

一般論文

洋上風力発電システムの集電系統における 高調波共振メカニズムと対策

Harmonic Oscillation Mechanism and Countermeasures
at Collecting System on Offshore Windfarm

久保 敏裕
T. Kubo

黒田 和宏
K. Kuroda

長崎 則久
N. Nagasaki

概要

欧州での事例に見るように、再生可能エネルギーの大量導入が進み、とりわけ大規模の洋上風力発電所から陸上まで直流送電するケースが今後増えてくると予想される。一方、多数の風車が連系される交流集電系統において、フルコンバータ方式風力発電機（PWMインバータ）から発生するスイッチング周波数成分が、系統の共振特性により拡大する可能性が指摘されている。本論文ではMMC（モジュラーマルチレベルコンバータ）を用いた直流送電系統モデルにて、共振拡大の条件を明らかにすると共に、これを抑制可能な高調波フィルタの設計とシミュレーションによる効果確認を行った結果を報告する。

Synopsis

Following practical cases in the Europe, it is expected that HVDC transmissions from large-scale offshore windfarms to mainland are increasing. In the AC collection system which a large number of wind turbines are connected, it is pointed out that the switching frequency component from full-converter-type wind turbines may be amplified by the system resonance characteristics. In this paper, such condition is clarified and a harmonic filter which can suppress that amplified harmonics is designed, then confirmation of its effect is discussed by using instantaneous simulations.

1. はじめに

世界的な脱炭素化の流れにより、国内でも再生可能エネルギーの主力電源化への取り組みが進められている。その中でも風力発電への期待は高く、積極的な導入が進められているが、陸上では設置に適する場所が限られてくることから、今後は大規模な洋上風力発電所から陸上まで直流送電するケースが増加してくることが予想される。

その一方で、交流集電系統において、フルコンバータ方式風力発電機（PWMインバータ）から発生するスイッチング周波数成分がケーブル系統の共振特性により拡大する可能性が指摘されている⁽¹⁾。

われわれは、洋上風力発電システムからMMC（モジュラーマルチレベルコンバータ）を介して直流送電する系統において、洋上集電系統の共振条件により、風力発電機から発生した高調波が拡大する可能性を報告してきた⁽²⁾。

これまでの検討では、フルコンバータ方式の風力発電機を簡易的に基本波+単一高調波電圧源でモデル化していた。本論文ではより現実的にPWMスイッチングを模擬し、出力波形に含まれるスイッチング周波数成分が拡大する条件を明らかにする。さらに、集電系統側の対策として、洋上プラットフォームへの設置に適するフィルタの仕様選定を行い、高調波抑制効果を瞬時値シミュレーションにより確認する。

なお、本論文は具体的なプロジェクトを想定したものでなく、理論的な高調波拡大に的を絞った検討となっている。

2. はじめに

図1に示す洋上風力向けMMC-2端子HVDCモデルを瞬時値解析ツールPSCAD^(*)で構築した。図1では、洋上風力群の合計500MWを154kV交流ケーブルで集電する図2の交流集電系統を集約して表現している。洋上154kV母線にてMMCで直流に変換し、直流ケーブル（本線・帰線各1条）を介して、陸上側MMCで交流に変換、短絡容量模擬の交流系統と連系した。MMCは詳

細等価回路モデル（Type 4⁽³⁾）で模擬した。回路定数の一覧を表1に示す。

フルコンバータ方式風力発電機のPWMインバータは、三相ブリッジを構成するスイッチングデバイスにより指令値との三角波比較で直流電圧源をチョッピングするものとした。電圧指令値は、洋上側MMC変換器で形成される基本波電圧に対して500MW送電時の相差角を有する正弦波で固定とした。また、キャリア周波数は1.1kHz（22次）とし、この±2次成分が主要な電圧歪成分として現れる（後述）ことを考慮して、キャリア周波数で-20dBとなるようなローパス特性を持つL形のLCフィルタを出力端に設定した。

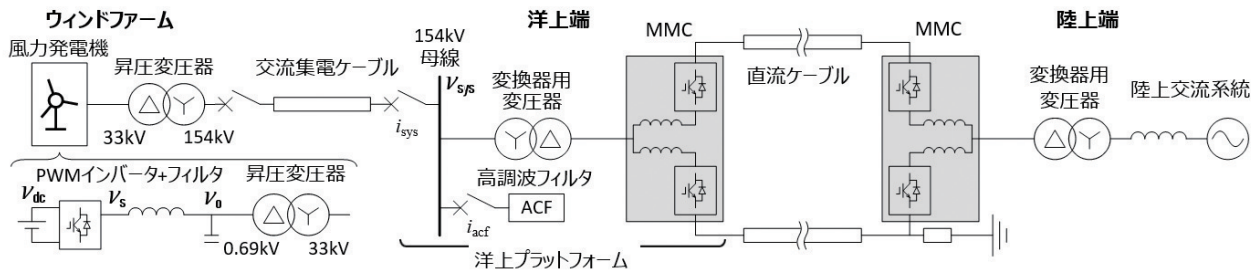


図1 洋上風力送電系統

表1 回路定数
(a) MMCおよび交流系統模擬

| | 洋上側 | 陸上側 |
|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 回路構成 | Asymmetric Monopole (導体帰路、陸上端接地) | |
| 背後短絡容量 P_s | — | 50 GVA (SCR = 50, $R_s/X_s = 1/20$) |
| 交流電圧 V_{sys} | 154 kV (50 Hz) | 500 kV (50 Hz) |
| 変換器用変圧器 L_{conv} | 5% (on 525MVA) | 同左 |
| バッファリアクトル L_{buf} | 5%/arm (on 525MVA) | 同左 |
| 変換器ローカル制御 (P, Q 制御) | CVCF制御 (有効・無効電力制御は洋上WFにより決定) | DC-AVR制御、AC-AVR制御 |

(b) 風力発電機および洋上集電系統

| 回路要素 | 定数 |
|--|---|
| 連系リアクトル L_f (LCフィルタ内) | 10% (on 500MVA) |
| 昇圧変圧器漏れインダクタンス $L_{0.69/33}, L_{33/154}$ | 0.69kV/33kV : 10% (on 525MVA) 33kV/154kV : 10% (on 525MVA) |
| 154kV集電ケーブル長さ、回線数、インダクタンス、キャパシタンス | 12.7km、2回線、 0.70mH/km/回線、 0.12μF/km/回線 |

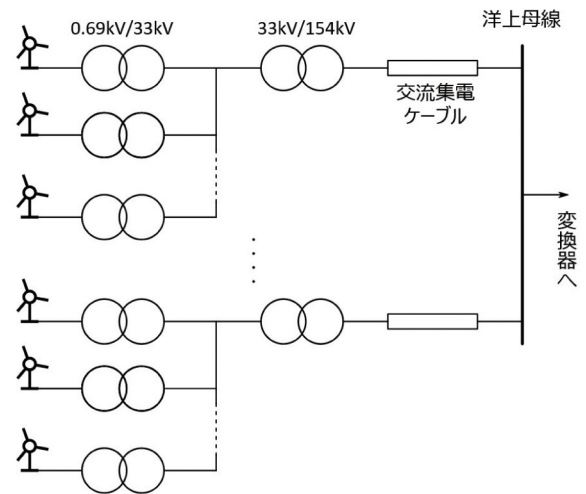


図2 洋上風力集電系統（集約前）

集電ケーブルは154kV・500MWに十分耐え得る絶縁厚さ・断面積・回線数（2回線）を設定した分布定数モデルとした。ケーブル長は次章の考察で示す集電系統での拡大周波数が1.0kHzとなる距離として12.7kmとした。この拡大周波数はケーブル自身の固有周波数と区別するため、第1固有周波数3.9kHzより十分に低く選んだ。

3. 高調波拡大メカニズム

高調波等価回路は損失を無視すると図3のように考えられる。ここで、左端の高調波電圧発生源はPWMインバータ出力に含まれる高調波成分の重ね合せである。また、集電ケーブルは簡易的にL形集中定数で表現している。

この回路で発生源からみた154kV換算の周波数インピーダンス (f-Z) 特性を、電力系統解析ツールATPにより1Hz刻みで算出すると図4(a)「ACFなし」となる。370Hz付近の第1共振点は同図(b)のLCフィルタの共振周波数に由来し、それより高い周波数の特性はLCフィルタ内の連系リアクトル L_f が支配的となっている。

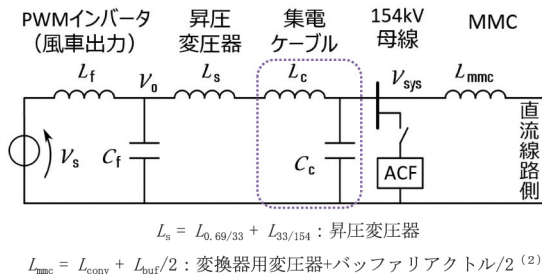


図3 洋上集電系統の高調波等価回路

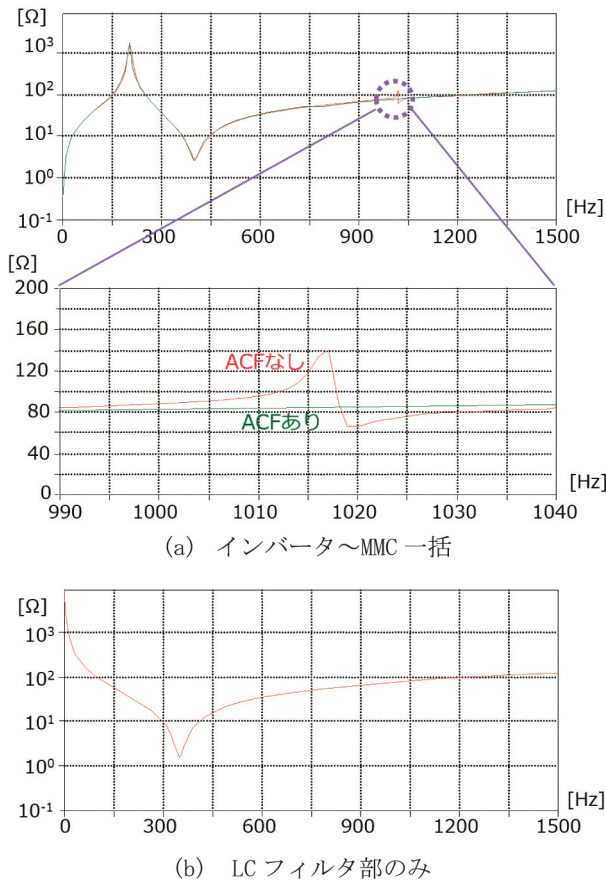


図4 PWMインバータ（風車出力）端からみたf-Z特性

図4(a)に戻ると、1.0kHz付近の共振点・反共振点はケーブルの静電容量に起因する。この共振点はPWMインバータ端（風車出力側）からみると僅かなインピーダンス変化であるが、反共振点のインピーダンス上昇と共振点による電流拡大が近接した周波数で発生する相乗効果により、1.0kHz付近での電圧歪の拡大が推測される。

ここで図5に示すように、風車内の電圧源を1puとした場合の各点電圧分布では、1.0kHz付近でPWMインバータのLCフィルタ通過後の出力 $V_0 < 154kV$ 母線 V_{sys} となっており、電圧歪が拡大することが解析的に示される。

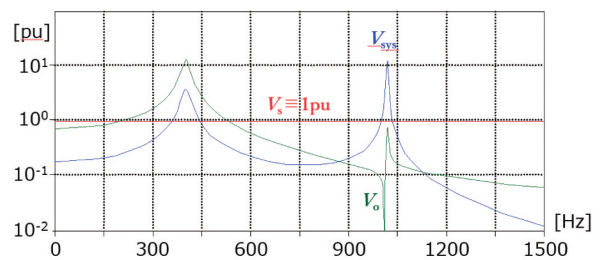


図5 PWMインバータ電圧源出力に対する各点の電圧分布

以上の高調波拡大次数検討の妥当性を瞬時値モデルでも検証するため、図1の風力発電機部分を図6(c)の「基本波電圧源+5%高調波電圧源」に置換し、高調波の周波数を掃引した。

その結果、図6(a)に示すとおり、1.0kHz (20次) 付近で154kV母線の電圧拡大点が見られた。これは前述のATPでの検討結果と一致するため、拡大次数が図3の等価回路で説明できることが瞬時値解析からも明らかとなった。

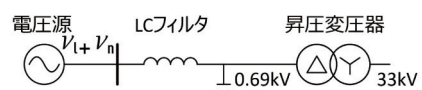
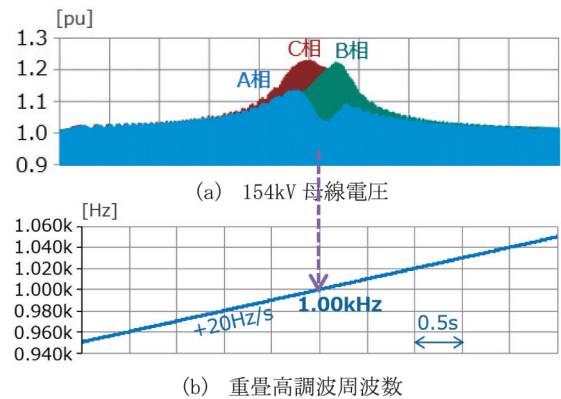


図6 周波数掃引による拡大次数の探索

なお、各相の電圧が不平衡となっているのは集電ケーブルを水平配置としたことで、各相のインピーダンスが不平衡になり、共振周波数が各相でずれるためである。

高調波拡大周波数については、ケーブルや風車の投入状態によるインダクタンス、キャパシタンスの変化に影響を受ける。本論文では定格送電の全数投入時をベースケースとし、集電系（図2の風力発電機～集電ケーブル）の一部が開放となって拡大周波数が変化した場合についても扱う。

4. 高調波拡大条件でのシミュレーション結果

PWM出力波形に含まれるキャリア周波数の成分は相電圧にのみ現れ、線間電圧には現れないため⁽⁴⁾、 Δ -Y変圧器を介することによって、洋上154kV母線では消去される。よって、154kV母線で注目すべきPWM出力波形の高調波主成分は、キャリア周波数 ± 2 次となる。

前述の20次が拡大する回路条件で、風力発電500MW送電時のPSCADシミュレーション結果を図7に示す。また、154kV母線A相電圧の高調波の含有率を表2に示す。

これらの結果より、PWM出力波形が拡大次数である20次成分を含む(a)キャリア周波数：22次（出力主成分20・24次）の場合は、LCフィルタ通過後の出力 V_o の20次成分が154kV母線で顕著に拡大していることが判る。

比較のために、PWM出力波形に20次成分が含まれない(b)キャリア周波数：21次（出力主成分19・23次）の条件でも実施した。インバータ出力端にあるLCフィルタのカットオフ周波数次数も22次から21次に変更している。この場合も、拡大次数に近い19次が拡大しているが、20次に比べて拡大率は低い。

何れのケースも、154kV母線での2～50次までの電圧総合歪は(a) 43.3%、(b) 11.1%に達し、母線に接続さ

れる機器やケーブルへの悪影響が懸念される。

なお、図には示していないが、送電電力はインバータ端で500MWとなっており、安定送電できることを確認している。

表2 高調波電圧成分：無対策（A相、基本波=100%）
(a) キャリア周波数：22次

| 次数 | 20 | 22 | 24 |
|-------------------|-------|--------|-------|
| 風車インバータ端 V_s | 27.9% | 104.7% | 28.3% |
| 風車内LCフィルタ端 V_o | 7.1% | 11.6% | 2.8% |
| 154kV母線 V_{sys} | 43.3% | 0.1% | 1.6% |

(b) キャリア周波数：21次

| 次数 | 19 | 21 | 23 |
|-------------------|-------|--------|-------|
| 風車インバータ端 V_s | 27.9% | 104.3% | 27.9% |
| 風車内LCフィルタ端 V_o | 3.2% | 11.6% | 2.8% |
| 154kV母線 V_{sys} | 10.9% | 0.0% | 2.2% |

5. フィルタ設計と高調波拡大抑制効果の検証

高調波の拡大を抑制できるフィルタを設計し、瞬時値解析で効果を確認した。

フィルタ諸元を表3に示す。洋上への設置を考慮すると、設備はできる限り小型・軽量が望ましい。そこで、基本波進相容量は可能な限り小さくすることとし、経済性の観点から高調波電流とのバランスが1:1になるように検討して10MVAとした。

また、前述の拡大周波数がケーブルの点検停止等で20次から変動しても対応できるように、同調次数が20次の高次形フィルタとした。加えて、抵抗器の寸法を決定する要因である損失がなるべく小さくなるように、尖鋭度は高めの $\gamma = 5$ とした。

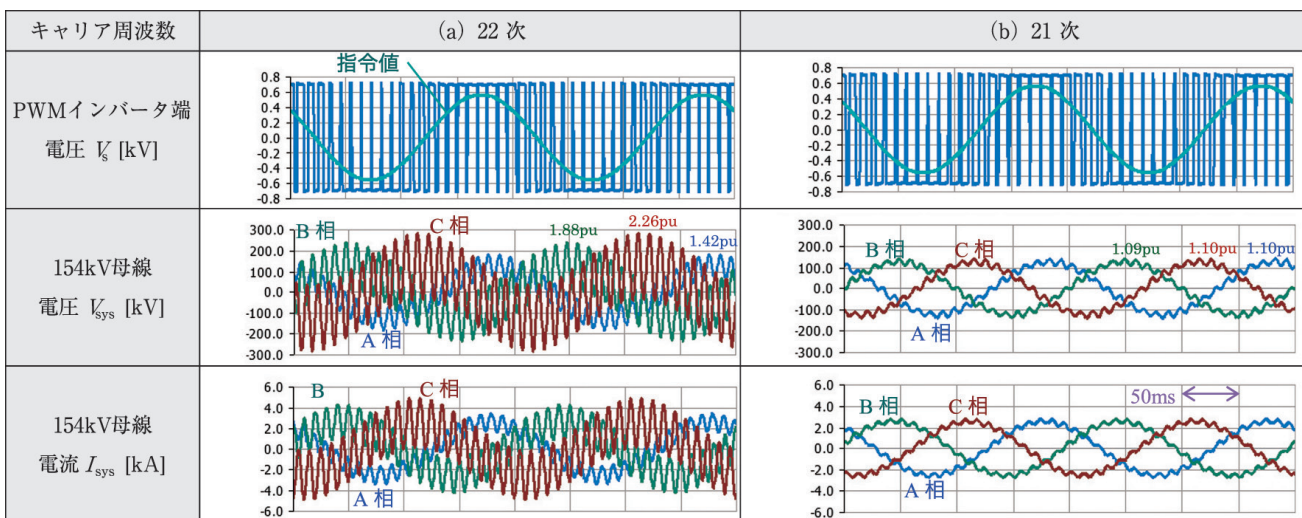


図7 各部電圧・電流波形：無対策

表3 高調波フィルタ (図1: ACF) の仕様

| | | |
|-------|-----------------|--|
| 回路構成 | 高次分路フィルタ (右図) | |
| 回路電圧 | 154kV | |
| 基本波容量 | 10MVA (送電容量の2%) | |
| 共振次数 | 20次 (1.00kHz) | |
| 尖鋭度 | 5 | |

このフィルタを154kV母線 (図1、図3のACFの位置) に設置した場合の、風車側発生源からみたf-Z特性を図4 (b)の「ACFあり」に重ねて示す。フィルタの低インピーダンスによりケーブルの静電容量の影響は低減され、これに起因していた1.0kHz付近の共振点がみられなくなる。

また、このフィルタを設置した場合の瞬時値解析結果波形を図8に示す。また、A相高調波電圧の含有率を表4に示す。これらの結果より、設置したフィルタは拡大周波数に加えて、フィルタ共振次数から離れた23次、24次高調波電圧を含めて、各次1.2%以下まで抑制される。154kV母線での2~50次までの電圧総合歪は (a) 1.4%、(b) 1.1%となり、十分に抑制できていることが判る。

図8下段のフィルタ電流では、(a)、(b) 何れのケースでもフィルタはPWM波形の高調波主成分を吸収している。なお、拡大次数の20次に近い成分が流入電流に卓越して現れ、キャリア周波数±2次の成分による4次の差での喰りが発生していることが波形から判る。

フィルタ流入電流の波形にて、基本波容量見合いの電流振幅を1puとしているのに対し、(a)、(b) 何れも波高値は2.2pu程度であるので、基本波振幅とそれ以外の高調波による振幅は同程度となっている。

また、フィルタ損失は送電容量の0.04% (0.2MW) 以下であり、フィルタ設備の設置面積・重量の軽減が期待される。

表4 高調波電圧成分: 高調波フィルタ設置時
(a) キャリア周波数: 22次

| 次数 | 20 | 22 | 24 |
|-------------------|-------|--------|-------|
| 風車インバータ端 V_s | 27.9% | 104.7% | 28.3% |
| 風車内LCフィルタ端 V_o | 4.1% | 11.6% | 2.6% |
| 154kV母線 V_{sys} | 0.6% | 0.0% | 1.2% |

(b) キャリア周波数: 21次

| 次数 | 19 | 21 | 23 |
|-------------------|-------|--------|-------|
| 風車インバータ端 V_s | 27.9% | 104.3% | 27.9% |
| 風車内LCフィルタ端 V_o | 4.2% | 11.6% | 2.6% |
| 154kV母線 V_{sys} | 0.7% | 0.0% | 0.8% |

6. 集電ケーブル系統の共振周波数変動時の検討

これまでの議論では、定格送電を前提に集電系統の風力発電機・昇圧変圧器・集電ケーブルは全数投入としてきたが、実際には点検等で一部が開放されている状態も考えられる。

実用上の高調波検討では、運用上あり得る発電機・変圧器・ケーブルの投入・開放状態が条件として与えられることにより、高調波拡大周波数の取り得る範囲を把握し、網羅的に必要な対策を講じる必要がある。この与条件は、集電系統のルーティングや運用方針により一件一様となるが、本論文では、高調波対策が必要となる条件変化の一例を取り上げる。

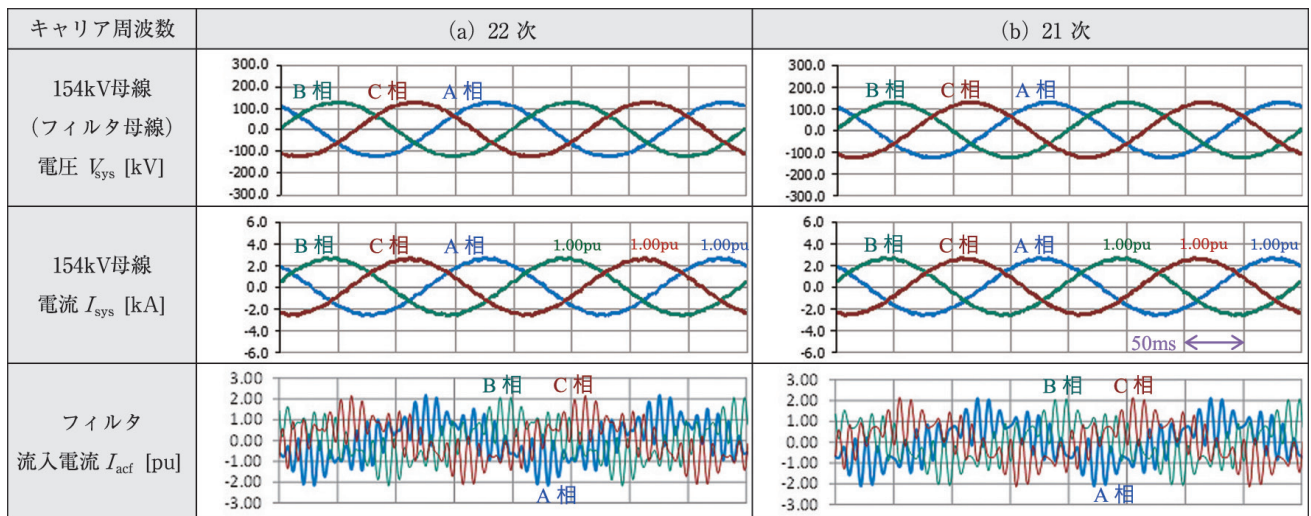


図8 各部電圧・電流波形: 高調波フィルタ設置時

4章で述べたとおり、PWMインバータのキャリア周波数が22次の場合は、出力主成分として20次・24次の高調波電圧が発生する。今回、集電系統の全数投入状態では、20次成分が拡大する系統条件となっていた。

本章では、もう1つの発生源主成分である24次が拡大する系統条件として、集電系（図2の風力発電機～集電ケーブル）の枝のうち、点検により36%が開放中（64%が運転中）である場合について検討する。この場合、図3でMMC側インダクタンス L_{mmc} のみが変化せず、それ以外のインピーダンスが $1/0.64 = 1.56$ 倍に拡大することにより、共振周波数が上昇する。また、ケーブル長は $12.7\text{km} \times 0.64 = 8.1\text{km}$ 相当となる。

この条件で、高調波フィルタが無い場合の瞬時値解析結果波形を図9(a)に示す。図7(a)の洋上154kV母線電圧波形では20次が拡大したが、図9(a)では24次が拡大しており、A相電圧歪は42.8%にまで達する。

ここで、表3と同一のフィルタを洋上154kV母線に設置した場合を図9(b)に示す。単一同調形ではなく高次形フィルタを採用したことにより、同調次数である20次から4次離れた24次の高調波電圧歪も効果的に抑制され、A相電圧歪は0.4%まで低下する。よって少なくとも今回の2ケースに対しては、表3のフィルタ設置で十分な高調波対策が取れていることが判る。

7. 結論

風車側をPWMインバータとL形フィルタで模擬し、集電系統の共振回路条件により、インバータのスイッチング周波数成分が拡大することを瞬時値シミュレーションにより示した。その拡大周波数は、集電系からみた簡易的な等価回路の共振周波数をみることで求められることを示した。

加えて、洋上プラットフォームへの設置に適するフィルタを設計し、洋上系統の運用状態が変化して拡大周波数が移動した場合でも、高次形の適用により高調波抑制効果が十分であることを瞬時値解析で検証した。

さらに当社では、フィルタ用コンデンサ、リアクトルへの生分解性電気絶縁油の適用により、従来の電気絶縁油に比べて万一の漏油時に海洋の環境汚染や生態系への影響を軽減できる他⁽⁵⁾、充電部密閉型フィルタ製造技術の適用による塩害対策も実現でき、洋上プラットフォーム設置に適したフィルタを提案できる。

また、集電系統のケーブルによる高調波拡大現象は、変換器の無い交流連系の場合にも原理的には発生し得るが、本論文と同様の手順で、拡大次数の検討やフィルタ設計が可能と考えられる。

しかしながら、直流連系により集電系統を独立して考えられる場合とは異なり、交流連系では連系している商用系統の至近にある調相設備の投入状態、送電線の運用等の影響を強く受ける。また、風力発電の規模拡大により、同一母線に複数の風力発電所が接続され、相互作用が懸念されるケースも考えられる。よって、慎重かつ網羅的に検討条件を洗い出す必要がある。

なお、高調波・スイッチング周波数成分が風車用インバータ制御系の影響を受けて拡大する高調波不安定の事例も報告されており⁽³⁾、風車側とフィルタ設備側の協調も必要になってくると考えられる。

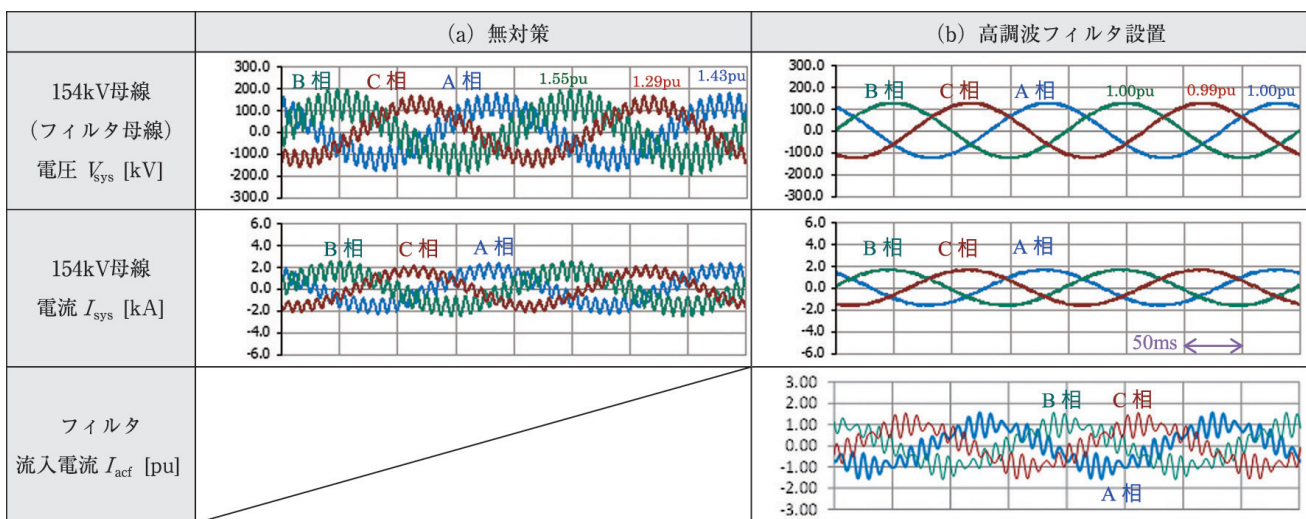


図9 各部電圧・電流波形：集電系統変更時（キャリア周波数：22次）

参考文献

- (1) H. Saad, et al: "On Resonances and Harmonics in HVDC-MMC Station connected to AC Grid", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.32, No.3 (2017.6)
 - (2) 久保、黒田、萩原 他:「次世代洋上直流送電システム開発 その12 集電系統での高調波解析検討」、電気学会全国大会(2020.3)
 - (3) CIGRE WG B4.57: "Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid", TB604(2014.11)
 - (4) 電気学会 半導体電力変換方式調査専門委員会:「半導体電力変換回路」、電気学会(1987.3)
 - (5) 「油入機器に生分解性電気絶縁油を適用 ～技術力を活かした環境配慮製品で環境負荷低減を推進～」、日新電機 ニュースリリース (2020.06) <https://nissin.jp/news/200608/>
- (*)「PSCAD」は、Manitoba Hydro International Ltd.の登録商標です。

執筆者紹介



久保 敏裕 Toshihiro Kubo
研究開発本部
電力技術開発研究所



黒田 和宏 Kazuhiro Kuroda
研究開発本部
電力技術開発研究所
主幹



長崎 則久 Norihisa Nagasaki
電力・環境システム事業本部
静止機器事業部 電力技術部長