

# 最近の高調波問題と対策について ～再エネ主力電源化を迎えて～

Possible Harmonic Resonance Problems and Mitigation Proposals

–Preparing for the age of renewable energy resources as major power generation–

田中 康博  
Yasuhiro Tanaka

植村 浩之  
Hiroyuki Uemura

長崎 則久  
Norihisa Nagasaki

黒田 和宏  
Kazuhiro Kuroda

荻原 義也\*  
Yoshiya Ogihara

真山 修二  
Shuji Mayama

太田 一雄  
Kazuo Ota

電力系統における電力品質は、供給される電圧の振幅・周波数が一定であること、三相電圧の各振幅が等しく位相差が120度であること、基本波周波数（50Hz/60Hz）のみで表される正弦波であること、そして電力供給が瞬時も途切れないことが理想であり、それぞれ規格で決められた指標で評価される。日新電機(株)は、電力品質改善に寄与する対策技術・機器の専門メーカーとして、各種電力機器・システムを開発・製品化してきた。本稿では、電力品質の中でも「高調波問題と対策」に焦点をあて、再エネ主力電源化の進行によって懸念される、新たな高調波問題と対策について報告する。

In an electrical network, achieving optimal power quality entails maintaining a steady amplitude and frequency of the supplied voltage, characterized by a sinusoidal waveform at 50/60Hz, while ensuring uninterrupted power supply. Nissin Electric Co., Ltd., a leading manufacturer of power equipment, has been at the forefront of addressing power quality issues. This paper aims to examine potential harmonic resonance challenges arising from the increasing penetration of large-capacity renewable energy resources in a power system, and propose mitigation measures.

キーワード：高調波、共振拡大、高調波フィルタ、風力発電、ケーブル系統

## 1. 緒 言

電力系統における電力品質は、供給される電圧の振幅・周波数が一定であること、三相電圧の各振幅が等しく位相差が120度であること、基本波周波数（50Hz/60Hz）のみで表される正弦波であること、そして電力供給が途切れないことが理想である。

これに対し、実際の電力系統では、接続される電力機器や負荷機器の運転特性、自然災害などの影響を受けて、「電力品質が低下する」状況が発生し、系統に接続される複数の機器の安定運転ができない状態につながることもある。

そこで、電源供給側の管理目標値の考え方、品質に影響する外乱の測定評価法、機器からの外乱発生量の許容限度値、機器の外乱に対する耐量（安定運転のための限度値）などが標準化されている。代表例として、ヨーロッパの低圧配電系統電圧の品質（EN 50160で指定）を表1に示す<sup>(1)</sup>。

日新電機(株)は、電力用コンデンサ、分路リアクトル、SVC（静止型無効電力補償装置）、高調波フィルタ、瞬低・停電対策装置など、電力品質の改善に係る機器の製作や、その検討のための系統解析技術で産業の発展に貢献してきた。

本稿では、電力品質の中の高調波を取り上げ、その問題と対策を説明する。

高調波問題は、古くて新しいものであり、過去、問題が

顕著になるたびに一般社団法人 電気学会、一般社団法人 電気協同研究会などで調査研究がおこなわれてきた。

再生可能エネルギー（再エネ）の主力電源化を迎え、新たな高調波問題の顕在化も懸念されることを以下の章構成で説明する。

2. 高調波とは何か
  3. 高調波電流の発生源と発生原理
  4. 高調波による障害事例
  5. 高調波抑制のための管理方法
  6. 再エネ、特にWF（Wind Farm）における高調波問題
  7. 大容量WF設置により複雑化しつつある高調波問題
- これらを体系的に説明することにより、電力系統側、再エネ電源側、連系設備（長距離ケーブル系の高調波フィルタ対策含む）製作側の間の迅速で正確な情報交換の実施を期待するものである。

## 2. 高調波とは何か

供給される電圧波形が理想とする正弦波形（50Hz/60Hz）より歪んでいるのは、高調波と呼ばれる基本波周波数の整数倍の周波数成分が重畳しているため、主に以下の高調波成分が含まれている。

表1 ヨーロッパの低圧配電系統電圧の品質 (EN50160)

系統周波数 (10秒平均)	連系系統	年間の99% 年間の1%	周波数変動	± 1%以内 ± 6%以内
	孤立系統	年間の95% 年間の5%	周波数変動	± 2%以内 ± 6%以内
電圧変動	ゆっくりした変動 (10分rms)	一週間の95%	電圧変動	± 10%以内
	フリッカ生じない速い変動		電圧変動	± 5%以内
	フリッカを生じる変動	一週間の95%	P st = 1	P lt = 0.8
電圧ディップ		年間数十~千回	0.5秒以内	電圧低下60%以内
瞬 停		年間数回~数百回	その70%は1秒以下	
停 電		年間10~50回	3分以上継続	
電圧不平衡	逆相電圧値 (10分rms)	一週間の95%	正相分の2%以内	
電圧高調波	(10分rms)	一週間の95%	各次調波は別表の値以下 総合電圧ひずみ率8%以内	
電力線搬送信号		一日の95%以上	別図の大きさ以下	
過渡過電圧	異常電圧サージ	系統事故時 µs - ms	数秒程度以下、1.5kV程度 一般に6kV以下	

文献 (1) 中の第1-7表をもとに作成

3次調波：150Hz/180Hz、  
5次調波：250Hz/300Hz、  
7次調波：350Hz/420Hz・・・

つまり、歪んだ波形を周波数分析（フーリエ展開）することで各次調波成分に分解される。

例えば、矩形波をフーリエ展開すると、基本波振幅を100%として式 (1) のように多項式であらわされ、複数の高調波次数成分に分解される。

$$100 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + 33 \cdot \sin(3\omega_0 \cdot t) + 20 \cdot \sin(5\omega_0 \cdot t) + 14 \cdot \sin(7\omega_0 \cdot t) + \dots \quad (1)$$

ここで、

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad f_0 = 50/60\text{Hz}$$

その逆の過程を基本波から7次調波までの合成で表したものが図1である。このように、定常的には歪波形は複数の高調波次数成分の重畳として表現される。

発電機の作り出す電圧が正弦波であっても、つながる電力機器、負荷機器の運転特性により、高調波電流が機器に流れた場合（機器が高調波電流を発生する、と表現する）、これによる線路や変圧器のインピーダンス電圧降下が生じ、歪んだ電圧波形が機器の接続点に現れる。

三相回路で多く問題になるのは、5次調波、7次調波といった比較的低次の高調波成分である。2次、4次といった偶数次調波も存在するが、通常その大きさが問題になることは少ない。ただし、無負荷変圧器投入時の過大な励磁突入電流には、過渡的な直流成分に加え、偶数次調波成分も存在するため、過渡的な共振性過電圧や過電流の発生に注意が必要である。

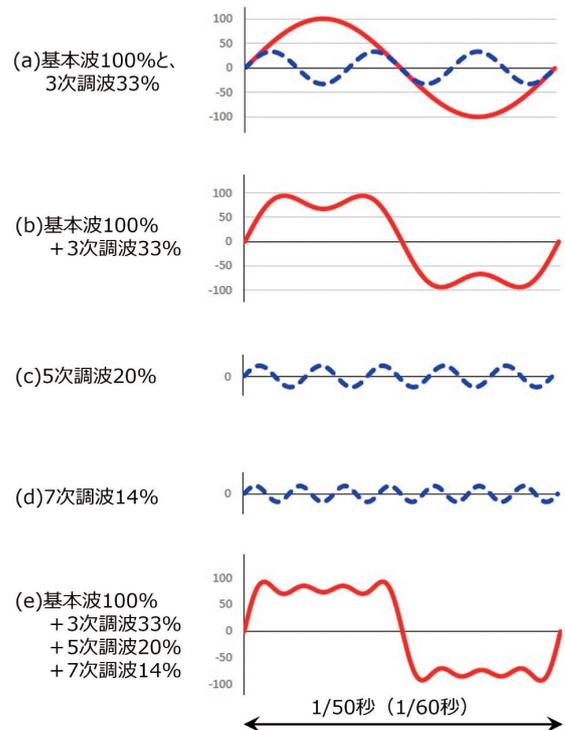


図1 式 (1) の各次調波合成（重畳）波形

### 3. 高調波電流の発生源と発生原理

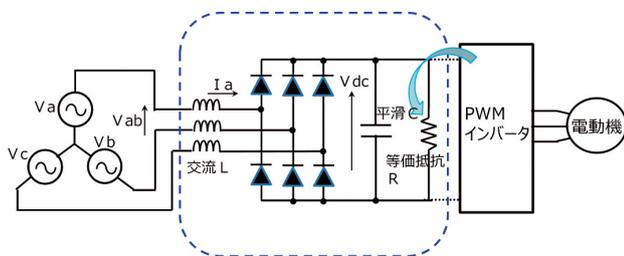
高調波電流を発生する機器は、家電製品（TV、エアコン、冷蔵庫、充電器・・・）、直流電気鉄道の変電所の整流器、製鐵所の圧延設備（可変速駆動）など多種多様である。わずかながら、変圧器の定常時の励磁電流にも高調波成分が含まれる。

発電所から正弦波の電圧を送っても、これらの機器は基本波電流で仕事をするだけでなく、高調波電流というノイズ成分を出す。わかりやすいたとえ話として、多くの支流

から集まった水が大きな川となり海に流れ混む水系のモデルがある。

各支流にはノイズ成分（高調波）を発生する不特定多数の機器がたくさんつながっており、浄化装置を備えて、大半を除去する需要家もあれば、少量と判断しそのまま流出させている需要家もある。流出したノイズ成分（高調波）の総和として、支流あるいは、大きな川、最終的に海（系統）のノイズ成分（高調波）のレベルが増加していくことになる。

高調波電流を発生する代表例として、高調波抑制対策技術指針<sup>(2),(3)</sup>より、**図2**に示すインバータの三相全波整流回路部（ダイオードブリッジ、平滑コンデンサあり、かつ平滑リアクトルなし）から発生する高調波電流発生量（定格基本波電流に対する%値）の一部を**表2**に示す。



**図2 三相全波整流回路部**  
(平滑コンデンサ付き、かつ平滑リアクトルなし)

**表2 図2の整流器の高調波電流発生量**  
(平滑コンデンサあり、かつ平滑リアクトルなし)

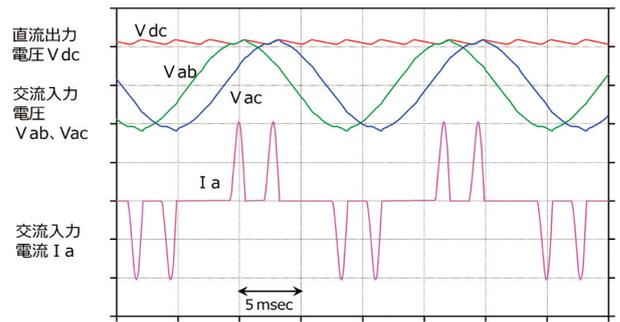
交流リアクトル (%X)	In / 基本波電流値 (%)							
	n=5次	7次	11次	13次	17次	19次	23次	25次
1.0	65.0	41.0	8.5	7.7	4.3	3.1	2.6	1.8
5.0	31.0	8.7	6.2	3.3	2.3	1.9	1.0	1.0

文献(3)のp.268をもとに作成

**図2**において、平滑コンデンサ電圧よりも交流電圧が高い期間に、パルス状の電流がコンデンサに流入してコンデンサ電圧をピーク値まで充電する。それを過ぎるとコンデンサが放電することで、電圧がゆっくりと下がっていくが、コンデンサ電圧が交流電圧よりも高ければ充電電流は流れ込まないため、**図3**のような交流入力電流となる。

**図3**では、A相－B相、A相－C相のルートでA相に充電電流が流れるため、半波で2つのパルス状電流波形となり、「ウサギの耳」波形とも呼ばれている。なお、**表2**は、**図2**においてPWMインバータと電動機を等価抵抗Rで置き換えての高調波電流発生量の計算値である。

このような特定機器からの高調波電流が系統側に流出する計算は、電力系統側、需要家構内の機器（受電変圧器、力率改善用コンデンサ、高調波フィルタなど）を線形特性



**図3 図2の整流回路の主要波形イメージ**  
(平滑コンデンサあり、かつ平滑リアクトルなし)

のモデルとし、発生源を定電流源として、次数成分ごとに独立した等価回路で計算される<sup>(2),(3)</sup>。

実際には、高調波電流にも三相間不平衡が存在し、一般負荷（動力機器、照明等）にも一部の高調波電流が分流するが、それらは単相等価回路上で力率を仮定した線形要素（R-L）で表現して、解析することが一般的である<sup>(4),(5)</sup>。

#### 4. 高調波による障害事例

負荷機器から発生した高調波電流は、流れやすい所に流れるため、インピーダンスの低い力率改善用コンデンサ設備に多く流入して、コンデンサ設備内の直列リアクトルを過熱させたり、通過する途中の機器（変圧器など）に過熱あるいは騒音を発生させる問題が起きることがある。

さらに、「共振」現象が起きると、高調波による過電圧や機器に対する過電流・過負荷などの事故を引き起こす。

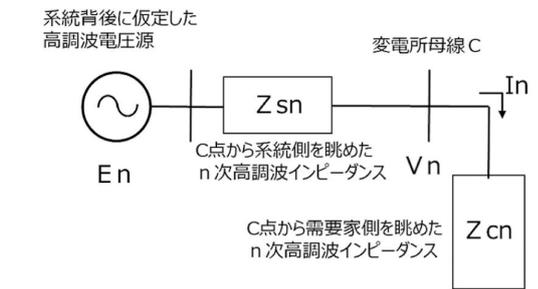
よく知られているのは、1994年3月24日の午後10時過ぎに、某科学教育施設の電気室で力率改善用コンデンサ設備の直列リアクトル（L=6%）に過剰な5次調波電流が流れ込み、直列リアクトルの焼損に至った事例である。

この事故は、某科学教育施設の設備や付近の特定機器から発生した高調波ではなく、不特定多数の機器から発生した電流が系統に流れ込み、それが特定の機器（事故が発生した力率改善用コンデンサ）に流入したためと考えられている<sup>(6)</sup>。

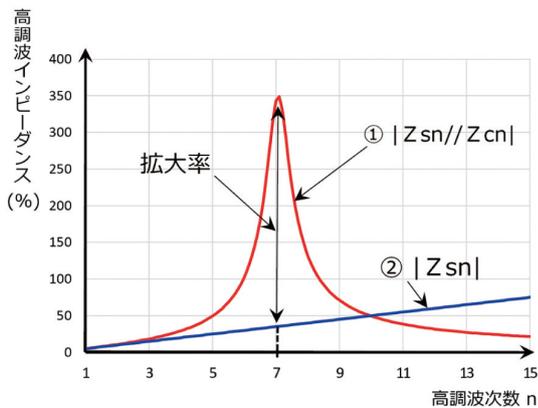
この事象は、「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」、「高圧または特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」が1994年10月に通商産業省（現、経済産業省）から通知される直前のタイミングで起きたこともあり、広く高調波対策の重要性を認識させるものとなった<sup>(2)</sup>。

このように、特定の需要家（特定の発生源）からの高調波分流ではなく、不特定多数の機器から高調波電流が系統に注入された結果として、あたかも電力系統の背後に高調波電圧源Enが存在すると等価表現して、高調波分流状態を検討する場合も増えてきている。

図4にて、低いインピーダンスとなる回路ルートに高調波電流が流れ込むことを説明する。



(a) 系統側と需要家側の等価回路



(b) 高調波拡大率(①と②の比)の図示

図4 高調波拡大現象の説明図

図4(a)において、系統側インピーダンス  $Z_{sn}$  と需要家側インピーダンス  $Z_{cn}$  で決まる共振周波数(次数)が高調波電圧源の次数  $n$  と一致すると、式(2)において、 $Z_{sn} + Z_{cn} \approx 0$  となり、共振次数  $n$  の電流が需要家側に集中して流れるとともに、高調波電圧  $V_n$  が拡大して、接続機器に障害を起こすことになる。図4(b)は7次調波共振の例である。

$$\begin{aligned} V_n/E_n &= Z_{cn}/(Z_{sn} + Z_{cn}) \\ &= (Z_{sn}/Z_{cn}) / Z_{sn} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 $Z_{sn}/Z_{cn}$  は、式(3)で表すとおり、 $Z_{sn}$  要素と  $Z_{cn}$  要素の並列インピーダンスを意味している。

$$Z_{sn}/Z_{cn} = Z_{sn} \times Z_{cn}/(Z_{sn} + Z_{cn}) \dots\dots\dots (3)$$

系統側を変圧器・送電線などの誘導性インピーダンス、需要家側をコンデンサ負荷による容量性インピーダンスのように単純化して表現すると、

$$Z_{sn} = j \cdot \omega' L, Z_{cn} = -j \cdot 1/\omega' C \text{ となるので、式(4)よ}$$

り共振角周波数  $\omega'$  が求められる。

$$\omega' = 1/\sqrt{LC} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$\omega' = 2\pi f' \quad f' = \text{共振周波数}$$

高調波拡大率  $|V_n/E_n|$  は、図4(b)において、次数  $n$  におけるグラフ①とグラフ②の比率に相当する。 $Z_{cn}$  にインピーダンス  $Z_{fn}$  の高調波フィルタを並列に接続することで、式(3)の低減、すなわち図4(b)に示す高調波拡大率を低減できることがわかる。

### 5. 高調波抑制のための管理方法

高調波対策もノイズ対策と同様に、①発生させない、②伝えない(系統に流出させない)、③機器の耐量を高くする(体力をつける)、という3つの方法がある。

①と②は、家電製品・汎用品など個別機器からの発生量を抑制する「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」、あるいは、それ以外の機器を対象に定められた「高圧また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」を、機器メーカー、需要家がそれを遵守することに対応する。後者のガイドラインに対して実行するための具体的な技術指針(JEAG9702-1995)が産業界に示された<sup>(2)</sup>。需要家の契約電力相当値kWベースで、mA/kWの形で各次高調波電流(単位mA)の系統への流出上限値を抑制するために、パワーエレクトロニクス機器からの発生量を低減する方法(多相化、PWM化、リアクトル挿入)や流出量を低減する方法(受動型フィルタ・能動型フィルタ対策など)の原理と運用法が示されている。なお、現在の技術指針最新版は、平成30年11月に改訂されたものである<sup>(3)</sup>。また、JIS C 61000-3-2(2003)「電磁両立性-第3-2部:限度値-高調波電流発生限度値(1相当たりの入力電流が20A以下の機器)」の制定に伴い、平成16年(2004年)に「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」が廃止され、ガイドラインにおいてはJIS C 61000-3-2を引用することとなった<sup>(3)</sup>。

ここで、受動型高調波フィルタ(以下、高調波フィルタ)の構成と特性について、基本的な説明を行う。高調波フィルタには多くの回路構成があるが、図5に示す3タイプが代表例として知られている。

以下の説明は、特定の高調波発生源(整流器など)があり、その対策として近傍にフィルタを設置して、高調波電流をフィルタに分流させる(系統流出電流値をガイドライン上限値以下に抑制する)ことを想定している。

高調波フィルタには、特定の高調波次数を対象とした単一同調フィルタと、特定の高調波次数よりも高い領域を広く対象としたハイパスフィルタがある<sup>(4),(7)</sup>。以降に、各フィルタの構成を簡単に記載する。

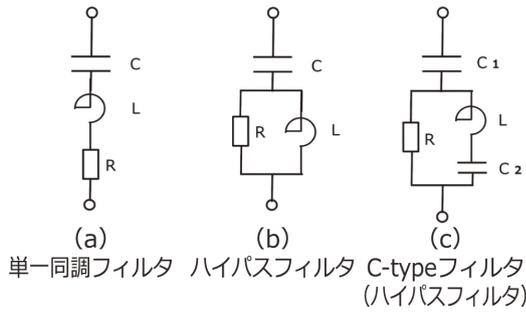


図5 主な高調波フィルタの構成

(a) 単一同調フィルタ

設定した周波数（高調波次数）に対して、系統インピーダンスよりも十分低いフィルタインピーダンスとなるように、L-C-R直列回路として構成する。角周波数 $\omega$ とインピーダンス $Z$ の関係式は式(5)となる。

$$Z = R + j \cdot (\omega L - 1/\omega C) \dots\dots\dots (5)$$

同調角周波数 $\omega'$ を中心として、その前後の周波数に対するインピーダンス近似を行うと、式(6)のように表される。

$$Z \doteq R(1 + j \cdot 2 \cdot Q \cdot \delta)$$

$$= |Z'| (1/Q + j \cdot 2 \cdot \delta) \dots\dots\dots (6)$$

$$|Z| \doteq R \sqrt{(1+4(Q \cdot \delta)^2)}$$

ここで、 $\omega' = 1/\sqrt{LC}$   
 $\omega'$ からの同調ずれ  $\delta = (\omega - \omega')/\omega$   
 固有インピーダンス  $|Z'| = \omega' L = 1/\omega' C$   
 共振の鋭さ  $Q = \omega' L/R = |Z'|/R$

式(6)より、 $|Z'|$ を小さくするか、または、 $Q$ を大きくすれば、フィルタインピーダンスは低くなる事がわかる。

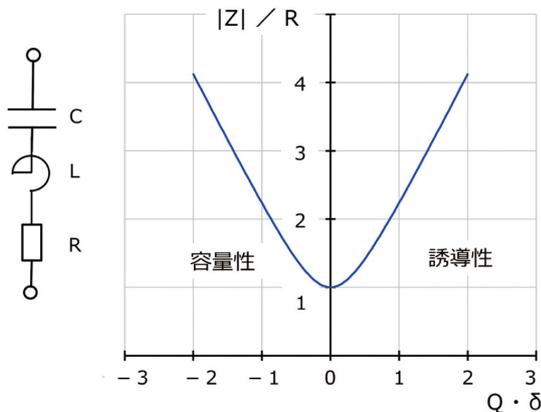


図6 単一同調フィルタのインピーダンス特性  
文献(7)中の図6-2-11を一部編集

これは、フィルタの基本波進相容量を大きくする、または、リアクトルの損失を小さく（ $Q$ を大きく）することによって可能である。しかし、 $Q$ を過剰に大きくした場合、同調ずれ $\delta$ により、高調波吸収効果が急減すること、およびフィルタの流入電流増大による過負荷をもたらすことに注意が必要である。同調ずれの要因としては、系統の周波数変動、機器の製作誤差、機器パラメータの温度による変化がある。

図6は、単一同調フィルタ特性の式(6)を一般化した変数、すなわち、横軸を $Q \cdot \delta$ 、縦軸を絶対値 $|Z|/R$ で表現したものである<sup>(7)</sup>。

(b) ハイパスフィルタ

設定した周波数（高調波次数）以上の広い周波数領域で低い抵抗性のインピーダンスを持つ。LとRの並列回路とCの直列構成となる。

ハイパスフィルタのインピーダンスは、式(7)で表現される。

$$Z = 1/j\omega C + 1/(1/R + 1/j\omega L) \dots\dots\dots (7)$$

図7はハイパスフィルタ特性として、式(7)を一般化した変数、すなわち、横軸を $\omega/\omega'$ 、縦軸を $|Z/Z'|$ で表現したものである。

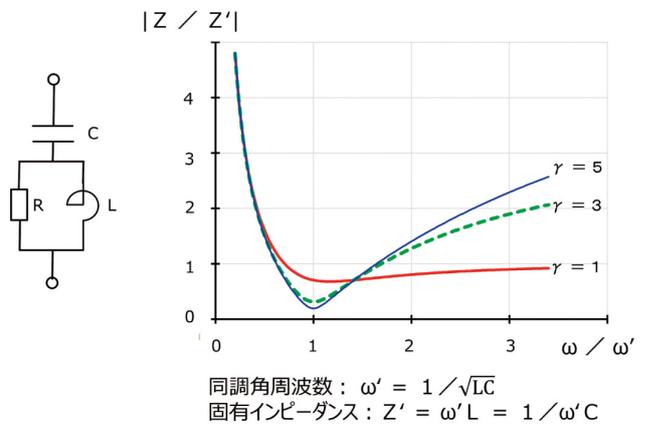


図7 ハイパスフィルタのインピーダンス特性  
文献(7)中の図6-2-12を一部編集

図7は、同調角周波数 $\omega'$ において、最小となるインピーダンスを示し、 $\gamma$ の値によって低いインピーダンスとなる周波数帯域が決まる。

$\gamma$ は共振の鋭さであり、単一同調フィルタと逆の表現、すなわち、 $\gamma = R/\omega' L$ となる。 $\gamma = 1 \sim 5$ 程度に選定され、同調角周波数 $\omega'$ 付近でも同調ずれによる影響は小さい。

$\gamma = 1$ に設定すると理想的な低インピーダンス（抵抗性）となるが、基本波成分の流入も含めた抵抗器での損失が非常に大きくなる。

一般には、単一同調フィルタとハイパスフィルタを組合わせて用いられる。高調波発生量の多い低次調波を各次数の単一同調フィルタで分担し、高次高調波全体の吸収を目的としてハイパスフィルタで分担する構成である。

(c) C-Type フィルタ (ハイパスフィルタ)

C-Type フィルタは、高調波インピーダンス特性がハイパスフィルタ特性とほぼ同じである。

基本波電流による抵抗器での損失を防止するために、**図5 (c)** に示すように抵抗器と並列に L-C2 の基本波共振回路を設けたものである。**図5 (b)** ハイパスフィルタと同様に、同調角周波数  $\omega'$  以下では抵抗器によるダンピング効果は期待できないが、 $\omega'$  よりも高い周波数成分に対してダンピング効果を示す。5次程度以下の同調周波数が必要な場合に、C-Type フィルタがしばしば採用されている<sup>(8)</sup>。これは、電力系統のインピーダンス変化に対応するための低インピーダンス特性と基本波成分を含めた抵抗器の損失低減を両立するためと考えられる。

## 6. 再エネ、特に WF (Wind Farm) における高調波問題

再エネ (太陽光発電、風力発電\*) の多くは、電力用変換器を介して系統と接続 (連系) されるため、電力用変換器の瞬時電流制御により、ほとんど歪のない電流が系統に注入されると考えられる。

※最近の大容量 WF では、二次励磁型誘導発電機 (DFIG) 方式 (誘導発電機二次巻線と系統の間に Back-To-Back 接続の電力用変換器が入る) の風車と、フルコンバータ同期発電機方式 (同期発電機出力と系統の間に Back-To-Back 接続の電力用変換器が入る) の風車が主流であると考えられる。

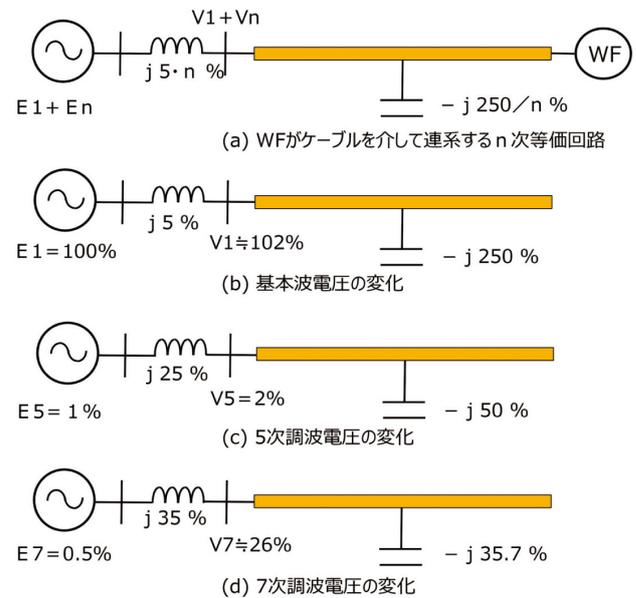
なお、電力用変換器の電流制御系の応答周波数領域やスイッチング周波数が**式 (2)** の共振次数に近づくと、電力用変換器特性を含んだ高調波拡大現象が発生するといわれている<sup>(9)</sup>。こういった現象の解析は、単純な固定の電流源や電圧源モデルは使えず、対策検討も含めて風車メーカー側の検討領域となる。

以降では、これら再エネ電源の内、大容量ウィンドファーム (WF) が長距離ケーブルで系統連系される場合を扱う。具体的には、風車自身が発生する高調波ではなく、大容量 WF が長距離ケーブルで系統連系されるとき、系統背後に等価的に存在する高調波電圧を共振拡大させる現象についての説明である。

WF がケーブルを介して系統と連系される場合には、**図4** で示したように連系点から上位系を眺めたインピーダンス (あるいは短絡容量) とケーブルの対地インピーダンス (あるいは充電容量  $Q_c$ ) によって、低次高調波で共振条件が成立することがある。共振次数の簡略算定式として**式 (8)** が良く知られている<sup>(10)、(11)</sup>。

$$\text{共振次数 } n = \sqrt{(\text{短絡容量 (MVA)} / \text{充電容量 (MVA)})} \dots (8)$$

電力系統 (発電機、送電線、変圧器) をインダクタンス、地中ケーブルをキャパシタンスとおき、単純な等価回路で表わすことにより、基本波、5次調波、7次調波電圧の変化を**図8**で説明する。



**図8** 各自調波電圧に分解して説明するイメージ図

**図8**は、風車側が開放されている条件での説明であり、(a) 系統側の基本波インピーダンス =  $j \cdot 5\%$  (誘導性)、ケーブルの対地インピーダンス =  $-j \cdot 250\%$  (容量性) としている。%値は100MVAベースである。

また、系統背後電圧は、基本波 = 100%、5次調波電圧 = 1%、7次調波電圧 = 0.5%と設定している (**図8 (a)**)。

(b) 基本波電圧の拡大

系統とケーブルの接続点の基本波電圧は

$V1 = 100\% \times (-j \cdot 250) / (j \cdot 5 - j \cdot 250) \approx 102\%$  となる。電圧が2%上昇することを意味し、抑制するためには、分路リアクトルを設ける必要がある (**図8 (b)**)。

(c) 5次調波電圧の変化

系統とケーブルの接続点の5次調波電圧は

$V5 = 1\% \times (-j \cdot 50) / (j \cdot 25 - j \cdot 50) = 2\%$  となる。系統背後の5次調波電圧E5を2倍に拡大することになる (**図8 (c)**)。

(d) 7次調波電圧の変化

系統とケーブルの接続点の7次調波電圧は

$V7 = 0.5\% \times (-j \cdot 35.7) / (j \cdot 35 - j \cdot 35.7) \approx 26\%$  となる。実際には回路抵抗や負荷が存在するので、V7は26%よりも小さくなるが、共振拡大による電力機器への影

響が懸念される (図8 (d))。

以上の簡略計算でもわかるように、以下の特性が変化すると、ケーブルとシステムの接続点での高調波電圧値が変化し、フィルタ効果も変化することが予想される。

- i) 系統側の高調波インピーダンス特性
- ii) ケーブルも含むWF側の高調波インピーダンス特性
- iii) 系統背後に想定している高調波電圧値

i) では、系統構成・並列発電機数、調相設備の投入状態の変化、ii) では、同一接続点でのケーブルによるWF連系の増加や、接続点付近の負荷 (ダンピング効果が期待される) の変化、iii) では、家電・産業機器などのパワエレ機器の増加が、それぞれ対応する。

## 7. 大容量WF設置により複雑化しつつある高調波問題

WFの建設は風況の良い地域に集中するため、複数のWFが電力系統の同一変電所母線に接続、または電氣的に近接して接続される状況が発生すると推測される。

また、近年の自営線で連系する大容量WFでは、雷害・積雪対策や運転開始までの見通しの容易さから、高電圧 (66~154kVクラス) で長距離 (30~50km) のケーブルによる連系案件が増加していくと考えられる。

このような長距離ケーブルを伴う風力発電所が、同一の変電所母線、または電氣的に近接して接続される場合には、以降に示す高調波問題が発生する可能性がある。その対策・運用については個別のWFプロジェクトごとではなく、関係者が課題を共有し合理的に検討する必要がある。

### 7-1 高調波共振現象による高調波電圧の拡大

図9では、短絡容量2000MVAの系統に、充電容量が10~30MVA相当の自営線 (ケーブル) がつながる場合を説明している。

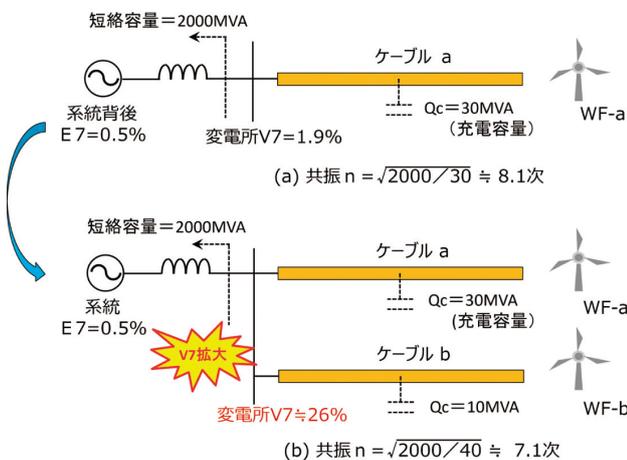


図9 WFケーブル連系の増加による高調波共振の発生

- (1) ケーブルaだけの場合は、高調波は拡大しないため (系統背後の8次調波成分は非常に小さい)、フィルタ対策不要である。
- (2) ケーブルbの事業者は、ケーブルaの情報を持たないと、高調波は拡大しないと判断しフィルタ対策を実施しない。
- (3) ケーブルaとケーブルbが接続された時点で、7次調波共振が発生し、変電所接続点でのV7が拡大し、3%を超過する。よって、7次調波フィルタが必要になる。

### 7-2 高調波共振周波数の変化による高調波対策効果の変化

図10では、短絡容量2000MVAの系統に、充電容量が40~80MVA相当の自営線 (ケーブル) がつながる場合を説明している。

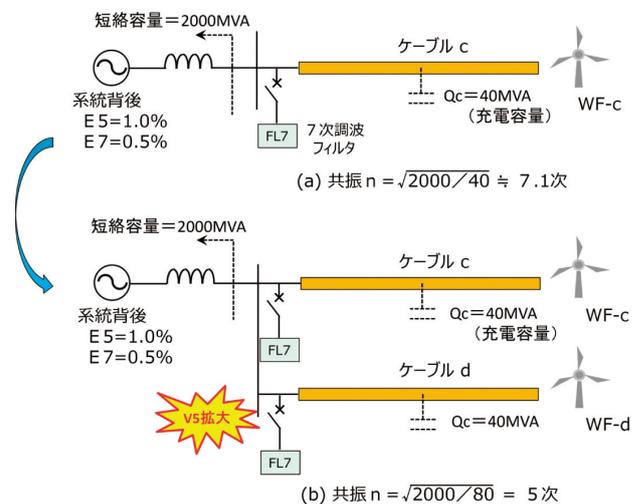


図10 WFケーブル連系の増加による高調波フィルタ効果の変化

- (1) ケーブルcだけの場合は、7次調波で共振拡大するので7次調波対策が必要であり、7次調波フィルタを設置する。
- (2) ケーブルdの事業者は、ケーブルcの情報を持たないと、ケーブルcと同様に7次調波対策が必要と判断して、7次調波フィルタを設置する。
- (3) ケーブルcとケーブルdが系統に接続された時点で、5次調波共振が発生し、変電所接続点のV5が拡大して3%を超過する。よって、5次調波フィルタが必要になる。

以上の説明は、課題をわかりやすく示すためのものである。実際には系統に7次調波フィルタを設置する場合には、その低次側、つまり5次調波での拡大を避けるために5次調波フィルタも併せて設置している。

### 7-3 高調波フィルタ対策の留意点

主にコンデンサとリアクトル、抵抗器で構成される受動型フィルタは、設計・使用に際して、いくつかの留意点が指摘されている。

これらの留意点について、文献<sup>(2),(7)</sup>をもとに若干の編集を加え、以下に整理する。

- ①同調周波数よりも低次側は、容量性のリアクタンスとみなせるので、系統側と新たな共振周波数を作り出し、フィルタ自身が過負荷になる場合がある。  
ただし、存在する共振周波数の高調波成分が小さければ、問題にはならない。
- ②6章で述べたように、周囲の電気回路条件の影響を受けるため、事前情報をもとに十分なシミュレーション（系統解析）が必要である。  
また、条件変化に対して設計裕度を確保しておく必要がある。
- ③フィルタは、進みの無効電力設備としてふるまうため、分路リアクトルを設けて無効電力を打ち消す場合もある。逆に、フィルタの力率改善効果を活用する場合もある。
- ④高調波フィルタ設備（リアクトル）から発生する騒音への対策が必要となる場合がある。
- ⑤高調波フィルタ設備の保守停止時の代替対策を考慮しておく必要がある。

## 8. 結 言

前半では、特定の負荷から発生する高調波に関して一般的な説明を行い、後半では、不特定多数の高調波発生源から系統に注入された結果として電氣的に発生源がどう見えているか、さらにはそれが再エネ連系、特に大容量WF連系システムにどのような影響を及ぼすかを単純化した等価回路で説明した。

研究報告<sup>(12)</sup>によると、8年間の年度実績推移から、少なくとも超高压系統と商業地域の6.6kV配電系統で総合電圧歪が減少していること、1994年に制定された高調波抑制対策ガイドライン、翌年に制定された高調波抑制対策技術指針などによる高調波の低減効果が確実に現れていることが報告されている。

一方で、大容量WFを連系するケーブル系統の導入は今後ますます進んでいくと予想され、電力系統との間で高調波共振問題の発生が懸念される。この問題は、WF導入拡大とともに、様相が複雑に変化していく可能性を秘めている。

WF運転開始後に高調波対策の追加が必要となった場合、既存のフィルタ設備の過負荷、追加するフィルタ設備の設置スペースの確保や、分路リアクトル追加による電流ゼロミス現象（過渡時に交流電流波形がゼロ点を横切らない状態が続くこと）などの系統対策の変化により、WF連系システム全体に影響を及ぼすことが想定される。よって、

WF検討段階から、電力系統、WF連系システムなどの関係者間で情報交換を密とし、将来計画も見据えて合理的な高調波対策の検討を進めていくことが望まれる<sup>(7),(13)</sup>。

### 参 考 文 献

- (1) 「電力品質に関する動向と将来展望」、電気協同研究第55巻第3号、p.10（平成12年1月、2000年）
- (2) 日本電気協会、「高調波抑制対策技術指針」、JEAG 9702-1995（平成7年6月、1995年）
- (3) 日本電気協会、「高調波抑制対策技術指針」、JEAG 9702-2018（2019年5月）
- (4) 山口、「電力系統の高調波とその対策」、電学誌95巻4号、pp.19-26（1975年）
- (5) 室谷、「W. 高調波計算」、電学誌100巻1号、pp.25-28（1980年）
- (6) 中部電気管理技術者協会、「協会の窓」2021年春号、pp.21-22
- (7) 高調波対策専門委員会、「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、pp.62-64、p.164（1990年）
- (8) WG B3.26, "Guidelines for the design and Construction of AC Offshore Substations for Wind Power Plant," CIGRE, pp.61-65（2011年11月）
- (9) Christoph Buchhagen, et.al, "BorWin1 – First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids," International ETG Congress, VDE（2019年11月17-18日）
- (10) WG C4.502, "Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cable's," CIGRE, p.23（2013年10月）
- (11) M. ValEscudero, et.al, "TECHNICAL CHALLENGES ASSOCIATED WITH THE INTEGRATION OF LONG HVAC CABLES AND INVERTER BASED RENEWABLE GENERATION IN WEAK TRANSMISSION NETWORKS・・・Irish Experiences," CIGRE, C4-110 2018
- (12) 雪平、「電圧歪を中心とした電力品質の統計分析結果」、電力中央研究所研究報告R07006（平成20年5月、2008年）
- (13) 田中 他、「持続的な成長を支えるスマート電力供給システム（SPSS）」、日新電機技報 Vol.66、No.2、pp.54-56（2021年11月）

執 筆 者

田中 康博 : 日新電機(株) 室長



植村 浩之 : 日新電機(株) 参与



長崎 則久 : 特別フェロー  
日新電機(株) 部長



黒田 和宏 : 日新電機(株) 副所長



荻原 義也\* : 特別フェロー  
日新電機(株) 所長



真山 修二 : 電力プロジェクト事業部 技師長



太田 一雄 : 電線・エネルギー事業本部 技師長



\*主執筆者

出典元: 田中康博 他、「最近の高調波問題と対策について~再エネ主力電源化を迎えて~」日新電機技報 Vol.68, No.1, pp.33-42 (2023年5月)