

分散型電源の受動的マイクログリッドによる

エネルギーネット構築の基礎研究

研究代表者 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻 教授 引原隆士

1. はじめに

環境問題と電力自由化の動きの中で、自然エネルギーによる再生可能エネルギーを用いた分散型電源（太陽光発電，風力発電），燃料電池，電力貯蔵用二次電池（レドックスフロー電池，NAS 電池）などの個別機器の研究開発が進められている。一方これらを既存の電力システムに導入し連系する試みが始められ，NEDO を中心とする太陽光発電設備の集中連系およびマイクログリッドの適用性を検討するプロジェクトなどが進められている [1]。本研究はこれらの研究に関連して，受動的機能を有するマイクログリッドを構成し，しなやかに電力システムへの連系とグリッド内の電力品質を保つシステム制御技術の可能性を検討するものである。

分散型電源の多くは直流電源である。さらに自然エネルギーによるものは入力変動により出力が常に変動する電源として知られている。これらの導入は，今後のエネルギー資源枯渇への対策および地球環境問題への対応から避けられないものである。しかしながら，現在のエネルギーネットワークの根幹をなす電気エネルギーシステムは，交流発電システムの同期現象に基づく自律的安定性に依存したシステムであり，そのシステムの安定化に多大な労力が注がれている。ここに出力変動の大きい分散電源を中心とした発電システムが大量に導入される場合，システムの安定性への影響が懸念されている。さらに現在では導入電力量に制限が加えられるとともに，導入可能な地域が限定されている。このため，従来の電力システムの利点を維持しながら分散電源の導入を可能にし，さらに自由化等の進展に見合う高機能なシステム技術の開発が望まれている。そのための基礎技術として主に，(1) 分散電源の電力系統連系機能を高める，(2) 分散電源による電気エネルギーのネットワーク上の流れを把握する，(3) 従来の電気エネルギーシステム上に専用線を用いない同時同量を満たす仮想的マイクログリッドの構築，が挙げられる。

複合的物理システムはそのエネルギー的独立性を保つことで，相互干渉の無い安定なシステムを形成する性質があることが知られている。従来より線形な電気回路理論・システム理論ではこの性質は正実性として知られ，フィルターの設計，制御系の設計で多くの成果を生み出してきた [2,3]。近年この考え方を非線形に拡張した受動性が着目され，それに基づく設計論が検討されている。受動性を確保した複数のシステムはその結合により相互干渉して要素の機能を劣化することが無く，逆にその機能を最大限に利用することができる。このような設計論を電気エネルギーネットワークに導入することを本研究の目的としている。これまで直流電源の並列化および電気・機械システムの設計に受動性に基づく制御系の構築が検討されてきた [4,5]。本研究では，この受動性に基づくシステム設計論を電気エネルギーシステムに適用するに当たって，必要となる基礎的技術について検討を加えている。特に本報告では，研究助成を受けた同研究の推進状況に関して，上記3点を中心にその概要をまとめている。

2. 同期機能を有するインバータシステムの開発とその検証

電力ネットワークにおいては，変動が激しい分散電源の発電出力を既存の電力システムに注入する操作は，発電された分散電源の電力を一旦直流に変換した後，それをさらに再びインバータにより交流に変換し，システムに同期させて連系した上で行う方法がとられてきた。これは，従来より電力システム上の同期発電機が送電線を介して電力を授受し相互に力学的に同期する特性を維持し，電力のフローが確保さえすれば大規模化が可能であるという特質を最大限に利用したものと言える。しかしながら，インバータはブリッジ状のスイッチング回路にすぎず，基本的に電力を介した相互同期の機能は有していない。ここに大きなシステム構成上の問題がある。インバータの多くは連系する系統電圧の零クロス点でトリガをかける，もしくは位相同期ループ（Phase Locked Loop）の動作に基づく位相調整により制御されている。そのため，分散電源の直

流側と連系点の相互の状態変化に応じた電力の授受を，インバータが自律的に行うことはない．これに対して，既に提案されていたもののその機能が重要視されてこなかったインバータへの同期機能付与の手法 [6] を改良し，外乱に対しても同期状態に自律的に復帰し，出力応じてその位相調整で電力を授受できる新しい制御手法を提案した [7,8]．その制御ブロックを図1に示す．

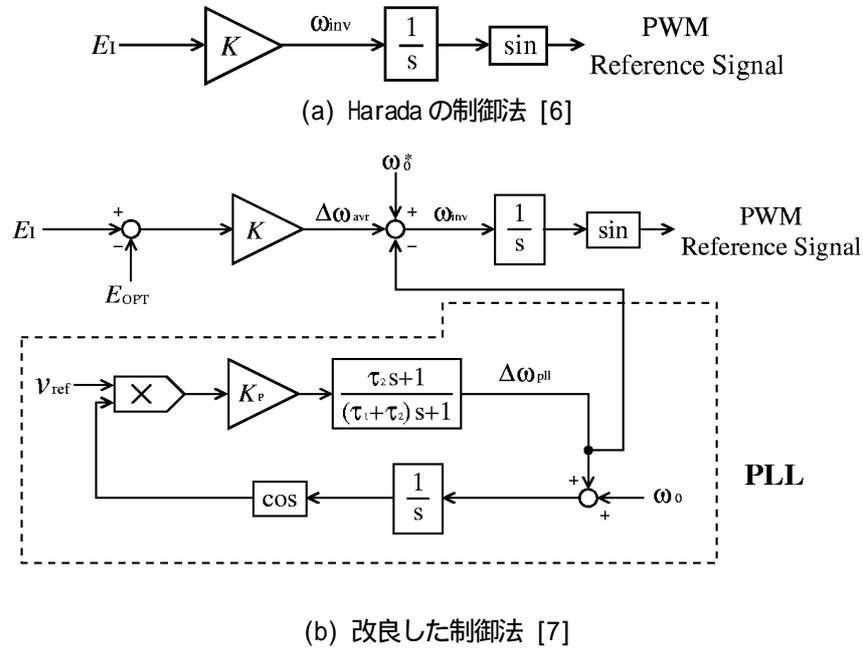


図1 インバータに同期機能を付与する制御ブロック

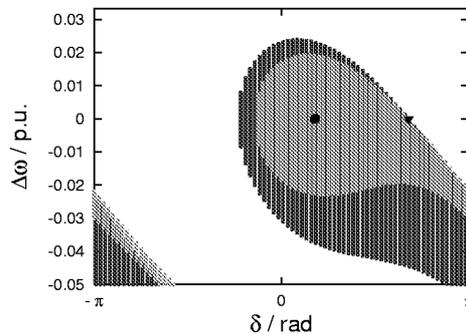


図2 同期機能を有するインバータの平衡点の引力圏（薄い領域がHaradaの方法，濃い領域が改良法）[8]

本手法は，位相平面において同期機と同様の引き込み領域を有し，同期発電機からなる電力システムにしなやかに同期できるインバータ駆動法となることが明らかになった．図2に同システムの同期引き込みの引力圏を位相平面上に示す．この図からわかるように，文献[6]の制御手法は同期発電機と同様の同期引き込みの引力圏を有しているが，提案制御手法は外乱等に対してロバストな同期特性を有しており，この制御手法を適用したインバータシステムは，既存システムに対して同期を前提としたエネルギー授受を検討することができることを理論的，実験的に示した．

以上のように，分散電源を電力システムに連系する際に不可欠なインバータシステムに対して，電力ネットワークに自律的に同期して連系できる高機能なインバータ制御が可能であることを，本研究は明らかにした．これは，自然エネルギーによる発電機器を有するマイクログリッドを，直流電力，交流異周波電力を含む構成にもかかわらず，従来の電力システムの同期発電機が分散配置された集合とみなした一つのシステムとして制御が可能であることを意味している．すなわち，マイクログリッドを構成する際に，分散型発電システムは既存の交流システムと同じ同期状態で接続でき，それに基づき，分散電源の集合としてのマイクログリッドの運用が可能であることが示された．

3. 電力ネットワークにおける電力授受算定アルゴリズム

前節で述べた研究結果に基づき、電力ネットワークシステムが同一周波数によって同期し、各ネットワーク要素が相互に電力を授受できるシステムであることを前提として以下議論を進める。ネットワーク構成に応じて発電機・負荷間で電力のフローがどのように分配されるかを知ることは、仮想的マイクログリッド構成において重要である。従来、電力系統では潮流計算法により、発電機、負荷間のノードごとの電力値が算出されてきた。この手法はどの発電機がどの負荷に対してどのように寄与しているかを知ることができず、既存の電力系統と共存するマイクログリッドにおいて、マイクログリッド内の発電機・負荷間での同時同量を確保するための情報を得ることができない。専用線を有する独立系統であるならば、その結果が全体の連系点での発電量として一意に決定するが、複数の連系点(ノード)を有するマイクログリッドでは、それらのノードにおいてどのような電力のバランス、ひいては電圧、位相を決定するかを議論することが不可能である。以上の点に着目し、本研究では Bialek によって提案された電力配分アルゴリズム [9] を拡張し、電力の瞬時値の算定に適用すると同時にその妥当性を回路理論に基づくシミュレーション、実験によって検証した[10]。以下、Bialek によるアルゴリズムを簡単に述べる。

3.1 アップストリーム・アルゴリズム

電力ネットワークのなかで、電源側をアップ端、負荷側をダウン端とする。一つの電源(アップ端)に着目して、この電源が複数の線路、負荷に供給している電力を算出する方法をアップストリーム・アルゴリズムと呼ぶ。その概念を図3(a)に示す。具体的には以下の式で与える。

$$|P_{i-l,k}| = \frac{|P_{i-l}|}{P_i} P_i = \frac{|P_{i-l}|}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} = \sum_{k=1}^n D_{i-l,k}^G P_{Gk} \quad (l \in \alpha_i^{(d)}) \quad (1)$$

上の式で $D_{i-l,k}^G = |P_{i-l}| [A_u^{-1}]_{ik} / P_i$ であり、 $\alpha_i^{(d)}$ はノード i から送電されているすべてのノードである。この式では $D_{i-l,k}^G$ を求めると、電力ネットワークで k 番の電源が線路 $i-l$ へ供給している分の有効電力値を算出することができる。

次に特定の電源から任意の負荷へ分配された電力を計算する。このとき

$$P_{Li,k} = \frac{P_{Li}}{P_i} P_i = \frac{P_{Li}}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

の関係が得られ、 k 番の電源から i 番の負荷に供給した有効電力が算出できる。これより、直接接続関係のない電源と負荷間で電力の負担配分関係を求めることが可能となる。また、定常状態においては無効電力の配分も同様の方法により計算することができる。ただし、この関係の導出は線路が無損失であるとの仮定の上で成立するものである

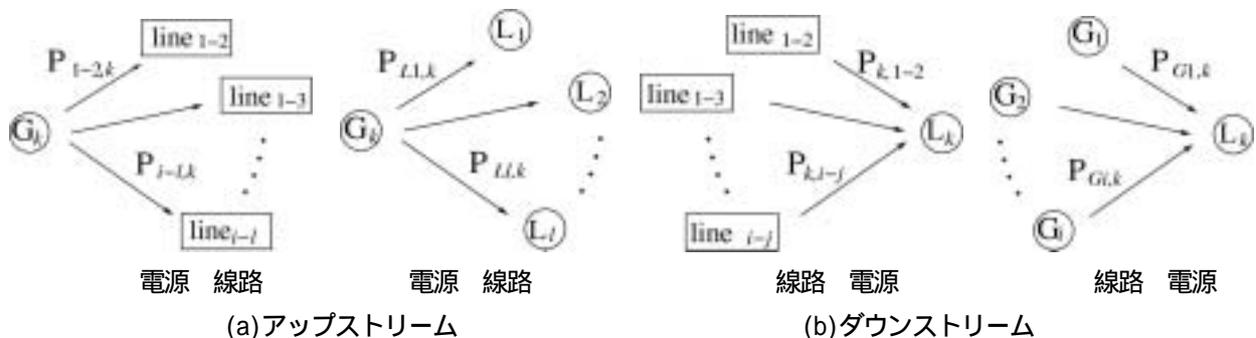


図3 アルゴリズムの概念図

3.2 ダウンストリームアルゴリズム

アップストリームアルゴリズムに対して、一つの負荷(ダウン端)に着目して、この負荷が複数の電源、線路から供給されている電力を算出する方法をダウンストリームアルゴリズムと呼ぶ。その概念図は図3(b)に示す通りである。具体

的な計算式を以下の通りである。

$$|P_{j-i,l}| = \frac{|P_{j-i}|}{P_i} P_i = \frac{|P_{j-i}|}{P_i} \sum_{l=1}^n [A_d^{-1}]_{il} P_{Ll} = \sum_{l=1}^n D_{j-i,l}^L P_{Ll} \quad (j \in \alpha_i^{(u)}) \quad (3)$$

上式で $D_{j-i,l}^L = |P_{j-i}| [A_d^{-1}]_{il} / P_i$ であり、 $D_{j-i,l}^L$ 項を定義して、電力ネットワークのなかで l 番の負荷が線路 $j-i$ から供給される量に相当する有効電力の値を示している。

次に特定の負荷が任意の一つの電源から供給された有効電力は、

$$P_{Gi,l} = \frac{P_{Gi}}{P_i} P_i = \frac{P_{Gi}}{P_i} \sum_{l=1}^n [A_d^{-1}]_{il} P_{Ll} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

で与えられ、負荷 l に供給した電力のなかで、電源 i が供給した分の有効電力を表している。

一方、電力システムの定常状態における電力バランスを考慮した直流回路モデルでは、無効電力の配分も上述の方法を用いて計算することができる。ただし、ここでは無損失線路の仮定をおいている。

3.3 線路上損失の配分算出

電力ネットワークには必ず線路損失が存在するため、前節で述べたアルゴリズムは現実的ではない。そのため、線路上の損失を平均化してからの算出する方法を用いることで、簡易にアルゴリズムを適用できる。図4に示すように、二つのノード近くの電力の和を平均して線路上の電力と見なす。損失平均化を適用すると線路は無損失線路として扱うことができる。

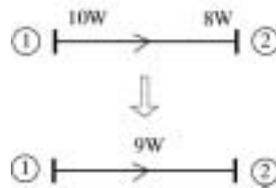


図4 損失平均化

損失平均化するまえの各値を上各式に代入すると、各線路の損失の配分も算出できる。

本研究では以上述べたアルゴリズムにより、従来、『潮流計算』の手法で算出されてきた電力フローの算定を包含する形で、回路理論の基礎に則り、平均電力、瞬時電力、さらには過渡時の時間変化を含めて、電力のネットワーク上のフローが算出可能であることを、シミュレーション、実験で示した [10]。ただし、過渡時においては、条件によってはネットワーク上に新たな発電機を仮想的に設定する必要があるためさらに検討を要する。また、上記アルゴリズムを適用するためには、電力ネットワーク上の分岐点ごとに計測機器を敷設し、その電圧、電流等の計測データを、全ての測定点で共有する必要がある。その際に、配電システムを主体とするマイクログリッドでは、あらたな光ケーブルなどの敷設は望まれない。一方、電話回線などの通信回線は情報伝送には向いているが、実際の電力フローの経路とは異なる回線であり、その電力ネットワークの接続の有無にかかわらず情報のみがやり取りされる。この点で、電力のフローの保証をしているわけではない。このようなデータ通信手段が確保された場合上記アルゴリズムを実施することは可能であり、発電事業者と契約者間で物理的な実態としての電力のフローを算定することができ、損失分担などの再定義を可能とするものと考えられる。これらの点については今後の検討が必要である。

4. マイクログリッドによる同時同量制御の可能性の検討

NEDO のプロジェクトでも実施されているマイクログリッドに関する研究プロジェクトにおいて、京都府丹後京丹後市で実施されているマイクログリッドのプロジェクト [11] は、既存の電力システムの配電網上に仮想マイクログリッドを重ね、電力会社の電力供給に加え、マイクログリッドを構成する発電機およびその供給負荷が、仮想的に同時同量を実現する

というものである。

本研究では、負荷変動、発電電力変動、などを想定したシミュレーションモデルを構築し、通信、制御等の遅れをも考慮して同時同量システムの実現可能性を数値的に検討した。現実に京丹後市の公開されているシステム構成データに基づき、同時同量の実現可能性を検証した結果、仮想的マイクログリッド全体としては数分間内の同時同量は十分達成できることがわかった。しかしながらガス発電機の頻繁な出力制御を避けるためには、蓄電池の容量を上げることが避けられない。また、自然エネルギー発電の変動に対しては蓄電池による対応が必要となることが予想されるため、瞬時の応答を満たすために過剰な蓄電設備を必要とすることになり、マイクログリッドとして最適な条件を検討する必要があることが分かった。今後、実際の物理システムにおけるデータを用いてシミュレーション結果の検証を進めることができれば、仮想マイクログリッドが既存システムと連系するにあたっての最低限の構成および機能条件などが明確にできるものと考えられる。

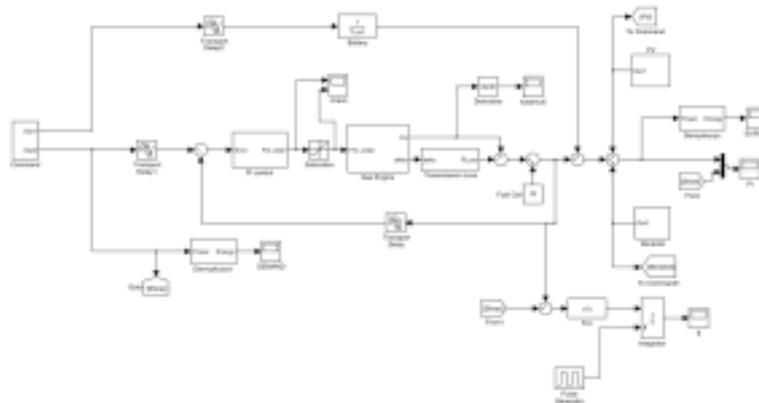


図 5 仮想的マイクログリッドの同時同量制御検証シミュレーションモデルの例 (MatLab)

また、仮想的マイクログリッドは総量としての同時同量のみを評価指標としているが、個々の発電機器と場内負荷、系統構成、環境変動などの影響を考慮すると、マイクログリッドが共用しているネットワークの個々の地点で、様々な安定性を保証したシステム運用が求められる。これについては、受動的なネットワーク構築の観点からさらに検討していく必要がある。

5. おわりに

本研究では、既存電力システムに分散電源の受動的マイクログリッドを構築するために必要な基礎技術について検討を行った。まず、既存システムと相補的に連系することを目的として、分散電源に同期能力を付加した連系技術について検討した。つぎに、発電機およびインバータが相互に同期したマイクログリッドの構築を前提として、発電機と負荷間のそれぞれの電力のフローを算定するアルゴリズムの適用を提案し、その妥当性を数値的および実験的に検証した。さらに、仮想的マイクログリッドにおいて同時同量を実現のための制御上の問題を抽出するためにシミュレーションを行った。これらの研究により、受動的マイクログリッド成立のための必要条件に関する基礎データが得られたものと考えられる。今後、さらにこれらの研究を発展させて行く予定である。

謝辞 本研究に関して，分散電源への同期機能向上に関する研究にご協力頂いた本学助教授 舟木剛先生，大学院生 澤田理君（現 JR 東海），電力授受算定アルゴリズムの検証にご協力頂いた大学院生 韓敬華さん，また，同時同量検証のためのモデル設定，数値検証にご協力頂いた，学部生 金子純君に この場を借りて謝意を表します．

参考文献

- [1] 横山明彦，新しい電力供給ネットワークシステムの動向，エネルギー・資源，Vol. 26, No. 5, pp. 7-10 (2005).
- [2] C.A.Desoer and E.S.Kuh, Basic Circuit Theory, Chap.19, (McGraw-Hill, 1969)
- [3] M.Takegaki and S.Arimoto, A new feedback method for dynamic control of manipulators, Trans. ASME, J. Dyn, Syst., Meas., Control, Vol. 103, pp.103-125 (1981).
- [4] R.Ortega, A.Loria, P.J.Nicklasson and H.Sira-Ramirez, Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems, (Springer, 1998).
- [5] 有本卓，ロボットの力学と制御，pp.88-90, (朝倉書店，2002).
- [6] 原田耕介，村田勝昭，太陽電池と商用電源のインターフェース回路，電子情報通信学会論文誌 C, Vol.69, No111, pp.1458-1455 (1986).
- [7] T.Sawada, T.Hikihara, and T.Funaki, PLL Based Self-synchronizing Linkage Inverters between Distributed Power Source and Power System (submitted).
- [8] T. Sawada and T. Hikihara, Pull-in Characteristics of Self-Synchronizing Linkage Inverter System between Distributed Power Source and Power System, 2005 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, SEC@BRUGES, Bruges, Belgium, October 18-21 (2005).
- [9] J.Bialek, Tracing the flow of electricity, IEE-Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.143, No.4. pp.313-320 (1996)
- [10] 韓敬華，引原隆士，ループ型電力ネットワークにおける電力配分算出法に関する一検討，平成 17 年電気関係学会関西支部連合大会，京都大学，2005 年 11 月 13 日．
- [11] 京都エコエネルギープロジェクト研究会，分散電源の系統連系に係る実証研究 5) 新エネルギー等地域集中実証研究 京都エコエネルギープロジェクト，エネルギー・資源，Vol.26, No. 5, pp.25-27 (2005).