

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24760223
研究課題名(和文) オンラインPV出力推定・短時間先変動予測を用いた先進的配電系統電圧マネジメント

研究課題名(英文) Advanced Voltage Management in Distribution Network Utilizing Online PV Output Estimation and Short-term Generation Fluctuation Forecast

研究代表者
原 亮一 (HARA, RYOICHI)
北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80361872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：PV大量導入を想定した、新しい配電系統電圧マネジメント手法として、(1) 研究代表者が開発した日射量の変動統計モデルを用いた、短時間先PV出力変動予測技術を開発した。また、予測の精度を向上させるために、直接観測することのできない現在のPV出力をオンラインで推定する手法を開発した。(2) PV出力変動予測情報に基づいた、予防的な配電系統電圧協調制御手法を開発した。(1)、(2)とも、その有効性を計算機シミュレーションにより検証した。

研究成果の概要(英文)：Novel voltage profile management technique considering massive PV installation was developed. In detailed, (1) Short-term PV output fluctuation forecast, which utilizes the statistics model of solar irradiation variation mode developed by our research group, was developed. Online estimation of PV output, which is not observed directly, was also developed to improve the short-term forecast accuracy. (2) Proactive voltage management in distribution network based on the short-term PV output fluctuation forecast was developed. Effectiveness of the above items (1) and (2) were verified through computational simulations.

研究分野：電力系統工学

キーワード：太陽光発電 電圧制御 配電系統

1. 研究開始当初の背景

エネルギー自給率の向上や環境負荷の低減などの理由から、太陽光発電（以下、PV）に対する期待が世界的に高まっている。我が国でも、2030年までに53GWの導入を目標として掲げている。大部分のPVは、一般住宅の屋上などに設置されるため、電力システムの中でも配電系統に大量に導入されることになる。天候、特に雲の影による影響を受けて大きく出力が変動する可能性のあるPVが配電系統に大量に連系（接続）されると、配電系統を流れる電力の量や向きが短期間に大きく変動し、結果的に供給電圧が大きく変動する、あるいは供給電圧が法令適正範囲を逸脱することを回避するためにPVが動作停止し発電量が低下する可能性が指摘されている。重要な社会基盤の一つである電力供給の品質確保のためにも、また、いまだ割高なPVの稼働率を高めるためにも、PVの大量導入時代に備えて、新しい配電系統の電圧マネジメント手法の開発が急務であるといえる。

2. 研究の目的

背景で述べた問題意識に基づき、PVを含む分散型電源が配電系統に大量に連系された場合の電圧管理手法について、多くの研究が国内外でなされている。しかしこれらの先行研究事例では、将来起こるPVの短時間出力変動は未知であると仮定しているものが多い。すなわち、PVの出力が変動し、配電系統の電圧が変動したことを観測してから、事後的に電圧管理のための対策を施しているといえる。これは、PV出力の短時間変動の予測が困難であることが原因である。言い換えると、PV出力変動を予測することができれば、その予測情報に基づき先行的に対策を打つことが可能となり、より高精度で効果的な電圧マネジメントが実現できるものと予想される。

そこで本研究では、PV大量導入を想定した、新しい配電系統電圧マネジメント手法の開発を目的として掲げた。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するために、本研究では次の2つの技術項目を開発すると共に、実データを用いた計算機シミュレーションによりその性能を評価した。

(1) 短時間先PV出力変動予測技術の開発

研究代表者らは、晴天指数の平均値から、日射量の変動の大きさを推計するための統計モデルを構築してきた。統計モデルのイメージは図1に示すが、時間帯と平均晴天指数を入力とし、短時間先の日射量予測分布を出力とするものである。ここで、晴天指数とは日射量における季節のトレンドを除去するために用いられるものであり、モデル生成の際にも日射量を晴天指数に変換して使用する。晴天指数は、次式に示すように日射量測

定値を大気外日射量で除すことで得られる。

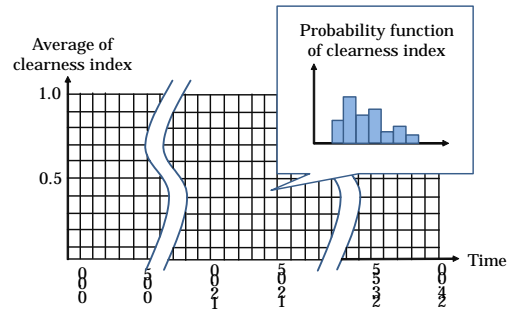


図1 日射量変動統計モデルのイメージ

後述するように、本統計モデルを用いるためには、現在のPV出力を入力する必要があるが、実際の配電システムでは、PV出力平均そのものを細かい時間間隔で計測してはいないため、本研究で開発する電圧管理手法を実システムに実装するためには、オンラインで観測される実潮流データ（PV出力と需要変動の合計）から、PV出力データを抽出する技術の開発が必要となる。複数の信号が混成した状態から、個別の信号を抽出する手法として、独立成分分析（ICA）という手法が信号解析の分野で広く用いられており、本研究でもこのICAを用いたPV出力のオンライン推定する手法を開発した。

(2) 予測情報に基づく予防的な配電系統電圧協調制御手法の開発

従来の配電系統では、変圧器のタップ切替やコンデンサの並解列などによる離散制御と、静止形無効電力補償装置（SVC）などの無効電力調整による連続制御の、協調制御がとられている。ただし、離散制御は変圧器タップやコンデンサ並解列用スイッチの機械的な動作を伴うため、その動作は遅く、また、寿命の関係から頻繁に動作させることもできない。そのため、従来の事後的な（電圧変動が発生してからそれを解消するような）制御手法では、どうしても連続制御の負担が大きくなってしまう。そこで本研究では、(1)で開発したPV出力変動予測情報に基づいた、予防的な配電系統電圧協調制御手法を開発した。

4. 研究成果

本研究で開発したLRT制御方式の基本的な考え方は、対象とする配電系統内の各ノード電圧が短い将来にどのように変動しうるのかを前述のPV出力変動統計モデルにより予測（短時間先電圧変動予測）し、その情報に基づき電圧逸脱の発生が予想される場合には先行的にLRTを動作させる点にある。図2に提案するLRT制御方式のイメージを示すが、同図よりわかるように、短時間先の電圧予測はあるひとつの点として与えられるわけではなく、一定の幅を持った確率分布として与える。その上で、短時間先にある一定以上の確率で電圧逸脱が発生すると予測

された場合に LRT を先行的に動作させる事を考えている

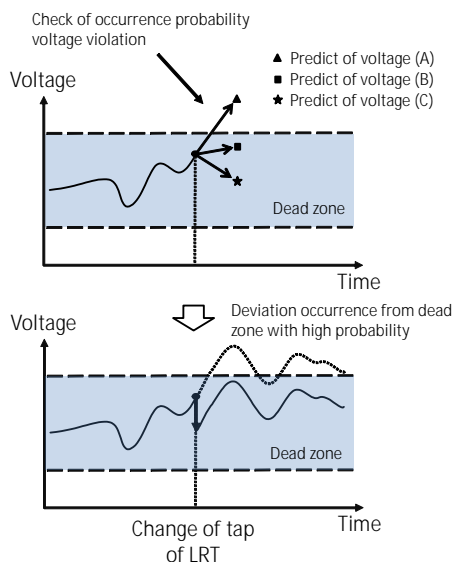


図2 開発手法のイメージ

以下に、各手法の詳細をまとめる。

(1) 短時間先 PV 出力変動予測技術の開発

本研究では、PV 出力変動に関する統計モデルへの入力データとして必要な PV 出力値を求めるために、以下で述べる PV 出力推定手法を開発した。この手法では、配電線を通る有効電力潮流 P_{net} [kW]と代表箇所 1 点における日射量計測値 R [kW/m²]を観測信号とし、負荷消費電力 P_{load} [kW]と PV 出力 P_{PV} [kW]を推定するものである。具体的には、各変数の間には次式の関係が成立するものと仮定して、独立成分分析 (ICA) により P_{load} と P_{PV} を推計する。

$$\begin{bmatrix} P_{net} \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{load} \\ R \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} P_{load} \\ R \end{bmatrix}$$

$$P_{PV} = P_{load} - P_{net}$$

ここで、比例定数 k は推定エリア内の PV の実効稼働容量 [kW/(kW/m²)]として本研究で定義した変数である。なお、上記第一式の行列を \mathbf{A} (ICA では混合行列と呼ばれる) に対し、白色化 (観測信号の共分散行列の固有値分解を用いて観測信号を無相関かつ分散を 1 にする線形変換) を適用すると、白色化後の混合行列は、白色化行列の成分のみを用いて表現することが可能となる。このことは、ICA の解法として有名な FastICA と同様の原理であり、本研究で対象としているオンラインでの PV 出力推定に利用可能な時間での推定を実現可能とする。

本研究で開発したオンライン PV 出力推定手法のイメージを図 3 に示す。時刻 t に、新たな有効電力潮流と日射量が計測された場

合に、その最新のデータを含む過去 $width$ [min] (以下、評価時間窓とする) の長さの時系列データに対して ICA を適用する。ICA を適用すると評価時間窓の長さ分の時系列データを得られるが、その中の時刻 t (最終時点) のデータを推定結果とする。このような作業を新たなデータが得られるたびに実施することで、連続的に推定結果を得る。

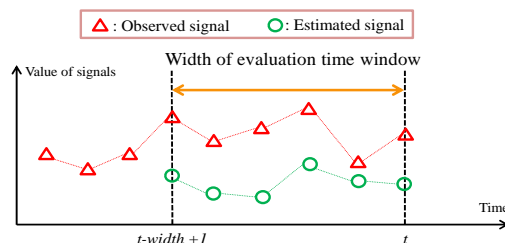


図3 オンライン推定のイメージ

そのため、提案手法では新たな観測データを入力する都度、新たな実効稼働容量 k を求めることになる。しかし、 k の値は前後の近い時間帯では大きく変化するものではなく、近い値をとることが多いと考えられる。そこで提案手法では、過去の直近数時間、あるいは過去 1 ヶ月間の同時帯に実施した推定結果のうち、PV 出力が精度良く推定できると思われる、 R の標準偏差が大きな評価窓に対して得られた k を持って代用することで、ICA そのものの省略による計算時間の短縮と精度向上の両面を狙っている。なお、出力推定精度と R の標準偏差の統計的關係についても、本研究課題の中で実施したシミュレーション結果より経験的に得られた知見である。

ここでは、出力推定の例として、ある晴天日の出力推定結果を図 4、5 に示す。同図より、提案手法により P_{load} 、 P_{PV} の変動を良く捉えた推定がなされている様子が確認できる。なお、最終的な平均推定精度は晴天日で 9.9%、曇天時で 4.4% (いずれも絶対値誤差率) である。

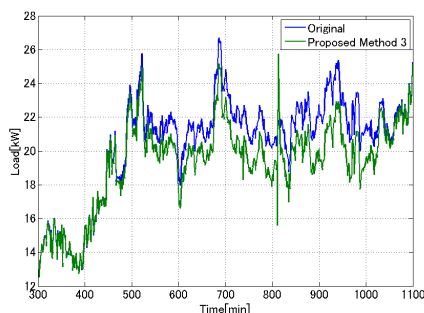


図4 PV 出力推定の例 (P_{load})

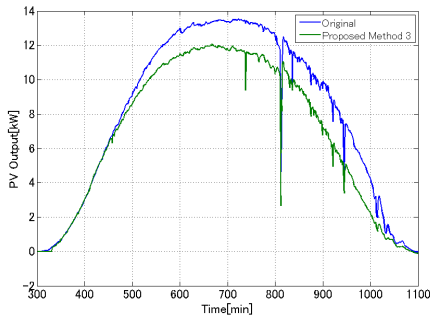


図5 PV出力推定の例 (P_{PV})

(2) 予測情報に基づく予防的な配電系統電圧協調制御手法の開発

提案する LRT 制御方式の流れを図 6 に示す。以下、同図に沿って詳細を述べる。

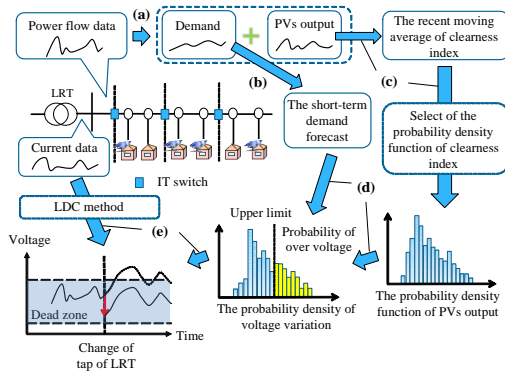


図6 開発した LRT 制御方式

(手順 1) 電力潮流情報の取得と分離 (1) で開発したオンライン PV 出力推定手法により、PV 出力と負荷を推定する (図 6(a))。この推定に基づき、次に述べるように短時間先の負荷と PV 出力を予測する。

(手順 2) 短時間先負荷の予測 前述の通り、本研究では負荷ならびに PV 出力予測を LRT の先行動作に活用するが、予測の対象は短時間(数分から数十分程度)で充分である。そのような期間内での負荷変動は PV 出力変動と比較してかなり小さいと考えられるため、提案方式では手順 1 で推定された各情報収集区間の、負荷時系列データの直近数分間における移動平均をとり、それを情報収集区間内の需要家の契約電力で按分することで、各需要家の短時間先負荷予測値とする (図 6(b))。

(手順 3) 日射量変動統計モデルによる PV 出力変動予測 まず、(手順 1) で推定された PV 出力変動分の合計における直近移動平均値を算出する。次にこれを情報収集区間内に設置されている PV の総定格容量ならびに同時間帯における大気外日射量で除すことで、晴天指数の移動平均値に換算する。次に、この値が統計モデルの平均晴天指数の 10 区間のうちどこに属するか、現在の時間が確率

関数モデルのどの時間帯に属しているかをそれぞれ判別し、該当する晴天指数の確率分布を抽出する (図 6(c))。最後に、この晴天指数の確率分布に大気外日射量を乗じ、さらに情報区間内の各ノードに接続されている PV の定格容量を乗じることで、各ノードにおける PV の短時間先出力変動予測分布を得る。つまり、PV の短時間先変動予測はある値として得られるわけではなく、幅を持った確率分布となる。

(手順 4) 短時間先電圧変動予測の算出 手順 2, 3 から得られた短時間先の負荷予測値と、PV 出力変動予測分布におけるすべての組み合わせについて潮流計算を行うことにより、短時間先の電圧変動予測分布を生成することができる (図 6(d))。しかし、提案手法では計算時間を短縮するために、基本的には PV 出力が大きいほど電圧が上昇するという関係を利用することで PV 出力分布の代表値を抽出し、その値でのみ潮流計算を行うこととする。具体的な PV 出力代表値の抽出方法を図 7 に示す。同図のように、LRT 不感帯における下限逸脱および上限逸脱の判断に対し、図 7 のようにそれぞれ累積確率を取り、その累積確率が LRT 動作の判断確率に達した点での PV 出力を取り出す。すなわち、下限逸脱と上限逸脱の判断のために、2 つの代表値が取り出される。そして、それぞれの値および負荷予測値を用いて潮流計算を行うことで、後述する LRT のタップ切り替え判断に必要な各ノード電圧が算出される。

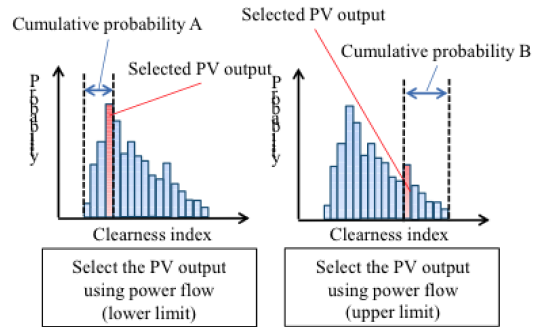


図7 PV出力代表値の抽出

(手順 5) LRT のタップ切り替え判定 LRT のタップを動作させるかどうかを、以下の二段階の評価結果に基づき判断する。まず、手順 4 で求めた各ノード電圧の代表値が LRT 動作判定の閾値を超えているかどうか、従来の LDC 方式により (図 6(e))、LRT のタップ切り替えの必要性を判断する。短時間先の各ノード電圧の代表値、LDC 方式のいずれか、もしくは両者においてタップ切り替えを行うべきだと判断した場合には、タップ切り替えが行われたと仮定した状態について手順 4 の手順に沿って再び潮流計算を行い、切り替え後の電圧逸

脱を検証する。その結果，他の電圧逸脱を誘発する可能性が低いと判断された場合には，実際にタップ切り替えを行う。ただし，PV が発電しない夜間などの時間帯では従来通り LDC 方式での制御を行うものとする。

開発手法の有効性については，計算機上のシミュレーションにより検証した。シミュレーションには，図 8，9 に示す典型的な配電システムモデルを用いた。

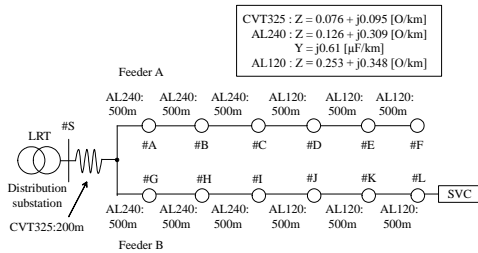


図 8 高圧配電システムモデル

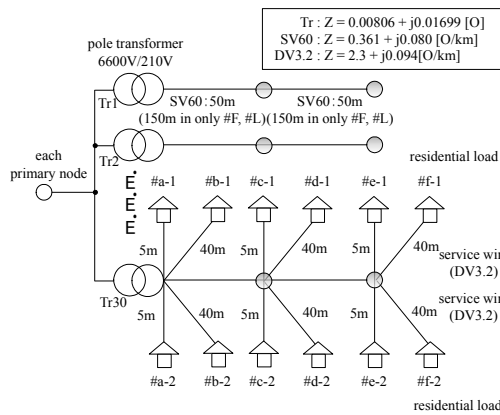
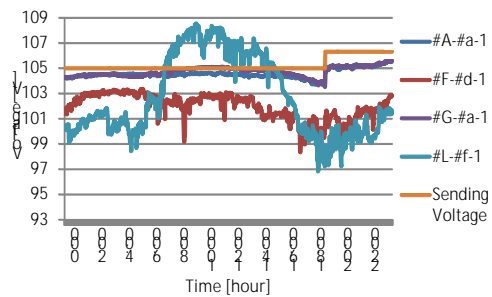


図 9 低圧配電システムモデル

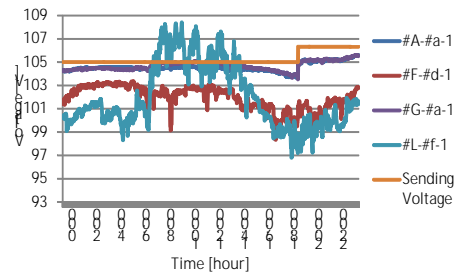
図 10 および図 11 に従来の LDC 方式のみを適用した場合と，提案方式を採用した場合の，受電電圧および LRT 送り出し電圧の時間推移を天候別に示す。なお，これらの結果は SVC が Feeder B 末端に設置される前の結果であり，図中凡例の #A-#a-1 という表記は，高圧ノード #A に接続されている柱上変圧器下の #a-1 にある需要家の受電電圧を意味する。図 9 に示すシステムモデルでは #A-#a-1 に該当する住宅はシステムモデル内に 30 軒存在するが，ここでは最も電圧変動が厳しい住宅を選出している。さらに，その中でも各 Feeder でもっとも電圧上昇が厳しい住宅，もっとも電圧降下が厳しい住宅として #A-#a-1，#F-#d-1，#G-#A-1，#L-#f-1 を代表ノードとして記載している。

図 10 より，従来 LDC 方式では晴れ・薄曇りどちらのケースにおいても LRT が必要な時間帯に動作せず，電圧適正範囲である 95V ~ 107V を逸脱を引き起こしてしま

っていることがわかる。一方，図 11 を見ると，提案方式においてはいずれの天候においても LRT が電圧逸脱を回避するように動作していることがわかる。ここで，天候に関わらずそれぞれの時間帯において，送り出し電圧を高くするための LRT 動作は LDC 方式による判断，送り出し電圧を低くするための LRT 動作は提案方式の判断で検討されていることを確認している。これは，PV の出力変動で急に生じる局所的な電圧上昇に対しては提案方式で電圧逸脱を回避するように動作し，システム全体から見た電圧裕度に対しては補完的に LDC 方式で動作していると捉えることができる。天候が晴れのケースでは，これらの方式がうまく協調し完全に電圧逸脱を回避できていることがわかる。

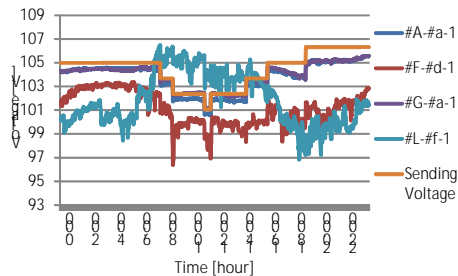


(快晴日)

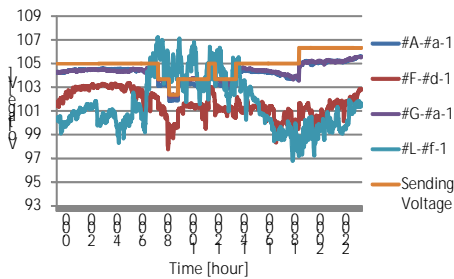


(曇天日)

図 10 従来 LRT 方式による電圧制御結果



(晴天日)



曇天日

図 11 開発手法による電圧制御結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

赤塚元軌, 原亮一, 北裕幸, 福島知之, 坂原淳史, 松本孝俊: 「単地点での日射量時系列に基づく 10km 四方内の空間平均日射量時系列の生成および変動幅出現頻度による評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 134, No. 4, pp. 311-319 (2014)

[学会発表](計 6 件)

(1) Zheng Huang, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita: "Intelligent Flow Algorithm for Time-sequential Reconfiguration of Distribution System with Interconnection of Distributed Generators", 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2014 年 9 月 10 日~12 日, 同志社大学(京都府京田辺)

(2) 島津和大, 原亮一, 北裕幸, 田中英一: 「太陽光発電の短時間先出力変動予測を用いた LRT 制御手法 ~ 取得情報量低減時における制御効果の検討 ~」, 平成 25 年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2013 年 10 月 19 日~20 日, 室蘭工業大学(北海道室蘭市)

(3) 島津和大, 原亮一, 北裕幸, 田中英一: 「配電系統における太陽光発電大量導入時の短時間先電圧変動予測を用いた LRT 制御手法」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 2013 年 9 月 11 日~13 日, 九州工業大学(福岡県北九州市)

(4) 島津和大, 原亮一, 北裕幸, 田中英一: 「太陽光発電の短時間先出力予測を用いた LRT 制御手法 ~ SVC 併用時の定量的評価 ~」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2013 年 8 月 27 日~29 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)

(5) 島津和大, 原亮一, 北裕幸, 田中英一: 「配電系統における太陽光発電の短時間先出力変動予測を用いた LRT 制御手法」, 平成 25 年電気学会全国大会, 2013 年 03 月 20 日~22 日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

(6) 島津和大, 原亮一, 北裕幸, 田中英一: 「配

電系統における太陽光発電の短時間先出力変動予測を用いた LRT と SVC の協調制御手法」, 平成 24 年電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012 年 10 月 20 日~21 日, 北海道大学(北海道札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 亮一 (HARA RYOICHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号: 80361872