Performance Improvement of a Hydraulic Turbine Generation System Using

Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control

적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이용한 수차 발전 시스템의 성능 향상

Dae-Hyun Cho · Yeongsu Bak · Kyo-Beum Lee

조대현^{*} · 박영수^{*} · 이교범[†]

Abstract

This paper presents a performance improvement of a hydraulic turbine generation system using adaptive fuzzy sliding mode control. A dynamic response of current control on the part of generator should be improved to utilize differential pressure energy efficiently in hydraulic turbine generation system. Current ripple on the part of generator should be reduced in terms of noise and generator's life. Adaptive fuzzy sliding mode control scheme is applied to generator in order to improve the performance of a hydraulic turbine generation system. Sliding mode control is used to make the dynamic response improve and fuzzy logic is used to select a proper gain of sliding mode control to decrease chattering phenomenon in steady state. The effectiveness and performance of the proposed method for hydraulic turbine generation system are verified by simulation and experiment.

Key Words

Hydraulic turbine generation system, Sliding mode control, Fuzzy logic, Dynamic response, Chattering phenomenon

1. 서 론

지역난방 시스템에서는 열 생산 시설로부터 원거리에 위치 한 열 사용자 시설에 온수를 공급하기 위해 고압 유체를 사용 한다. 하지만, 근거리에 위치한 열 사용자 시설에서는 고압 유 체를 이용할 수 없을 뿐만 아니라 고압 유체에 의해 설비가 손상될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 차 압 유량 조절 밸브(Differential Pressure Control Valves, DPCV) 를 사용한다[1]. 하지만, DPCV는 고압 유체에 의해 잦은 고장 및 오작동이 발생하므로[2], 최근 DPCV를 대체하여 지역난방 시스템에서 미활용되고 있는 차압 에너지를 활용하기 위한 수 차 발전 시스템 개발이 활발하게 진행되고 있다. 차압 에너지 를 이용한 수차 발전은 소수력 발전의 한 종류로, DPCV를 이 용한 차압 제어 과정에서 기계적 손실로 낭비되는 차압 에너 지를 전기 에너지로 회수할 수 있다. 또한, 온실가스를 배출하 지 않고 높은 에너지 밀도를 가지므로 친환경적이고 경제적인 발전 방식이다[3].

일반적으로 수차 발전 시스템에서는 차압 에너지를 활용하 기 위해 Back-to-Back 컨버터를 사용하며, 이를 통해 발전된 전력을 계통으로 전달하여 활용한다. 이때, Back-to-Back 컨버 터의 3상 계통 측 컨버터를 이용하여 직류단 전압을 일정하게 제어하며, 발전기 측 인버터를 이용해 고압 유체의 차압 제어 를 수행한다[4]. 수차 발전 시스템에서 고압 유체의 차압 제어 를 원활하게 수행하여 차압 에너지를 효과적으로 활용하기 위 해서는 발전기 측 전류 제어의 속응성 향상과 같이 과도 응답 상태 특성의 개선을 통해 발전 성능을 향상시켜야 한다. 또한, 정상 상태에서 발전기 측 전류의 리플이 발생하는 경우에는 발전기의 토크 리플 및 소음이 증가하고 수명을 단축시킬 수 있으므로, 우수한 정상 상태 특성을 통해 발전되는 전력의 품 질을 개선해야 한다.

Back-to-Back 컨버터를 이용한 수차 발전 시스템에서는 주 로 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어기를 이용하여 발전 기 측 전류를 제어하지만, PI 제어를 통해서는 발전기 측 전류 제어의 요구되는 과도 응답 특성을 만족시킬 수 없다. 다양한 제어 방법 중에서 슬라이딩 모드 제어를 통해 수차 발전 시스 템의 원활한 차압 제어뿐만 아니라 발전기 측 전류 제어의 과 도 응답 특성을 향상시킬 수 있다. 슬라이딩 모드 제어는 비 선형 제어의 한 종류로서 파라미터의 변화, 모델링의 불확실

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/

[†]Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea. E-mail: kyl@ajou.ac.kr

https://orcid.org/0000-0002-2125-9500

^{*} Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

Received : June 29, 2019 Accepted : September 25, 2019

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

licenses/by-nc/4.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성, 외란 등으로부터 강인하며, 빠른 속응성을 갖는 제어 방법 이다[5-7]. 하지만, 슬라이딩 모드 제어의 불연속적인 특성으로 인해 정상 상태에서 고주파의 채터링 현상이 나타난다. 채터 링 현상은 슬라이딩 모드 제어의 이득이 클 때 심화되며, 이 는 전류의 고조파 및



그림 1 수차 발전 시스템의 구성 Fig. 1 Composition of hydraulic turbine generation system

토크 리플 등 다양한 문제의 원인이 된다[8]. 이에 따라, 슬라 이딩 모드 제어를 이용한 수차 발전 시스템의 정상 상태 특성 을 향상시키기 위한 추가적인 방법이 필요하다.

본 논문에서는 수차 발전 시스템의 과도 응답 상태 특성뿐 만 아니라 정상 상태 특성을 향상시키기 위해 적응 퍼지 슬라 이딩 모드 제어를 이용한 발전기 측 전류 제어 방법을 제안한 다. 일반적으로 퍼지 제어는 제어 규칙을 언어적으로 쉽게 표 현할 수 있으며, 외란에 대해 매우 강인한 특성을 갖는다. 또 한, 제어 대상을 수학적으로 정확히 근사화할 수 없는 경우에 제어 대상의 입력과 출력 관계만으로 탁월한 성능을 나타내므 로, 다양한 산업 분야에 넓게 적용되어왔다[9, 10]. 슬라이딩 모드 제어 방법을 이용한 수차 발전 시스템에서는 과도 응답 상태와 정상 상태의 특성을 동시에 개선하기에 한계가 존재한 다. 과도 응답 상태의 속응성을 향상시키기 위해 슬라이딩 모 드 제어의 이득을 크게 설정하는 경우, 정상 상태의 전류 리 플이 증가하는 문제가 발생한다. 반면, 정상 상태에서 발전기 측 전류 리플을 저감하기 위해 슬라이딩 모드 제어의 이득을 작게 설정하는 경우, 과도 응답 상태의 속응성이 PI 제어기를 사용한 경우에 비해 크게 향상되지 않는다. 따라서 본 논문에 서 제안하는 방법을 통해 슬라이딩 모드 제어의 이득을 적절 하게 가변하여 발전기 측 전류 제어의 과도 응답 상태뿐만 아 니라 정상 상태의 특성을 동시에 개선할 수 있으므로, 수차 발전 시스템의 발전 성능뿐만 아니라 발전되는 전력의 품질을 개선할 수 있다. 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션과 실 험을 통해 검증한다.

2. 수차 발전 시스템

2.1 수차 발전 시스템의 구성

그림 1은 차압 에너지를 활용하기 위한 수차 발전 시스템의 구성을 나타내며, 수차와 연결된 영구자석 동기발전기 (Permanent-Magnet Synchronous Generator, PMSG), Back-to-Back 컨버터, *L* 필터, 3상 계통으로 구분한다. 수차는 지역난방 시스템의 열 수송관에 흐르는 고압 유체에 의해 회 전하며, 수차에 연결된 PMSG는 전력을 발생한다. PMSG로부 터 발생된 전력은 Back-to-Back 컨버터를 통해 3상 계통 측으 로 전달되며, Back-to-Back 컨버터는 3상 2-Level 토폴로지를 이용한 PMSG 측 인버터와 3상 계통 측 컨버터 및 직류단 커 패시터로 구성된다[11-13].

PMSG 측 인버터는 PMSG를 통해 발전되는 전류를 제어하며, 일반적으로 엔코더와 같은 위치 센서를 통해 얻은 회전자 위치를 이용하여 PI 제어기를 통해 전류 제어를 수행한다[4]. 3상 계통 측 컨버터는 전압 제어기와 전류 제어기가 직렬 연결된 구조로 설계하며, 계통 측 제어를 위해 필요한 위상각은 위상 고정 루프(Phase Locked Loop, PLL)를 통해 얻는다[14]. 마지막으로, L 필터는 Back-to-Back 컨버터와 3상 계통 사이에 전류의 리플을 저감한다.

2.2 PI 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과

PI 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동작을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 및 PMSG 파라 미터는 표 1과 같다.

	계통 선간 전압	380 [V _{rms}]
시뮬레이션	계통 주파수	60 [Hz]
파라미터	제어 주기	100 [µs]
	직류단 커패시터	500 [µF]
	정격 출력	5 [kW]
	정격 속도	1750 [rpm]
PMSG	d축 인덕턴스	7.25 [mH]
파라미터	q축 인덕턴스	7.29 [mH]
	고정자 저항	0.158 [Ω]
	쇄교 자속	0.264 [Wb]

표 1 시뮬레이션 및 PMSG 파라미터 Table 1 Parameter of simulation and PMSG

그림 2는 PI 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동작 시 뮬레이션 결과를 나타낸다. 고압 유체에 의해 회전하는 수차 를 모의하기 위해 PMSG의 회전 속도를 900 rpm으로 설정하 였으며, 3상 계통 측 선간 전압(*V_{AB grid}*)은 60 Hz/380 V_{ms}로 설 정하였다. 3상 계통 측 컨버터를 통해 Back-to-Back 컨버터의 직류단 전압(*V_{DC}*)을 600 V로 제어하였으며, PMSG 측 q축 지 령 전류를 12 A로 설정하였다. PI 제어기를 통해 PMSG 측 q 축 전류(*i_{qe grid}*)는 지령 전류에 따라 제어되며, 계통 측 q축 전 류(*i_{qe grid}*)를 통해 PMSG로부터 발전된 전류가 3상 계통 측으 로 흐르는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이 션 결과를 나타내며, PMSG 측 q축 지령 전류($i^*_{qe_gen}$)는 0.2 초 에 2 A에서 6 A로 가변하였다. PMSG 측 q축 전류인 i_{qe_gen} 은 지령 전류에 따라 제어되며, 정상 상태 도달 시간은 약 2.15 ms이다. PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어에서 정상 상



그림 2 PI 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동작 시뮬레이션 결과

Fig. 2 Simulation results of hydraulic turbine generation system operation using a PI controller



그림 3 PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이션 결과 Fig. 3 Simulation results of current control on PMSG side using a PI controller

태 오차는 거의 존재하지 않지만 속응성이 느린 단점으로 인 해 지역난방 시스템의 차압 에너지를 효과적으로 활용할 수 없다. 따라서, 수차 발전 시스템에서 고압 유체의 차압 제어를 원활하게 수행하여 차압 에너지를 효과적으로 활용하기 위해 서는 과도 응답 특성을 향상시키기 위한 추가적인 방법이 필 요하다.

2.3 슬라이딩 모드 제어

수차 발전 시스템에서 슬라이딩 모드 제어를 통해 PMSG 측 전류 제어의 과도 응답 상태 특성을 향상시켜 차압 에너지 를 효율적으로 활용할 수 있다. 그림 4는 슬라이딩 모드 제어 기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 블록도를 나타낸다. 우선, 슬라이딩 평면은 식 (1)과 같이 설정한다.

$$S = e_i + \int e_i dt \tag{1}$$

여기서, ei는 슬라이딩 모드 제어의 입력을 나타내며, PMSG



그림 4 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 블록도 Fig. 4 Current control block diagram on PMSG side using a sliding mode controller

측 q축 지령 전류인 *i*^{*}_{qe_gen}과 q축 전류인 *i*_{qe_gen}의 차로 계산한 다. 또한, 그림 4에 나타낸 제어 블록도에서 Signum function 블록을 통해 *sgn(S*)를 식 (2)와 같이 계산한다.

$$sgn(S) = \frac{S}{|S|+r}, \ r = \begin{cases} 0, \ |S| \ge \delta\\ \lambda, \ |S| \le \delta \end{cases}$$
(2)

여기서, λ는 큰 양수 값, δ는 작은 양수 값을 나타내며, 시스 템의 특성에 따라 적절한 값을 선정한다[15]. PMSG 측 전류 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 계산된 새로운 오차는 식 (3)과 같다.

$$e_{i_surface} = sgn(S) \cdot K_{smc} + e_i \tag{3}$$

여기서, K_{smc}는 슬라이딩 모드 제어의 이득을 나타낸다. K_{smc}가 클수록 PMSG 측 전류 제어의 과도 응답 상태 특성은 향상되 지만, 정상 상태에서 채터링 현상이 심화되는 문제가 발생한 다. 마지막으로, e_{i_surface}를 PI 제어기의 입력으로 설정하며, PMSG 측 전류 제어기의 출력인 q축 지령 전압은 식 (4)와 같 다.

$$*_{qe_gen} = k_{pq} \cdot e_{i_surface} + k_i \cdot \int e_{i_surface}$$
(4)

여기서, k_{pq} 와 k_i 는 각각 PI 제어기의 q축 비례 이득과 적분 이 득이다.

2.4 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과

슬라이딩 모드 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동작을 확인하고, K_{smc}에 따른 과도 응답 상태 및 정상 상태의 특성을 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 및 PMSG 파라미터는 표 1과 같다. 그림 5는 K_{smc}를 5로 설정한 경우에 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이션 결과를 나타내며, 그림 3에 나타낸 지령 전류와 같이 i^{*}_{qe gen}은 0.2 초에 2 A에서 6 A로 가변하였다. i_{qe gen}은 지 령 전류에 따라 제어되며, 정상 상태 도달 시간은 약 0.5 ms 이다. 그림 3에 나타낸 PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제 어 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도 응답 상태 특성이 향상 되었으나, 정상 상태에서의 채터링 현상으로 전류의 리플이 증가하는 문제가 발생한다. 전류의 리플은 PMSG의 수명을 단 축시킬 뿐만 아니라 소음을 발생시키는 원인이 되므로, 정상 상태에서 전류의 리플을 고려하여 K_{smc}를 설정해야 한다.

그림 6은 그림 5와 동일한 구성 및 조건에서 전류의 리플을 저감하기 위해 K_{smc}를 1로 설정한 시뮬레이션 결과를 나타내 며, *iqe.gen*은 지령 전류에 따라 제어된다. 그림 5에 나타낸 시뮬 레이션 결과와 비교하여 K_{smc}가 감소하여 전류의 리플이 감소 했으나 정상 상태 도달 시간이 약 1.78 ms로 증가하였다. 또 한, 그림 3에 나타낸 PI 제어기를 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하여 과도 응답 상태 특성이 크게 향상되지 못한 것을 확 인할 수 있다. 따라서, PMSG 측 전류 제어의 과도 응답 상태 특성과 함께 정상 상태 특성을 모두 향상시키기 위해서는 추 가적인 제어 방법이 필요하다.



그림 5 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이션 결과(Ksmc=5)

Fig. 5 Simulation results of current control on PMSG side using a sliding mode controller(Ksmc=5) $\,$



그림 6 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이션 결과(Ksmc=1)

Fig. 6 Simulation results of current control on PMSG side using a sliding mode controller(Ksmc=1)

3. 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어

본 논문에서는 수차 발전 시스템에서 PMSG 측 전류 제어 의 과도 응답 상태 및 정상 상태 특성을 모두 향상시키기 위 해 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어 방법을 제안한다. 그림 7은 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 블록도를 나타내며, 제안하는 방법에서는 퍼지 제어를 통해 슬라이딩 모드 제어의 이득인 K_{smc}를 결정한다. 퍼지 제어의 입력은 PMSG 측 q축 전류의 오차(e_i)이며, Fuzzification, Rule evaluation, Defuzzification의 과정을 거쳐 적절한 K_{smc}를 결정한다. 즉, PMSG 측 q축 전류의 오차에 따 라 K_{smc}를 증가 또는 감소하여 과도 응답 상태 및 정상 상태 특성을 모두 향상시킬 수 있다.



그림 7 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 블록도

Fig. 7 Current control block diagram on PMSG side using a proposed adaptive fuzzy sliding mode controller

3.1 퍼지 제어

퍼지 제어는 Fuzzification, Rule evaluation, Defuzzification의 세 부분으로 구성한다. 먼저, Fuzzification은 입력 변수를 멤버 쉽 함수로 처리하는 과정이며, 입력 변수가 각 멤버쉽 함수에 속하는 정도(Degree of Membership, DOM)를 결정한다[16]. 멤 버쉽 함수는 가우시안 분포, 시그모이드 곡선, 범종형, 삼각형 등 임의의 형태로 설정할 수 있으며, 멤버쉽 함수의 형태를 결정한 후에 중앙값과 변역을 결정한다. 이때, 멤버쉽 함수는 어떠한 입력에도 하나 이상의 멤버쉽 함수에 소속되어 DOM 을 갖도록 설정한다. 그림 8은 본 논문에서 설정한 멤버쉽 함 수를 나타내며, 다른 형태의 멤버쉽 함수에 비해 구현이 간단 하고 오버슈트가 존재하지 않는 삼각형의 멤버쉽 함수로 설정 하였다[17, 18].



Fig. 8 Membership function

Rule evaluation은 각 멤버쉽 함수의 DOM을 기준으로 output strength를 선택하는 과정이다. 본 논문에서 각 멤버쉽 함수의 output strength는 표 2와 같으며, 수차 발전 시스템의

과도 응답 상태 및 정상 상태 특성을 고려하여 설정하였다. 마지막으로, Defuzzification은 각 멤버쉽 함수의 DOM과 output strength를 이용한 계산을 통해 퍼지 제어의 출력을 계 산하는 과정이다. 퍼지 제어의 출력은 슬라이딩 모드 제어의 이득을 나타내며, 퍼지 제어의 입력이 3.5인 경우에 멤버쉽 함 수 PS와 PB의 DOM은 각각 0.5이고, 나머지 멤버쉽 함수의 DOM은 0이다. 즉, 퍼지 제어의 출력인 Ksmc는 식 (5)와 같다.

$$\begin{split} K_{smc} &= DOM(NB) \cdot 7 + DOM(NS) \cdot 0.5 + DOM(Z) \cdot 0 \\ &+ DOM(PS) \cdot 0.5 + DOM(PB) \cdot 7 \\ &= 0 \cdot 7 + 0 \cdot 0.5 + 0 \cdot 0 + 0.5 \cdot 0.5 + 0.5 \cdot 7 \\ &= 3.75 \end{split}$$
(5)

표 2 멤버쉽 함수의 가중치

Table 2 Output strength of membership functions

Membership function	Meaning	Output strength
NB	Negative Big	7
NS	Negative Small	0.5
Z	Zero	0
PS	Positive Small	0.5
PB	Positive Big	7

3.2 제안하는 제어 방법을 이용한 수차 발전 시스템의 시뮬레이션 결과

그림 9는 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용 한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이션 결과를 나타내며, PMSG 측 q축 지령 전류인 $i^*_{qe_gen}$ 은 0.2 초에 2 A에서 6 A로 가변하 였다. 제안하는 제어 방법을 통해 PMSG 측 q축 전류인 i_{qe_gen} 은 지령 전류에 따라 제어되며, 정상 상태 도달 시간은 약 0.92 ms이다. 그림 5 및 그림 6의 시뮬레이션 결과에서 슬라 이딩 모드 제어의 이득인 K_{smc} 는 일정하지만, 제안하는 제어 방법을 이용한 시뮬레이션 결과에서 K_{smc} 는 퍼지 제어를 통해 PMSG 측 q축 전류의 오차에 따라 가변한다. 즉, 과도 응답 상태에서는 K_{smc} 를 증가하여 전류 제어의 속응성을 향상시키 고, 정상 상태에서는 K_{smc} 를 감소하여 전류의 리플을 저감할 수 있다.

제안하는 방법을 이용한 경우에 *iqe_gen*의 정상 상태 특성인 전류 리플의 크기는 그림 3에 나타낸 PI 제어기를 이용한 시 뮬레이션 결과에서 *iqe_gen* 리플의 크기와 유사하지만 정상 상태 도달 시간이 약 58 % 감소하였으며, 제안하는 방법을 통해 과 도 응답 상태 특성을 향상시킬 수 있다. 또한, *iqe_gen*의 과도 응 답 상태 특성은 그림 5에 나타낸 슬라이딩 모드 제어기를 이 용한 시뮬레이션 결과에서 *iqe_gen*의 특성과 유사하지만 정상 상 태 특성인 전류 리플의 크기는 약 96 % 감소하였다. 결과적으 로, 본 논문에서 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 수차 발전 시스템의 과도 응답 상태 특성뿐만 아니 라 정상 상태 특성을 모두 향상시켜 발전 성능 및 전력의 품 질을 개선시킬 수 있다.



그림 9 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 시뮬레이션 결과

Fig. 9 Simulation results of current control on PMSG side using a proposed adaptive fuzzy sliding mode controller

3.3 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 안정도 분석

본 논문에서 수차 발전 시스템의 성능 향상을 위해 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 안정성은 PMSG 측에서 발전되는 전력을 이용하여 분석할 수 있다. 우선, 식 (4)에 나 타낸 PMSG 측 인버터의 지령 전압을 바탕으로 PMSG 측에서 발전되는 전력은 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_{gen} = \frac{-V_{gen}}{Ls+R} \left(k_{pq} + \frac{k_i}{s} \right) \left(sgn\left(S_s\right) \cdot K_{smc} + e_{i_surface} \right)$$
(6)

여기서, V_{gen} 은 PMSG의 역기전력에 의한 선간 전압, L과 R은 각각 PMSG의 인덕턴스 및 고정자 저항, S_s 는 슬라이딩 평면 S의 Laplace 변환식이다. 안정도 판별을 위하여 Lyapunov 함 수를 $V_2 = S_s^2/2$ 로 선정하고, Lyapunov 함수의 미분 항을 계산 하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{split} \dot{V}_{2} &= S_{s}\dot{S}_{s} = -bS_{s}^{2} + (1 - a_{p} + b_{p})e_{i}S_{s} + \frac{L}{R}P_{gen}S_{s} \\ &- b_{p}K_{smc}|S_{s}| \\ &= -b_{p}S_{s}^{2} - E_{p}|S_{s}| \\ (E_{p} &= \left|(a_{p} - b_{p} - 1)e_{i}\right| - \left|\frac{L}{R}P_{gen}\right| + b_{p}K_{smc}, \\ &a_{p} &= \frac{V_{gen}k_{pq}}{R}, b_{p} = \frac{V_{gen}k_{i}}{R}) \end{split}$$
(7)

따라서, 수차 발전 시스템의 성능 향상을 위해 제안하는 적 응 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 안정성을 보장하기 위해서는 식 (7)에서 $S_s S_s < 0$ 을 만족해야 하며, 슬라이딩 모드 제어의 이득인 K_{sme} 는 식 (8)과 같이 설정해야 한다.

$$K_{smc} \ge \left(\left| \left(1 - a_p + b_p \right) e_i \right| + \left| \frac{L}{R} P_{gen}^{\cdot} \right| \right) / \left(b_p \right)$$

$$\tag{8}$$

4. 실험 결과

본 논문에서 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이 용한 수차 발전 시스템의 성능 향상 방법의 타당성을 검증하 기 위해 그림 10에 나타낸 실험 세트를 이용하여 실험을 진행 하였다. 그림 10(a)는 PMSG와 수차를 모의한 유도 전동기 (Induction motor, IM)이며, 그림 10(b)와 (c)는 각각 PMSG 측 전류를 제어하기 위한 인버터 및 3상 계통 연계를 위한 컨버 터이다. 전력변환장치는 TMS320F28335 디지털 신호 장치를 통해 구동되며, 실험에서 사용한 PMSG의 파라미터는 표 1과 같다.



그림 10 실험 세트 Fig. 10 Experiment set

그림 11은 PI 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동작 실 험 결과를 나타낸다. 고압 유체에 의해 회전하는 수차를 모의 하기 위해 IM을 이용하여 PMSG의 회전 속도를 900 rpm으로 설정하였으며, 3상 계통 측 선간 전압(*V_{AB grid}*)은 60 Hz/380 Vms로 설정하였다. 3상 계통 측 컨버터를 통해 Back-to-Back 컨버터의 직류단 전압(*V_{DC}*)을 600 V로 제어하였으며, PMSG 측 q축 지령 전류를 12 A로 설정하였다. 결과적으로, PI 제어 기를 이용하여 PMSG 측 q축 전류인 *i_{qe gen}*은 지령 전류로 제 어되는 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결 과를 나타내며, $i^*_{qe_gen}$ 는 2 A에서 6 A로 가변하였다. 또한, i_{qe_gen} 는 지령 전류에 따라 제어되며, 정상 상태 도달 시간은 약 2.80 ms이다. i_{qe_gen} 의 정상 상태 오차는 거의 없지만 속응 성이 느린 단점이 있다.

수차 발전 시스템에서 고압 유체의 차압 제어를 원활하게 수행하여 차압 에너지를 효과적으로 활용하기 위해서는 과도 응답 특성을 향상시키기 위한 추가적인 방법이 필요하다. 즉,



그림 11 PI 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동작 실험 결과 Fig. 11 Experiment results of hydraulic turbine generation system operation using a PI controller



그림 12 PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과 Fig. 12 Experiment results of current control on PMSG side using a PI controller



그림 13 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과 (Ksmc=2)

Fig. 13 Experiment results of current control on PMSG side using a sliding mode controller(Ksmc=2)

PI 제어기를 이용하는 경우에 *i_{qe gen}의* 속응성이 느린 단점을 보완하기 위해 주로 슬라이딩 모드 제어기를 사용한다. 이에 따라, 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 수차 발전 시스템의 동 작을 확인하고, 슬라이딩 모드 제어의 이득인 *K_{sme}*에 따른 과 도 응답 상태 및 정상 상태의 특성을 비교하기 위한 실험을 수행하였다.

그림 13은 K_{sm}e를 2로 설정한 경우에 슬라이딩 모드 제어기 를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과를 나타내며, $i^*_{qe,gen}$ 은 2 A에서 6 A로 가변하였다. 슬라이딩 모드 제어를 기반으

1200

로 iqe_gen은 지령 전류에 따라 제어되며, 정상 상태 도달 시간



그림 14 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과 (Ksmc=1)

Fig. 14 Experiment results of current control on PMSG side using a sliding mode controller(Ksmc=1)



그림 15 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과

Fig. 15 Experiment results of current control on PMSG side using a proposed adaptive fuzzy sliding mode controller

은 약 1.58 ms이다. 그림 12에 나타낸 PI 제어기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과와 비교하여 과도 응답 상태 특성이 향상되었으나, 정상 상태에서의 채터링 현상으로 인해 전류의 리플이 증가하는 문제가 발생하였다.

그림 14는 그림 13과 동일한 구성 및 조건에서 전류의 리플 을 저감하기 위해 K_{smc}를 1로 설정한 실험 결과를 나타낸다. 그림 13에 나타낸 실험 결과와 비교하여 감소한 K_{smc}에 따라 전류의 리플은 감소했으나 정상 상태 도달 시간이 약 1.83 ms 로 증가하였다. 또한, 그림 12에 나타낸 실험 결과와 비교하여 과도 응답 상태 특성이 확연하게 향상되지 못한 것을 확인할 수 있다.

PMSG 측 q축 전류 제어의 과도 응답 상태 특성인 정상 상 태 도달 시간을 줄이고 정상 상태 특성인 전류 리플의 크기를 줄여 수차 발전 시스템의 성능을 향상시키기 위해 본 논문에 서는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 제어 방법을 제안한다. 그림 15는 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어 기를 이용한 PMSG 측 전류 제어 실험 결과를 나타낸다. 실험 결과에서 제안하는 제어 방법을 통해 iqegen은 2 A에서 6 A로 가변한 i^{*}qegen에 따라 제어되며, 정상 상태 도달 시간은 약 1.43 ms이다. 그림 13 및 그림 14에 나타낸 실험 결과에서는 슬라이딩 모드 제어의 이득인 Ksmc가 일정하므로, 각각 정상 상태에서 전류 리플의 크기가 증가하거나 과도 응답 상태에서 속응성이 느린 단점이 있다. 이와 달리, 제안하는 제어 방법 기반의 실험 결과에서는 퍼지 제어를 통해 PMSG 측 q축 전 류 오차에 따라 Ksmc를 가변한다. 즉, 정상 상태에서는 Ksmc를 감소하여 전류 리플의 크기를 저감할 수 있으며, 과도 응답 상태에서는 Ksmc를 증가하여 전류 제어의 속응성을 향상시킬 수 있다.

추가적으로, 그림 12에 나타낸 PI 제어기 기반의 실험 결과 와 비교하여 PMSG 측 q축 전류 리플의 크기는 유사하지만, 정상 상태 도달 시간은 약 49 % 감소하였다. 또한, 그림 13에 나타낸 슬라이딩 모드 제어기 기반의 실험 결과와 비교하여 PMSG 측 q축 전류 제어의 정상 상태 도달 시간은 유사하지 만, 전류 리플의 크기가 감소하였다. 결과적으로, 제안하는 적 응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 PMSG 측 전류 제 어의 과도 응답 상태 특성뿐만 아니라 정상 상태 특성을 모두 향상시킬 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이용한 수 차 발전 시스템의 성능 향상 방법을 제안하였다. 일반적으로 수차 발전 시스템에서는 PI 제어기를 이용하여 PMSG 측 전 류를 제어하지만, 과도 응답 상태 특성인 속응성이 느린 단점 이 있다. 이러한 PI 제어기의 단점을 해결하고, 전류 제어의 속응성을 향상시키기 위해 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 PMSG 측 전류를 제어할 수 있다. 하지만, 슬라이딩 모드 제 어의 이득인 Ksmc가 일정하여 과도 응답 상태 및 정상 상태 특 성을 모두 향상시키는데 한계가 존재하며, PMSG 측 전류 제 어의 과도 응답 상태 특성뿐만 아니라 정상 상태 특성을 향상 시켜야하는 수차 발전 시스템에서는 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 퍼지 제어를 통해 PMSG 측 전류의 오차에 따 라 Ksmc를 가변하여 PMSG 측 전류 제어의 과도 응답 상태 및 정상 상태 특성을 동시에 향상시켜 발전 성능뿐만 아니라 전 력의 품질을 개선시키는 방법을 제안한다. 즉, 전류 제어의 과 도 응답 상태에서 Ksmc를 증가하여 전류 제어의 속응성을 향상 시키고, 정상 상태에서 Ksmc를 감소하여 PMSG 측 q축 전류 리플의 크기를 저감한다. 제안하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이용한 수차 발전 시스템의 성능 향상 방법의 타당성 은 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 확인하였다.

Acknowledgements

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기 술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20172020108970)

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구개별연구에 의해 지원되었음. (과제번호: R19XO01-20)

References

- [1] K. M. Kim, S. Y. Park, and M. S. Oh, "Power Generation and Control System Using Differential Pressure of District Heating Pipeline in a Substation," Journal of Energy Engineering, vol. 26, no. 3, pp. 90-96, Sep. 2017.
- [2] D. K. Kim and C. H. Sohn, "Numerical Study on Cavitation Reduction in Velocity-Control Trim of Valve with High Pressure Drop," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, vol. 37, no. 9, pp. 863-871, Sep. 2013.
- [3] J. Liu, B. Xu, D. Chen, J. Li, X. Gao, and G. Liu, "Grid-Connection Analysis of Hydro-Turbine Generator Unit with Stochastic Disturbance," IET Renewable Power Generation, vol. 13, No. 3, pp. 500-509, Feb. 2019.
- [4] Y. Bak, S. S. Jeon, and K.-B. Lee, "Power Conversion System for Hydraulic Turbine Generation to Utilize Unused Differential Pressure Energy," in Proc. the KSFM Journal of Fluid Machinery, pp. 1-2, 2019.
- [5] R. Shahnazi, H. M. Shanechi, and N. Pariz, "Position Control of Induction and DC Servomotors: A Novel Adaptive Fuzzy PI Sliding Mode Control," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp. 138-147, Mar. 2008.
- [6] V. I. Utkin "Sliding Mode Control Design Principles and Application to Electric Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, Feb. 1993.
- [7] H.-W. Kim and J.-Y. Choi, "SPMSM Mechanical Parameter Estimation Using Sliding-Mode Observer and Adaptive Filter," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 24, no. 1, pp. 33-39, Feb. 2019.
- [8] A. Saghafinia, H. W. Ping, M. N. Uddin, and K. S. Gaeid, "Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control Into Chattering-Free IM Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 692-701, Jan./Feb. 2015.
- [9] D.-K. Choi and K.-B. Lee, "Variable Step-Size MPPT Control based on Fuzzy Logic for a Small Wind Power System," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 17, no. 3, pp. 205-212, Jun. 2012.
- [10] H.-S. Ro, K.-G. Lee, J.-S. Lee, H.-G. Jeong, and K.-B. Lee, "Torque Ripple Minimization Scheme Using Torque Sharing Function Based Fuzzy Logic Control for a Switched Reluctance Motor," Journal of Electrical Engineering &

Technology, vol. 10, no. 1, pp. 118-127, Jan. 2015.

- [11] J.-S. Lee, K.-B. Lee, and F. Blaabjerg, "Open-Switch Fault Detection Method of a Back-to-Back Converter Using NPC Topology for Wind Turbine Systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, pp. 325-335, Jan./Feb. 2015.
- [12] H.-J. Kim, H.-J. Kim, D.-Y. Kim, and J.-M. Kim, "DC Voltage Balancing Control of Half-Bridge PWM Inverter for Liniear Compressor of Refrigerator," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 22, no. 3, pp. 256-262, Jun. 2017.
- [13] A. Tcai, H.-U. Shin, and K.-B. Lee, "DC-Link Capacitor-Current Ripple Reduction in DPWM-Based Back-to-Back Converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 3, pp. 1987 - 1907, Mar. 2018.
- [14] K.-B. Lee, Advanced Power Electronics, 1st Edition, Seoul: Munundang, 2019.
- [15] B.-S. Lee, J.-S. Lee, and K.-B. Lee, "Performance Improvement of a Grid-Connected Inverter System using a Sliding-Mode Based Direct Power Control with a Variable Gain," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 17, no. 1, pp. 57-66, Feb. 2012.
- [16] J.-H. Kim, G.-S. Kim, and K.-B. Lee, "A Sensorless MPPT Control Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Logic for PV Battery Chargers," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 18, no. 4, pp. 349 -358, Aug. 2013.
- [17] Y. J. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Control Method for Phase-Shift Full-Bridge Center-Tapped Converters Using a Hybrid Fuzzy Sliding Mode Controller," Electronics, vol. 8, no. 6, pp. 705, Jun. 2019.
- [18] A. Rubaai, A. R. Ofoli, L. Burge, and M. Garuba, "Hardware Implementation of an Adaptive Network-Based Fuzzy Controller for DC-DC Converters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 6, pp. 1557-1565, Nov./Dec. 2005.

저자소개



조대현 (Dae-Hyun Cho)

He received the B.S. degree in Electrical and Computer Engineering in 2019 from Ajou University, Suwon, South Korea, where he is currently working toward the M.S. degree in Electrical and Computer Engineering from Aiou University, Suwon, South Korea. His research interests include electric machine drives and power electronics, and control systems.



박영수 (Yeongsu Bak)

He received the B.S. and M.S., and Ph.D. degrees in Electrical and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, South Korea, in 2014, 2016, and 2019, respectively. He is currently working as a Research Associate in Research Institute for Information and Electronics Technology, Ajou University, Suwon, South Korea. His current research interests include grid-connected systems, electric machine drives, and matrix converters. E-mail : wov2@ajou,ac,kr



이교범 (Kyo-Beum Lee)

He received B.S. and M.S. degrees in Electrical and Electronic Engineering from Ajou University, Suwon, Korea, in 1997 and 1999, respectively. He received Ph.D. degree in Electrical Engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 2003. From 2003 to 2006, he was affiliated with the Institute of Energy Technology, Aalborg University, in Aalborg, Denmark. From 2006 to 2007, he was affiliated with the Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Korea. In 2007, he joined the School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, Korea. He is an Associate Editor of the IEEE Transactions on Power Electronics, Journal of Power Electronics, and Journal of Electrical Engineering & Technology. His current research interests include electric machine drives, renewable power generation, and electric vehicle applications. E-mail : kyl@ajou.ac.kr