

# バッテリーエネルギー 貯蔵システム用ヒューズ

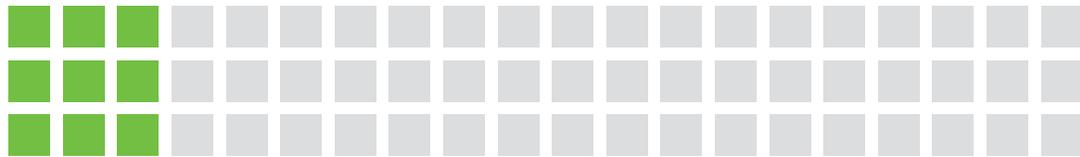
BESS電源回路を過電流から適切に保護する方法



テクニカルペーパー



Expertise Applied | Answers Delivered



## 目次

はじめに .....	3
BESS内で回路保護が重要な場所 .....	3
電源回路のヒューズ保護 .....	4
ヒューズの調整 .....	5
“Reverse” Coordination : Selective Coordination からの変更 .....	5
低抵抗の短絡から保護するためのヒューズサイズの設定方法 .....	6
モジュールでのヒューズサイズの設定方法 .....	6
バッテリーラック、DC パネル、電力変換システムでのヒューズサイズの設定方法 .....	7
事例 .....	8
より大きなピーク電力需要に対応するため、BESS容量を増強するインテグレータ .....	8
新しいインバータ設計でよりハイパワーを目指す .....	9
規格 .....	10
関連資料 .....	11

## はじめに

一滴の雨粒や輝く海のように、エネルギー貯蔵システムは地球の水域のようなものです。

バッテリーエネルギー貯蔵システム（BESS）では、バッテリーセル内のエネルギーは、結合して小川を形成する雨粒のようなものです。小川が組み合わされて河川を形成するように、セルからの複合エネルギーが組み合わされてバッテリーモジュールのエネルギーとなります。モジュールは直列に組み合わされてラックを形成します。ラックは河川を流れる丘の斜面を表しています。斜面を流下する河川が結びつき、エネルギーの「海」を形成します。それが絵に描いたような大海原であれ、エネルギー投資であれ、貴重なものはすべて保護されなければなりません。

セルからラックまでの各段階でエネルギーを組み合わせるとき、回路保護が必要になります。ヒューズは、BESSを過電流から保護するための効率的で効果的な方法です。過電流は頻繁にシステムにダメージを与えるだけでなく、ダウンタイムの元凶となり、企業の損失となります。

ヒューズがBESSにもたらす利点は計り知れません。複雑な配線や追加コンポーネントを必要とせずに、簡単かつコスト効率よくシステムを保護する素晴らしい方法です。

ヒューズは、ダウンタイムを増やすことなく簡単に交換可能です。BESSヒューズの低いワット損失は、エネルギー損失を防ぎ、それによってコンポーネントからの無駄な電力を効率的に最小限に抑えます。コンパクトサイズのため、高エネルギー密度のシステム設計を可能にします。BESSヒューズは、1500 VDCで最大250 kA（もしくは潜在的にそれ以上）の直流遮断容量を持ちます。これにより、長期のBESSの設計が可能になる一方、最小遮断容量は低く、より低い故障電流レベルに対する保護を提供します。全体的に見て、ヒューズはBESSに最適ということです。

破壊的な故障を防ぐために、回路保護は適切なサイズである必要があります。使用する最適な回路保護部品は、以下の事項により決定します。

- システム電圧
- システム公称電流
- 時定数
- 相互接続部品の耐久定格
- 周囲条件
- システム内のコンポーネントの位置

本書では、BESSのさまざまな故障しやすいポイント、そして最適な過電流保護のためのヒューズの適切なサイズ設定方法について解説します。

### 略語

ac	交流電流
BPU	バッテリー保護ユニット
BESS	バッテリーエネルギー貯蔵システム
dc	直流電流
ESR	エネルギー貯蔵ラック
IEC	国際電気標準会議
IGBT	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ
NEC	米国電気工事規程
OEM	相手先ブランド製造 (OEM)
UL	Underwriters Laboratory (UL: 安全機関)
UPS	ユニバーサル電源

## BESSとUPSシステムの違い

BESSとユニバーサル電源（UPS）システムは、時々混同されることがあります。

NEC 706.2の second informational noteでは、BESSが「UPSシステムのような他の貯蔵システムとは異なる」とその区別について言及しています。UPSシステムは、停電時、負荷に交流電力を一定時間供給するために使用される電源のことです。一方で、「BESSはエネルギーを蓄積し、電気エネルギーを構内配線システムまたは電力生産と配電ネットワークに供給することができる、単一もしくは複数の組み立てられたコンポーネントである」と、NEC 706.2に記載されています。

## BESS内で回路保護が重要な場所

UL 1741 32.4（第3版）によると、バッテリー回路への接続を意図したユニットには過電流保護を備える必要があります。このような場所では回路保護が重要です。

- モジュールレベル
- バッテリーラック
- DCパネル（DCアレイコンバイナーキャビネット）
- 電力変換システム（インバータ）への入力

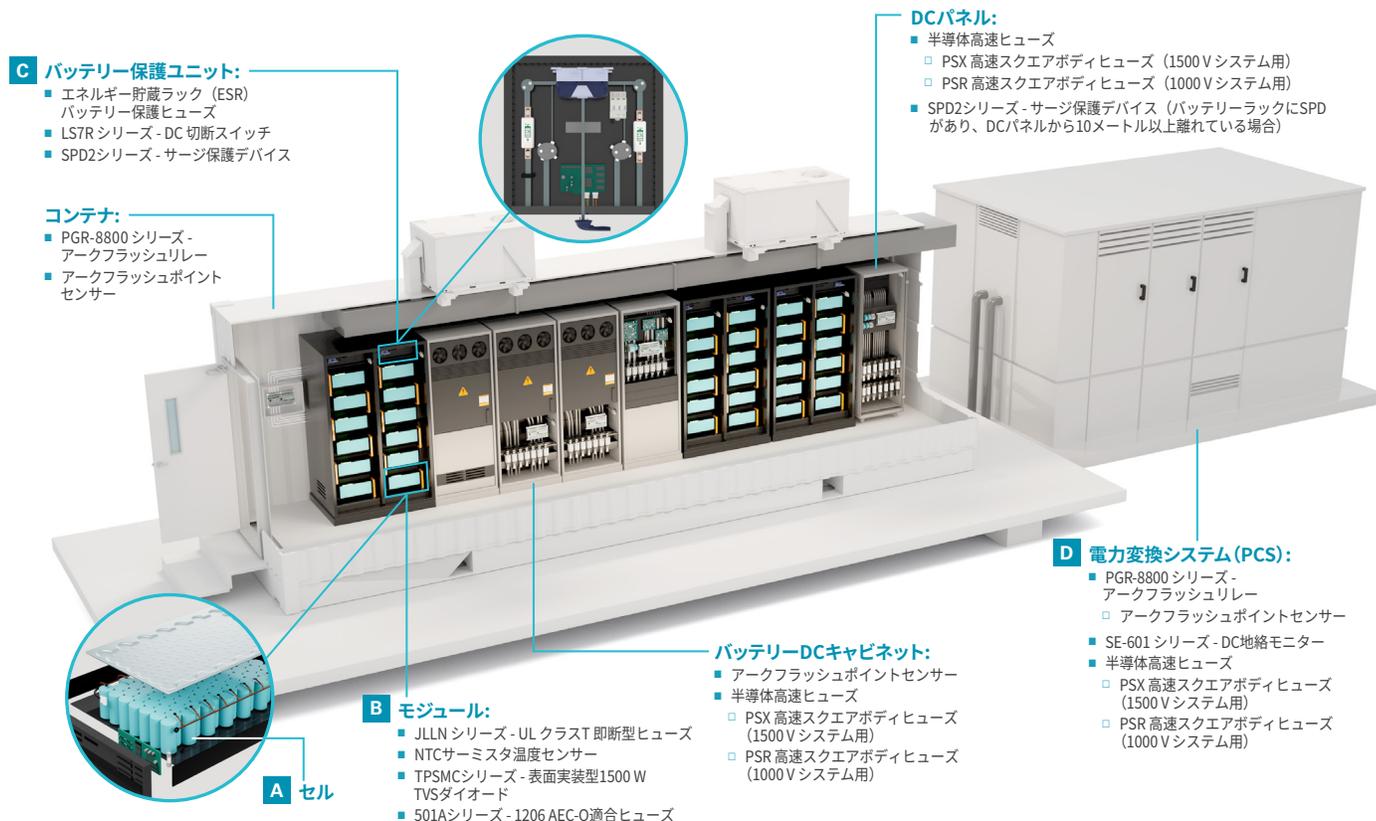


図1. バッテリーエネルギー貯蔵システム (BESS)

バッテリーシステム内には、2つの回路があります。電源回路（主回路）と制御回路（二次回路）です。制御回路は、データを監視および収集し、システムの動作に関する情報を提供し、必要な場合にはトリップ信号を送信します。電力回路は、負荷を操作する電気を送ります。

BESSには、多様な回路保護が必要です。図1をご覧ください。

- [ヒューズ](#)
- [アークフラッシュリレー](#)
- [地絡リレー](#)
- [サージ保護デバイス](#)

本書では、BESS電源回路における過電流に対する保護のみ焦点を当てます。

## 電源回路のヒューズ保護

図1のセル（A）は、エネルギー貯蔵システム内の最小コンポーネントです。図1のモジュール（B）は、並列および直列構成で組み合わせられたセルで構成されています。モジュールを直列に積み重ねてラックを構成します。ラック電圧は一般的にシステムと同じです。

ラックは、直列に積み重ねられたモジュールで構成されます。各モジュールの電圧を足していくと、バッテリーラックの電圧となります。

システムの電圧を知るには、各バッテリーラックモジュールの電圧を足していきます。バッテリーラックの電圧は、DCシステムの電圧と等しくなります。例えば、1500Vのシステムでは、各ラックは1500VDCになります。モジュール電圧が50VDCの場合、ラックには30個のモジュールを直列に収容する必要があります。

モジュールまたはバッテリーラック内で発生する可能性のある短絡から、モジュールを保護することが重要です。BESS内で発生する過負荷は、通常BMS（バッテリー管理システム）などで管理されるため、ほとんどの回路保護は主に短絡保護用であり、過負荷用ではありません。

次に保護する領域はバッテリーラックです。この回路保護は通常、バッテリー保護ユニット（BPU）にあり、図1ではバッテリーラック（C）の最上部にあります。各モジュールからのエネルギーを集約して構成されています。このレベルの回路保護は、通常、各モジュールの電圧よりも高いシステム電圧で定格されます。

そのため、故障時にバッテリーラックを絶縁するための回路保護（ヒューズなど）が必要です。必要な量のエネルギーを得るために、多くのラックが並列に組み合わせられてDCパネルに入ります。短絡故障が発生した場合にすべてのラックを保護するために、DCパネルにはヒューズを使用します。

BESSの全エネルギーは、並列に組み合わせられたバッテリーラックのエネルギーで構成されます。

図1の電力変換システム（D）は、直流を交流に変換し、バッテリーを充電する際には、交流を直流に変換します。

BESSに接続されている電力変換デバイスの入力を保護するために、回路保護デバイス（ヒューズなど）を使用します。これらは、故障発生時にBESSを電力変換システムから絶縁させる機能があります。

## ヒューズの調整

### ”Reverse” Coordination : Selective Coordinationからの変更

”Reverse” Coordinationは、標準的なCoordinationとは少し異なります（図2）。Reverse coordinationでは、故障発生時にバッテリーラックの上部にあるヒューズだけが溶断するようにします。これにより、不要な数のヒューズが溶断するのを防ぎます。

一般的なSelective Coordinationは、過電流保護デバイスの時間-電流特性を同期させ、過電流が発生すると、故障のライン側で最も近い上流デバイスのみが開くようにします。この方法では、問題のある電気系統セクションのみがオフラインになります。これにより、過負荷回路の特定が容易になり、機器をサービスから取り外し、完全なサービス運転に復旧するまでに必要な時間を最小限に抑えることができます。

一般的なSelective coordinationでは、故障発生時に、故障または故障した分岐（分岐ヒューズ）に最も近いヒューズのみを溶断し、メインヒューズやフィーダーヒューズは影響を受けません。ただし、ヒューズのサイズが適切でない場合、Selective Coordinationが困難になる場合があります。

”Reverse” Coordinationでは、目標が少し異なります。BPUの近くで故障が発生した場合、Reverse Coordinationでは、BPU内のラックヒューズ（フィーダーヒューズ）とモジュールヒューズ（分岐ヒューズ）を調整することで複数のヒューズの溶断を防ぎます。この場合、分岐ヒューズに影響を与えずに、ラックヒューズを開かせたいです。

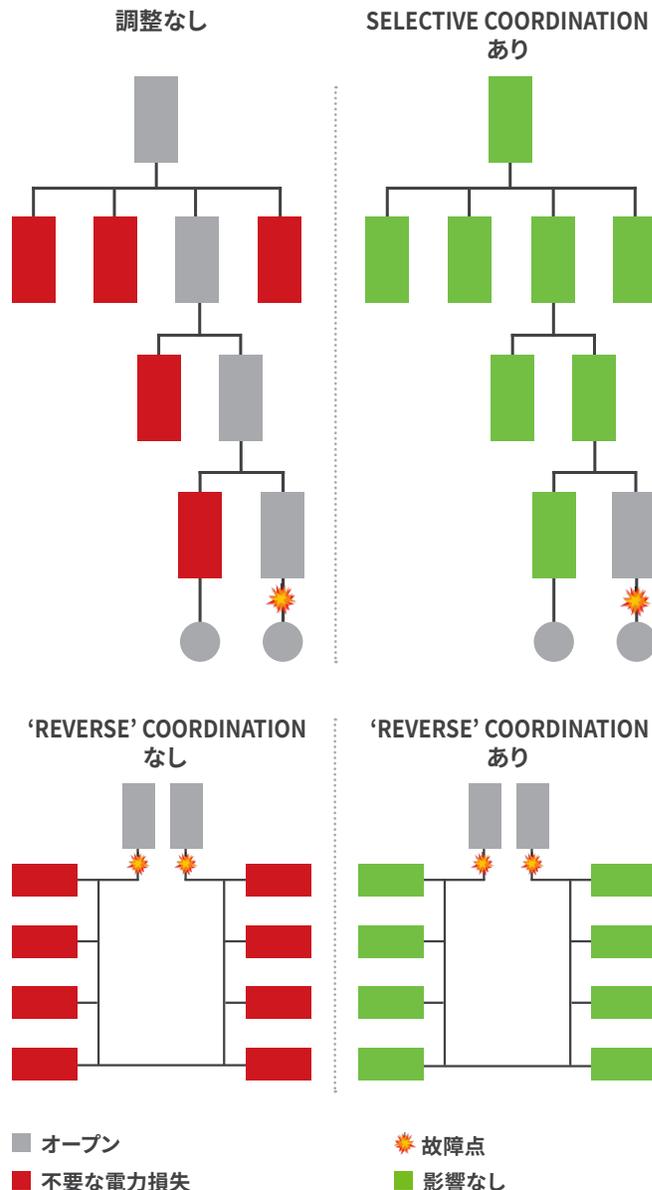


図2. Selective coordination versus “reverse” coordination.

モジュールヒューズに影響を与えずにBPUヒューズを溶断したい場合は、”Reverse” Coordinationを行うと良いでしょう。これにより、修理の必要性和ダウンタイムが最小限に抑えられます。

ヒューズの異なる溶断および全遮断 I<sub>pts</sub> を使用して、ある程度の調整レベルを決定することは可能ですが、ヒューズメーカーと協力して、この性能基準を満たすヒューズを組み合わせる必要があります。

## 低抵抗の短絡から保護するためのヒューズサイズの設定方法

高抵抗と低抵抗の両方の短絡電流について、表1をご覧ください。高抵抗の短絡回路はバッテリーをゆっくり放電し、低抵抗の短絡回路はバッテリーを急速放電します。

### モジュールでのヒューズサイズの設定方法

ラック電圧が1500Vのアプリケーションでは、モジュールのヒューズは1500VDC以上である必要があります。システム電圧に定格されていないヒューズは決して使用しないでください。

UL 1973 7.9.10 は以下のように示しています。

短絡保護を含むバッテリー過電流保護用に使用されるヒューズは、短絡および過負荷の両方の状態について評価しなければなりません。短絡状態に対してのみ評価されるヒューズ（aR型ヒューズ）は、これらのタイプのヒューズがカバーする範囲を下回る過電流状態での保護を確実にするために、補助保護（例えば、BMS [バッテリー管理システム]）を備えなければなりません。

さらに、UL 1973 7.9.11では、「バッテリーシステム内での直列接続を意図したバッテリーモジュールの保護部品は、意図したバッテリーシステムの最大電圧に対して定格でなければならない」と記載されています。

一般に、BESS内のヒューズは、[IEC 60269-7](#)で示されている、バッテリーおよびバッテリーシステムの保護のためのヒューズ

ズリンクに関する補足要求事項を満たすように設計されるべきです。

システム電圧がJLLNヒューズの電圧（300V）以下のアプリケーション内のモジュールであれば、JLLNヒューズを使用してモジュールを保護することができます。ただし、モジュールを直列に積み重ねると、システム全体の電圧が上昇します。モジュールを積み重ねる場合は、UL 1973 7.9.11に従って、積み重ねたバッテリー全体の電圧以上の定格電圧を持つヒューズを各モジュールに使用する必要があります。

モジュールでのヒューズの定格電流を計算するには、次の式を使用します。

$$I_N = \frac{I_L}{(F_{AT} \times F_L)}$$

ここでは：

$I_N$  = アプリケーション用高速ヒューズの定格電流

$I_L$  = 公称負荷放電電流率

$F_{AT}$  = 温度ディレーティング係数

$F_L$  = ヒューズ負荷率

### 例

公称電流10Aで動作するバッテリーを備えたシステムを考えてみます。モジュール間ヒューズのサイズを決めるには、周囲温度とヒューズ負荷定数を考慮する必要があります。

表1: 高抵抗および低抵抗の短絡の原因と影響

	考えられる原因	影響
高抵抗の短絡	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 内部バッテリーセルの欠陥または汚れ</li> <li>■ 外部短絡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 誤った「自己放電」を作り出す</li> <li>■ セル電圧の低下を緩やかにする</li> <li>■ 電池をゆっくり放電する</li> </ul>
低抵抗の短絡	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 内部バッテリーセルの欠陥または汚れ</li> <li>■ バッテリーストリングまたはDCパネル内の製造欠陥または回路故障</li> <li>■ 外部短絡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ セル電圧の急速な低下</li> <li>■ セル温度を急速に上昇させる</li> <li>■ 健全なバッテリーラックから、バッテリーーストリングまたはコモンDCバスバー上のDCパネルの故障点への逆送電</li> <li>■ 電池を急速に放電する</li> </ul>

周囲温度48°Cは、ディレーティング曲線（図3）に従って10%ディレーティングすることを意味します。

ヒューズが48°Cでその通電容量の75%で動作するように、ヒューズの負荷率を考慮する必要があります。

たとえば:

$$I_L = 10 \text{ A}$$

$$F_{AT} = 0.9 \text{ (10\%ディレーティング)}$$

$$F_L = 0.75$$

このとき:

$$I_N = \frac{10 \text{ A}}{0.9 \times 0.75} = 14.81 \text{ A}$$

定格電流 ( $I_N$ ) が14.81 Aであるため、最も近いヒューズサイズは15Aです。

## バッテリーラック、DC パネル、電力変換システムでのヒューズサイズの設定方法

バッテリーラックレベルでは、短絡電流から保護するだけでなく、コンタクトを保護するための最小遮断容量も低いヒューズが必要です。エネルギー貯蔵ラック (ESR) ヒューズは、バッテリーラックの保護に最適です。

直流パネルと電力変換システムを短絡電流から保護すればよいだけなので、半導体ヒューズがこの2つの分野に最適といえます。1500Vのシステムでは高速PSXバッテリー保護ヒューズを使用し、1000Vのシステムでは高速半導体PSRヒューズを使用しましょう。

以下を保護するヒューズのサイズを選ぶとき、

- バッテリーラック
- DC パネル
- 電力変換システム

次式を使用します。

$$I_N = \frac{I_L}{(F_{AT} \times F_L \times F_{SS} \times F_{WR} \times F_{FC})}$$

ここでは:

$I_N$  = アプリケーション用高速ヒューズの定格電流

$I_L$  = 公称負荷放電電流率

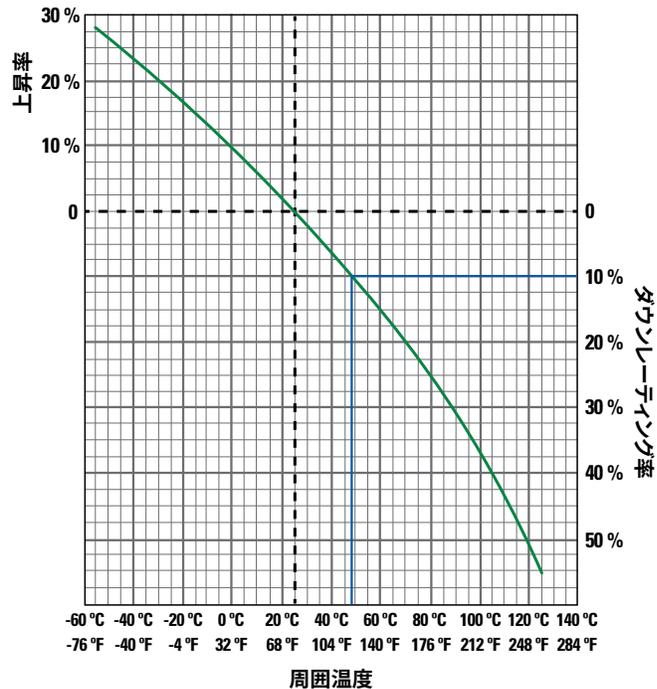


図3. 温度ディレーティング曲線

表2: スイッチング補正係数

スイッチングの頻度	スイッチング補正係数
年間12回未満の停止	1.00
月に1回以上の停止	0.95
1週間に2回以上の停止	0.90
1日に1回以上の停止	0.85
毎日数回の停止	0.80

$F_{AT}$  = 温度ディレーティング係数

$F_L$  = ヒューズ負荷係数

$F_{SS}$  = スイッチング補正係数 (表2)

$F_{WR}$  = 熱補正係数 (図4)

$F_{FC}$  = 強制冷却補正係数 (図5)

図5では熱補正係数の決定方法を示しています。当社の[高速ヒューズテクニカルペーパー](#)では、熱補正係数を決定するための事例を示しています。

ヒューズ電圧は、バッテリー電圧以上にする必要があります。ヒューズの短絡電流定格は、バッテリーシステム内に設置されている場所の故障電流以上でなければなりません。システムの時定数は、ヒューズの時定数以下である必要があります。

## 例

720 VDC～960 VDCで動作し、0.25 の充電率で充電と放電が行われる 200-Ah バッテリーラックを考えてみます。バッテリーラック内の温度が70 °Cで、バッテリーラック内の強制空冷はないと仮定します。システムは1 日に数回放電と充電を行います。

コモンDCバス上に8つのラックが並列にあり、それぞれが8kAの故障電流を持っています。

ヒューズ定格を導くには：

$$I_L = 50 \text{ A (0.25 の充電レート - } 0.25 \times 200 \text{ Ah)}$$

$$F_{AT} = 0.8 \text{ (ディレーティング曲線より20\%または0.2の温度ディレーティングによる)}$$

$$F_{FC} = 1.0 \text{ (ラック内の強制空冷なし)}$$

$$F_{WR} = 0.8 \text{ (バスバーサイズの業界平均基準：2A~3A/mm}^2\text{)}$$

$$F_{SS} = 0.8 \text{ (表2のスイッチング補正表参照)}$$

この例では、ヒューズの定格電流 $I_N$ を以下の式で計算します。

$$I_N = \frac{50}{1.0 \times 0.8 \times 0.8 \times 0.8 \times 1} = 97.66 \text{ A}$$

このため、使用可能なヒューズアンペアは100 Aとなります。

この例では、1000 VDCで100 Aのヒューズを使用します。ヒューズの遮断定格は、すべてのラックの合計故障電流を反映する必要があります。この例では、8 ラックにそれぞれ8 kA の故障電流があるため、ヒューズの遮断定格は少なくとも64 kA (64 kA = 8 kA × 8 ラック) が必要となります。

## 事例

### より大きなピーク電力需要に対応するため、BESS容量を増強するインテグレータ

太陽光発電システムとBESSを供給するインテグレータは、電力会社の顧客がピーク時の電力需要により長時間対応できるように、BESSの容量を増やす必要がありました。そのため、

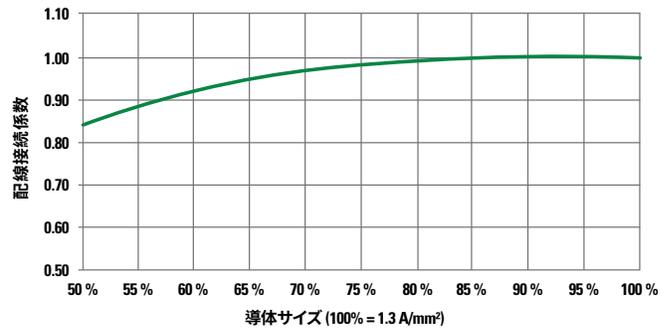


図4. 温度補正係数

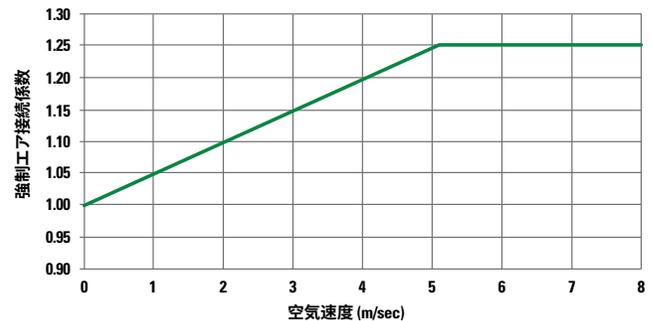


図5. 強制冷却補正係数

インテグレータの設計者はBESS にさらにバッテリーバンクを追加しました。また、フローバッテリーから高容量のリチウムイオンバッテリーセルに切り替えました。

## 課題

新しいBESSのエネルギー密度が高ければ、故障電流もかなり大きくなります。高出力レベルでは、故障が壊滅的な損傷を引き起こし、人員を傷つけることさえあります。したがって、BESSは、はるかに高いレベルの回路保護を必要としました。

## ソリューション

BESSへのバッテリーバンクの追加に際し、設計エンジニアは、当時のBESSに使用されていたものより高い短絡電流遮断定格のヒューズの使用を考えました。このタイプのヒューズは、BESS電力変換器内の繊細な電子機器を保護できるように、非常に迅速に動作する必要がありました。

## 結果

エンジニアは複数のメーカーのヒューズの試験を始めました。最終的に、Littelfuse PSRシリーズの高速スクエアボディ型半導体ヒューズが選ばれました。競合他社の中で最も高い短絡電流定格を持っていたからです。より高い定格 (150 kADCと200 kAAC) によって、DCパネルをより少なくでき、コストの削減と設計の複雑さの解消を実現しました。

さらに、PSR ヒューズシリーズにより、インテグレータのエンジニアは、従来の設計に使用されていたヒューズに類似した角型ボディフォームファクターのヒューズを使用できました。PSR ヒューズを使用することで、大幅な設計変更を行う必要がなくなり、コストが削減されました。

Littelfuse PSR シリーズヒューズを使用することで、インテグレータはDCパネル数をコンテナごとに1つに減らし、さらに2つのバッテリーユニットを追加しました。BESSコンテナのエネルギー密度が7%増加したため、電力需要の高いピーク時に電力会社はより長期間BESSに頼ることができ、同時にその運転コストも低くなりました。

## 新しいインバータ設計でよりハイパワーを目指す

### 課題

太陽光OEMは、市場の要求に応えるため、30kW~150kWの大容量化を図った新しいインバータ設計を開発していました。信頼性と効率性は技術者にとって極めて重要でした。しかし、エネルギー貯蔵システムが増加すると、その基本的なニーズも増加します。

新しいインバータが必要なのは、少なくとも遮断定格が高くトリップ時間が速いヒューズです。内蔵表示など、その他の機能もエンジニアの重要なニーズでした。

エンジニアは、ソーラーインバータにハイパワー<sup>1</sup>、IGBTを使用していました。このソーラーインバータは、ソーラーパネルからの直流出力を交流出力に変換して、送電やユーザーによる消費に利用します。パワーIGBTは、高速スイッチングで電力損失を最小化し、インバータの効率を最大化します。高電圧と大電流の両方で動作するIGBTの短絡故障状態におけるケースの破裂を防ぐ方法を見つけ出す必要がありました。

IGBTの保護が不十分な場合、壊滅的な故障が発生する可能性があります。さらに、過熱したIGBT内に蓄積される高温によって、火災が発生する可能性があります。火災によって、大幅なダウンタイムと高額な修理が必要となる場合があります。さらに、インバータの故障によって、電力会社は、蓄電システムが稼働していないピーク時の電力需要を満たすために高価な電力の購入の負担を迫られる場合があります。また、エンジニアはタイトなスケジュールで、新しいインバータの過電流保護の選択を迅速に行う必要がありました。

### ソリューション

IGBTは非常に速く開くので、発生の恐れがあるあらゆる故障を除去するための高速半導体ヒューズが必要です。新しい高出力の設計に対応するために、高い遮断定格の半導体ヒューズが必要でした。

エンジニアは、Littelfuseの1000VDC、遮断定格150kAのPSR高速ヒューズを選びました。試験した他のヒューズと比較して、Littelfuseのヒューズが以下の特長を持っていたからです。

- 最速の遮断時間
- 低電力消費
- 内蔵表示と遠隔監視
- 早いリードタイム

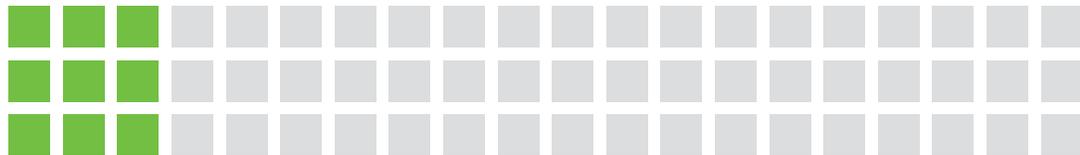
PSR高速ヒューズは、新しいインバータの基本要件を超えていたため、すぐにこのヒューズが選ばれました。エンジニアのタイトなスケジュールに対応し、認証や資料を迅速に提供したことで、Littelfuseはエンジニアたちにとってサプライヤーというよりもパートナーのようでした。

### 結果

それ以来、このOEMは、さまざまな用途で数千のLittelfuseコンポーネントを、全て品質問題や故障なしに使用してきました。このOEMの好意的な経験は、熱保護金属酸化バリスタ (TMOV) やサージ保護デバイス (SPD) を含む、さらなる関連製品への扉を開きました。

**BESSコンテナのエネルギー密度が7%向上したため、電力会社はピーク電力需要の高い時間帯により長くBESSに頼ることができるようになり、同時に運転コストも下げることができました。**

1 BESS アプリケーションでは、IGBTの電流定格は450 A~2400 A、電圧定格は1200 V~2300 Vです。



## コードと規格

### コード

米国電気工事規程

**NEC 706** エネルギー貯蔵システム

国際電気標準会議

**IEC 60269-7** バッテリーおよびバッテリーシステム保護のヒューズリンクに関する補足要求事項

### 規格

ULおよび北米規格

**UL 1741** 分散型エネルギー源で使用するためのインバータ、コンバータ、コントローラ、相互接続システム機器

**ANSI/CAN/UL 1973** 定置用および動力用予備電源用途に使用するバッテリー

## 関連資料

### BESS保護デバイス

#### ヒューズ

- [クラスTヒューズ](#)
- [エネルギー貯蔵ラック \(ESR\) ヒューズ](#)
- [PSX高速ヒューズ](#)
- [高速半導体ヒューズ](#)
- [表面実装ヒューズ](#)

#### その他の保護

- [アークフラッシュ検出](#)
- [地絡保護](#)
- [サージ保護デバイス](#)

#### その他BESS製品

- [DC切断スイッチ](#)
- [表面実装TVSダイオード](#)
- [温度センサー](#)

### BESS関連資料

- [High-Speed Fuses \*\*Technical Paper\*\*](#)
- [Fuse Fundamentals \*\*Technical Paper\*\*](#)
- [Battery Energy Storage Systems Demand a Comprehensive Circuit Protection Strategy \*\*Technical Paper\*\*](#)
- [BESS Resource Hub](#)
- [Arc-Flash \*\*Knowledge Center\*\*](#)
- [Ground-Fault \*\*Knowledge Center\*\*](#)
- [BESS Capability Guide](#)
- [How to Protect BESS to Increase Reliability and Maximize Return on Investments \*\*On-Demand Webinar\*\*](#)
- [Solutions for Battery Energy Storage Systems \*\*SlideShare\*\*](#)
- [Temperature-Sensors Product and Application Information](#)

100年近くの電子部品の経験をもとに、Littelfuseがいつでもお客様をお手伝いします。

#### アプリケーションおよびフィールドサポート

当社の経験豊富な製品およびアプリケーションエンジニアが、お客様の特定のニーズに最適なソリューションを提案し、設計から設置までお客様と協力させていただきます。

[Littelfuse.com/ContactUs](http://Littelfuse.com/ContactUs)

#### メルマガ登録はこちら

[Join our mailing list](#)

[Littelfuse.com/BESS](http://Littelfuse.com/BESS)

詳細は、[Littelfuse.com/BESS](https://www.littelfuse.com/BESS) を  
ご覧ください。