

# 太陽光発電大量導入時の電圧上昇対策に関する考察 —無効電力補償とデマンドレスポンスの比較—

Measures for Voltage Stabilization in Distribution Network with Large-scale PV Systems  
- Comparative Analysis of Reactive Power Compensation and Demand Response -

キーワード：太陽光発電，配電系統，電圧安定化，無効電力補償，デマンドレスポンス

高木 雅昭 田頭 直人

太陽光発電(PV)からの逆潮流によって配電系統の電圧が上昇する問題に対しては、配電系統側における対策の他、需要側における対策も検討されている。需要側における対策は、制御対象や運用方法により効果が大きく異なるため、その経済性を評価することが非常に難しい。需要家端で実施可能な対策は、制御対象によって、大きく二つに分けられる。一つは、有効電力を制御するデマンドレスポンス(DR)、もう一つは、無効電力補償である。本稿では、それぞれの対策の経済性を評価した当所の既刊報告書を参照しつつ、両対策の結果を比較する。更に、DRによる対策と無効電力補償による対策の特徴を明らかにすることで、両対策の協調の可能性を検証する。最後に、両対策を組み合わせた場合、設備の稼働率に基づいて、それぞれの対策が経済的に棲み分けることが重要である点について言及する。

1. はじめに
2. 電圧上昇抑制メカニズムの概要
3. 無効電力補償による対策の概要とその特徴
  - 3.1 配電系統モデルの概要
  - 3.2 無効電力補償装置の設置方策
  - 3.3 無効電力補償装置の必要容量
4. DRによる対策の概要とその特徴
  - 4.1 配電系統モデルの概要
  - 4.2 DRによる対策の評価結果
5. 評価結果の分析と考察
  - 5.1 無効電力補償装置の設備容量は何によって決まるか
  - 5.2 DRの必要抑制電力量は何によって決まるか
  - 5.3 無効電力補償による対策とDRによる対策の比較
  - 5.4 協調の可能性
6. まとめ

## 1. はじめに

近年、我が国においても「再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT: Feed-in Tariff)」等の導入により、太陽光発電 (PV: Photovoltaic) の普及が加速している。しかしながら、住宅用PVが配電系統に大量に連系された場合、PVからの逆潮流により需要家端の電圧が上昇し、電気事業法で定められた規定値 (107V) を逸脱する可能性がある。

電圧上昇を抑える手段としては、柱上変圧器のタップ変更や線路用電圧調整器(SVR: Step

Voltage Regulator)の設置、PVの出力抑制の他、無効電力を補償することも効果的である。これまで、無効電力を補償することで電圧上昇を抑制する場合、静止型無効電力補償装置(SVC: Static Var Compensator)を配電系統の高圧側に設置することが検討されてきた。一方、福島(2012)、樺澤(2012)、飯岡(2006)は、低圧設置の無効電力補償装置を提案し、その有効性を確認している。これら需要サイドにおける無効電力補償に用いる機器 (以降、需要側機器と呼ぶ) の一例として、インバータを含む機器や $\mu$  STATCOM (福島2012、樺澤2012) 等が挙げられる。その

他の関連研究としては、野田(2011)、三栗(2013)がEVの無効電力制御による電圧低下補償、田中(2009)、八太(2013)が分散型電源の無効電力補償による電圧上昇抑制対策を提案している。

著者らはこれまで、需要側機器による無効電力補償の経済価値を定量的に示す手法(高木2014, 高木2015a)や、低圧系統に設置する無効電力補償装置に関して、複数の設置方を想定し、その費用対効果を比較できる分析手法(高木2015b)を提案してきた。

一方、東日本大震災以降、需給逼迫対策としてピーク電力をカットするデマンドレスポンス(DR: Demand Response)に注目が集まっている。加えて、最近ではピークカット以外に、再生可能エネルギー大量導入時の系統安定化対策としてDRを活用することも検討されている。河村(2013)は、PV逆潮流による電圧上昇問題に対するDRの適用可能性を検討するため、DRの発動日数や発動時間、必要抑制電力量を定量的に把握し、その経済性を評価している。

無効電力は、その特性上、装置容量(kVA)を超えなければ、エネルギーを消費することなく、自由に供給することが可能である。つまり、無効電力の供給に伴って発生する費用は存在しない<sup>1</sup>。従って、配電系統側での電圧対策の経済性評価は、基本的に無効電力補償装置の容量をベースに行う。対して、DRによる対策は、装置を新規に設置する必要性は無いが<sup>2</sup>、抑制した有効電力量(kWh)に対してコストが発生する<sup>3</sup>。このように、電圧対策の経済性を評価す

る上で、有効電力と無効電力とでは性質が大きく異なる。本稿の目的は、需要家端での無効電力補償による対策(高木2015b)と需要家の協力に基づくDRによる対策(河村2013)を比較し、その関係性を明らかにした上で、両対策の協調の可能性を検証することにある。

## 2. 電圧上昇抑制メカニズムの概要

図1に示す2ノードモデルを用いて、PV逆潮流による電圧上昇と有効電力・無効電力を用いた電圧上昇抑制の関係について説明する。

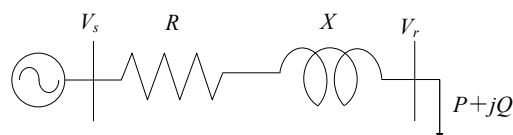


図1 2ノードモデル

送電端と受電端の電圧差である電圧降下 $V_s - V_r$ は(1)式によって近似される。

$$V_s - V_r \cong \frac{PR + QX}{V_r} \quad (1)$$

$$P = P_L - P_{PV} \quad (2)$$

$V_s, V_r$ : 送電端電圧と受電端電圧

$P, Q$ : 受電端の有効電力と無効電力

$R, X$ : 送電線の抵抗分とリアクタンス分

$P_L, P_{PV}$ : 負荷電力とPV出力

ここで、(2)式において、負荷電力 $P_L$ よりもPV出力 $P_{PV}$ の方が大きい場合、受電端の有効電力 $P$ はマイナス(PV逆潮流が発生している状態)となる。この時、(1)式においては、これに抵抗を乗じた値がマイナスの電圧降下、すなわち電圧上昇を引き起こしていることが分かる。DRによる対策の場合、負荷電力 $P_L$ を増加、またはPV出力 $P_{PV}$ を減少させることで、PVによる逆潮流を緩和し、受電端の電圧を適正範囲に維持する。一方、無効電力補償による対策の場合、受電端の無効電力 $Q$ がプラスの値となるよう

<sup>1</sup> 配電損失の増加等はあるが、本稿で検討する程度の無効電力補償量であれば、経済性評価に与える影響は小さい。

<sup>2</sup> ただし、制御指令やその応答を伝達するための通信インフラの構築およびその費用は必要。

<sup>3</sup> 需要家と電気事業者が事前に契約を締結し、系統に問題が生じた際に需要家の有効電力を制御し、その制御量に応じた報奨金を需要家に対して支払うインセンティブベースのDRを想定。

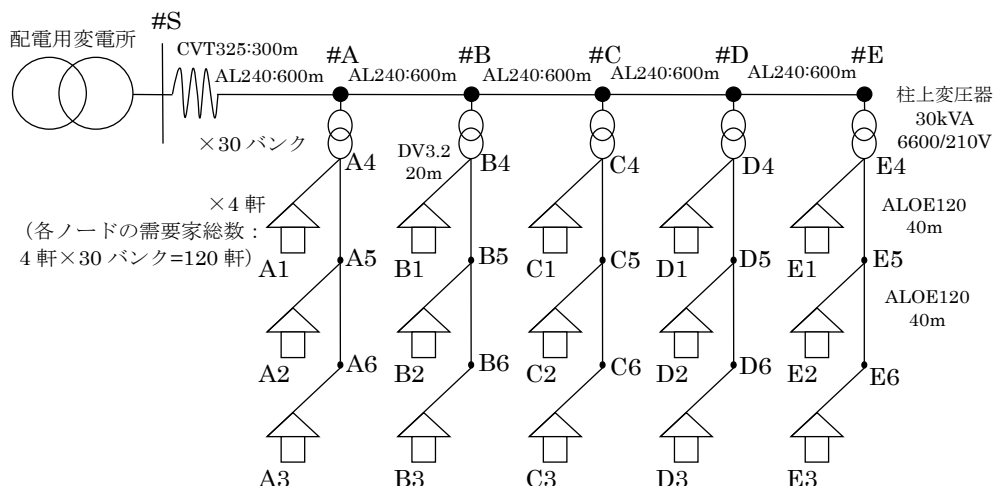


図2 配電システムモデルの概要

に補償することで、(1)式においては、これにリアクタンスを乗じた値が電圧降下となる。従って、PV逆潮流による電圧上昇分をキャンセルするように、無効電力を補償することで、受電端の電圧を適正範囲に維持することができる。

### 3. 無効電力補償による対策の概要とその特徴

本章では、無効電力補償による対策（高木2015b）について概説する。

#### 3.1 配電システムモデルの概要

高木(2015b)が用いた配電システムモデルを図2に示す。各需要家には、高圧配電線と接続する30kVAの柱上変圧器の2次側より低圧線と引込線を介して、電力が供給される。高圧配電線のノード#A~#Eでは、1ノード当たり30フィーダー分の低圧配電線を縮約するものとし、各需要家ノード（#A-1~#E-3）の縮約需要家数は120軒となる。なお、本配電システムモデルにおける電気的特性は文献（田中2009，三栗2013，電気協同研究会2005）を参考に表1のように設定している。

表1 配電システムの電気的特性

	抵抗 ( $\Omega$ /km)	リアクタンス ( $\Omega$ /km)	線種
変電所送り出し用 地中ケーブル	0.076	0.095	CVT325
高圧架空線	0.126	0.309	AL240
低圧線	0.252	0.268	ALOЕ120
低圧引込線	2.3	0.094	DV3.2
柱上変圧器	0.0186 ( $\Omega$ )	0.0328 ( $\Omega$ )	-

#### 3.2 無効電力補償装置の設置方策

図2に示す配電システムモデル内の各需要家ノード（#A-1~#E-3）にPVが順次設置されるものとした。PVの導入パターンとして、乱数を使って作成したランダムな順列1,000シナリオを想定した。本研究では、電圧逸脱を解消するために必要な容量の無効電力補償装置を、以下に示す4種類の設置ケースを想定して算出する。

- (1) SVCケース：高圧配電線の末端ノード（#E）にSVCを設置。装置容量は、これまでの導入実績より300kVAごとの離散値とする。
- (2) PVノード設置ケース：PVの設置により電圧逸脱が発生した場合、当該PV設置ノードに無効電力補償装置を設置する。

- (3) 需要家設置ケース：全需要家ノード(A1, A2, A3, B1, B2, B3, … E1, E2, E3)が無効電力補償装置の設置可能ノードであり，総容量が最小となるように各ノードの機器容量を決定する。
- (4) 柱上設置ケース：全柱上ノード(A4, A5, A6, B4, B5, B6, … E4, E5, E6)が無効電力補償装置の設置可能ノードであり，総容量が最小となるように各ノードの機器容量を決定する。

### 3.3 無効電力補償装置の必要容量

無効電力補償装置の総容量の1,000シナリオ平均値<sup>4</sup>を図3に示す。無効電力補償装置の総容量が最も大きいのはSVCケースで，次いでPVノード設置ケース，柱上設置ケースと需要家設置ケースはほぼ同容量となった。無効電力補償による電圧上昇抑制効果はリアクタンス分に左右されるため，リアクタンス分の小さい低压引込線の手前に設置する柱上設置ケースと後方に設置する需要家設置ケースは，ほぼ同容量となっている。

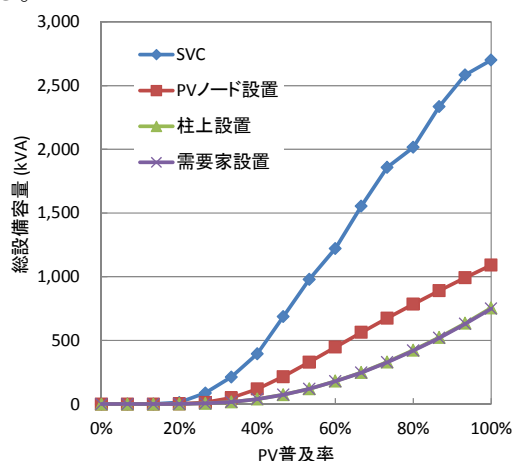


図3 無効電力補償装置の総容量（1,000シナリオの平均値）

<sup>4</sup> 膨大な数の配電線それぞれに対して，PVの導入パターンは異なるので，多数ある配電線の期待値として平均容量を用いる。

SVCケースの容量を100%とした時の各ケースの割合を示すと，PV普及率40%においては，PVノード設置ケースで30%，柱上設置ケースと需要家設置ケースで10%となっている。同様に，PV普及率100%においては，PVノード設置ケースで40%，柱上設置ケースと需要家設置ケースで28%となっており，PV普及率が低い時程，低压に設置する3ケースの総容量の割合が小さくなっている。第3.2節で述べたように，本研究ではPVを縮約した需要家ノード単位で順次設置するため，PV普及率が低いほど，PVが偏在する。また，SVCは需要家端の電圧を高压線から一括して補償するのに対して，低压用無効電力補償装置<sup>5</sup>は需要家近辺に設置することで，局所的に作用するといった特徴がある。つまり，PV普及率が低い程，電圧逸脱が局所的に発生するため，低压に設置する3ケースの効果が大きくなったと解釈できる。

柱上設置ケースと需要家設置ケースの総容量がPVノード設置ケースより小さい理由は，設置候補となるノード数が多いためであり，これは最適配置による効果と解釈できる。

## 4. DRによる対策の概要とその特徴

本章では，DRによる対策の評価手法（河村2013）について概説する。

### 4.1 配電システムモデルの概要

河村(2013)が用いた高压配電システムモデルを図4に，低压配電システムモデルを図5に示す。低压配電線は，柱上変圧器を中心にして，2方向に2径間ずつ延びている。ここで，図4

<sup>5</sup> PVノード設置ケース，柱上設置ケース，需要家設置ケースでは低压側に無効電力補償装置を設置するので，本3ケースにおける装置を総称して，低压用無効電力補償装置と呼ぶ。

に示すパターンiは、高圧系統全体にわたって負荷およびPVが均等分散しているケース、パターンiiは高圧系統の後半部分のみにおいて負荷およびPVが均等分散しているケースを表す。ただし、本稿の目的は、負荷およびPVの分布パターンの違いによる影響を詳細に分析することではなく、DRによる対策の傾向を把握することにある。これに加え、パターンiとiiのいずれにおいても同様の傾向を示していることから、以降はパターンiの結果のみを紹介する。なお、DRによる必要抑制電力量は、全て理想的に実施されるものとする。

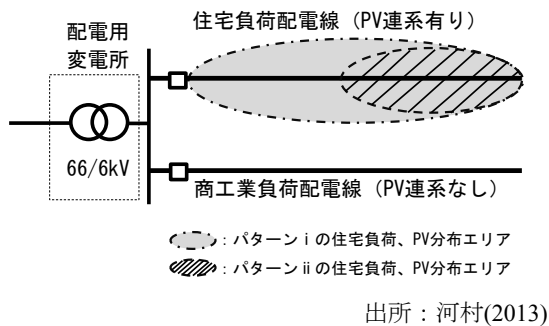


図4 高圧配電系統モデル

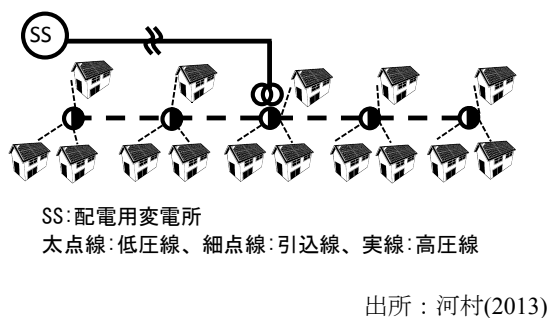


図5 低圧配電系統モデル

#### 4.2 DRによる対策の評価結果

DRによって対策を行った場合の必要抑制電力量を図6に示す（図中、●付実線）。

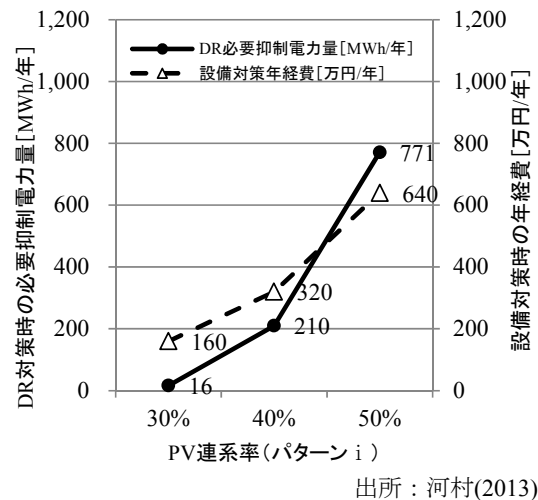


図6 DR対策時の必要抑制電力量と設備対策時の年経費率の変化（パターンi）

図6より、PV連系率の増加とともに、必要抑制電力量が逡増的に増加していることが分かる。一方、図3に示すように、無効電力補償による対策の場合、装置容量はほぼ線形に増加する。なお、河村(2013)も、PV連系率ごとに必要な無効電力量を試算しており（表2）、本容量にSVCの年経費を乗じたものが、図6における設備対策年経費（△付破線）である。併せて、PV連系率が増加すると、必要抑制電力量（DRによる対策）は急激に増加するのに対し、設備年経費（無効電力補償による対策）は概ね直線的に増えている点を指摘している。

表2 電圧適正化対策に必要な無効電力量の試算結果

PV連系率	必要な最大無効電力量[kvar]	
	パターンi	パターンii
30%	300	400
40%	600	800
50%	1000	1300

出所：河村(2013)

## 5. 評価結果の分析と考察

### 5.1 無効電力補償装置の設備容量は何によって決まるか

無効電力補償による対策の場合、PV逆潮流による電圧上昇分をキャンセルするように、無効電力を補償する。本原則を(1)式に適用すると、分子第1項の電圧上昇分と分子第2項の電圧下降分の和がゼロとなるに無効電力を補償することになる。本条件より、PV連系率に比例して増加した逆潮流分に対し、抵抗とリアクタンスの比(R/X)を乗じた値が、電圧を適正範囲に維持するのに必要な無効電力量となることが分かる。ただし、これは電圧が上限値に達した後に成立する条件であり、規定範囲内である間は、必要な無効電力補償量はゼロとなる。以上の理由により、図3に示す無効電力補償装置の容量は、PV普及率に対して、電圧逸脱発生後、ほぼ線形に増加しているものと推測される。

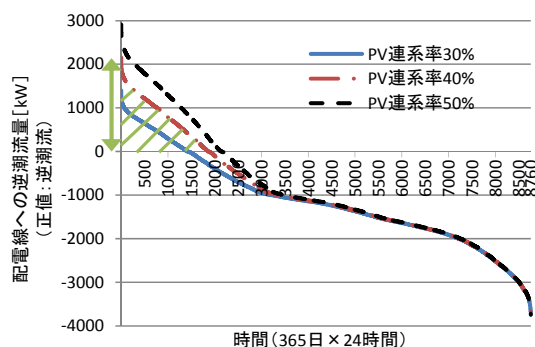
### 5.2 DRの必要抑制電力量は何によって決まるか

図7に、年間の逆潮流を大きい順に並べ替えた潮流持続曲線<sup>6</sup>を示す。無効電力補償による対策の場合、電圧面で最も厳しい1断面(図7において矢印で示した高さ)から必要な装置容量を算出する。これに対し、DRによる対策の場合、年間の逆潮流状態に基づいたシミュレーション(図7において斜線の面積)から必要な抑制電力量を算出する<sup>7</sup>。

<sup>6</sup> 配電線の送り出し電力について、逆潮流を正として大きい順に並び替えたもの

<sup>7</sup> 厳密には、配電用変圧器の送り出し電圧や配電性のインピーダンスによって、電圧逸脱が発生する逆潮流量の値も異なり、逆潮流量の全てを対象とする必要はない。ここでは、無効電力補償による対策が潮流持続曲

図7を見ると、PV連系率に対して、デュレーションカーブの高さはほぼ比例的に増加しているのに対して、面積は急激に増加している様子が見てとれる。その結果、無効電力補償装置の容量は線形に増加し、DRによる必要抑制電力量は通増的に増加したと解釈できる。

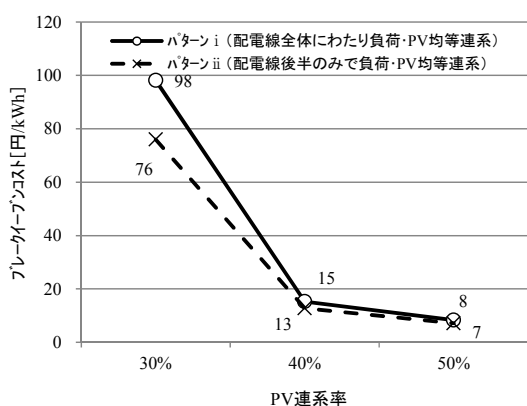


\*矢印と斜線は著者が追記 出所：河村(2013)

図7 潮流持続曲線(PV連系率30%~50%住宅負荷配電線の例)

図8にDR対策時におけるブレークイーブンコストを示す。本ブレークイーブンコストはDR導入に伴い回避できる設備対策費(SVCの設置費用)を逆潮流の抑制電力量で除することで算出されており、PV連系率が低い時に比較的大きなブレークイーブンコストとなっている。また、表3に示すように、PV連系率が低い時程、DRの発動時間が短くなっている。PV連系率が低い時は、年間の逸脱時間が短いので、この時に無効電力補償装置を設置すると設備の稼働率が低くなる。つまり、無効電力補償装置の稼働率が低くなる場合には、DRで対応した方が経済的といえる。

線の「高さ」を問題とするのに対し、DRによる対策が「面積」を問題とする点に焦点を当て、厳密性よりも簡便性を重視し、このような条件の下、以降の説明を行う。



出所：河村(2013)

図8 DR対策時におけるブレイクオープンコストの試算結果

表3 DR発動が必要な時間数

PV連系率	30%	40%	50%
DR発動			
発動が必要な年間延べ時間数	55	331	918

出所：河村(2013)

### 5.3 無効電力補償による対策とDRによる対策の比較

本節では、第3.3節で得られた結果を参照しつつ、低圧用無効電力補償装置をDRに置き換えても、同様の結果が得られるのか考察してみる。

まず、「SVCは需要家端の電圧を高圧線から一括して補償するのに対して、低圧用無効電力補償装置は需要家近辺に設置することで、局所的に作用するといった特徴がある。」点であるが、DRも需要家端で実施されるため、DRに置き換えても同様のことが言える。従って、低圧用無効電力補償装置による対策とDRによる対策は、PV普及率が低い時に効果的な、局所的な電圧上昇抑制

効果を、ともに備えているといえる。

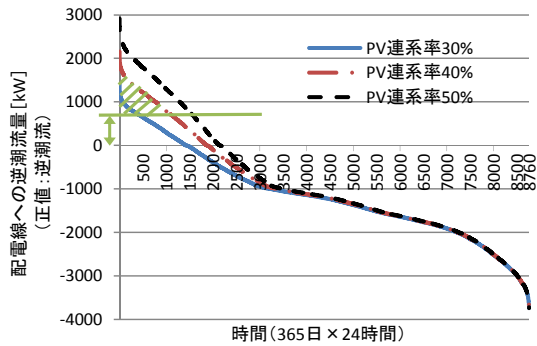
次に、最適配置による効果であるが、これはDRにも当てはまる。DRも需要家端で実施されるので、設置候補となるノードは多数存在する。従って、電圧上昇抑制効果の高い需要家を選択して、契約することができれば、最適化の効果を得られる。ただし、DRを実施する上でこのような選択的な契約が実現可能かに関しては、別途、検討が必要である。

### 5.4 協調の可能性

これまでの議論を踏まえ、無効電力補償による対策とDRによる対策の協調を検証する。本可能性は、河村(2013)も指摘しており、両対策を組み合わせた場合のシミュレーションによる最適な経済性の評価、分析（オプションとしてのDR適用に関する評価、分析）を今後の課題として挙げている。

具体的には、無効電力補償装置の稼働率が高くなるよう<sup>8</sup>、潮流持続曲線のボトム部分（図9において矢印の部分）を無効電力補償による対策が分担する。また、無効電力補償装置を設置すると稼働率が低くなるピーク部分（図9において斜線の部分）はDRによる対策が分担する。本棲み分けは、無効電力補償装置のコストとDRプログラムの実施コストにより決定される。実際の運用方法としては、電圧逸脱が発生した際、無効電力補償装置が優先的に稼働し、それでも逸脱が解消されない場合、DRが発動されることで両対策が棲み分けることになる。

<sup>8</sup> 第1章で述べた様に、無効電力補償装置の場合、装置の設置費用は発生するが、無効電力の供給に伴う費用は発生しない。従って、装置の設置費用を無効電力の供給量で除した単位無効電力量当たりの費用は設備の稼働率が高い（無効電力の供給量が多い）程、低くなる。



\*矢印と斜線は著者が追記 出所：河村(2013)

図9 潮流持続曲線に基づいた無効電力補償対策とDR対策の棲み分け

## 6. まとめ

本稿では、PV逆潮流による電圧上昇問題に関し、無効電力補償による対策とDRによる対策の結果を比較することで、両対策の特性を明らかにした。

無効電力補償による対策の場合、潮流持続曲線の高さから必要な装置容量を決定するのに対し、DRによる対策の場合、潮流持続曲線の面積に基づいて必要な抑制電力量を算出する。また、装置の稼働率が高くなる場合には、無効電力補償装置の設置、装置の稼働率が低くなる場合には、DRの方が経済性の高い対策となる。すなわち、潮流持続曲線において、ベース部分を無効電力補償による対策が分担し、ピーク部分をDRによる対策が分担することで両対策が経済的に棲み分けることになる。

本稿では、需要側における対策に注目して、需要家近辺で対策を行うことで局所的に作用できる点や、最適配置による効果の可能性を整理した。これらは、対策実施箇所の自由度の高さに起因するものであるが、このような前提とするためには、今後、解決すべき課題があることにも留意しなければならない。例えば、需要側における対策

では、制御対象が膨大となるので、通信インフラの構築や、制御協調の問題がある。加えて、多数の需要家の関与を必要とすることから、簡便で透明性の高い制度を構築する必要がある。また、DRに関しては、河村(2013)が指摘しているように、DR参加需要家をPV設置需要家に限るか、負荷のみの需要家も含める必要があるかといった参加対象範囲の議論も重要となってくる。従って、需要側における対策のメリットとデメリットを天秤にかけた上で、その実現性を見極める必要性が有る。本稿で示した考え方は、需要側における対策の経済性を向上させるもので、その実現の一助になるものとする。

## 参考文献

- [1] 飯岡大輔, 榊原邦晃, 横水康伸, 松村年郎, 出原範久 (2006)「太陽光発電装置が集中導入された配電系統の電圧上昇と SVC による抑制」, 電学論 B, Vol.126, No.2.
- [2] 樺澤祐一郎, 野田琢, 福島健太郎, 根本孝七 (2012)「需要家端に分散配置する無効電力補償装置  $\mu$  STATCOM の開発 (その 2) - 太陽光発電および電気自動車普及時の需要家電圧調整の検討 -」, 電力中央研究所報告 H11030.
- [3] 河村清紀 (2013)「太陽光発電大量連系時の系統電圧制御に対するデマンドレスポンスの適用可能性 - 発動頻度と経済性の評価 -」, 電力中央研究所報告 Y12008.
- [4] 高木雅昭, 田頭直人, 岡田健司, 浅野浩志 (2014)「需要側機器による無効電力補償の経済価値分析 - 太陽光発電大量導入時の電圧上昇抑制対策 -」, 電力中央研究所報告 Y13007.
- [5] 高木雅昭, 田頭直人, 岡田健司, 浅野浩志 (2015a)「需要側機器の無効電力補償による電圧上昇対策の経済価値分析」, 電学論 B, Vol.135, No.1.
- [6] 高木雅昭, 田頭直人, 岡田健司, 浅野浩志 (2015b)「低圧用無効電力補償装置の設置方策の検討 - PV 導入時における電圧上昇対策の費用対効果分析手法の提案 -」, 電力中央研究所報告 Y14010.
- [7] 田中俊輔, 鈴木宏和 (2009)「分散形電源の自律分散制御による電圧補償制御方式の検討」, 電学論 B, Vol.129, No.7.
- [8] 電気協同研究会 (2005)「配電系統における電力



品質の現状と対応技術」, 電気協同研究, Vol.60, No.2.

- [9] 野田琢, 樺澤祐一郎, 福島健太郎, 根本孝七, 上村敏 (2011)「充電器からの無効電力注入による電気自動車夜間一斉充電時の配電線電圧低下補償手法」, 電力中央研究所報告 H10006.
- [10] 八太啓行 (2013)「SVC 容量を低減する分散形電源無効電力制御-PV 出力に応じた無効電力制御のシミュレーション評価」, 電力中央研究所報告 R12012.
- [11] 福島健太郎, 野田琢, 樺澤祐一郎, 根本孝七 (2012)「需要家端に分散配置する無効電力補償装置  $\mu$  STATCOM の開発 (その 1) -概念と試作機による基本性能の検証-」, 電力中央研究所報告 H11029.
- [12] 三栗祐己, 原亮一, 北裕幸, 神谷英志, 滝照祥治, 平岩直哉, 小暮英二 (2013)「電気自動車の充電調整と無効電力注入による夜間一斉充電時の配電系統電圧低下補償に関する研究」, 電学論 B, Vol.133, No.2.

高木 雅昭 (たかぎ まさあき)

電力中央研究所 社会経済研究所

田頭 直人 (たがしら なおと)

電力中央研究所 社会経済研究所