

太陽光発電システムの単独運転特性解析用 回生負荷モデルの開発

Development of regenerative load model for islanding operation
characteristic analysis of PV system

五十嵐 広宣^{*1}

Hironobu IGARASHI

川崎 憲広^{*2}

Norihiro KAWASAKI

涌井 伸二^{*3}

Shinji WAKUI

黒川 浩助^{*4}

Kosuke KUROKAWA

Abstract

The photovoltaic generation system must have protection device and islanding detection devices to connect with utility line of the electric power company. It is regulated in the technological requirement guideline and the electric equipment technology standard that the country provides. The install propose of islanding detection devise is to detect a blackout due to the accident occurrence of the earth fault and the short-circuit in the utility line. If the photovoltaic generation system is not stopped immediately, electricity comes to charge to the utility power line. It is a very risk. The islanding phenomenon break out by regenerative load. The IEC standard has to standardize the regenerative load of the islanding test method. An analysis model is necessary for it. The author made the model which could analyze a islanding transitional phenomenon from a coalition differential equation based on an electric circuit theory. The analysis result confirmed that agreed in comparison with the experiment result very well.

キーワード：単独運転，解析モデル，誘導電動機，回転機負荷，行列

Key Words: Islanding, Analysis model, Induction motor, Rotating machine load, Matrix

1. はじめに

現在，導入が進められている太陽光発電システム（PV）の多くは，系統連系形太陽光発電システムである。このシステムの特徴は，太陽光で発電した発電量と構内で使用する負荷量の差を余剰電力として，一般電気事業者へ売電できることである。そのため，系統連系を行う際は，配電線の電力品質や安全確保の面から，電気設備の技術基準¹⁾，電力品質確保に係わる系統連系技術要件ガイドライン²⁾，および系統連系規程³⁾に規定された単独運転検出装置などの保護装置を具備せねばならない。この単独運転検出装置は，系統連系を行っている配電線において，地絡や短絡事故による配電線停止が発生した場合，同停止状態を速やかに検出し，PVを当該配電線から解列させる。この装置の

評価は，安全性を保証する上で最も単独運転現象が継続しやすい条件で行う必要がある。すなわち，一般の誘導性負荷と力率改善用コンデンサの容量性負荷を組み合わせた共振負荷⁴⁾や，誘導電動機負荷⁵⁾などの回生負荷で行う必要がある。回生負荷は，配電線停止時に単独系回路の電圧，周波数を維持する特性がある。そのため，単独運転が継続しやすい^{13),14)}。この負荷による試験方法は，財団法人電力中央研究所が新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託された研究開発事業^{6)~11)}において開発され，財団法人電気安全環境研究所（JET）の認証試験方法¹²⁾に反映された。

著者は，同等の回生エネルギー量を持つ共振負荷と誘導電動機負荷の比較実験から，後者の方が単独運転を助長することを明らかにした¹⁵⁾。単独運転の助長は，誘導電動機負荷が配電線停止後に発電機状態へ変化し有効電力を補償し電圧低下を抑制する。さらに，自らのインダクタンスが変化して無効電力を補償または吸収することで周波数変化が抑制される¹⁶⁾。

近年，PVの世界的導入拡大により，単独運転試験法¹⁷⁾の国際規格化が活発化している。この中では，共振負荷を含んだ誘導電動機負荷の動特性解析モデルの作成が必要で

^{*1} 財団法人 電気安全環境研究所（〒230-0004 神奈川県横浜市鶴見区元宮 1-12-30） e-mail: lgarashi_H@jet.or.jp

^{*2} 東京工業大学 統合研究院 研究員

^{*3} 東京農工大学工学府 電気電子工学科 共生科学技術研究院 先端電気電子部門 教授

^{*4} 東京工業大学 統合研究院 特任教授
（原稿受付：2009年8月10日）

ある。しかし、解析モデルの検討は行われていない。

一般に電力系統における過渡解析には、実効値解析の Y 法（電力系統動特性過渡安定度解析プログラム）¹⁸⁾や瞬時値解析の EMTP (Electromagnetic Transients Program) ¹⁹⁾といった回路過渡現象シミュレーションプログラムが用いられる。Y 法は、実効値をベースとした大規模電力系統の過渡安定度解析に適したプログラムであり、商用周波の一周期よりも短い単独運転現象などの過渡現象解析には適さない。一方、EMTP は、瞬時値 (μ 秒) をベースとした過電圧解析や雷サージ解析などに向けたプログラムであり、単独運転現象の解析に適する。しかし、EMTP には、住宅用 PV の単独運転解析に必要とされる単相誘導電動機の解析モデルがない。

そこで著者は、これまでの実験結果を踏まえ、住宅用 PV の単独運転特性を行列演算によって解析できるモデルを作成した。解析モデルは、実機では容易に行えない負荷条件を詳細に設定できる。そのため、単独運転現象を継続させ易い負荷条件を容易に選定できる。また、誘導電動機負荷の特性を考慮した解析モデルでは、誘導電動機負荷の定数を変更することで、異なる機種種の解析が可能となった。これらから、実態に即した厳しい負荷条件を設定可能となった。

2. 実機による単独運転検出装置の評価方法

2.1 単独運転試験

実機での単独運転試験は、解析結果と比較する目的で行った。試験は、Fig.1 に示す住宅用 PV が配電線に連系運転している状態をモデル化した試験回路にて行う。この回路は、JET 認証試験方法および IEC 規格と同じである。試験の負荷条件は、共振負荷および共振負荷に単相誘導電動機負荷を組み合わせた 2 条件である。

試験用の太陽光発電システム用パワーコンディショナ (PCS) は、国内市場において最も多く流通している定格出力 4kW を用いた。PCS の保護継電器は、工場出荷時の標準整定値（過電圧検出値 115.0V、不足電圧検出値 85.0V、

Table 1 Specification of grinder.

表 1 グラインダの仕様

Specification of grinder	Size of motor $W[m] \times H[m]$	Size of flywheel $D[m]$ $W[kg]$	Moment of inertia $[kg \cdot m^2]$
1 Φ 100V, 6.5A, 2pole type 50/60Hz, 2960/3560rpm Output power 645W	$W:0.452$ $H:0.267$	$D:0.205 \times 2$ $W:1.300 \times 2$	0.015

過周波数検出値 51.0Hz、不足周波数検出値 48.5Hz) とした。また、単独運転検出装置の受動および能動方式検出装置は、配電線停止後の電圧や周波数への影響を無くす目的からマスクした。

2.2 単独運転試験用の単相誘導電動機負荷

単独運転試験用の誘導電動機負荷は、一般市販の単相交流電源で駆動するグラインダである。仕様を Table 1 に示す。グラインダは、コンデンサ形誘導電動機のシャフト部に研磨用砥石を固定し、高速回転している砥石部分に鉄などの切れ端を当て、研磨を行う工作機器である。コンデンサ形誘導電動機は、副巻線側に進相コンデンサを直列接続し、位相をずらして運転を行う。進相コンデンサは、配電線停止後にコンデンサ内に蓄積された電気エネルギーを外部へ放出する。そのため、副巻線およびコンデンサは、配電線停止後の電圧や周波数への影響を無くす目的から切断され、主巻線のみで運転する誘導電動機負荷で行った。

2.3 単独運転試験方法

単独運転の測定は、①～⑤の実験手順を踏んで、各負荷条件の組み合わせにて行う。なお、負荷の組合せは、IEC 規格および JET 認証試験方法で規定されている範囲 (-10% ~ +10%) で行った。潮流点は、Fig.1 に示す負荷 R_{ASC} が接続されている箇所とする。潮流点の有効電力 P は、交流有効電力計 W_2 にて計測し配電線から負荷へ流れている状態をプラス (+) と、逆に配電線へ流れている状態をマイナス (-) とする。また、無効電力 Q は、交流無効電力計

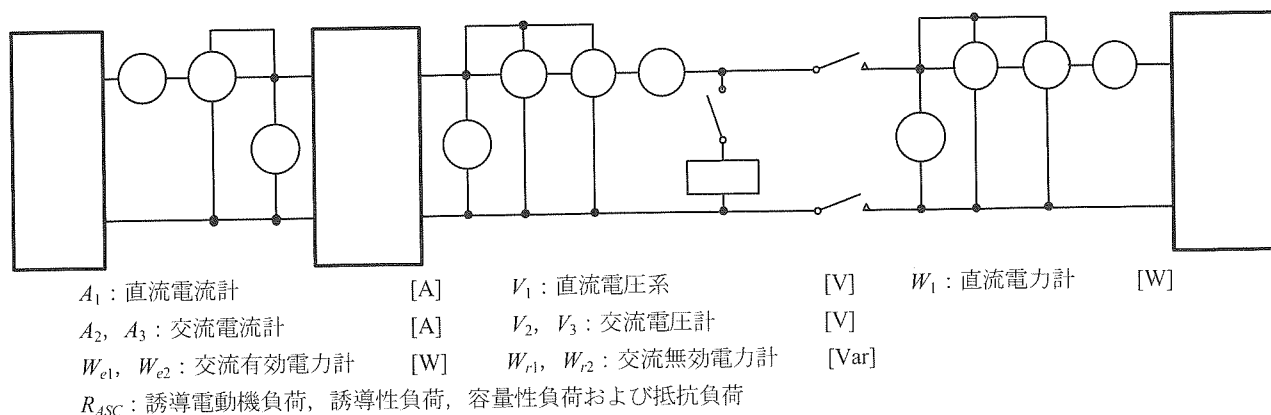


Fig.1 Circuit of islanding tests.

図 1 単独運転試験回路図

W_2 にて計測し、配電線側からみた場合に遅れ力率をプラス (+) と、進み力率をマイナス (-) とする。

- ① PCS は、太陽電池模擬電源装置を調整し、定格出力 4kW とする。
- ② 潮流点の有効電力 P は、抵抗負荷を調整し PCS 定格出力の -10%, -5%, 0%, +5%, +10% とする。
- ③ 潮流点の無効電力 Q は、容量性負荷を調整し PCS 定格出力の -10%, -5%, 0% とする。また、誘導性負荷を調整し、+5% および +10% にする。
- ④ 単独運転は、 $t=0$ のタイミングで開閉器 SW_{CB} を開放する。
- ⑤ 開閉器 SW_{CB} の開放と同時に波形観測測定器にて PCS の出力電圧波形 V_2 、出力電流波形 A_2 、および各負荷の電流波形を取得する。

3. RLC 共振負荷のみの単独運転試験回路の解析

3.1 定常状態の解析モデル

まず、共振負荷の単独運転解析モデルの検討を行う。PCS は、常時配電線の電圧を計測し、その電圧位相に合わせて電流を出力する。すなわち、解析モデルにおける PCS を、近似的な理想定電流源²⁰⁾と考えた。PV が配電線に連系している定常状態は、Fig.2 のように配電線の電圧源と PCS の電流源から構成される。同一回路内に電圧源および電流源がある場合の定常状態は、重ね合わせの理を用いて解ける。Fig.2 に重ね合わせの理を適用した場合は、電圧源が短絡となり、PCS 出力電流 $i_{PV}(t)$ が配電線に全て流れる。一方、電流源を開放した場合は、配電線電圧が抵抗負荷 R 、誘導性負荷 L 、および容量性負荷 C の各素子に印加され、素子電流 $i_R(t)$ 、 $i_L(t)$ 、および $i_C(t)$ が流れる。すなわち、定常状態における素子電流は、式(1)から(3)によって求められる。

$$i_R(t) = \frac{v(t)}{R} = \frac{E}{R} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$L \frac{d\{i_L(t)\}}{dt} = v(t) \text{ より} \\ i_L(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt = \frac{1}{L} \int E \sin(\omega t) dt \\ = \frac{E}{L} \int \sin(\omega t) dt = -\frac{E}{\omega L} \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$\frac{1}{C} \int i_C(t) dt = v(t) \text{ より} \\ i_C(t) = C \frac{d\{E \sin(\omega t)\}}{dt} = CE \frac{d\{\sin(\omega t)\}}{dt} \\ = \omega CE \cos(\omega t) \quad (3)$$

3.2 過渡状態時の解析

Fig.3 は、単独運転移行時の時間領域回路をラプラス変換し、 s 関数として表した回路図である。単独運転に移行したときの初期値は、式(1)から(3)に初期条件($t=0$)を代入し、式(4)から(6)となる。

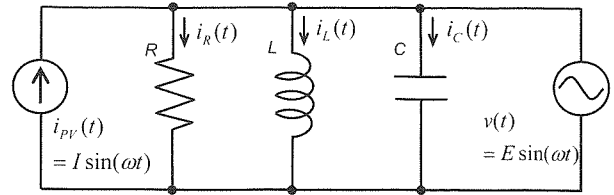


Fig.2 Conceptual diagram of photovoltaic system.

図2 太陽光発電システムの概念図

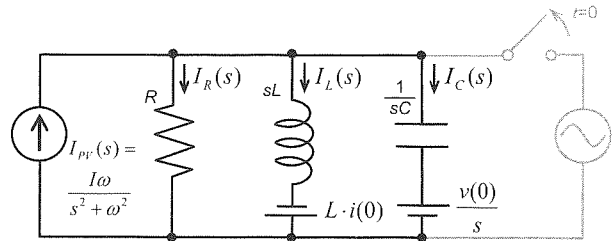


Fig.3 Circuit diagram of s-function.

図3 s 領域の等価回路

$$i_R(0) = 0 \quad (4)$$

$$i_L(0) = -\frac{E}{\omega L} \quad (5)$$

$$i_C(0) = \omega CE \quad (6)$$

PCS 出力電流 $I_{PV}(s)$ は、電流 $I_R(s)$ 、 $I_L(s)$ 、および $I_C(s)$ の合計として式(7)となる。

$$I_R(s) + I_L(s) + I_C(s) = \frac{I\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (7)$$

また、各素子にかかる電圧は等しいので、式(8)および(9)の電圧方程式が得られる。

$$RI_R(s) - sLI_L(s) = \frac{E}{\omega} \quad (8)$$

$$RI_R(s) - \frac{1}{sC} I_C(s) = 0 \quad (9)$$

これらの s 関数による連立微分方程式を行列演算で表すと式(10)となる。

$$\begin{pmatrix} I_R(s) \\ I_L(s) \\ I_C(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ R & -sL & 0 \\ R & 0 & -\frac{1}{sC} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{I\omega}{s^2 + \omega^2} \\ \frac{E}{\omega} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

配電線停止後の共振負荷による過渡解析方法は、式(10)に示した s 関数を演算し解を導出する。

共振負荷による単独運転解析は、定常状態、初期値、および過渡状態それぞれの回路方程式を数値計算プログラム MATLAB にプログラミングして求めた。演算では、実機で行った単独運転試験の初期条件として PCS 出力電流 I 、配電線電圧 V 、回路周波数 f 、抵抗負荷の消費電力 W 、誘導性負荷、および容量性負荷の消費無効電力 Q を入力した。

3.3 共振負荷による解析結果

解析モデルの妥当性評価は、2.3 節に既述した単独運転実験結果と解析結果との比較による。配電線停止 0.3 秒後の電圧値を Table 2 に示す。解析結果を上段に、実験結果を中段に、そして解析値に対する誤差率を下段に示す。比較結果は、負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=0\%$) において最大-2.18%と約 4V 程度の誤差となった。この負荷条件では、Fig.4 のように実機の誘導性負荷電流および容量性負荷電流の周波数に変動が発生している。これは、配電線停止後に誘導性負荷 L と容量性負荷 C 、および PCS との間に発生した共振現象が原因である。そのため、共振の影響を受けた電圧値は、Fig.5(a)のように変化し、解析結果に比べ大きくなり誤差が生じた。

単独運転の過渡現象は、時系列的に変化しており、一地点の比較だけでは現象の整合性は確認できない。そこで、誤差率が最大である負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=0\%$) を例に時系列による比較を行った。比較結果は、Fig.5(a)から(e)のように、共振現象が発生する 0.15 秒までは顕著な差異が無く同等の傾向を示した。

電圧解析と同様に周波数の解析を行った。配電線停止 0.3 秒後の周波数を Table 3 に示す。解析結果を上段に、実験結果を中段に、そして解析値に対する誤差率を下段に示す。比較結果は、負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=+5\%$) において最大+1.59%となり約 0.8Hz 程度の誤差となった。この負荷条件では、Fig.6 のように実機の誘導性負荷電流および容量性負荷電流の周波数が大きく変動している。これは、配電線停止後に誘導性負荷 L と容量性負荷 C 、および PCS との間に発生した共振現象が原因である。そのため、共振の影響を受けた周波数は、Fig.7 のように解析結果と比較し共振現象の影響を受けて変化し、解析結果に比べ大きくなり、誤差が生じた。また、他の負荷条件においても同様に時系列による比較検討を行い、共振現象の影響を除いて実験値と解析結果がよく一致した。したがって、共振負荷の解析モデルの妥当性が確認できた。

4. RLC 並列回路と誘導電動機負荷の単独運転特性解析

4.1 誘導電動機負荷の解析モデル

誘導電動機は、構造や原理が簡単で安価で頑丈なことから多く利用されているが、解析モデルの検討例は少ない。また、誘導電動機特性検討は、始動時の過渡現象や運転特性（電流、力率、効率など）など運転に関わる内容が主である。そのため、電力が途絶えた後に発生する過渡現象については、運転上あまり問題視されないため検討例は僅少である。

一般的に誘導電動機の定常特性は、JIS C 4210²¹⁾に規定されている等価回路法によって算出される。等価回路法は、電動機を定常と考え、回路計算によってこの特性を算出する手法である。等価回路の素子値は、無負荷運転および拘束試験から求められる。また、各素子の電流は、回路理論

Table 2 Voltage of 0.3seconds it blacks out.

表 2 配電線停止 0.3 秒後の電圧

[measure : Vrms]

Reactive power Q [Var]		Active power P [W]				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Analysis	222.9	204.5	198.0	195.7	186.5
	Actual	225.6	204.6	199.3	194.2	184.3
	Error rate	-1.19%	-0.04%	-0.65%	0.77%	1.19%
-5%	Analysis	219.4	204.0	197.9	197.4	186.9
	Actual	220.3	202.2	198.9	196.0	185.0
	Error rate	-0.40%	0.89%	-0.50%	0.71%	1.02%
0%	Analysis	219.0	201.1	198.0	198.5	187.0
	Actual	223.9	199.6	201.4	201.9	183.2
	Error rate	-2.18%	0.75%	-1.68%	-1.68%	2.07%
+5%	Analysis	219.0	204.6	198.7	194.9	186.2
	Actual	217.6	206.1	199.6	193.7	184.0
	Error rate	0.64%	-0.72%	-0.45%	0.61%	1.19%
+10%	Analysis	219.1	207.2	198.8	191.9	189.7
	Actual	223.4	207.2	198.3	192.7	189.8
	Error rate	-1.92%	0%	0.25%	-0.41%	-0.05%

Upper row (Analysis of MATLAB)

Middle (Result of actual)

Lower (Error rate of analysis and actual.)

Table 3 Frequency of 0.3seconds after it blacks out.

表 3 配電線停止 0.3 秒後の周波数

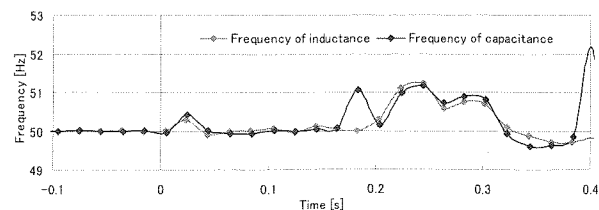
[measure : Hz]

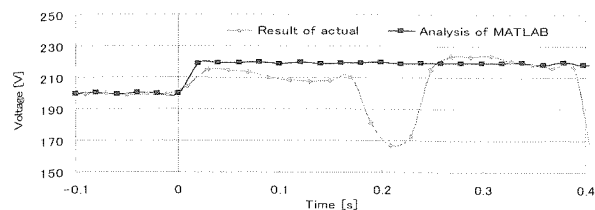
Reactive power Q [Var]		Active power P [W]				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Analysis	47.85	47.62	48.54	48.08	48.08
	Actual	47.53	47.83	48.07	48.09	48.09
	Error rate	0.67%	-0.43%	0.97%	-0.02%	-0.02%
-5%	Analysis	49.26	49.02	49.50	49.50	49.26
	Actual	49.37	49.33	49.40	49.47	49.36
	Error rate	-0.22%	-0.62%	0.20%	0.06%	-0.20%
0%	Analysis	50.51	50.51	50.76	50.76	50.51
	Actual	49.82	50.57	50.62	50.61	50.49
	Error rate	1.38%	-0.11%	0.27%	0.29%	0.03%
+5%	Analysis	51.02	50.76	50.76	51.02	51.02
	Actual	50.22	50.89	50.88	51.14	51.06
	Error rate	1.59%	-0.25%	-0.23%	-0.23%	-0.07%
+10%	Analysis	52.36	52.36	52.36	52.63	52.63
	Actual	52.79	52.56	52.40	52.76	52.88
	Error rate	-0.81%	-0.38%	-0.07%	-0.24%	-0.47%

Upper row (Analysis of MATLAB)

Middle (Result of actual)

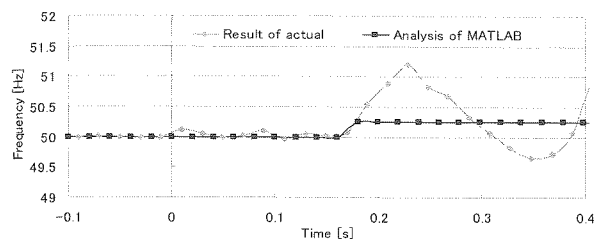
Lower (Error rate of analysis and actual.)

Fig.4 Frequency of inductance current and capacitance current load condition ($P=-10\%$, $Q=0\%$).図 4 誘導性および容量性負荷電流の周波数
負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=0\%$)



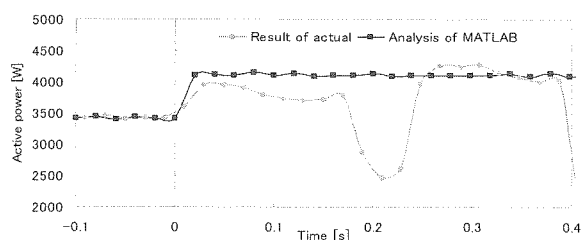
(a) Comparison of voltage.

(a) 電圧比較



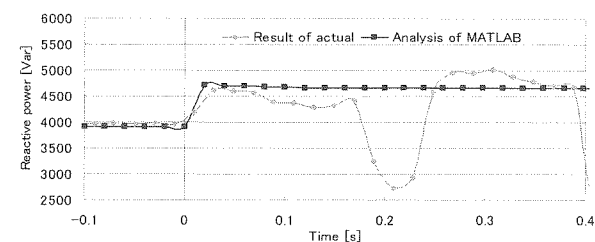
(b) Comparison of frequency.

(b) 周波数比較



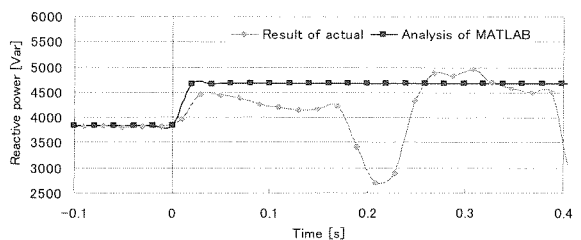
(c) Comparison of active power.

(c) 抵抗消費電力比較



(d) Comparison of inductance reactive power.

(d) 誘導性無効電力比較



(e) Comparison of capacitance reactive power.

 Fig.5 Load condition($P=-10\%$, $Q=0\%$).

(e) 容量性無効電力比較

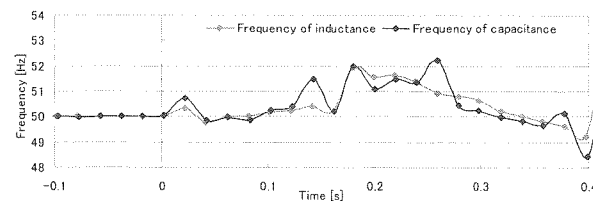
 図5 負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=0\%$)


Fig.6 Frequency of inductance current and capacitance current

 load condition($P=-10\%$, $Q=0\%$).

図6 誘導性および容量性負荷電流の周波数

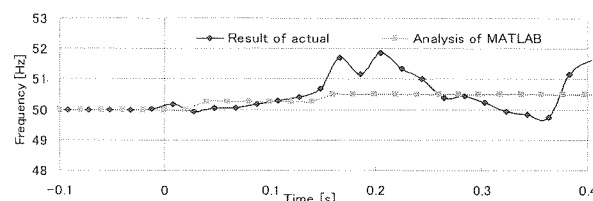
 負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=0\%$)

 Fig.7 Comparison of frequency($P=-10\%$, $Q=+5\%$).

 図7 負荷条件 ($P=-10\%$, $Q=+5\%$) の周波数

から算出できる。そこで、誘導電動機の解析モデルは、等価回路から連立微分方程式を立て行列演算するモデルとした。

4.2 誘導電動機の解析モデルの検討

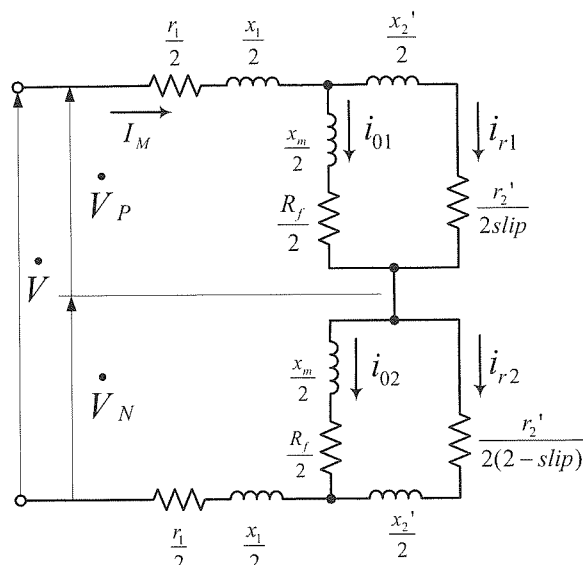
主巻線のための誘導電動機は、純単相誘導電動機²²⁾と考えられる。同電動機の等価回路は、回転磁界の回転方向だけが異なる2個の同じ二相誘導電動機と等価である。二相誘導電動機は、Fig.8に示す正相側と逆相側を合わせた等価回路となる。また、定格出力645Wの誘導電動機(主巻線)の定数は、無負荷運転および拘束試験から計測して求めた²³⁾。定数をTable 4に示す

定常状態における素子電流 I_{01} , I_{r1} , I_{02} , および I_{r2} は、分流の法則によって算出できる。しかし、単独運転時は、単独系回路の周波数変化に伴い S と各素子のインダクタンスおよび合成インピーダンスが変化する。そのため、分流の法則を適用して各素子電流を算出できない。また、過渡現象は、正相側と逆相側を一貫して考える必要がある。しかし、Fig.8に示すように誘導電動機内部を流れる電流は正相側を通過した後に一旦合成され、逆相側にて再度分流する。そのため、正相側と逆相側を一貫した式をたてられない。

そこで、今回新たに単独運転時に各素子電流を計算できる回路構成として、Fig.8に示す等価回路をFig.9およびFig.10に示す、正相側と逆相側の二つに分け、各素子電流を算出できる解析モデルを考案した。

4.3 誘導電動機負荷の定常状態解析モデル

誘導電動機負荷の過渡解析方法は、3.2節に既述したように定常状態における t 関数の連立微分方程式をラプラス変



$\dot{V}$: 電源電圧 [V], $\dot{V}_p$: 正相側電圧 [V],
 $\dot{V}_N$: 逆相側電圧 [V], r_1 : 一次抵抗 [Ω],
 x_1 : 一次洩れリアクタンス[Ω],
 x_m : 励磁リアクタンス [Ω], R_f : 鉄損抵抗[Ω],
 r_2' : 一次換算二次抵抗[Ω], $slip$: すべり[-],
 x_2' : 一次換算二次洩れリアクタンス[Ω]

Fig.8 Equivalent circuit of pure induction motor.

図8 純誘導電動機の等価回路図

Table 4 Coefficient of induction motor.

表4 誘導電動機の定数

Parameter	Symbol	Value
No-load voltage	V_N	99.98 [V]
No-load current	I_N	4.61 [A]
No-load power	P_N'	76.0 [W]
Mechanical loss	P_M	11.8 [W]
Adsorption voltage	V_L	33.78 [V]
Adsorption current	I_L	6.74 [A]
Adsorption power	P_L	168.0 [W]
Main winding resistance	r_1	0.835 [Ω]
No-load impedance	R_N	3.02 [Ω]
	X_N	21.47 [Ω]
Adsorption impedance	R_L	3.698 [Ω]
	X_L	3.383 [Ω]
Main winding of leakage reactance	x_1	1.691 [Ω]
Iron loss resistance	R_f	2.94 [Ω]
Excitation reactance	x_m	37.87 [Ω]
Resistance of converted into the main winding	r_2'	3.124 [Ω]
Leakage reactance of converted into the main winding	x_2'	1.691 [Ω]

換し, s 関数にて演算し解を導出する.

定常状態における合成電流 I_M は, Table 4 の定数を Fig.8 の等価回路図の各素子へ代入し, 式(11)によって合成インピーダンス算出した後, 式(12)によって求められる. また, 素子電流 i_{01} , i_{r1} , i_{02} , および i_{r2} は, 合成電流 I_M を用いて分流の法則にしたがい算出する.

各素子電流の初期値は, 定常状態を算出した式に初期条

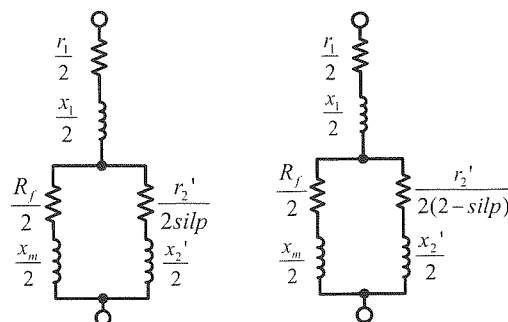


Fig.9 Circuit of regular-phase. Fig.10 Circuit of contra-phase.

図9 正相側回路図 図10 逆相側回路図

件 ($t=0$) を代入し求める. また, 正相側電圧 $\dot{V}_p$ および逆相側電圧 $\dot{V}_N$ は, 定常状態を算出した式に初期条件 ($t=0$) を代入し算出する.

$$Z = (r_1 + x_1) + \frac{1}{2} \frac{(R_f + jx_m) \times \left(\frac{r_2'}{slip} + jx_2' \right)}{(R_f + jx_m) + \left(\frac{r_2'}{slip} + jx_2' \right)} + \frac{1}{2} \frac{(R_f + jx_m) \times \left(\frac{r_2'}{(2-slip)} + jx_2' \right)}{(R_f + jx_m) + \left(\frac{r_2'}{(2-slip)} + jx_2' \right)} \quad (11)$$

$$I_M = \frac{E}{Z} \quad (12)$$

4.4 誘導電動機負荷の過渡状態解析モデル

過渡状態における各素子電流は, Fig.11 および 12 に示した s 関数の回路方程式から算出できる.

Fig.11 に示す正相側回路の電圧方程式は, 式(13)となる.

$$I_{01}(s) \left(\frac{r_1}{2} + \frac{sx_1}{2} + \frac{R_f}{2} + \frac{sx_m}{2} \right) + I_{r1}(s) \left(\frac{r_1}{2} + \frac{sx_1}{2} \right) = \frac{\dot{V}_p \times \omega}{s^2 + \omega^2} + i_{01}(0) \left(\frac{x_1}{2} + \frac{x_m}{2} \right) + \frac{x_1}{2} i_{r1}(0) \quad (13)$$

Fig.11 に示す並列接続からなる閉回路の電圧方程式は, 反時計方向に計算すると, 式(14)となる.

$$I_{01}(s) \left(\frac{R_f}{2} + \frac{sx_m}{2} \right) - I_{r1}(s) \left(\frac{r_2'}{2slip} + \frac{sx_2'}{2} \right) = \frac{\dot{V}_p \times \omega}{s^2 + \omega^2} + i_{01}(0) \left(\frac{x_1}{2} + \frac{x_m}{2} \right) + \frac{x_1}{2} i_{r1}(0) \quad (14)$$

逆相側は, 正相側と同様に Fig.12 に示す回路から電圧方程式をたてると, 式(15)となる.

$$I_{02}(s) \left(\frac{r_1}{2} + \frac{sx_1}{2} + \frac{R_f}{2} + \frac{sx_m}{2} \right) + I_{r2}(s) \left(\frac{r_1}{2} + \frac{sx_1}{2} \right)$$

$$= \frac{\dot{V}_N \omega}{s^2 + \omega^2} + i_{02}(0) \left(\frac{x_1}{2} + \frac{x_m}{2} \right) + \frac{x_1}{2} i_{r2}(0) \quad \dots\dots\dots (15)$$

Fig.12 に示す並列接続からなる閉回路の電圧方程式は、反時計方向に計算すると、式(16)となる。

$$I_{02}(s) \left(\frac{R_f}{2} + \frac{sx_m}{2} \right) - I_{r2}(s) \left(\frac{r_2'}{2(2-slip)} + \frac{sx_2'}{2} \right) \\ = \frac{x_m}{2} i_{02}(0) - \frac{x_2'}{2} i_{r2}(0) \quad \dots\dots\dots (16)$$

過渡状態における素子電流は、式(13)から(16)によって算出できる。

実機による単独運転試験は、誘導電動機負荷と共振負荷が並列に接続された回路にて行う。そのため、誘導電動機負荷を含んだ単独運転現象の解析では、3.1 節に既述した共振回路の解析モデルに、誘導電動機負荷解析モデル式(13)から(16)を組み合わせる。誘導電動機負荷と共振回路による単独運転解析モデルは、式(17)の行列表現となる。なお、誘導電動機の定数は、通常定格周波数 f にて設計されており、周波数が f に変化した場合には $f/f = \alpha$ 倍となる²⁴⁾。

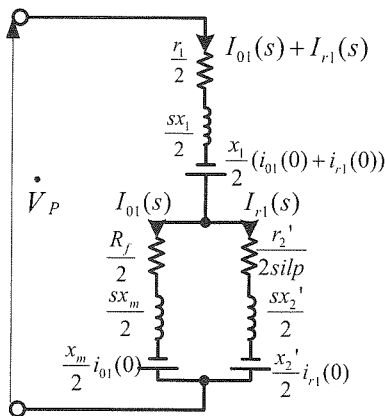


Fig. 11 Regular phase side s -function connection diagram.
図 11 正相側 s 関数回路図

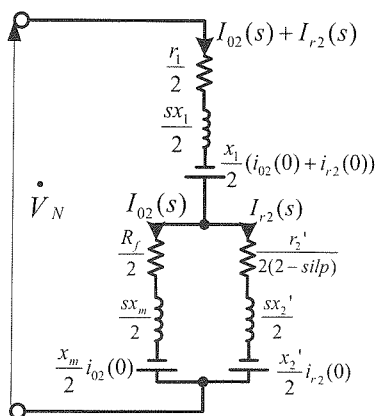


Fig. 12 Contra-phase side s -function connection diagram.
図 12 逆相側 s 関数回路図

また、すべり S については、 $1/\alpha$ 倍²⁴⁾となるので、配電線停止後の解析モデルにおけるすべり S は、 $1/\alpha$ 倍として算出した。

$$\begin{pmatrix} I_R(s) \\ I_L(s) \\ I_C(s) \\ I_{01}(s) \\ I_{r1}(s) \\ I_{02}(s) \\ I_{r2}(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ R & -sL & 0 & 0 \\ R & 0 & -\frac{1}{sC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(r_1 + R_f) + s(x_1 + x_m)}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_f + sx_m}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{r_1 + sx_1}{2} \\ -\frac{r_2' - sx_2'}{2slip} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\dot{V}_P \omega}{s^2 + \omega^2} + \frac{x_1}{2} (i_{01}(0) + i_{r1}(0)) + \frac{x_m}{2} i_{01}(0) \\ \frac{x_m}{2} i_{01}(0) - \frac{x_2'}{2} i_{r1}(0) \\ \frac{\dot{V}_N \omega}{s^2 + \omega^2} + \frac{x_1}{2} (i_{02}(0) + i_{r2}(0)) + \frac{x_m}{2} i_{02}(0) \\ \frac{x_m}{2} i_{02}(0) - \frac{x_2'}{2} i_{r2}(0) \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

4.5 誘導電動機と RLC 共振回路の解析結果

解析モデルの妥当性評価は、2.3 節に既述した単独運転実験結果と解析結果との比較による。配電線停止 0.3 秒後の電圧値を Table 5 に示す。解析結果を上段に、実験結果を中段に、そして解析値に対する誤差率を下段に示す。比較結果は、負荷条件 ($P=-5\%$, $Q=+5\%$) において最大 -2.18% と約 4V 程度の誤差となった。この負荷条件では、Fig.13 のように容量性負荷の電流の周波数だけが変動している。これは、配電線停止後に容量性負荷 C と PCS の間で発生した共振現象が原因である。そのため、共振の影響を受けた電圧値は、Fig.14(a)のように変化し、解析結果に比べ大きくなり誤差が生じた。また、時系列による比較は、誤差率が最大である負荷条件 ($P=-5\%$, $Q=+5\%$) を例に行った。比較結果は、Fig.14(a)から(f)のように PCS 運転制御の影響

による瞬時的な変動を除いて、実験値と顕著な差異が無く同等の傾向を示す。

電圧解析と同様に周波数についても解析した。配電線停止 0.3 秒後の周波数を **Table 6** に示す。解析結果を上段に、実験結果を中段に、そして解析値に対する誤差率を下段に示す。比較結果は、負荷条件 ($P=0\%, Q=-5\%$) において最大-1.39%となり約 0.7Hz 程度の誤差となった。この負荷条件では、**Fig.15** のように容量性負荷の電流の周波数だけが変動している。これは、配電線停止後に容量性負荷 C と PCS との間で発生した共振現象が原因である。そのため、共振の影響を受けた周波数は、**Fig.16** ように変化し解析結果に比べ大きくなり、誤差が生じた。

他の負荷条件においても同様に比較を行い、PCS の運転制御や共振現象による瞬時的な変動を除いて実験値と解析結果がよく一致する。したがって、誘導電動機負荷の解析モデルの妥当性が確認できた。

5. まとめと今後の展望

本論文では、一般住宅用太陽光発電システムの共振回路および単独運転試験用に用いられる誘導電動機について、連立微分方程式をラプラス変換し行列演算解析モデルを作成した。解析結果は、実験結果とよく一致することを確認し解析モデルの妥当性を検証した。解析モデルは、実機では容易に行えない詳細な負荷条件の設定が可能である。そのため、単独運転現象を継続させ易い負荷条件を容易に見つけやすい。また、誘導電動機負荷の特性を考慮した解析モデルによって、同負荷による影響も解析可能とした。誘導電動機負荷の解析は、定数を変えることで、異なる機種種の解析が可能である。この結果、実機による試験時間の短縮および設備コストの削減が可能である。今回作成した解析モデルは、MATLAB によって解析されたが、行列計算が可能な解析プログラムへの転用は容易に行える。そのため、汎用性が高い。

今後は、PCS による共振現象、PCS 制御運転機能や単独運転検出装置の運転制御機能など制御に関する標準モデルの検討を行い、単独運転時における解析精度の向上を図る。

謝 辞

本研究において、数々の助言を頂いた財団法人電力中央研究所上席研究員の小林広武氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 経済産業省原子力安全保安院:「電気設備の技術基準」, 平成 20 年 10 月解釈改正
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁:「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」, 経済産業省 資源エネルギー庁策定, 平成 16 年 10 月 1 日
- 3) 社団法人日本電気協会 系統連系専門部会:「系統連系規格 JEAC 9701-2006」, オーム社, 2006
- 4) 財団法人電力中央研究所, 関西電力 株式会社:「サ

Table 5 Voltage of 0.3seconds it blacks out.

表 5 配電線停止 0.3 秒後の電圧

Reactive power Q [Var]		Active power P [W]				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Analysis	209.4	202.7	200.3	195.4	193.9
	Actual	207.7	202.6	199.9	196.2	191.8
	Error rate	0.81%	0.04%	0.20%	-0.40%	1.09%
-5%	Analysis	210.9	203.9	201.4	196.9	193.7
	Actual	210.2	203.4	200.0	197.6	193.5
	Error rate	0.33%	0.24%	0.70%	-0.35%	0.10%
0%	Analysis	208.9	207.9	198.8	193.9	191.6
	Actual	209.6	205.7	198.7	195.8	190.0
	Error rate	-0.33%	1.06%	0.05%	-0.97%	0.84%
+5%	Analysis	204.2	202.3	199.8	196.1	188.1
	Actual	203.8	205.5	198.0	196.4	188.9
	Error rate	0.19%	-1.55%	0.90%	-0.15%	-0.42%
+10%	Analysis	213.6	201.5	200.4	200.3	187.6
	Actual	212.0	202.0	201.9	197.7	188.2
	Error rate	0.75%	-0.24%	-0.74%	1.31%	-0.31%

Upper row (Analysis of MATLAB)

Middle (Result of actual)

Lower (Error rate of analysis and actual.)

Table 6 Frequency of 0.3seconds after it blacks out.

表 6 配電線停止 0.3 秒後の周波数

Reactive power Q [Var]		Active power P [W]				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Analysis	46.95	47.17	46.51	46.08	45.87
	Actual	46.94	46.78	46.34	46.31	46.11
	Error rate	0.02%	0.83%	0.33%	-0.06%	-0.52%
-5%	Analysis	48.78	48.54	48.08	48.07	47.62
	Actual	48.76	48.74	48.76	48.26	47.72
	Error rate	-0.57%	-0.41%	-1.39%	-0.39%	-0.20%
0%	Analysis	50.51	49.50	49.50	50.00	49.26
	Actual	50.41	49.75	49.44	49.98	49.36
	Error rate	0.19%	-0.50%	0.12%	0.04%	-0.20%
+5%	Analysis	51.81	51.54	50.76	51.02	51.28
	Actual	51.49	51.52	50.86	50.88	51.25
	Error rate	0.62%	0.05%	-0.19%	0.27%	0.05%
+10%	Analysis	53.48	53.19	53.76	53.48	52.63
	Actual	54.17	53.31	53.63	53.61	52.70
	Error rate	-1.27%	-0.22%	0.24%	-0.24%	-0.13%

Upper row (Analysis of MATLAB)

Middle (Result of actual)

Lower (Error rate of analysis and actual.)

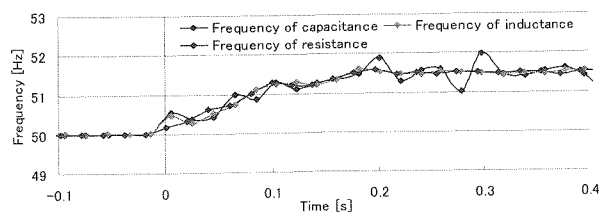
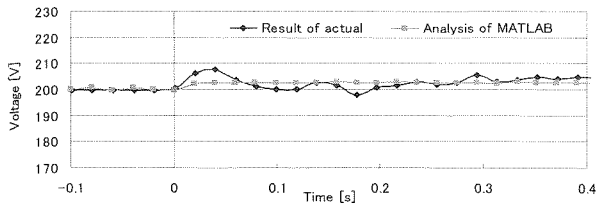
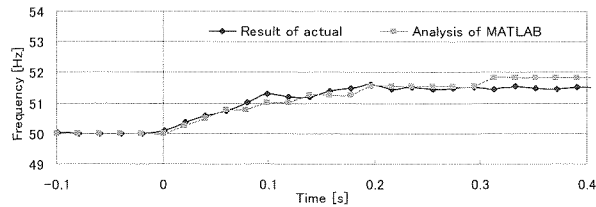


Fig.13 Frequency of inductance current, capacitance current and resistance current load condition ($P=-10\%, Q=0\%$).

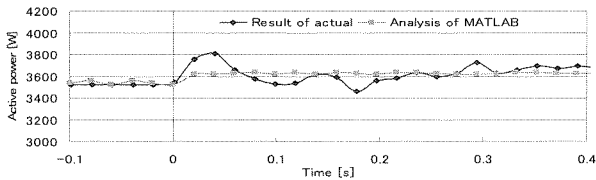
図 13 誘導性、容量性および抵抗負荷電流の周波数負荷条件 ($P=-10\%, Q=0\%$)



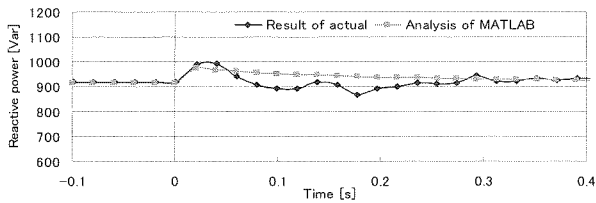
(a) Comparison of voltage.
(a) 電圧比較



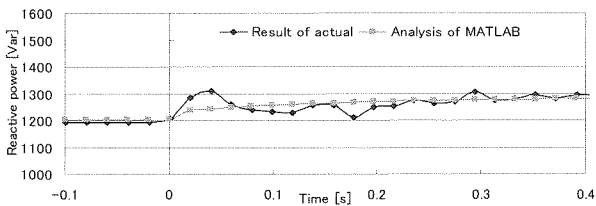
(b) Comparison of frequency.
(b) 周波数比較



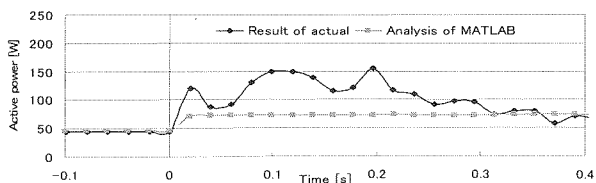
(c) Comparison of active power.
(c) 抵抗消費電力比較



(d) Comparison of inductance reactive power.
(d) 誘導性無効電力比較



(e) Comparison of capacitance reactive power
(e) 容量性無効電力比較



(f) Comparison of induction motor.
Fig.14 Load condition($P=-5\%$, $Q=+5\%$).

(f) 誘導電動機有効電力比較
図 14 負荷条件 ($P=-5\%$, $Q=+5\%$)

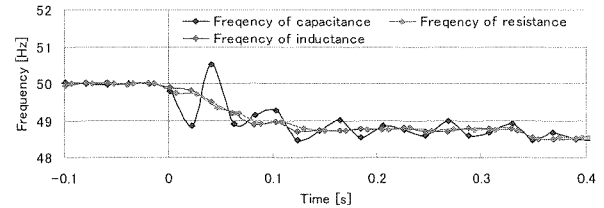


Fig.15 Comparison of frequency($P=-5\%$, $Q=+5\%$).

図 15 負荷条件 ($P=-5\%$, $Q=+5\%$) の周波数比較

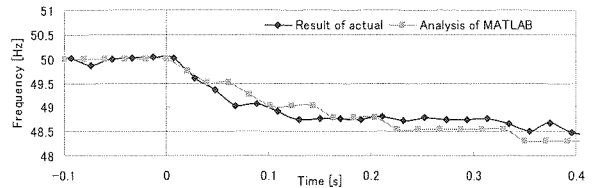


Fig.16 Comparison of frequency($P=0\%$, $Q=-5\%$).

図 16 負荷条件 ($P=0\%$, $Q=-5\%$) の周波数

シャイン計画 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)委託業務成果報告書(総括版)」として、平成 3 年度「太陽光発電システム実用化技術開発「周辺技術の研究開発」(系統連系制御技術の実証研究開発)」, 平成 3 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 1991

- 5) 財団法人電力中央研究所:「ニューサンシャイン計画 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として、平成 5 年度「太陽光発電システム評価技術の研究開発」(周辺技術評価システムの研究開発)」, 平成 5 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 1993
- 6) 財団法人電力中央研究所:「ニューサンシャイン計画 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として、平成 5 年度「太陽光発電システム実用化技術開発「太陽光発電利用システム評価技術の研究開発」(周辺技術評価システムの研究開発)」, 平成 5 年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 1993
- 7) 財団法人電力中央研究所:「ニューサンシャイン計画 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として、平成 6 年度「太陽光発電システム実用化技術開発「太陽光発電利用システム評価技術の研究開発」(周辺技術評価システムの研究開発)」, 平成 6 年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書, 1994
- 8) 財団法人電力中央研究所:「ニューサンシャイン計画 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として、平成 7 年度「太陽光発電システム実用化技術開発「太陽光発電利用システム評価技術の研究開発」(周辺技術評価システムの研究開発)」, 平成 7 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務

- 務成果報告書，1995
- 9) 財団法人電力中央研究所：「ニューサンシャイン計画新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として，平成8年度「太陽光発電システム実用化技術開発(太陽光発電利用システム評価技術の研究開発)(周辺技術評価システムの研究開発)」，平成8年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書，1996
- 10) 財団法人日本電気用品試験所：「新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として，平成4年度「分散型新発電技術実用化実証研究に関する保護機能等試験方法の確立」，平成4年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書，1992
- 11) 財団法人日本電気用品試験所：「新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託業務成果報告書」として平成5年度「分散型新発電技術実用化実証研究に関する保護機能等試験方法の確立」，平成5年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書，1993
- 12) 財団法人電気安全環境研究所：「太陽電池発電システム用系統連系保護装置等の試験方法(平成14年10月)」，2003
- 13) Hironobu Igarashi：「The tests of islanding have an influence on motor」，Proc for 2005 National Convention Record IEE Japan, No.6-192, p.341~342, 2005
五十嵐広宣：「単独運転防止試験時の回転機負荷影響について」，平成17年度電気学会全国大会, No.6-192, p.341~342, 2005
- 14) 村上高德，黒川浩助，小林広武，滝川清：「系統連系型太陽光発電の動特性シミュレーション -誘導機負荷が単独運転検出装置に与える影響の評価-」，平成10年電気学会電力エネルギー部門大会，P472~P473，1998
- 15) Hironobu Igarashi：「About the influence on the difference and the Islanding test of the resonance load and the motor load」，IEEE Trans. PE，Vol.127 No1, p.192~199, 2007
五十嵐広宣：「共振負荷と回転機負荷の相違と単独運転試験への影響について」，平成19年電気学会論文誌 B，平成19年1月 Vol.127, p.192~199, 2007
- 16) Hironobu Igarashi：「About the power generation confirmation of the induction motor and the influence on the islanding detection device」，IEEE Trans. PE，Vol.128 No7, p.967~975, 2008
- 17) IEC 62116 Ed1.0：「Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters」，2008
- 18) 谷口治人，田中和幸，内田直之著：「電力系統解析システム」，電気学会論文誌 B，Vol.128, p.377~380, 2008
- 19) 財団法人電力中央研究所ホームページ：「EMTP-DCG プロジェクトの結成と経過」，
<http://criepi.denken.or.jp/JDCG/page01/jdgcg011.htm>
- 20) Shuichi Shibata, Kazuya Miyunami, Kiyoshi Takigawa, Hiroyuki Sugihara：「A CPAT Simulation Analysis on the Effect of Islanding Protection under Clustered PV application 500 PV Systems」，IEEE Trans. PE，Vol.127 No10, p.1067~1072, 2007
柴田秀一，宮南一也，滝川清，杉原裕征：「500 台規模太陽光発電システム集中連系時の単独運転検出機能の Y 法解析手法」，平成20年電気学会論文誌 B，平成19年10月，Vol.127, p.1067~1072, 2007
- 21) 日本工業規格：「一般用低圧三相かご形誘導電動機：JIS C 4210-2001」
- 22) 社団法人電気学会著：「電気工学ハンドブック」，1988
- 23) 見城尚志監修，三宅博著：「小型 AC モータの設計と制御~BASIC から CAD まで~」
- 24) 荻野昭三著：「誘導電動機の特性」，電気書院，2007