About the Power Generation Confirmation of the Induction Motor and the Influence on the Islanding Detection Device

Hironobu Igarashi Member (Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories)
 Takashi Sato Non-member (Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories)
 Kazunori Miyamoto Student Member (Tokyo University of Agriculture and Technology)
 Kousuke Kurokawa Member (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Keywords: photovoltaic system, induction motor, islanding detection device, islanding, generator

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 islanding detection device detected purpose install for blackout due to the accident occurrence of the earth fault and the short-circuit in the utility line.

When the islanding detection device detects the power blackout, it is necessary to stop the photovoltaic generation system immediately. If the photovoltaic generation system is not stopped immediately, electricity comes to charge the utility power line very at risk. But, we had already known that the islanding detection device can't detect the islanding phenomenon, if is there the induction motor in the loads.

Authors decided to investigate the influence that the induction motor gave to the islanding detection device. Two causes to which the induction motors continues the islanding are thought. When the frequency decreases after the supply of electric power line stops, a synchronous speed of the induction motors decreases, the rotor with the inertia energy maintains the rotational speed, and the state of the dynamo and the state are thought to be changeable from the state of the induction motors. It is thought that it has the action to which the voltage decrease is controlled in addition by supplying active power when the induction motors exists from these as a load of the distribution line. It is thought that the induction motors is a load in which the individual operation is continued easily from the geostationary type load by these characteristic changes. Secondary, the constant of the induction motors usually has rated frequency f design. The frequency becomes f' when changing $f'/f = \alpha$ time. Therefore, reactance is changed depending on the changing frequency and the amount of a reactive power will change, too. Therefore, it is possible that the induction motors has the action that makes amends for the reactive power according to the change in frequency.

We confirmed validity from the result of the experiment by using PCS in which the above-mentioned event was marketed.

We confirmed the induction motors was changed into the dynamo by the experiment result. The induction motors and the resistance load are connected in parallel and the power generation confirm method of the induction motors is cut off from the power supply. And, slipping was calculated from a rotational speed and a synchronous speed of the induction motors after it had cut off the power supply. The calculation result of showing in Fig. 1 is a result of confirming slip less than 0. Therefore, it was clarified to have changed the induction motors into the dynamo. The induction motor change to generator that the load condition is restraining voltage. Moreover, it was clarified that the time of the islanding continuance was long

Fig. 1. Calculation result at slip

Table 1. Inductance value change table of induction motors

Upper row (Before cut out utility line)
 The lower (0.3 seconds after cut out utility line)

Reactive power (Var)		Active power (W)				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Normal operation	114mH	114mH	114mH	115mH	116mH
	0.3seconds after	44mH	54mH	84mH	90mH	84mH
-5%	Normal operation	114mH	115mH	114mH	115mH	114mH
	0.3seconds after	60mH	115mH	94mH	104mH	103mH
0%	Normal operation	114mH	114mH	114mH	115mH	116mH
	0.3seconds after	50mH	95mH	117mH	128mH	116mH
+5%	Normal operation	116mH	114mH	114mH	114mH	115mH
	0.3seconds after	98mH	136mH	127mH	118mH	154mH
+10%	Normal operation	113mH	114mH	114mH	115mH	114mH
	0.3seconds after	79mH	85mH	84mH	95mH	50mH

compared with the load condition of not changing into the state of the generator.

Next, whether the inductance of the induction motors had changed from the islanding experiment from Table 1 was verified.

The value changes into the reactance of the induction motors according to the frequency change after the supply of electric power line stops. The frequency after the supply of electric power line stops changes for the unbalance the reactive power by the effect of the power rate constancy control with PLL of the power conditioner. However, induction motors also change frequency, makes amends for the amount of reactive power, and the change in the frequency after the supply of electric power line stops as a result is controlled. When the frequency changed after the supply of electric power line stopped, it was clarified of the action on the direction where it made amends from the change of the constant for the amount of reactive power, and the possession of the characteristic in which the continuance of the individual operation was promoted.

誘導電動機の発電確認と単独運転検出装置への影響について

正員 五十嵐広宣^{*,**} 非会員 佐藤 孝則^{*}
 学生員 宮本 和典^{**} 正員 黒川 浩助^{**}

About the Power Generation Confirmation of the Induction Motor and the Influence on the Islanding Detection Device

Hironobu Igarashi^{*,**}, Member, Takashi Sato^{*}, Non-member, Kazunori Miyamoto^{**}, Student Member, Kousuke Kurokawa^{**}, Member

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 islanding detection device detected purpose install for blackout due to the accident occurrence of the earth fault and the short-circuit in the utility line. When the islanding detection device detects the power blackout, it is necessary to stop the photovoltaic generation system immediately. If the photovoltaic generation system is not stopped immediately, electricity comes to charge the utility power line very at risk. We had already known that the islanding detection device can't detect the islanding phenomenon, if is there the induction motor in the loads. Authors decided to investigate the influence that the induction motors gave to the islanding detection device. The result was the load condition that the induction motors changed generator the voltage is restraining. Moreover, it was clarified that the time of the islanding was long compared with the load condition of not changing into the state of the generator. The value changes into the reactance of the induction motors according to the frequency change after the supply of electric power line stops. The frequency after the supply of electric power line stops changes for the unbalance the reactive power by the effect of the power rate constancy control with PLL of the power conditioner. However, the induction motors is also to the changing frequency, makes amends for the amount of reactive power, and the change in the frequency after the supply of electric power line stops as a result is controlled. When the frequency changed after the supply of electric power line stopped, it was clarified of the action on the direction where it made amends from the change of the constant for the amount of an invalid electric power, and the possession of the characteristic in which the continuance of the individual operation was promoted.

キーワード：太陽光発電システム，誘導電動機，単独運転検出装置，単独運転，発電機

Keywords: photovoltaic system, induction motor, islanding detection device, islanding, generator

1. はじめに

太陽光発電システムなどの分散型発電システムは，電力会社などの配電線に連系運転を行う際に，配電線における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⁾及び

系統連系規程⁽³⁾によって定められた単独運転検出装置などの保護装置を具備することが求められている。

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，地絡や短絡事故等による配電線停止が発生した場合に安全を確保するため，同停止状態を速やかに検出し太陽光発電システムなどを当該配電線から解列させ，配電線への電力供給（逆充電）を停止させることを目的としている。

単独運転検出装置の機能を試験評価する場合は，安全性を保証する上で実態に即した範囲内で最も単独運転現象が継続し易い条件を考慮して設定する必要がある。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⁾や回転機負荷⁽⁵⁾などの配電線停止

* (財) 電気安全環境研究所

〒151-8545 東京都渋谷区代々木 5-14-12

Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories
5-14-12, Yoyogi, Shibuya-ku, Tokyo 151-8545

** 国立大学法人東京農工大学工学府電子情報工学専攻

〒184-8588 小金井市中町 2-24-16

Tokyo University of Agriculture and Technology
2-24-16, Naka-cho, Koganei 184-8588

時に単独系の周波数や電圧を維持する特性を持つ回生負荷を考慮する必要がある。

実際に共振負荷や回転機負荷などの回生エネルギーを持つ負荷が配電線にある場合に、単独運転現象が継続することが確認されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、著者らは、同じ回生エネルギーを持つ共振負荷と回転機負荷を用い、単独運転検出装置へ与える影響について比較試験を行い、共振負荷よりも回転機負荷が、単独運転現象継続時間が長くなりより厳しい条件であることを明らかにした⁽⁸⁾。

回生負荷を用いた単独運転検出装置の標準的な試験方法の検討は、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^{(9)~(14)}により実施された経緯がある。この中では、10kW未満の住宅用低圧系統連系太陽光発電用パワーコンディショナの単独運転試験方法の負荷条件について検討を行い、①実際に低圧需要家で使用されている負荷の中で回生エネルギーが最も大きい分類に属していること、②将来の認証制度において実用的なものやJIS規格化への適用を配慮し、比較的安価で一般的に入手し易いこと、を同時に満たす負荷として、グラインダー（研磨用砥石付き645Wコンデンサ誘導電動機）が採用された。これらの検討結果は、財団法人電気安全環境研究所（JET）の認証試験方法⁽¹⁵⁾に反映された。

近年、太陽光発電システムの世界的導入拡大により、IEC規格⁽¹⁶⁾などの国際規格化の動きが活発化しており、単独運転検出装置の試験方法は、今後の改訂を含め国際規格への反映が望まれている。この中では、上記誘導電動機または、本電動機の特性を標準化するための共通的なモデルを作成する必要がある。このためには、同誘導電動機の単独運転時の挙動を詳細に解明する必要があるが、これまでにない。

今回、著者らは、単独運転検出装置の評価手法用として用いられている誘導電動機について、配電線から切り離された後の挙動に着目し、誘導電動機の挙動及びその挙動が単独運転検出装置へどのような影響を与えているのかを検証した。

2. 系統連系形太陽光発電システム用パワーコンディショナの単独運転時の運転特性

〈2・1〉 太陽光発電システム用パワーコンディショナの制御方式 太陽光発電システム用パワーコンディショナ（PCS）は、常に変化する気象条件でも太陽光電池の発電電力を配電線に効率良く出力する必要がある。そのため、PCSは、最大電力追従制御（MPPT制御）により出力電力値を太陽電池出力に応じて制御しながら、出力損失や配電線損失を軽減するために無効電力の発生を抑え運転を行うことが要求されており、これらの運転条件を満たす制御方法として電圧型電流制御方式を多くの機種が採用している。

電圧型電流制御方式は、系統電圧の周波数及び位相に一致するようPLL制御回路（位相同期回路）によって出力電流を直接制御し、力率1での運転を行うものである。また、

同時に負荷の急峻な変動にも強く、配電線の短絡時においても瞬時に電流を制御できることから、安全性及び電力品質の面で優れており、電力品質確保に係わる系統連系技術要件ガイドラインにおいても推奨されている。

〈2・2〉 配電線停止後の周波数・電圧変化に与える影響

電圧型電流制御方式のPCSは、PLL制御回路によって、基本的に力率が一定（通常は1）となるように、出力電流の周波数及び位相を制御している。配電線停止直前に、特に発電量と負荷量の間の無効電力が不平衡状態にある場合は、配電線停止直後に一時的に不平衡分をPCSが賄うことになる。この結果、上記の力率一定制御により出力電流位相を変化させ力率を戻そうとするが、系統電圧が存在しないため、電流位相の変化とともに電圧位相も変化し、結果的に周波数の変化を招くこととなる。

電圧については、有効電力の不平衡度の影響を特に受け、単独運転後、基本的には負荷の抵抗分とMPPT制御による出力電力一定の条件により定まる電圧値に変化する。

3. 考えられる単独運転時における誘導電動機の特性変化

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' のように変化した場合には $f'/f = \alpha$ 倍となる⁽¹⁷⁾。そのため、変化する周波数によってリアクタンスが変化し無効電力量も変化するようになる。したがって、誘導電動機は、周波数の変化によっては、無効電力を補償する作用をもつことが考えられる。

配電線停止後に周波数が低下した場合は、誘導電動機の同期速度が低下し、慣性エネルギーを持った回転子が回転数を維持することにより、誘導電動機状態から発電機状態へと状態を変化するものと考えられる。これらから誘導電動機が配電線の負荷として存在する場合には、更に有効電力の供給により電圧低下を抑制する作用も持つものと考えられる。これらの特性変化により、誘導電動機は、共振負荷などの静止形負荷よりも単独運転を継続させ易い負荷であることが考えられる。

以上の考察の妥当性について、実験により検証した。

4. 誘導電動機の在否と単独運転継続時間の関連

〈4・1〉 誘導電動機の在否による単独運転現象継続の検証 単独運転現象の継続時間は、誘導電動機が負荷として存在する場合に長くなる傾向にある⁽⁶⁾。誘導電動機が負荷として接続されている場合の影響について、誘導電動機の在否により検証を行った。

単独運転継続時間の計測は、図1に示すJET認証試験方法⁽¹⁵⁾及びIEC規格⁽¹⁶⁾において採用されている一般住宅用太陽光発電システムが配電線に連系運転している状態をモデル化した回路を用いて行った。

実験に用いたPCSは、市場で多く使用されている定格出力4[kW]モデルを用いた。保護継電器の設定値は、工場出荷時整定値（過電圧検出値115.0[V]、不足電圧検出

値 85.0 [V], 過周波数検出値 51.0 [Hz], 不足周波数検出値 48.5 [Hz]) とした。また, 単独運転検出装置の受動的及び能動的検出装置については, 配電線停止後の周波数などへの影響を無くす目的からマスクした。

〈4・2〉 単独運転試験用誘導電動機の概要 単独運転継続時間の計測に用いられている誘導電動機は, 一般に市販されているグラインダーと言われる機器である。通常グラインダーは, 誘導電動機のシャフト部分に研磨用の砥石を固定し, 高速回転している砥石部分に鉄等の切れ端部分を当て, 研磨を行う工作機器である。グラインダーの仕様を表 1 に示す。

グラインダーを単独運転試験用の負荷として使用する場合は, 空回転 (無負荷運転) 状態にて運転する。空回転とする理由は, 砥石自身の重さと大きさによって定まる慣性モーメントが運動エネルギーとして慣性負荷となり, 配電線停止後も回転を継続しエネルギーを放出すると考えられているからである。

〈4・3〉 単独運転継続時間の計測方法 単独運転継続時間の計測方法は, 図 1 に示す負荷 (R_{ASC}) が接続されている箇所を潮流点とし, 潮流点の有効及び無効電力を W_{e2} 及び W_{r2} によって計測し, 順潮流及び遅れをプラスとし逆潮流及び進みをマイナスとし以下に示す手順にて行った。

- ① PCS は, 定格電圧 200 [V], 定格周波数 50 [Hz] にて, 定格出力状態の 4 [kW] となるよう運転を行う。
- ② 潮流点の有効電力は, PCS の定格出力に対して -10% (-400 W), -5% (-200 W), 0% (0 W), +5% (200 W), +10% (400 W) となるよう抵抗負荷の調整を行った。
- ③ 潮流点の無効電力は, PCS の定格出力に対して, -10% (-400 Var), -5% (-200 Var), 0% (0 Var) と

表 1 グラインダーの仕様

Table 1. Specification of grinder.

Electric ratings	Size of motor W[m] × H [m]	The size of the Flywheel D[m]W[kg]	Moment of inertia [kg・m ²]
1 Φ 100 V, 6.5 A, 2pole type 50/60Hz, 2960/3560rpm Output power 645W	W:0.452 H:0.267	D:0.205×2 W:1.300×2	0.015

図 1 単独運転実験回路図

Fig. 1. The circuit of islanding tests.

なるように容量性負荷を調整する。また, 無効電力量を +5% (200 Var), +10 (400 Var) に調整する場合は, 誘導性負荷を調整する。

- ④ 単独運転継続時間の計測は, $t = 0$ のタイミングで開閉器 SW_{CB} を開放し, PCS のゲートブロック信号及び解列信号 (開閉器解列信号) が出力されるまでの ΔX [Sec] について測定を行う。

〈4・4〉 単独運転継続時間の計測結果 誘導電動機を接続しない状態の単独運転継続時間結果を表 2 上段に示し, 誘導電動機を接続した状態の単独運転継続時間結果を表 2 の中段に示す。また, 表 2 中段の誘導電動機がある状態の単独運転継続時間から表 2 上段誘導電動機が無い状態での単

表 2 誘導電動機在否による単独運転継続時間

Table 2. Islanding continuance time when with or without Induction motors.

Reactive power (Var)		Active power (W)				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Without Induction motor	550ms	579ms	550ms	564ms	558ms
	With Induction motor	659ms	650ms	611ms	617ms	591ms
	Differences	109ms	71ms	61ms	53ms	33ms
-5%	Without Induction motor	577ms	574ms	576ms	618ms	642ms
	With Induction motor	Islanding	Islanding	Islanding	793ms	689ms
	Differences	—	—	—	175ms	47ms
0%	Without Induction motor	615ms	654ms	654ms	650ms	790ms
	With Induction motor	585ms	Islanding	Islanding	Islanding	742ms
	Differences	-30ms	—	—	—	-48ms
+5%	Without Induction motor	569ms	584ms	592ms	600ms	564ms
	With Induction motor	578ms	673ms	867ms	Islanding	Islanding
	Differences	9ms	89ms	275ms	—	—
+10%	Without Induction motor	576ms	541ms	564ms	569ms	548ms
	With Induction motor	552ms	585ms	591ms	584ms	587ms
	Differences	-24ms	44ms	27ms	15ms	39ms

Upper row (Without Induction motor), The middle (With Induction motor)

The lower (Differences of the without Induction motor and with Induction motors)

独運転継続時間を差し引いた時間を表2下段に示す。

誘導電動機がない状態での実験結果は、負荷条件に関係なく配電線停止後から600 mS前後で運転が停止していることが確認できた。また、誘導電動機がある状態での実験結果は、発電量と負荷量が平衡状態 ($P = 0\%$, $Q = 0\%$) にある負荷条件を中心に単独運転が1秒以上継続していることが確認できた。なお、表2中の単独運転が1秒以上継続している負荷条件については、単独運転として表記し、判明し易くする目的でマーキングを行い、以降関連する表3、表4、表5、表6も同様に単独運転を1秒以上継続している負荷条件についてもマーキングを行った。

単独運転継続時間は、誘導電動機が負荷として存在する場合に長くなる傾向にあるが、表2の下段に示すように一部の負荷条件において誘導電動機がない方が単独運転の継続時間が長いことが示された。この事象については、負荷条件 ($P = -10\%$, $Q = 0\%$) を例に検証を行った。検証結果は、配電線停止後の周波数が過周波数継電器の検出値を超えるまでの時間が、誘導電動機がある状態では39.3[ms]、誘導電動機がない状態では78.9[ms]と差異があり、配電線停止後の周波数変化率の違いにより単独運転継続時間が短くなったものと考えられる。

当該実験結果は、誘導電動機が負荷として存在する場合に単独運転現象が長くなる傾向にあることが明らかになった。単独運転が継続する要因は、配電線停止後の電圧及び周波数の変化が少ないことが考えられる。そのため、配電線停止0.3秒後の電圧及び周波数について分析を行った。

〈4・5〉 配電線停止後の周波数分析結果 誘導電動機を接続しない状態での周波数分析結果は、最大55.60[Hz]、最小44.42[Hz]と過不足周波数継電器の検出値を超過していることが明らかになった。また、他の負荷条件すべてにおいても同様に継電器の検出値を超過していることが併せて明らかになった。分析結果を表3の上段に示す。

誘導電動機を接続した状態での周波数分析結果は、最大54.01[Hz]、最小46.50[Hz]であり誘導電動機を接続しない状態に比べ変化が少ないことが明らかになった。また、単独運転が1秒以上継続している負荷条件の周波数変化は、過不足周波数継電器の検出値以内で維持されていることが併せて明らかになった。分析結果を表3の下段に示す。

〈4・6〉 配電線停止後の電圧分析結果 誘導電動機在否による電圧解析結果を表4に示す。表4の誘導電動機を接続しない状態での電圧分析結果は、最大220.02[V]、最小184.11[V]であった。また、誘導電動機を接続した状態における電圧分析結果は、最大229.80[V]、最小187.68[V]で、いずれも過不足電圧継電器の検出閾値を超過している値はないことが明らかになった。配電線停止後における電圧値は、数箇所の負荷条件を除いて、誘導電動機を接続した状態のほうが高くなることが明らかになった。

これらの結果から誘導電動機は、周波数の変化の抑制と電圧の低下を抑える効果があることを確認した。

表3 誘導電動機在否による配電線停止0.3秒後の周波数解析結果

Table 3. Frequency analysis result after 0.3 seconds after it blacks out when with or without Induction motor.

Reactive power (Var)		Active power (W)				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Without Induction motor	44.42Hz	44.56Hz	44.48Hz	44.59Hz	44.67Hz
	With Induction motor	47.37Hz	47.28Hz	46.94Hz	46.82Hz	46.50Hz
-5%	Without Induction motor	44.92Hz	44.96Hz	45.02Hz	45.07Hz	45.06Hz
	With Induction motor	49.19Hz	48.52Hz	48.50Hz	48.49Hz	47.76Hz
0%	Without Induction motor	54.95Hz	46.03Hz	46.09Hz	46.15Hz	47.83Hz
	With Induction motor	52.14Hz	49.19Hz	50.90Hz	50.59Hz	47.94Hz
+5%	Without Induction motor	54.91Hz	55.27Hz	55.05Hz	54.54Hz	54.54Hz
	With Induction motor	52.23Hz	51.24Hz	50.89Hz	50.60Hz	50.58Hz
+10%	Without Induction motor	55.56Hz	55.57Hz	55.49Hz	55.60Hz	55.42Hz
	With Induction motor	54.01Hz	53.37Hz	52.88Hz	52.41Hz	53.02Hz

Upper row (Without Induction motor), The lower (With Induction motor)

表4 誘導電動機在否による配電線停止0.3秒後の電圧解析結果

Table 4. Voltage analysis result after 0.3 seconds after it blacks out when with or without Induction motor.

Reactive power (Var)		Active power (W)				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Without Induction motor	219.07V	204.19V	198.44V	194.65V	188.96V
	With Induction motor	229.80V	210.11V	202.05V	196.90V	192.13V
-5%	Without Induction motor	220.02V	205.48V	199.39V	194.52V	184.11V
	With Induction motor	221.65V	204.11V	199.30V	197.46V	191.41V
0%	Without Induction motor	209.76V	204.25V	199.67V	193.81V	190.52V
	With Induction motor	215.60V	202.82V	199.45V	194.43V	187.68V
+5%	Without Induction motor	218.91V	213.96V	199.63V	193.45V	192.63V
	With Induction motor	208.77V	204.06V	199.42V	195.68V	190.02V
+10%	Without Induction motor	209.32V	203.84V	199.54V	193.48V	187.93V
	With Induction motor	216.41V	203.37V	200.08V	193.00V	188.19V

Upper row (Without Induction motor), The lower (With Induction motor)

5. 誘導電動機による電圧維持の検討

〈5・1〉 配電線停止後の誘導電動機挙動について 誘導電動機によって電圧値が維持される要因は、電動機状態から発電機状態へ変化した可能性が考えられる。そのため、配電線停止後における誘導電動機の挙動についてPCSを連

系しない(誘導電動機単体)状態にて検証を行った。なお、今回検証を行った誘導電動機は、前章の単独運転継続時間の計測に用いたものと同一の誘導電動機である。

誘導電動機の構成は、主巻線及び副巻線にコンデンサを直列接続した一般的なコンデンサ型誘導電動機である。

配電線停止後の運転状態の確認方法は、図2に示す回路にて以下の手順に従い、主巻線電流 A_m 、副巻線電流 A_s 、コモン電流 A_c 、電圧 V_1 及び回転数 N_r の計測を行った。

- ① 誘導電動機を定常運転状態とし無負荷運転とする。
- ② 並列抵抗負荷 R を $10[\Omega]$ に設定し、 SW_r を投入する。
- ③ $t=0$ のタイミングで開閉器 SW_{mg} を開放し、配電線が停止した状態を模擬する。
- ④ 開閉器 SW_{mg} 開放前後の電圧、電流及び回転数を測定する。

実験結果は、図3に示すように開閉器 SW_{mg} 開放直後に、コモン電流 A_c 及び主巻線電流 A_m の流れる方向が反転していることが確認された。

主巻線電流 A_m 及びコモン電流 A_c の流れる向きが反転する現象は、誘導電動機状態として運転を行っている状態から、開閉器 SW_{mg} を開放した後に発電機状態に変化し、並列に接続された抵抗負荷 R に電力を供給したことによるものと考えられる。しかし、実験結果からでは、誘導電動機状態から発電機状態に変化したのか不明確である。

そこで、誘導電動機特有であるすべりに着目し、分析を

図2 誘導電動機の回路図

Fig. 2. Circuit chart of induction motor.

図3 誘導機負荷の発電状態計測結果

Fig. 3. Power generation state measurement result of inducement machine load.

行うこととした。

〈5・2〉 誘導電動機の発電状態分析 誘導電動機は、通常すべりが0から1の範囲で運転されている。そのため、誘導電動機の同期速度 N_s が回転数 N_r を越え、すべりが0以下で運転されていれば発電機状態に変化していることになる。

通常すべりは、(1)式の同期速度と回転数から求められる。

$$S = \frac{(N_s - N)}{N_s} \dots\dots\dots (1)$$

S : すべり [-], N_s : 同期速度 [rpm],

N : 回転数 [rpm]

しかし、同期速度 $[N_s]$ は、(2)式に示すように周波数 f の値に合わせて変化する。

$$N_s = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots (2)$$

N_s : 同期速度 [rpm], f : 周波数 [Hz],

p : 磁極の数

そのため、配電線停止後の周波数 F は、一定でないことから誘導電動機に残る電圧 V_1 から算出した。

配電線停止後の周波数 F は、(3)式に示すように電圧 V_1 が0[V]を通過する点をゼロクロス点として求め、そのゼロクロス点間の一周期毎の時間 t [ms] を(3)式に代入し算出した。

$$F = \frac{1}{t} \dots\dots\dots (3)$$

F : 周波数 [Hz], t : ゼロクロス間の時間 [ms]

図4 同期速度の計算結果

Fig. 4. Calculation result of synchronous speed.

図5 すべりの算出結果

Fig. 5. Calculation result of slip.

配電線停止後の同期速度は、算出した周波数 f [Hz] を (2) 式に代入し算出した。算出した同期速度 N_s 及び実測回転数 N_r を図 4 に示す。

また、配電線停止後のすべりについては、算出した同期速度 N_s 及び実測した回転数 N_r を (1) 式に代入し算出した。すべりの算出結果を図 5 に示す。

〈5・3〉 配電線停止後の誘導電動機挙動分析結果 すべりの算出結果は、配電線停止後に 0 以下となり、発電機状態へ変化していることが示された。

誘導電動機が発電機状態へと変化する要因は、切り離された配電線内の周波数が低下し、慣性エネルギーによって回転子の回転数が維持され同期速度が回転数を下回ったことによるものである。

誘導電動機が発電機状態に変化することが明らかになったことから、誘導電動機が発電機状態への変化と単独運転継続時間との関連について検証を行うこととした。

検証方法は、〈4・3〉節において行った実験について誘導電動機が配電線停止後に発電機状態へ変化しているのかを確認した。単独運転継続時間におけるすべりを表 5 に示す。

誘導電動機は、表 5 に示すように発電機状態に変化している負荷条件では、表 4 に示した誘導電動機がない状態の負荷条件と比べて一部の負荷条件 ($P = -5\%$, $Q = 0\%$) を除いて電圧の低下が抑えられていることが確認できた。また、誘導電動機が、発電機状態に変化していない負荷条件においても電圧の低下が抑えられている。これらの要因については、計測結果から誘導電動機の共振による影響のものと負荷の特性によるものに分類することができる。

負荷条件 ($P = -10\%$, $Q = 0\%$) 及び ($P = -10\%$, $Q = +10\%$) は、約 7 [V] 程度の電圧差が発生している。これは、計測結果から誘導電動機の主巻線電流の周波数が大きく変動し、それに伴い電圧が変化していることが観測されており、主巻線が外部に接続された容量性負荷との間に共振を発生させたことにより電圧が上昇したものと考えられる。また、それ以外の負荷条件は、静止形の誘導性負荷を用いる場合と誘導電動機を用いて負荷条件を構成する場合に、消費電力が少ない誘導電動機を用いた負荷条件の方が電圧低下を抑える結果になったと考えられる。

表 5 単独運転現象継続時間計測時の誘導電動機の運転状態

Table 5. State of driving of induction motors when measuring it at islanding phenomenon continuance time.

		Active power [W]				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
Reactive power [var]	-10%	$S < 0$	$S < 0$	$S < 0$	$S < 0$	$S < 0$
	-5%	$S < 0$	$S > 0$	$S < 0$	$S < 0$	$S < 0$
	0%	$S > 0$	$S < 0$	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$
	+5%	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$
	+10%	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$	$S > 0$

単独運転の継続時間は、表 2 に示すように誘導電動機が発電機状態に変化しない負荷条件の単独運転継続時間平均値が 756.2 [ms] であった。また、誘導電動機が発電機状態に変化した負荷条件の単独運転継続時間平均値が 761.0 [ms] であった。なお、単独運転が 1 秒以上継続している場合の負荷条件については、単独運転時間を 1000 [ms] として平均値を求めた。

これらの結果から誘導電動機が発電機状態に変化しない負荷条件に比べ、電圧低下を抑え単独運転の継続時間が長くなることが明らかになった。

〈5・4〉 誘導電動機が発電機状態による有効電力補償効果 誘導電動機が発電機状態に変化することによる影響について、負荷条件 ($P = +5\%$, $Q = -5\%$) を例に分析を行った。

負荷条件 ($P = +5\%$, $Q = -5\%$) における誘導電動機の挙動は、配電線停止直前まで誘導電動機状態として運転を行い、配電線停止後から 0.33 秒まで発電機状態となり、回転数と同期速度が同期状態のすべり 0 で 0.33 秒から 0.42 秒まで運転を行っている。負荷条件 ($P = +5\%$, $Q = -5\%$) における誘導電動機の回転速度及び同期速度を図 6 に示す。

次に、パワーコンディショナ出力、誘導性負荷、容量性負荷、抵抗負荷及び誘導電動機における有効及び無効電力を算出し電力フローとして図 7～図 10 に示した。

図 7 及び図 8 は、配電線停止前の誘導電動機状態で運転

図 6 単独運転実験の回転数及び同期速度 ($P = +5\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 6. Rotational speed and synchronous speed of is-landing test ($P = +5\%$, $Q = -5\%$).

図 7 配電線停止前の無効電力フロー ($P = +5\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 7. Active power flow in state of induction motors.

図 8 配電線停止前の有効電力フロー ($P = +5\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 8. Reactive power flow in state of induction motors.

図 9 配電線停止 0.1 後の無効電力フロー ($P = +5\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 9. Reactive power flow in state of electricity generator.

図 10 配電線停止 0.1 後の有効電力フロー ($P = +5\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 10. Active power flow in state of electricity generator.

を行っている時の無効及び有効電力を示した電力フロー図である。図 9 及び図 10 は、配電線停止 0.1 秒後に誘導電動機が発電機状態に変化した際の無効及び有効電力を示した電力フロー図である。図 10 に示す有効電力フロー図は、抵抗負荷で消費される電力がパワーコンディショナ出力分では不足しているため、誘導電動機から発生した電力が補償していることを示している。

6. 単独運転継続時における無効電力相互作用

〈6・1〉 配電線停止後の誘導電動機定数について 誘導電動機の無効電力は、図 7 及び図 9 から配電線が停止した後に比較的顕著に変化していることが示された。

この要因として、一つは、周波数の変化によるリアクタンスの変化が考えられるが、ここでは、無効電力の変化と単独運転現象との関連についてより詳細に検証を行うために、3 章に記載した誘導電動機の定数と周波数 f のとの関係式を参照し、配電線停止前及び停止 0.3 秒後の誘導電動機のインダクタンスを算出することとした。

誘導電動機のインダクタンス算出方法は、誘導電動機に流れる電流と周波数を用いて (4) 式によって求めた。

表 6 誘導電動機のインダクタンス値変化表

Table 6. Inductance value change table of induction motors.

Reactive power (Var)		Active power (W)				
		-10%	-5%	0%	+5%	+10%
-10%	Normal operation	114mH	114mH	114mH	115mH	116mH
	0.3secon -ds after	44mH	54mH	84mH	90mH	84mH
-5%	Normal operation	114mH	115mH	114mH	115mH	114mH
	0.3secon -ds after	60mH	115mH	94mH	104mH	103mH
0%	Normal operation	114mH	114mH	114mH	115mH	116mH
	0.3secon -ds after	50mH	95mH	117mH	128mH	116mH
+5%	Normal operation	116mH	114mH	114mH	114mH	115mH
	0.3secon -ds after	98mH	136mH	127mH	118mH	154mH
+10%	Normal operation	113mH	114mH	114mH	115mH	114mH
	0.3secon -ds after	79mH	85mH	84mH	95mH	50mH

Upper row (Before cut out utility line), The lower (0.3 seconds after cut out utility line)

$$L = \frac{Q}{2 \times \pi \times f \times I^2} \dots \dots \dots (4)$$

L : インダクタンス [H], Q : 誘導電動機の無効電力 [Var], f : 誘導電動機の周波数 [Hz], I : 誘導電動機の電流 [A]

(4) 式によって算出したインダクタンスを表 6 に示す。

算出結果から、単独運転が継続している負荷条件 ($P = -10\%$, $Q = -5\%$) において配電線停止後半分まで値が低下している。また、同様に負荷条件 ($P = +10\%$, $Q = +5\%$) では、1.5 倍程度まで値が増加していることが明らかになった。

なお、無効電力が+10%の負荷条件では、インダクタンス値が小さくなっていることが明らかになった。この原因は、表 3 に示したように配電線停止後の周波数が上昇したことにより誘導電動機内部の主巻線及び副巻線のインダクタンスが低下し、主巻線電流の周波数が大きく変動していることが観測されたため、主巻線と外部に接続された容量性負荷との間に共振現象が発生し、副巻線のインダクタンスのみの値となったためと考えられる。

〈6・2〉 単独運転継続時における誘導電動機の無効電力補償について 配電線停止後の周波数は、負荷条件の無効電力がアンバランスの場合、PCS の PLL 制御による力率一定制御によってその周波数に変化する。しかし、表 3 に示すように単独運転が継続している負荷条件の周波数は、配電線停止前と比べても大きく変化していない。そのため、負荷条件 ($P = -10\%$, $Q = -5\%$) 及び ($P = +10\%$, $Q = +5\%$) における誘導電動機は、表 6 に示すように変化する周波数に併せてインダクタンスを変化させながら無効電力を補償し、その結果、配電線停止後の周波数の変化を抑制したものと考えられる。これら無効電力を補償している事象を電力フローにて検証を行うこととした。

図 11 配電線停止前の無効電力フロー
($P = -10\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 11. Reactive power flow in state induction motors.

図 15 配電線停止前の無効電力フロー
($P = +0\%$, $Q = +5\%$)

Fig. 15. Reactive power flow in state of induction motors.

図 12 配電線停止前の有効電力フロー
($P = -10\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 12. Active power flow in state of induction motors.

図 16 配電線停止前の有効電力フロー
($P = +10\%$, $Q = +5\%$)

Fig. 16. Active power flow in state of induction motors.

図 13 配電線停止 0.3 秒後の無効電力フロー
($P = -10\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 13. Reactive power flow after 0.3seconds cut out utility line.

図 17 配電線停止 0.3 秒後の無効電力フロー
($P = +10\%$, $Q = +5\%$)

Fig. 17. Reactive power flow after 0.3seconds cut out utility line.

図 14 配電線停止 0.3 秒後の有効電力フロー
($P = -10\%$, $Q = -5\%$)

Fig. 14. Active power flow after 0.3seconds after cut out utility line.

図 18 配電線停止 0.3 秒後の有効電力フロー
($P = +10\%$, $Q = +5\%$)

Fig. 18. Active power flow after 0.3seconds after cut out utility line.

〈6・3〉誘導電動機による無効電力補償の分析について

誘導電動機が無効電力を補償する事象について負荷条件 ($P = -10\%$, $Q = -5\%$) 及び ($P = +10\%$, $Q = +5\%$) を例に検証を行った。負荷条件 ($P = -10\%$, $Q = -5\%$) の電力フローを図 11～図 14 に示す。図 13 は、配電線停止 0.3 秒後の無効電力フローを示したものであり、図 11 に示す配電線停止前の無効電力値と比較した場合には、2.3 倍まで無効電力値が顕著に増加し、単独運転前の無効電力の不均衡分を補償する方向に変化していることがわかる。

負荷条件 $P = +10\%$, $Q = +5\%$ の電力フローを図 15～

図 18 に示す。図 17 は、配電線停止 0.3 秒後の無効電力フローを示したものであり、図 15 に示す配電線停止前の無効電力量と比較した場合には、0.33 倍まで無効電力値が顕著に減少し、単独運転前の無効電力の不均衡分を補償する方向に変化していることがわかる。

これらの値は、インダクタンス値一定条件の値と比較して大きく異なる。

これらの結果から誘導電動機は、配電線停止後において、周波数が変化する場合、定数が変化することから無効電

力を補償する方向に作用し、単独運転の継続を助長する特性をもつことが明らかになった。

7. ま と め

本論文は、誘導電動機の影響により単独運転継続時間が長くなることを確認した。

単独運転継続時間が長くなる要因は、配電線停止後に周波数が低下する場合、誘導電動機が発電機状態へ変化することにより有効電力のアンバランスを補償し、電圧の変化を抑制する特性を有することによることを明らかにした。また、同時に誘導電動機は、配電線停止後において PLL 制御による力率一定制御によって周波数が変化する場合、その周波数の変化を抑制する方向に作用し、単独運転を継続する特性も有することを明らかにした。

これらにより、誘導電動機は、静止形負荷よりも単独運転現象を発生させやすい負荷であることを明らかにした。

謝 辞

本研究において、数々の助言を頂いた(財)電力中央研究所上席研究員小林広武氏に深く感謝いたします。

(平成19年10月26日受付, 平成20年2月18日再受付)

文 献

- (1) 経済産業省原子力安全・保安員 編:「電気設備の技術基準」最終改正 平成18年6月解釈改正
- (2) 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」平成16年10月1日 資源エネルギー庁
- (3) 「系統連系規程 JEAC 9701-2006」, 日本電気協会 系統連系専門部会
- (4) 『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 (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) 電力中央研究所, 関西電力
- (5) 『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) 電力中央研究所
- (6) H. Igarashi: "The tests of islanding have an influence on motor", Proc. of 2005 National Convention Record IEE Japan, No.6-192, p.341-342 (2005) (in Japanese)
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年電気学会全国大会, No.6-192, p.341-342 (2005)
- (7) T. Murakami, K. Kurokawa, H. Kobayashi, and K. Takigawa: "Dynamic characteristic simulation of the utility interconnected PV system—Effect of the induction motor on the detection of islanding—", Proc. of 1998 Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, pp.472-473 (1998) (in Japanese)
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, pp.472-473 (1998)
- (8) H. Igarashi: "About the influence on the difference and the Islanding test of the resonance load and the motor load", IEEJ Trans. PE, Vol.127, No.1, pp.192-199 (2007-1) (in Japanese)
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」, 電学論 B, 127, 1, pp.192-199 (2007-1)
- (9) 『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)』
- (10) 『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)』

- (11) 『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)』
- (12) 『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)』
- (13) 『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』
- (14) 『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』
- (15) 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作成: 電気安全環境研究所 (2002-10)
- (16) IEC 62116: Test procedure of islanding prevention measures for utility-interconnected photovoltaic inverters
- (17) 荻野昭三: 誘導電動機の特性, 電気書院

五十嵐 広 宣 (正員) 1972年11月19日生。1993年3月東京電機大学短期大学電気科卒業。1991年4月(財)日本電気用品試験所(現,(財)電気安全環境研究所)入所。現在,(財)電気安全環境研究所研究部前任主査として,太陽光発電システムの系統連系保護装置の認証業務,太陽光発電システムの研究に従事。2004年10月東京農工大学大学院工学教育部に入学。

佐 藤 孝 則 (非会員) 1973年2月24日生。1996年3月千葉大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月常陽産業(株)入社。1999年5月同社退社。同年5月(財)電気安全環境研究所入所,現在に至る。主に電力系統の解析業務に従事。

宮 本 和 典 (学生員) 1981年6月13日生。2006年3月東京農工大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月東京農工大学大学院工学府電気電子工学専攻博士前期課程に進学。現在,太陽光発電システムの単独運転現象に関する研究に従事。

黒 川 浩 助 (正員) 1942年8月16日生。1965年3月早稲田大学第一理工学部電気工学科卒業。同年4月通商産業省工業技術院電気試験所入所後,高電圧直流送電の研究に従事。1974年よりサンシャイン計画などで太陽エネルギー・太陽光発電の研究。1996年5月東京農工大学教授に転任。2008年4月より東京工業大学統合研究院特任教授および東京農工大学特任教授。早稲田大学工学博士。再生可能エネルギー協議会代表,国際太陽エネルギー学会理事。IEEE 会員。