

DFIG 기반의 가변속 양수발전 시스템 모델링

유진건, 안현성, 차한주
충남대학교 전기공학과

Modeling of DFIG based Variable-Speed Pumped Storage Hydro

Zhenqian Liu, Hyunsung An, Hanju Cha
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 DFIG기반의 가변속 양수발전소의 조속기, 터빈-수압관(penstock), 발전기/컨버터 및 시스템 제어를 모델링하였으며, 발전기/컨버터 모델은 하나의 전류원과 임피던스로 등가화 되었다. 최적 운전 조건을 위한 터빈의 속도와 게이트 위치 지령치는 시스템 제어를 통해서 얻을 수 있으며, 계통 전력의 지령치를 통해서 발전기/컨버터 모델의 전류 지령치를 만들며, 터빈 회전속도와 게이트 위치는 DFIG의 속도와 지령 속도의 비교를 통해 출력된다. 시뮬레이션 모델링을 통해 전력의 지령치 변화에 따라 계통의 전력과 터빈의 응답성을 확인하였다.

1. 서론

전 세계적으로 화석연료 고갈 및 환경문제가 대두되면서 풍력, 수력 그리고 연료전지와 같은 신재생에너지 관심이 증가되고 있다. 신재생에너지원 중 태양광과 풍력발전은 가장 큰 비중을 차지하며, 자연환경 요인의 영향을 많이 받는다. 대규모 태양광 및 풍력발전 설비의 급격한 출력변동은 전력계통에 악영향을 미칠 수 있으며, 양수발전기는 이 설비들의 큰 출력변동을 완화시키기 위한 가장 유용한 자원이다. 풍력 발전기 등 신재생 에너지가 계통에 대규모로 투입되면 불규칙적인 출력변동에 따라 계통의 주파수 문제를 발생시킨다. 기존의 양수발전 시스템은 동기기로 쓰는데 정속도 운전을 하는 특성에 의해 계통의 주파수 변화에 빠르게 대응하기 할 수 없기 때문에 주파수 변화에 빠른 응답 특성을 가지고 있는 DFIG(Doubly Fed Induction Generator)를 통한 가변속 양수발전 시스템이 필요하다. 이러한 양수발전 시스템의 제어 기법 및 시스템을 개발하기 위해서는 발전소에 적용하기 전 성능 검증을 위한 시뮬레이션 모델링이 필요하므로 양수발전 시스템의 분석 및 모델링이 필수적이다.

본 논문은 DFIG 기반의 가변속 양수발전 시스템의 조속기, 터빈-수압관(penstock), 발전기/컨버터 및 시스템 제어를 분석하고 모델링하였다.

2. 양수발전 시스템

첨두부하용으로 사용되는 양수발전소는 상부저수지, 하부저

수지 및 발전 시스템 등으로 구성되어 야간이나 전력이 풍부할 때 펌프를 통해 하부저수지의 물을 상부 저수지로 퍼올려 전력이 필요할 때 방수하여 발전한다. 부하에서 전력이 많이 필요할 경우 물을 상부저수지에서 방수하고 터빈을 가동하여 운동 에너지를 전기 에너지로 변환한다. 이때 DFIG는 발전 모드로 동작하여 계통에 전력을 공급하게 된다. 반대로 부하가 적을 때 하부 저수지의 저장된 물을 양수하여 상부저수지로 끌어올리므로 DFIG는 전동기로써 동작한다. 그림 1은 양수발전소의 기본 구조이다.

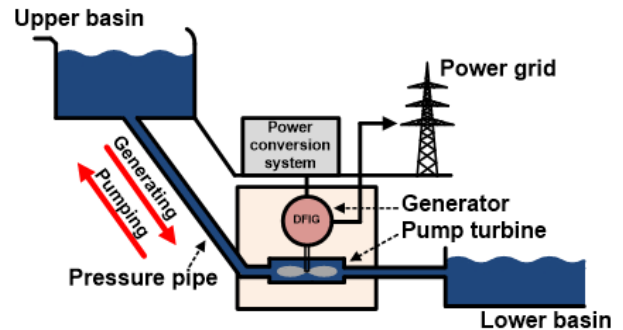


그림 1 양수발전소 구성
Fig. 1 Pumped storage power plant structure

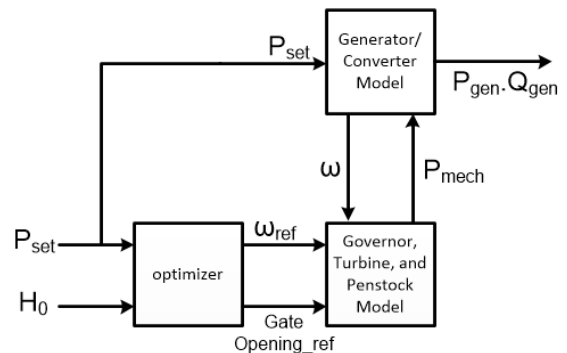


그림 2 양수발전 시스템 제어구조
Fig. 2 Pumping system control structure

그림 2에서 보여주는 것을 양수발전 시스템 제어구조이다. 양수발전 시스템이 터빈-수압관(penstock), 발전기/컨버터 및 optimizer 3 가지 모델을 나눌 수 있으며 P_{set}는 optimizer에 입력하고 터빈 지령 속도와 게이트 지령 위치를 얻을 수 있다.

터빈 지령 속도와 DFIG 회전자 속도의 차이를 통해서 게이트 위치를 제어할 수 있다. 게이트 위치는 터빈 모델에 입력하고 기계적 전력(P_m)과 기계적 토크(T_m)를 얻을 수 있다. P_{set} 는 발전기/컨버터 모델에 입력하고 계통 전력(P_g) 및 전기적 토크(T_g)를 얻을 수 있으며 기계적 토크하고 전기 토크의 차이를 통해서 회전자의 회전속도를 얻을 수 있다. 회전자의 실제 속도는 다시 피드백을 하여 터빈 지령 속도와 비교한다.

2.1 터빈 모델

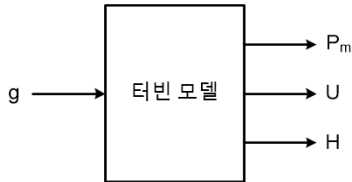


그림 3 터빈 모델 블록도
Fig. 3 Block of turbine model

그림 3에서 보여주는 것은 터빈 모델의 블록도이다. 입력이 게이트의 실제 위치(Real gate opening) g 이고 출력은 기계적 출력 P_m 이다. 수압관(penstock)안에 있는 물이 흐르는 속도 U 이며, 상부 저수지 물의 압력(Head)은 H 다. 식(1), 식(2), 식(3)에 의해 그림 4와 같이 터빈 모델링을 얻을 수 있다.

$$H = \left(\frac{U}{G}\right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{U}{H - H_0} = \frac{-1}{T_W s} \quad (2)$$

$$P_m = (U - U_{NL})H \quad (3)$$

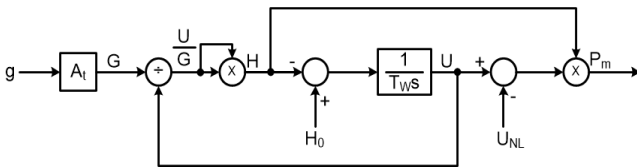


그림 4 터빈 모델
Fig. 4 Model of turbine

A_t 는 터빈의 이득이고 G 는 게이트의 이상적인 위치(Ideal gate opening)이다. H_0 는 H 의 초기값이다. T_W 는 수압관 안에 있는 물이 속도 0에서 속도 U 까지 가속하는 시간이고 U_{NL} 는 무부하 상태에서 수압관 안에 있는 물이 흐르는 속도이다. P_m 은 터빈 시스템의 기계적 출력이다. 여기서 물 흐름의 저항을 무시하고 수압관의 흐르는 물은 압축되지 않으므로 가정하였다.

2.2 조속기 모델

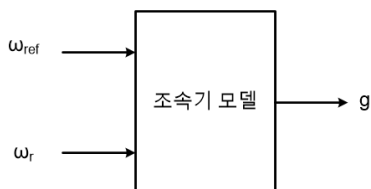


그림 5 조속기 모델 블록도

Fig. 5 Block of governor model

터빈의 실제 속도와 지령 속도의 오차는 조속기를 통해서 게이트 위치를 제어하여 보상된다. 그림 5에서 보여주는 것은 조속기 모델 간략화된 블록도이며, 조속기의 실제 구조는 그림 6에서 나오는 것과 같다. T_p 는 pilot valve 와 서보 모터의 시정수(time constant)이고 T_G 는 메인 서보 모터의 시정수를 나타낸다.

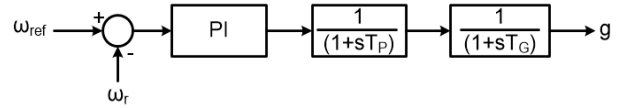


그림 6 조속기 모델 구조
Fig. 6 structure of governor

2.3 발전기/컨버터 모델

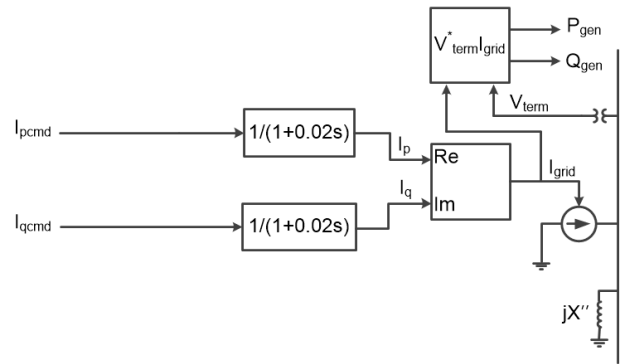


그림 7 발전기/컨버터 모델
Fig. 7 generator/converter model

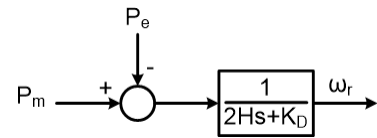


그림 8 Inertial Dynamics
Fig. 8 Inertial Dynamics

그림 7에서 보여주는 것은 DFIG 및 back to back converter의 모델링이다. 발전기/컨버터 모델은 하나의 전류원과 임피던스로 등가화 될 수 있다. 여기서 I_q 는 0로 가정한다. 계통의 전력과 전력의 지령치를 통해서 발전기/컨버터 모델의 전류 지령치를 만든다. 그림 8에서 보여주는 것은 Inertial Dynamics이며, H 는 unit inertia constant이고 K_D 는 damping factor이다.

2.4 속도 및 게이트 optimizer 모델

시스템 최적운전을 위해서 optimizer 모델이 필수적이다. 그림 9에서 보여 주는 것은 속도 optimizer 모델이다. P_{set} 하고 H_0 는 속도 optimizer 모델에 입력하고 지령 속도를 출력한다. P_{set} , H_0 및 속도의 관계는 식 (4)과 같다. 그림 10는 $H_0=1$ 때의 게이트 optimizer를 보여준다. P_{set} 는 게이트 optimizer에 입력하고 지령 게이트 위치를 출력한다. P_{set} 하고 지령 게이트 위치의 관계는 식(5)와 같다.

$$\omega = 1.25P_{set} - 0.25H_0 + 0.15 \quad (4)$$

$$Gate\ Opening = 0.88P_{set} \quad (5)$$

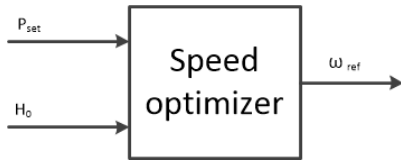


그림 9 속도 optimizer 모델
Fig. 9 model of speed optimizer

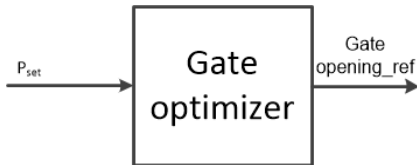


그림 10 게이트 optimizer 모델
Fig. 10 model of gate optimizer

2.5 양수발전 시스템 모델 및 시뮬레이션

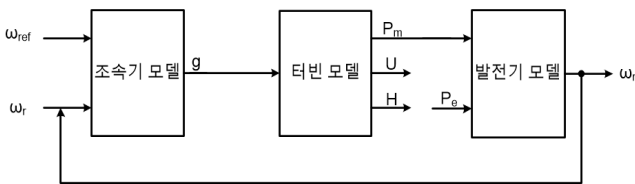


그림 11 양수발전 시스템 블록도
Fig. 11 Block of Pumped Storage Hydro

조속기의 출력(g)과 터빈 모델의 입력이 상호연결 되고 발전기 회전자의 속도(ω_r)가 조속기 입력에 피드백 되면 그림 11과 같이 모델링 되며 그림 12는 시뮬레이션 모델이다. 속도 조절의 특성을 향상시키기 위해서 gate optimizer에서 출력된 지령 게이트 위치는 조속기 PI제어기 출력과 함께 밸브에 인가된다. 양수발전 시스템 모델 확인을 위하여 85초때는 P_{set} 0.7에서 0.8로 증가시키고 130초에 다시 0.8에서 0.7로 감소시킨다. P_{set} 변화에 따라서 속도 및 게이트 위치의 변화를 그림 13에서 보여준다. 그림 14에 P_{set} 에 따라서 계통 전력 P_e 와 터빈 출력 P_m 을 보여준다. 시뮬레이션 결과를 통해서 시스템 모델이 안정적 인 것을 확인 하였다.

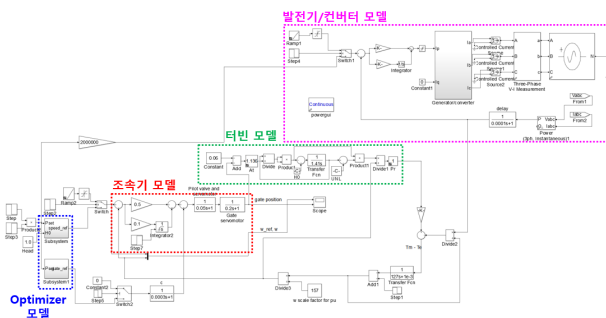


그림 12 양수발전 시스템 시뮬레이션 모델
Fig. 12 Simulation model of Pumped Storage Hydro

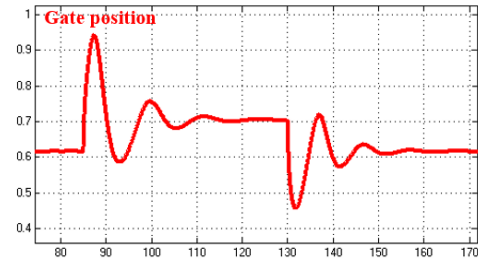
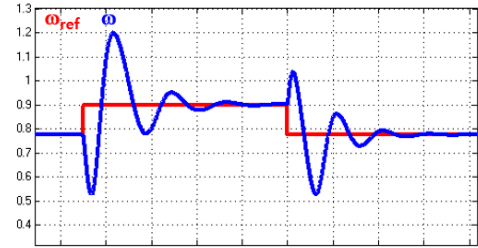


그림 13 속도 및 게이트 위치의 파형
Fig. 13 speed and gate opening curve

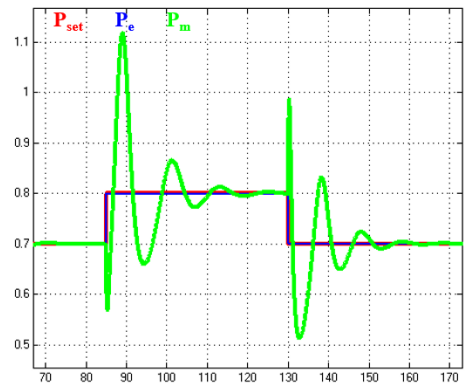


그림 14 계통 전력 및 기계적 전력의 파형
Fig. 14 system power curve

3. 결론

본 논문에서 양수발전 시스템 및 제어 구조를 분석하여 설명하였다. 계통 주파수로 운전하기 위해서 터빈의 속도와 지령치를 비교하여 양수발전용 조속기를 통해 게이트 상태를 계통에서 요구하는 급전을 안정적으로 제어한다. 터빈의 출력 토크와 계통의 전기적 토크의 차이를 통해서 DFIG 회전자의 실제 회전 속도를 얻을 수 있다. 또한, 시뮬레이션 모델링을 통해 전력의 지령치 변화에 따라 계통의 전력과 터빈의 응답성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] PRABHA KUNDUR, "Power System Stability and Control" America:McGraw-Hill, Inc, 1994, 377-418
- [2] "Modeling Adjustable Speed Pumped Storage Hydro Units Employing Doubly-Fed Induction Machines" U.S. Department of Energy
- [3] Dr John Fletcher and Jin Yang, "Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications" InTech, 2010