洋上ウィンドファーム用ループ式多端子 HVDC 送電システムの特性解析

Characteristic Analysis of a Loop-Type Multi-Terminal HVDC Transmission System for Series-Connected Offshore Wind Power Plants

1. 緒　言

風力発電を行うフィールドは、地上から洋上へと拡大している。洋上風力発電は世界中で研究が行われ、2030 年までの導入量は 316GW を超えると予想されている[1]。洋上における送電にはいくつかの方法があるが、長距離送電の場合、直流送電（High Voltage Direct Current: HVDC）が有利であることが知られている。HVDC を用いるシステムとして、様々なシステムが提案されている。例えば、風車と風車を並列に接続する並列接続方式や、各風車を直列に接続する直列接続方式、電力変換器に IGBT 等の自己消弧型素子を用いる電圧形インバータ及び、サイリスタ等の他励素子を用いる電流形インバータを採用したシステムなどが提案されている。現在主流となっている電圧形インバータを用いた並列接続方式のウィンドファームは、転流失敗のリスクが無く、電力フィルタの小容量化を図ることができる反面、高価な洋上変電所が必要となる。一方、直列接続方式は実用化の例は無いが、直流送電部において風力発電機の直列接続による電圧上昇を利用し、洋上変電所を用いずに運用することができる。筆者らは、サイリスタインバータを用いた信頼性の高い直列接続方式のウィンドファームとして、LCC-HVDC を応用したループ式多端子 HVDC 送電システムを提案している[2]。

本論文では、同システムをウィンドファームに適用した場合のシステムの有用性を明らかにすることを目的とする。先ず、シミュレーションモデルを構築し、併せて研究室規模の供試装置を製作した。次いで、これらを用いて、理論と実験双方によりシステムの動作範囲に関する検討を行った。またシミュレーションモデルの妥当性を確認するとともに、風速変動を想定したシステム全体の過渡特性解析を行う。

2. システムの構成

本システムは、電流形サイリスタインバータを用いた直列接続方式の洋上ウィンドファームである。図 1 にシステム全体の構成を示す。同システムは複数のウィンドファーム、複数の陸上変電所が直流送電線によって直列に接続された構成となっている。図 2 に陸上変電所の構成を示す。陸上変電所において、HVDC で送電された直流電力は、電流形サイリスタインバータや電力補償装置などを介して交流系統に受電される。本システムでは、インバータの制御角 β を操作することにより直流送電電流 I_d を調整することができる。また電力補償装置は、負の等価インダクタンスを有する変圧器や同期機、電力貯蔵設備付き原動機を有し、同変圧器の効果により、電力用フィルタを用いずにインバータで発生した高調波を除去することができる[3]。また、同期機の界磁電圧を操作することにより、インバータや系統への無効電力を調整でき、原動機の出力を操作することにより有効電力の調整もできるため、システムの出力 P_g を一定に保つことができる（有効・無効電力の独立制御が可能）。

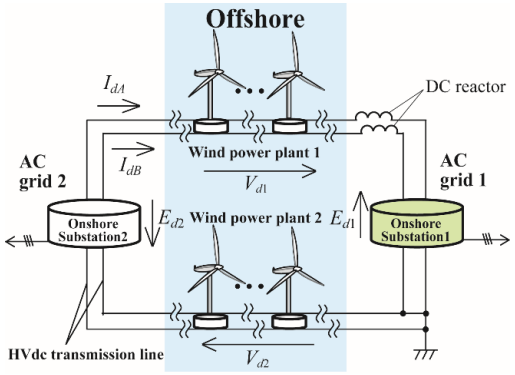


図 1　システム全体の構成

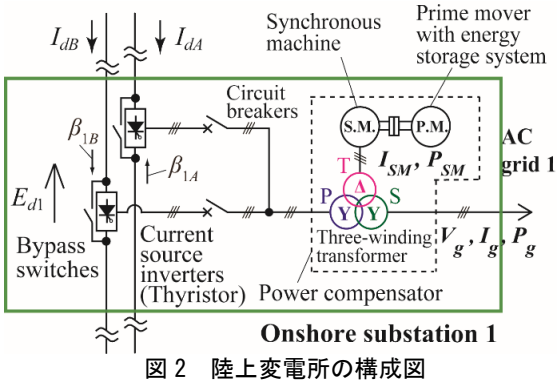
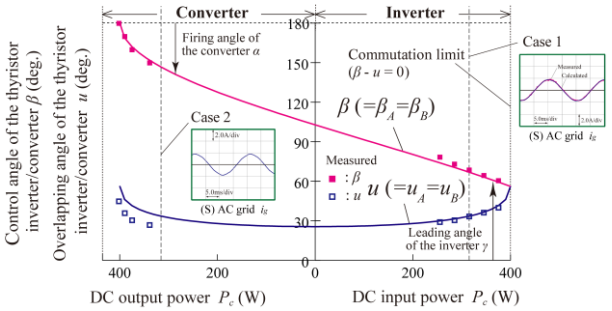


図 2　陸上変電所の構成図

3. 受電端回路に関する定常特性解析

受電端回路に関する種々な定常特性解析を行うため、シミュレーションモデル（MATLAB/Simulink/Simscape（MathWorks®））を構築した。また、実験的検討に必要な供試装置（2kVA）を製作した。これらを用いた定常特性解析の一例を図 3 に示す。同図には、直流入出力電力 P_c に対する、インバータの制御角 β 並びにインバータの



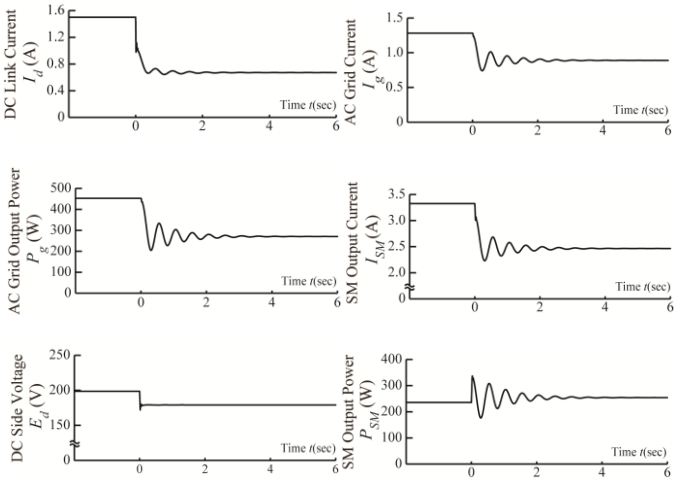
System conditions (constant):
$I_{dA} = I_{dB} = 0.75$(A), $V_{gA} = 209$(V), $P_g = 450$(W), $f_g = 50$(Hz), $pf_g = 1.0$

図 3　システムの動作範囲（供試装置）

電流重なり角 u の特性と各ケースにおける交流側電流波形が示されており、図よりシステムの動作範囲に関する検討を行うことができる。なお、本システムの基本的な特性を把握するため、2 台のインバータの制御角 β_A、β_B は同一の値 β とした。実線はシミュレーションによる計算値、プロット点が実験値である。同図より、本システムの陸上変電所は直流送電電流 I_d やシステムの出力 P_g を一定に保ったまま受電端だけでなく送電端としても動作できることが明らかになった。さらに、送受電端の各ケースにおいて、交流側電流はひずみの無い正弦波となることがわかった。なお、インバータ動作の場合、直流入力電力の増加に伴い、u は増加（$\beta \geqq u$ が動作範囲で、β が u 未満の時に転流失敗を引き起こす）するため、動作制限を受けることになる。以上のことから同システムは、システム定数を適切な値に選定することにより、十分な動作範囲が得られることが判明した。また実験値と計算値はよく一致しており、シミュレーションモデルの結果は妥当であることが明らかとなった。

4. 受電端回路に関する過渡特性解析

シミュレーションモデルを用いて、システムの受電端回路に関する過渡特性解析を行う。本システムにおいて、風速が変動する場合、直流送電電圧 V_d（図 1 の場合 $V_{d1}+V_{d2}-E_{d2}$ に相当する）が変動することとなる。本検討では、供試装置（2kVA）を対象としたシミュレーションとして、直流送電電圧 V_d を 200V から 180V にステップ的に減少させた場合の開ループ駆動時の過渡応答を計算する。図 4 はその結果の一部で、直流送電電流 I_d、交流系統電流 I_g、システムの出力 P_g、同期機の電機子電流 I_{SM}、インバータ直流側電圧 E_d、同期機の出力 P_{SM} の過渡応答計算値を示したものである。図より、直流送電電圧 V_d の減少に伴い、直流送電電流 I_d が減少し、その減少は、同期機電流 I_{SM} や系統電流 I_g の減少を引き起こす。さらに、システム各部の電流の減少に伴い、インバータの交流側電圧が減少するため、インバータ直流側電圧 E_d は図示のように減少し、直流送電電流 I_d の減少は抑制される。結果、システムの出力 P_g も



Steady-state operating values:
$\beta_A = \beta_B = 66.9$(deg.), $V_g = 204$(V), $P_g = 450$(W), $pf_r = 1.0$, $f_g = 50$(Hz), $I_d = I_{dA} + I_{dB} = 1.5$(A)
Before step change: $V_d = 200$(V), After step change: $V_d = 180$(V)

図 4　風速変動時におけるシステムの過渡特性

図示のように減少することとなる。なお、これらの応答は振動的となるが、これは同期機が電流の変化に伴い、エネルギーの吸収、放出を繰り返すために生ずるものと考えられる。また、これら振動的な応答を抑制するための制御系についても検討を行っており、ある程度の成果を得ている。

5. 結　言

本研究では、供試装置及び、シミュレーションモデルを用いて、洋上ウィンドファーム用ループ式多端子 HVDC 送電システムの受電端回路の動作範囲に関する定常特性解析を行った。また、過渡特性解析の一つとして、風速の変化を想定し、直流送電電圧をステップ的に減少させた場合の過渡特性解析を行った。定常特性解析の結果、陸上変電所は、システム定数を適切に選定することにより、受電端だけでなく送電端としても動作でき、交流側電流はひずみの無い正弦波となることが明らかとなった。また、過渡特性解析の結果、風速変動に伴い直流送電電流や出力電流が大幅に変動すること、またこれらの変動は制御可能であることがわかった。以上より、本システムは次世代の洋上風力発電システムとして有利な特徴を有していることが判明した。

文　献

[1] Global Offshore Wind Report 2022, [Online], Available: https://gwec. net/global-offshore-wind-report-2022/

[2] D. Sakamoto, S. Tanaka, Y. Mori, and K.Yamashita, “Steady-state characteristics of a Loop-Type Multi-Terminal HVDC Transmission System for Series-Connected Wind Power Plants,” *Proc. of 2021 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2021)*, HICO, Gyeongju, Korea, Nov. 2021.

[3] K. Yamashita, Y. Kameda, and S. Nishikata, “A harmonics elimination method using a three-winding transformer for HVDC transmission systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1645-1651, Mar./Apr. 2018.