

슬라이딩 모드제어 기법을 이용한 풍력 터빈의 최대 출력 제어 방법에 대한 검토

신윤호*, 문석준, 남용윤, 김창현, 류지윤

Examination on the Maximum-Cp Control of Wind Turbine by Sliding Mode Control

Yun-ho Shin*, Seok-jun Moon, Yong-yun Nam, Chang-hyun Kim and Ji-june Ryu

Abstract

Because concern on the problem of the limited energy is growing and the wind energy is considered as one of the biggest solutions, the researches on the wind energy and turbine are accomplished vigorously. The simulation tools on the non-linear characteristics of wind turbine system are various and it could describe the non-linear characteristics well but, the tool and methodology to apply non-linear control theory rarely exist. In this paper, the application procedure of sliding mode control theory to 2-DOF non-linear wind turbine system is suggested and the application results of it are also shown as compared with a torque loop control theory.

Key words

Max-CP Control(최대 출력제어), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드제어), Wind Turbine Control(풍력 터빈 제어), Non-linear Control of Turbine(풍력 터빈의 비선형 제어)

(접수일 2011. 7. 15, 수정일 2011. 8. 22, 게재확정일 2011. 8. 22)

* 한국기계연구원 시스템다이내믹스실

■ E-mail : shinyh77@kimm.re.kr ■ Tel : (042)868-7211 ■ Fax : (042)868-7418

Nomenclature

$\Omega_{r,g}$: Rotational Speed of Rotor/Generator, rad/s

$\theta_{r,g}$: Rotational Displacement of Rotor/Generator, rad

λ : Tip Speed Ratio

σ : Sliding Surface

$B_{r,g}$: Damping Coefficient of Rotor/Generator Bearing, Ns/m

$J_{r,g}$: Moment of Inertia of Rotor/Generator, kgm^2

J_t : Equivalent Moment of Inertia of Turbine, kgm^2

R : Blade Radius, m

T_a : Aero-dynamic Torque, Nm
 $T_{r,g}$: Torque of Rotor/Generator, Nm
 $a_{1,2}$: Gain Tuning Parameter of Sliding Mode Controller
 $c_{r,g}$: Damping Coefficient of Rotor/Generator, Ns/m
 $k_{r,g}$: Stiffness Coefficient of Rotor/Generator, N/m
 $u_{eq, N}$: Command Input by Sliding Mode Controller
 v : Wind Speed, m/s

1. 서론

세계적으로, 저탄소 녹색성장에 대한 관심이 커져가고 에너지 고갈 문제가 인류가 직면한 가장 큰 문제 중 하나로 대두되면서 회수할 수 있는 에너지양이 상대적으로 큰 풍력에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 입력에 해당하는 바람의 특성 모사에서부터 블레이드를 거쳐 소비를 위한 전력망으로의 연결까지 신호 처리 분야부터 동역학, 제어, 전기 공학 등에 대한 전반적인 지식을 요구하는 풍력 시스템은 공학에 대한 통합적인 지식을 요구할 뿐만 아니라, 제 자체가 가지고 있는 비선형 성으로 인해 모사실험을 비롯하여 그 특성 예측이 어렵다.

풍력 터빈 계의 모형화에 대한 연구는 크게 바람 에너지로부터 기계적으로 회수 될 수 있는 에너지를 산출하는 시스템에 초점을 맞춘 기계 분야⁽¹⁻³⁾와 기계로부터 회수된 에너지에서부터 전력망까지의 연결과 관련된 거동 특성에 초점을 맞춘 전기 분야^(4,5)로 구분되며, 이에 대한 모사실험을 위한 다양한 상용 프로그램들^(6,7)이 개발되어 사용되고 있다. 개발된

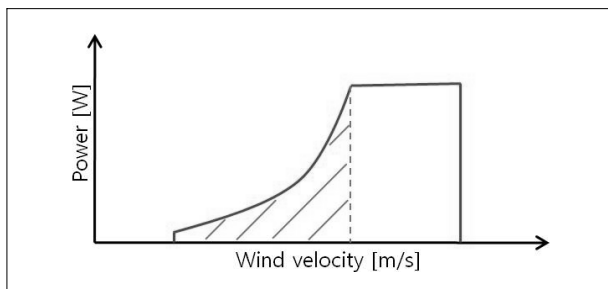


Fig. 1 Operational Schedule of Wind Turbine System

상용 프로그램들은 터빈 계의 비선형적인 특성 묘사에는 초점을 맞추고는 있으나, 적용 제어기와 관련된 부분은 선형 제어기인 PID 제어 혹은 토크 루프 제어기만을 검토할 수 있는 실정이다.

본 연구에서는 3MW 풍력 터빈을 대상으로 효율이 최대(Maximum C_p)가 되기를 요구하는 전격 풍속(Rated Wind Speed) 이하의 구간에 대해 비선형 강인성 제어 이론 중 하나인 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control) 이론의 적용 절차와 그 효과에 대해 논의하고자 한다(그림 1 참조). 이는 비선형 항을 포함하는 2-자유도 비선형 터빈 모형을 대상으로 하며, 성능 비교 대상으로는 최대 출력 구간에서 많이 검토·적용되는 토크 루프 제어기(Torque Loop Controller)로 한다. 본 연구는 향후 정도가 높은 비선형 계에 대한 터빈 모형을 대상으로 출력 효율을 최대로 하는 비선형 제어기 설계 및 적용에 대한 연구를 위한 기초 연구로서 그 의미가 있으며, 비선형 제어기 설계·적용을 위한 시뮬레이터 개발에 활용될 수 있다.

2. 풍력 터빈의 수학적 모형화

본 장에서는 비선형 제어기 중 하나인 슬라이딩 모드 제어기의 유효성을 확인하기 위한 비선형항을 포함하는 풍력 터빈 모형을 유도하고자 한다. 이를 위하여 2-자유도로 간략화한 풍력 터빈 모형을 유도하며, 바람 신호 및 공력 토크의 산출 방법을 정리한다.

2.1 2-자유도 풍력 터빈의 유도

본 연구에서 대상으로하는 풍력 발전기는 3MW급의 풍력 발전기로서, 풍력발전기의 파워추종 제어 알고리즘 설계의 초기 연구 단계로서 간략화 모델에 대해 기존에 널리 사용되

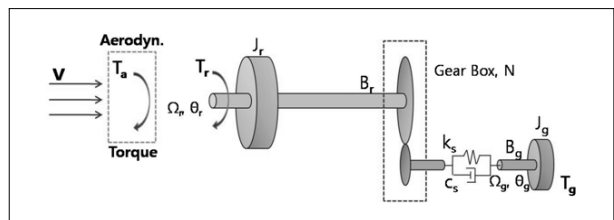


Fig. 2 2-DOF Wind Turbine System

고 있는 토크루프 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 비교·검토하였다. 그림 2은 풍력발전기에 대한 간략화 모델을 보여주고 있으며, 블레이드를 포함하여 증속기 전단까지를 하나의 원판으로 모델링하고, 증속기 후단부터 발전기까지를 또 하나의 원판으로 모델링하였다. 두 개의 원판은 증속비를 갖는 증속기로 연결되어 있다. 모델링 내용 및 단순화를 위한 가정을 정리하면 다음과 같다.

- 공력회전 토크(T_a) 및 발전기 토크(T_g)에 의해 가동되는 2 자유도 비선형 모델
- 공력회전 토크 산출시 블레이드 거동 영향 무시
- 타워 모드 등의 추력 관련 요소 무시
- 블레이드, 발전기 시스템의 동적 거동 무시
- 시스템 내 신호처리 필터 등의 동적 특성 무시

언급한 내용을 바탕으로 간략화한 2-자유도 풍력 터빈에 대한 운동 방정식은 식 (1)과 같다⁽¹⁾.

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_a(\lambda, \beta) - k_s(N\theta_r - \theta_g) - k_s(N\Omega_r - \Omega_g) - B_r\Omega_r$$

$$J_g \frac{d\Omega_g}{dt} = k_s(\theta_r - \frac{1}{N}\theta_g) + c_s(\Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_g) - B_g\Omega_g - T_g \quad (1)$$

여기서 회전 시 기어, 베어링 등에서 발생하는 손실에 대한 항(B_r , B_g)은 무시하며, 사용된 각 매개변수들에 대한 세부적인 값들에 대한 기술은 생략한다. 2-자유도 시스템에 대한 입력은 공력 토크(T_a)이며, 발전을 위해 사용되는 발전기 토크(T_g)가 제어 가능한 변수가 된다. 이때 입력에 해당하는 공력토크는 대상 터빈의 회전속도(Ω_r) 및 블레이드의 피치각(β)

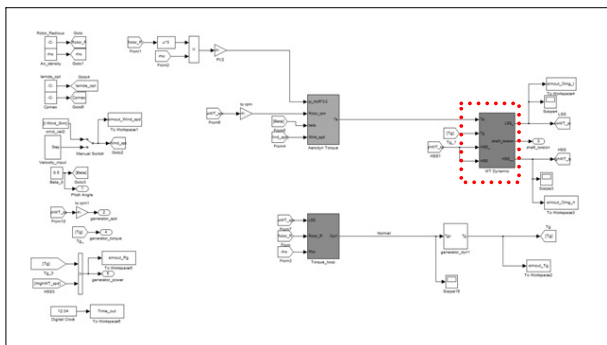


Fig. 3 Block Diagram for MatLab/Simulink Wind Turbine Simulation

의 함수로 나타내며, 이로 인해 시스템에 비선형성이 발생된다. 본 연구에서 관심을 가지는 임계속도(Rated Speed) 이하의 구간에서는 피치각에 의한 시스템 응답 특성의 변화가 작으므로 이를 일정 값(0)으로 고정하고 모사실험을 수행한다.

비선형 항을 포함하는 풍력 터빈의 모사실험을 위한 계의 구현은 공학용프로그램인 MatLab/Simulink를 활용하였으며, 그림 3과 같이 크게 세 부분으로 나뉜다. 이는 각각 2-자유도 터빈 모형 구현, 바람으로부터 공력토크 산출, 발전기 토크 제어를 위한 제어기법 적용 및 구현으로 구성된다.

식 (1)에 나타난 풍력 터빈의 구현을 위한 세부적인 모델링은 그림 4와 같으며, 이는 블레이드단의 저속 부분과 발전기단의 고속 부분으로 나뉘어 구현된다.

2.2 공력 토크의 생성

대상 풍력 터빈의 모사실험에 있어서 비선형성이 크게 관찰되는 부분은 공력토크와 관련된 항임을 2.1절에서 언급하였으며, 이에 대한 구현 절차 및 특성을 고찰하기 위해 대상 풍력 터빈의 공탄성 특성을 확보된 자료를 바탕으로 구현하였다. 그림 5는 확보된 자료를 이용하여 공탄성 특성계수를 도시한 것이며, 확보된 자료 중 주속비(Tip Speed Ratio)는 1.0부터 13.0까지 0.5간격이며, 피치 각은 0°부터 30°까지는 0.5°간격이고 30°부터 90°까지는 10° 간격이다. 그림 5로부터 대상 풍력 터빈의 최대 출력위치를 확인할 수 있었으며, 최대 출력계수는 피치 각 0.5°, 주속비 8.0에서 0.481임을 알 수 있다.

임의로 불어오는 바람으로부터 블레이드에서 받아들이는 공력토크의 산출은 식 (2)를 이용한다.

$$T_a = \frac{P}{\Omega_r} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_Q(\lambda, \beta) v^2 \quad (2)$$

$$\text{where } \lambda = \frac{R\Omega_r}{v}$$

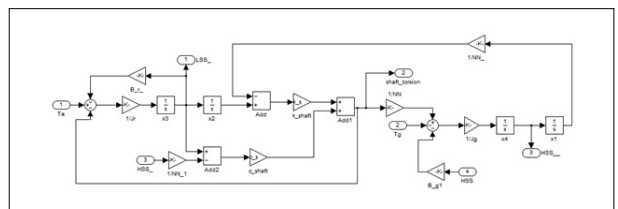


Fig. 4 Block Diagram of 2-DOF Wind Turbine System

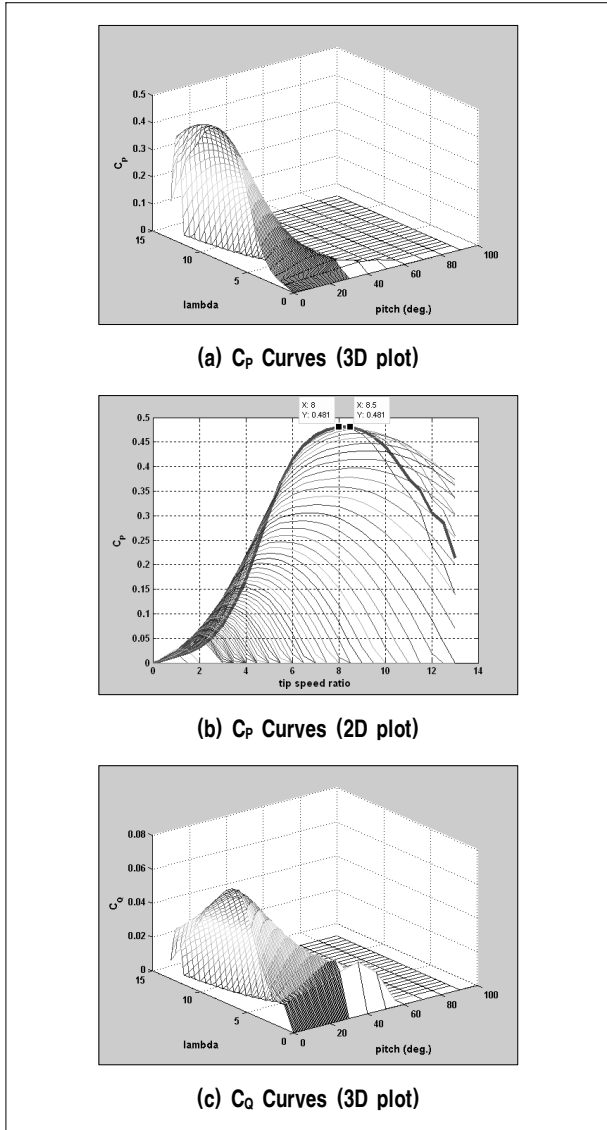


Fig. 5 Aero-dynamic Characteristic Coefficients for Wind Turbine

공력토크의 산출을 위해서는 블레이드의 형상정보, 블레이드의 피치각, 터빈의 회전속도, 터빈으로 불어오는 바람의 속도 정보가 필요하며, 이로부터 피치각을 고정한 상태에서 주속비를 계산하여 출력 계수 및 공력토크 계수를 산출한다. 그림 6은 공력토크를 구현하기 위한 블록 선도를 의미하며, 이를 이용하여 터빈의 동역학적 거동과의 상호 연산을 통해 터빈이 받는 입력 토크인 공력토크를 산출한다.

풍력 터빈으로 불어오는 난류가 포함된 바람 신호는 IEC-61400-1⁽⁸⁾을 참조하여 생성하였으며, 이때 바람의 평균 풍속은 5m/s로 가정한다. 이는 본 연구의 관심 구간인 최대출력

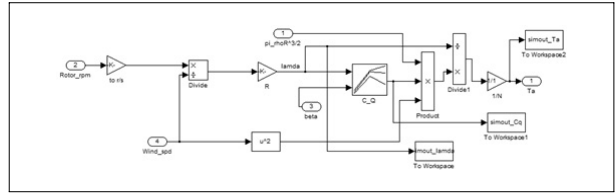


Fig. 6 Block Diagram for Realization of Nonlinear Aero-dynamic Characteristics

제어 구간에서 터빈이 거동하게 하기 위한 입력 풍속이다.

3. 토크 루프 제어기의 적용

토크 루프 제어기는 풍력 터빈에서 최대 출력 제어를 위해 일반적으로 사용되고 있는 제어기로서 발전기 토크를 식 (3)과 같은 방법으로 발전기로의 명령 토크(Command Torque)를 산출한다.

$$T_g = K \times \Omega^2 \quad (3)$$

where
$$K = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5$$

기본적인 구조는 발전기의 속도를 되먹임하여 발전기의 토크를 제어하는 제어기로서, 주속비(Tip Speed Ratio, λ)에 따른 출력계수(C_p)의 변화 곡선과 발전기 토크 사이의 수렴성을 이용하여 발전기 출력이 최대가 되도록 명령 토크를 생성하는 제어기이다. 이는 설계 및 측정 값들이 정확하다면 식 (3)에 기반한 입력 토크 명령 시 최적의 주속비(λ_{opt}) 지점으로 즉, 최대 출력계수($C_{p,max}$)를 가지는 로터 회전속도로 수렴하여 운전하게 된다. 별도의 제어 이득에 대한 조율 과정은 필요하지 않으며, 난류 및 시간에 따라 변화하는 바람의 특성으로 인하여 최적의 주속비에서 운전되지 않는 구간이 존재하게 된다.

공학용프로그램(MatLab/Simulink)을 활용하여 제어기를 설계 및 구현하고 모사실험을 통해 해당 제어기의 제어 성능을 검토하였으며, 그림 7은 구성 모듈 구현을 위한 블록 선도를 보여주고 있다. 난류를 포함하고 불어오는 바람(평균 풍속 5m/s)에 대한 시간에 따른 모사실험 결과는 그림 8과 같으며, 랜덤 속도 입력에 대한 로터 회전 속도, 발전기 토크, 터빈 발전 파워 응답을 각각 나타내고 있다.

토크 루프 제어기에 대한 모사실험 결과를 그림 9~12와 같

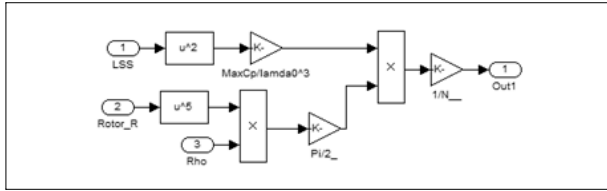


Fig. 7 Block Diagram of Torque-loop Controller

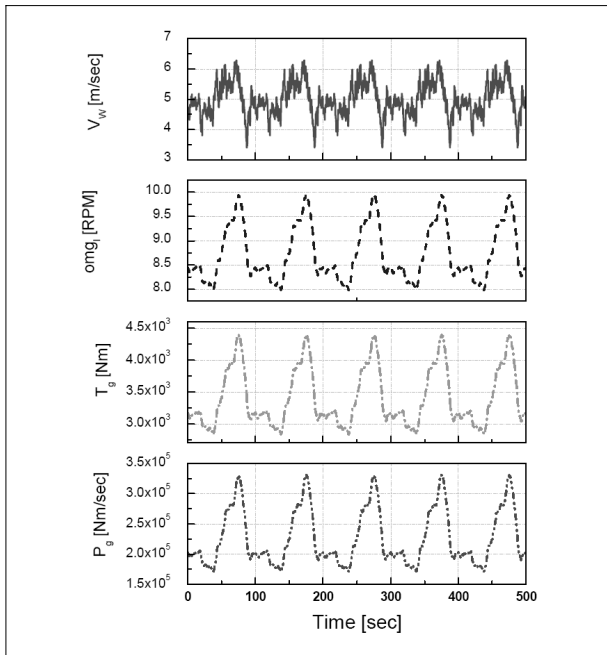


Fig. 8 Simulation Results of Wind Turbine on Turbulent Wind Input: Torque Loop Control

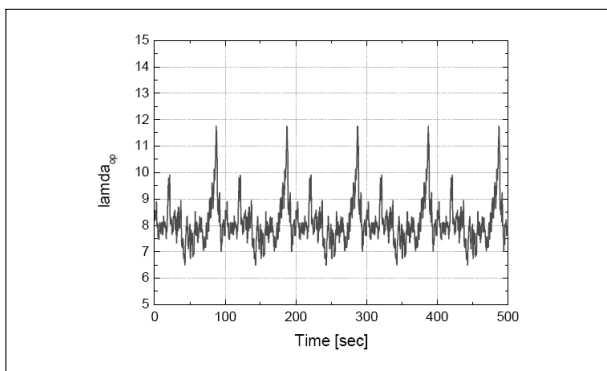


Fig. 9 Simulation Results of Torque Loop Control: Time vs. Tip Speed Ratio

이 정리하여 살펴보면, 응답 특성이 상대적으로 안정적이며 급격한 바람의 변화가 있는 구간을 제외하고 생성 출력을 최대한으로 하는 최적의 운전 조건에서 운전된다. 이는 응답 속도가

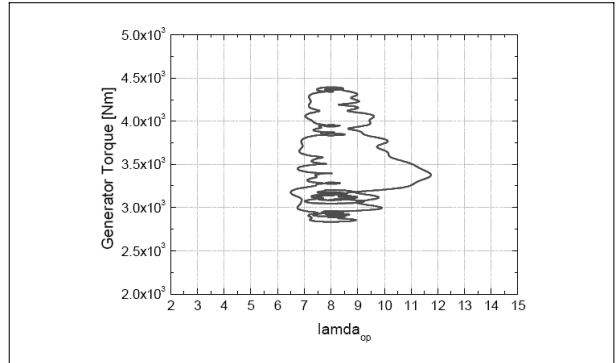


Fig. 10 Simulation Results of Torque Loop Control: Tip Speed Ratio vs. Generator Torque

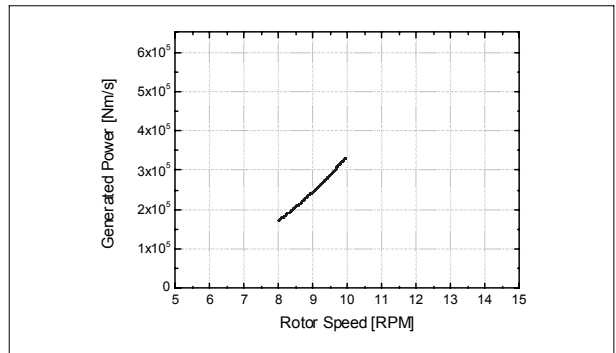


Fig. 11 Simulation Results of Torque Loop Control: Rotor Speed vs. Generated Power

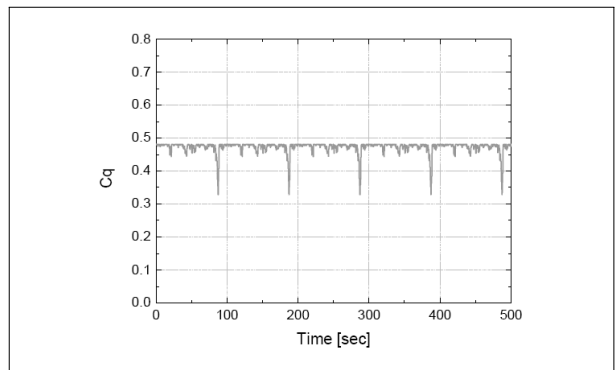


Fig. 12 Simulation Results of Torque Loop Control: Time vs. Power Coefficient

상대적으로 느리기에 최대 효율과 관련한 일정 부분의 손해를 감수하고 안정적인 발전기 운전이 가능함을 의미한다. 실제 운전 결과 등의 추가 자료가 존재하지 않을 때는 제어 이득의 조정이 불가능하기에 수렴 속도 조절, 운전 위치 등의 조절에 단점이 존재한다.

4. 슬라이딩 모드 제어 기법의 적용

본 장에서는 최대 출력 제어를 위해 기존 풍력 터빈에 적용되어 빈번하게 사용되고 있는 토크 루프 제어기(Torque Loop Control)의 모사실험 결과를 바탕으로, 이에 대한 성능 개선을 목적으로 비선형 강인성 제어기로 알려진 슬라이딩 모드 제어 기법(Sliding Mode Control)의 적용 절차 및 그 결과를 기술한다.

4.1 슬라이딩 모드 제어기의 설계

2장에서 언급한바와 같이 공력 항에 의해 강한 비선형성을 가지는 풍력 터빈 계를 대상으로 선형 제어이론을 적용할 경우, 제어기 설계 시 고려한 범위를 벗어난 구간에 대해서는 최적의 제어 성능을 기대하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 대상 계의 강한 비선형성을 고려하여 비선형 강인성 제어기 중 하나인 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Control)를 선정·검토하였다. 슬라이딩 모드 제어기는 제어 이득의 조정을 통한 응답 특성 조율 가능하며, 슬라이딩 서피스(Sliding Surface)를 정의하여, 제어 입력이 슬라이딩 서피스 표면으로 수렴하도록 발전기 토크 신호(T_g)를 생성하여 운전한다. 앞서 토크 루프 제어기와 비교하여 바람속도에 대한 측정을 추가로 필요하며, 발전기 토크, 로터 회전속도를 측정 변수로 사용한다. 제어기의 목표 거동에 해당하는 슬라이딩 서피스(6)는 식 (4)와 같이 정의된다⁽⁹⁾.

$$\sigma = a_1 J_r \Omega_g + a_2 J_r T_g - J_r \dot{\Omega}_g \quad (4)$$

발전기 토크에 대한 명령 입력은 슬라이딩 서피스로 들어가기 위한 입력(u_N)과 슬라이딩 서피스에서의 거동 특성을 유지하기 위한 입력(u_{eq})으로 구성된다. 각각의 입력 항에 대한 유도 결과는 식 (5), (6)과 같다.

$$u_{eq} = T_g - \frac{\tau_g}{1 + a_2 J_r} (a_1 J_r \Omega_g + a_2 J_r T_g) (a_1 - A(\lambda, v)),$$

$$\text{where } A(\lambda, v) = \left(\frac{\rho \pi R^2}{2N} v R^2 \right) (C_p'(\lambda) \lambda - C_p(\lambda)) / \lambda^2 \quad (5)$$

$$u_N = -\alpha \cdot \text{sgn}_h(\sigma) \quad (6)$$

여기서 $A(\lambda, v)$ 를 결정하기 위해 사용되는 C_p, C_p' 은 그림 5에 나타난 출력계수를 λ 에 대한 다항식으로 곡선 맞춤하여 산출된 수식을 이용한다.

다항식 슬라이딩 모드 제어이론에 대한 적용 방법에 대해서는 참고문헌 [9]에 1-자유도계의 풍력 터빈을 대상으로 개략적으로 기술되어 있으며, 본 연구에서는 2-자유도 계 터빈 모형을 바탕으로 1-자유도 등가 계로 근사화 하여 세부적인 매개변수들을 결정하였다.

슬라이딩 서피스에서의 동특성을 결정하기 위한 제어 이득은 식 (7), (8)과 같다.

$$a_1 = -1 / \tau_{sm} \quad (7)$$

$$a_2 = -a_1 \frac{\Omega_{g,opt}}{T_{g,opt} (1 + k (\Omega_g - \Omega_{g,opt}) / \Omega_{g,opt})} \quad (8)$$

이 때 최적의 조건에서 운전할 때의 입력 토크 크기를 자력으로 조율하게 하기 위해 a_2 는 동적 계수(Dynamic Constant)로 정의된다. 슬라이딩 모드 제어기는 설계 및 측정 값들에 대해 일정 수준의 불확실성을 허락하며, 상기의 입력 사용 시 최적의 주속비(λ_{opt}) 및 최대 출력계수($C_{p,max}$)로 수렴하여 운전된다. 제어 이득에 대한 조율이 가능하여 이를 통한 수렴 속도 등의 동특성 조율 및 설계 가능하다.

4.2 슬라이딩 모드 제어기의 적용

모사실험 결과는 그림 13과 같으며, 이는 토크 루프 제어기와의 비교를 위해 동일한 형태의 난류를 포함한 평균 5m/s의 바람 입력에 대한 모사실험 결과이다. 그림 14~17은 그림 13에 도시한 모사실험 결과를 바탕으로 주속비, 발전기 토크, 회수 파워, 출력 계수(C_p)를 중심으로 정리한 결과를 나타낸다.

모사실험 결과를 세부적으로 살펴보면, 슬라이딩 서피스에서의 동특성 결정을 위한 제어 이득인 a_1, k 의 조율을 통한 발전기 응답 특성 조절이 가능함을 알 수 있다. 높은 제어 이득을 이용한 발전기의 빠른 응답 특성 구현이 가능하기에 발전기의 효율을 높일 수 있으며, 토크 루프 제어기를 적용한 경우와 출력 계수(C_p)를 비교하면, 모든 구간에서 출력 계수 값이 0.4 이상으로 선형 제어기 대비, 효율이 높은 제어 방법으로 판단된다. 측정 속도 신호를 이용하기에 이에 대한 필터

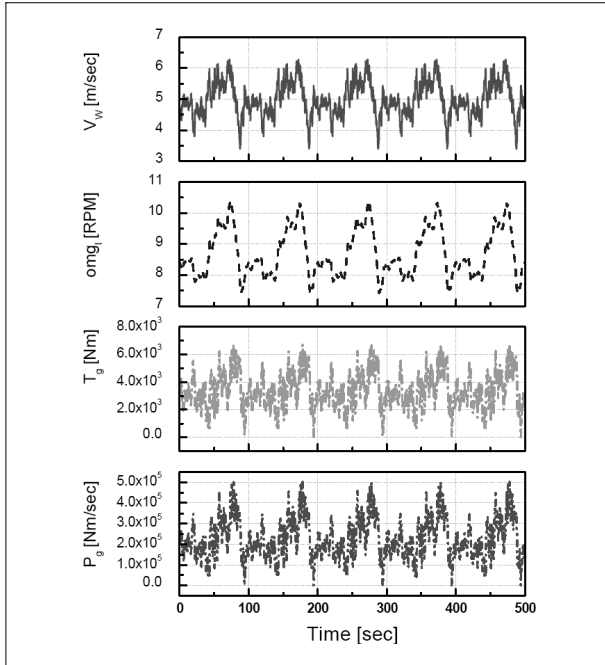


Fig. 13 Simulation Results of Wind Turbine on Turbulent Wind Input: Sliding Mode Control

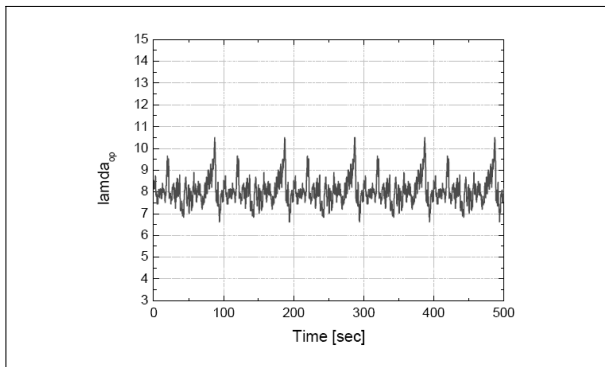


Fig. 14 Simulation Results of Sliding Mode Control: Time vs. Tip Speed Ratio

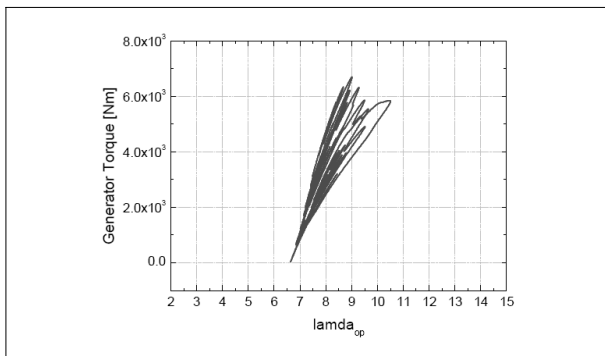


Fig. 15 Simulation Results of Sliding Mode Control: Tip Speed Ratio vs. Generator Torque

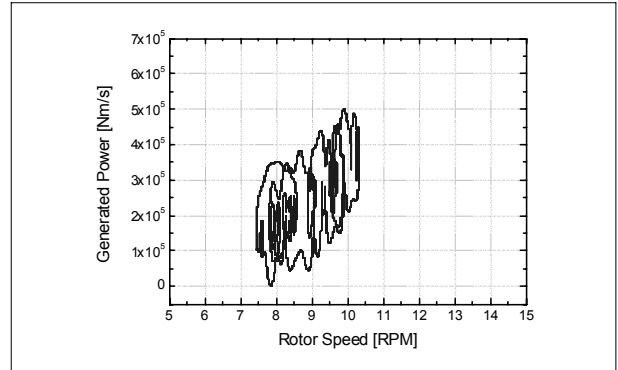


Fig. 16 Simulation Results of Sliding Mode Control: Rotor Speed vs. Generated Power

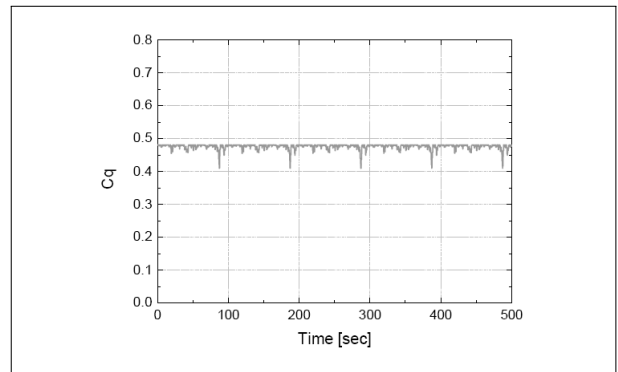


Fig. 17 Simulation Results of Sliding Mode Control: Time vs. Power Coefficient

설계 및 정확한 예측의 과정이 추가적으로 요구되며, 토크 루프 제어기와 비교하여 0.6% 정도 향상된 효율 특성을 보이고 있다. 본 모사실험이 이상적인 경우에 대한 모사실험임을 감안할 때, 보다 다양한 실제 운전 특성 조건을 반영하여 효율을 계산하면, 선형 제어기와 비교하여, 더 향상된 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 슬라이딩 모드 제어를 적용할 경우, 다른 제어기와 동일하게 제어 이득 조율에 따라 계가 불안정해질 가능성이 존재하며, 제어 이론이 상대적으로 복잡하여 설계 및 조율에 어려움이 존재한다. 그리고 슬라이딩 서피스에서의 동특성 및 궤적 유지를 위한 입력 생성 시 채터링(Chattering) 문제가 발생할 가능성이 존재하지만, 다양한 방법(예: 슬라이딩 서피스를 구간으로 정의하는 방법)으로 이 부분에 대한 해결이 가능하다⁽¹⁰⁾. 대상 계가 강한 비선형성을 가지고 있는 상황에서, 본 연구에서 검토한 슬라이딩 모드 제어기가 비선형 계에 기반하여 설계된 제어기이기에 전반적

Table 1. Comparison of Performance between Torque Loop Controller and Sliding Mode Controller

	토크 루프제어기 (기준)	비선형 제어기 (Sliding Mode Controller)
평균 출력계수	0.4176	0.4752
출력계수 비		1.008
평균 회수파워	205.76kW	206.99kW
회수파워 비		1.006
연간 전력생산량	1802.5MWh	1813.2MWh
전력생산량 비		1.006

인 운전 구간에 대해 최적의 운전 성능을 보장할 수 있다는 장점이 가장 크게 생각되어야 할 사안이다. 이는 추후 모형의 점도 및 실제 상황에 대한 추가의 반영 시 그 차이가 더 확실해 질 것으로 생각된다.

4.3 제어 결과 비교

본 절에서는 3장과 4.1절에서 언급한 두 개의 제어기에 대한 상호비교 결과를 정리하였다. 비교 기준을 토크 루프 제어기의 모사실험 결과로 하였으며 이를 출력계수, 회수 파워, 연간 전력 생산량으로 정리하면, 표 1과 같다. 앞서 기술한 바와 같이 비선형 제어기(Sliding Mode Controller)를 적용한 경우의 효율이 상대적으로 좋은 것으로 나타났으며, 대상 계에 대한 세부적인 동적 특성 및 세부 설계 내역을 반영한 풍력 터빈 및 공력 회전토크 모형을 이용한 모사실험을 수행할 경우, 각 제어기의 특성을 더 명확하게 구분할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 공력 향으로 인하여 강한 비선형성을 가지는 풍력 터빈 계에 대한 2-자유도 운동방정식을 이용하여 비선형 강인성 제어기 중 하나인 슬라이딩 모드제어 이론의 적용 가능성을 모사실험을 통하여 검토하였다.

선형화된 모형을 대상으로 일정 상황 하의 성능만을 보장하는 토크루프 제어기와 비교하여 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 경우가 회수 파워 및 연간 전력 생산량을 기준으로 0.6% 상승된 전력을 생산할 수 있음을 확인하였으며, 이는 대상 계에 대한 모델 점도 및 실제 상황을 모사할 수 있는 필

터 등의 기타 요소들이 더 고려 될 경우, 그 성능 차이가 더 확실할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 결과의 일부입니다(‘풍력발전시스템용 제어 기술 및 기기개발’, No. 20103010020040).

References

- [1] Yoon-Su Nam, "Wind Turbine Control", GS InterVision, ISBN 978-89-93668-33-9, 2009.
- [2] Henrik Bindner, "Active Control: Wind Turbine Model", Riso-R-920(EN) pp.1-32, 1999.
- [3] Dewey H. Hodges & Mayuresh Patil, "Multi-Flexible-Body Analysis for Application to Wind-Turbine Control Design", 19th ASME Wind Energy Symposium, Jan. 10-13, 2000.
- [4] L. Hanefors & H.P. Nee, "Model-based Current Control of AC Machines Using the Internal Model Control Method", IEEE Trans, Ind. Applicat., Vol. 34, No. 1, pp. 133-141, Jan./Feb. 1998.
- [5] W.S. Kim, G.H. Sim, K.B. Lee, B.C. Jeong, S.H. Song, "Sliding-mode Based Direct Power Control of a Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbines", Trans. of KIEP, Vol. 13, No. 2, pp. 152-162, 2008.
- [6] Garrad Hassan & Partners Ltd., "Bladed User Manual Version 4.0", 2010.
- [7] Jason M. Jonkman, Marshall L. Buhl Jr., "FAST User's Guide", Technical Report of NREL, 2005.
- [8] International Electrotechnical Commission, "Wind Turbine Generator Systems, Part 1: Safety Requirements", IEC 61400-1, 2005.
- [9] Iulian Menteanu, Antoneta Luliana Bratcu, Nicolaos-Antonio Cutululis, Emil Ceanga, "Optimal Control of Wind Energy Systems", Springer, ISBN 978-1-84996-724-2, 2010.
- [10] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall Inc., ISBN 0-13-040049-1, 1991.

신윤호



2003년 한양대학교 기계공학부 공학사
2004년 KAIST 기계공학과 공학석사
2009년 KAIST 기계공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실 선임연구원
(E-mail : shinyh77@kimm.re.kr)

문석준



1988년 서울대학교 조선공학과 공학사
1990년 서울대학교 조선해양공학과 공학석사
1995년 서울대학교 조선해양공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 시스템다이나믹스연구실 책임연구원
(E-mail : sjmoon@kimm.re.kr)

남용운



1986년 부산대학교 조선공학과 공학석사
1994년 부산대학교 조선공학과 공학박사
1987년 한국기계연구원

현재 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 책임연구원
(E-mail : yynam@kimm.re.kr)

김창현



2000년 KAIST 전기및전자공학과 공학사
2002년 KAIST 전기및전자공학과 공학석사
2009년 KAIST 전기및전자공학과 공학박사

현재 한국기계연구원 자기부상연구실 선임연구원
(E-mail : chkim78@kimm.re.kr)

류지윤



1992년 영남대학교 기계공학과 공학사
IEC TC88 위원

현재 (주)유니슨 풍력연구소 연구소장
(E-mail : jyryu@unison.co.kr)