

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：17701
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2012～2014
課題番号：24560341
研究課題名(和文)マトリックスコンバータを用いた蓄電池レス・電解コンデンサレス瞬時電圧低下補償装置

研究課題名(英文) Batteryless and Capacitorless Instantaneous Voltage Sag Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter

研究代表者
山本 吉朗 (YAMAMOTO, Kichiro)
鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70220457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、蓄電池、コンデンサ等の蓄電要素を持たない小形、低コスト、メンテナンスレスのマトリックスコンバータ方式瞬時電圧低下補償装置を開発することである。

まず、シミュレーションにより動作解析を行い、装置を試作して動作確認を行った。その結果、装置LCフィルタのコンデンサと電源インダクタンスとの共振による補償電圧脈動により、補償性能が大きく低下することを明らかにした。また、この脈動の抑制法として、電圧検出にローパスフィルタおよびオールパスフィルタを用いる方法、フィードバックに予測値を用いる方法を提案し、これらとダンピング抵抗を併用した場合の脈動抑制効果や損失最小の抵抗値を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop an instantaneous voltage sag compensator utilizing single-phase matrix converter. The compensator has no storage devices such as batteries or capacitors. Therefore, smaller sized, lower cost and less maintenance compensator can be realized.

First, system analysis was performed and a prototype compensator was implemented. The performances of the compensator were investigated. From the experimental results, it was clarified that the resonance between filter capacitor of compensator and line inductance causes severe deterioration of compensation voltage. Next, two countermeasures, a method using low pass filter and all pass filter for sensed compensation voltage, and a method using feedback of predictive values, were presented. Furthermore, it was demonstrated that the effects of these method on reducing the deterioration of the compensation voltage. Finally, the value of damping resistance for least losses was clarified.

研究分野：電気機器・パワーエレクトロニクス分野

キーワード：電気機器工学 電力工学 瞬時電圧低下補償 マトリックスコンバータ

1. 研究開始当初の背景

(1) 瞬時電圧低下とその補償

精密機器やコンピュータシステムの誤動作を引き起こす停電や瞬時電圧低下に対応するため、通信分野やコンピュータ分野などでは、蓄電池を用いた無停電電源装置(数分オーダの補償)が広く普及してきていた。また、生産設備分野でも、半導体工場のように装置のトリップによる歩留まり低下や損失を防ぐために、工場規模で大容量の無停電電源装置や瞬時電圧低下補償装置(数秒程度の補償)が導入されるケースが増えてきていた。しかし、蓄電池やキャパシタのメンテナンス、コストなどが、無停電電源装置や瞬時電圧低下補償装置のさらなる普及の妨げとなっていた。

当時の日本の電力事情では、地震や台風などの災害時や計画停電を除けば完全な停電の回数は非常に少ないことがわかっており、また、瞬時電圧低下そのものも電圧が100%低下するようなものはほとんどなく、例えば九州電力株式会社で行われた半年間の測定では、最も低下した場合でも30%の電圧残留率で、時間も100ms程度であった(URL http://www.kyuden.co.jp/company_tech_report_report11.html)。

申請者らは、それまでに電解コンデンサ方式、電気二重層キャパシタ方式の瞬時電圧低下補償装置の研究を進めていた(「電気二重層コンデンサを用いた無停電電源装置の動作特性と補償可能な最大負荷」, 篠原, 山本, 飯盛, 柳田, 五所, 電気学会論文誌 D, Vol.124-D, pp.799-806, 2004, “Maximum Load Capacity and Main Circuit Design of Voltage Sag Compensator Using Double-Layer Capacitor”, K. Yamamoto, K. Shinohara, F. Wada, Proceedings of Power Electronics, Machines and Drives PEMD2004, pp. 588-593, 2004 など)。

(2) マトリックスコンバータ

当時は、直流リンク部を持たず交流から直接交流を発生する「マトリックスコンバータ」が注目されていた。マトリックスコンバータは、通常のコンバータ-インバータのAC-DC-AC変換に比べて直流リンク部を必要としないAC-AC変換であるため、a)平滑用の大容量コンデンサが不要で小形化、メンテナンスフリー化が可能、b)変換器の通過段数が少なく変換器損失小、といった特長があった。

申請者らも、変調方式や制御方法について検討を行ったり、電気学会調査専門委員会において普及状況や問題点について調査を行っていた(「マトリックスコンバータの空間ベクトル変調におけるパルスパターンの改善」, 山本吉朗, 篠原勝次, 森辰也, 電気学会論文誌 D, Vol.128-D, pp.176-183, 2008, 「直接形交流電力変換回路の技術動向」, 篠原勝次, 山本吉朗, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.9, pp.1161-1170, 2006 (特集解説) など)。

(3) マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置

申請者らは、研究開発当初、既にマトリックスコンバータを用いて低下した電源電圧から補償電圧を発生し、これを、変圧器を用いて電源電圧に加えることで瞬時電圧低下時でも負荷に正常な電圧を印加する装置(図1)を提案し、特許出願していた(篠原勝次, 山本吉朗, 飯盛憲一: マトリックスコンバータによる電圧変動補償システム(電圧調整装置), 日本, 特願2006-081282, 2006年3月)。

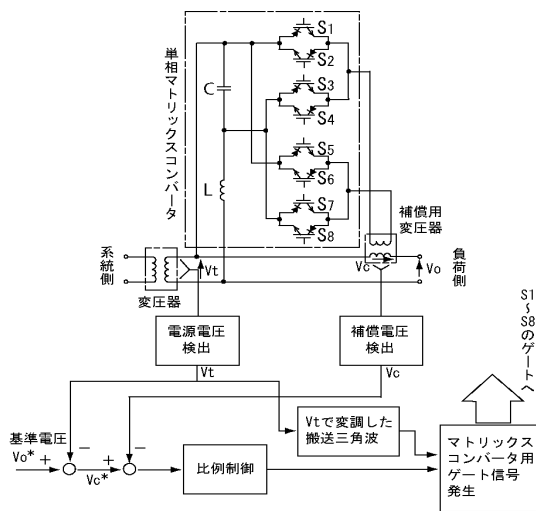


図1 マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧補償装置

提案の装置は、電源電圧が30%以下に落ちると補償できなくなる(変圧器の巻数比を変えれば10%までは対応可能)。しかし、それ以上の範囲であれば、蓄電池やキャパシタなどを用いることなく補償可能で、これまでの補償装置と比べてメンテナンス、コストの点で非常に有利な装置で、瞬時電圧低下補償装置が家庭用コンピュータ用などへ普及するのを促すものと考えられた。また、この当時、無停電電源装置や瞬時電圧低下補償装置に関する発表は国内学会、国際会議などでなされていたが、蓄電池を用いた無停電電源装置や大容量キャパシタを用いた瞬時電圧低下補償装置に限られており、蓄電要素を持たないマトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置に関する発表は、申請者の知る限り行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで研究代表者らが研究してきた、高効率で蓄電要素を持たない「マトリックスコンバータ」に、同じくこれまで研究してきた「瞬時電圧低下補償装置」の考え方を組み合わせ、電解コンデンサ、電気二重層コンデンサ、蓄電池などの蓄電要素を持たないマトリックスコンバータ方式の瞬時電圧低下補償装置を開発することである。マトリックスコンバータ方式の瞬時電圧補償装置では、装置の小形化、低コスト化、メンテナンスレス化が見込まれるため、瞬時電圧補償装置の普及を後押しできると考えて研究を進めてきた。

3. 研究の方法

(1)提案システムの基本設計および検討

提案システムの基本動作を確認し、仕様の決定や回路およびシステムの設計を行う。また、回路構成の検討、コンデンサやリアクトル等の定数や制御系のサンプリングのタイミングなどを大まかに決定する。

(2)シミュレーションによる基本動作の確認、補償可能範囲の調査

回路シミュレータPSIMを用いて提案システムの回路動作の解析を行い、意図している動作ができていないかについて確認する。また、負荷の大きさや力率を変化させて、その補償可能な範囲が理論的に検討したものと一致しているかについて調べる。さらに、(1)で検討した定数やパラメータについてその値が問題ないかの確認を行う。また、(2)のシミュレーションで、システムに対して予定の動作特性が得られなかった場合には、さらにシミュレーションを続け、パラメータ設計を進める。

(3)実験システムの詳細設計および検討

(2)の結果を踏まえて、実験システムの詳細設計を行う。さらに動作やパラメータの値について、シミュレータPSIMを用いて詰める。また、PSIMを用いて制御アルゴリズムの検討を行うとともにDSP用の制御ソフトウェアを開発する。

(4)実験システムの試作および動作確認

(3)での検討を基に必要な部品を購入し、実験システムを試作する。IGBTマトリックスコンバータおよび補償用変圧器からなる主回路とデジタルシグナルプロセッサ(DSP)、FPGA等からなる制御回路、インターフェース回路等を製作し、機能的なまとめごと動作チェックを行う。また、必要に応じて回路シミュレータPSIMの結果との比較も行いながら回路動作の確認を行う。仕様変更等の必要性、研究方法の見直しの必要性があるようであれば、これについても検討する。

実際にはこのフェーズで、電圧上昇補償時に変圧器のインダクタンスと装置のフィルタコンデンサの共振により補償性能が大幅に低下することがわかったため、この対策を検討する必要が生じた。

(5)補償電圧ひずみの抑制

電圧上昇補償時に保証性能が大幅に低下することについて調べるために、実験において、フィードバックゲインの調整やフィードフォワード制御を検討する。また、検出した電源電圧にローパスフィルタやオールパスフィルタを用いて高周波のひずみを取り除き、補償電圧ひずみの抑制を図る。

これらにより、幾分補償電圧ひずみが改善され、補償動作が可能となった。

(6)補償電圧ひずみ抑制の改善(新抑制法提案)と実験システム改良

さらに動作を安定化するために、フィルタにダ

ンピング抵抗を追加、基準電圧、電源電圧、補償電圧それぞれの予測値を用いる制御法を検討する。

(7)実験システムの損失低減についての検討

ダンピング抵抗によって生じる損失を低減するために、ひずみを抑制しつつより低損失にできるダンピング抵抗値について調べる。さらに、ダンピング抵抗の位置を変えたり、フィルタリアクトル電流をフィードバックすることでさらに低損失なひずみ抑制を検討する。

当初の予定と異なり、研究期間内にはこのフェーズまでしか進まなかった。

(8)補償用変圧器の磁気特性まで考慮したシミュレーションの検討

補償電圧を注入するための変圧器の磁気特性により補償電圧にひずみを生じる場合があるが、これについてシミュレータPSIMと電磁界解析ソフトウェアJAGを練成した解析によるシミュレーションにより検討を行う。

(9)実験システムの改良

(8)の結果をもとに、制御プログラムの改良を行う。

(10)瞬時電圧変動補償の実験

想定される様々な負荷状態、瞬時電圧変動条件等に対する補償実験を行い、提案装置の性能を示す。

(11)まとめ

以上の結果をまとめる。

4. 研究成果

(1)シミュレーションによる基本動作の確認、補償可能範囲の調査

回路シミュレータPSIMを用いて提案システムの回路動作の解析を行い、意図している動作ができていないことを確認した。また、500W負荷の力率を変化させ、遅れ0.6~進み0.8の範囲で補償可能であることを明らかにした。これらの結果については学会発表 および雑誌論文にて発表した。

(2)実験システムの試作および動作確認

(1)での検討を基に、必要な部品を購入し、実験システムを試作した。IGBT単相マトリックスコンバータおよび補償用変圧器からなる主回路とデジタルシグナルプロセッサ(DSP)、FPGA等からなる制御回路、インターフェース回路等を作成し、補償電圧のフィードバックなしでの瞬時電圧低下補償動作に関して、回路動作の確認を行った。これについては学会発表 および雑誌論文にて発表した(図2,3)。

(3)補償電圧ひずみの発生

補償電圧のフィードバックを付加して瞬時電圧低下補償動作を行い、シミュレーションと同様の結果が得られることを確認した。その結果は、学

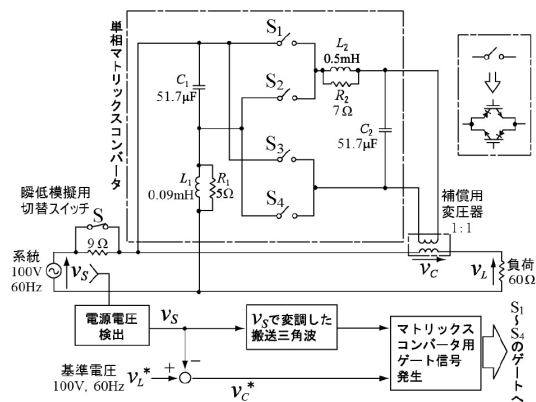
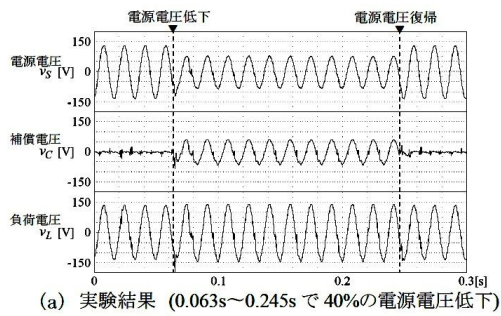
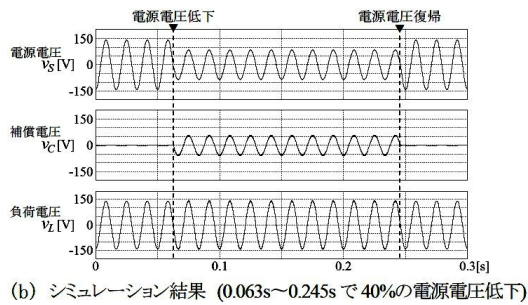


図2 マトリクスコンバータを用いた瞬時電圧補償装置 (補償電圧フィードバックなし)



(a) 実験結果 (0.063s~0.245sで40%の電源電圧低下)



(b) シミュレーション結果 (0.063s~0.245sで40%の電源電圧低下)

図3 実験結果とシミュレーション結果 (補償電圧フィードバックなし)

会発表 , および雑誌論文 , において発表された (図4, 5)。しかし、その後の実験で、瞬時電圧上昇補償時に、補償性能が大幅に低下することがわかった。瞬時電圧低下補償の実験では電源電圧低下の模擬に抵抗挿入による電圧降下を用いたが、その抵抗がダンピング抵抗となってひずみを抑制していたためであった。これに対し、瞬時電圧上昇補償の実験では電圧上昇の模擬に単巻変圧器を用いていたため、そのインダクタンスと装置のフィルタコンデンサとの共振で、補償電圧ひずみが発生していた。再度単巻変圧器を用いて電圧低下を模擬した実験を行ったところ、これまで成功していた低下補償の場合においてもひずみが発生した。

(4) 補償電圧ひずみの抑制

補償電圧ひずみ抑制のために、フィードバックゲインの調整やフィードフォワード制御などを検討したがうまくいかず、オープンループの制御に戻した。また、検出した電源電圧をローパスフィルタ LPF およびオールパスフィルタ APF に通し、高い周波数のひずみを取り除いた。これらにより補償電圧のひずみが改善され、補償動作が可

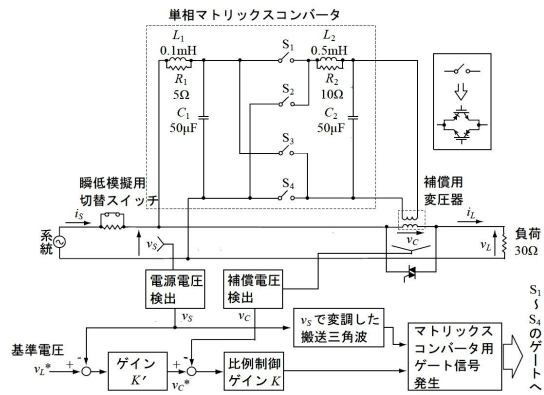
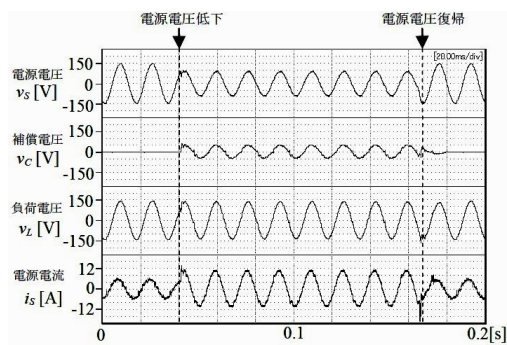
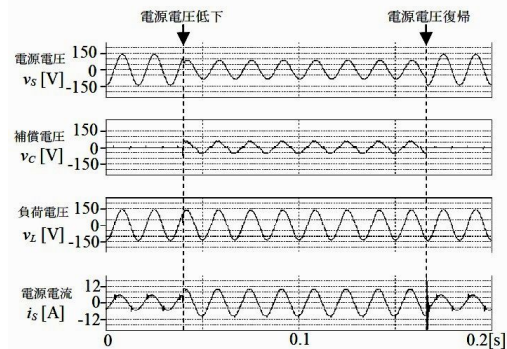


図4 マトリクスコンバータを用いた瞬時電圧補償装置 (補償電圧フィードバックあり)



(a) 実験結果 (電源電圧40%低下)



(b) シミュレーション結果 (電源電圧40%低下)

図5 実験結果とシミュレーション結果 (補償電圧フィードバックあり)

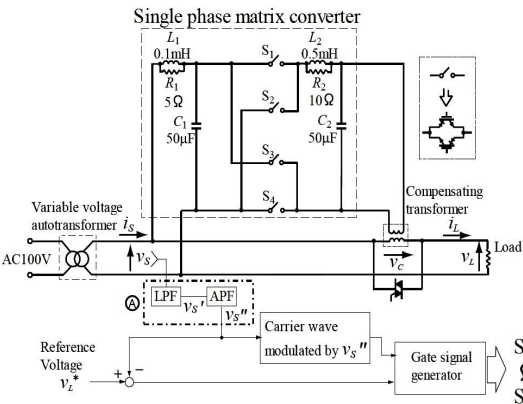
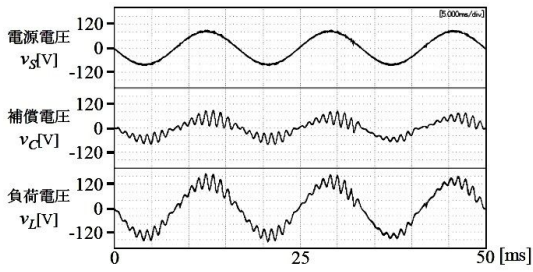
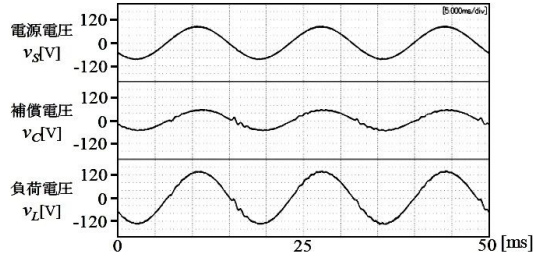


図6 LPFとAPFを用いた補償電圧ひずみ抑制

能となった。その成果は、学会発表 , および雑誌論文 , , で発表した (図6, 7)。



(a) 250W,力率1.0 負荷, v_s 40%低下時の実験波形 (v_L^* , v_s , v_c の予測値不使用)



(b) 250W,力率1.0 負荷, v_s 40%低下時の実験波形 (v_L^* , v_s , v_c の予測値使用)

図7 LPF および APF の効果

(5)補償電圧ひずみ抑制の改善(新抑制法提案)と実験システム改良

これまで問題となっていた補償電圧ひずみを改善するために、フィルタにダンピング抵抗を追加するとともに基準電圧、電源電圧、補償電圧それぞれの予測値を用いるフィードバック制御法を提案し、実験システムを改良して、この制御がデジタル制御の遅れによって生じる補償電圧ひずみの軽減に有効であることを示した。これについては学会発表、雑誌論文で発表した(図8, 9)。

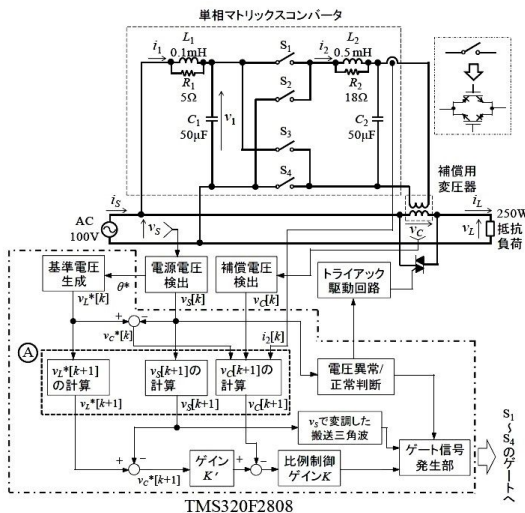
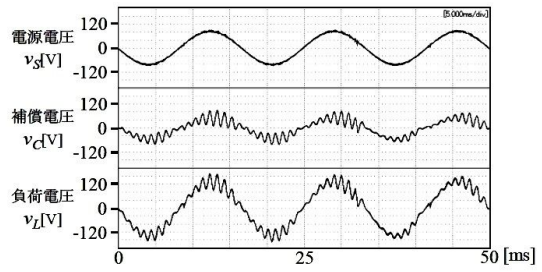


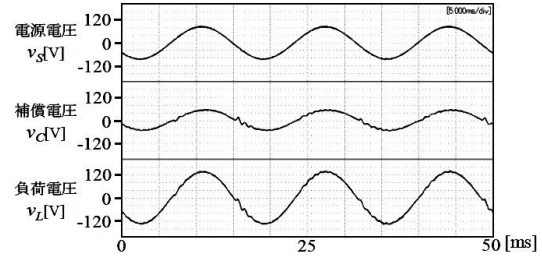
図8 予測値を用いたフィードバック制御

(6)実験システムの損失低減についての検討

上記ひずみ抑制法において、損失低減のためのダンピング抵抗値 R_2 について検討し、ひずみを抑制しつつ、より低損失にできるダンピング抵抗値を明らかにしてシステムの高効率化を実現した。これについては学会発表、雑誌論文で発表した(図10)。さらに、この後、ダンピング



(a) 250W,力率1.0 負荷, v_s 40%低下時の実験波形 (v_L^* , v_s , v_c の予測値不使用)



(b) 250W,力率1.0 負荷, v_s 40%低下時の実験波形 (v_L^* , v_s , v_c の予測値使用)

図9 予測値を用いたフィードバック制御の効果

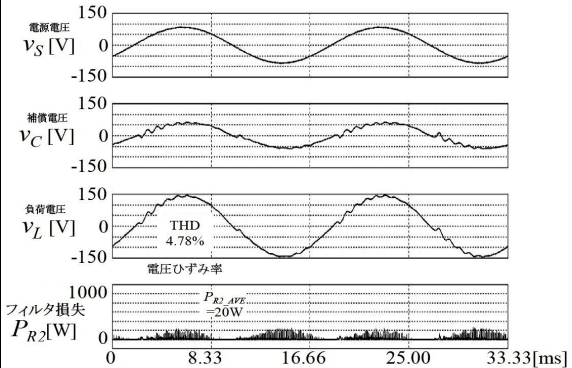


図10 予測値フィードバック制御とダンピング抵抗 R_2 併用時の実験結果 ($R_2 = 18\Omega$)

抵抗の位置を変え、フィルタリアクトル電流をフィードバックすることでさらに低損失なひずみ抑制に成功した。これについては、今後、学会で発表予定である。

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10件)

鶴崎勇, 山本吉朗, 池田稔, 椎屋美咲, 秋山雅裕, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の出力フィルタ損失低減, 平成26年度電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, 査読無, CD-ROM, 2014, pp. 290-291

鶴崎勇, 山本吉朗, 椎屋美咲, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の予測制御, 平成26年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 査読無, CD-ROM, 2014, pp. 195-196

鶴崎勇, 山本吉朗, 唐鎌寛崇, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置における電圧脈動抑制, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, 査読無, 4 巻, 2014, p. 4-077

Kichiro Yamamoto, Keisuke Ikeda, Yu Tsurusaki, Minoru Ikeda, Characteristics of Voltage Sag/Swell Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, Vol. 2, No. 4, 2013, pp. 447-453, <http://dx.doi.org/10.11142/jicems.2013.2.4.447>

Kichiro Yamamoto, Keisuke Ikeda, Yu Tsurusaki, Minoru Ikeda, Characteristics of Voltage Sag/Swell Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter, Proceedings of 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, 概要による査読有, CD-ROM, 2013, pp. 1863-1868

鶴崎勇, 山本吉朗, 唐鎌寛崇 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置における電圧制御の実験, 平成 25 年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 査読無, CD-ROM, 2013, p. 350

鶴崎勇, 山本吉朗, 唐鎌寛崇 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の実験, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 査読無, CD-ROM, 2013, Y30

Kichiro Yamamoto Compensating Characteristics of Voltage Sag Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter Journal of International Conference on Electric Machines and Systems, 査読有, Vol. 2, No. 1, 2013 pp. 77-82, <http://dx.doi.org/10.11142/jicems.2013.2.1.77>

Kichiro Yamamoto Compensating Characteristics of Voltage Sag Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter Proceedings of International Conference on Electric Machines and Systems 2012, 概要による査読有, CD-ROM, 2012, pp. 1-6

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の実験 平成 24 年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, 査読無, CD-ROM, 2012, p. 208

[学会発表](計 8 件)

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の出力フィルタ損失低減, 平成 26 年度電気・情報関係学

会九州支部連合大会, 2014 年 9 月 19 日, 鹿児島大学(鹿児島県・鹿児島市)

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の予測制御, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, 2014 年 8 月 26 日, 東京電機大学(東京都・足立区)

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置における電圧脈動抑制, 平成 26 年電気学会全国大会, 2014 年 3 月 18 日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)

Kichiro Yamamoto, Characteristics of Voltage Sag/Swell Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, October 28, 2013, Pusan (Republic of Korea)

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置における電圧制御の実験, 平成 25 年度電気関係学会九州支部連合大会, 2013 年 9 月 25 日, 熊本大学(熊本県・熊本市)

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の実験, 平成 25 年電気学会産業応用部門大会, 2013 年 8 月 28 日, 山口大学(山口県・山口市)

Kichiro Yamamoto, Compensating Characteristics of Voltage Sag Compensator Utilizing Single-Phase Matrix Converter, International Conference on Electric Machines and Systems 2012, October 23, 2012, Kaderu27 (Sapporo, Hokkaido)

山本吉朗, 単相マトリックスコンバータを用いた瞬時電圧低下補償装置の実験 平成 24 年度電気関係学会九州支部連合大会, 2012 年 9 月 24 日, 長崎大学(長崎県・長崎市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 吉朗 (YAMAMOTO, Kichiro)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70220457