

가변속 양수발전 시스템 모델링

유진건, 안현성, 송우석, 차한주
충남대학교 전기공학과

Modeling of Variable-Speed Pumped Storage Hydro

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

ABSTRACT

본 논문은 가변속 양수발전 시스템의 모델링 및 양수발전용 전력변환장치 제어 구조를 분석하고 모델링하였다. 기존 양수발전 시스템은 동기 발전기를 사용하였지만 신재생 에너지원의 출력 변동 및 부하 변동에 따른 주파수의 변화에 빠른 대응을 위한 가변속 양수발전 시스템을 채용하여 계통 전력과 전압, 주파수 등을 보상한다. 양수 발전소의 터빈, 게이트, 조속기 등을 분석하여 모델링하였으며, Doubly fed induction generator를 위한 back to back 전력 변환 장치를 발전 및 양수 모드에 사용하기 위해 벡터제어, 속도제어, 유효 무효 전력 제어기 등을 모델링 하였다.

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 출력 변동에 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 DFIG를 통한 가변속 양수발전 시스템의 제어 구조 및 터빈, 조속기 등을 분석하고 back to back구조의 전력변환장치의 제어기법을 모델링하였다.

2. 양수발전 시스템

침투부하용으로 사용되는 양수발전소는 상부저수지, 하부저수지 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.

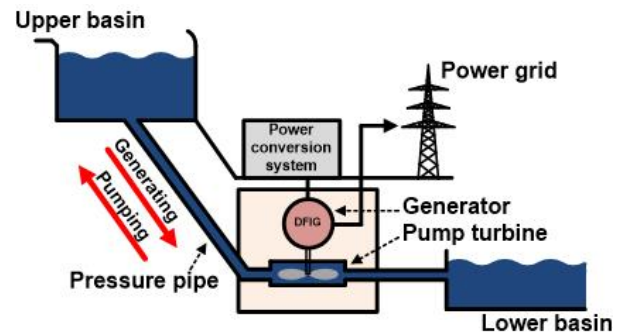


그림 1 양수발전소 구성
Fig. 1 Pumped storage power plant structure

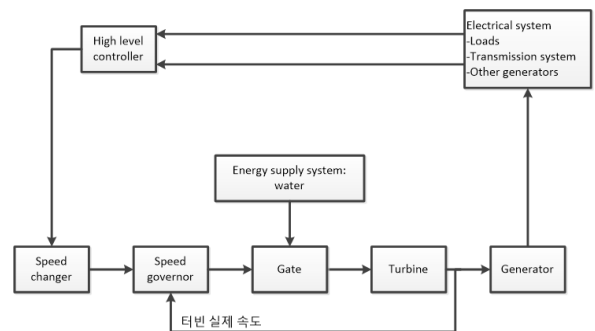


그림 2 양수발전 시스템 제어구조
Fig. 2 Pumping system control structure

양수발전 시스템이 동작할 때 터빈 지령치 속도하고 실제 속도의 오차가 조속기를 통해서 게이트의 위치를 제어한다. 게이트의 상태를 통해서 터빈의 실제 속도를 제어할 수 있다. 터빈의 실제 속도는 다시 조속기 제어 입력에 피드백된다. 터빈은 축을 통해 연결된 발전기를 구동시키며, 계통에 공급하는 유효 무효 전력은 발전기와 연결되는 전력변환 장치를 통해서 제

어된다. 전력 계통의 전압이나 주파수가 변동이 있으면 상위 제어를 통해서 지령 속도를 조속기 제어 입력에 보낸다. 양수발전 시스템의 제어 구조는 그림 2와 같다.

2.1 터빈 모델

그림 3에서 보여주는 것은 터빈의 모델링이며, G는 게이트의 실제 위치이고 U는 수압관(penstock)안에 있는 물이 흐르는 속도이다. H는 터빈에서 상부 저수지의 높이이며, H₀는 H의 초기값이다. T_w는 수압관 안에 있는 물이 속도 0에서 속도U까지 가속하는 시간이고 U_{NL}는 무 부하 상태에서 수압관 안에 있는 물이 흐르는 속도이다. P_m는 터빈 시스템의 기계적인 출력이다. 여기서 물 흐름의 저항을 무시하고 수압관의 흐르는 물은 압축할 수 없다는 것으로 가정하였다. 식(1), 식(2), 식(3)에 의해 터빈 모델링을 얻을 수 있다.

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

$$\frac{U}{H - H_0} = \frac{-1}{T_w s} \tag{2}$$

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

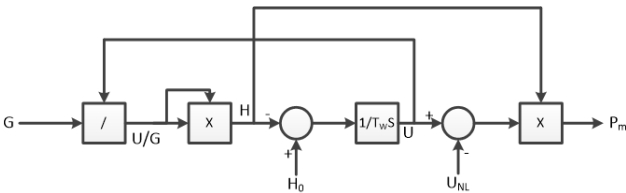


그림 3 터빈 모델
Fig. 3 Model of turbine

2.2 조속기 및 valve 시스템 모델

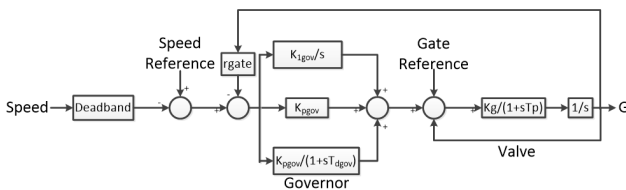


그림 4 발전기 모드의 조속기 및 밸브 모델
Fig. 4 Governor and valve Model for the Generating Mode

발전기 모드 경우에는 앞서 언급하는 것처럼 터빈의 지령속도와 실제속도의 오차가 조속기를 통해서 제어하고 제어출력이 밸브시스템을 통해서 게이트 위치를 제어하며, 조속기 제어기는 PI제어기이다. 밸브 시스템에서 K_g/(1+sT_p)는 파일럿 밸브와 파일럿 서보의 전달함수이고 1/s는 릴레이 밸브와 게이트 서보모터의 전달함수이다. 그림 4에서 보여주는 것은 발전기 모드경우에는 조속기 및 밸브의 모델이다. 발전기 모드와 달리 양수 모드의 경우 조속기 시스템은 효율을 높이기 위해서 게이트가 P(total power command)와 H₀에 의해 결정된 일정하게 열린 상태로 동작해야 한다. 조속기 안에 있는 제어가 필요 없고 지령 게이트 위치하고 실제 게이트 위치의 오차가 바로 밸브시스템을 통해서 게이트 실제 위치를 제어한다. 밸브 시스템은 발전기 모드와 똑같이 모델링 된다. 그림 5에서 보여주는 것은 양수 모드의 밸브 모델이다. 조속기 및 밸브 시스템의 출력이 바로 게이트 위치 즉 터빈 시스템의 입력이다.

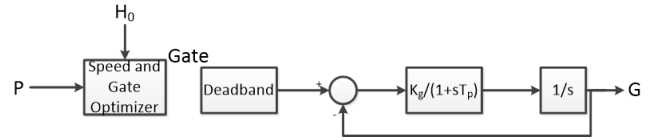


그림 5 양수 모드의 밸브 모델
Fig. 5 Valve Model for the Pump Mode

2.3 양수발전용 전력변환장치

양수발전을 위한 전력변환장치는 그림 6와 같이 back to back 구조를 가지고 있으며, 계통 측 컨버터(GSC)와 회전자 측 컨버터(RSC) 구성된다. GSC는 전압제어와 전류제어를 통해 DC링크의 전압을 일정하게 유지하는 제어를 수행하며, RSC는 벡터제어를 기본으로 하여 양수발전소의 발전/양수 모드 및 양수 터빈의 속도에 따라서 제어기법이 결정된다.

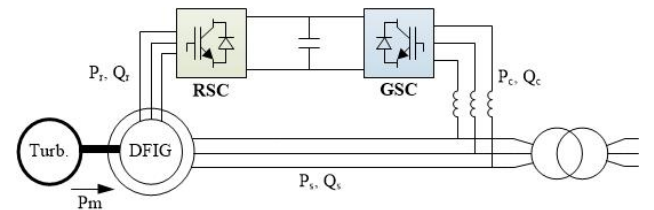


그림 6 전력변환장치 구성
Fig. 6 Structure of the power conversion system

3. 결론

본 논문에서 양수발전 시스템 및 제어 구조를 분석하여 설명하였다. 계통 주파수로 운전하기 위해서 터빈의 속도와 지령치를 비교하여 양수발전용 조속기를 통해 게이트 상태를 제어하여 물의 흐름을 제어한다. 또한, 양수발전소의 발전과 양수를 위해 back to back 전력변환장치의 구조 및 제어기법을 모델링하고 설명하였다. 전력변환장치는 계통 측 컨버터와 DFIG의 회전자 측 컨버터로 구성되어 전압제어 및 속도제어, 유효 무효 전력 제어 등을 수행하여 양수발전 시스템을 안정적으로 운전한다.

참고문헌

- [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