

デジタルグリッドルータおよびセルグリッドの開発

中小規模配電網の配電事業運営のための基幹制御装置

㈱DGキャピタルグループ 阿部 力也

はじめに：開発の背景

今年4月に改正電気事業法が施行され、配電事業が自由化された。このことは電力会社の保有する配電網を民間事業者が譲り受けて配電事業を営むことを可能にするものである。すでに数十社がこの事業の準備としての「地域マイクログリッド」マスタープランを作成し、構築事業への準備を始めている。

配電網運営の要請は、

- ① レジリエンス強化：電力系統停電時に配電網自立運転が可能であること。
- ② 再エネ利用拡大：地域に存在する再生可能エネルギーと未利用エネルギーを活用すること。
- ③ 地域マイクログリッド実現：前記①、②を満足する分散型エネルギーシステムを地域において構築すること。

電力系統運用技術は非常に高度なものであり、民間事業者に配電網が運営できるか？上流の送電系統に悪影響を及ぼさないか？マイクログリッド内の需要家に支障を与えないか？など多くの懸念がある。

また、民間事業者にとっても配電網運営にかかわるコストとリスクがバランスしているのか？果たしてビジネスとして魅力があるのか？などという懸念がある。

我々は、これらの懸念を払拭するマルチインバータ（デジタルグリッドルータ：DGR）を長期にわたり開発してきており、今般Helios型DGRのプロトタイプを完成したので以下に紹介する。

インバータ主体の電力系統は可能か？

既存の電力系統は、水力タービンや蒸気タービンにより巨大な回転力を、同期発電機が電力

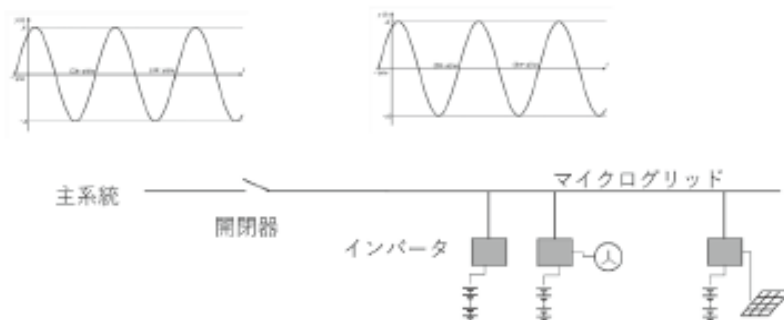


図1 インバータ系統連系による配電網（マイクログリッド）

に変えて、送電系統に電力を送り出すものである。近年インバータによる電力供給が盛んになり、特に太陽光発電のPCS（パワーコンディショナー）は地域によっては最大電力を超えるまでになった。

このような中、系統連系する太陽光インバータは10kW未満を除いて出力抑制の対象となり、送配電線の空き容量も不足する事態となっている。

一方で、前述のように、レジリエンシーを高めた再エネ主体の配電網も求められるようになってきた。このような配電網は、図1に示すように、インバータ主体で内部に分散電源を有する配電網になってくる可能性がある。

しかし、従来使われてきた「系統追従モード（Grid Following Mode：GFL）」のインバータでは自立可能な配電網を実現することができな

い。それは何故だろうか？

GFLインバータは、図2の上段のように系統電圧を測定して、送り出したい電力量を割り算することにより、目標電流を定めて送り出すという電流制御になっている。

しかし、主系統が停電すると、図2中段のように、電圧がゼロとなるため、目標電流の計算もできず、また、電圧のない系統に電流を送り出すことはできなくなる。図2下段のように、まれに送り出す電流が負荷に流れて電圧をつくり、単独運転というループができることがある。主系統停電時に部分的に電圧があると作業安全上の問題があるため、単独運転は系統連系規定で禁じられている。インバータには単独運転を検出する保護装置の設置を義務付けられる。つまり、主系統停電時にはインバータはすべて停止しなければならない。



図2 グリッドフォローイング運転



基準電圧がなくなるとどんどん位相が進む（遅れる場合もある）⇒不安定

図3 グリッドフォーミング運転

このような理由で千葉や北海道で長期にわたる停電が発生したときも太陽光は電源として寄与することができなかった。したがって、GFLでは、前に述べたレジリエンス強化、再エネ利用拡大には応えることができない。

そこで、インバータ運転の新しいモード「系統構築モード (Grid Forming Mode : GFM)」が脚光を浴びるようになってきた。GFMは本来電力系統に対して慣性力や同期化力を与える目的で研究されてきたもので、電流ではなく電圧を制御する。

これは、図3上段のように系統電圧に対して、インバータ内部電圧の位相を進めて、送り出したい電力を制御するものである。同期機と同じような慣性力・同期化力を制御系に付与することができるので、電力系統の安定化を図るものとして大いに期待されている。

主系統停電時には、図3下段のように配電網を切り離して、配電網内部の電圧を維持することができる。このことは、前述のレジリエンス強化、再エネ利用拡大の方針に合致している。

このようにGFMはGFLより、レジリエンス強化に適しているが、実際には難点がある。図4上段のように、主系統の安定した電圧源を失うと、自分で作った電圧を目標に内部電圧を作るため、正のフィードバックループができしまい、周波数が上昇したり下降したりしやすく

なる。これを制御するため高速なエネルギーマネジメントシステムが必要になる。それでも負荷の変動で周波数は簡単に変化するので、周波数安定性を維持するのは困難となる。今まで報告された事例などでは周波数変動を $\pm 0.5\text{Hz}$ 以内に抑えきるのも難しいようである。このため、GFMであっても、レジリエンス強化、再エネ利用拡大には応えることができない。

時刻同期による インバータ主体の電力系統

このように単純なGFMインバータでは、主系統停電時に独立配電網のレジリエンス確保が困難である。そこで我々は、共通指標としてインバータにGPS受信機を搭載して時刻を参照することにより、インバータの電圧位相を同期させる手法を開発した。

インバータ部の電圧降下を制御上15%とした場合、電圧誤差が1%でも電流誤差は7%に相当する。これは約 $5\mu\text{sec}$ 程度の誤差に相当する。周波数では、 50Hz の場合、 0.00125Hz の誤差に相当する。水晶発振器では約 $10\mu\text{sec}$ の誤差がある上に、誤差が累積されていくのでインバータ間の電圧誤差が大きくなってしまふ。そこで、共通信号として $0.1\mu\text{sec}$ 程度の精度のGPSを使用し、水晶発振器を補正する手法をとる。

我々の開発した特許技術では、図4下段のよ

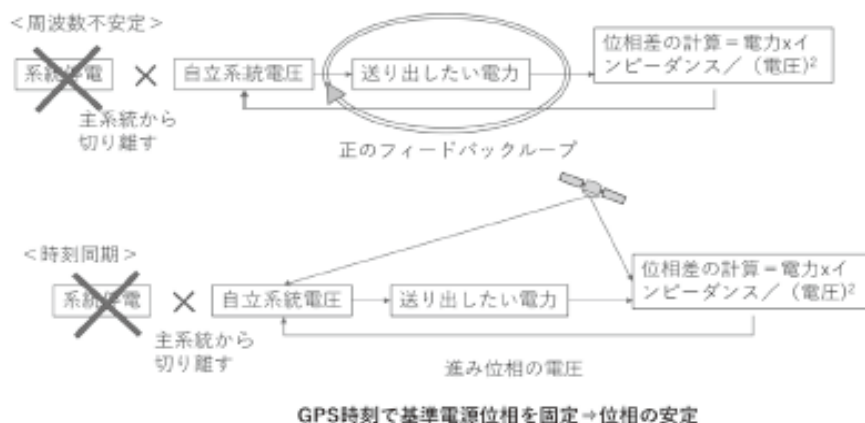


図4 時刻同期グリッドフォーミング運転

うにGPS時刻を用いて基準電源位相をつくり、それに対してDGR内部電圧位相を定める方式とした。周波数は $50\text{Hz} \pm 0.0125\text{Hz}$ のオーダーで安定化し、独立運転が継続できる。これにより、前述のレジリエンス強化・再エネ利用拡大を達成することができる。

GPS時刻信号は広範囲に利用できるため、広大な配電網であっても、多数のGFMインバータを並列同期して稼働することができる。配電網サイズに見合った巨大なインバータを設計・製作する必要がなくなる。量産型の安価なインバータ台数を増やすことで対応できるようになる。共通の同期信号があるため、多数のインバータを配電網電圧ゼロの状態から一斉に定格電圧に昇圧する、いわゆる「ブラックスタート」も可能となる。

このように多数台インバータ同期連系を実現したのが、時刻同期GFM方式のHelios DGRおよびセルグリッド運用技術である。

以下にその詳細について述べる。

セルグリッドの運用

図5はDGRがマイクログリッド内に配置されるイメージを描いたものである。電力系統とはDGRブレーカーで接続され、随時接続したり、切り離したりできる。

電力系統とマイクログリッドが接続されているときは、系統側との間の電力潮流をコントロールできる。逆潮流ゼロとすることもできるし、系統側が空いているときはフルに逆潮流を送り出すこともできる。

電力系統とマイクログリッドが切り離されるときには無停電で切り離しが可能となる。

また、停電後のいわゆるブラックスタートも全く問題なく可能である。

周波数は、前述のように $\pm 0.0125\text{Hz}$ 以内の変動なのでほとんど固定と考えて良い。需給バランスを取るには、インバータの内部電圧位相を制御する。

しかし、上位系統の周波数は $\pm 0.2\text{Hz}$ という変動があるので、そのまま直接接続することができない。そこで、図5のMGC（ミニグリッドコントローラ）をクラウド上に置いて、上位系統の周波数と位相情報をミニグリッド内のインバータに伝搬している。これにより、ミニグリッドは上位系統周波数 $\pm 0.0125\text{Hz}$ で運転され、常に位相が一致するようになる。

この状態になれば、上位系統と直接接続することができるので、同期遮断器を入れて、直接連系運転を行う。

上位系統に問題が生じれば、速やかに遮断器を切って、セルグリッドの独立運転を実施する。

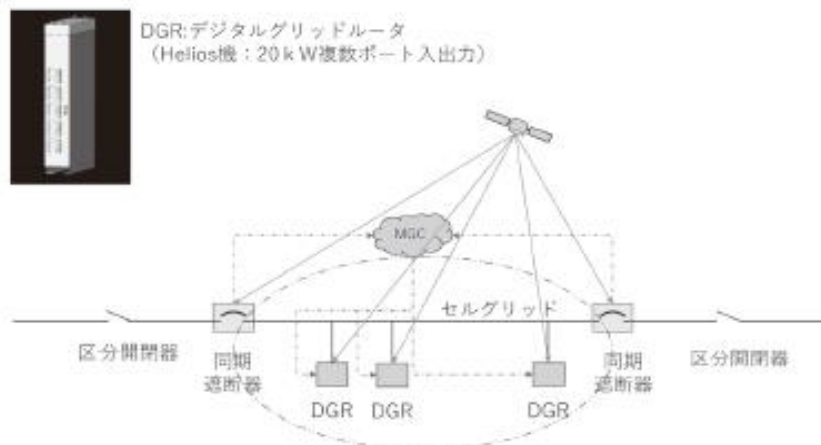


図5 多数のインバータが一台のように機能する

このようにして、上位系統と随時接続したり、遮断したりでき、常にセルグリッド側は停電せずに運転継続することができるようになる。

このことは電力会社から見ても、計画停電などで、悩む必要がなくなるため、発電機の定期点検などにおいて柔軟性が高まる。一方で、セルグリッド側は自己の電源を充実していく必要があるため、競争原理が働き、小型で安価な発電技術や蓄電技術の競争が始まり、電源設備のプラットフォームが構築される。セルグリッドは新たなサービスのプラットフォームにもなる

だろう。地球温暖化対策法改正の影響もあり、このような配電網の潜在ポテンシャルは日本中に生まれた。各市町村は2050年のカーボンニュートラルに向けてしのぎを削り始めている。

装置とシステムの概要

図6は、DGRの回路図である。直流電圧から交流や直流を作り出すハーフブリッジ (HB) と呼ばれる電力変換回路を九つ備えている。

DGRは複数の電源（太陽光パネル、小型風力、小型発電機、燃料電池、蓄電池など）を接

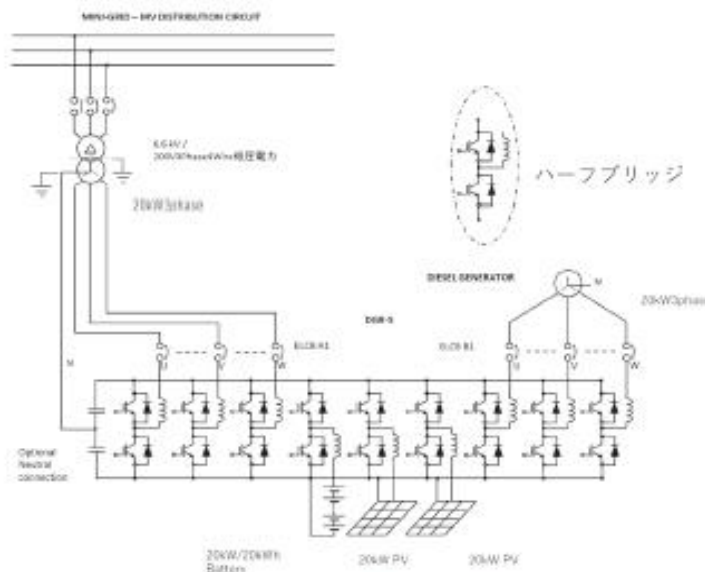


図6 Helios DGRの回路構成

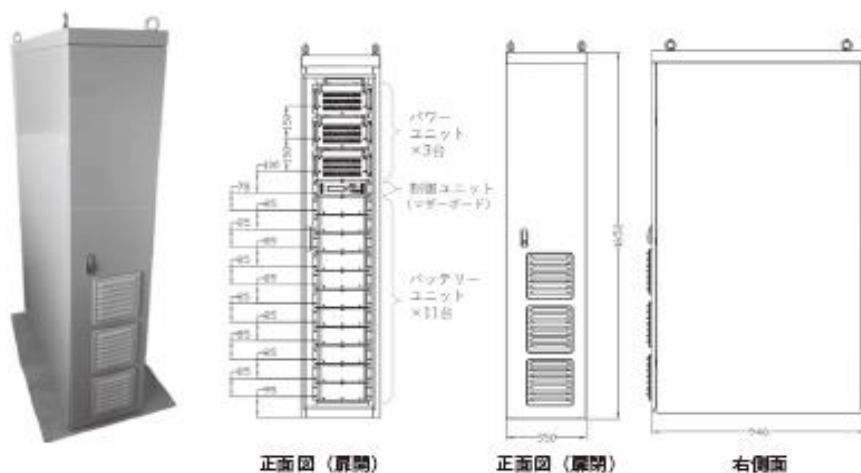


図7 Helios DGRの寸法図

続して配電網の電圧・周波数と同期させて電力を供給する装置である。一台のDGRは比較的小型で数十kW程度のものである。プロトタイプであるHelios DGRの場合、配電網への出力は20kWであるが、太陽光入力40kW、発電機入力20kW、蓄電池入出力20kWが同時に稼働する。

これらのHBはすべて一つの制御ユニットにおいて信号授受を行う。図7に示すように、この制御ユニットをマザーボードと呼ぶ。我々はこのマザーボードを提供して、DGRメーカーとなることを希望する事業者がDGR製造技術を提供する。最も経済性の高い出力バランスをマザーボードが自動的に決定する。

各DGRのマザーボードは、GPS時刻情報を基準に系統側の電圧位相に短時間遅れで同期するため、瞬間的には無限大の慣性力・同期化力をDGRに与える。この特性は系統安定化に資するものとなる。また、DGRをマイクログリッド内に多数分散配置することで配電網の各部の電圧を安定化させ、いわゆる電圧問題を解決する。

インバータの部品は、通常のパワコンと変わらないが、一つのDGRがマルチインバータになっているので、出力kWあたりの価格は割高に見える。しかし、配電網の新しい機能を提供するという視点から見ると非常に割安であるといえる。

本インバータは保守負担を軽減するため、プラグ&プレイ式のユニットになっている。故障が起きれば、ユニットを抜いて、新しいユニットを差し込むだけで修理は完了する。

日本のみならず、海外でも十分使用可能な製品仕様となっている。

おわりに：今後の展望

このようなインバータ主体の配電網は、電力の世界に一体何をもたらすのだろうか？

多数台インバータ（DGR）が作る配電網に

はいわゆるエネルギーマネジメントシステム（EMS）が存在しない。需給バランスは自動的に保たれ、変動や事故も自動的に対応し、問題が解決すれば自動的に継続運転を続ける。

変動の多い再エネ電源も自動的に抑制をかけてコントロールできる。

需要側もインバータ主体の世界が変わっていき、省エネが実現しながら再エネ化が拡大していく。新しい発電技術が試験導入されるようになり、電力潮流コントロールもビジネス視点から自在にできるようになる。

今年から始まった配電網ライセンスはその配電網の中の需要家の数が5万軒以下であれば、発電・配電・小売の兼業が認められる。市町村単位で自治体電力が作られ、小売電気事業者への電力の販売や直接小売りなど様々なビジネスが生まれるだろう。

自治体には豊富な再エネ電源があるが、今までは系統連系が難しく、十分活用できてこなかった。自治体自身が配電網事業者になればこの点を大幅に緩和するインセンティブが生まれてくる。さらにデマンドコントロール、熱併給、廃棄物処理、バイオ処理、小水力、小風力などが創出され、陸上漁業、野菜工場、冷凍産業など新ビジネスが生まれるインセンティブも働く。地方自治体が総合的な事業者となるルーラルエンタープライズモデルの根底には電気事業が位置することになるだろう。

このような配電網のプラットフォームとサービスのプラットフォームができ、その運用が極めてシンプルになると新たな電力産業が形成されるようになるだろう。

それは、従来の電力技術からかなりかけ離れたデジタル電力の世界になると考える。