

安定した電力供給および電力品質の維持に貢献する高調波解析技術

■ 森 佑介
Yusuke Mori

カーボンニュートラルの実現に向けて再生可能エネルギーの導入が進められているなかでは、電力の安定供給や電力品質を維持するために様々な課題への対応が必要であり、対策を検討するにあたって電力系統解析は欠かすことができない。電力系統解析技術は多岐にわたるが、その一つである高調波解析技術は再生可能エネルギーの導入拡大において重要な役割を果たす。特に長距離ケーブルで系統連系する場合、系統のインピーダンスの変化にともない、高調波が共振して拡大する可能性があるため、本技術による検討が欠かせない。本稿では、電力系統解析ソフト PowerFactory を用いて、定量的に高調波電圧の拡大倍率や高調波共振対策の効果を解析した事例を紹介する。

1 はじめに

近年、世界的に環境意識が高まり、脱炭素化に向けた流れが強まっている。日本においても、2020 年に「2050 年カーボンニュートラル」が宣言された。その実現に向けた第 7 次エネルギー基本計画では、電源構成における再生可能エネルギー（以下、再エネ）の比率を 4～5 割程度に拡大する方針が示されている⁽¹⁾。このようにカーボンニュートラルの実現に向けて、再エネの導入が進められていくなかで、以下のように様々な課題への対応が必要となる。

- (1) 送電可能容量のひっ迫
- (2) 電力系統事故時の安全確保や復旧対策の迅速化
- (3) 火力発電などの需給調整力・周波数維持能力の低下
- (4) 慣性力不足による周波数変動率の増加
- (5) 電圧変動の増大
- (6) 高調波や電圧フリッカなどによる電力品質への影響

これらの課題に対して、様々な対応策やルール制定の検討が進められているが、各検討過程において、電力系統解析技術の活用は欠かすことができない。また、上記課題に対して、必要となる電力系統解析技術は多岐にわたるため、技術者には幅広い知見や技術が要求される。これまでの東光高岳技報でも、再エネ設備を長距離ケーブルで系統連系する場合に必要な解析技術⁽²⁾、サージ^{注1)}などの瞬時値解析技術⁽³⁾、再エネ連系時の配電系統における電圧変動解析技術⁽⁴⁾について取り上げてきた。

本稿では、再エネ設備が電力系統に接続される際の高調波による電力品質への影響に着目する。電力系統の高調波が大きくなると、最悪の場合、電力設備の焼損事故・停電などにつながる。そのため、高調波に関わる現象を把握し、適切な設備構成や対策を講じることが重要である。そこで本稿では、高調波障害の防止に有効な解析技術として、定量的に高調波の拡大倍率や対策の効果を確認した高調波解析事例を紹介する。

2 高調波とは

電力系統における電力品質として、電圧の振幅・周波数が一定であること、三相の位相差が 120° で振幅が等しいことの他、一つの基本周波数成分（日本国内においては 50 Hz もしくは 60 Hz）のみを含むことが理想である。実際の電力系統では基本周波数以外の周波数成分を含むが、基本周波数の整数倍の周波数となる電流・電圧のことを高調波電流・電圧とよぶ。また、その整数倍のことを次数とよぶ。

本章では、高調波の発生要因、高調波共振現象、高調波による障害について述べ、再エネ設備の系統連系時における高調波解析技術の必要性について記載する。

(1) 高調波の発生要因

テレビやエアコンなどの家電機器、インバータ機器のようにダイオードなどのスイッチングデバイスが含まれる機器が接続されると、その入力電流波形はきれいな正弦波にならず、高調波を含んだ波形となる（高調波電流）。この高調波電流が電力系統に流れ込むと電圧ひずみが大きくなる。電力系統には不特定多数の高調波発生源が接続されており、それらが広範囲に分布するため、発生源の特定が困難なことも多い。太陽光発電や風力発電などの再エネ電源はインバータで直流を交流に変換してから電力系統に接続しているため、再エネ設備の導入が増加すると高調波の発生源も増えることになる（風力発電は交流で発電するが、一度直流に変換した後、再度安定した交流に変換している）。系統連系規程⁽⁵⁾では、インバータからの高調波流出電流について、総合電流ひずみ率を 5%、各次電流ひずみ率を 3% 以下にすることが望ましいと記載されている。なお、総合電流ひずみ率、各次電流ひずみ率は以下の式であらわされる。

$$\begin{aligned}\text{総合電流ひずみ率} &= \frac{\text{高調波電流の実効値}}{\text{基本波電流の実効値}} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \\ \text{各次電流ひずみ率} &= \frac{\text{各次高調波電流の実効値}}{\text{基本波電流の実効値}} \times 100\% \\ &= \frac{I_n}{I_1} \times 100\%\end{aligned}$$

ここで、 I は電流、下添え字は次数をあらわす。 I_1 は基本波電流である。

(2) 高調波共振現象

前述のとおり、電力系統には不特定多数の高調波発生源が接続されているため、高調波を完全になくすることはできない。電力品質の維持や高調波による障害を防止するため、「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」において、電力系統全体で維持すべき高調波環境目標レベルとして、配電系統は総合電圧ひずみ率5%、特別高圧系統は総合電圧ひずみ率3%と定められている⁽⁶⁾。なお、総合電圧ひずみ率は、以下のように前述の総合電流ひずみ率と同様の式であらわされる。

$$\begin{aligned}\text{総合電圧ひずみ率} &= \frac{\text{高調波電圧の実効値}}{\text{基本波電圧の実効値}} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1} \times 100\%\end{aligned}$$

この電力系統の高調波電圧について、いくつかの観測事例が報告されており⁽⁷⁾⁽⁸⁾、いずれの電圧階級においても、第5次高調波が最も大きく、次いで第7次高調波などが大きいことが知られている。再エネ設備を系統連系した際には、この電力系統に存在している高調波電圧ひずみを共振現象によって拡大させないことが重要である。本現象は、図1に示すように再エネ設備を電力系統に接続したことで、インピーダンスが変化することに起因する。同図は、高調波を含む電圧源、連系点から電力系統側をみたインピーダンス Z_{An} （背後電源インピーダンス）と連系点から再エネ設備側をみたインピーダンス Z_{Bn} にまとめている。3章で本現象の解析事例を記載しているが、そこでは第5次高調波(V_5)が1.0%、第7次高調波(V_7)が0.5%含まれるものとした。同図内の高調波拡大倍率 k の計算式にあるとおり、 Z_{An} と Z_{Bn} の和が極小になる周波数において高調波共振が発生し、連系点の高調波が拡大することになる。再エネ設備が系統連系する場所から離れており長距離ケーブルで連系する際には、インピーダンスが大きく変化するため、高調波共振現象の発生や次項に記載する高調波障害の発生リスクについてよく検討する必要がある。

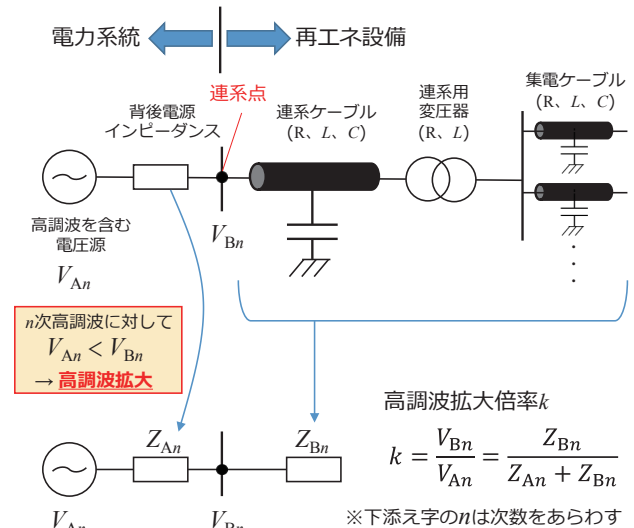


図1 高調波共振現象のイメージ図

(3) 高調波障害と系統解析の必要性

高調波障害としては、進相コンデンサ^{注2)}およびその直列リアクトル^{注3)}の発熱や異音が主であるが、最悪の場合は焼損に至り、重大事故や停電になる可能性がある。その他にも電力機器や家電機器などに、損失増加や誤作動といった様々な悪影響をおよぼすリスクもある。そのため、適切な高調波抑制対策を講じ、高調波を発生させない、共振拡大させないことが重要である。再エネに利用されるPCS（パワーコンディショナ）はPWM制御^{注4)}やフィルタにより、低次の高調波ひずみが少ない正弦波が出力されるため、本稿ではこれ以降、高調波共振現象に着目する。

高調波共振現象については、シンプルな構成であれば、高調波共振の発生リスクを概略的に計算することができる。しかし、実際の再エネ設備の系統連系において、詳細かつ効率的に共振周波数や高調波の拡大倍率、高調波対策の効果を把握するには電力系統解析ソフトを活用する必要がある。特に評価対象の規模が大きく、複雑な場合はその必要性が高い。また、連系ケーブルが長い場合に高次の高調波共振現象を精度良く計算したい際には、分布定数回路^{注5)}によるモデル化が必要となり、理論計算による検討が極めて困難なこともある。以上のことから、電力系統解析ソフトを有効に活用し、高調波による電力品質の低下を検討し、これにともなう電力機器や家電などに悪影響を生じないようにすることが大事である。

次章では、高調波共振現象による高調波電圧の拡大倍率やフィルタによる対策の効果を定量的に解析した事例を紹介する。

3 高調波共振現象の解析事例

3.1 解析モデル

(1) モデル概要および高調波電圧の目標値

総合電力系統解析ソフト PowerFactory⁽⁹⁾ を用いて、**図2**に示すモデルで高調波共振解析を実施した。本モデルは同一変電所母線に二つの再エネ設備が連系されたモデルである。連系する系統は特別高圧系統を想定しており、総合電圧ひずみ率を3%以下にする必要がある。

(2) 電力系統側のモデル

実際の電力系統には様々な次数の高調波電圧を含むが、ここではわかりやすくするため、主要な第5次高調波、第7次高調波のみ含む電圧源としてモデル化した。本モデルでは、連系点の背後に第5次高調波 (V_5) が1.0%、第7次高調波 (V_7) が0.5%含まれるものとした。また、系統連系する変電所の変圧器および背後電源インピーダンス (着目した点から上位系統に存在するインピーダンス) をモデル化した。

(3) 再エネ設備側のモデル

再エネ設備側は、連系用のケーブル、連系用変圧器、各発電機出力を集電するためのケーブルで構成した。連系用のケーブルについては、再エネ発電設備と系統連系点が離れており、長距離のケーブルで接続することを想定している。そのため、連系ケーブルは大きな静電容量を有しており、電力系統の背後電源インピーダンスや変圧器のインダクタンス成分と共振することで高調波を拡大させる可能性がある。また、**図2**に示す連系1 (青枠内) と連系2 (黄枠内) は同様の構成であるが、連系2のほうが連系点と離れており、約1.5倍のケーブル長

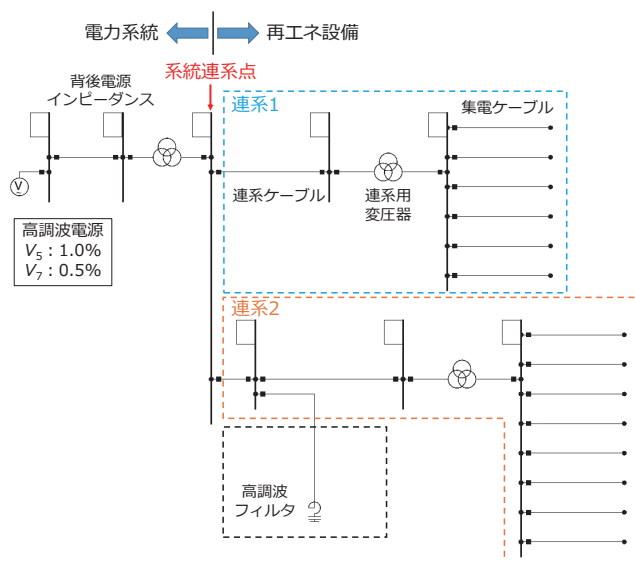


図2 高調波共振解析モデル (PowerFactory)

を設定している。また、連系2では高調波対策用のフィルタの有無を切り替えられるようにし、その効果を確認できるようにしている。なお、この高調波フィルタは第5次高調波を対象とした単一同調フィルタ^{注6)}のみで構成している。

(4) 解析パターン

同一系統に再エネ設備の連系が増えると、インピーダンスが変化し、共振周波数も変化する。また、再エネ設備内の事故や保守・点検作業にともない連系ケーブルを系統から切り離すことも考えられる。したがって、それぞれの連系状態において高調波共振のリスクを確認する必要がある。本稿では、**図2**に示した解析モデルに対して、**表1**の組合せで解析を実施した。

表1 解析条件

No.	系統連系状態	高調波フィルタ有無
1	連系1のみ	なし
2	連系2のみ	なし
3	連系1 + 連系2	なし
4	連系1 + 連系2	あり

3.2 解析結果

高調波共振現象の解析結果を**図3**に示す。同図は系統連系点の第5次高調波含有率 V_5 、第7次高調波含有率 V_7 、この二つの高調波から計算した総合電圧ひずみ率を示している。なお、同図内の系統背後の値は、系統連系前に存在する高調波含有率の設定値である。連系1 (No.1) の状態になると、第5次高調波、第7次高調波はともに増加しているが、総合電圧ひずみ率は高調波環境目標レベルの3%以下である。連系2 (No.2) の状態になると第5次高調波がさらに増加しているが、同じく高調波環境目標レベルの3%以下である。連系

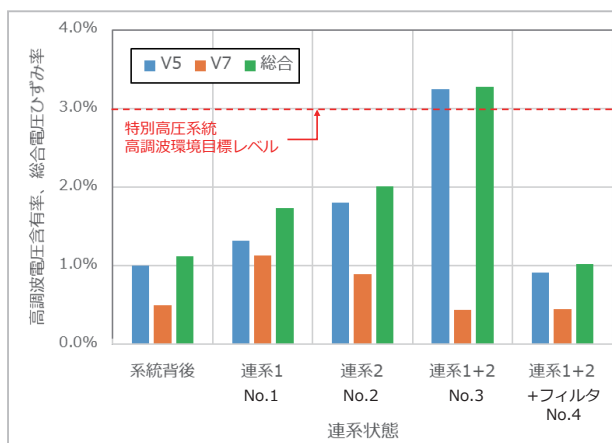
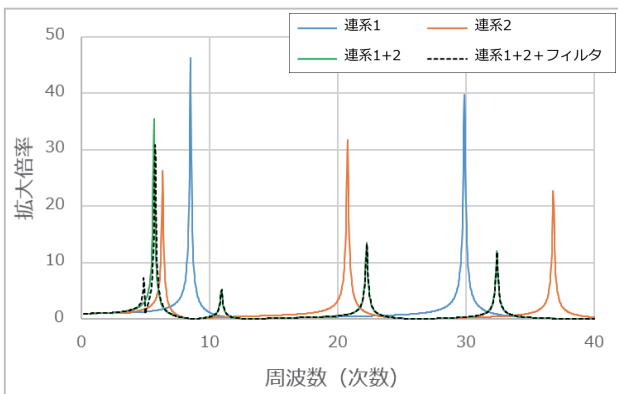


図3 各条件の高調波含有率および総合電圧ひずみ率

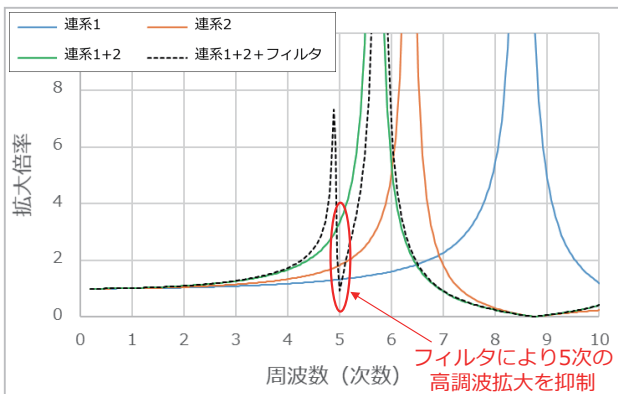
1+連系2 (No.3) の状態になると、第5次高調波が大きく増加したことで、総合電圧ひずみ率が高調波環境目標レベルの3%を超過しており、何らかの対策が必要であることがわかる。その対策としてフィルタを設置した場合 (No.4) は、第5次高調波を十分抑制でき、効果的に対策できていることがわかる。以上のように、電力系統解析技術を活用することで、高調波共振の対策の必要性や対策の効果を定量的に確認することができる。

本解析で用いた電力系統解析ソフト PowerFactory では、上記のように第5次高調波や第7次高調波が何倍に拡大するかだけでなく、各周波数に対するインピーダンスの変化を考慮し、周波数と拡大倍率の関係を求めることができる。この手法を「周波数掃引解析」という。

図4に周波数掃引解析の結果を示す。連系1の状態に比べて、連系2の状態のほうが、第1共振周波数（最も低い共振周波数）が若干低くなっていることがわかる。共振周波数はインダクタンスと静電容量の積が大きいほど低くなるため、連系1よりも連系ケーブルが長く、大きな静電容量とインダクタンスを有している連系2のほうが低くなったと考えられる。連系1+連系2になると、再エネ設備側の静電容量が合成されて大きくなるため、さらに第1共振周波数が低下している。図4(b)は第5次高調波付近を拡大表示したものである。



(a) 40次まで



(b) 10次まで拡大

図4 各条件の高調波拡大倍率

連系1+連系2の第1共振周波数は、第5次の周波数より若干高いものの、その近傍の周波数帯においても高い拡大倍率となっていることがわかる。その結果、図3で示したように連系1+連系2において、第5次高調波含有率および総合電圧ひずみ率が高い値になっている。対策としてフィルタを追加した場合には、第5次高調波付近の拡大倍率が低下していることがわかる。ここで設定したフィルタは、第5次高調波のみを対象とした単一同調フィルタのため、第5次高調波から離れた周波数帯の特性はフィルタがないときと同等である。このように周波数掃引解析により、各共振周波数や系統連系による高調波拡大倍率の変化を詳細に把握することができる。

図4に示したとおり、共振周波数においては、当該周波数成分の拡大倍率が大きくなり、高調波障害のリスクは非常に高くなる。したがって、高調波共振による高調波の拡大を防ぐためには、高調波（特に第5次や第7次）の周波数と共振周波数を一致させないことが最低限必要と考える。また、高調波の周波数と共振周波数が近い場合にも、高調波が環境目標レベル以上に拡大することがあることも本解析事例で示した。このような高調波拡大現象により、前述の高調波障害を発生させないためには、事前の十分な検討や本稿で紹介した解析技術による評価が重要だと考える。

4 おわりに

カーボンニュートラルの実現に向けて、再エネの導入拡大および有効活用は非常に重要である。その一方で、電力の安定供給と電力品質を維持するためには、様々な課題に対応する必要がある。本稿では、そのなかでも高調波問題、特に高調波共振現象について着目し、定量的に高調波電圧の拡大倍率や高調波共振対策の効果を解析した例を紹介した。大規模な再エネ設備を電力系統に接続する場合には、本稿で紹介した高調波解析以外にも冒頭に記載したような様々な解析技術が必要である。それらの解析結果を総合的に評価したうえで、適切な電力設備構成や運用方法を決定することが重要だと考えている。今後も、本稿やこれまでの東光高岳技報で取り上げた電力系統解析技術だけでなく、様々な解析技術を活用し、再エネの導入拡大はもちろんのこと、高度化する電力系統の構築・運用にも貢献していきたい。

■参考文献

- (1) 資源エネルギー庁：「第7次エネルギー基本計画の概要」，(2025)
- (2) 森佑介，滝澤明広：「再生可能エネルギー導入拡大に向けた系統連系解析」，東光高岳技報，No.8 (2021)
- (3) 森佑介：「電力の安定供給を支える解析技術

PowerFactory における瞬時値解析機能の妥当性検証」,
東光高岳技報, No.11 (2024)

- (4) 森佑介:「電力の安定供給と高度利用へ貢献する
PowerFactory による電圧変動解析技術」, 東光高岳技
報, No.12 (2025)
- (5) 日本電気協会系統連系専門部会編:「系統連系規程
(JEAC9701-2024)」, (2024)
- (6) 経済産業省:「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」, (2004)
- (7) 電気協同研究会高調波対策専門委員会編:「電力系統に
おける高調波とその対策」, 電気協同研究, 第 46 巻,
第 2 号 (1990)
- (8) 福田泰史:「電力系統における高調波の実態」, 平成 31
年電気学会全国大会 (2019)
- (9) 「系統解析ソフトウェア 独国 DIgSILENT 社製
PowerFactory」, 東光高岳技報, No.9 (2022)

■語句説明

- 注 1) サージ: 落雷時やスイッチのオン・オフによって瞬間
的に発生する過電圧や過電流のこと。
- 注 2) 進相コンデンサ: 電気の力率を改善することで電気の
利用効率を高めるための機器。
- 注 3) 直列リアクトル: ここでは進相コンデンサに直列に接
続されるリアクトルのことをさす。高調波に対して誘
導性となるように設定し, 同じく誘導性である電力系
統との共振を防ぐ。
- 注 4) PWM 制御: Pulse Width Modulation 制御。高速ス
イッチングにより, 出力波形を制御する方法。
- 注 5) 分布定数回路: 距離の概念を考慮した電気回路で同一
線路上でも位置によって電圧や電流が変化する回路。
- 注 6) 単一同調フィルタ: 特定の周波数に対してのみ低いイ
ンピーダンスとなるフィルタ。

森 佑介

戦略技術研究所 技術開発センター
解析・試験技術グループ 所属