

APC InfraStruXure 40 kW UPS/PDUの 信頼性分析

著者: Stephen Fairfax
Neal Dowling
Dan Healey

White Paper #111

 MTechnology, Inc.


Legendary Reliability®

要 約

APC の **InfraStruXure** 製品ラインは集中設置方式の **UPS** に対して変革的なアーキテクチャを示しています。MTechnology, Inc. は確率論的リスク評価法 (Probabilistic Risk Assessment : PRA) の技術を利用して、サイリスタスタティックスイッチバイパスを内蔵した **InfraStruXure 40kW UPS/PDU** の信頼性を評価しました。この評価では、理論上と実システム両方で **InfraStruXure** のパフォーマンスを分析しました。さらに、想定した **500kW** のクリティカル負荷をもつデータセンタにおいて、**InfraStruXure** アーキテクチャのパフォーマンスを集中設置方式の **UPS** システムのパフォーマンスと比較しました。この結果、データセンタ全体範囲での障害において、**InfraStruXure** アーキテクチャの方が顕著的に低いとともに、個々の IT 機器レベルでの障害に対しても若干優位であることが判明しました。この白書は、MTechnology の定量的リスク評価の主要な結果を要約し、これが施設の管理者や設計者にとってどのような意味を持つかを明らかにします。まず評価結果を示し、続いて分析に使用した方法を説明して、最後に結果を詳しく論じます。

評価結果

1. APC 製品の信頼性は、集中設置方式の UPS のベンダが発表しているデータに示されている信頼性に匹敵します。
2. 想定上のデータセンタに設置された単台 500kW の UPS と 14 セットの InfraStruXure UPS を比較した場合、システムレベルでの給電停止に至る障害が発生する確率は InfraStruXure の方が著しく低くなっています。システムレベルで障害の主要な原因は、共通部品（例えば ATS）の障害にあります。
3. InfraStruXure の内部冗長性設計が製品の信頼性を確保しています。
4. MTech はパワーモジュールの障害の原因と影響を分析しました。この結果、パワーモジュールの障害の発生頻度が増えるものの、モジュールの増加によって得られる冗長性のプラスは障害頻度増加のマイナスを補って余りあるとの結論に達しました。
5. UPS 故障の原因となる共通原因による障害のメカニズム及び潜在的致命的な障害モードを詳細に調べた結果、これらは製品の信頼性を大幅に低下させるものでないことが判明しました。
6. 評価結果は電力会社による電力供給の障害率にはほとんど影響されません。つまり、InfraStruXure はその設計された機能を遂行しており、商用電源瞬時的な変動や停電に影響されないように負荷機器を保護し守っています。
7. APC の製品の構成ユニット単体や機器内部のコンポーネント自体の障害率は特に低いわけではありませんが、APC のモジュール式设计とそれに伴う大量生産は、専用の製造ラインの利用を可能にし、欠陥の少ない製品を低コストで生産することを可能にしています。非モジュール式设计の同業メーカーが 1 つの電源装置を製造するところを APC は 5 つの電源モジュールを製造します。この結果、製品ラインの信頼性が急速に向上します。
8. InfraStruXure アーキテクチャでは負荷への配線システムが工場で組み立てられますが、これは現場で配線システムを構築する集中設置方式の UPS システムに比べて大きな利点を持っています。配線システムを構築するにはさまざまな欠陥が発生し、重要な機器への給電に障害が発生する可能性があります。現場での配線プロセスと工場での配線プロセスを比較した結果、現場で構築したシステムの欠陥確率は工場で構築したシステムの 1,500 倍にもなることが判明しました。この分析では、APC の製品の障害率を特に低く評価しているわけではなく、集中設置方式の UPS の障害率を特に高く評価しているわけでもありません。

概要

American Power Conversion Corp. (APC) はサイリスタスティックスイッチバイパス付きの InfraStruXure 40kW UPS/PDU (InfraStruXure) の信頼性分析を MTechnology, Inc. (MTech) に委託しました。APC が望んだのは、確率論的リスク評価法 (Probabilistic Risk Assessment: PRA) の技術を使って製品の信頼性を調べ、起こりうる障害の原因を突き止め、信頼性と可用性を改良する可能性を探ることでした。InfraStruXure は多くのコンポーネントに冗長性を用意することによって信頼性を高め、「ホットスワップ」の技術によって高度な可用性を実現しています。InfraStruXure の製品ラインは拡張性の高い「成長に応じた設備投資の最適化」が可能なソリューションであり、ラック列の数に合った適切な UPS 容量を選択できます。これは集中設置方式における一台の大容量の UPS によってデータセンタ全体バックアップする方法に対して変革的なソリューションです。

MTechnology, Inc. (MTech) は 1997 年以来、7×24 の市場を対象としてフォーマルで定量的な信頼性分析を手がけています。米国の原子力産業は何十年に渡り巨額の投資を通じて信頼性を高めていますが、MTech はこうした 7×24 稼動の環境で信頼性と可用性を高める方法を PRA の技術を使って調査しています。MTech は電力会社、製造会社、設計会社、重要施設を所有または運営する企業などをクライアントとしています。

MTech はサイリスタスティックスイッチバイパス付きの InfraStruXure 40kW UPS/PDU を詳細に分析しました。基本となるのは障害ツリー分析 (FTA) であり、これをイベントツリー分析とベイジアン更新 (Bayesian updating) で補完して、スパースデータ (sparse data: まばらなデータ) からコンポーネントの障害率を推定しました。

この調査では、製品単体分析や典型的なデータセンタ環境における分析を行い、同じデータセンタにおける集中設置方式 UPS と信頼性の比較を行いました。電気設計、メカニカル設計、エンジニアリング検証試験、開発段階の有効性試験、製造技法を詳細にレビューし、稼動状態での装置の性能も調べました。さらに、APC の設計エンジニアリング担当者、製品サポート担当者、販売保守担当者、上級管理職との面接調査も実施しました。MTech のエンジニアたちはデンマークのコリング (Kolding) にある APC の設計センターを訪れ、設計担当者と保守担当者との密接な協力のもとに、製品の信頼性と可用性を評価するためにシステムを構築し、検証しました。

はじめに

7×24、365 日連続稼動する情報システムへの依存が深まるにつれ、この新しい市場に製品やサービスを提供する産業が急速に発展してきました。かつては大手金融機関やメインフレームコンピュータをベースとしたデータベース (例えば航空会社の予約システム) に限られていたオンデマンドの情報サービスへのニーズが、世界のあらゆる企業やオフィスにまで広がってきました。

こうしたオンデマンドのサービスにとって、信頼できる電源は不可欠な基盤です。電力会社による配電網だけでは必要な品質と信頼性を確保できません。配電網の保護システムは、感電から人々を守り、機器を守るために、いざというときには自動的に電力供給を停止するように設計されています。

無停電電源装置 (UPS) は電源の信頼性を高めるための製品です。UPS は商用電力を調整し、保護された負荷機器に適切な電圧と電流が供給されるように保証します。UPS はバッテリー (あるいはその他のエネルギー貯蔵装置) を内蔵しており、停電の際には負荷機器に電力の継続供給ができます。UPS が登場したのは何十年も前であり、APC は 1984 年以来 UPS の製造に携わっています。

これまでさまざまな設計の UPS が登場していますが、InfraStruXure をはじめデータセンタをターゲットとする UPS のほとんどはダブルコンバージョンのアーキテクチャになっています (図 1 を参照)。商用 AC 電力は DC に変換されます。DC バスを介して整流器をバッテリー (図には示されていませんが、通常は複数の直列と並列のストリングから構成されています) とインバータ

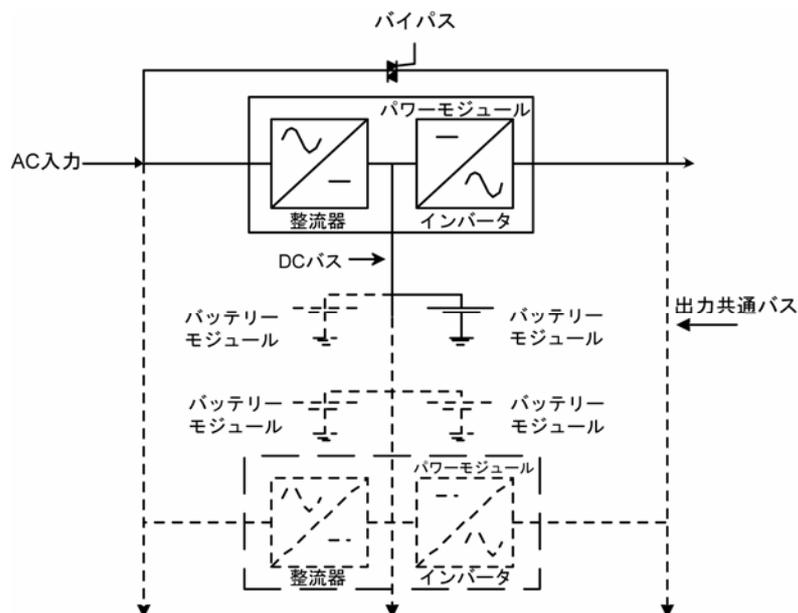
に接続します。インバータは商用電源のスパイク、電圧低下、高調波、瞬停などの影響を受けないグリーンな電圧を負荷へ提供します。

インバータの出力はサイリスタスタティックスイッチバイパスの出力と並行に接続されます。整流器またはインバータに障害が発生するか、または負荷機器の障害によって、UPS の過負荷になった場合、バイパススイッチは閉じます。

出力共通バスはバイパスと（1つまたは複数の）インバータの出力を接続します。負荷容量が大きい、あるいは冗長性を持たせるために、複数のインバータを使っている UPS も存在します。複数のインバータを備えたシステムでは整流器も複数あるのが普通です。整流器とインバータのセットはパワーモジュールと呼ばれます。

図 1 に破線で示されているのはオプションです。例えば、並列バッテリーのストリングや複数のパワーモジュールはオプションである UPS もあります。

図1 ダブルコンバージョンのUPS



ダブルコンバージョンのUPSアーキテクチャは、電力が2回変換されるため若干のロスが生じることから、効率面での犠牲を払っているといえます。バッテリーはDCバスの電圧が低下するとすぐに放電を開始し、インバータは商用電力が供給されている場合と同様に稼働を続けます。

UPSは非常に成熟した製品であり、比較的少数の標準設計が市場を制覇しています。新製品の発売するときの課題の1つは、従来のソリューションと同等以上の性能を持つことをユーザーに評価することです。適切な評価は新しいUPSにとっては大きな課題になります。なぜなら、UPSの導入サイト毎はほとんどカスタム設計で行われるため、UPSに対する評価は外部装置や条件、運用慣行に依存する割合が大きく、サイト毎のUPSシステムのパフォーマンスを比較するのが困難であるためです。そのうえ、UPS技術の成熟はこの検証自体のバリアーにもなります。給電が停止するまでに至る障害の例は少なく、どのUPSモデルについても致命的障害のデータはほとんど存在しません。大手のUPSベンダは「100年に1回以下の障害」のレベルの信頼性を宣伝していますが、データセンタにしてもUPSにしてもこれまでの稼働実績はせいぜい20年か30年です。

新製品を実際に導入して障害の発生回数を観察し、信頼性のレベルを判別することは可能です。しかし、この方法にはいくつかの問題があります。まず、ユーザーを実験の材料にしてしまうことです。次に、設計や製造に多少の欠陥がある製品でもそう頻繁に障害を引き起こすものではなく、統計的に有意な数字を得るには何ヶ月あるいは何年もかかります。第三に、重要なシステム（航空機、アンチロックブレーキ、電話切替スイッチなど）において信頼性を高めるには、大量の同一コンポーネントを長期間に渡って観察しなければなりません。現在では、UPSは数多くのデータセンタで使用されています。データセンタはそれぞれ独自の設計であり、データセンタ内のUPSはそれぞれ独自の環境で独自の方法で管理されています。当然のことながら、UPSのベンダはカスタムソリューション（あるいはカスタマイズ可能なソリューション）の数を増やして、カスタム設計のデータセンタからのあらゆるニーズに応えようとしています。

言うまでもなく、信頼性を判別するには、何千ものユーザーを実験台にして障害の餌食にするより、何らかの別の手段を使った方が効率的で低コストです。競合する複数のソリューションの中で、最小のコストで最大の信頼性を実現しているのはどれかを知るのは非常に役に立ちます。製品の設計者としては、製品全体の信頼性にとってどのコンポーネントとサブシステムが最も重要かを知りたいところです。製品のサポートエンジニアは、実働環境での製品のパフォーマンスを追跡し、弱点や欠陥が見つかり次第、必要な変更を実施しなければなりません。このようにすることによって、エンジニアにとっては、障害が発生しやすいコンポーネントを識別するロードマップが役に立ちます。ロードマップによる予測からずれている箇所についてはさらに詳しい調査が必要であり、場合によっては訂正措置が必要になるかもしれません。

確率論的リスク評価法（Probabilistic Risk Assessment : PRA）は、宇宙船の障害の原因が数限りなくあるのに悩まされていた初期のロケット技術者のニーズに応える形で開発されました。数学的分析が明らかにしたように、ロケットやデータセンタのようにさまざまな要素が相互に複雑につながっているシステムでは、「鎖はその最も弱い環で切れる」ということわざはもやは通用しません。鎖はネットに似たものとなり、多くの弱い環と隠された糸が相互につながっています。ネットのいずれかの部分が破綻すると、他の部分にストレスがかかり、破綻がさらに広がります。このため、ちょっとしたつまづきがシステムの完全な停止にまでエスカレートするといった事態になりかねません。

PRAは米国の原子力産業に大規模に適用されました。きっかけは安全性に関する米国民の懸念に対処することでした。スリーマイルアイランド（TMI）の事故によって何十億ドル規模の原子力産業全体の存亡が問われるようになったのを受け、PRAの技術は各種設計の選択に対してだけでなく、運転と保守に関する意思決定や管理のあり方にまで適用され、発展されました。この努力は報われました。それ以降TMIのような事故はまったく発生していないだけでなく、現在では103の原子力発電所が稼働しており、TMI以前よりも20%多い電力を出力しています。現在の原子力発電所では、燃料補充のための停止を別として、18ヶ月ないし24ヶ月一度の停電もなく操業を続けるのはごく普通のことになりました。PRAはメンテナンスにも適用され、「最良の保守方法（best practices）」とされている方法の多くが実際にはコンポーネントの障害と事

故の危険を増加させていることを明らかにしました。

定量的結果とコンポーネント故障の相互関係の突き止めの機能により、**PRA** が強力なツールになります。論理モデルを構築するプロセスでは、製品が正常に機能することを影響するすべての部分の欠陥や誤解を発見できます。計算は数学的に行われるため、信頼性の定性的評価によく見られるように、経験やその他の常識的な思い込みに訴えることはできません。「**20 年の経験**」といっても、1 年で学んだことを残りの **19 年間**ただ繰り返しているだけのケースが少なくありません。

MTech の **PRA** 計算にはしばしば異議が唱えられています。クライアントの側が「我が社のシステムの信頼性は **MTech** の計算値よりずっと高い」と思っている場合は特にそうです。数学モデルの論理を検証すれば、システムの動作に関してどちらの側に誤解があるかを判明します。コンポーネントの障害率をクライアントが主張する値に変更しても、最終的な結果に大きな変化が生じることはめったにありません。ほとんどすべての **UPS** にはバイパススイッチなどの冗長パスが用意されています。冗長設計では、システムの信頼性は個々のコンポーネントの障害率にはあまり影響されません。

PRA の値は、定量的な結果に依存するとともに、個々のコンポーネントの障害の相互影響を確定できることに依存しています。システムにおける各コンポーネントの役割を定量的に計算することができなければ、リソースを合理的に（あるいは最適に）割り当てることはできません。従来から冗長性がシステムの信頼性の特性となっているのは、こうした事情を反映しています。データセンタの多くは "**N+1**" または "**N+2**" の冗長設計となっており、"**2N**" や "**2N +1**" の冗長性が採用されているケースもあります。"**N+1**" の冗長設計とは、正常な運転のために **N** 個のコンポーネントが必要な場合にはそのコンポーネントを 1 個余分に用意しておくことを意味します。しかし、すべての冗長機器が同じように信頼性に寄与するわけではありません。例えば、始動失敗率が **1%** の発電機の予備を用意しておくことは、めったに故障しない乾式変圧器の予備を用意しておくよりずっと信頼性に寄与します（乾式変圧器の予備に使うお金があるなら、何か別のことに使った方が効果的です）。冗長かどうかを問わず、システムの信頼性への各コンポーネントの寄与を定量的に把握できなければ、設計者にしろユーザーにしろ、お金やその他の希少なリソースの最も有効な割り当てを決定できません。**PRA** はこうした問いに答えるための強力なツールです。

冗長設計に関してはいくつかの根本的な問題があります。冗長性とは個々のコンポーネントまたはサブシステムに障害が発生してもシステム全体が停止することのないようにする仕組みですが、これにはかなりのコストがかかるうえ、大きな問題が潜んでいます。というのも、冗長システムではコンポーネントの数が増えるからです。コンポーネントの数が増えれば、障害が発生する可能性もその分だけ高くなります（ツインエンジンの飛行機の 1 時間あたりのエンジン障害はシングルエンジンの飛行機のほぼ **2 倍** になります）。どのコンポーネントに障害が発生したかを突き止め、そのコンポーネントをシステムから切り離すには、信頼性の非常に高いメカニズムが必要になります。こうしたメカニズムがなければ、冗長性の利点は得られず、障害の原因となるコンポーネントが増えるだけです。

複数のコンポーネントに同時に影響する障害モードもあります。この種の障害は冗長性の利点を大きく制限します。設計上の欠陥、製造上の欠陥、設置、保守、修理の際のミスなどは、本来相互に独立しているはずの複数の機器に影響し、冗長設計にもかかわらずシステムの停止にまで至ることがあります。ある種のコンポーネントの致命的な障害は、そのコンポーネントに接続している（あるいはそのコンポーネントに隣接している）他のコンポーネントの障害を誘発し、システムを停止させてしまいます。

MTech は **PRA** の技術と原子力産業で採用されているソフトウェアを利用して、**InfraStruXure** の製品ラインを分析し、そのパフォーマンスを従来型のシステムと比較しました。その結果から得られた数学モデルによって、いくつかの重要な問いに対する回答が得られました。**InfraStruXure** は信頼性を高める手段としてほとんどすべてのコンポーネントに冗長性を組み込んでいます。**MTech** の分析が示したところによれば、冗長性にはコストと利点の両方があり、利点がどれだけあるかはサブシステムによって異なります。

信頼性と可用性

この調査の主要な目的は製品の信頼性を評価することです。しかし、可用性について論議しようとするベンダも少なくありません。信頼性と可用性の区別は非常に微妙ですが、重要でもありません。信頼性とはシステムが定められた期間正常に稼動する確率です。期間（「ミッション」とも呼ばれます）は明確に定義しなければなりません。離陸後のボーイング 747 は非常に高い信頼性を誇っています。機体や乗客に害を与えることなく着陸する確率は 14 時間以下のフライトでは 99.99%をはるかに上回ります。しかし、36 時間のフライトでは 747 の信頼性はゼロになります。というのも、ミッションを完了する前に燃料がつかってしまうからです。

可用性はシステムが稼動する時間の関数です。可用性はミッション時間に関連させることができるほか、長期的の可用性として表すこともできます（これは時間を無限とした場合の漸近線です）。可用性を知るには、システムの障害を修理するのに要する時間がわかっているなければなりません。故障率を一定とすれば、すばやく修理できるシステムはそうでないシステムよりも長く稼動することができます、したがって可用性は高くなります。

信頼性も可用性もそれぞれ有効な尺度であり、どちらも必要です。しかし、データセンタの所有者や運営者にとっては、信頼性（より正確には「信頼できない程度」、つまり一定のミッションにおいて失敗する確率）の方が役に立つ尺度です。信頼性は非常に高いが修理に長時間かかるシステムと頻繁に故障するがすぐに修理できるシステムを比較すると、可用性に関しては同じくらいか、むしろ前者の方が低くなります。データセンタで電源障害が発生すれば、いかにすばやく回復できても、相当の金銭的その他の損害を被ります。この事情を理解しているデータセンタ所有者のほとんどは、高い可用性よりも高い信頼性の方を選択するでしょう。

「失敗の確率」（信頼できない程度）を使用する第一の理由は、エンドユーザーにとって最も役に立つ尺度であることです。PRA の数学的技法に精通している企業は皆無に近いでしょうが、企業の役員やマネージャはさまざまな度合いのリスクを抱えたさまざまなソリューションを常日頃比較検討しています。リスクは確率と結果の関数です。企業はリスク評価（損害を被る確率に損害額を乗じた値）をベースとして保険や障害回復プログラムなどの商品を購入します。データセンタを運営している企業のほとんどは 1 回の電源障害で相当の被害を被ります。したがって、こうした障害の可能性がどれくらいあるかを知り、リスクを軽減するための追加投資やその他の決定を行う必要があります。

「故障の確率」を使用する第二の理由は、この尺度が組織のすべての階層で適用できることです。APC は 4 つの階層を使って、典型的な企業における各種システムの相互関係を表しました。一番上の階層は人、次の階層はプロセス、三番目の階層は情報技術、最後の階層は物理層（インフラストラクチャ）です。電源はインフラストラクチャに含まれます。階層が異なれば、特定の障害が可用性に及ぼす影響は大きく異なります。

10 年に一度の割合で UPS システムの停止に遭遇する会社を想定しましょう。

- インフラストラクチャの階層では 10 分間で電源を回復できます。したがって可用性は次のように計算できます。
 $A = 87599.8 / 87600 = 99.9998\%$ 。インフラストラクチャの階層での可用性は「5 桁の 9」となります。
- 情報技術 (IT) の階層ではアプリケーションを 12 時間で修復でき、可用性は次のように計算されます。
 $A = 87588 / 87600 = 99.99\%$ 。つまり「4 桁の 9」の可用性です。
- プロセス(アプリケーションマネージャ)の階層ではデータベースの修復に 2 日かかります。したがって可用性は次のように計算されます。
 $A = 87552/87600 = 99.95\%$ 。つまり「3 桁の 9」の可用性になります。

「人」の階層の可用性についてはどうでしょうか。顧客をなだめ、SEC（米国証券取引委員会）に報告書を提出し、職員を解雇し、交替の職員を雇用してトレーニングするのに2ヶ月を費やした会社幹部たちは、自分たちの可用性を計算することなど思いもつかないでしょう。しかし、あえて計算すれば $A = 86160/87600 = 98.4\%$ となります。おそらく自分たちの可用性が「2桁の9」にすぎないことに腹を立てるのではないのでしょうか。

この例で使った数字は各レベルでの平均的な修復時間であり、可用性の受け止め方がそれぞれの観点に依存していることを示しています。これに対し、社内のどの階層においても「失敗の確率」は一律に「10年に一度」です。システムの信頼性が相対的に高いなら、複数回に渡って失敗する確率は低くなり、最初の失敗の確率だけを考慮すればよいこととなります。

調査の実行

調査は、マサチューセッツ州ビルリカとロードアイランド州イーストプロビデンスにある APC のオフィスに InfraStruXure の製品ラインを導入し、UPS とラック型分電盤 (PDU) を詳細に検討・検査することから始まりました。APC からはエンジニアリングの技術資料の提供を受けました。また、APC のフィールドサービス担当者とのコンタクトをとって、大量のフィールド記録を調べることができました。

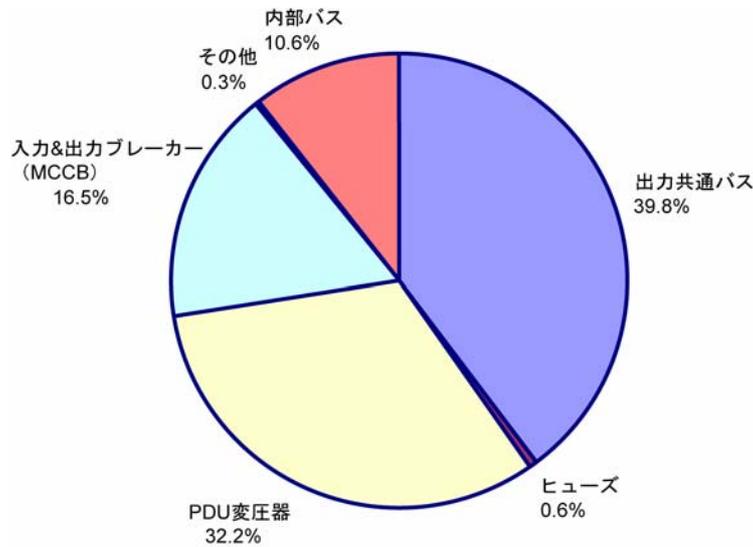
MTech はシステムの障害ツリーモデルを開発しています。障害ツリーモデルの詳細な説明はこの白書の範囲を越えますが、解説や論文は数多く発表されています。最初のモデルは APC 製品のみを扱っています。このモデルでは、商用電源と負荷機器はまったく正常であることが仮定されています。このモデルは UPS と PDU 自体の障害がクリティカル機器の障害につながる頻度を探ります。

UPS のベンダやユーザーは、UPS を導入することは一つの新しいコンポーネントの追加であること、したがってクリティカル機器につながっている回路の中に新しい障害の要因を少なくとも1つ追加することであることをなかなか認めようとしません。どのような行為もプラスの効果とマイナスの効果をもたらします。目標はプラスを最大にし、マイナスを最小にすることです。最初の障害ツリーモデルは、システムの信頼性に大きく影響するコンポーネントとサブシステムに焦点を合わせました。MTech はこれらのコンポーネントの詳細な調査を開始しました。

MTech の調査員はデンマークのコリング(Kolding)にある APC の設計センターを訪れ、1週間にわたり製品設計者たちに密着した調査を行いました。調査の対象となったのは、製品の開発プロセス、設計のルール、検査と試験、品質の管理と評価、フィールドサービスの記録などです。類似の前モデル製品も詳しく調べました。さらに、APC のエンジニアたちからこの障害ツリーモデルについてのコメントをもらい、モデルを改訂しました。改訂されたモデルは、MTech の側での誤解を正し、障害の原因（特に共通原因による障害）に関するより詳しい情報を含むものとなっています。

複数の障害モードを持つコンポーネントも存在します。共通出力バス、バッテリー、コントロール（インテリジェンスモジュール）、パワーモジュールには2つの障害モード、すなわち「通常の障害」と「致命的障害」があります。これらのコンポーネントの致命的障害はUPSの稼働停止につながります。通常の障害では、コンポーネントが冗長であるため、UPSの稼働は停止しません。検出されずに進行している障害は致命的障害の一つです。この場合、障害が発生したコンポーネントは他のコンポーネントまで波及し、他のコンポーネントの誤動作を引き起こすか、または障害が気づかれないまま進行して、重大な障害に至ります。物理的には、UPS内部の致命的障害がプラズマを発生し、そのプラズマが電源回路及び制御回路をショートさせて、UPSの出力停止を引き起こします。コンポーネントにおける致命的障害の割合は重要なパラメータです。MTech はこれまでの経験からコンポーネントの障害のおよそ1%は致命的障害であると判断し、この前提のもとに今回の調査を開始しました。最初の障害ツリーモデルを作成し、そのモデルをAPCのエンジニアたちの協力を得て再検討したあと、実際のフィールドデータを反映して致命的障害の割合を調整しました。1%の比率はほぼ正確でした。図2はこの初期段階の調査を要約しています。

図2 障害の原因となるコンポーネントの割合：
 InfraStruXure のみ、商用電力の障害を含まない



PDU 変圧器の障害と出力共通バス（パワーモジュールとバイパススイッチの間の並列接続ポイント）の致命的障害で障害全体の **72%**になります。入力と出力のブレーカ（MCCB）については、コンポーネント障害率は1時間あたり 1.2×10^{-7} 、つまり **830万時間**のMTTFにもかかわらず、障害の原因として**17%**近くを占めています。

APC のエンジニアの協力のもとに障害ツリーモデルと当初の調査結果を再検討したあと、製品の実働環境を考慮して、モデルを修正し、拡張しました。商用電源の障害、発電機の始動失敗、商用と発電機を切り替えるスイッチの障害などもモデルに組み込みました。負荷機器への障害の影響も調べました。

こうした「現実」に即した製品分析の結果、いくつかの新しい疑問が出てきました。例えば、分岐回路ブレーカの障害は製品の障害とみなすべきでしょうか。スプリアストリップのMTTFが**800万時間超**であることに示されているようにブレーカは非常に信頼性の高いコンポーネントですが、それほど大きくないデータセンターでも回路ブレーカの障害がかなり大きな割合を占めています。

実際のデータセンターに関する以前の調査も利用して、「典型的」なデータセンター配線システムの障害ツリーモデルを作成しました。「典型的」という表現をデータセンターの設計に適用するのはあまり適切ではありません。データセンターの設計はほとんど標準化されておらず、ここで選択したシステム構成の割合が平均なのか、それ以下なのか、それともそれ以上なのか断言することができないからです。ここで言えるのは、最近建設された実際のデータセンターをベースとしたモデルであるということだけです。図3はこのモデルの単線結線図であり、**500kW**の集中設置方式UPSを示しています。図4は、同様の負荷をサポートする**14基**のAPC InfraStruXure UPSの単線結線図です。どちらの場合も、商用電源システムの構成と配線システムは同じです。

図3 大型UPSの単線結線図（500kWのデータセンタ）

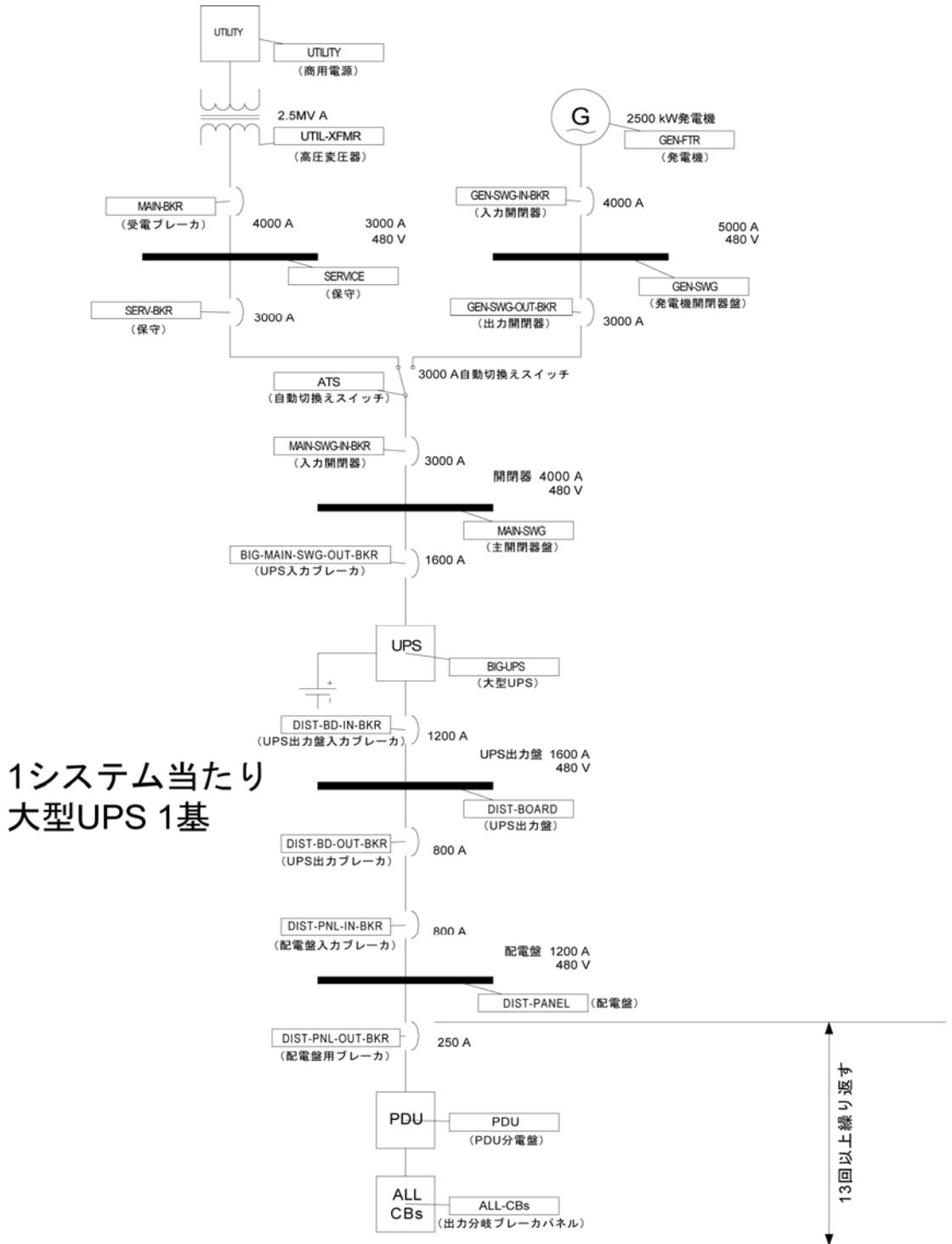
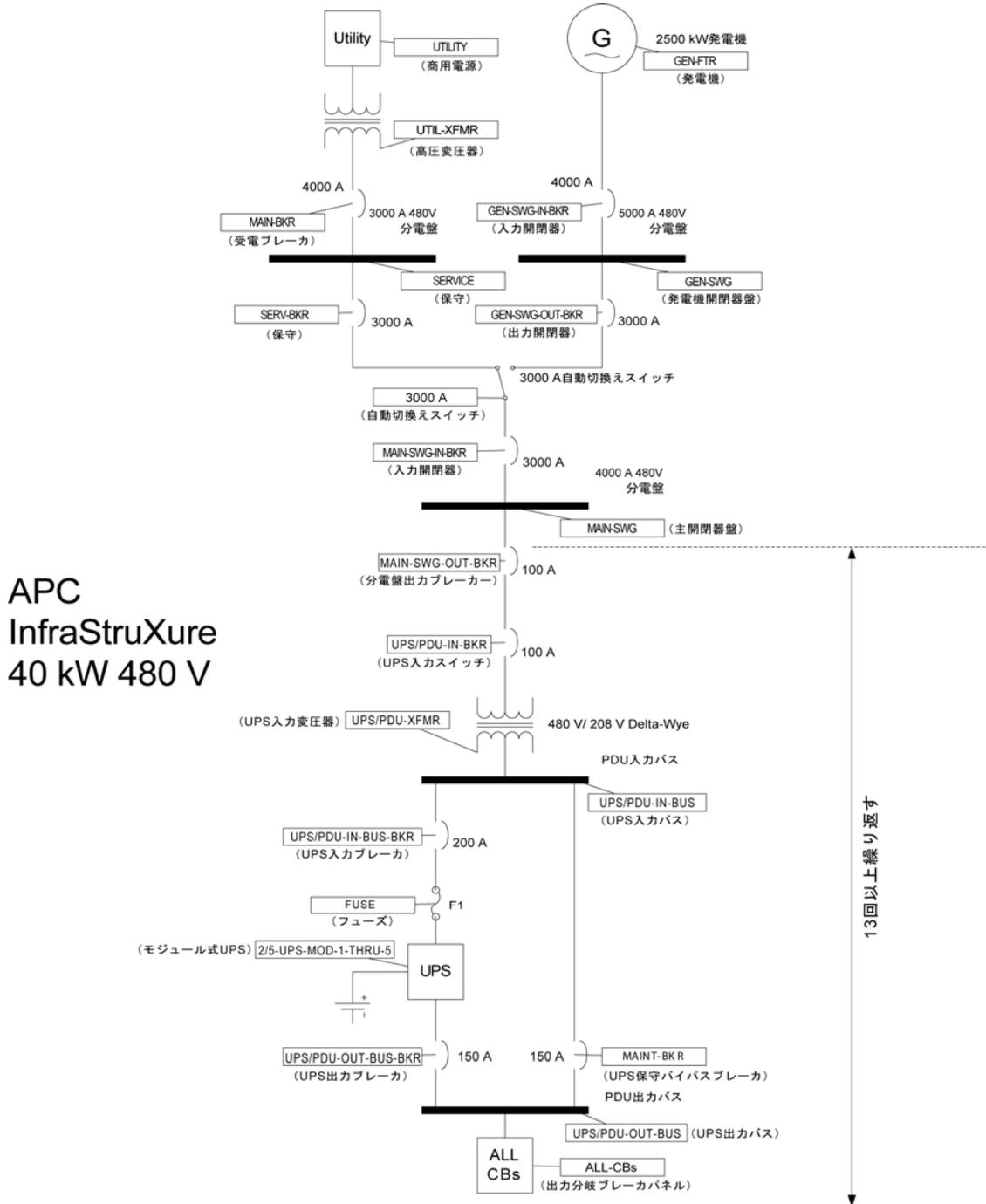


図4 APC InfraStruXure UPS (500kWのデータセンタ)



大型 UPS 障害に関するデータは、電力システムのコンポーネントの障害率に関してベンダが公表している資料と第三者による資料の両方から収集しました。「障害」と「正常」はごく常識的な基準によって区別しました。いずれかのパワーモジュールに障害が発生しても、バイパスに正常に切り替えられるなら、システムは「正常」と判断されます。バッテリーの故障が「障害」とみなされるのは、仕様よりもずっと速く消耗したか、停電と同時に故障したかのいずれかの場合だけです。ここでは四半期ごとのバッテリー検査を仮定し、この検査によってセルや接続の故障が100%正確に検出されるという見方をとりました。作業員のミスによるクリティカル機器の停止は障害とみなしていません。ただし、別の分析では、作業員のミスのいくつかはエルゴミクス(人

間工学) 上の欠陥ないし不適切な指示によるものとの結論に達しました。

標準的な統計技術を使って、複数の本質の異なる障害率を一つの推定障害率へとまとめ、「集中設置方式 UPS」に適用しました。その結果、出力共通バスにおける大型 UPS の障害率はほぼ 1 時間あたり 1×10^{-6} であることが判明しました。障害率が一定だとすると、これは 100 万時間の MTTF (平均故障時間) に該当します。このリサーチは 600 シリーズの UPS 製品に関して Liebert が行ったデータ分析にも依存しており、ここでの結果も Liebert の分析にほぼ一致します。Liebert の分析については、

<http://www.liebert.com/support/whitepapers/documents/techmtbf.asp> (2004 年 2 月 19 日にチェック)

を参照してください。

大型 UPS についてはあまり障害が報告されていません。Liebert の論文は総計 2 億時間の稼働記録の中で 80 件の障害を論じ、これ以外にも報告されていない障害がありうると指摘しています。報告された障害が少数であることから、ほんの少しの障害を見逃しても結果は大きく変わってきません。Liebert の分析方法と「100 万時間超の MTBF」という控えめな推定は妥当なものです。以下に示す結果からも明らかなように、UPS 故障率が多少改善されても、その改善がシステム出力停止までの障害確率にはあまり影響しないでしょう。

ここで注意しなければならないのは、APC 製品に比べて大型 UPS の分析やモデル化はそれほど詳細に行っていないことです。比較のために UPS のおおよその障害率を算出したにとどまらず、他のベンダが公表しているパワーモジュールの障害率は、APC のパワーモジュールについて調査した値と大差ありません。また、UPS 障害で最も多いのは、共通原因による障害 (コントロールシステムの障害やコンポーネントの致命的障害を含む) であることも判明しました。この結論は APC のフィールドデータの詳細な分析や致命的障害モードのモデルとも一致します。

障害ツリーは 2 つの仮想のデータセンタを対象として作成されました。1 つは単一の 500kW UPS を使用しているデータセンタであり、もう 1 つは同じ負荷を 14 基の APC InfraStruXure 製品でサポートしているデータセンタです。冷却システムはモデルに組み込まず、UPS 負荷の一部への給電停止による影響も考慮していません。

図 5 は InfraStruXure アーキテクチャについて、図 6 は集中設置方式 UPS アーキテクチャについてそれぞれ分析結果を示しています。InfraStruXure システムの障害率は集中設置方式 UPS システムの障害率より約 40%低くなっています (ここでの「障害」はデータセンタ内のすべてクリティカル機器が停止することとして定義されています)。

バッテリーの障害は集中設置型 UPS ではかなりの比率を占めていますが、InfraStruXure ではほとんどありません。どちらも同じバッテリー障害率を採用しているにもかかわらずこうした相違が生じたのは、集中設置型 UPS のモデルに単一ストリングの VRLA バッテリーが使われているためです。InfraStruXure では 8 個の直列/並列ストリング (4 個のプラスストリングと 4 個のマイナスのストリング) が使われており、いくつかのストリングに障害が発生しても稼働は停止しません。InfraStruXure のストリングは 196V DC ですが、集中設置方式 UPS のストリングは 400 ボルト以上の DC です。ストリングの電圧が高くなり、直列のセルの数が多くなれば、セル数の少ないストリングよりも少し信頼性が低下します。複数の並列ストリングのバッテリーを集中設置方式 UPS アーキテクチャに実装すれば、クリティカル機器の停止にまで至るバッテリー障害はかなり減るはずですが、バッテリー障害を除外しても、InfraStruXure の障害率は集中設置方式 UPS アーキテクチャより 18%ほど低くなります (ここでの「障害」はデータセンタ内のすべてクリティカル機器が停止することとして定義されています)。その他の相違は各システムのアーキテクチャによるものであり、コンポーネントの障害率の相違によるものではありません。

InfraStruXure と集中設置方式 UPS のどちらの設計でも、単線結線図から明らかなように、商用入力と発電機から切替スイッチに至る機器の中に共通の弱みを持っています (図 3 と図 4 を参照)。InfraStruXure のアーキテクチャでは、すべての機器が停止するのは共通の電源設備に障害が発生した場合だけです。例えば、入力主幹母線に障害が発生したり、自動切替スイッチが開かない場合がこれに相当します。14 基の InfraStruXure 装置が同時にすべて働かなくなる確率は非

常に低いでしょう。これに対し、集中設置方式 UPS とそのバイパスに障害が発生した場合は、すべての負荷機器が停止します。これは InfraStruXure のアーキテクチャにはない障害要因です。

「障害」の定義を変更して、PDU の故障を障害に含めれば、2 つのアーキテクチャ間の信頼性の差は縮まります。InfraStruXure の入力/出力回路ブレーカに障害が発生すると、負荷機器の一部が停止します。同様に、集中設置方式 UPS システムの PDU 入力回路ブレーカに障害が発生すると、一部の負荷機器が停止します。

2 つのアーキテクチャのもう 1 つの相違は、回路全体におけるブレーカの数にあります (ブレーカがトリップすると、UPS 出力をすべての負荷機器に伝送できなくなります)。集中設置方式 UPS の単線結線図では、自動切替スイッチのあとに 5 個の配線用ブレーカがあります。2 個は UPS の入力回路上、3 個は出力回路上です。出力回路のブレーカに障害が発生すると、重要負荷機器が即座に停止します。入力回路のブレーカに障害が発生した場合は、UPS のバッテリーが放電終了したあと、負荷機器が停止します。バッテリーの放電時間は通常 10~45 分で、理論的にその間にトリップしたブレーカを修理することは可能です。しかし、この修理によって他の障害を誘発することなく修理を遂行できる可能性は非常に低いでしょう。InfraStruXure のアーキテクチャでは、自動切替スイッチのあとに置かれている回路ブレーカは 1 個だけであり、このブレーカに障害が発生すれば、負荷機器がすべて停止します。

図5 障害の原因となるコンポーネントの割合： InfraStruXureアーキテクチャ

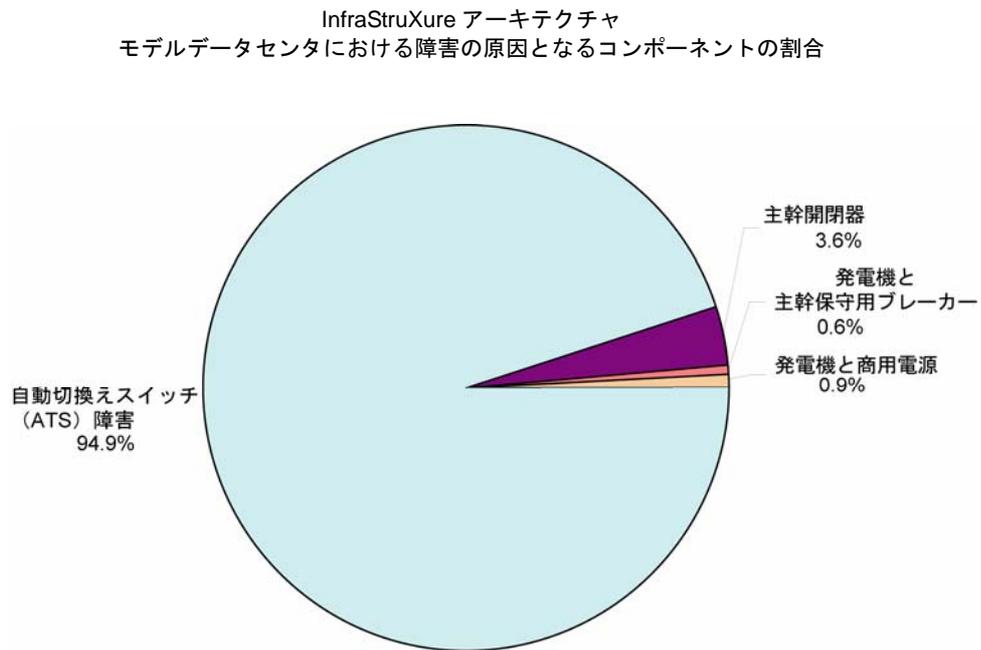
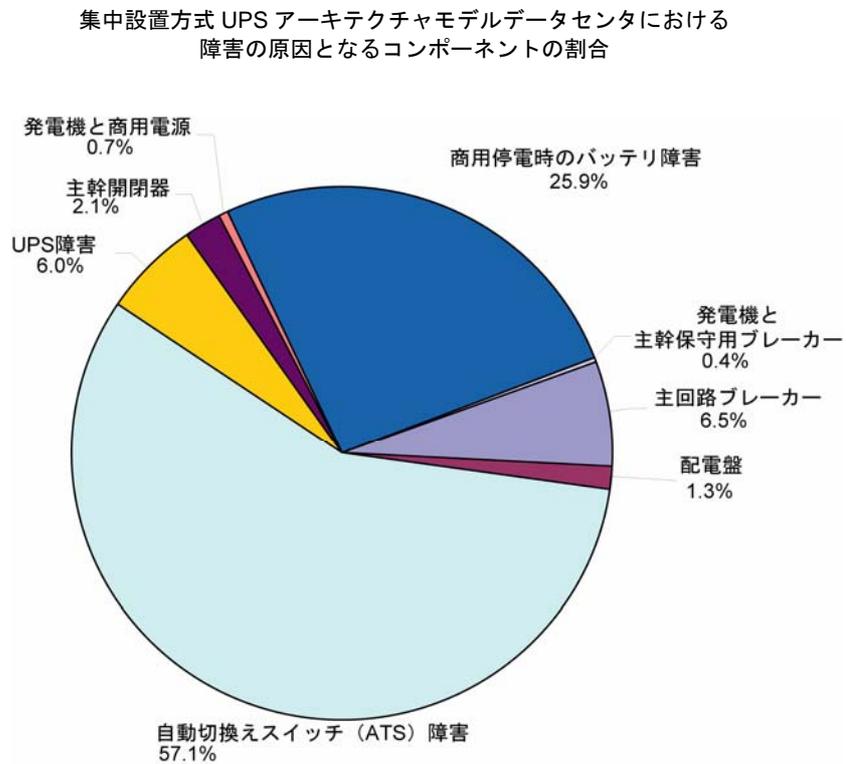


図6 障害の原因となるコンポーネントの割合：
集中設置方式 UPS アーキテクチャ



作業員のミスが UPS 障害に与える影響も調査しましたが、これについては APC の UPS と大型 UPS の間に顕著な差はないとの結論に達しました。分析対象となる仮想のデータセンタでは、作業員は InfraStruXure UPS を大型 UPS よりも 14 倍多く操作することになります。標準のエラー誘発原因 (Performance Shaping Factor : PSF) 分析によれば、操作回数が多ければ人間によるエラーの確率は低くなります。したがって、表面的に見る限りでは、人間によるエラーの影響も APC アーキテクチャの方が少ないということになります。

配線システム (UPS の出力とクリティカル負荷機器の間の配線や保護装置を含む) の障害率は重要です。この問題は APC のアーキテクチャと集中央設置方式 UPS のアーキテクチャの両方に共通しています。そこで APC の配線システムの工場製造プロセスを詳細に調べました。工場での配線システムは製作済みのために APC が採用しているプロセスコントロールと品質管理を調べ、中央設置方式 UPS の場合の現地電気工事による配線と比較しました (今日のデータセンタでは、なにごとであれ「標準」という用語を使うのは危険です)。この結果、工場での配線製作済みの方は不具合率がずっと低くなると判明しました。しかし、これはここでの評価結果には含まれていません。この白書の目的は、アーキテクチャを比較することであり、特定の製品を比較することではないからです。

評価結果の詳しい説明

以上で明らかのように、InfraStruXure アーキテクチャを採用しているデータセンタの信頼性は、単一バッテリーリングを利用した単一モジュールの UPS を採用している同規模のデータセンタよりもかなり高くなります。InfraStruXure の冗長サブシステムは UPS 障害の確率を低減しますが、この相違は両方のアーキテクチャに共通の外部システムの影響によってあいまいになっています。PRA によれば、集中設置方式 UPS に並列の冗長バッテリーリングを装備すればこの差を縮めることができますが、差を完全になくすことはできません。ほとんどの UPS も、バッテリーだけではクリティカル機器を数分間サポートできるだけです。クリティカル機器をもっと長い時間保護するには、予備の発電機と自動切替スイッチ (ATS) を用意して、商用電源と発電機を切り替えできるようにしておく必要があります。MTech の分析によれば、自動切換えスイッチ (ATS) の性能が往々にして信頼性向上のネックとなっています。

分析結果を数値で見ると、InfraStruXure アーキテクチャのデータセンタでクリティカル機器すべての停止に至る障害が発生する確率は、集中設置方式 UPS を採用している同規模のデータセンタに比べておよそ 40%低くなります。集中設置方式 UPS の場合も並列の冗長バッテリーリングにすれば信頼性はかなり高くなりますが、それでも InfraStruXure アーキテクチャの方が 1 年間の稼働で 18%低い障害発生確率になります。「障害」の定義を変更して、UPS ではなく分岐回路の障害を原因とするいずれか 1 台の負荷機器の停電も含むようにすると、InfraStruXure アーキテクチャの障害発生確率は集中設置方式 UPS よりも 6%だけ低いことになります。18% から 6%へのこの低下は分岐ブレーカのトリップだけによるものです (ブレーカの障害はどちらのアーキテクチャでも信頼性を低下させます)。この程度の差は、入力データの不確実性、現場での導入作業の質、各ベンダの製品間の相違などの外的要因によって相殺されてしまう可能性が大です。

公平を期すために、InfraStruXure と従来型の UPS を比較するモデルでは、すべてのコンポーネントに同じ障害率が適用されています。競合製品との差をつけるために、APC は MTech の分析が指摘した主要コンポーネントの信頼性を高めるためのプログラムを開始しています。例えば、PDU 変圧器の構造が変更され、ありがちな障害モードのいくつかが消滅しました。出力共通バスは強化され、モジュールへの接続が改良されました。ブレーカはすべて InfraStruXure システムに組み込む前にテストされます。ほかのデータセンタでは、取付けの前に分岐回路ブレーカをすべてテストするのはおそらく不可能です。こうした事情にもかかわらず、MTech は両方のアーキテクチャでのブレーカ障害率を同等にして比較しました。MTech の分析に基づいて、APC はブレーカの障害原因を再調査し、特に障害が発生する確率の高い部分をよりよく見つけるために新しいテストの実行を検討しています。

MTech の分析によれば、**InfraStruXure** と集中設置方式 **UPS** の相違は、コンポーネントの数や信頼性にあるのではなく、アーキテクチャにあります。ユーザーが **UPS** 製品の信頼性を実感するのは、製品がデータセンタで実際に使用された場合です。実働環境での **InfraStruXure** の信頼性は常に集中設置方式 **UPS** のアーキテクチャを上回っていますが、「障害」の定義を「データセンタ全体の休止」から「単一の分岐回路の休止」に変更すると、この優位は統計的に意味を持たないほど小さくなります。どちらのアーキテクチャでも、コンポーネントの選択または使用法を少し変更するだけで、信頼性を大きく改良する可能性があります。MTech が知る限り、今回の調査は、**UPS** 製品の開発と製造をターゲットとして遂行され、公表された最初のフォーマルで定量的な **PRA** です。

APC の資料では「**InfraStruXure** アーキテクチャはコストと柔軟性で競合製品をはるかに引き離しているため、信頼性が他の製品とそう変わらなくてもユーザーは **InfraStruXure** を選択することになる」と主張されています。システムの所有コストとその関連トピックについては **APC** の他の白書に説明されており、ここでは立ち入りません。詳しくは、**APC White Paper #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』および**#6**『データセンタと電算室における物理インフラ (NCPI) の総所有コストを求める』を参照してください。

MTech は **InfraStruXure** で採用されている製造技法を分析し、従来型製品の製造技法と比較しました。**InfraStruXure** と集中設置型方式システムの主要な相違は、**InfraStruXure** 製品では負荷ラックへの配線システムが工場で組み立てられていることです。**UPS** は商用停電時にクリティカル機器に給電するための「全体としての製品」の一部にすぎません。従来のデータセンタでは、**UPS** は上げ床の端に置かれるか、または別の部屋に置かれ、カスタマ仕様の配電管や配線を通じて、コンピュータやその他の重要な機器を収納しているラックに給電します。こうした電気工事は現場で必須に生じます。

InfraStruXure の配線システムはすべて工場で組み立てられます。MTech は工場での組み立てプロセスと現場の電気工事での組み立てプロセスの両方を分析しました。**APC** の工場では、専用の工具を使い、キャリブレーション、品質管理、全製品の自動検査を実施しています。このため、工場での配線と現場での配線では、不具合の数に大きな違いが出てきます。

分岐回路を 1 つ構築するには、適切なケーブルの選択から始まり、配線管への設置（現場での配線の場合）、ワイヤ被覆の除去、プラグ取付け、ブレーカ端子への接続、接続のマーク付けなど、さまざまな手順をふむ必要があります。MTech は工場での構築と現場での構築の両方について、これらの作業でミスが発生する確率を分析しました。この分析には、軍事産業と原子力産業の信頼性分析で使われているデータと方法を延用しました。この結果、現場での配線の欠陥率は工場での配線の 1,500 倍も高いことが判明しました。この相違は信頼性比較分析には反映されていません。

すべての欠陥が給電停止につながるわけではありません。スイッチやケーブルのラベルの付け間違いなど、まったく気づかれない欠陥もあります。コンポーネントのラベルの付け間違いは機器を変更する際によく発見されます（分岐回路ブレーカを開いたところが、別の機器で予期せぬ負荷のドロップが発生した場合などです）。この種の欠陥は「作業員のミス」とみなされることが多いようですが、実際は現場での配線の際の隠れた欠陥の結果です。工場での配線と現場での配線の欠陥率に大きな差があるという事実は、ユーザーにとって貴重な教訓になります。標準化された製品や標準化された製造方法は、信頼性の高いシステムを生み出します。これに対し、カスタマ製品、カスタマ配線、カスタマ操作手順は、障害や問題が発生する確率を助長します。

MTech は **APC** の製造プロセスを調べ、その信頼性向上管理技術を評価しました。5 つの電源モジュールからなる **InfraStruXure** の設計については、当然ともいえる疑問が出てきます。**InfraStruXure** は 5 つの電源モジュールのいずれかが機能しなくなっても稼働を続けるように設計されているとはいえ、5 つのモジュールのシステムは単一モジュールのシステムよりも障害が発生する確率が 5 倍高いのではないかという疑問です。冗長設計のためにかえってクリティカル機器への給電停止が頻繁に発生することにはならないでしょうか。

MTech はパワーモジュール障害の原因と影響を分析し、パワーモジュールの障害は頻繁に発生するものの、モジュールの増加によって得られる冗長性のプラスは障害のマイナスを補って余りあるとの結論に達しました。

複数のパワーモジュールを使用することには明らかにメリットがありますが、この調査ではこのメリットは定量化されていません。出荷台数が一定のレベルに達し、コストに見合っ製造施設を専用に使えらるようになれば、製造上の欠陥の率は大幅に低下します。専任のスタッフ、充実の試験設備、豊富な経験の統合により、欠陥を引き起こす潜在的な要因を排除するのは可能になります。専用の製造セルにすれば、共通故障はほぼ絶滅されます。例外的なミスも容易に検出され、事前に訂正されます。

InfraStruXure はモジュール式设计となっているため、製品は複数のパワーモジュールを添付して出荷されます。したがって、単一モジュール製品のメーカーに比べて、**APC** はパワーモジュール専用製造工場によりはやく移行できます。また、単一モジュールよりも多くのモジュールが実働しているため、出荷済み製品のコンポーネントの欠陥やその他の問題点をより早期に発見できます。さらに、パワーモジュールに障害が発生した場合、ユーザーは簡単にモジュールを交換して、**APC** に返品できます。このため、**APC** は返品されたモジュールを診断、修理し、障害の原因をより正確に突き止めることができます。単一モジュールの設計では、障害は一般に現場で修理され、根本原因の究明はずっと困難です。

今回の調査では扱っていませんが、現場での修理はさらに別の障害を生み出すことになりかねません。現場での修理は工場での修理に比べて新しい障害を引き起こす可能性が高くなります。**UPS** のメーカーは、特定条件での耐圧試験や機能試験をはじめ、製造ユニットをさまざまな形で一連の試験を実施しています。現場での修理がこのように詳細かつ厳密にテストされることはめったにありません。

結 論

MTech が **InfraStruXure** アーキテクチャを対象として行った **PRA** 分析の結果、同規模のデータセンター内で使われている集中設置方式の **UPS** に比べ、**InfraStruXure** の方が少し信頼性が高いことが判明しました。稼動 1 年間あたりの障害発生確率の相違は、「障害」という用語の定義によって大きく左右され、集中設置方式 **UPS** のバッテリーバンクの設計によっても左右されます。しかし、**MTech** が調査したいずれのケースでも、信頼性は **InfraStruXure** アーキテクチャの方が上でした。データセンター内の全体設備を原因とする障害の方が **UPS** 自体の障害よりも大きな意味を持っています。

信頼性における **InfraStruXure** 製品の圧倒的優位を証明するものではなかったにもかかわらず、**APC** は今回の分析が有益だったと判断しています。分析のそもそもの目的は、製品の信頼性を高めるうえで、どのコンポーネントまたはプロセスに投資を追加したらよいか見極めることにありました。こうした基準からすれば、今回の分析は大成功です。

PRA 分析によれば、**APC** はコンポーネントの品質向上と試験にさらに投資することにより、**InfraStruXure** の信頼性を大幅に高めることができます。3 種類のコンポーネントを改良するだけで、ランダムな障害を 10 分の 1 以下に減らすことができます。汎用コンポーネントを組み込んでいる限り、**InfraStruXure** の信頼性が同様のコンポーネントを組み込んでいる競合製品を大きく上回ることはありません。今回の分析をふまえ、**APC** は製品障害の大きな原因となっているコンポーネントに集中的にリソースを注ぎ込んでいます。

今回の分析は、工場での負荷ラックへの配線システムの構築とそれに対する試験には大きな利点があることも示しました。**APC** が工場で構築した配線システムは現場での電気工事により構築された配線システムよりも欠陥発生率においては 1,500 倍もよくなっています。モジュール式设计の利点も重要です。この設計のおかげで、**APC** は最高品質な製造方法を採用し、コストを削減しながら同時に製品の信頼性を高めることができます。

APC と **MTech** は今回の分析から多くのことを学びました。各種の設計や製造手法の役割と影響

に関する前提条件が問われ、数学的分析と平明な論理的証明に照らして修正されました。**PRA** は設計エンジニア、フィールドエンジニア、製造担当者にとって強力なツールです。厳密に徹底して適用することにより、**PRA** は製品の信頼性を高めるための有効な武器になります。原子力発電所の信頼性を計算する技術は、急速に進化する電源業界（この業界では障害の経済的、人的なコストも急速に増加しています）にとっても重要なリソースとなります。

PRA は製品やシステムアーキテクチャを公平に比較するためのツールとなります。ユーザーは、**PRA** 分析の結果に基づいて、どの製品またはアーキテクチャが自分の用途に合っているか正確に判断できます。ユーザーがこのように正確な情報に基づいて選択することにより、製品の信頼性、コスト、パフォーマンスが改良され、信頼性と機能をそれぞれのニーズに対応させることが可能になります。**PRA** は、メーカーやデータセンタ設計者、そしてユーザーが情報に基づいた合理的な選択をする際のツールとなります。

参考資料

1. IEEE, Inc. IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, and Sensing Component Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations. New York: IEEE Press, c1977. [IEEE Nuclear Reliability Data Manual.]
2. IEEE, Inc. IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. New York: IEEE Press, 1988. [IEEE Gold Book: Power Systems Reliability.]
3. Hale, Peyton and Arno, Robert "Survey of Reliability Information for Power Distribution, Power Generation, & HVAC Components for Commercial, Industrial, & Utility Installations", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2000.
4. Kumamoto, Hiromitsu, and Henley, Ernest J. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. 2nd Ed. New York: IEEE Press, 1996.
5. Kusko, Alexander. Emergency/Standby Power Systems. New York: McGraw-Hill, 1989.
6. Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment. MIL-HDBK-217F, Wash., DC: U.S. Dept. of Defense, January 1990.
7. Ramakumar, Ramachandra. Engineering Reliability: Fundamentals and Applications. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.
8. Sanders, Mark S., and McCormick, Ernest J. Human Factors in Engineering and Design. 6th Ed. New York: McGraw-Hill, 1987.
9. Snevely, Rob. Enterprise Data Center Design and Methodology. Palo Alto: Sun Microsystems Press, A Prentice Hall Title, 2002.
10. Swain, A.D., and Guttman, H.E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (THERP) Final Report. NUREG/CR-1278-F, Wash., DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, August 1983.

著者について :

Steve Fairfax は MTechnology, Inc. の社長です。MTech に入社したのは 1997 年ですが、Steve は MIT の学生だったころからメガワット級の電力システムと取り組んでいました (MIT ではトカマク型核融合炉用の 200 メガワット電力システムの構築と運用に参加していました)。その後、Steve は、Failure Analysis Associates のマネジングエンジニアとして、電力システムの信頼性の研究を始めました。MIT プラズマ融合センターにおける Alcator C-MOD 核融合炉の設計と試運転に際してはエンジニアリング/オペレーションのチーフを務め、ボストン周辺のいくつかの企業の主任エンジニアとしても活躍しました。MIT から物理学と電気工学の修士号を取得。

Neal Dowling は MTechnology, Inc. の上級エンジニアです。障害ツリー分析とそれに関連したモデリングやシミュレーション、電源やスイッチ関連の新技術の開発と試験に加え、Neal は MTech の 400kW 燃料セル発電プラントの運転と保守を指揮しています。MTech に入社する前は、ボストン周辺のいくつかの医療機器メーカーで働いていました。専門とする分野は、機器のファームウェアやソフトウェアの開発とメンテナンス、米国食品医薬品局基準への準拠、アナログ/デジタル設計などです。MIT から電気工学の学士号と修士号を取得。

Dan Healey は MTechnology, Inc. の上級エンジニアであり、ヒューマンファクター分析と運転や保守作業への PRA 技術の適用を専門としています。Dan はボストン周辺のいくつかの企業でエンジニアリング担当ディレクターとして、半導体、医療機器、ロボット、電子光学システムなどの製品開発を指導しました。Dan はロチェスター大学から電気工学の学位を取得しているほか、大学院で光学とプログラミングも勉強しました。現在はハーバード大学の特別学生として、技術管理とソフトウェア開発を学んでいます。

MTechnology, Inc. は 21 世紀に向けた電力システムのエンジニアリングを専門とし、コンサルティング、試験、製品開発、プロトタイプ作製などのサービスを提供しています。MTech は電

カシステムの確率論的リスク分析、設計のレビュー、障害根本原因解析などを通じ、規制への準拠や係争にかかわる状況で専門的な見解を求められることもあります。MTech はリスクインフォームドシステム (risk-informed system) の設計、運転、保守、アップグレード、信頼性向上管理などに関するコンサルティングを提供しています。MTech のクライアントの多くは設備投資と経常支出を抑制しながら、製品の信頼性を高めています。MTech は 5,000 平方フィートの試験施設と研究所を擁し、500kW の装置の連続稼働や数メガワットのパルス負荷の稼働が可能です。レシプロエンジンから燃料電池に至る幅広い技術を駆使した信頼性の高い分散型発電プロジェクトも手がけました。MTech のクライアントには、電力会社、設計会社、エンジニアリング会社、重要施設を所有または運営する企業、7x24 のミッションクリティカルな産業をサポートするメーカーなどがあります。

©2004 American Power Conversion. All rights reserved.

この白書の内容はすべて著作権で保護されています。この白書のいずれの部分についても、著作権所有者の書面による許可がない限り、使用、複製、コピー、転送、(検索可能なシステムへの)保存は禁じられています。

www.apc.com

Rev 2004-0