

# スマートグリッドとその問題点

青木 秀憲<sup>\*1</sup>

## Smart Grid and Problems

by

Hidenori AOKI<sup>\*1</sup>

(Received on Nov. 16, 2011)

### Abstract

Supplying electric power stably, safely and efficiently is essential. Fossil fuels have filled this essential need, but burning them creates carbon dioxide and causes global warming. Solutions have been researched in many countries such as energy from wind and solar power, but using renewable energy presents other issues. This paper presents these issues and introduces the smart grid, which is one of the best technologies to solve them. The smart grid will be a great help to create a low-carbon society and is being researched and developed highly in many countries.

Keywords: Smart grid, Low-carbon society, Photovoltaic power generation, Surplus power

### 1. まえがき

3月11日の東日本大震災とその津波の影響により多くの発電所が停止し、東京電力をはじめいくつかの電力会社では計画停電や節電の実施が余儀なくされる深刻な電力不足に陥っている。電力の供給力を増すために化石燃料を用いる火力発電を中心とした増強が進められているが、燃料費が嵩むほか、昨今の地球温暖化防止対策に対しては温室効果ガスを排出することになるので環境の悪化を招く恐れがある。現在、世界各国では低炭素社会の構築を目指し、化石燃料の使用を減らしていこうという機運が高まっている。そのため、地球温暖化防止対策として再生可能エネルギーを用いた技術革新やコスト削減が期待されている。すなわち、スマートグリッド導入の狙いは、こうした現状の電力供給に関連した問題点への対処と今後のより優れた電力インフラを構築し、実現することを目指したものである。

本論文では、スマートグリッドが今日のように注目された歴史、スマートグリッドのアウトライン、国によって異なるスマートグリッドへの取り組みの違い、日本型スマートグリッドの基本概念、日本の再生可能エネルギーと電気自動車の現状と促進状況などについて記述している。最後に、太陽光発電などの再生可能エネルギーの電力系統への大量導入は、これまでの系統に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、まず本稿ではそれらの問題点について詳細に説明する。次に、それぞれの問題点への対応策についても同時に言及し、これからのスマートグリッドに必要な系統側と

\*1 工学部電気電子工学科 教授

需要家側で実施されることになる制御についても記述している。これらを通してスマートグリッドによる新しいライフスタイルの社会を想像していただければと思います。

### 2. スマートグリッドへの取り組み

スマートグリッドという言葉が急激に一般に広がったのは、アメリカのオバマ大統領が2008年の大統領選挙でスマートグリッドを政策の優先項目に取り入れ、就任後に景気対策法に組み込んだためと言われている。アメリカでは、1990年以降、電力需要が25%増加したにもかかわらず、日本とは異なり、大規模と小規模の電力会社が併存(3100社以上)しているだけでなく発電、送配電、小売りが分離されており、需要の伸びに対して電力系統への投資が進まない状況となっていた。そのため、アメリカの送配電網は老朽化し、送配電ロスも高くなっている。また、停電や供給電力の品質悪化による経済的悪影響は膨大な金額に上るものと試算されていた。このように先進国であるアメリカでさえも電力供給に関する問題点について、何らかの対策を立てる必要に迫られていたのである。この状況に対して、オバマ政権はスマートグリッド分野などへの公共投資を行い、産業界に新しいビジネスを誕生させ、約4万3,000人の雇用創出効果を見込み、環境関連産業を将来のアメリカ経済を牽引する一つの柱として、発表して以来、世界的に注目されるようになった。

### 3. スマートグリッドとは

スマートグリッドとは、図1に示すように従来から電力

系統内にある集中型電源（水力・火力・原子力発電など）や送配電ネットワークおよび温暖化ガス削減のための再生可能エネルギーである分散型電源（太陽光・風力発電など）を管理・運用し、需要家（オフィス、工場、一般家庭など）に効率よく供給するシステムを構築することである。そのために、最新のデジタル情報技術を活用し、双方向通信と制御技術により系統内の情報を統合・活用し、高効率、高品質、高信頼度の電力供給ネットワークシステムの実現を目指すものである。すなわち、電力技術と情報技術を統合したものと定義されている。これにより、スマートグリッドのネットワークでは、電気の流れを監視・管理するだけでなく、発電設備と需要家との間で電気と情報を双方向で流すことによって発電と送配電の効率を上げて無駄を少なくし、電力供給の信頼性を向上させ、さらには需要家側の電気機器の使用状況を把握し、これら装置の情報を積極的に利用し、配電系統の運用制御を効率良くすることによって負荷の軽減と安定を図ることになる。これは、これまでシステムの運用・管理にほとんど参加しなかった需要家が、オンデマンドによる電力供給を受けるのではなく、電力供給システムにおいてアクティブな役割を果たすことになる。このような双方向の通信機能を持つデジタルメータとしてスマートメータが適用されることになる。この装置は、オフィス、工場さらには一般家庭などに設置する電力計であり、電力会社と送配電網を介して需要家の消費電力情報をリアルタイムに把握し、再生可能エネルギー電源の発電調整を行うことが可能となる。

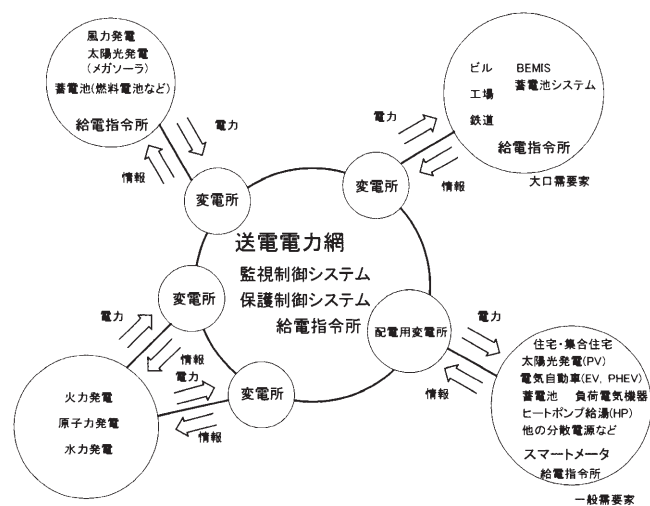


Fig. 1. Example of Smart Grid

#### 4. 日米欧のスマートグリッドへの取り組みの違いについて

第2章に記述したようにアメリカにおける電力事業は日本と比べはるかに劣った状態にある。そのため、アメリカの電力会社はスマートグリッドを導入することによ

り、最新のデジタル情報技術を活用した電力系統の信頼性向上を図る狙いがある。さらに、スマートメータの導入により電力料金の回収率向上や負荷平準化の実現を目的としている。

Table 1. Ratio of Wind Power Generation by EU (2009)

1	デンマーク	24.9%	9	イギリス	3.3
2	スペイン	15.3	10	イタリア	3.2
3	アイルランド	13.0	11	オーストリア	3.1
4	ポルトガル	11.4	12	スウェーデン	2.5
5	ドイツ	8.6	13	フランス	2.2
6	ギリシャ	4.8	14	リトアニア	2.0
7	オランダ	4.5		EUの平均	5.3
8	エストニア	4.1		日本	0.3

一方、ヨーロッパ諸国は日本のように2種類の周波数を持つ国ではなく、周波数が統一されていることから各国の国際連系線が接続された大容量系統が構成されている。現在は、多くの原子力発電所を持つフランスが大輸出国であり、イタリアは大輸入国となっている。ヨーロッパ諸国では、これまで電力会社に自然エネルギーを高値で買い取らせることで、普及を促してきた。そのため、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーによる発電は、既に多く導入されている。表1は、EU主要国の消費電力に占める風力発電の割合(2009年)を示したものであり、西ヨーロッパで多く導入されていることがわかる。特に、デンマークが熱心であり、風力発電で総電力消費量の約25%を賅っている。今年の2月には洋上風力発電所を増設するなどして2050年までには化石燃料への依存率を零にする目標が打ち出されている。これを実現するために、デンマークの買取制度は風力や太陽光で発電した電力を、電力市場での流通価格に一定の奨励金を上乗せして電力会社が買い取る仕組みとなっている。しかし、風力発電は風速の変化によって、太陽光発電は天候によって発電電力は左右されることになる。このように変動する再生可能エネルギーの電力系統への導入は、現在は送電線でつながった近隣諸国からの電力購入に支えられている。しかし、この発電出力の変動は、将来的には電力系統に大きな影響を与えることになる。そのため、ヨーロッパのスマートグリッド導入の狙いは、最新のデジタル情報技術を活用することにより、需要制御や電力貯蔵（蓄電池、電気自動車など）を行うことで供給変動を吸収し、地球温暖化緩和効果に有効とされる再生可能エネルギーと電気自動車の大量導入を実現することにある。フランスでは、2009年秋に再生可能エネルギーを電力網に効率よく組み込むためのスマートグリッド計画を発表している。イギリスも2020年までにスマートメータを国内全2,600万世帯に取り付ける計画となっている。また、このようなスマートグリッドの導入は、インターネット企業にとっては電力の利用情報を活用した新たなサービスが

可能となる「次のインターネット」と考えている会社もある。さらに、電力会社にとっては電気自動車が必要・供給の変動を抑え、路上で充電するなど新たなインフラとして捉えている会社もある。このように、欧米の企業は景気低迷と政府の経済対策を好機と見て、次のビジネスにつながるインフラ投資を積極的に推進しようとする状況にある。

日本では、3月11日に発生した大地震と津波により影響で深刻な電力不足に陥っているが、諸外国に比べれば電力供給の信頼度は世界最高水準にあると言われている。すでに、送電ネットワークには情報通信ネットワークを活用した監視と自動的な制御システムが導入されており、配電ネットワークには停電範囲を最小化する自動化技術が導入されている。これにより日本の電力システムではスマート化がかなり進んでいることになる。さらには、世界で最も停電回数の少ない、電力の安定供給が実現されている。このような状況にある日本でスマートグリッドのような考え方が指摘されたのは2000年頃と言われている。これは、電力自由化やCO<sub>2</sub>削減が提唱され、分散電源を電力システムに連系したいという要望が増えたためである。これら太陽光発電、風力発電は本来、配電システムに導入されることになるが、送電システムと比較し、容量の少ない配電システムでは電気事業法に、違反する現象が発生する可能性がある。それにどう対応するかという問題が生じることになる。これらをどのように電力システムと調和させるかが、重要な課題となっている。日本の狙いは、①地球温暖化の防止（CO<sub>2</sub>の排出削減：2020年に25%（1990年比））、②新エネルギー（再生可能エネルギー）等の導入による低炭素社会の実現、③環境技術の開発による事業者、消費者双方の社会的利便性が提案されている。これらを達成するために、分散型電源や電気自動車などの積極的な活用、従来からの電力システムと分散型電源との万全な協調、最新のデジタル情報技術の活用、不確定要素に対応できる電力システムの構築などが必要となっている。

### 5. 日本型スマートグリッドの基本概念

日本型スマートグリッドとは、これまでのように全国に電力を安定に供給することである。これをさらに効果的なものとするためには、基本的には既存の系統電源とローカル地域で生産・消費される分散電源との協調によって電力システムが構成されるべきであり、送電ネットワークへ最新の情報通信技術を一層活用する必要がある。これらの基盤により、発電と送配電の効率を上げ、無駄をなくしたこれまで以上の電力インフラの信頼性を向上させることになる。さらに、オフィスや家庭内にある電気機器の使用効率を改善することにより電力インフラに対する負荷の軽減と安定性が実現されることになる。具体的には、スマートグリッドの対象となる電源として大規模電源（火力・水力・原子力発電など）、再生可能エネルギー（太陽光・風力・バイオマス発電など）、蓄電池、電気自動車、燃料電池、ヒートポンプ給湯機などが上げられ、これらが種類や量を問わず基幹系統、配電系統、ネットワークの中央/末端、電圧階

級などを選ばずに、どこにでも接続される状態が構築され、出力調整が行われる。これらの情報を得るために、情報通信技術により電気事業者と消費者が相互に作用することができる電源・電気機器の双方向情報通信ネットワークが形成されることになる。その際、再生可能エネルギーにある日射量や風量変動などの自然現象の影響（不確定要素）を受けにくくするために蓄電装置や電気自動車の充放電状態の把握などの協調制御が重要な役割を果たすことから、これらの技術を開発する必要性がさらに増すことになる。

### 6. 日本の再生可能エネルギーと電気自動車の現状と促進

永続的に使えるエネルギーには自然エネルギーと生ゴミ、排熱などを利用するリサイクルエネルギー、用水路に水車を取り付けた小規模水力発電、さらには植物から作ったバイオマス燃料（バイオマス）などがある。風力発電は2009年度末で10kW以上の風車が1683基あり、総出力が218万6000kWとなっている。その発電単価は9~14円と石油並みとなっているが、風量により発電が不安定であり、発電量を増加するにはブレード（翼）部分を大きくする必要があるので騒音問題を生じることになる。また、敷地面積も広くなり設置地域に限られることになる。水力発電も2009年度で年間発電電力量の8%を賅っているが「脱ダム」が喧伝されていることから大規模・中規模な新規建設は困難となっている。地熱発電は火山地帯の地下1~3kmまで掘って高温の蒸気を利用するので火山国日本では立地可能な地点は国内に多く存在するが、国立公園内や温泉地などにより新規建設は限られてしまうことになる。また、木材や廃材を用いるバイオマス発電は北欧諸国などでは利用が進んでいるが日本での進展の兆候はほとんど見られていない。現在、大規模水力発電を除く再生可能エネルギーによる総出力は、2009年度の国内発電量9551億kWに占める割合の1%程度となっている。そのうち、日本の太陽光発電による現在の発電単価は高く（49円/kWh）、日射量によっても発電が不安定であり、年間利用率も12%程度となっている。しかし、今後技術開発が進み、発電単価の低下

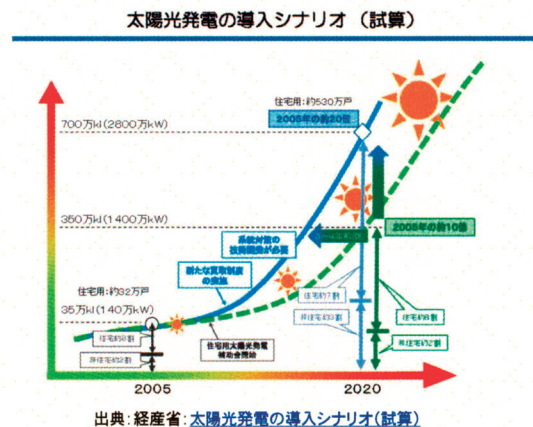


Fig. 2. Introduction Scenario of Photovoltaic Power Generation

が見込めること（2020年：14円/kWh、2030年：7円/kWhを予定）や個人でも設置可能であることから、身近な存在として国民に捉えられているため、日本では太陽光発電が大量に導入されるシナリオが政府から示されている。図2に示すように、2020年までに約530万世帯2800万kW、さらに2030年には5300万kWの普及を目指すことが政府から示されている。また、2009年11月からは家庭で余った電力を電力会社が買い取る制度が始まっており、1kW時当たり48円、2011年度からは42円となっている。

さらに、再生可能エネルギーの普及促進を図るために再生可能エネルギー特措法案が閣議で決定され、11年8月26日に参院本会議で可決、成立している。これは2012年度から、企業が設置した太陽光・風力・地熱・バイオマスなどの発電の全量を買取り、家庭における太陽光発電のうち、使い切れなかった余剰電力分を対象に買い取る内容となっている。この場合、電力会社は一定価格で15～20年間（住宅の太陽光は10年間）にわたって電力を買い取らなければならない。そのため、個人や企業にとっては発電設備の設置費用を回収しやすい制度となっている。しかも、買い取り価格は現在の価格を軸に当初は高めに設定されることになっている。（その後、徐々に下がる方針も示されている。）しかしながら、買い取り費用は電気料金に上乗せされるため、企業や家庭に求める負担の公平さをどのように実現するかの課題がある。また、特措法には電力の円滑な供給に支障が生じる恐れがある場合（例えば、不安定な電力供給源が増える状態）、電力会社が再生可能エネルギーの受け入れを制限できる規定が盛り込まれている。現在、10電力会社のうち、東京、中部、関西電力を除く7社が風力発電の受け入れ枠を設けており、再生可能エネルギーの普及促進に対する問題点として指摘されている。

このように再生可能エネルギーの普及とそれに対する課題は多く残されているが、地球温暖化に対する低炭素社会の実現に向けて電力業界（電気事業者）では、2020年度までに電力10社合計で約30地点・約14万kWのメガソーラー発電を導入する計画が進められている。これによる年間発電量は、約4万軒分の家庭使用量に相当することになる。そして、約7万トンのCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献することになり、将来的に多めに期待されている。

これら太陽光発電の大量導入に向けてシステムの安定化を図る対策の1つとして電気自動車の導入計画が進められている。電気自動車はCO<sub>2</sub>排出量が少なく、排気ガスがなく、騒音が小さいなどで都市環境の改善に役立ち、燃料費が安い（ガソリン車の1/4～1/10程度）などの利点がある。これを活用する日本型スマートグリッドを積極的に進めるために太陽光出力データの蓄積・分析が全国320箇所で収集されている。これらの解析に基づいて太陽光出力の予測システム技術が開発され、頻繁な充放電制御に耐える高性能蓄電池システムの開発が現在、進められている。電力業界では、2020年度までに電力10社合計で約1万台の電気自動車（プラグイン・ハイブリッド車を含む）を業務用車両とし

て導入する計画となっている。仮に日本のすべての軽自動車に電気自動車に置き換わった場合、約2500万t-CO<sub>2</sub>/年のCO<sub>2</sub>制御効果が見込まれ、これは日本のCO<sub>2</sub>排出量の約2%に相当する。現在、自家用自動車のほとんどが常時使われているのではなく、通常95%以上の時間帯で駐車場などに置かれたまま使用されていないといわれている。そこで、駐車中は使われていない電気自動車を有効活用し、電力システムに効果的に取り入れ、天候などに左右される太陽光発電による出力を平滑化し、システムの安定化に寄与する1つの手段として導入が考えられている。

## 7. 太陽光発電などの再生可能エネルギーが大量に導入された場合の課題と対応

第5、6章でも述べたように太陽光発電や風力発電は日射量や風量によって作用される不安定電力供給電源である。そのため必要なときに出力されるものではないので、その発電出力を制御することは、極めて困難な電源となる。現在のように参入規模が小さい場合には、ネットワークで吸収でき、問題はないと思われるが、今後大量に分散型電源が導入されると様々な問題が発生することになる。例えば、風力発電の電力需給を考えた場合、風量によって太陽光発電と異なり夜も稼働することになる。そのため夜間のように電力需要が少ないときに働く風力発電は、余剰電力を発生する可能性があり、周波数安定上問題になる場合がある。また、風力発電は6,600V以上からの上位システムに対して接続されることや設置箇所も限られることから、日本における風力発電は2020年度までには現在の2.5倍程度に増える見通しとなっている。これに対して、2020年度の太陽光発電は現在の7.5倍程度まで増えることが見込まれている。そのため、本稿では取り扱う内容を日本において大量導入が予想されている太陽光発電について主に言及する。太陽光発電は、太陽電池を一般家庭に設置することが主流となるため電気を送る配電線の末端に接続される小規模電源となる。そのため、大量に導入された場合には多数の電源となり、個別に制御することは事実上困難となる。さらに、電力システムにある発電所や変電所での事故等によりシステムに故障が発生した場合、電圧変動の影響により末端にある太陽光発電システムのパワーコンディショナに伝わり、この装置が数秒間停止することによりシステムが一斉解列し、太陽光発電の電源が同時に脱落し、発電を停止する可能性がある。この場合、電力システムにおける電気の供給量が需要量を満たせなくなり、電力供給のバランスが崩れ、安定的な電力供給が困難となる。このように自然変動する発電（太陽光、風力など）では、①電圧の問題、②周波数の問題、③余剰電力の問題（需給バランス）が生じることになる。

①では図3に示すように電力は、配電用変電所から高圧配電線（配電用フィーダ）を通して送り出され、その途中の柱状変圧器で、100Vまたは200V程度に降圧され

て低圧配電線で送り届けられることになる。通常は、これに基づいて一方向で一般家庭に供給されることになる。しかし、太陽光発電設備がシステムの末端に大量に導入された場合、家庭から配電用変電所に向かって電気が流れることになる。このように太陽光発電によって電力が逆に流れることを「逆潮流」と呼んでいる。この場合、配電線の末端の方で電圧が上昇することになる。電気事業法では、配電システムの電圧を 95 V～107 V 以内に抑制することが求められており、これを超えてしまうと配電ネットワークに接続されている電気機器に様々な障害（例えば、発熱による火災など）を生じることになる。このための対策としては、(1) 配電線の強化や柱状変圧器の増設と変圧器に接続される太陽光発電設備の数を減らす。(2) 電圧を調整する電圧調整機器（SVR：Step Voltage Regulator, SVC：Static Voltage Controller）を設置し、電圧を規定値内に抑える。(3) 蓄電池を導入（電気自動車を含む）し、電圧の平滑化を図る。(4) これまでの電圧（100/200V）ではなく、より効率的に電気を運用するために世界の大部分が使用している IEC（International Electrotechnical Commission）の規格に沿った電圧に昇圧（230/400V）する、などが考えられている。これらの実現には、いずれも膨大な費用が発生することになるものと予測されている。

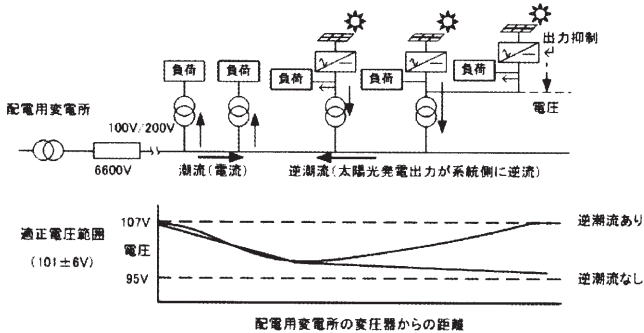


Fig. 3. Distance from the transformer of the transformer substation

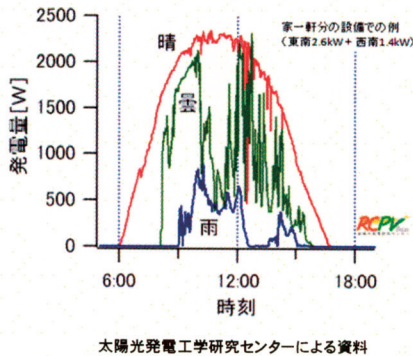


Fig. 4. Output of Photovoltaic Power Generation

②にある周波数の調整について電力系統では決められた周波数を維持することが求められている。一般的に、系統に大量の電気が流れ、これに対する過負荷が発生すると、周波数が維持できなくなり、安定した電力の供給ができなくなる。そのため、電力系統の周波数を電力会社はその瞬間での需給バランスを調整することにより維持されている。しかし、太陽光発電の出力は図 4 に示すように天候などの影響を受けるために変動が大きく、予測制御が困難である。こうした発電システムが大量に既存の電力系統に接続されるとこれまでの需給バランス調整が困難となり、電力会社（供給エリアごとの）の調整能力が不足する可能性がある。周波数が適正値を超えた場合、電気の安定供給（質の確保）ができなくなり、企業の生産に大きな支障を生じる。さらには電力系統の停電につながる恐れがある。対策としては、電力系統全体で天候の変化による太陽光出力の大幅な変動に備えて、周波数調整のための大型の安定器となるようなバックアップ電源が必要となる。これも①と同様に非常に高コストとなる。また、電源としては比較的短時間で（分オーダー）で出力の調整が可能な蓄電池などの電力貯蔵装置あるいは分散電源の設置が効果的となっている。また、プラグインハイブリッド自動車（PHEV）を積極的に周波数調整に用いる V2G（Vehicle to Grid）なども検討されている。

③太陽光発電が大量に導入された場合、図 5 に示す日負荷曲線の昼間においてベース供給力（原子力、水力、火力最低出力、）等と太陽光による合計発電量が需要を大きく上回る可能性がある。また、ゴールデンウィーク、お盆さらにはお正月などの期間においても電気の供給量が需要量を大きく上回り、余剰電力が発生する恐れがある。このように太陽光発電が増加すると、系統側の電源設備・流通設備とも稼働率が低下し、電源・流通双方でコストが高くなることが想定される。そのため、太陽光発電の出力変動に備えたバックアップ電源が必要となる。①、②と同様にこれによる膨大な費用が発生するこ

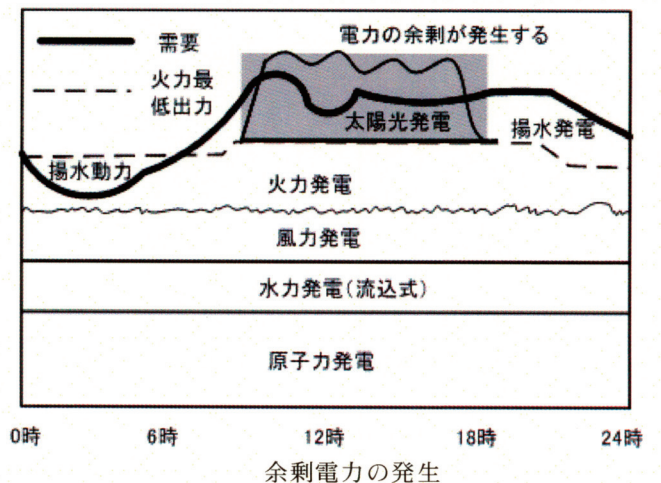


Fig. 5. Generation of Surplus Power

とになる。なお、図 5 には風力発電が太陽光発電と比べ、比較的安定な電力を供給するものとして記述している。

電力系統では、これまで述べたように常に発電出力と総需要とは同時同量となることが必要であり、この関係を維持できない場合には①と②にある電圧、周波数に大きく影響することになり、大きな障害（事故）に発展することになる。対策としては、太陽光発電設備を一時的に止めることや送電系統や配電系統内、事業所あるいは家庭に蓄電設備（蓄電池）を導入する必要がある。また、他には、家庭で消費される電力の需要カーブや電力料金に関する情報などをスマートメータを使用したスマート化技術により需要家へ情報を提供し、需要家自らが電気の使い方を工夫することで負荷を調整する対策が必要となる。さらには、エアコン・冷蔵庫等を太陽光による発電量や系統の需要状況により自動的な制御（DSM：デマンドサイド・マネジメント）が行われることになる。これらによって、需給の協調を実現し、効率的で無駄のない需給システムが形成されることになる。一方、需要家側だけでなく運用者側からの調整としては、系統の供給状況に合わせた負荷制御を系統側から実施し、需要を抑えようとする DR（デマンド・レスポンス）などについても検討されている。

## 8. まとめ

オバマ政権の誕生に伴い、米国ではスマートグリッドが大きくクローズアップされ、全米でスマートグリッドに関する実験や研究が行われている。一方、欧州でもドイツ、オランダ、デンマークなどをはじめとする再生可能エネルギーの普及に熱心な国々が社会的な実験に取り組み始めている。アジアにおいても韓国、中国などが日本を上回る速度でプロジェクトが進んでいる。各国の電力供給に関する思惑は異なるものの、低炭素社会を目指し、今後のより優れた電力インフラを構築するために、これまでの大規模電源と再生可能エネルギー、電気自動車、蓄電池さらには、先端の情報通信技術を統合し、活用した新しい社会システムの実験が急ピッチで行われている。これを実現するためには電力系統に悪影響を及ぼす課題や対応策を解決し、電力供給の高い信頼性を損なうことなく、さらには過剰なコスト増加にならないように総合的な取り組みが必要である。また、産業界にとっても新しいビジネスとして期待でき、今後さらに世界的に注目され、スマートグリッド技術開発が進んでいくものと考えられる。

## 文 献

- (1) 「OHM」, 技術総合誌, オーム社, 2010, 3月号
- (2) 「OHM」, 技術総合誌, オーム社, 2010, 7月号
- (3) 「OHM」, 技術総合誌, オーム社, 2011, 4月号
- (4) 村上朋子・江川正尚・浅野浩志・近藤道雄・上田悦紀・加藤政一：  
「大震災と電気エネルギー」電気学会 電力・エネルギー部門大会  
震災特別セッション (2011.8)