日本機械学会論文集(B編)
63巻610号(1997-6)

論文 No. 96-1332

小型複数台風車と太陽電池パネルによる複合発電システムの変動特性*

永井　實*1, 那須謙一*1, 天久和正*2

Performance of a Multiple Small Wind Turbine-Solar Panel Hybrid System

Minoru NAGAI, Kenichi NASU and Kazumasa AMEKU

One of the major limitations of wind power is the inconsistency of wind turbine generator (WTG) output. However, there is a possibility that a multiple wind turbine system could reduce fluctuations in a total output by canceling out each other's variations. Theoretically, the deviation of the multiple wind turbines' fluctuations is reduced at a rate inversely proportional to the square root of the number of turbines. The authors have constructed a hybrid multiple WTG system, which consists of three 1 kW wind turbine generators and four 21.6 W polycrystal solar panels. The generators are directly connected to the common 24 V d. c. electric line system. Measurements of the performance of each generator, such as rotational speed of the turbines, fluctuating electric currents and line voltage, and the fluctuations of each generator's output are analyzed. Our results show that the hybrid multiple WTG system successfully reduces wind turbine output fluctuations.

Key Words: Fluid Machinery, Windmill, Natural Energy, Electric Power, Power Fluctuation

1. はじめに

東シナ海の外縁を形作る南西諸島は，ユーラシア大陸と太平洋の気圧こう配によって生じる季節風が吹く地域に位置するため，潜在的な風力エネルギー賦存量は少なくないと考えられる[1]．この普遍的な風のエネルギーを発電原価が極めて高い離島で有効に利用することは，新エネルギー開発と農業を始めとする産業振興の両面から重要な課題である．一方自然風下に設置される風車は風向風速の変化に従いその出力を大きく変動させるため系統への連系が問題となるが，複数の風車を接続したウインドファームの場合，各風車出力が互いに変動を打ち消し合い合計出力の変動を減衰させることが期待される[2]．

本論文はこのような観点から，小型複数台風力発電システムの性能およびその変動特性について調べたものである[3]．また風力発電と出力変動特性の異なる太陽光発電装置を小型風力発電システムに組合せた複合発電システムを作り，その特性についても考察を行う．

* 1995年9月11日　第73期全国大会において講演，原稿受付　1996年8月22日．

*1 正員，琉球大学工学部（〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原1）．
*2 准員，琉球大学工学部．

2. 理　論

複数台風力発電システムにおいて任意の単機風車出力を $x_i(t)$ とすると，平均出力 $\bar{x}_i$ および分散 σ_i^2（標準偏差 σ_i）は以下のように表せる．

$$\bar{x}_i=\frac{1}{T}\int_0^T x_i(t)dt \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\sigma_i^2=\frac{1}{T}\int_0^T\{x_i(t)-\bar{x}_i\}^2dt=\frac{1}{T}\int_0^T x_i'(t)^2dt \quad \cdots\cdots(2)$$

また，N 台風車合計出力 $x_T(=\sum x_i)$ の時間平均 $\bar{x}_T$ および分散 σ_T^2 は

$$\bar{x}_T=\frac{1}{T}\int_0^T x_T(t)dt=\sum_{i=1}^N\bar{x}_i \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\sigma_T^2=\frac{1}{T}\int_0^T\{x_T(t)-\bar{x}_T\}^2dt=\frac{1}{T}\int_0^T\left\{\sum_{i=1}^N x_i'(t)\right\}^2dt$$
$$=\sum_{i=1}^N\sigma_i^2+\sum_{i=1}^N\sum_{j=1,j\neq i}^N\sigma_i\sigma_j r_{ij} \quad \cdots\cdots(4)$$

となる．ここで r_{ij} は風車 i と風車 j の相関係数

$$r_{ij}=\frac{\frac{1}{T}\int_0^T x_i'(t)x_j'(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x_i'(t)^2dt}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x_j'(t)^2dt}} \quad \cdots\cdots(5)$$

である．

出力変動の理論減衰率を以下のように定義する．

$$\mathrm{Damp}=\frac{\text{合計出力の変動係数 } C.V._{\mathrm{total}}}{\text{単機風車平均出力の変動係数 } C.V._{\mathrm{one}}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

$$=\frac{\sigma_T/\bar{x}_T}{\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\sigma_i\right)\Big/\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}\bar{x}_i\right)}=\frac{\sigma_T}{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

結局，上式は合計出力の標準偏差と各出力の標準偏差の和との比によって重ね合わせによる減衰効果を表している．式(4)より式(7)は次のようになる．

$$\mathrm{Damp}=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^2+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\sigma_i\sigma_j r_{ij}}}{\sum_{i=1}^{N}\sigma_i} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

同一規格，同一設計仕様の風車では $\sigma_i=\sigma_{\mathrm{one}}$ と仮定し，単機平均出力および相関係数のアンサンブル平均

$$\bar{x}_{\mathrm{one}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\bar{x}_i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

$$r_{\mathrm{cross}}=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}r_{ij} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

を用いて式(8)を書き換えると

$$\mathrm{Damp}=\frac{\sqrt{1+(N-1)r_{\mathrm{cross}}}}{\sqrt{N}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

となる．$r_{\mathrm{cross}}=1$ の場合は式(4)より $\sigma_T^2=(\sum\sigma_i)^2$ となり減衰率1すなわち各出力の変動は互いに干渉せず合計しても減衰しないことを意味する．しかし，風車が定格で運転しているならば，ピッチ角制御やストール制御等の出力制限を各風車ごとに独立に行うので，$r_{\mathrm{cross}}=0$ に近づくと考えられる．この場合を単純理論減衰率とすると，

$$\mathrm{Damp}_{\mathrm{simple}}=\frac{1}{\sqrt{N}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

であり，$\sigma_T=\sigma_{\mathrm{one}}/\sqrt{N}$ になる．同様にそれぞれの平均値で割った出力 $[=x_i'(t)/\bar{x}_i]$ のパワースペクトル密度(PSD)を比較すると，合計出力のパワースペクトル密度は単機風車出力のパワースペクトル密度の $1/N$ になる．

3. 複合発電システムの概要

琉球大学キャンパス内(北緯26°15′，東経127°46′，海抜約110 m)エネルギー機械工学ビル屋上に風向風速計，小型風車3機および太陽電池パネルを設置した．図1に各装置の配置を示す．風向風速計はビル風の影響を避けるため設置面から5.5 mの高さに設置した．風車1号機と2号機は風向風速計に近接して，3号機はビル東端に設置した．設置面から回転中心までの高さはいずれも5.8 mである．風車タワーはメンテナンス性，強風対策を考慮して可倒式とした．太陽電池パネルは3号機の近くに建物の陰に入らないように設置した．取付角は18°，方位は真南である[4]．

表1に小型風車の仕様を示す．2枚翼固定ピッチアップウィンド型で，回転数制御機構には上方偏向方式を用いており，風速12 m/s付近で水平軸に対して約60°傾くことにより過回転を防止し，発電電力を最大1 200 Wに制限している．表2に太陽電池の仕様を示す．シリコン多結晶型でパネル4枚を用いて86.4 W(33.4 V)のアレイとした．後でも述べるが，この値は風車の定格出力に比べ小さいものであった．

図2に風車1機と太陽電池アレイの組合せを例に測定システムの概要を示す．小型風車の出力はコントローラ内で整流された後，太陽電池の出力とともに並列にバッテリ充電に供される．バッテリ電圧が設定値を超えるとレギュレータが作動し，過充電電力を負荷シ

Table 1　Specifications of wind turbine generator

Type	:	Two blade propeller, Upwind
Rated power	:	1000 W (at 11 m/s)
Peak power	:	1200 W (at 12 m/s)
Rotational speed	:	850 rpm
Cut-in wind speed	:	3 m/s
Survival wind speed	:	55 m/s
Propeller diameter	:	2.7 m
Weight	:	35 kg

Table 2　Specifications of solar cell (1 panel)

Type	:	Si-polycrystal
Power	:	above 21.6W (at 16.7 V)
Efficiency	:	about 12 %
Area	:	0.18 m²
Angle	:	18°
Direction	:	South

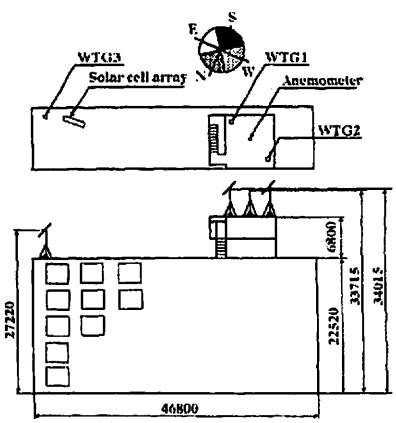


Fig. 1　The arrangement of anemometer, wind turbines and solar cell panels (mm)

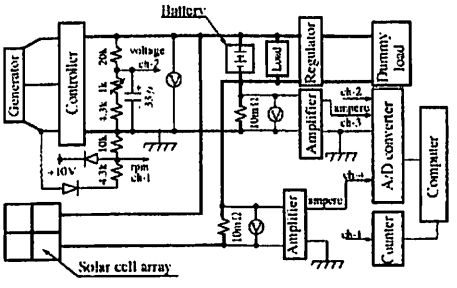


Fig. 2　Measurement system

ステムへ供給する．負荷には自動車用ヘッドランプ等を用いている．本実験における測定項目は風向，風速，3風車回転数，3風車発電電流，太陽電池発電電流およびバッテリ電圧の計10個である．回転数は風車発電機の三相交流波形の周期を読取ることにより求める．発電電流はシャントにかかる微小電圧をアンプで増幅し，またバッテリ電圧は1/5に減衰させた後，それぞれA-D変換ボードを介してコンピュータに取り込む．いずれの場合も回路にノイズフィルタを取付けてある．測定時間は1回当たり約5 min，測定間隔0.15 s，測定個数2 048個であり，風向については風向風速計の記録紙から読取った．

4. 測定結果と考察

1994年2月から96年1月までに187回の測定を行った．そのうち64回のデータは風車3機のみで，残りの123回のデータについては太陽電池も併せて測定した．図3に風車，太陽電池とも比較的に高い出力が得られた場合のデータを示す．このときの風向はNNWで平均風速は12 m/s，1号機，2号機，3号機および太陽電池の平均出力はそれぞれ609，491，349 Wおよび74 Wであった．各風車とも風速の変化に従い出力を変動させるが，特に1号機が風速の変化によく対応して出力を変動させている．また，3号機出力は他の2機に比べ大きく変動しているが，これは3号機が，この風向のときに，建物の影響を受けやすく変動が大きくなったためと考えられる．また，太陽電池の出力にも細かい変動が見られる．

図4に本小型風車の性能図を示す．前述のデータを用いて風速を0.5 m/s幅ごとに分け，その中から風車出力係数 C_P を計算し，極大データと極小データをそれぞれ10%カットしプロットしてある．図4中の実線はカタログ性能曲線である．1号機はばらつきが小さいがこれは他の2機に比べ11 m/s以上の高風速域において上方偏向しにくかったためである．3号機で

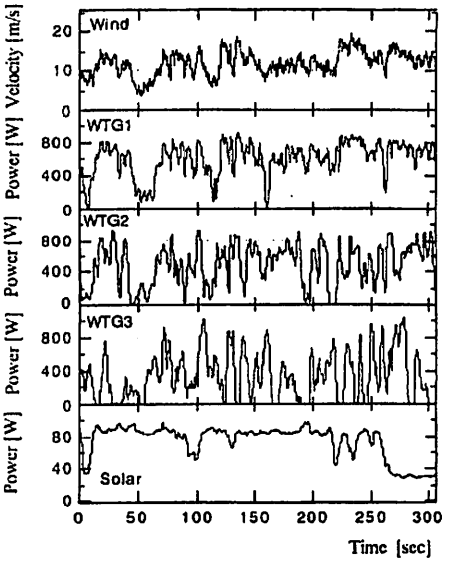
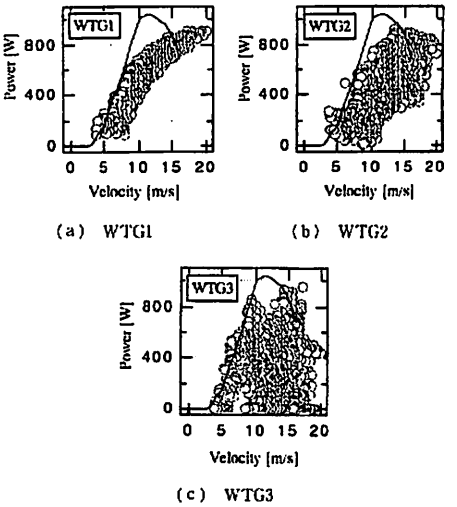


Fig. 3　Wind velocity and instantaneous power of each generator (1995/2/5, NNW)



(a)　WTG1　　(b)　WTG2

(c)　WTG3

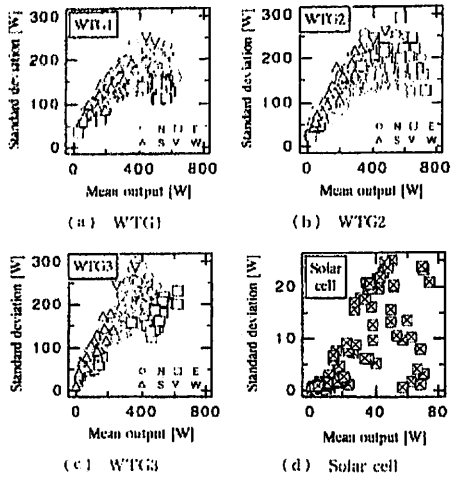
Fig. 4　Performance of WTG instaneous (NNW)

はデータがかなりばらついているが，これは前述の原因および3号機と風速計との距離が遠く，測定時間間隔が短かったためであり，10 m/s以上の高風速域において，200 W以下の低出力も示している．一般にカタログデータは高めに表示されていると思われるが，各風車出力ともかなり低い数値にとどまった．

図5に各風車および太陽電池の平均出力と標準偏差の関係を示す．風車は始め平均出力とともに標準偏差

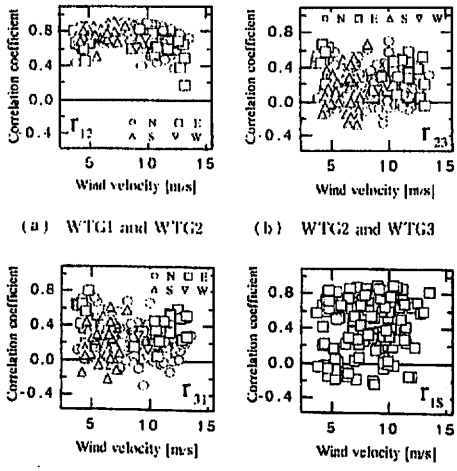
も増加するが，平均出力が 500 W を超えると標準偏差はやや減少する．500 W 付近で標準偏差が最大になり，このときの平均風速は約 10 m/s であった．太陽電池の場合，例えば平均出力 40 W 付近では，標準偏差が 5 W と 22 W の場合があり，太陽電池の標準偏差は出力に比例しないことがわかる．本実験システムにおいて，風車も太陽電池パネルもともに，その最大標準偏差は定格出力の約 3 割程度であった．

図 6 に各出力間の相関係数を示す．1 号機と 2 号機間の相関係数 r_{12} は低風速域に比べて，風速が 10 m/s 以上の高風速域では相関係数が小さくなることがわかる．これは前述した風車の標準偏差が減少する風速域とほぼ一致している．また，r_{23}，r_{31} は距離が離れているため r_{12} に比べ相関が小さく，太陽電池と各風車間の相関係数も正負の領域にわたってばらつき相関が小さいことが確かめられた．



(a) WTG1　(b) WTG2　(c) WTG3　(d) Solar cell

Fig. 5　Fluctuation of generator outputs



(a) WTG1 and WTG2　(b) WTG2 and WTG3　(c) WTG3 and WTG1　(d) WTG1 and Solar

Fig. 6　Correlation between generators

表 3 に 4 風向別の各種平均値を示す．風向は表 3 下に示すように分けた．つまり $\tilde{N}$ は N 方向の風を中心に，NNW，NNE，NE の 4 方向をまとめたもので，他の方向も同様である．まず，標準偏差を平均値で割った変動係数について考察する．$\tilde{E}$ 方向の場合，1 号機と 3 号機の変動係数は他の風向に比べ有意に小さいが，2 号機の変動係数はあまり差がない．これは，2 号機が 1 号機の風下に位置し，その影響を受けたためと考えられる．$\tilde{W}$ 方向では，測定データが 2 個と少ないが，各風車出力とも変動係数が大きくなっている．次に各相関係数について見ると，まず $\tilde{N}$ 方向と $\tilde{S}$ 方向は $\tilde{E}$ 方向と $\tilde{W}$ 方向に比べ r_{12} が大きいことがわかる．また，$\tilde{E}$ 方向の場合 r_{23}，r_{31} は他方向に比べ相対的に大きくなることがわかった．これらは図 1 に示す各風車の配置と風向および建物の影響とによって説明できるように思われる．

図 7 に 3 機合計出力の変動減衰率を示す．前述したように，各出力の変動が互いに独立であれば，N 個の合計出力変動の単純理論減衰率は $1/\sqrt{N}$ となる．実

Table 3　Performance of WTGs in each wind direction

	Direction	$\tilde{N}$	$\tilde{E}$	$\tilde{S}$	$\tilde{W}$	all
	n	121	30	34	2	187
Velocity [m/s]	Average	8.57	8.97	6.26	9.42	8.22
	Deviation	2.22	2.05	1.74	2.90	2.11
	C.V.	0.26	0.23	0.28	0.31	0.26
WTG1 [W]	Average	348.2	393.2	204.2	468.4	330.5
	Deviation	150.2	112.1	127.3	244.9	140.9
	C.V.	0.43	0.29	0.62	0.52	0.43
WTG2 [W]	Average	341.5	382.0	166.2	443.1	317.2
	Deviation	149.0	155.3	127.3	249.7	147.1
	C.V.	0.44	0.41	0.77	0.56	0.46
WTG3 [W]	Average	273.8	364.0	101.8	310.4	257.4
	Deviation	161.4	136.0	93.7	264.7	146.2
	C.V.	0.59	0.37	0.92	0.85	0.57
Three WTGs' summation [W]	Average	963.5	1139.2	472.2	1221.9	905.1
	Deviation	352.3	319.3	277.2	564.2	335.6
	C.V.	0.37	0.28	0.59	0.46	0.37
	Damping	0.77	0.80	0.79	0.74	0.78
Correlation coefficient	r_{12}	0.75	0.63	0.78	0.65	0.73
	r_{23}	0.19	0.34	0.14	0.16	0.21
	r_{31}	0.24	0.40	0.20	0.20	0.25

$\tilde{N}$: NNW, N, NNE, NE　$\tilde{S}$: SSE, S, SSW, SW
$\tilde{E}$: ENE, E, ESE, SE　$\tilde{W}$: WSW, W, WNW, NW

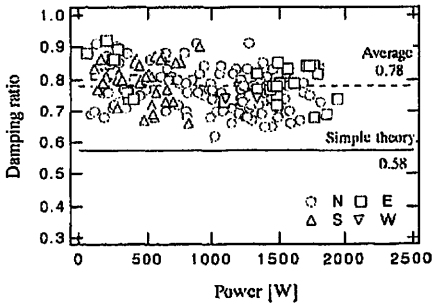


Fig. 7 Damping ratio of three WTGs output

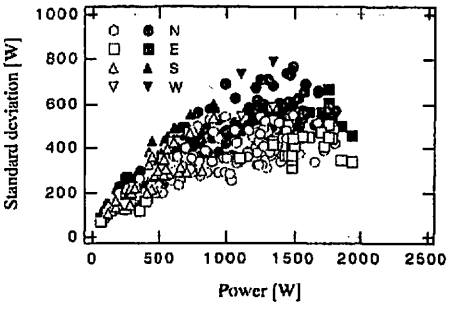


Fig. 9 Damping effect of three WTGs output

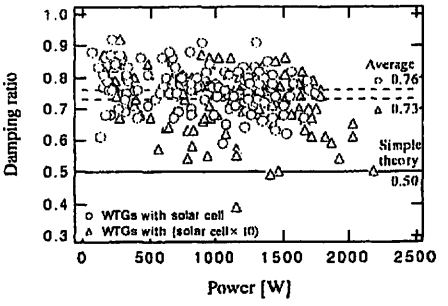


Fig. 8 Damping ratio of total hybrid system

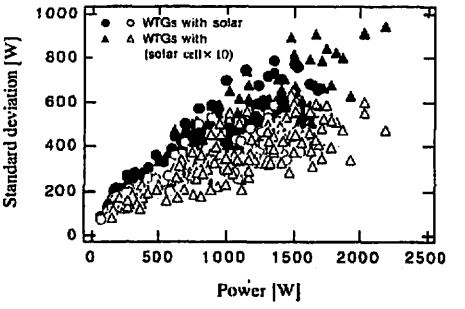


Fig. 10 Damping effect of total hybrid system

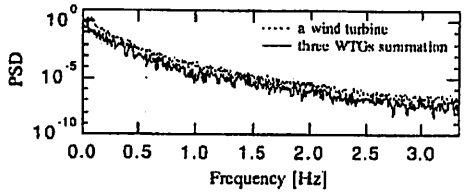
験による平均減衰率は0.78であり，理論値0.58ほど小さくならないが，これは1号機と2号機間の相関が比較的高いためである．しかし，風車出力が定格出力に近づくほど相関係数は小さくなり，合計出力変動を減衰させていることが確認できる．

図8に3機合計出力に太陽電池出力を併せた複合システム合計出力の減衰率を示す．図8中丸印がそれである．平均減衰率は0.76であり，3機合計出力に比べ変動は減衰している．しかし，理論値と比較すると実験値と理論値の差は大きくなっており，本太陽電池の全システムへの減衰効果はほとんどないように思われる．そこで次に太陽電池の出力を10倍し，風車3機合計出力と併せた仮想システムを考えた．つまり太陽電池の定格出力は864 Wになり，風車1機の定格出力の約8割の大きさとした．図8の白ぬき三角形が仮想システムの減衰率である．平均減衰率は0.73となり，実際の複合システムの0.76よりも小さくなる．単純理論値を示す線より下にも計測点があるが，これは太陽電池出力と風車出力の相関が負の場合に対応すると考えられる．

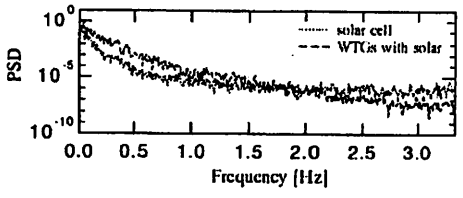
図9に3機合計出力とその標準偏差の関係を示す．白抜きのシンボルが合計出力の標準偏差，黒塗りのそれは各出力の標準偏差を合計したものであり，両者の比の大きさが減衰率となる．合計出力800 W以上で標準偏差はほぼ一定になり，2 000 Wに近づくとやや下がる．合計出力の標準偏差は最大600 W，つまり定格出力3 kWの2割程度以下に抑えられる．また，合計出力が大きくなるほど，変動は減衰しており，特に1 300 W付近の変動減衰が大きい．減衰率が等しくても平均出力が小さい場合に比べ，平均出力が大きいほうが変動の減衰効果が大きいことがわかる．

図10に前述仮想システムの合計出力と標準偏差の関係を示す．本仮想システム合計出力においても，標準偏差が最大600 W程度以下に抑えられることがわかる．また，各出力の標準偏差の合計は直線的に伸びており，合計出力が大きくなるほど変動の減衰効果は大きいといえる．

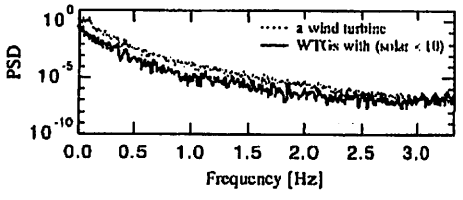
図11に風車出力，太陽電池出力ともに高い場合について解析した，パワースペクトル密度(PSD)を示す．図11(a)中破線は各風車出力より計算した平均パワースペクトル密度で，実線は3機合計出力のパワースペクトル密度である．実線が破線より下に存在しており，変動は全周波数領域で減衰することがわかる．しかし，風車台数が3と少ないため，その差は必



(a) One WTG and three WTGs summation



(b) Solar cell and WTGs with solar cell



(c) One WTG and three WTGs with (solar×10)

Fig. 11 Power spectral density

ずしも明りょうではない.

図11(b)は太陽電池と複合システムのパワースペクトル密度を示す. 複合システムと比較して太陽電池の変動は2.0 Hz以上の周波数領域で大きく, 逆に1.5 Hz以下の領域で小さい.

図11(c)は破線が図11(a)と同じく風車の平均パワースペクトル密度で, 実線は太陽電池出力を10倍化した仮想システムのパワースペクトル密度を示す. 実線は破線よりもほとんどすべての周波数領域で下方に分布している. 単機風車出力, 3機合計出力およびそれと80 W太陽電池出力を併せた複合システムと比較しても, 仮想システムの変動が最も減衰することが確認された.

5. 結　論

小型風車3機および太陽電池パネルよりなる複合発電システムについて測定を行い, 解析した結果,

(1) 供試小型風車出力の標準偏差は始め風速の増加に伴い増加し, 平均出力が500 W, 風速が約10 m/sのとき最大となる.

(2) 風車間の相関係数が小さくなるにつれ, 合計出力変動が減衰することが確認された.

(3) 太陽電池の出力変動は風車に比べ相対的に小さいが, 本実験システムにおいてはその定格出力が相対的に小さいため, 出力変動減衰への寄与は小さい.

(4) もし太陽電池の出力規模を風車と同等までに拡張すれば, 両者の変動特性の違いにより, 相互干渉による減衰はかなり期待できる.

(5) 本実験システムにおいて, 各風車出力および太陽電池出力の最大標準偏差は定格出力の3割程度であるが, 3機合計出力およびシステム合計出力では定格出力の2割程度に減少する.

等が明らかになった. より多様な気象条件および計測期間における系統的な解析はなお今後の課題である.

本研究の一部は93, 94年度文部省科学研究費(一般研究B)の補助を得た. 記して謝意を表する.

文　献

(1) 永井宣, 第11回風力エネルギー利用シンポジウム, 風力エネルギー協会, (1989-11), 18-32.
(2) McNerney, G., ほか1名, IEEE/PES WM(1992-1), 1-4.
(3) 永井宣・ほか3名, 機構論, No. 948-2(1994-7), 162-165.
(4) 上里勝實・ほか2名, 琉球大学工学部紀要, 第46号, (1993).