

NEDO特別講座産学合同セミナー

電力系統におけるインバータ の適用とその制御

2025年10月16日

環境エネルギー技術研究所

工学院大学名誉教授

荒井純一

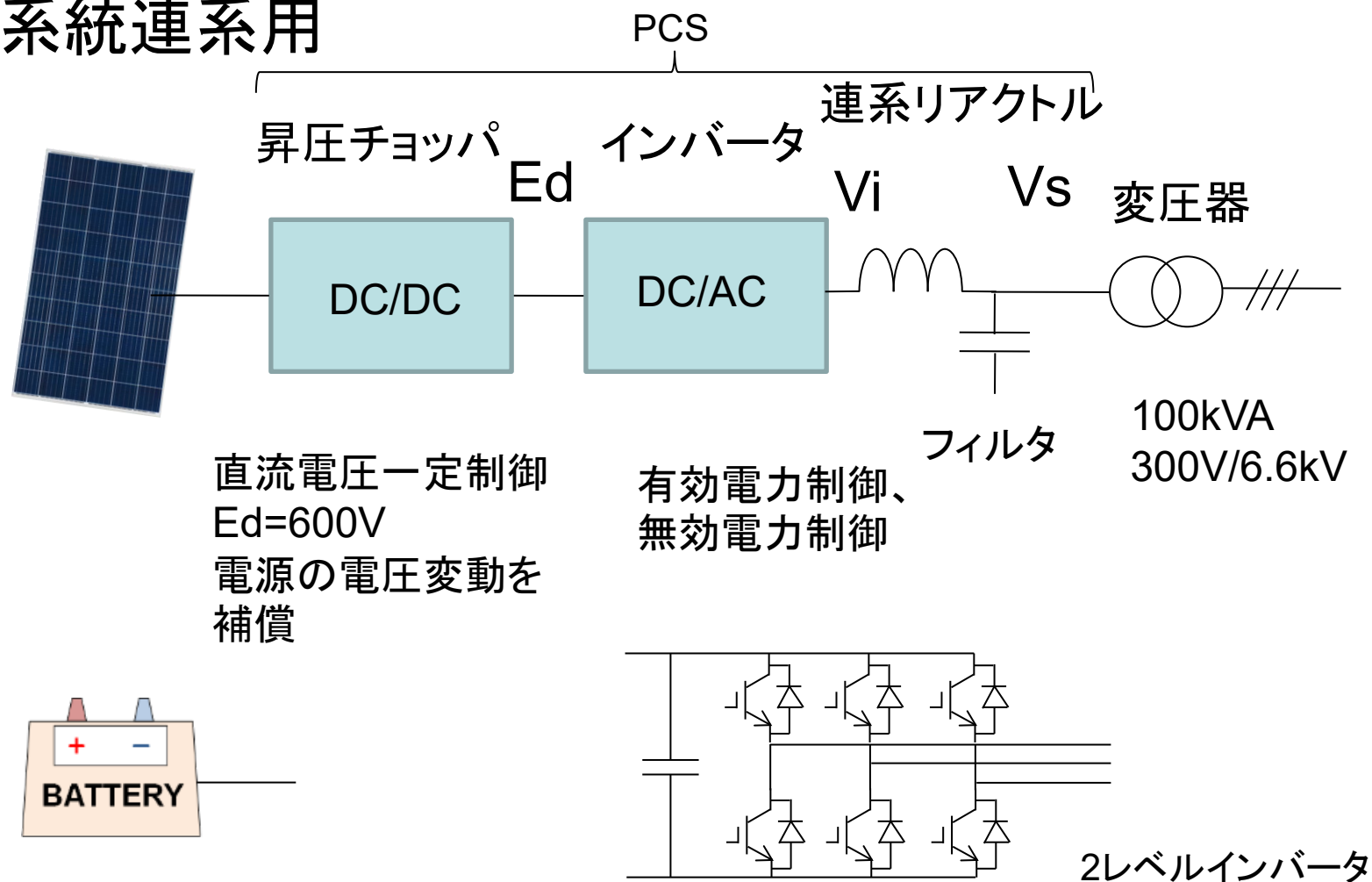
arai@cc.kogakuin.ac.jp

目次

1. 太陽光発電システムの構成
2. インバータの動作
主回路, 制御, 使われ方
3. 連系運転から自立運転まで
インバータと同期発電機
4. サイバー空間における**EMS**
5. まとめと課題

1. 太陽光発電システムの構成

系統連系用



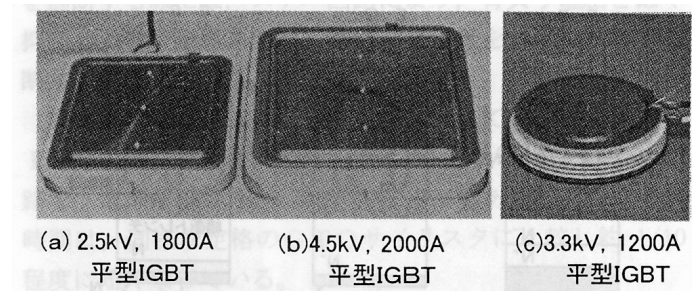
2. インバータの動作 パワー素子とその特徴

非可制御素子	オン機能可制御素子	オン／オフ機能可制御素子
ダイオード	サイリスタ	パワートランジスタ IGBT、GTO、IGCT など



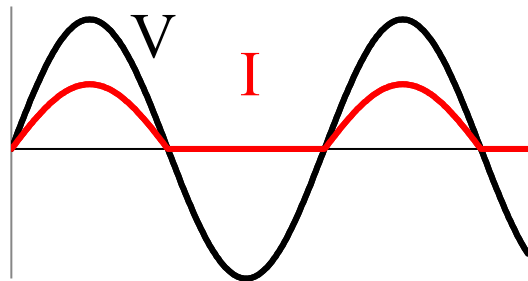
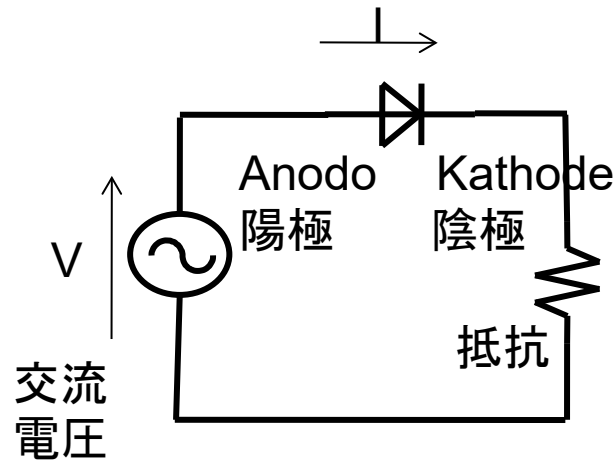
Thyristor
8kV-3.5kA

IGBT



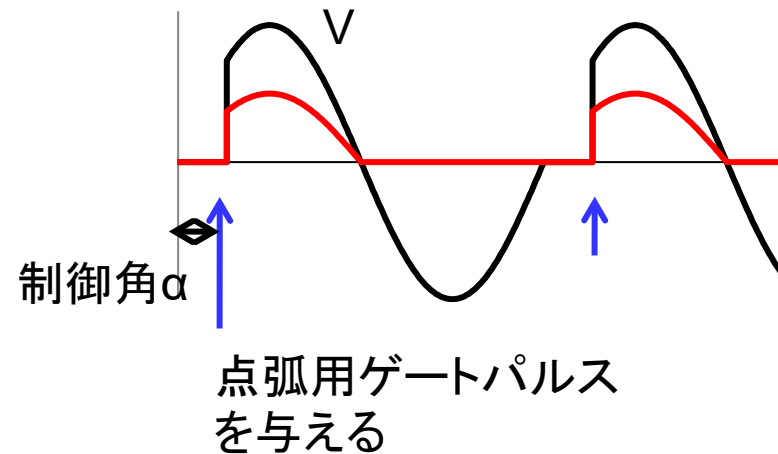
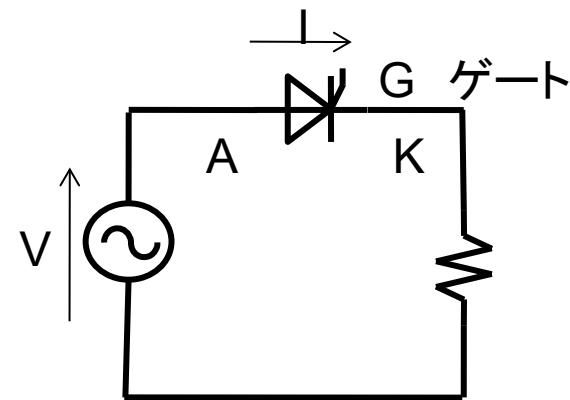
IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO: Gate Turn Off Thyristor
IGCT: Integrated Gate-Commutated Thyristor

ダイオード



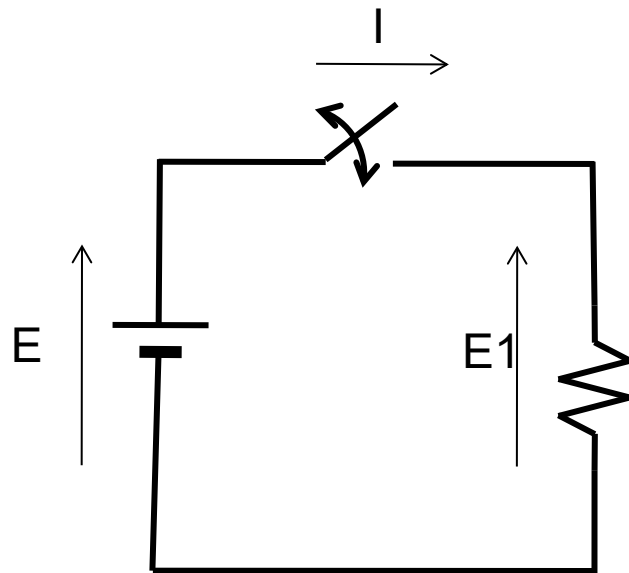
電流は順方向のみ

サイリスタ



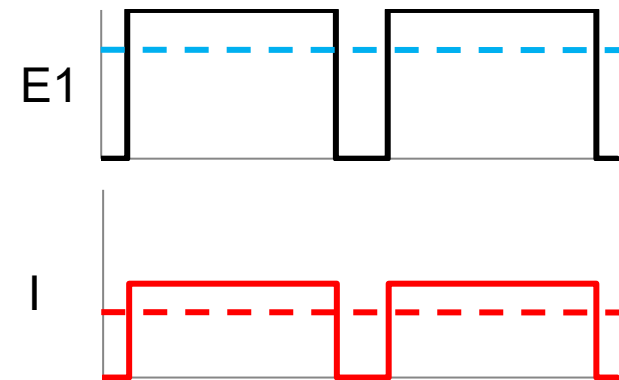
- 電流は順方向のみ
- 制御角を大きくすると抵抗にかかる電圧平均値が小さくなる → 電力を制御できる

オン／オフ機能素子

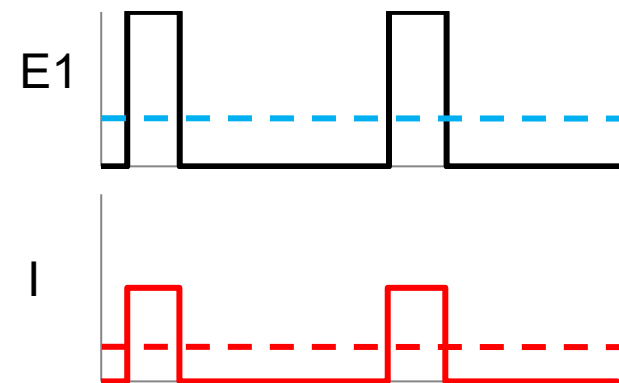


- スイッチとして半導体素子を用いる
- スイッチのオンオフ期間を調節すると電圧(電流)が制御できる
- オン／オフ可→2変数量を制御可能

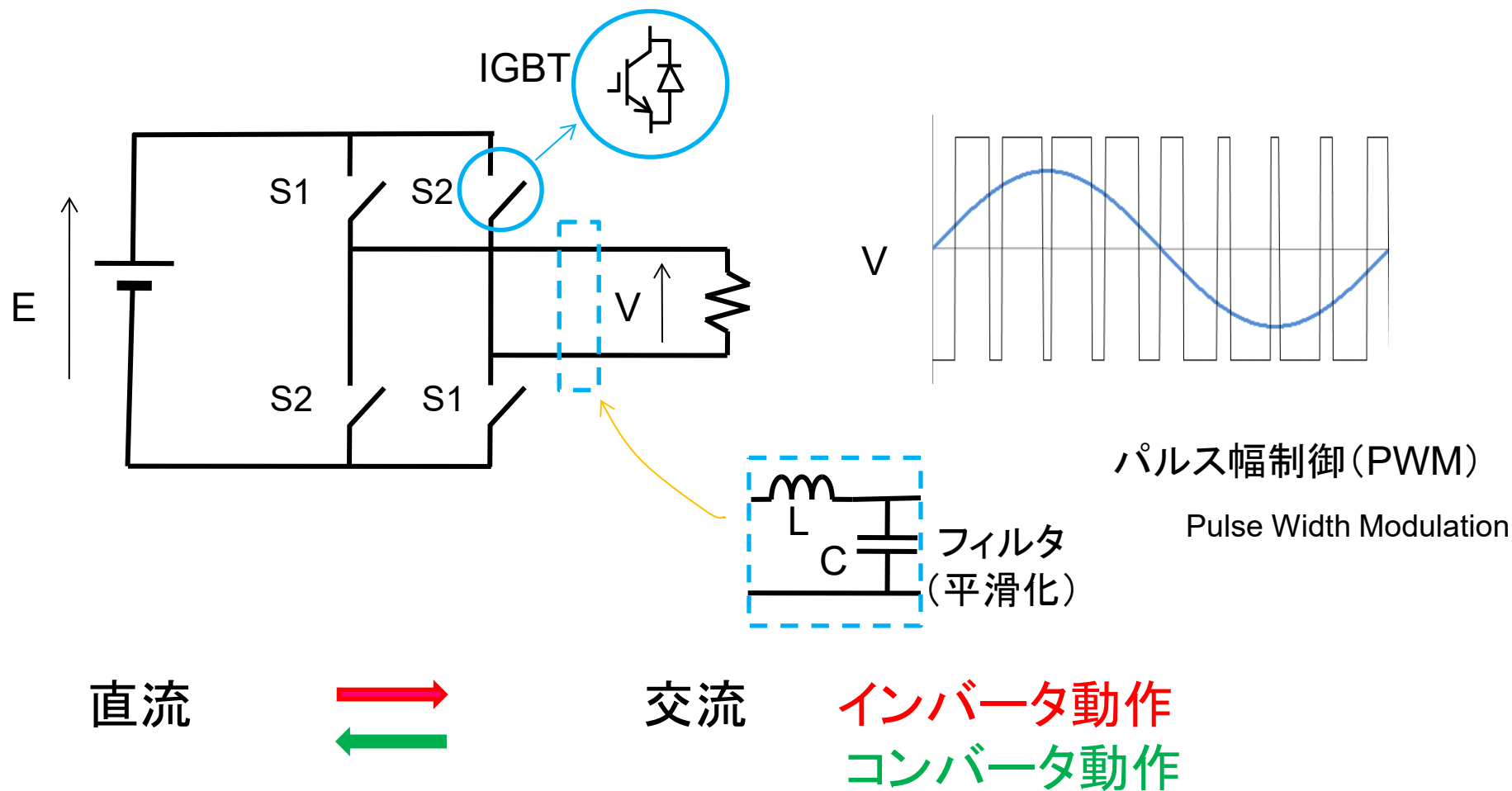
導通期間を長くした場合



導通期間を短くした場合



IGBTを使った自励式インバータ動作



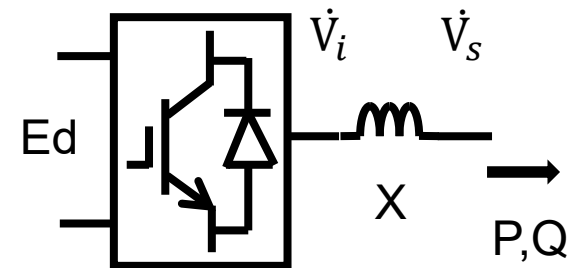
電力はどちらへも流せる。

三相インバータの制御

• PQの式

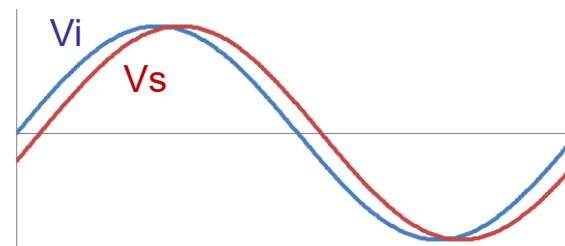
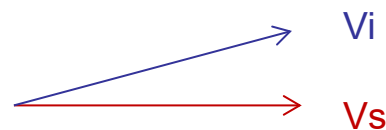
$$P = \frac{V_s \cdot V_i}{X} \sin \theta$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s \cdot V_i}{X} \cos \theta$$



(θ は電圧 V_i と V_s の位相差)

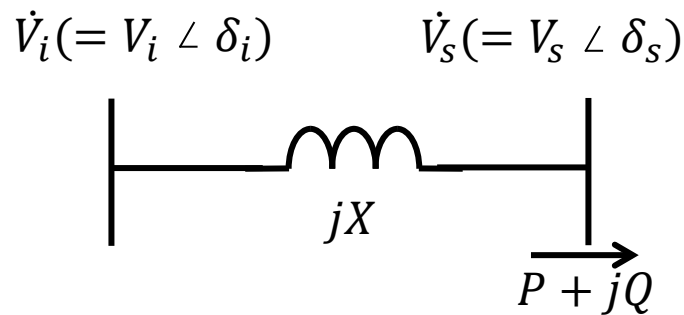
系統電圧 $\dot{V}_s$ に対してインバータが発生する電圧 $\dot{V}_i$ を調整してPとQを制御する
($\dot{V}_i$ の振幅と位相を調整する)



系統電圧の位相
を知る必要がある

電圧 V_i が V_s より位相15度進んでいる発電状態

有効電力と無効電力



$$P + jQ = \bar{\dot{V}}_s * \dot{I} \quad \dot{I} = \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_s}{jX}$$

$$P + jQ = V_s e^{-j\delta_s} * \frac{V_i e^{j\delta_i} - V_s e^{j\delta_s}}{jX}$$

$$= \frac{V_s V_i e^{j(\delta_i - \delta_s)}}{jX} - \frac{V_s^2}{jX}$$

$$= -j \frac{V_s V_i \{\cos(\delta_i - \delta_s) + j \sin(\delta_i - \delta_s)\}}{X} + j \frac{V_s^2}{X}$$

$$= -j \frac{V_s V_i \cos(\delta_i - \delta_s)}{X} + \frac{V_s V_i \sin(\delta_i - \delta_s)}{X} + j \frac{V_s^2}{X}$$

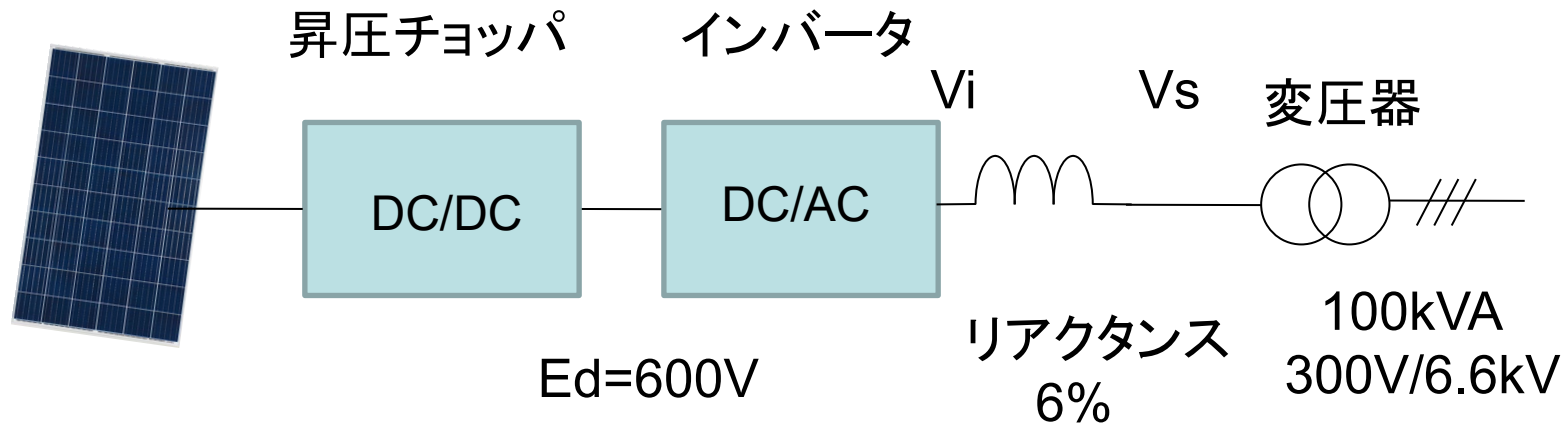
$$P = \frac{V_s V_i \sin(\delta_i - \delta_s)}{X}$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_i \cos(\delta_i - \delta_s)}{X}$$

$V_s \doteq V_i \doteq 1 \text{ pu}$ とすれば
Pは電圧位相差に比例

練習問題: V_i 側でのPとQの式を導出せよ

インバータ設計例



直流電圧 E_d とするとPWM方式で発生できる
三相交流電圧 V_i は、制御率 $a(0\sim 1)$ とすると

$$V_i = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} a E_d = 0.612 a E_d$$

$E_d=600V$ とすれば、 $V_{rms}=367.2a$
最大367.2V

もし300Vを定格に選べば、 $\pm 20\%$ の交
流電圧変動に対応できる

$P=1pu$, $Q=0pu$ の運転点
 $V_s=1.0pu$ とし、 $\delta_i - \delta_s = \theta$ とすれば

$$P_i = \frac{V_i}{0.06} \sin \theta$$

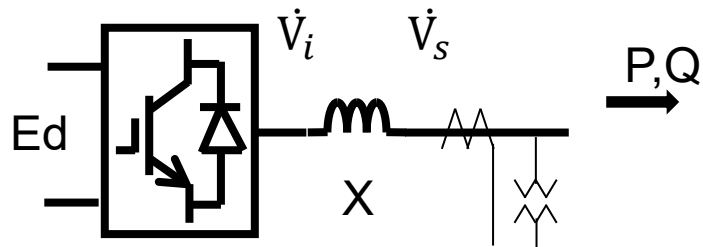
$$Q_i = \frac{1}{0.06} - \frac{V_i}{0.06} \cos \theta$$

$$V_i = 1.0018pu, \theta = 3.43^\circ (0.0599rad)$$

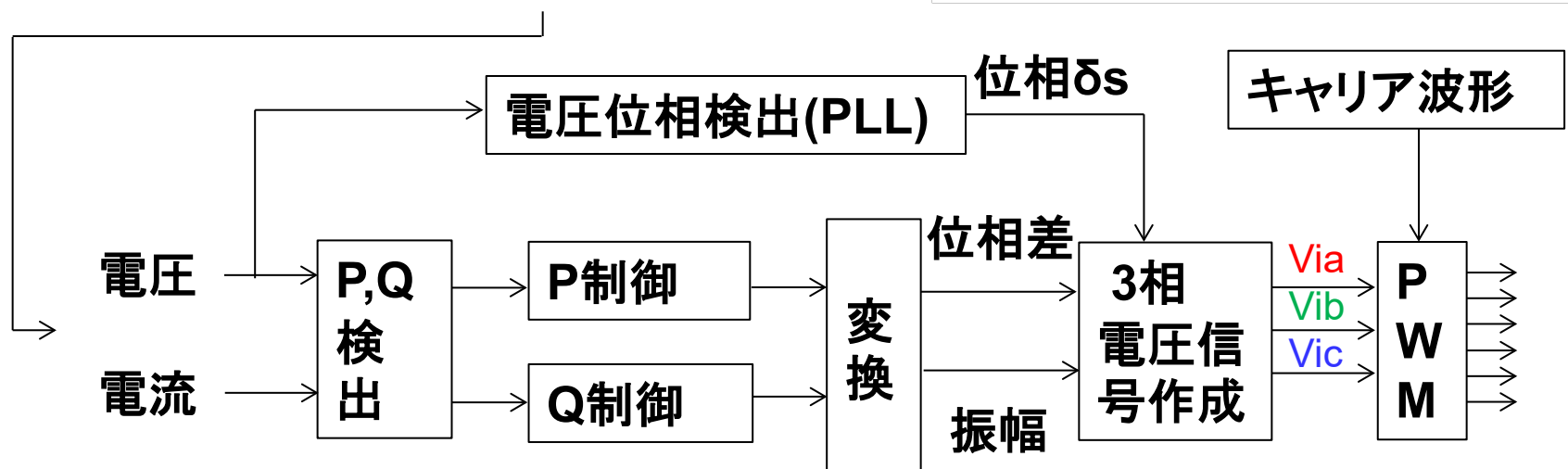
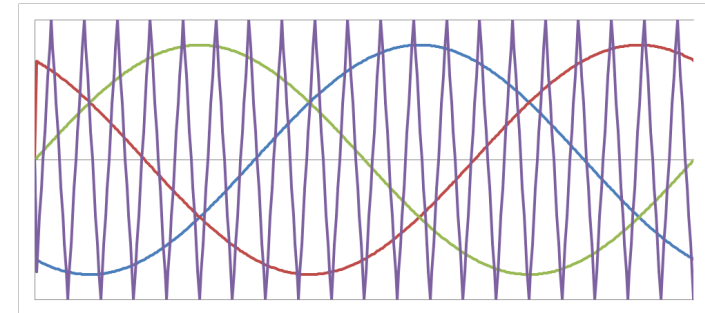
(pu: per unit)

連系インバータの制御

PWMロジック



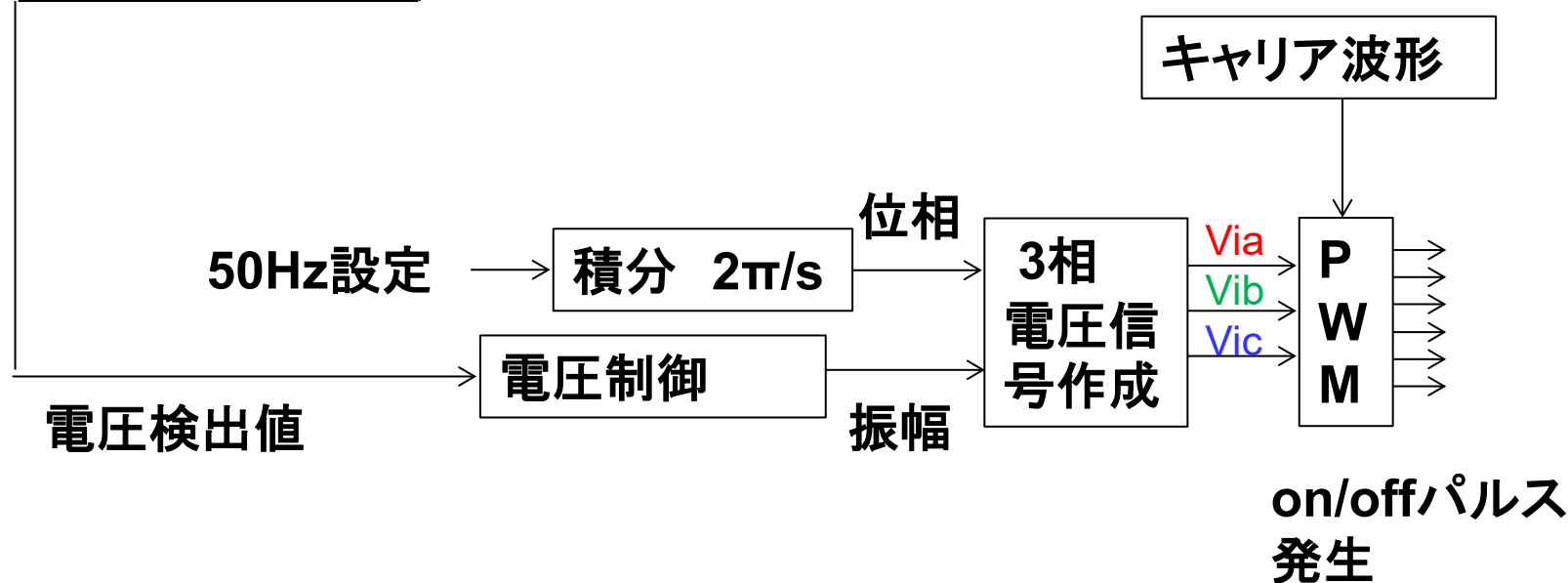
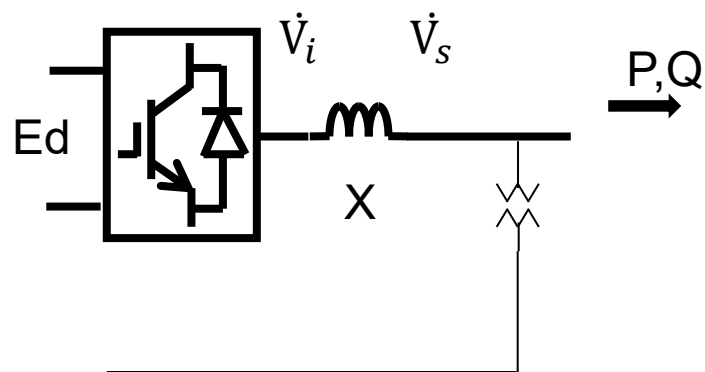
電圧・電流検出



on/offパルス
発生

P指令値はMPPT制御あるいはEMSより与えられる
変換箇所はdq2軸量で処理されている
系統側電圧位相を検出するPLL特性は重要

自立運転時の制御



インバータ制御の組み合わせ

系統連系運転

有効電力

有効電力制御 P

または

直流電圧制御 E_d

無効電力

無効電力制御 Q

または

力率制御

交流電圧制御 V_{ac}

PQ制御(従来)
PV制御など

自立運転

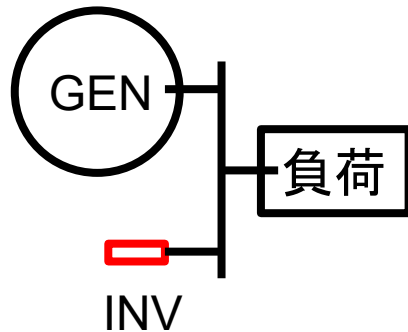
周波数一定運転 F

交流電圧制御 V_{ac}

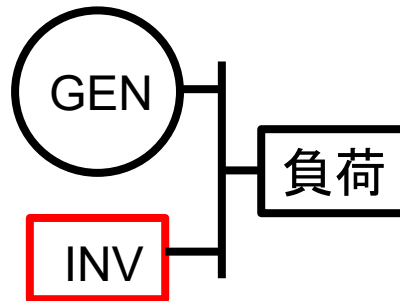
FV制御

3. 連系運転から自立運転まで --インバータと同期発電機--

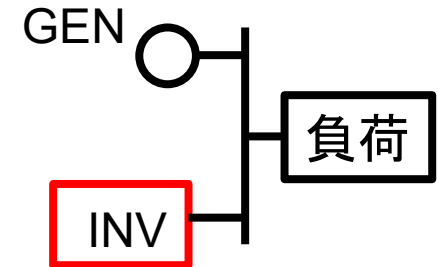
電源として



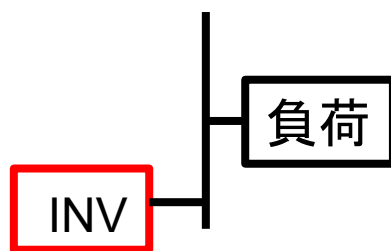
A: $GEN > INV$
(容量比)



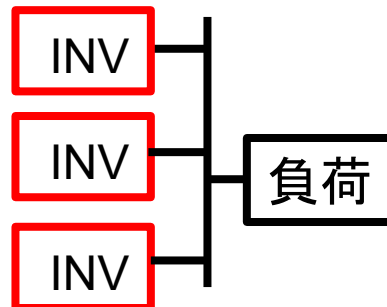
B: $GEN = INV$



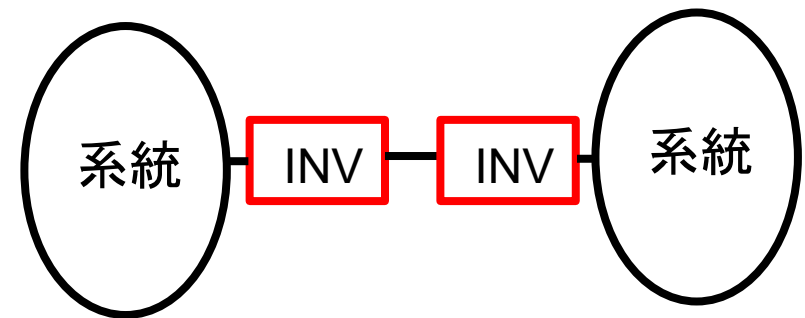
C: $GEN < INV$



D: INV

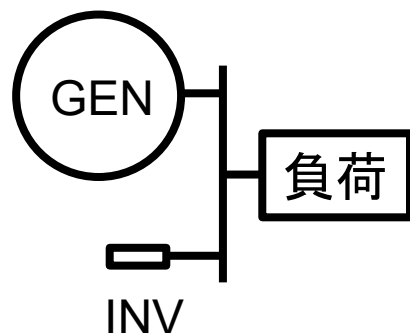


E: 複数INV



F: 直流連系

A 現状のインバータの使われ方

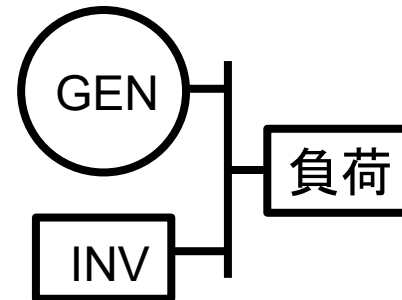


A: $GEN > INV$

- **INV**は系統連系モード
- **P,Q**制御
- 安定運転ができ, 問題ない
- 現在の**PV**, 蓄電池等

B 同じような容量で安定運転は？

B: GEN=INV

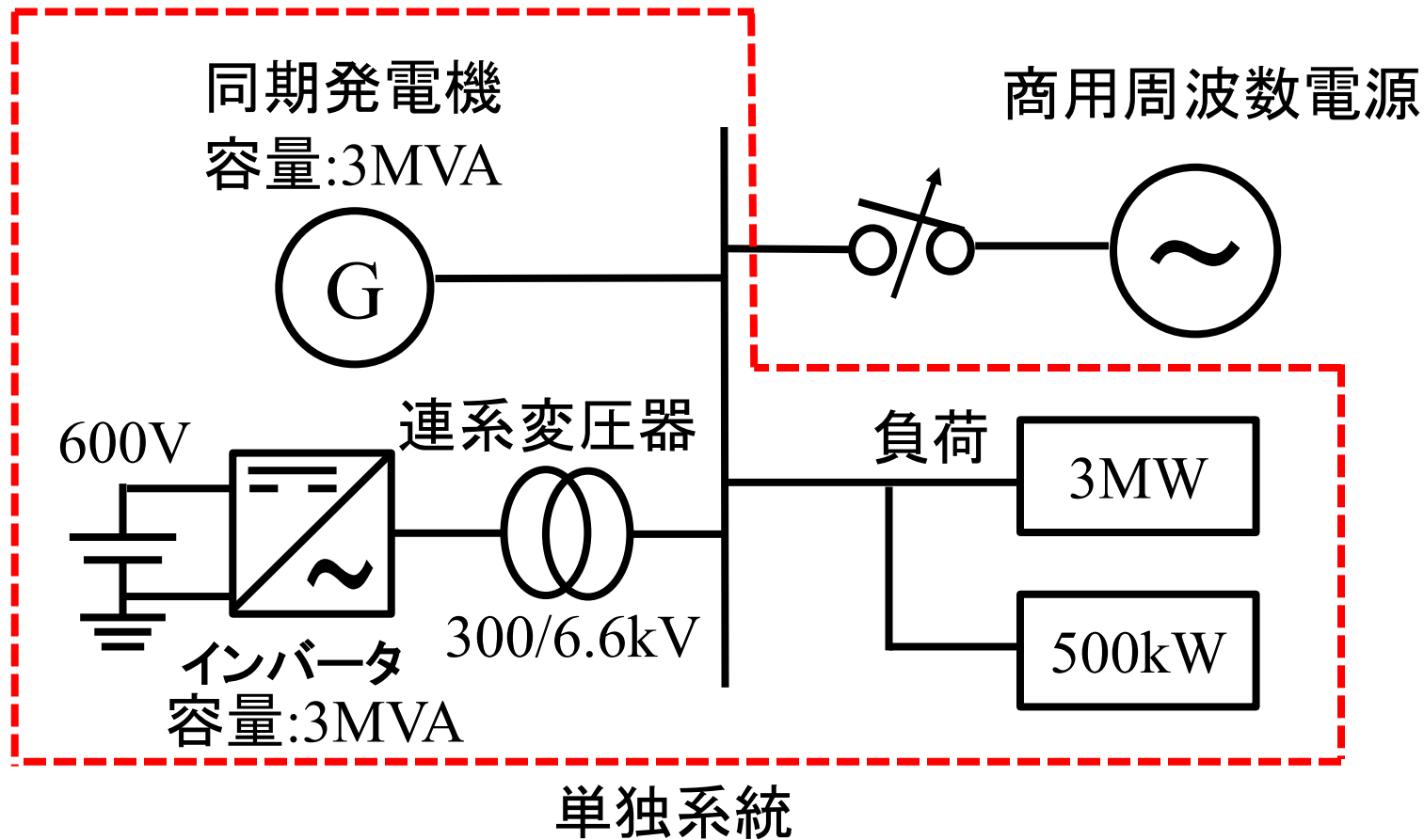


- 同定度の容量であれば安定性に問題ない
- **INV**は**P,Q**制御

ただし負荷分担が課題

- 発電機はガバナ(速度制御)＋電圧制御
- **INV**は**PQ**制御ゆえ負荷分担制御が必要となる

B 想定したマイクログリッド

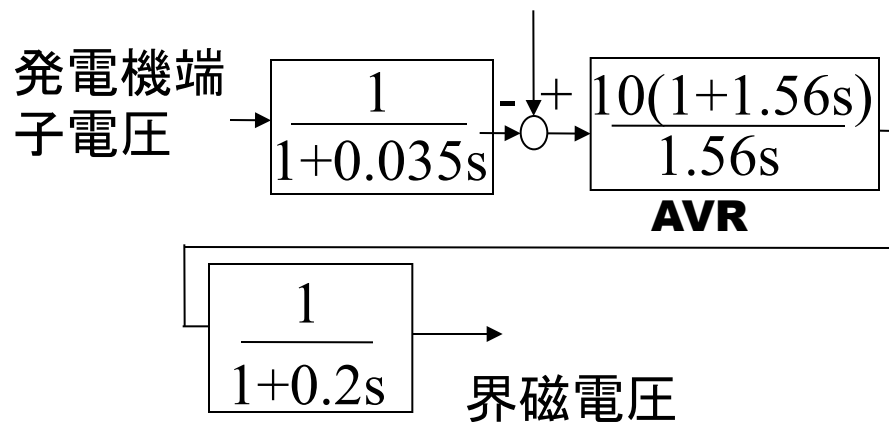


同期発電機3MVA, インバータ電源容量3MVA と同容量を想定

B 発電機のAVR と GOV 制御

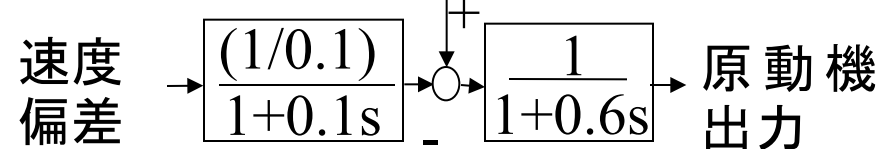
AVR 制御

端子電圧指令値



GOV 制御

負荷設定値



GOV

原動機特性

速度調定率 = 10%

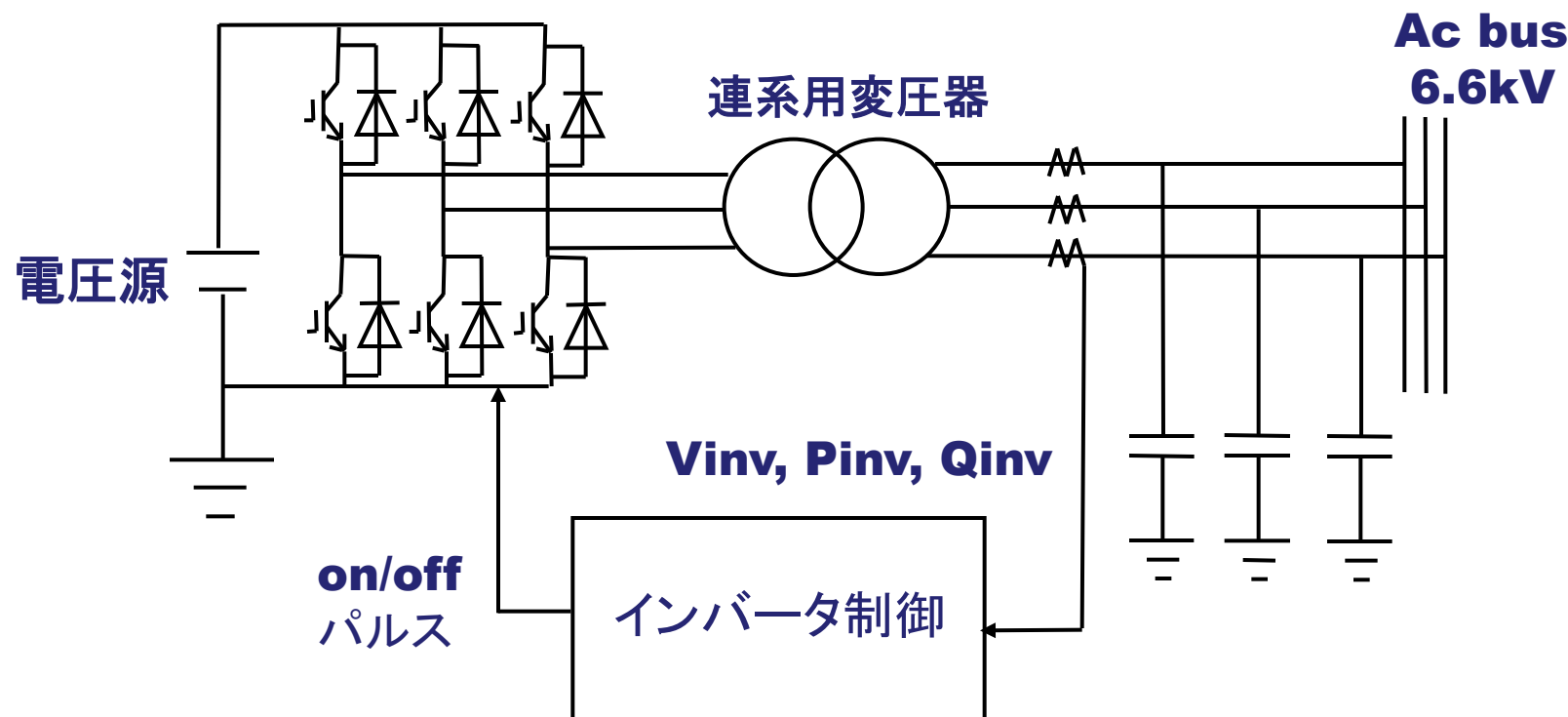
速度制御=周波数制御

発電機はパークモデルで模擬

3MW, 6.6kV, H=2s, 定数はガイドライン参照

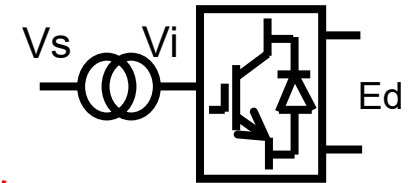
Ref: 電力系統連系技術要件ガイドライン 2003

B インバータ回路

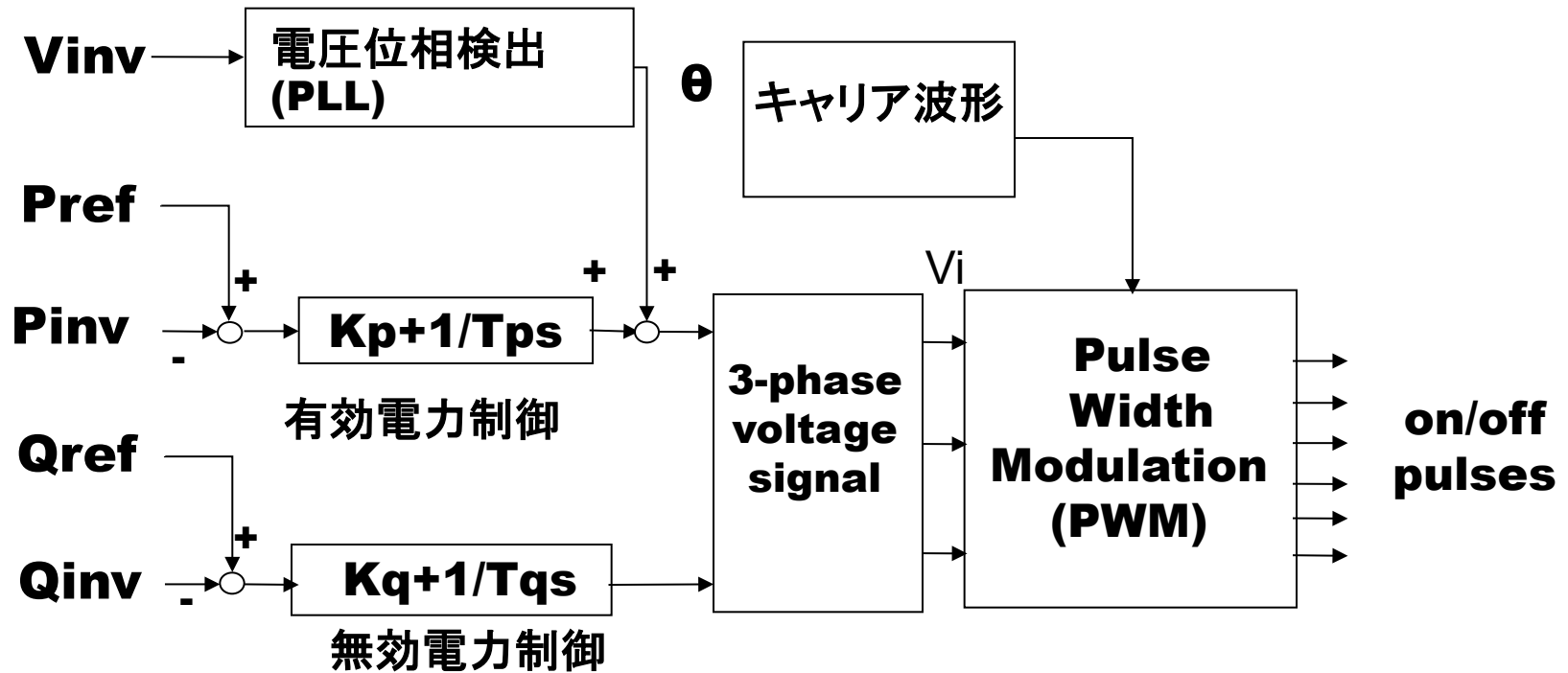


- インバータは6アームフルブリッジ構成
- 系統側から電圧，有効電力，無効電力を検出してインバータ制御をかける

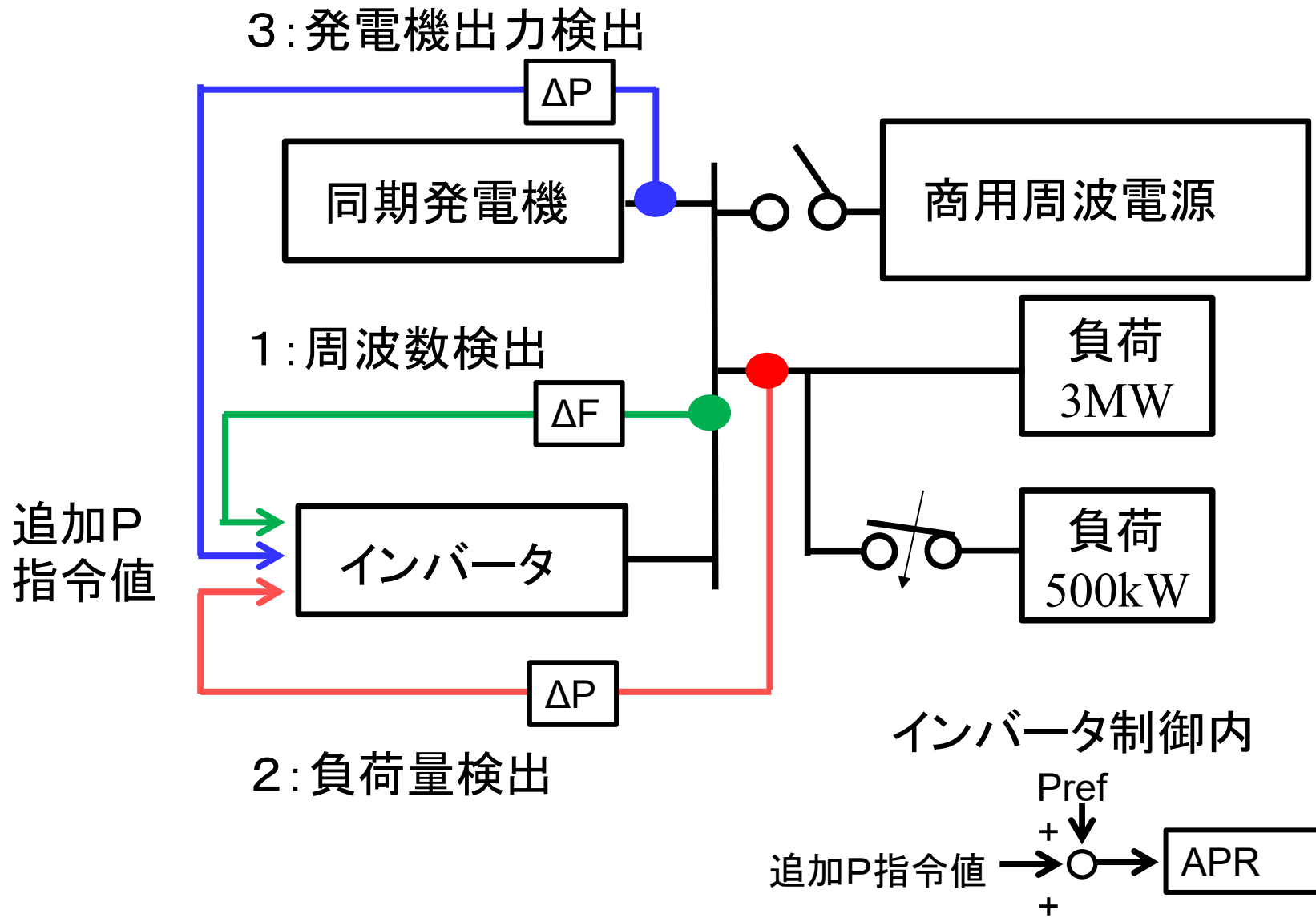
B インバータ制御



P-Q 制御 (有効電力制御, 無効電力制御)



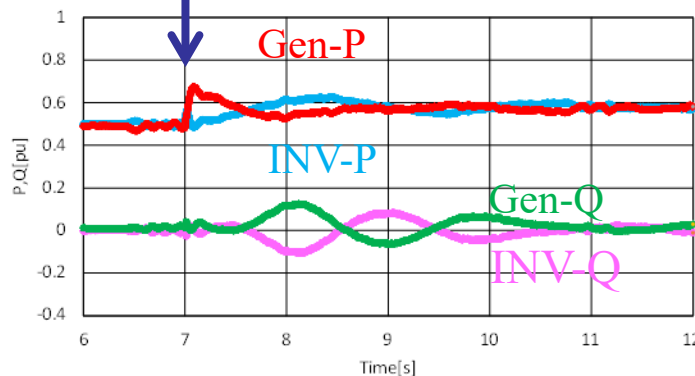
B 負荷分担方法3通り



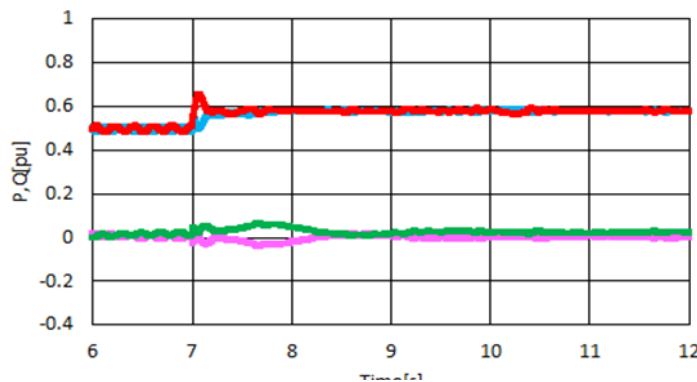
B 負荷分担

負荷増加

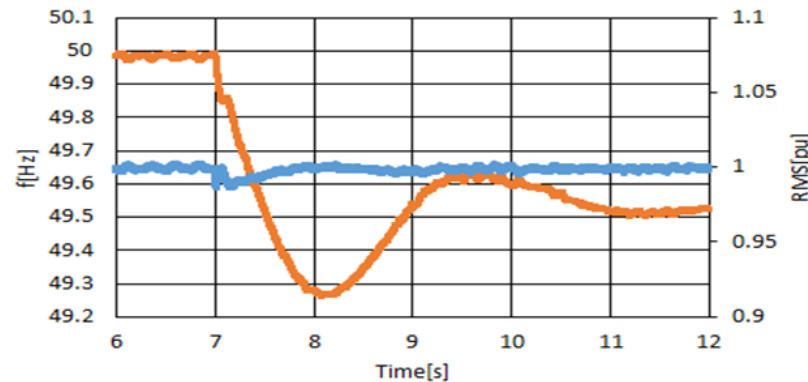
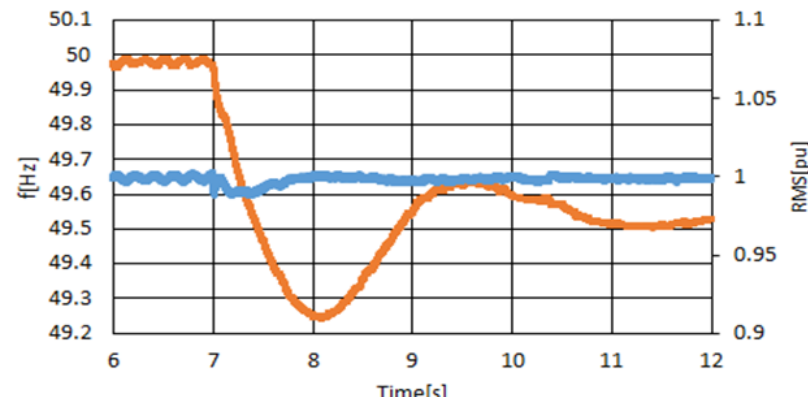
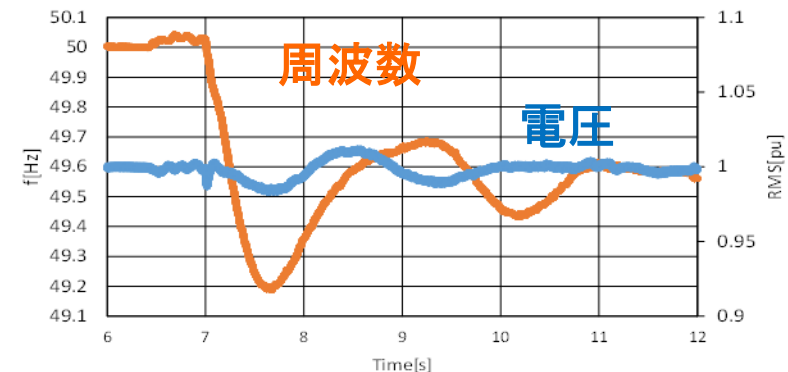
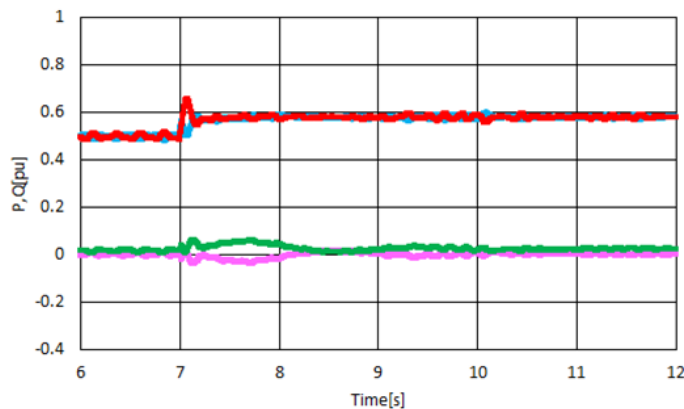
1:
周波数
検出



2:
負荷量
検出



3:
発電機
出力

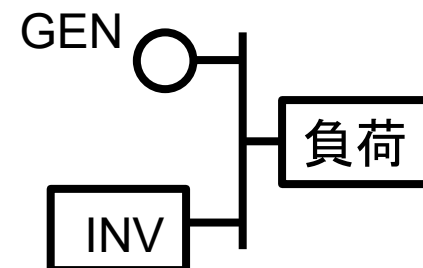


B 結論

- 早い負荷分担は，負荷量検出および発電機出力検出方法である。
- 負荷へのフィーダが多い場合は検出点が多くなる欠点がある。その場合は発電機出力で検出
- 工場内，地域マイクログリッド等に適用が可能

C 同期発電機の何倍まで？

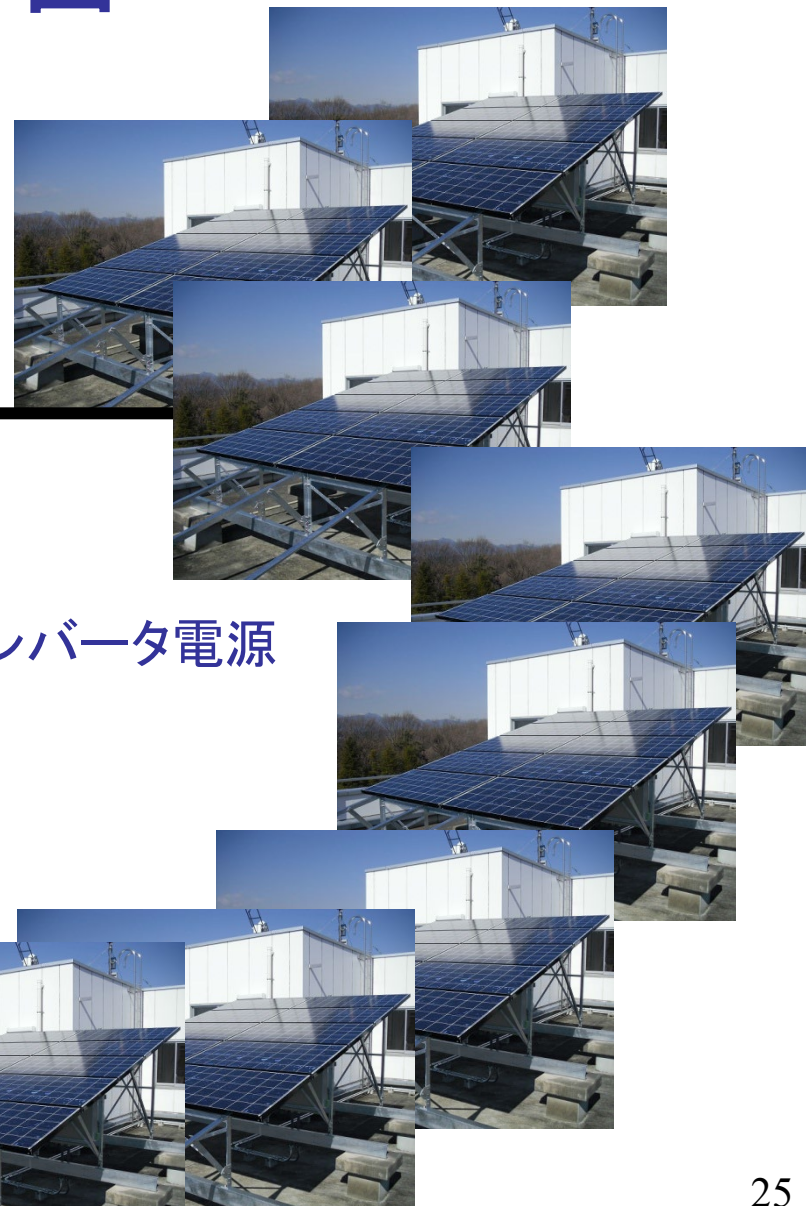
GEN<INV



- 自立したマイクログリッド等で同期発電機の何倍までインバータ容量は運転できるか？

C イメージ図

ジーゼル発電機
(同期発電機)



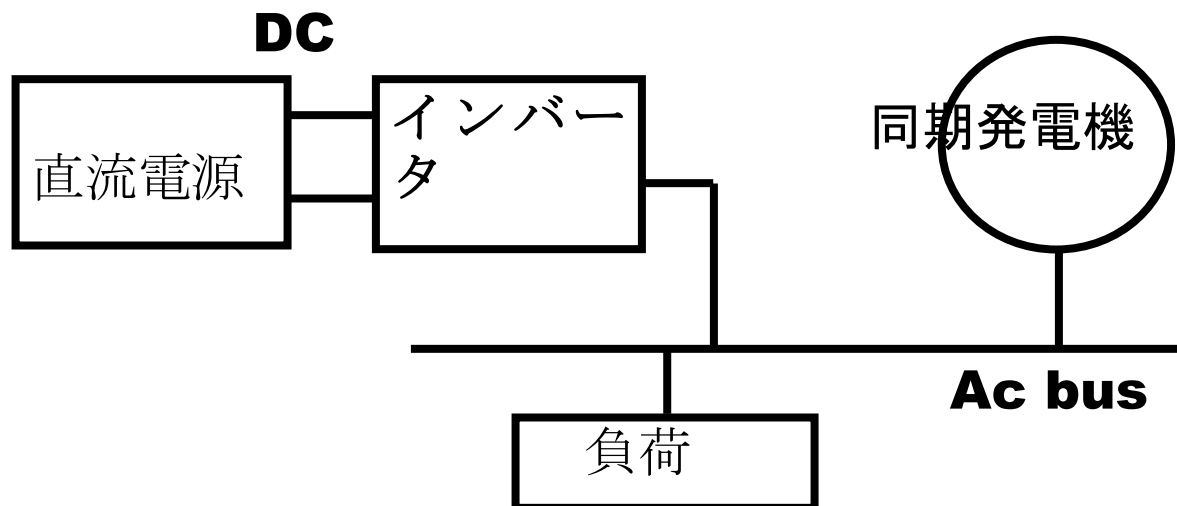
インバータ電源

負荷

課題:

- 容量での限界
発電機の何倍まで?
- 必要となる制御

C 単独運転モデル



S. Yamada, J. Arai, Control of inverter coordinating with synchronous generator in isolated microgrid, IEEJ P&ES – IEEE PES Joint Symposium, Thailand, p17-22, Feb. 24, 2012

C 従来の P & Q 制御

シミュレーションケース

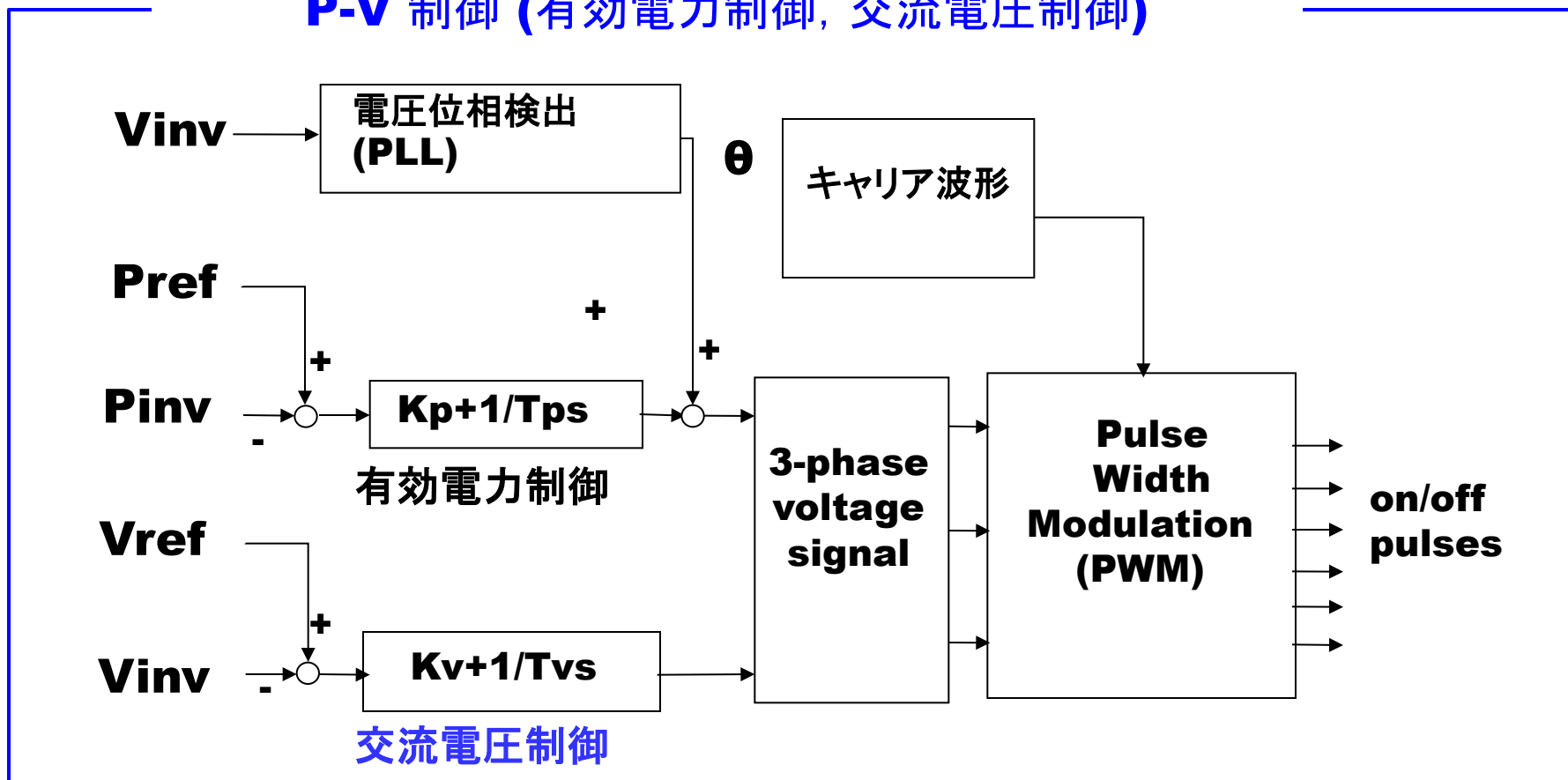
Case	インバータ容量 [MW]	P-Q control	同期発電機容量
Case1	3.0	安定	3.0 MVA
Case2	9.0	安定	
Case3	12.0	不安定	
Case4	15.0	不安定	

発電機 : AVR制御、ガバナ制御

インバータ: 有効電力制御、無効電力制御

C PVインバータ制御

P-V 制御 (有効電力制御, 交流電圧制御)

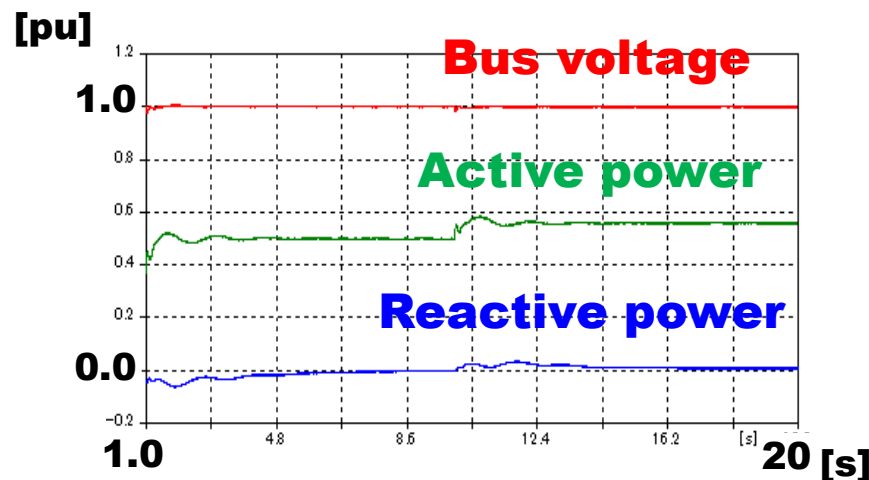


交流電圧維持のために無効電力制御を交流電圧制御に変更

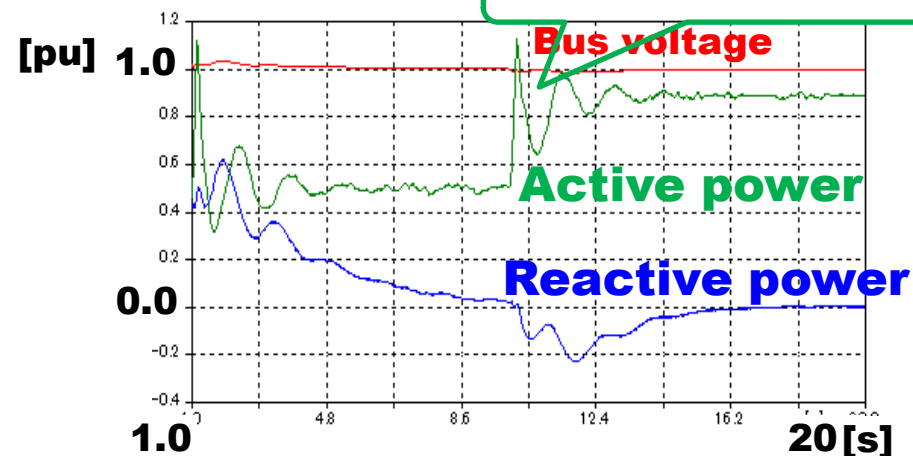
C P&V制御+droop特性

Case	インバータ容量 [MW]	P-V Control with droop	同期発電機容量
Case 5	3.0	安定	3.0 MVA
Case 6	6.0	安定	
Case 7	15.0	安定	
Case 8	18.0	安定	
Case 9	30.0 (10倍)	安定	

C Simulation results



インバータ側諸量

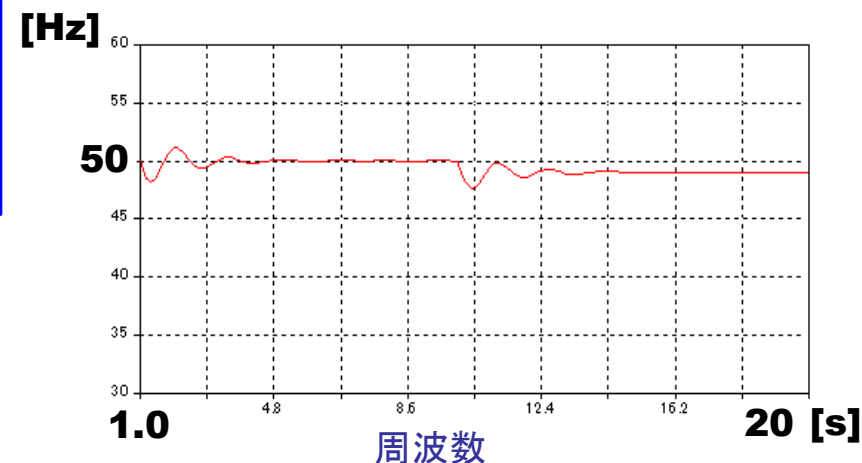


発電機側諸量

インバータ
容量 : 発電機容量

30MW (10) : 3MW (1)

Case 9
一応安定



C シミュレーション結果の要約

P-Q 制御

$$\frac{\text{インバータ容量}}{\text{発電機容量}} = \frac{9 \text{ MW}}{3 \text{ MW}} = 3 \text{ 倍}$$

P-V 制御

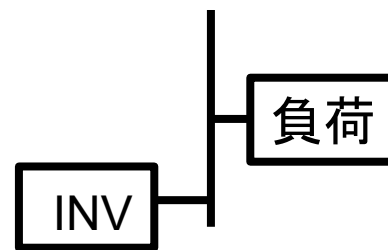
$$\frac{\text{インバータ容量}}{\text{発電機容量}} = \frac{30 \text{ MW}}{3 \text{ MW}} = 10 \text{ 倍}$$

従来のPQ制御では3倍くらいまで。

インバータの制御を変えれば10倍程度, しかし微分制御必要であり実用的ではない。

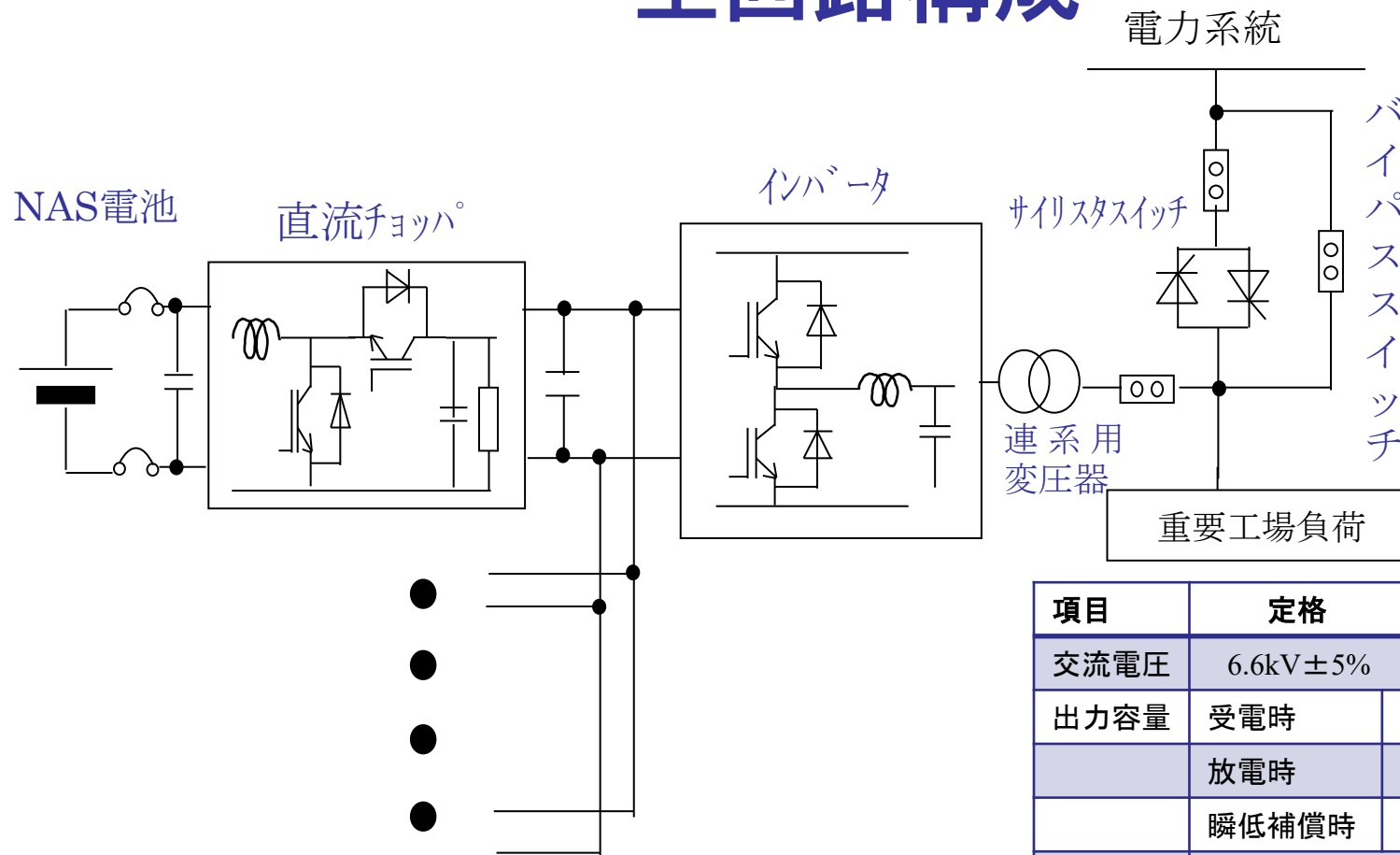
D インバータ1台の場合

- **INV**1台で電力供給



- 現在の**UPS**運転と同じ
- **UPS**は**V**一定制御、周波数一定制御(**CVCF**)
- 問題なく電力供給できる
- 瞬低対策付蓄電池システム等

D 瞬低対策付きNAS電池システム 主回路構成

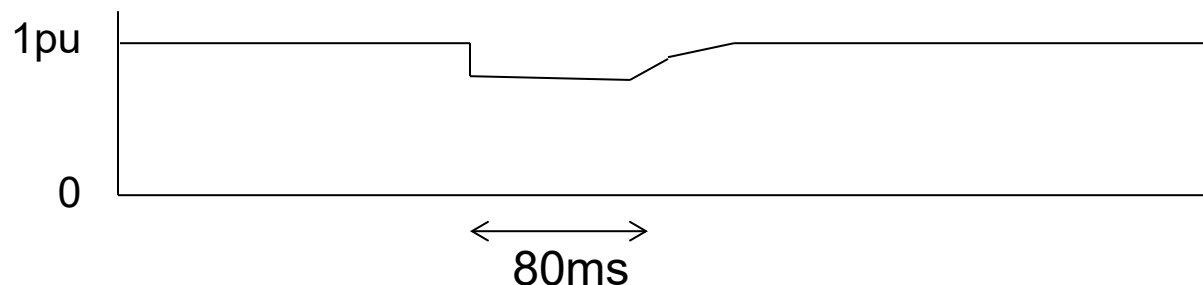


項目	定格	
交流電圧	6.6kV $\pm$ 5%	
出力容量	受電時	1080kVA
	放電時	1000kVA
	瞬低補償時	3000kVA(短時間)
回路構成	3相変換器+直流チョッパ	
適用素子	IGBT	

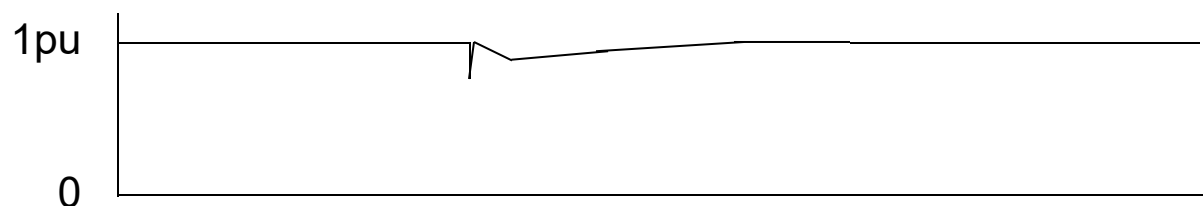
飯島 由紀久, 川上 紀子, 鈴木 健一, 阿部 実, 田代 洋一郎, 武田 秀雄, 相沢 仁士, 阿部 浩幸, 佐藤 光春, NAS電池を使用した大容量瞬低補償装置, H15年度電気学会産業応用部門大会、1-S3-2

D 系統事故時の応答波形

配電線側電圧



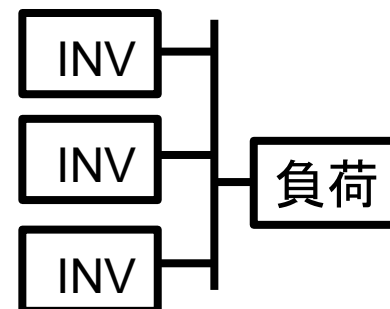
重要負荷側電圧



- ・重要負荷側の電圧低下が改善されて重要負荷は運転継続
- ・系統連系→自立運転 この後系統連系へ復帰

E インバータ電源が複数では？

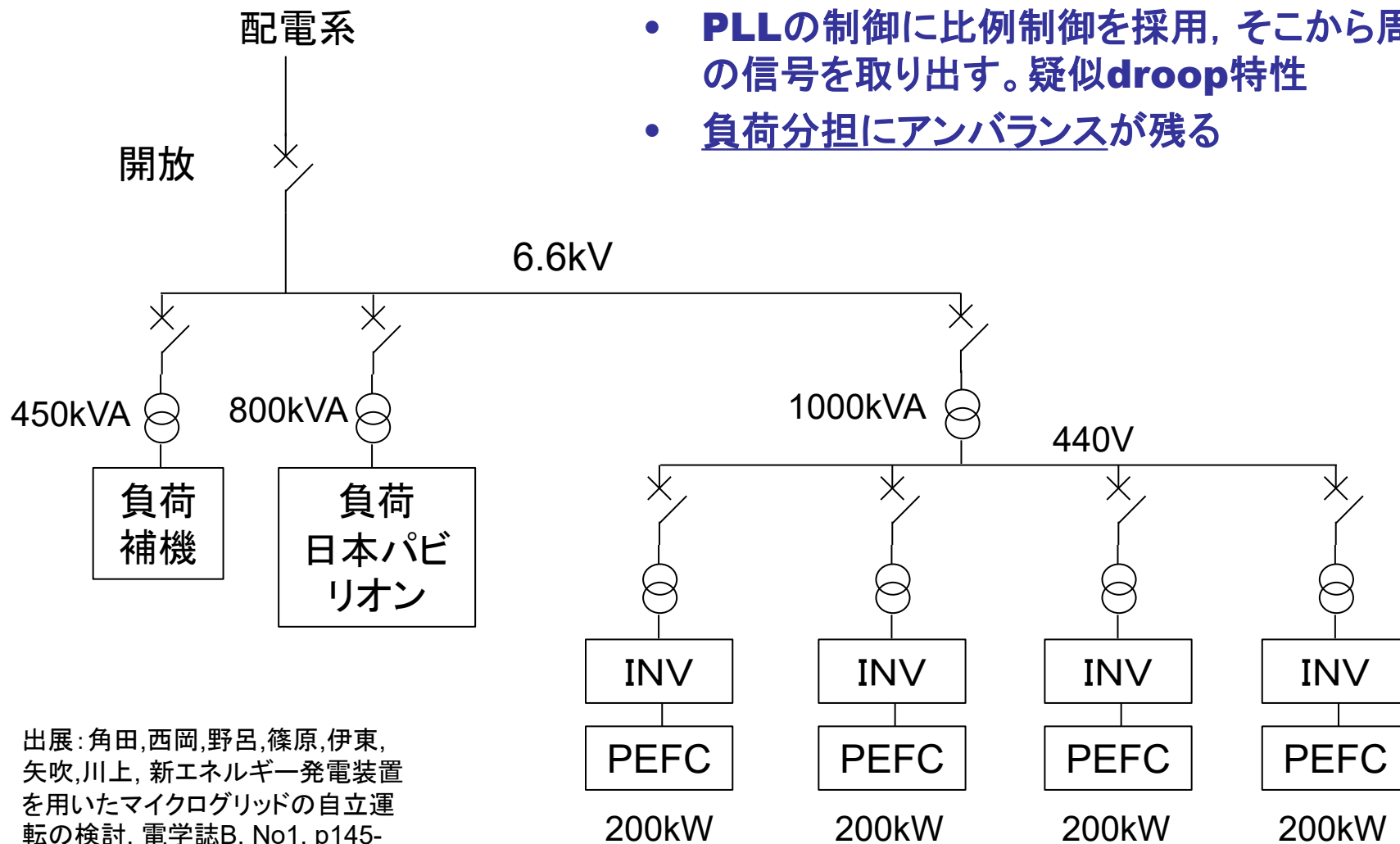
複数**INV**の場合



- 同期発電機が無くインバータ電源のみ
- **UPS**の延長では安定運転できず
- 負荷分担のためのインバータ間の協調運転が課題
- 愛知万博での実系統で自立運転し特筆すべき成果を出す

E 愛知万博での自立運転

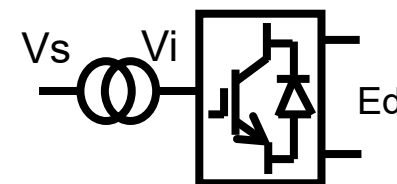
- 実系統で運転し特筆すべき成果
- **PLL**の制御に比例制御を採用, そこから周波数の信号を取り出す。疑似**droop**特性
- 負荷分担にアンバランスが残る



出展: 角田, 西岡, 野呂, 篠原, 伊東, 矢吹, 川上, 新エネルギー発電装置を用いたマイクログリッドの自立運転の検討, 電学誌B, No1, p145-153, 2007

E 愛知万博での制御

並列するインバータ皆同じ制御

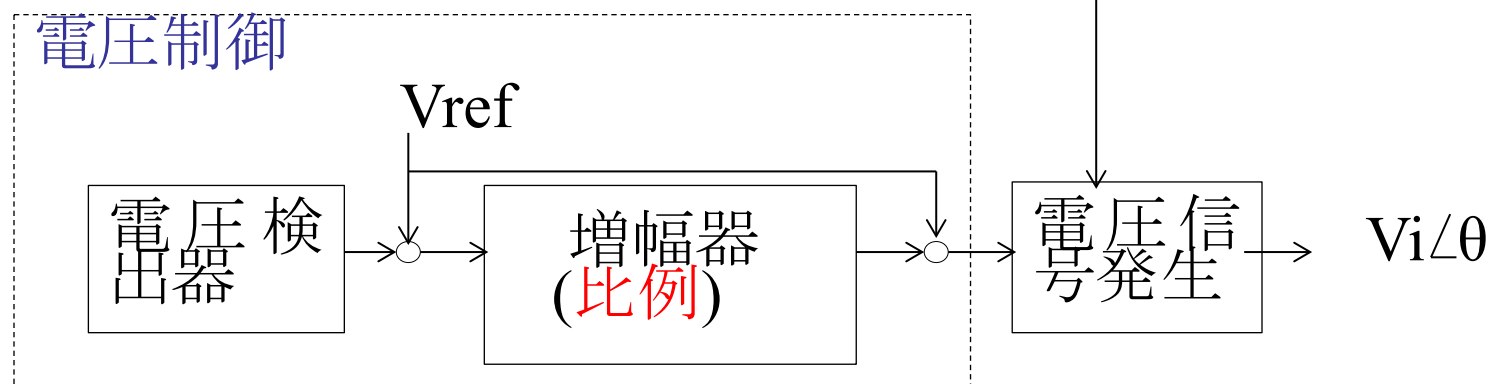


位相/周波数検出

基準周波数

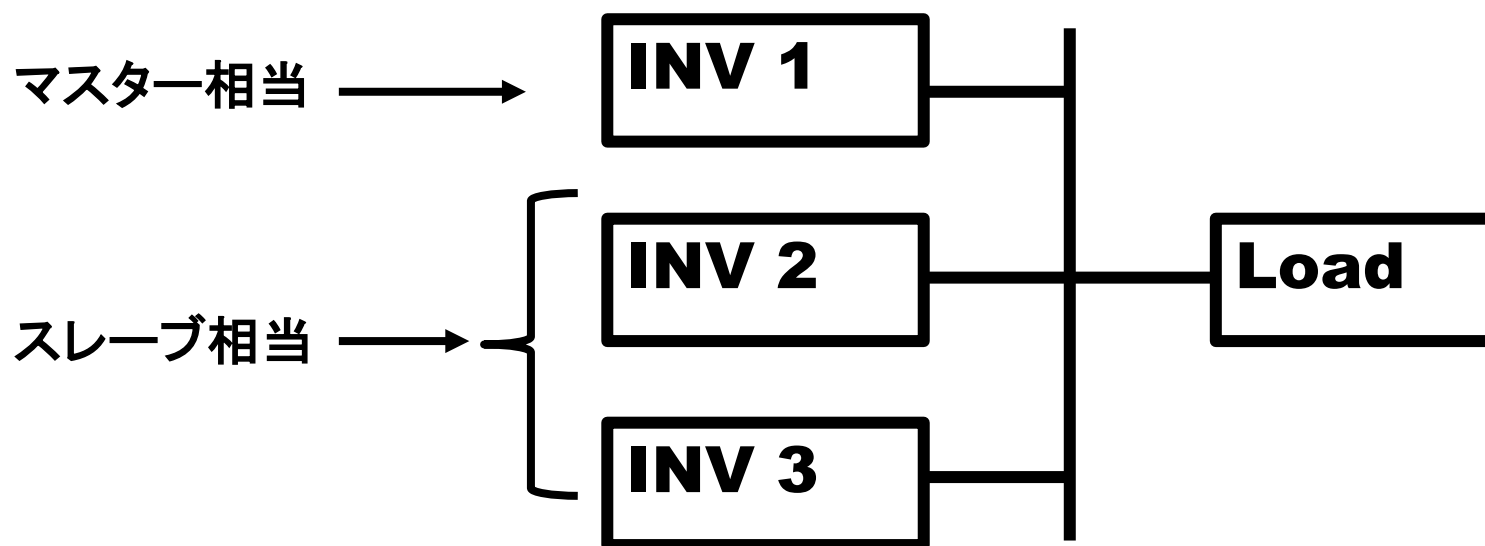


電圧制御



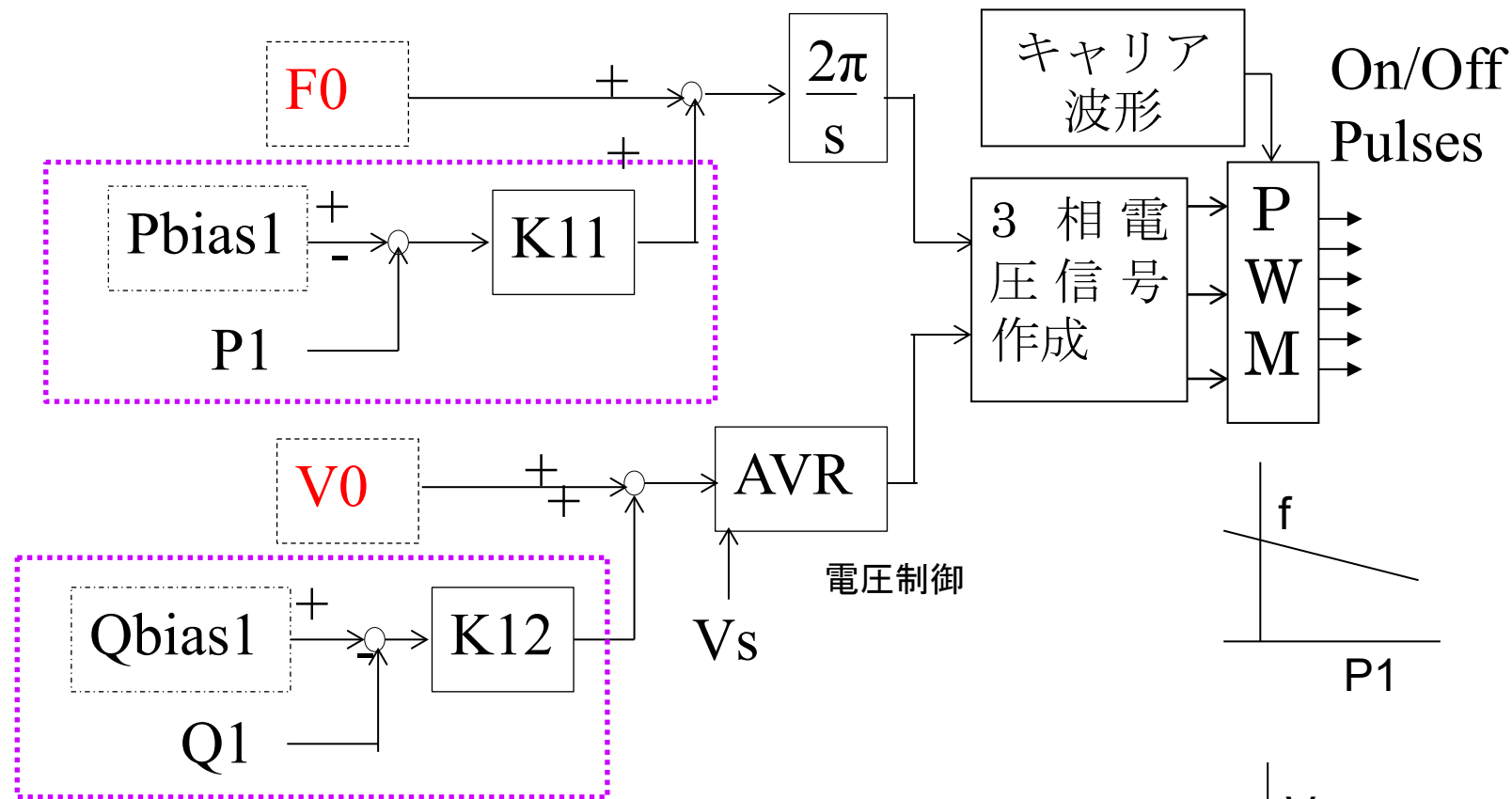
E 自立マイクログリッド

- ・ 負荷分担にアンバランスが出ず、均等分担する制御方式を提案
- ・ 3台のインバータを想定



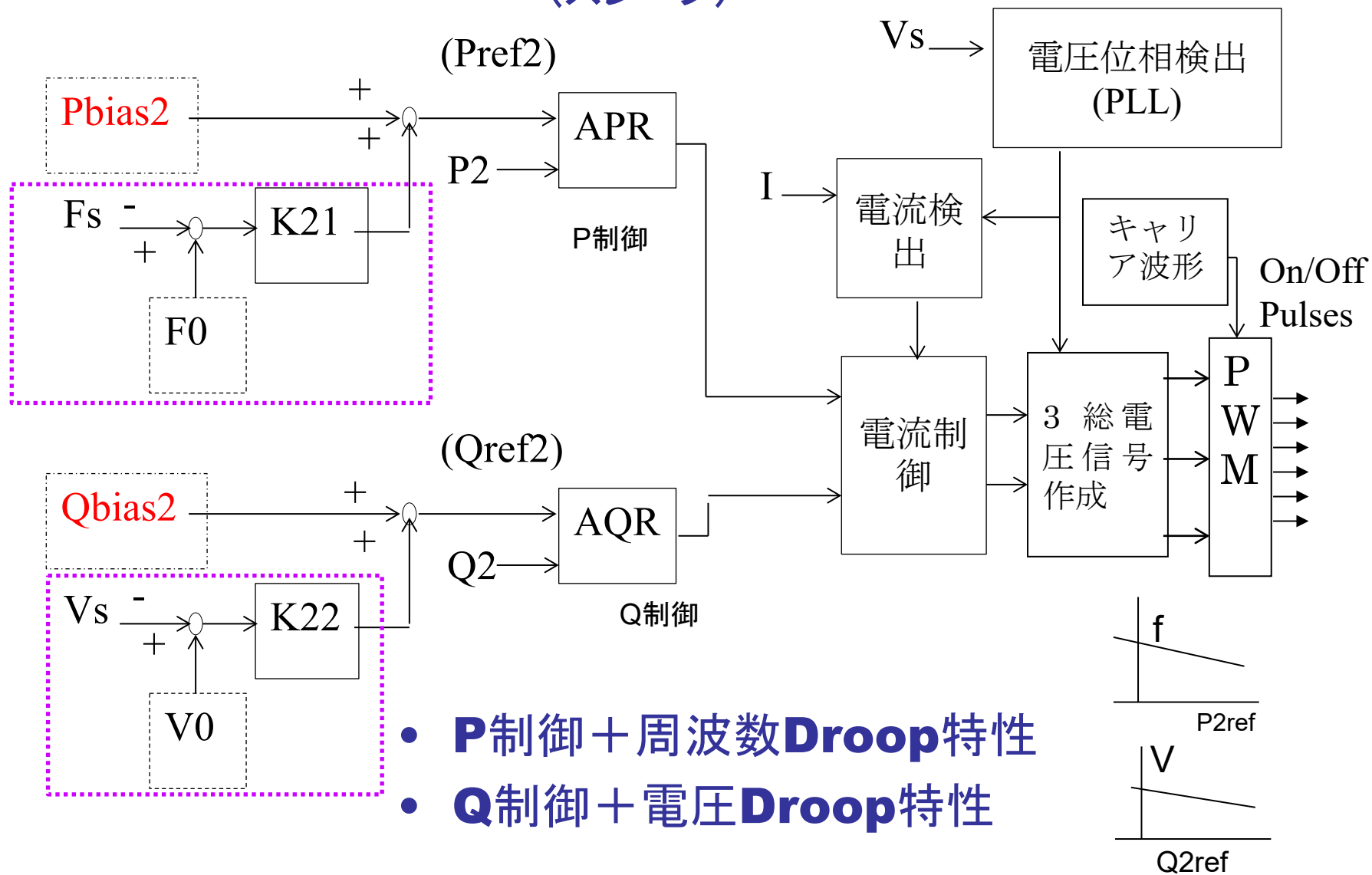
- ・ 直井、荒井、野呂、インバータ電源で電力供給する自立マイクログリッドにおけるインバータ電源の制御方式、電気学会論文誌B、Vol.137, No.6, pp426-433、2017

E 提案するINV1の制御回路 (マスター)



- 周波数固定＋有効電力**Droop**特性
- 電圧振幅制御＋無効電力**Droop**特性

E 提案するINV2,3の制御回路 (スレーブ)

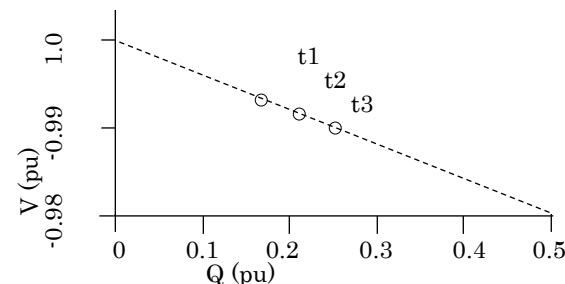
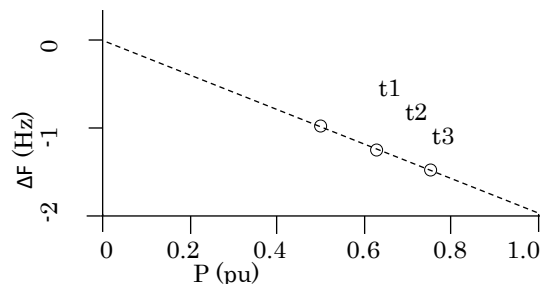
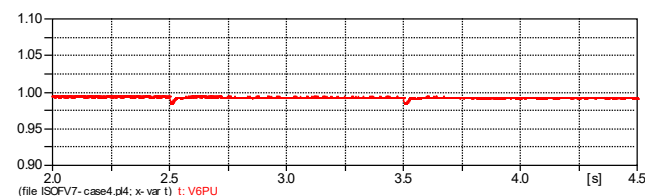
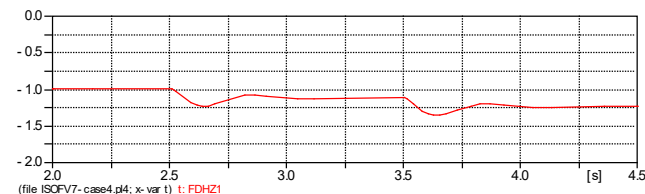
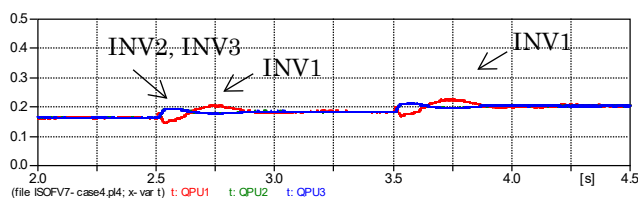
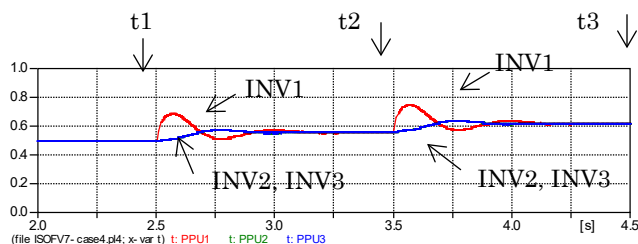


- **P制御＋周波数Droop特性**
- **Q制御＋電圧Droop特性**

E 定格

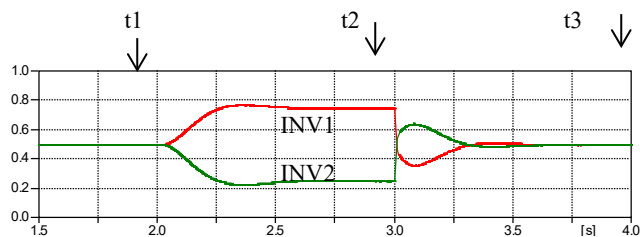
母線電圧	6.6kV, 50Hz		
インバータ	INV1	INV2	INV3
容量	1MW	1MW	2MW
垂下特性	周波数／有効電力 -4%/pu	有効電力／周波数 -4%/pu	同左
	電圧／無効電力 -4%/pu	無効電力／電圧 -4%/pu	同左
設定値	F0=50Hz, V0=1.0pu		

E シミュレーション結果 負荷増加

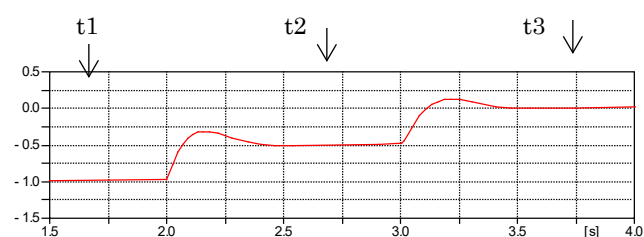


(0.5MW,0.5MW,1.0MW)
 初期負荷2MW(0.5pu,0.5pu,0.5pu) → +0.25MW → +0.25MW
 負荷増加直後はINV1が分担するが、すぐに全INVで負荷分担する

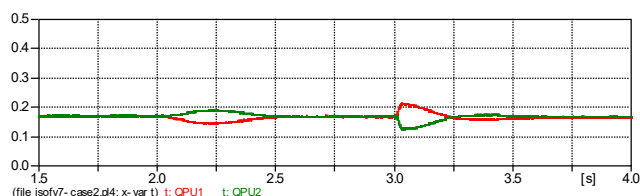
E INV1とINV2の負荷分担変更



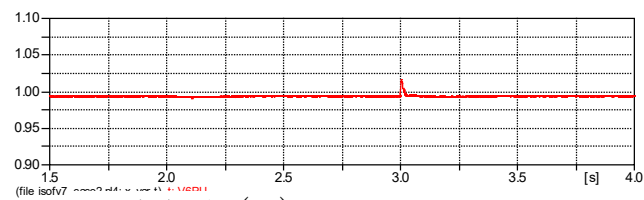
(a) INV1とINV2の有効電力(pu)



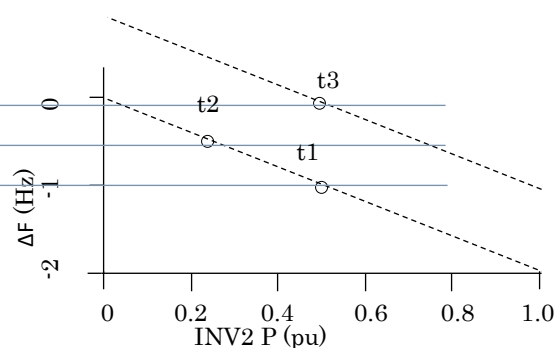
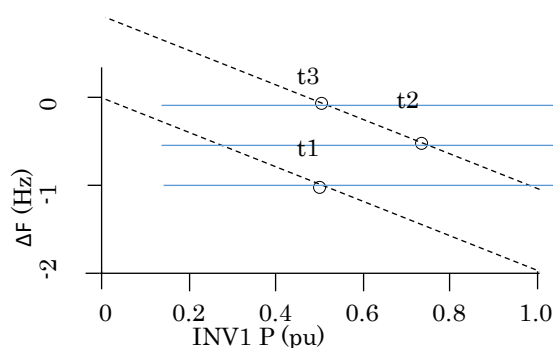
(c) 周波数偏差(Hz)



(b) INV1とINV2の無効電力(pu)



(d) 電圧(pu)



負荷1MW(pf=0.95)

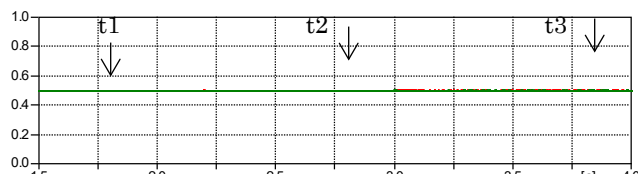
t1=0 Pbias1=0, Pbias2=0

t2=2s Pbias1=0.5pu, Pbias2=0

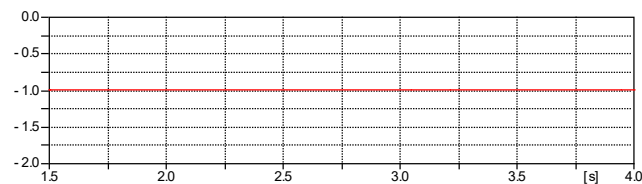
t3=3s Pbias1=0.5pu, Pbias2=0.5pu

有効電力分担の変更が容易

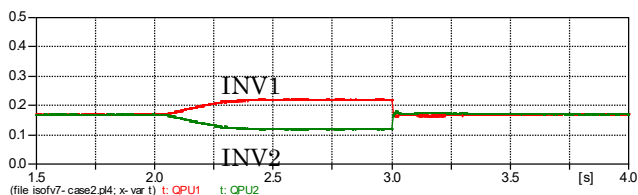
E INV1とINV2の無効電力分担変更



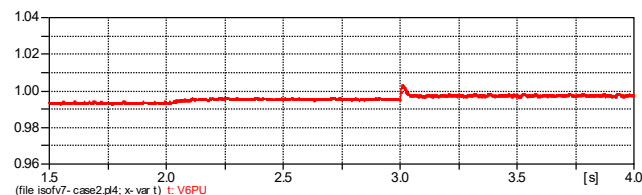
(a) INV1とINV2の有効電力(pu)



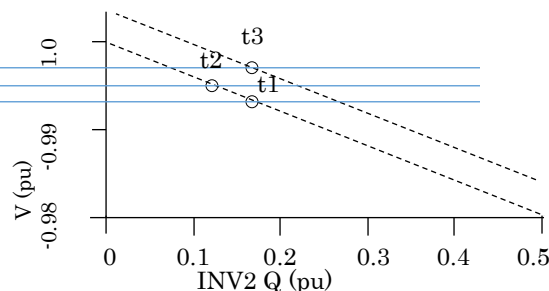
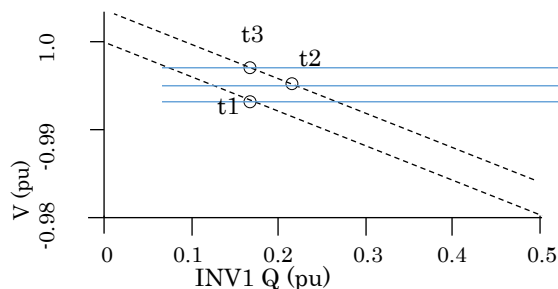
(c) 周波数偏差(Hz)



(b) INV1とINV2の無効電力(pu)



(d) 電圧(pu)



負荷1MW(pf=0.95)

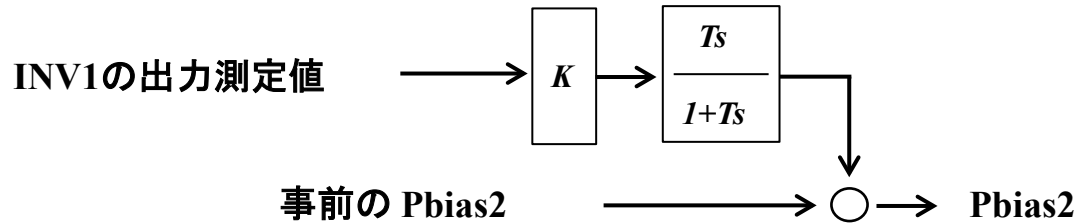
t1=0 Qbias1=0, Qbias2=0

t2=2s Qbias1=0.1pu, Qbias2=0

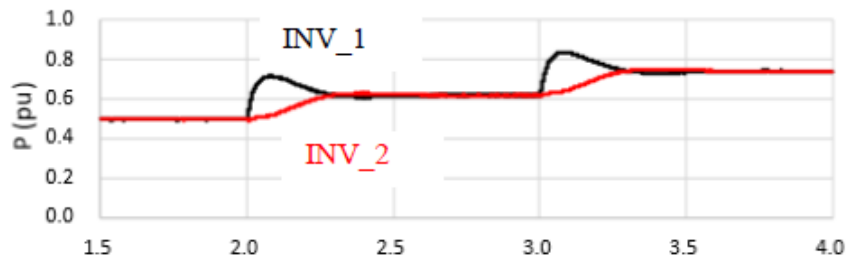
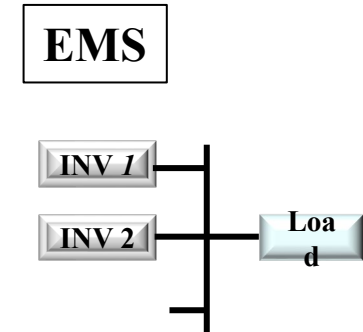
t3=3s Qbias1=0.1pu, Qbias2=0.1pu

無効電力分担の変更が容易

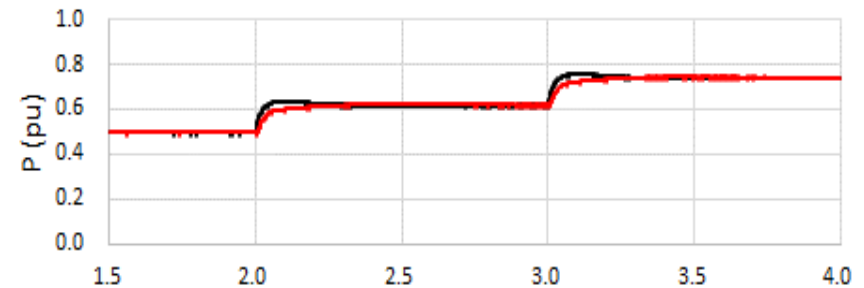
E EMSによる協調運転



EMSによる協調制御



協調制御無し



協調制御有

INV1とINV2の出力(pu)

E まとめ

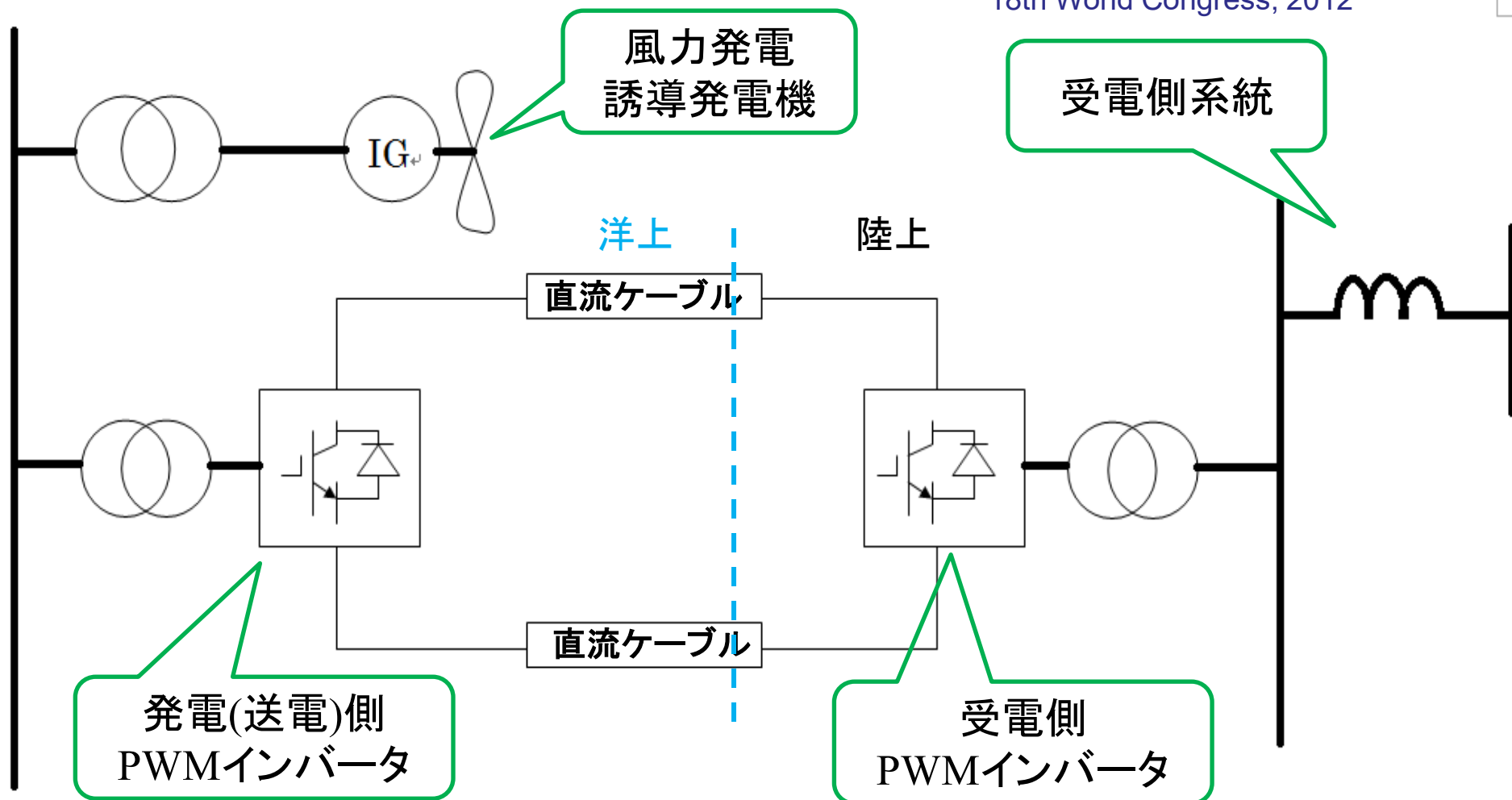
- インバータ電源だけで電力供給するマイクログリッドにおけるインバータの新しい制御方式を提案
- 従来方式に比べ定常偏差が残らず，インバータ間での負荷分担を正確に制御できる
- ただし，制御が追従するまで，ここで言うマスターのインバータが，過渡的には追加負荷を分担するので，その出力がインバータの容量を超えないような適用が望まれる
- インバータを管理制御する**EMS**が必要
(Energy Management System)

F 直流連系

- 電力系統間の直流送電, 周波数変換
従来から行われている
- 洋上ウィンドファームから電力を直流で送る
今後の日本で期待されているシステム

荒井純一, 桑原渉, 田中亮, 横山隆一
 「Control of Dc Transmission System
 from a Wind Farm」, 2011年9月1日,
 No.899, p12237-12242, Miran, IFAC
 18th World Congress, 2012

F 主回路

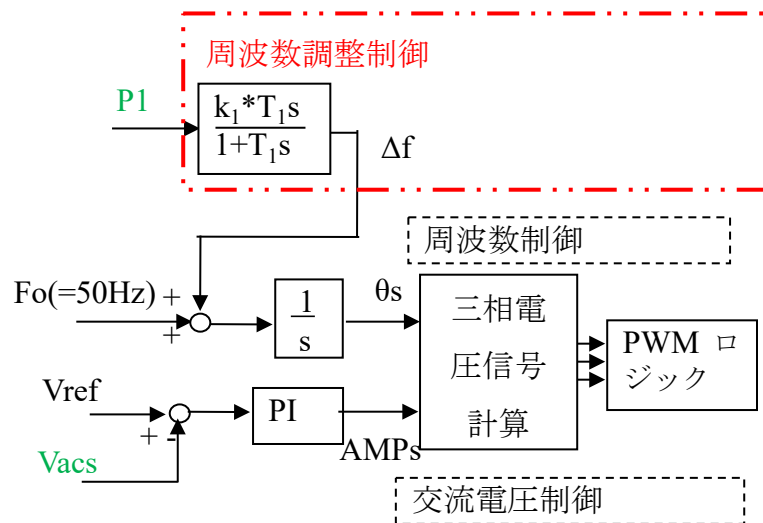


50Hz一定, 交流電圧一定制御

直流電圧一定制御, 交流電圧一定制御

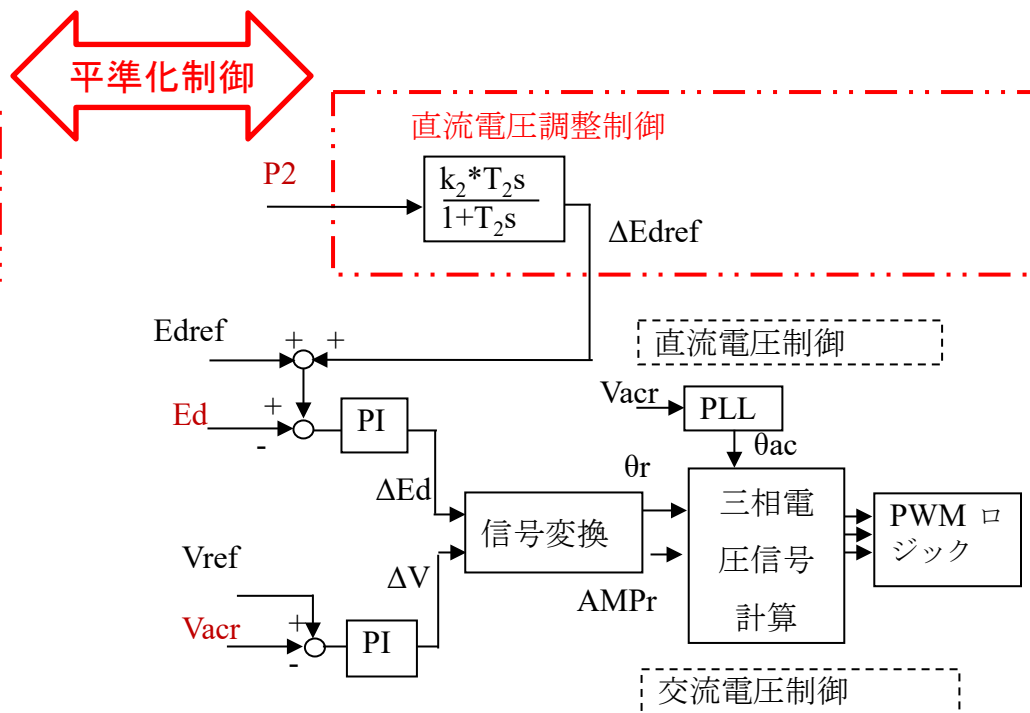
F 基本制御＋平準化制御

洋上側



周波数一定制御
交流電圧振幅制御

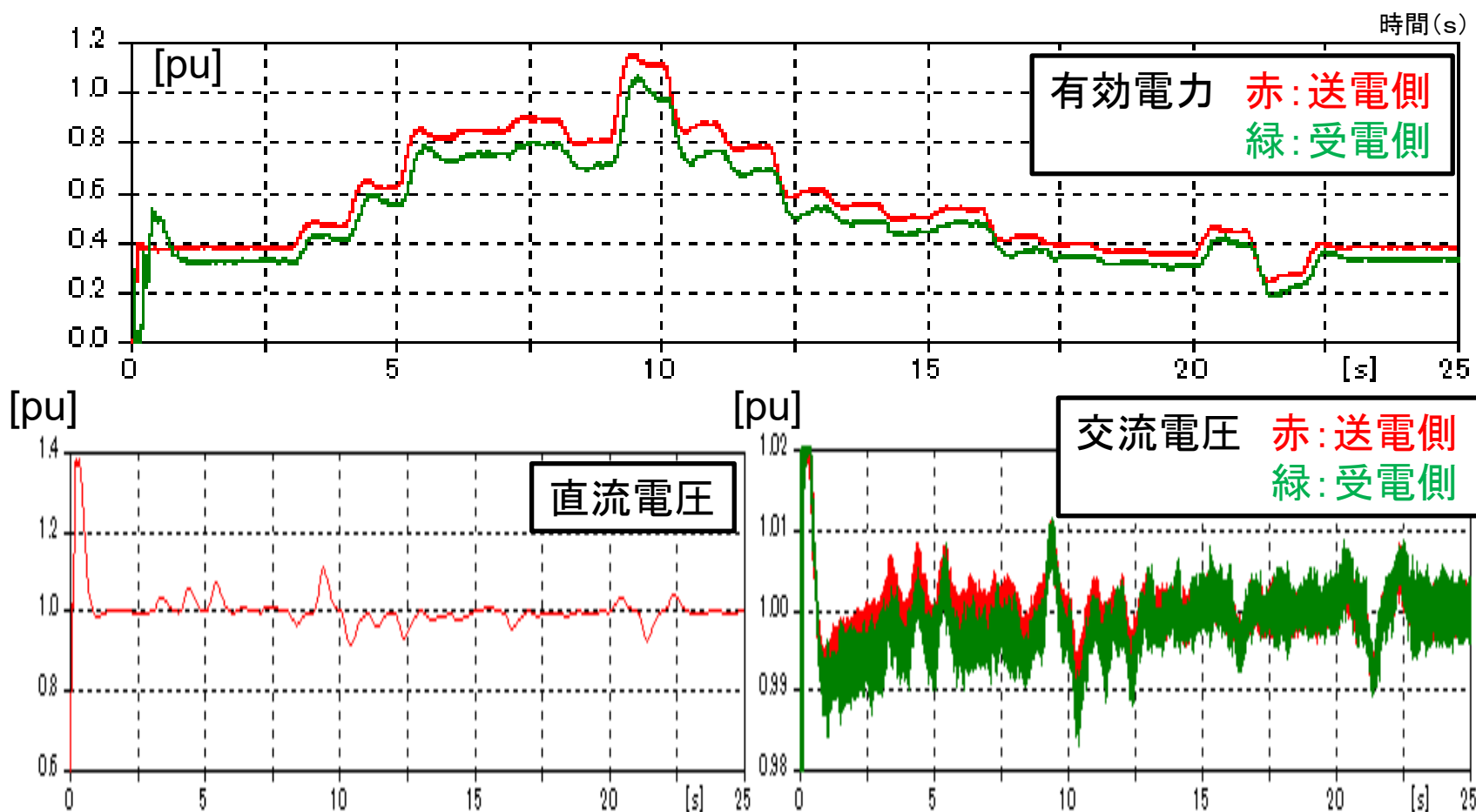
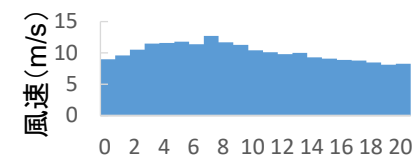
受電側



直流電圧一定制御
交流電圧振幅制御

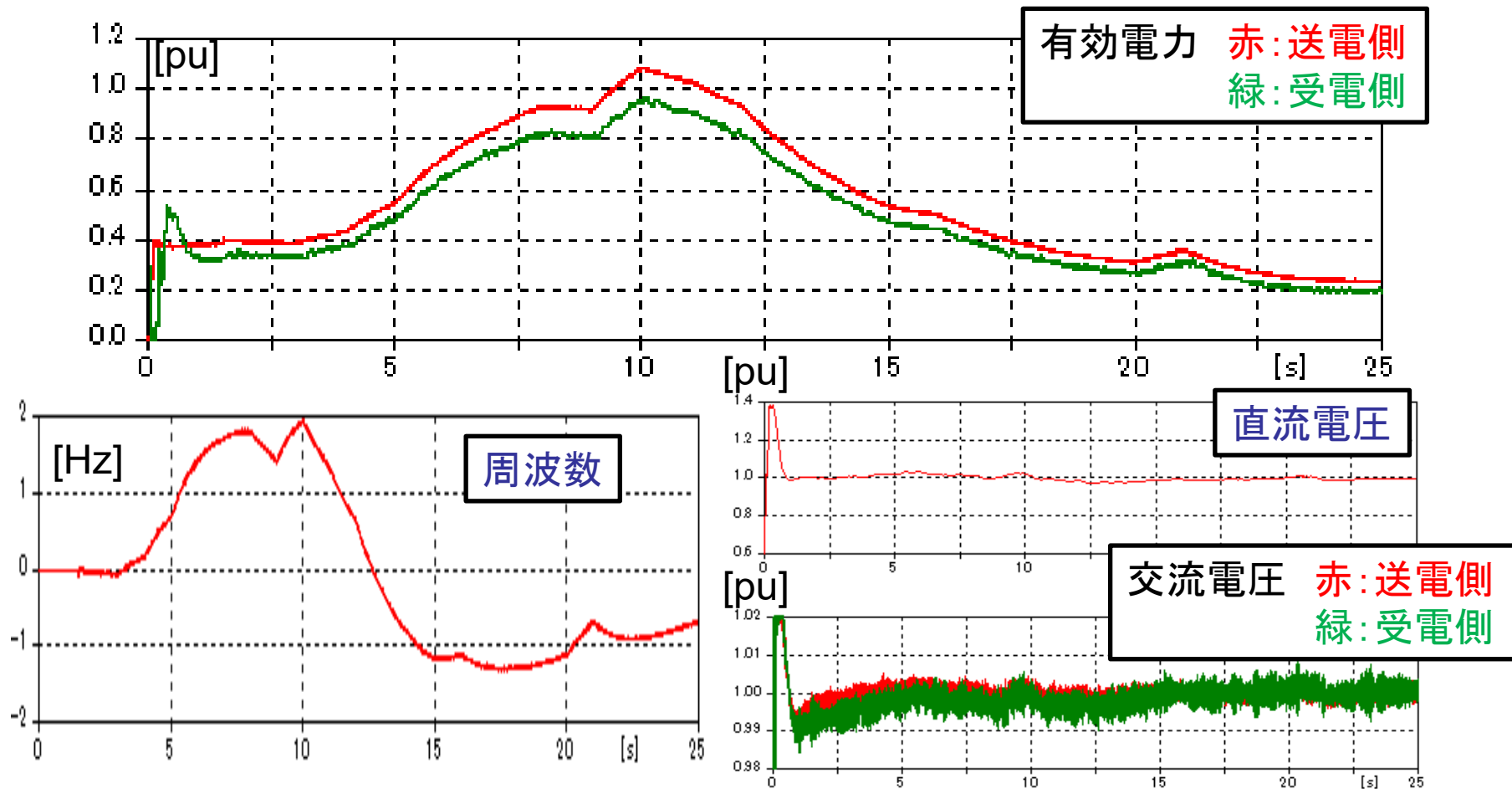
F シミュレーション結果

風速データ



電圧変動も少なく、安定に運転できる

F 周波数をモディファイした場合

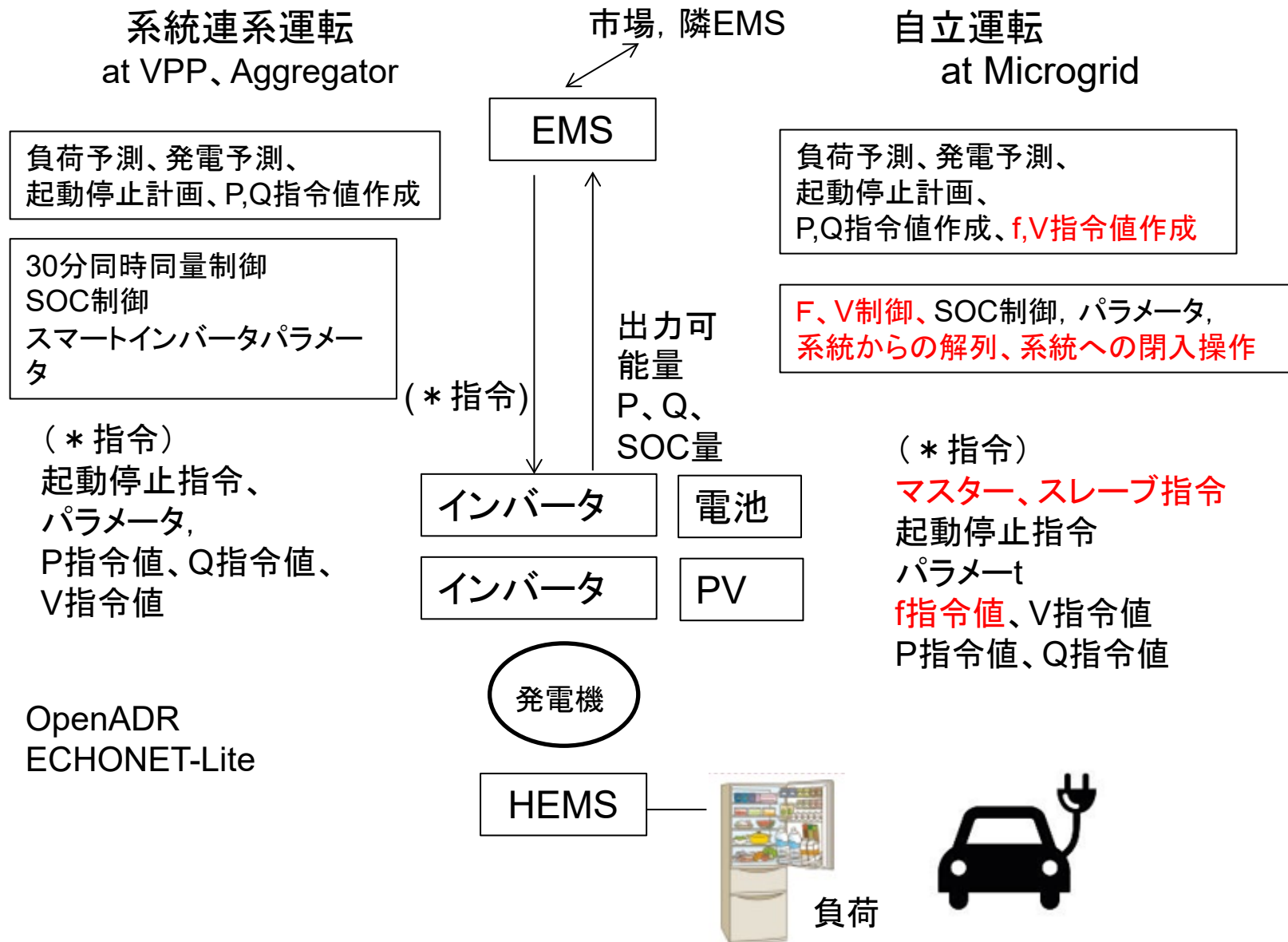


周波数をモディファイすると送電電力の平準化ができる

F まとめ

- ウィンドファームからの直流送電は安定運転可能。
- ウィンドファーム側では周波数を変化させてある程度
の出力平準化ができる。その変動幅は $\pm 2\text{Hz}$ ($\pm 4\%$)程度

4. サイバー空間におけるEMS



5. まとめと課題

- インバータは極めて能力高い電源
- インバータはマイクログリッドの主役
- インバータは仮想発電機として使える
- **EMS**が必要。**EMS**とのやりとりが課題(連系・自立)
- 連系↔自立切り替え
- インバータ間の協調運転制御(自立)
- 蓄電池の**SOC**把握(連系、自立)
- 変圧器の突入電流対策(自立)