

令和元年6月10日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06241

研究課題名(和文) 配電系統における高調波伝搬・拡大現象の解析と発生源推定手法および抑制手法の開発

研究課題名(英文) Analyses of Propagation and Expansion Phenomena of Harmonics in Distribution System and Development of Harmonic Sources Estimation Method and Harmonic Suppression Method

研究代表者

川崎 章司 (Kawasaki, Shoji)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：90262609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、模擬配電系統実験設備およびシミュレーション解析モデルを構築し、配電系統における高調波の伝搬および拡大現象の解析を行った。また、高調波電流の方向別分離を用いて配電系統における高調波発生源を推定する手法を開発し、シミュレーションと実験の両面から有用性を検証した。さらに、家庭用太陽光発電システムのパワーコンディショナを有効活用して配電系統全体で高調波を抑制する制御システムを構築し、シミュレーションと実験の両面から有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまで困難であった実験による高調波に関する種々の解析が可能となる。具体的には、面的に広がる配電系統や負荷機器への高調波の流入量・流出量の算出、高調波拡大現象の原因の究明、また、配電系統における高調波発生源の推定などが可能になる。更に、今後の通信インフラ技術の進展と提案した高調波抑制システムにより、配電系統全体での高調波の抑制が可能となり、電力品質の向上を目指すことができる。本研究を今後も継続していき、高調波の不確定要素をできるだけ取り除くことで、高調波解析技術、高調波抑制技術の発展、確立のための一翼を担うものと考えている。

研究成果の概要(英文)：In this study, the experimental equipment and simulation analyses model of a distribution system were constructed, and the propagation and expansion phenomenon of harmonics in a distribution system were analyzed. In addition, I developed a method to estimate the harmonic sources in a distribution system using directional separation of harmonic currents, and verified the usefulness from both of simulation and experiment. Furthermore, a control system for suppressing harmonics in an entire distribution system was constructed by effectively utilizing the power conditioner systems of residential photovoltaics system, and the usefulness was verified from both of simulation and the experiment.

研究分野：電力システム

キーワード：電力工学 電力系統工学 高調波 高調波伝搬 高調波発生源 高調波抑制

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

発電所～送電線～変電所～配電線で構成される巨大な電力システムにおいて、配電系統に接続された無数の負荷機器や、近年、導入が進んでいる太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーを利用した分散型電源から高調波電流が発生し、それが電圧歪みを引き起こす。これらが系統を伝搬する中で、分流したり位相にズレが生じたりしながらある地点で合成され、最終的な高調波電圧歪みとなる。インピーダンスによっては思いも寄らぬ遠隔地で歪みが拡大して発生することもある。これが自家用コンデンサ・リアクトル等の調相設備の過熱・焼損、変圧器の寿命低下、誘導機・同期機の効率低下、配電損失の増大などにつながり、家電・汎用品などにも影響を及ぼす。また、平成6年には、高調波の原因による人身事故も発生し、新聞等マスコミにも大きく取り上げられた。現在では、後述する多様化した負荷やインバータを介する分散型電源などの増大により、特に都心部では高調波が大量に発生することもあり問題となっている。

高調波問題の経緯として、水銀整流器など大型の非線形負荷から高調波が発生し、これが通信線誘導障害などを誘発することは、かなり古くから知られている。近年では、パワーエレクトロニクス技術の進展に伴う高調波発生源の飛躍的な増大と、高調波電流を流しやすい本質的な性質を有する力率改善用コンデンサの普及により、通信線誘導障害以外の高調波問題がクローズアップされてきており、電気学会や電気協同研究会といった中立的かつ公的な技術報告書のテーマとして、電力系統側の観点から、負荷機器側の観点から、および機器を設置する需要家の観点から高調波問題が取り上げられてきている。また、行政の観点からも通商産業省資源エネルギー庁(当時)長官の私的懇談会の報告書においても高調波問題が大きく取り上げられ、この報告書で初めて具体的な高調波管理目標(総合電圧歪率:配電系統5%以下,特別高圧系統3%以下)が記述された。現在では、高調波発生源となりうる発電設備や機器を配電系統に連系する際の高調波に関する管理値が、発電設備に対しては系統連系規程で、また、発電設備以外の機器に対しては高圧又は特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドラインおよび日本工業規格 JIS C 61000-3-2 で定められているので、発電設備や機器単体では大きな高調波発生源とはならないが、これらが多数台連系されるに従い高調波が増大して配電系統における管理目標値を超えてしまうことが懸念される。また、インバータ応用機器などの高効率機器(高調波を発生する非線形機器)の普及率が際立って高い我が国の実態は、今後このような機器が普及してくるであろう諸外国からも大いに注目されている。

高調波発生源の一つとして考えられる代表的な機器として、電気鉄道などの三相整流回路、電気炉などの電力調整回路、テレビ・パソコンなどの単相整流回路、およびインバータエアコン・太陽光発電などのインバータ回路がある。これらの内部回路では、半波整流、全波整流、半波整流コンデンサ平滑、全波整流コンデンサ平滑、全波位相制御など様々な回路が用いられ、これらはすべて電流波形が異なっている。電流源から発生した高調波電流は、上位系統、負荷のあらゆる方向に向かって流れて行くが、上位系統も構成が複雑で、特別高圧、高圧、低圧需要家の負荷には定電力特性のものや定電流特性のものがあり、また、高調波発生源そのものであることもある。したがって、高調波解析において必要となる高調波インピーダンスは、単純に基本波分のリアクタンスを周波数倍したものとはならず、高調波係数などを実測等により求め、ある程度補正をする必要があるとも考えられている。加えて、実測により把握しようにも、需要家受電点における高調波電流は流入と流出の合成であり正確に分離することは不可能で、ある程度の仮定に基づいたシミュレーションによって分離しなくては、流入量・流出量を求めることができない。

上記のように高調波解析はあまりにも不確定要素が多く、計算値と実測値が単純に一致しないことから検証も困難であるため、高調波解析は現時点で確立されていないといえる。

2. 研究の目的

本研究では、再生可能エネルギーや電気自動車、多様化している負荷などの電力系統への大量導入により、益々複雑化している配電ネットワークにおいて、不確定要素が多く未だ解決されていない高調波の伝搬や拡大現象の解析、ならびに、高調波発生源の推定手法の確立および高調波抑制手法の開発を目指す。本目的達成のために、模擬配電系統実験設備を拡大構築し、実験および数値計算シミュレーションの両面から高調波に関する様々な解析・検証と開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では、まず、単相系統および三相系統を構築でき、任意の高調波を重畳できるプログラマブル交流電源、太陽光発電模擬用の直流電源、高調波抑制機能を持たせるためのパワーコンディショナ開発装置、配電線路装置、様々な負荷を模擬可能な電子負荷装置、および再現可能な高調波発生源となる整流負荷装置から成る模擬配電系統実験設備を構築する。設備を構築後、高調波伝搬および拡大現象に関する種々の実験ならびに解析を行う。また、実験と並行して、MATLAB や XTAP 等の数値解析ツールを用いて数値計算シミュレーションの面からも解析と検証を行い、高調波の発生源推定手法ならびに抑制システムの開発を行う。

研究期間内における主な研究項目は、①「実験およびシミュレーションによる配電系統にお

ける高調波の伝搬および拡大現象の把握」, ②「配電系統, 負荷機器, 調相設備への高調波の流入量・流出量の導出と発生源推定手法の開発」, ③「パワーコンディショナを活用した配電系統における高調波抑制システムの開発」, ④「開発した高調波抑制システムのパワーコンディショナへの実装実験による有用性の検証」である。

4. 研究成果

(1) 模擬配電系統実験設備の構築 任意の高調波を重畳できるプログラマブル交流電源, 太陽光発電模擬用の直流電源, 高調波抑制機能を付加するパワーコンディショナ開発装置, 配電線路装置, 様々な負荷を模擬可能で任意の電流波形を出力できる電子負荷装置, および再現可能な高調波発生源となる負荷装置から成る模擬配電系統実験設備を構築した。図1に構築した実験設備を示す。

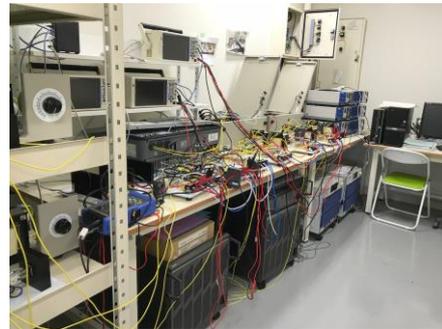


図1 模擬配電系統実験設備

(2) 配電系統における高調波の影響解析 配電系統解析モデルを構築し, 高調波が配電系統に及ぼす影響について解析を行った。構築した解析モデルにおける高調波発生源として, 高圧負荷に非線形負荷を模擬し, 低圧の住宅負荷には実際の機器を想定した高調波電流源を挿入した。従来モデルをベースに, 電灯負荷を住宅負荷と集合住宅負荷とに分割し, より詳細に模擬した。さらに, 高調波発生源については他系統からの流入を想定した高調波電圧源と, 負荷からの高調波を模擬した高調波電流源を用いた。高調波電圧源は1週間分の実測値を使用した。高調波電流源は実機器を想定し, JIS規格に則り値を設定した。

高調波の影響解析として, まず, 高調波電圧源の電圧値パターンによる解析を行った。その結果, 高調波電圧源の電圧値パターンによる解析結果の変化はあまり見られず, 他系統からの流入を模擬した高調波電圧源よりも, 実機器からの高調波を模擬した高調波電流源の影響のほうが大きいのではないかと考えられる。さらに, 高調波電圧源の位相の変化による解析を行った。その結果, 系統の高調波が持つ位相と近い設定値では1週間通して大きな変化は見られなかった。その一方で, 系統の高調波が持つ位相と逆位相に近い設定値による解析では, 高調波が拡大する現象や, 拡大が低減される現象がみられた。

以上より, 負荷からの高調波を模擬した高調波電流源が, 系統の高調波電圧に影響を与え, 総合電圧ひずみ率にも影響するのではないかと考えられる。また, 上位側の高調波電圧ベクトルのもつ位相が, 系統の高調波電圧ベクトルと合成され, その系統から流出する高調波の大きさに影響すると考えられる。

(3) 配電系統における高調波発生源推定手法の開発 系統を流れる高調波電流は, 当該配電系統内の負荷に起因するもの(下位から流れる電流)と, 他の多くの配電系統の負荷に起因するもの(上位から流れる電流)の, 流れる向きが異なる2つの成分を含む。しかし, 実際に測定できる電流はこれらが合成されたものである。そこで, 測定箇所ノード($k-1$)~ノード k 間における高調波電流の方向別分離を行う。測定値と, 算出する上位および下位からのそれぞれの高調波電流について測定箇所ごとの変化を見ることで, 高調波発生源の推定を行う。前提条件として, 系統の各ノード電圧, 各ノード間の電流, およびそれぞれの位相を正確に測定できるものとする。

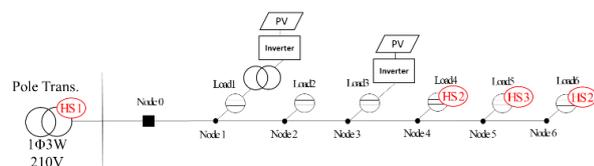
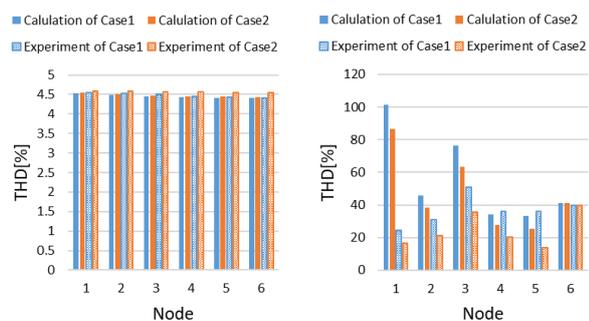


図2 解析モデル例

低圧配電系統の解析モデルの一例を図2に示す。上位系統から流入する高調波として, 第3, 5, 7次高調波電圧をそれぞれ1, 4, 2%ずつ重畳する。図2において, 高調波発生源として, Load 1およびLoad 3にPVシステム, Load 4およびLoad 6に高調波発生負荷, Load 5に任意の電流波形を出力可能な負荷装置を設置した。ここでは, 図2においてCase 1としてLoad 4の高調波発生負荷から出力される電流の同位相のものを, Case 2としてLoad 4の高調波発生負荷から出力される電流の逆位相のものをLoad 5から出力し, 高調波の拡大・相殺現象を



(a) 総合電圧ひずみ率 (b) 総合電流ひずみ率

図3 各ノードにおけるTHD

把握し、高調波の発生源推定の有用性を確認した。

〈シミュレーションによる推定結果〉

図 3(a)に電圧の総合ひずみ率（以下、THD）、図 3(b)に電流の THD、図 4 に発生源推定結果を示す。図 3(b)から、Case 1 では、Load 4 と Load 5 の負荷が同位相であるため系統全体で THD が増加し、Case 2 では、Load 4 と Load 5 の負荷が逆位相であるため系統全体で THD が減少していることが見て取れる。出力される電流の大きさが同じでも、位相によって高調波が拡大・相殺されるが、図 4 に示すように、高調波が拡大・相殺されても高調波発生源として設定した箇所は、明確に特定できている。また、負荷ごとの高調波の発生量も明確に推定できたと言える。

〈実験による推定結果〉 図 2 と同じ構成とした模擬系統設備を用いた実験により、発生源の推定が可能か検証した。図 3(a)に電圧の THD、図 3(b)に電流の THD を示す。各ノードで測定した電流および電圧を解析して得られた発生源推定結果を図 4 に示す。シミュレーション結果と実験結果を比較すると、実験では発生源以外の箇所で高調波が多少検出されているが、これは使用した電子負荷装置によるもので、シミュレーションとほぼ同様に明確に発生源を推定できていることが見て取れる。

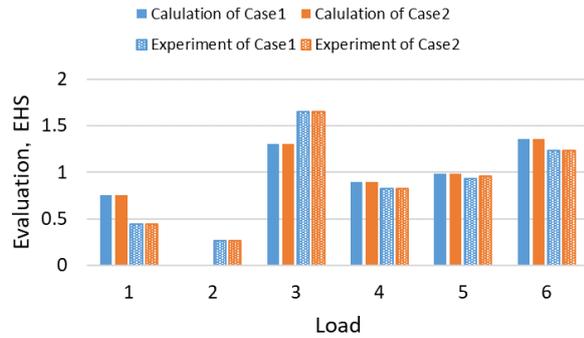


図 4 発生源推定結果

(4) 配電系統における高調波抑制システムの開発

パワーコンディショナ（以下、PCS）にアクティブフィルタ機能を付加することにより配電系統全体の高調波を抑制するシステムを開発した。家庭用 PCS の制御システムは、ヒステリシス制御を使用していることが多く、また、ヒステリシス制御は PWM 制御に比べて比較的簡単に電流を制御できるため、今回はヒステリシス制御を適用した。提案システムにおいて、ノードの電流情報がセンサから得られると仮定すると、PCS から逆位相の高調波を出力することによって、配電系統全体の高調波を抑制できる。図 5 に提案システムの概念図を示す。

提案システムの有用性をシミュレーションと実験の両面から検証した。シミュレーションにおける解析モデルは、太陽光発電システムの PCS と高調波発生源である非線形負荷等から構成されている。模擬配電系統実験設備は、高調波を発生する負荷、太陽光発電システムの PCS、配電線等で構成されている（図 1 参照）。

提案システムによる電流 THD の抑制効果を図 6 に示す。ノード 2 およびノード 5 に連系されている PCS の自端制御では、かえって悪化するノードもあるものの系統全体に抑制効果をもたらすことが見て取れる。一方、ノード 2 およびノード 5 の PCS が系統全体の高調波電流を抑制する提案システムでは、系統全体で大きな抑制効果が得られることが見て取れる。なお、図 6(a)において、ノード 4 の電流 THD が高いのは、THD の分母となる基本波成分がノード 5 の太陽光

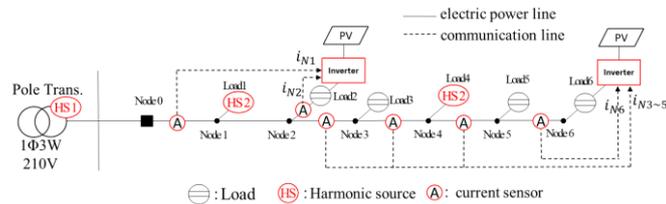
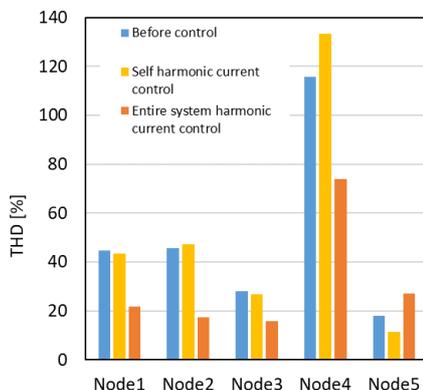
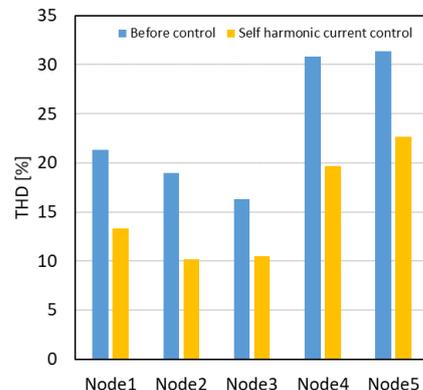


図 5 提案システムの概念図



(a) シミュレーション結果



(b) 実験結果

図 6 高調波の抑制効果

発電システムからの逆潮流によって減少するためである。実験結果については、制御前の THD と自端制御した場合の THD のみを示す。ノード 2 およびノード 5 に連系した PCS により高調波電流を抑制することは、システム全体に抑制効果をもたらすことが示された。なお、提案システムの開発用 PCS への実装は現在行っている段階であり、研究・開発を継続中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Shoji Kawasaki and Genki Ogasawara, “Influence Analyses of Harmonics on Distribution System in Consideration of Non-linear Loads and Estimation of Harmonic Source”, Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 7, No. 1, pp.76-82 (2017)
- ② Shoji Kawasaki, Masanari Mochizuki, and Nobuo Ninomiya, “Estimation Method of Harmonic Sources on Distribution System and Experimental Verification”, IEEE PES 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 41, Electric ISSN: 2164-0610 (2018)
- ③ Shoji Kawasaki and Keitaro Suzuki, “A Study on Improvement of Power Quality by STATCOMs for Low Voltage System”, Journal of International Council on Electrical Engineering (掲載決定)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 小笠原元気, 望月 柁成, 川崎章司:「非線形負荷を考慮した配電システムモデルにおける高調波の影響解析」, 平成 29 年電気学会全国大会, 6-190 (2017.3)
- ② 望月 柁成, 川崎章司:「高調波発生源の推定手法の検討および実験による検証」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, P34, pp.67-68 (2017.9)
- ③ 二宮伸夫, 望月 柁成, 川崎章司:「配電システムにおける高調波の発生源推定と実験による検証」, 平成 30 年電気学会全国大会, 6-177 (2018.3)
- ④ 二宮伸夫, 望月 柁成, 川崎章司:「配電システムにおける高調波の拡大・相殺現象の把握と発生源推定」, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, P47, pp.73-74 (2018.9)
- ⑤ 川崎章司, 望月 柁成:「配電システムにおける高調波発生源推定手法と高調波抑制機器の最適設置箇所の検討および実験による検証」, 平成 30 年電気学会 電力技術・電力システム技術合同研究会, PE-18-071, PSE-18-047, pp.13-18 (2018.9)
- ⑥ 川崎章司, 鈴木恵太郎:「PV 大量導入に向けた低圧用 STATCOM による配電システムの電力品質向上システムの開発と効果検証」, 平成 31 年電気学会 電力技術・電力システム技術・半導体電力変換合同研究会, PE-19-024, PSE-19-035, SPC-19-084 (2019.3)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.isc.meiji.ac.jp/~powersys/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。