

オンデマンド型電力供給ネットワークにおける 電力分配アルゴリズムの提案

前田 朋孝^{†1} 横島 誠也^{†2} 岡部 寿男^{†1}

近年の家庭におけるエネルギー消費量は増加傾向にある。現在の電力供給網では、機器をコンセントに接続した瞬間に電力が機器に必要な分だけ無条件に供給されるため、生活者の自主的な省エネ行動などによってしか消費電力を抑える術がない。その解決方法として、オンデマンド型電力供給ネットワークが提唱されている。オンデマンド型電力ネットワークを作成するために、LAN ケーブル上に情報と共に電力を伝送する Power over Ethernet (PoE) に着目した。PoE ではリンク層探索プロトコル (Link Layer Discovery Protocol:LLDP) が用いられ、消費電力の微調整をすることが可能である。しかし、LLDP においては電力スイッチ(PD)から末端機器(PSE)に対して要求電力は送信することはできるが優先度は伝えることができないことから LLDP の拡張を行ってきた。しかしながら、供給可能な電力量を各機器の要求する必要電力と優先度を基にどのように分配することが生活者の品質をなるべく下げずに維持することができるかについては考えられてきていない。そこで本論文において、PSE において供給可能電力値および PD からの要求電力値および優先度を入力とし出力としてその電力の割り当てを行うモデルを考え、すべての機器が優先度に基づき公平に供給可能電力の分配を行うことが可能なアルゴリズムを考案した。また、このアルゴリズムにおいてすべての処理が定数時間内に終わることを示し、公平性が妥当であることを検証した。

A Proposed Algorithm for power distribution toward on-demand Power supply network

Today energy consumption in home tends to increase. When powered devices are connecting to an electrical outlet, power is immediately supplied in current power supply network. So there is no way to reduce the power consumption only by energy conservation voluntary action of consumers. As a solution, on-demand power supply network has been proposed. We focused on the Power over Ethernet (PoE) for supplying power along with the information to the LAN cable. In PoE, Link Layer Discovery Protocol (LLDP) is used, and it is possible to fine-tune the power. However, It is possible to send the required power for the Power Source Equipment (PSE) to Powered Device (PD), however it is not possible to send priority of PD in LLDP. So we propose the extension of LLDP. So in this paper, power available value in PSE and value of required power from the PD and consider the model that performs the allocation of the power output as an input a priority, and we designed an algorithm capable of performing the distribution of power available fairly.

TOMOTAKA MAEDA^{†1} MASAYA YOKOHATA^{†2} YASUO OKABE^{†1}

1. はじめに

近年の家庭におけるライフスタイルの変化に伴い、個別機器の省エネルギー化が進んで来ている。しかし、エネルギー消費量は減少するどころか増加する傾向である。現在の電力供給網では、機器が電力ネットワークに接続した瞬間（機器をコンセントに刺した瞬間）電力が機器に必要な分だけ無条件に供給されるため、人の不在を検知して消灯する対策や電力量の局所的な可視化による生活者の自主的な省エネ行動などによってしか消費電力を抑える術がなく、また節電目標を達成できるとも限らない。

欧米などで電力網の高機能化を目指して Smart Grid の研究開発が進められている。Smart Grid は、発電設備から

末端の電力機器まで含めた大規模な電力網全体に対して情報技術を用いる事で、電力網全体の需給バランスの最適化を目指している。また各家庭に HEMS (Home Energy Management System) を導入することにより、電力消費量を把握することで、節電や省エネのモチベーションにもなる。しかし、これらは電力提供者主体で考えられているため、生活者の利便性をなるべく損なわずに自動的に消費電力を削減することは難しい。

情報通信技術 (ICT) を活用して生活者の利便性を失わず、かつ生活者が意識することなく確実に消費電力の削減を達成できる技術としてエネルギーの情報化プロジェクト [1][2]では、オンデマンド型電力供給ネットワークが提唱されている。オンデマンド型電力ネットワークでは、家庭などの電力消費者に注目し、生活者の行動に応じて機器から必要な電力を明示的に電源へと要求を行う。これにより、すべての機器に無条件に電力が供給されることを防ぐだけ

^{†1} 京都大学 学術情報メディアセンター
Kyoto University

^{†2} 京都大学 大学院
Kyoto University

でなく、供給電力可能量として節電目標値を設定することで、家庭内における瞬時電力を節電目標値以下に抑えることが可能となる。

我々はこのオンデマンド型電力供給ネットワークを実現するためのアプローチとして Power over Ethernet (PoE) および PoE+に着目してきた。PoE+では逐次機器が必要な電力を要求することができ、オンデマンド型電力供給ネットワークを実現するために必要な最低限の要素を備えていることから、PoE+での電力要求に用いられる LLDP (Link Layer Discovery Protocol) の拡張を行ってきた。

本研究では、LLDP の拡張を用いた PSE (Power Source Equipment) から PD (Powered Device) に対しての電力を供給について着目し、PSE が PD に対して電力を提供するモデル化を行なった。そして QoL をなるべく損なわないアルゴリズムの提案を行なった。

以下の構成を述べる。2 章で先行研究としてエネルギーの情報化におけるオンデマンド型電力ネットワークについて PoE および PoE+について説明するとともに PoE を用いてエナジーオンデマンドを実現するための LLDP の拡張について述べた。そして 3 章 QoL を最小限に損なわないようにするための 1 つの手段としてすべての機器が優先度に基づいて平均化する手法について述べ、4 章では PSE から PD に対する電力配送のモデル化を行なった。そして 5 章において 3 章で提案した優先度に基づいて平均化するためのアルゴリズムについて述べた。そして最後に 5 章でまとめとして、結論と今後の課題を述べる。

2. 先行研究

2.1 エネルギーの情報化

松山らはエネルギーの情報化において、家庭などの電力消費者に注目し、電力ネットワークと情報ネットワークの統合を統合するとともに、生活者の行動に応じて機器から電源へのオンデマンド型要求により電力を制御・管理する事で、省エネ環境の実現を目指している。オンデマンド型電力ネットワークについて描いたものが図 1 である。

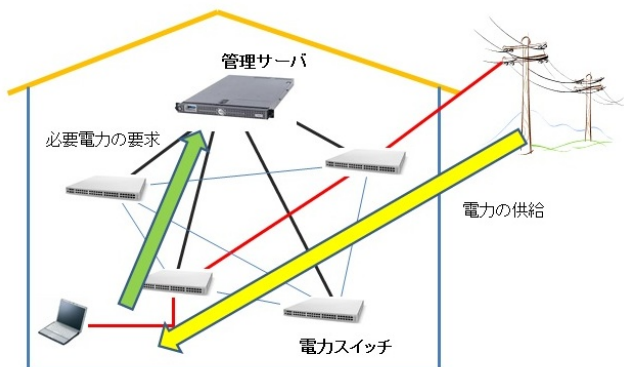


図 1 : オンデマンド型電力供給

我々はこのオンデマンド型電力供給ネットワークにお

いて複数電源を考慮し、さらに実世界の人間の行動パターンに応じてエネルギーを制御し、管理していくことを目指している。そのためには、電力ネットワークが自動的に機器ごとに細かく節電を行うことが必要であると考え、機器に要求電力量と優先度のエントリを複数持たせ、その中から電力を割り当てる必要がある。それにより QoL

(Quality of Life) をなるべく損なわずに節電することが可能となる。

この研究として、藤本ら[3]は資源予約プロトコル RSVP とルーティングプロトコルである HQLIP を応用し、人間の生活品質を損なわずして「家庭内の瞬間消費電力量を一定電力内に抑える」といった命令/目標をネットワークが達成する新しい電力ネットワークを提案した。また宮本らは、光ネットワーク上でパケットの前方にラベルを付加して転送し、時分割多重、波長多重、回線交換機能を可能にした GMPLS が電力ネットワークに適用できるのではないかと考え、これに経路資源予約プロトコルである RSVP を拡張し、RSVP-TE と経路情報交換プロトコルである OSPF を拡張した OSPF-TE の適用について提案している[4]。

しかし、これらの研究においては機器が直接つながっている電力スイッチから電源に対しての提案であり、電源スイッチから PD 間については考えられず、PD が持つ電力要求のテーブルをすでに電源スイッチが持っている想定されてきた。

2.2 PoE および PoE+

PoE は電源が確保しにくい場所に対して、LAN ケーブルだけで情報とともに電力を流すことができる技術であり、IEEE802.3af[5]によって定義されている。PoE では最初に PD が PSE に接続した際、その PD が PoE に対応した機器であるかを判断するために電力パルスを送る。そして、そのパルスの応答によって PD が PoE に対応であるか、また消費電力の帯域がいくらであるかという電力クラス分けが行われる。そのクラスに対応した電力を PSE が PD に対して送ることにより、PD が必要電力の要求を PSE に対して送信できるようになる。PoE では、PSE が個々の PD に対して 48V の電圧をかけ、15.4W まで供給することが可能となる。さらに、流値を監視し続け電流値が電力クラスに対応した消費電力量を超えた電流値を検出すると、電力供給を遮断が行われる。これにより、PSE は直接つながっている PD への電力供給の管理を行うことが可能となる。

PoE+は PoE の拡張であり IEEE 802.3 at[6]で定義される。PoE+は PoE に比べ配送することが可能な電力量が 30W に増えたほか、電力クラスが判断された後に IEEE 802.1AB で規格化されたデータリンク層プロトコルである LLDP によって機器の動作に必要な電力を逐次伝えることができるようになった。

PoE で用いられる LLDP パケットには Power Priority および Power Request Value を設定しなくてはならない。そこで、

PoE では Type Length Value(TLV) の値を 127 と定められたオプションの設定を行う。この時使用されるパケットのフォーマットが図 2 である

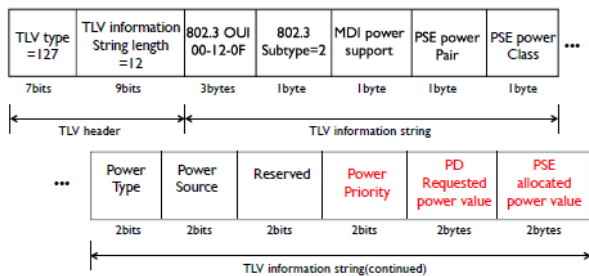


図 2 供給可能な電力量を伝えるための拡張

2.3 LLDP 拡張を用いた電力

PoE 給電においてを用いた場合、PD から PSE に対して電力要求を行う。この際のパケットフォーマットとして LLDP が用いられ、PD が必要とする電力量 (PD Requested power value) が PSE へ送られる。この電力要求を行うパケットを、電力要求メッセージと呼ぶ。また、この電力要求に対して PSE は PSE のポートの優先度 (Power Priority) を基に PD に対して電力を供給するかを決定し、PD に対して電力を割り当てることができる場合のみ Power Priority と割り当てる電力量 (PSE allocated power value) が LLDP パケットによって送られる。これを示したものが図 3 である。

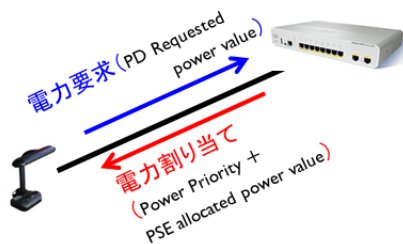


図 3 : PoE における電力割り当て

対して、オンデマンド型電力供給ネットワークを実現するためには PD が優先度と要求電力量を PSE に対して送り、PSE が PD に対して割り当てる電力量を送らなければならない。また、オンデマンド型電力供給ネットワークにおいて PSE が割り当てられた電力は永続的に確保されるわけではない。そのため、PD は PSE に対して電力要求を一定時間ごとに行わなければならない。また、PD は複数の優先度と要求電力量の組を複数持ちその組の中から PSE に対していずれかの優先度と要求電力量を送らなければならない。だから、PSE が PD に対して電力が割り当てられないと判断された場合にも PD は異なる電力要求を送ることになる。そのため、PSE から PD に対して電力が割り当てられない場合、PD に対して供給可能な電力量を伝える必要がある。これを示したものが図 4 である。

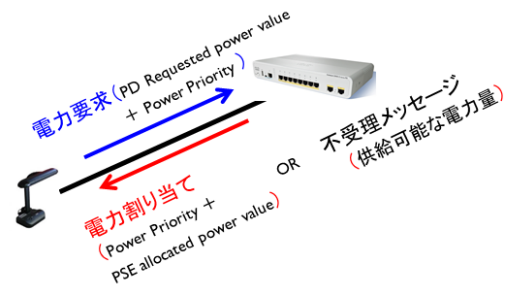


図 4 : オンデマンド型電力供給における電力割り当て

また、PSE が PD に対して電力が割り当てられないと判断された場合に送るメッセージについては現状の LLDP では想定されていないため、新たにそのパケットフォーマットを定義した。パケットフォーマットを以下の図 5 に示す。

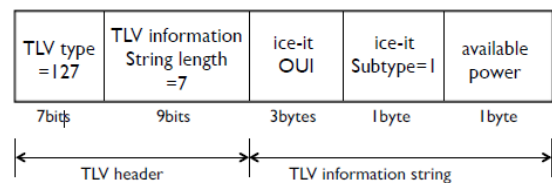


図 5 : 未割り当てパケットフォーマット

3. QoL の損失を最小限に抑える

我々の研究では、生活者の利便性をなるべく損なわずに自動的に消費電力を削減することを求めている。そのために重要となってくるのが QoL (Quality of Life) である。しかし PD の優先度が高い機器が 1 つしかつかえないよりも、優先度が低い機器が複数あった方が QoL を大きく損なわないという人もいれば、優先度が低い機器だけしかないよりも優先度が高いものが一つでもあった方がよいという場合もあり得る。このように QoL を損なわないというのの厳密な尺度を定義するという事は非常に難しい。

そこで今回我々は、QoL を損なわない、つまり生活者の利便性をなるべく損なわずということが、PSE に対してつながっているすべての PD が最低限動作しかつ優先度を見た場合にできるだけ平均化されている時であるという場合について着眼点を置いた。

この場合において、以下の条件を満たした場合 PoE の制約条件において今回の QoL を損なわないという条件に近似されると考えた。

- PoE による制約条件
 - 優先度は低・中・高の三段階
 - 電力要求が到着した順番が優先される
- QoL を満たすため行った条件
 - 優先度 High の機器は 1 つであり、起動に必要な最低限の電力である。
 - 優先度の逆転が起きない (PD₀ の LOW 25W と PD₁ High 15W だと優先度 High の方を優先)

電力の最低限必要である High の要求を送ってきた場合、現在 High 以上の電力の要求を受け取っている PD は優先度を下げて要求を行わなくてはならない。

4. PSE から PD に対する電力配送のモデル化

この節においてオンデマンド型電力ネットワークにおいて PoE 電力供給を行う際のモデル化を行う。

モデル化を行う図 6 を以下のように示す。

我々の想定する PSE のポート数の最大を N とする。

・電力要求リスト：各 PD が持つエントリから作成された電力要求メッセージを送る際に使用するリスト

PSE のポート i ($0 \leq i \leq N$) に LAN ケーブルで接続された機器を PD_i とする

電力要求リストは $request_value[i]k$ と $request_priority[i]k$ から成り立つ ($0 < k : k$ はリストにあるエントリの数)

$request_priority[i]k$ は Low・Middle・High の 3 段階のいずれかの値をとる。また、 $request_value[i]k$ の値は 0W ~ 25.5W の値であり、要求電力の 10 倍の値が $request_value[i]k$ に格納されている。これらは PoE+ によって定義されている。このエントリは PD においてあらかじめ用意されているものとする。

それに対して我々は $request_priority[i]k$ の優先度が低くなるほど $request_value[i]k$ の値が高くなること。また、 $request_priority[i]k = High$ を持つエントリは PD_i を起動するために必要な最低限の起電力であり、各 PD_i に対して 1 つしか持たないと設定した。

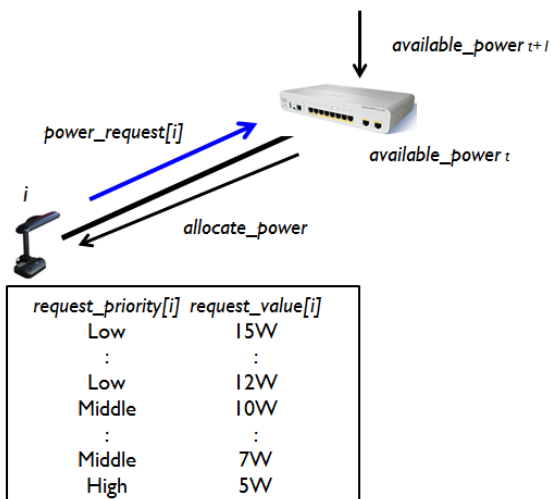


図 6：PSE から PD に対する電力配送のモデル化

・PSE に対する入力：PSE に対して入力されるメッセージとしては供給可能電力量である $available_power$ と各 PD_i から送信される電力要求メッセージである

$available_power$ は電力ルータである PSE が達成しなければならない電源からの供給電力量であり、この値を超え

ないように PSE は PD の要求を振り分ける。各 PD_i から送信される電力要求メッセージについては、各ポートからの要求が $request_priority[i]$ へ流れる。PSE がこの $request_priority[i]$ を受理した場合、 $allocated_value[i]$ として PD_i に対して供給している電力量を送る。

5. 提案アルゴリズム

4 章で述べた電力のモデル化を用いて記述した入力に対して、最低限必要な電力をもっとも多く配送することが可能なアルゴリズムについて説明を行う。

5.1 入力が発生した場合

PSE における入力は供給可能電力量と PD からの電力要求量の 2 種類である。この 2 種類のメッセージが時系列的に入力として与えられる。この場合にまず、来た入力が Event 1 ~ 3 のどのイベントに当たるのかについての判定を行う。判定について述べる。

入力が発生した場合 $available_power$ か $request_value[i]$ のどちらかの値が変化する。

時刻 t の時の $available_power$ の値を $available_power_t$

$request_value[i]$ の値を $request_value[i]_t$

時刻 $t+1$ の時の $available_power$ の値を $available_power_{t+1}$

$request_value[i]$ の値を $request_value[i]_{t+1}$

とする。

・ $available_power$ の入力が発生した場合

If $available_power_t > available_power_{t+1}$

Event1 のタグをつける

Else If $available_power_t < available_power_{t+1}$

Event2 のタグをつける

Else Event は発生させない

・ $request_value[i]$ の入力が発生した場合

If $request_value[i]_{t+1} - allocated_value[i]_t < 0$

Event2 のタグをつける

Else if $request_value[i]_{t+1} - allocated_value[i]_t > 0$

Event3 のタグをつける

Else ($request_value[i]_{t+1} - allocated_value[i]_t = 0$)

Event は発生させない

この入力から Event を決定し、その Event を基に割り当てのアルゴリズムを行う。

どの Event の処理を行うかについて以下の図 7 に示す。

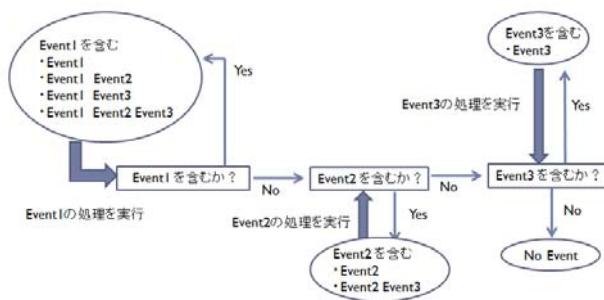


図7：Event 処理フローチャート

5.2 PSE における出力

以下において PSE において処理される Event1・2・3 における処理について説明する。

5.2.1 Event1 の処理の実行

PSE において Event1 が実行される場合、供給可能電力量が現在供給するよりも減少している場合である。

そのため、現在の供給よりも提供電力量を削減しないといけないことから、すぐに処理を行わなくてはならない。

しかし Event1 を処理する際に、新たな Event1 か 2 が存在した場合もっとも新しい、Event1 以外の Event1 と 2 を削除する必要がある。図 8 においてその例を示す。

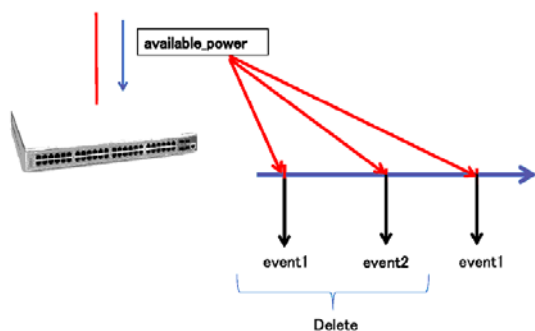


図 8：Event1 における削除

なぜ最新の Event1 以外の処理を行うかという、本研究による電力供給においては供給可能電力よりも提供電力量が多いということがあってはならない。PSE においてバッテリーを持たせることによって電力割当てを超過してしまった場合に対応することは可能であるが、切り替えにかかる時間が少ないことが望ましい。そこで、最新の供給可能電力量の削減をまず行わなくてはならない。

具体的に Event1 における電力の削減について説明する。Event1 の処理を行う時のそれまでの $available_power$ を $available_power_t$ 変更後を $available_power_{t+1}$ とする。

この際 $available_power_{t+1} - available_power_t$ が削減しなくてはならない電力量でありこの値を $power_PD_should_reduce$ と定義する。この値分、電力を消費している機器から集めることで、供給可能電力量内に収める必要がある。

そのため、まず現在電力供給を行っているポートの内も

っとも $request_priority[i]$ が高いものから順に電力抑制メッセージを送っていく。 $request_priority[i]$ が同じであるものが複数あった場合にはポートに対して重みづけを行っておくことによって対処する。この場合において電力抑制メッセージは未割当てパケットを用いて通知する。この時 $power_PD_should_reduce$ の値をもっとも高い $request_priority$ を持つ PD へと送る。このパケットが届いた機器は同じ優先度 ($request_priority$) で $power_PD_should_reduce$ の値を引いた $request_value[i]$ を新たな電力要求として出すか、優先度を一段階下げた中で最も多くの電力量を持つ $request_value[i]$ を送る。

もし同じ $request_priority$ で $power_PD_should_reduce$ の値を引いた $request_value[i]$ を送った場合、その要求が通った時点で削減すべき電力量が集まっているので、供給可能電力量内に収まっている。しかし、優先度を一段階下げた要求が送られてきた場合は、まだ $power_PD_should_reduce$ -

$$(request_value[i] + request_value[i+1])$$

の値だけ供給電力可能量まで足りないことから、この値を新たな $power_PD_should_reduce$ として次に高い $request_priority$ を持つ PD へと電力抑制メッセージを送る。これを繰り返すことにより、 $request_priority$ の偏りをもっとも少なくしつつ電力の抑制を達成することができる。

5.2.2 Event2 の処理の実行

Event2 の処理が実行された時、つまり $available_power$ が増えたか $request_value[i]$ が減少することによって電力供給量に余裕が出たということである。この時もっとも $request_priority$ 低い PDi に対して電力をさらに多く供給することができる。しかし、 $request_value[i]$ は一定時間ごとに送られてくることから Event2 が処理されたときに無理に供給しなくても $request_value[i]$ が機器から送られる Event3 を処理する場合に実行した方がよいと考え、この処理の時には何も動作を行わない。ただし、Event1 において処理を行った時と同様、行うべき Event2 の処理の後にさらば Event2 の処理が行われることが決まっている場合、最新の Event2 を処理する必要がある。この例を図 9 において示す。

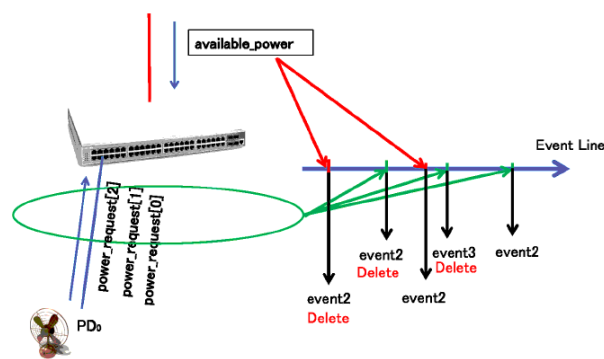


図 9：Event2 における削除

5.2.3 Event3 の処理の実行

Event3 の処理が実行された時、この時 $request_value[i]$ の増加が発生している。この場合、要求が供給可能電力量を超えているかどうかを判定しなくてはならない。また、 $power_request[i]_{t+1}$ が適応された場合、優先度を下げたメッセージを送らなくてはならない。このことを図 10 において示す。

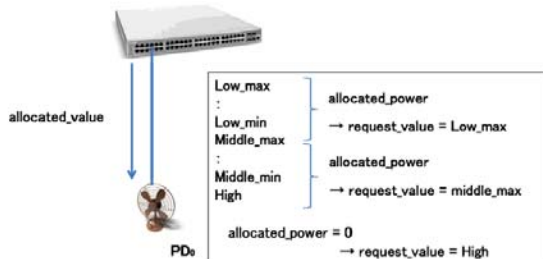


図 10：電力許容量を超えた場合の $power_request$ の値

まず、PDi が初めてつながった場合、最小起電力として $request_priority$ が High の $request_value[i]$ を送信する。もし、その電力要求が通り、 $allocate_value$ として認められた場合、次回の要求は、 $request_priority$ が Middle の内もっとも大きな値（これを $middle_max$ と名付ける）を送信する。そして、もし要求が満たされなかった場合は、同じ $request_priority$ が Middle の値の中から要求の通る $power_request$ が $request_priority$ が High の $power_request$ を送る。これにより $request_priority$ が Middle における最適な値を送信することができる。その次に送る $power_request$ であるが、以下の 2 つのパターンに分けることができる。第一に $allocate_value$ の値が $middle_max$ と同値であった場合、PSE からの電力にまだ余裕があると考えられることから $request_priority$ が Low の内もっとも大きな値（これを low_max と名付ける）。を送信する。そして、もし要求が満たされなかった場合は、同じ $request_priority$ が Low の値の中から要求の通る $power_request$ が $request_priority$ が $middle_max$ の $power_request$ を送る。

これにより PD におけるリストのエントリの数の大小にかかわらず、段階的に $request_priority$ を公平に上昇させることができる。

6. 考察とまとめ

今回我々の行ったモデル化において、もし優先度に偏りがあった場合には、低い優先度を持つ機器が一段階優先度の高い要求を出すため、優先度が上昇する。またその要求の結果、高い優先度を持つ機器の要求を満たすことができなかった場合優先度が下がる。これによりすべての機器がほぼ等しい優先度を持った要求を機器に対して電力を配ることが可能となる。また、このアルゴリズムは優先度 High の機器は 1 つであることと優先度の逆転が起きないという制約条件があることから、定数時間でただ唯一の解が得られる。最悪の場合はポート数 \times 3priority 分の時間がかかる。

本研究においては PoE Power Supply Network において家庭内で確実な節電を実現するためのシステムとしてオンデマンド型電力ネットワークについての概要を述べ、これを実現するための技術として LAN ケーブル上に電力を流す技術である PoE に着目した。そしてオンデマンド型 PoE を実現する上で PoE には足りないものとこれを補うために PoE に必要な機能まとめ LLDP の拡張を行ってきた。またこの LLDP を利用した環境のモデル化を行い、このモデル化においてすべての入力の場合においても優先度をみて平均化された電力要求を満たすことのできるアルゴリズムを開発した。

謝辞

本研究は NICT 高度通信・放送開発委託研究による。

参考文献

- [1] i-Energy WG. <http://www.i-energy.jp/>.
- [2] Takashi Matsuyama. Creating safe, secure, and environment-friendly lifestyles through i-energy. In New Breeze, volume 21, pages 1–8, Apr 2009.
- [3] Yasuo Okabe, Tomoki Shibata, and Kazumi Sakai. The design and implementation of an on-demand DC grid in home, SAINT2011. Jul 2011.
- [4] Takuya Miyamoto, Youichi Koyama, Kazumi Sakai, Yasuo Okabe, A GMPLS-based Power Resource Reservation System toward Energy-on-Demand Home Networking, SAINT2012, July 2012.
- [5] IEEE Standard 802.3AF Power over Ethernet IEEE Computer Society Jun 2003
- [6] IEEE Standard 802.1AB Station and Media Access Control Connectivity Discovery, IEEE Computer Society, Jun 2005.