

# 太陽光発電大量導入に対する配電システムの技術的課題

Technical issues on distribution systems for mass introduction of PVs

造賀芳文\*

## 1. はじめに

国のエネルギー政策の基礎となるエネルギー基本計画は3年ごとに見直されることになっており、2018年7月3日には第5次エネルギー基本計画が閣議決定された。その中で、再生可能エネルギーを長期安定的な「主力電源」と位置付けることが謳われ、太陽光発電（以下PV）はその第一に挙げられている<sup>1)</sup>。長期エネルギー需給見通しの2030年度のエネルギーミックスにおいては、再生可能エネルギーが22～24%程度、そのうちPVが7.0%程度とされ、設備容量としては6,400万kW（64GW）となっている<sup>2)</sup>。2012年7月から始まった固定価格買取制度（FIT：Feed-in Tariff）によりPVの導入は急速に進み、2018年3月時点での導入量は4,450万kW（44.5GW）である<sup>2)</sup>。このうち、件数で見るとFIT後だけでも住宅用が約118万件（非住宅は約52万件）となっており、これら住宅用PVは主に配電システムに導入されていることになる。

電力システムにPVが大量に導入されると種々の問題が生じることはかねてから指摘されており<sup>3,4)</sup>、配電システムについても制御の高度化などが議論され<sup>5)</sup>、具体的な研究も進められてきている<sup>6)</sup>。本稿では、従来の配電システムの運用と制御およびPVの大量導入に対応するための課題、さらに将来の配電システムに求められる役割について述べる。

## 2. 配電システムの概要

図1に電力システムの構成を示す。大規模発電所にて発電された電力は、まず超高圧へと昇圧され、基幹システムを通じて大量に送られる。その後、地域供給システムを経由して徐々に降圧されながら需要地の近くまで運ばれ、最終的には配電システムが各需要家に電力を届ける役割を担っている。配電システムは階層構造をも

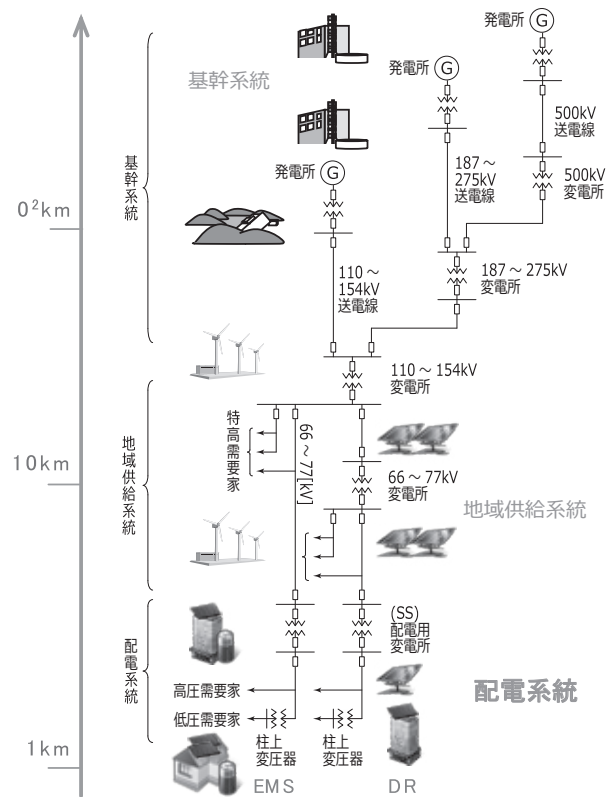


図1 電力システムの階層構成と配電システム

つ電力システムで最も需要家に近い部分であり、住宅のルーフトップに導入されるPVはここに接続される。

配電システムの特徴としては、主に以下の3点が挙げられる。

- (1) 【電圧制約】 公衆安全のため電圧が規定されている。日本では  $101 \pm 6V / 202 \pm 20V$  (低圧線、屋内配線)。
- (2) 【設備的特性】 すべての需要家まで張られており設備数が多い。そのため、制御が局所的(ロー

\* 広島大学大学院工学研究科 准教授

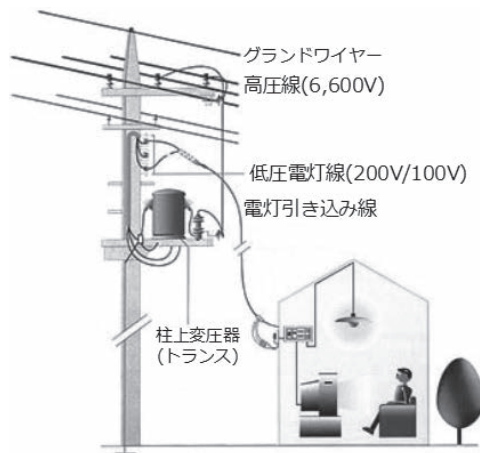


図2 配電系統の設備例

カル) となる傾向がある。

- (3) 【地理的特性】すべての需要家まで張られており地理的な広がり大きい。よって同じく制御が局所的(ローカル)である。

図2に配電系統設備の模式図を示す。送電系統を流れてきた電力は配電用変電所にて降圧され、配電系統の高圧線を通じて6,600Vで送られる。その後、一部の電柱の上に置かれている柱上変圧器で100V/200Vに降圧され、低圧線を通じて需要家まで近づいた後、引き込み線で最終的に各需要家まで届けられる。

上記(1)について、電圧は高い方が電力損失も少ないため送電効率としては有利であるが、高すぎる電圧は誤って人が感電した際に大変危険である。よって、公衆に近い低圧線や屋内配線は法的に電圧が決めており、一般的な家電製品などもこの規定電圧範囲内であれば問題なく動作するように設計されている。

次に(2)について、電力系統はライフラインとして重要な電力供給インフラであり、いわゆるユニバーサルサービスが要求される。よって、すべての需要家まで低圧線を引く必要があることから必然的に関連する設備数が多くなる。また(3)についても、送電系統が目標地点まで直線的に用意されればよいのに比べ、面的に広がっているすべての需要家を繋ぐ必要があることから地理的な広がりも大きい。よって、集中制御するには技術的にもコスト的にも負担が大きく、今までは基本的に局所的(ローカル)な運用・制御になっている。

図3に都市部の典型的な配電系統図の一例を挙げる。これは電気的な系統図で地理的な情報を示しているわけではないが、それでも設備数の多さと広が

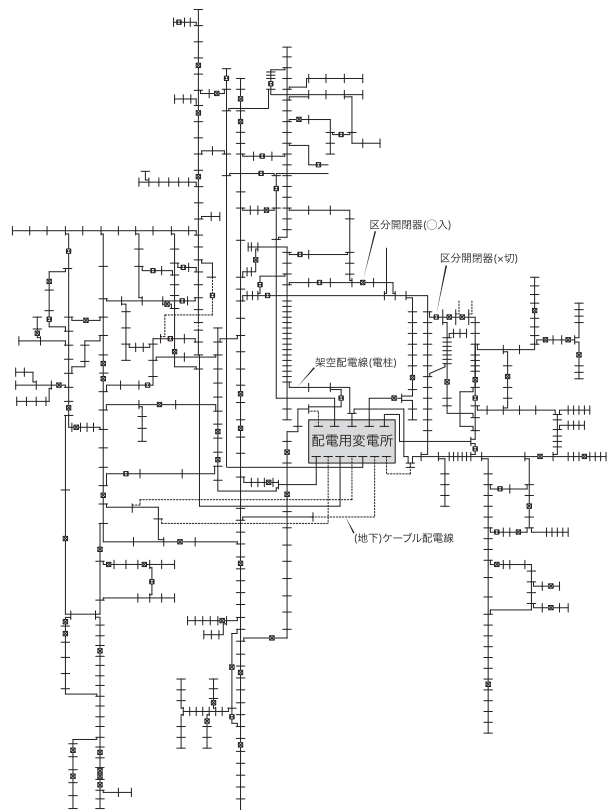


図3 配電系統の一例(高圧系統まで)

り具合はイメージできると思われる。また、これは1か所の配電用変電所が通常供給している範囲だけを抜き出したものであり、実際には隣接した同ような配電用変電所と互いに接続されていて、ある地域には少なくとも2か所以上の配電用変電所から電力が供給できるようになっていることが多い。通常はその突き合わせ点が開放されて運用され、作業や事故復旧などが必要な時に切り替えが行われる。

まず、中央に配電用変電所があるが、ここに向けて送電系統から電力が送られてくる。その後、変電所内の変圧器で電圧を高圧レベル(6,600V)まで下げ、地下のケーブル配電線や電柱の上の架空配電線など各需要家まで限なく張り巡らされている配電線を通じて配電されていることが分かる。ここでは高圧線までしか描かれていないが、実際には柱上変圧器、その下の低圧線があり、各需要家まで繋がれている。

### 3. PV大量連系による課題

さて、PVの大量導入が進むことによる配電系統における技術的な懸案事項としては、主に以下の項目が挙げられる。

- ・ 周波数問題(変動が概ね $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内)
- ・ 高調波問題(電圧歪率は5%以内)

- 電圧分布（制約）問題（低圧で  $101 \pm 6V$  以内）
- 電圧不平衡問題（不平衡率は 3% 以内）
- 事故時の検出・復旧問題（できるだけ早く）

もちろん PV は温室効果ガスを発生しないなどよい面も多くあるが、上記の点は必ずクリアする必要があり大きな懸念事項となる。ただし、周波数問題は主に需給バランス面での問題、また高調波については機器的な問題であるためここでは省き、上記「→」の項目である電圧分布、電圧不平衡、事故時の検出・復旧の課題について述べる。

まず、PV の電源としての特徴のうち、懸念事項としてあげられるのは主に以下の項目である。

- (1) 出力が天候によって変動すること。
- (2) 分散して配置されること。
- (3) 直流発電であるため、交流に変換するためのパワーコンディショナー（PCS：Power Conditioning System）が必要であること。
- (4) 賦課金や出力抑制による不公平感が存在すること（制度的）。
- (5) 電力自由化による事故時の責任分担が不明瞭であること（制度的）。

これらの項目と前述の課題との関係を筆者なりにまとめてみたものが図 4 である。電圧分布問題と不平衡問題は通常運用・制御時の課題 A として、また事故など緊急時の問題については少し細かく 3 つの課題 B として分類してある。右側の電源としての特徴が、左側の課題に対してどのような関係があるかを矢印で示してある。点線は制度的な話題を示す。

(1) の出力変動が避けられないという点については、(A-1) 電圧上・下限の逸脱問題や (A-2) 不平衡問題に大きく関わる。また、(2) の小規模な電源として分散して配置されることも同じく (A-1) 電圧上下限問題や (A-2) 不平衡問題に関係する。さ

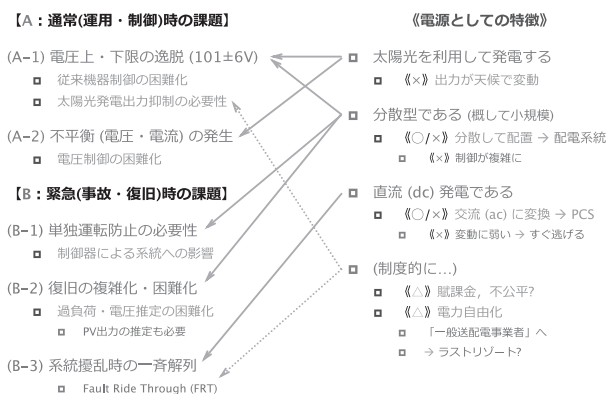


図 4 PV の特徴と技術的課題との対応

らに、分散型であるがゆえに、事故時の (B-1) 単独運転や (B-2) 事故後の復旧を複雑・困難化に関係している。次に、(3) の直流発電がゆえに PCS が必要という点は (B-3) 系統擾乱時の一斉解列に関連しており、これは PCS がパワーエレクトロニクス（パワエレ）機器であるということに起因している。最後の 2 つ (4) (5) については、技術的問題そのものというより制度的、ルールの問題として挙げられているものであるが、それに対応するために技術的な課題がある。

以下では、上記の課題の観点からそれぞれについてまとめてみる。

### 3.1 通常（運用・制御）時の課題

まずは、通常運用時の課題 (A-1), (A-2) についてそれぞれ述べる。

#### 3.1.1 電圧上・下限の逸脱 (A-1)

そもそも、今までの電力潮流（電力の流れ）は上位→下位へと一方通行であった。よって、電圧も配電用変電所の出口から順に下がっていくことになり、設備的にもそのように整備されてきた。運用方法としても需要家の需要電力だけを予測すればよく、今までの膨大な経験から問題なく想定できていた。したがって、最終的な制御についても一方通行の電力潮流を想定し、配電用変電所出口での電圧を制御していれば以降の電圧分布はほぼ予定通りに収まるため、それに必要十分な電圧制御機器が設置され、活用されてきた。

図 5 に 1 フィーダだけを取り出した配電系統の模式図を示す。上半分の系統図のように 5 か所に需要家が存在し、左側の配電用変電所から電力が供給されている場合、下半分のグラフの下側の線のように一様に下がるような電圧分布になる。よって、低圧系のレベルで全体的に  $107 \sim 95V$  の間に収めることは比較的容易であった（線路の長さによっては、途中で電圧が下がりすぎる場合も多く、途中で SVR (Step Voltage Regulator) などの電圧制御機器が設けられる）。

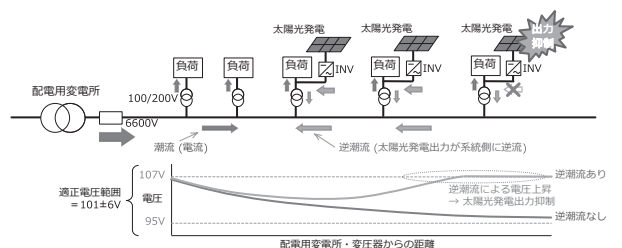


図 5 電圧上・下限の逸脱 (1 フィーダ) <sup>4)</sup> (文献 4 を参考に作成)

しかしながら、今まで電源のなかった配電系統内に PV が導入されてくると、まずは発電した電力が自分の負荷を相殺することになり見かけ上の負荷が減る。すると、配電線にあまり電力が流れなくなってきて、電圧の低下が緩やかになる。さらに導入が進んでくると、負荷を上回るほどの発電が行われる時間帯が現れ、電力が逆流するという現象が起こる。これを「逆潮流」と呼び、グラフの上側の線のように電圧の上昇を引き起こす。電圧上昇が起こってもそれが規定値内の 107V 以下に収まっていれば問題はないが、それ以上に上昇するほど PV が大量に導入されると問題となる。また、この上昇分を加味して配電系統の電圧を低めに制御しているときに急に日射が減って PV の出力が下がれば、逆に下限値を下回るという可能性もある。

電圧上昇に対しては PCS に出力抑制機能をもたせるように規定されており、現在でもすでに上記の状況は発生している。電圧が規定値を超えた場所の PV が出力抑制することになり、これが不公平な状況を生んでいることが問題となっている。

そのため、新しい電圧制御機器の開発や、PV を効果的に出力抑制する方法などは国レベルでの実証試験も進んでいる。また、IoT や情報通信ネットワークを活用した新しい制御方法なども盛んに研究されている。ただし、先に述べたように配電系統は対象機器の数が多く、また地理的に広がっているためにコストの問題には注意が必要である。

### 3.1.2 不平衡の発生 (A-2)

3本の電線で三相電力を送る方法が最も効率のよくなることが知られており、配電系統においても高压系統(6,600ボルト)まではほとんどが三相3線式で構成されている。図6にその模式図を示す(なお、先の図5では簡単のため3本の線を1本で表している)。低压系統、家庭用のコンセントなどは単相であるので3本のうち2本を取り出すことでこれを実現している(厳密にはさまざまな接続方法がある)が、動力として電力を使うモーターなど三相の

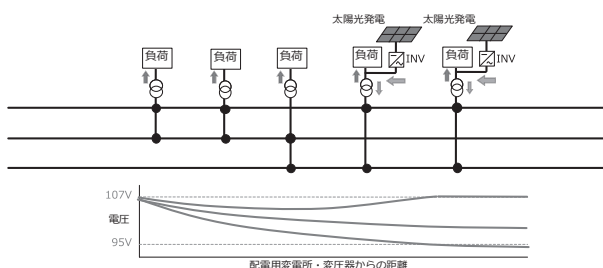


図6 不平衡の発生

まま接続する機器もあり、この三相間はバランスが取れていて平衡状態にあることが望ましい。平衡状態とは、各相間で大きさが等しく位相角がちょうど120度ずれた理想的な状態を指し、これが崩れた状態を不平衡状態という。この崩れている割合を不平衡率というが、不平衡が大きくなるとさまざまな問題が発生するため、この不平衡率は3%以内に抑えることが規定されている。

3本のうち2本を取り出して単相とし各負荷に接続されている形であるので、接続自体もバランスを取らないと不平衡になる可能性があるが、どの程度の負荷をどの相間に接続するかは計画的に決定され、今まではそれほど問題なく運用されてきた。しかし、PVが大量に連系されてくると連系先がどの相間になるのかによってバランスに影響を与え、かつ日射の変化によって各相間のバランスも変動するため平衡状態の管理が難しくなる。また、先の(A-1)電圧上・下限の問題も低圧において規定値以内に入っている必要があるため、ある相間だけ規定値を逸脱するという事も生じてくる(図6下側のグラフ)。

## 3.2 緊急(事故・復旧)時の課題

ここからは、緊急時(事故時や復旧段階)に問題となり解決が求められる課題(B-1)、(B-2)、(B-3)についてそれぞれ述べる。

### 3.2.1 単独運転の防止(B-1)

単独運転とは、上位から電力が送られていないのにある部分だけ電源が運転されていて電圧がかかっている状態をいい、事故が起こった際に問題となる。配電系統では、樹木接触などが原因の短絡や、何か電線を切ってしまう断線などの事故が多く、いずれも作業員による修理が必要となる。また、そもそも公衆に最も近い場所の電力設備であるため、作業員や公衆の安全のため、事故が起こるとまずは根元から送電を止めてしまうことになっている。

通常、配電用変電所の出口にあるリレー(継電器)が常に事故を監視しており、例えば短絡で大量の電流が流れ出ていかないかなどをチェックしている。しかし、下流に新たにPVが導入されてくると、たとえ事故が発生してもPVがその事故電流を供給してしまい、事故に気づけない可能性がある。また、根元で遮断できたとしてもPVからの出力と負荷とがちょうどバランスしてしまうとPVが動き続けることになり、配電線に電圧がかかったままとなる。これでは作業員や公衆が感電してしまう恐れがあった大変危険であり、これを単独運転状態という(図

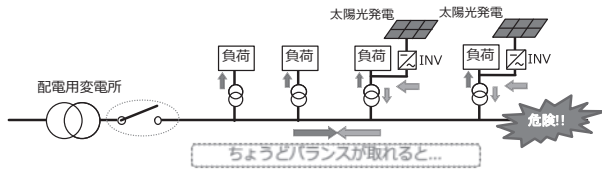


図7 単独運転の防止

7). よって、現在のPCSは自分の連系している配電線が単独運転状態にあるかどうかを常に監視するよう義務付けられており、その機能が付加されている。しかし、この機能自体が電力システムに影響を与え、電圧フリッカとして現れてしまったという事態も起きている。

### 3.2.2 事故復旧過程の複雑化・困難化 (B-2)

次に、事故がちゃんと検出され遮断が成功したとしても、そこから復旧していく際にも課題がある。日本では、諸外国に比べ配電システムでの設備投資が進んでおり、事故復旧も比較的高いレベルでの自動化が実現されている。

図8に単純な配電系統の一例を示す。下側の図は左右に配電用変電所があり、両側から送電されている例である。途中、四角(□)の中にバツ(×)印がある2種類の記号で区切られていることが見て取れるが、これが区分開閉器と呼ばれるスイッチである。普段は常に「入」になっているものと、常時は「切」になっているものがあり、これらを用いてどちらの変電所から供給するかを制御することができる。これらは事故時および復旧時にこそ威力を発揮し、自分自身にかかっている電圧、流れている電流を検出することで、半自動的に復旧が可能である。

例えば、短絡事故が発生すると電流が大量に流れるが、それをフィードの根元で検出し遮断する。すると当該フィードに電圧がかからなくなるので、各

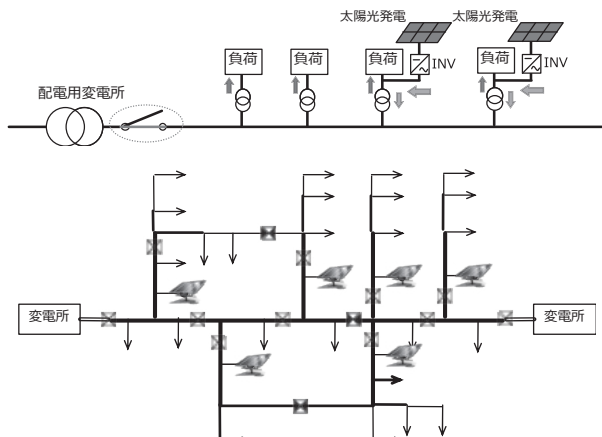


図8 事故復旧過程の複雑化・困難化

区分開閉器は根元が遮断されたことが分かる。その後、根元から徐々に区分開閉器を入れていき、事故地点に到達するとまた事故状態になる。この時点でどの区分開閉器を入れた瞬間に事故が再発したかが分かるので、その最後の区分開閉器をロックすることで、残りの部分は復旧させることができる。

この方法は、配電システムに負荷だけが存在する場合には、ローカルの情報および制御だけで自動的に事故区間の特定と途中までの復旧が行われるので、大変有用な方法である。しかし、PVが大量に導入される場合を考えると主に以下の2点が問題となる。

- ・事故が起こると単独運転防止のためにPVはすべて解列され、事故前と復旧後の見かけ上の負荷が異なる。
- ・復旧後、またPVが復活してくるので、先の電圧問題などが懸念される。

事故時は単独運転を防止するためにすべてのPVは解列される。よって、事故前はPVが負荷を相殺したり逆潮流を流したりしていたはずであるが、復旧時にはそれがなくなり見かけ上は負荷が増大したように見える。よって、今まで通りの復旧方法だけだと先に述べた課題(A-1)、(A-2)などの電圧問題に対応できず、追加の制御が必要になると考えられる。また、無事に復旧できたとしても、復活してくるPVに対して同じく課題(A-1)、(A-2)に対応しなくてはならない。

### 3.2.3 擾乱時の一斉解列 (B-3)

最後に、擾乱時の一斉解列について述べる。これは送電系統、同期安定度などに関連する課題であると整理されることもあるが、接続先は配電系統が多く、与える影響も大きいので簡単に説明する。

PVは直流発電であるので、配電システムには交流に変換するPCSを介して連系される。このPCSはパワーエレクトロニクス機器であり、事故などの大きな擾乱に敏感であることが知られている。よって、配電システム自身の事故でなく上位の事故による電圧変動であっても敏感に反応し、自分を解列してしまうことがある。上位系の事故の場合、通常は雷が原因であることが珍しくなく、その場合は自動的に一瞬で復旧できるシステム(高速遮断・復帰、自動再送電など)が装備されており、何事もなく送電が継続されることも多い。

しかし、一瞬で自動的に復旧されるといってもやはり瞬間的に電圧が下がる(瞬時電圧低下)などの影響は避けられず、配電システムに接続されているPVがこれに敏感に反応し、問題がないのに解列する可

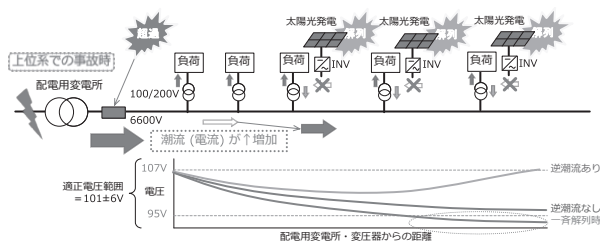


図9 PVの一斉解列イメージ

性能がある。すると、日射があったとしてもPVからの出力がなくなることとなり、さらにそれが一斉に発生することも十分考えられる。これは、前述した内容と同じ見かけ上の負荷が急に増えることと等価であり、電圧問題などを引き起こす(図9)。

よって、このような擾乱でも簡単に解列せず、できるだけ出力を続けるようにする機能をフォルト・ライド・スルー(FRT: Fault Ride Through)と呼び、今後はこの機能も実装されるように要求されると考えられる。

#### 4. おわりに

本稿では、配電系統の設備構成や運用方法などについて述べ、PVが大量に導入される際に懸念される技術的、制度的課題についてまとめてきた。これらの課題は電力の安定供給のためには必ず対応しなければならないものである。

電力系統の将来を見据え、例えば2030年以降の次世代電力ネットワークについて図10のようなイメージ<sup>7)</sup>が検討されている。配電系統は「DSO: 配電」部分に対応するが、PVのみではなく電気自動車(EV)やバッテリーの充放電、それらを含めた高度なエネルギー管理システム(EMS)が導入されていくことが予想されている。また、最近ではVPP(Virtual Power Plant)なども話題で、電力自由化時代の新しいプレーヤーとして発電や需要を束ねて新しいサービスを提供するアグリゲーターにも注目が集まっている。

しかしながら、どのような制度のもとで、どのようなサービスを開発・提供するにしても、PV・需要家に最も近く地理的に広がって分布している圧倒的な数の設備に対し、コストを抑えつつスマートに制御することで、物理的制約を満たしながら安定な電力供給を継続し、非常時にも柔軟に対応することのできる技術の開発が必須であることは論を俟たない。本稿の内容が少しでも読者にとって有益であれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた今後の論点～第5次エネルギー基本計画の策定を受けて～(2018/8/29)

### Beyond 2030のNWシステム(「分散化」「広域化」)(イメージ)

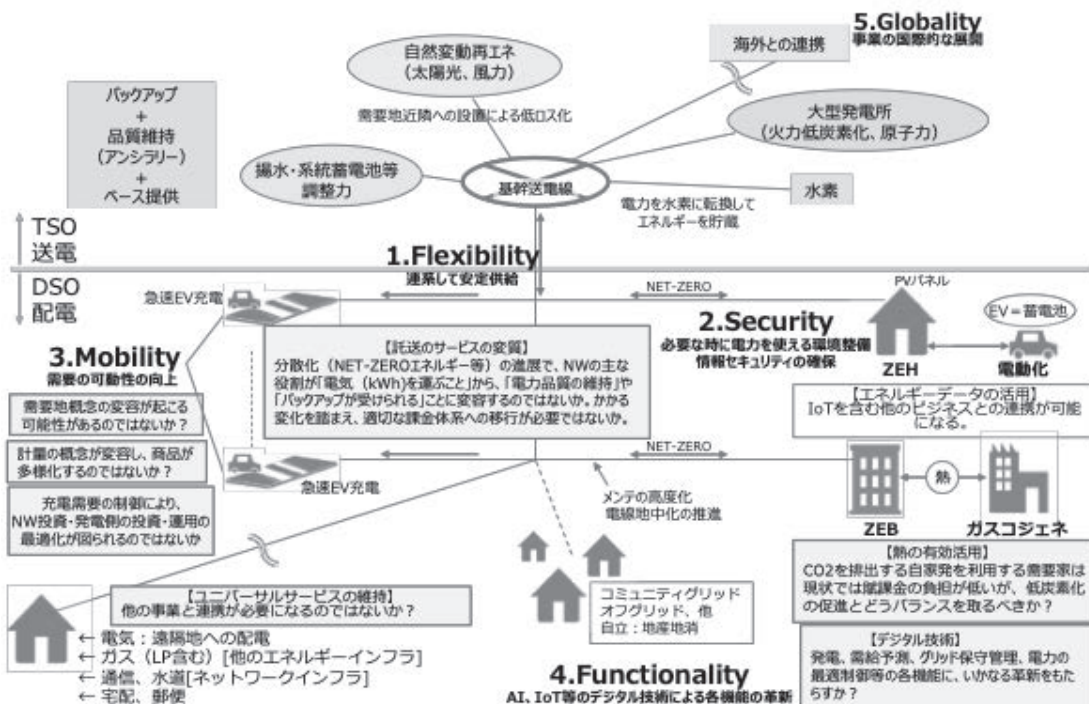


図10 Beyond 2030のネットワークシステム<sup>7)</sup>

- 2) 資源エネルギー庁, 国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案 (2018/10)
- 3) 社団法人電気協同研究会, 電力系統における新エネルギー拡大のための課題と展望, 電気協同研究, 第64巻, 第3号 (2009/3)
- 4) 資源エネルギー庁・次世代送配電ネットワーク研究会, 低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて (2010/4)
- 5) 社団法人電気協同研究会, 低炭素社会の実現に向けた配電システムの高度化, 電気協同研究, 第66巻, 第2号 (2012/3)
- 6) 社団法人電気協同研究会・配電自動化技術の高度化専門委員会, 配電自動化技術の高度化, 電気協同研究, 第72巻, 第3号 (2016/10)
- 7) 資源エネルギー庁, 2030年以降を見据えた次

世代電力ネットワークの在り方 (2018/3/22)

- 8) 資源エネルギー庁, 2030年エネルギーミックス実現へ向けた対応について～全体整理～ (2018/3/26)

#### 著者略歴



造賀 芳文

1995年3月広島大学大学院工学研究科博士課程前期(システム工学専攻)修了。1997年4月広島大学工学部助手, 2007年4月同助教, 同年6月同准教授, 現在に至る。2002年～2003年米国 University of Washington 客員助手。博士(工学)。2006年電気設備学会賞(学術部門:論文奨励賞)受賞。IEEE, 電気学会, 電気設備学会, エネルギー・資源学会会員。