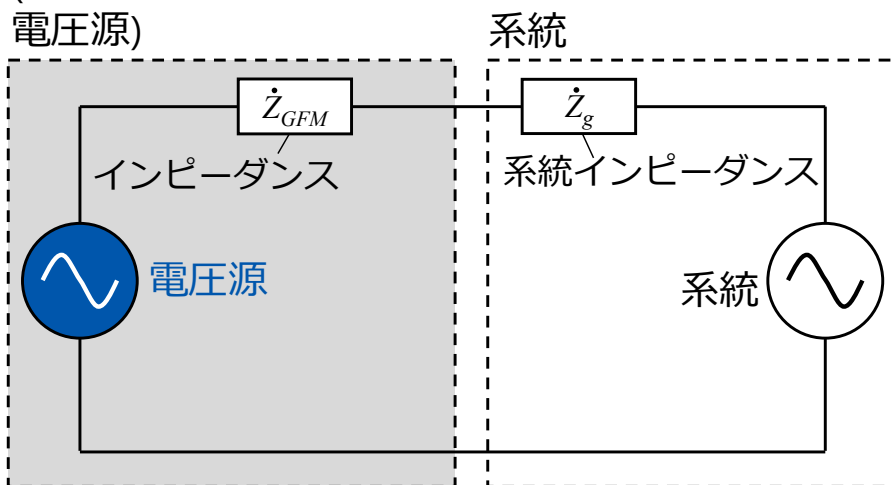
\*GFLインバータでよく用いられる

- \*\*系統の強度: IEEE standard 1204-1197によって定義
  - short-circuit ratio (SCR) > 3 → strong grid
  - $2 \leq \text{SCR} \leq 3$  → weak grid
  - SCR < 2 → very weak grid

- ◆ 故障発生時に系統へ故障電流を供給
- ◆ 系統安定化に貢献 (電圧・周波数維持をサポート)
- ◆ GFLインバータ\*\*\*と比較して定態安定性に優れる

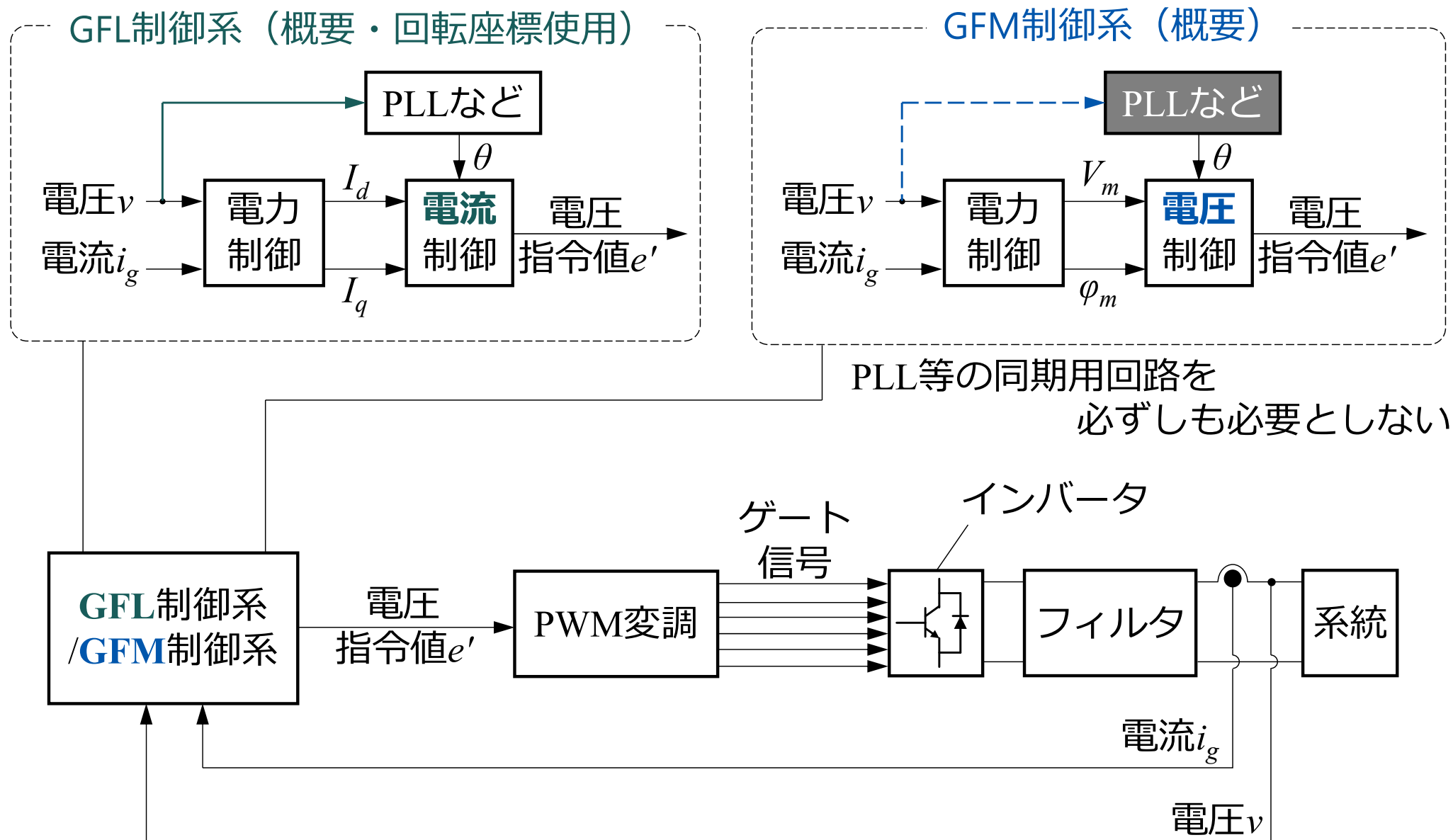
\*\*\*H. Wu and X. Wang, "Control of grid-forming CVCs: a perspective of adaptive fast/slow internal voltage source," *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 38, no. 8, pp. 10151–10169, (2023)

### GFMインバータモデル (インピーダンスを持つ 電圧源)



R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu and S. Engelken, "Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review," *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 93–109, (2021).

# 背景



## ➤ GFM制御

- ◆ North American Electric Reliability Corporation (NERC)\*
- ◆ Australian Energy Market Operator (AEMO)\*\*
- ◆ 「系統条件の急峻な変動時に内部電圧フェーズを一定, またはほぼ一定に維持する制御」と定義\*,\*\*

→ 周波数や電圧を維持する電圧源

\* North American Electric Reliability Corporation, Atlanta, GA, USA. (2021). Grid Forming Technology Bulk Power System Reliability Considerations.

\*\* “Voluntary Specification for Grid-forming Inverters,” AEMO, May 2023.

### 代表的なGFM制御手法（概要については後述）

名称	本資料における日本語訳
droop control	ドループ制御
virtual synchronous generator (VSG)	仮想同期発電機
power synchronization control (PSC)	有効電力同期制御
synchronverter	シンクロンバータ
virtual oscillator control (VOC)	仮想発振器制御
matching control	マッチング制御

- M. Tozak, S. Taskin, I. Sengor and B. P. Hayes, “Modeling and control of grid forming converters: A systematic review,” IEEE Access, vol. 12, pp. 107818–107843, (2024).
- H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).

# 講演内容

背景

## GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

GFMにおける電流制限

GFMプロジェクト・GFM製品

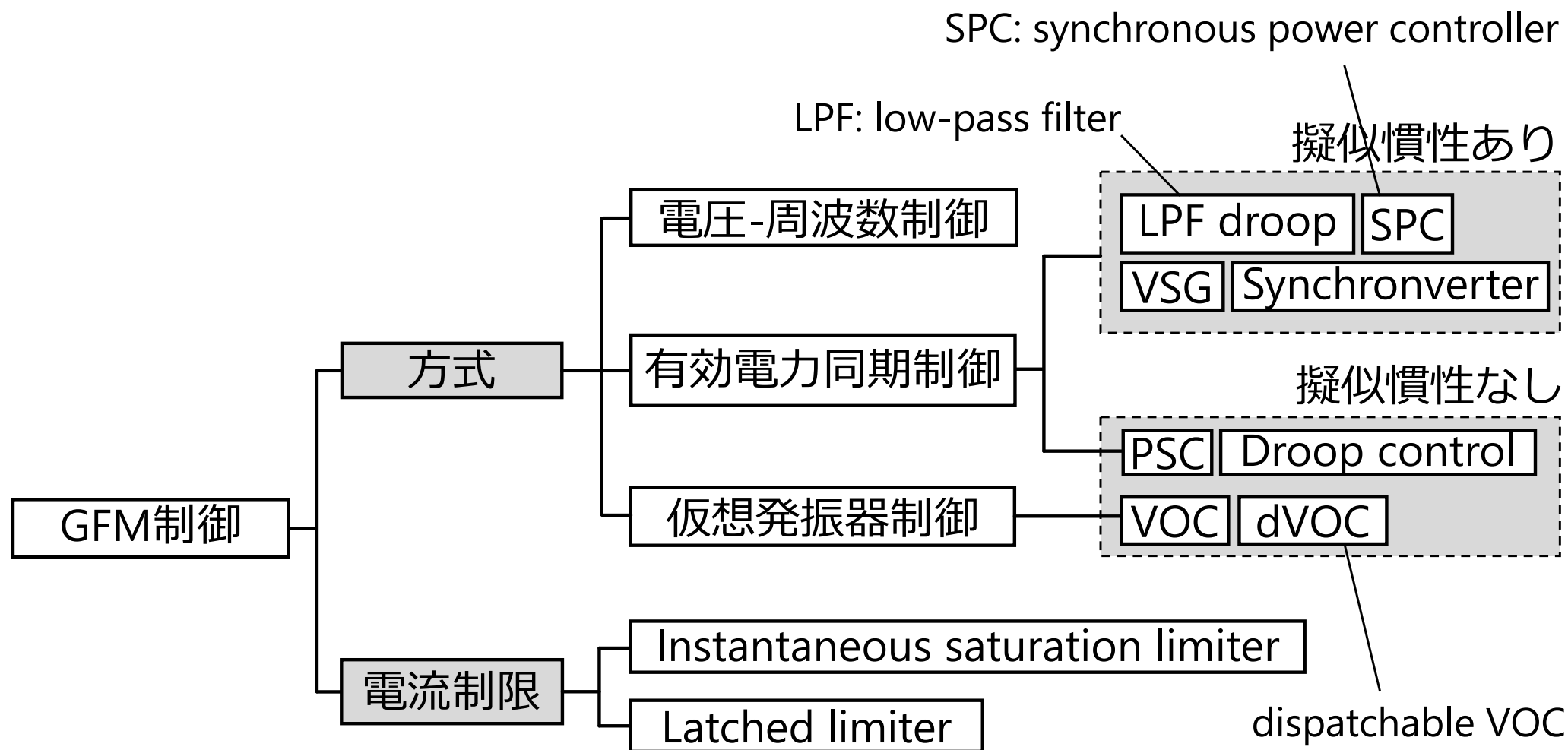
近年のGFM制御に関する動向

GFMに関する展望



# GFM制御の概要

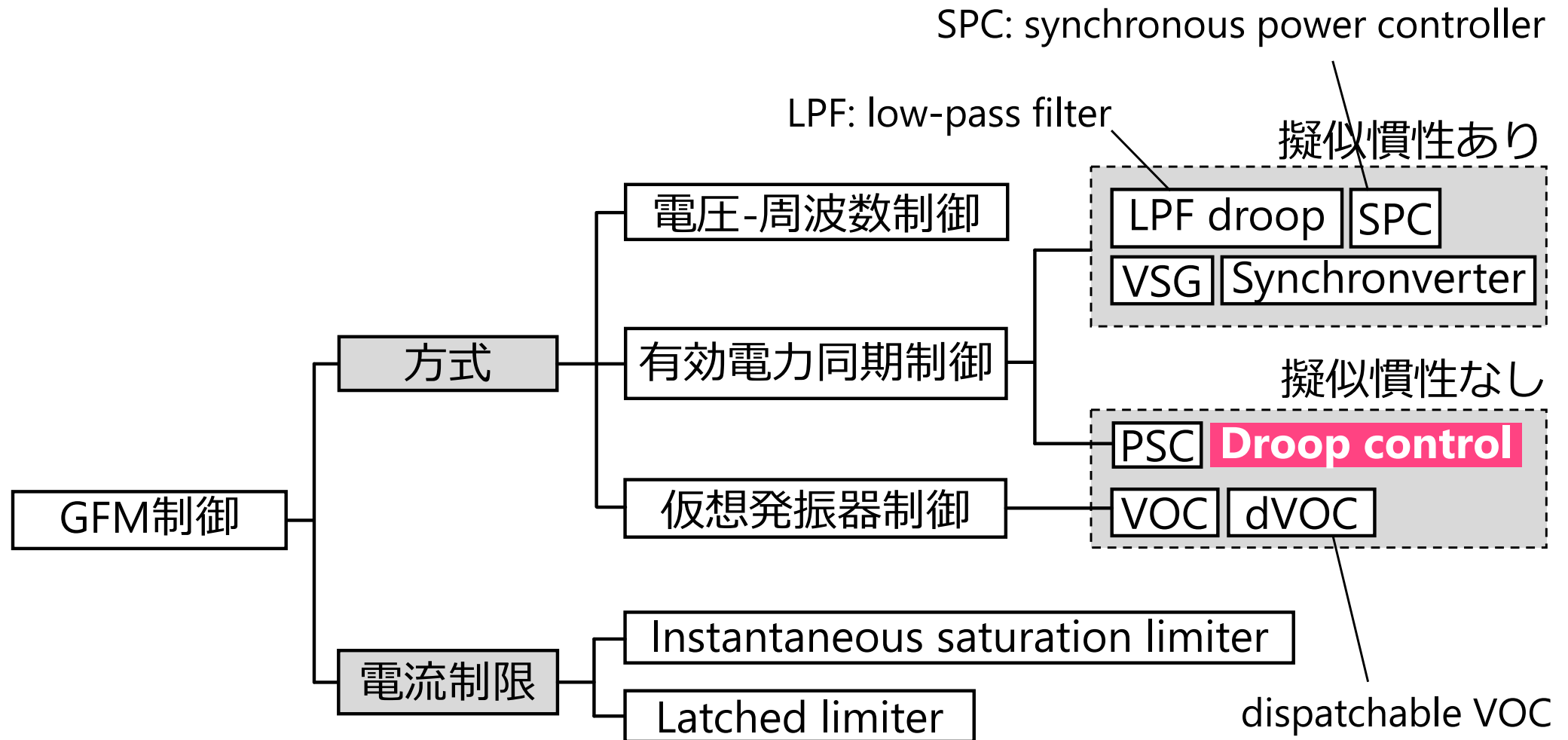
## ➤ Zhang et al.(2021)\* によるGFM制御の分類



\*H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).

# GFM制御（ドループ制御）

## ➤ Zhang et al.(2021)\* によるGFM制御の分類

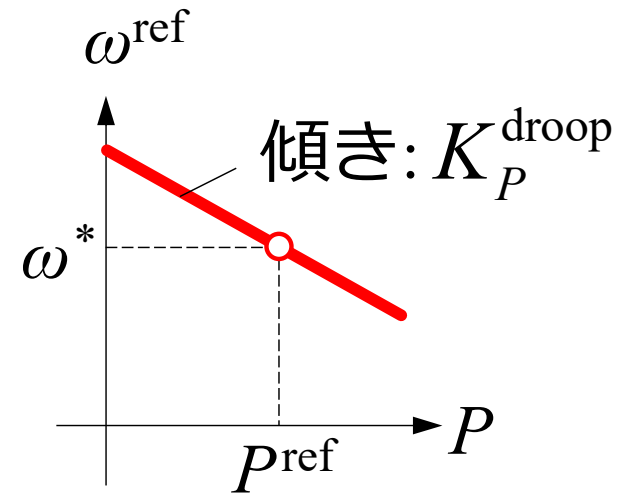
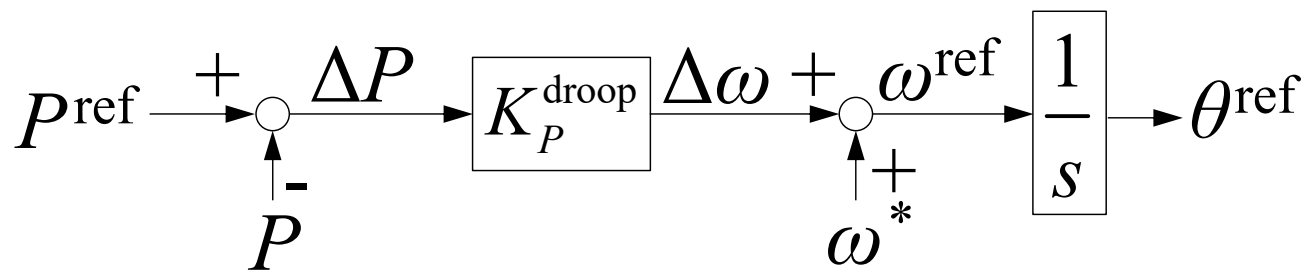


\*H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).

# GFM制御（ドループ制御）

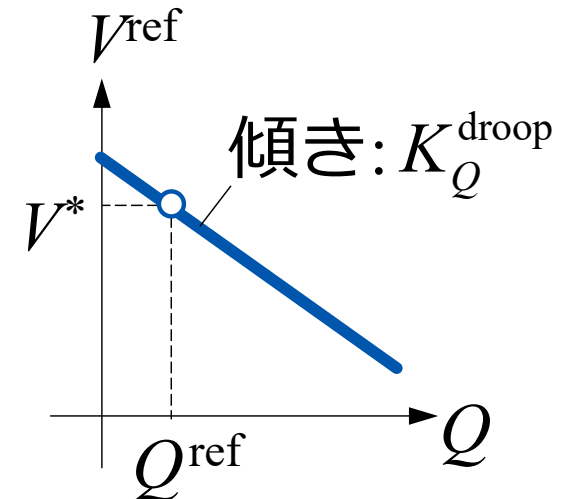
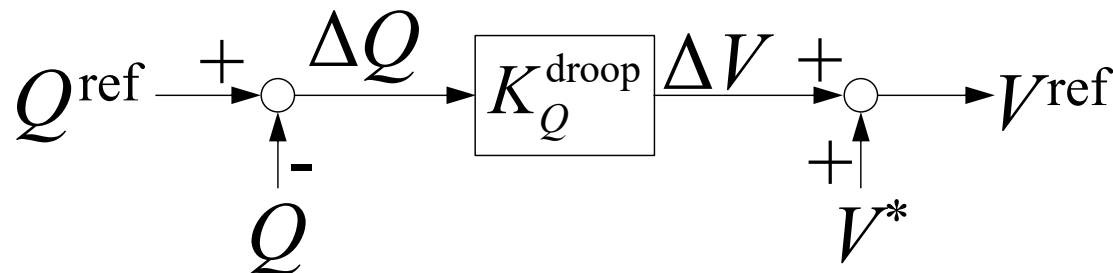
## ドループ制御

- ◆ 同期発電機の速度ドループ機構に類似
- ◆ 構造が単純で広く用いられる



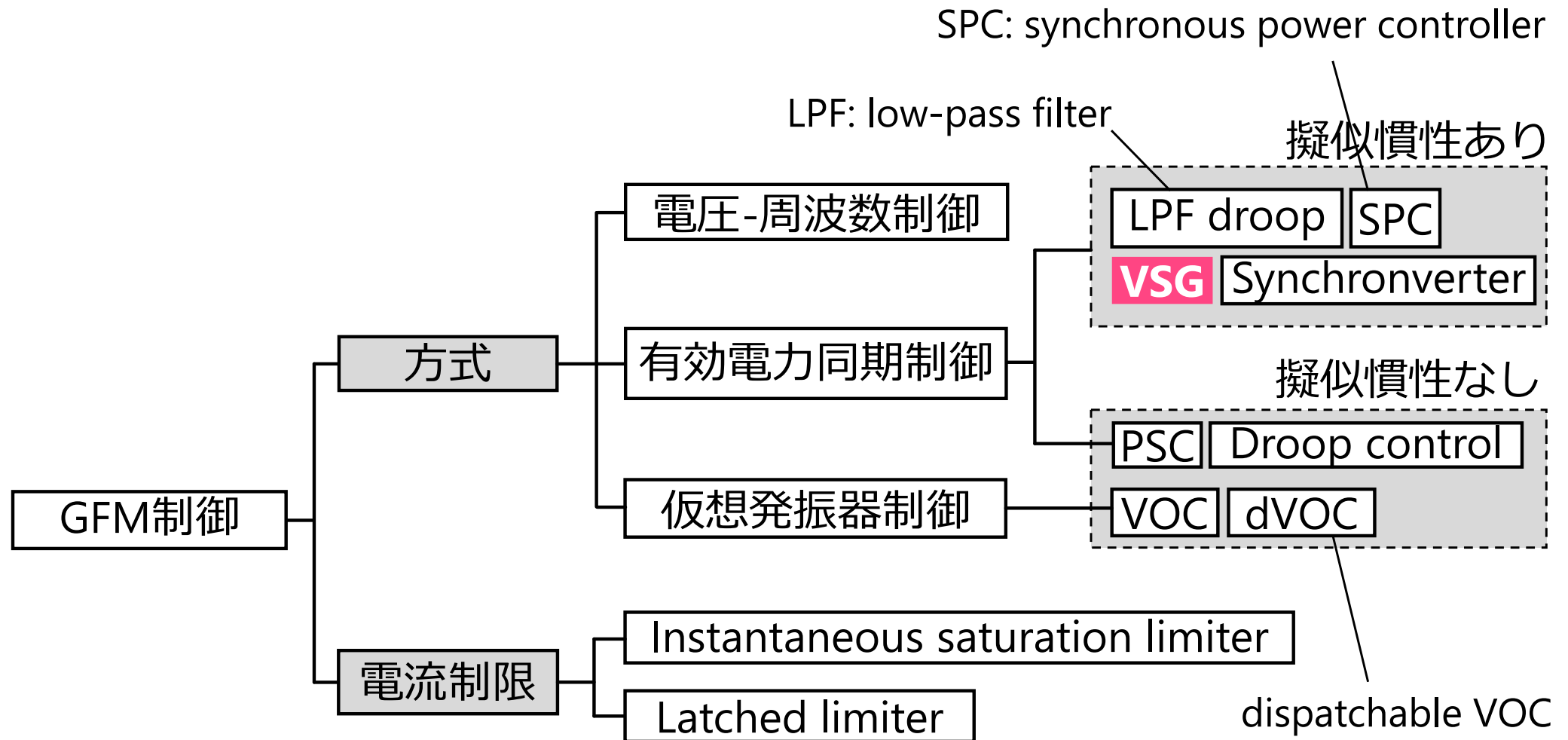
➤ 有効電力制御

➤ 無効電力制御



# GFM制御（仮想同期発電機(VSG)制御）

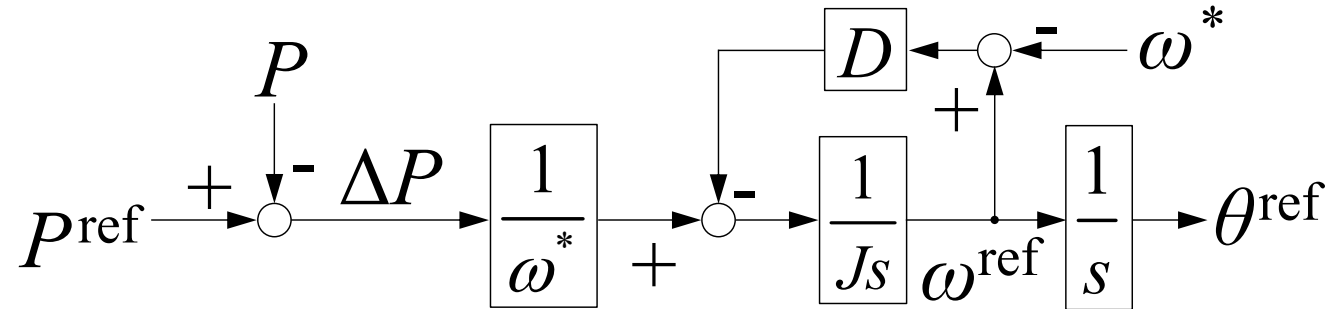
## ➤ Zhang et al.(2021)\* によるGFM制御の分類



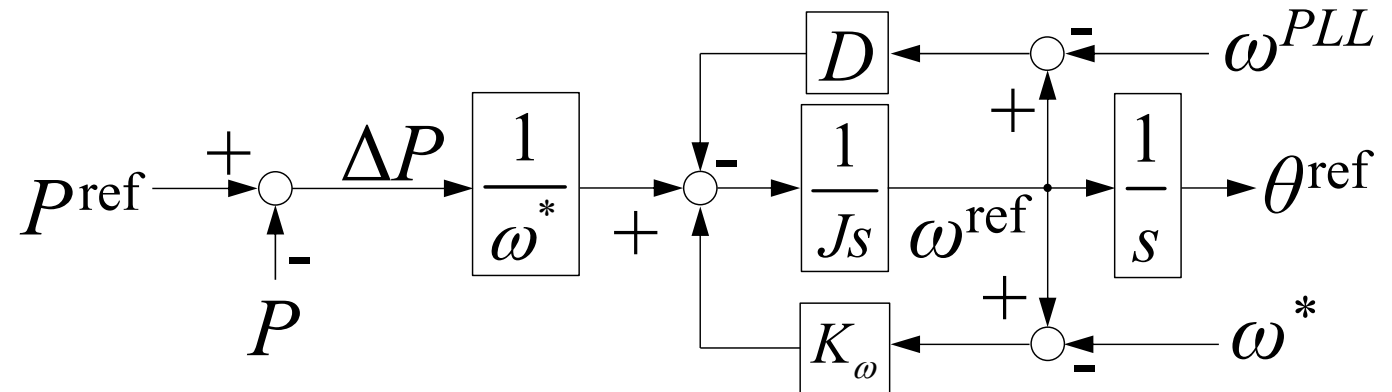
\*H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).

# GFM制御（仮想同期発電機(VSG)制御）

VSG制御系に基づく  
有効電力制御器

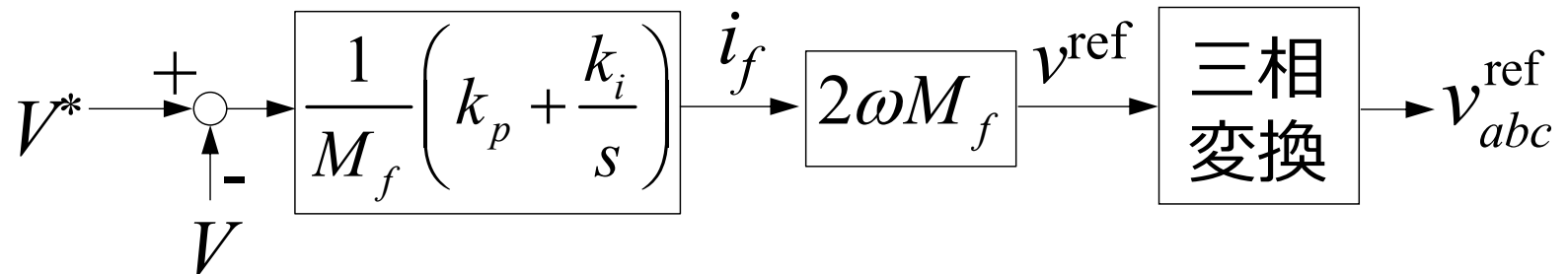


VSG制御系に基づく  
有効電力制御器  
+  
周波数ドループ制御



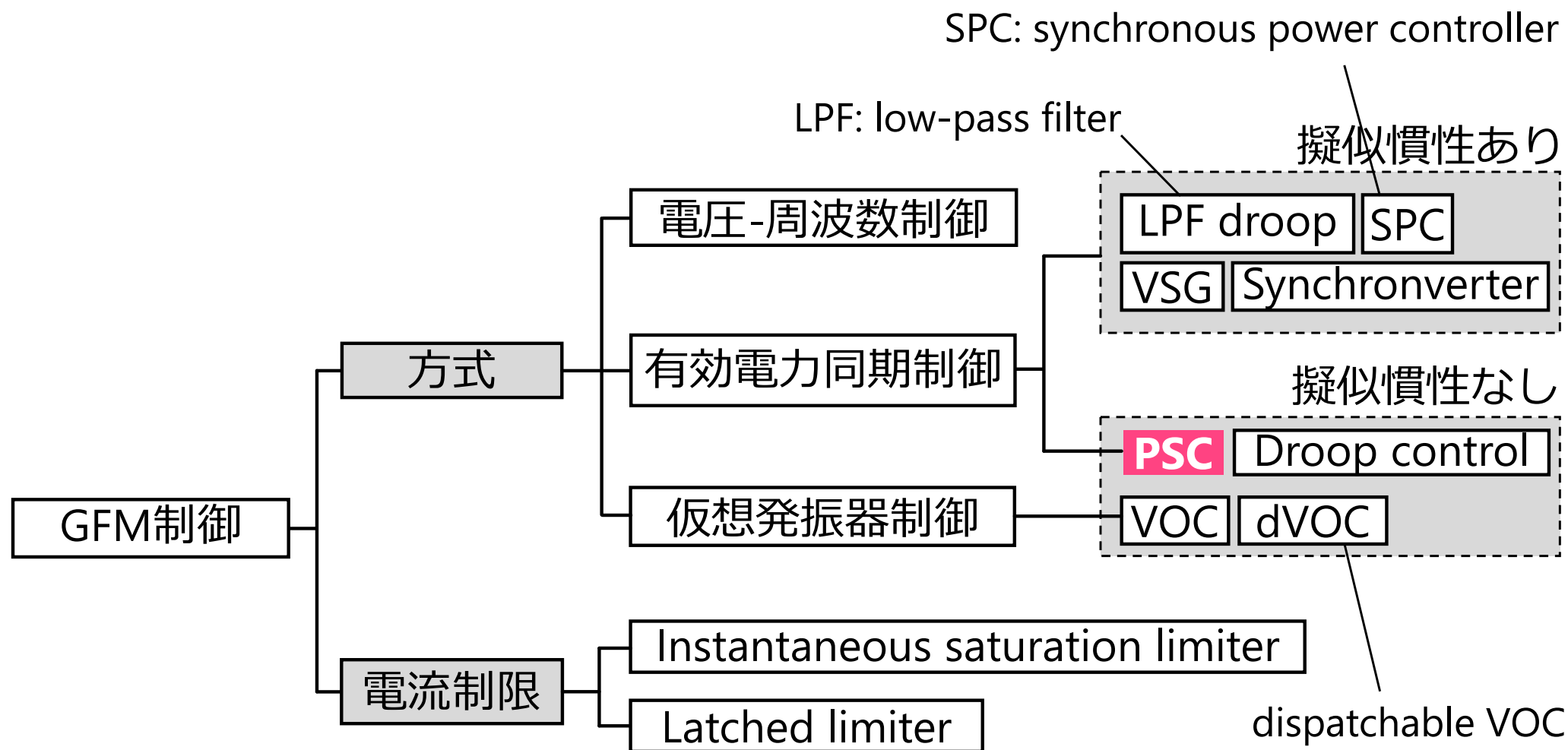
➤ 有効電力制御系

➤ 電圧制御系



# GFM制御 (power synchronization制御: PSC)

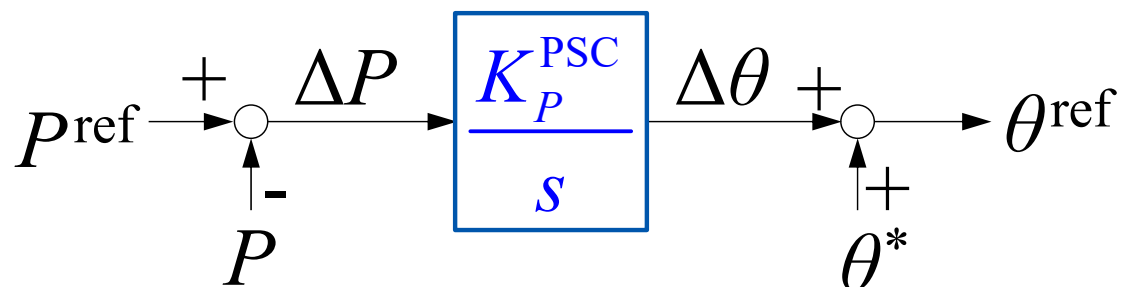
## ➤ Zhang et al.(2021)\* によるGFM制御の分類



\*H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).

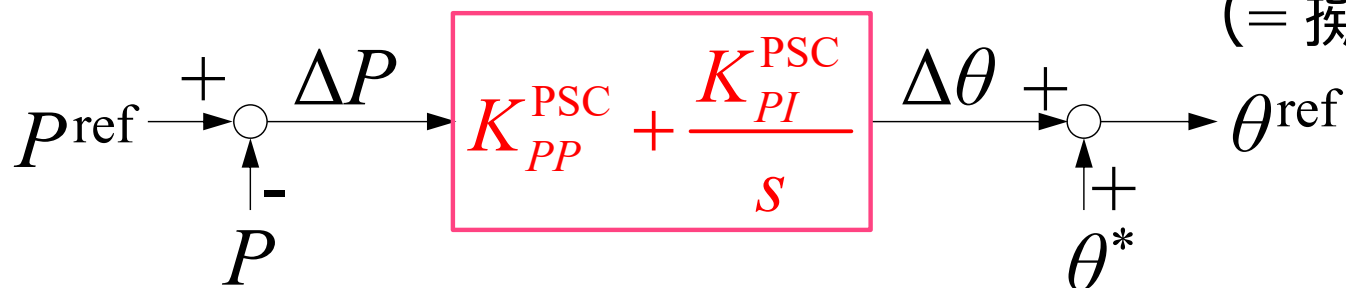
# GFM制御 (power synchronization制御: PSC)

○ 位相演算に積分器を使用



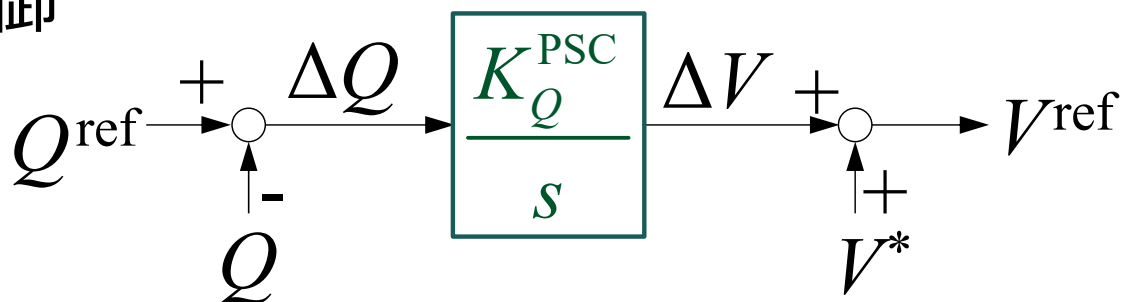
$P^{\text{ref}}$ : 有効電力指令値  
 $\theta^{\text{ref}}$ : 位相角指令値

○ 積分器の代わりに比例積分制御を位相演算に使用  
(= 擬似慣性あり)



位相制御

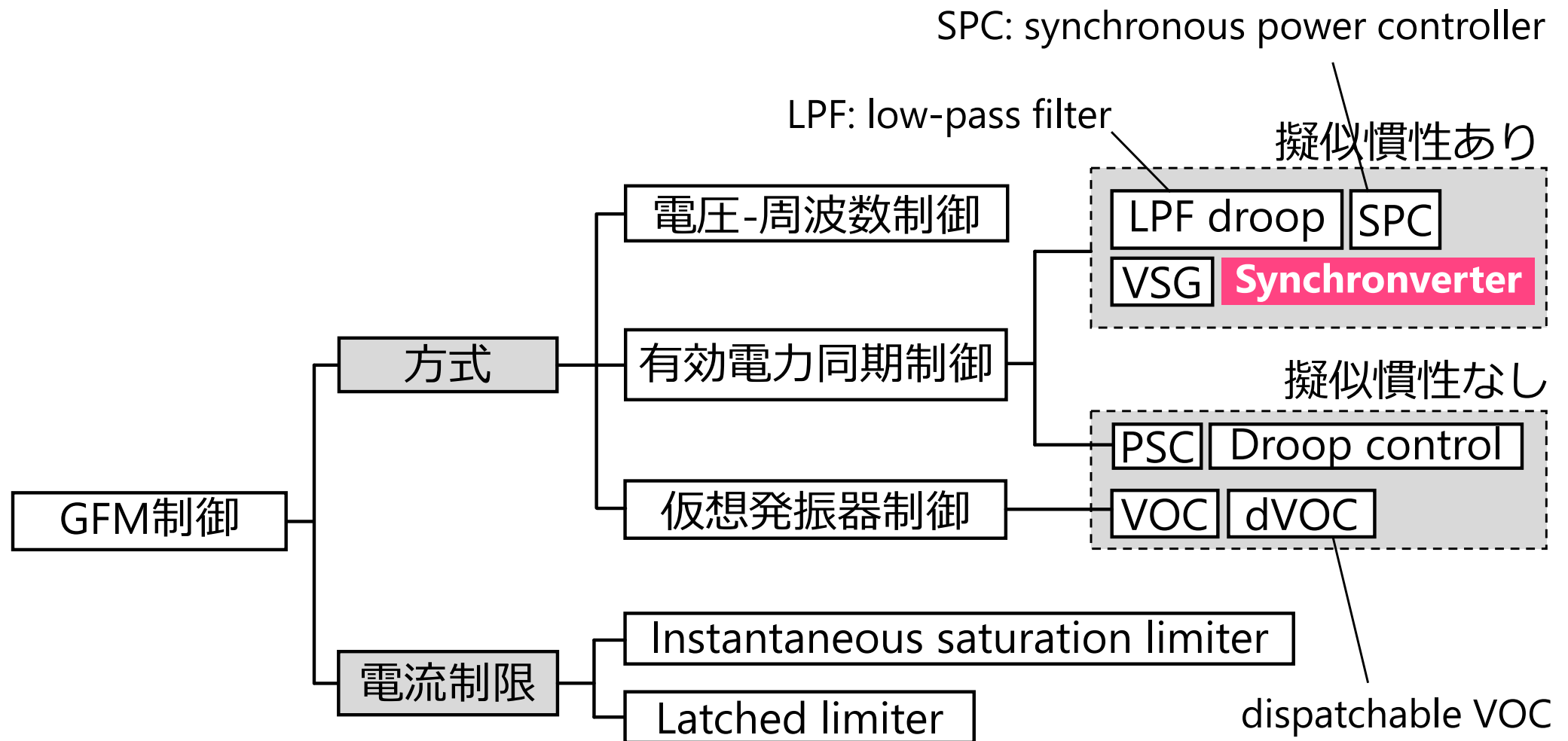
電圧制御



$Q^{\text{ref}}$ : 無効電力指令値  
 $V^{\text{ref}}$ : 電圧指令値  
 $V^*$ : 電圧定格値

# GFM制御 (synchronverter)

## ➤ Zhang et al.(2021)\* によるGFM制御の分類

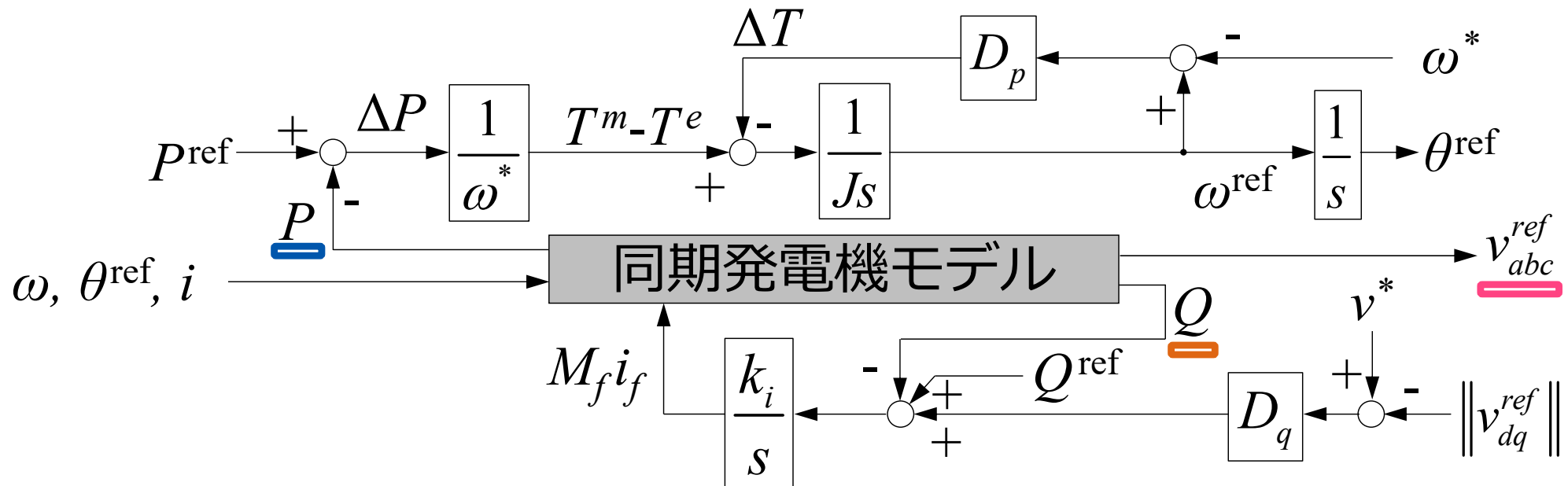


\*H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).



# GFM制御 (synchronverter)

- Synchronverter: Parkの方程式に基づき出力電圧を演算



$$\underline{v_{abc}^{\text{ref}}} =$$

$$\omega M_f i_f \begin{bmatrix} \sin \theta^{\text{ref}} \\ \sin \left( \theta^{\text{ref}} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left( \theta^{\text{ref}} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

$$\underline{P} =$$

$$M_f i_f \omega^* \begin{bmatrix} i_{o,a} \sin \theta^{\text{ref}} \\ i_{o,b} \sin \left( \theta^{\text{ref}} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{o,c} \sin \left( \theta^{\text{ref}} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

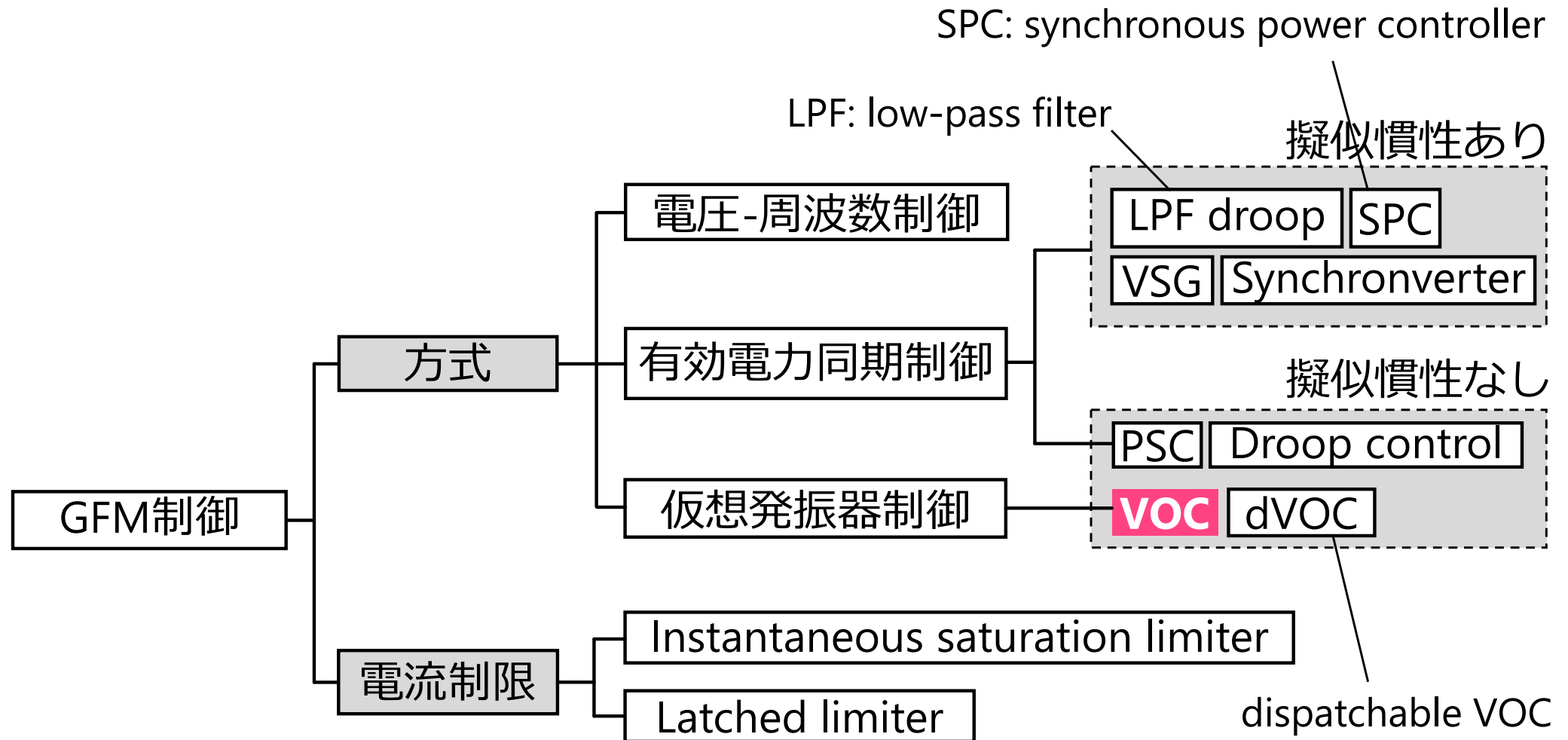
$$\underline{Q} =$$

$$-\theta^{\text{ref}} M_f i_f \begin{bmatrix} i_{o,a} \cos \theta^{\text{ref}} \\ i_{o,b} \cos \left( \theta^{\text{ref}} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{o,c} \cos \left( \theta^{\text{ref}} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 58, no. 4, pp. 1259–1267, (2011).

# GFM制御 (virtual oscillator control)

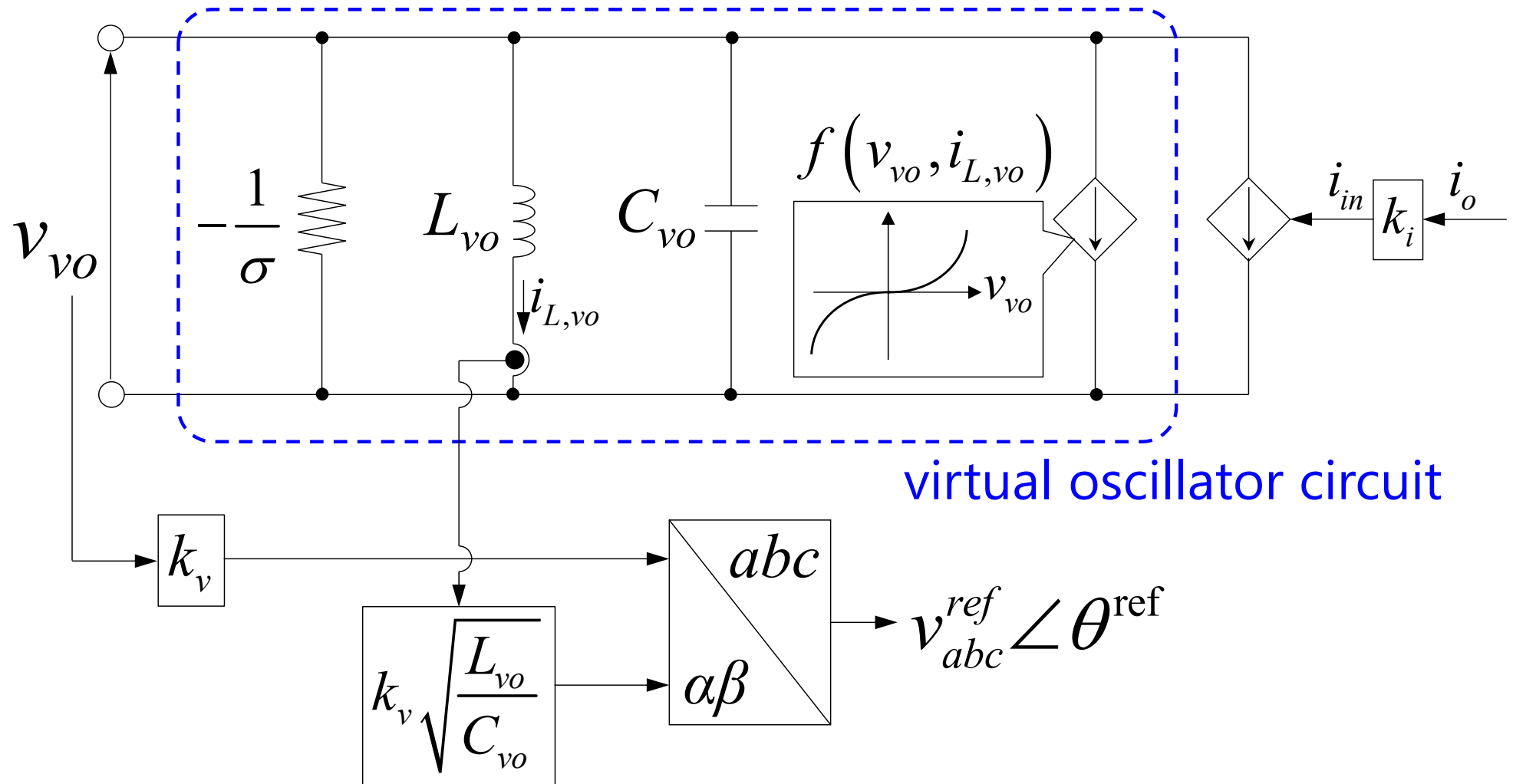
## ➤ Zhang et al.(2021)\* によるGFM制御の分類



\*H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1239–1256, (2021).

# GFM制御 (virtual oscillator control)

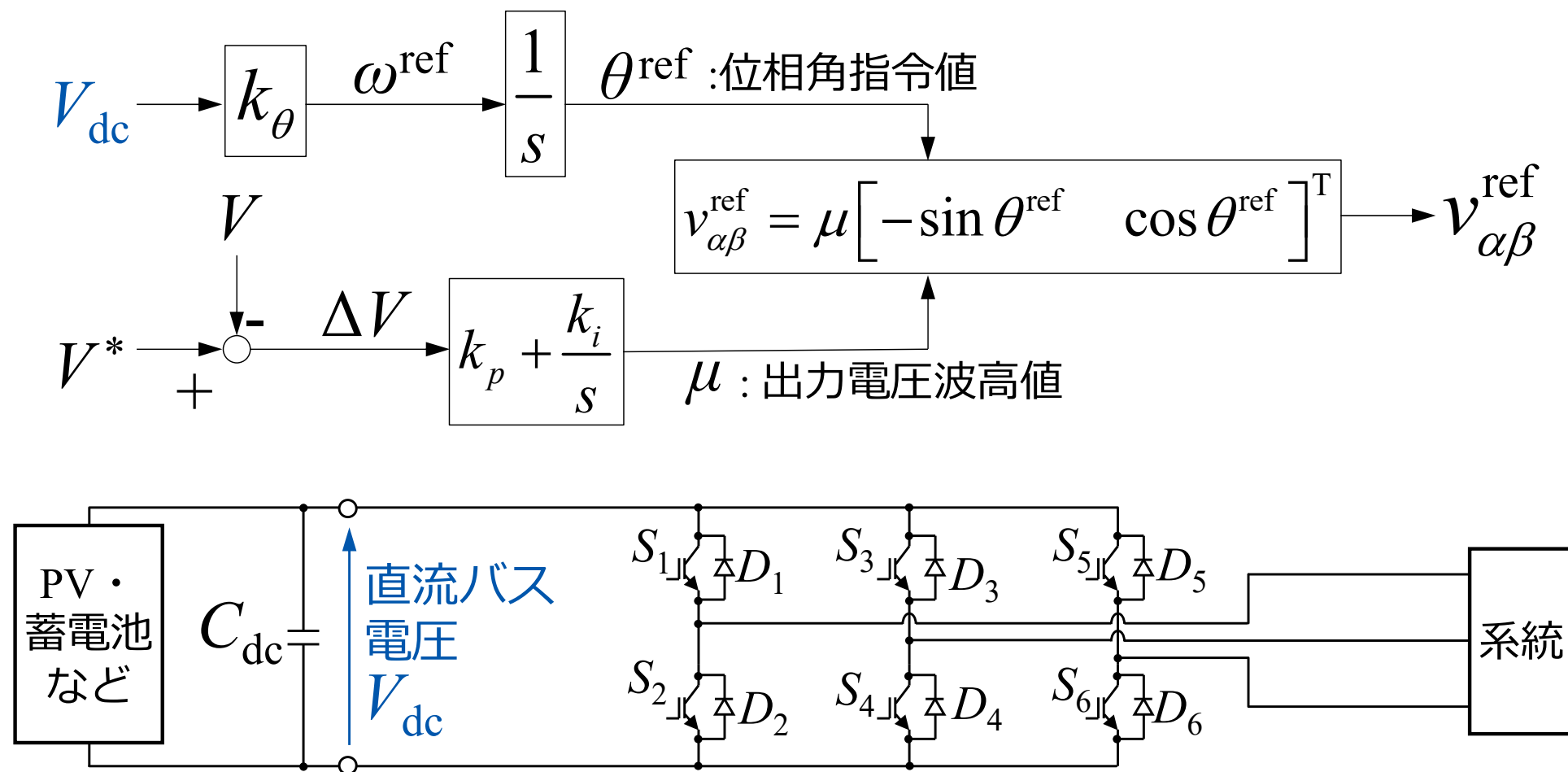
## 仮想発振器制御 (virtual oscillator control: VOC)



B. B. Johnson, S. V. Dhople, A. O. Hamadeh, and P. T. Krein, "Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 11, pp. 6124–6138, (2014).

# GFM制御 (matching control)

- 電力変換器の直流バス電圧の（指令値との）偏差と同期発電機の電気-機械エネルギーの偏差を一致させる制御
- 直流バスのエネルギーを同期発電機の回転エネルギーのように使用



T. Jouini, C. Arghir, and F. Drfler, "Grid-friendly matching of synchronous machines by tapping into the DC storage," IFAC PapersOnLine, vol. 49, no. 22, pp. 192–197, Jan., (2016).  
C. Arghir, T. Jouini, and F. Dörfler, "Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines," Automatica, vol. 95, pp. 273–282, Sep. 2018.

# GFM制御 (matching control)

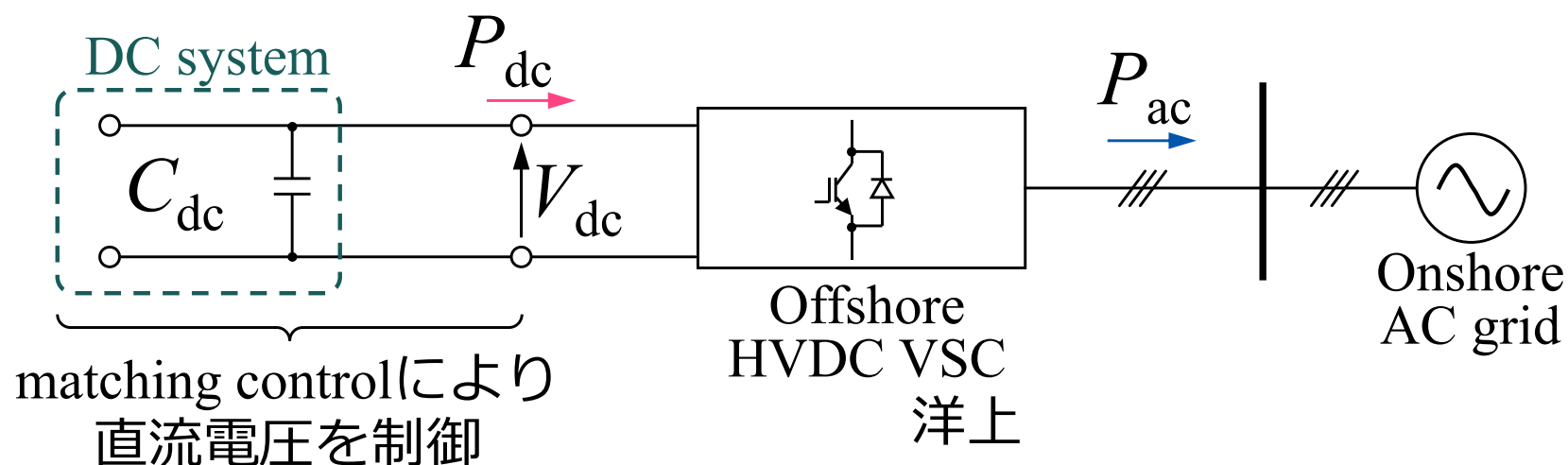
## ➤ Onshore AC grid

◆ 再エネ大量導入によって低慣性や低SCRといった問題

→ HVDCへのGFM制御の適用

## ➤ HVDCでは直流電圧を制御する必要あり

→ matching controlに基づく研究例



- L. Huang, H. Xin, W. Zhen et al., “A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 4, pp. 1565-1577, Dec. 2017.
- O. D. Adeyi, M. Cheah-Mane, J. Liang et al., “Fast frequency response from offshore multiterminal VSC-HVDC schemes,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 6, pp. 2442-2452, Dec. 2017.
- I. Cvetkovic, D. Boroyevich, R. Burgos et al., “Modeling and control of grid-connected voltage-source converters emulating isotropic and anisotropic synchronous machines,” in Proceedings of 2015 IEEE 16<sup>th</sup> Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Vancouver, Canada, Jul. 2015, pp. 1-5.
- F. Milano, F. Dörfler, G. Hug et al., “Foundations and challenges of low-inertia systems (invited paper),” in Proceedings of 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), Dublin, Ireland, Jun. 2018, pp. 1-25.

# 講演内容

背景

GFM制御の概要

**GFMの研究開発状況**

GFMにおける電流制限

GFMプロジェクト・GFM製品

近年のGFM制御に関する動向

GFMに関する展望

# GFMの研究開発状況（期待される役割）

## ➤ GFM制御に期待される役割（系統のサポート）

(from North American Electric Reliability Corporation: NERC)

- ◆ 低SCR系統の運用 (operation in weak grids)
- ◆ 周波数と電圧の安定化  
(stabilizing grid frequency and voltage)
- ◆ 定態安定性の改善 (small signal stability damping)
- ◆ 系統との再同期能力 (resynchronization capability)
- ◆ fault ride-through (FRT)
- ◆ 系統の復旧とブラックスタート  
(system restoration and black start)

# GFMの研究開発状況（系統との同期）

- 電力変換器：系統との同期が重要
- 系統の強度（IEEE standard 1204-1997）
  - ◆ SCRが3を超える系統は “strong”
  - ◆ SCRが2-3の系統は “weak”，SCRが2未満の系統は “very weak”
- 系統との同期方式
  - ◆ PLL使用: weak gridにて不安定  
(⇔ power synchronization control (PSC) : strong gridで不安定)
- GFL制御
  - ◆ SCRの減少に伴い電流制御を介してPLLが相互干渉  
→ 定態安定性の低下問題を引き起こす
- GFM制御
  - ◆ 電圧源の性質 & PSCによる同期 → weak gridにおいて優れる<sup>\*, \*\*, \*\*\*</sup>

\* R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu, and S. Engelken, “Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends—A review,” IEEE Open J. Ind. Appl., vol. 2, pp. 93–109, (2021).  
\*\* R. Rosso, J. Cassoli, G. Buticchi, S. Engelken, and M. Liserre, “Robust stability analysis of LCL filter based synchronverter under different grid conditions,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 6, pp. 5842–5853, (2019).  
\*\*\* R. Rosso, S. Engelken, and M. Liserre, “Robust stability analysis of synchronverters operating in parallel,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 11, pp. 11309–11319, (2019).



# GFMの研究開発状況（電力変換器の保護）

- GFM制御における電流制限の必要性（後スライドで詳細を説明）
  - ◆ 同期発電機は公称電流の5倍までの過電流に耐える
    - ⇔ 電力変換器の過電流耐性は低い
- 外乱発生時におけるGFM制御
  - ◆ 電圧・周波数を調整しようとする間に電流が瞬間的に急増
    - 電流制限はGFM制御において非常に重要
- GFM制御に求められる要件
  - ◆ 様々な系統条件下で安定的に動作
  - ◆ 系統故障に伴う過電流を（適切に）制限
  - ◆ 系統故障除去後に系統と再同期

} 電流制限と関連
- 実用化に向けて解決すべき課題
  - ◆ 電流制限に伴う短絡電流低下 → 保護リレー動作への影響
  - ◆ GFM制御に適した単独運転検出 など

# GFMの研究開発状況（GFM・GFL制御の切替）

- 再生可能エネルギー電源が導入された系統
  - ◆ 再生出力に応じて同期発電機の連系状況が変化
  - ◆ 系統慣性や系統強度が動的に変化
    - ✓ GFM制御が安定となる系統条件A
    - ✓ GFL 制御が安定となる系統条件B
- 対策例
  - ◆ 同期発電機の比率が高い場合にはGFL制御で動作し、  
低い場合にはGFM制御で動作する電力変換器
  - ◆ GFL制御とGFM制御の（スムーズな）切替
- GFL・GFM制御を切り替えることによる利点：○
- GFL制御とGFM制御の両方で動作<sup>\*, \*\*, \*\*\*</sup>

\* Y. Si, N. Korada, Q. Lei, and R. Ayyanar, “A robust controller design methodology addressing challenges under system uncertainty,” IEEE Open J. Power Electron., vol. 3, pp. 402–418, (2022).

\*\* L. Huang, H. Xin, and F. Drfler, “H<sub>∞</sub>-control of grid-connected converters: Design, objectives and decentralized stability certificates,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 11, no. 5, pp. 3805–3816, (2020).

\*\*\*F. Sadeque, D. Sharma, and B. Mirafzal, “Seamless grid-following to grid-forming transition of inverters supplying a microgrid,” in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Mar. 2023, pp. 594–599.

# 講演内容

背景

GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

**GFMにおける電流制限**

GFMプロジェクト・GFM製品

近年のGFM制御に関する動向

GFMに関する展望

# GFMにおける電流制限

Fan et al. (2022)\*によるレビュー論文：電流制御手法を分類

- ① **current limiter**方式  
電流指令値を制限して出力電流を制御
- ② **virtual impedance**方式  
virtual impedanceを増加させることで電流を制限
- ③ **voltage limiter**方式  
出力電圧と連系点電圧の間の電位差を小さくする

	電流制限性能	故障電流の制御性能	故障復帰能力
<b>Current limiter</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>定常状態：○.</li><li>一時的な過電流発生.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>PLLベースのGFL制御への切替</li><li>有効電力指令値の調整</li></ul>	電圧制御系のwindupにより失敗する可能性
<b>Virtual impedance</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>電流制限と安定性の間のトレードオフ</li><li>一時的な過電流</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>VIや系統条件に依存</li><li>電力指令値の調整</li></ul>	平常時の制御に自動的に復帰
<b>Voltage limiter</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>定常状態：○.</li><li>一時的な過電流発生.</li></ul>	voltage limiterと系統パラメータに依存	

B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, "A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 3, pp. 955–969, (2022).

# GFMにおける電流制限

## ➤ current limiter方式：電流指令値を制限

	電流制限性能	故障電流の制御性能	故障復帰能力
Current limiter	<ul style="list-style-type: none"><li>定常状態：○.</li><li>一時的な過電流発生.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>PLLベースのGFL制御への切替</li><li>有効電力指令値の調整</li></ul>	電圧制御系のwindupにより失敗する可能性
Virtual impedance	<ul style="list-style-type: none"><li>電流制限と安定性の間のトレードオフ</li><li>一時的な過電流</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>VIや系統条件に依存</li><li>電力指令値の調整</li></ul>	平常時の制御に自動的に復帰
Voltage limiter	<ul style="list-style-type: none"><li>定常状態：○.</li><li>一時的な過電流発生.</li></ul>	voltage limiterと系統パラメータに依存	

B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, "A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 3, pp. 955–969, (2022).

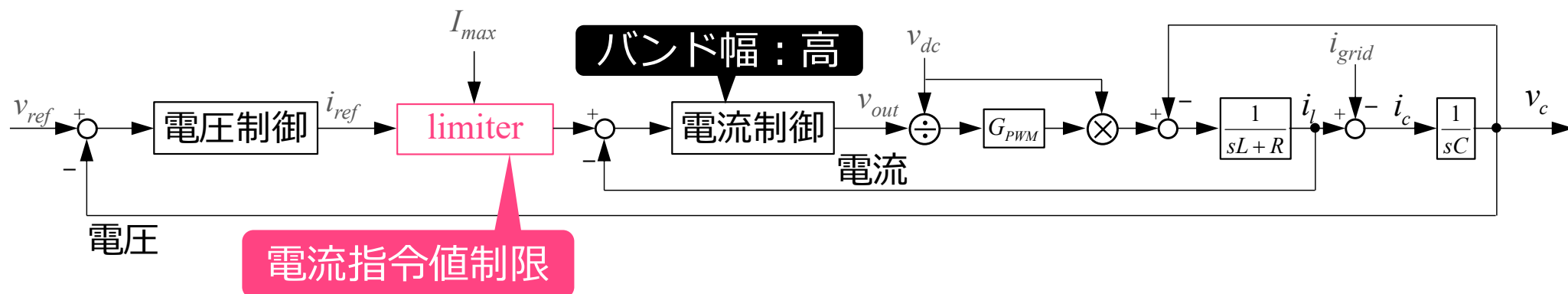
◆ **電流制限性能**：定常状態では○. 一時的な過電流発生.

◆ **故障電流の制御性能**：GFL制御への切替  
有効電力指令値の調整.

◆ **故障復帰能力**：電圧制御系のwindupにより失敗する場合も

# GFMにおける電流制限

## ➤ current limiter方式：電流指令値を制限



### 利点

- ・ 指令値に基づいて電流を制御するため、**高速に電流制限**が可能
- ・ 電流制御系のバンド幅が高いため、**高速**な電流制御が可能

### 欠点

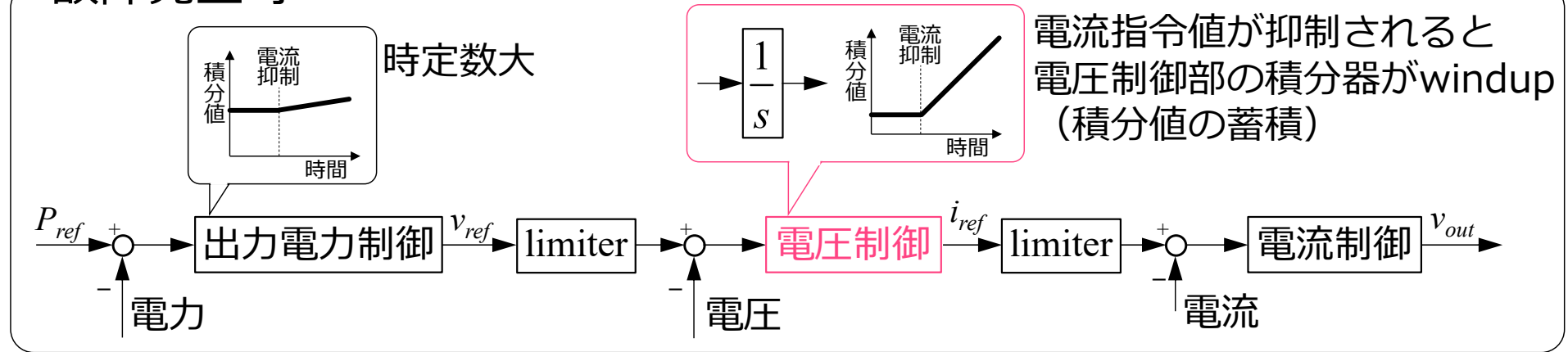
- ・ 電圧・電流のカスケード制御 → 電圧制御系のバンド幅が制限される  
→ 故障除去後の復帰にはwindup対策が必要
- ・ GFL制御への切替方式 → GFM特性が失われる  
→ PLLを用いる場合にはweak gridで不安定化
- ・ GFM制御＋電流指令値抑制 → 適切な対応をとらない場合に過渡安定性悪化\*

\*L. Huang, H. Xin, Z. Wang, L. Zhang, K. Wu, and J. Hu, "Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 578–591, (2019).

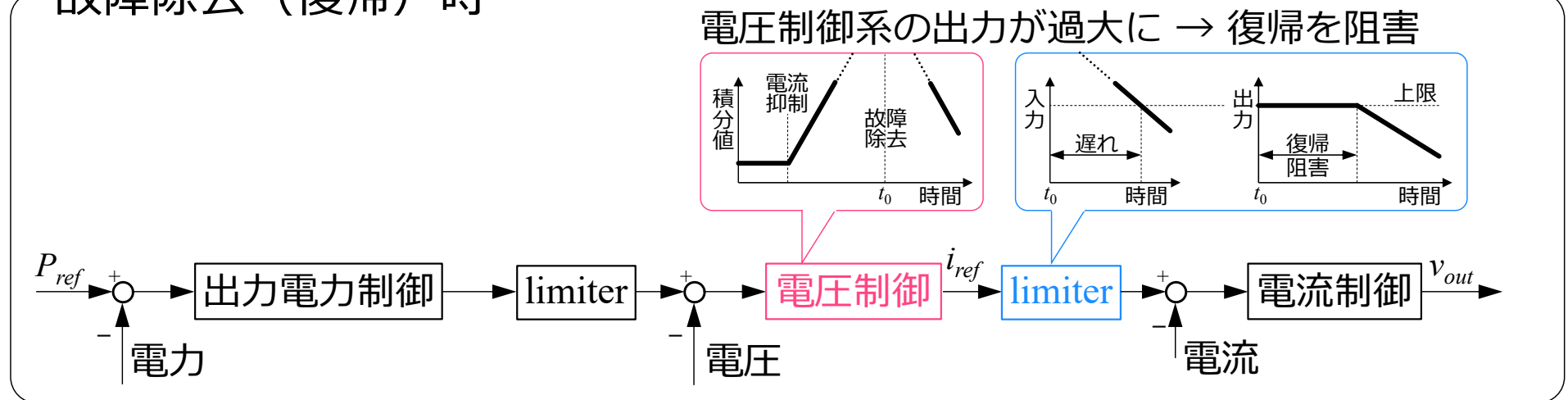
# (補足) windupについて

## カスケード制御におけるouter voltage loopのwindup

### 故障発生時



### 故障除去（復帰）時



・・・ anti-windup機構（積分器への入力調整）が必要

# GFMにおける電流制限

➤ virtual impedance (VI)方式：VIを増加させて電流を制限

	電流制限性能	故障電流の制御性能	故障復帰能力
Current limiter	<ul style="list-style-type: none"><li>定常状態：○.</li><li>一時的な過電流発生.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>PLLベースのGFL制御への切替</li><li>有効電力指令値の調整</li></ul>	電圧制御系のwindupにより失敗する可能性
Virtual impedance	<ul style="list-style-type: none"><li>電流制限と安定性の間のトレードオフ</li><li>一時的な過電流</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>VIや系統条件に依存</li><li>電力指令値の調整</li></ul>	平常時の制御に自動的に復帰
Voltage limiter	<ul style="list-style-type: none"><li>定常状態：○.</li><li>一時的な過電流発生.</li></ul>	voltage limiterと系統パラメータに依存	

B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, “A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances,” *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 3, pp. 955–969, (2022).

◆ **電流制限性能**：電流制限と安定性の間のトレードオフ  
一時的な過電流発生

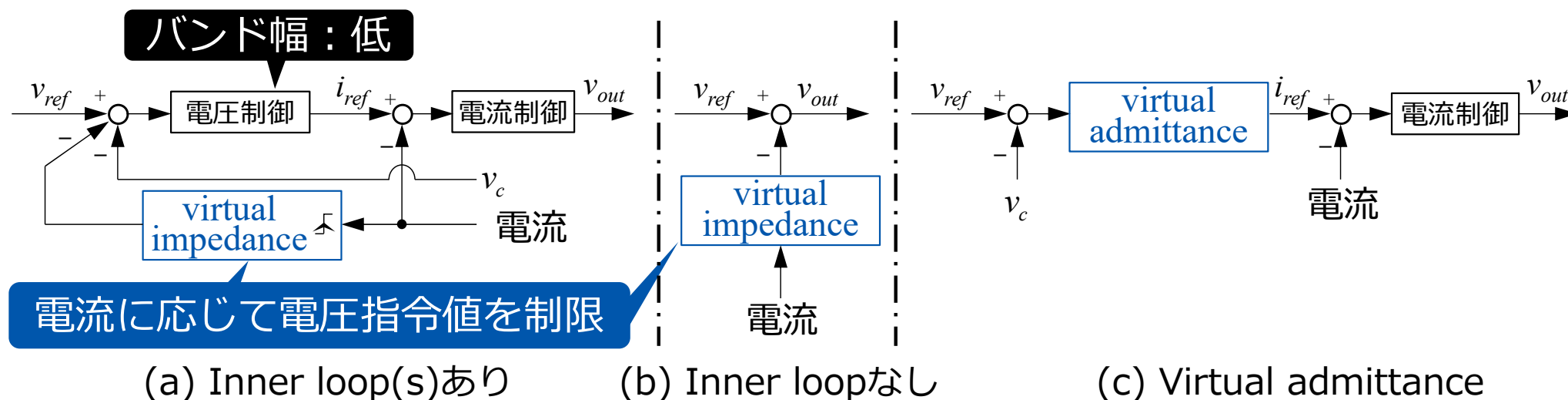
◆ **故障電流の制御性能**：VIの値や系統条件に依存  
有効電力指令値の調整により制御

◆ **故障復帰能力**：平常時の制御に自動的に復帰



# GFMにおける電流制限

- **virtual impedance (VI)方式** : VIを増加させて電流を制限



## 利点

- ・ GFM特性 (=電圧源) を維持したまま電流制限
- ・ 電流制限時におけるouter loopのwindupを回避することができる  
→故障除去後の復帰性能に優れる

## 欠点

- ・ 性能が電圧制御系 (バンド幅：低) に依存  
→速応性が劣る
- ・ 電流制限や故障電流注入のために適切なVIの値やX/R比の設定が複雑
- ・ 誘導性VIは電流の微分 ( $L \frac{di}{dt}$ )を必要とするため、ノイズの影響大

# 講演内容

背景

GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

GFMにおける電流制限

**GFMプロジェクト・GFM製品**

近年のGFM制御に関する動向

GFMに関する展望

# GFM関連プロジェクト

プロジェクト名	場所	年	種別
Zurich BESS	Switzerland	2012	BESS
Mackinac HVDC	USA	2012	HVDC
Ausnet GESS	Australia	2012	Hybrid
St. Eustatius II Project	Netherlands	2017	Hybrid
Hornsedale Power Reserve	Australia	2017-2020	BESS
DEMOCRAT Project	Europe	2018	BESS
Tetiaroa Island	French Polynesia	2018	Hybrid
Graciosa Island, Canary Islands	Spain	2018	Hybrid
La Plana Hybrid Project	Spain	2018	Hybrid
Dalrymple BESS (ESCRI-SA)	Australia	2018-2019	BESS
OSMOSE Project	Europe	2018-2022	Hybrid
Bordesholm BESS	Germany	2019	BESS
Dersalloch Wind Farm	Scotland	2019	GFM Wind
Saba Island	Netherlands	2019	Hybrid
NREL's Wind Turbine at Flatiron Campus	USA	2019	Hybrid
Torrens Island BESS	Australia	2023	BESS
Neilston Greener Grid Park Project	Scotland	-2024	BESS
Coylton Greener Grid Park Project	Scotland	-2024	BESS
Blackhillock BESS - Phase 1	Scotland	-2024	BESS
Kilmarnock BESS - Phase 1	Scotland	-2024	BESS
Broken Hill BESS	Australia	-2025	BESS
Liddell Battery Project	Australia	-2026	BESS
Blackhillock BESS - Phase 2	Scotland	-2026	BESS
Kilmarnock BESS - Phase 2	Scotland	-2026	BESS
Eccles BESS	Scotland	-2026	BESS
Palmerston BESS	Australia		BESS

## 過去および現在進行している GFM関連のプロジェクト (一部)

### <参考文献>

M. Tozak, S. Taskin, I. Sengor and B. P. Hayes, "Modeling and control of grid forming converters: A systematic review," IEEE Access, vol. 12, pp. 107818–107843, (2024).

R. Musca, A. Vasile, and G. Zizzo, "Grid-forming converters. A critical review of pilot projects and demonstrators," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 165, Art. no. 112551, (2022)

M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson, "Review of grid applications with the Zurich1MW battery energy storage system," Electr. Power Syst. Res., vol. 120, pp. 128–135, (2015).

# GFM関連製品

## ➤ 市場に登場し始めるGFM機能を持つ製品

### ＜対象＞

- ◆ Battery energy storage system (BESS)
- ◆ hybrid power plant
- ◆ HVDC
- ◆ 静止型無効電力補償装置 (static synchronous compensator: STATCOM)

## ➤ 例

- ◆ ABB : PCS100 ESSインバータ
- ◆ Hitachi energy : e-mesh Energy Storage
- ◆ シーメンス : Proteus PCS-Eインバータ
- ◆ Huawei : LUNA2000-200KTL-H1 Smart PCS
- ◆ SMA : Sunny Central Storageインバータ
- ◆ 日立エナジー : HVDC (MACH) 向けmodular advanced control  
(製品カタログに“Grid forming”またはそれに類する記述があるものを抜粋)

### ＜参考文献＞

M. Tozak, S. Taskin, I. Sengor and B. P. Hayes, “Modeling and control of grid forming converters: A systematic review,” IEEE Access, vol. 12, pp. 107818–107843, (2024).

# GFM BESS (オーストラリア東海岸)

## ➤ In operation

- ◆ Dalrymple BESS- 30 MW/8MWh
- ◆ Hornsdale Power Reserve – 150 MW/193.5 MWh
- ◆ Wallgrove – 50 MW/75MWh

## ➤ Under construction

- ◆ Broken Hill – 50MW/100 MWh
- ◆ Riverina/Darlington Point – 150MW/300MWh
- ◆ Capital – 100 MW

## ➤ The Australian Renewable Energy Agency (ARENA) Funded

- ◆ Liddell – 250 MW/500 MWh
- ◆ Gnarwarre – 250 MW/550 MWh
- ◆ Moorabool – 300MW/450MWh
- ◆ Hopeland – 200 MW/400MWh
- ◆ Blyth – 200MW/400MWh
- ◆ Mortlake – 300MW/900MWh
- ◆ Bungama – 200 MW/400MWh
- ◆ Mount Fox – 300MW/600MWh

### <参考文献>

Australian Landscape of Grid-Forming Batteries (2023.8)  
<https://www.esig.energy/australian-landscape-of-grid-forming-batteries/>

# 講演内容

背景

GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

GFMにおける電流制限

GFMプロジェクト・GFM製品

**近年のGFM制御に関する動向**

GFMに関する展望

# 近年のGFM制御に関する動向

## ➤ GFM制御の定義

- ◆ North American Electric Reliability Corporation (NERC)\*
- ◆ Australian Energy Market Operator (AEMO)\*\*

**Grid Forming Control** for BPS-Connected Inverter-Based Resources are controls with the primary objective of **maintaining an internal voltage phasor that is constant or nearly constant** in the sub-transient to transient time frame. This allows the IBR to immediately respond to changes in the external system...



\*North American Electric Reliability Corporation, Atlanta, GA, USA. (2021). Grid Forming Technology Bulk Power System Reliability Considerations.

\*\*“Voluntary Specification for Grid-forming Inverters,” AEMO, May 2023.

# 近年のGFM制御に関する動向

## ➤ cross-forming control\*(He et al. (2025))

- ◆ 内部電圧フェーザ（の向き）の維持 (Voltage angle-forming)
- ◆ 出力電流の大きさを指定値に制限 (Current magnitude-forming)

出力電流の大きさを指定値に制御



内部電圧フェーザ  $\hat{v}_\lambda$  の角度を維持

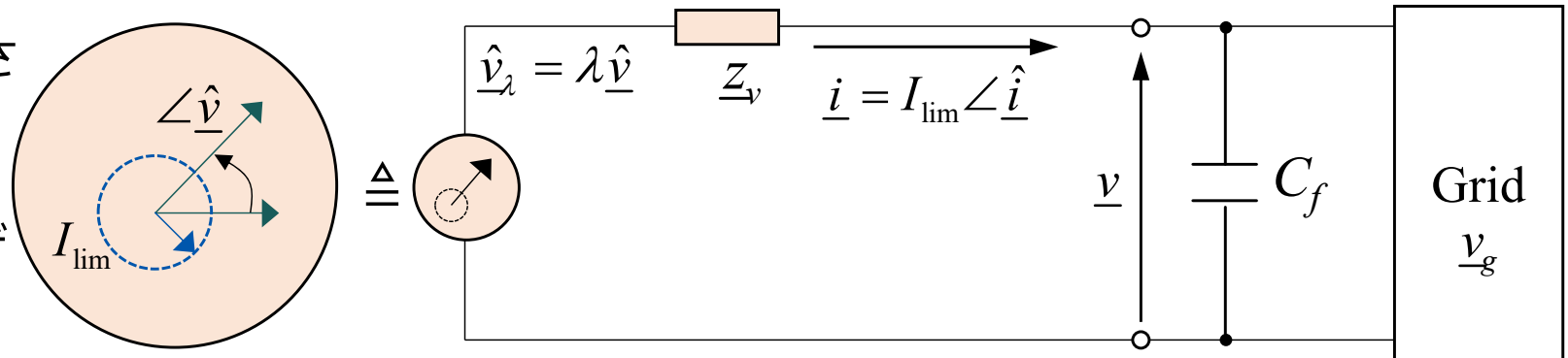
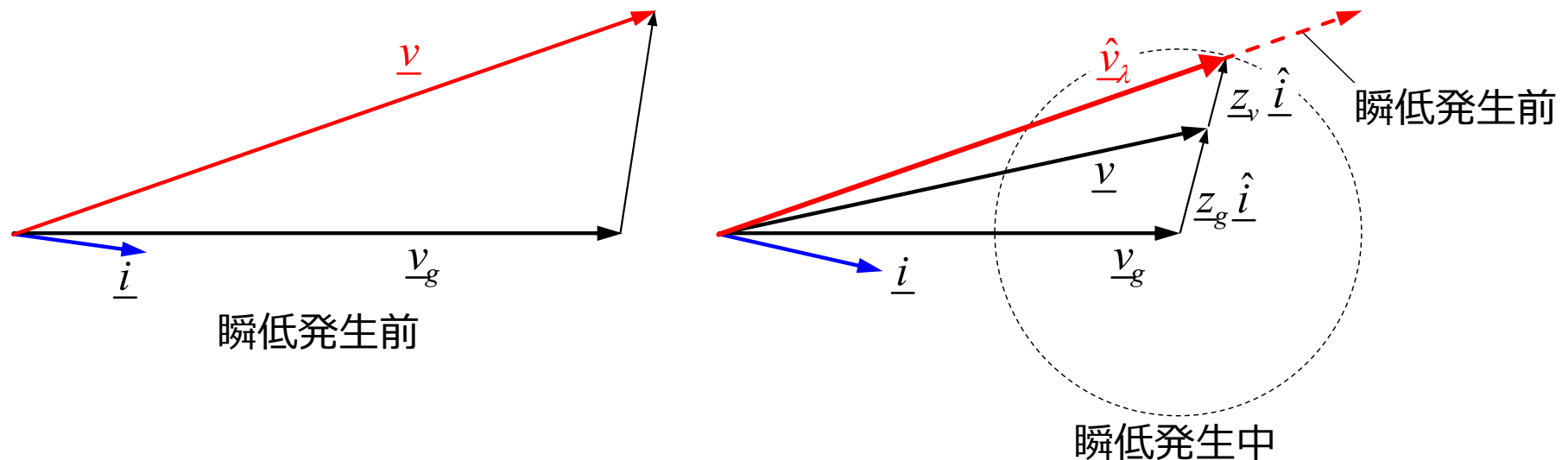


図 Cross-formingの等価回路図\*

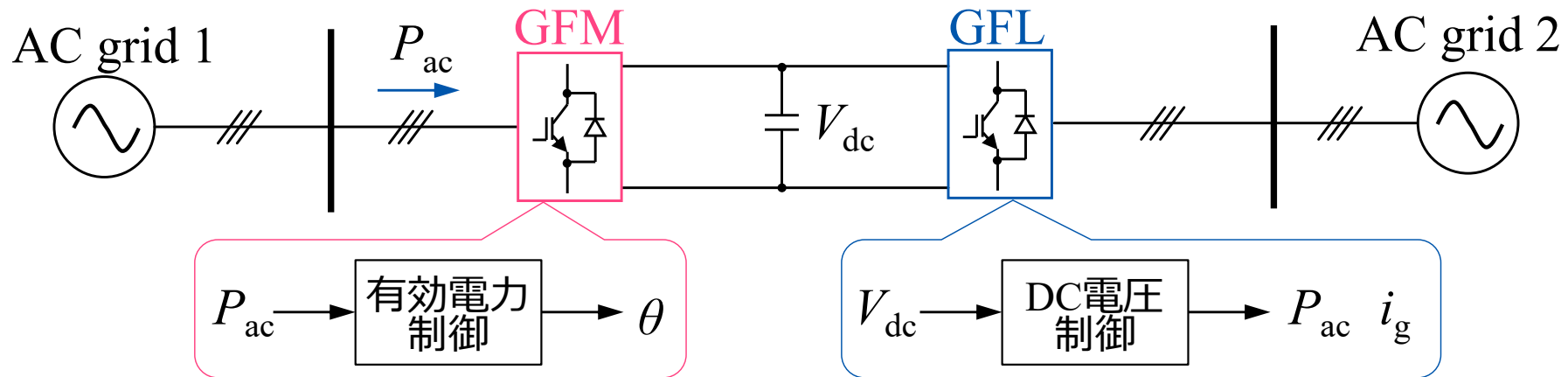
\*X. He, M. A. Desai, L. Huang and F. Dörfler, “Cross-forming control and fault current limiting for grid-forming inverters,” *IEEE Trans. Power Elect.*, vol. 40, no. 3, pp. 3980-4007, (2025).





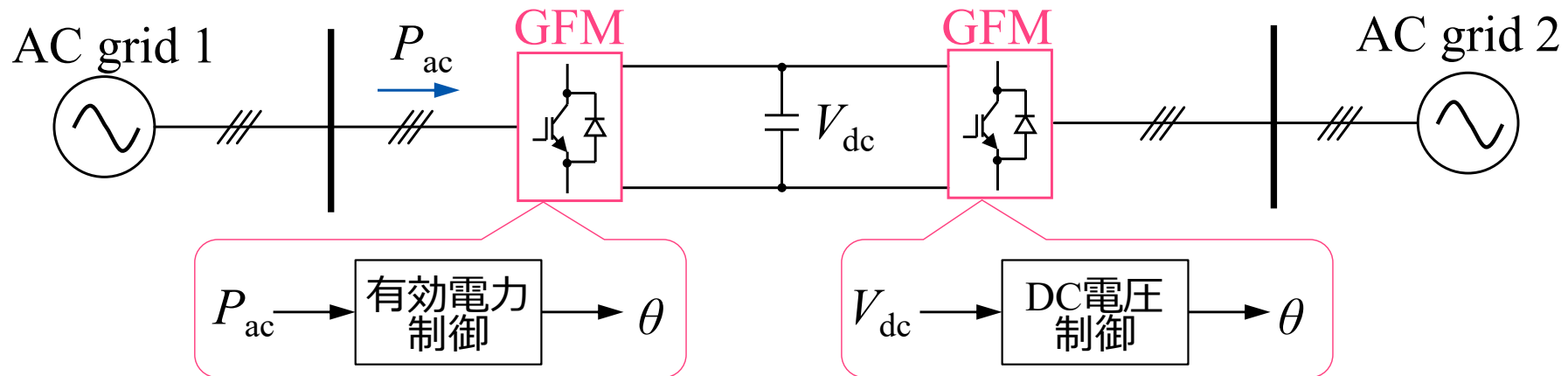
# 近年のGFM制御に関する動向

## ➤ HVDCへのGFM制御の適用



### GFM-GFL構成

### GFM-GFM構成



G. Shafique, J. Boukhenfouf, F. Gruson, F. Colas and X. Guillaud, "DC Voltage Control with Grid-Forming Capability for Enhancing Stability of HVDC System," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 13, no. 1, pp. 66-78, January 2025, doi: 10.35833/MPCE.2024.000822.

# 近年のGFM制御に関する動向

## ➤ HVDCへのGFM制御の適用

### ＜課題＞

#### ◆ カスケード制御の遅延

- ✓ 従来：GFM制御の外側にDC電圧制御ループを配置
- ✓ GFMの有効電力制御応答が遅い
- ✓ DC電圧制御の応答も遅い

#### ◆ エネルギー貯蔵コスト

- ✓ DC電圧の維持だけでなく慣性の提供
- ✓ DCリンクに大きなコンデンサが必要 → コスト・体積増加

#### ◆ 系統強度への依存

- ✓ 既存研究：weak gridでは安定 ⇔ strong gridでは不安定

## ➤ 今後の検討例

#### ◆ 大規模な外乱発生時における検討（電流制限など）

#### ◆ 多端子直流送電システムへの拡張

など

G. Shafique, J. Boukhenfouf, F. Gruson, F. Colas and X. Guillaud, “DC Voltage Control with Grid-Forming Capability for Enhancing Stability of HVDC System,” in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 13, no. 1, pp. 66-78, January 2025, doi: 10.35833/MPCE.2024.000822.

# 近年のGFM制御に関する動向

## ➤ 近年発表されたGFM制御に関するレビュー論文\*

- ◆ 課題1 : GFM制御による意図しない単独運転に関して既存研究では殆ど注目されていない.
- ◆ 課題2 : GFM変換器の最適な設置位置・台数について  
更なる検討が必要.
- ◆ 課題3 : GFM変換器の実応用に関する研究は限定的であり  
更なる実証が必要.

## ➤ 近年の論文\*\*

- ◆ 定態安定性とgrid strengthの観点からGFM変換器がどの程度必要か
- ◆ 定態安定性改善のために全変換器をGFMにする必要は必ずしもない

→ **GFM制御**は重要な役割を担うものの, **GFL変換器**との協調も重要  
(\*\*\* GFLに関するレビュー論文)

\* Q. Salem, B. B. Fawaz, R. Aljarrah and M. Karimi, “Grid forming converters for low inertia systems-capabilities and limitations: A critical review,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 6, pp. 775–801, 2025

\*\* H. Xin, C. Liu, X. Chen, Y. Wang, E. Prieto-Araujo and L. Huang, “How many grid-forming converters do we need? A perspective from small signal stability and power grid strength,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 40, no. 1, pp. 623–635, (2025).

\*\*\* R. Aljarrah, B. B. Fawaz, Q. Salem, M. Karimi, H. Marzooghi and R. Azizipanah-Abarghooee, “Issues and Challenges of Grid-Following Converters Interfacing Renewable Energy Sources in Low Inertia Systems: A Review,” in IEEE Access, vol. 12, pp. 5534-5561, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3349630.

# 近年のGFM制御に関する動向

- X. Wang, M. G. Taul, H. Wu, Y. Liao, F. Blaabjerg and L. Harnefors, “Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources—An Overview,” in IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 1, pp. 115-134, **2020**, doi: 10.1109/OJIA.2020.3020392.  
被引用数 : 640 (2025.12.10時点)
- R. Rosso, X. Wang, M. Liserre, X. Lu and S. Engelken, “Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review,” in IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 2, pp. 93-109, **2021**, doi: 10.1109/OJIA.2021.3074028.  
被引用数 : 854 (2025.12.10時点)
- H. Zhang, W. Xiang, W. Lin and J. Wen, “Grid Forming Converters in Renewable Energy Sources Dominated Power Grid: Control Strategy, Stability, Application, and Challenges,” in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 9, no. 6, pp. 1239-1256, November **2021**, doi: 10.35833/MPCE.2021.000257.  
被引用数 : 221 (2025.12.10時点)
- B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, “A Review of Current-Limiting Control of Grid-Forming Inverters Under Symmetrical Disturbances,” in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 3, pp. 955-969, **2022**, doi: 10.1109/OJPEL.2022.3227507.  
被引用数 : 228 (2025.12.10時点)
- N. Baeckeland, D. Chatterjee, M. Lu, B. Johnson and G. -S. Seo, “Overcurrent Limiting in Grid-Forming Inverters: A Comprehensive Review and Discussion,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 39, no. 11, pp. 14493-14517, Nov. **2024**, doi: 10.1109/TPEL.2024.3430316.  
被引用数 : 102 (2025.12.10時点)
- M. Tozak, S. Taskin, I. Sengor and B. P. Hayes, “Modeling and Control of Grid Forming Converters: A Systematic Review,” in IEEE Access, vol. 12, pp. 107818-107843, **2024**, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3437236.  
被引用数 : 39 (2025.12.10時点)
- Q. Salem, B. B. Fawaz, R. Aljarrah and M. Karimi, “Grid forming converters for low inertia systems-capabilities and limitations: A critical review,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 6, pp. 775–801, **2025**  
被引用数 : 2 (2025.12.10時点)
- H. Xin, C. Liu, X. Chen, Y. Wang, E. Prieto-Araujo and L. Huang, “How Many Grid-Forming Converters Do We Need? A Perspective From Small Signal Stability and Power Grid Strength,” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 40, no. 1, pp. 623-635, Jan. **2025**, doi: 10.1109/TPWRS.2024.3393877.  
被引用数 : 39 (2025.12.10時点)

# 講演内容

背景

GFM制御の概要

GFMの研究開発状況

GFMにおける電流制限

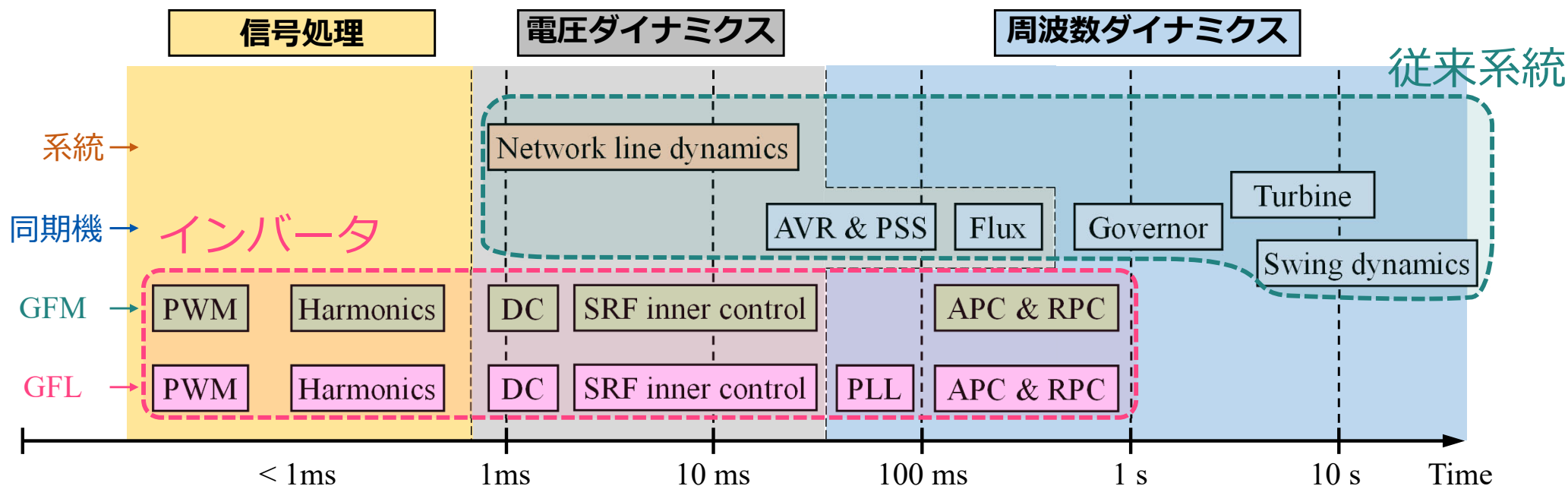
GFMプロジェクト・GFM製品

近年のGFM制御に関する動向

**GFMに関する展望**

# GFMに関する展望

## ➤ 低慣性系統における物理・制御ダイナミクスのタイムスケール\*



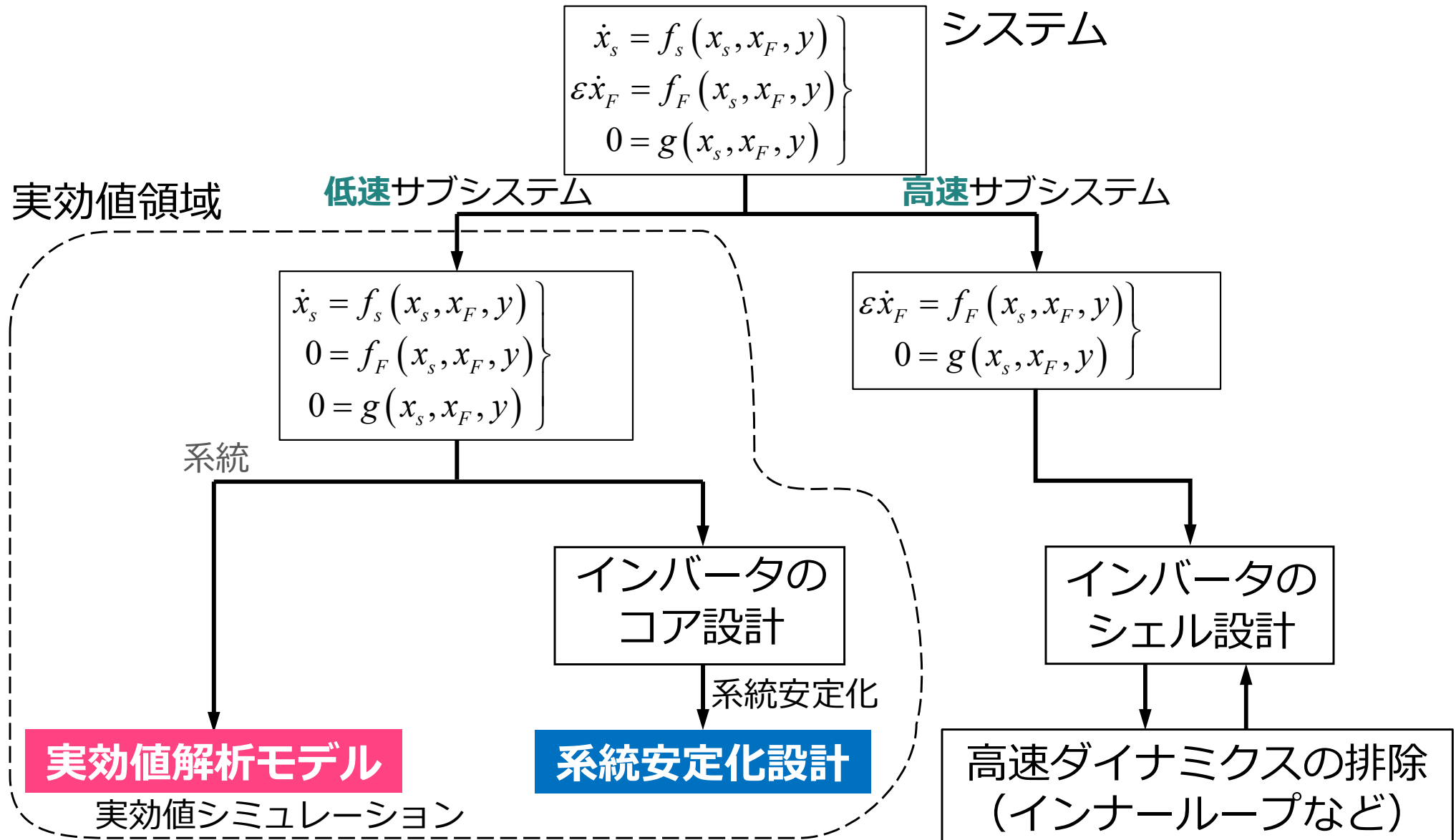
- ・ ダイナミクス：複雑
- ・ Network line dynamicsがインバータによる電圧制御と同じ領域  
→ シミュレーションや解析において無視できない\*

➡ 詳細・正確な分析には広範なタイムスケールの考慮が必要

\*U. Markovic, O. Stanojev, P. Aristidou, E. Vrettos, D. S. Callaway, and G. Hug, "Understanding small-signal stability of low-inertia systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 5, pp. 3997–4017, (2021).

# GFMに関する展望

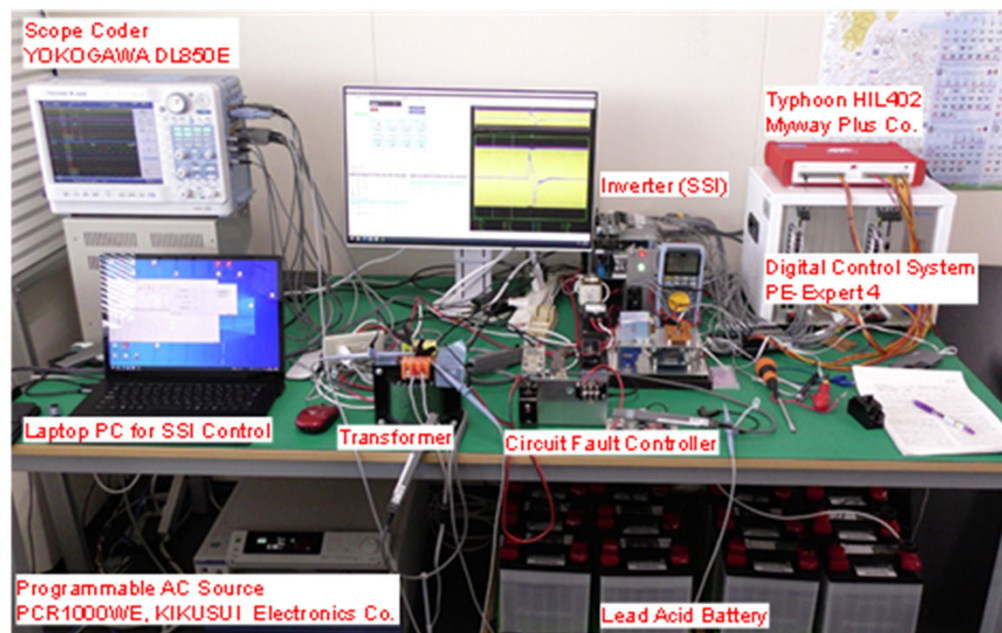
広島大学のアプローチ：**実効値解析** + **系統安定化制御系設計**



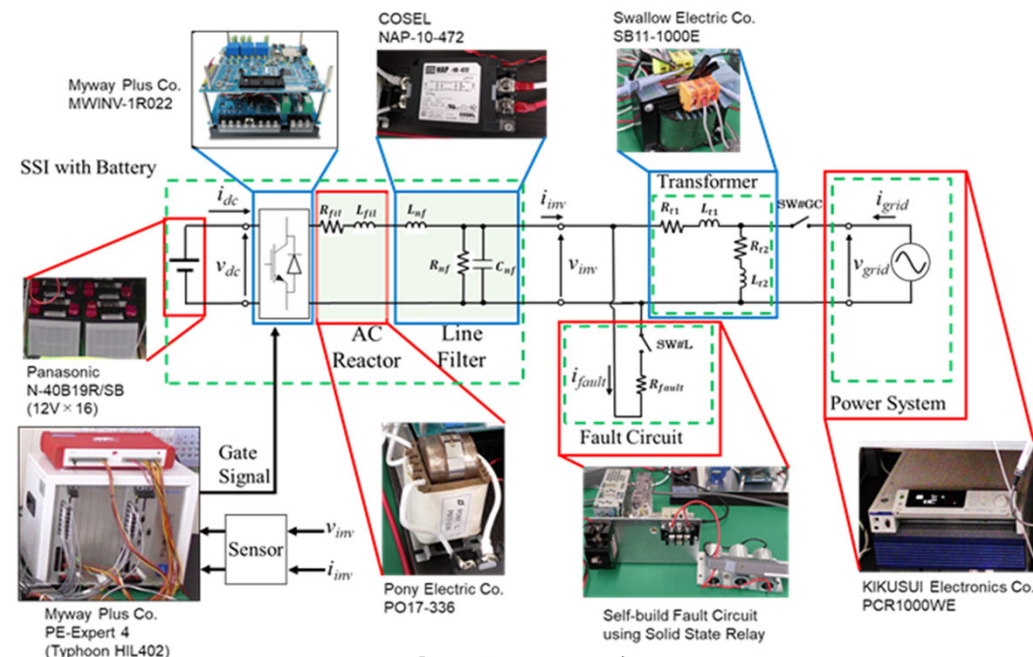


# GFMに関する展望

- 実効値シミュレーションツール・・・実機ベース開発
- Hardware-in-the-loop (HIL)シミュレータおよび実機実験にて結果を比較・検証  
→ HIL・実機実験結果と一致するように実効値シミュレータ改良
- 実機に裏付けられた実効値シミュレーション



実機およびHILの写真



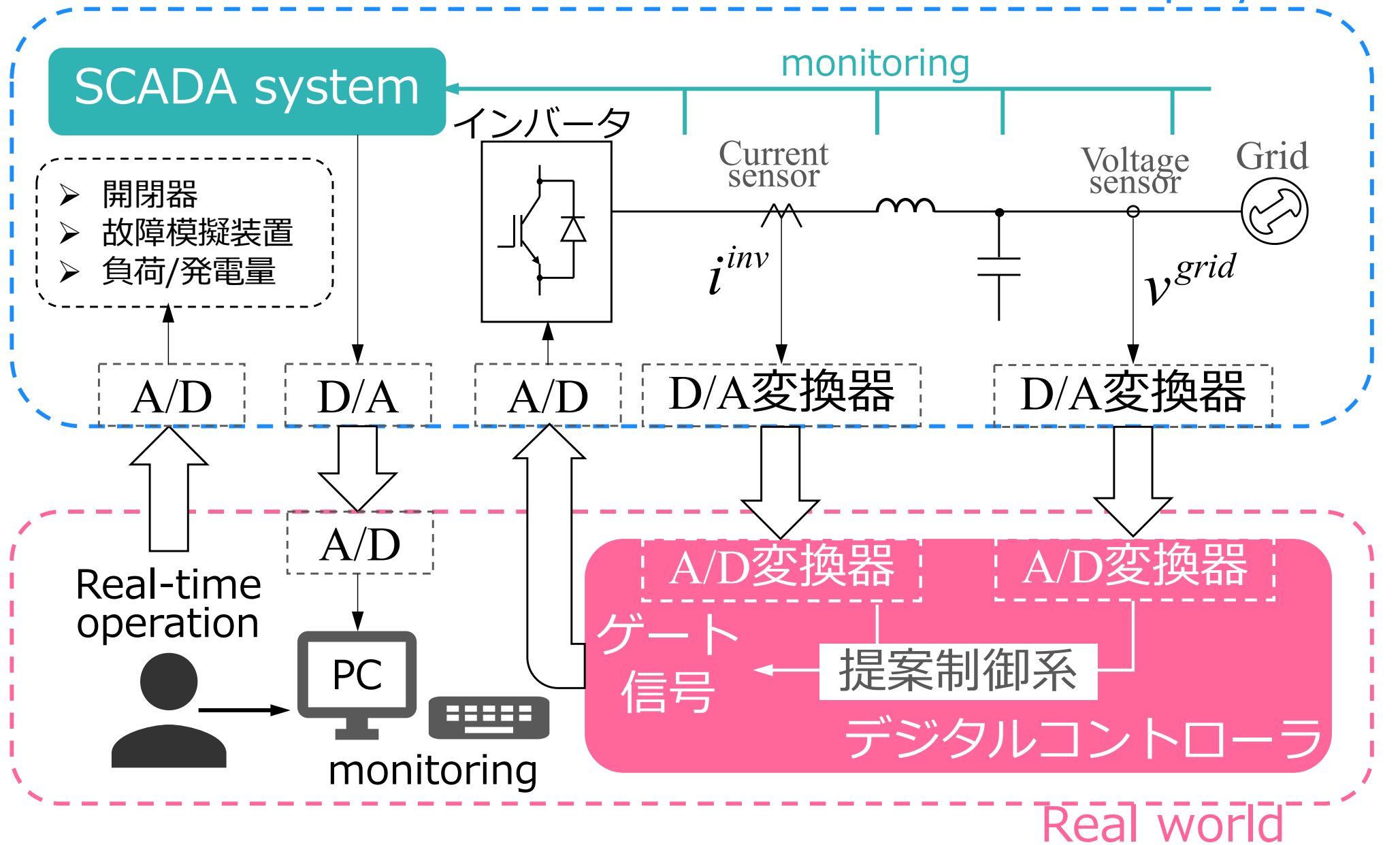
試験回路図



# GFMに関する展望

リアルタイムシミュレータ

Hardware in the loop system



# GFMに関する展望



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／  
将来の電力システムの計画・運用を支える人材育成

概要  
ABOUT

活動  
ACTIVITIES

アーカイブス  
ARCHIVES

ニュース  
NEWS

問合せ先  
INFO



広島大学



UTokyo  
東京大学



早稲田大学



北海道大学



産業技術総合研究所

電力システムは、

私たちの生活と産業を支える礎。

脱炭素を背景に大きく変わりつつある

電力システムを支える技術、

人材育成を追求するコミュニティ

"SHIN系統"へようこそ。



## ABOUT 概要

## 将来の 電力システムの 計画と運用を 支える

電力システムは、これまでの常識とは異なる新たな姿へと進化しています。太陽光や風力といった再生可能エネルギー電源の拡大、蓄電池や電気自動車の普及、さらにデータセンターのような新たな大規模施設の登場により、その特性が本質的に変化しつつあるのです。

こうした変革期をとらえ、次世代の電力システムの設計とその運用を支えるための研究開発の推進、そしてそれを担う専門知識と実践力を備えた人材が欠かせません。私たちは、クリーンで安定した電力が社会に届く未来の実現を目指し、これを支える人材を持続的に輩出する産学連携のコミュニティを形成します。

<https://shin-keitou.w.waseda.jp/>

# まとめ

- GFM電力変換器への期待
  - ◆ 低慣性系統において重要な役割を担う
  - ◆ サーベイ論文・レビュー論文が近年増加
  - ◆ 国際会議等でもGFM関連のセッションが増加
- GFM制御の実用化に向けて
  - ◆ 技術的な研究開発に加え，系統への貢献に対するインセンティブ付与やグリッドコードといった制度面の整備も並行して進めていくことが重要
  - ◆ GFM制御に組み込まれる電流制限機能<sup>\*</sup>,<sup>\*\*</sup>や系統へ貢献するためのFRT機能など，グリッドコードからの要求<sup>\*\*\*</sup>,<sup>\*\*\*\*</sup>を満たすための検討を期待
- GFM制御に関する研究開発の活発化へ向けて
  - ◆ パワエレや電力システムに関する専門知識を持つ人材の育成：重要

- <sup>\*</sup> B. Fan, T. Liu, F. Zhao, H. Wu and X. Wang, “A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances,” IEEE Open Journal of Power Electron., vol. 3, pp. 955–969, (2022).
- <sup>\*\*</sup> N. Baeckeland, D. Chatterjee, M. Lu, B. Johnson and G. -S. Seo, “Overcurrent limiting in grid-forming inverters: A comprehensive review and discussion,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 39, no. 11, pp. 14493–14517, (2024).
- <sup>\*\*\*</sup> B. Bahrani et al., “Grid-forming inverter-based resource research landscape: Understanding the key assets for renewable-rich power systems,” IEEE Power Energy Mag., vol. 22, no. 2, pp. 18–29, (2024).
- <sup>\*\*\*\*</sup> S. Ghimire et al., “Functional specifications and testing requirements of grid-forming offshore wind power plants,” Wind Energy Sci. Discuss., vol. 2024, pp. 1–21, 2024.