

多端子自励式 HVDC 構成の洋上風力送電システムに MMC を適用した場合の安定運転特性の比較検討

A Comparative Study in Case with MMC Applied to Offshore Wind Power
Transmission System with Multi-terminal HVDC_Light Configuration

小室 陸*
Riku Komuro

呉 国紅*
Guohong Wu

Abstract: In this study, we have designed an offshore wind power transmission system model that adopts a Modular Multi-Level Converter (MMC) in the on-land site, which has relatively low conversion loss and high voltage resistance. In addition, simulation studies using MATLAB/Simulink have been conducted to examine the effectiveness of MMC in HVDC_Light. The operation of the designed offshore wind power transmission system model was confirmed under two studying conditions: at constant rated wind speed and at real data based fluctuating wind speed. Furthermore, in order to verify the effectiveness of MMC application, a comparative study between HVDC_Light in case with MMC and with 3-level converter respectively has been conducted as well. This simulation results illustrate that the HVDC_Light with MMC applied had the lowest loss voltage waveform. In addition, the results also reveal that the AC filters capacity can be possibly reduced.

キーワード: 洋上風力送電システム, 自励式 HVDC, モジュラーマルチレベルコンバータ, 3-レベル変換器

Keywords: Offshore Wind Power System, HVDC_Light, MMC, 3-Level Converter

1 はじめに

近年、地球温暖化などの問題により、再生可能エネルギーの導入が促進されており、我が国においても再生可能エネルギーの導入が促進されている。その一環として、国内における開発可能な資源量を明らかにするための再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査を環境省が行っている^[1]。そして、環境省の調査より、洋上風力発電の設備容量が 11 億 kW と突出して高い導入ポテンシャルを持つことが示されている。現時点では、導入に際して採算性の向上が課題であるが、将来において技術的及び経済的な課題が解決された際には、洋上風力発電の大規模な導入が進む可能性があることは確認されている^[2]。

これを鑑みて、国内で洋上風力発電所の建設及び実証事業が始まっている。2012 年 3 月に開始された経済産業省からの委託事業「福島浮体式

洋上ウインドファーム実証研究事業」では世界初の浮体式ウインドファームが建設された。また、2023 年 1 月には、秋田県秋田港に 4.2MW 風車 13 基、能代港に同風車 20 基による商業運転が開始されている。

上記の国内での洋上風力発電の事例における離岸距離は、どちらも 30km 程であり、さらなる安定した風況を得るには、より長距離の送電が必要だと推定される。また、洋上風力発電の導入ポテンシャルは電力大需要地から遠方に多く存在しており、北海道、東北、九州で全体の 70% を占めており^[3]、これらの導入ポテンシャルを活かすために海底直流送電などで大需要地に直接送る検討も開始されている^[4]。そのため、洋上風力発電の導入のために長距離かつ海底ケーブルによる送電や採算性のとれる送電システムの構成の検討が必要となる。

海底ケーブルを用いた洋上風力発電システムの送電回路構成については、今までに主に欧州

* 東北学院大学大学院工学研究科電気工学専攻

を中心に検討され、HVDC の電力変換器として一般的に 3-レベル変換器が利用されている [5]。しかしながら、3-レベル変換器の出力は、その構成上 3 段状の波形となり、多くの高調波が含まれるため、正弦波交流電圧を形成するには大容量の交流フィルタが必要となる。そのため、変換における損失や交流フィルタの設備コストが課題点となる。そこで、本研究では、3-レベル変換器よりも変換損失が小さいという利点を有し、交流フィルタの設備コストも低減することが可能な Modular Multi-Level Converter (MMC) を適用した多端子自励式 HVDC 構成による洋上風力送電システムを提案し、MATLAB/ Simulink にてシミュレーションモデルの作成を行い、その定常運転時の電気特性の検証を行う。また、HVDC における変換器として一般的に採用されている 3-レベル変換器との比較検討も行う。

2 自励式 HVDC の概要

図 1 に HVDC の概要図を示す。HVDC とは、High Voltage Direct Current の略称であり、高電圧による直流送電のことを示す。洋上風力発電においては、図 1 に示すように、洋上側では発電された交流電力を AC-DC コンバータを用いて一度直流電力に変換してから陸上側まで送電し、そこで DC-AC インバータによって再び交流電力に変換される送電方式となる。また、自励式 HVDC とは、交直変換に用いるスイッチングデバイスに自励式を採用した HVDC である。一般的には IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が採用されており、本研究においても IGBT を採用している。

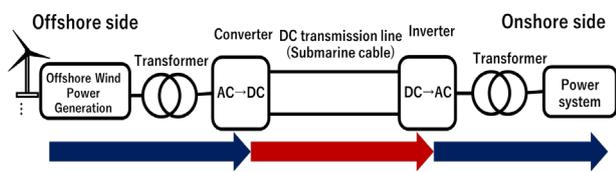


図 1 HVDC の概要図

自励式 HVDC の利点を以下に示す。

- (1) 長距離送電の場合、交流送電よりも送電コストが安価である(図 2 参照)。
- (2) 周波数・電圧変動の影響を受けない。
- (3) 有効電力・無効電力の独立制御が可能である。
- (4) リアクタンス等の影響による電力損失が無い。

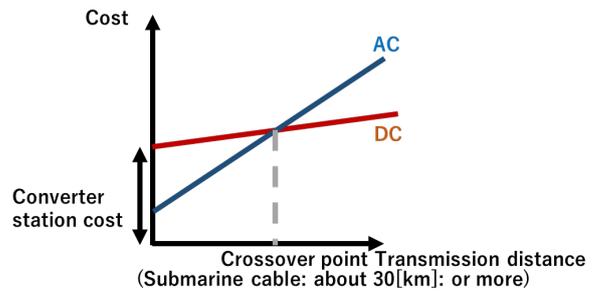


図 2 送電線の送電距離とコストの関係図 [6]

上記の利点より、自励式 HVDC は洋上風力発電における長距離送電に適しているといえる [7-8]。本研究で提案した自励式 HVDC 構成の洋上風力送電システムは、第 4 章にて詳細を述べる。

3 MMC の概要

図 3 に MMC の回路構成を示す。MMC の回路は、半導体スイッチとコンデンサで構成されたチョップパセルと呼ばれる単位変換器を構成要素とし、チョップパセルが多数直列に接続されたアームで構成される。本研究においては、直流回路と交流回路の定格電圧を考慮し、1 相のアーム当たり 20 段のチョップパセルで構成された MMC のモデルを作成し、シミュレーションを行う。

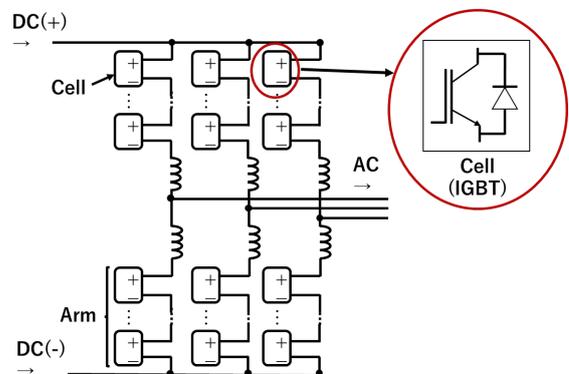


図 3 MMC の回路構成

MMC の特徴として、以下のようなものが挙げられる。

- (1) 高電圧化可能

チョップパセルが多数直列に接続されているため、1 つ当たりの素子にかかる電圧のレベルを低く抑えることができるため、高電圧での使用にも耐える。

- (2) 高調波電圧の低減

高調波の少ないマルチレベルの電圧波形を生成することができ、交流フィルタの削減ができる。

(3) スwitching損失の低減

マルチレベル化により、半導体デバイス1個当たりのスイッチング回数が低減され、スイッチング損失の低減がもたらされる。

(4) 冗長性の確保

あらかじめ予備のセルを接続しておくことで、一部のセルが故障した際に、故障セルを短絡除去することにより運転を継続できる場合がある。

上記の特徴により、洋上風力送電システムに MMC を適用することで、より効率的な送電ができると考えられる。

また、MMC を用いた場合の出力電圧波形は、一般に使用される 3-レベル変換器を使用した場合の電圧波形に比べて高調波が少ない特長もある。一般的に用いられる 3-レベル変換器は、各相 2 組の半導体スイッチで交流電圧を出力するため、出力電圧は 3 段状の波形となる。そのため、正弦波の交流系統と接続するためには交流フィルタが必要になる。一方、MMC は各チョップセルの動作タイミングをずらすことで階段状のマルチレベル電圧波形を出力することができ、出力する交流電圧をほとんど正弦波に近い波形になる。そのため、MMC を用いた場合は、交流フィルタが無くても（または小容量の交流フィルタを用いたとしても）交流系統と接続しても影響が少なく、3-レベル変換器の場合よりもコストを低減することができる^[9]。

4 洋上風力送電システムモデル

4.1 シミュレーションモデル

図 4 に提案する多端子自励式 HVDC 洋上風力送電システムのシミュレーションモデルの全体図を示す。洋上側には 5[MW] の PMSG ウィンドタービン発電機が 2 基ある多端子構成を想定した。発電機電圧はそれぞれ実効値 1.8[kV] と設定した。それぞれ変圧器で実効値 33[kV] まで昇圧した後に、交流集電方式により集電する。交流で集電後は、洋上変電所で 100[kV] まで昇圧し、30[km] の海底ケーブルを通して直流送電を行う。最後に陸上側の MMC 方式のインバータにより再度交流電力に変換され、電力系統へ連系される仕組みである。この提案する洋上風力送電システムは、MMC の変換後の出力電圧の特性より陸上側の交直変換後の交流フィルタを削減することができる。また、送電方式に HVDC 方式を採用しているため、洋上風力発電のような長距離送電に適している。

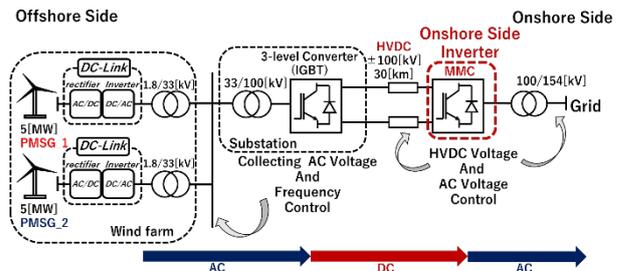


図 4 多端子自励式 HVDC 洋上風力送電モデル (陸上側変換器に MMC を適用)

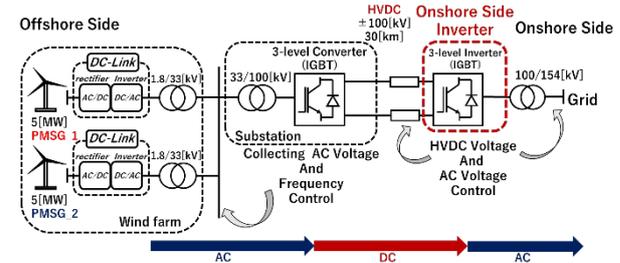


図 5 多端子自励式 HVDC 洋上風力送電モデル (陸上側変換器に 3-レベル変換器を適用)

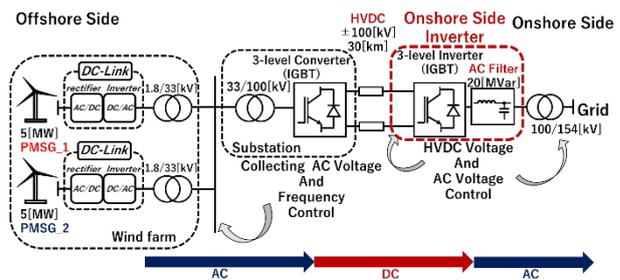


図 6 多端子自励式 HVDC 洋上風力送電モデル (陸上側変換器に 3-レベル変換器を適用、交流フィルタを削減)

また、MMC との性能の比較のために用いたシミュレーションモデルの全体図を図 5 及び図 6 に示す。図 5 は、一般的な洋上風力発電の交直変換器に採用されている 3-レベル変換器を陸上側に用いた洋上風力送電システムである。ここで、3-レベル変換器後の交流フィルタのフィルタ容量は 20[MVar] と設定した。図 6 は、比較検討のために、図 5 の洋上風力送電システムの陸上側の 3-レベル変換器後の交流フィルタを削減した場合を想定したものである。

4.2 各種制御系^[10]

提案する洋上風力送電システムの制御系は、主に洋上側洋上変電所と陸上側 MMC の 2 つに大別できる。

図 7 に洋上側洋上変電所の制御系を示す。洋上側では、洋上側交流系統の交流電圧及び周波数の確立を行っている。ウィンドファームで発電された電力はそのまま変換器を通して直流回路へ

4.3.2 PMSG のピッチ角制御

図 11 に洋上風力発電機のピッチ角制御モデルを示す。PMSG の定格回転速度の指令値と測定値を入力とし、PI 制御したものをピッチ角として出力している。このピッチ角制御を行うことで定格風速を超える高風速域において、定格出力を上回る過剰な出力及び回転速度になることを抑制する。

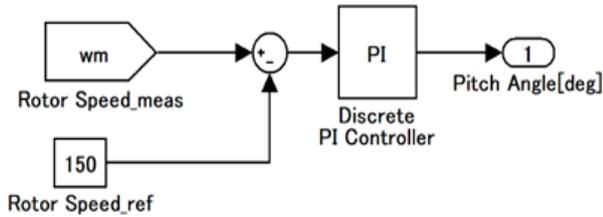


図 11 PMSG のピッチ角制御モデル

5 シミュレーション結果及び考察

本章では、本研究で行ったシミュレーション結果及び考察について述べる。5.1 節では、図 4 の提案した洋上風速送電システムの定常運転時の電気特性のシミュレーション検討を行った結果について述べる。5.2 節では、図 4 の MMC を適用した洋上風力送電システムと図 5、図 6 の 3-レベル変換器による洋上風力送電システムの変換後の交流電圧値を比較検討した結果について述べる。

5.1 定常運転時の電気特性の検証

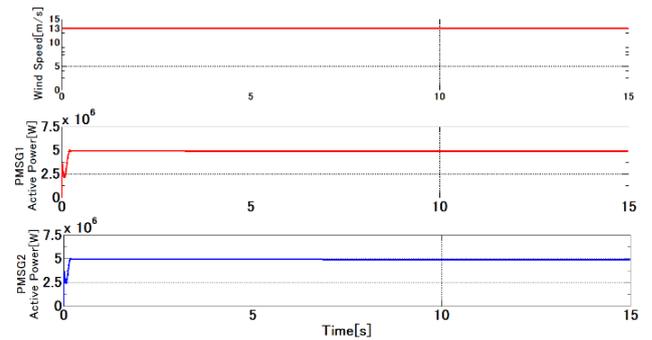
本研究で提案した洋上風力送電システムの定常運転時の電気特性を確認するためにシミュレーションを行った。シミュレーションは、入力する風速データの違いで 2 通り行った。1 つ目が定格風速 13[m/s]一定である風速データ、2 つ目が時間経過で風速が変動する風速データである。

5.1.1 定格風速一定時のシミュレーション結果

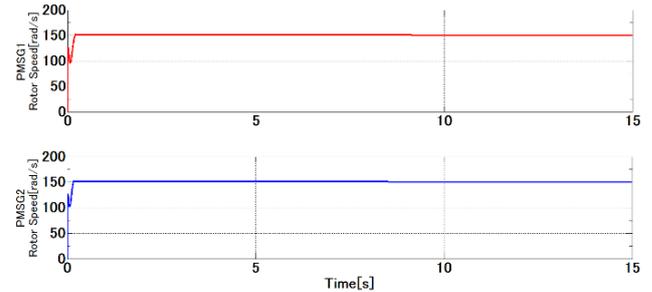
定格風速である 13[m/s]一定の風速を入力したときのシミュレーション結果を図 12 に示す。

図 12(a)に入力した風速及び洋上側発電機の有効電力波形を示す。この結果より、定格風速である 13[m/s]が一定に入力されるとき、定格出力である 5[MW]が安定的に出力されることが確認できる。このとき、図 12(b)より、PMSG は定格回転速度である 150[rad/s]で安定していることも確認できる。

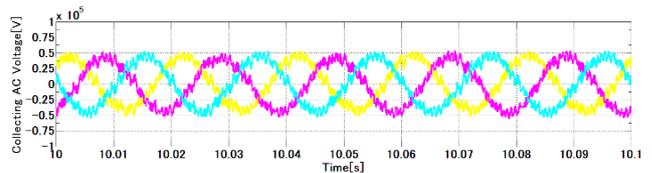
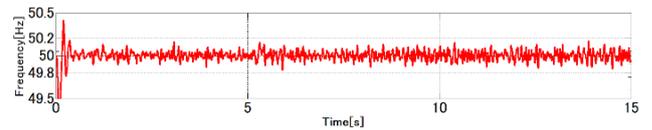
図 12(c)に洋上側交流系統の集電後の交流電圧波形及びその周波数の測定波形を示す。この結果より、交流電圧の最大値が約 46.6[kV]と測定



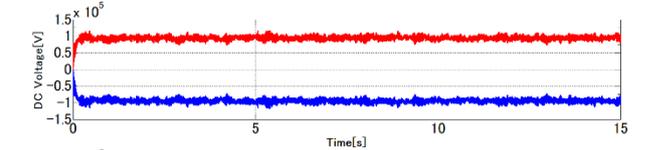
(a) 風速及び洋上側発電機の有効電力



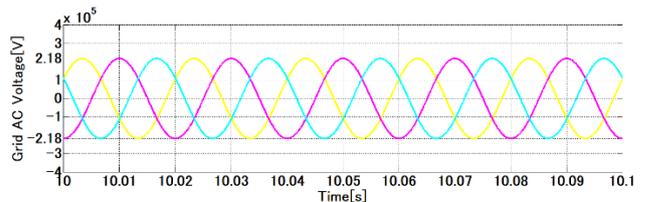
(b) 発電機回転速度



(c) 集電後周波数及び交流電圧



(d) HVDC の直流電圧及び MMC 変換後の交流電圧



(e) 陸上側電力系統の交流電圧波形

図 12 定格風速一定時におけるシミュレーション結果

され、最大値から実効値を求めると、指令値である実効値 33[kV]になっていることが分かる。また、周波数の変動の範囲も ± 0.2 [Hz]以内に抑えられているため、洋上側の制御が正しく行われていることが確認できる。

図 12(d)に HVDC における直流電圧波形及び陸上側 MMC で交流に変換後の交流電圧波形を示す。この結果より、直流電圧の値は指令値である ± 100 [kV]でおおよそ一定であることが確認できる。また、変換後の交流電圧波形の最大値は約 141.4[kV]と測定され、実効値を求めると、指令値である実効値 100[kV]であることが分かる。また、図 12(e)の陸上側電力系統の交流電圧波形より、安定的に送電ができていることが確認できる。

上記の結果より、定格風速一定時において、交直変換や制御系が正しく動作していることが確認できた。

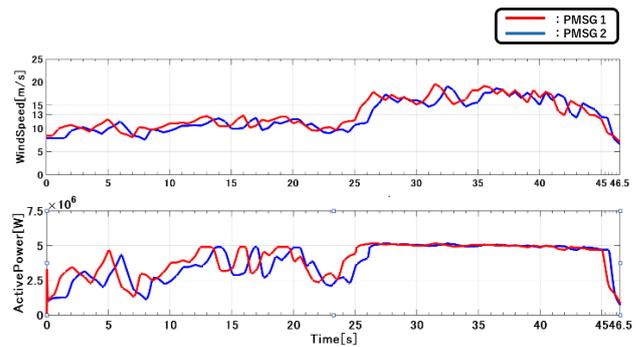
5.1.2 風速変動時のシミュレーション結果

風速変動時の風速データは、千葉県銚子沖で 2014 年 6 月 13 日の 4:00~19:30 の間に 10 分間隔で観測された風速を元に作成した^[14]。PMSG1 に入力した風速データは、この元の風速データの 10 分間隔の風速データをシミュレーションの都合上、0.5 秒間隔に短縮した風速データを作成して使用した。PMSG2 に入力した風速データは、PMSG1 に入力した風速データの風速から 0.5[m/s]下げ、1 秒分データを遅らせたものを作成して、用いた。これは、2 基並んだ風車にそれぞれ吹く風を簡易的に模擬するためである。

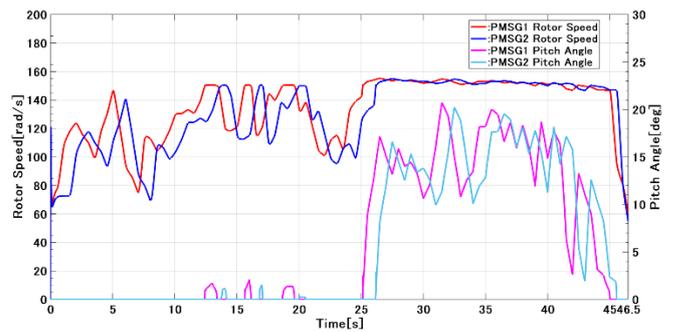
このような変動風速を用いた場合のシミュレーション結果を図 13 に示す。

図 13(a)に入力した風速及び洋上側発電機の有効電力波形、図 13(b)に PMSG の回転速度及びピッチ角を示す。これらの結果より、それぞれの PMSG が風速に応じて発電していることが確認できる。また、定格風速である 13[m/s]を超えた高風速域においては、定格出力である 5[MW]を超えないようにピッチ角が正しく動作し、PMSG 回転速度の加速を抑制できていることが確認できる。

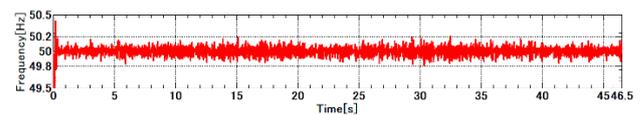
図 13(c)に洋上側交流系統の集電後の交流電圧波形及びその周波数の測定波形を示す。この結果より、風速一定時と同様の測定結果が得られ、風速が変動したことによる影響を受けずに発電した電力を交流集電できていることが確認できる。



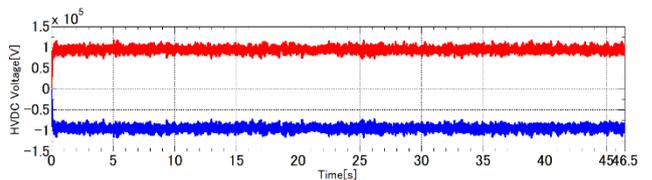
(a) 風速及び洋上側発電機の有効電力



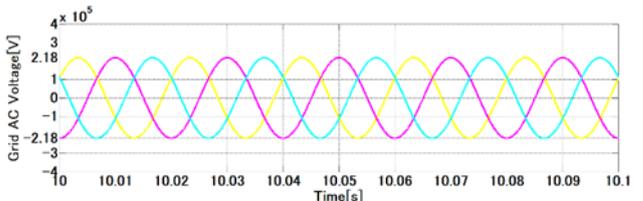
(b) 発電機回転速度及びピッチ角



(c) 集電後周波数及び交流電圧



(d) HVDC の直流電圧及び MMC 変換後の交流電圧



(e) 陸上側電力系統の交流電圧波形

図 13 風速変動時におけるシミュレーション結果

図 13(d)に HVDC における直流電圧波形及び陸上側 MMC で交流に変換後の交流電圧波形を

示す。この結果も風速一定時と同様に、指令値である±100[kV]で安定した送電ができており、陸上側で交流に変換できていることが確認できる。また、図 13(e)の陸上側電力系統の交流電圧波形より、安定的に送電ができていることが確認できる。

上記の結果より、風速変動時においても、風速変動の影響を受けずに安定して直流送電ができていることが確認でき、構築したモデルが正しく動作することが確認できる。

5.2 MMC と3-レベル変換器の比較検討

本研究では、MMCを用いたHVDCと3-レベル変換器を使用したHVDCによる陸上側変換後の交流電圧波形の比較検討も行った。シミュレーションの風速条件は定格風速13[m/s]一定とし、HVDC回路の構成は、図4、図5、図6とした。

それぞれの陸上側変換後の交流電圧波形を図14、図15、図16に示す。ここで1[p.u.]は141.4[kV]を示す(実効値の指令値が100[kV]であるため)。図16の交流フィルタが無い3-レベル変換器後の電圧波形は、電圧波形が3段階状の波形となっており、正弦波状の電圧波形にならないことが確認でき、洋上風力送電回路として使用できないことが分かった。一方、図15の交流フィルタを導入した3-レベル変換器後の電圧波形を確認すると、交流フィルタを通したことにより正弦波に近い波形に平滑化されていることが確認できる。これに対し、図14の交流フィルタが無いMMCの変換後の電圧波形は、同じ交流フィルタがない条件でも、図16に比べてはるかに良い交流波形が得られ、交流フィルタのある図15の電圧波形と同程度の正弦波に近い波形が出力されていることが確認できる。これは、本研究に20段のチョップセルを持つMMCを用いたため、変換後の電圧波形が20段階状の電圧波形となったため、正弦波に近い電圧波形が出力されていると考えられる。

また、それぞれの波形の最大値に着目すると、図14のMMCの電圧波形はおおよそ1[p.u.]以内に収まっており、図15の3-レベル変換器の電圧波形は約1.1[p.u.]であることが確認できる。この結果より、図14のMMCの場合の電圧波形はおおよそ指令値に基づいた電圧波形に変換されていることが確認できる。これに対して、図15の3-レベル変換器(交流フィルタ有り)の場合は、指令値の約1.1倍の電圧波形となっていることが確認でき、これは交流フィルタを通した後もスイッチングによる

高調波成分の除去が完全でないことが考えられる。また、図14について、小容量の交流フィルタを追加すればより指令値1[p.u.]に近い電圧波形になると考えられる。

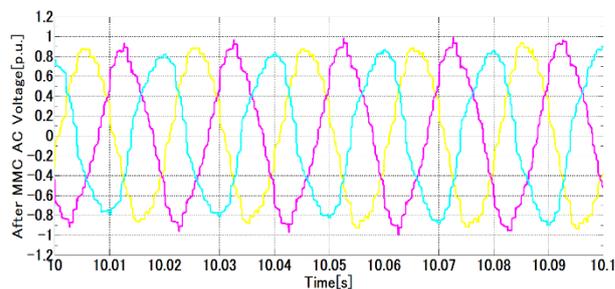


図14 MMC(交流フィルタ無し)の変換後の交流電圧

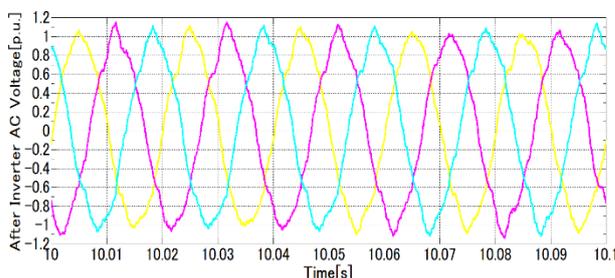


図15 3-レベル変換器(交流フィルタ有り)の変換後の交流電圧

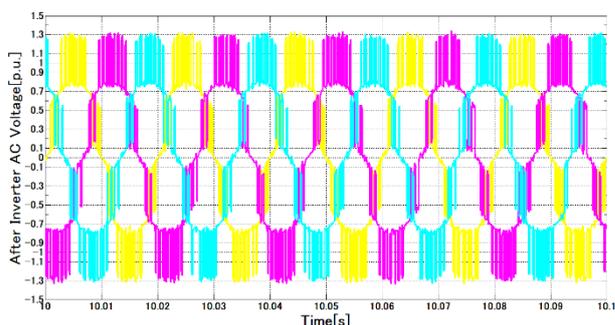


図16 3-レベル変換器(交流フィルタ無し)の変換後の交流電圧

シミュレーションによる比較検討より、多端子自励式HVDC構成の洋上風力送電システムにMMCを適用することで、交流フィルタが無くても3-レベル変換器+交流フィルタ構成を適用した洋上風力送電システムと同等以上の変換効率を発揮できることを確認できた。これにより、交流フィルタ分のコストを削減することができ、より採算性のとれる洋上風力送電システムを構築することが可能である。

6 まとめ

本研究では、MMCを適用した多端子自励式HVDC構成による洋上風力送電システムを提案し、シミュレーションモデルを作成した。そして、シミュ

レーションによってその定常運転時の電気特性を検証し、構築したモデルが正常に動作することを確認した。また、一般的に用いられる 3-レベル変換器と変換後の交流電圧の比較検討を行った。その結果、MMC を適用した洋上風力送電システムの方が、交流フィルタが無くても高い変換効率を発揮でき、交流フィルタ分の設備コストを削減できることをシミュレーションにより明らかにした。

今後の研究においては、より実用的かつ詳細に模擬したシミュレーション検討を行う予定である。具体的には、NEDO が構想する将来の日本における洋上風力送電システム回路(洋上側 2 端子、陸上側 3 端子の多端子自励式 HVDC 回路^[15])を参考にしてシミュレーションモデルを作成し、この回路構成に MMC を適用した洋上風力送電システムのシミュレーション検討を行い、安定運用に関わる定常安定性や事故時過渡安定性などの様々な課題を研究する。

参考文献

- [1] 環境省:「我が国の再生可能エネルギー導入ポテンシャル 概要資料導入編」, 2022 年 4 月
- [2] 電力中央研究所:「洋上風力発電を対象とした直流昇圧方式による直流送電システムの制御法」, 2014 年 6 月, 研究報告:R13017
- [3] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO):「直流送電に関する技術動向」, 2021 年 3 月 15 日
- [4] 経済産業省:「系統インフラの整備に関する検討について」, 令和 3 年 4 月 1 日, 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 制度審議室
- [5] Frede Blaabjerg, Ke Ma: “Wind Energy Systems”, IEEE(2017), Vol.105 No.11, pp.2116-2131
- [6] 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO):「直流送電の基本事項」, 2021 年 3 月 15 日
- [7] 西岡 淳:「再生可能エネルギーの大量導入と直流送電技術」, 日本風力エネルギー学会誌, Vol.41 No.2(2017), pp.201-205
- [8] 宜保 直樹, 高崎 昌洋:「直流送電技術」, 電気設備学会誌, Vol.32 No.12(2012), pp.860-872
- [9] 新井 卓郎, 中沢 洋介, 爪長 正宏:「HVDC 用高電圧・大容量マルチレベル変換器」, 東芝レビュー, Vol.69 No.4(2014), pp.16-19
- [10] 上野 愛:「自励式 HVDC による複数の DFIG を用いた洋上風力発電システムの電力安定化制御に関する研究」, 東北学院大学工学研究科電気工学専攻, Japan. 2014
- [11] S. Samanvorakij, P. kumkraug: “Modeling and simulation PMSG based on Wind Energy Conversion System in MATLAB/SIMULINK”, AEEE, 2013, pp.37-41
- [12] Venkata Yaramasu, Apparao Dekka, Mario J. Duran, Samir kouro, Bin Wu: “PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls”, IET Electric power (2017), Vol.11, pp.956-968
- [13] Kelvin Tan, Syed Islam: “Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors”, IEEE (2004), Vol.19 No.2, pp.392-399
- [14] 東梅 祐也, 呉 国紅, 郭 海蛟:「洋上風速の推定値を用いた洋上風力発電電力に関するシミュレーション検討」, Journal of JWEA, Vol.34 No.2(2010), pp.112-117
- [15] NEDO スマートコミュニティ部:「次世代洋上直流送電システム開発事業」(事後評価)(2015 年度～2019 年度 5 年間)プロジェクトの概要, 「次世代直流送電システム開発事業」(事後評価)分科会資料 5, 2020 年 9 月 3 日