

モジュール不具合を考慮した PV システム信頼性の検討

Reliability Analysis of PV Systems Considering Failure of PV Modules

岡島 敬一 *¹
Keiichi OKAJIMA

羽倉 瑞季 *²
Mizuki HAKURA

大関 崇 *³
Takashi OOZEKI

Abstract

Photovoltaic (PV) systems may possibly include some modules with failure. As a result of an oversight, those failure modules has not been repaired nor exchanged in general. In this study, reliability of PV systems considering failure of PV modules is evaluated. We have investigated PV systems installed in AIST Tsukuba center. An exchange of module, a power drop due to bypass diode and a stall of a power conditioner are assumed to basic failure event. Failure rates for each basic event are estimated using field data. System failures were then evaluated by event tree analysis (ETA) and fault tree analysis (FTA). System unreliability after 10years are calculated to be 0.445 with the threshold output level of 90%. It has become clarified that PV system reliability is dominated by the reliability of the power conditioner.

キーワード：太陽光発電システム、信頼性、フォルトツリー、故障率、累積故障確率

Key Words : PV system, Reliability, Fault tree, Failure rate, Unreliability

1. はじめに

太陽光発電システム（以下 PV システム）はこの数十年の研究開発でセル発電効率向上やシステムのコスト削減が進められてきているが、システムの信頼性に関する研究にはあまり目が向けられていない。PV システムには可動部がなく本質的に故障しにくい発電方式であることがメリットとしてアピールされている、実際に運転しているシステムはさまざまな環境下にさらされており、システム信頼性は重要な要素である。

日本での研究調査として住宅用 PV システム 100 件の計測、解析、評価についての報告がなされている⁽¹⁾。その中で、信頼性に関する評価として、トラブル事例の分析と、各システムの稼働時間と修理時間のデータから平均故障間隔 (Mean Time Between Failure: MTBF)、平均修復時間 (Mean Time To Repair: MTTR)、稼働率、故障率の算出を行っている。故障によって停止したシステムのトラブル事例を考慮しており、システムレベルでの稼働率と故障率を入力データとしているため、モジュール等の各システム構成機器レベルでの信頼性評価が必要と言える。

パワーコンディショナの不具合は、エラー表示などにより容易に確認できるとともに、1 台停止すると発電量が顕著に低下するため発見しやすい。一方、モジュールは 1 枚故障したことによる発電量の低下が少なく、さらにその発電量は周辺環境や天候に左右され常に変化しているため、正常に動作しているかの判断が困難である。したがって、モジュールに不具合があることに気づかず正常に動作していると判断している可能性を否定できない。実際には、発電量の低下に現れにくいモジュールの不具合事例として、ホットスポットやそれによるバイパスダイオードの通電がある⁽²⁾⁽³⁾。

PV システムの信頼性分析において、系統に電力を供給していない状態を故障とするケースでは、一部に不具合のあるモジュールは正常とみなされる。こうした修理・交換に至らないモジュールについても考慮した信頼性評価を行う必要がある。そこで本研究では、修理・交換に至らないモジュールの不具合を考慮した PV システムの信頼性評価を行った。(独) 産業技術総合研究所つくばセンターに導入されている PV システムを用いて、各要素の故障率を算出し、イベントツリー解析(Event tree Analysis, ETA)およびフォルトツリー解析(Fault tree Analysis, FTA)を進めた。

ETA および FTA による分析は、特に原子力の分野で行われている。複雑システムの安全性を総合的・定量的に評価する手法として、確率論的安全評価(Probabilistic Safety Assessment, PSA)が用いられてきた。PSA の実施にあたって、ETA および FTA を用いている。また、各事業者が自らプラントの安全水準を定期的に評価する定期安全レビューにお

*¹ 筑波大学システム情報工学研究科講師
(〒 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)
e-mail: okajima@risk.tsukuba.ac.jp

*² 筑波大学システム情報工学研究科大学院生

*³ 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター
(原稿受付：2010 年 8 月 6 日)

いては、PSA の活用が推奨されている⁽⁴⁾。さらに、電気自動車などの複雑なシステムで構成される工業製品の信頼性評価にも FTA が用いられている⁽⁵⁾。

2. 対象システムと評価の前提条件

2.1 評価対象システム

対象とした PV システムは、産業技術総合研究所つくばセンター第 2 事業所 OSL 棟屋上に設置された 4 kW システム 40 台である。システムアレイは 9 直列 3 並列のモジュール構成であり、モジュール枚数は合計で 1080 枚である。システムの仕様を Table 1 に示す。なお、バイパスダイオードで区切られたセルの直列部分をクラスタと定義すると、対象システムでの使用モジュール (Sharp ND-150AM) はバイパスダイオードが 3 つ設置された 3 クラスタ構成である。

Table 1 Configuration of the system

PV Module	Sharp ND-150AM (pc-Si)
P_{MAX}	150 W
PV Array	9 series 3 parallel
Power output	4,050 W
Inclination	25°
Power Conditioner	Sharp JH-M303

2.2 使用データと評価前提条件

用いたデータは、対象システムのモジュール・パワーコンディショナの交換履歴、バイパスダイオードの通電点検データ⁽³⁾、システムの発電量である。対象システムは 2004 年 4 月から運用を開始しており、モジュール・パワーコンディショナについては運用開始時から 2008 年 3 月末までの期間データである。バイパスダイオードの通電点検は 2006 年夏(6 月)から 09 年春(3 月)までの間、3~9 ヶ月ごとに定期的な点検を行ったデータである。本研究で用いたデータ期間においては、バイパスダイオードが通電したモジュール枚数は 10 枚、パワーコンディショナ不具合台数は 10 台、モジュール交換枚数は 39 枚であった。信頼性評価にあたり、

バイパスダイオード通電を原因とするモジュールの故障寿命 (故障発生までの時間) は点検によって通電が発見された時点までとし、交換を原因とするモジュールおよびパワーコンディショナそれぞれの故障寿命は交換もしくは修理が行われた日までとした。実際にはそれぞれの機能停止時刻以降に点検・交換修理が行われるため、故障寿命を長く見積もることになり信頼度が高めに算出される可能性がある。しかしながらデータの制約上、本研究では上記前提条件にて評価を進めた。

システムを構成するサブシステムはモジュール・ストリング・アレイ・パワーコンディショナとした。信頼性評価においては故障を定義づける必要がある。本研究においては、モジュール・ストリング・アレイについては出力が各々の定格出力の 90% 以下に減少する時を故障とみなした。これは JIS によるモジュールの規格において、その出力特性が「基準状態における最大出力が公称最大出力の 90% 以上」⁽⁶⁾⁽⁷⁾とされていることから設定した。また、パワーコンディショナでは修理または交換が発生する時を故障とした。なお、故障による出力低下のみを考慮し、天候や季節、一時的な部分影などによる出力変動は考慮しないものとした。評価には信頼性解析ソフト Relx Reliability Studio 2007 を用いた。

3. システム故障フローの検討

3.1 イベントツリーによるシステム故障フローの検討

Fig. 1 に本研究で設定したイベントツリーを示す。Success は、その事象が上述した故障に該当しない状態、Failure は該当する状態を示す。すなわち、Success が正常に発電しているとみなせる状態、Failure が故障している状態である。各事象の枝の下には各々のイベント発生確率を示しており、 $P_M(t)$, $P_S(t)$, $P_A(t)$ はそれぞれモジュール、ストリング、アレイの累積故障確率 (不信頼度) である。これらは後述するフォルトツリー解析で算出される、 $P_{P1}(t) \sim P_{P4}(t)$ は全てパワーコンディショナの累積故障確率である。このとき、ツリーの末尾である右端に「×」が記された

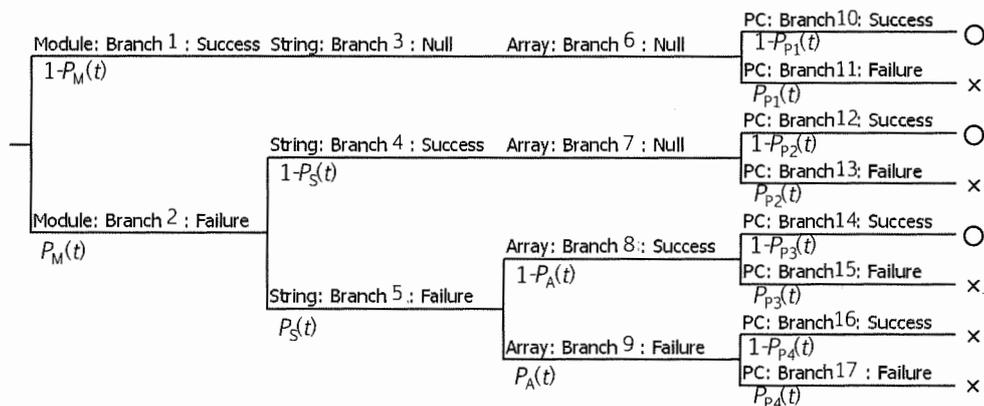


Fig.1 Event tree diagram of system failure

Branch 11, 13, 15, 16, 17がシステム故障となる。したがって、システムの累積故障確率 $F(t)$ は Branch 11, 13, 15, 16, 17の発生確率の和となる。これは1から Branch 10, 12, 14の発生確率の和を引いたものに等しいので、(1)式で表すことができる。

$$F(t) = 1 - [\{1 - P_M(t)\} \{1 - P_{P1}(t)\} + P_M(t) \{1 - P_S(t)\} \{1 - P_{P2}(t)\} + P_M(t) P_S(t) \{1 - P_A(t)\} \{1 - P_{P3}(t)\}] \quad (1)$$

パワーコンディショナの故障確率は修理・交換データより故障率を推算して算出し、モジュール・ストリング・アレイの故障確率は次項のフォルトツリー解析により求めた。

3.2 フォルトツリー解析によるサブシステム故障評価

太陽電池のサブシステム（モジュール・ストリング、アレイ）故障発生について、各々のサブシステムの故障を頂上事象としたフォルトツリーについて検討した。考慮した事象は、モジュールの交換とバイパスダイオードの通電である。これらの事象により出力低下が起こり、頂上事象に至るフローをフォルトツリーでの構築を行った。なお、実際にはバイパスダイオードの通電は故障の根源的な原因ではないが、本研究では出力低下における基本事象とした。モジュール・パワーコンディショナの交換については、これ以下に原因を掘り下げない省略事象とした。

(1)モジュールの故障のフォルトツリー モジュールの故障フローを示したフォルトツリーをFig. 2に示す。バイパスダイオードが通電し、クラスタ1つが発電に寄与しなくなると、モジュールの出力が1/3低下する。これは出力が90%を下回るため、本研究で設定した故障の定義を満たす。よってバイパスダイオードが1つ通電した場合もしくは交換が発生した場合にモジュールは故障と見なされることになる。なお、このフォルトツリーで使用しているゲート

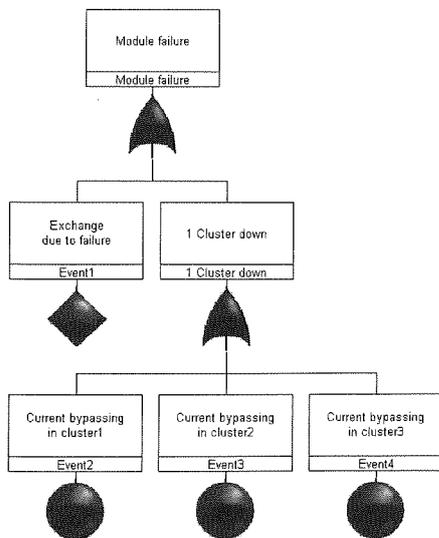


Fig. 2 Fault tree diagram of module failure

トはORゲートであり、入力要素のうち1つが発生すると出力される。

(2)ストリング故障のフォルトツリー ストリングの故障フローを示したフォルトツリーをFig. 3に示す。モジュール9直列からなるストリングは、9枚のモジュールのうち1枚が交換となるか、3つのバイパスダイオードが通電した場合、出力が90%を下回り故障となる。このとき、 n 個の要素のうち m 個が発生すると出力される m/n ゲートを用いて、モジュール交換については1/9ゲート、バイパスダイオードの通電については3/27ゲートとしてフォルトツリーを構築した。

(3)アレイ故障のフォルトツリー アレイの故障フローのフォルトツリーをFig. 4に示す。アレイは、27枚のモジュールのうち3枚が交換となるか、9つのバイパスダイオードが通電した場合、出力が90%を下回り故障となる。ストリング故障のフォルトツリーと同様に m/n ゲートを用いており、モジュール交換については3/27ゲート、バイパスダイオードの通電については9/81ゲートとしてフォルトツリーを構築した。

4. 故障率の算出

信頼度を求めるためには、寿命の分布形とともに分布の母数(パラメータ)の値が必要である。母数の真の値は未知であるから、寿命データよりこれを推定する。一般的に工業製品では寿命の分布は指数分布に従うものとされる。本研究では、対象システムの寿命分布が指数分布に従うとして、その故障率を点推定により推算した。 n 個の製品に対して寿命試験を行い、得られた故障時間を t_1, t_2, \dots, t_n (t_i)とする。本研究で使用したデータはランダム打ち切りデータであり、 t_s は時間で打ち切ったもの、すなわち分析期間中に故障しなかった製品のデータを示す。このとき、信頼度 R の最尤推定値 R_L は(2)式で表される。

$$R_L = \exp(-\lambda_L t) = \exp\left(-\frac{rt}{T}\right) \quad (2)$$

ここで、 λ_L は故障率の最尤推定値、 t は時間、 r は故障した要素数、 T は総試験時間である。打ち切りデータのため、 T は $\sum t_i$ に $n-r$ 個の打ち切り時間の和を加えたものである。

基本事象としてパワーコンディショナおよびモジュールの故障を対象として故障率の推算を行った。なお、モジュールについては、「交換」と「バイパスダイオードの通電による出力低下」を異なる基本事象として算出した。(2)式により算出した各要素の故障率をTable 2に示す。パワーコンディショナの故障率が最も大きい結果となった。モジュールについてみると、バイパスダイオードの通電による出力低下に関する故障率は交換に起因する値より小さく、モジュールに不具合が潜在する確率は、モジュールの交換に比べて小さいことが示された。この故障率を用いて、システム信頼度の評価を進めた。

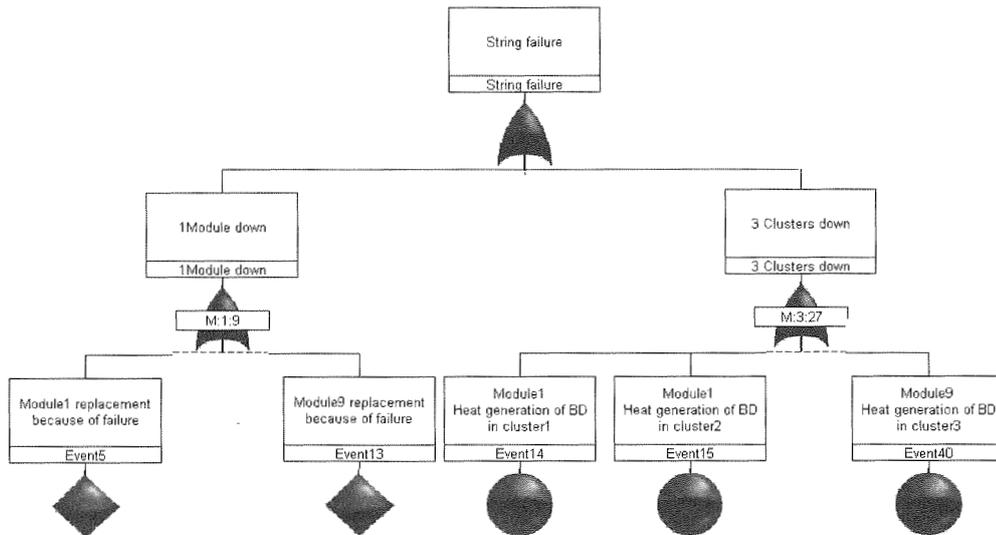


Fig. 3 Fault tree diagram of string failure

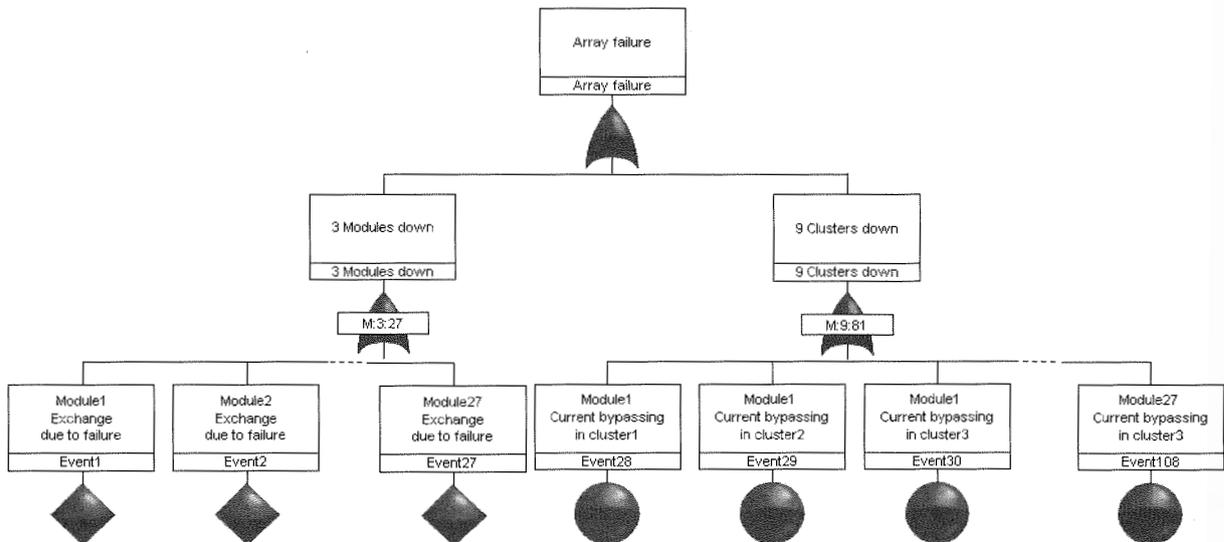


Fig. 4 Fault tree diagram of array failure

5. PV システム信頼性評価結果

5.1 10年経過時の累積故障確率

一般的にモジュールの期待寿命は20年以上、パワーコンディショナの寿命は10年程度とされているため⁽⁸⁾、10年経過時の累積故障確率(信頼度)について評価を行った。Table 2に示した各要素の故障率およびFig. 2~Fig. 4のフォルトツリーを用いて、システムの運用から10年経過時のモジュール・ストリング・アレイの累積故障確率を算出した。これらの結果をTable 3に示す。さらに、故障の定義を修理または交換が発生した場合としたときの、システム運用から10年経過時のパワーコンディショナの累積故障確率、およびFig. 1に示したイベントツリーから算出したシステムの累積故障確率についても併せて示す。

評価の結果、モジュールの累積故障確率は0.145であつ

Table 2 Failure rate of basic events

Event	λ_L [1/h]
Power Conditioner	6.229×10^{-6}
Module (exchange)	1.146×10^{-6}
Module (power drop with bypass diode)	2.154×10^{-7}

Table 3 Unreliability after 10years on each subsystem or system

Subsystem or System	Unreliability
Module	0.145
String	0.600
Array	0.483
Power Conditioner	0.421
System	0.445

た。すなわち、故障の定義をモジュール出荷時の製品保証基準と同等とした場合、運用開始から 10 年経過したモジュールの約 15% は、交換またはバイパスダイオードの通電による出力低下により故障しているということを示している。一方、ストリングの累積故障確率は 0.600 とモジュールに比べて大幅に増大した。ストリングはモジュールの直列接続で構成されており、信頼性評価において直列系システムは要素数の増加に伴い信頼度が急激に低下する。そのため、ストリングは大幅に累積故障確率が高い結果となる。

アレイの累積故障確率は 0.483 と、モジュールの累積故障確率より大きく、ストリングより小さい結果となった。アレイはモジュールを直並列に接続しているため、モジュールより要素数が直列に増加したため累積故障確率が増大し、ストリングと比較すると並列系が加わり冗長性が高まっていると考えられる。パワーコンディショナの累積故障確率は 0.421 となった。パワーコンディショナの期待寿命は 10 年程度とされているが、運用開始から 10 年経過時での修理や交換の発生確率は約 4 割程度であることが示唆された。

イベントツリー解析を組み合わせた PV システムの累積故障確率 0.445 となった。すなわち、故障の定義を定格出力の 90% 以下になった場合とした条件下では、運用開始から 10 年経過したシステムのおよそ半分は故障していると見なされる。

5.2 累積故障確率の時系列推移

モジュール、ストリング、アレイ、パワーコンディショナ、そしてシステムの累積故障確率について、運用開始から 10 年経過時までの時系列変化を算出した。その結果を Fig. 5 に示す。システムの累積故障確率は、パワーコンディショナのそれとほぼ同様の推移をしており、パワーコンディショナの故障が支配的であることが明示された。運用時間が経過しモジュール・ストリング・アレイの累積故障確率が

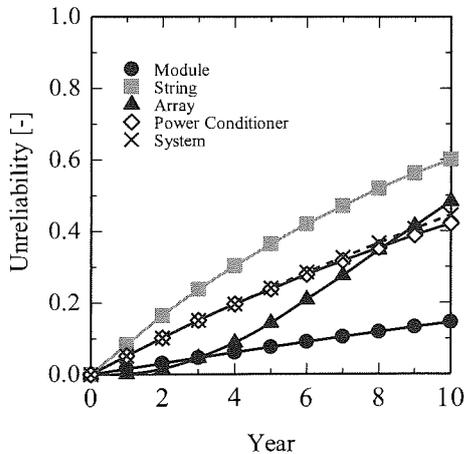


Fig. 5 Effect of elapsed time on unreliability

大きくなっていくと、わずかにそれらに影響を受けパワーコンディショナの累積故障確率よりも大きくなった。モジュールの不具合がシステムの累積故障確率に影響するのは、運転開始から約 7 年経過後となる。

5.3 故障定義についての検討

モジュール・ストリング・アレイについて、故障の定義を定格出力の (a)81% 以下、(b)67% 以下、(c)33% 以下としたケースについて評価を行った。(a)については、出力保証が「公称最大出力の公差範囲内の最大許容値の 10% 以上低下した場合」と定められているため⁽⁸⁾、公称最大出力の 90% のさらに 90% である 81% 以下とした。(b)および(c)については、対象システムのモジュールが 3 クラスタ構成であるので、クラスタ単位での系統からの脱落を想定した条件設定である。(b)は少なくとも 1 クラスタ脱落した場合、(c)は少なくとも 2 クラスタ脱落した場合となる。それぞれについて運用開始から 10 年経過時の累積故障確率を算出した。

Fig. 6 に各々の定義で算出した、運用開始から 10 年経過時のモジュール・ストリング・アレイ・パワーコンディショナ・システムの累積故障確率を示す。その結果、システムの累積故障確率は、故障の定義を変化させても大幅に変化しないことが明らかになった。システムの累積故障確率はパワーコンディショナの故障が支配的となっており、定義が 81% およびそれ以下の 3 種類においては、システムとパワーコンディショナの累積故障確率はほぼ同じ値となった。これは、アレイの累積故障確率が故障の定義を緩めるとともに大幅に減少したため、システムの累積故障確率は太陽電池のサブシステムからはあまり影響を受けなかったためと考えられる。

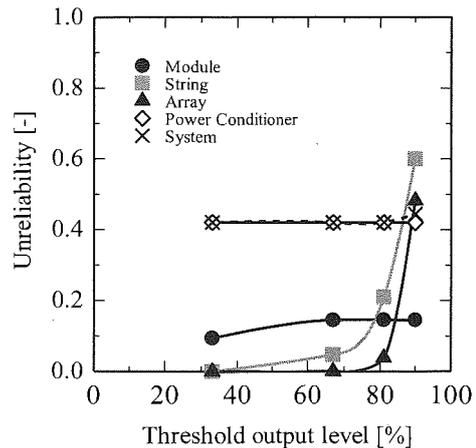


Fig. 6 Considered threshold of failure output level (after 10 years)

6. 故障率に対する分析

故障率を変化させたとき、システムの信頼度がどのように変化するかを評価した。各々の故障要素（基本事象）の

故障率を1桁ずつ変化させ、各サブシステムの累積故障率の最大値および最小値がおよそ一定の値に収束する範囲まで推移させたときの、各々の故障率におけるシステム信頼度を算出した。すなわち、各々の故障要素の故障率を $1 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ から $1 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ まで変化させた時のサブシステムおよびシステムの累積故障率について評価を行った。

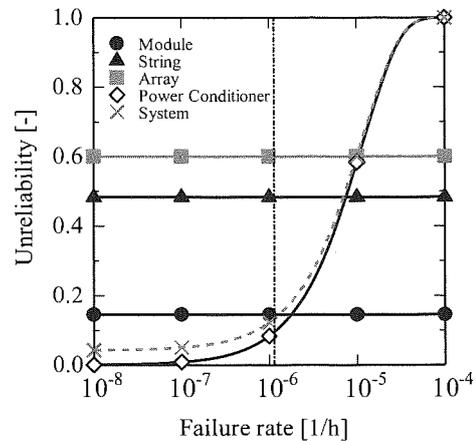
Fig. 7a に故障要素「パワーコンディショナ」の故障率を変化させた場合の結果を示す。なお、図中の鎖線は Table 2 に示したフィールドデータからの算出値である。システムの累積故障率はほぼパワーコンディショナの累積故障率と同様に变化した。しかしパワーコンディショナの故障率が小さくなるに従い累積故障率が低減されると、システムの累積故障率はパワーコンディショナよりも大きくなること示された。これは、パワーコンディショナの累積故障率が大幅に低下したため、アレイの累積故障率が相対的に大きくなり、アレイの影響がより大きくなったためと考えられる。

要素「モジュール(交換)」の故障率を変化させたケースでの評価結果を Fig. 7b に示す。図中の鎖線は Fig. 7a と同様に Table 2 に示した算出値である。故障率が高い領域では太陽電池のサブシステム、特にストリング・アレイの累積故障率が高くなり、それに起因してシステム累積故障率も増大する結果となった。しかし故障率が低減された場合には、システム累積故障率はパワーコンディショナの累積故障率の値に収束し、それ以上低下しないことが明らかとなった。これは、パワーコンディショナの故障率を変化させた時と同様に、アレイ累積故障率が大幅に低下し、パワーコンディショナ累積故障率が相対的に大きくなり支配的となるためと考えられる。しかしながら「モジュール(交換)」故障率が $1 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ まで低減したとしても、システムの累積故障率は 0.42 であり、パワーコンディショナとほぼ一致する。この結果からもパワーコンディショナの故障が支配的であることが言える。

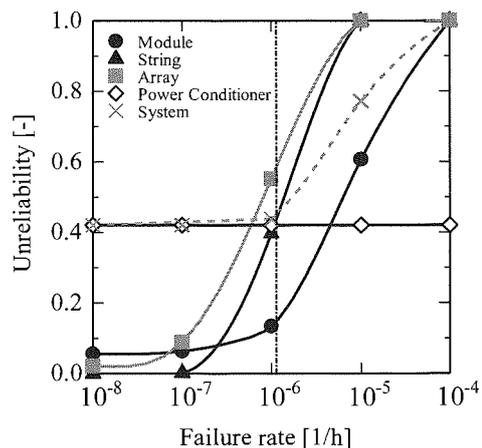
要素「モジュール(バイパスダイオードの通電による出力低下)」の故障率を変化させたケースを Fig. 7c に示す。図中の鎖線は同様にフィールドデータ算出値である。故障率が高い場合には各サブシステムの累積故障率が非常に大きくなり、それに依存してシステムの累積故障率も増大する結果となった。しかし、「モジュール(交換)」事象のケースとは異なり、故障率が $1 \times 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ 以下に低下してもサブシステム、特にストリングとアレイの累積故障率が 0 に漸近しない結果となった。本評価での使用モジュールが、バイパスダイオードが3個設置された3クラス構成であるために、交換に対してバイパスダイオードの通電は元来影響が小さいことに要因がある。

システムの累積故障率は太陽電池のサブシステムよりもパワーコンディショナの故障率に大きく影響される。例えば、10年経過時のシステムの累積故障率を10%程度とするためには、パワーコンディショナの故障率を $1 \times 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 以下に低減させる必要がある。平均故障間隔 (MTBF) は

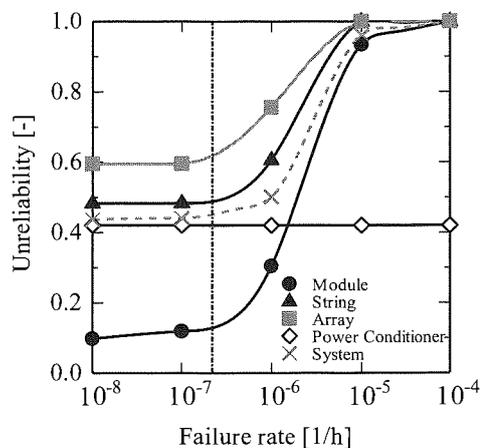
故障率の逆数となるため、すなわち MTBF を 100 万時間以上まで増大させることに相当する。



(a) Power Conditioner



(b) Module (exchange)



(c) Module (power drop with bypass diode)

Fig. 7 Effect of failure rate on unreliability after 10 years

7. まとめ

修理・交換に至らないモジュールの不具合を考慮した PV システムの信頼性評価を行った。その結果 10 年経過時点での PV システムの累積故障確率は 0.445 となり、故障の定義を定格出力の 90%以下になった場合とした条件下では運用開始から 10 年経過したシステムのおよそ半分は故障していると思なされる結果になった。定格出力の 90%以下という故障定義はやや厳しいものの、故障定義を緩めた評価ケースにおいてもシステム累積故障確率は大幅に変化しない。これはパワーコンディショナの故障が支配的となっていることに起因する。

故障率の感度分析においても同様の結果となり、システムの累積故障確率は太陽電池のサブシステムよりもパワーコンディショナの故障率に大きく影響される。10 年経過時のシステム累積故障確率を 10%程度とするためには、平均故障間隔 (MTBF) を 100 万時間以上まで増大させる必要がある。

設置年数が経過した場合ではシステム累積故障確率にアレイの影響が出現してくることが示された。アレイの信頼度を改善するためにはモジュールの信頼度の向上が不可欠であるため、モジュール信頼度の向上も重要である。

謝辞

本研究は産業技術研究所太陽光発電研究センター加藤和彦主任

研究員にデータの提供および助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- (1) T Sugiura, T Yamada, H Nakamura, M Umeya, K Sakuta and K Kurokawa, Measurements, analyses and evaluation of residential PV systems by Japanese monitoring program, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **75** (2003), 767-779.
- (2) 羽倉瑞季・岡島敬一・加藤和彦, バイパスダイオードの発熱状況による太陽光発電システム不具合評価, *太陽/風力エネルギー講演論文集*, (2008), 273-276.
- (3) 加藤和彦, 太陽光発電システムの不具合事例の分析・評価 (2) -産総研太陽光発電設備における不具合事例-, *太陽エネルギー*, **35-4** (2009), 61-66.
- (4) 村松健, 軽水炉の確率論的安全評価 (PSA) 入門, *日本原子力学会誌*, **48-6** (2006), 35-43.
- (5) D. Aswani, B. Badreddine, M. Malone, G. Gauthier and J. Proietty, Criteria for evaluating protection from single points of failure for partially expanded fault trees, *Reliability Engineering and System Safety*, **93-2** (2008) 206-216.
- (6) JIS C 8918 結晶系太陽電池モジュール(1998).
- (7) JIS C 8939 アモルファス太陽電池モジュール(1995).
- (8) シャープ株式会社, 住宅用太陽光発電システム, http://www.sharp.co.jp/sunvista/faq/faq_02.html