

太陽光発電による高速道路施設への電源供給システム

保全施設部 電気通信課 野村正則
同 部 同 課 鳥越稔

要 約

太陽光発電は、太陽光の持つ光エネルギーを太陽電池で電力に変換するものである。

太陽光のもつクリーンでかつ無尽蔵なエネルギーを有効に活用出来れば、省資源、省エネルギーへの寄与は非常に大きい。高速道路を利用した太陽光発電は、海外で一部導入されているもののコスト的な問題もあり全面的な展開にはいたってない。しかし、高速道路は太陽電池の設置スペースとしては、大きく今後本格的な導入が期待される。

阪神高速道路公団においても、その有用性に着目し適用可能な太陽光発電システムについて道路側壁発電と料金所屋上発電を対象として望ましい供給方式を検討した。

その結果、信頼性、経済性、にすぐれている商用電源連系供給方式が適用可能な方式であることが明らかとなり高速道路の各負荷設備を対象に太陽電池容量などの概略設計を行うこととした。

今後、さらに詳細の仕様等の検討を進め、実験システムの導入を深めたい。

キーワード：開発、ソーラーシステム、道路照明、太陽光発電、蓄電、自然エネルギー

まえがき

最近、地球環境問題が人類の最重要課題のひとつになっている。このため従来の化石燃料にかわるものとして本質的に害のないクリーンなエネルギー資源である自然エネルギーの開発に対する関心が高まっている。自然エネルギー発電には、地熱発電、風力発電、太陽発電、海洋エネルギー発電などがあり、我国においても1974年からスタートした「サンシャイン計画」により各機関で研究開発が進められている。

太陽から放射されるエネルギーは膨大で、地球に到達する太陽エネルギーは全消費電力の1万倍以上といわれる。このエネルギーの一部を有効利用出来れば、エネルギー供給基盤の強化、地球環

境の保全への寄与は非常に大きい。

太陽エネルギーの利用方法としては太陽電池に代表される太陽光発電システムと、ソーラーシステムに代表される熱利用システムがある。

太陽電池については、単結晶、多結晶シリコン太陽電池などが実用化され、さらに高効率化、低コスト化への研究が進められ、また系統連系装置などの周辺技術もほぼ確率されるなど本格的な実用化も目前となっている。

ここでは、太陽光発電システムの高速道路施設への適用について、負荷特性などを考慮しながら適用可能なシステムの検討について報告する。

1 太陽発電システム

1-1 太陽発電パターンと負荷への供給形態

地表に降り注ぐ太陽エネルギーの日射強度は最大 1 kW/m^2 であり、これを太陽電池により電力に変換することを太陽光発電という。太陽電池の発生する電力は直流であり、日射強度、太陽電池素子の温度、太陽電池の動作温度などに依存する。

太陽電池の発生電力は、季節、天候、時間帯により大きく変動し、その供給量、発生時間帯ともに負荷需要の量、時刻帯と一致しない。また人為的に制御することも不可能である。天候の相違による太陽電池出力パターンの例を図-1に示す。雨天時の最大出力は晴天時のそれと比べて $1/3$ 以下になっている。また晴天の場合でもフラットな出力が継続するのではなく、12時頃をピークとした放物線的な出力となっている。

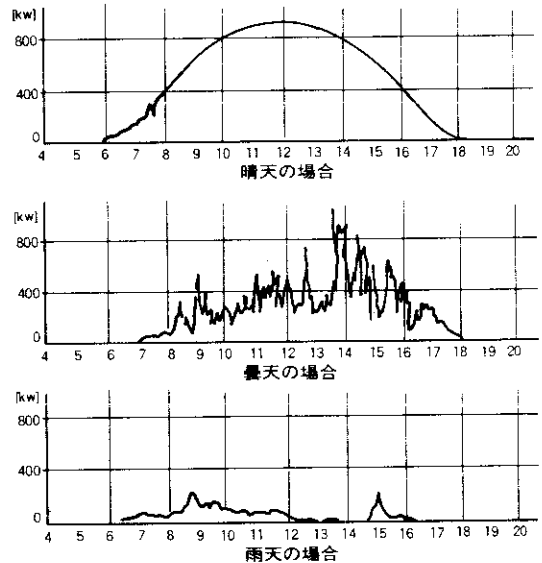
このように時刻、季節などによって変動する日射エネルギーから、負荷に安定した電力を供給する為には、電力を貯蔵する為の蓄電池の利用あるいは配電系統や発電機などとの連系などが必要となる。

すなわち、昼間の供給形態としては基本的に太陽電池から電力を供給し、太陽電池出力が負荷容量より大のときは蓄電池に電力を蓄え、小のときは蓄電池あるいは配電系統または発電機から不足を供給することが考えられる。

また夜間は、太陽電池出力がない為、蓄電池または発電機から電力を供給することとなる。

1-2 システム分類と高速道路施設への適用

このように、太陽光発電システムにはいくつかの周辺機器が必要となるが、システムの分類としては独立システムと系統連系システムに分けられる。



出展：川崎献介「太陽光発電」電機設備学会誌

図-1 太陽電池出力パターン

1-2-1 独立システム

独立システムは、太陽光発電システムのみで、負荷に必要な電力を供給する方式で山間、僻地用、離島用の電力供給システムがこれにあたる。この場合、夜間及び曇天の日射量不足時は、蓄電池で負荷に供給する蓄電池設置形システムや常用及び非常用として発電機を備えたハイブリットシステムもある。図-2に蓄電池設置形独立システムのシステム構成例を示す。

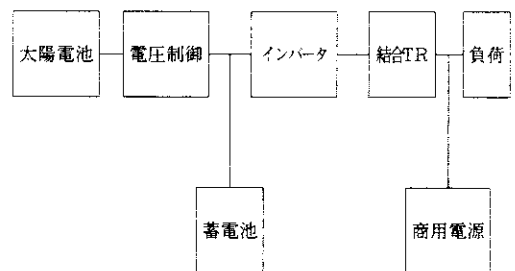


図-2 蓄電池設置形独立システム

高速道路全線に太陽電池を設置すれば計算上は高速道路の施設に必要な電力をすべて供給することは可能である。これにより商用受電を廃止し、独立システムを適用することが考えられる。

しかし太陽電池の発電量は天候や時間帯に左右されるため、最適容量の10倍以上の太陽電池容量が必要となる。

例えば、2000kwの受電所の負荷をカバーするための太陽電池容量は34000kwとなり、高さ1mの太陽電池パネルを高速道路の両壁に設置するとして約170km必要になり経済的にもスペース的にも非現実的な設備となる。

さらに夜間は発電しないことを考慮すると、夜間の電力シフトのための大容量蓄電池も必要となりまたその維持管理も困難である。

よって独立システムの高速道路への適用は現実的でない。

1-2-2 系統連系システム

系統連系システムは、必ずしも太陽光発電システムで発電した電力のみで負荷に電力を供給するものではなく、供給力の不安定さを既存の配電システムによりバックアップするシステムである。

この場合、蓄電池などをなくしてシステムの単純化や低コスト化を図ることも考えられる。

また系統連系システムには電力潮流の形態により、切換形、常時並列逆潮流防止形、常時並列両方向潮流形がある。

電力系統への影響が少ないのは切換形や逆潮流防止形であるが、システム利用効率及びエネルギー利用効率の面からみると両方向潮流形が望ましい利用形態といえる。

系統連系システムの構成例を図-3に示す。

商用電源と連系する場合、受電所や配電用のケーブルは従来どおり必要であるが、太陽電池出力の変動や負荷のアンバランスを電力系統側に負担させ吸収させることが可能となり太陽光発電システムを構成する太陽電池、蓄電池、インバータなどの容量を最適なものとするができる。

また両方向潮流形のシステムでは昼間の発電余剰電力を商用系統に融通し、夜間発電電力の不足時に系統に融通した電力を無料で供給してもらう

ことも可能となり、商用系統が昼間の電力を夜間にシフトする蓄電池がわりにもなる。

このように系統連系システムは、経済性、スペース性、信頼性などの点からどのような負荷に対しても適用可能と考えられ、高速道路施設への適用も充分可能性がある。

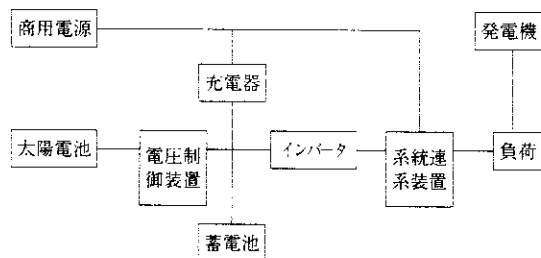


図-3 系統連系システム

1-3 システム構成要素

太陽光発電システムとして高速道路への適用可能な系統連系システムの構成は1-2-2で述べた。ここではその構成要素についてその概要及び現状の技術開発状況を紹介する。

1-3-1 太陽電池

太陽電池は、半導体の光起電力を利用するもので開発研究中のものを含めると、表-1に示すように種々のものが用いられている。

そのうち現在最も一般的に用いられているものは単結晶シリコン、多結晶シリコン、アモルファスシリコンが中心となっている。太陽電池に望まれる特性としては、

- ・変換効率が高い
- ・製造エネルギー、コストが少ない
- ・材料資源が豊富である
- ・耐久性が高い
- ・製造、使用、廃棄の段階で公害をおこさないなどである。

これらを勘案すると現時点では単結晶シリコン、または多結晶シリコンがふさわしい。

各太陽電池の比較を表-2に示す。

また、太陽電池を生産するのに要したエネルギーを回収する（エネルギーペイバックタイム）は、

生産規模が10MW/年の現状で約4年、将来100MW/年になるとすると約2年程となる。

表一 太陽電池の種類

太陽電池の種類		半導体材料
シリコン太陽電池	結晶系	◎単結晶Si ◎多結晶Si
	アモルファス系	◎a-Si a-SiC a-SiN a-SiGe a-SiSn
化合物半導体太陽電池	Ⅲ-V族	GaAs AlGaAs InP
	Ⅱ-VI族	◎CdS CdTe Cu ₂ S
	その他	CuInSe ₂ CuInS ₂
湿式太陽電池	TiO ₂ GaAs InP Si	
有機半導体太陽電池	フタロシアニン ポリアセチレン ヒドロキシ・スクワリウム	

◎印のみ実用化、他は研究中または開発中

表二 太陽電池の比較

材料	変換効率 %	製造エネルギー	コスト	寿命	資源	信頼性	公害
単結晶Si	◎ 13~18	△	△	◎	○	◎	小
多結晶Si	○ 7~16	○	○	○	○	○	小
a-Si	○ 8~11	◎	◎	△	◎	○	小
GaAs	◎ 18~22	△	×	○	△	◎	大
CdS/InP	◎ ~14	○	○	△	△	◎	大
CdS/CdTe	○ 8~13	○	○	△	△	○	大

1-3-2 電圧制御装置

太陽電池の起電力は、日射量及び負荷量により大きく変動するので、特に蓄電池を充電する場合は充電効率の向上、及び過充電防止のための電圧制御装置必要となる。

1-3-3 充電器

蓄電池を使用する場合で商用電源がある場合は、長期間の無日射にそなえて充電器が必要となる。

1-3-4 インバータ

太陽電池の起電力は直流であるため、これを交流に変換するインバータが必要である。

インバータに求められる性能は以下のとおりである。

- ・変換効率が高いこと
- ・負荷側で短絡保護ができること
- ・小型、軽量、低騒音であること
- ・保守が容易なこと

1-3-5 系統連系装置

太陽系発電システムを系統と連系しようとする場合、系統側からこれを自由に制御できないため系統の需給運用体制や配電線の保守・保安体制に影響を与える。また天候に左右されやすい不安定な電源であるため、系統の負荷特性を複雑化し電圧変動を引き起こすおそれがある。さらに直交変換に伴う高調波の発生など系統の電力品質を低下させる可能性がある。

そのため連系システムでは配電線の電圧や周波数をうまく協調し運転する系統連系装置が必要となる。系統連系装置に必要な機能として、電圧変動抑制機能、保護協調機能、単独運転防止機能などがある。

2 高速道路施設への適用

2-1 商用負荷と電力供給方式

高速道路における太陽電池の設置場所としては1カ所に集中して設置するスペースがないため、高速道路の側壁および料金所屋上が考えられる。

そのため、供給の対象となる負荷も、受電所などのような大きな単位でなく変電塔単位、あるいは各負荷設備単位となる。

ここでは表-3に示す負荷を太陽光発電システム対象負荷として設備規模、適用性などの検討をおこなった。

また、電力供給方式としては、1-2で述べたように、系統連系システムである商用電源との連系供給方式として、蓄電池を設置する場合、設置しない場合について検討した。

2-2 検討方法

2-2-1 太陽電池容量

太陽電池が年間に受け取る日射量は、太陽電池パネルを設置する角度によって異なり、設置地点の緯度と同一の傾斜角に設置した場合に最大となる。表-4に大阪地区の日射量を示す。

表から大阪地区では日射量が最大となるのは、南向きで傾斜角が30°のときで、年平均約3600kcal/m²・日であることがわかる。

以後の設計計算では太陽電池パネルが南向きで傾斜角を30°に設置できるものとして進める。

日射量が3600kcal/m²・日とすると、1日あたりの太陽電池出力電力量は

$$Pdc[kwh/日] = (kd \times 3600) / 860 \quad (1)$$

(ただしkdは減損係数)

であらわせ、kd=0.8~0.85とするとPdc=3.35~3.56kwh/日となる。

大阪地区では、晴天時の入射エネルギーは約0.7kw/m²であるので、最大出力で約5時間分の電力量となる。

太陽電池容量の算出は蓄電池を設置する場合

$$Sbh = Rh / \text{変換効率} \quad (2)$$

Rh : 太陽電池出力でまかなう負荷電力量[kwh]

Sbh : 1日当たりの太陽電池出力電力量[kwh]

変換効率: (インバータ効率×トランス効率)

$$Sbc = Sbh / Gh \quad (3)$$

Sbc : 太陽電池容量[kw]

表-3 側壁発電システムの適用負荷

代表的負荷	負荷特性
変電塔電源	路上昼夜間負荷
トンネル緩和照明	昼間専用負荷
橋梁ライトアップ	夜間専用負荷
高架下照明	暗がり照明昼夜間負荷

表-4 大阪地区日射量及び太陽電池出力

単位: Kcal/m²・日

地点名	方位角	傾斜角	月											
			1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
大阪	気	温	6.4	6.9	11.2	16.9	21.8	24.4	28.2	30.7	26.7	20.6	15.2	9.5
		水	温	7.9	6.9	10.4	14.6	19.1	22.9	26.1	28.8	26.0	22.9	15.8
	0°	20°	336	354	336	372	406	376	470	430	340	306	236	217
30°		267	306	346	392	399	356	398	426	350	349	262	264	

Gh : 太陽電池の最大出力での発電時間[h]

変換効率を0.85、最大出力での発電時間を5[h]とすると(2)、(3)式より

$$Sbc = Rh / (0.85 \times 5) \quad (4)$$

となる。

また蓄電池を設置しない場合は、

$$Sbp = R / \text{変換効率} \quad (5)$$

R : 太陽電池出力でまかなう負荷電力 [KW]

Sbc = Sbp / 晴天時の入射エネルギー係数
(大阪地区 0.7)

$$(6)$$

Sbp : 太陽電池出力 [KW]

となる。変換効率を0.85、大阪地区の入射エネルギー係数を0.7とすると

$$Sbc = R / (0.85 \times 0.7) \quad (7)$$

となる。

2-2-2 蓄電池容量

蓄電池は、1日の負荷電力のうち太陽電池出力でまかなえない夜間の負荷などに供給するためのものであり、1日あたりの蓄電池出力[AH]は

$$Bah = R ah / (\text{変換効率} \times \text{蓄電池電圧 [v]}) \quad (8)$$

Bah : 1日あたりの蓄電池出力 [AH]

R ah : 蓄電池出力でまかなう負荷電力 [VAH]

であらわされる。

また蓄電池容量は、これを放電深度及び寿命補償係数で割ったものとなる。

一般に鉛蓄電池の場合、放電深度と寿命の関係は毎日充放電を繰り返したとして100%の場合1~1.5年80%の場合で約5年程度である。

そこで放電深度を0.8寿命補償係数を8とすると(8)式より

$$Bp = Bah / (0.8 \times 0.8) \quad (9)$$

Bp : 蓄電池容量 [AH]

となり変換効率を0.85蓄電池電圧を216vとすると

$$R ah / (0.85 \times 216 \times 0.8 \times 0.8) \quad (10)$$

となる。

2-3 変電塔電源への適用

太陽電池を高速道路の側壁に設置し、変電塔から供給している負荷にたいしてエネルギーを供給する変電塔電源システムについて検討する。

変電塔は高速道路沿いに約1.5km間隔で設置さ

れ受電所から配電される高圧(6.6kv)を各負荷設備にあった低圧(100v~460v)に降圧して電力を供給する設備である。

2-3-1 対象負荷容量と負荷パターン

本検討において対象とした1変電塔あたりの負荷を表-5に示す。

これらの負荷のうち昼夜間対象負荷は15[KVA]、夜間のみの対象負荷は60[KVA]である。

これを横軸に時刻、縦軸に負荷電力で表わすと図-4に示すパターンとなる。

これらの負荷に太陽電池により負荷電力を供給する方式として、蓄電池を設置して夜間電力にも供給する方式と蓄電池を設置せず昼間電力を太陽電池から、夜間電力を商用電源から供給する方式が考えられる。

表-5 変電塔あたりの負荷

負荷名称	容量[KVA]	電圧 [V]	備考
照明設備	55	1φ460	夜間負荷
標識設備	5	1φ210	〃
道路情報板	5	1φ460	昼間負荷
保安設置	10	1φ210/105	〃
計	75		〃

2-3-2 蓄電池を設置する方式

蓄電池を設置して夜間にシフトして負荷に電力を供給する場合、夜間電力の一部に供給する方法と全部に供給する方法があるが、ここでは夜間電力全体を対象に検討する。

太陽電池モジュールとしては、36セル(17V、48W)を1モジュール、20モジュール(340V、960W)を1グループとしてグループ単位で集電盤に接続する構成とした。

この時1グループの大きさは0.9m×10mとなる。

必要な発電電力量は、図-4より75KW×12+15KW×12=1080[KWh]

であるので太陽電池出力は（４）式より

$$\text{太陽電池容量} = \frac{1080}{0.85 \times 5} = 254 \text{ [KW]}$$

となる。

よって必要なグループ数は、これを0.96KWで除して265グループとなる。

これらを高速道路沿いに両側に設置した場合、延長約1.3km設置面積約2400㎡となる。

次に必要な蓄電池容量を算出する。蓄電池出力でまかなう負荷電力は、図-4より75KW×12h=900KWhである。（10）式にこれを代入して

$$\begin{aligned} \text{蓄電池容量 [AH]} &= \frac{900 \times 10^3}{0.85 \times 216 \times 0.8 \times 0.8} \\ &= 7660 \text{ [AH]} \end{aligned}$$

となる。これに適合する蓄電池の形式および容量は、SLB-3000（1950Ah/10HR）が4組となり、必要設置スペースは約100㎡程度となる。

また連系盤、インバータ盤等蓄電池以外に必要なスペースは約20㎡である。

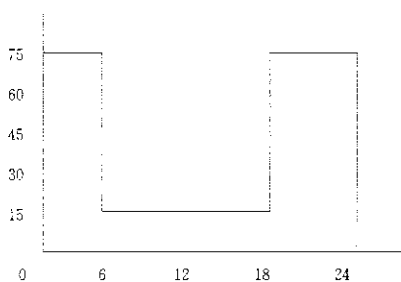


図-4 蓄電池出力

2-3-3 蓄電池を設置しない方式

蓄電池を設置しない場合、曇天雨天時の出力不足時及び夜間の電力は、商用側から電源供給を受ける形式となり、システム構成は図-6に示すとおりである。

必要な太陽電池容量は（7）式より

$$\begin{aligned} \text{太陽電池容量} &= \frac{15 \text{ KW}}{0.85 \times 0.7} \\ &= 25.2 \text{ [KW]} \end{aligned}$$

となる。このとき太陽電池のグループとしては $25.2 \div 0.96 = 27$ となり、設置面積243㎡、延長約270mとなる。

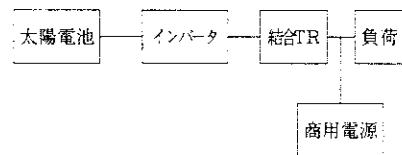


図-5 蓄電池を設置しない場合のシステム

2-3-4 まとめ

蓄電池を設置する方式と設置しない方式の比較を表-6に示す。

表からわかるように蓄電池を設置して昼夜間全負荷へ供給する方式は、蓄電池なしで昼間負荷へ供給する方式に比べて約10倍の設備規模となるうえ、蓄電池設置面積として100㎡程度必要となるため、蓄電池を設置しない方式の方が現実的で適用の可能性が高いといえる。

ここでは、変電塔負荷全体を対象に検討したが、トンネルの緩和照明、路下照明、点滅灯など各負荷単位での適用も考えられる。

あとがき

本報告では、太陽光発電システムの高速道路施設への適用性について、システムの構成も含めて検討を行った。

その結果、昼間の負荷に対しては太陽光発電システムから、夜間や曇天雨天時には商用電源から電力を供給する、系統連系システムが設置スペース、信頼性、経済性などの点で望ましい形式であるとの結論を得た。

今後は、具体的適用方法、詳細の機器仕様、設置方法、系統連系技術など実験システムの導入に向けての検討を進めていきたい。

太陽電池やその周辺機器は、技術的には、ほぼ実用のレベルに達してはいるものの、コストなどの点で本格導入には至っていない。

しかしながらこのような自然エネルギー利用は、地球環境の保護を考えると是非共必要なものである。

本検討がこれらの一助になれば幸いである。

表一 6 蓄電池ある・なし比較

	蓄電池あり	蓄電池なし
太陽電池最大出力[KW]	254	25.2
設置面積[m ²]	2400	243
モジュール数[枚]	5300	540
蓄電池容量[AH]	7660	—
機器設置面積[m ²]	20	—
蓄電池設置面積[m ²]	100	—