

大規模UPSシステムの 効率向上

リチャード L セイヤー

White Paper #108



要約

エネルギーリソースがますます枯渇し高価になっている中で、電力効率は、大規模なUPSシステムの仕様決定や選択において重要な性能上の要素となりつつあります。企業のUPSシステム運用コスト、特に電気代に大きく影響すると考えられる、小さいけれども重要な要因が 3 つあります。残念ながら、システムの仕様決定時にこれらの要因を認識していないケースが多いため、運用時の効率が適切に考慮されず、運用コストを含む総所有コストがかさむ結果になっています。このホワイトペーパーでは、UPS の効率を評価する際によくある間違いや誤解について説明します。UPS の効率曲線について説明と比較を行い、関連するコストを数値化して説明します。

はじめに

従来、UPS システムの仕様や選択においてはシステムの信頼性のみに焦点を当てることがほとんどでした。この信頼性とは、製造元や設計エンジニアが提示する平均故障間隔 (MTBF) で表されます。しかし現在、2 つの動向により、信頼性ととも、効率が UPS 評価の最重要ポイントとなりつつあります。(1) システム運用期間全体の 総所有コスト (TCO) への注目、そして (2) “グリーン ビルディング” 認定プログラムや電力会社による需要制御プログラムのような、公的および私的な環境への取り組みです。

UPS の効率を低下させる 2 つの大きな要因は、UPS モジュール自体の内部損失と、システムの導入時 (容量選定の適正化、冗長構成など) における損失です。UPS システムの仕様を決定する際、多くの場合は製造元によって公表された最高条件下での値のみが効率の数値として考慮されます。後で説明しますが、これは間違いの元になります。

このことが企業の電気代に大きな影響を与える可能性を示すには、例で考えるのがわかりやすいでしょう。製造元の異なる 2 つの 1,000kW UPS システムを想定してみます。UPS システム 1 と UPS システム 2 は、公表されている効率 (最大負荷時 93%) が同じで、2N 構成で運用され、12 円 / kW hr の電気代を消費し、300 kW の負荷をサポートします。この 2 つのシステムを運用するための年間電気代に違いはないと考える人も多いでしょう。しかし、緊急時およびメンテナンス時を除き、その考えは誤っています。UPS は、2N 構成では 100% の負荷レベルで運用されることはありません。それぞれの “N” は、対になっているシステムが使用できなくなったときに最大負荷をサポートする能力を備えていなければならないからです。そのため、通常稼働時の各 UPS の最大設計負荷は 50% を超えることはありません。実際には、2N システムではそれぞれ 50% の負荷に達することすら珍しいのです。2N データセンタは 2N 容量の 20 ~ 40% で運用されているとする調査もあります。¹ この例では、平均的な 30 % の負荷で、各 UPS が 150 kW をサポートする場合を想定することにしましょう。システム 1 の各 UPS は、年間 1,256,400 円の電気代がかかります。これに対してシステム 2 の各 UPS の電気代は 3,398,640 円です。各システムには 2 つの UPS があるため、損失に対する電気代は年間でそれぞれ 2 倍の 2,512,800 円と 6,797,280 円となります。これらの UPS 損失は熱となって現れ、冷却システムで処理する必要があります。冷却システムが熱を処理するために熱 1 kW につき 400 ワットが必要であると仮定すると、年間それぞれ 1,005,120 円と 2,718,912 円がさらに必要となります。² この例では、平均的なデータセンタの耐用期間である 10 年間で、UPS システムの合計コストは表 1 に示すように、それぞれ 35,179,200 円と 95,161,920 円になります。3 つの要因のうちの 1 つによって、同じに見える 2 つの UPS システムの間に、なぜこれほどの差が生じるのでしょうか。

¹ データセンタの UPS の平均的な負荷は、APC ホワイトペーパー #37『データセンタインフラの過剰設備により発生する不要なコストを回避するために』で記述されているとおり、約 30% です。

² 400 ワットというのは、データセンタの実際の冷却コストに対して、少なめに見積もった場合の数値です。次の報告書では、冷却 kW はデータセンタの総熱負荷の 51% を占めているとされています。Jennifer Mitchell-Jackson 著『*Energy Needs in an Internet Economy: A Closer Look at Data Centers*』(2001 年 7 月 10 日) 35 ~ 37 ページ

表 1 - 同一負荷の 2N 構成システム間で生じるコストの差

UPSシステム	UPS 損失コスト	冷却コスト	電力損失による年間コスト	電力損失による 10 年間のコスト
UPSシステム 1	¥2,512,800	¥1,005,120	¥3,517,920	¥35,179,200
UPSシステム 2	¥6,797,280	¥2,718,912	¥9,516,192	¥95,161,920

答えは、2 つの UPS システムの効率曲線と、負荷に対する設備容量にあります。1 つの UPS で効率を 5% 改善すると、UPS の負荷量によっては電気代を 18% ~ 84% 削減できる可能性があります。これについては、現在販売されている 2 つの UPS 設計構成を使用して後で説明します。

UPS の製造元は、現在求められている効率や環境の要件を満たすために、技術、トポロジ、モジュール性という 3 つの要素を利用して大容量 UPS の効率を改善することができます。これらの要素によって、熱エネルギー (kW) で表される UPS の電力損失を削減できます。このホワイト ペーパーでは、効率曲線と、UPS の効率評価の際によくある間違いについて説明します。製造元が技術、トポロジ、モジュール性を利用して UPS 効率を改善する方法も説明します。データセンタの効率の詳細については、APC ホワイト ペーパー #113『データセンタの電力効率のモデル化』を参照してください。

UPS 効率曲線

UPS のデータ シートに UPS 効率の値が 1 つしかない場合、それはほぼ間違いなく 100% 負荷 (負荷率) で、他の有利な条件 (完全に充電されたバッテリー、UPS 定格入力電圧) を使用し、入力変圧器やフィルタが接続されていないか導入されていない場合の数値です。ほとんどの UPS 製造元は UPS 効率を 100% の負荷で提示します。これは、UPS が達成できる最高の効率を表せるからです。**残念ながら、このような効率を実現できることはほとんどありません。100% の負荷に達することは無いからです。**銘板上の効率値で UPS の仕様を決定することは、高速道路上の最大燃費効率の数値だけを見て自動車の購入を決め、街で使用するようなものです。UPS の仕様を決定する際は、ほとんどの中〜大規模なデータセンタにおける運用時の平均的負荷である約 30% で効率を計算するのが良いでしょう。そのためにはまず、UPS 効率曲線とその作成方法について理解する必要があります。

図 1 は、UPS 効率曲線の基本的な形状を表しています。曲線の最高地点は、最大効率 (縦 軸) と最大負荷率 (横 軸) に対応しています。この曲線では、UPS の最大効率は 93% です。現実的な負荷レベルで UPS の仕様を決定するには、30% 程度の一般的な負荷レベルでの UPS 効率値を求めるか、テストしてみることが必要です。

UPS 効率曲線の作成方法

効率曲線は、まず UPS に供給される (入力) 電力と、UPS が負荷に供給する (出力) 電力を計測することによって作成されます。これらの計測は、さまざまな負荷率 (通常は 25%、50%、75%、および 100%) で行われます。UPS 自体が消費する電力 (無負荷損失) を調べるため、0% の負荷でも計測が行われます。これらの計測の結果、出力電力から入力電力を減算することで損失が計算されます。これらの損失はグラフ上に座標で示され、それらの点に沿って線が描かれます。この線から、すべての負荷の割合に対して他のすべての点が座標に示されるような計算式が導き出されます。すべての損失が計算されると、負荷率を横軸として、入力電力に対する出力電力の比率が座標に示され、効率曲線が作成されます。

この曲線では 89% になります。データセンタで冗長 UPS (2N) を使用する場合は、両方の UPS に負荷が分散されるため、効率はさらに下がって 82% になります。冗長性の影響については、このホワイト ペーパーで後述します。

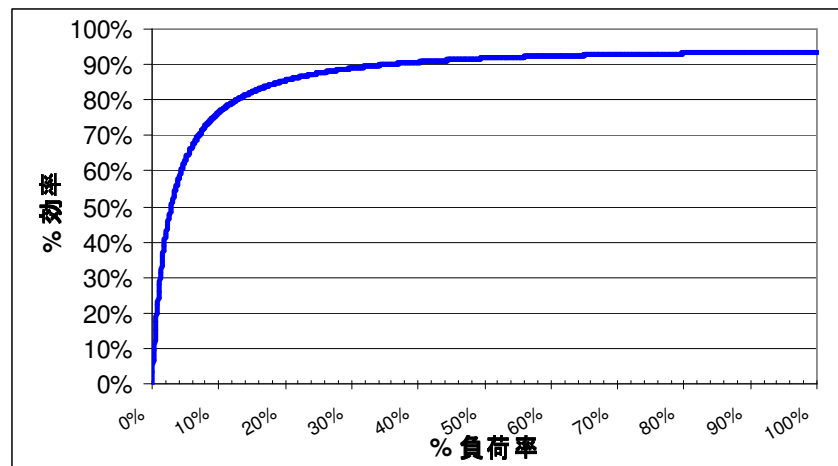


図 1 - UPS 効率曲線

図 1 の効率曲線をより深く理解するため、図 2 では電力の行方について示しています。

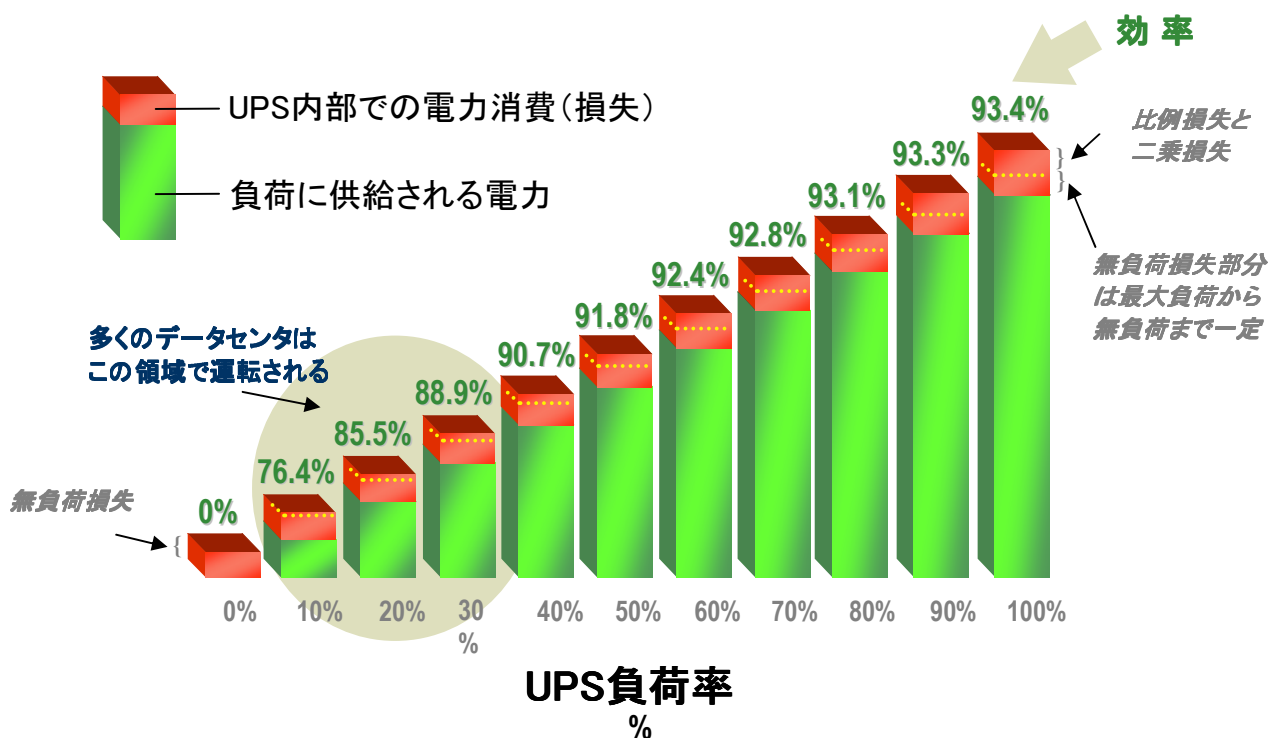


図2 - UPS の総入力電力の内訳 (電力の最終的な行方)

この図では、緑色の棒グラフが IT 負荷に消費されるすべての電力を、赤色の棒グラフが UPS 内部損失を示しており、図 1 の効率曲線を定義しています。UPS が完璧な効率を実現すれば、UPS に供給されるすべての電力がデータセンタの負荷に用いられ、すべての負荷レベルにおいて全部が緑色の棒グラフ（無損失）となります。この場合、効率“曲線”は水平の線になるでしょう（すべての負荷に対して 100%）。しかし、赤色の棒グラフで示されているように、入力電力の一部は UPS 本体によって消費されます。UPS 損失には、“無負荷”損失、“比例”損失、および“2 乗”損失の 3 種類があります。

無負荷損失

負荷が 0% の場合、すべての入力電力が UPS によって使用されるため、“無負荷”損失と呼ばれます。この損失は、風袋、不変、固定、分路、平行などの名前でも呼ばれることもあります。これらの損失は負荷とは関係なく、変圧器、コンデンサ、ロジックボード、通信用カードなどへの電力供給が原因となります。無負荷損失は UPS 損失全体の 40% 以上を占める場合があり、UPS 効率を上げるためにはこの改善が不可欠です。これについては付録で詳しく説明します。

比例損失

UPS の負荷が増加するにつれ、通電経路内のさまざまな部品によって“消費”される電力が大きくなります。たとえば、トランジスタによるスイッチング損失、コンデンサやリアクトルによる電気抵抗損失などは比例損失の例です。

2 乗損失

UPS への負荷が大きくなるにつれ、そのコンポーネントに流れる電流が大きくなります。これによって、電流の 2 乗の損失（ I^2R 損失）が UPS 内に生じます。電力損失は熱という形で消費され、電流の 2 乗に比例します。2 乗損失は UPS 負荷率が高いと大きくなります（1 ~ 4%）。

複数の UPS で効率を比較することは、それらの損失（図 2 の赤色の棒グラフ）のみを評価することを意味します。効率曲線は単独で、すべての負荷レベルでの比例損失、無負荷損失、2 乗損失の数値化を含め、UPS に関する多くの情報を伝えます。UPS の負荷率に対するこれら 3 種類の損失を座標で示すと、図 3 のような電力損失グラフが出来上がります。負荷率の全領域を通じて無負荷損失が一定の値を保っているのに対し、UPS に接続される IT 機器が多くなるほど比例損失が増大していることがわかります。

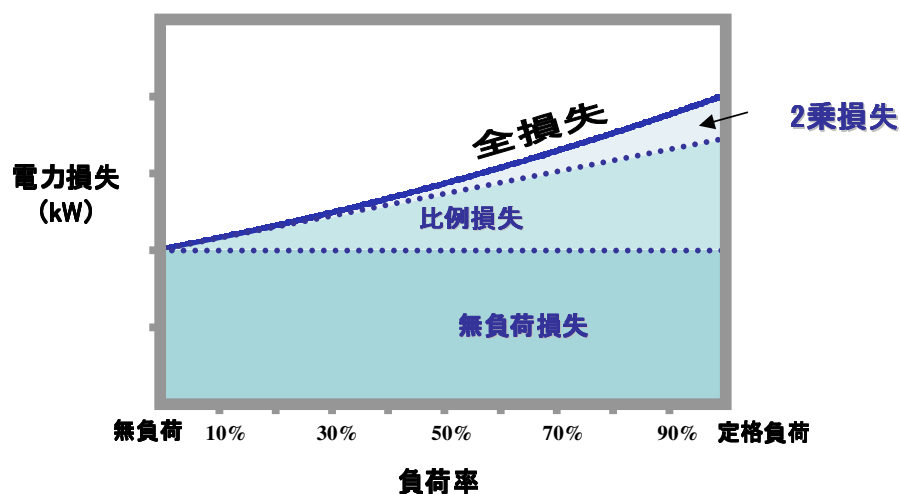


図 3 - 電力損失グラフ

UPS システムの仕様決定時によくある間違い

UPS システムの仕様決定時、UPS 同士を比較して効率を追求することは軽視されがちです。その理由と、それによって発生する不都合を表 2 に示します。

表 2 - UPS 効率を考慮しない理由

理由	不都合
公表されている UPS 効率はほぼ間違いなく 100% の負荷と最高条件下の数値なので、効率はどの UPS でもほとんど変わらない。	公表されている効率は、UPS に 80% 以上の負荷がかかると予想される場合のみ考慮すべきです。それ以外の場合は、UPS の仕様決定時には、より低い負荷における効率を考慮する必要があります。また、製造元によっては 効率を 0.5 ~ 1% 悪化させる入力フィルタを除外していることがよくあります。
UPS に 80% 以上の負荷がかかった場合、UPS 損失の電気代は、IT 負荷の電気代に比べれば小さな割合にしかならない。	これは正しいですが、実際には使用する UPS によって電気代に大きな差が生じます。
比較されている UPS の公表効率は、すべての負荷シナリオに対する電力損失の計算に使用されており、結果的に同じようなコストとなる。	効率は 30% 以上の負荷では一定のように見えますが、実際には徐々に下がり、20 ~ 30% 以下の負荷レベルでは大きく下がります。また、効率の差は小さくても、電気代にすると予想以上に大きな差となります。
年間ベースで計算すると、コストはわずかである。	年間コストはわずかに見えますが、データセンタの平均的な耐用期間である 10 年間で計算する必要があります。

企業は、電力量計で計測された電気代を支払います。これは、あらゆる機器の仕様の最終的なベンチマークです。そのため、製造元の効率曲線のデータは現実の導入状況に基づくべきです。さらに、データセンタの電力システム的设计では、UPS だけでなく、パワートレイン全体の効率への影響を考慮する必要があります。たとえば、計測される UPS 効率を上げるための、入力フィルタの除去です。UPS は本来、高調波や不必要な電流を発生する性質があ

るため、上流の配線や変圧器で熱損失が増大し、効率が低下します。UPS 入力フィルタは、交流の高調波成分を減衰させることで、このような悪影響を最小限にとどめます。計測される UPS 効率を上げるために入力フィルタを除去することで、製造元は実際には、熱損失とそれに関連する電気代をさらに上流に移動しています。最終的にエンドユーザーは、最大負荷時 0.5 ~ 1% 以上のコストを知らない間に払っているのです。これは、UPS が一般的に約 30% の負荷で使用されており、フィルタの固定損失の割合が高くなるためです。たとえば、12 円 / kW hr の場合、30% 負荷時の 1,000kW UPS を想定すると、最大効率は 89% になります。これにフィルタを追加し、この負荷レベルで効率が 3% 低下する場合、年間の電気代は 3,940,920 円から 5,133,720 円となり、32% 近く増加します。

効率を考慮して UPS の仕様を決定するための最も効果的な方法は、他の UPS と比べて特定の UPS を使用した際のエネルギー節約のメリットを完全に説明するような効率曲線を製造元に要求することです。効率曲線は、簡単なスプレッドシートで 0% ~ 100% のすべての負荷における電力削減を計算できるように、入力電力と出力電力のデータを含む必要があります。**製造元の効率曲線は、仕様を検討しているユーザーの構成に類似した構成に基づいていることが重要です。**このホワイトペーパーの付録では、UPS 効率をさまざまなシナリオで比較しながら、詳しく説明しています。次のセクションでは、製造元がさまざまな設計手段を使用して UPS 効率を高める方法を説明します。

大規模な UPS の効率の改善

UPS 効率を改善するために製造元が削減可能な重要な損失として、無負荷損失、比例損失、2 乗損失の 3 種類があります。製造元はそのために、技術、トポロジ、モジュール性という 3 つのポイントを利用する必要があります。設計エンジニアは、これらの要素が効率にどのように影響するかを理解することで、運用時の電気代を大きく節約する UPS システムを特定することができます。

技術

技術という言葉はトポロジやモジュール性と重複しているように見えますが、このホワイトペーパーでは、ハードウェアやソフトウェアを含む、UPS のビルディング ブロックのみを指します。

大規模なソリッド ステート (“静止型”) UPS システムは、交流 (AC) を直流 (DC) に、そして DC を AC に変換することで動作します。この電力変換プロセスの一部として素早いオンとオフの切り替えがあり、その本来の電気抵抗により、スイッチ全体の熱という形で電力損失が発生します。実際には、スイッチが開いていても、漏洩電流によって少量の熱損失が常に発生しています。これは、ロープ (電流) が人の手 (スイッチ) で素早く引っ張られるときに発生する熱に似ています。ロープがきつく握られている (スイッチが閉じられている) ときは熱が発生し、ロープがゆるく握られている (スイッチが開いている) ときはわずかな熱しか発生しません。

当初、スイッチ プロセスは、高電流・高電圧のスイッチング機能を持つサイリスタ (SCR) で実現されました。SCR は、1990 年代の中頃まで標準的な UPS コンポーネントであり、一部の古い設計ではまだ使用されています。SCR は比較的安価で設計が容易でしたが、重大な欠点がありました。ショートしやすく、UPS の最重要ポイントである 直流母線でショートすることがあったのです。この障害から直流母線を保護するために回路や、機器を追加する必要があり、結果的に、障害を起こす可能性のあるコンポーネントが増えることになりました。SCR はオンにすることは容易ですが (1 ~ 2 ボルトの信号をゲートに送ればよい)、オフにするのが難しい (逆バイアスの電圧スパイクが必要) という特徴があります。トランジスタにはこの問題がなく、オンやオフにするために電力をそれほど必要としません。トランジスタの場合、ゲート信号が存在するときは “オン” で、そうでないときは “オフ” ですが、1990 年代中頃までは電流処理の 機能に限定されていました。しかし、絶縁ゲート バイポーラ トランジスタ (IGBT) の発明により、これは解決されました。より高速、高電力の処理が可能になったことで、IGBT は “高周波パルス幅変調 (PWM)” モードで運用できる電力変換プロセスを実現しました。高周波 PWM によって、必要なフィルタ コンポーネントのサイズが小さくなり、効率が改善されます。

今日では、多くの製造元がアナログ制御からデジタル信号処理 (DSP) 制御に移行しています。これは、歯車と針を用いていた従来の時計が、電池と液晶ディスプレイ (LCD) を使用したデジタル時計に切り替わったのと似ています。DSP 制御ははるかにインテリジェントで迅速なレートで実行できるため、多くの決定を下すことができ、効率が上がります。DSP 制御では、アナログ回路に比べてコンポーネント数を減らすことができます。

さらに先進的な DSP 制御では、インテリジェントに適応できるスイッチによって効率を上げることができます。損失が発生しやすいスイッチ切り換えを少なくすることで、メインの高周波電流スイッチが出力電流の精度を維持できるのです。負荷が少ない場合、DSP の使用によって最大 50% もスイッチ切り換え回数を減らせることもあり、効率を大きく上げることができます。また、DSP 制御は前の世代の制御よりも少ない電力で済み、無負荷損失を大幅に減らすことができます。

IGBT と DSP 技術は、新世代の UPS 製品で UPS の効率を上げる要因となった大きな技術革新です。

トポロジ

UPS トポロジは基本的に、電力コンポーネントが内部でどのように接続されるかを定義するものです。製造元は、特定のアプリケーションや容量範囲の損失を低減させるツールとしてトポロジを使用できます。大規模な UPS システムで使用される 2 つの主なトポロジとして、ダブル コンバージョン オンライン方式とデルタ コンバージョン オンライン方式があります。米国 EPRI (Electrical Power Research Institute) の最近の発表によると、大電力の UPS システム (200 kVA 以上) の場合、現在はデルタ コンバージョン オンライン方式の UPS トポロジの方が高い効率を実現することが明らかになりました³ (図 4)。トポロジが UPS 効率にもたらす効果については、後で説明します。

³ My Ton, Brian Fortenbury 著『*High Performance Buildings: Data Centers Uninterruptible Power Supplies (UPS)*』20.ページ http://hightech.lbl.gov/documents/UPS/Final_UPS_Report.pdf (2006 年 4 月 28 日アクセス)

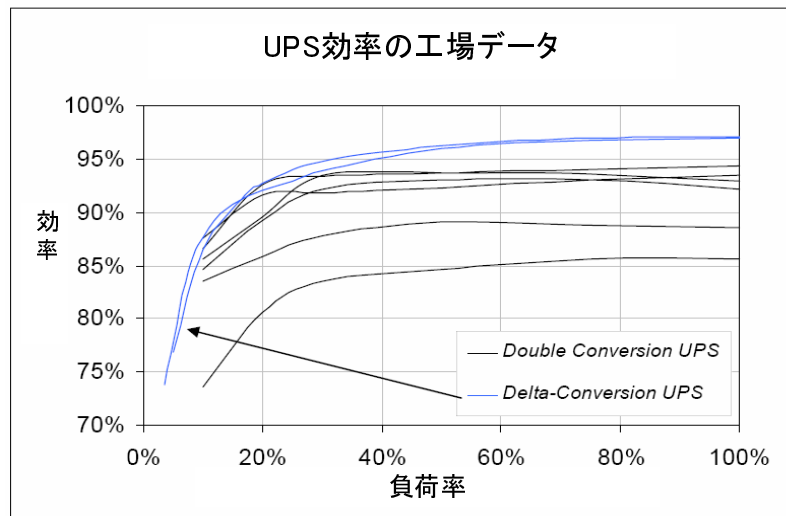


図 4 - EPRI UPS レポート (p.20) からの抜粋

デルタ コンバージョン オンライン方式システムの場合、主に無負荷損失を減らし、さらに 2 乗損失を減らすことで効率が上がります。入力変圧器を直列接続して使用することで、ダブル コンバージョン オンライン方式のようにすべての入力電力を DC に変換したり AC に戻したりする必要がなくなり、UPS 入力電流と UPS 出力電圧が完全に制御されます。これは 図 5 に示されています。デルタ コンバージョン オンライン方式の UPS の出力電圧は出力インバータによって完全に制御され、ダブル コンバージョン オンライン方式の UPS と違って電力供給とは関係なくなること注目してください。また、ダブル コンバージョン オンライン方式に必要な入力フィルタをなくすことで、無負荷損失を低減しています。従来のダブル コンバージョン方式の UPS は、大きな入力高調波電流 (全高調波歪み率 9% ~ 30%) と、低い力率 (0.9 ~ 0.8) を発生していました。そのため、ダブル コンバージョン方式には入力フィルタが追加され、これによって力率を上げ、上流の配線や変圧器の熱損失を増大させる高調波電流や不必要な電流を最小限にとどめます。しかし、入力フィルタを追加することで、エンジン発電機による電圧制御が妨げられます。デルタ コンバージョントポロジでは、正弦波電流が流れるように制御することで、力率を維持しながら入力高調波電流をわずか (3% 未満) にとどめ、入力フィルタをまったく使用しなくてもよくなりました。UPS トポロジの違いについては、APC ホワイト ペーパー #1『UPS の運転方式』を参照してください。

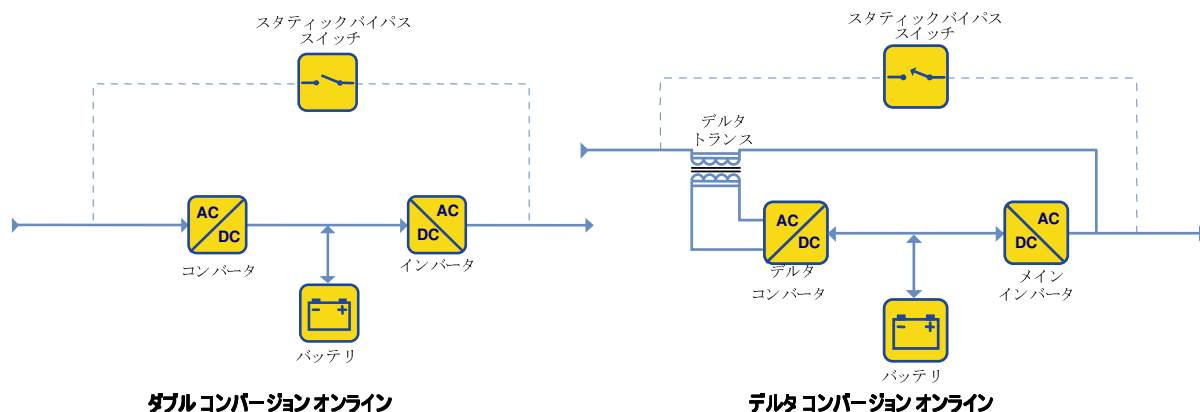


図5-2 2つの「オンライン」UPS 電力変換技術

APC White Paper #1 『UPS の運転方式』

デルタコンバージョンは、製造元が電力性能を犠牲にせずにUPS効率を上げ、電力を節約するためにトポロジを利用できる良い例です。次の比較では、このコスト削減についてわかりやすく説明しています。

1N トポロジの比較 - デルタコンバージョンとダブルコンバージョン

構成「A」は、1,000kWのデルタコンバージョンオンライン方式のUPSです。構成「B」は、1,000kWのダブルコンバージョンオンライン方式のUPSです。図6は、各UPSの負荷率に対する効率曲線を示しています。どちらの場合も、負荷は300kWと仮定しています。負荷30%での効率は、構成「A」で94.9%、構成「B」で88.7%です。効率で6.2%の差となり、UPSの耐用期間全体のコストに換算すると大きな差となります。

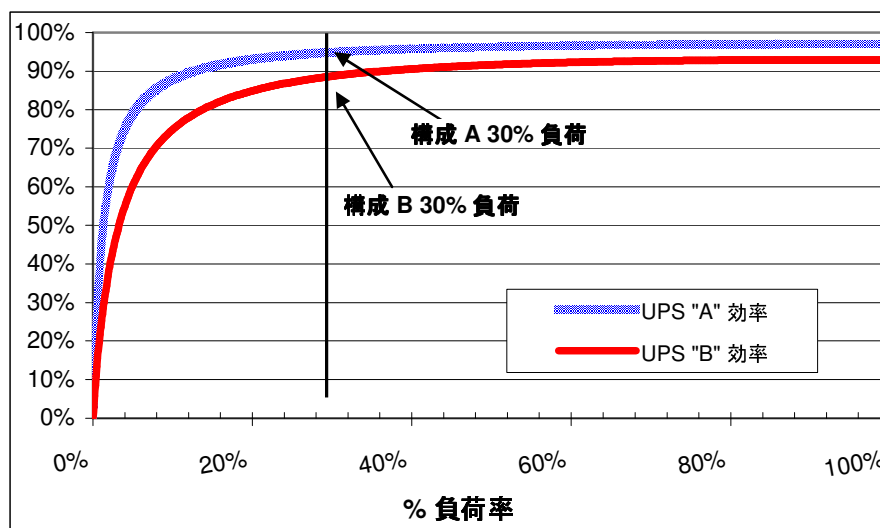


図6 - デルタコンバージョンUPS「A」とダブルコンバージョンUPS「B」の効率曲線

表 3 では、構成 “B” のダブル コンバージョン トポロジに対して、構成 “A” のデルタ コンバージョン トポロジが、58% のコスト減を実現することを示しています。各 UPS のコスト減に最も貢献しているのは、すべての損失のうち 60% を占める無負荷損失であることがわかります。

表 3 - 300 kW 負荷での 10 年間の効率コストの分析 - デルタ コンバージョンとダブル コンバージョン (1N)

UPSシステム	効率%	比例 損失	無負荷 損失	2 乗 損失	冷却 コスト	損失の 合計コスト	10 年間の コスト削減率
構成 “A” デルタ コンバージョン	94.87%	¥2,018,400	¥14,012,520	¥1,022,760	¥6,821,520	¥23,875,200	58%
構成 “B” ダブル コンバージョン	88.67%	¥3,025,560	¥33,995,760	¥3,268,680	¥16,116,000	¥56,406,000	

同じ UPS を冗長 2N 構成（二重化システム）で分析した場合、表 3 に示されたコストは約 2 倍になります。次の比較で、このことを説明します。

2N トポロジの比較 - デルタ コンバージョンとダブル コンバージョン

構成 “A” は、冗長 (2N)1,000kW デルタ コンバージョン オンライン方式の UPS システムです。構成 “B” は、冗長 (2N) 1,000kW ダブル コンバージョン オンライン方式の UPS システムです。この場合も、負荷は 300 kW と仮定しています。通常運用時には 2 つの UPS がそれぞれ負荷の半分を担うことから、各 UPS は 15% の負荷しか持たないことになります。表 4 に、この 2N シナリオのコスト配分を示します。特定の UPS では、2N 構成では 2 乗損失が半分になりますが、2 倍になる無負荷損失と相殺はできません。無負荷損失は負荷に関係ないからです。

表 4 - 300 kW 負荷での 10 年間の効率コストの分析 - デルタ コンバージョンとダブル コンバージョン (2N 冗長)

UPSシステム	効率%	比例 損失	無負荷 損失	2 乗 損失	冷却 コスト	損失の 合計コスト	10 年間の コスト削減率
構成 “A” - デルタ コンバージョン	91.17%	¥2,018,400	¥28,025,040	¥511,440	¥12,221,880	¥42,776,760	58%
構成 “B” - ダブル コンバージョン	81.28%	¥3,025,560	¥67,991,640	¥1,634,400	¥29,060,640	¥101,712,240	

モジュール性

モジュール性は、電力消費削減のために製造元が利用できる 3 つめの手段です。図 5 の効率曲線で示されているとおり、UPS が最大負荷での運用に近くなるほど、効率が上がります。モジュール性により、ユーザーは、負荷にできるだけ適合するように UPS システムのサイズを決定できるようになります（つまり、UPS ができるだけ効率曲線に沿った形で運用できるようになります）。負荷と容量を適合させるための効果的な方法は、データセンタでよく使用される機器、ブレード サーバーで簡単に説明できます（図 7）。

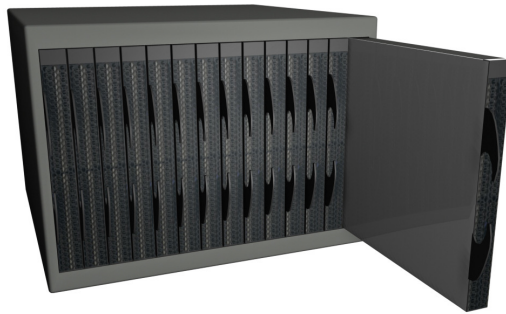


図 7 – モジュール式の拡張可能なブレード サーバー

ブレード サーバーの構成は、UPS システムで役立つ 鍵となる 2 つの特性、モジュール性と拡張性を備えています。

ブレード サーバーは、ブレード サーバー用のフレームを購入し、標準的な “ブレード” をフレームに設置することで、アプリケーションで必要な処理量を達成するためのモジュール式の装置です。フレームに挿入されるブレードの数が多くなるほど、強力な計算装置となります。こうして、必要な計算機能に応じてサイズを変更できる、“拡張可能な” システムとなります。

ここで、同じようにモジュール方式の電力コンポーネントを使用した UPS システムを想像してみましょう。たとえば、UPS 本体が 1,000kW の電力出力が可能で、UPS システム上の負荷が大きくなるにつれて、必要な出力容量に応じて標準化された電力モジュールが追加できると仮定します。追加容量が必要な場合、UPS を 200 kW ～ 1,000kW まですべて拡張できます。結果として、必要な電力コンポーネントのみを購入すればよくなり、資本投資の浪費を防ぐことができます。さらに、UPS は実際の負荷に適合した容量になるため、より高い負荷レベルで動作し、電力効率が上がります。次の比較では、前出の例で使用した 300 kW の負荷でサイズを調節したときに効率がどのように改善されるかを示しています。

1N モジュールの比較 – 適切なサイズの UPS と過大な UPS

構成 “A” は 1,000kW の拡張可能なデルタ コンバージョン オンライン UPS で、2 × 200 kW モジュール (400 kW) で構成されています。構成 “B” は同じ UPS ですが、5 × 200 kW のモジュールで 1,000kW を構成しており、サイズが大きすぎます。この例の効率曲線を 図 8 に示します。⁴

⁴図 8 の効率曲線は過大な UPS を示していますが、UPS のサイズが適切に調整されると近似値になります。

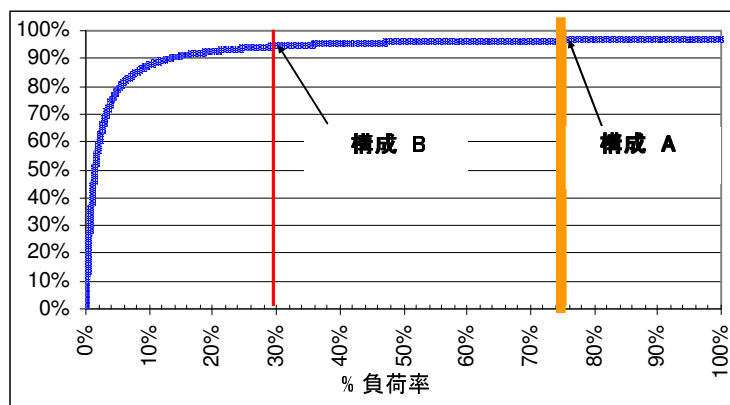


図 8 -1,000kW デルタ コンバージョン UPS の効率曲線

このグラフでは、曲線上の 2 つのポイントが示され、比較が行われています（構成 A と B、それぞれに対して 75% と 30% の負荷率）。これらの 2 つのポイントは、それぞれ 96.87% と 94.87% の効率に対応します。表 5 は、それぞれのコスト分析の内訳を示しています。比例損失は同じですが、過大な UPS の無負荷損失は、適切な容量の UPS の 2.5 倍になります。ただし、適切な容量の UPS の効率の増加幅は、過大な UPS の 2.5 倍となる 2 乗損失の増加により、わずかに下がります。これは、UPS 負荷率が高いほど 2 乗損失が大きくなるためです。

表 5 - 300 kW 負荷での 10 年間の効率コストの分析 - サイズ調整された拡張可能な
デルタ コンバージョン UPS - 適切なサイズと過大なサイズ (1N)

UPSシステム	効率 %	比例損失	無負荷損失	2 乗損失	冷却コスト	損失の合計コスト	10 年間のコスト削減率
構成 "A" - 適切なサイズの拡張可能 UPS	96.87%	¥2,018,400	¥5,604,960	¥2,556,960	¥4,072,200	¥14,252,520	¥9,622,680 40%
構成 "B" - 過大な拡張可能 UPS	94.87%	¥2,018,400	¥14,012,520	¥1,022,760	¥6,821,520	¥23,875,200	

次の比較では、冗長な設計ではこれらのコストがさらに削減されることを説明します。

2N モジュールの比較 - 適切なサイズの UPS と過大な UPS

構成 "A" は 2N (二重化システム)1,000kW の拡張可能なデルタ コンバージョン オンライン UPS システムで、各 UPS につき 2 × 200 kW モジュール (400 kW) に容量選定されています。構成 "B" は基本的に "A" と同じですが、5 × 200 kW のモジュールで 1,000kW に構成されており、容量が過大な点が異なります。表 6 は、それぞれのコスト分析の内訳を示しています。2 つの UPS 間の比例損失と無負荷損失の比率は 1N モジュールの比較のときと同じですが、それでも 10 年間のコスト削減は 53% にもなる点は興味深いことです。ここでも、低負荷において総損失に占める比率が小さくなる 2 乗損失が、正味の削減の理由となっています。

表 6 - 300 kW 負荷での 10 年間の効率コストの分析 - 容量調整された拡張可能な
デルタ コンバージョン UPS - 適切な容量と過大な容量 (2N)

UPSシステム	効率 %	比例損失	無負荷損失	2 乗損失	冷却コスト	損失の合計コスト	10年間のコスト削減率
構成 "A" - 適切な容量の拡張可能 UPS (2N)	95.60%	¥2,018,400	¥11,210,040	¥1,278,480	¥5,802,720	¥20,309,640	¥22,467,120 53%
構成 "B" - 過大な拡張可能 UPS (2N)	91.17%	¥2,018,400	¥28,025,040	¥511,440	¥12,221,880	¥42,776,760	

トポロジとモジュール性によって効率が上がることは、これまでの比較で述べてきたように明白です。では、トポロジとモジュール性の利点を組み合わせることで、効率をどこまで上げることができるでしょうか。次の比較で、その効果を数量化してみます。

1N トポロジおよびモジュール性の比較 - 適切な容量のデルタ コンバージョン UPS と過大なダブル コンバージョン UPS

構成 "A" は 1,000kW の拡張可能なデルタ コンバージョン オンライン UPS で、2 × 200 kW モジュール (400 kW) に容量調整されています。構成 "B" は 1,000kW の拡張不可能なダブル コンバージョン オンライン UPS で、容量が大きすぎます。どちらの場合も、負荷は 300 kW と仮定しています。負荷 30% での効率は、構成 "A" で 96.9%、構成 "B" で 88.7% であり、8.2ポイントの差となります。

表 7 は、拡張不可能なダブル コンバージョン UPS の代わりに、適切な容量のデルタ コンバージョン UPS を使用することで、コストを 75% 削減できることを示しています。この 1N 構成では、構成 "A" の合計電気代は構成 "B" のほぼ 4 倍です。さらに、構成 "A" の無負荷損失は全損失の 39% にまで減り、構成 "B" (60%) の半分近くになります。図 9 は、1N 構成のさまざまな損失による電気代の内訳を示しています。

表 7 - 300 kW 負荷での 10 年間の効率コストの分析 - 適切なサイズの
デルタ コンバージョンと拡張不可能なダブル コンバージョン (1N 冗長性なし)

UPSシステム	効率 %	比例損失	無負荷損失	2 乗損失	冷却コスト	損失の合計コスト	10 年間のコスト削減率
構成 "A" - 適切な容量の拡張可能デルタ コンバージョン UPS	96.87%	¥2,018,400	¥5,604,960	¥2,556,960	¥4,072,200	¥14,252,640	¥42,153,360 75%
構成 "B" - 拡張不可能の過大なダブル コンバージョン UPS	88.67%	¥3,025,560	¥33,995,760	¥3,268,680	¥16,116,000	¥56,506,000	

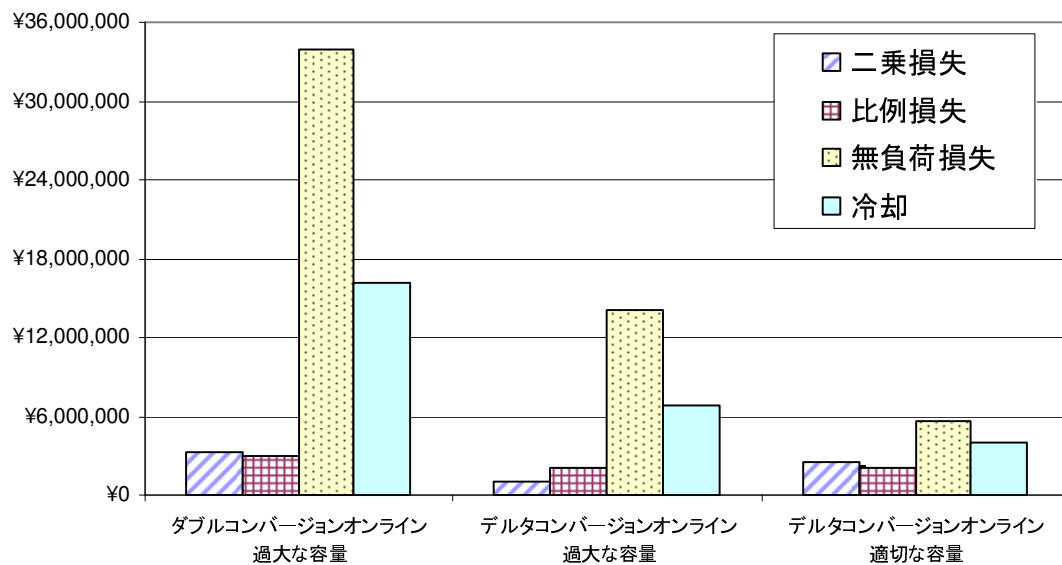


図 9 - 1N 構成の損失による 10 年間のコスト内訳

表 7 に示されたコストは、構成“A”と“B”が冗長 2N 構成 (システム + システム) の場合は約 2 倍になります。2N 構成では、表 8 に示すように構成“B”の電気代合計は構成“A”の約 5 倍になります。図 9 と図 10 を見ると、無負荷損失のコストへの影響は他の損失よりも大きいことがわかります。特定の UPS では、2N 構成では 2 乗損失が半分になりますが、2 倍になった無負荷損失を相殺はできません。無負荷損失は、ほぼすべての負荷レベルで最大の損失であるためです。

表 8 - 300 kW 負荷での 10 年間の効率コストの分析 - 適切なサイズのデルタ コンバージョンと
拡張不可能なダブル コンバージョン(冗長性あり 2N システム+システム)

UPSシステム	効率 %	比例損失	無負荷損失	2 乗損失	冷却コスト	損失の合計コスト	10 年間のコスト削減率
構成“A” - 適切なサイズの拡張可能デルタ コンバージョン UPS	95.60%	¥2,018,400	¥11,210,040	¥1,278,480	¥5,802,720	¥20,309,640	¥81,402,600 80%
構成“B” - 過大で拡張不可能なダブル コンバージョン UPS	81.28%	¥3,025,560	¥67,991,640	¥1,634,400	¥29,060,640	¥101,712,240	

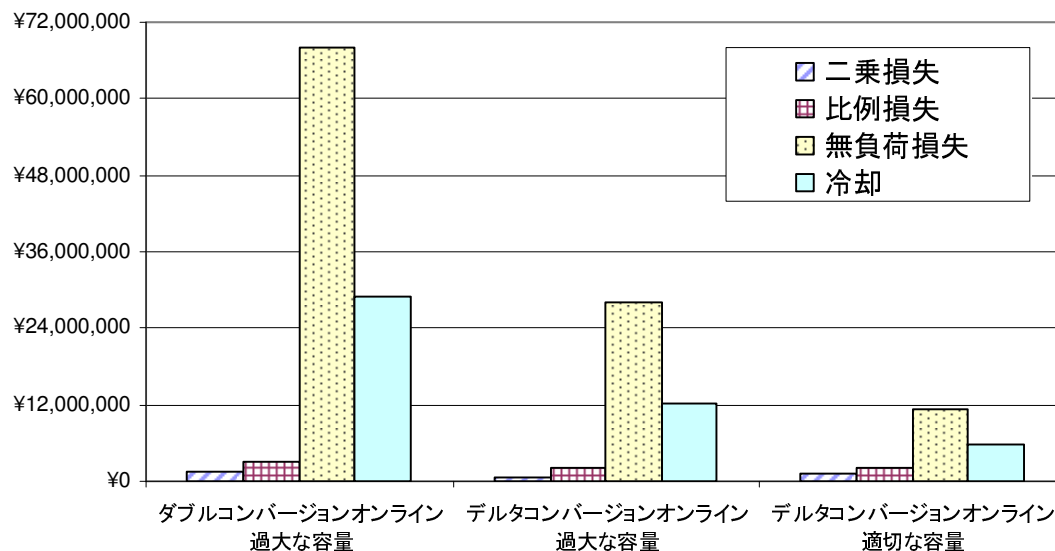


図 10 - 2N 構成の損失による 10 年間のコスト内訳

これらの比較から、より効率のよい UPS トポロジの選択と UPS システムの規模の適切化という 2 つの方法によって、UPS の効率向上が実現できることは明らかなです。効率のよいトポロジを選択したこれらの例では、間違いなく、最も効率が向上しています。ただし、これを実現するためには、既存の UPS の耐用年数が過ぎた場合でもなければ現実的とはいえない、新しいUPSの購入が必要となります。一方、UPSシステムの規模の適切化による効率向上を選択する場合は、必ずしも新しくUPSを購入する必要はありません。UPSシステムが複数存在する場合に規模を適切化するには、ある UPS システムの負荷を他の UPS システムに移行し、負荷のなくなったシステムの電源を切れるようにします。この方法は、大規模なデータセンタの空調ユニットにも適用されます。

図 11 は、200 kW モジュールで拡張可能な 1,000kW UPS システムの例です。資本の先行投資と日常的なシステム運用のコストが節約できるため、最終的には総所有コスト (TCO) が削減されます。

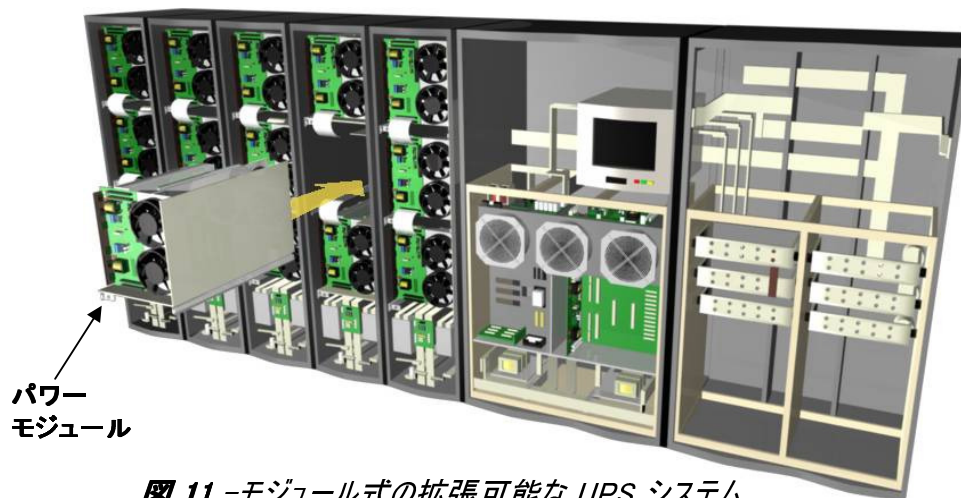


図 11 - モジュール式の拡張可能な UPS システム

負荷に合わせた UPS 容量の拡張による電力効率の向上だけでなく、モジュール式の UPS 設計は、可用性、迅速性、総所有コストの点でも著しく貢献します。モジュール式設計の利点の詳細については、APC White Paper #116『物理インフラにおける標準化とモジュール性』を参照してください。

その他の経済的利点

効率の向上には、直接的な電力消費の削減だけでなく、2 次的な利点もあります。たとえば米国では、2005 年エネルギー政策法により、商業建築物のエネルギー効率改善に対して税制上の優遇措置が適用されます。⁵ 同様に、資本控除拡大 (ECA) 制度により、英国の企業では最初の税制年度において、エネルギー効率改善設備の取得に使用した資金が 100% 控除されます。⁶ 電力会社が、総電力需要の削減を目的とした需要制御プログラム (DSM) により、高効率設計を奨励することもあります (米国では多くの地域で実施されています)。これらのプログラムでは、電気料金の割り引きや、電力会社による高効率技術の資本コスト援助などが行われます。こうした恩恵により、電力に精通したデータセンタ所有者は、さらに TCO を削減することができます。

電力効率の高い UPS 仕様を決定するには、すべての UPS 効率の測定が、異なるベンダー間でも同様の条件下で行われ、サードパーティのテスト機関によって管理および承認される必要があります。最近、ローレンス バークレーナショナルラボラトリ (LBNL) は、クリーンルームや研究所だけでなく、データセンタのエネルギー効率も向上させることに焦点を置いた “高性能なハイテク ビルディング” プロジェクトの一環として、UPS に関するレポートを発表しました。⁷ このレポートでは、効率の高い UPS の使用を促進する方法として、さまざまなタイプの UPS システムに対して、エネルギー効率と電力品質の標準化が提案されています。

また、効率の高い設計として “グリーン ビルディング” 認定があります。これは、市場で高い信頼性を得ている運動のメンバーとして効率的なデータセンタを選ぶものです。企業の中では、運用コストを下げて利益を上げることに加え、“グリーン” 認定が広告メッセージにプラスになることが認知されつつあります。企業にも、(低い製品コストにより) 顧客にも、そして環境にも良い結果がもたらされます。エネルギー資源が乏しく高価になりつつある中で、グリーン認定の市場での認知度と重要度は高まっていくでしょう。

実行できる事

- ・UPS システムを評価する際は、効率を重要な要素として考慮し、製造元から効率曲線を提供してもらいます。
- ・すべての UPS は低負荷時に効率が下がるという事実を理解し、製造元の効率データが最大負荷時の単独の値だけでなく、負荷の機能として示されていることを確認します。
- ・実際の負荷により適合するように UPS 容量を拡張できる、モジュール式 UPS 構成を選択します。**これは、効率に大きく影響します。**
- ・担当分野で提供されている可能性がある需要制御プログラムについて調べます。
- ・担当分野で “グリーン ビルディング” 認定を取得するための要件について調べます。

⁵ <http://www.energy.gov/taxbreaks.htm> (2006 年 4 月 28 日アクセス)

⁶ <http://www.ea.gov.uk/etl/page.asp?pageCode=w0002&showHeader=1&showMenu=1> (2006 年 5 月 11 日アクセス)

⁷ My Ton, Brian Fortenbury 著『High-Performance High-Tech Buildings – Uninterruptible Power Supplies (UPS)』(2005 年 12 月)

結論

データセンタは大量の電力を消費しますが、この事実は市場や企業で無視されがちでした。総所有コストが重要な決定要素となりつつある中で、システムの効率は差別化のための価値になっています。UPS 技術は、電力効率を上げるために革新を続けています。成功の真の尺度は（信頼性の標準は維持されるものとして）内部技術の詳細ではなく実際の達成効率である、ということを確認することが重要です。新しい技術が考案され、古い技術は改善されるでしょう。しかしユーザーの視点で重要なのは状況を説明する効率曲線であり、その情報と機器のコストを組み合わせてすぐにアクションを起こせることなのです。すべてのシステムが等しく信頼性があるのであれば（実際ほとんどそのとおりです）、できるだけ効率的なシステムを採用することは企業の決定として妥当です。“グリーン”な企業イメージに貢献し、迅速性を高め、モジュール設計によってサービス要件を単純化することは、付加的なメリットとして選択の妥当性を裏付けます。

関連文献

APC White Paper #1	UPS の運転方式
APC White Paper #17	Understanding Power Factor, Crest Factor, and Surge Factor
APC White Paper #75	UPS システム構成の比較
APC White Paper #78	MTBF (平均故障間隔) の解説と規準
APC White Paper #113	データセンタの電力効率のモデル化
APC White Paper #116	物理インフラにおける標準化とモジュール性

著者について

リチャード L セイヤーは米国ロードアイランド州ウエストキングストンにある APC 本社のデータセンタテクノロジー担当ディレクターで、APC のプロフェッショナル サービス チームを指揮しています。彼は 7x24 Exchange のメンバーであり、AFCOM's Data Center Institute の諮問委員です。彼は APC に入社する前に、Fidelity Investments、Aetna Life and Casualty、CIGNA Corporation の世界各地のデータセンタの設計、構築、運用に携わった経験があります。

付録

表 3 ～ 8 のコストの導出方法

この付録では、表 3 ～ 8 に示したコストがどのように導き出されたかを説明します。計算には次の変数を使用しました。

kW hr あたりのコスト = 12 円
1 年間の時間数 = 8,760 時間
運用年数 = 10 年
1kW の熱の除去に必要な冷却システムのエネルギー = 0.4 kW
1N (冗長性なし) システムでの UPS の負荷 = 300 kW
2N (二重化 システム) システムでの各 UPS の負荷 = 150 kW

このホワイト ペーパーに示されたコストは、図 A1 の曲線を使用して導き出したものです。デルタ コンバージョン オンライン UPS とダブル コンバージョン オンライン UPS の両方とも、サード パーティである TUV Rheinland Group によって 100% の抵抗負荷で計測されました。これらの電力損失曲線は、まず各 UPS に供給される (入力) 電力と、各 UPS が負荷に供給する (出力) 電力を計測することによって作成されました。これらの計測は、複数の負荷レベル (25%、50%、75%、および 100%) で行われました。UPS 自体が消費する電力 (無負荷損失) を調べるために 0% の負荷でも計測が行われました。これらの計測の結果、出力電力から入力電力を減算することで損失が計算されました。損失は、各 UPS の UPS 定格出力によって除算されました。これは、すべての負荷レベルでの UPS 損失を表す簡単な方法です。これらの損失率を Microsoft Excel 上に座標で示し、最小 R² 値 0.9998 でこれらのポイントに適合するように 2 次傾向線が追加されました。⁸ この線から、次に示すように、すべての負荷比率に対する他のすべての損失を座標に表示できるような計算式が作成されます。負荷レベルに対する損失率を均等な間隔で 1000 ポイント描くと、図 A1 の曲線が生成されます。

デルタ コンバージョン オンライン UPS の 2 次傾向線の計算式

$$y = 0.01081x^2 + 0.00640x + 0.01333$$

ダブル コンバージョン オンライン UPS の 2 次傾向線の計算式

$$y = 0.03455x^2 + 0.00959x + 0.03234$$

最初の項は UPS の定格出力に対する比率として 2 乗損失を示していることに注意してください。2 番目の項は比例損失を、3 番目の項は無負荷損失を示しています。これらは、すべての負荷レベルに対する UPS の総損失の数学的なモデルを表します。

⁸ R の 2 乗 (R²) は 0 ～ 1 の統計単位で、傾向線の値が、測定された値にどれだけ近くなるかを示します。R² 値が 1 の場合は完全一致または完全な相関を示します。

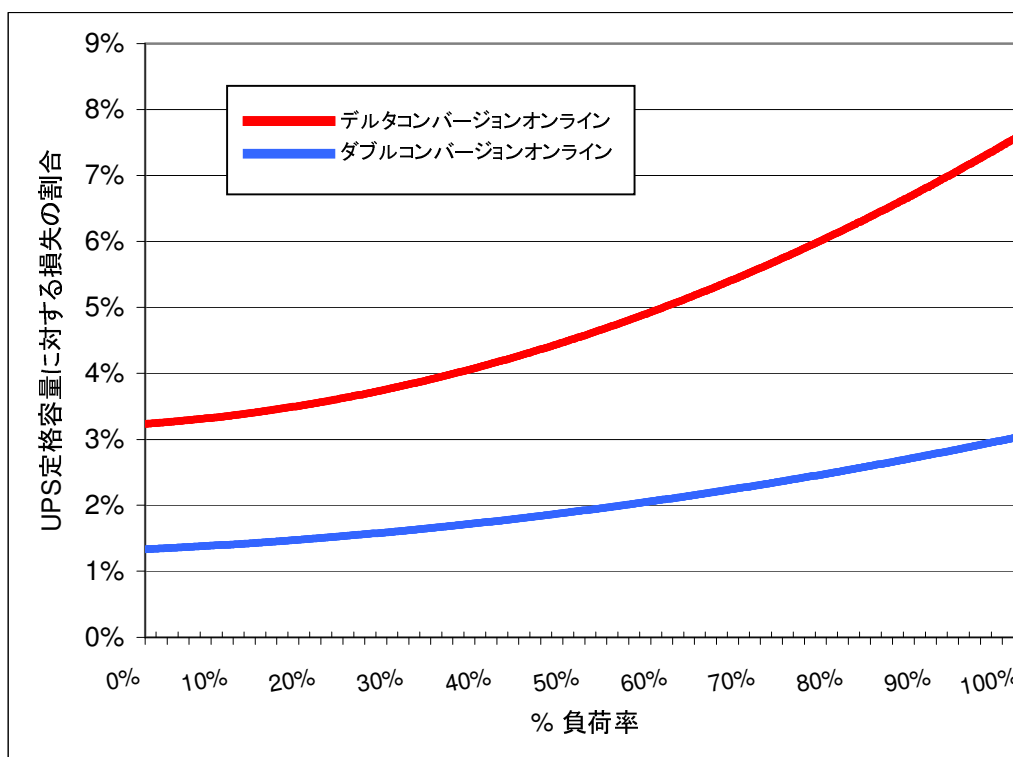


図 A1 - デルタ コンバージョン UPS とダブル コンバージョン UPS の電力損失曲線

この比較で示されているコストは、表 A1 のデータに基づいています。このデータは、前述の 2 次方程式から導き出されたものです。

表 A1 - 表 3 ~ 8 の計算に使用されたデータ

UPS システム	負荷 (kW およ び %)	比例損失 %	無負荷 損失 %	2 乗損失 %	効率 %
構成 - 適切なサイズの拡張可能 デルタ コンバージョン UPS	300 (75%)	0.48%	1.33%	0.61%	96.87%
構成 - 過大な拡張可能 デルタ コンバージョン UPS	300 (30%)	0.19%	1.33%	0.10%	94.87%
構成 - 過大で拡張不可能な ダブル コンバージョン UPS	300 (30%)	0.29%	3.23%	0.31%	88.67%
構成 - 適切なサイズの拡張可能 デルタ コンバージョン UPS	150 (38%)	0.48%	2.67%	0.30%	95.60%
構成 - 過大な拡張可能 デルタ コンバージョン UPS	150 (15%)	0.19%	2.67%	0.05%	91.17%
構成 - 過大で拡張不可能な ダブル コンバージョン UPS	150 (15%)	0.29%	6.47%	0.16%	81.28%

損失率は UPS の定格出力 (過大な UPS は 1000 kW、適切な容量の UPS は 400 kW) に対応していることに注意してください。負荷の比率に関係なく無負荷損失 (kW) は一定ですが、UPS 定格出力の比率は、負荷レベルが下がるにつれて高くなっています。

次の例を見ると、表 A1 の損失率の計算方法を理解しやすいでしょう。“構成 – 適切な容量の拡張可能デルタ コンバージョン UPS” について 75% 負荷での 2 乗損失率を計算するには、デルタ コンバージョンの計算式 $y = 0.01081x^2 + 0.00640x + 0.01333$ (“x” は 0.75) が使用されます。ただし、最初の項 $0.01081x^2$ で表される、損失の 2 乗部分を求めています。したがって、2 乗損失は UPS 定格出力 (このシナリオでは 400 kW) の $0.01081 \times (0.75)^2$ 、つまり 0.61% です。この適切なサイズの 400 kW UPS は、75% 負荷で 2.4 kW の 2 乗損失を生成することになります。

“構成 “A” – 適切なサイズの拡張可能デルタ コンバージョン UPS” について 75% 負荷での総損失率を計算するには、デルタ コンバージョンの計算式 $y = 0.01081x^2 + 0.00640x + 0.01333$ (“x” は 0.75) が使用されます。答えは UPS 定格出力 (このシナリオでは 400 kW) の 0.02421、つまり 2.42% です。この適切なサイズの 400 kW UPS は、75% 負荷で 9.7 kW の損失を生成することになります。

UPS 内部損失の 10 年間のコストを計算するには、次の計算式が使用されます。

$$\text{UPS内部損失の10年間のコスト} = \text{損失 (kW)} \times 8,760 \times 12 \times 10$$

2N 構成では、これらの損失を生成する UPS が 2 つあるため、上記の方程式から算出されるコストを 2 倍にする必要があります。また、UPS 内部損失のコストに加えて、冷却コストを追加する必要があります。UPS 内部損失の 10 年間の冷却コストを計算するには、次の計算式が使用されます。

$$\text{UPS内部損失の10年間の冷却コスト} = (\text{UPS内部損失の10年間のコスト}) \times 0.4$$