太陽光・風力ハイブリッド発電システム導入による ピーク負荷の抑制と CO₂ 排出削減の効果

准 員 見 目 喜 重 (豊橋技科大)

准 員 金 子 和 史 (豊橋技科大)

正 員 榊 原 建 樹 (豊橋技科大)

Reduction of Peak Load and Exhausted CO₂ Gas by Introducing a Solar-Wind Hybrid Power Generating System

Yoshishige Kemmoku, Associate, Kazushi Kaneko, Associate, Tateki Sakakibara, Member
(Toyohashi University of Technology)

In order to smooth fluctuation of a solar-only or a wind-only generating system, a solar-wind hybrid generating system has been proposed. Using computer simulation, this paper presents how an electricity consumer reduces a peak value of purchased electricity and exhaust CO₂ gas by introducing the hybrid system. In the hybrid system, the energy flows are controlled on the basis of "a peak load reduction method". System performance are evaluated in terms of the peak value and the total energy of purchased electricity. The amount of exhaust CO₂ gas is assumed to be proportional to the purchased energy.

The simulations are run for a battery-only system and the hybrid system. The results show that the peak value decreases with the battery capacity and the total energy decreases with the natural energy penetration. And it is found that the appropriate values of the battery capacity and the natural energy penetration are 0.5 day of the daily load and 20~25% of the yearly load, respectively, under the load pattern and the meteorological data adopted in this paper.

キーワード：太陽光・風力ハイブリッド発電システム，シミュレーション，負荷平準化，購入ピーク電力，購入電力量，CO₂削減効果

1. はじめに

太陽エネルギーをはじめとする自然エネルギーが、将来の有望なエネルギー源として注目を集めて以来、その有効利用について数多くの研究がなされてきた。その一つとして、気象条件により変化しやすい自然エネルギーの中から相補性の期待できる太陽エネルギーと風力エネルギーとを組合せた「太陽光・風力ハイブリッド発電システム」が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。

近年の電力需要をみると、夏季における電力需要の急激な伸びから需要電力の季節間格差が増大する傾向

にある。このため、再び負荷平準化の必要性が強調されている。また、ここ数年、環境問題が全地球規模で議論され、そのなかでも地球温暖化への影響が最も大きいCO₂排出量の削減が提起されている。こうした点からも、自然エネルギー利用の促進が急務となっている。

本研究では、「太陽光・風力ハイブリッド発電システム」の導入が、負荷平準化ならびにCO₂排出量の削減にどの程度の影響を与えるのかをシミュレーションを用いて考察する。電力負荷対象として豊橋の福祉施設(老人ホーム)を取上げ、気象条件として、豊橋の昭和62年1年間のデータを利用した。

2. システム構成および運用

補完的太陽光・風力ハイブリッド発電システムの構成を図1に示す。図中の矢印はエネルギーフローを示している。負荷には、太陽光・風力ハイブリッド発電電力、系統からの電力、蓄電池からの電力が供給される。蓄電池は状況に合わせて充電・放電を行う。これらを制御するのが電力制御装置と充放電制御装置で、ここではピーク負荷軽減運用法を用いて電力の流れを制御する。ピーク負荷軽減運用法では、購入電力にあるカットレベルを設定し、購入電力をこのレベル以下に抑えるいわゆる負荷平準化を行うことを目的としている。

この運用法では、負荷電力がカットレベルを超える場合には、ハイブリッド発電電力および蓄電池からの電力の放出によってカットレベルを超える超過電力をまかなう。ハイブリッド発電電力に余裕があれば蓄電池の充電を行い、それでもなお余裕があればカットレベル以下の負荷電力にもハイブリッド発電電力を供給し、購入電力を低減する。一方、負荷電力がカットレベル以下である場合には、ハイブリッド発電電力を蓄電池に貯蔵し、蓄電池の充電率が100%の状態であるならば、負荷にも供給する。ハイブリッド発電電力のうち、蓄電池に充電しきれず、かつ負荷電力に供給しても余る場合には、これらは余剰電力となる。余剰電力は系統へ逆流させずに、余剰電力用負荷で消費する。また、ハイブリッド発電電力だけで蓄電池を充電率100%に充電できない場合には、購入電力がカットレベルを超えない条件で、そのときの負荷電力を上回る電力を系統から購入して蓄電池に貯蔵する。このような運用を1時間ごとに行う。

太陽電池の出力は、日射量に比例するものとし、その変換効率は10%とする。ただし、日射量が0.05 kW/m²未満の場合には、出力が得られないものとする。

図1 太陽光・風力ハイブリッド発電
Fig.1. Structure of photovoltaic-wind hybrid system.

風力発電機の出力-風速特性は、始動風速 3 m/s, 定格風速 7 m/s とし、始動風速から定格風速の間では、風速に対して直線的に出力が増大するものとする。また、蓄電池の充放電効率は 70% とする。

3. 電力負荷

電力負荷の対象として豊橋市の老人ホーム(定員 100 名)を取上げた。その年間負荷持続曲線を図2に示す。1日の負荷パターンは年間負荷電力量に各月ごとの比率と各時間ごとの比率を掛合せることにより作成し、1箇月間は同じ負荷パターンを用いた。老人ホームの日負荷曲線は、9時から20時までは高く、22時から5時までが低い台形状である。季節的には夏季の負荷電力量が突出しており、特に8月の負荷電力量は年間の18%を占めている。また、2月にも年間負荷電力量の9%を占める第二のピークがある。なお、年間負荷電力量は 219 MWh であり、従って日負荷電力量の平均は 600 kWh となる。

4. 気象データ

気象データとしては昭和62年の豊橋の日射量ならびに風速を用いた。実際には、5分ごとに測定した値を1時間にわたって平均した値、すなわち1時間平均値を使用した。なお、日射量については、IEA法によって全天日射量を35度の傾斜面日射量に変換した値を用いた。

この気象条件下に定格出力 1 kW の風力発電機と、

図2 老人ホームの負荷持続曲線
Fig.2. Load duration curve of an old people's home.

図 3 太陽光および風力発電電力の持続曲線
Fig. 3. Duration curve of output power of a photovoltaic and a wind generator.

1 kW の太陽電池を 1 年間設置した場合にどのような発電電力が得られるのかを示したのが図 3 である。図中には定格出力 0.5 kW の風力発電機と 0.5 kW の太陽電池とでハイブリッド発電を行った場合の発電電力も示した。同図から、ハイブリッド発電の場合には発電電力の持続時間が長くなっており、風力発電と太陽光発電の相補性が認められる。

5. 蓄電池による負荷平準化効果

ハイブリッド発電システムを用いて負荷平準化を行う前に、まず風力発電機と太陽電池を使用せずに蓄電池のみを用いた電力貯蔵システム⁽²⁾だけで負荷平準化を行う運用についてシミュレーションを行った。

〈5・1〉 購入ピーク電力 負荷平準化を目的とするシステムの評価尺度の一つに購入ピーク電力がある。これは年間を通して設定可能なカットレベルの値であり、この値が低ければ負荷平準化をより効果的に果たしたことになる。

蓄電池だけで負荷平準化を図った場合の購入ピーク電力と蓄電池容量との関係を示したのが図 4 である。ここで、蓄電池容量は平均日負荷電力量 600 kWh で、購入ピーク電力は年間最大負荷電力 87.5 kW でそれぞれ規格化してある。

蓄電池容量の増加に伴い購入ピーク電力は減少するが、蓄電池容量が 0.45 日を超えると購入ピーク電力は 65.6% から減少しなくなる。これは、日負荷曲線において、カットレベルを超える超過電力量とカットレベル以下で蓄電池を充電するために系統から購入する電力量とが、ちょうどバランスするためである。そのために、これ以上蓄電池容量を増やしても蓄電池は充電できず、またカットレベルをこれ以下に下げても

図 4 蓄電池による負荷平準化効果
Fig. 4. Effect of a battery on load leveling.

超過電力量をまかなうように充電することはできない。

これ以上のカットレベルの範囲内で、あるカットレベルが設定されたときに、それに適する蓄電池容量は超過電力量をまかなうための蓄電池充電電力量分、すなわち、超過電力量を蓄電池充放電効率で割った値となる。このようにして、購入ピーク電力は負荷電力が最大となる月の負荷パターンから決定でき、負荷パターンに固有のものである。

負荷平準化に主眼を置いた場合、蓄電池容量は、購入ピーク電力の抑制に効果がある。一方、蓄電池容量は小さい容量にすることが経済的に好ましい。従って、本研究の負荷対象の場合、蓄電池容量を 0.45 日以上にしても購入ピーク電力は減少しないので、電力貯蔵システムとしての適切な蓄電池容量は 0.45 日分となる。

〈5・2〉 購入電力量 系統からの購入電力が蓄電池容量の変化によってどのように変化するかを示したのが図 5 である。蓄電池容量の増加に伴って、購入電力量は、最初、増加する。これは、充放電に伴う損失が増加するためである。しかし、蓄電池容量が 0.45 日分以上となると購入電力量は 101.6% 一定となる。これは、蓄電池容量がこれ以上増加しても、カットレベルが減少しないために充電電力量が増加せず、そのために購入電力量も増加しなくなるためである。

一般に、系統電力負荷のベースとなる部分は原子力発電で、変動部分は火力発電で供給されている。それゆえ、本研究で対象としたような変動の激しい負荷への電力供給は火力発電が分担するものと考えてよい。火力発電所で発電される電力量とその際に排出される

CO₂量とはほぼ比例関係にあるから、購入電力量はCO₂排出量と比例すると仮定してよい。従って、図5の購入電力量の変化はCO₂排出量の変化を表しているものとみなしてよい。

〈5・3〉 購入電力持続曲線 蓄電池のみを用いた電力貯蔵システムを導入した場合、購入電力の持続曲線がどのようなものかを示したのが図6である。これは電力供給者側からみれば、需要家の負荷持続曲線が変化したことと等価である。蓄電池容量0日分はシステム導入前の負荷曲線を表している。蓄電池容量が増加するに従って、持続曲線のピーク値は低下しているが、曲線と縦軸・横軸とで囲まれる面積である購入

図5 購入電力量と蓄電池容量との関係
Fig. 5. Purchased electric energy vs. battery capacity.

図6 蓄電池容量による購入電力持続曲線の変化

Fig. 6. Purchased electricity duration curve for various battery capacities.

電力量、すなわちCO₂排出量が増加している。

また、蓄電池容量が0.5日分の場合でも、曲線の形状は負荷平準化の理想とされる負荷率100%の長方形形状にはほど遠い。この原因は、8月の負荷電力が他の月と比較してかなり突出しており、この月で設定されるカットレベルが他の月の最大負荷電力以上となってしまうために、負荷平準化が8月しか行われていないことにある。

6. ハイブリッド発電システムによる負荷平準化

次に、ハイブリッド発電システムを導入して負荷平準化を行う場合を検討する。

〈6・1〉 パラメータ ハイブリッド発電システムを構成する際のパラメータとして、蓄電池容量、自然エネルギー浸透、太陽光風力発電比(S/W比)、太陽電池面積、風力発電機定格がある。ここで、自然エネルギー浸透とは、年間負荷電力量に占める年間ハイブリッド発電電力量の割合である。太陽光風力発電比とは、年間ハイブリッド電力量に占める太陽光発電電力量と風力発電電力量との割合である。例えば、太陽光で60%、風力で40%を発電させる場合には60/40のように表す。

これらのパラメータのうち、太陽電池面積ならびに風力発電機定格は、自然エネルギー浸透と太陽光風力発電比から決定できるので、実質的なパラメータは蓄電池容量、自然エネルギー浸透および太陽光風力発電電力となる。

〈6・2〉 適切な蓄電池容量 図7に自然エネルギー

図7 ハイブリッド発電システムにおける購入ピーク電力と蓄電池容量との関係
Fig. 7. Peak value of purchased electricity vs. battery capacity in hybrid system.

一浸透が20%のときの購入ピーク電力と蓄電池容量との関係を示す。同図から S/W 比によらず蓄電池容量が0.5日分以上では購入ピーク電力の減少率が急に小さくなっていることがわかる。このような傾向は他の自然エネルギー浸透の場合にも見られた。蓄電池容量は小さいほど好ましいので、設定蓄電池容量は0.5日分が適切である。

購入ピーク電力と蓄電池容量の関係はハイブリッド発電を導入したシステムの場合も蓄電池のみを用いた電力貯蔵システムの場合でも同じような傾向を示したことは、蓄電池が購入ピーク電力の抑制に主要な働きをしていることを意味している。

〈6・3〉 適切な自然エネルギー浸透 図8に余剰

図8 余剰電力量と自然エネルギー浸透との関係

Fig. 8. Excess electric energy vs. natural energy penetration.

図9 購入ピーク電力と自然エネルギー浸透との関係

Fig. 9. Peak value of purchased electricity vs. natural energy penetration.

電力量と自然エネルギー浸透の関係を示す。風力発電の割合が高いほど、自然エネルギー浸透が低い段階から余剰電力が発生し、太陽光発電の割合が高い S/W 比80/20や100/0の場合では自然エネルギー浸透が20~25%になると余剰電力が発生している。現状の法規制のもとでは余剰電力は電力系統に逆流させられないことや、負荷平準化を目的としたシステムでは過度に設備を大きくする必要はなく、余剰電力用負荷がないほうが経済的に好ましいことから、自然エネルギー浸透は20~25%までの範囲に設定することが好ましい。

〈6・4〉 購入ピーク電力と自然エネルギー浸透

購入ピーク電力と自然エネルギー浸透との関係を図9に示す。 S/W 比が0/100から100/0に向かうにつれて、自然エネルギー浸透の増加に伴って購入ピーク電力の減少率が大きくなっている。このことは、負荷電力の大きい夏季には太陽光発電が有利であることが影響している。

〈6・5〉 購入電力量と自然エネルギー浸透

購入電力量と自然エネルギー浸透との関係を図10に示す。購入電力量は、ほぼ自然エネルギー浸透の増加分だけ減少している。この場合も S/W 比が0/100から100/0に向かうにつれて減少率は大きくなっている。自然エネルギー浸透が一定ならば、年間発電電力量は S/W 比が変化しても等しいので、本来ならば購入電力量の値は同じになるはずである。しかしながら、太陽光発電は夏の昼間に発電量が多いために、カットレベル以上の超過電力をまかなうために蓄電池から供給される電力量が少なく、その結果、夜間の蓄電池充電

図10 購入電力量と自然エネルギー浸透との関係

Fig. 10. Purchased electric energy vs. natural energy penetration.

蓄電池容量：0.5日分，S/W比：100/0

図 11 自然エネルギー浸透による購入電力持続曲線の変化

Fig.11. Purchased electricity duration curve for various natural energy penetrations.

量も少なくなる。そのため、太陽光発電比が高い場合のほうが購入電力量が若干少なくなる。

ハイブリッド発電システムを導入した場合、蓄電池のみを用いた電力貯蔵システムに比べて、購入ピーク電力を抑制しつつ購入電力量すなわち CO_2 排出量を減らすことができる。

〈6・6〉 購入電力持続曲線 ハイブリッド発電システムを導入した場合の購入電力持続曲線を図 11 に示す。ここでは S/W 比は 100/0 とした。自然エネルギー浸透が大きくなるに従って、購入ピーク電力が減少し、面積すなわち購入電力量も少なくなっている。

7. ま と め

ある福祉施設に太陽光・風力ハイブリッド発電システムを導入した場合、電力負荷の負荷平準化ならびに購入電力量の削減にどのような効果があるのかをシミュレーションによって検討した。その結果、蓄電池システムだけで負荷平準化を行うのに必要な蓄電池容量は日間電力量の 0.45 日分でよく、更にハイブリッド発電システムを導入した場合には、購入電力量をほぼ自然エネルギー浸透分だけ削減できることがわかった。購入電力量が CO_2 排出量に比例すると仮定するならば、購入電力量の削減が CO_2 排出量の削減につながる。また、余剰電力を発生させないとするならば、自然エネルギー浸透は 20～25% が適正な規模であることがわかった。更に、負荷平準化システムとしては、夏季におけるピーク負荷抑制の観点から太陽光

発電が風力発電よりも有利であることがわかった。

このようなシステムを直ちに導入することは、現状では経済的に難しく、太陽電池や蓄電池のコストダウンが図られなければならない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、現在の電力業界のかかえている最大の課題、すなわち夏季のピーク負荷の解決に、ハイブリッド発電システムの導入は太陽電池システムの導入⁽⁶⁾と同様、非常に有効である。

(平成 3 年 7 月 26 日受付，同 3 年 10 月 29 日再受付)

文 献

- (1) 野村・榎原，他：「福祉コミュニティに適用した太陽光・熱/風力ハイブリッドシステムの利用」，第 1 回電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(論文 I)，p. 277 (平 2)
- (2) L. A. Anderson: "A Simulation Approach to Sizing Hybrid Photovoltaic and Wind Systems", *J. Energy*, 7, 750 (1983)
- (3) 吉澤：燃料電池と電力貯蔵システム，p. 167 (昭 60) 講談社
- (4) 瀬川・藤田，他：「太陽光発電システムのシミュレーション」，*J. JSES*, 15, p. 38 (平元-5)
- (5) 高柴，他：「太陽光発電・負荷平準化システムの年間シミュレーションによる考察」，平元電気学会全大，p. 1497
- (6) 小林・滝川：「太陽光発電によるピーク電力需要の削減技術」，電気学会研資，ESC-91-3，p. 19 (平 3)

見 目 喜 重 (准員)

昭和 42 年 12 月 20 日生。平成 2 年 3 月豊橋技術科学大学電気・電子工学課程卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学，現在に至る。

金 子 和 史 (准員)

昭和 42 年 7 月 17 日生。平成 2 年 3 月豊橋技術科学大学電気・電子工学課程卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻修士課程に入学，現在に至る。

榎 原 建 樹 (正員)

昭和 47 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程後期課程修了。以後，名古屋大学助手などを経て，現在，豊橋技術科学大学電気・電子工学系教授。工学博士。応用物理学会，日本太陽エネルギー学会，IEEE 会員。