

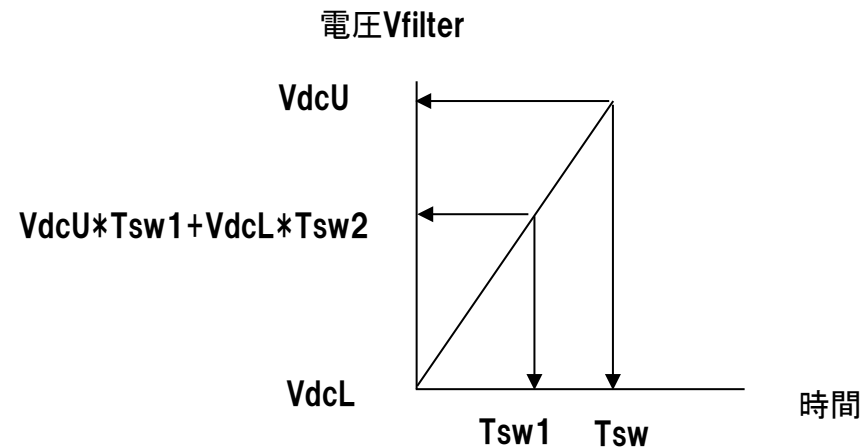
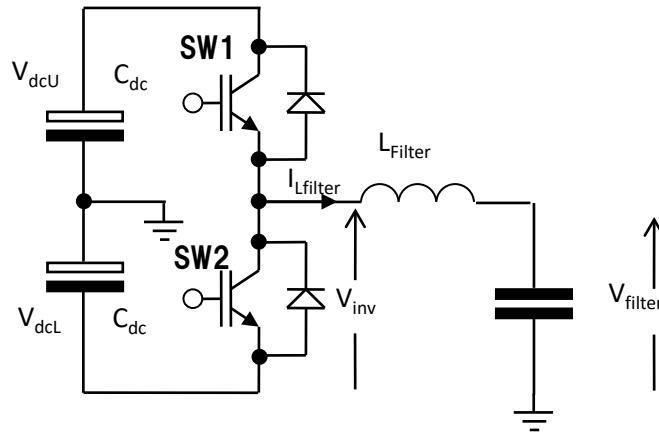
デジタルグリッドルータ及びセルグリッドの開発

(株)DGキャピタルグループ代表取締役 兼
(社)デジタルグリッドコンソーシアム
代表理事 阿部力也

- 1 インバータの動作原理
 - ・ **PWM**制御とヒステリシス制御
 - ・ **DGR**のヒステリシス電流制御
 - ・ 電流制御による電圧作成 (**GFM**化)
 - ・ 仮想インピーダンスによる内部電圧位相制御 (**GFM**位相制御)
- 2 **DGR**の多入力電源制御
 - ・ **DC**母線電圧維持制御
 - ・ **PV/Gen/Bat**などマルチ電源の入力制御
 - ・ **Bat**—**SOC**制御
 - ・ 系統接続部の**GFL**／**GFM**切り替え
- 3 **DGR**の**GFM**並列運転
 - ・ 電圧**PLL**による電圧位相制御
 - ・ 周波数偏差フィードバックによる並列同期
 - ・ **GPS**時刻同期 (**Time base synchronization**) による並列運転
 - ・ **MGC** (ミニグリッドコントローラ) による系統位相の伝送
- 4 系統とセルグリッド並列運転
 - ・ 有効電力・無効電力潮流制御
 - ・ 系統分離時の位相同期
 - ・ 系統遮断器の同期投入・無停電分離
 - ・ セルグリッドブラックスタート
5. 系統内**DGR**分散運転 (**MG**も含む)
 - ・ **MGC**による調整力の提供
 - ・ **MGC**による同期化力の提供
 - ・ **MGC**による慣性力の提供
 - ・ **MGC**による再エネ利用率最大化
6. **DGR**によるビジネスモデル
 - ・ **DGR**と需要家間の自己託送制御
 - ・ セルグリッド内完全自立の経済性
 - ・ セルグリッド部分供給モデルの経済性
 - ・ 離島モデルの経済性
 - ・ **DGR**の目指すビジネスモデル
 - ・ **DGR**の価格低下シナリオ
 - ・ **MGC**と系統連系における認証プロセス
7. オープンソースインバータ
 - ・ **DGR**の制御チップ (**FPGA**+**CPU**)
 - ・ 制御ソフトウェアのオープンソース化
 - ・ オープンソースコミュニティによるカーネルバージョンアップ
 - ・ デジタルグリッドコントローラ (**DGC**) による制御ソフトのアップデート
 - ・ ハードウェア情報のオープンソース化
8. まとめ
 - ・ デジタルグリッドコンソーシアムでのコミュニティ構築
 - ・ 世界展開へのプロセス
 - ・ 再エネ主力電源化の可能性

1. インバータの動作原理

(1) ハーフブリッジインバータ



左図はHalf Bridge Inverter

- SW1がオンすると V_{inv} に V_{dcU} が印加される
- SW2がオンすると V_{inv} に V_{dcL} が印加される
- V_{filter} は V_{inv} の時間平均値の電圧となる

電圧と時間が比例関係にあるので直線で表す

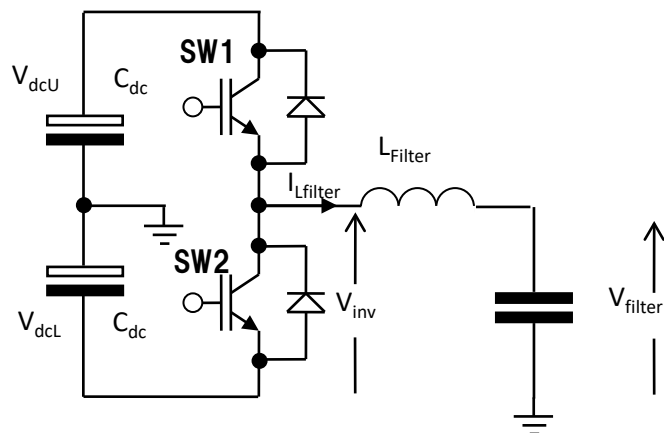
- スイッチング周波数を f_{sw} とする
- スイッチング時間の1周期を T_{sw} とする
- $T_{sw} = 1/f_{sw}$ の関係になる
- SW1のオン時間を T_{sw1} とする
- SW2のオン時間を $T_{sw2} = T_{sw} - T_{sw1}$ とする
- V_{filter} に現れる電圧は $V_{dcU} * T_{sw1} + V_{dcL} * T_{sw2}$ となる

例えば $V_{dcU} = 50V$, $V_{dcL} = -50V$ とすると

- $T_{sw1} = 1/2 * T_{sw} = T_{sw2}$ のときは $V_{filter} = 0V$
- $T_{sw1} = T_{sw}$, $T_{sw2} = 0$ のときは $V_{filter} = 50V$
- $T_{sw1} = 3/4 * T_{sw}$, $T_{sw2} = 1/4 * T_{sw}$ のときは $V_{filter} = 25V$ となる

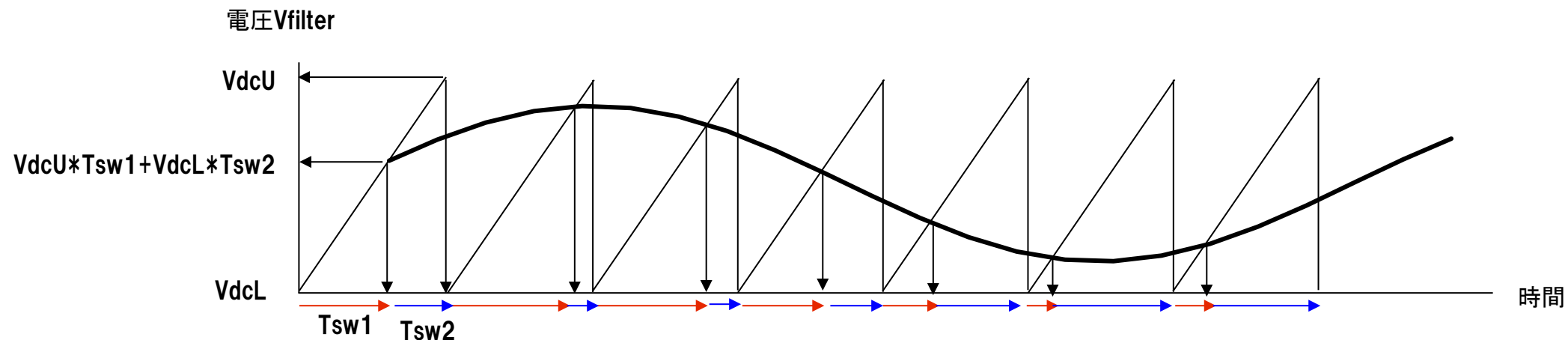
1. インバータの動作原理

(2) PWM制御



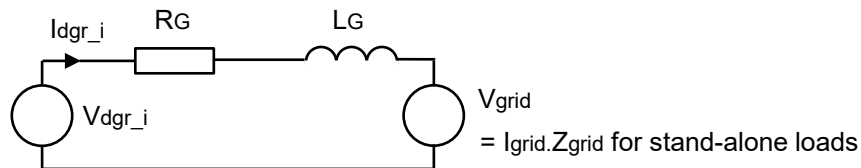
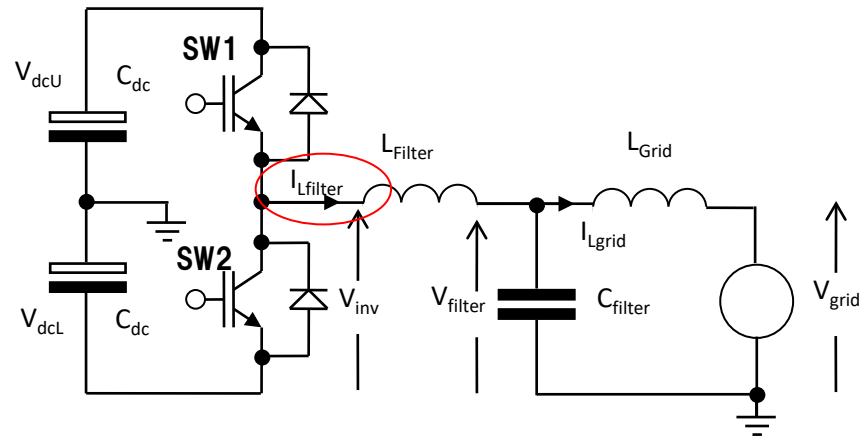
PWM制御

- V_{filter} の目標電圧を作成し、スイッチングタイムを制御する
- 下図のように目標電圧が正弦波状に変化するとき、目標電圧とスイッチング時間により作られる繰り返し三角波との交点までの時間がSW1のオン時間となる
- このようにしてSW1、SW2のオン/オフを繰り返して目標電圧を V_{filter} に作り出す
- この方式をパルス幅制御(PWM: Pulse Width Modulation)という



1. インバータの動作原理

(3) 系統連系インバータ



■ ハーフブリッジインバータを系統接続する

- デジタルグリッドルータは系統電圧 V_{grid} とインバータ出口電圧 V_{filter} の間に系統連系リアクトル L_{Grid} を挿入している
- L_{Grid} の両端にかかる電圧差で電流を流す事ができる

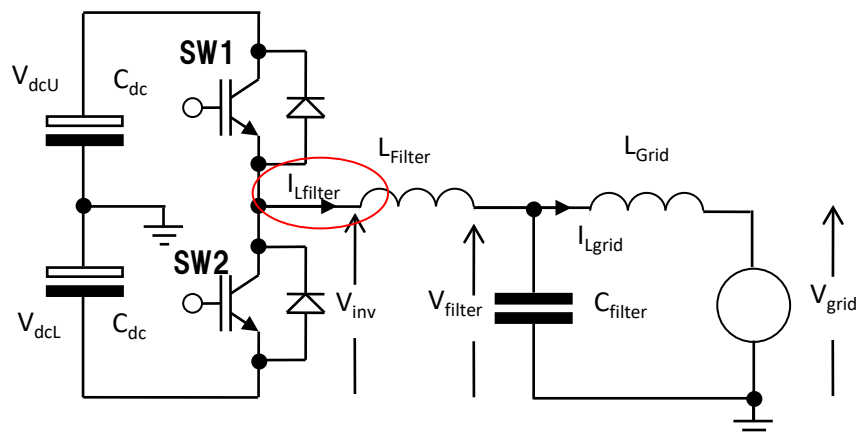
■ 系統連系インバータの目的は電力を精度良く送り出すこと

- 電力は V_{grid} と I_{Lgrid} の積によって作られる
- I_{Lgrid} を精度良く送り出したい
- PWM制御では、直接 I_{Lgrid} を制御していない
- PWM制御ではまず V_{filter} をつくり、 V_{filter} と V_{grid} の差で流れる I_{Lgrid} により電力を制御しているので遅れが生じる
- V_{grid} の変動で I_{Lgrid} は大きく変動するので電力制御は困難となる

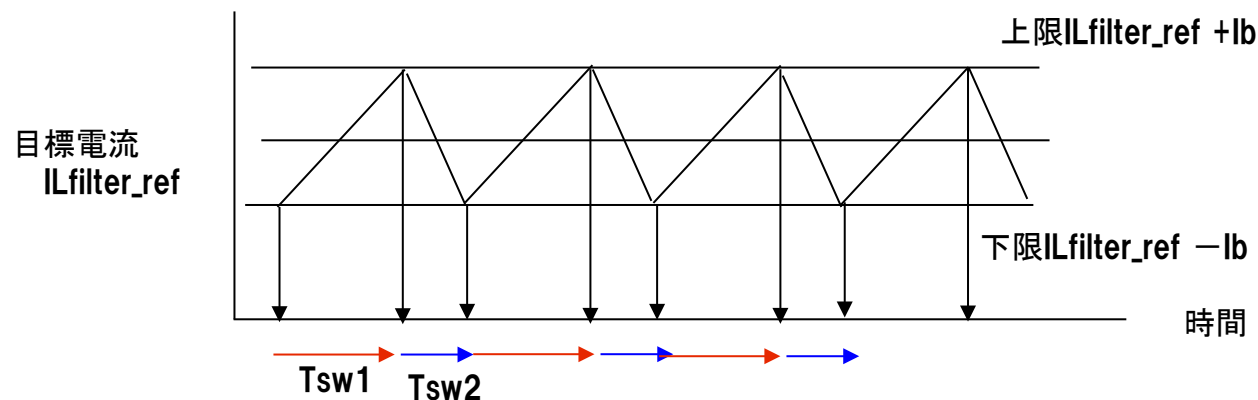
■ 電流を直接制御する

- $I_{Lgrid} = I_{Lfilter} + I_{Cfilter}$ だが、 $I_{Cfilter}$ は極めて小さい
- よって $I_{Lfilter} \approx I_{Lgrid}$
- デジタルグリッドルータは $I_{Lfilter}$ を直接制御する

(4) Hysteresis制御



電流 (I_{filter})



Hysteresis制御

- 目標電流値 $I_{\text{filter_ref}}$ に一定のバンド幅 $\pm I_b$ を設けてそれを超えたらスイッチを反転する
- すなわち、SW1をオンしたら $V_{\text{inv}} = V_{\text{dcU}}$ となり、

$$I_{\text{filter}} = \frac{1}{L_{\text{filter}}} \int (V_{\text{dcU}} - V_{\text{filter}}) dt$$
 となる
- $\Delta V_U = V_{\text{dcU}} - V_{\text{filter}}$ とすると、 ΔV_U が一定なら、 I_{filter} は $\Delta V_U / L_{\text{filter}}$ の傾きで時間とともに増加していく。
- T_{sw} が極めて短ければ、 ΔV_U の変化は殆どないので、 I_{filter} の増加は直線状になる。
- SW2をオンとした場合は、 $V_{\text{inv}} = V_{\text{dcL}}$ となり、

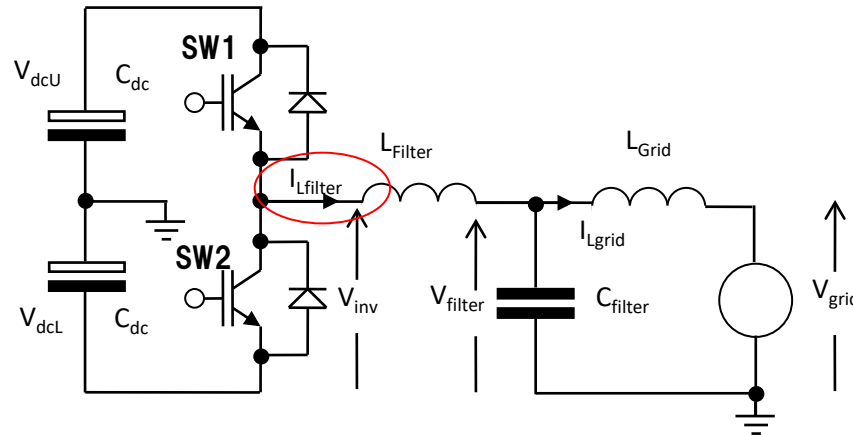
$$I_{\text{filter}} = \frac{1}{L_{\text{filter}}} \int (V_{\text{dcL}} - V_{\text{filter}}) dt$$
 となる。
- $\Delta V_L = V_{\text{dcL}} - V_{\text{filter}}$ とすると、直線状に $\Delta V_L / L_{\text{filter}}$ の傾きで減少していく

目標電流 $I_{\text{filter_ref}}$ の制御

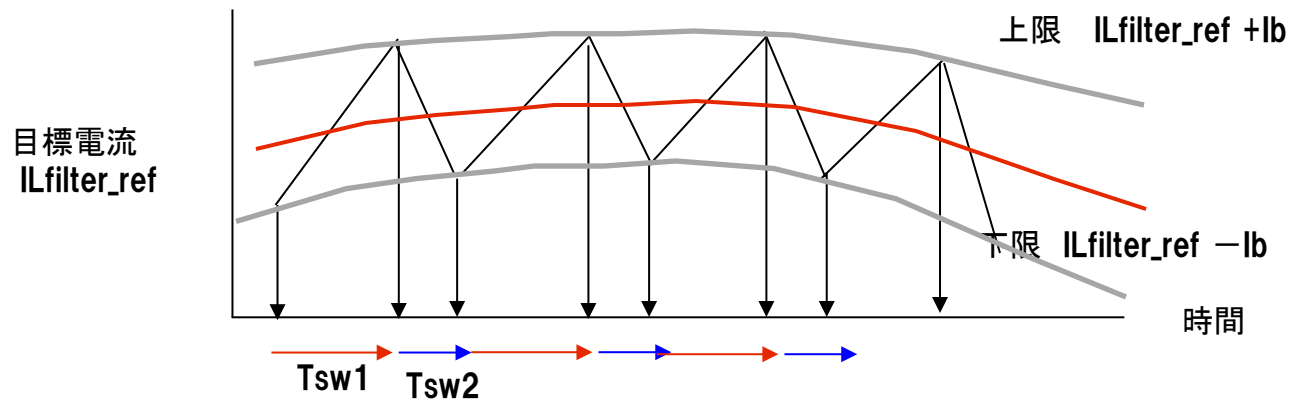
- 図のように目標電流が定まると、その上下に I_b のバンド幅を設け、
 $\text{上限 } I_{\text{filter_ref}} + I_b < I_{\text{filter}}$ となったら、SW1をオフにして、デッドタイムをおいたあと、SW2をオンにする。
- I_{filter} は減少に向かうので、下限 $I_{\text{filter_ref}} - I_b$ に達したら、SW2をオフにして、ついでSW1をオンにする。
- この単純な繰り返しで、平均電流値が目標電流 $I_{\text{filter_ref}}$ に近づく

1. インバータの動作原理

(5) 可変バンド幅制御



電流 ($I_{Lfilter}$)



Band幅の計算

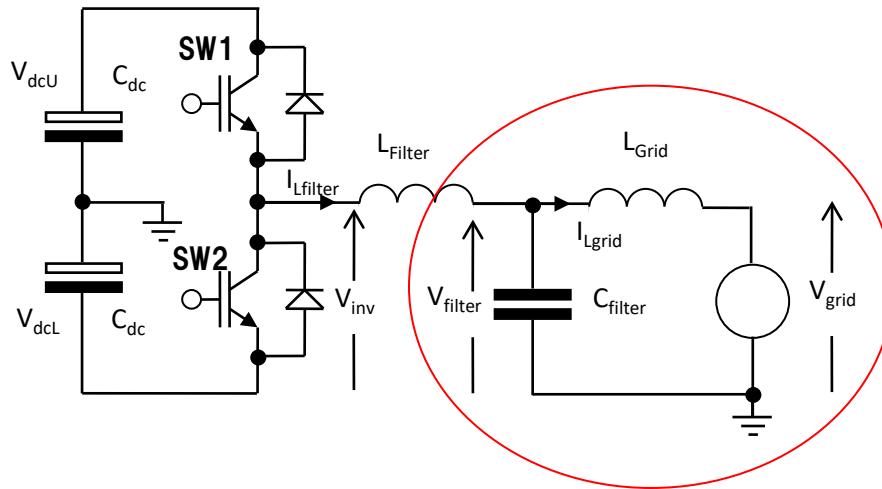
- バンド幅は電圧差とリアクトルによる傾きとオン時間によって変化する。
- $2I_b = 1/L_{filter} * (V_{dcU} - V_{filter}) * T_{sw1}$
- また、 $2I_b = 1/L_{filter} * (V_{dcL} - V_{filter}) * T_{sw2}$
- ここで、 $T_{sw} = T_{sw1} + T_{sw2}$ なので、
- $T_{sw} = 2I_b * L_{filter} (1 / (V_{dcU} - V_{filter}) + 1 / (V_{dcL} - V_{filter}))$ となり、
- $I_b = T_{sw} / 2 / ((V_{dcU} - V_{filter}) + (V_{dcL} - V_{filter})) / ((V_{dcU} - V_{filter}) * (V_{dcL} - V_{filter}))$
- ここで、 $V_{dcU} = -V_{dcL}$ とすると
- $I_b = T_{sw} / 4 * (V_{filter}^2 - V_{dcU}^2) / V_{dcU}$

可変バンド幅制御

- 電流バンド幅 I_b を定数とするとスイッチング周波数は可変となり、フィルター回路の設計が困難となる。
- スwitchング周波数 ($f_{sw} = 1/T_{sw}$) を固定して、電流バンド幅 I_b を可変とする **可変バンド幅制御方法** を考案した。

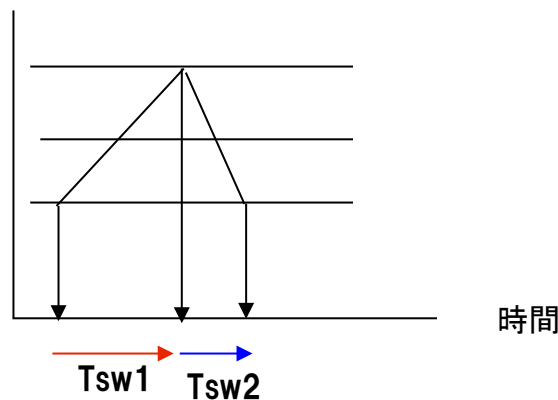
1. インバータの動作原理

(6) 電流制御による電圧作成



電流 (I_{filter})

目標電流 $I_{\text{filter_ref}}$



任意の内部位相電圧 V_{filter} をつくる

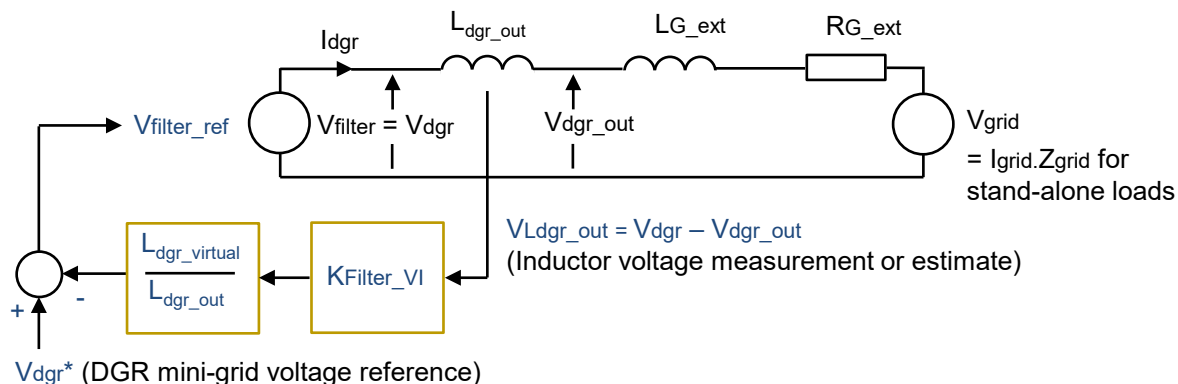
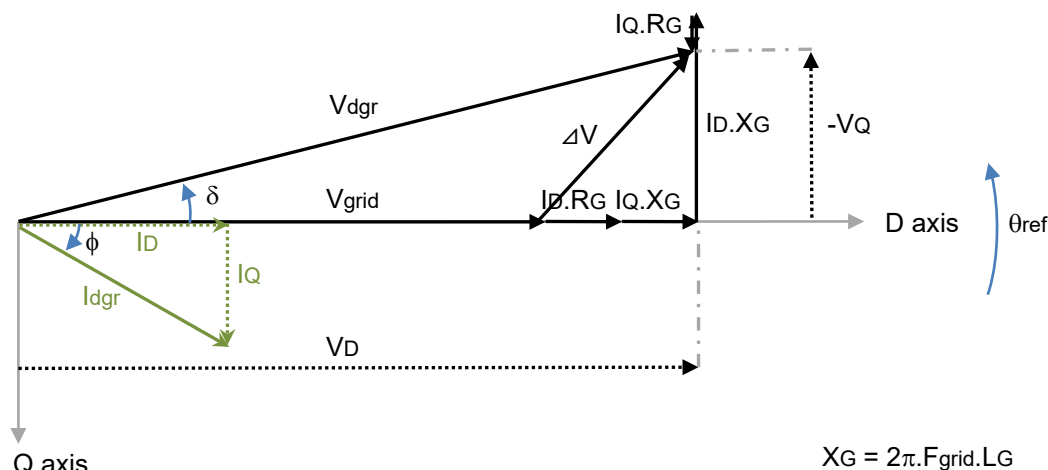
- $V_{\text{filter}} = 1/C_{\text{filter}} \int (I_{\text{Lgrid}} - I_{\text{filter_ref}}) dt$
- 1スイッチング時間 T_{sw} の間に起こる変化は I_{filter} の平均値が、目標電流 $I_{\text{filter_ref}}$ に等しいと仮定し、
- 直前の V_{filter} が目標電圧 $V_{\text{filter_ref}}$ に等しいとすると、
- $V_{\text{filter}} - V_{\text{filter_ref}} = 1/C_{\text{filter}} * (I_{\text{Lgrid}} - I_{\text{filter_ref}}) * T_{\text{sw}}$
- これを変形すると
- $I_{\text{filter_ref}} = C_{\text{filter}}/T_{\text{sw}} * (V_{\text{filter_ref}} - V_{\text{filter}}) + I_{\text{Lgrid}}$

電圧目標を電流目標に置き換えることができた

- 上記により、目標内部位相電圧 $V_{\text{filter_ref}}$ は目標電流 $I_{\text{filter_ref}}$ を制御することで得られる
- 位相差を作るためには有効電流と無効電流に分離して計算する必要がある

1. インバータの動作原理

(7) 仮想インピーダンスによる内部電圧位相制御 (GFM位相制御)



交流の場合、電圧の位相差で電力を送る

- DGRの内部電圧を V_{dgr} とする
- DGRが接続する系統電圧を V_{grid} とする
- V_{dgr} と V_{grid} の間には抵抗 R_G とリアクトル L_G がある

V_{dgr} と V_{grid} の間に流れる電流 I_{dgr} は次のように決まる

- V_{dgr} と V_{grid} の電圧差 ΔV は V_{grid} に沿うD軸と直行するQ軸に分けられる
- I_{dgr} もD軸に沿う I_d と、Q軸に沿う I_Q に分けられる
- $\Delta V_D = I_d \cdot R_G + I_Q \cdot X_G$: ($X_G = 2\pi f L_G$)
- $-\Delta V_Q = I_d \cdot X_G - I_Q \cdot R_G$
- このように I_{dgr} は電圧位相差 ΔV で自動的にその大きさ、位相が決まる

ΔV を意図的に変化させる

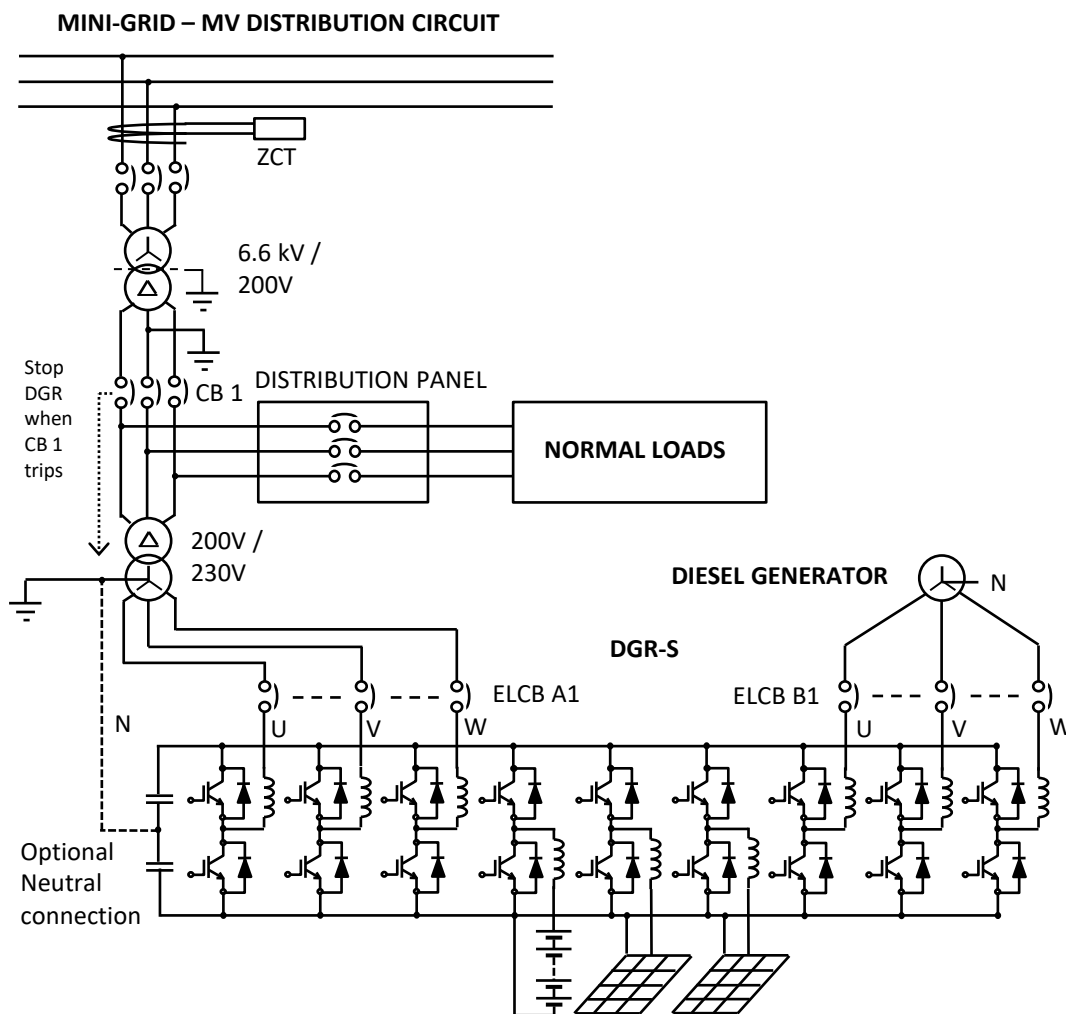
- V_{dgr} は前述の V_{filter} であるので目標値を任意に設定できる
- よって、 ΔV も任意に大きさと位相を設定できる
- その結果、 I_{dgr} の大きさ、位相も任意に作ることができる

仮想インピーダンス

- DGRに実装される系統連系リアクトルは物理的な制約から大きな物が入れられない
- そこで、定格電流が流れた時に、電圧降下の大きさが他の同期発電機と同じくらいになるように、仮想インピーダンスを設定し、その計算を制御回路に組み込む

2. DGRの多入力電源制御

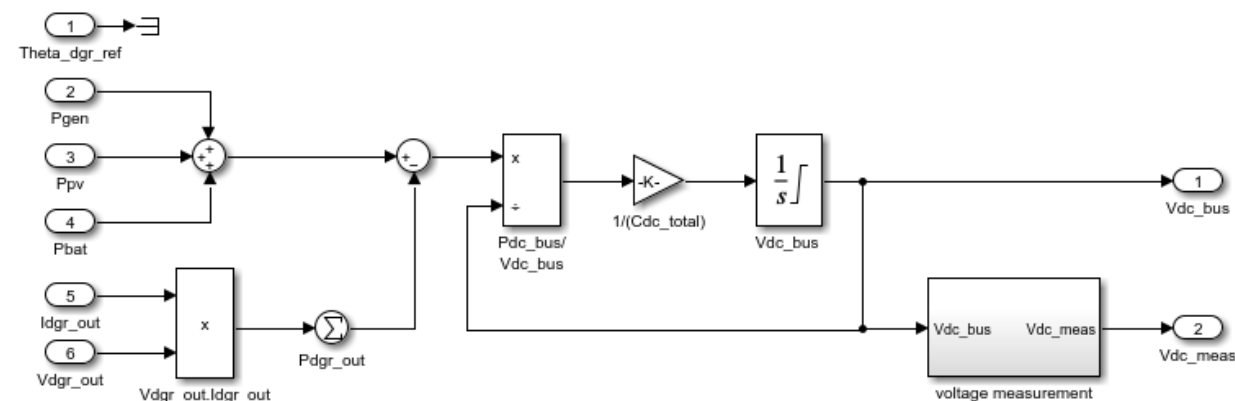
(1) DC母線電圧維持制御



DGRは他入力電源インバータ

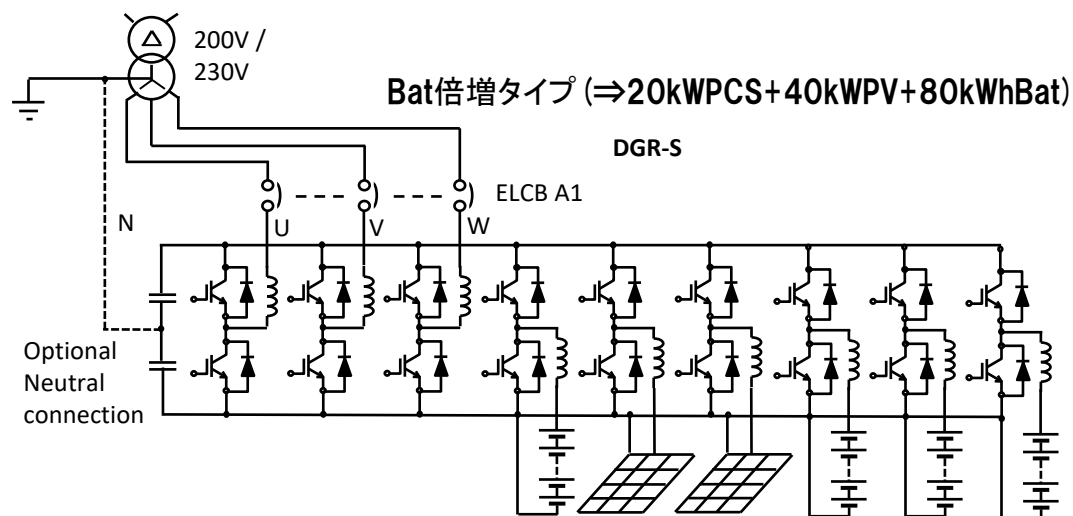
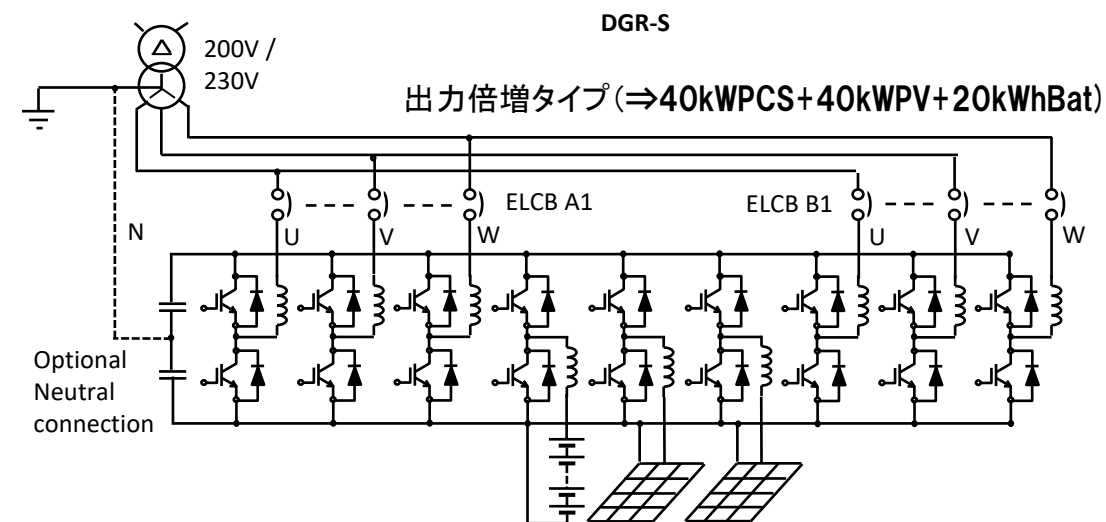
- 左図は、発電機、太陽光、バッテリーの3入力
- ハーフブリッジインバータをLEGと呼ぶ
- 交流入力は3相で3つのLEGを使用
- 交流出力は3相で3つのLEGを使用
- 直流のPVとバッテリーはそれぞれLEGを1つとDC母線のマイナス側を使用

全電力の差し引き分がコンデンサーに流れ込んで母線電圧を維持する

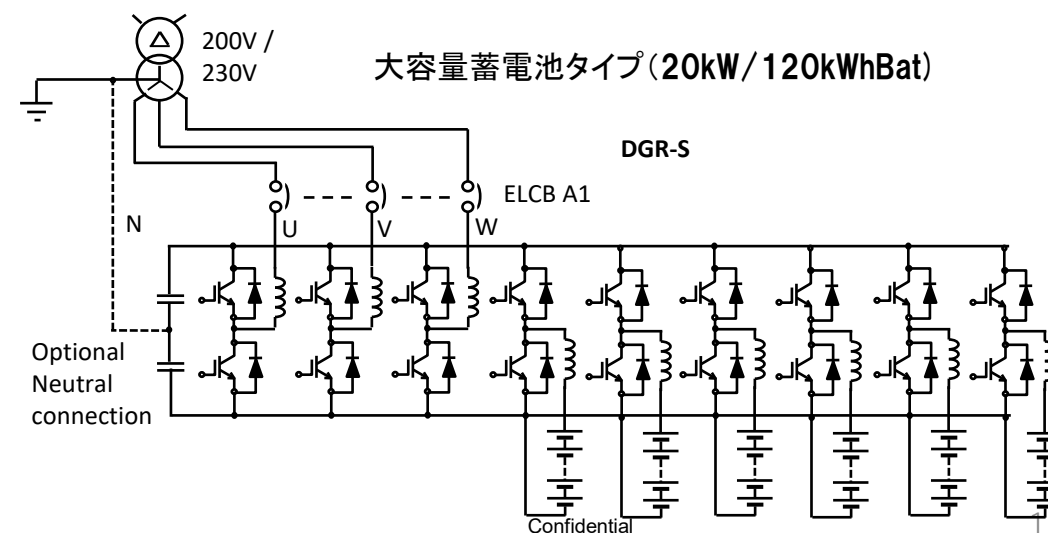
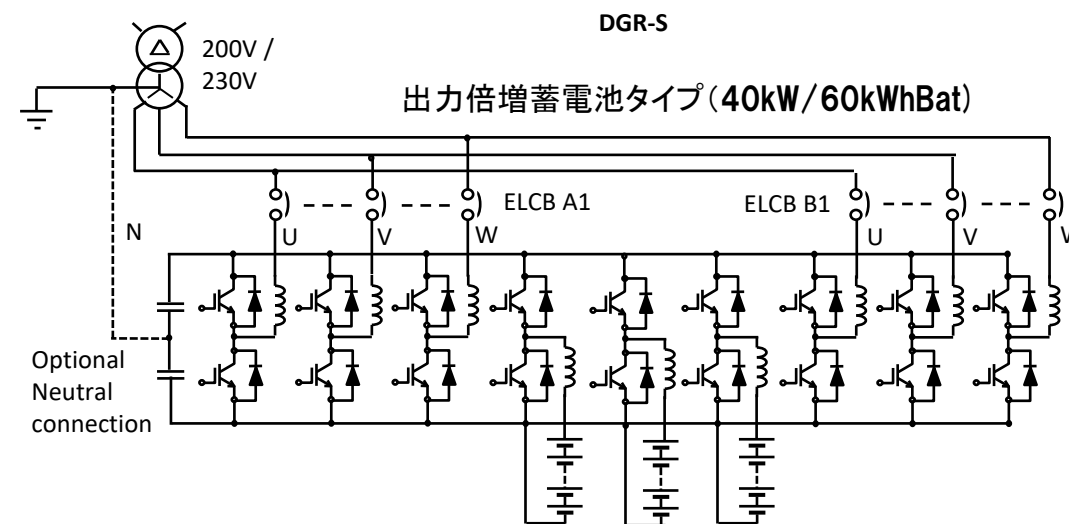


2. DGRの多入力電源制御

(2) PV/Gen/Batなどマルチ電源の入力制御

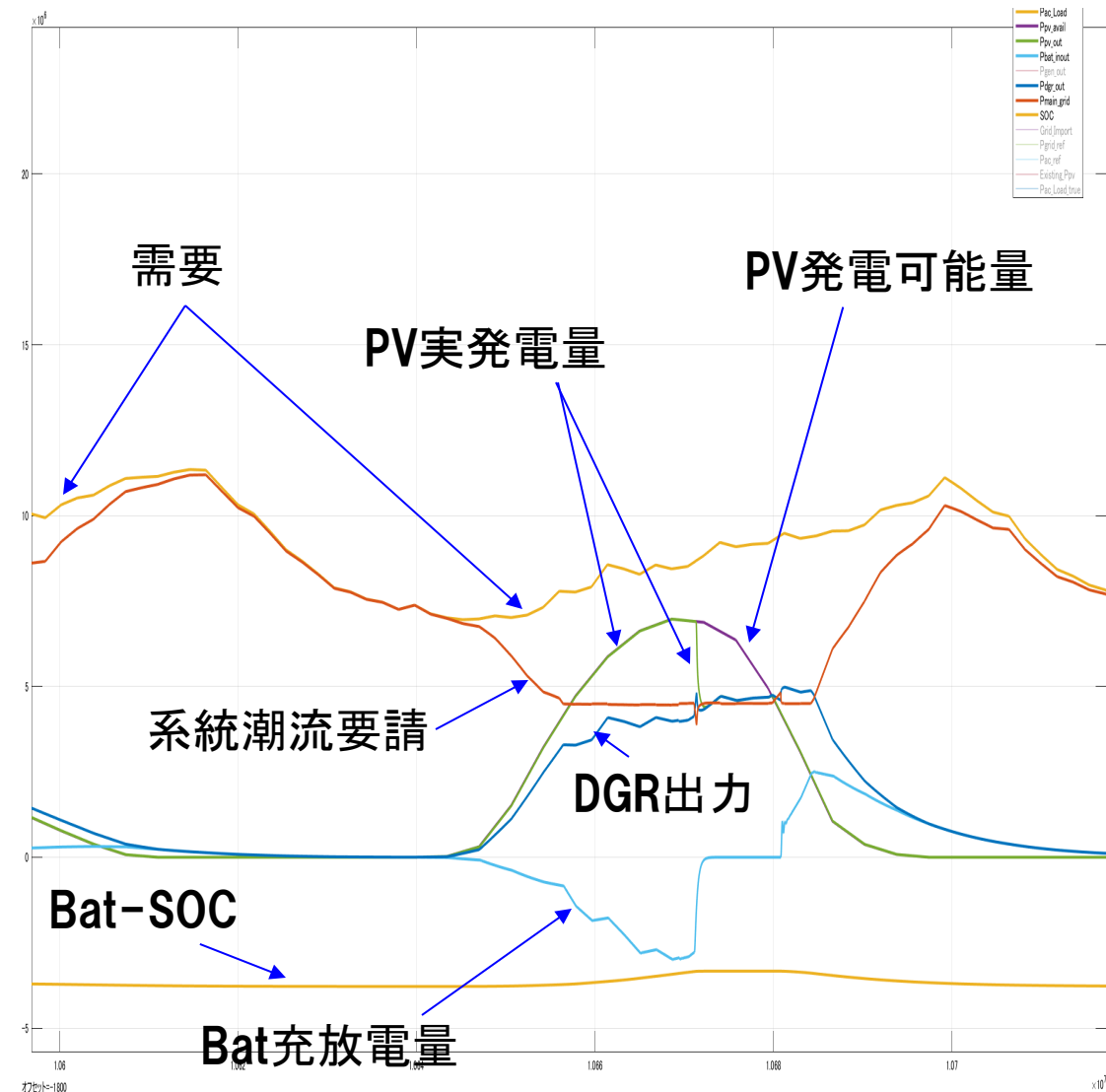
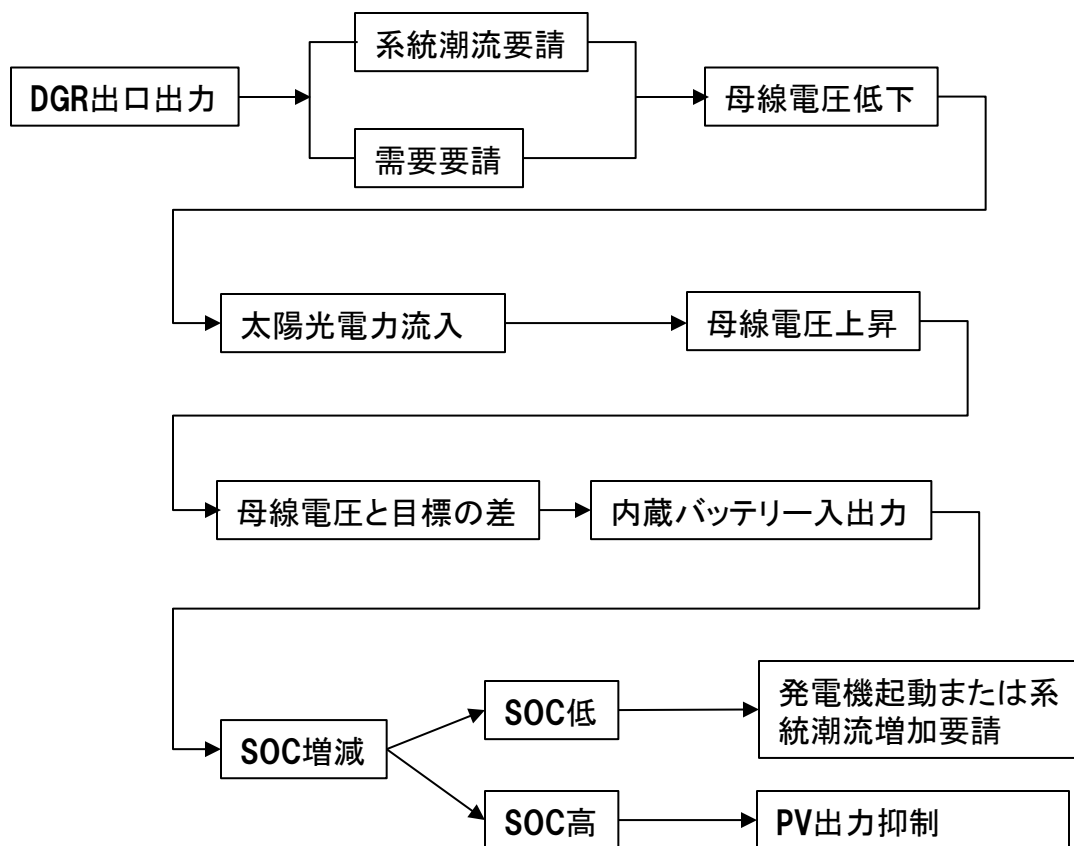


■ レグの使い方で太陽光パワコンとして出力を倍増することも、蓄電池とのハイブリッドも蓄電池だけで大容量化することも柔軟にできる。



2. DGRの多入力電源制御

(3) Bat-SOC制御



(4) 系統接続部のGFL/GFM切り替え

■ GFL (Grid Following Mode)

- 従来型の系統連系
- 系統電圧→PLL (Phase Lock Loop) で電圧大きさ、位相を検出
- 目標電力から目標電流を決定
- 目標電流を送る制御

■ 特徴

- 太陽光などの最大電力をMPPT (Maximum Power Point Tracking) で検出し、それを目標電力にし、インバータから系統に送り込める。

■ 欠点

- 系統電圧がなくなると機能しない
- 自立運転はできない
- 系統電圧の動揺を増加させる可能性がある

■ GFM (Grid Forming Mode)

- 近年必要とされ始めた系統連系方法
- 系統電圧→PLL (Phase Lock Loop) で電圧大きさ、位相を検出
- 目標電圧を決定
- 目標電圧を維持する制御

■ 特徴

- 系統電圧と目標電圧の位相差で電力が送り出される
- 太陽光などの発電可能電力にかかわらず、自動的に出力抑制される
- 系統電圧がなくなっても自立運転可能
- 系統電圧の同様に抑制する

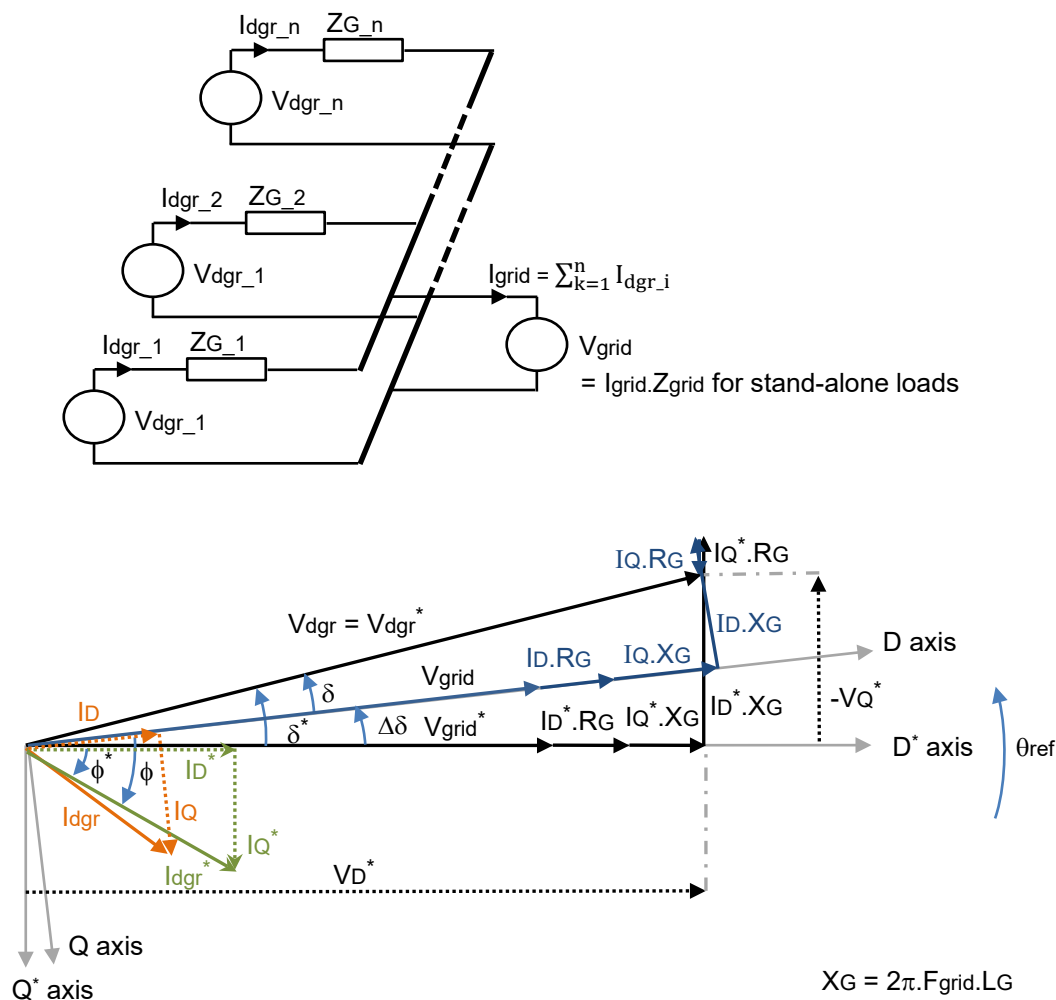
■ 欠点

- 多数のインバータを同期させる手段が難しい
→ DGRは時刻同期を使う

※両機能は非常に似ており、切替可能

3. DGRのGFM並列運転

(1) 電圧PLLによる電圧位相制御

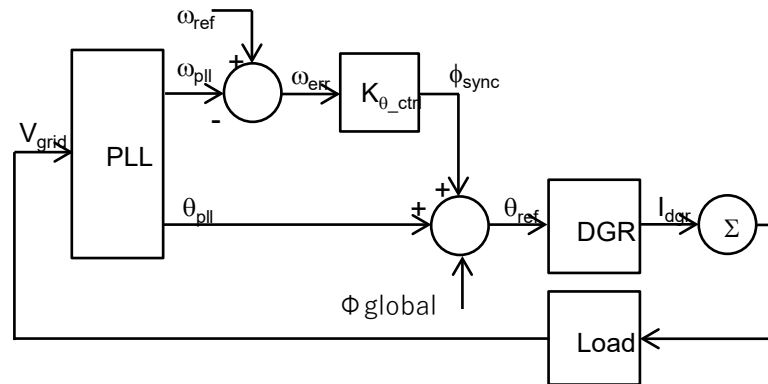


電圧PLLベースでのミニグリッド自立運転は困難

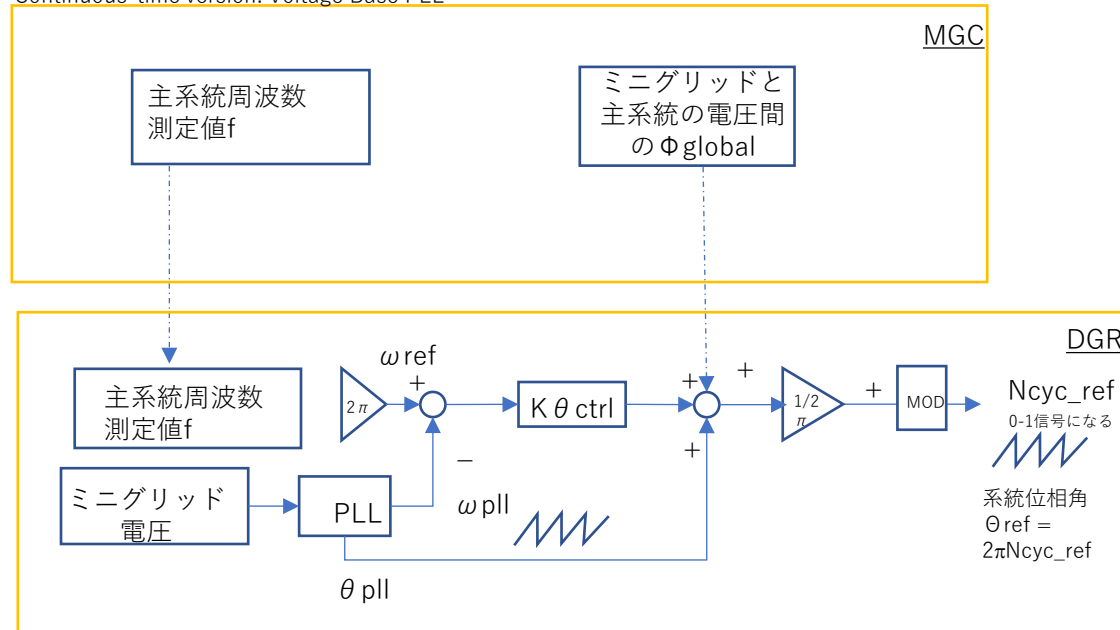
- 電圧ベースの同期は、DGRと負荷の間の実・無効電力差を受け入れる系統電源がない場合は安定しない
- PLLは、 V_{grid}^* が V_{grid} と一致する場合にのみ安定する
- すなわちDGRの実・無効電力目標の合計がミニグリッド負荷の実・無効電力要件と正確に等しい場合のみ安定
- DGR実電力指令が負荷実電力要求を超える場合、 V_{grid} は V_{grid}^* をリードし、常に正となる
- PLLは正帰還ループで周波数と位相目標を増加させる
- そのためPLLの周波数は連続的に増加する
- DGR実電力指令が負荷実電力要求値より小さい場合、 V_{grid} は V_{grid}^* に遅れ、常に負になる
- PLLは正帰還ループで周波数と位相目標を低下させる
- そのためPLLの周波数は連続的に減少する
- まず。いずれの場合も、PLLとミニグリッドの周波数は安定しない
- そのため、自立運転で電圧による同期をとることはできない

3. DGRのGFM並列運転

(2) 周波数と位相偏差フィードバックによる並列同期



Continuous-time version: Voltage Base PLL



系統に依存しないミニグリッドにおいて、電圧ベースの同期を安定化させるための新手法の提案

- 基準角周波数 ω_{ref} をミニグリッドコントローラから全DGRに伝送 (既定値でも良い)
- 基準各周波数 $\omega_{ref}=2\pi f_{ref}$ とミニグリッドの周波数 ω_{pll} の差を K_{θ_ctrl} 制御器で誤差ゼロにし、周波数を一致させる
- ミニグリッドの電圧PLLで θ_{pll} を作成し、これを加えて Φ_{sync} を作成
- 各DGRはこれを基準に電圧を作成
- 適正な負荷分担がなされミニグリッド電圧が維持される

ミニグリッド電圧がないと運用できない

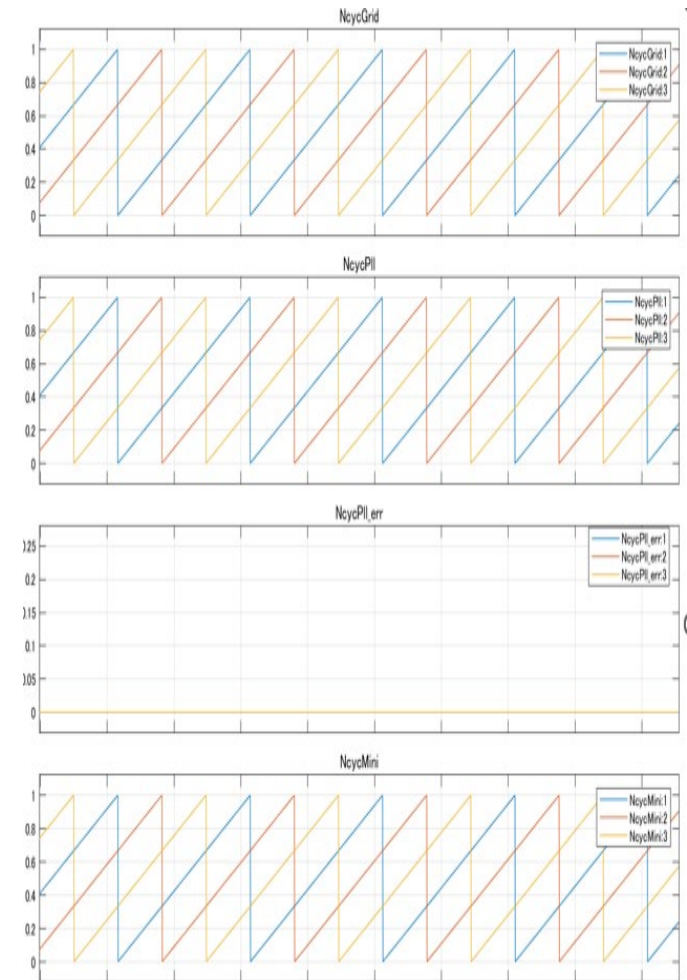
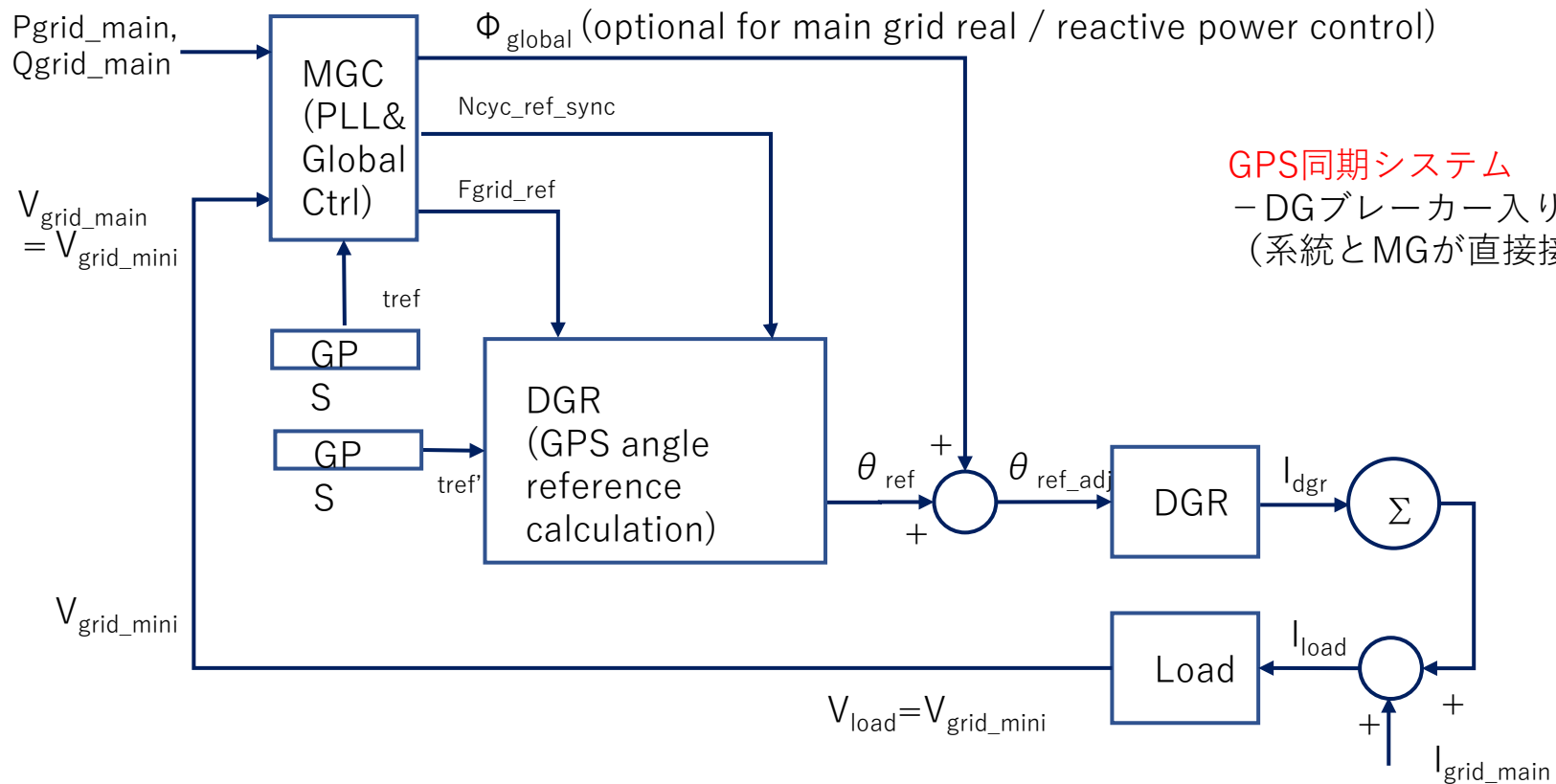
- ブラックススタートはできない
- 系統に接続するときは、系統側のPLLで実行

ブラックススタート可能なGPS時刻同期手法の提案

- 次のスライドでGPS時刻時刻同期の提案を行う
- 電圧ベースの同期手法はバックアップとして使用する

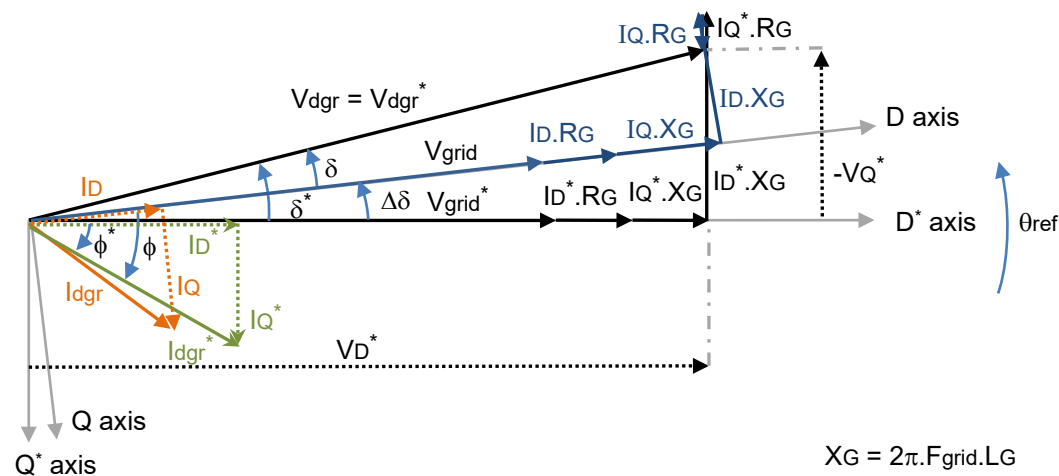
3. DGRのGFM並列運転

(4)MGC(ミニグリッドコントローラ)による系統位相の伝送

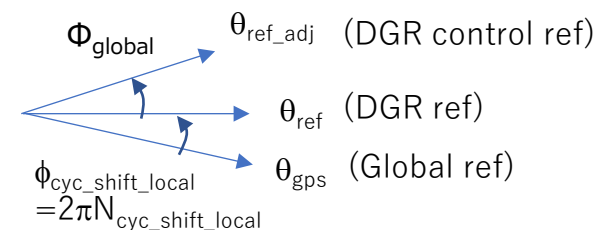
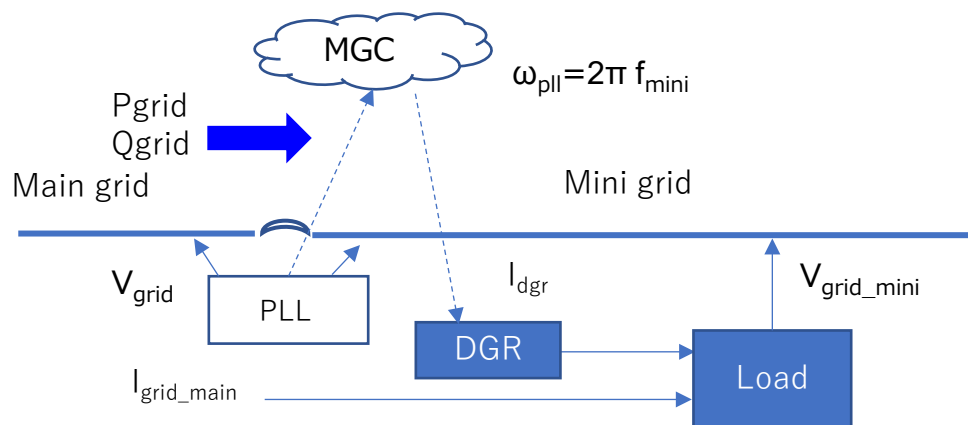


4. 系統とセルグリッド並列運転

(1) 有効電力・無効電力潮流制御



$$\omega_{ref} = 2\pi f_{main} \quad (\text{CB is closed: Synchronous operation})$$



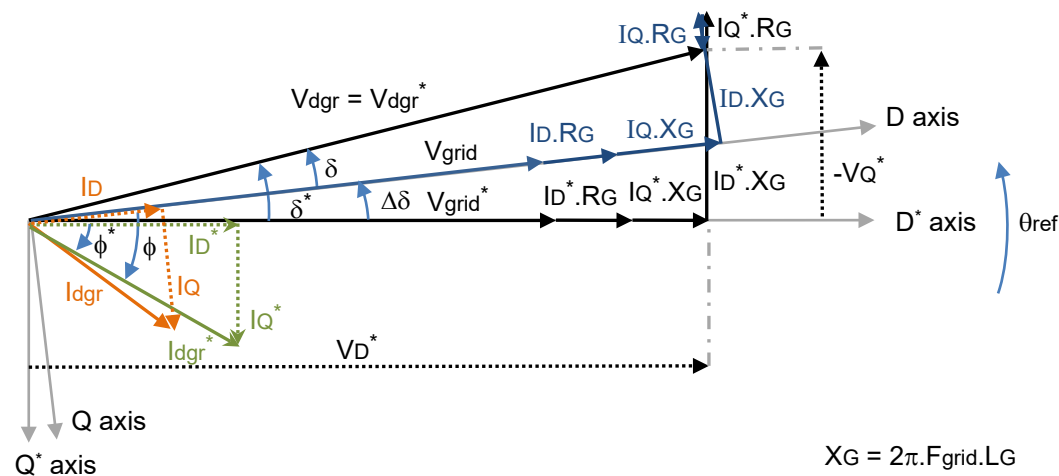
(DGR local phase shift for transformers, etc)

系統側とミニグリッド間の潮流測定

- 目標有効電力／無効電力に応じて位相角 $\Delta\delta$ を計算 (Φ_{global})
 - その値をMGCで全DGRに伝送
 - 電圧の大きさについてもMGCから伝送
 - DGR側でVgrid*とVdgr*を作成
- これにより潮流制御が可能になる
- Vgrid*はMain Gridの電圧位相と一致するのでVdgrとの位相差が δ^* になる
 - これにより両系統間を流れる有効無効電力潮流が決まる
 - 全体としてフィードバックループになる

4. 系統とセルグリッド並列運転

(2) 系統分離時の位相同期

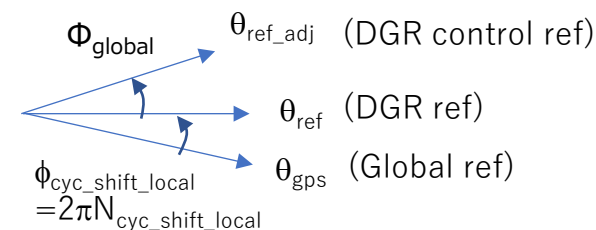
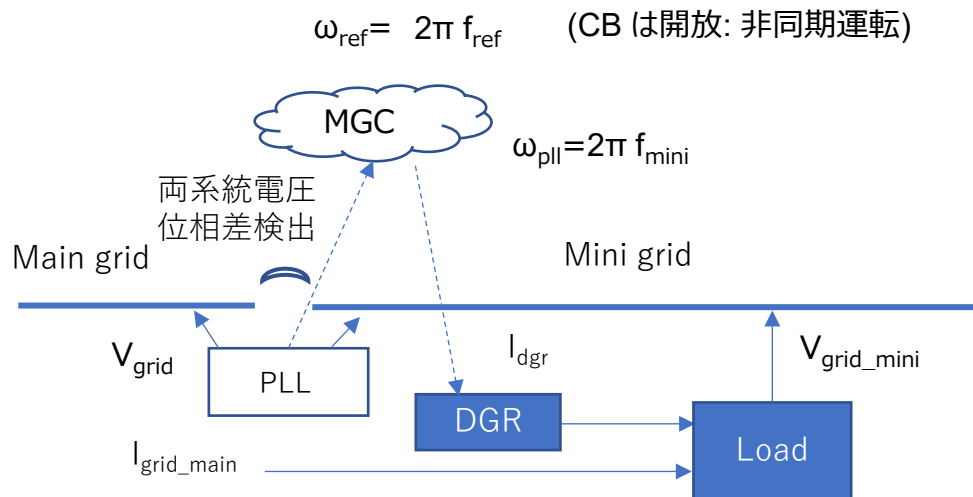


系統側とミニグリッド間の電圧位相差測定

- PLLで両系統の位相角 $\Delta\delta$ を計算 (Φ_{global})
- その値をMGCで全DGRに伝送
- 電圧の大きさについてもMGCから伝送
- DGR側で V_{grid}^* を復元
- フィードバックループになる

これにより両系統の位相を合わせることが可能になる

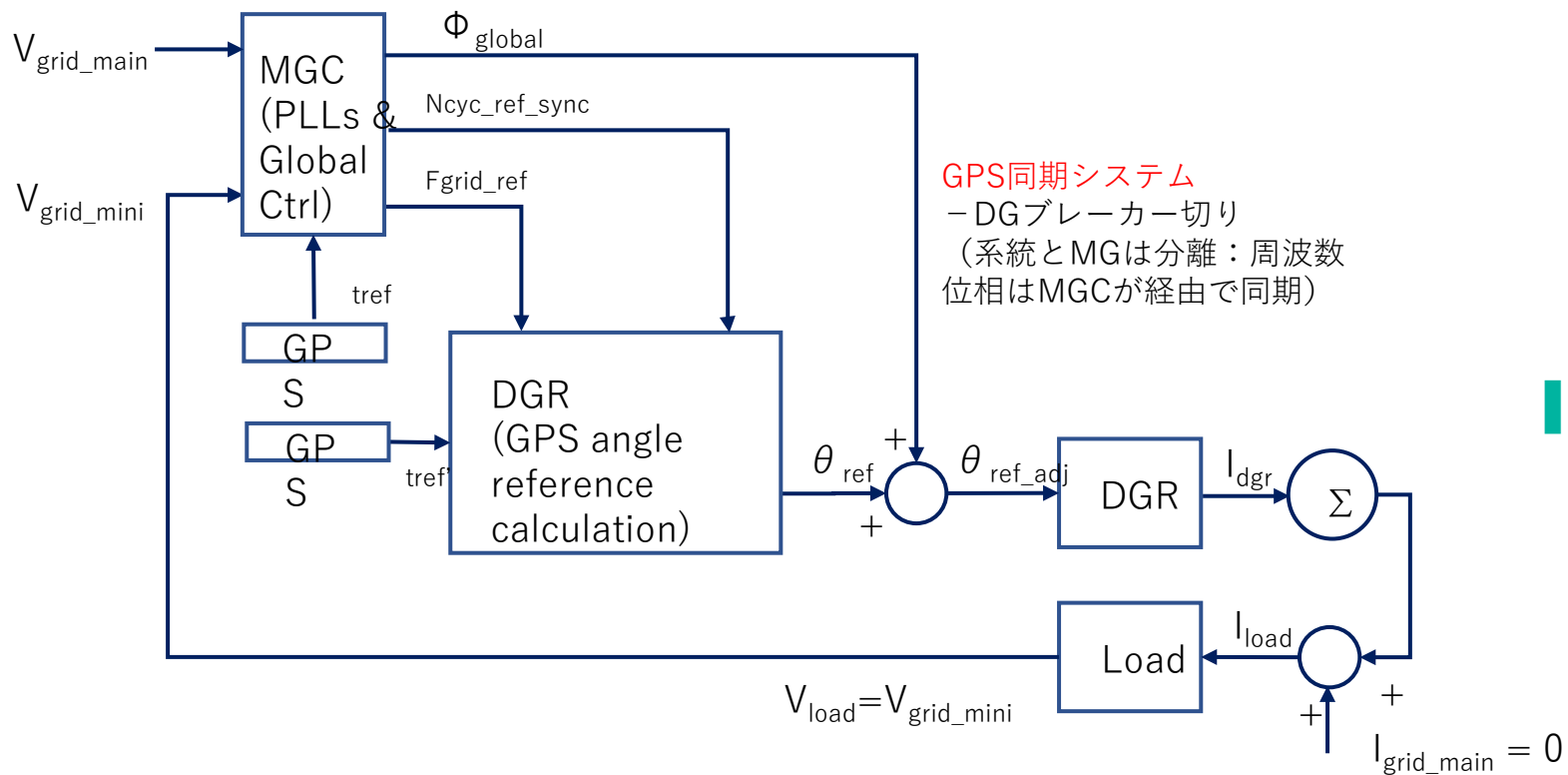
- 遮断器の同期投入が可能となる



(DGR local phase shift for transformers, etc)

4. 系統とセルグリッド並列運転

(3) 系統遮断器の同期投入・無停電分離



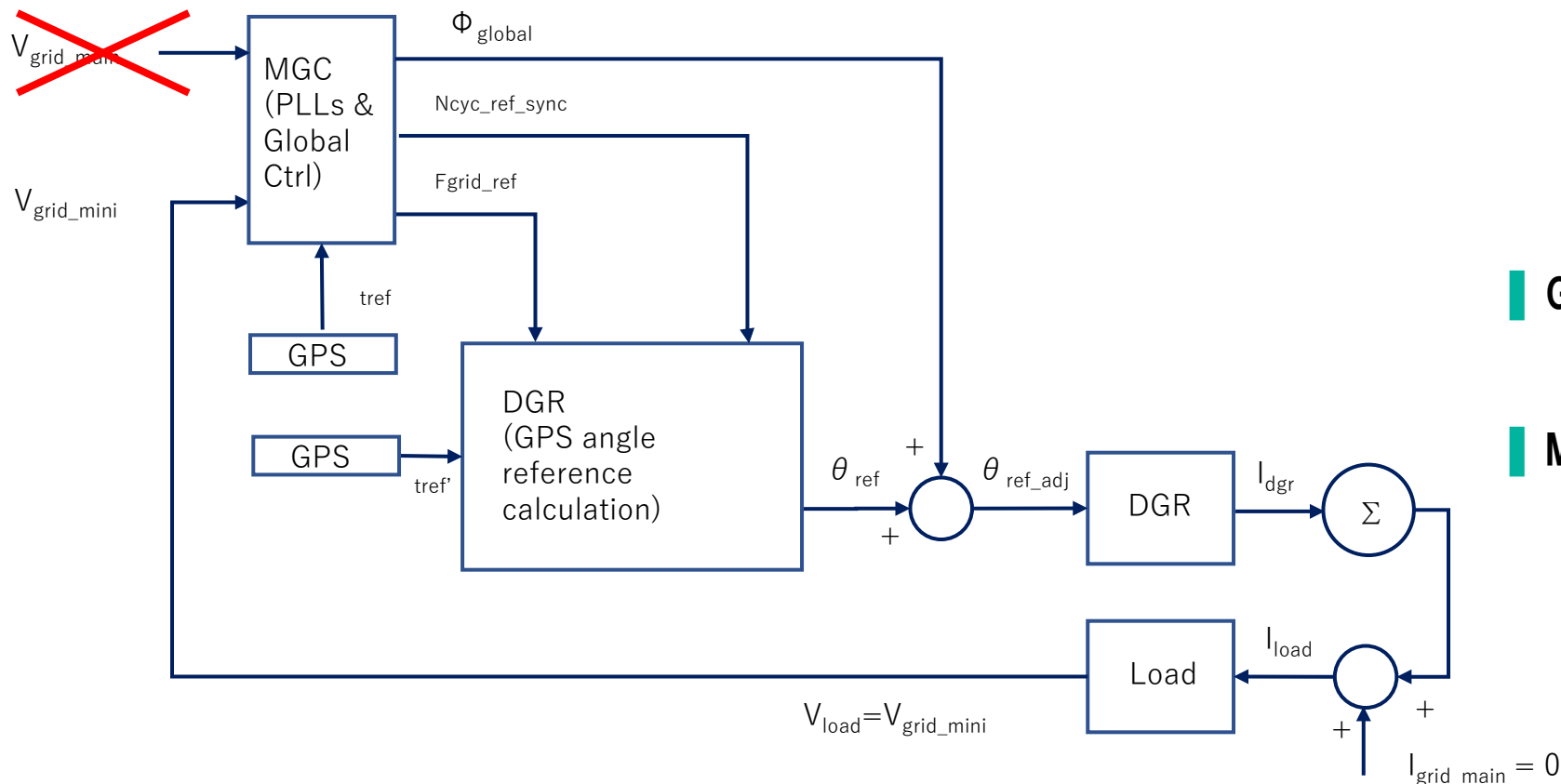
MGCには主系統とミニグリッド系統の両方の電圧が入力されそれぞれ**PLL**で測定される

- **MGC**で周波数と位相と電圧が伝送されている
- **GPS**時刻同期で両系統は同期が取れている
- Φ_{global} はオプションで調整機能を有する
- これにより遮断器が開放されていても常に両系統の同期はとれている

両系統が接続されている状態から遮断器を開放してもミニグリッド系統は無停電で運転を継続する

4. 系統とセルグリッド並列運転

(4)セルグリッドのブラックスタート



系統停電時

- **MGC**は内部に持つ電圧位相をリファレンスとして、ミニグリッドをブラックさせることができる
- **GPS**時刻信号で定めたタイミングで**DGR**は同時スタートできる
- ミニグリッド起動電流が大きい場合は一定時間持ちこたえることができるように設定できる

GPS信号異常時

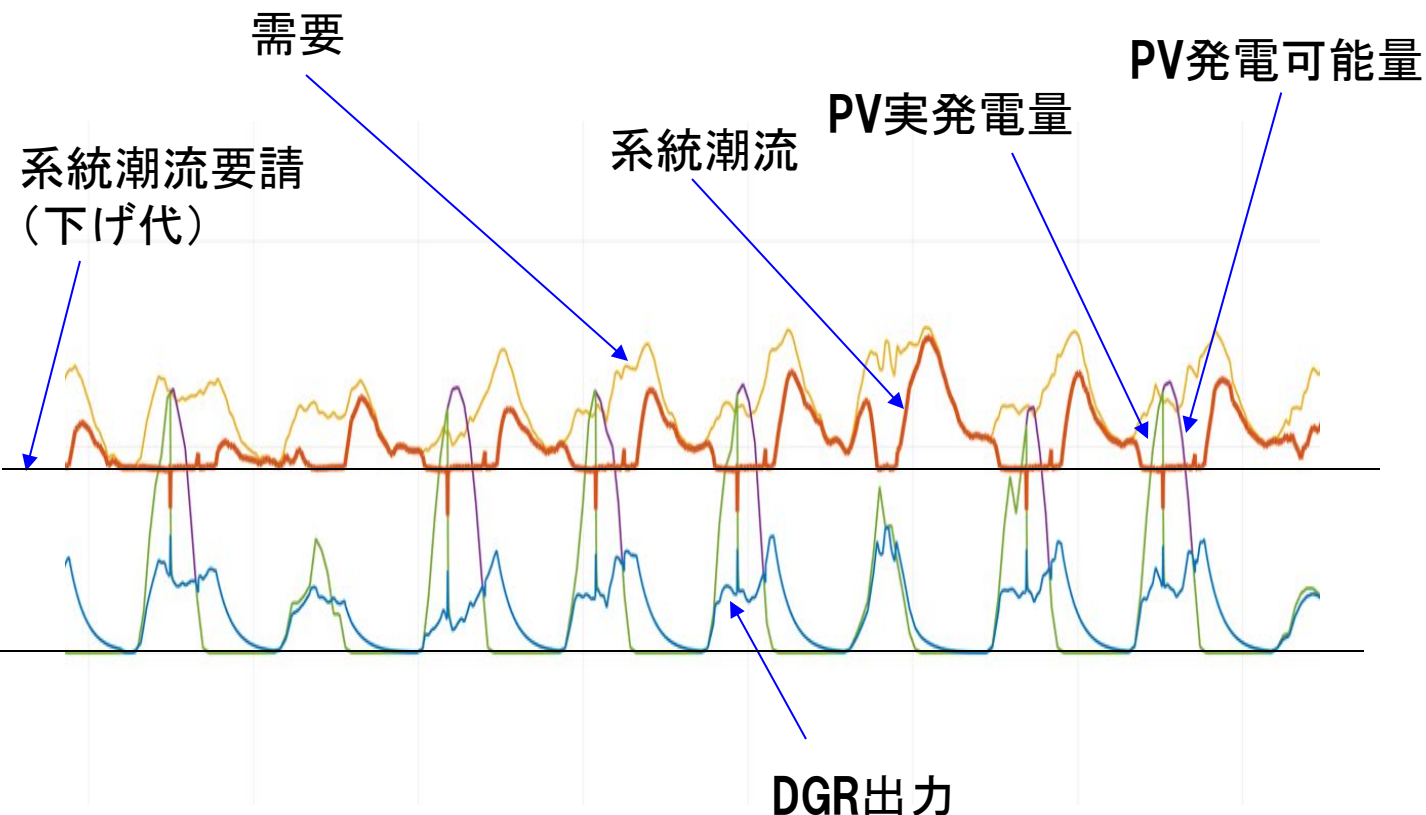
- 運転できていれば**PLL**電圧モードに切り替えて運転継続できる

MGC異常時

- 運転できていれば**PLL**電圧モードに切り替えて運転継続できる

5. 系統内DGR分散運転(ミニグリッドも含む)

(1)MGCによる調整力供給



左図はある離島におけるシミュレーションである

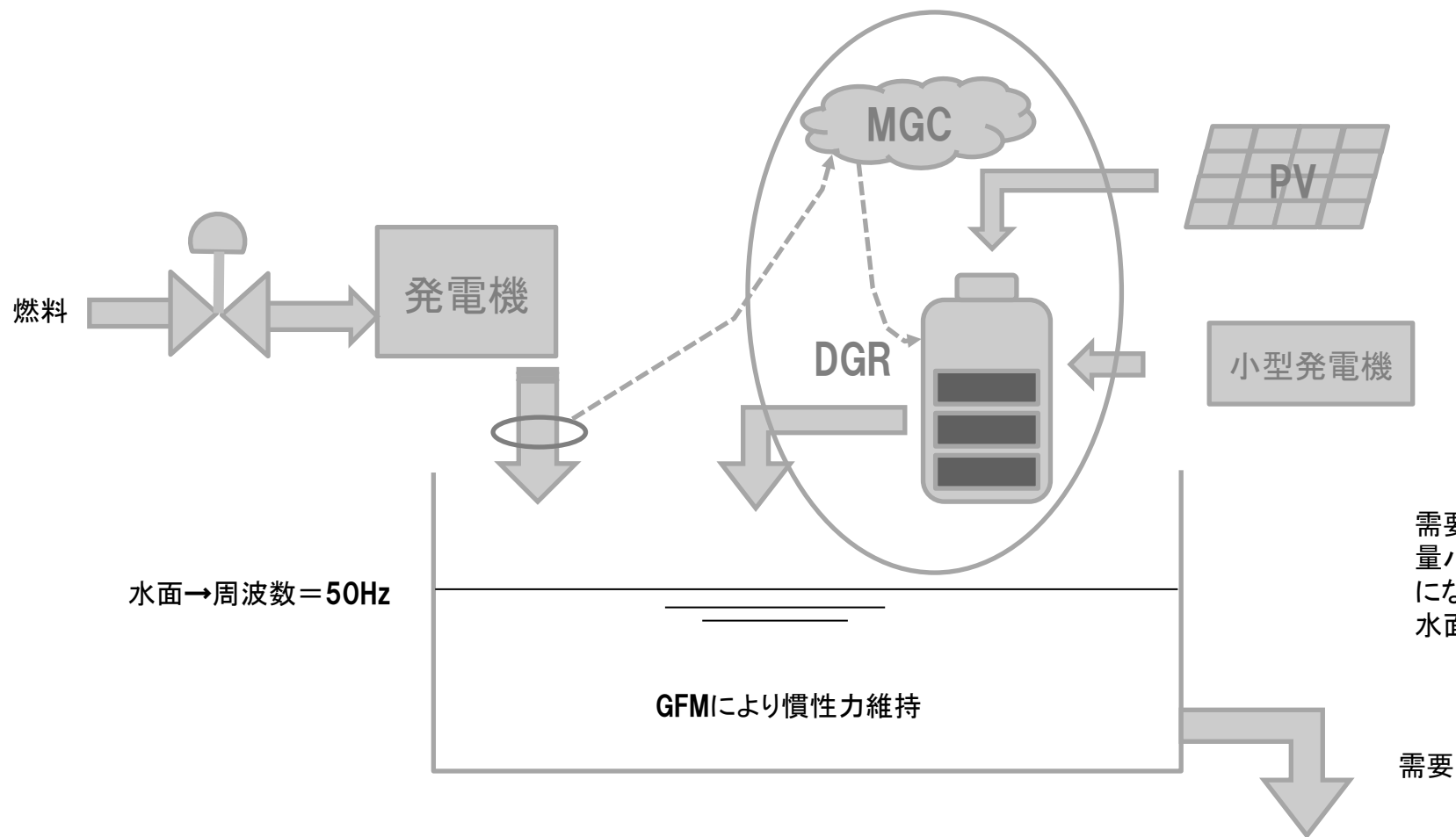
- 島内発電所の下げ代不足により、最低出力を維持するよう求められている
- 系統潮流を測定し、MGCで Φ globalを作成し、最低出力を維持するよう各DGRに伝搬している
- それにより、最低出力を下回らないように運転が行われている
- 需要変動部分はDGRが追従して出力している
- 太陽光は発電可能量に対し、出力抑制が自動的にかかっている

発電所の潮流を更に細かく指定できる

- 需要の変動分をすべてDGR群で吸収し、発電所を効率よく運転することも可能である
- 予測制御の精度を上げ、蓄電池を活用すれば再エネ利用率を飛躍的に上げることができる
- 発電所の下げ代を見直すことで、化石燃料使用量を大幅に削減することが可能となる。

5. 系統内DGR分散運転(ミニグリッドも含む)

(1-1) DGRによるオフグリッドでの電力の調整

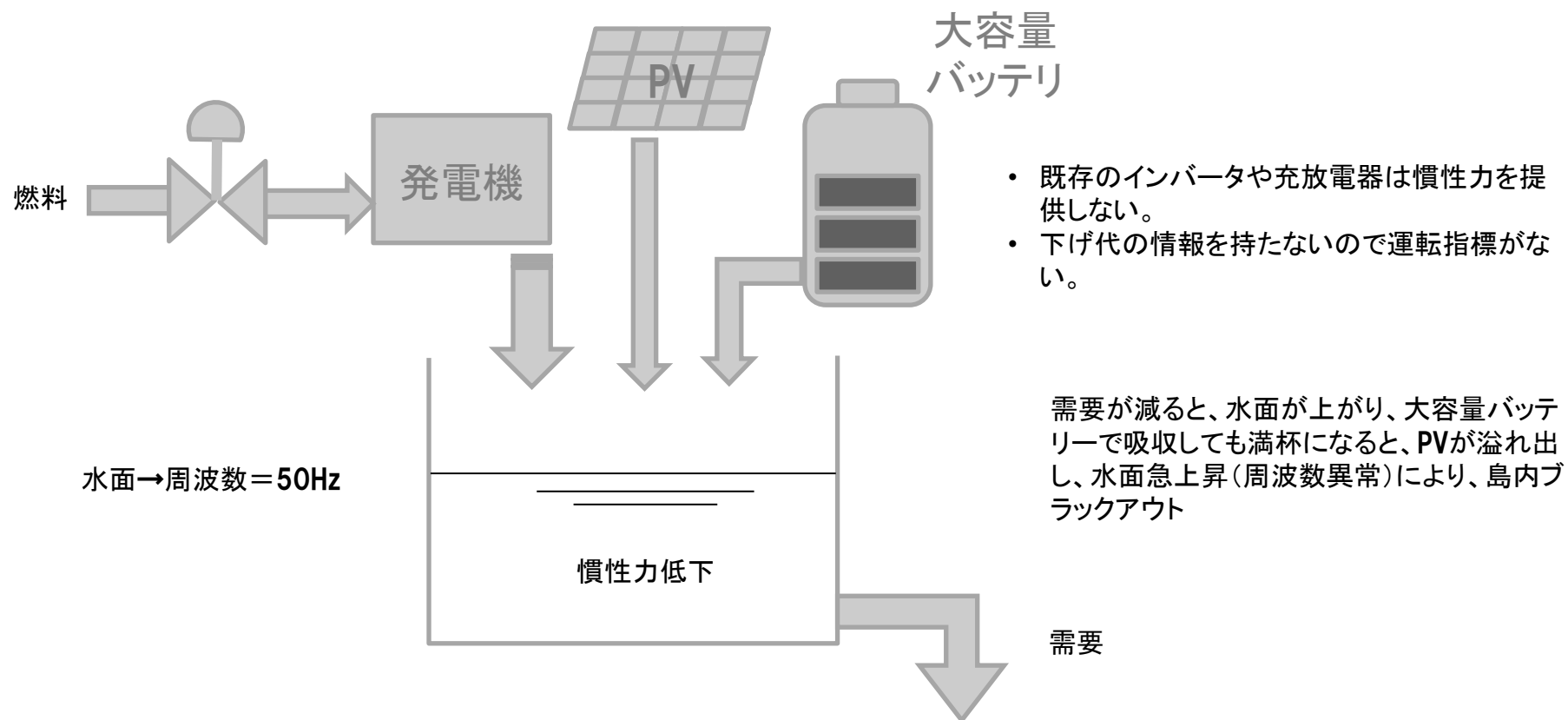


- DGRは慣性力を提供するので周波数変動が小さくなる。
- MGC経由で下げ代の情報を持つので最低出力を維持できるようDGRを運転する。

需要が減ると、水面が上がるが、DGRの大容量バッテリーで吸収する。バッテリーが満杯になると、PVの出力抑制を自動的におこない、水面(周波数)レベルを安定維持する。

5. 系統内DGR分散運転(ミニグリッドも含む)

(1-2) 通常のEMSによるオフグリッドでの電力の調整



5. 系統内DGR分散運転(ミニグリッドも含む)

(2)MGCによる同期化力の提供

主系統側のPLL

- ある時刻 $t1$ のときの電圧 V をPLLで測定
- 周波数 f_{grid} , 位相 α が測定されたとする
- すなわち、電圧 $V_{main}=V_o*\sin(2\pi f_{grid}*t1 + \alpha)$ であることがわかる
- 周波数と位相と電圧はほぼ一定であるとする

MGC伝送

- MGCで f_{grid} の値と α と V_o の値をブロードキャストする

DGRでの受信

- 各DGRはそれぞれ主系統の f_{grid} の値と α と V_o の値を取得する
- これらの値をもとに $V_{mini}=V_o*\sin(2\pi f_{grid}*t2 + \alpha)$ を作成する
- 主系統の電圧は時刻が $t2$ になっているので $V_{main}=V_o*\sin(2\pi f_{grid}*t2 + \alpha)$ となる
- すなわち、 $V_{main}=V_{mini}$ と同期している

時刻は強力な回転力に相当する

回転のパラメータが一致すれば強力な同期化力を生み出す

このパラメータは、周波数と位相である

(3)MGCによる慣性力の提供

主系統側の位相変化

- 周波数変化はまず位相が変化することから始まるので、位相変化を考える

MGCの伝送遅れ

- この遅れのために主系統の位相が変化したとき、ミニグリッドは直前の位相のままである

主系統の位相が進んだとき

- 主系統の位相が進んだとき、ミニグリッドの位相は相対的に遅れた位相のままである
- 主系統からミニグリッドに位相差による有効電力が流出する
- すなわち主系統の位相進みを抑制する方向に働き、一次のダンピング効果をもたらす
- 別な見方をするとミニグリッドの負荷が重くなり慣性力が働いたように見える

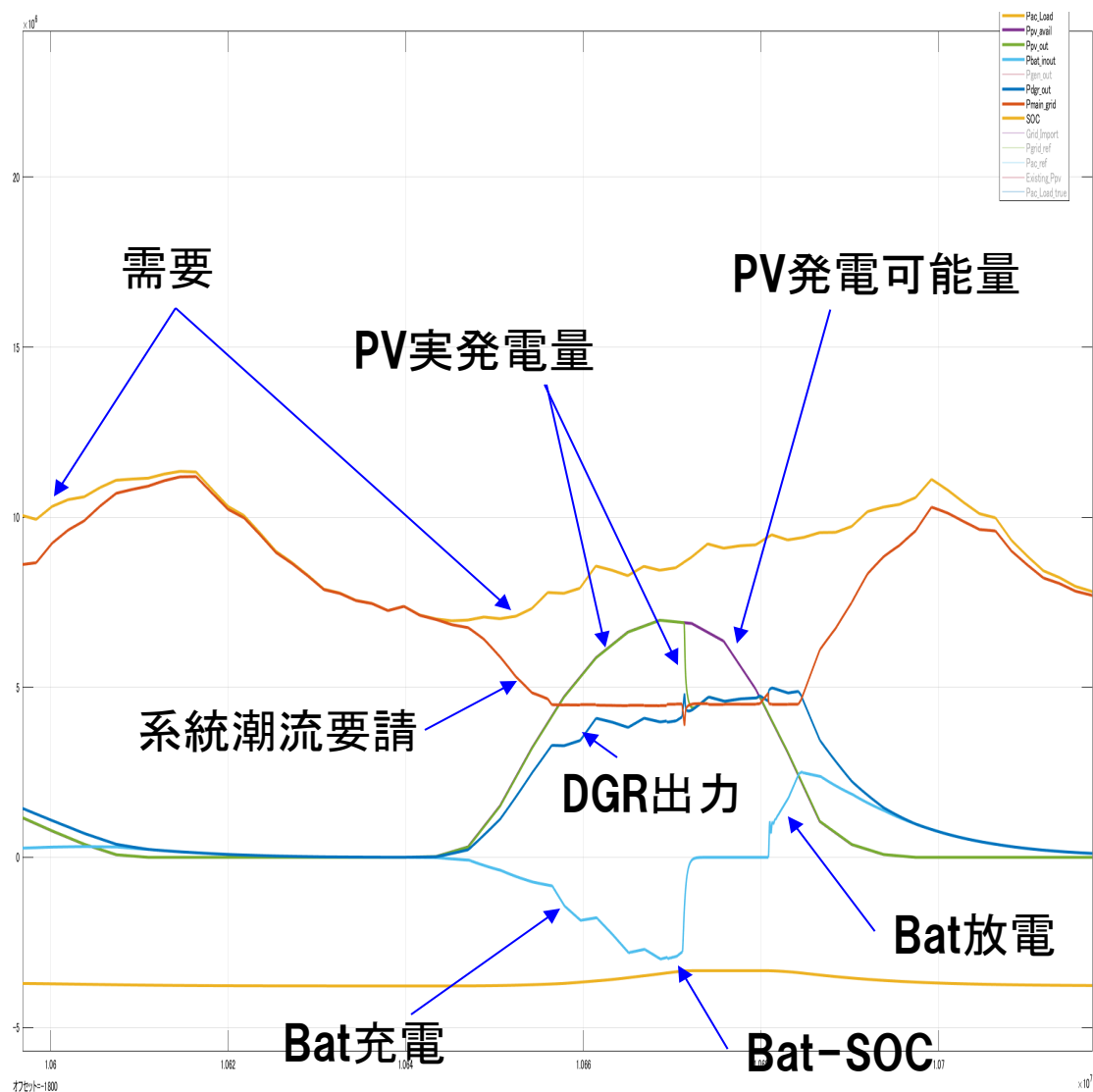
主系統の位相が遅れたとき

- 主系統の位相が遅れると、ミニグリッドの位相は相対的に進んだ位相のままである
- 主系統にミニグリッドから位相差による有効電力が流入する
- すなわち主系統の位相遅れを抑制する方向に働き、一次のダンピング効果をもたらす
- 別な見方をするとミニグリッドが慣性力を働かせて主系統に電力を供給したように見える

このように、MGCによる伝送遅れは主系統にダンピング効果あるいは慣性力を提供する効果がある

5. 系統内DGR分散運転(ミニグリッドも含む)

(4)MGCによる再エネ利用率最大化



再エネ利用率最大化のためには予測が必要

- 需要の予測
- 太陽光発電可能量の予測
- 下げ代制約の予測
- その他系統側発電機の制約

予測の上で事前シミュレーションが必要

- 蓄電池のSOCの挙動
- 蓄電池貯蔵量と放電量の挙動
- 再エネ率の計算

太陽光発電可能量が大きいと予想される場合

- 夜間に蓄電池を放電し、SOCを適切な値に下げしておく(レジリエンシー考慮)
- 充電した量を適切な時間帯に放電する

太陽光発電可能量が少ないと予想される場合

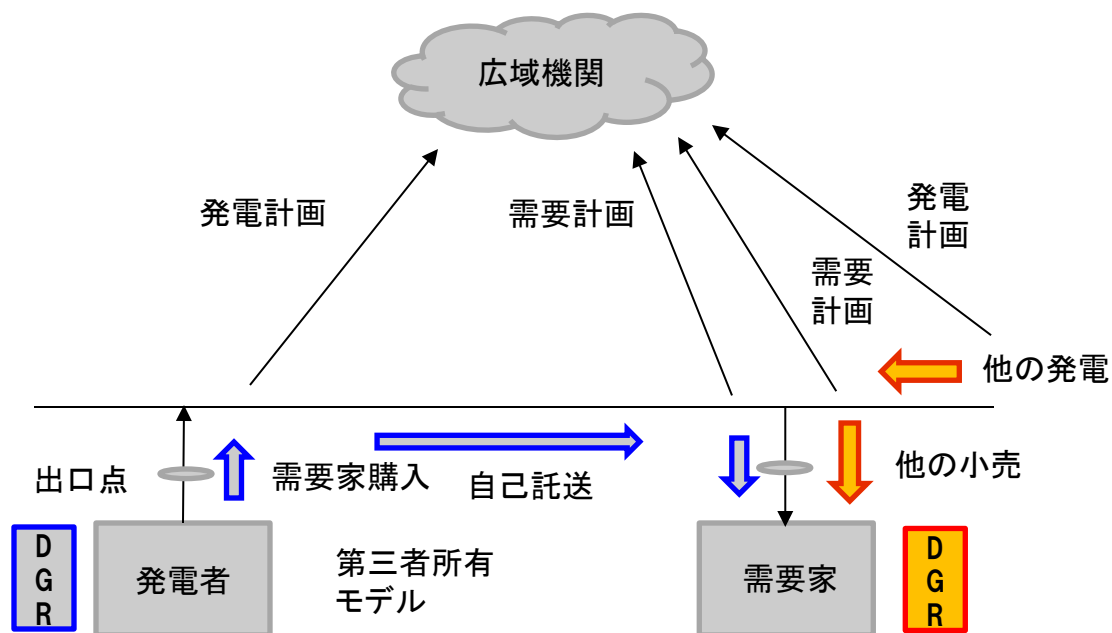
- SOCの値を適切なレベルにしておく(レジリエンシー考慮)

ノンファーム接続

- 系統の空き状態を時間帯別に予測し、SOCのレベルを調整する

6. DGRによるビジネスモデル

(1) DGRと需要家間の自己託送制御



非電気事業用電気工作物
FITやFIP制度不適用
専用電源
脱炭素電源
組合型も可能

自己託送は様々な制約はあるが、再エネ調達に効果的手段

- 特に第三者所有モデルは、近接地に土地がない場合効果的
- 他電力管内でも託送可能
- 第三者所有の場合、出口点で購入することで自己の需要に託送することとなる

再エネ賦課金が賦課されない

- 自己託送部分については、託送する電気が再エネ由来電力なので、その部分については再エネ賦課金がかからない
- 託送料金は必要

同時同量計画

- 30分単位の計画値同時同量を実現する
- 広域機関に発電計画・需要計画を提出
- 実績との差が大きいときはインバランス料金が課金される

DGRによるインバランス回避

- 太陽光のPCSを蓄電池内蔵DGRに置き換えることにより、インバランスを調整できる
- 広域機関のゲートクローズ直前まで、計画を変更し、ゲートクローズ後は出力調整をPV出力+蓄電池で実現

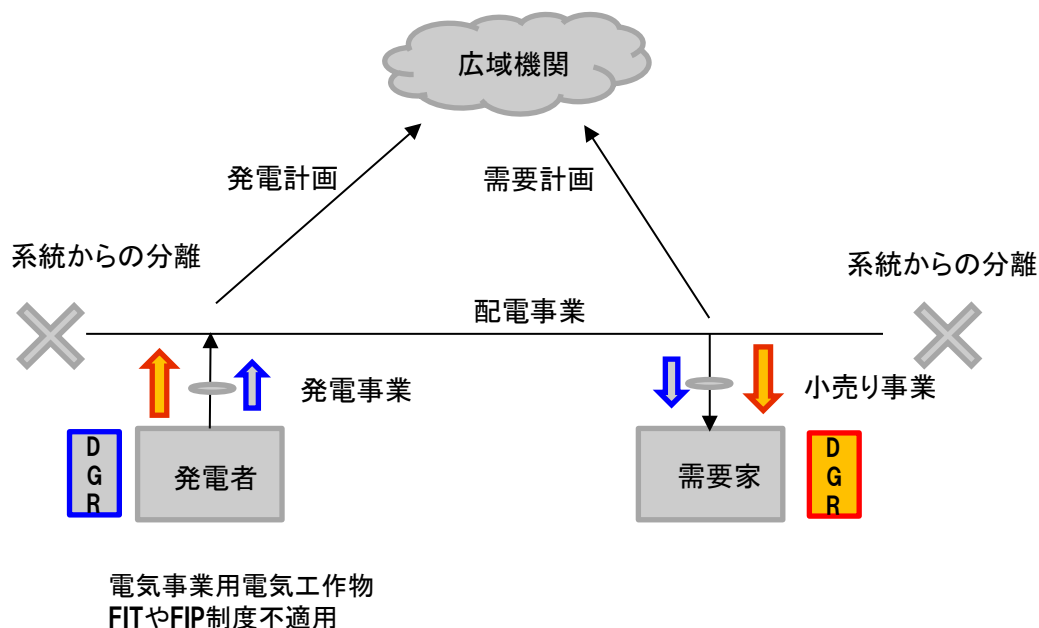
他の発電・小売は残った部分の同時同量が必要になる

- DGRを活用する場面が生まれる

6. DGRによるビジネスモデル

(2)セルグリッド内完全自立の経済性

現行料金レベルや設備単価では経済性は厳しいが外部依存性はない



セルグリッドは5万軒以下なら兼業規制緩和

- 発電、配電、小売りの兼業が可能
- すべての事業認可が必要
- 既存小売りからの転換が必要
- 再エネ賦課金など不透明(自己託送ではない)
- 配電については一般送配電事業者へ賃借料などの支払いが生じる
- DGRにより完全自立は可能だが、十分な電源確保が必要

設備の経済性は

- 設備利用率15%の太陽光のみで考えると
設備Pkw×15%=平均需要DkW
- 需要の負荷率40%とすると、
最大需要Dmax=D/40%
- よって、 $P=40\%/15\% \times D_{\max}=2.7 \times D_{\max}$
- 設備単価をV万円/kWとすると
- 生涯コストは $V \times P=27000 \times V \times D_{\max}$ 円

燃料の経済性は

- 燃料費相当単価をE円/kWhとすると
- 平均需要DkW×E円/kWh=D×E円/h
- 寿命をL年とすると生涯燃料削減は $L \times 24 \times 365 \times (D_{\max} \times 0.4) \times E$ 円

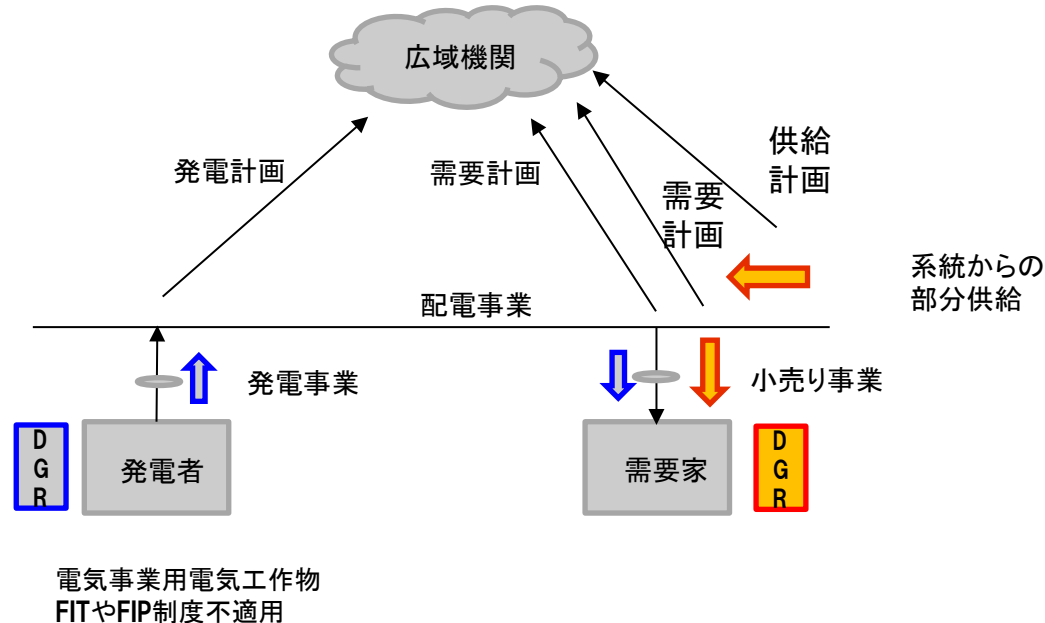
合算すると

- 電力供給コストは $\{27000 \times V \times D_{\max} - L \times 24 \times 365 \times (D_{\max} \times 0.4) \times E\} / \{L \times 24 \times 365 \times D_{\max}\} = 27000 \times V / 8760 - 0.4 \times E$
=3.1V-0.4E
- 設備単価V=30万円/kW, 従量料金25円/kWhとすると
=3.1×30-0.4×25=83円/kWhとなる

6. DGRによるビジネスモデル

(3)セルグリッド部分供給モデルの経済性

現行料金レベルや設備単価で仮に採算が取れても外部依存性が高いのでいずれ破綻する



部分供給は時限的な措置

- 電力自由化の過程で新規参入者を保護するのが目的だが、あくまで経過措置
- 「適正な電力取引についての指針」では、『経過措置期間中においては特定小売供給約款に基づく規制料金(以下「経過措置料金」という。)による小売供給を行うことが電気事業法上義務付けられている(平成26年改正法附則第16条)。』
- <https://www.meti.go.jp/press/2021/03/20220331011/20220331011-1.pdf>

外部依存性が高い部分供給価格が将来どう変化するかわからない

- 経済性の外部依存割合が高く、リスクが大きい
- 市場依存の場合もリスクが読めない
- 長期間にわたる計算が不可能

部分供給相当を相対契約で

- 部分供給相当を他の発電事業者と相対契約できれば成立する

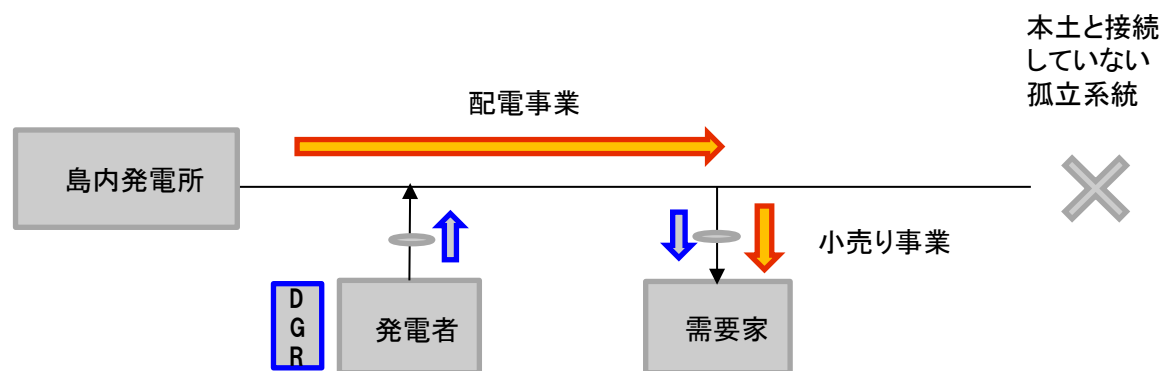
小売り電気事業

- 様々な賦課金が発生する可能性が高い
- 賦課金負担を顧客に転嫁することが難しい

6. DGRによるビジネスモデル

(4) 離島モデルの経済性

部分供給や卸供給は、インバランス単価が適用される



離島ユニバーサル料金は本土需要家の負担のもとに成り立っている

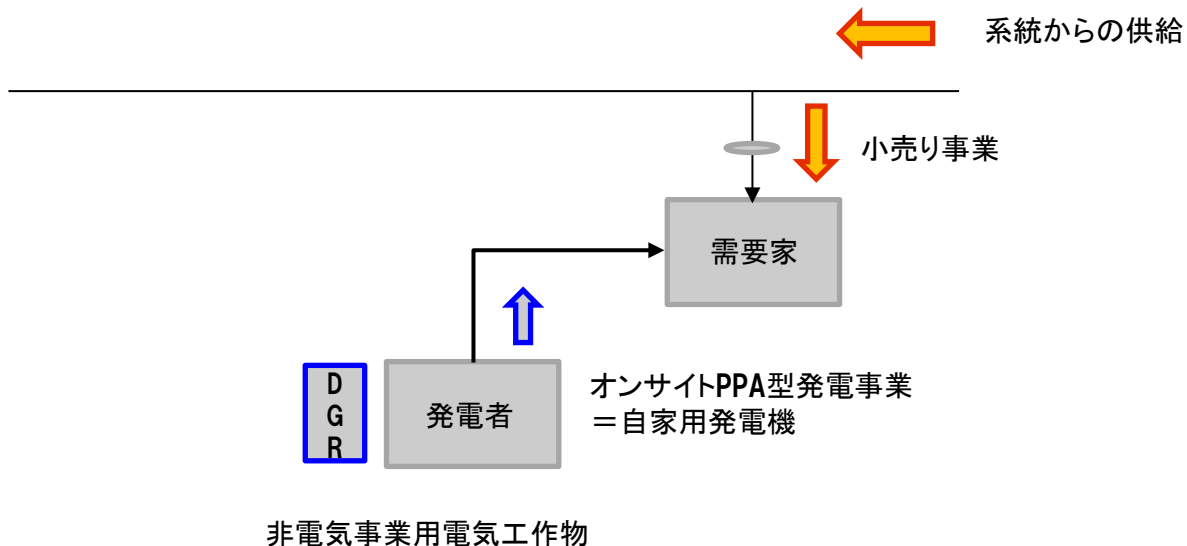
- 離島で小売事業を行ったばあい、自分の発電を除いた不足分の電力は全量インバランスとして扱われる
- 本土では現行制度では部分供給として規制料金が適用されている部分が、インバランス単価の適用になる

需要家電力全量を自前で供給できない限り、経済性の検討ができない

- インバランス料金については外部依存経済である
- 太陽光の場合、日照不足時や夜間はすべてインバランスになるということ
- 長期にわたって経済性を計算することは不可能

(5) DGRの目指すビジネスモデル 第1ステップ

第1ステップ



■ オンサイト型PPA発電事業（総括原価型）

- 自家発は非電気事業なので規制がかからない
- 総括原価型で固定費償却の回収にするとメータがいらない（計量法に抵触しない）
- 小売側の同時同量にDGRが貢献し、インバランスをなくせる
- 発電設備の種類によってはピークカットによる小売基本料金の低減が可能
- 系統停電時には自立運転可能

■ 総括原価型なので将来にわたって支出が固定される

- 需要家にとって支出固定は大きなメリット
- 発電家にとっても支出固定は大きなメリット
- 変動費が発生する発電技術の場合は燃料費相当を実費支払いする

■ 小売りによる供給電力量削減

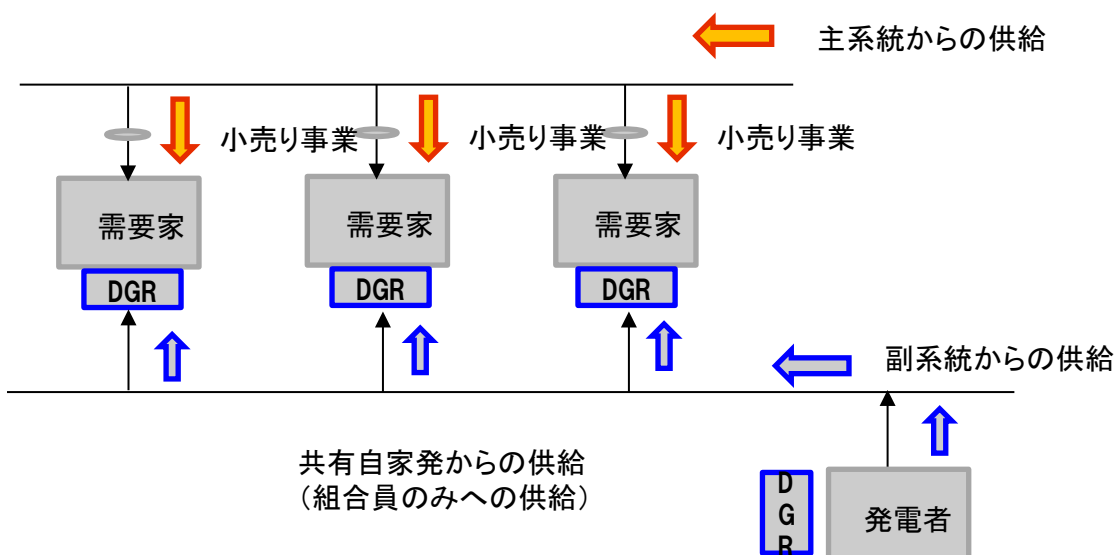
- 様々な賦課金も削減される
- 将来の料金単価の変動の影響が減少する

■ 発電設備を増やしたくても逆潮流が発生すると制約がかかる

- 現行の配電設備ではほとんど逆潮流は認められない
- 認められても極めて安価での買い取りとなる

(6)DGRの目指すビジネスモデル 第2ステップ

第2ステップ



第1ステップの課題であった発電設備を増やせないという問題を解決する

- 再エネ率大幅拡大の切り札

再エネ発電を中心とした電源を、「副電力系統」を経由して希望する需要家に供給する

- 副系統は、直流自営線
- 発電機は、希望する需要家群の共同所有自家発
- 副系統から需要家への配電は小型DGRにより実現
- 小型DGRはGFMで同期化力・慣性力供給で系統安定寄与
- 狭い範囲の需要家組合の組合員に再エネ供給
- 個々の需要家では使い切れなかった再エネを共同使用

需要家への供給は個々のピークカットおよび契約形態(発電機保有比率分担)などで決定

- 小型DGRはクラウドからの指示で電力量調整
- 料金は固定費のみで分担

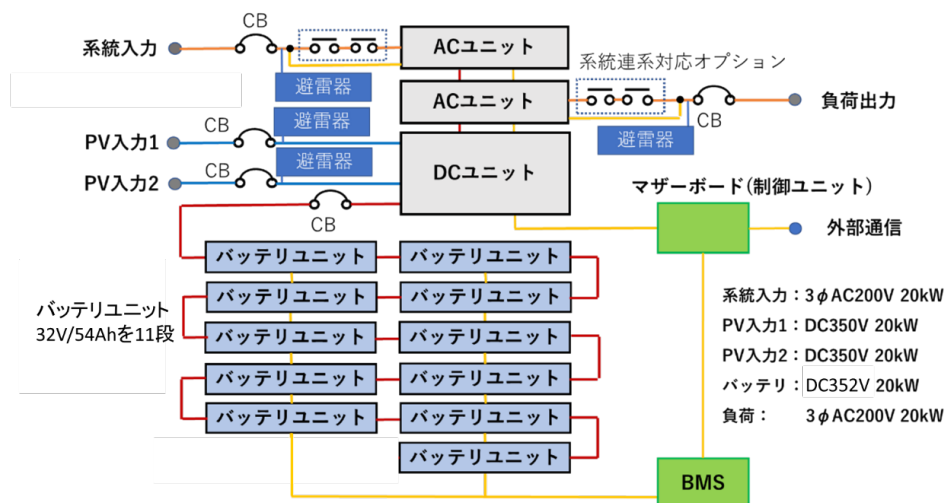
1需要家1受電は、電力会社の供給約款上の規定、電気事業法の定めはない

- 複数受電をしている需要家はすでに多数存在

直流配電線の電圧維持技術はDGRが実現

6. DGRによるビジネスモデル

(7) DGRの価格低下シナリオ



細かいパーツに分けて大量生産

- ACユニット、DCユニット、バッテリーユニット、制御ユニット、筐体に分けて、個別に大量生産可能とする
- ユニットは**Plug&Play**方式、すなわちパワー部も制御部もコネクター接続、手動抜き差しで接続完了
- 修理もユニット交換→保守コストの低下

使用部品は太陽光パワコンと同等仕様

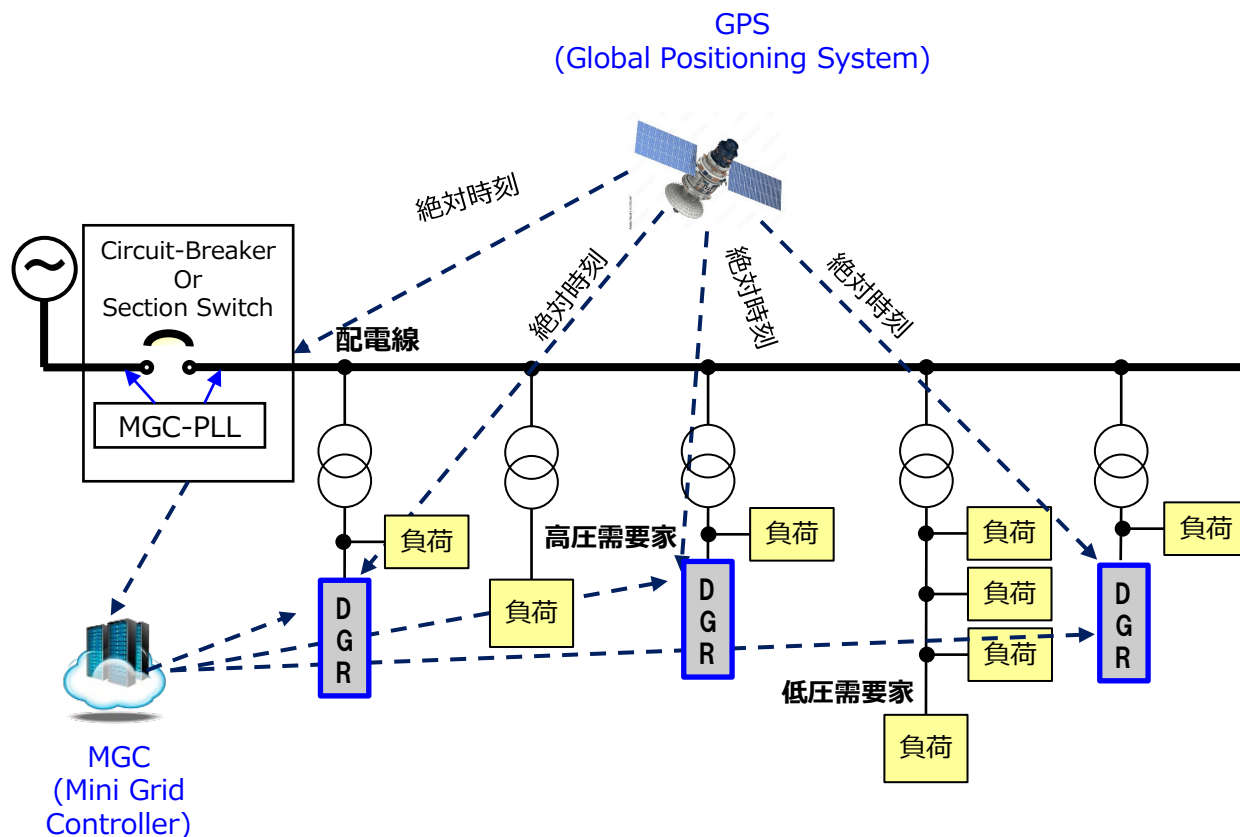
- パワコンが大量生産で安くなったと同じメカニズムで価格低下
- 価格を支配する主要部品が電気自動車と共通
 - ・インバータ
 - ・バッテリー
- 筐体の塗装なども自動車製造のラインが好適

製造メーカーは世界中に分散

- データはCAD化してどこでも製造できるようになる
- ハードウェアには制御機能部品がない
- 性能は制御ユニットのソフトウェアで決まる

6. DGRによるビジネスモデル

(7)MGCと系統連系における認証プロセス



ソフト系によるMGCクラウド認証 + ハード系による電力系統連系認証

DGRの使用にあたっては2つの認証プロセスがある

- ソフト系のMGCクラウド認証
- ハード系の電力系統連系認証

モバイル回線を使用したソフト系のMGC接続認証

- MGCが全DGRに情報を伝えるにはまず認証する必要がある
- モバイル回線はセキュリティの観点から閉域網となる
- 他者のなりすましは排除され、アタッキングも排除される
- 系統位相情報などの伝搬サイクルを短縮できる閉域網

電力系統に接続するにあたっては系統連系認証が必要

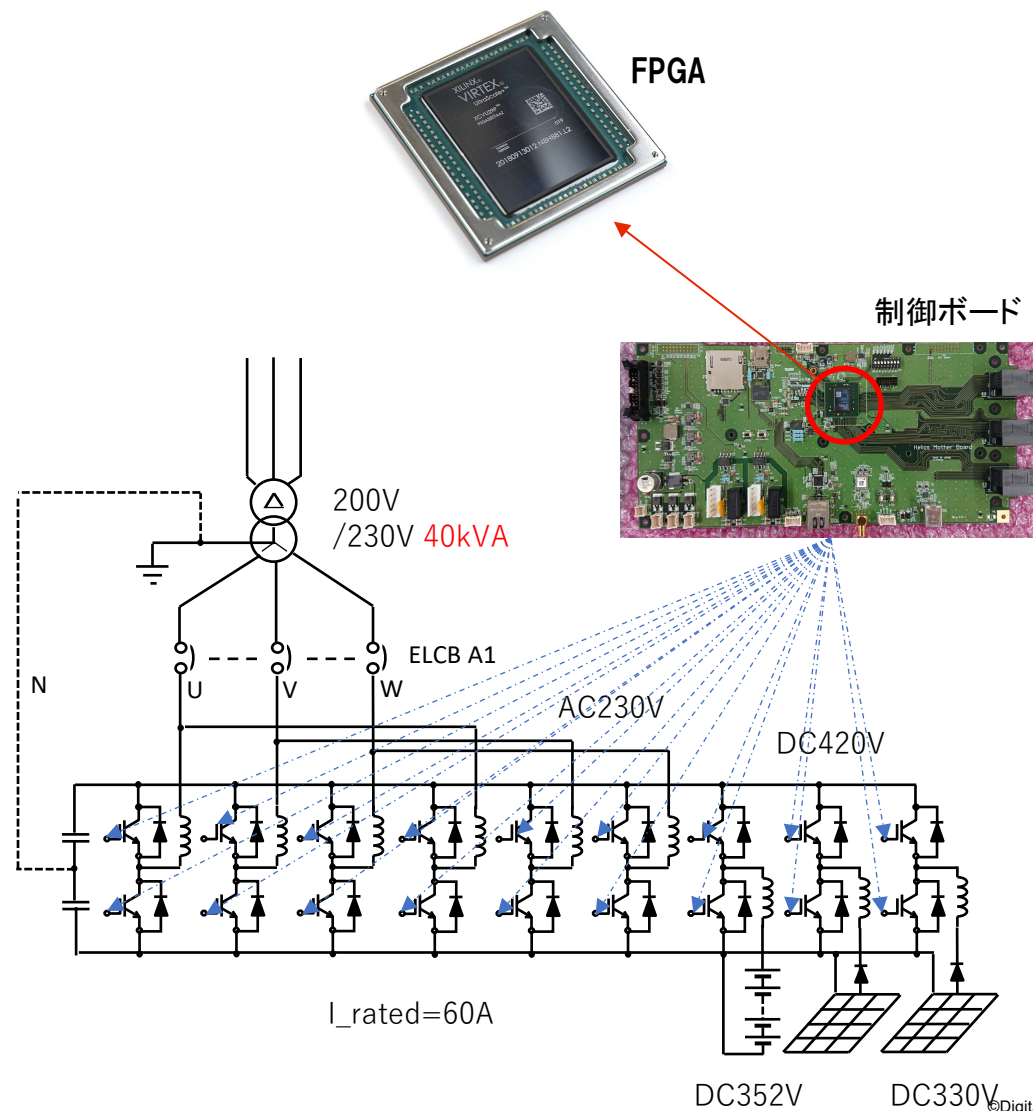
- 系統連系規定に準拠していること
- 様々な保護機能と設定の確認を電力立会で実施
- 運用に関する取り決めに契約

デジタルグリッドコンソーシアムは上記認証を代行

- DGR型式試験
- DGR-ID発行
- 認証マーク発行

7. オープンソースインバータ

(1) DGRの制御チップ(FPGA+CPU)



FPGA は、書き換え可能な論理回路集積IC

- PLD (プログラマブル ロジック デバイス) に分類される集積回路 (IC) であり、製造後に変更できる適応性に優れたハードウェアで構築されている
- 配列された各ハードウェア ブロックは個別に設定でき、必要に応じて接続できる

DGRの9つのハーフブリッジのヒステリシス用ゲート信号はこのFPGAから発信される

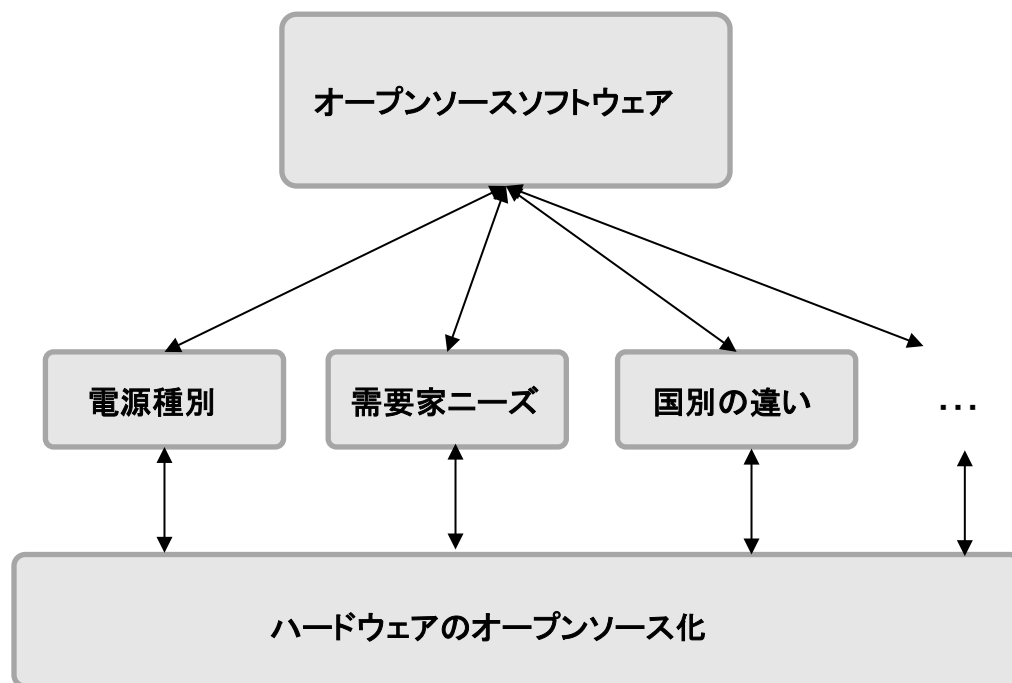
- すべての制御はこのチップに集約
- モバイル回線を通じて書き換え可能
- パワーユニット上には制御装置(マイコンなど)はない

割り込み機能がなく時間に忠実な制御が可能

- 太陽光の変動、バッテリーの状態、交流系統の変動、などすべての情報を集約して即座に応答
- ヒステリシス制御と合わせて極めて高速
- 50/60Hzの動きを40GHzで制御

このソースコードをオープンソース化予定

(2) 制御ソフトウェアのオープンソース化



■ 制御ソフトウェアのオープンソース化の目的

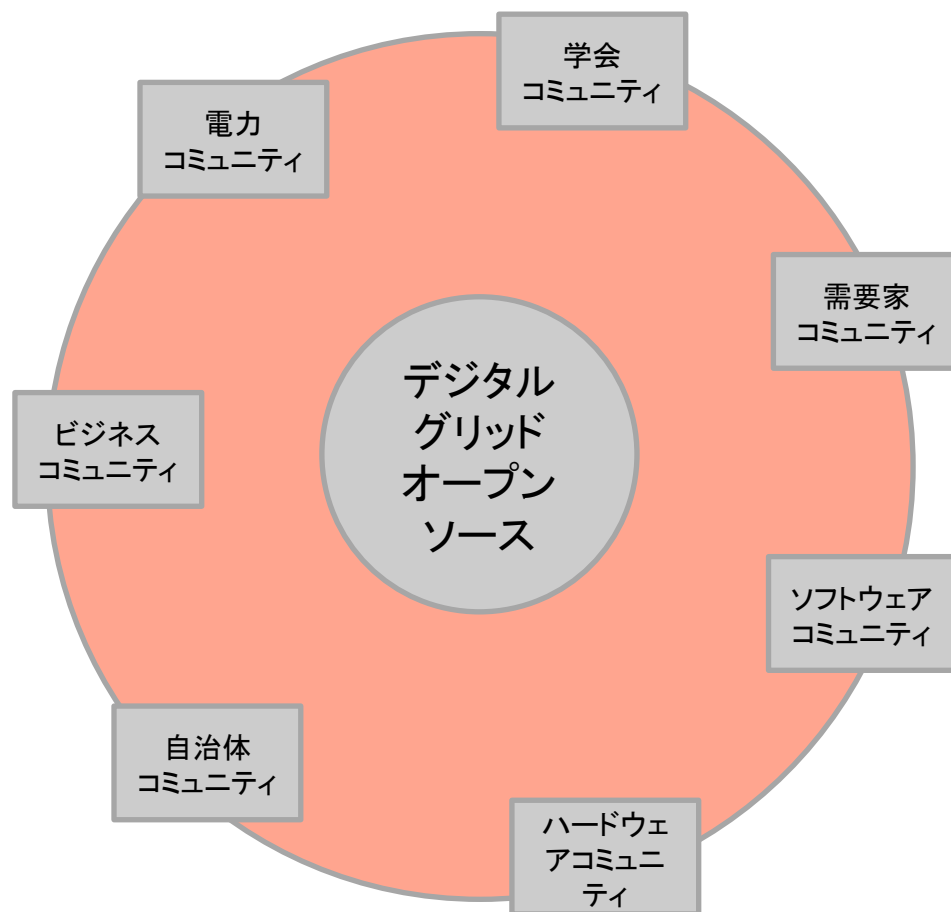
- インバータの制御はソフトウェアで決まる
- 再エネを系統に連系して、運用するには高度な知識が必要
- 各社各様の制御システムでは電力系統の信頼性を損なう
- 共通となるオペレーティングシステムができてこそ、再エネ主力電源化が可能となる
- 異なるニーズに対する対応

■ 「ニーズに対応して順番に開発」では間に合わない

- コアなソフトウェアは共通化
- 個別的なニーズ対応はバッチ処理
- ハードウェアに対応しなければならない

■ Linuxのようなオープンソースコミュニティが必要

(3) オープンソースコミュニティによるカーネルバージョンアップ



■ オープンソースの中核にあるカーネルは各コミュニティのニーズを反映してバージョンアップされる

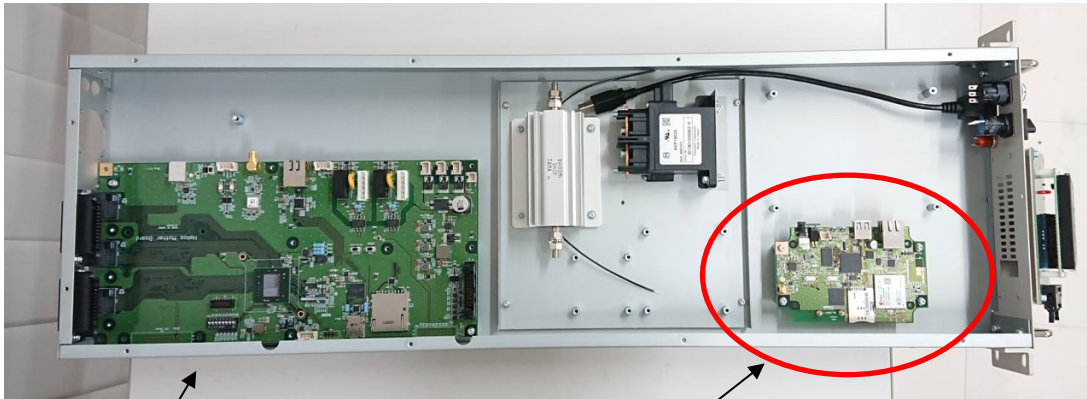
- 電力コミュニティは最大のユーザーになる可能性あり
- その利益と財源は自治体コミュニティ
- 直接ニーズは需要家コミュニティ
- ファイナンスを含めたビジネスコミュニティ
- 学会コミュニティが承認

■ ハードウェアリクエストは日進月歩

■ ソフトウェアバージョンアップも日進月歩

7. オープンソースインバータ

(4) デジタルグリッドコントローラ(DGC)による制御ソフトのアップデート



デジタルグリッドコントローラ(DGC)

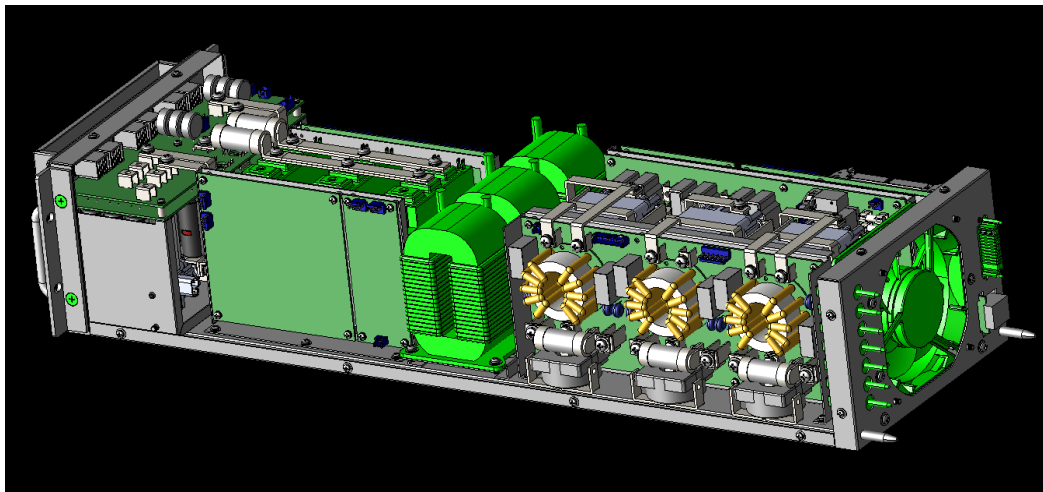
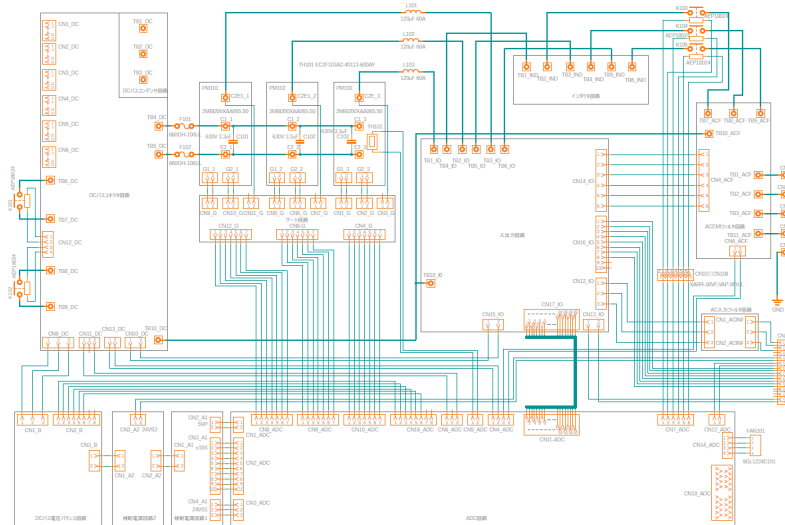
制御ユニット



DGCはモバイル回線使用のMGCとの通信ユニット

- 周波数や位相の情報を取得
- DGRの接続認証を実施
- FPGAソースコードの書き換え
- DGR状態監視
- 警報発報
- 電力量などのログの記録

(5) ハードウェア情報のオープンソース化



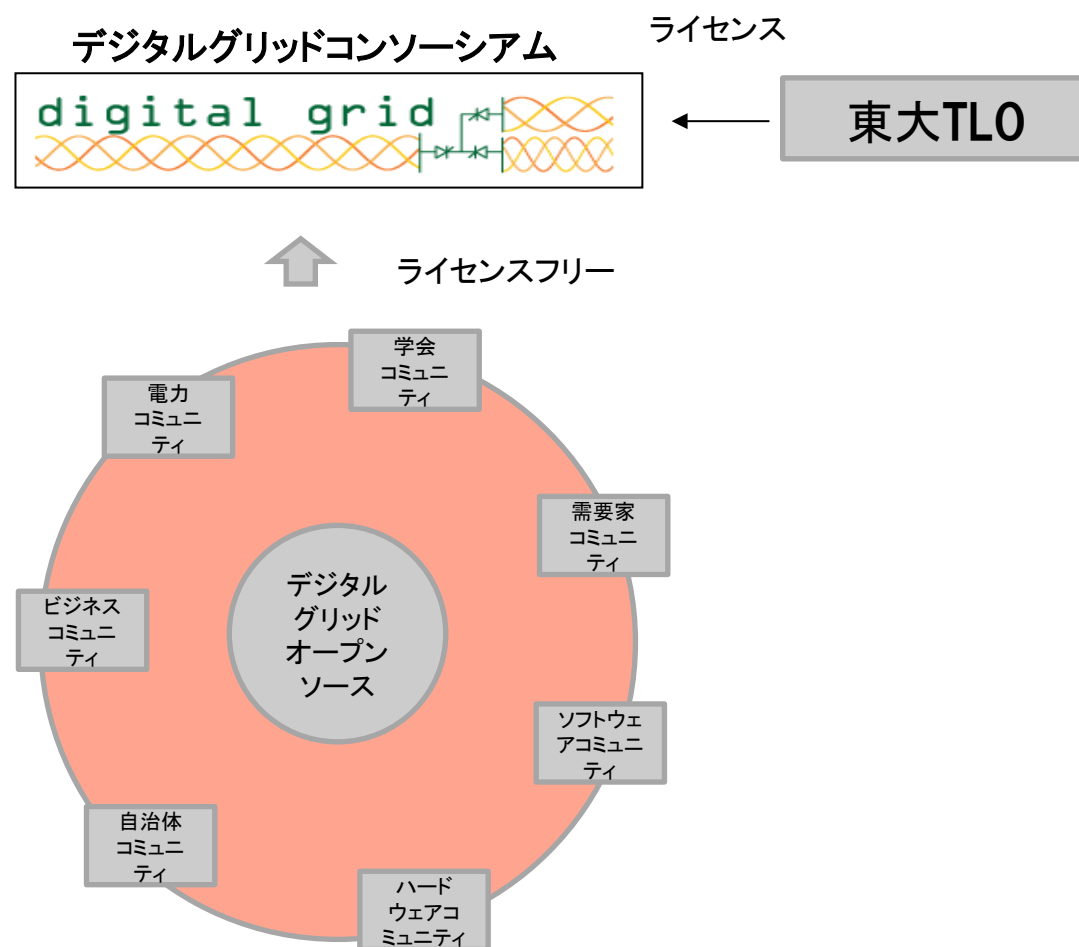
ハードウェア情報のオープンソース化

- 設計情報
- CAD情報
- 部品リスト
- 製作図面

誰でもパッケージング化できるようにすべてをオープン化

- 改造については各社のノウハウ化が可能
- ライセンスフリー

(1) デジタルグリッドコンソーシアムでのコミュニティ構築



コミュニティには一定の条件下でライセンスフリー化

- GPL (GNU General Public License) を参考に構築
- 自己責任で使う
- 著作権の表示は必要
- 複製・改変・再配布・販売等は自由にできる
- 再配布する物もGPLライセンスにする

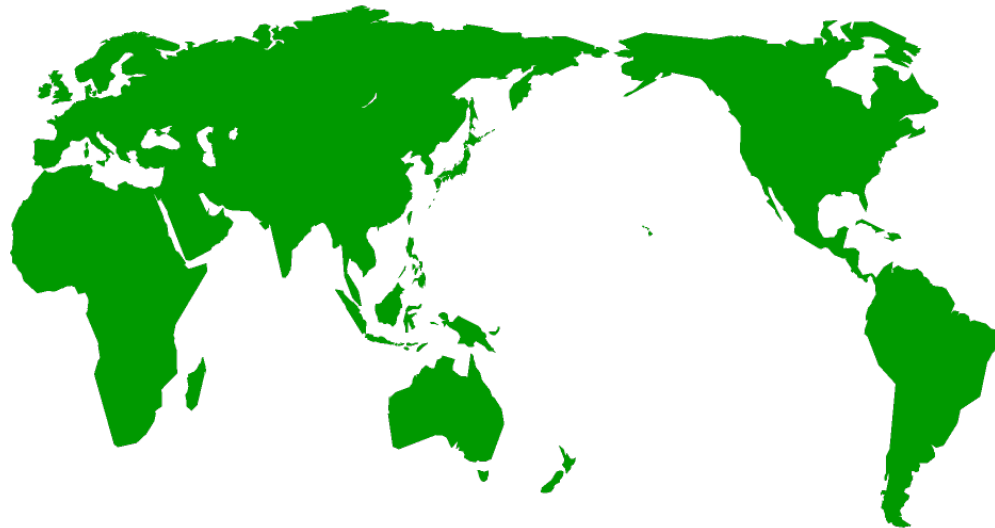
独自のコミュニティ文化を作る

- 日本はコミュニケーションが不得意
- 日本にあった仕組みづくり
- ハードウェアを中心とした仕組みが合う
- 海外向けはまた別途構築

重要な要素として新技術開発

- DGRだけの世界にとどまてはいけない
- バッテリー新技術
- 水素製造新技術
- 燃料電池新技術
- 小型風力新技術
- 小水力新技術

(2) 世界展開へのプロセス



世界のエネルギー問題の対策

- 再エネシフトは全世界の課題
- 地球温暖化対応の切り札

ハードウェアオープンソース化

- ローカルマニュファクチャリング
- 現地生産のハードルを下げる
- 検査用マザーボードの提供
- MGCクラウドもローカライズする

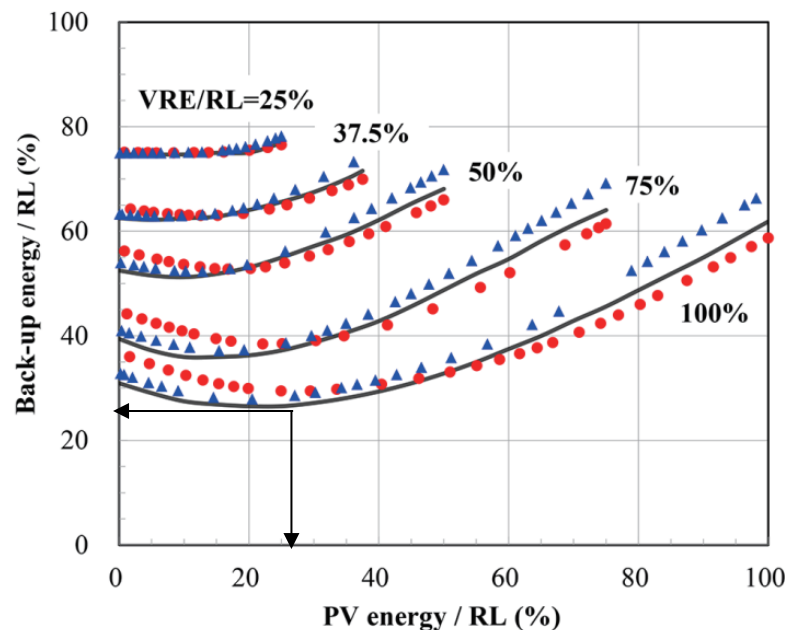
オープンソースにより誰でも利益を上げられる仕組み提供

- 自己責任で使う
- 著作権の表示は必要
- 複製・改変・再配布・販売等は自由にできる
- 再配布する物もGPLライセンスにする

現地電力会社の認証

- オープンソースが必要
- 世界中の研究者の参画が必要
- 電力会社自身のビジネスになるように

(3)再エネ主力電源化の可能性



日本エネルギー学会誌Vol. 101, No. 1, 2022, pp16-2, 「再生可能エネルギーの出力特性から導かれる日本への大規模導入時の風力増強の重要性」より
村岡克紀※1†, 山形幸彦※2, 阿部力也※

VRE: Variable Renewable Energy (変動性再エネ: PVと風力)

RL: Reduced Load (総需要からほかの再エネを除いた需要)

VRE/RL: 需要に対する変動性再エネ割合

図の横軸: PV energy / RL (需要に対するPV割合)

図の縦軸: Back-up energy / RL (需要に対するバックアップ必要量)

左図はドイツと九州の風況と日射量のデータから筆者らが分析した結果を示す

- 供給すべき需要に対し、変動性再エネで供給する割合を25%, 37.5%, 50%, 75%, 100%としてプロット
- 赤丸は2019年九州データ、青三角は2011年九州データ、実線は2012年ドイツのデータである
- いずれも同じ傾向を持つ、すなわち、太陽光と風力の割合が25%と75% (1:3) の時にバックアップ量が一番少なくて済む
- 需要100%を供給できるようにしても時間帯により過剰の時と、不足の時が発生する。
- 過剰の時は出力抑制したとしても、不測の時は何らかのバックアップ電源が必要
- その割合は需要の25%にもなる

この結果から、再エネの主力である太陽光と風力で100%の電気を賄うことはできず、化石燃料が25%程度必要ということを示唆している。

この25%をバッテリーで補うことは、余剰のタイミングと合致しないので難しい

この25%を余剰電力で製造した水素で発電するのであれば化石燃料から脱却できる可能性がある