

太陽光電池パネルのクラウドを利用した 異常検知システムの開発

秋山 陽平† 河西 勇二‡ 岩田 昌也‡ 高橋 栄一‡ 佐藤 文明† 村川 正宏‡

太陽光電池パネルの寿命は一般的に 20 年といわれているが、工業製品である以上一定の確率で故障が発生する。しかし、現状での太陽光発電システムでは、パネル単位での異常を検出することが難しい。そのため、パネルの異常を抱えたまま太陽光発電システムが運用され、期待する発電量に達しないケースが発生している。このため、太陽光電池パネルの価格上昇や通信工事費用増加を招くことのない異常検知システムの研究開発が急務である。これまでに、産業技術総合研究所では直流電力線を利用した独自の電力線通信方式を用いて、パネル毎にデータ通信装置子機を実装し、発電情報の状態モニタリングを可能としている。今回我々は、データ通信装置子機において計測された膨大な発電情報をネットワーク上の仮想データベースであるクラウドサーバ上に集約・蓄積させることで、ブラウザ上でパネル単位での発電状況を逐一観測可能な状態モニタリングと早期に異常を検知する異常検知システムを開発した。さらに、一枚のパネルを遮光することにより擬似的に異常パネルを作成し、開発したシステムを用いて評価実験を行った。

The Development of Anomaly Detection System for Photovoltaic Modules utilizing Cloud Computing

Yohei Akiyama† Yuji Kasai‡ Masaya Iwata‡
Eichi Takahashi‡ Fumiaki Sato† Masahiro Murakawa‡

1. はじめに

東日本大震災後、我が国では再生可能エネルギーの導入拡大が必須の情勢であり、特にメガソーラ等の太陽光発電への期待が高まっている[1]。太陽光電池パネルの寿命は一般的に 20 年[2]といわれているが、工業製品である以上一定の確率で故障が発生し、その期間中に異常の発生を防ぐことは困難である。しかし、現状での太陽光発電システムでは、パネル単位での異常を検出することが難しい。一般的に太陽光発電システムを設置した場合、メンテナンスされることは稀であり、仮に発電量の低下に気付いた場合でも、太陽光電池パネルの特性上、影や日照条件の変化のためなのか、パネル等の異常なのか判別が困難である。そのため、パネルの異常を抱えたまま太陽光発電システムが運用され、期待する発電量に達しないケースが発生し、結果的に費用対効果の面から、太陽光発電システムの普及の妨げになりかねない。このため、太

陽光電池パネルの価格上昇や通信工事費用増加を招くことのない異常検知システムの研究開発が急務である。

これまでに、産業技術総合研究所では直流電力線を利用した独自の電力線通信方式を用いて、発電情報のモニタリングを可能としている[3]。この手法は、パネル毎に安価なデータ通信装置子機をパネルの端子箱に実装することにより、発電状況を逐一観察可能であり、電力線通信を用いることで、新たな通信ケーブルなどを必要とせず、導入コストを抑えることを可能とした。

今回我々は、データ通信装置子機において計測された膨大な発電情報をネットワーク上の仮想データベースであるクラウドサーバ上に集約・蓄積させることを可能とした。更に、そのデータを基に、ブラウザ上でパネル単位での発電状況などの逐一観測できる状態モニタリングを可能とし、収集した膨大な電流値データを用いて異常検知を行うシステムを開発した。この異常検知システムは、日々のパネル毎の電流値を積算することにより、太陽光発電システム全体における電流量に対する割合を観察し、その変動量に応じて異常検知を行う。そのため、早期の段階で異常検知が可能であり、更には影や

†東邦大学大学院理学研究科

‡(独)産業技術総合研究所情報技術研究部門 (AIST)

日照条件による影響を軽減することができる。実験では、実際に24枚のパネルを4枚直列に接続したものを一組(ストリングと呼ぶ)とし、それぞれの電流値を計測した。また、一枚のパネル遮光することで擬似的に異常パネルを作成し、開発したシステムを用いて評価実験を行った。

2. 太陽光発電システムの現状

太陽光発電システムはクリーンな新エネルギーと注目されている。太陽光電池パネル(以下、パネル)は、一般的に約20年の寿命[2]と言われているが、工業製品である以上一定の確率で故障が発生し、その期間中に異常の発生を防ぐことが困難である。仮に、発電量の低下に気づけたとしても、それが故障なのか日照条件の変化なのか検知しづらい。この理由として、現状の太陽光発電システムはシステム全体の発電量の変化しか把握できないため、個々のパネルの故障による発電量の変化を検知しにくいことがある。本来、太陽電池パネル1枚に異常をきたせば、それにより発電量の変化が現れ、異常の特定が可能である。しかし、現状の太陽光発電システムは、パネルのすべてが、直流から交流に変換するためのパワーコンディショナに接続されており、すべてのパネルの発電量の合計値しか把握していない。そのため、現状では異常の特定は難しく、異常自体の認識も容易ではない。

現時点でのパネルの故障診断方法は、目視による検査、あるいは赤外線カメラを用いて表面温度の変化を検知する手法が一般的である。しかし、目視による検査は、外観で故障が識別できる場合のみ有効であり、赤外線カメラは、大きな温度変化が生じる故障の場合のみ有効である。逆にいえば、外観的な故障が小さく、温度変化の生じない故障の場合は見過ごされるケースが発生する。このため、現状の太陽光発電システムは故障検知に関しては不十分であるといえる。更に、パネルの特性として、日照による発電量の変化が著しく、故障があったとしても雨や曇りなどの天候不順や、日の当たりづらい設置環境である場合は、尚更に異常検知が難しくなる。このように、メンテナンスが不完全な状態で、太陽光発電システムを用いると、パネル異常により期待する発電量を得られず、結果的に費用対効果の面で普及の妨げになるといえる。この問題点を解決するため、本研究では、太陽光発電システムの異常を容易に検知できる

システムの開発を目標としている。

3. 開発したモニタリングシステム

3.1. 概要

開発したパネルのモニタリングシステムの全体構成を図3.1に示す。本システムは、(1)発電モニタ通信装置子機(以下、子機)、(2)発電モニタ通信装置親機(以下、親機)、(3)クラウドサーバ、(4)Webアプリケーションから構築される。

動作の流れは、パネルに配置された子機が電圧や電流などの発電データを収集し、そのデータを電力線通信を用いて親機に送信する。データを受信した親機は、複数台の子機からのデータを集約し1分間隔でクラウドサーバに送信する。クラウドサーバは受信したデータを収集する。Webアプリケーションは、主に2つの機能を有する。1つ目はクラウドサーバに収集されたデータを可視化する。2つ目は異常検知である。

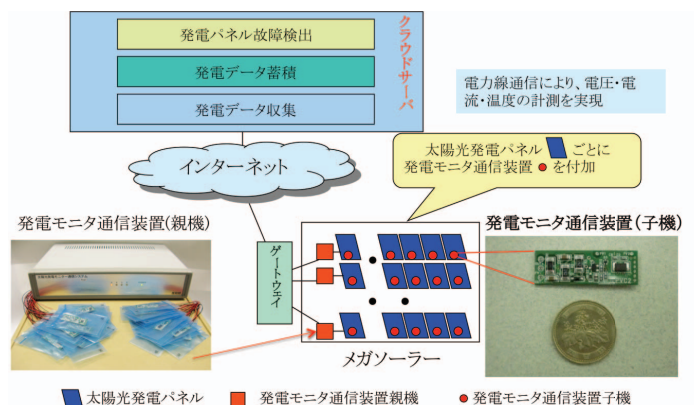


図 3.1 全体構成図

3.2. 発電モニタ通信装置子機

図3.2に開発した子機を示す。子機は、縦14.5mm、横42.0mmと非常に小型でありパネルの端子箱の中に設置される。基板は、Microchip Technology社のPICマイコン、ダイオード温度センサが実装されている。基板は安価な市販部品で構成されており、量産時のコストは1個あたり約200円で生産可能である見通しを得ている。このため、本システムを導入する場合にかかるコストが小さく、太陽光発電システムの導入の際の価格増加を最小限にすることが可能である。また、平均故障間隔をスイッチング電源の部品点数法による信頼度予測推奨基準に基づき算出したところ、子機は約80年[3]であった。しかしながら、パネルは、屋外での使用が想定されるため、平均故障間隔は一般的に80年

以下になることが予想されるが、パネルの使用寿命が約 20 年と算出されているため、子機の故障交換によるコスト増加の影響は少ないと予想される。

子機の機能としては、親機に電力線通信(3.4 節で後述)を用いて、CDMA 方式の信号を送信する。送信データは電圧、電流、温度である。この時、送信するための使用される電力はパネルで発電した電力が用いられる。このため、雨や曇りなどの天候不順の場合は発電データを取得することができない。しかしながら、天候不順の場合は正常パネルと異常パネルとの発電量の差が小さいことから異常検知に有益なデータを取得が難しい。送信間隔は各パネルが平均して 70 秒間隔で連続的に行う。送信を 70 秒という短い間隔で送信することによって、雲や影などの逐一変化する日照変化を観察することができ、発電量の低下が日照変化によるものなのか、異常によるものなのかを判別しやすくする。また、送信データサイズは、1 つのパネルからの 1 送信あたり 78bit である。

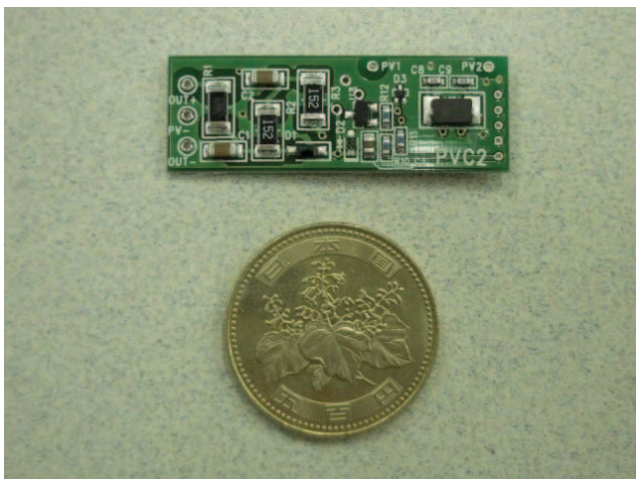


図 3.2 発電モニタ通信装置子機

3.3. 発電モニタ通信装置親機

図 3.3 に開発した親機を示す。親機は、縦 230mm、横 320mm、高さ 70mm である。構成としては大別して 2 つあり、1 つ目は子機から送信される CDMA 方式のデータを受信する機能であり、マイコンには Xilinx 社製の FPGA である Spartan6 上で動作する Microblaz に実装されている。2 つ目は、収集した発電データをクラウドサーバへアップロードする機能であり、マイコンには SH7706 を用いて、LinuxOS を搭載した SH7706LSR ボードに実装されている。

親機は最大で 300 個程度の子機との接続が可

能である。更に、親機を複数個、併用することで、メガソーラなどの大規模な太陽光発電システムにも実装可能であり、太陽電池パネル毎の膨大な発電情報が 1 カ所に集約・蓄積でき、その状態モニタリングが可能となる。また、各子機から約 70 秒ごとに送信されるデータを収集し、1 分ごとに TCP 通信を用いてクラウドサーバにまとめて送信する。このクラウドサーバへの送信には、JSON(JavaScript Object Notation)フォーマットを使用している。この JSON フォーマットは、数値、文字列、配列、オブジェクトなどのデータを文字列で表現できる軽量なデータ交換フォーマットであり、JavaScript 以外にも C や C++、Java、Perl などのサーバサイドの言語でも取り扱うことができる。今回は、クラウドサーバ上での JavaScript での処理に使用する。



図 3.3 発電モニタ通信装置親機

3.4. 電力線通信方式

電力線通信とは、電力線を通信回線として利用する手法である。一般的な通信ケーブルを用いた通信方法とは異なり、新たに配線設備などを必要としないことが特徴である。

今回使用する電力線通信方式は、これまでに産業技術総合研究所で開発された手法であり、電力線通信により子機と親機の通信に用いる。それぞれのパネルとパワーコンディショナは直流電力線に接続されている。電力線を用いることにより、既存の太陽光発電システムにおいても、新たな通信設備の必要がなく、より低コストで実現可能である。

今回用いる電力線通信方式としては、CDMA 方式を使用した通信であり、スペクトル拡散によってノイズに強い多元接続通信を可能とする。

本システムでは、最初に、太陽電池パネルに設置した子機により測定した電圧値、電流値、温度を 1 フレームの送信データとして生成する。

更に、生成したデータフレームの1ビット毎に、0、1の2値で表現されたGold符号の組みを使用して拡散変調を行う。この拡散変調後のデータは2047チップ分のデータとなる。データ送信処理として、2047チップ分のデータを電力線に重畳する。次に親機は、そのデータを受信し、受信したデータに対して同期検出処理を行い、フレームの初めのデータを推定し、拡散復調を行う。最後に、複合処理を行い、電圧値、電流値、温度を取得する。この手法を用いることで、伝送速度は、4.425bit/sであり、前述の通り安価に導入できる上に、ノイズに強く、多元接続を実現できる。

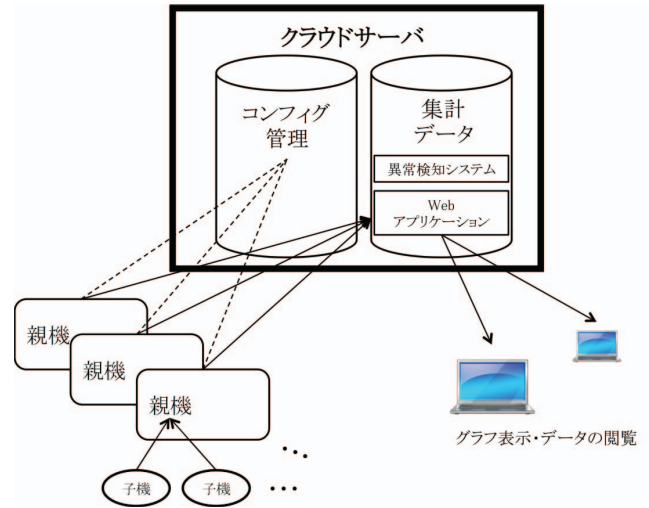


図 3.4 クラウドサーバの構成図

3.5. クラウドサーバ

図 3.4 にクラウドサーバの構成図を示す。クラウドサーバは、複数台の親機から送信されてくる全子機データをJSONフォーマットで受信し、状態モニタリングと異常検知を行う。今回我々はGoogle社の提供するGoogle App Engineを用いる。クラウドサーバの開発言語にはJavaを用い、さらにMVCフレームワークとしてSlim3[7]を使用した。以下にクラウドサーバの機能を示す。

- A) 設定
使用する親機をクラウドサーバに登録する。
- B) データアップデート
親機からTCP通信で送られてくるデータを逐一データベースに登録する。
- C) データ集計
収集データを状態モニタリングや異常検知を行うために、1時間毎にパネル毎の電圧値、電流値、温度の1時間分の平均値を算出しデータベースに格納する。1日毎にも同様に1日分の平均値を格納する。
- D) 異常検知システム
収集したデータを基に、パネル毎の異常を逐一検知する。
- E) データ表示
パネル毎に、データベースに格納された電圧値、電流値、温度を日時指定し、Webブラウザ上に文字列として表示する。
- F) グラフ表示
日時、パネル、データ種類、時間間隔を指定し、Webブラウザ上にグラフとして表示する。今回、グラフ表示には、Google Chart Tools[5]を用いた。

4. 異常検知アルゴリズムの提案手法

4章では、太陽光発電システムの特徴を述べ、提案した異常検知アルゴリズムの詳細を述べる。

4.1. 概要

本提案手法は子機からクラウドに収集された膨大な時系列データを基に、不具合などの異常な発電量低下を示すパネルを検知するものである。

本稿では、パネルから収集される電圧値、電流値、温度の内、電流値のみに着目する。これは、本研究がメガソーラでの実現を目標としているためである。例えば1MWのメガソーラは、約2ha程度の面積が必要である。つまり、メガソーラを構築するためには数千台のパネルを敷き詰める必要があるため、各パネルは数枚ごとに、ストリングと呼ばれる単位で直列に接続されており、このストリング単位で電流値を計測することで、よりコストを抑えることが可能である。

本異常検知システムは、日々のパネル毎の電流値を積算することにより、太陽光発電システム全体からの割合を観察し、その変動量に応じて異常検知を可能とした。そのため、早期の段階で異常検知が可能であり、更に影や日照条件による影響を軽減できる。

4.2. 太陽光発電システムのデータ特徴

太陽光発電システムでの発電量データの特徴として、太陽光の日射量により発電量が著しく影響されるため、天候や環境に強く左右される。そのため、天候面に関しては、雨や曇などによ

り、発電量の変化の差が大きくなる。更に、晴天の場合でも、雲の存在により、隣接するパネルであっても発電量の差が強く現れる。また、悪天候時など日射量が極めて小さい場合は、発電されない場合がある。このため、悪天候時にはパネル群の一部又は、全体の発電量が計測されない場合がある。このため、異常検知に有益なデータが得られず、異常検知は不可能である。環境面に関しては、木々や電線、電柱などの影による影響が強い。例えば季節により、夏と冬の太陽高度の違いや、時間による太陽高度の変化などで、影の位置が一様に定まらず、それぞれのパネルの設置位置により発電量の推移が一定ではない。以上の理由から、太陽光発電システムの特徴は、

- 隣接するパネルであっても同時刻の発電量が逐一異なる。
- 悪天候時などの発電できないパネルがある場合は、異常検知が不可能である。
- 同じパネル、同じ日照条件であっても1年を通して発電量が変化する。

よって、太陽光発電システムでの異常検知を行うためには、日々のパネル毎の発電量から特徴を見つけ、その変化により異常を検知する必要がある。

4.3. 提案手法

本提案手法は、データ欠損時の除外、それぞれのパネルの特徴分析、異常検知と大別して3つの段階に分かれている。

1つ目のデータ欠損時の除外は、4.2節に示すように、悪天候時などの日射量が極めて小さい場合、異常検出が不可能であるため、パネル群の一部に欠損が現れた場合は、その一定期間のデータを異常検知に用いない。

2つ目のパネルの特徴分析は、一定期間の電流値を積算し、パネル群全体からの割合(以下、積算発電割合)を算出する。この理由として、以下の仮説に基づく、

- どのパネルも発電量は一定間隔の日射量に比例する。例えば、曇りの日は1時間毎の発電量の平均を見れば、どのパネルも同じくらい雲に影響される。
- 短い期間において、固定された遮蔽物があれば、一定間隔に同じだけ発電量に影響を与える。これは、1週間などの期間で見れば、日々の木の影はほぼ同じ軌跡を辿り、日々の発電量が同じだけ低下する。

よって、一定間隔でパネル毎の電流値の平均を積算し、パネル群全体からの割合を算出することで、パネル毎にあたる日射量の変化による影響と遮蔽物による影響を低減することが可能である。

図4.1に異常検知の流れを示す。

以下に、パネル P_a の n 枚のパネル群からの積算発電割合 $R(P_a)$ の算出方法を示す。

本稿は一定間隔を1日として、1年を通じて日射量が高い9時から15時までの1時間毎の電流値 C_{Pa} の平均を用いる。1日のパネル P_a の積算値 $S(P_a)$ は、

$$S(P_a) = \sum_{t=9}^{15} C_{Pa}(t) \dots (1)$$

よって、パネル P_a の1日の積算発電割合 $R(P_a)$ は、

$$R(P_a) = \frac{S(P_a)}{\sum_{k=1}^n S(P_k)} \dots (2)$$

3つ目の異常検知は、算出したパネル P_a の積算発電割合 $R(P_a)$ と、前日から一定期間の遡った n 日数分の平均との過去の積算発電割合 $r_n(P_a)$ と比較し、その変動量 $M(P_a)$ に応じて異常検知を行う。本稿は過去平均割合 $r(P_a)$ を計測日 t 日の前日 $t-1$ 日から10日間遡った日数とし、過去の平均割合 $r_{10}(P_a)$ と表記する。過去平均割合 $r_{10}(P_a)$ は、

$$r_{10}(P_a) = \frac{\sum_{k=t-11}^{t-1} R_k(P_a)}{10} \dots (3)$$

変動量 M は、

$$M(P_a) = \frac{R(P_a)}{r_{10}(P_a)} \dots (4)$$

異常値の定義を以下に述べる。一般的にパネルに異常をきたした場合、大きく2つに分かれる。1つ目は、発電量の著しい低下である。この場合は配線の断線などにより、直列に接続されたパネル全てが発電できなくなるので、全体でのパネル発電量からすぐにユーザーは異常に気づくことができ比較的容易に検知可能である。2つ目は、小さな発電量の低下である。これは、パネルの小さな亀裂や焼き付きなど、長期に渡って徐々に低下するため、異常の判断がしづらい。更には、土汚れなどが原因の場合は、通常、雨などによりパネルが洗われ正常に戻る可能性も考えられるそこで、本稿では変動量から以下のように異常値を定義した。

- $M < 90\%$ ⇒ 注意パネル
- $M < 80\%$ ⇒ 異常パネル

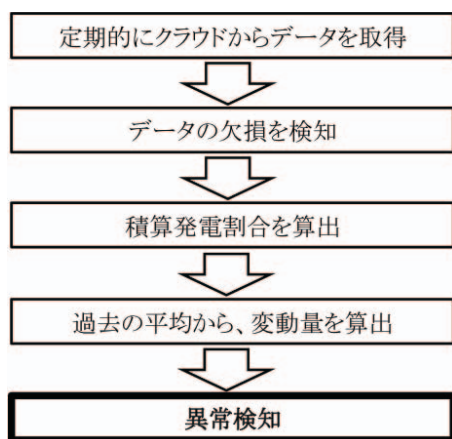


図 4.1 異常検知の流れ図

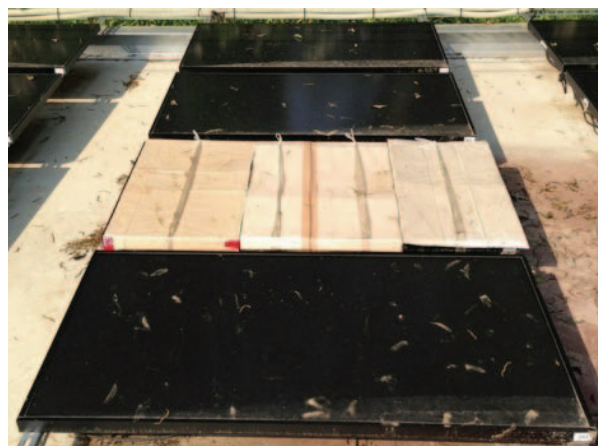


図 5.2 擬似異常パネル

5. モニタリング実験

5.1. 実験環境

- 実験環境

図 5.1 に実験を行ったパネルの設置状況を示す。パネルはソーラーフロンティア製 24 枚のパネルを用いる。本稿では、電流値に着目しているため、直列に繋がれた 4 枚のパネルの電流が等しくなる。そこで、縦列のパネル 4 枚を 1 組(以下、ストリング)とし、6 つのストリングに関して実験を行った。また、ストリングはそれぞれ、図 5.1 の右からストリング 1、ストリング 2 とし、一番左がストリング 6 である。



図 5.1 実験環境

- 異常検知環境

図 5.2 に擬似異常パネルを示す。図のように擬似的に異常パネルを設置した。これは、1 ストリングにあるパネル 4 枚の総面積の内、25%が発電できない状態である。本稿では、開発した異常検知システムを用いて、この擬似異常パネルのストリングを特定する。

5.2. 実験評価

- 状態モニタリングの評価

図 5.3 に状態モニタリングの表示結果を示す。これは、2013 年 4 月 22 日午前 10 時から 12 時までの 1 分刻みの電流値グラフである。図 5.3 により、1 分単位の短時間でも日射量の変化による電流値の変化が観測されていることが分かる。また、子機が親機に対して 70 秒ごとに測定データを送信しているためグラフ表示では 7 分に 1 回の割合でデータ内の点が表示されない。

クラウドサーバに関して、今回試験的に親機の最大子機数 300 個で検証した結果、運用可能であった。1 台の子機に対し 1 日につき約 6KB 程度の保存領域を消費することが分かり、親機の最大子機数の 300 個でも一日につき約 2MB で、定期的に古いデータの削除を行えば CPU、ネットワーク帯域等、GAE の無料クォータ [6] 内に収まる程度であるため、コスト効率は高いと考えられる。

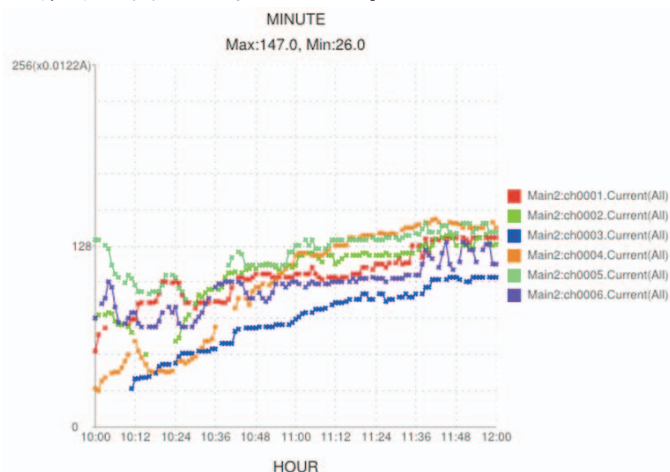


図 5.3 状態モニタリングの表示

● 異常検知アルゴリズムの評価

本稿は、2013年4月15日から2013年5月15日間に於いて評価を行う。また、この期間の2013年4月26日に図5.2のようにストリング5の1枚に擬似異常パネルを設置した。

図5.4に積算発電割合を100%積み上げ面グラフで示す。これはストリング1(S_1)からストリング6(S_6)の1日おきの積算発電割合 $R(S_1)$ から $R(S_6)$ までである。図中の点線は参考の為に、気象庁のホームページ内にある、実験場所であるつくば市の日々の日射量の推移をプロットした。図5.4から分かるように、2013年4月26日以降、ストリング5の割合が一様に低下している。また、データが飛び飛びなのは(縦線)は、日照条件が悪い場合にデータに欠損が見られた日が除外されているためである。図中の点線の変化が激しい時ほど、積算発電割合も同様に変化が激しい。これは、日射量が小さい場合には、パネル毎の環境による発電量の変化が大きいことが推察される。

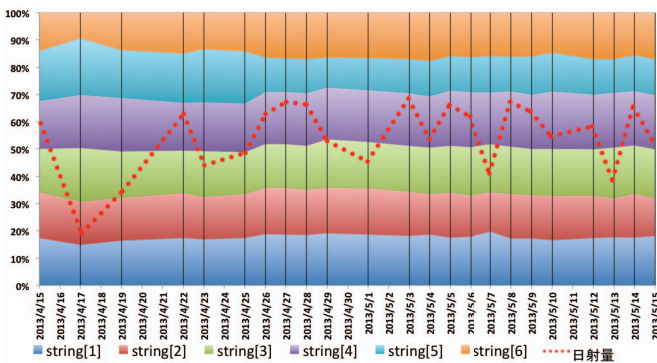


図 5.4 積算発電割合の面グラフ

次に図5.5に積算発電割合の折れ線グラフを示す。図5.4と同様に気象庁の日射量計の推移もプロットした。このグラフから、日射量の値が変化するとき、計測されたストリング1からストリング6の値も同様に変化していることが分かり、発電データが正確に計測されていることが推察される。

次に図5.6にストリング1とストリング5の積算発電割合と、それぞれの積算発電割合の10日間平均のグラフを示す。ストリング1の積算発電割合とその10日間平均が安定して推移しているが、擬似的に異常を施したストリング5は2013年4月26日以降、発電量が急激に降下したことが分かる。ストリング5とその10日間平均からも2013年4月26日

以降は80%以下の値を示しており異常と検知された。また、ストリング5の異常後の最低値を示した2013年4月29日以降は変動量が徐々に増加している。これは、10日間平均を使用しているためであり、異常検知後は要注意パネルとする必要がある。なぜなら、積算発電割合と、過去の積算発電割合の平均変動量の差が小さくなれば変動量が100%に近づいてしまい異常検知がなされない。

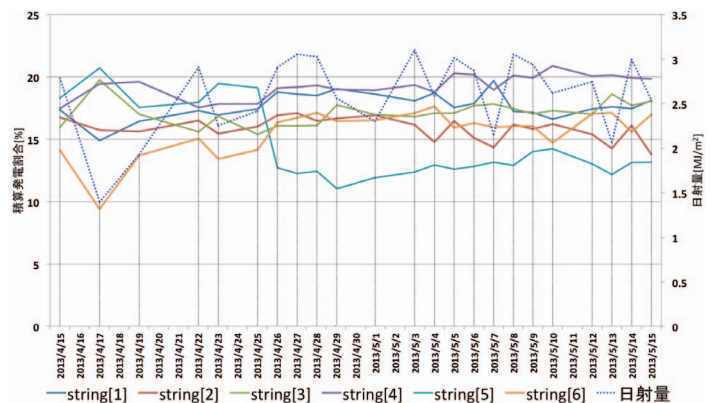


図 5.5 積算発電割合の折れ線グラフ

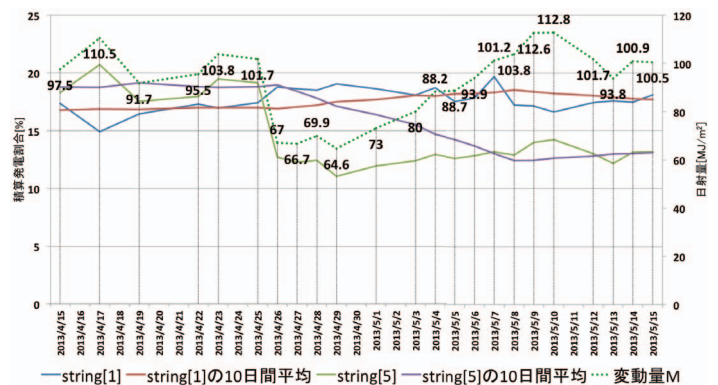


図 5.6 積算発電割合と10日間平均のグラフ

6. おわりに

状態モニタリングとして、パネル単位の発電状況データを子機で計測し、電力線通信に用いることで親機に集約する。更に、そのデータをクラウドサーバに蓄積し、その収集データを基に、状態モニタリングを可能とした。さらに、収集したデータから定期的に積算発電割合を計算し、それぞれの過去10日間の平均と比較する方法により、異常検知システムを開発した。今後の展望として、現在の変動量に関しては、異常時の閾値を固定しているが、異常の状況や天候により変動させる必要がある。また、過去の平均を10日間としているが、異常値を検知後、

しばらく経過すると、通常時と異常時の差が小さくなるため、今後は例えば1ヶ月間、3ヶ月間もしくは併用するなど閾値の適切な値で検証する必要がある。また、擬似異常に関しては、パネル全面を遮光しているが、例えばその半分など遮光する面積や位置による発電量の変化を考慮し、より多くのケースでの異常検知を検証する必要がある。

参考文献

[1]資源エネルギー庁, 源電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法(平成二十三年法律第百八号), 十三経済産業省:

<http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/2011kaitori.pdf>

[2]太陽光発電協会(編), 太陽光発電システム手引書, 1-13 耐用年数と補修, 太陽光発電協会

[3]野里裕高, 河西勇二, 岩田昌也, 高橋栄一, 村川正宏,

「電力線通信による太陽電池パネル毎のモニタリングシステムの開発」, 電子情報通信学会和文論文誌D編, Vol. J96-D, No. 3, 2013

[4]高野了成, 清水敏行, 中田秀基, 工藤知宏. 「クラウドを利用した電力可視化システムの構築」, IPSJ SIG Technical Report

[5]Google Chart Tools:

<https://developers.google.com/chart/>

[6]Google app engine:

<https://developers.google.com/appengine/docs/>

[7]Slim3:<https://sites.google.com/site/slim3appengine/>