

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

技術普及編

九州地域における太陽光発電大量導入と  
過渡安定度を考慮した電力システムの  
新しい経済的負荷配分制御の研究

平成28年3月

“Study on a Novel Economic Load Dispatch Control of Power Systems  
in Kyushu Region Taking Massive Installation of Solar Power Generation  
and Transient Stability into Consideration”

Strategy for Technology Dissemination

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構  
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2015-PP-18

## 概要

低炭素社会を目指す国際状況において、太陽光発電（PV）の割合は増加する傾向にあるが、PV の増加によってシステムの安定性が低下することがわかっている。日本においても固定価格買取制度（FIT）の影響によって PV の発電量が増加しており、特に九州地域において顕著である。九州電力管内では最大需要 15GW 程度に対して FIT により認定され導入が検討されている分の合計が 19GW になっており、近い将来に PV が九州電力管内のシステムの安定性に対して影響を与えることは明らかである。

PV の予測の不確実性による安定性の低下については、既存の設備容量の予備力を評価して需給を一致させるという研究例がある。しかし PV が大量に接続されたときの安定性を考慮した経済的負荷配分について考察している論文は殆どないため、本研究をするに至った。

本研究の手法は、大きく 2 つある。まず 1 つ目は、九州を 4 つの地域に分けて評価することで、地域ごとに PV がどの程度導入可能であるかの計算手法を提案すること。そして 2 つ目は、その手法を用いて主たる送電線ごとに過渡安定度を考慮した PV による有効電力に対する安定性の制約を与えた場合と与えない場合での PV の抑制量の違いを計算することである。シナリオとしては、九州電力が発電設備接続可能量として掲げている容量である 8.17GW の PV が導入された場合の 5 月の第 1 週の週間電源運用計画を考える。

PV 大量導入時のシステムの安定度について考慮すべきであるということと、PV の出力を抑制する際に蓄電池や水素エネルギーなどの電力貯蔵設備について議論する必要があるという課題に対し、マネジメント手法の 1 つの指針として本研究の手法を用いることを提案する。

## Summary

In this paper, we propose a novel economic load dispatch control of power systems including the constraints on the transient stability in the optimal power generation mix in Kyushu region taking massive installation of photovoltaic (PV) system into consideration. According to the recent studies in this field, the extensive introduction of PV system affects the transient stability of the power system. The share of the PV system in the total power generation in Kyushu is expected to grow faster than that in other regions in Japan. In this study, we first divided Kyushu into 4 areas. Then we evaluated the power system stability of each area by using the network flow model, in which the constraints on the transient stability were taken into consideration. Then we clarified the optimal power generation mix, by minimizing the system's total cost with linear programming. Our results showed that the constraints on the transient stability affected the optimal power generation mix and caused the suppression of PV outputs.

## 目次

### 概要

1. 緒言	1
2. 九州地域の過渡安定度評価と運用計画の構築	2
2.1 九州地域のモデル化	2
2.2 過渡安定度の評価法	3
3. 線形計画法による定式化	4
4. 九州地域の評価の結果	6
4.1 経済的負荷配分モデルの比較	6
4.2 抑制量についての考察	6
5. 政策立案のための提案	7
参考文献	7

## 1. 緒言

低炭素社会を目指す国際状況において、太陽光発電（PV）の割合は増加する傾向にあるが、PV の増加によって系統の安定性が低下することがわかっている。日本においても固定価格買取制度（FIT）の影響によって PV の発電量が増加しており、特に九州地域において顕著である。九州電力管内では、最大需要 15GW 程度に対して、PV の容量については、既存の導入量と FIT により認定され導入が検討されている分を合わせると 19GW 程度になっている。このような状況において、近い将来に PV が九州電力管内の系統の安定性に対して影響を与えることは明らかである。

PV の予測の不確実性による安定性の低下については、既存の設備容量の予備力を評価して需給を一致させるという研究例がある。しかし、PV が大量に接続されたときの安定性について考慮した経済的負荷配分について考察している論文は殆どないため、本研究をするに至った。

本研究の手法は、大きく 2 つある。まず 1 つ目は、九州を 4 つの地域に分けて評価することで、地域ごとに PV がどの程度導入可能であるかの計算手法について提案すること。そして 2 つ目は、その手法を用いて主たる送電線ごとに過渡安定度を考慮した PV による有効電力に対する安定性の制約を与えた場合と与えない場合での PV の抑制量の違いを計算することである。

また、本研究の目的は、PV 大量導入時における、系統の安定性を考慮した経済的負荷配分モデルを開発し、そのモデルを用いて系統のマネジメント手法を提案することである。シナリオとしては、九州電力が発電設備接続可能量として掲げている容量である 8.17GW の PV が導入された場合の 5 月の第 1 週の週間電源運用計画を考える。

## 2. 九州地域の過渡安定度評価と運用計画の構築

### 2.1 九州地域のモデル化

本稿では、九州の地区ごとに PV の導入量によって安定度がどのように変化するかを計算する手法を示すために、WEST30 機モデル<sup>[1]</sup>を参考にして、九州電力関内の送電線と発電機をモデル化する。公開されているインピーダンスマップ<sup>[1]</sup>から、実際に九州の地図に WEST30 機モデルを当てはめると図 1 のようになると推定し、本稿ではこのモデルを用いて評価をする。

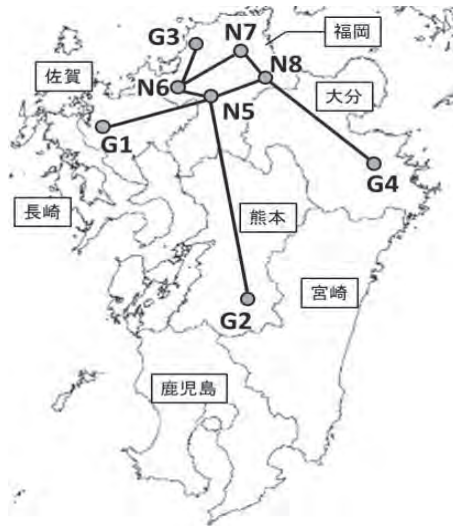


図 1 WEST30 機モデルから推定した九州のモデル

図 1 において、G1～G4 は発電機群を表し、N5～N8 は変電所のノードを表す。各発電機群のノードは、G1 が佐賀県と長崎県を合わせたもの、G2 が熊本県と宮崎県と鹿児島県を合わせたもの、G3 が福岡県、そして G4 が大分県の発電機の合計となっている。発電機群のノードは PV や風力発電 (WP) を含む発電機と需要家を持ち、変電所のノードは需要家だけを持つ。

PV と WP 以外の発電機の容量は九州電力のホームページ<sup>[2]</sup>から推定し、各ノードの PV と WP の容量については、九州全体の PV と WP のそれぞれの発電量に、固定価格買い取り制度のホームページ<sup>[3]</sup>に掲載されている県ごとの導入量の割合をかけることで外生的に与える。需要は WEST30 機モデルでの昼のピーク時の潮流図から、各ノードでの消費量を求め、その割合を九州全体の需要にかけることで計算をした。その PV と WP の発電機群ノードごとの割合を表 1 に示す。

表 1 PV と WP の発電機群ノードごとの割合

	G1	G2	G3	G4
PV	17%	45%	25%	13%
WP	32%	61%	4.5%	2.5%

## 2.2 過渡安定度の評価法

図 1 で示した九州のモデルにおいて、先行研究<sup>[4]</sup>で示されている一機無限大母線モデルを用いて、各発電機ノードにおける PV の出力を変化させていったときの過渡安定性を評価する。一機無限大母線モデルを図 2 に示す。このモデルにおいては、右端の無限大母線に接続しているため、PV や LOAD が変化しても、無限大母線における電圧と位相が影響を受けないという仮定をおいて分析している。本研究では、安定して運転している状態から事故が起こり一度三相地絡状態になった後に事故を遮断して、その後はずっと 1 回線で運転するという、システムにとって厳しい条件を考える。最悪の場合を想定することで制御の十分条件が与えられるために妥当だと判断した。解析方法は先行研究<sup>[4]</sup>を参考にして計算をした。

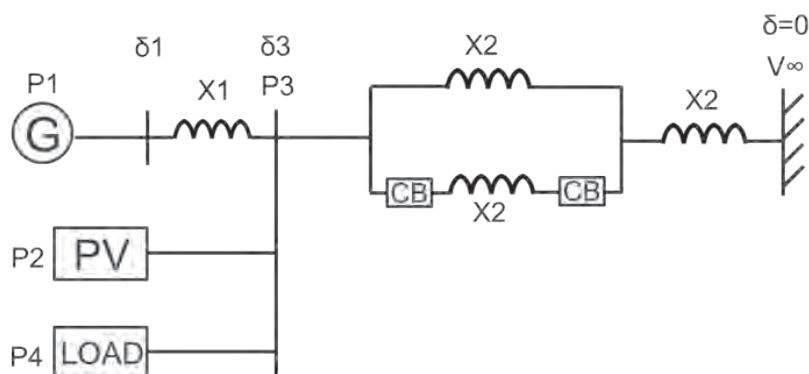


図 2 一機無限大母線モデル<sup>1)</sup>

本研究では、システムのマネジメント手法を提案するため、PV の導入量が増えた場合に同期発電機の容量をその分減らすという条件で計算をしており、同期機の出力は常に定格の 80% としている。

現実の送電システムを一機無限大母線モデルで近似することは難しい。ただし、ここでは同期発電機のような慣性を持たない太陽光発電システムが大量導入されることによる、過渡安定度への影響を推定するため、本モデルを導入した。更に、現実のシステムにおいては、太陽光発電システムによる有効電力が一定比率以上になり、過渡安定度に影響を及ぼすリスクを予防的に回避することを目的とする。そのため、本モデルで得られた過渡安定度の限界をもとに、安全性を考慮して、現実のシステムにおける太陽光発電からの有効電力を一定比率以下にする制約を設けることとした。

本モデルを用いて求めた、各発電機群ノードでの発電機の出力に対して PV が出力できる電力の割合を表 2 に示す。

表 2 各発電機群ノードでの発電機の出力に対する PV の出力の限界

G1	G2	G3	G4
76%	68%	46%	56%

<sup>1)</sup> G, 同期発電機、PV, 太陽光発電、LOAD, 負荷、CB, Circuit Breaker (高圧遮断器)。

### 3. 線形計画法による定式化

#### (1) 目的関数

本研究では目的関数として燃料コストを用い、線形計画法を用いて燃料コストの最小化をする解を求める。

$$\text{minimize TotalCost} = \sum_{i,g,h,d} \text{Cost}_{i,g,h,d}$$

( $\text{Cost}_{i,g,h,d}$ : d 曜日の h 時のノード i の電源 g での発電コスト[yen])

#### (2) 制約条件

本研究で考慮した主な制約条件を列挙する。

- ・ 需給バランス制約
- ・ 1 時間ごとの出力変化率の制約
- ・ 出力上限制約
- ・ 負荷追従運転制約
- ・ 供給予備率制約
- ・ 揚水式発電の貯水量制約
- ・ ネットワークの需給バランス制約
- ・ 過渡安定度の制約

これらの制約式の中で従来手法と異なる、ネットワークの需給バランス制約と過渡安定度の制約について説明をする。

#### (3) ネットワークの需給バランス制約

本研究では九州地域を 4 個の地域に分割したため、九州地域の中で電力の送電を考慮する必要がある。そこで、図 3 のように図 1 からネットワーク図だけを取り出した物を用いて、制約式について説明する。

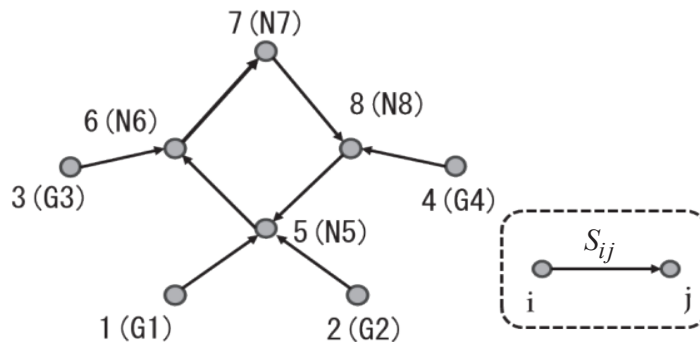


図 3 簡略化したネットワーク図と流量の定義

図 3 の点線の中に示したように、ノード i からノード j に流れる電力の流量を  $S_{ij}$  と定義する。さらに、電力の流れを図 3 の中の矢印の方向に固定すると、配列 L を用いて制約式は下記のように

に書くことができる<sup>2)</sup>。この式は、ノードごとの電力量の流量保存を意味し、全ての時間で満たされなければならない。

$$\sum_g O_{i,g} - D_i + E_i = \sum_j S_{ij} \times L(i,j)$$

ここで、

$$L(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T1 & T2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T8 \\ 0 & 0 & T3 & 0 & T5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T6 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T4 & 0 & 0 & T7 & 1 \end{bmatrix}$$

( $O_{i,g}$ : ノード  $i$  の電源  $g$  での発電量 [GW],  $D_i$ : ノード  $i$  での需要 [GW],  $E_i$ : ノード  $i$  での抑制量 [GW],  $T_i$ : ノード  $i$  での送電ロス を考慮した成分<sup>3)</sup>)

#### (4) 過渡安定度の制約式

表 2 で求めた各発電機ノードでの同期発電機の出力に対する PV の出力の限界の割合を用いて任意の時間において、同期発電機の出力に対する PV の出力の制約式を定めた。

$$\sum_{g \neq PV, WP} O_{i,g} \times PV\_rate \geq O_{i,PV}$$

ここで PV\_rate というのは表 2 の値であり、G1 では 0.76、G2 では 0.68、G3 では 0.46、G4 では 0.56 となっている。この PV\_rate は昼のピーク時の過渡安定度から求めたものであるが、本研究では昼のピーク時に安定性をもっとも低くなると仮定して、これよりも小さい割合で PV が出力をすれば安定性は保たれると考えた。

<sup>2)</sup> この場合、例えば、 $S_i = (S_{ij}) = (0,0,0,0,S_i,0,0,0)$  のようにベクトルで表現できる。

<sup>3)</sup> 例えば、送電ロスが 6% ならば、 $T_i=0.94$  となる。



## 4. 九州地域の評価の結果

### 4.1 経済的負荷配分モデルの比較

九州電力が発電設備接続可能量として掲げている容量である 8.17GW の PV が導入された場合の 5 月の第 1 週の週間電源運用計画を図 4 に示す。この節では過渡安定度の制約を与えない従来のモデルと過渡安定度の制約を与える提案手法の両方の結果を示す。それにより実際に PV の出力が抑制され、他の電源の出力がどのように変化したかを示す。図 4(a) が過渡安定度の制約を与えていないときの結果で、図 4(b) が制約を与えたときの結果となっている。図から過渡安定度の制約を与えることによって PV の出力が実際に抑制されていることがわかる。そして、制約を加えることによって、日中においては揚水式発電 (PmHD) の出力が減り、その分ガスコンバインドサイクル (GCC) の出力が増加していることがわかる。

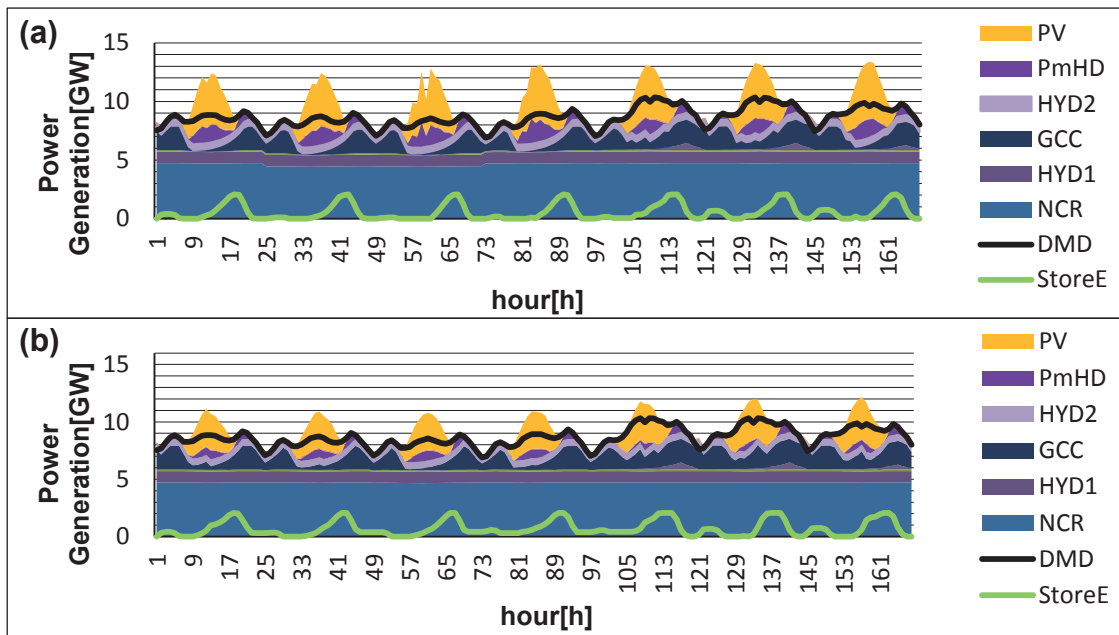


図 4 求めた週間電源運用計画 (a)過渡安定度の制約なし (b)過渡安定度の制約あり

(PV, 太陽光発電、PmHD, 揚水式水力発電、HYD2, 貯水池式水力発電、GCC, ガスコンバインドサイクル、HYD1, 自流水水力発電、NCR, 原子力発電、DMD, 電力需要、StoreE, 揚水式水力発電の貯水量)

### 4.2 抑制量についての考察

本節では 4.1 節での PV の抑制量を取り出して議論をする。図 5 に発電機群ノード G3 及び G4 の PV の出力の抑制量を示す。G1 と G2 では抑制が起こらなかったため、図には示していない。

G3 においては全ての日において PV の出力の 80% 以上を抑制してしまう結果になった。これは G3 のノードが LNG 火力と石油火力で構成されるとしたが、図 4 の結果ではその 2 つの発電がなされず、同期機の出力が小さいため、許容される PV の出力が極端に小さくなった結果だと説明できる。

また、G4 について説明をすると、抑制をしている日においては、G4 での PV のうち、40~70% 程度の出力を抑制し、5~7 日目においては抑制が全く出ないという結果になった。これは G4 の大部分がガスコンバインドサイクルであることが原因であり、5~7 日目においては図 4 からわかるようにガスコンバインドサイクルの出力が増えており、その結果として抑制がなくなったと説明できる。

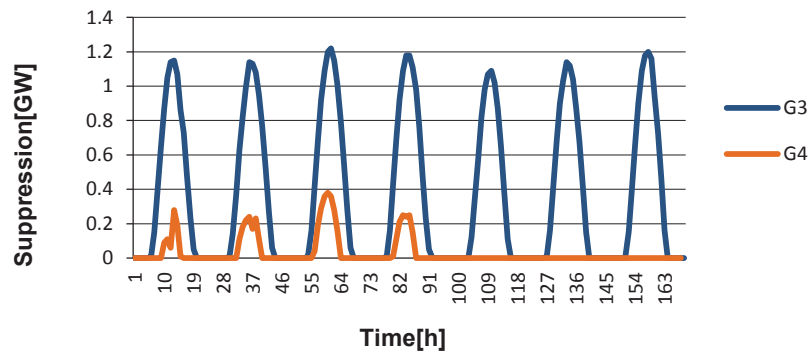


図 5 各発電機群ノードでの PV の出力の抑制量 (G1 と G2 は抑制なし)

## 5. 政策立案のための提案

再生可能エネルギーが系統に大量に接続された状況においては、現在とは異なるマネジメントをする必要がある。そのような状況を踏まえ、本研究では太陽光発電大量導入時において安全面の立場から過渡安定度を考慮した系統のマネジメント手法の提案をした。PV 大量導入時の系統の安定度について考慮すべきであるということ、PV の出力を抑制する際に蓄電池や水素エネルギーなどの電力貯蔵設備について議論する必要があるという課題に対し、マネジメント手法の 1 つの指針として本研究の手法を用いることを政策立案のための提案とする。

## 参考文献

- [1] 電力系統モデル標準化調査専門委員会編, 電力系統の標準モデル, 電気学会 (1999).
- [2] 九州電力株式会社 発電 URL, [http://www.kyuden.co.jp/effort\\_thirmal-power\\_index.html](http://www.kyuden.co.jp/effort_thirmal-power_index.html), 2015 年 12 月 15 日にアクセス.
- [3] 資源エネルギー庁 固定価格買取制度認定量 URL, [http://www.fit.go.jp/statistics/public\\_sp.html](http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html), 2015 年 12 月 15 日にアクセス.
- [4] 坂本尚也, 谷口治人, 太田豊, 中島達人, 千貫智幸, 「太陽光発電大量導入時の一機無限大母線系統の過渡安定度解析」, 電気学会論文誌 B, vol.132, No.1, pp9-15 (2012).

---

低炭素社会の実現に向けた  
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく  
イノベーション政策立案のための提案書

技術普及編

九州地域における太陽光発電大量導入と  
過渡安定度を考慮した電力システムの  
新しい経済的負荷配分制御の研究

平成 28 年 3 月

“Study on a Novel Economic Load Dispatch Control of Power Systems  
in Kyushu Region Taking Massive Installation of Solar Power Generation  
and Transient Stability into Consideration”

Strategy for Technology Dissemination,  
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action  
toward Low Carbon Societies,  
Center for Low Carbon Society Strategy,  
Japan Science and Technology Agency,  
2016.3

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

---

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 研究補助員 櫻木 政徳 (Masanori SAKURAGI)  
研究統括 松橋 隆治 (Ryuji MATSUHASHI)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階  
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp  
<http://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2016 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

---