III. 太陽光発電システムの要素技術—1— 太陽電池アレイ構成技術

キーワード

太陽光発電システム, 太陽電池アレイ, 電気回路設計

滝川 清

電力中央研究所

1. ま え が き

太陽電池アレイの構成技術には、多数の太陽電池モジュールをまとめてアレイを構成するための電気回路設計技術と、これらを支持するための架台設計技術がある。電気回路設計技術では、アレイとしての発電効率の向上と安全性設計が重点となり、一方、架台設計技術では、構造物としての安全性・耐久性設計がポイントとなる。

これらについては、まだ規格・標準というかたちで明確に示された設計基準がないのが実状である。以下では、これまでに各所で実施された研究成果などを参考に、アレイ電気回路の設計に際して留意すべき諸点について述べる。

2. 主回路設計

太陽電池アレイは、数十 W 規模の多数の太陽電池モジュールを組み合わせて構成する。従ってアレイ全体の発電効率を向上するには、その構成要素としてのモジュールの特性を考慮しつつ、電気配線などに伴う損失を低減することがポイントとなる。

2.1 集電設計

(1) 集電損失

太陽電池は他電源と異なり非線形な $I-V$ 特性を有しており、日射強度と動作温度に対応する最適動作点（最大電力出力； $P_{\max}$ 点）に負荷を定めなければ、急激に発電効率が低下するという特徴がある。このため一般に、この最適動作点に追従し、太陽電池から常に最大電力が得られるように負荷を制御する。

以下では、この最適動作点とのずれによる損失を不整合損失と呼ぶが、アレイ全体に最大電力追従制御を行っても、個々の太陽電池モジュールの特性にばらつきがあれば、それらの不整合損失に伴う損失分が残る。

アレイ電気回路の集電損失は、これらの不整合損失と電気配線の抵抗分による損失の和で表されるが、また電気配

線に抵抗分があれば、個々の太陽電池の最適動作点がずれるというやっかいな問題がある。

このため、アレイ電気回路では、電気配線の抵抗分だけでなく、太陽電池の不整合損失を考慮して電気回路設計を進める必要がある。例えば、現状で最もポピュラーな 4 インチの単結晶太陽電池を例にとると、集電損失を 2% に抑えるためには、モジュール 1 枚当たりの線路抵抗を 0.2Ω 程度以下とする必要がある。このような原則をもとに、モジュール間の接続線から幹線ケーブルに至る設計を行う。

(2) 集電形態

電気配線による損失を最小とする形態を選ぶのが集電システム設計の基本である。そのほかに建設・施工コストの低減などに配慮する必要があるため、施工の容易な形態も合わせて考慮する必要がある。また、大規模アレイや逐次増強が見込まれるアレイでは、基本的にビルディングブロック方式の集電システム設計とする必要がある。

この点、家庭用などを対象とする数 kW 規模の小型アレイの場合は単純で、図 1(a) に示すように数十枚程度のモジュールを直並列接続することでアレイが完成するため、集電設計も非常に簡単である。

一方、数百 kW 以上の大規模アレイでは、図 1(b) に示すように、広い面積に分布する多種・多数のサブアレイから集電することになるため、単に電気配線による損失だけでなく、個々のサブアレイとの不整合損失を増加させないよう、線路上の電圧配分にも注意する必要がある。

すなわち、線路抵抗により集電システムの末端になるほど電圧が上昇するので、これに合わせてサブアレイの最適出力電圧設計を行う必要がある。

(3) 回路規模

大規模アレイでは、アレイを複数のサブアレイで構成する。その際、サブアレイの最適規模が問題になるが、性能面で見ると、太陽電池には一般に大規模化に伴うメリットが少ないため、一概に最適規模を論じるのは難しい。

実用的には、むしろ立地条件、架台設計・施工の容易性、および事故時の保護設計などのかねあいで決まることになるが、これまでの例では、サブアレイの規模を 3~5 kW 程度に選定している例が多い。

(4) 回路電圧

太陽電池アレイの出力電圧は、これまでの例では、小型

The Present Condition and the Future of Photovoltaic Generating Systems.

III. Elements Technology for Photovoltaic Generating Systems
—1— Photovoltaic Array Technology: Lesson and Learning.

By Kiyoshi Takigawa (Central Research Institute of Electric Power Industry).

(a) 小型太陽電池アレイの構成

(b) 大規模太陽電池アレイの構成

図 1 太陽電池アレイの構成概念

システムで 200 V 程度、数十 kW の中規模システムで 250～300 V 程度、大規模システムでは 500 V が採用されている。

集電損失だけでなくインバータなどの損失を低減する意味では、出力電圧が高いほどよいが、半面、安全性の向上に必要なコストが上昇する。また、家庭用の小型システムでは、出力電圧が低いほど一般的な安全性が増す。

出力電圧を最高 500 V 程度にとどめている理由は、直流開閉器などに低圧機器（750 V）の採用を可能とすること、およびインバータスイッチング素子の耐圧の問題を考慮し、コスト低減を図るためである。一方、小型システムの直流電圧 200 V は、交流 100 V 系におけるトランスレスインバータの可能性を考慮したものである。

小型システムでは集電損失があまり問題にならないので、インバータの変換効率などに問題がなければ、更に低圧化することが可能である。欧米では既に直流 48 V 仕様の小型インバータが市販されている。

2.2 基本回路設計

アレイ回路を構成する基本要素には、太陽電池のほか逆流防止ダイオードやバイパスダイオードがあり、そのほかに開閉器もしくは遮断器、避雷素子、ヒューズ、地絡・短絡事故検出用の保護リレー回路、および事故除去回路などがある。

(1) 直並列設計

図 2 に示すように、アレイ回路構成は大きく 2 種類に大

(a) 直/並列（柵状）回路構成

(b) 並/直列（格子状）回路構成

注) D_s : 逆流防止ダイオード, D_b : バイパスダイオード, SA: 避雷素子, ○: 太陽電池モジュール

図 2 代表的なアレイ電気回路構成法

表 1 アレイ回路構成法の特徴比較

回路構成方式	直/並列回路	並/直列回路
1. 施工等		
(1) モジュール間配線の容易性	◎ 単純	△ 複雑
2. 発電性能		
(1) モジュール特性のばらつきによる出力低下	○ 影響を受けやすい (対策あり)*	◎ 影響を受けにくい
(2) 日影などによる出力低下	○ 影響を受けやすい (対策あり)*	◎ 影響を受けにくい
3. 障害等		
(1) 逆バイアスによる出力低下、温度上昇など	○ 発生しやすい (対策あり)*	◎ 発生しにくい
(2) 障害モジュールによる出力低下	○ 影響を受けやすい (対策あり)*	◎ 影響を受けにくい
(3) 障害モジュール検知の容易性	◎ 切分け容易	△ 切分けがしにくい

注) バイパスダイオード, その他, モジュール特性を考慮した配置など。

別される。最も代表的なのは図 2 (a) に示す直列ストリングを並列に接続した直/並列回路構成である。これに対するものとして、同図 (b) に示す並列エレメントを直列に接続した並/直列回路構成があり、それぞれ得失がある。もちろん、上記図 2 (a), (b) の中間的な回路構成もある。

これら回路構成の特徴を表 1 に示す。直/並列構成は配線が簡単であるが、モジュール特性のばらつきの影響を受けやすく、不整合損失や、直列ストリング内の比較的短絡電流の小さいモジュールにホットスポット（異常温度上昇）を発生する危険性が高い。

しかしながら、これらの短所は後述するように、あらかじめモジュール特性を考慮して配置を決定したり、バイパスダイオードを挿入することでカバーできる。このため、

注) アレイ上の日影面積率: 20% (影方向: 斜め 45 度)

図 3 回路構成による日影の影響の差

直/並列構成はモジュール間配線の単純性を生かし、小型システムから大規模システムにいたるまで広く利用されている。

一方、並/直列構成は、直/並列構成配線に比べて配線が複雑になりがちで、バスバー方式などの工夫を凝らす必要があるが、不整合損失による出力低下が少なく、モジュールの障害（多くは断線）や部分的な日影などの影響が少ない利点がある。

部分的な日影に対する効果については、日影の発生条件にもよるが、図 3 に示すとおり、アレイ面積の 20% の日影により出力低下が 55% に達する場合でも、これを半分程度に改善できるとの報告がある⁽¹⁾。

ただ、直/並列構成に比べてモジュールの障害を切り分けることが難しいのが欠点である。しかしながら、逆に無保守を旨とする遠隔地や住宅用の小型システムなどに適用すれば、信頼性の向上に威力を発揮するものと考えられる。

(2) 太陽電池モジュール

アレイ回路設計の基本は、まず同一種のモジュールを用いて回路構成することである。これはモジュールの不整合損失や逆バイアスによる損失を軽減し、アレイ全体としての発電効率を向上するうえで最も重要な点である。

これに加え、表 2 に示すように、各モジュールの最適動作電流を合わせるように直列ストリング設計を行うのが効果的である⁽²⁾。また、各直列ストリングの最適動作電圧も一致させるようにする。最近では発電効率の向上に伴ってモジュールの $I-V$ 特性がシャープになっているため、表 3 に示すように、特に最適動作電流のばらつきにより、アレイ出力がモジュール出力の単純和よりも 10~20% 程度低下する例が報告されている⁽³⁾。

(3) 逆流防止ダイオード

逆流防止ダイオードは、直列ストリング間を流れる循環

表 2 最適動作電流を合わせるように直列ストリング設計を行った場合の出力増大効果

接続方法	ランダム接続	2 ランク分類	3 ランク分類
購入容量 (kW)		500.0	
実際の出力	456.2	475.0	481.9
出力低下分 (kW)	43.8	25.0	18.1
出力低下率 (%)	8.8	5.0	3.6
ランダム接続に対する出力増加 (kW)	—	18.8	25.7
ランダム接続に対する出力増加率 (%)	—	4.1	5.6

四国総合研究所

表 3 モジュール特性のばらつきによるアレイ出力低下の例

(単位: %)

種別	開放電圧	短絡電流	最適動作		最適動作最大出力
			電圧	電流	
SO	94	98	96	97	92
SE	98	87	99	88	87
BE	96	87	102	86	88
KO	96	99	100	95	95
KE	96	92	97	92	90
HE	95	81	96	78	75
AE	97	92	97	90	88

注) 昭和 62 年度設置分: 工場出荷試験データとの比較。
(関西電力: 六甲アイランド)

電流による損失を防止するとともに、インバータや蓄電池からアレイへの逆流を防止する。そのほか、モジュールや集電ケーブルの地絡・短絡に際し、事故電流の集中を防止するのに効果があるため、アレイ回路に必須の要素である。

安全性の点では設置数を増やすほど有利であるが、逆にダイオード自体の順方向損失が増大するため、各直列ストリング単位に設置するほか、集線の段階に応じてサブアレイ、もしくはアレイ単位に設置する程度が適当である。順方向損失は、シリコンダイオードの場合 0.6~0.7 V 程度の電圧降下を見込み、回路電流に比例するものとみてよい。

ただし、アレイ全体の開放電圧、特に冬期に上昇する開放電圧に十分に耐える逆耐圧特性を有する必要がある。

設置位置は地絡保護とのかねあひがあり、図 4 に示すように、対地電位の不平衡による地絡検出方式を採用する場合は、ストリングの真中、あるいは +、一極側にバランスするように設置するのが、回路の対地平衡度を増し検出感度を向上するうえで有利であるとの報告がある⁽²⁾。

(4) バイパスダイオード

バイパスダイオードは、モジュール特性のばらつき、特に最適動作電流のばらつきによる逆バイアス電圧を軽減し、逆バイアス損失による出力低下や焼損事故（ホットス

図4 逆流防止ダイオードの対地バランス配置

ポット)を防止する効果がある。そのほか、モジュール断線や部分的な日影による発電出力の低下を軽減する効果もある。

逆バイアスは、直列ストリング中で比較的最適動作電流が小さい一部のモジュールに集中して発生する。特に次のような場合に発生しやすい。

- (i) アレイ出力電圧が高く、かつ直列ストリング内モジュールの最適動作電流のばらつきが大きい。
- (ii) 太陽電池モジュールのフィルファクタ (FF) が大きく、 $I-V$ 特性がシャープである。
- (iii) システム運転電圧がアレイ最適出力電圧よりも低い。

これは、モジュールごとにバイパスダイオードを設置することで防止できるが、工事費などコストアップにつながる可能性がある。ただし、実用的には3~5モジュールごとに挿入すれば十分であるとの報告がある⁽⁴⁾。

しかしながら、これまでの実績によると、次のような場合にはバイパスダイオードを省略しても特に問題はない。

- (i) アレイ出力電圧が低く 200 V 以下の場合。
- (ii) 500 V 程度の高電圧アレイでも、モジュール配置を考慮することで、直列ストリング内モジュールの最適動作電流の均一性が1%以下に保たれる場合。
- (iii) 遮蔽物がなく日影のないとき。
- (iv) その他、並/直列回路を採用する場合。

3. 保護回路設計

安全性設計のポイントには、まず人身に対する感電事故防止設計があり、そのほかに考慮すべき点として、地絡・短絡などの事故時保護設計、および耐雷設計がある。

3.1 感電防止設計

感電防止設計の基本は、モジュールをはじめ集電線など電気回路の絶縁設計を徹底することにつぎ。また、人体との低抵抗回路を形成しないよう、我が国ではアレイ回路を低抵抗接地しないのが通例である。静的な充電電圧や隣接高圧線などによる誘導電圧は高抵抗接地で防止する。

3.2 事故時保護設計

アレイ回路で考えられる事故には地絡事故と短絡事故があるが、事故防止、および事故発生後の対処の仕方には、それぞれ異なる対応策がある。

(1) 地絡保護

地絡事故がそのまま短絡事故につながる可能性があるた

図5 太陽電池アレイの地絡検出方法

図6 海外システムにおける短絡事故例（二重事故）

め、我が国ではアレイ回路を低抵抗接地しないのが通例である。海外では中性点を接地する例が多いが、アメリカの例に見られるように、地絡事故がそのまま短絡事故につながり、ケーブルやインバータを焼損した例が報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このため、中性点接地する場合でも一点接地とし、事故につながるケースを減らすなどの対策が採られている。

また、地絡事故の検出のため、地絡検出リレーを設置するが、図5に示すように、これには次の2種類がある。

(i) 直流対地電位の不平衡を検出する方式

(ii) 交流電流を注入し電流不平衡で検出する方式

(i)の方式は比較的構造が簡単なため、小規模システムから大規模システムに至るまで広く用いられている方式である。特に小規模システムではインバータに内蔵される例が多い。しかしながら、この方式には不感帯があるため、最近では後者に研究が傾注されている。

特に大規模システムでは、実動作状態における地絡地点の切分け、自動標定方法などまだ問題が残されている。

(2) 短絡保護

直流短絡事故はアークが消えにくくケーブルなどの焼損事故に至る恐れがある。実際に、図6に示すダブル地絡事故や、特に中性点接地方式では単独地絡事故がそのまま短

図 7 アレイ短絡事故に対する消弧システム
(アーク短絡)

絡事故に発展した例があるため、十分に注意する必要がある。

大規模アレイでは、系統ごとに短絡検出リレーを設置し迅速に事故系統を分離すること、および図 7 に示すように、積極的な消弧システムを採用する必要がある⁽²⁾。

太陽電池の短絡電流は最適動作電流の 3 割増し程度にすぎないため、メタリック短絡の場合でも、過電流検出リレーなどによる単純な短絡検知は難しい。また、徐々に絶縁劣化が進むような高抵抗短絡の検知は更に難しいが、絶縁劣化の場合でも、ある程度劣化が進むと急速にアーク短絡に移行するのが通例である。

そこで、アレイ出力電圧の急激な低下を検出することで、回路の短絡を検知する方法がある。通常の日射変動ではアレイ出力電圧が急激に変化することがないため、これは極めて効果的な検出方法である。

最近では絶縁材料の性能向上により、数百 V の低圧における絶縁劣化事故（水トリーなど）は見られない。むしろ、トラッキング現象など絶縁物表面の劣化が問題である。このため、端子台などの塩塵害防止、耐湿対策をはじめ、あらかじめ十分な絶縁距離をもたせておく必要がある⁽⁷⁾。

3.3 耐雷設計

今のところ直撃雷に対する効果的な保護手段はないが、直撃雷の確率は極めて小さいため、耐雷設計の焦点はもっぱら誘導雷による被害の防止に絞られている。耐雷設計としては次のような対策が有効である。

(i) 太陽電池モジュールの金属フレーム、架台などを接地する。大規模アレイでは、架台などの連接接地を施す。

(ii) アレイ電気回路に避雷素子を分散設置する。

(iii) ケーブル類のシールドを徹底し埋設する。

誘導雷に対しては、制限電圧が回路電圧の 2 倍、サージ耐量 1 kA 以上の避雷素子をアレイ内に分散設置すれば十分で、更に同程度の耐量をもつバイパスダイオードを設置することにより、図 8 に示すように、約 70% の確率で直撃雷による被害をも避けられるとの報告がある⁽²⁾。

避雷素子にはツェナーダイオードなどの半導体素子が理想的である。バリスタは一般にストレスを受けるたびに劣

図 8 太陽電池アレイにおける避雷器の効果

化が進むため、ついには通常の対地電圧で絶縁破壊を引き起こすことがある。また、放電管などの負性抵抗素子は、昼間は太陽電池による対地直流電圧があるため、サージ電圧が去った後も消弧できないことがあるので、注意を要する。

他の避雷措置として、避雷針や遮蔽線、あるいは誘雷針などの設置があるが、最近では、特に雷撃頻度の多い山間地システムなどを除き、海外でも大々的に設置する例は少なくなった。また、小型システムでは太陽電池モジュールの金属フレーム、架台などを接地し、アレイ出力端やインバータ入力に避雷素子を挿入する程度が一般的であるが、補完的に避雷用接地スイッチを設ける場合もある。

4. ま と め

以上、明らかな地形、地物の日影による出力低下の防止など、特殊な条件を考慮する必要がないかぎり、通常用途のアレイでは小型システムから大規模システムにいたるまで、標準的なアレイ回路構成として、直/並列構成を採用しても大きな問題はない。ただし、特に無保守・長寿命化をねらう場合には、並/直列回路構成とするのが有利である。

また、逆流防止ダイオードは必須の回路要素であるが、一方、バイパスダイオードについては、モジュールの最適動作電流を合わせるように注意深く直列ストリング設計を行えば、必ずしも必要ではない。しかしながら、特性のばらつきの大きいモジュールを使用する際には、バイパスダイオードの設置を考慮することが望ましい。

アレイ回路電圧については、現在のところ、小型アレイでは 200 V 程度以下、大規模アレイでも 500 V 程度までが実用範囲である。電力用途としては、48 V の倍数系列が電圧系列標準化の一つのねらい目であると考えられる。一方、大規模アレイのサブアレイ規模については、小型シ

システムとの整合性を考え合わせ、3～5 kW に置くのが適当と思われる。

地絡・短絡などのアレイ障害対策については、小型システムでは障害検知および分離遮断機能を含め、すべてインバータに内蔵されるものとみてよい。従って、アレイの出力開閉器に自動遮断機能は不要である。また、事故が把握できれば十分で、障害モジュールの標定機能までは必要ない。

これに対し大規模アレイでは、主要系統ごとに、地絡・短絡検出機能に連動した自動遮断機能付きの開閉器を設け、事故箇所を迅速に標定・分離すること、場合により消弧機能を併せもたせることが望ましい。地絡・短絡検出方法に関しては、交流電流を注入して検出する方式、回路電圧の急降下を検出する方式などの研究成果が期待される。また、確実な障害位置標定方式の開発が今後の研究課題である。

その他、耐雷設計については、太陽電池モジュールの金属フレーム、架台の接地、および十分な避雷素子の設置などが必須である。耐雷設計については、今後の研究開発の機会を通じ、更に実証的に検証されることを期待したい。

(平成6年11月21日受付)

文 献

- (1) 小林，他：「太陽電池アレイの構成法（影パターンを考慮した最適構成法の検討）」，電中研報告，No.183011（昭58-9）
- (2) 四国総研，他：「集中配置形太陽光発電システムの研究開発」，NEDO 委託業務成果総合報告書（平2-3）
- (3) 関西電力，他：「系統連系制御技術の実証研究開発」，昭62年度 NEDO 委託業務成果報告書（昭62-3）
- (4) 東京電力，他：「分散配置形太陽光発電システムの研究開発」，NEDO 委託業務成果総合報告書（昭62-3）
- (5) T. Key, et al.: "Photovoltaic Electrical Design Practice: Issues and Recommendations", 19th IEEE PVSC (1987-5)
- (6) D. Collier: "Electrical Fault Protection for a Large Photovoltaic Power Plant Inverter", 20th IEEE PVSC (1988-11)
- (7) 岡本：「電気絶縁材料の諸問題(放電劣化)」，昭43電気学会東京支部電気工学専門講習会予稿

滝 川 清（正員）1944年生。電子工学専攻。1962年電力中央研究所入所。当初、電力用デジタル通信方式の研究に従事。1978年より太陽光発電システムの研究に着手。光発電用周辺装置の性能試験・評価法をはじめ、系統連系システム、系統連系保護装置などの研究に従事。