分散型電源群の微小発生電力を効果的に輸送する 将来の新しい電力ネットワーク

正員 斎藤 浩海 (東北大)

正員 豊田 淳一 (東北大)

A New Concept of Electric Power Network for the Effective Transportation of Small Power of Dispersed Generation Plants

Hiroumi Saitoh, Member, Junichi Toyoda, Member (Tohoku University)

This paper proposes a new concept of electric power network which makes it possible that many types of dispersed generation plants owned by non-utility organizations can participate in an electric power market without the disadvantages of existing power utility and customers. We call the power network “Open Electric Energy Network (OEEN)” because the network is opened to the many types of plants for the participation. For achieving such openness, electric power storage devices, load controller at each customer and data communication network are installed in OEEN, and the flow of excess electric power generated by each plant is controlled autonomously and in the distributed way. That is, the control is done by transmitting the data about excess electric power such as generation and demand point, power quality, price and so on from each dispersed generation plant to the power storage devices and the load controllers through the communication network. Since this data driven power flow control is similar to the mail system for a packet with the addresses of sender and receiver, we call it “Packet Electric Power Transportation”.

In OEEN, the storage device plays the different role from load leveling. Therefore, the way of determining the storage capacity is different from the conventional approach. In this paper, the applicability of queuing theory for determining the capacity is also discussed.

キーワード：分散型電源，開放型電力ネットワーク，電力貯蔵，待ち行列

1. ま え が き

近年の需要地帯近傍における大規模電源の立地不足は、以前増加傾向にある都市域の需要への電力供給をますます困難にしている。また、CO₂の排出に伴う地球温暖化現象などの環境問題も、電源の計画・運用に新たな制約を課す可能性もあろう。このような状況において、太陽光発電、燃料電池、コジェネレーションなどの需要側に分散配置される小規模電源の有効利用が期待されている⁽¹⁾。

本論文では、将来、多数の小規模分散型電源が需要側に出現し、かつその余剰電力を一般の需要家が直接購入できるようになった状況において、分散型電源が既存の大規模電源と共存しながら電力供給の場に参入するための新しい電力ネットワークの構想を提案している。一般に分散型電源は、その発電特性や所有する機関に依存して様々な運転形態を有するものと考えられる。従って、既存の電力システムと連系し、電力供給に参入するためには、分散型電

源、大規模電源および一般需要家のそれぞれに技術的・経済的面において好ましくない影響をもたらさないようにすることが重要である。提案する新しい電力ネットワークは、この影響を緩和する干渉材的な役割を果たすことを目的としている。著者らは、この新しいネットワークが種々の運転形態をもつ電源および種々の品質の電気の購入を希望している需要家に対して開かれた電力供給の場を与えうるという意味から、開放型電力ネットワーク (Open Electric Energy Network; OEEN) と呼んでいる^{(15)~(18)}。

これまで分散型電源の系統連系およびそれに関連する需要側管理 (Demand Side Management; DSM) については、各所において研究が進められてきている^{(2)~(6)}。その代表的なものとしては、新エネルギー・産業技術開発機構 (NEDO) の委託研究による太陽光発電、風力発電、燃料電池の系統連系試験がある⁽⁷⁾。また DSM については、季節別料金制度が導入された状況での分散型電源の参入プロセスに関する研究が、ゲーム理論を応用して行われている

る⁽⁸⁾。著者らも、ペトリネットを用いて分散型電源の参入プロセスをモデル化し、参入量を評価する手法を検討している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。これらの今までの研究は、分散型電源の系統連系における電気的問題や安全・保安上の問題、あるいは電気事業者、分散型電源所有者および需要家の行動をベースとした電気料金制度の問題などに焦点を当てたものがほとんどである。しかし本論文では、新しい電力ネットワークを構築することにより分散型電源の連系に伴う問題を解決しようという立場にあり、従来とは異なる技術的方策の開拓に主眼がある。

OEEN 構想の最も主要な特徴は、分散型電源から発生する余剰電力の輸送方式にある。その基本的考え方は、輸送する電力にその発電元と需要先を識別するための情報や電力の品質、価格に関する情報などを付帯させ、その情報に基づいて発電元から需要先へ余剰電力を自律的に流通させる方式である。著者らは、この電力輸送方式が小包にその送付人と受取人の宛名を付けて郵送するシステムと類似していることから、パケット（小包）電力輸送と名付けている。分散型電源の発生電力は原子力などの大規模電源に比較すると微小であるので、多数の分散型電源が電力供給の場に参入してきたときには、品質、価格の異なる多数の微小電力の流れを一括して集中制御・管理することは困難になると予想される。従って、OEEN では、電力と情報を一体化したパケット電力輸送が必要になると考えている。

本論文の構成は次のとおりである。まず第2章において、分散型電源が既存電力システムと連系したときに生じ得る基本的な問題について整理し、OEEN を提案するに至った背景について述べる。次に第3章では、OEEN の基本機能と構成について論じ、OEEN が現状の電力技術、情報通信技術で実現の可能性のあることを述べたい。第4章では、OEEN における電力流通方式としてパケット電力輸送の考え方について論じる。最後に第5章では、OEEN において要となる電力貯蔵装置の容量の決定の仕方について、待ち行列理論を応用した手法を提案したい。

2. 分散型電源の系統連系により生じうる問題

分散型電源が逆潮流のある状態で既存の配電ネットワークに連系する場合、電気的連系そのものに関する技術上の問題と余剰電力の売買に伴って生ずる問題の二つが存在する。連系技術上の問題としては、系統事故時の分散型電源の単独運転や電圧変動による電力品質の低下などがあるが、これらについては平成5年3月に改正された系統連系技術要件ガイドラインにより基準が定められている⁽¹⁾⁽⁷⁾。そこで本章では、余剰電力の売買に伴って生じうる問題について述べ、開放型電力ネットワーク（OEEN）を提案するに至った背景を明確にしたい。

まず、余剰電力の売買のあり方には、次の二つの状況が考えられる。

（状況1） 一般電気事業者が分散型電源の余剰電力を

買い取る。

（状況2） 一般需要家が分散型電源から直接その余剰電力を購入できる。

（状況1）は現行の余剰電力の買い取り制度に対応している。この状況において生じる基本的な問題は、分散型電源の連系に伴う電気事業者側の負荷率の低下と分散型電源の経済運転との協調に関するものと考えられる⁽¹¹⁾。この問題に対する代表的な方策としては、季時別料金制度による分散型電源の運転形態の変更や電力貯蔵装置による負荷平準化があろう。

次に、（状況2）は現行の制度がより自由化された将来の電力市場に相当している。平成6年度の電力基本問題検討小委員会（通産省電気事業審議会需給部会）において取りまとめられた中間報告では、卸発電事業の自由化や直接供給に関する参入条件の整備が指摘されているので、（状況2）は近い将来現実のものになると予想される。この状況では、基本的に次の事項が成り立っていると考えられる。

（i） 各分散型電源の余剰電力や電気事業者の供給電力の価格は異なる。

（ii） 電力の価格は発生電力の品質によって定まっている。

（iii） 需要家は価格、品質の異なる電力を識別して、選択的に受電できる。

なお、ここでいう電力の品質とは、電圧変動や周波数変動などの電気的な品質を意味するのではなく、各電源の供給信頼度、すなわち要求電力に対する供給責務の度合を意味している。例えば、現在の一般電気事業者には供給責務が課せられているので、その発生電力の品質、要するに電力供給の確率は高い。しかし、自家消費を主体とする分散型電源では、その所有者の経済活動に依存して余剰電力の発生量、発生の仕方が変動し得るので、その電力の品質は低いことになろう。

（状況2）で生ずる可能性のある問題は、異なる価格、品質の電力を同一の電力ネットワーク上で流通させることに起因する。この問題を解消し、一般電気事業者、分散型電源および一般需要家がより自由化された電力市場においても相互に不公平性をもたらすことなく電力の売買を可能にするのがOEENである。

（状況2）での問題はOEENが有すべき基本機能と密接に関係しているので、次章において述べたい。

3. 開放型電力ネットワークの機能と構成設備

開放型電力ネットワーク（OEEN）は、種々の分散型電源が発生する異なる品質の余剰電力を柔軟に流通、活用することのできる需要側の電力ネットワークである。このOEENが有する基本機能には、次の三つがある。

（機能1） 分散型電源の余剰電力パターンを需要家が要求する消費パターンに変換できる。

（機能2） 各種の品質、価格の余剰電力が、集中管

理・制御を受けることなく、発電元から需要先へ自律的に流通できる。

(機能3) 需要点において品質の異なる電力を識別でき、選択的に受電できる。

これらの機能が必要になる理由を図1(a)に示す系統を例に以下に述べたい。なお、この図の系統では、既存の交流電配ネットワークに多数の分散型電源が連系しており、一般需要家は電気事業者からの電力を購入すると同時に、各分散型電源からもその余剰電力を直接購入するものとする。

まず、(機能1)が必要になる理由は、分散型電源が必ずしも需要家の要求する消費パターンに合わせて余剰電力を発生できるとは限らないことに起因する。分散型電源は基本的には自身の自家消費を優先して経済的な運転をするものと考えられるので、(b)図のようにWhとしては需要家の要求を満たすことができて、その余剰電力発生パターンを需要家の消費パターンに整合させることはできないかもしれない。従って、発生パターンを消費パターンに整形する機能がOEENには必要となる。この機能は、電力貯蔵装置により実現可能である。

次に(機能2)は、少量・多品種の製品の流通制御と密接に関連している。一般需要家がどの分散型電源からも余剰電力を購入できるようになると、多数の異なる品質、価格の電力が同一の電力ネットワーク上を流れることになる。従って、(c)図に示すようにすべての分散型電源の余剰電力の発生とすべての需要家の負荷を集中的に監視・制御することは、データ管理・処理の点から困難になると予想される。そこでOEENでは、各発電元においてその余剰電力を識別するための情報と流通の仕方を制御する情報などをその電力自身に付帯させ、その情報に基づいて自律分散的に電力を流通させる機能が必要となる。このように電力の流通制御を自律分散化することにより、新たな分散型電源がOEENに連系してきても既存の分散型電源を配慮して流通制御方式を変更する必要がなくなり、システム構成の変化に柔軟な電力流通が行えることになる。なお、(機能2)は、各発電元で電力の流れと同期させて情報を発信できる設備と各発電元と需要者間でデータ通信が行える通信ネットワークが存在すれば実現可能である。

最後に(機能3)は、主に次のような状況が生ずるときに重要になる。まず(d)図に示すように、ある需要家がある特定の分散型電源から10kWhの電力をある時点において購入すると契約し、他の電源からは電力を購入しない場合を考えてみよう。このとき購入先の電力は品質、価格において他の電源の電力と異なっているため、需要家は購入先以外の電力を受電することは契約違反になる。ここでもし、購入先の分散型電源が供給時点になって自身の自家消費を優先させるために7kWhの余剰電力しか供給できなかったとしよう。また、この余剰電力の発生量の変更はこの分散型電源の電力の品質と価格にみあった行動だとしよう。このとき需要家は、購入先の分散型電源から7kWh

の電力を受電し、残りの3kWh分は停電にならなければならない。しかし、交流の電力ネットワーク上ではその残りの3kWh分が電気事業者や他の分散型電源から自動的に引き出されてしまう。その結果、需要家は異なる品質、

(a) 分散型電源群が連系した配電ネットワーク

(b) 発生パターンと消費パターンの不整合性

(c) 多品種・少量電力の集中制御・管理の困難さ

(d) 需要点における異品種電力の識別不可能性

図1 OEENの機能が必要になる理由
Fig. 1. Reasons for necessity of OEEN.

図2 OEENの基本構成
Fig.2. Basic structure of OEEN.

価格の電力を3kWh分受電してしまい、停電しなくてはならないことになる。これは供給元の分散型電源が他の電源の供給力を無断で利用し、需要家は3kWh分の停電をまぬがれてメリットを受けることを意味する。他方、電気事業者や他の分散型電源は自身の発生電力を勝手に利用されることになり、デメリットを受けることになる。このような電力市場の参加者に不公平性が生ずる原因は、需要点において異なる品質、価格の電力を交流回路上では物理的に識別できないことによる。従って、OEENは需要点での異品質の電力を識別し、選択的に受電できる機能を有する必要がある。この機能は(機能2)において述べたように、発生電力に情報を付帯させ、その情報に基づいて需要点での負荷を制御することにより実現できるものと考えられる。設備的には、通信ネットワークと需要点での負荷制御器が存在すれば実現可能であろう。

上述した三つの機能をもつOEENの基本構成は、図2のようになろう。電力貯蔵装置としては、現段階では二次電池が適用可能と考えられるが、将来的には充放電損失のないSMES(超電導エネルギー貯蔵装置)が有効であろう。また需要点における負荷制御器や発電元における情報付帯装置および通信ネットワークは、現在の配電自動化システムの技術を更に高度化することにより実現できるものと考えられる。なお、図2の構成でOEENの機能を総合的に実現するためには、余剰電力の流通制御方式が必要となる。これについては次章において論じたい。

4. パケット電力輸送

〈4・1〉 基本的な考え方 前章で論じたOEENの基本構成を実現する余剰電力の流通方式を著者らはパケット電力輸送と呼んでいる。この基本概念は図3のように描くことができ、その仕組みは次の四点で述べることができる。

(i) 輸送する余剰電力を「小包(パケット)」のような“かたまり”とみる。

(ii) 電力の“かたまり”に、流通設備を制御するため

図3 パケット電力輸送の考え方
Fig.3. Concept of packet electric power transportation.

の「流通制御情報」と電力の品質、価格を識別するための「品質価格情報」を付帯させる。本論文では、この情報を伴った電力の“かたまり”を「パケット電力」と呼んでいる。なお、情報を電力に付帯させることは、通信ネットワーク上のデータフローと電力ネットワーク上のパワーフローを同期させることにより実現する。

(iii) パケット電力の流通制御情報(発電元および需要家の識別情報、余剰電力の発生パターンと需要先の消費パターンに関する情報)がOEENの電力貯蔵装置や負荷制御器を制御することにより、パケット電力自身が自律的に貯蔵されたり、各需要先に分割されて到達し、消費される。すなわち、流通制御情報がパケット電力の水先案内の役割を果たすことによって、電力の自律的流通を実現する。ここで、パケット電力の貯蔵や分割の仕方を制御する機構を「パケット電力ディスパッチャ」と呼んでいる。この機構については、次節において詳しく論じる。

(iv) 需要家の電気料金は、購入したパケット電力の品質価格情報(電力の品質、価格、流通設備利用価格など)に基づいて、各負荷制御器により個別に計算、記録される。

〈4・2〉 具体例 ここでは、図4に示す具体的なOEENの構成例を用いて、パケット電力輸送がどのように行われるかを説明したい。なお、この構成例では、既存の交流配電ネットワークを基本流通設備とし、電力貯蔵装置としてSMESを考えている。また、パケット電力の流通経路を能動的に制御できるようにするため、DC Back to BackとSMESを組み合わせた直流多端子回路を導入している。各配電フィードはこの直流多端子回路と交直変換器を介して接続されている。

パケット電力輸送には、特定の分散型電源から指定した需要家へ余剰電力を輸送する“託送的”な役割と、供給する需要家が指定されない“卸売的”な役割の二つが考えられる。本論文では、前者の場合について説明したい。まず、図4の需要家2と需要家3が分散型電源1から余剰電力を購入するとしよう。また、各需要家における余剰電力の消費パターンと分散型電源1の余剰電力の発生パターン

図 4 OEEN の具体的な構成例
Fig. 4. One of the examples of OEEN.

図 5 需要家の消費パターンと分散型電源の発生パターンの例
Fig. 5. An example of generation and demand pattern of excess electric power.

が、図 5 のような形状であったとする。このとき各需要家は自身の消費パターンに関する情報を図 6 (a), (b) に示すようなデータ構造で、通信ネットワークを介して分散型電源 1 に送信し、余剰電力の購入を事前に申し込む。分散型電源 1 は電力量として両方の需要家に余剰電力を供給できるので、需要家からの申し込みを受け入れ、余剰電力が発生する時点に図 6 (c) の情報をパケット電力ディスパッチャに送信する。ただし、この情報は余剰電力を実際に OEEN に放出する一定期間前（数十秒あるいは数分前）に送信されるものとする。

パケット電力に関する情報がパケット電力ディスパッチャに到着したとき、ディスパッチャは図 7 に示す処理を行う。まず、既に伝送されてきている他のパケット電力の情報と制御を考慮しながら、流通制御情報のみを取り出し、それを基に電力貯蔵装置の充放電および各直交変換器を流入・流出させる有効電力のタイムスケジュールを作成する。例えば、ディスパッチャが他のパケット電力の処理を行っていない場合に、分散型電源 1 から需要家 2, 3 にパケット電力を輸送するときのタイムスケジュールは図 8 のようになろう。続いて、この有効電力のスケジュールから

(データ構造)
<S1, D2, 8:05, 1.0, 8:35>
(意味)
分散型電源 1 (S1) へ需要家 2 (D2) より
8 時 05 分から 8 時 35 分まで 1.0kW 購入希望

(a) 需要家 2 の購入問合せ情報

(データ構造)
<S1, D3, 9:00, 1.5, 9:10>
(意味)
分散型電源 1 (S1) へ需要家 3 (D3) より
9 時 00 分から 9 時 10 分まで 1.5kW 購入希望

(b) 需要家 3 の購入問合せ情報

(データ構造)
<PD, S1, G1in, 8:00, 2.0, 8:10, 1.5, 8:30, 2.0, 8:40, G2out, D2, 8:05, 1.0, 8:35, G3out, D3, 9:00, 1.5, 9:10: 品質価格情報>
(意味)
パケット電力ディスパッチャ (PD) へ分散型電源 1 (S1) より
ゲート 1 から流入 (G1in)
8 時 00 分から 8 時 10 分まで 2.0kW
8 時 10 分から 8 時 30 分まで 1.5kW
8 時 30 分から 8 時 40 分まで 2.0kW
ゲート 2 から流出 (G2out) 需要家 2 (D2) へ
8 時 05 分から 8 時 35 分まで 1.0kW
ゲート 3 から流出 (G3out) 需要家 3 (D3) へ
9 時 00 分から 9 時 10 分まで 1.5kW

(c) 分散型電源 1 が発信する情報

図 6 パケット電力の情報の構造と意味
Fig. 6. Data structure and its meanings for packet electric power.

図 7 パケット電力ディスパッチャのデータ処理フロー

Fig. 7. Data processing in packet electric power dispatcher.

各直交変換器のゲート制御信号の時系列を求め、それを用いて各発電元から放出されるパケット電力の流れを制御する。一方、品質価格情報はパケット電力の各配電フィードへの放出あるいは SMES への貯蔵と同時に、再び流通制御情報と一体化し、パケット電力が需要先に届くまで付帯し続ける。

以上、パケット電力輸送の基本的なメカニズムを例示した。ただし、もし分散型電源 1 が、パケット電力の付帯情報をディスパッチャに送信する時点になって、需要家 2,

図8 パケット電力の制御スケジュールの例
Fig. 8. An example of control schedule for packet electric power.

3の要求を満たすだけの余剰電力を発生できなくなった場合には、次のような制御が行われることになる。まず、分散型電源1は流通制御情報における余剰電力の発生パターンと需要先での消費パターンを修正し、ディスパッチャに伝送する。ディスパッチャは分散型電源1における変更にかかわらず、受け取った流通制御情報に従ってパケット電力の流れを制御する。需要家2, 3では、それぞれの負荷制御器が送られてきた流通制御情報と事前に申し込んだ余剰電力の消費パターンを比較して、供給されない電力分を受電しないように自身の負荷を制御する。なお、分散型電源1が需要家2, 3の消費パターンをどのように修正するかは、分散型電源と需要家との電力の売買契約の仕方に依存して決まると考えられるので、本論文ではその修正の仕方については議論しない。また、分散型電源1が供給できなくなった電力を需要家2, 3が事前に予測できる場合には、需要用2, 3は他の電源からその不足電力を購入することも可能であろう。しかし、この点はパケット電力輸送方式を更に具体化する段階で重要になると考えられるので、今後の検討課題としたい。

5. 待ち行列理論による電力貯蔵容量の決定法

OEENにおける電力貯蔵装置は、不特定多数の発電元から需要家へパケット電力を輸送するときの需給バランスを取る役割を果たしており、従来の負荷平準化機能とは異なっている。すなわち、OEENの電力貯蔵装置は多数の分散型電源と需要家の共有資源であるので、その貯蔵容量は貯蔵装置の利用頻度、すなわちパケット電力の貯蔵要求の発生の仕方に依存して決定する必要がある。このような視点に立つと、OEENの電力貯蔵容量は待ち行列理論を応用して決定できると考えられる。なお、提案する貯蔵容量の決定法では、貯蔵装置の電力量(Wh)に関する容量を決定できるが、電力(W)に関する容量は求められない。

図9 待ち行列システム
Fig. 9. A queueing system.

〈5・1〉 待ち行列理論の適用可能性 一般に待ち行列理論は、図9に示すような s 個の窓口と N 席の待合室からなるシステムを扱い、ランダムに到着する客があるサービスを窓口で受けるときの待ち行列の性質を分析するための基礎を与える⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

ここで、ランダムに到着する客を「ランダムに発生するパケット電力の貯蔵要求」、 s 個の窓口を「電力貯蔵装置」、客が窓口でサービスを受けることを「パケット電力が貯蔵装置に貯蔵されること」に対応させて考えてみよう。このとき“貯蔵装置の容量をいくらにすればランダムに発生するパケット電力のほとんどを貯蔵できるか”という問題は、“客の待ち行列ができるだけ生じないようにする窓口の個数 s はいくつか”という待ち行列理論の問題に置き換えることができる。しかし、待ち行列理論で扱う客という要素は、1人、2人と数えられる離散量であり、また客自身の大きさを表す量(例えば身長や体重)は、待ち行列とは無関係である。一方、パケット電力は連続量であり、かつその大きさは貯蔵容量の決定に強く関係している。従って、待ち行列理論をOEENと電力貯蔵容量の決定にそのまま適用することは不可能であるので、本論文では次の仮定を設けている。

仮定：ランダムに発生するパケット電力の大きさ(Wh)は、平均的に等しく、かつ既知である。この仮定の導入により、貯蔵装置の容量は図10に示すようにパケット電力の平均の大きさを区分けした貯蔵区画として離散的に扱えるようになる。その結果、上述した貯蔵容量を決める問題は、“貯蔵区画数 s がいくつであればランダムに発生するパケット電力の大部分を貯蔵できるか”という問題に置き換えることができ、待ち行列理論を適用できることになる。

〈5・2〉 貯蔵容量の求め方 前節において述べた貯蔵容量を決定する問題は、貯蔵を要求するパケット電力の発生とパケット電力が貯蔵されている時間のそれぞれの確率統計的性質を与えることにより解くことができる。そこで本論文では、この両者の確率統計的性質を次のように仮定している。

まず、微小時間 Δt に貯蔵を要求するパケット電力が1個しか発生せず、その確率が時刻によらず $\lambda\Delta t$ と一定であるとする。このとき期間 τ で k 個の独立したパケット電力が貯蔵の要求をする確率は、次式のポアソン分布に従

図 10 待ち行列理論からみたパケット電力の貯蔵メカニズム

Fig. 10. Storage mechanism of packet electric power from the viewpoint of queuing theory.

うことになる。

$$P_{0k}(\tau) = \exp(-\nu\tau)(\nu\tau)^k/k! \quad \dots\dots\dots (1)$$

この分布は平均 $\nu\tau$ であるので、 ν は「単位時間当たりに貯蔵の要求をするパケット電力の平均の個数」を意味することになる。

次に、図 10 に示した一つの貯蔵区画に 1 個のパケット電力が貯蔵されており、そのパケット電力が微小時間 Δt 後に放電される確率を時刻によらず $\mu\Delta t$ 一定としよう。このとき t 時間後にその貯蔵区画にそのパケット電力がまだ貯蔵されている確率は、次式の指数分布に従うことになる。

$$H(t) = \exp(-\mu t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

この分布の平均は $1/\mu$ であるので、 $1/\mu$ は「一つのパケット電力が一つの貯蔵区画に貯蔵されている平均の継続時間」を表すことになる。すなわち、平均的に $1/\mu$ の時間が経過すればパケット電力は貯蔵装置から放電されることを意味している。

上述した確率分布の下で、定常的に r 個の異なるパケット電力が同時に r 個の貯蔵区画に貯蔵されている確率を求めると、次式が得られる。

$$P_r = \frac{(\nu/\mu)^r/r!}{\sum_{k=0}^{\infty} (\nu/\mu)^k/k!} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式の導出では、パケット電力の発生源は無限個存在すると仮定している。また、微小時間 Δt に 2 回以上のパケット電力の充電と放電が生じないものとし、エルゴード性が成り立つものと仮定している。なお、この式は一般にアーラン分布と呼ばれている。

OEEN における電力貯蔵装置の容量は (3) 式を用いて決定できるが、その際に次に述べるような貯蔵量を定義する。まず、 ν は単位時間当たりに貯蔵を要求するパケット電力の平均の個数であり、 $1/\mu$ は平均の貯蔵継続時間である。従って、パケット電力の平均の大きさを a [Wh] であるとすれば、 (ν/μ) に a をかけた量は「単位時間当たりのパケット電力の平均の貯蔵量」とみなすことができる。そこで、本論文では単位時間当たりの平均貯蔵量を次式のように定義する。

図 11 OEEN の貯蔵容量を決める特性曲線
Fig. 11. Characteristics curves for determining the power storage capacity of OEEN.

$$c \triangleq a\nu/\mu \quad \dots\dots\dots (4)$$

例えば、1 時間に 3 個の異なるパケット電力が貯蔵の要求をし、その各々の大きさが 10 kWh とすべて等しく、また、それぞれ 5, 10, 15 分の貯蔵継続時間を要求したとしよう。このとき、 $\nu=3$ 回/h、 $1/\mu=(5/60+10/60+15/60)/3=1/6$ h と計算できるので、要求された貯蔵量 c は 1 時間当たり 5 kWh となる。

さて、単位時間当たりに要求されるパケット電力の貯蔵量が c (Wh) であり、実際に貯蔵できる量は c_c (Wh) であったとしよう。すなわち $(c-c_c)$ (Wh) の分だけ貯蔵できないものとしよう。このとき貯蔵不達成率 c_f という量を次式によって定義する。

$$c_f = (c - c_c)/c = 1 - c_c/c \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 c_c はパケット電力の定常的な貯蔵量に対応するので、(3) 式のアーラン分布より c_c は次式のように表すことができる。

$$c_c = \sum_{r=1}^s arP_r = c(1 - P_s) \quad \dots\dots\dots (6)$$

従って、(5)、(6) 式から貯蔵不達成率 c_f は次式のように表されることになる。

$$c_f = P_s = \frac{(c/a)^s/s!}{\sum_{k=0}^{\infty} (c/a)^k/k!} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、(7) 式ではアーラン分布の (ν/μ) を (4) 式を用いて (c/a) に書き換えている。

以上から OEEN の電力貯蔵装置に必要な容量は、貯蔵不達成率 c_f と単位時間当たりの要求貯蔵量 c を与えて (7) 式から貯蔵区画面数 s を求めることにより、 $a \times s$ (Wh) と決定できることになる。なお、(7) 式はアーラン

文 献

B式と呼ばれるものに対応しており、 c_f と (c/a) および s の関係を表す数値表が与えられている⁽¹⁴⁾。

図11は、(7)式を用いて貯蔵区画数 s と単位時間当たりに貯蔵されているパケット電力の平均の個数 (c/a) の関係を貯蔵不達成率 c_f をパラメータとしてプロットしたものである。この曲線を利用すれば、OEENに必要な貯蔵容量の概数を決定できる。例えば、単位時間当たりのパケット電力の要求貯蔵量 c が50 kWh、パケット電力の平均の大きさ a が10 kWh、貯蔵不達成率 c_f を0.01（貯蔵されないパケット電力の期待値が0.5 kWh）とすれば、図11から必要な貯蔵区画数 s は11と求められ、必要な貯蔵容量は110 kWhとなる。なお、本論文で提案する貯蔵容量の決定法をより実用的なものに近づけるためには、パケット電力の発生と消費にかかわる確率統計的性質を実際の需要データなどに基づいて明らかにする必要がある。本論文ではOEENにおける貯蔵容量の決定の考え方と待ち行列理論の適用可能性に焦点を当てているので、(1)、(2)式のような仮定を設定している。

6. む す び

本論文では、需要側に連系された多数の小規模分散型電源を有効に利用するための新しい電力輸送網として、開放型電力ネットワーク(OEEN)を提案した。特に、OEENの根幹をなす電力と情報を一体化したパケット電力輸送方式について、その基本的考え方と余剰電力の自律的流通の可能性について論じた。また、OEENにおける電力貯蔵装置の容量の決定の仕方について、待ち行列理論の適用可能性も示した。

ただし、本論文で論じた新しい電力ネットワークと電力輸送方式および貯蔵容量の決定の仕方は、まだ基礎概念を確立する段階の域を出ておらず、実現に向けて多くの課題が残されている。例えば、OEENの使用料をパケット電力の売買価格にどのように反映させるのか、その反映の仕方により需要家は多品質電力の選択のメリットを多く得られるのか、そうでないのかなど、パケット電力の売買に関する経済システムの検討が必要であろう。また、貯蔵容量の決め方においては、パケット電力の発生に関する確率統計的性質は現段階では不明であるし、更にパケット電力の大きさが発電元によらずほぼ等しいとはいえないかもしれない。本研究には、このような課題が山積しており、容易に実現できるとはいえない。また、提案したOEEN以外にも、電力市場の自由化に伴った新しい電力流通のあり方、実現方法、運用の仕方であろう。しかし、将来の電力システムのあるべき姿を模索するうえでは、本論文のような基礎的な研究も必要であると考えている。各所の方々の忌たんのない御批判、御意見を賜ることができれば幸いである。

なお、本研究が財団法人東電記念科学技術研究所の研究助成を受けていることを付記する。

(平成6年8月24日受付、同6年12月2日再受付)

- (1) 塚本：「特集分散型電源の系統連系技術，分散型電源の系統連系技術の現状と今後の展望」，OHM，18（平4）
- (2) 岡村：「配電線への発電機連系に伴う変電所母線電圧上昇」，電学論B，112，408（平4-5）
- (3) 岡村：「配電線における分散型電源単独運転時の鉄共振過電圧現象の発生様相と対策」，同上B，113，1012（平5-9）
- (4) S. Talukdar & C. W. Gellings ed：「Load Management」，IEEE Press Selected Reprint Series，p. 3（1986）
- (5) 大山：「電力貯蔵装置および時間別料金制が各地域の電力供給コストに与える影響」，電学論B，112，237（平4-3）
- (6) 重次・茅：「自家発電を考慮した電力時間帯別料金」，同上B，112，1139（平4-12）
- (7) 八木：「分散型電源への期待—分散型電源の系統連系ガイドラインについて—」，電気評論，p. 6（平5-10）
- (8) 浅野・桑畑：「コジェネレータを含む電力供給システムのゲーム論的解析」，電学論B，113，713（平5-7）
- (9) H. Saitoh & J. Toyoda：「A Petri Net Based Technique for Analyzing the Participation Process of Dispersed Generation」，Proc. of 4th ESAP，p. 260，Melbourne（1993）
- (10) J. Toyoda，H. Saitoh & A. Sasaki：「Mixed Electric Energy Supply System Including Utility and Non-Utility Generation」，Proc. of An International Conf. on Power Industry Tech. & Management Strategies for the 21 Century，IEA New Electricity 21，p. 119，Tokyo（1992）
- (11) 斎藤・豊田：「開放型電気エネルギーネットワークにおける電力輸送方式」，電気学会電力技術研資，PE-93-116（平5）
- (12) 森村・高橋：「マルコフ解析」，日科技連，p. 116（昭60）
- (13) 吉岡：「図解 ネットワークの基礎」，オーム社comシリーズ，（平3）
- (14) 秋丸：現代交換工学概論（昭54）オーム社
- (15) 斎藤・豊田・佐々木：「分散した中都市群の電気エネルギー供給を支える開放型ネットワークの可能性」，平4電気学会電力エネルギー部門大会，164
- (16) 斎藤・豊田：「開放型電気エネルギーネットワークの基本構想」，平5同上，226
- (17) 斎藤・佐々木・豊田：「都市における分散型電源の効果的な活用—開放型電力ネットワーク—」第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス，1-6（平6）
- (18) 斎藤・豊田：「自律的電力流通を実現するためのパケット電力輸送方式」，平6電気学会全大，No. 1273

斎藤 浩 海（正員）1960年7月19日生。1989年3月東北大学大学院博士課程修了。同年4月同大学工学部助手。1992年4月同電気工学科助教授，現在に至る。工学博士。

豊田 淳 一（正員）1934年7月9日生。1963年3月東京大学大学院博士課程修了。同年4月成蹊大学工学部電気工学科助教授，1972年4月同教授。1983年4月東北大学工学部電気工学科教授，現在に至る。IEEE，CIGRE SC 39 会員。