

機関番号：34412

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560284

研究課題名（和文） 分散電源の瞬低耐性の精密評価および電源品質向上機能の研究

研究課題名（英文） Detailed Study on Operability of Inverters for Distributed Generation during Voltage Sags and Improvement of Function for Power Quality

研究代表者

伊与田 功 (IYODA ISAO)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：80413798

研究成果の概要（和文）：

今後大量に系統連系される太陽光発電インバータが瞬低で一斉に停止した場合大きな影響が予想される。本研究では従来の実験装置でできなかった詳細な瞬低波形の再現を可能にするため、PCを用いた信号発生回路と線形電力アンプで系統の瞬低波形を精密に再現する装置を開発し実験をした。その結果、電磁接触器の開極時間が瞬低発生位相により大きな影響を受けることや瞬低時の系統連系インバータの詳細応答を詳細に解明できた。

研究成果の概要（英文）：

A large quantity of photovoltaic(PV) systems will be installed in near future. There would be a serious power system disturbance if they would be stopped by voltage sags. This study solved the difficulty in generating voltage sags with controlled parameters or reproducing actual voltage sags precisely in laboratory, using PC for waveform composition and linear power amplifier representing voltage source modeling actual power system. The Precise studies on behaviors of magnetic contactor behavior and for power system connecting inverters for voltage sags have been carried out.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気工学、電力変換、電気機器

キーワード：電力系統工学、パワーエレクトロニクス、瞬時電圧低下、分散電源、位相跳躍

1. 研究開始当初の背景

現在はさらに厳しさが増しているが、研究開始当初においても社会を支えるエネルギー基盤である電力系統の供給電力品質に関する関心が非常に高まっていた。その中でも、瞬時電圧低下(瞬低)問題はわが国だけでなく先進国共通の問題として重要性を増しており、電力品質の国際学会でも瞬低に関する報

告が増加していた。特にパワーエレクトロニクス機器のひとつである太陽光などの分散電源用の系統連系インバータは今後ますます増加するので、その誤動作が電力系統ひいては社会に与える影響は深刻であった。

このような状況に対して本研究助成金受給者らは平成18年19年の2カ年にわたり文部科学省科学研究費補助金を得て、「系統連

系された分散電源の瞬低耐性の解明と対策に関する研究」を実施し、瞬低研究において従来考慮されていなかった、瞬低開始時点の系統電圧位相の影響を明らかにし、また、太陽光発電系統連系インバータについては、三相インバータを用いて実験をし、瞬低によりインバータが停止すること、またその原因が過電流過電圧というような装置の保護に関係する原因ではなく単独運転防止という系統保護に関するものであることを明らかにした。しかし、同時に研究方法の問題点も明らかになった。系統連系インバータを連系する系統として研究室内の通常の3相200Vラインを用いたが、この3相200Vラインには多くの校内負荷が接続されており、校内の機器使用状況で電圧波形が変化する。そのうえ、学校受電点電圧自身も学校付近の需要家の負荷により影響されること、また、実現できる瞬低波形に制約があり条件をコントロールし、かつ精密な検討をすることができなかった。

2. 研究の目的

前述の問題を解決し、瞬低のパラメータをより精密にコントロールして実験を行い、瞬低時の電磁接触器や系統連系インバータの動作をより精密に解明し、瞬低耐性のある制御保護を考案することが本研究の目的である。また、別の研究で蓄積されている実際の系統で発生した瞬低波形のデータを用いて瞬低現象を再現できる電源を開発し、実際の系統連系インバータを接続して瞬低応答の実験や波形歪や不平衡のある電源電圧による実験を実施し、将来分散電源が増加した時の電気機器の運転動作に関する詳細なデータを蓄積する。

3. 研究の方法

研究の方法としては瞬低時の系統電圧を模擬できる信号発生回路と線形電力アンプで3相200V電源を模擬し、19年度までに完成している分散電源模擬装置および計測装置と組み合わせてより精密な実験をした。

平成20年度は、瞬低模擬に使用する多機能安定化電源の特性を解明した。この安定化電源は入力信号端子カードを付加すれば線形電力アンプとして入力信号通りの出力電圧を発生できる。また外部からの電力を吸収できる。シミュレーション検討の準備として等価内部インピーダンスを実験により明らかにした。さらに、19年度までに電磁接触器の開極動作が瞬低発生時の系統電圧位相により大きく変化することは明らかにしているが、その要因である励磁電流の変化を、新しい瞬低模擬電源を用いた精密な実験で明らかにした。

平成21年度は、実系統の特性に近くなっ

た瞬低模擬電源で系統連系インバータの瞬低時動作をより精密に実測し明らかにした。また、平成12年より蓄積している実系統の瞬低電圧波形データより典型的なデータを選定し、実際の瞬低でのインバータの応答を実験室で再現した。さらに、リアクトルによりインバータ設置点からみた系統短絡容量を変化させて系統短絡容量の影響を調べたり、逆潮流量を変化させて影響を調べたりした。

平成22年度は、瞬低模擬電源で、電圧歪や電圧不平衡を再現し、そのような条件化での系統連系インバータの動作の詳細を明らかにした。これは、分散電源で系統全体の品質を改善するための基礎データとなる。

4. 研究成果

4.1 実験装置および波形出力プログラム開発

本研究で開発した瞬低模擬電源の特徴を明確にするため、従来の装置とその問題点について簡単に説明する。図1に平成19年度までの研究に使用した実験回路を示す。系統を模擬しているAC200V系統は実系統であり微小ではあるが常に擾乱が発生している。また、瞬低は図中の半導体スイッチ S_u 等により送電線と中性点を抵抗を介して短絡することで発生させるので、一応、図2に示す瞬低のパラメータ、瞬低の深さ x 、瞬低の継続時間 t_s 、および瞬低発生位相 α をコントロールできるが、その際、過渡現象が生じたり、変更できるのが短絡用抵抗の値のみであるので、不平衡なども制約され、短絡用抵抗による系統特性への影響も避けられない。

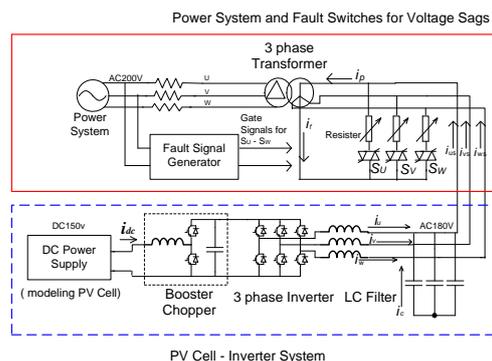


図1 故障抵抗を用いた瞬低実験回路

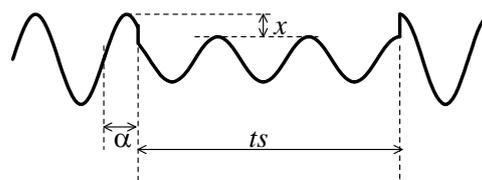


図2 瞬低波形とパラメータ

図3に開発をした瞬低発生装置の構成を示す。図1の実線枠で示した半導体スイッチを用いた瞬低発生回路を含む模擬電力系統を、図3の実線枠で示したように実測瞬低データをPCとD/A変換器で3相分のアナログ電圧信号に変換し、増幅器で増幅して3相200Vの電圧を発生させる手法に変更した。増幅器Δ結線にすると(1)増幅器間で電圧出力が干渉する可能性があること、(2)定常状態で振幅値280Vの出力を行う必要があり過電圧まで再現しようとする増幅器の定格電圧が非常に高くなることからY結線としている。系統連系インバータは従来と同様である。瞬低波形信号作成プログラムはVisualBasicを使用した。図4に実験装置の外観を示す。

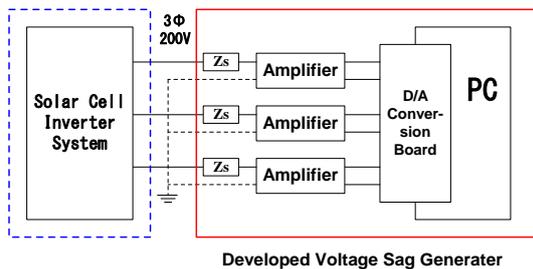


図3 開発した実験回路構成

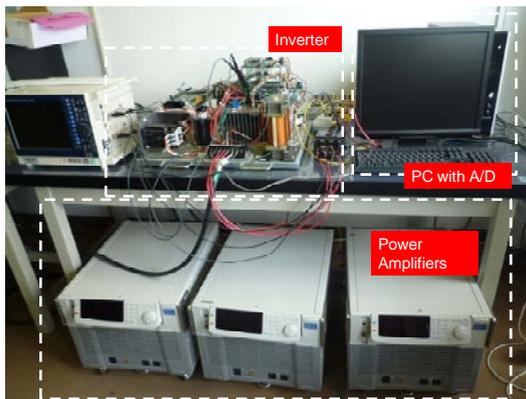


図4 実験装置外観

図5に正常正弦波と実測瞬低波形の切替により実験用の瞬低波形を合成した例を示す。瞬低の実験ではまず正常な三相の正弦波電圧を対象機器に印加して機器を正常運転状態にし、途中で瞬低波形に切り替え、さらに瞬低波形が終われば即時元の正常正弦波に切り替える必要がある。

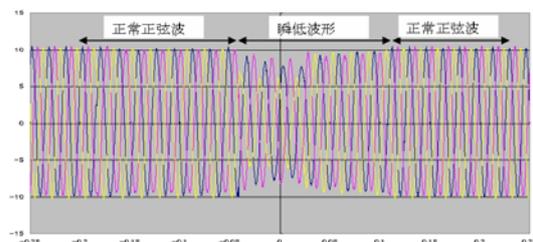


図5 瞬低波形合成出力

完成した瞬低発生装置に実際にインバータに繋げて実験を行ったところ、瞬低を発生させる前の正常な三相正弦波出力の状態でインバータが停止した。この問題を解析する為にメモリオシロにより波形の観測を行ったところ図6のように部分的に波形の乱れがあった。これはPCの種々の割り込み処理による瞬低発生装置の周期処理の遅れが原因であることが判明した。PCでは本瞬低発生プログラムであるVisual BasicだけでなくOSの元で種々のプログラムが実行されており、それらは本プログラムから見ると割り込み処理ということになる。本プログラムでは割り込み処理がないものとしてFor文の繰り返し回数で周期を調整していたので、割り込みが入ると波形の出力が遅れてしまう。図6の現象はそのような割り込みが原因であると推定した。

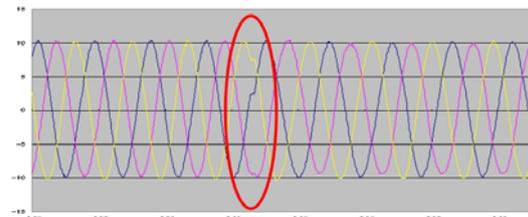


図6 割り込み処理による波形の乱れ

この問題を解決するために以下のように改善を施した。

(1) 周期調整の改善

周波数の同期はfor文を用いて周期の調節を行っていたが、この処理方法では割り込み発生時に周期が伸びてしまう。よってPC内部の高分解能パフォーマンスクロックカウンタを用いた同期方法に変更した。このカウンタは[μs]単位以上の精度がある。図7に改善案のフローチャートを示す。処理方法としては

- ① PC内部カウンタを読み出す。その値が保存してある直前の出力タイミングカウンタ(保存カウンタ)値よりも130μs以上大きくなるまで内部カウンタを読み出す処理を繰り返す。130μsを越えたら②の処理に移る。
- ② 保存カウンタとの差が260μsより小さければ直ちに波形出力処理をし、前の保存カウンタに130μs相当のカウント数を加えて新しい保存カウンタとし①に戻る。260μs以上であればカウンタを130μs相当分進め、電圧波形データをスキップする。この操作を繰り返し保存カウンタとの差が260μより小さくなったら波形出力処理をし、前の保存カウンタに進めた位相相当のカウント数を加えて新しい保存カウンタとし①に戻る。

図8にプログラム改善後の電圧波形を示す。割り込みによる波形の遅れがあるが位相は調整され割り込み処理に起因する位相跳躍

は発生していないことが確認できた。

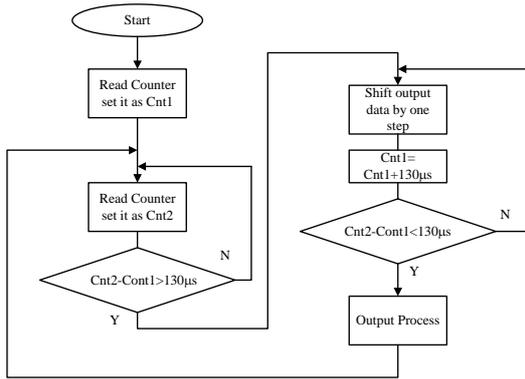


図 7 割り込み処理を考慮した波形合成

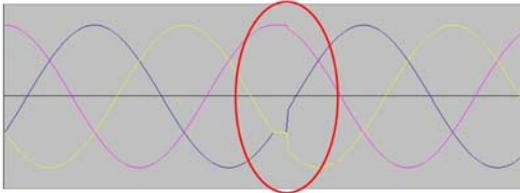


図 8 改善した波形

(2) 瞬低波形切り替え処理の改善

初期の設計では切り替え指示処理後 10 サイクル程度の三相交流正弦波（イントロ）を置いて瞬低波形を出力していたが、このイントロの長さを約 32[s]に変更した。インバータは位相跳躍保護で停止した場合、5秒の停止期間を置いて自動的に復帰するので、仮に切り替え処理の波形の乱れでインバータが停止しても 5 秒後に復旧し安定状態になったところで瞬低波形が印加されることになり切り替え時の外乱の影響を受けずに有効な試験データを得られる。

4.2 電磁接触器の実験と解析

最初に図 9 の単相回路を用いて電磁接触器の瞬低応答について詳細な検討をした。

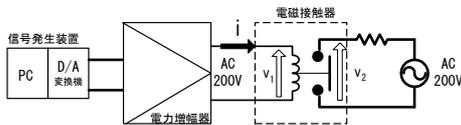


図 9 電磁接触器の詳細実験回路

電圧低下率を 100%、75%、50%とした場合について、瞬低発生位相 α を 11.3 度きざみで変化させて開極時間を調べた結果を図 10～図 12 に示す。100%すなわち完全に短絡して電圧がゼロになった時は瞬低発生から接点開放までの時間は α に従って 0.01s から 0.07s の範囲で正弦波状に変化するが、75%では 0.04s で頭打ちになり、50%の場合 0.03s 付近で一定になるということが判明した。この現象について詳細に検討した結果、図 13

に示すように 75%、50%の場合は系統電圧に交流成分が残留しているために励磁電流にも単調減少成分にその交流成分による変動が重畳され励磁電流が単調減少の場合より低下する部分が発生し 100%の場合よりも早く開極条件が成立することがより定量的に明確にすることができた。（雑誌論文[1]）

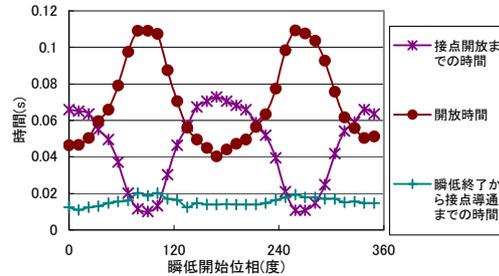


図 10 開極時間の変化(瞬低深さ 100%)

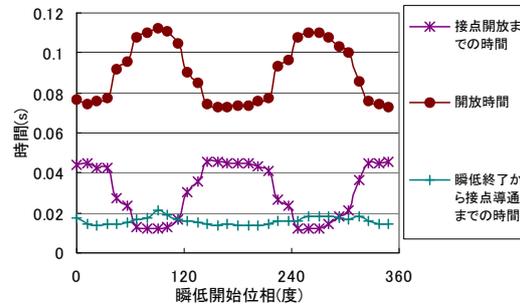


図 11 開極時間の変化(瞬低深さ 75%)

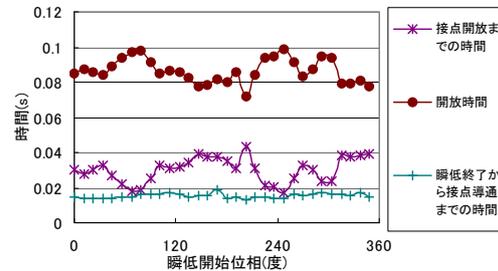


図 12 開極時間の変化(瞬低深さ 50%)

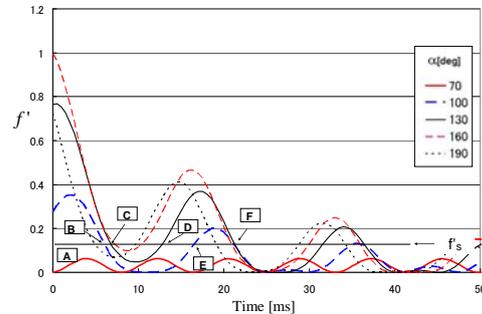


図 13 瞬低開始後の励磁電流変化

4.3 インバータ瞬低実験

図 14 はインバータが運転継続した場合の

実験結果、図 15 は位相跳躍量が大きくインバータが停止した場合の結果である。系統電圧波形と PWM 制御による高調波を含んだ電流波形を示している。インバータが停止するとインバータ電流はゼロとなるので系統電圧波形のみが残ることになる。

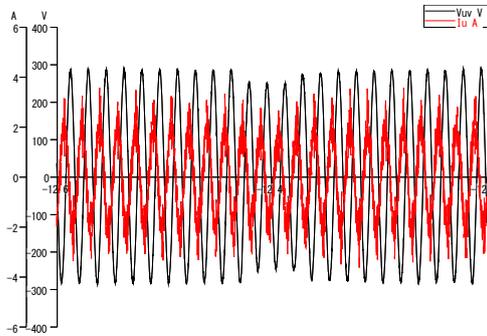


図 14 実験結果(インバータ運転継続)

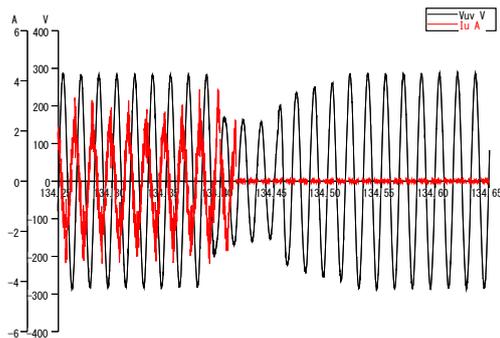


図 15 実験結果(インバータ停止)

表 1~3 は実測された瞬低データを研究室で再現してインバータの運転継続性を確認した結果である。表の左端が瞬低発生日時である。国内の 3 か所で計測した内のひとつである。表 1 より瞬低の深さ、継続時間とインバータの運転には関係性は確認できない(瞬低深さが 43.5%でも停止しないケースがある一方、30.7%でも停止する例がある)が、位相跳躍については明らかに関係があり、位相跳躍が 8 度を超えると停止することが明確に確認できた。系統短絡容量については表 2 に示すように系統インピーダンスを増加させ系統短絡容量を小さくするとやや停止しやすくなっている。表 2 の実験では合成波形を用い、瞬低深さ、初期位相は固定し、位相跳躍だけを変化させている。送電距離が長くなると瞬低によりやや停止しやすくなることが判明した。系統側よりインバータ側の電圧の方が波形のひずみが大きくなることなどが

影響しているものと思われる。表 3 も実測した瞬低波形ではなく、瞬低のパラメータを設定して合成した波形を用いた試験結果である。直流電流を変化させているので逆潮流電力を変化させていることになる。瞬低の深さ $ds=10\%$ 、継続時間 $ts=100ms$ としている。直流電流はインバータの運転継続性について大きな影響は与えていないことが判明した。

表 1 実測瞬低波形による実験結果

Date & Time	Depth ds (%)	Lasting Time ts (ms)	Phase Angle Jump δj (Deg.)	Operation of Inverter
13:30/25/July/2006	17.6	59.3	3.6	
12:39/6/Sept./2006	45.7	104	15.2	Stopped
13:04/6/Sept./2006	47.3	80.2	11.8	Stopped
13:31/6/Sept./2006	43.5	204	6.6	
20:03/9/Sept./2006	22.1	39.4	7.8	
21:33/9/Sept./2006	16.5	39.6	3.7	
2:53/11/Nov./2006	50.6	131.8	9.8	Stopped
23:48/31/March/2007	17.2	48	6.6	
23:26/8/June/2007	30.7	63.7	9.3	Stopped
20:22/29/July/2007	27.2	63.9	7.8	
6:35/30/July/2007	36.3	61.7	8.2	Stopped
19:46/22/Aug./2007	20.1	42.7	1.5	
15:40/3/Sept./2007	17.9	34.1	3.5	

表 2 系統短絡容量による運転継続性の違い

System Impedance [Ω]	Phase Angle Jump [Deg.]	Operation of Inverter		
0.06+j3.3	6			
	7			Stopped
	8	Stopped	Stopped	Stopped
0.14+j6.6	6			
	7	Stopped	Stopped	Stopped
	8	Stopped	Stopped	Stopped

表 3 出力電力および位相跳躍量による影響

DC Current i_{dc} [A]	Phase Angle Jump δj [Deg.]	Operation of Inverter		
0	5			
	6			
	7		Stopped	Stopped
	8	Stopped	Stopped	Stopped
1	9	Stopped	Stopped	Stopped
	5			
	6			
	7		Stopped	Stopped
1.5	8	Stopped	Stopped	Stopped
	9	Stopped	Stopped	Stopped
	5			
	6			
1.5	7		Stopped	Stopped
	8	Stopped	Stopped	Stopped
	9	Stopped	Stopped	Stopped

4.4 不平衡電圧状態での運転特性

最後に波形合成機能を用いて系統の三相電圧を不平衡状態にした実験をした。特定の相の電圧波形の位相のみを $4^\circ \sim 18^\circ$ まで 2° 間隔でシフトさせたケースと瞬低の深さを $4\% \sim 18\%$ まで 2% 刻みで変化させたケースについて実験した。それぞれ 14° 、 14% までは運転が継続できることが確認できた。図 16

に実験結果の一例を示す。電圧が不平衡であるので電流波形も不平衡になっている。

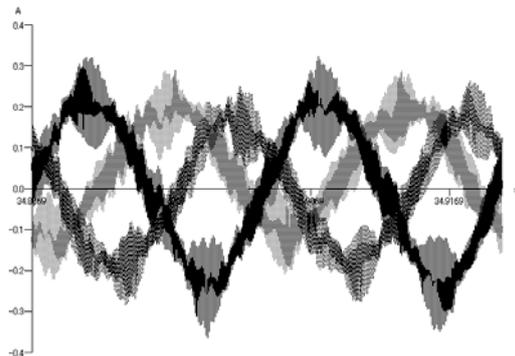


図 16 電圧不平衡時のインバータ電流波形

以上のように当初予定した研究課題はほぼ実施できた。その成果をもとに、瞬低による位相跳躍と系統単独による位相跳躍を判別し瞬低による位相跳躍ではインバータゲートブロックを回避する制御保護方式の1案として、電圧波形をFourier分析して基本波成分の位相を抽出しその変化パターンから判別する方法を考案した。しかし、この場合は1周期分の電圧波形データを用いて分析することになるので、ゼロクロス点のみから位相跳躍量を計算していた従来法では問題にならなかった割り込み処理の期間の波形の乱れ(図8参照)が位相跳躍量計算に影響を与えることになる。これを解決するためには通常のPCではなく、リアルタイムOSを搭載した専用コンピュータを用いて波形合成する必要がある。今後はリアルタイムシミュレーション専用コンピュータを導入し本研究の成果を活用して瞬低による太陽光発電インバータの不要停止防止のための研究を実施していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

[1] Isao Iyoda、Yoshitaro Ando、Sompathana Pounyakheth、Masaya Hirata、Toshifumi Ise、 “Affect of Voltage Sags on Electro-magnetic Contactor - A new Parameter for Sag Characteristics - ”、電気学会 論文誌B、査読有、Vol. 139、No. 5、2010、pp510-516

[2] 阿部 良岐、重井 宣行、早川 潔、伊与田 功、用丸 剛匡、河野 佑介、伊瀬 敏史、 「系統連系インバータ試験用瞬低電圧発生装置の開発」、パワーエレクトロニクス学会誌、査読有、Vol. 35 2010、pp170-177

[学会発表] (計6件)

[1] Isao Iyoda、Yoshiki Abe、Toshifumi Ise、Nobuyuki Shigei、Kiyoshi Hayakawa、 “New Parameter of Voltage Sags and Its Effect on Inverters of PV Systems Surveyed by a Newly Developed Voltage Sag Generator”、IECON 2010、2010年11月、Glendale、Arizona、USA

[2] 阿部 良岐、伊与田 功、早川 潔、重井 宣行、河野 佑介、伊瀬 敏史、 「太陽光発電系統連系インバータの瞬低応答」、パワーエレクトロニクス学会第181回定例研究会、2009年12月19日、大阪大学

[3] 阿部 良岐、伊与田 功、早川 潔、重井 宣行、河野 佑介、伊瀬 敏史、 「瞬低電圧発生装置の改善」、平成21年電気関係学会関西支部連合大会、2009年11月07日、大阪大学

[4] 阿部 良岐、伊与田 功、重井 宣行、置田 瑞希、用丸 剛匡、河野 佑介、伊瀬 敏史、 「系統連系インバータ試験用瞬低電圧発生装置の開発」、パワーエレクトロニクス学会第180回定例研究会、2009年10月14日、関西電力株式会社電力技術研究所

[5] 阿部 良岐、伊与田 功、重井 宣行、置田 瑞希、用丸 剛匡、河野 佑介、伊瀬 敏史、 「瞬低電圧発生装置の開発」、平成21年度電気学会全国大会、2009年3月17日、北海道大学

[6] 置田 瑞希、伊与田 功、 「電磁接触器の瞬低時詳細解析」、平成20年度(第16回)高専卒業研究発表会、2009年3月7日、大阪中央電気倶楽部

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊與田 功 (IYODA ISAO)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：80413798

(2) 研究分担者

伊瀬 敏史 (ISE TOSHIFUMI)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00184581

重井 宣行 (SHIGEI NOBUYUKI)

大阪府立工業高等専門学校・総合工学システム学科・准教授

研究者番号：90259896

早川 潔 (HAYAKAWA KIYOSHI)

大阪府立工業高等専門学校・総合工学システム学科・准教授

研究者番号：20325575

(3) 連携研究者

年度により研究分担者が連携研究者として参画した。