

デジタルパワーローターとデジタルパワーコントローラで構成する 情報と電力の融合したデジタルグリッド

阿部力也

(注：2009年当時の論文原稿に注記を付けている。IEEE論文の和訳と思って読んでいただきたい。)

1. はじめに

近年、気候変動問題ならびに化石燃料高騰の影響を受け、風力発電・太陽光発電などに代表される再生可能エネルギー電源の導入が加速している。政府は、2020年には2,800万kW、2030年には5,300万kWの太陽光発電を導入する目標をたてているが、一方で、2009年7月の「低炭素電力供給システムに関する研究会報告書」において⁽¹⁾、現状の電力システムのままでは、太陽光発電は一定規模の出力抑制を採用しても、2020年度時点で1,300万kW程度しか導入できないと報告している。

これは配電網末端に設置された太陽光発電のもたらす逆潮流による系統電圧上昇が主たる制約要因となるためだが、太陽光発電の導入をさらに進めれば、余剰電力発生の問題や、周波数調整力不足の問題も顕在化してくる。^{(2) (3)}

さらに根源的な問題は太陽光発電や風力発電が、基本的に系統電源に対する同期化力を持たない上、変動が大きく、予測困難であるといった点にあり、従来型の基幹電力系統には受け入れにくい課題の多い電源であるといえる。

これらの課題を克服し、再生可能エネルギーを大量に導入するという目的のため、新しい電力供給システムの開発が急務であり、さまざまな検討がなされてきた。^{(4) (5) (6)}

一方で、スマートグリッド等の計画^{(7) (8)}により、電力消費サイドを中心に、デジタル情報網を使って電力の流れを双方向に把握し、効率的な電力系統運用を図ろうという計画が米国を中心に進んでいる。しかし、情報がデジタル化され、スマートに電力需給を制御しても、電力自体は同期回転機による連続的なアナログであるため、デジタル情報系が意図する通りに電力を融通することには困難が伴う。このため、再生可能エネルギー導入が増大している欧州では系統の各部をセル化して、セル内での需給バランスを強制するようなコンセプトも現れている。(デンマークの事例等)

また、新興国や開発途上国では、分散した非同期電力系統(以下分散グリッドと呼ぶ)が一般的であるが、これらの再生可能エネルギーの導入量拡大を促進すれば分散グリッドの周波数維持のため、電力貯蔵装置の導入が必至となる。し、これにより同期の維持が困難になった電力系統間を従

来の送配電電線路を含めたN:N接続し、お互いの自立継続に必要な電力貯蔵量を、選択的に融通し合う自励式電力デジタル変換方式について検討した。

これにより、情報も電力もデジタルとなり、電力線搬送を用いれば通信路と連系電線路も共通となるため、実質的に情報と電力が一体化した「デジタル電力」を作ることができる。

この目的を達成するための具体的な方法として、IP通信機能を持った「デジタルパワーローター」および「デジタルパワーコントローラ」といった新しいデバイスを考案した。

これらを用いて構成する「デジタルグリッド」の概念について以下に提案するものである。(注：現在は「デジタルグリッドローター：DGR」、「デジタルグリッドコントローラ：DGC」と称している。「デジタルグリッド」を含め商標登録済み。また、IPアドレスを使用する方法に代えて、ブロックチェーンによる秘密鍵と、公開鍵の組み合わせでセキュリティとアイデンティティを確保している。)

2. デジタルグリッドの特徴および効用

〈2・1〉 デジタルグリッドの特徴 本稿で提案するデジタルグリッドとは、お互いに周波数や位相が異なる多数のマイクログリッド間を、自励式電力変換器で構成する非同期連系装置と連系電線路で接続し、電力に関わる情報と電力そのものを、直接デジタル制御し、選択的融通を行う分散型の電力系統の概念であり、次のような特徴を有する。

- (1) マイクログリッドが、各種の分散型発電と負荷を持ち、さらに電力貯蔵装置により、太陽光や風力発電の変動を吸収して当該マイクログリッド内の周波数を一定の範囲内に維持し、個々に自立している。
- (2) 周波数や位相の異なる自立したマイクログリッド同士を、後述する多端子型非同期連系装置(デジタルパワーローター：DPR)という自励式電力変換器と連系電線路で接続し、電力を選択的に融通する。
- (3) マイクログリッド内部は、従来の同期系統であり、後述する外付けの電力機器制御端末装置(デジタルパワーコントローラ：DPC)を用いて発電機や電力貯蔵装置等の電力機器を制御し、情報を伝達する。
- (4) 情報伝送路に電力線を使用し、デジタル式電力線搬

送通信方式 (PLC) を採用して、DPR および DPC に、固有の IP アドレスを与えて IP 通信を行う。

〈2・2〉 デジタルグリッドの効用 このような構成のデジタルグリッドには、次のような効用がある。

- (1) 従来の電力系統では、ローカルな需給アンバランスを補償し、同期を維持するための電力潮流が常にその大きさ・方向を変えながら常に系統内を往来している。大量の再生可能エネルギーが電力系統に接続されると、その変動に伴い、潮流の変動もさらに大きくならざるを得ない。デジタルグリッドでは、この変動をそれぞれのマイクログリッド内の周波数の変動で吸収し、それぞれの周波数が異なったまま安定し、共存できるため、同期維持のための電力潮流が不要となる。また、潮流に伴う電力損失も低減される。この結果、再生可能エネルギーの導入が拡大してもデジタルグリッドの安定を維持できる。(再生可能エネルギーの大量導入)
- (2) 従来の電力系統では、送電ルートが事故などにより使用不能になると、下流の電力系統の停電や瞬低が発生する。デジタルグリッドでは、マイクログリッドの数の2乗に比例した電力融通ルートができるため、電力融通の冗長性が飛躍的に高まる。すなわち、いくつかのルートが使用できなくなっても他のルートを使って電力融通ができるようになる。この結果、デジタルグリッド全体の堅牢性が高まる。(グリッドの冗長性と堅牢性)
- (3) マイクログリッドが他との連系がない状態で自立する場合、需給アンバランスのボラティリティが高くなるため、余裕を大きめにとった電力貯蔵容量が必要となる。デジタルグリッドでは、複数マイクログリッド間で自在に電力融通できるので、全体で一つのマイクログリッドになったのと同じ状態になり、需給アンバランスのボラティリティを下げるができる。この結果、電力貯蔵設備を共有している状態になり、全体としての容量は、個々に単独設置するよりも低減できる。(電力貯蔵装置の共有)
- (4) 一つのマイクログリッドで、電力貯蔵装置の残量が少なくなり、周波数維持に支障が出ると判断されると、近隣のマイクログリッドに電力融通を依頼し、複数のマイクログリッドから複数のルートを通じて少しずつ電力融通を受けることができる。また、逆に電力貯蔵装置の残量が多い時に風力発電が立ち上がって来た場合、近隣の複数のマイクログリッドに少しずつ余剰電力を受け取ってもらうこともできる。この結果、個々のマイクログリッドや連系線の負担は小さくなる。(共同負担)
- (5) 従来の同期系統では需給バランスの確保のために、PPS などに対し、30 分同時同量の原則を課してきた。デジタルグリッドにおいては、個々のマイクログリッドが、非同期であるので、需給バランス調整のう

ち、短い周期を電力貯蔵装置が、長めの周期を化石燃料系の分散電源が負担するものの、負担しきれない部分は回転機の回転エネルギー吸放出、すなわち周波数の上下降で負担することが可能になる。従って電力融通のやり取りに際して、緊急性や、30 分同時同量などのしぼりが大幅に緩和され、後述の電力融通手順で述べるように、事前交渉・予約・確定・納品をベースとした商取引に馴染んだ取引形態が採用できる。これにより新しい電力取引ビジネスのプラットフォームが形成できる。(電力取引)

〈2・3〉 スマートグリッドとの違い 最近研究が進んでいるスマートグリッドは、デジタル情報化を進めて電力を区別しようとしている。特に消費側でどの負荷で消費された電力かを区別できるようにしようとしている。⁽⁷⁾しかし、電力そのものは同期回転機から連続的に作り出されるアナログ電力であり、情報をデジタルで高度化する計画⁽⁸⁾ではあるもの、どの発電機で作られたものかを識別することは物理的に困難である。

〈2・4〉 パケット電力との違い 情報通信と電力貯蔵をベースに電力流通制御を行う開放型電力ネットワークという概念がすでに知られており、電力ルータを使って荷札をつけたようなパケット電力という概念が紹介されている。

しかし、この電力ルータは BTB の流通制御に電力貯蔵を加えたものであり、パケット電力はあくまで実際に実現できるものではなく、概念であると断っている。^{(9) (10)}

〈2・5〉 電力クラスター また、マイクログリッドをネットワーク構成した電力クラスターを考案し、電力ルータを用いてクラスター間の電力のやりとりを行う、本稿に類似の提案もなされている。⁽¹¹⁾しかし、ここでも概念は紹介されているが具体的な回路構成はなく、情報の伝達は別構成となっている。

〈2・6〉 デジタル電力 一方、本提案のデジタルグリッドでは、概念ではなく、情報と電力が一体化した実体を持つ「電力」を作り、自在にグリッドの中を融通させることができる。

これは、デジタル情報を作る CPU が、デジタル PWM 信号も制御し、その信号によって IGBT 等の自励式電力変換器を動作させて任意の電力を作ることができるからである。

本稿では、この情報と一体化した電力を「デジタル電力」と呼ぶ。これは単なる概念ではなく実体を持っている。

一般的にはヘッダー情報とフッター情報に本体電力そのものが挟まれた形態をとることができる。PLC 通信の採用により、これらの情報と電力は、同じ電線路の上を連続して一体となって流れる。ヘッダー情報には、発信元や送付先のアドレス情報があるため、指定された DPR を経由しながら任意の送付先までデジタル電力を送ることができる。必要な融通量をいくつかの電力に分割し、別なヘッダーをつければ、異なるルートを経由させることもできる。

ヘッダー情報に、デジタル電力の大きさや継続時間などの電力プロファイルをデータとして含めて、フッター情報で、電力送信の終了を確認し、電力取引の証拠として記録することが可能になる。

3. デジタルグリッドの具体例

〈3・1〉 デジタルグリッドの具体例 Fig.1 は、本稿で提案するデジタルグリッドの概念を単線結線図で表したものである。図中の#1 から#4 までのマイクログリッドは、同期していない。それぞれが、再生可能エネルギーを大量に内包し、化石燃料系分散電源と電力貯蔵装置で需給バランスをとっている。マイクログリッド毎に、電源と負荷構成が異なるので、それぞれ周波数が異なり、周波数運用範囲も異なっている。それぞれに電力母線があり、その下に発電装置、電力貯蔵装置ならびに図示していないが一般需要家の負荷等の電力機器が接続されている。マイクログリッド間を接続する DPR は一点鎖線で囲まれた範囲で示されている。

DPR には遮断器、断路器、自励式電力変換器と、図中では省略したリアクトルおよび AC フィルターで構成される接続端子と遮断器、断路器のみで構成される接続端子がある。

マイクログリッド#1 から#4 に設置された DPR は連系電線路を介して相互に連系しあい、マイクログリッド#1 と#2 は、メイングリッドと表記された基幹電力系統とも接続している。

マイクログリッド#5 は、DPR 接続端子が直接単独の電力機器に接続されている例である。これにより電力貯蔵装置の充放電を制御したりできる。マイクログリッド#6 は、マイクログリッド#1 の中にある下位の電力階級で使用する例である。

DPR は、接続先のマイクログリッドの電力を直流に順変換したのち、直流並列母線を通じて、残りの接続端子群が接続しているマイクログリッドの電圧・位相・周波数に同期させて電力を逆変換して送出し、流入する電力と送出する電力の総和がゼロとなるよう電力制御する。

点線で囲まれた楕円はマイクログリッドで、その中は、従来型の同期系統である。自立したマイクログリッド内には、電力母線の下位に遮断器を介して、発電装置・電力貯蔵装置・図示されていない負荷等の電力機器がある。電力機器には電力の入出力を制御する電力制御部があり、そこに外部信号を伝える手段を有する DPC が、実線の四角形で図示されている。

DPC の各接続端子にも黒い長方形で図示された PLC ター

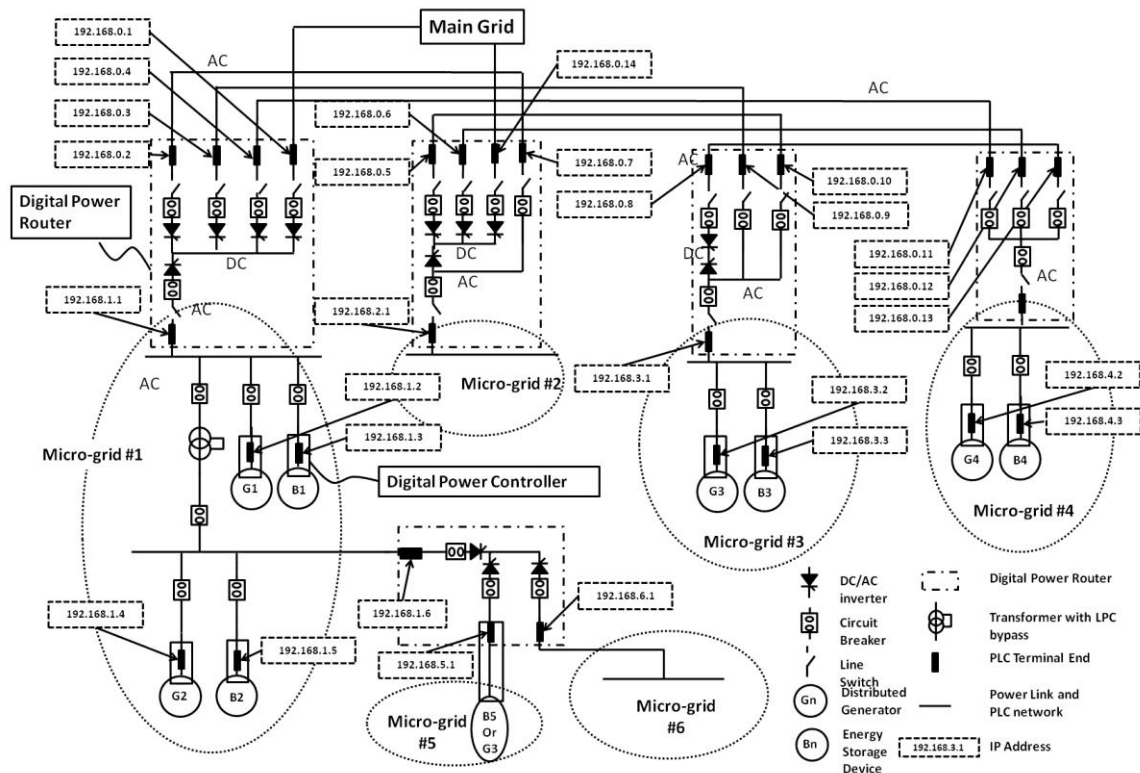


Fig.1 An Example of Digital Grid composed of Digital Power Router and Digital Power Controller

ミナルエンドが設置され、それぞれの IP アドレスが表示されている。

アドレス管理の方法としては、各 DPR に手でアドレスを与える方法と自動で与える方法がある。手動の場合、設備変更に伴いアドレス変更作業が生じる。自動の場合は、新しく設置されたり、電源が入ったりすると、装置側から自分の MAC アドレスを発信して、新しい IP アドレスの割り当てを要求することになる。この場合、アドレス変更作業などはすべて自動で行われるので、システム管理者の負担が小さい。

このように DPR の接続端子に通信用アドレスを与えて構成された WAN と、デジタルパワーコントローラに通信用アドレスを与えて構成された LAN は、DPR の接続端子を通じて通信的にも接続されているので、異なるマイクログリッド電力機器間や、複数マイクログリッド間での IP 通信が可能になる。

〈3・2〉 ルーティングテーブル Fig.2 は、Fig.1 で割り当てられている IP アドレスを用いたルーティングテーブルを示したものである。それぞれのデジタルパワー路由器から、目的のネットワークにたどりつくための Gateway の IP アドレスが記載されたテーブルになっており、これにより隣接する DPR が把握できる。

Address Table of Digital Power Router at MG #1		
Network	Subnet mask	Gateway
192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.0.7
192.168.3.0	255.255.255.0	192.168.0.9
192.168.4.0	255.255.255.0	192.168.0.11
192.168.5.0	255.255.255.0	192.168.1.6
192.168.6.0	255.255.255.0	192.168.1.6

Address Table of Digital Power Router at MG #4		
Network	Subnet mask	Gateway
192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.0.4
192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.0.6
192.168.3.0	255.255.255.0	192.168.0.8
192.168.5.0	255.255.255.0	192.168.0.4
192.168.6.0	255.255.255.0	192.168.0.4

Address Table of Digital Power Router at MG #2		
Network	Subnet mask	Gateway
192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.0.2
192.168.3.0	255.255.255.0	192.168.0.10
192.168.4.0	255.255.255.0	192.168.0.12
192.168.5.0	255.255.255.0	192.168.0.2
192.168.6.0	255.255.255.0	192.168.0.2

Address Table of Power Device #5		
Network	Subnet mask	Gateway
192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.3.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.4.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.5.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.6.0	255.255.255.0	192.168.6.1

Address Table of Digital Power Router at MG #3		
Network	Subnet mask	Gateway
192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.0.3
192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.0.5
192.168.4.0	255.255.255.0	192.168.0.13
192.168.5.0	255.255.255.0	192.168.0.3
192.168.6.0	255.255.255.0	192.168.0.3

Address Table of Digital Power Router at MG #6		
Network	Subnet mask	Gateway
192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.3.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.4.0	255.255.255.0	192.168.1.1
192.168.5.0	255.255.255.0	192.168.5.1

Fig.2. Routing Tables

〈3・3〉 融通手順の事例 マイクログリッド#1 の電力貯蔵装置 B1 の電池残量 SOC が少なくなり、マイクログリッドの自立に支障が出そうであると予測されたときの電力融通手順を示す。

(1) 電力貯蔵装置 B1 の DPC は自己の通信ポート 192.168.1.3 を通じて、まず、マイクログリッド#1 内の他の電力機器に、希望取引条件を付して、融通を打診するための一斉問い合わせ (Broad Casting) 信号を発信する。

(2) 対応できる発電装置の返信がマイクログリッド#1 内から得られなかった場合、次に Default Gateway であるマイ

クログリッド#1 上の DPR の 192.168.1.1 のポートに対して、同じ問い合わせを発信する。

(3) マイクログリッド#1 の DPR は、他のマイクログリッドの DPR の Gateway に対してその内容を一斉問い合わせ (Broad Casting) する。

(4) ここで、マイクログリッド#4 の DPR が電力融通できるとすると、192.168.0.11 の接続端子が、自分の IP アドレスと可能取引条件を、発信元であるマイクログリッド#1 の DPR のポート 192.168.0.3 と 192.168.1.1 を経由して、電力貯蔵装置 B1 の DPC 通信ポート 192.168.1.3 に返信する。その後、マイクログリッド#4 の DPR が、自己マイクログリッド内の電力機器に問い合わせを発信するなり、自己の自立機能の中で電力融通を実現する。

(5) マイクログリッド#4 の DPR が、自己マイクログリッド内の電力機器に問い合わせを発信し、発電装置 G4 が融通可能なら電力融通予約、電力融通確定、電力融通ルーティングのプロセスを経て、マイクログリッド#1 の電力貯蔵装置 B1 に、マイクログリッド#4 の発電装置 G4 が電力を供給する手続きが進められる。

また別な方法として、電力貯蔵装置 B4 に放電させ、別なタイミングで発電装置 G4 から補給したり、あるいは料金の安い時期に他のマイクログリッドから調達したりと多彩な選択肢があり、これらはマイクログリッド#4 の電力融通アルゴリズムに基づいて実施される。

4. DPR および DPC

〈4・1〉 DPR Fig.3 に図示したのが、DPR の構成図である。DPR は、電力を双方向に変換する自励式電力変換装置を有する電力変換器付き接続端子と、電力変換器が無く遮断機や断路器からのみ構成される接続端子の両方あるいはどちらか一方を有している。電力変換器のない端子は接続先で電力変換のある端子と対になる。これにより二重の電

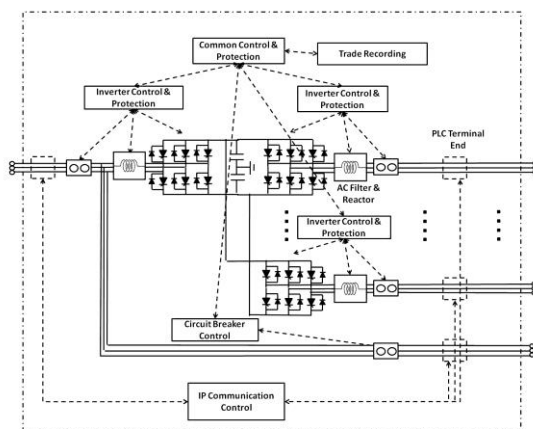


Fig.3 Digital Power Router

力変換を防ぐ仕組みとなっている。

電力変換を行う接続端子では、接続先のマイクログリッドの電力を直流に順変換したのち、残りの接続端子の接続

先のマイクログリッドの電圧・位相・周波数に同期させて電力を逆変換して送出し、流入する電力と送出する電力の総和がゼロとなるよう制御する。

自励式電力変換器の採用により、系統連系モードの場合、電力と位相を独立に制御できるため、任意の有効電力を任意の方向に送れるとともに、独立して任意の無効電力を任意の大きさで発生できるので、電圧の制御も可能となる。

また、自励式であるので、接続先電力系統が無電圧になった場合には、電圧源となって電力を供給することもできる。この点については、MATLAB/Simulink で、直流入力 3 端子並列電圧源出力を作成し、任意の周波数の交流ならびに直流送出を確認した。

Fig.4 に示すように DPR を配置することにより、任意の二つのマイクログリッドを接続する際の連系電線路も途中で分岐がなく、連系電線路のどちらか一端にのみ電力変換器がある非同期連系ネットワークが構築できる。

図からわかるように、DPR の作るリンクとその組み合わせによる電力融通ルートは N の 2 乗に比例して増える。 N 個のマイクログリッド間において、 N をノード数と見ると、その間を相互に結ぶリンクの数は、 $1/2N(N-1)$ 本となる。たとえば $N=5$ の場合、図に示すように 10 本の非同期電力融通リンクが生成される。このようにして、 $N=10$ の場合 45 本、 $N=20$ の場合 190 本のリンクができる。一つのマイクログリッドにデジタルパワールーターは複数置くことができるので理論的リンク数はさらに増やすことができる。逆に、一リンクあたりの電流負担や電力変換器の定格は、 N の 1/2 乗に比例して小さくなる。

Fig.5 に見られるように、このネットワークを従来の BTB 型連系装置で構成する場合 (A) は、必要な装置数は N の 2 乗のオーダーになるのに対し、DPR で構成した場合 (B) は N の 1 乗のオーダーになる。装置内の電力変換器の総数も電力融通時の変換回数も DPR のほうが少なくなる。

Fig.6 では 4 つの電力系統ノード a, b, c, d が 6 つのリンクで接続されているが、従来型の電力系統 (A) で電力潮流を流す時には、隣接する系統との電圧もしくは位相に差をつ

けることになり、図ではノード c に、ノード a, b, d から電力が流入することになる。

しかし、DPR を使用して連系している (B) では、ノード a とノード c の間の電力変換器だけを稼働させているので当然他の電力系統からの電力流入がない。また、自励式では任意の電圧・位相が作れるので任意の有効・無効電力が作れることになる。

このネットワークシステムでは、何らかの理由により複数のリンクが使用不可能になっても他のリンクを通じて電力を融通することができ、柔軟でかつ安定度の高いシステムを構築することができる。

〈4・2〉 DPC また、本稿では、自立したマイクログリッド内に設置される電力機器の電力制御装置に付加される DPC を考案した。これは、太陽光発電・風力発電等の比較的可変動の激しい電源の発電量を測定して外部通信回路を通じて情報を出したり、ディーゼル発電機やガスエンジン発電機等出力調整が容易な発電機に出力増減指令を伝えて制

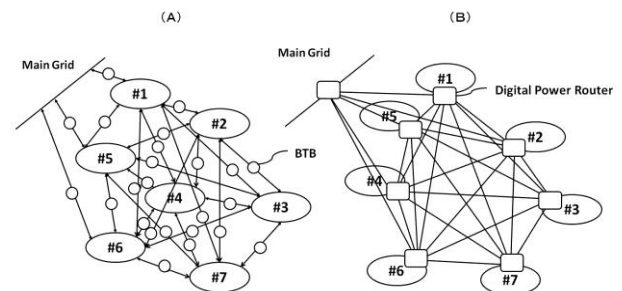


Fig.5. BTB (A) and Digital Power Router (B) interconnection

御したり、電力貯蔵装置の充電量 (state of charge : SOC) の情報を出したり、充放電量を制御したり、電力消費をする電力機器の情報を外部に出したりすることができるものである。

電力機器のアルゴリズムによっては電力融通に関わる情報を、予測しもって融通予約を行うことも可能である。

また、その時点の情報をもって一定時間後の電力融通予

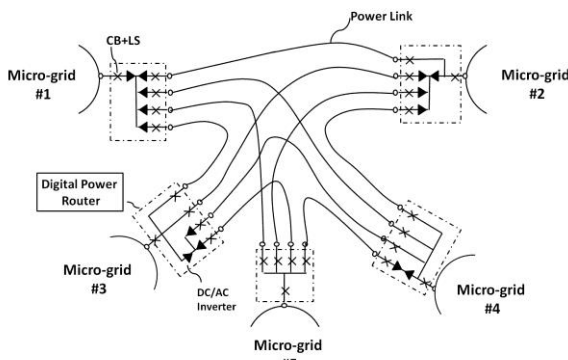


Fig.4. Digital Power Router interconnections

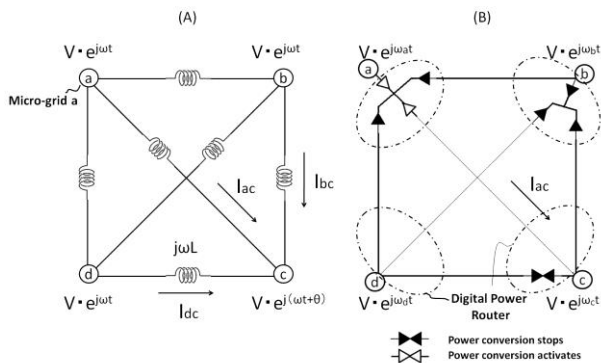


Fig.6. Ordinary grid and Digital Power Router interconnections

約をしておくこともマイクログリッド自立に有効な手段となる。マイクログリッドの特徴ごとに様々なアルゴリズムが考えられるが、一般的には電力貯蔵装置のSOCを50%前後に維持し、太陽光発電や風力発電の出力増加が予想されるときにはその出力を吸収するために50%より低めに、出力減少が予想されるときには電池より出力するために50%より高めに維持しておく予測制御が好適である。

5. LAN/WAN 型 IP 通信システム

Fig.7 は、2つのマイクログリッド間でのLAN/WAN概念を図示している。これに基づき、以下に電力線路を用いた通信ネットワークについて説明する。

〈5・1〉WAN 構成 まず、図中の DPR の接続端子に通信用 IP アドレスを与えて WAN を構成する。WAN の中にアドレスサーバーを置き、接続端子固有の MAC アドレス、割り当てられた IP アドレス、サブネットマスク、デフォルトゲートウェイ等を記述したアドレステーブルを保有すれば、DPR の接続端子アドレス管理を柔軟に行うことができる。

IP アドレスがあれば、DPR 間をルーティングする際のゲートウェイを記述したルーティングテーブルを、各 DPR の内部に置いて、相互に情報を交換し合って常に最新の状態に維持し、目的のマイクログリッドに到達するパスを知ることができる。

〈5・2〉LAN 構成 さらに、図中のマイクログリッド内の同期系統においても、DPC に通信用 IP アドレスを与えて LAN を構成する。DPC 固有の MAC アドレス、割り当てられた IP アドレス、サブネットマスク、デフォルトゲートウェイ等を記述したアドレステーブルを保有するアドレスサーバーを置けば、DPC に柔軟な動的 IP アドレスを持たせることができる。

IP アドレスがあれば、個々の DPC を特定できるため、その間で電力を融通したりするための情報をやり取りできる。このアドレスサーバーにより、LAN 中の電力機器の情報を一元管理することができる。

このサーバーはいろいろな所に置ける可能性があるが、そのマイクログリッドに設置された DPR の中におく方法が他のマイクログリッドとの連系上好適である。

〈5・3〉LAN/WAN 構成 これらにより、マイクログリッド内の電力機器の情報制御系と、マイクログリッド間の電力融通の情報制御系が、インターネットにおける LAN と WAN に類似の通信系統となって、柔軟な通信制御形態が構築できる。

デジタルグリッドでは個々のマイクログリッドの自立を前提としているため、通信系で重要なことは、高速性よりも堅牢性である。デジタルグリッドでは、N の 2 乗に比例した通信路ができるのでいずれかのルート障害が発生しても、他のルートから通信信号を送ることが可能になる。この点でデジタルグリッドの通信の冗長性は大きく、堅牢性が非常に高くなる。

Fig.7 は、2つのマイクログリッド間でのみの図になっているが、すべてのマイクログリッド内が個々の LAN となり、

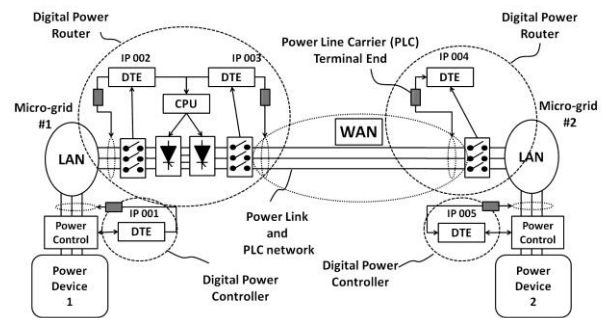


Fig.7. WAN/LAN IP communication system using PLC

すべてのマイクログリッド連系ネットワークが WAN となる。

デジタルグリッドの構成する LAN/WAN 上で、インターネットで標準化されている TCP/IP 通信プロトコルを使用することにより、誤り制御、順序制御、フロー制御、衝突回避などの標準化が可能となる。これにより、電力ネットワークシステムで、電力融通に関する通信が可能になり、マイクログリッド内での自立を優先しながら、必要に応じて、WAN を通じて他のマイクログリッドに電力融通を依頼する仕組みが構築できる。

〈5・4〉電力線搬送通信 (PLC) 外部との通信端局が、PLC である場合、電線路結合装置をもって連系電線路や配電網に通信信号を送り込める。これにより、電力を流す電力線路そのものが通信線路となるため、電力融通が可能なルートかどうかを自動的に確認することができる。

通信が出来ないルートは自動的にルーティングアルゴリズムから除外されるので無駄な確認手順が不要となる。こ

れにより、通信では正常に作動しているはずの機器が、実際には故障していて動かないというような通信制御の信頼性上の難問の一つを原理的に解決してくれる。

マイクログリッド内には、PLC 通信に適さない変圧器や遮断器・断路器・コンデンサー・リアクトル等がある上、接続されている他の機器のインピーダンスによっては通信信号の減衰が大きいため、部分的にバイパスを設けたり、増幅器を必要としたりする可能性はあるが、PLC を使うことには利点が多い。

66 k V系の送電線では、すでに 192kbps のデジタル式電力線搬送が実用化されている。一方、6.6kV や 440V および 220V 系の配電系統では、現在のところ 1,200bps 程度のかなり遅いアナログ式電力線搬送装置が実用化されているのみである。

家庭用ではすでに規制緩和が実現されているので、配電用でもニーズが高まれば規制緩和が行われ通信スピードが上がるものと思われる。最も電力融通予約程度であればこのスピードでも全く問題ない。

電力機器の供用開始・停止・更新・新增設・廃止などの変化に対し、PLC を採用していれば、電力機器の使用開始とともに、自動的に新しい IP アドレスを付加してくれるのでネットワーク技術者の負担が軽減される。

通信路は、光ケーブルやイーサネットなど外部データ通信路を使用しても上述したような電力融通は可能であるが、PLC を使用して通信路と電線路を物理的に同じものにすることは、電線路に合わせて新たな通信路施設する必要がなくなるうえ、線路の健全性の確認が自動的に行えるなど、複数のメリットがある。

6. デジタルグリッド上での電力融通手順

〈6・1〉 電力融通手順 デジタルグリッドにおける一般的な電力融通手順を以下に示す。

(1) 第一の電力融通要求段階：まず、いずれかの DPR または DPC が、他の装置および機器に対して一斉問い合わせを行い、候補者を見つける。

(2) 第二の電力融通要求段階：候補者に対してのみ電力融通予約し、予約確定を受け取る。

(3) 電力融通ルーティング段階：候補者から要求元までの最適なルーティングを決定する。

(第一の電力融通要求段階：Fig.8 参照)

電力融通要求元の発信する IP パケットは、発信元 IP アドレス・マルチキャスト IP アドレス・希望取引条件の情報を含むことを特徴とし、電力融通応答先が応信する IP パケットは、応信元 IP アドレス・返信先 IP アドレス・可能取引条件の情報を含む。希望取引条件には、希望する融通有効電力の方向と大きさ、無効電力の方向と大きさ、融通開始時間、融通終了時間、融通価格上下限、融通電力発生源の種別など様々なものが考えられる。このような希望を満たす電力機器があれば、それを可能取引条件として返信してくることになる。

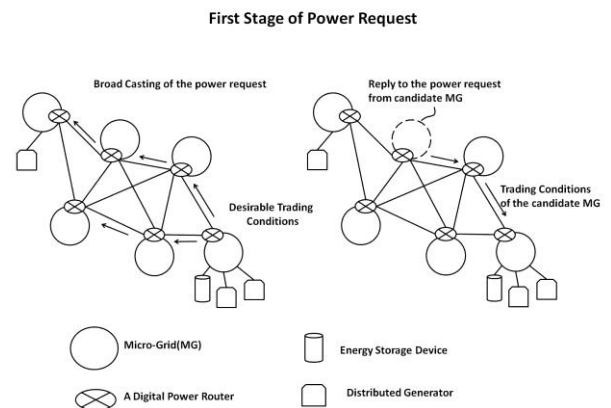


Fig.8. First stage of power request

(第二の電力融通要求段階：Fig.9 参照)

電力融通要求元の発信する IP パケットは、発信元 IP アドレス・受取先 IP アドレス・予約取引条件の情報を含むことを特徴とし、電力融通応答先が応信する IP パケットは、応信元 IP アドレス・返信先 IP アドレス・予約確定条件の情報を含む。予約取引条件には、予約番号、予約したい有効電力の方向と大きさ、無効電力の方向と大きさ、開始時間、終了時間、取引価格、電力発生源の種別などあらかじめ取り決めておいた情報からなり、予約を受けた電力機器は、予約確定条件として、予約確定番号、有効電力の方向と大きさ、無効電力の方向と大きさ、開始時間、終了時間、取引価格、電力発生源の種別などを鵜飼返しに返信することになる。

これらのプロセスは、数日前に行われることもあれば、数秒前に行われることもある。

(電力融通ルーティング段階：Fig.10 参照)

電力融通予約が確定すると、次にどのルートを使って電力を送るかが重要な課題となる。この様子を図示したのが Fig.10 である。ルーティングアルゴリズムは、電力融通相手先と電力融通プロファイルが決定したのち、(1) ルーティング経路の複数選定段階、(2) ルーティングプロファイル収集段階、(3) 電力融通ルート選定段階、(4) ルーティン

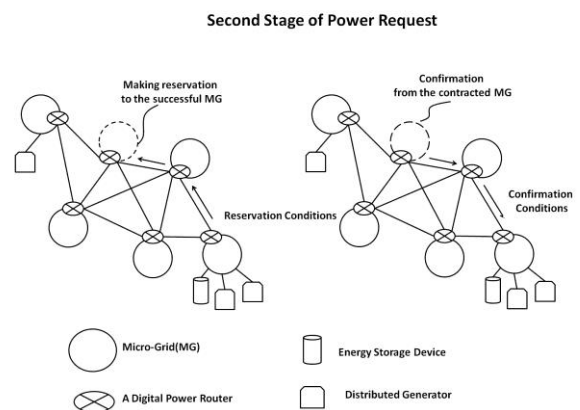


Fig.9. Second stage of power request

グ予約段階, (5) ルーティング確定段階, (6) 電力融通実施の監視段階, (7) 異常事態における緊急ルーティング方法などの段階に分かれる。

あるノードから別のノードへ、一定の電力を流す場合、複数のリンクをつなげば選択できるルートはさらに多数生まれる。このうち最適なものをつだけ選択する方法もある

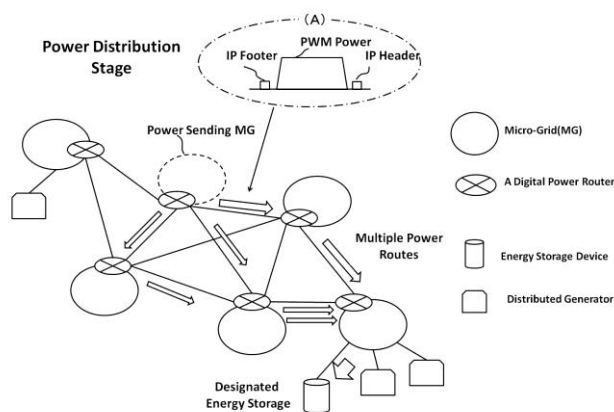


Fig.10. Power distribution stage

が、複数のルートを同時に使用して電力を分散して流すことで、それぞれのルートを通る電力は少なくて済むようになる。また、複数のノードが複数の電力融通を要求している場合、適切なルートを組み合わせたり、融通タイミングを調整したりすることにより、電力の潮流を相殺することが可能になる。従って電力変換器や連系電線路での電力損失の総和が最小となるようなルーティング選定アルゴリズムが重要になる。

電力融通要求が複数ある場合、基幹電力系統からの融通も含めてどのルートを使うと全体の電力ロスが少なくて済むか、物理的な制約はないか、取引価格情報も含めると膨大な選択肢が生じる。電力ロスを価格情報に含めて経済性を重視し、物理制約条件下での最適化問題を解くことでルーティング問題を解決できる。

〈6・2〉 情報と電力の融合 Fig.10 上部に示した (A) の融通電力は、その前および後、あるいはいずれか一方に、発信元 IP アドレス、受取先 IP アドレス、取引条件等の情報を含む IP パケットを有している。図中では IP header, IP footer と表現している。DPR により、IP header がデジタルに作られ、次いで融通電力が PWM 変換によりデジタルに作られ、最後に IP footer がデジタルに作られ、同一電線路により伝送される。電力は交流フィルタとリアクトルで平滑化されるが、情報はこれらをバイパスする仕組みとなる。

このヘッダー情報とフッター情報は、適切なバイパススイッチを用いれば、IGBT や MOSFET などの電力変換器そのもので信号を作り出すことができる。中央演算処理装置 (CPU) またはデジタルシグナルプロセッサ (DSP) の信号を、直接 PLC 信号生成装置の入力とすることもできる。

電力貯蔵装置のおかげで電力融通の同時同量のしぼりは

緩和されるため、融通電力をパケットに分割して別ルートで送電したり時間をずらして送電したりするなどの運用も可能になる。連系電線路の容量が足りないケースが発生した時は、融通電力をいくつかに分割して別な連系電線ルートに迂回するなどの応用が可能となる。

このデジタル電力の持つ IP 情報は、予約情報との照合、電力授受の記録、ルート変更の記録、緊急融通等電力取引の記録等、多彩な用途に使用できるため、電力取引の形態に大きな変化をもたらすものと思われる。

IP 情報も、PWM 信号も、デジタルパワールーターの CPU により、デジタルに時系列的に作り出されるので、ヘッダー情報に含まれている、送り込まれる電力の時系列プロファイルを読み取り、受電開始のタイミングを同期させることが可能となる。終了に関してもフッター情報に含まれるため、同期が可能である。

すなわち、デジタル電力は、従来のアナログ電力と異なり、情報と電力がデジタルに融合し、個々の電力を物理的に識別可能にする新しい電力形態であると言える。これは今まで述べてきたデジタルグリッド上で可能になる。

7. あとがき

従来、電力と情報の融合という概念はあったが、同期系統の中では、電力を個々に識別することができないという技術的困難を伴っていた。

本稿提案のデジタルグリッドは、上述したような DPR や DPC を使用することで、電力に情報を付加し、電力の識別が可能になる。このことは従来の電力システムに大きな変革をもたらす可能性がある。

デジタルグリッドは、既存の電力系統を補完するものであって、産業用や基幹業務系の電力は、原子力・火力・水力で構成される周波数の安定した信頼性の高い電源から供給されなければならない。デジタルグリッドの対象はある程度の周波数変動を許す需要家である。

また再生可能エネルギーを大量に受け入れたデジタルグリッドは、全国規模の風況や日照の変化については、電力貯蔵量や分散電源規模にもよるが、大なり小なり基幹電力系統からのバックアップが必要であり、基幹系統との共存が不可欠である。

デジタルグリッドへの移行ステップは、既存の変電所や変電設備以下の電力系統の主要な電力機器にのみ DPC を導入して、その他は現状を維持しつつ、自立したマイクログリッドとし、変電所間を接続する従来の送電線と変電所母線との間に DPR を設置して、他のマイクログリッドや基幹電力系統と非同期連系していくという手順になり、必ずしも無理のあるものではないと思われる。本稿提案について、関係者の研究が進むことを心より願うものである。

文 献

- (1) 「低炭素電力供給システムに関する研究会報告書 (3)」経済産業省 2009.7, pp19/27
- (2) Toshiya Nanahara: "Capacity Requirement for Battery Installed at a Wind Farm", IEEJ Trans. PE, Vol. 129 (2009) No. 5, pp.645-652
七原俊也: 「風力発電に併設する蓄電池の所要容量に関する検討」, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 129 (2009) No. 5, pp.645-652
- (3) Takae Shimada, Norihiro Kawasaki, Yuzuru Ueda, Hiroyuki Sugihara, Kosuke Kurokawa: "Study on Battery Capacity for Grid-connection Power Planning with Forecasts in Clustered Photovoltaic Systems", IEEJ Trans. PE, Vol. 129 (2009) No. 5, pp.696-704
嶋田尊衛, 川崎憲広, 植田 譲, 杉原裕征, 黒川浩助: 「集中連系型太陽光発電システムにおける翌日連系点電力の計画・制御を可能とする蓄電池容量の検討」, 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 129 (2009) No. 5, pp.696-704
- (4) 横山明彦, 平井崇夫, 小林広武他: 「特集: 新たな電力供給システムの動向と将来展望 1-5」, 電学誌, 125 巻, 3 号 (2005), pp145-164
- (5) Yasuhiro Hayashi, Shoji Kawasaki, Junpei Baba, Akihiko Yokoyama, et.al., "Active Coordinated Operation of Distribution Network System for Many Connections of Distributed Generators", IEEJ Trans. PE, Vol.127(2007), No.1 pp.41-52
林 康弘, 川崎章司, 馬場旬平, 横山明彦他: 「分散型電源の導入拡大に対応した配電系統の協調運用形態」 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol. 127 (2007) No. 1, pp.41-52
- (6) Akira Shiki, Akihiko Yokoyama, Junpei Baba, Tomohiro Takano, Tadahiro Goda, Yoshio Izu, "Autonomous Decentralized Control of Supply and Demand by Inverter Based Distributed Generations in Isolated Microgrid", IEEJ Trans. PE, Vol.127(2007), No.1 pp.95-103
志岐 明, 横山明彦, 馬場旬平, 高野富裕, 合田忠弘, 泉井良夫: 「単独マイクログリッドにおけるインバータを用いた分散型電源群による自立分散型需給制御」 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌), Vol.127(2007), No.1 pp.95-103
- (7) Hiroshi Suzuki, "Advanced Metering Infrastructure based on Smart Meters", IEEJ, Vol.127(2007), No.9 pp.977-980
鈴木 浩: 「スマートメータを用いた電力流通インフラの海外動向」 電気学会誌, Vol.127(2007), No.9 pp.977-980
- (8) Gary Locke (US DOE), Patrick D. Gallagher (National Institute of Standard and Technology): "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards Release 1.0 (Draft)", September, 2009
- (9) Hiromi Saitoh, Junichi Toyoda, "A New Concept of Electric Power Network for the Effective Transportation of Small Power of Dispersed Generation Plants", T. IEEJ, Vol.115-B (1995), No.6 pp.568-575
斎藤浩海, 豊田純一: 「分散型電源群の微小発生電力を効果的に輸送する将来の新しい電力ネットワーク」 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌) Vol.115-B (1995), No.6 pp.568-575
- (10) Hiromi Saitoh, Satoshi Miyamori, Toru Shimada, Junichi Toyoda, "A Study on Autonomous Decentralized Control Mechanism of Power Flow in Open Electric Energy Network", T. IEEJ, Vol.117-B (1997), No.1 pp.10-18
斎藤浩海, 宮森 敏, 島田 亘, 豊田純一: 「開放型電力ネットワークにおける自立分散的電力流通を実現する機構の基礎検討」 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌) Vol.117-B (1997), No.1 pp.10-18
- (11) Yoshihiko Matsumoto, Satoru Manabu, "A Vision of the Electric Power System Architecture Aiming for Our New Generation", IEEJ, Trans. PE, Vol. 123 (2003) No.12, pp1436-1441
松本吉彦, 柳父 悟: 「新世代に向けた電力システム構造のビジョン」 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌) Vol. 123 (2003) No.12, pp1436-1441

阿部 力也 (正員) 1953 年 9 月 12 日生。1977 年 3 月東京大学工学部電子工学科卒業。同年 4 月電源開発株式会社入社。2001 年 3 月九州大学大学院論文博士 (工学)。2008 年 6 月より東京大学に出向。現在東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻特任教授。主として自然エネルギー導入政策評価, マイクログリッド研究, 二次電池が作る社会システムイノベーションフォーラムメンバー, アドバンテッジパートナーズ社会戦略投資学寄付講座担当

(注: 上記は当時、2018 年より「デジタルグリッド」株式会社、代表取締役会長 CEO & CTO)