直列接続方式ウィンドファームのための
自励式同期発電機システムの特性解析

Performance Analysis of a Self-Excited Synchronous Generator
for Series-Connected Wind Power Plants

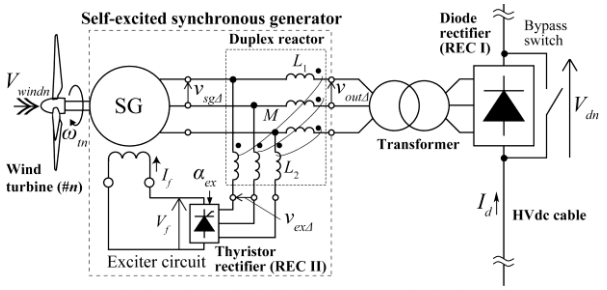
1. 緒　言

洋上風力発電への関心が世界中で高まっており、長距離送電に有利な高電圧直流送電を用いたシステムが運用され始めている[1]。このようなシステムの風力発電機には一般に高効率で信頼性の高い永久磁石同期発電機が用いられている。しかしながら同発電機は、永久磁石に使用されるレアメタルの価格変動に基因してコストが増大してしまう問題点があり、発電機自身で電圧調整ができないため、発電機と同容量の電力変換器が必要となる。また、こうした大規模洋上ウィンドファームについては数多くの研究開発が行われており、次世代システムとして、洋上変電所が不要な直列接続方式ウィンドファームなどが提案されている[2]。

筆者らは直列接続方式ウィンドファームの風力発電装置として、サイリスタ励磁方式を用いた自励式の巻線型同期発電機を提案し、同装置について種々な検討を行っている。本研究では提案システムの風力発電機としての有用性を明らかにすることを目的に、システムの定常特性並びに過渡特性について把握する。システムの特性把握については、シミュレーションモデルの構築並びに同モデルを用いた理論的検討や供試装置を用いた実験的検討の双方を用いることとする。

2. システムの構成

図 1 に、提案するダイオード給電型自励式同期発電システムの構成を示す。本システムは風車、同期機、発電機励磁用のサイリスタコンバータ（REC II）、直流系統連系用のダイオード整流器（REC I）などで構成される。同装置は自励式とすることにより外部電源が不要となり、小容量のサイリスタ励磁回路で発電機の出力電圧を調整することができるため、直流系統連系用の整流器に安価で堅牢なダイオードを用いることができる。また、本提案装置には図示のように相互誘導を有するリアクトル（Duplex Reactor : DR）が挿入されている。DR のない提案装置では REC I の転流に基因して発生する高調波が REC II にも影響を及ぼし、風力発電機として十分な動作範囲が得られないことが判明していた。DR は高調波ひずみの原因となる発電機の初期過渡インダクタンス L_S''を打ち消すように、発電機側の等価インダクタンスが負の値となるよう設計されている。



Notes – V_{windn}: wind speed of nth wind turbine, ω_{tn}: mechanical angular speed, α_{ex}: firing angle of REC II, $v_{sg\Delta}$: line-to-line voltage of the SG armature winding, $v_{out\Delta}$: line-to-line voltage of the SESG output terminal, $v_{ex\Delta}$: line-to-line voltage of the REC II input terminal, V_{dn}, I_d: dc link voltage and current of the REC I, V_f, I_f: dc link voltage and current of the REC II, L_1, L_2: self-inductances of the duplex reactor, M: mutual inductance of the duplex reactor.

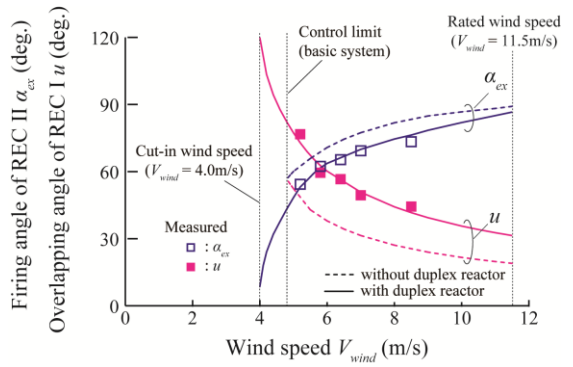
図 1　ダイオード給電型自励式同期発電システムの構成

その結果、DR を含む提案システムは、L_S''が増大する短絡比の小さい発電機（安価で軽量）を用いることができる。

また、風力発電装置として最大電力を追従するためには、周速比（ブレードの先端速度と風速の比）を常に最適な値で一定に制御する必要がある。直列接続方式ウィンドファームに接続される風力発電機群には共通の直流送電電流 I_d が流れるため、I_d を大幅に変動させることは好ましくない。そこで本論文では、I_d を一定とみなし、種々な検討を行う。また、発電機出力電圧は REC II の制御角 α_{ex} により調整できるため、I_d を一定とした場合、周速比（すなわちブレードの先端速度）を α_{ex} で制御することが可能となる。

3. システムの定常特性解析

図 2 に、定常状態におけるシステムの動作範囲に関する特性を示す。同図は風速 V_{wind} に対して、図中の条件となるように周速比を制御した場合の、サイリスタコンバータ制御角 α_{ex}、ダイオード整流器の電流重なり角 u の計算値を示したものである。また、図中のプロット点は供試装置を用いた実測値を示したものである。DR を持たないシステムの場合、制御角 α_{ex} が重なり角 u よりも小さくなると界磁電圧 V_f の調整ができなくなるため、低風速域では周速比を一定に保つことが困難となる。一方で、DR を持つ提案システムの場合、カットイン風速から定格風速までのすべての範囲で周速比を適切な値に保つこと可能であることがわかった。また、各風速域での実測値は理論値とよく一致しており、モデルの妥当性が明らかとなった。



System conditions (constant): I_d = 4.5(A), C_p = 0.48 (maximum value)

図 2　システムの動作範囲に及ぼす DR の影響

4. システムの過渡特性解析

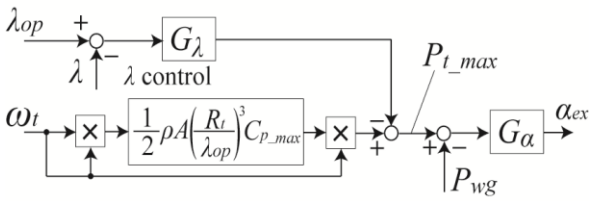
風力発電機は風のエネルギーを有効に利用するため、過渡時においても最大電力を追従する必要がある。そこで、タービンの出力係数 C_p が最大となる最適な周速比（供試装置では λ_{op}=8.1）を追従する制御系を構築した。図 3 に、構築した閉ループ制御系を示す。本制御系は、検出値をタービンの角速度 ω_t のみとし、これと出力係数最大値 C_{p_max} 及び最適な周速比 λ_{op} で求められるタービンの最大出力 P_{t_max} が指令値となり、制御量である発電機出力電力 P_{wg} を操作量となる制御角 α_{ex} により制御する構成となっている。なお、図 3 の閉ループ制御系において、G_α、G_λ は一般的な PI コントローラである。

同制御系を用いたシステムにおいて、種々な風速変化に対するシステム諸量の過渡応答について検討した。図 4 に、風速 V_{wind} をステップ的（8m/s →10m/s）に上昇させた場合の周速比 λ と制御角 α_{ex} の過渡応答計算値を示す。図より、風速がステップ的に増加すると、周速比 λ は急激に減少するが、提案した閉ループ制御系の働きにより α_{ex} が図示のように増加することがわかる。その結果、α_{ex} の増加は発電機出力の減少を引き起こすため、タービンの角速度が上昇し、周速比 λ は図示のように常に最適な値に追従することとなる。

一般的な風速の応答はステップ的な変化でなく、乱流成分を含み時々刻々と変化するため、これについても議論する必要がある。そこで、実風速を模擬するため乱流成分を含んだ風速モデル[3]を用いて、これに対するシステム諸量の過渡応答を計算した。計算の一例を図 5 に示す。図より、風速 V_{wind} は実際の風況と同様に不規則な変化をしていることがわかる。また、このような風速下においても、提案した制御系の働きにより、周速比 λ はほぼ一定に保たれており、提案した閉ループ制御系の有用性が明らかとなった。

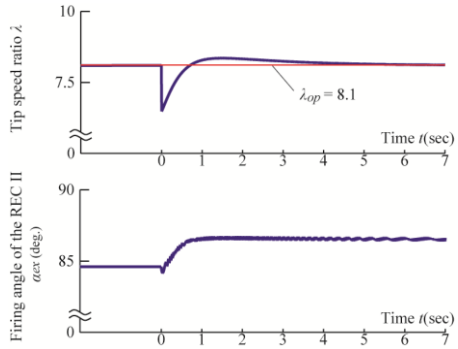
5. 結　言

本研究では、直列接続方式ウィンドファームのためのダイオード給電型自励式同期発電機として、サイリスタ励磁方式を採用したシステムを提案し、同システムの有用性を明らかにすることを目的に、システムの定常特性並びに過渡特性について検討した。その結果、定常特性解析により、提案システムはカットイン風速から定格風速までの広い範囲で動作可能であることが明らかとなった。また、過渡特性解析により、提案システムは風速の変動にかかわらず、常に最大出力となる動作点を追従できることが明らかとなった。



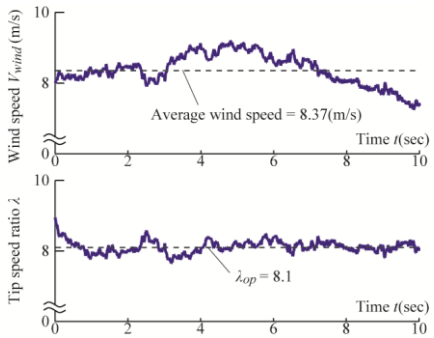
$G_\alpha = k_\alpha(1+1/(T_\alpha P))$, $G_\lambda = k_\lambda(1+1/(T_\lambda P))$, $P = d/dt$
k_α, k_λ: Proportional gain, T_α, T_λ: Time constant of integrator

図 3　最大電力を追従するための閉ループ制御系



Steady-state operating values: V_{wind} = 8(m/s), ω_t =209.4(rad/s) (0.67pu), α_{ex} = 84.6(deg), P_{wg} = 295(W), I_d = 2.0(A)

図 4　風速のステップ変化に対するシステムの過渡応答



System conditions: Average wind speed = 8.73(m/s)

図 5　乱流成分を含む風速に対するシステムの過渡応答

文　献

[1] Offshore wind farm grid connection, Siemens, [Online]. Available:https://new.siemens.com/in/en/products/energy/high-voltage/grid-access-solutions.html

[2] K. Yamashita, Y. Yamamoto and S. Kobayashi, “Performance Improvement of a Wind Turbine Generator Based on Self-excited Synchronous Generator for Series-connected Wind Power Plants,” *Proc. of 23th International Conference on Electrical Machines and Systems* (*ICEMS 2020*), Hamamatsu, Tokyo, Japan, Nov. 2020.

[3] K. Yamashita and S. Nishikata, “Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine Generator System Using Self-Excited Synchronous Generator for Current-Source Type Wind Farms,” *Proc. of 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, (SPEEDAM 2018)*, Amalfi, Italy, June 2018.