

연료전지 발전시스템용 제어장치의 서지 특성에 관한 연구

이중선*, 김정화*, 박동명*, 최형석*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:wndjts19@koreatech.ac.kr

A Study on the Characteristics of Surge for Control Device in Fuel Cell Generation System

Joong-Seon Lee*, Kyung-Hwa Kim, Dong-Myoung Park,

Hyoung-Seok Choi, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 정부의 탄소중립정책과 제1차 수소경제 이행 기본계획에 따라 환경오염이 적고, 에너지 효율이 높은 수소 연료전지에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 하지만, 실 계통에서 운용 중인 연료전지 발전시스템용 제어장치는 서지에 직접적으로 노출되어, 민감한 연료전지 발전시스템용 제어장치의 소손 및 오동작 등을 유발할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 연료전지 발전시스템용 제어장치의 보호기기 동작에 의한 개폐서지와 뇌격에 의한 서지의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 EBOP부, 연료전지 모듈부, MBOP부, 제어장치부, 뇌격 발생장치부 등으로 구성된 연료전지 발전시스템용 제어장치의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 서지의 운용 특성을 평가한 결과, 보호기기의 동작으로 인해 개폐서지 및 중성선 전류가 발생하여, 인접한 연료전지 발전시스템의 보호기기 오동작과 제어소자에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, 뇌격에 의한 서지는 설비의 절연내력(정격전압의 3배)을 크게 초과하여, 연료전지 발전시스템의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 정부의 탄소중립 정책과 제1차 수소경제 이행 기본계획에 따라, 환경오염원, 소음, 진동이 적고, 에너지 효율이 높은 수소 연료전지에 대한 관심이 증가하고 있다[1, 2]. 특히, 650[°C] 이상에서 운전하는 2.8[MW]급의 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC)가 상용화되어 계통에 연계되어 운용되고 있는 실정이다. 하지만, 실계통에서 운용 중인 연료전지 발전시스템용 제어장치는 안정성을 확보하기 위하여, 민감하고 정밀한 제어소자를 적용하고 있고, 일반적으로 등전위 통합 접지 방식을 채택하고 있어, 순환전류, 고조파, 순시전압강하(sag), 서지, 사고전류 등과 같은 전기적 위해요인에 직접적으로 노출될 가능성이 있다.

따라서, 본 논문에서는 연료전지 발전시스템용 제어장치의 전기적 위해요인 중의 중요한 요인인 서지의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 EBOP부, 연료전지 모듈부, MBOP부, 제어장치부, 뇌격 발생장치부 등으로 구성된 연료전지 발전시스템용 제어장치의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, 서지의 운용특성을 평가한 결과, 보호기기의 동작으로 인해 개폐서지 및 중성선 전류가 발생하여,

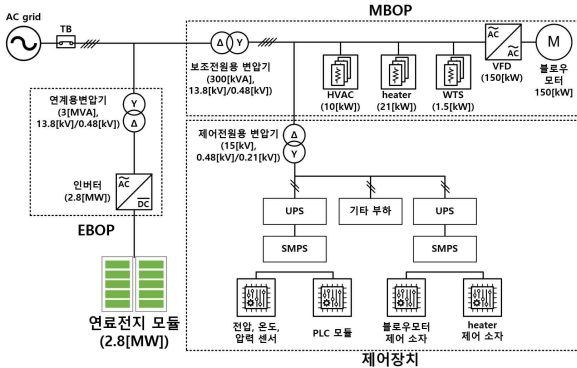
인접한 연료전지 발전시스템의 보호기기 오동작과 제어소자에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, 뇌격에 의한 서지는 설비의 절연내력(정격전압의 3배)을 크게 초과하여, 연료전지 발전시스템의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

2. 연료전지 발전시스템용 제어장치의 구성 및 서지 발생 메커니즘

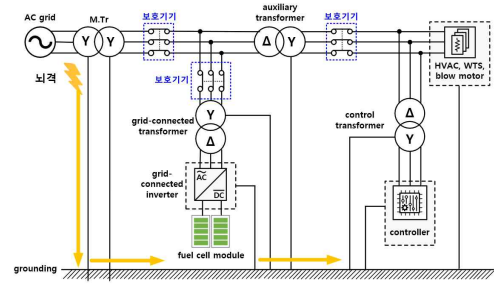
2.1 연료전지 발전시스템의 구성

일반적으로, 연료전지 발전시스템은 그림 1과 같이, 연료전지 모듈, EBOP(electrical balance of plant), MBOP(mechanical balance of plant), 제어장치 등으로 구성된다. 여기서, 연료전지 모듈은 수소, 산소 등의 연료로 전기를 생산하며, EBOP는 연계용 변압기, 계통 연계형 인버터 등을 이용하여, 연료전지 모듈의 출력을 계통 전원에 연계하는 역할을 한다. 또한, MBOP는 HVAC(heating ventilation and air conditioning), WTS(water treatment system), heater, 블로우 모터 등으로 구성된다. 여기서, HVAC는 설비 내부의 온도를 관리하고, WTS는 연료전지 발전에 필요한 물의 품질을 관리하며, 블로우 모터는 연료전지 발전에 요구되는 산소를 공급하는

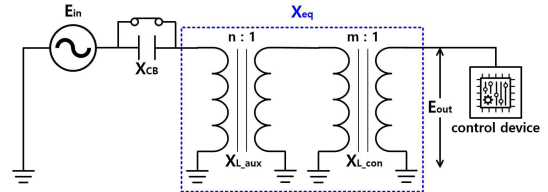
역할을 수행한다. 한편, 연료전지 제어장치는 제어전원용 변압기, UPS, SMPS, 제어소자 등으로 구성된다.



[그림 1] 연료전지 발전시스템의 실 계통 구성



[그림 2] 보호기기 및 뇌격에 의한 서지 발생 메커니즘



[그림 3] 연료전지 발전시스템의 L-C 직·병렬 등가회로

2.2 연료전지 발전시스템용 제어장치의 서지 발생 메커니즘

연료전지 발전시스템용 제어장치의 서지는 보호기기 동작에 의한 개폐서지와 뇌격에 의한 서지로 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 보호기기의 동작에 의한 개폐서지는 보호기기 극간 커패시터에 축적된 정전 에너지와 선로의 인덕터에 저장된 자기 에너지가 순간적으로 방전되어 발생할 수 있다. 또한, 연료전지 발전시스템은 그림 3과 같이, AC 계통과 보호기기의 C 성분, 보조전원용 및 제어전원용 변압기의 L 성분 등으로 구성된 등가 회로로 나타낼 수 있다.

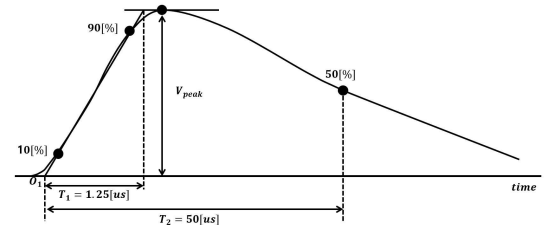
여기서, 연료전지 제어장치의 전압(E_{out})은 식 (1)과 같이, 변압기의 등가 임피던스(X_{eq})와 보호기기의 동작 임피던스(X_{CB})의 전압분배에 의하여 결정된다. 또한, X_{eq} 는 식 (2)와 같이, 보조전원용 변압기와 제어전원용 변압기의 직렬 합으로 나타낼 수 있다. 따라서, 사고 유형과 위치에 따라 보호기기가 동작하는 경우, 개폐서지가 발생하여 제어 및 통신 장치에 소손 및 오동작을 야기할 가능성이 있다.

$$E_{out} = \frac{E_{in}}{n \times m} \times \frac{X_{eq}}{X_{eq} + X_{CB}} \quad (1)$$

$$X_{eq} = X_{L_{aux}} + X_{L_{con}} \quad (2)$$

여기서, E_{out} : 출력전압[V], E_{in} : 입력전압[V], n : 보조전원용 변압기 권수비, m : 제어전원용 변압기 권수비, X_{eq} : 보조전원용 및 제어전원용 변압기의 등가 임피던스[Ω], X_{CB} : 보호기기의 극간 임피던스[Ω], $X_{L_{aux}}$: 보조전원용 변압기의 리액턴스[Ω], $X_{L_{con}}$: 제어전원용 변압기의 리액턴스[Ω]

또한, 뇌격은 피뢰기에 의해 대지(접지)로 방전되어, 공통접지를 통해 변압기 및 전력변환장치의 기생 커패시턴스와 결합하여 서지를 발생시킬 수 있다. 여기서, 뇌서지 전압은 KS C IEC 62305를 바탕으로, 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 파두장(T_1)은 규약 영점(O_1)에서 파고값에 도달하는 시간이며, 파마장(T_2)은 규약 영점(O_1)에서 파고값의 50[%]까지 감소하는 시간으로 정의된다.

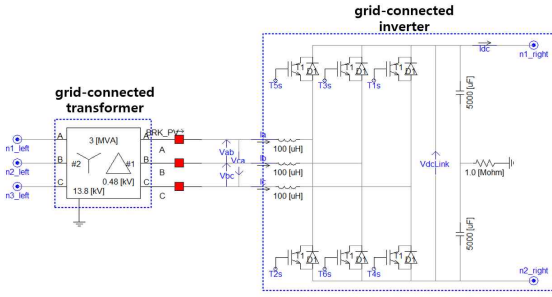


[그림 4] 뇌서지 전압의 표준 파형

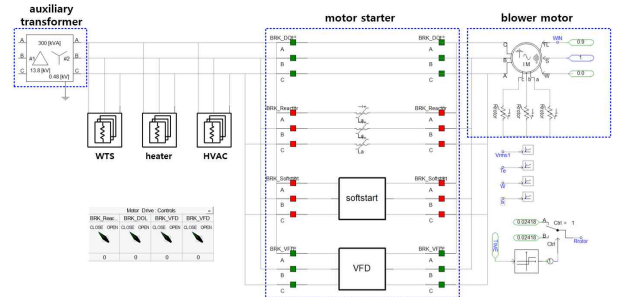
3. PSCAD/EMTDC를 이용한 연료전지 발전시스템의 모델링

3.1 EBOP부

연료전지 발전시스템의 EBOP부는 그림 5와 같이, 연계용 변압기, 계통 연계형 인버터 등으로 구성되는데, 연계용 변압기의 정격용량은 3[MVA], 결선방식은 Yg-Δ, 변압비는 13.8[kV]/0.48[kV]로 적용한다. 또한, 계통 연계형 인버터는 DC 1,290[V]를 3상 AC 480[V]로 변환하고, 2.8[MW]의 정격용량을 가진다.



[그림 5] EBOP부의 모델링



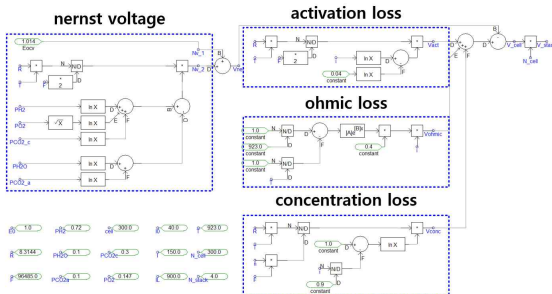
[그림 7] MBOP부의 모델링

3.2 연료전지 모듈부

Nernst 방정식을 바탕으로, 연료전지 스택의 모델링을 수행하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 연료전지 스택의 전압은 식 (3)과 같이, Nernst 전압에서 활성화 손실, 저항 손실, 농도 손실에 의한 전압강하를 뺀 값에 셀의 개수를 곱하여 산정된다. 또한, 연료전지 모듈은 연료전지 스택을 4SIP로 연결하여 구성한다.

$$V_{stack} = n(E_{ner} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{con}) \quad (3)$$

여기서, V_{stack} : 연료전지 스택의 전압[V], n : 셀의 개수, E_{ner} : Nernst 전압[V], η_{act} : 활성화 손실[V], η_{ohm} : 저항 손실[V], η_{con} : 농도 손실[V]



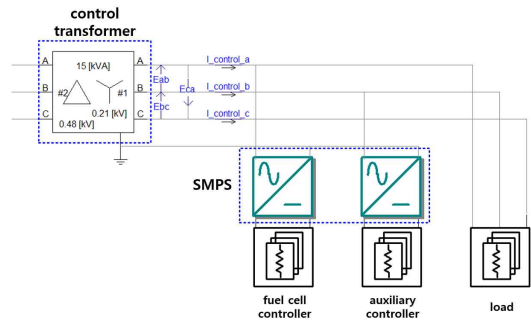
[그림 6] 연료전지 스택의 모델링

3.3 MBOP부

연료전지 시스템의 MBOP부는 그림 7과 같이, 보조전원용 변압기, WTS, heater, HVAC, 모터 기동기, 블로우 모터, 등으로 구성된다. 여기서, 보조전원용 변압기의 정격용량은 300[kVA], 결선방식은 $\Delta-Y_g$, 변압비는 13.8[kV]/0.48[kV]로 적용한다. 또한, WTS, heater, HVAC의 정격용량은 1.5[kW], 21[kW], 10[kW]으로 상정한다. 한편, 모터 기동장치는 직입, 리액터, 소프트 스타트, VFD 인버터 기동방식을 고려하며, 블로우 모터의 정격용량은 150[kW]로 상정한다.

3.4 제어장치부

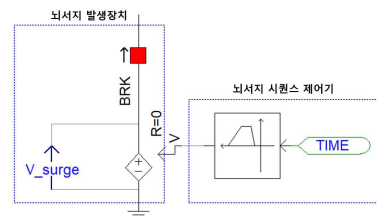
제어장치부는 그림 8과 같이, 제어전원용 변압기, SMPS, 제어소자, 기타부하 등으로 구성된다. 여기서, 제어전원용 변압기의 정격용량은 15[kVA], 결선방식은 $\Delta-Y_g$, 변압비는 480[V]/210[V]으로 적용한다. 또한, SMPS는 AC 120[V]를 DC 24[V]로 변환하며, EBOP 및 MBOP 제어소자의 용량은 1.1[kW], 0.4[kW], 기타부하의 용량은 4.5[kW]로 상정한다.



[그림 8] 제어장치부의 모델링

3.5 뇌격 발생장치부

뇌격 발생장치는 그림 9와 같이 뇌서지 발생장치와 뇌서지 시퀀스 제어기로 구성되며, 뇌서지 발생장치는 시퀀스 제어기의 지령에 따라 최대 50[kV]의 뇌서지를 발생시킨다. 또한, 시퀀스 제어기는 규약 영점으로부터 파고값에 도달하는 파두장과 파고값의 50[%]까지 감소하는데 걸리는 파마장을 시간에 따라 제어한다.



[그림 9] 뇌격 발생장치부

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

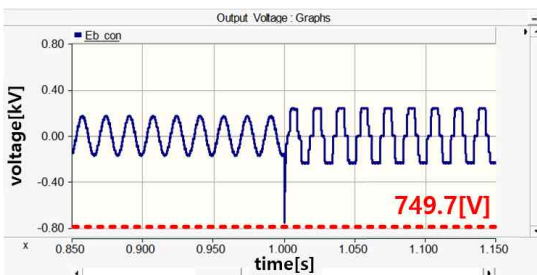
한편, 서지 상정 시나리오인 표 1의 Case 1은 보호기기 동작에 의한 개폐서지 조건을 나타내고, Case 2는 뇌격에 의한 서지 조건을 나타낸다. 여기서, 뇌격은 주변압기 2차 측으로 유입되는 크기를 50[kV]로 상정한다.

[표 1] 서지 상정 시나리오

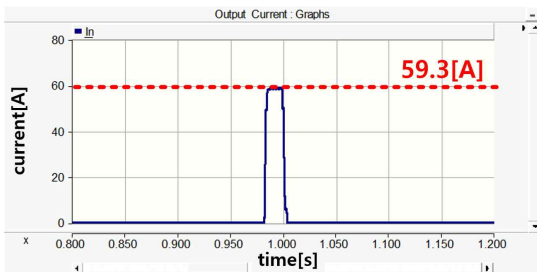
시나리오	내역
Case 1	보호기기(TB)에 의한 서지
Case 2	뇌격에 의한 서지

4.2 연료전지 발전시스템용 제어장치의 서지 특성

상기의 표 1에서 제시한 서지 상정 시나리오를 바탕으로, 보호기기 동작에 의한 개폐서지(Case 1)의 운용 특성을 나타내면 Fig. 19와 같다. 여기서, 그림 10 (a)는 보호기기 동작에 의한 개폐서지 특성, (b)는 중성선 전류 특성을 나타낸다. 즉, 보호기기가 동작하는 경우, 749.7[V]의 개폐서지가 발생하고, 3상의 차단기가 동시에 동작하지 않아, 59.3[A]의 중성선 전류가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 보호기기의 동작으로 개폐서지 및 중성선 전류가 발생하여, 인접한 연료전지 발전시스템의 보호기기 오동작과 제어소자에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) 개폐서지 운용 특성

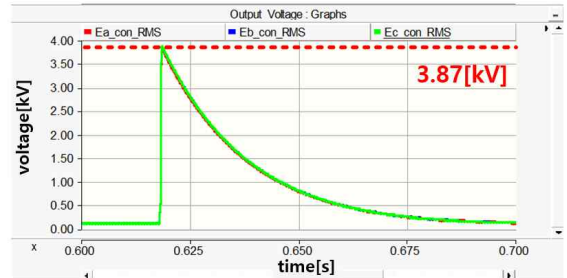


(b) 중성선 전류 운용 특성

[그림 10] 보호기기 동작에 의한 Case 1의 개폐서지 운용 특성

한편, 50[kV]의 뇌격이 연료전지 발전시스템으로 유입되는 시나리오인 Case 2의 특성을 나타내면 그림 11과 같다. 여기서, 제어전원용 변압기 2차측의 전압은 3.87[kV]로 산정되어, 설비의

절연내력(정격전압의 3배)을 크게 초과함을 알 수 있다. 따라서, 뇌격에 의한 서지는 연료전지 발전시스템의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.



[그림 11] 뇌격에 의한 Case 2의 뇌 서지 특성

5. 결 론

본 논문에서는 연료전지 발전시스템용 제어장치의 서지 발생 메커니즘을 제시하고, EBOP부, 연료전지 모듈부, MBOP부, 제어장치부, 뇌격 발생장치부 등으로 구성된 연료전지 발전시스템의 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로, 서지의 운용특성을 평가한 결과, 보호기기의 동작으로 개폐서지 및 중성선 전류가 발생하여, 인접한 연료전지 발전시스템의 보호기기 오동작과 제어소자에 악영향을 미칠 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한, 뇌격에 의한 서지는 설비의 절연내력(정격전압의 3배)을 크게 초과하여, 연료전지 발전시스템의 안전성에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원과 2026년도 정부(산업통상부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00409639, 2026년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

- [1] 김기영, 오용택, 김병기, 강민관, 노대석, “대용량 연료전지발전시스템의 계통외란방지알고리즘에 관한 연구”, 한국과학기술학회논문지, vol. 16, No. 8, pp. 5550-5558, 2015
- [2] 이민행, 김운호, 김세진, 장형안, 노대석, “LVDC 배전망에 있어서 전기적 위태요인의 발생 메커니즘 및 운용특성에 관한 연구”, 대한전기학회논문지, vol. 74, No. 7, pp. 1174-1186, 2025