

ファジィ推論を適用した揚水発電所の週間運用策定手法の開発

石丸 将愛^{*1} 平子 修二^{*2}

Development of a Weekly Operation Method for a Pumped Storage Hydro Power Plant by Fuzzy Reasoning

by

Masachika ISHIMARU^{*1} and Shuji HIRAKO^{*2}

(Received on Jun. 19, 2015 and accepted on Jan. 07, 2016)

Abstract

“The Act on Special Measures Concerning Procurement of Electricity from Renewable Energy Sources by Electricity Utilities” was enacted in August 2011 in part to accelerate the interconnection of photovoltaic power generation. Some electric power companies have a trial calculation that computes photovoltaic power generation output will exceed the total demand for power. In such cases, an operation in which pumped storage hydro power plants pump up water to the upper reservoir during the daytime has been proposed.

A conventional practice concerning pumped storage hydro power plants is to attach importance to economical efficiency. Pumped storage hydro power plants pump up water by low cost electricity generated at midnight and generate electricity for peak demand in a day. However, after interconnecting large amounts of photovoltaic power, the output of a pumped storage hydro power plant is determined in terms of both the extent of demand and the output of photovoltaic power generation. In such a case, the pumped storage hydro power plant may pump up water by using electricity from photovoltaic power generated during the daytime. Therefore, a new operation method for pumped storage hydro power plants based on demand and photovoltaic power generation is required. This paper proposes a weekly operation method of a pumped storage hydro power plant utilizing large amounts of interconnected photovoltaic power generation sources and the Fuzzy reasoning method. This paper has verified the efficiency of the proposed method using simulations.

Keywords: Renewable energy, Pumped storage hydro power plant, Weekly operation, Fuzzy reasoning, Photovoltaic (PV) power generation

1. はじめに

日本の電力供給は原子力発電の推進を方針転換し、化石燃料による発電の維持・継続を余儀なくされている。しかしながら、CO₂排出規制を考慮すると、石炭やLNGによる発電に頼ることは避けなければならない。このような状況のなか、クリーンな再生可能エネルギーを利用した発電が注目されている。再生可能エネルギーとは、自然界で繰り返し起こる現象から取り出せるエネルギー源¹⁾であり、その代表例に太陽光発電や風力発電、地熱発電等がある。これらの再生可能エネルギーによる発電は、2011年に制定された「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」により、その普及が進んでいる。しかしながら、太陽光発電や風力発電からの出力は、天候により大きく変動するため、これらの変動電源が電力系統に大量に連系された場合、電圧や周波数、その他電力の安定供給に影響が生じることが懸念されている。

経済産業省は、各電力会社における接続可能な再生可能容量を試算している²⁾。この試算においては、太陽光と風力を合算した再生可能エネルギー導入量は、東北電力、中国電力および九州電力管内において、太陽光発電の接続可能量が膨大になると試算されており、中国電力と九州電力に至っては、昼間最低負荷量をも上回ると試算されている。このような状況で、大量の太陽光発電が導入された際には、LFC調整力が低下することが問題となっている。LFCとは、電力会社が自社の電力系統内の負荷変動に起因した周波数変動を一定の範囲内に収めるため、系統内の発電機出力を増減させて行う制御である。

Fig.1に負荷曲線とその需要を賄うであろう電源の一例を示す。Fig.1からも明らかなように、太陽光発電は高需要時間帯となる昼間に出力が最大となる（晴天時を仮定）ため、系統電源の視点からは、昼間需要を肩代わりしてもらうことで、発電コストの低下というメリットを享受できる一方で、LFC調整力としての系統電源の出力低下を招くことがデメリットとして挙げられる。また、休日の昼間のように、太陽光発電が普段から需要が低い時間帯に大量に発電すると、供給力過多となる。このと

*1 工学部電気電子工学科専任講師

*2 工学部電気電子工学科科学部生

き、太陽光発電の出力抑制が検討されているが、太陽光発電事業者には不満が残ることが予想される。その対策として揚水発電所の昼間揚水が提案・検討されている²⁾。

これまでの揚水発電所は、経済性を重視した運用がなされてきた。つまり、低コストの深夜電力で揚水（深夜電力は原子力発電および新鋭高効率火力）することで、需要曲線のボトムアップに寄与し、高コスト電源が稼働する需要ピーク時間帯に発電することで、低コスト化に貢献してきた。

一方、Fig.1 に示された揚水発電所の運用は、需要量と太陽光発電の出力を考慮しながら、出力値を決定することとなる。このとき、LFC 調整量を確保することが望ましいため、これまで昼間は発電一辺倒で良かったはずが、揚水することも考えられる。一方、天候が悪ければ、これまでどおりのピーク需要のための発電も選択肢として残しておかなければならない。また、太陽光発電の電力価格を考慮すると、高価な太陽光発電を利用した揚水は、揚水機の総合効率を考慮すると、最も高価な電源となる。したがって、経済的には発電する理由が存在しない電源となり、昼間の揚水は、なるべく避けたい運転となる。このような理由から、これまでのような経済運用ではなく、系統需要と太陽光発電出力、さらには揚水上池の貯水量をパラメータとした運用が望まれる。

揚水発電所の運用は、週間単位で行われることが多い³⁾。需要を週間で見ると、週末には需要が低い傾向があるため、平日のピーク需要を賄うために使用した水を、需要の低い深夜時間帯に少しずつ揚水し、週末で満水近くまで戻すという貯水池運用が考えられる。Fig.2 に揚水発電所の週間運用のイメージを示す。Fig.2 の上段は電力系統需要であり、中段は揚水発電所の上池貯水量、下段は太陽光発電出力（天候による発電量の差異をイメージで表現）である。上記の経済運用が成り立っている前提であれば、非常に効率的な運用となる。しかし、Fig.2 の下段のような太陽光発電が大量導入された場合、このようなシステムティックな運用は困難となる。したがって、太陽光発電が大量に導入された場合の効果的な揚水発電所の運用方法が望まれる。

新しい揚水発電所の運用パラメータである需要の高低、太陽光発電出力の高低、上池貯水残量の高低は、いくつから高い（または低い）が決めづらく、定性的になる。太陽光発電が導入された後の揚水発電所運用では、このような多数のパラメータの下での意思決定が求められる。そのような問題には、ファジィ推論を使用し、曖昧さをもたせた運用意思決定法が有効であると考えられる。

本論文では、太陽光発電が大量に系統に導入された場合を想定し、需要と太陽光発電出力を考慮した揚水発電所の出力を決定する方法を提案する。具体的には、需要と太陽光発電出力および揚水発電所の上池残量をパラメータとして適切な発電出力（もしくは揚水運転量）を計算する手法として、ファジィ推論を適用した。その後、ファジィ推論が定性的である一方で、定量的になりづらい曖昧さ含んだ揚水発電所運用に対しての適用可能性を検証した。

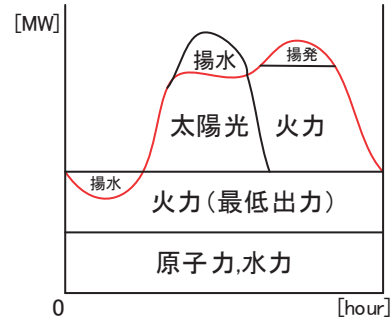


Fig. 1 Load Curve & Generation Types (文献[2]より作成)

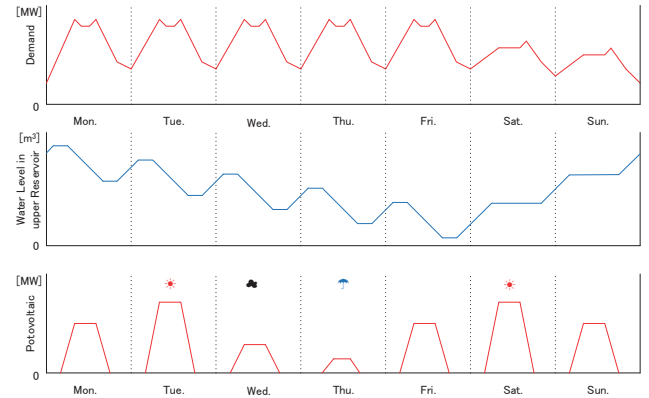


Fig. 2 Weekly Operation of Upper Reservoir & Photovoltaic Power Generation Output Image

2. ファジィ推論

2.1 ファジィ理論とメンバシップ関数

揚水発電所は、「一日のうち、需要が高い時間帯に発電運転し、需要が低い時間帯に揚水運転する」。この表現は、揚水発電所をある程度正しく表現しているが、この指示を受けて、揚水発電所の運転員が発電/揚水運転することは不可能である。言うまでもなく、需要が「高い」のは何 MW 以上なのか、または、需要が「低い」のは何時以降なのかといった定量的な境界が不明確だからである。そこで、「高い/低い」といった曖昧さを持つパラメータを定量的に表現しようとするのがファジィ理論である⁴⁾。

Fig.3 に日負荷曲線の例を示す。この曲線において、「高需要」の領域は、見る人によって異なるであろう。しかし、極端に異なることは少なく、概ね Fig.3 内の左側に示したようになるであろうが、境界が不明確になることが予想される。このように感覚的に「高い」「低い」と感

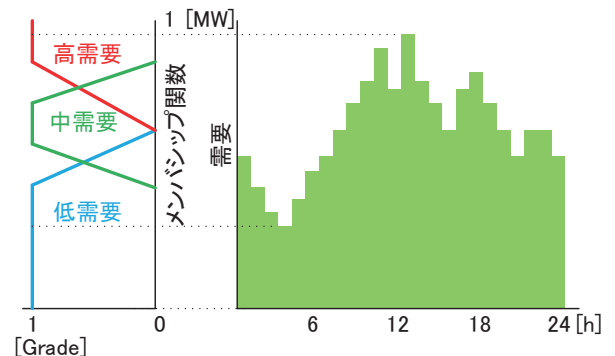


Fig. 3 Demand Curve & Membership Functions

じる「度合い」を定義したものがメンバシップ関数である。また、この「度合い」はグレードと呼ばれる。

2.2 ファジィ推論と IF-THEN ルール

ファジィ理論を応用した例に、ファジィ制御 (Fuzzy Control) がある。ファジィ制御は、制御アルゴリズムを IF-THEN 形式のファジィ制御規則と呼ばれる曖昧な入出力関係で記述するものであり、エキスパートシステムの先駆けとも言える。この IF-THEN ルール (2 次元の例) を以下に示す。

Rule 1 : if x_1 is A_{11} & if x_2 is A_{12} then y is B_1

Rule 2 : if x_1 is A_{21} & if x_2 is A_{22} then y is B_2

上式の if 部は前件部、then 部は後件部と呼んで区別される。ここで、 x_i が入力変数であり、 y は出力変数である。また、 A_{ij} は、 x_i がとるファジィ値であり、前述のメンバシップ関数で表現される。つまり、 A_{ij} は前件部のメンバシップ関数であり、 B_i は後件部のメンバシップ関数である。ファジィ制御は、このファジィ制御規則の集合体で構成され、最終的な制御出力はファジィ推論 (Fuzzy Reasoning) によって計算される。ファジィ推論は、以下の三段階で算出される。

- 1) 与えられた入力に対する各ルールの前件部の適合度を求める
- 2) 1) で求めた適合度を基に、各ルールの後件部の推論結果を求める
- 3) 各ルールの推論結果を合成し、その重心を算出し、出力値とする

まず、入力値 $x_1=X_1$ 、 $x_2=X_2$ と決まったとする。この入力値 X_1 および X_2 が Rule 1, 2 の前件部の条件に対する適応度を以下の式で計算する。

$$W_i = \min[A_{i1}(X_1), A_{i2}(X_2)] \quad (1)$$

ここで、 $A_{ij}(X)$ は、入力値が X のときのメンバシップ関数 A_{ij} のグレード値であり、 W_i は Rule i の適応度である。

次に、各 Rule の適応度と後件部のメンバシップ関数から、推論結果 $B_i(y)$ を導く。

$$B_i(y) = \min[W_i, B_i(y)] \quad (2)$$

この推論結果 $B_i(y)$ は、Rule の本数だけ存在するため、最終的な推論結果を次式により決定する。

$$B_{12}(y) = \max[B_1(y), B_2(y)] \quad (3)$$

上記の推論結果は、メンバシップ関数の形式で導出されているため、ファジィ集合から確定値に変換する操作 (非ファジィ化) をする必要がある。本研究では、非ファジィ化 (defuzzification) の方法として、以下の重心計算を用いた。

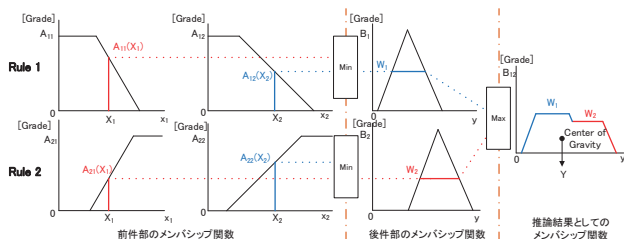


Fig. 4 Fuzzy Reasoning and Defuzzification

$$y = \frac{\int y B_{12}(y) dy}{\int B_{12}(y) dy} \quad (4)$$

これらの処理のイメージを Fig.4 に示す。

3. 揚水発電所出力算出へのファジィ推論適用

3.1 需要メンバシップ関数 (前件部)

Fig.3 に需要のメンバシップ関数のイメージを示した。しかし、本研究では、揚水発電所を制御対象としているため、「中需要」に対する操作は必要ない。そのため、中需要を省略することでモデルを簡略化した。本研究で使った需要メンバシップ関数を Fig.5 (上段) に示す。

3.2 太陽光発電出力メンバシップ関数 (前件部)

太陽光発電出力メンバシップ関数を Fig.5 (中段) に示す。太陽光発電出力は、高出力(High)、中出力(Middle)、低出力(Low)の 3 パターンとした。

3.3 上池貯水量メンバシップ関数 (前件部)

上池貯水量のメンバシップ関数を Fig.5 (下段) に示す。上池の貯水量は、水位の高低 (High/Low) と中間に分類した。貯水量は、High⇒発電方向、Low⇒揚水方向に運転という揚水発電所の運用に直結しているため、中間はどちらの方向にも運転可能という意味を考慮して、中間 (Neutral) と呼ぶこととした。また、貯水量は、発電できるエネルギー量として単位 [MWh] で管理する。

3.4 揚水発電所出力メンバシップ関数 (後件部)

揚水発電所の出力は、発電運転/揚水運転と、どちらもしない (停止) が考えられるが、高需要かつ太陽光出力：低のように、積極的に発電しなければならない場合や、上池貯水量を減らしたい場合および、逆に上池残量が低い状況での大量発電要請時に、やや発電気味で運転など、きめ細かい設定が必要となる。同様に、揚水の場合も「積極的に揚水」、「通常に揚水」、「やや揚水」が考えられる。

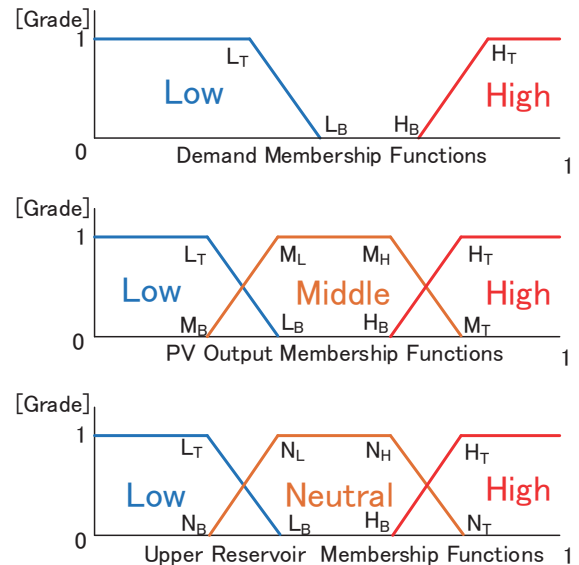


Fig. 5 Membership Functions in Proposed Method

本研究では、これらの事情を考慮し、以下の7パターンのメンバシップ関数を定義した。

- 1) Pumped Up Positively
- 2) Pumped Up Normally
- 3) Pumped Up Somewhat
- 4) Zero
- 5) Generation Somewhat
- 6) Generation Normally
- 7) Generation Positively

これらのメンバシップ関数を Fig.6 に示す。

3.5 揚水発電所運用のための IF-THEN ルール

揚水発電所運用のためには、ある時刻での需要[MW]、太陽光発電出力[MW]、上池貯水量[MWh]の組み合わせから考えられる IF-THEN ルールを設定する必要がある。メンバシップ関数がそれぞれ、需要が2パターン（High /

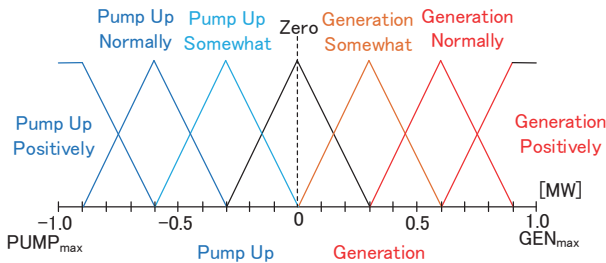


Fig. 6 Fuzzy Label of Pumped Storage Hydro Power Output

Low), 太陽光発電出力が3パターン（High / Middle / Low), 貯水量が3パターン（High / Neutral / Low) であるため、計 18 本の IF-THEN ルールが用意できる。

揚水発電所は、これまで需要量と発電コストから、その運用方針が決定されてきた。したがって、夜間に揚水、昼間ピークは発電となる。しかし、太陽光発電が大量導入されると、昼間であっても、太陽光発電出力が高ければ揚水運転となる。しかも、太陽光発電出力が低ければこれまでどおりのピーク需要を賄う発電運転をする。したがって、太陽発電の従者のような運転を強いられる。また、上池貯水量次第では、それもままならなくなるため、上池貯水量も必須のパラメータとなる。さらには、調整力確保のための揚水運転なども考えられる。

一方で、コスト面に視点を移すと、高価な太陽光発電出力で揚水した電力は、最高の価格となり、それを使用して発電するに見合う時間帯は存在しないため、経済性では運転が不可能となる。したがって、昼間の揚水運転は最小限にし、深夜時間帯もしくは休日での揚水運転が望ましいことは、これまでどおりである。このような定性的な運用意思はあっても、明確な運用数値目標が決定しづらい状況を IF-THEN ルールで記述できることが、本研究でファジィ推論を揚水発電所に適用した理由である。この IF-THEN ルールとそのときの取る後件部のメンバシップ関数を Table 1 に示す。Table 1 には揚水発電所運転をその動作をさせるに至った意思決定過程も明記した。

Table 1. IF-THEN Rules in Pumped Storage Hydro Power Plant

Rule No.	Demand Level	Photovoltaic Output Level	Upper Reservoir Level	Pumped Storage Hydro Power Plant	Decision Making of Operation	Weather or time zone
1	High	High	High	Zero	Without Operation (should be avoided)	Fine day
2	High	High	Neutral	Pump up Somewhat	To keep Regulation Ability (to avoid storage by High Priced Electricity)	
3	High	High	Low	Pump up Normally	To keep Regulation Ability	
4	High	Middle	High	Generation Positively	To meet High Demand	Cloudy day
5	High	Middle	Neutral	Generation Normally	To meet High Demand	
6	High	Middle	Low	Generation Somewhat	To meet High Demand (Caution for Reservoir Level)	
7	High	Low	High	Generation Positively	Role of Peak Gen.	Rainy day
8	High	Low	Neutral	Generation Normally	Role of Peak Gen.	
9	High	Low	Low	Generation Somewhat	Role of Peak Generator (Caution for Reservoir Level)	
10	Low	High	High	Zero	Without Operation (should be avoided)	Fine day in Week end
11	Low	High	Neutral	Pump Up Somewhat	To keep Regulation Ability (to avoid storage by High Priced Electricity)	
12	Low	High	Low	Pump Up Positively	Role of Storage Devices	
13	Low	Middle	High	Zero	Ready for Tomorrow (to avoid storage by High Priced Electricity)	Cloudy day in Week end
14	Low	Middle	Neutral	Pump up Somewhat	To keep Regulation Ability (to avoid storage by High Priced Electricity)	
15	Low	Middle	Low	Pump Up Normally	To keep Regulation Ability	
16	Low	Low	High	Zero	Ready for Tomorrow (lose an opportunity to storage Electricity)	Mid-Night or Rainy day in Week end
17	Low	Low	Neutral	Pump Up Normally	Economical pumped up using Base Gen.	
18	Low	Low	Low	Pump Up Positively	Economical pumped up using Base Gen.	

4. 揚水発電所の週間運用シミュレーション

4.1 東北電力需要データ

本研究では、揚水発電所の週間運用シミュレーションをするにあたり、東北電力株式会社の需要データ⁵⁾を使用することとした。需要データは直近である2014年の1年間を使用した。そのうち、夏季、冬季および春・秋季の特徴的な一週間データをFig.7に示す。

4.2 東北電力揚水発電所（第二沼沢発電所）

前述のように、東北電力需要を想定したため、揚水発電所も東北電力株式会社の揚水発電所である第二沼沢発電所（定格出力460.0[MW]）を想定した。そのため、上池貯水量は電力量で表示して34,000[MWh]とした²⁾。また、揚水機は可変速揚水機と仮定し、総合効率は70[%]と設定した。

4.3 東海大学18号館屋上太陽光発電データ

太陽光発電の定格出力[MW]は、東北電力が試算した太陽光接続可能量である5,500[MW]を想定した²⁾。しかし、需要データのように出力の実測データはないため、東海大学18号館屋上太陽光発電の出力データを取得し、使用することとした。18号館屋上太陽光発電の定格出力は5.5[kW]であるため、太陽光発電出力の時系列データを定格出力で除した発電比率として設定した。同時刻の東北電力管内での太陽光発電は、定格出力を接続可能量とみなし、この比率で発電するものとみなして使用した。Fig.8に本学18号館屋上太陽光発電電力量[kWh]を示す。

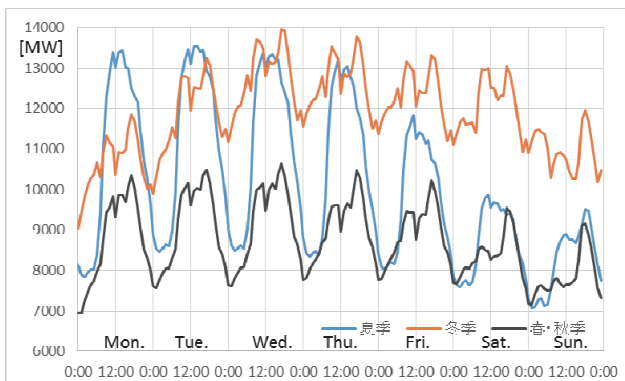


Fig. 7 Weekly Demand in Tohoku Area, 2014

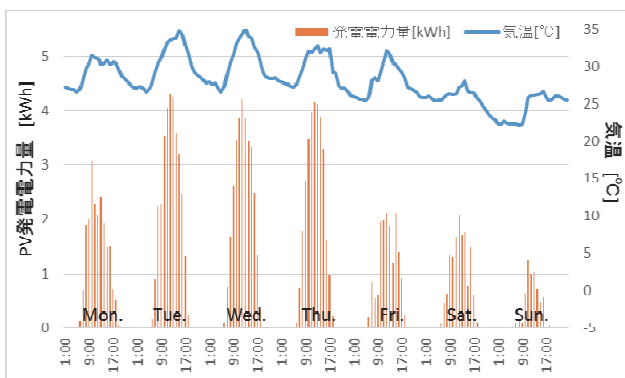


Fig. 8 Weekly PV output & Temperature on August 4, 2014

4.4 8月4日の週のシミュレーション

前述の東北電力の夏季需要（図7夏季を参照）を使用して、前述の設定のもと、揚水発電所の運用シミュレーションを行った。対象とした需要および同時刻の東北電力管内に連系される太陽光発電出力はそれぞれ予測値とし、その予測値から発電出力を決定し、揚水発電所の運用をするものとする。本研究においては、需要および太陽光発電出力の予測精度は高いものとし、揚水発電所の出力には予測誤差の影響はないものとする。上池貯水量が50[%]から週間運用が開始された場合を、太陽光出力と併せてFig.9.2に示す。揚水発電出力（右側縦軸）の0[MW]を境に、上側（出力:正）で発電運転、下側（出力:負）で揚水運転である。

8月4日の週は、平日需要の高低差が激しく、休日需要は全体的に低いという典型的な夏季の週間パターンである（Fig.9.1 参照）。シミュレーションでは、月曜の太陽光発電出力が若干低いため、発電運転を行っている。また、夜間の安価な電源を使用して揚水している（従来どおりの運転が可能）。翌日以降は、需要量が前日同様であるのに対し、太陽光発電が前日と比して出力を大きくしたため、昼間にも揚水運転していることが確認される（太陽光発電大量導入後の新しい揚水発電所運転が可能）。

また、休日は需要が低いため、揚水運転し、翌週のための貯水に努めていることが確認される。

次に、少し過酷な状況として、上池貯水量が極端に多い場合、逆に少ない場合を初期値に選んで、同様のシミュレーションを行った。

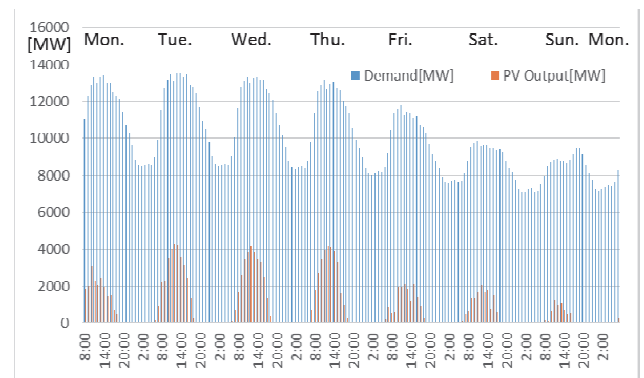


Fig. 9.1 Weekly Demand and Photovoltaic Power Generation on August 4, 2014

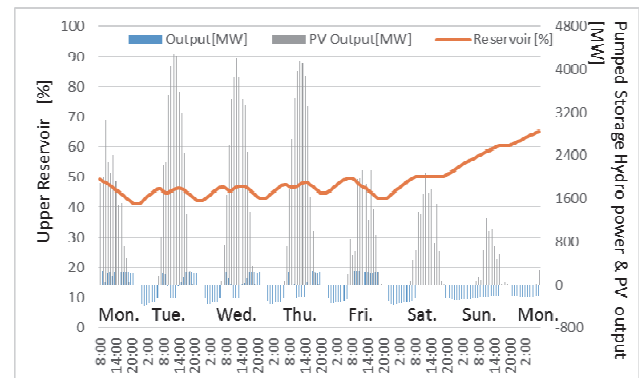


Fig. 9.2 Pumped Storage Hydro Power Operation on August 4, 2014 (Upper Reservoir 50%)

ュレーションを試みた。初期上池貯水量 90%のケースを Fig.9.3、同じく 10%のケースを Fig.9.4 に示す。

このシミュレーションでは、需要及び太陽光発電出力が前ケースと同一であるため、上池貯水量の初期値に依存した運用の変化を評価することが可能である。初日の月曜は、太陽光出力が低いため、過剰に貯水していた分を放出するべく発電し、貯水量を減らす意図が見て取れる。それでも、貯水量がまだ多いため、夜間揚水は控えめである。以降 3 日間は、太陽光発電出力が大きい時間帯に揚水し、それ以外は発電に努めている。休日は揚水に努めている。

初期貯水量が 10%と低いケースでは、貯水量が厳しいながらも月曜日は発電方向に運転後、貯水量を早く中庸な水位まで戻すべく、大きく揚水方向に運転していることが分かる。

これらのことから、太陽光発電の大量導入後の揚水発電所の週間運用にファジィ推論を適用することは有効であり、運転員の感覚的な運転制御をファジィにより実現できていると考えられる。

5. 電力系統需要のバリエーションへの対応

5.1 東北電力需要データ

Fig.7 に示したように、需要曲線は、季節に応じてそのパターンの変化が大きい。前節の夏季帯と比べると、冬

季および春・秋季は、最大需要が昼間から夕刻に移る。とりわけ、冬は需要が大きいだけでなく、夜間需要が下がらないという特徴がある。

一方、太陽光発電の出力[MW]は季節性が乏しいことが、本学 18 号館屋上太陽光発電出力の解析より得られた(付録参照)。したがって、太陽光発電出力の高低は、季節性の要因は少なく、当日の天候次第である(ただし、冬季は発電時間がやや短くなる)。

5.2 メンバシップ関数の使い回し(失敗事例)

季節的な需要変動のパターン変化に対しての適応性を確認するため、需要曲線を Fig.7 の冬季に変更し(2 月 3 日)、同様のシミュレーションを行った。Fig.10.1 に、東北電力管内の冬季需要を示し、需要をこの場合に置き換えたシミュレーション結果を示す。ただし、初期貯水量は 50%とした。

シミュレーションの結果、太陽光発電出力の高い時間帯にのみ揚水し、それ以外は、昼夜を問わず発電し、上池が底をつく結果になった。これは、冬季のピーク需要と夏季ピーク需要ではほとんど差がない(最大需要 14,000[MW])ものの、最低需要が夏季帯と比べて高く、揚水する機会を逸失していることが理由であると言える。また、上池貯水量の制約よりも需要に応えることを最重要規則として IF-THEN ルールを決定したことも影響している。

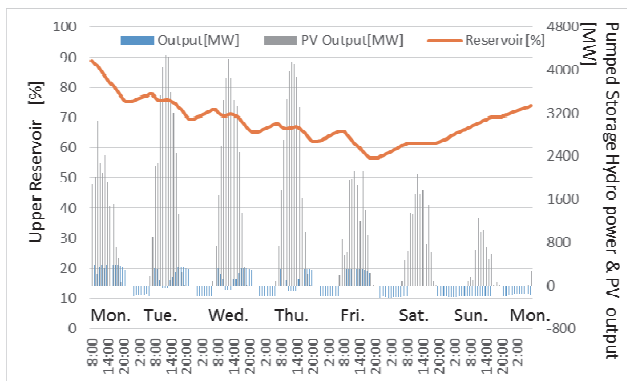


Fig. 9.3 Pumped Storage Hydro Power Operation on August 4, 2014 (Upper Reservoir 90%)

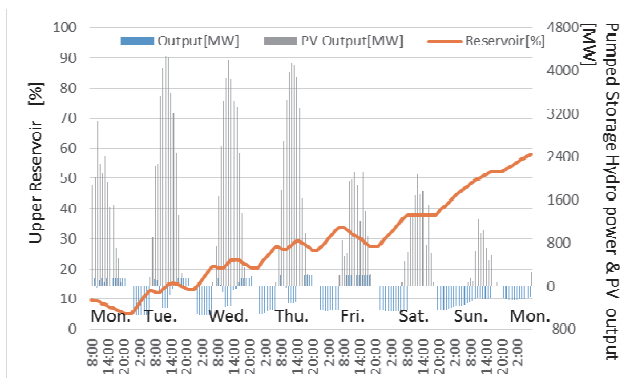


Fig. 9.4 Pumped Storage Hydro Power Operation on August 4, 2014 (Upper Reservoir 10%)

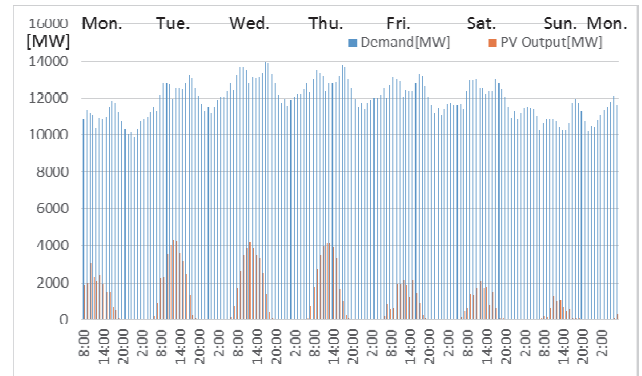


Fig. 10.1 Weekly Demand and Photovoltaic Power Generation on February 3, 2014

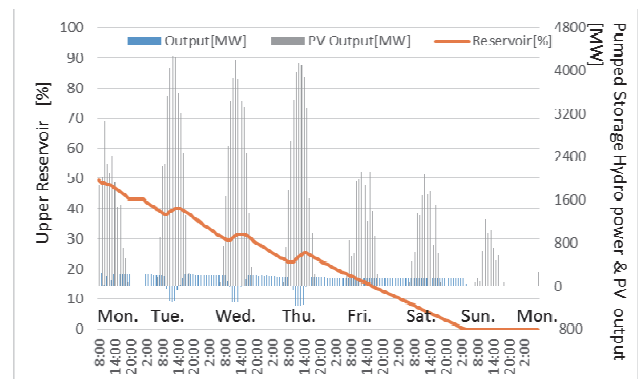


Fig. 10.2 Pumped Storage Hydro Power Operation on February 3, 2014 (Upper Reservoir 50%)

5.3 需要メンバシップ関数決定手法の提案

需要のパターンは週を追って徐々にではあるが変化するため、需要メンバシップ関数は、都度、調整が必要となる。また、太陽光発電出力は、前述の通り、季節によって日照時間に差は生じるものの、出力[MW]（グレード値）の変化は少ないため、メンバシップ関数の再調整の必要はない。本研究では、需要用メンバシップ関数の調整法を以下のように提案する。

週間需要の概要を定義するため、週間最大需要の予測値 DemandMax[MW]、週間の平均的な平日最低需要予測値 DemandMin[MW]を設定する。また、需要メンバシップ関数 High の H_T は、 $H_T = [0.90, 1.0]$ で固定とした。理由は、需要が「高い」を示す H_T に含まれる曖昧さは少ないと判断したためである。これより、需要用メンバシップ関数のパラメータを以下のように決定する。

$$L_T = \left[\frac{\text{DemandMin [MW]}}{\text{DemandMax [MW]}}, 1.0 \right] \quad (5)$$

$$a = \frac{H_T(x) - L_T(x)}{3} \quad (6)$$

$$L_B = [L_T(x) + a, 0.0] \quad (7)$$

$$H_B = [H_T(x) - a, 0.0] \quad (8)$$

ここで、上記の各パラメータは Fig.11 に示されている。また、 $H_T(x)$ は、 H_T の横軸上の点を示しており、Fig.11 では 0.90 に対応する。また、需要データから直感的に決定したメンバシップ関数と上記の提案手法により算定したメンバシップ関数を Table2 に記載する。

5.4 2月3日の週のシミュレーション

提案手法を適用して 5.2 節のシミュレーションを行った。上池貯水量の初期値を 50%, 90%, 10% と設定したものをそれぞれ、Fig.12.1-3 に示す。

月曜日に需要が低い傾向が出ている (Fig.10.1 参照)。そのため、日中の太陽光発電出力を揚水に使用している。また、冬季であるため、太陽光発電の出力が期待できない夕方から宵の口にかけてがピーク時間帯となる。そのため、ピーク時間帯のみ発電運転となった。その後、夜

Table 2 Comparison of Demand Membership Functions

	L_T	L_B	H_B	H_T
Intuitive Method	[0.50, 1.0]	[0.65, 0.0]	[0.75, 0.0]	[0.90, 1.0]
Auto Fitting	[0.78, 1.0]	[0.82, 0.0]	[0.86, 0.0]	[0.90, 1.0]

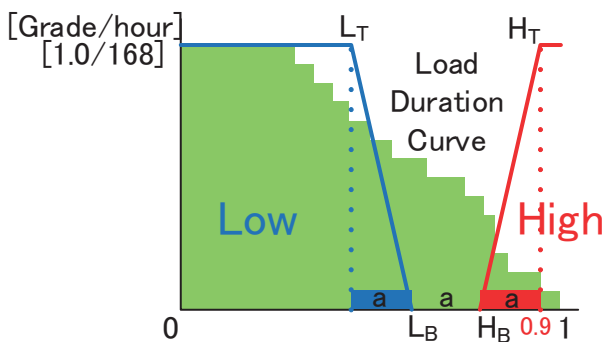


Fig. 11 Determination of Parameters in Demand Membership Functions

間の安価な電力を使用しての揚水運転も行えている。

次の日以降は、夜間の需要が月曜日ほど下らない。そのため、太陽光発電の出力がある昼間時間帯に揚水し、それ以降は深夜であっても発電運転している。これは、冬季の暖房需要の影響が大きいと考えられる。週末には揚水することで、平日に発電方向に長く動作した分を埋め合わせしている。

続いて、初期貯水量 90% の場合は、上池貯水量が元から多いこともあり、初日は暫く動作せず、ピーク時間帯にのみ発電運転している。それ以降は、前述同様に発電運転となる。ただし、貯水量が多いため、50% 開始と比

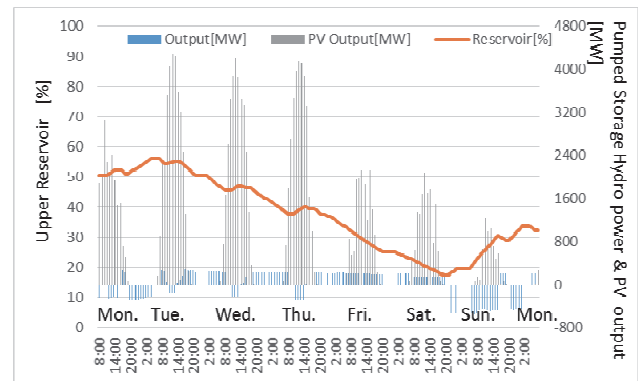


Fig. 12.1 Pumped Storage Hydro Power Operation on February 3, 2014 (Upper Reservoir 50%) by Auto Fitting

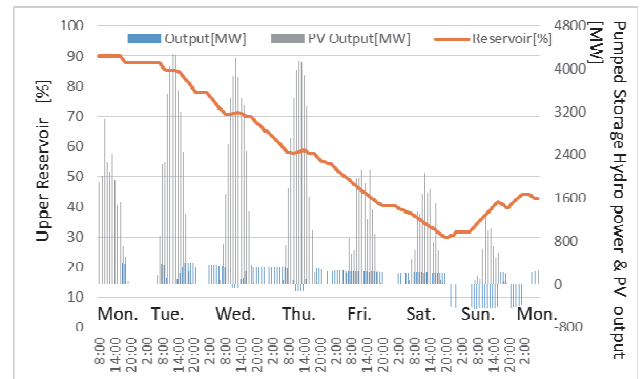


Fig. 12.2 Pumped Storage Hydro Power Operation on February 3, 2014 (Upper Reservoir 90%) by Auto Fitting

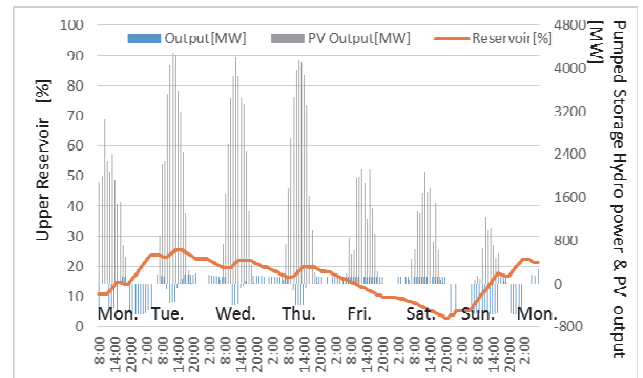


Fig. 12.3 Pumped Storage Hydro Power Operation on February 3, 2014 (Upper Reservoir 10%) by Auto Fitting

較して高出力で運転しており、貯水量のパラメータが影響していることが確認できる。逆に、10%開始では、50%開始のケースに運転動作パターンは酷似している。しかし、貯水量が影響しているため、発電出力は小さく、揚水動力は大きいという量的な差異を見せている。

以上より、揚水発電所の運転には、需要メンバシップ関数のフィッティングが重要であることが分かる。また、本研究において提案した3分割する簡潔な手法でも、ファジィの曖昧さをうまく利用した意思決定法が実現できることが確認された。

6. まとめ

本論文では、太陽光が大量導入された場合における昼間の揚水運転という、これまでは検討すらされてこなかった新しい状況下での、揚水発電所の週間運用について、ファジィ推論を適用することを提案している。ファジィ推論では、電力系統需要と太陽光発電出力および上池貯水量をパラメータとして、揚水発電所の発電/揚水運転の意思決定を、18本のIF-THENルールで記述した運用ルールに従って導出している。これにより、揚水発電所の運転をタイムスケジュール（昼間発電/深夜揚水）ではなく、1時間後の電力需要および太陽光発電出力の予測値と上池貯水量から、運用ルールに則った揚水発電所の運用が可能となった。

次に、パラメータの変動として、電力系統需要の変動は年間を通してみると大きいため、需要変動と需要メンバシップ関数の不整合は、揚水発電所の運用を大きく損ねる可能性がある。この課題に対して、本論文では、需要メンバシップ関数を作成する手法を提案した。電力需要は刻々と変化するが、変動幅の大小やその中心が季節によって大きく変化するため、これらにフィットした需要メンバシップ関数にする必要がある。提案手法では、当該週の最大需要と平均的な平日最低需要（夜間需要の平均値を想定）の概算値を入力値として使用することを提案した。本論文で使用しているのはファジィ理論であるため、ここで使用する需要値は予測値を適用することで十分である。仮に、需要の予測が外れたとしても、想定外の運転をせず、運用ルールに従った運転が可能となることもファジィ推論の適用が評価できる点である（冬季例の月曜日のような例）。

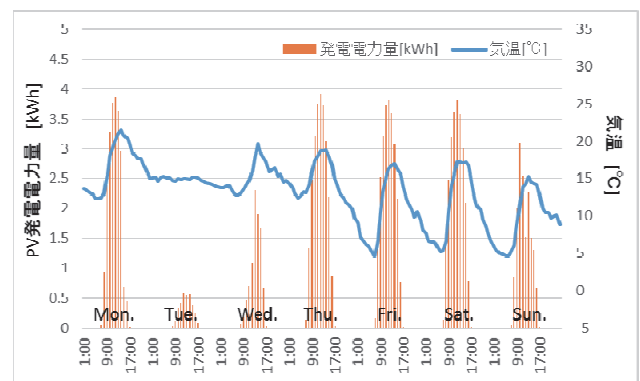
このように、太陽光発電の大量導入を考慮した場合、ファジィ推論を適用することで、揚水発電所の週間運用が可能であることが確認された。揚水発電所の運用としては十分であるが、電力系統全体としては、この揚水発電所の昼間の揚水運転に期待する効果として、LFC調整力の確保が挙げられる。これを評価するためには、1時間ごとの静的シミュレーションではなく、動的シミュレーションする必要がある。したがって、揚水発電所が出力を決定した後での需給シミュレーションと、それに続く安定度シミュレーションを行い、LFC調整力向上の検証をすることが今後の課題として挙げられる。

参考文献

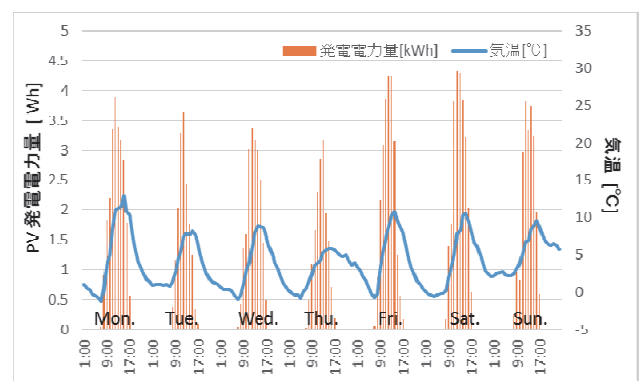
- 1) 電力エネルギー時事用語事典 2007, 電気新聞社
- 2) 系統WGにおける各社接続可能量の算定結果について, 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 新エネルギー小委員会 系統ワーキンググループ (第3回) - 配布資料 資料9 各社接続可能量の算定結果 (暫定)
- 3) 相原良太・横山明彦:「太陽光発電大量導入時における時間断面毎の最適な運転予備力を考慮した揚水発電所最適週間運用計画」, 電気学会論文誌B, Vol.135, No.3 pp.86-94 (2015)
- 4) 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫:「ファジィシステム入門」, 1987年, オーム社
- 5) 東北電力 HP: 東北電力需要実績データ <http://setsuden.tohoku-epco.co.jp/download.html>

付録

本学 18 号館屋上太陽光発電出力の解析から得られた秋季帯と冬季帯の太陽光発電出力を付 App.Fig.1 および 2 に示した。夏季帯は発電量が大きい印象を持つが、Fig.7 と App.Fig.1,2 からはそのような傾向は見受けられない。一方、発電量の大小は、同一週でも大きく異なる。そのため、太陽光発電の出力は季節に依存した「傾向」は乏しく、日々の天候による要因の方が大きいと言える。



App. Fig. 1 Weekly PV output & Temperature on November 10, 2014



App. Fig. 2 Weekly PV output & Temperature on February 17, 2014