直列接続方式ウィンドファームのための
ループ式直流送電システムの定常特性に関する研究

Steady-State Characteristics of a Loop-Type High-Voltage Direct Current Transmission System for Series-Connected Wind Power Plants

1. 緒　論

風力発電は陸上だけでなく洋上にも拡大しており、長距離送電に有利な直流送電（HVDC）を用いたシステムが運用され始めている。本研究室では、HVDC を利用した次世代の洋上風力発電システムとして、電流形サイリスタインバータを用いたループ式直流送電システムを提案している。同システムの構成を図 1 に示す。同システムは、電流形サイリスタインバータを用いる信頼性の高いシステムで、交流側回路には、同期機や変圧器などで構成される電力補償装置が接続される。電力補償装置は、システムの出力変動を抑制するだけでなく負の等価インダクタンスを有する変圧器の働きにより、サイリスタインバータで発生する高調波電流を吸収することができる。そのため本システムには、大規模な電力用フィルタが不要となる[1]。本稿では、システム全体の定常方程式の導出並びに、動作範囲などに関する定常特性の解析を行う。

2. システムの定常方程式

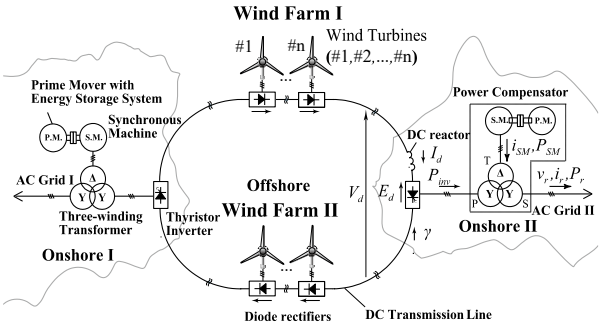
表 1 に導出したシステムの定常方程式を示す。同方程式は変圧器の励磁回路や鉄損を考慮したものであり、システムの種々な定常特性を解析することができる。

3. システムの定常特性

供試装置（2kVA）を対象としたシステムの動作範囲に関する検討を行う。図 2 にインバータの直流側電圧 E_d に対するシステム各部の電力 P_r, P_{SM}, P_{inv} 並びにインバータの制御進み角 γ、インバータの電流重なり角 u の定常特性（計算値）を示す。図 2(a)より、E_d の増加（風速の増加に相当する）に対し、電力補償を担う SM の出力 P_{SM} が減少し、有効電力の調整を行うことにより P_r を一定に保つことができる。また、図 2(b)より、E_d の増加に対し γ は減少、u は増加し、転流余裕角 γ-u（$\gamma \geqq u$ が動作範囲）が減少するため、E_d には上限のあることがわかる。

4. 結　論

直列接続方式ウィンドファームのためのループ式直流送電システムの動作範囲に関する定常特性解析を行った。その結果、風速の変動に対しシステムの出力を常に一定に保てること、インバータ直流側電圧には、インバータの転流限界に基因する上限のあることがわかった。



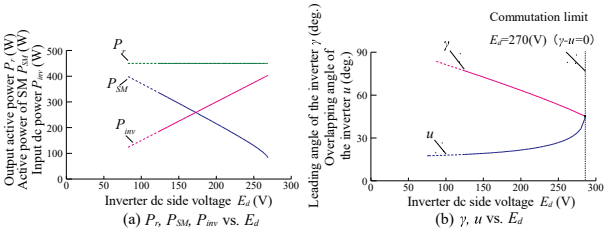
Notes- I_d: dc line current, P_{inv}: inverter output power, v_r, i_r, P_r: AC grid phase voltage, current, and output active power, i_{SM}, P_{SM}: synchronous machine (SM) current, and output active power.

図 1　ループ式直流送電システム

表 1　システムの定常方程式

Imaginary terminal μ phase voltage V_μ and leading angle η	$V_\mu=\sqrt{\left(a_s V_r+\frac{I_r}{a_s}X_s\sin\varphi_r\right)^2+\left(\frac{I_r}{a_s}X_s\cos\varphi_r\right)^2}$, $\eta=\sqrt{\left(\frac{I_r}{a_s}X_s\cos\varphi_r\right)/\left(a_s V_r+\frac{I_r}{a_s}X_s\sin\varphi_r\right)}$
Thyristor inverter leading angle γ and overlapping angle u	$\gamma=\left[\left\{E_d-\frac{3}{\pi}(X_T+X_\alpha)I_d\right\}\frac{\pi}{(3\sqrt{6})V_\mu}\right]$, $u=\gamma-\cos^{-1}\left\{\frac{\sqrt{6}(X_T+X_\alpha)}{3V_\mu}I_d+\cos\gamma\right\}$
Armature induced voltage of synchronous machine (SM) V_i	$V_i=\frac{1}{\sqrt{3}aa_T}\sqrt{\left\{V_\mu+\frac{I_r}{a_s}X_T\sin(\eta+\varphi_r)\right\}^2+\left\{\frac{I_r}{a_s}X_T\cos(\eta+\varphi_r)+X_T I_\mu\right\}^2}$
Armature induced leading angle ε	$\varepsilon=\eta+\tan^{-1}\left\{\left(\frac{I_r}{a_s}X_T\cos\eta+X_T I_\mu\right)/\left(V_\mu+\frac{I_r}{a_s}X_T\sin\eta\right)\right\}$
Inverter dc side voltage E_d and total dc link voltage V_d	$E_d=\frac{3\sqrt{6}}{\pi}V_\mu\cos\gamma+\frac{3}{\pi}(X_T+X_\alpha)I_d$, $V_d=R_d I_d+E_d$
Fundamental component of the armature current I_{SM}	$I_{SM}=\sqrt{3}aa_T\sqrt{\left\{\frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}\sin\left(\gamma-\frac{u}{2}\right)+\frac{I_r}{a_s}\sin(\eta+\varphi_r)\right\}^2+\left\{I_\mu-\frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}\cos\left(\gamma-\frac{u}{2}\right)+\frac{I_r}{a_s}\cos(\eta+\varphi_r)\right\}^2}$
Fundamental component of the lagging angle ζ	$\zeta=\varepsilon-\eta+\sin^{-1}\left[\frac{\sqrt{3}aa_T}{I_{SM}}\left\{\frac{\sqrt{6}I_d}{\pi}\sin\left(\gamma-\frac{u}{2}\right)+\frac{I_r}{a_s}\sin(\eta+\varphi_r)\right\}\right]$
SM output active power P_{SM}, AC grid active power P_r, and input DC power P_{inv}	$P_{SM}=3V_i I_{SM}\cos\zeta$, $P_r=3V_r I_r\cos\varphi_r$, $P_{inv}=E_d I_d$

Notes- φ_r: power factor angle of the AC grid, X_α, X_S, X_T: equivalent reactances of the transformer, a: turn ratio of the transformer, a_S, a_T: proportional constants of the exciting circuits.



(a) P_r, P_{SM}, P_{inv} vs. E_d　　(b) γ, u vs. E_d

System conditions : I_d = 1.5(A), $V_{l\text{-}l}$ = 209(V), P_r = 450(W), f = 50(Hz), pf_r = 1.0, a=1.153

図 2　風速変動に対するシステムの定常特性

文　献

[1] 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.