

## 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파의 운용특성에 관한 연구

이중선\*, 이승호\*, 유현상\*, 이명근\*, 노대석\*

\*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail: wndjts19@koreatech.ac.kr

### A Study on the Operation Characteristics of Unbalanced Current and Harmonics in Large Scale Fuel Cell Generation System

Joong-Seon Lee\*, Seung-Ho Lee\*, Hyun-Sang You\*,  
Myung-Geun Lee\*, Dae-Seok Rho\*

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

#### 요약

최근, 탄소중립정책과 제 1차 수소경제 이행 기본계획에 따라 환경오염원, 소음이 적고, 에너지 효율이 높은 수소 연료전지에 대한 관심이 급증하고 있으며, 2~3[MW]급의 연료전지 수십대로 구성된 대용량 연료전지 발전시스템(FCGS, Fuel Cell Generation System)이 상용화되어 계통에 연계되고 있다. 그러나, 대용량 FCGS는 정상 운전 및 과도상태에서 발생하는 계통 외란으로 인하여, 보호기기 오동작 및 제어소자 소손 등이 발생할 수 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 대용량 FCGS의 계통 외란 중의 중요한 요인인 불평형 전류 및 고조파의 운용특성에 대해서 평가하기 위하여, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 FCGS부, 제어전원 공급장치부, 불평형 발생장치부 등으로 구성된 대용량 연료전지 발전시스템의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파의 운용특성에 대해 평가한 결과, 불평형 전류는 제어전원용 변압기, 보조전원용 변압기, 접지 등에 유입되어, 연료전지 제어 시스템에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 고조파는 블로우 모터의 속도가 증가함에 따라, 종합 고조파가 증가하여 제어 및 통신 기기에 심각한 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

### 1. 서 론

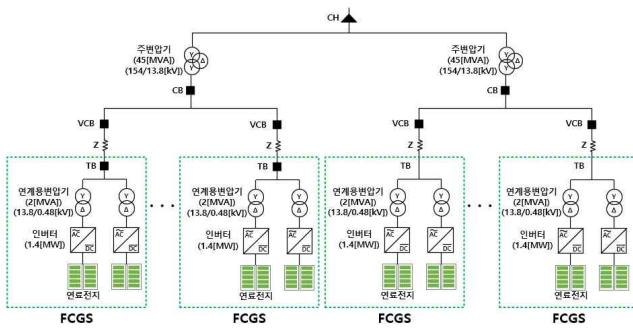
최근, 탄소중립정책과 제 1차 수소경제 이행 기본계획에 따라, 환경오염원, 소음, 진동이 적고, 에너지 효율이 높은 수소 연료전지에 대한 관심이 급증하고 있다. 특히, 2.8[MW]급의 용융탄산 염연료전지가 상용화되어 계통에 연계되고 있으며, 연료전지는 600[°C] 이상에서 운전하기 때문에, 민감하고 정밀한 제어 소자들을 사용한다[1]. 또한, 대용량 연료전지 발전시스템(FCGS, Fuel Cell Generation System)은 2~3[MW]급 FCGS 수십 대가 연계되어 발전단지를 구성한다. 이로 인해, FCGS의 정상 운전 및 과도상태에서 발생하는 계통 외란으로 인하여, 보호기기 오동작 및 제어소자 소손 등이 발생할 수 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 대용량 FCGS의 계통 외란으로 중의 중요한 요인인 불평형 전류 및 고조파의 운용특성에 대해서 평가한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 FCGS부, 제어전원 공급장치부, 불평형 발생장치부 등으로 구성된 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파의 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로, 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파의 운용특성에 대해 평가한 결과, 불평

형 부하에 의해 불평형 전류는 6,604[mA]가 발생하여, 제어전원 용 변압기, 접지, 보조전원용 변압기에 각각 6,406[mA], 91[mA], 85[mA]로 전류가 유입되어 연료전지 제어 시스템에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 고조파는 블로우 모터의 속도에 따라 종합 고조파가 약 1.2배 상승하여, 제어 및 통신 기기에 심각한 악영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

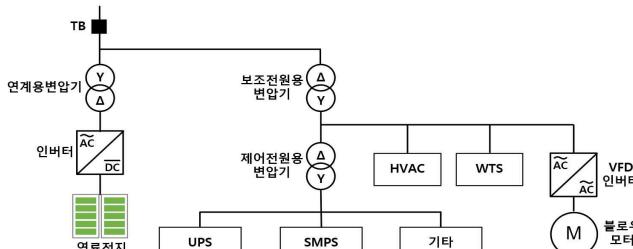
### 2. 대용량 연료전지 발전시스템의 구성

일반적으로, FCGS는 연료전지 스택, EBOP(Electrical Balance of Plant), MBOP(Mechanical Balance of Plant) 등으로 구성되며, 연료전지 스택은 수소, 산소 등의 연료를 사용하여 전기를 생산한다. 또한, EBOP는 연료전지 스택 출력을 계통 전원에 연계하기 위한 시스템이며, MBOP는 연료전지 스택에 연료 공급 및 온도조절 등을 유지해주는 역할을 한다. 이를 바탕으로, 대용량 연료전지 시스템은 그림 1과 같이, 2.8[MW]급의 FCGS 여러 대를 모선에 연결하여 구성되며, 각 FCGS는 사고 시 서비스를 계통으로부터 분리하기 위하여 주변압기와 연계되는 지점에 TB(Tie Breaker)를 설치한다[1].



[그림 1] 대용량 FCGS의 구성도

한편, 연료전지 발전을 위한 제어전원 공급장치는 그림 2와 같이, 보조전원용 변압기, 제어전원용 변압기, UPS, VFD(Variation Frequency Driver) 인버터, 블로우 모터 등으로 구성된다. 여기서, VFD 인버터는 블로우 모터의 입력 전압 및 입력 주파수를 제어하여 블로우 모터의 속도를 제어한다. 또한, 제어전원용 2차측에 UPS, SMPS 등이 연계되어 연료전지 발전에 필요한 제어전원을 공급한다.

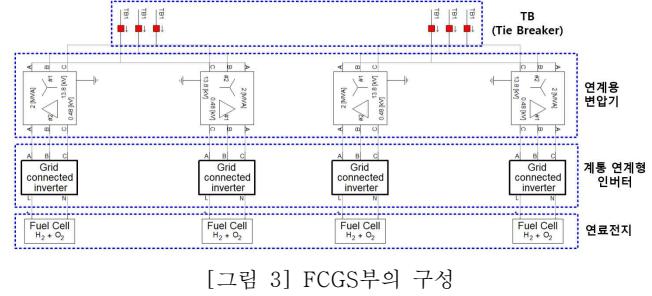


[그림 2] 대용량 FCGS의 제어전원 공급장치 구성도

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 FCGS의 모델링

#### 3.1 FCGS부

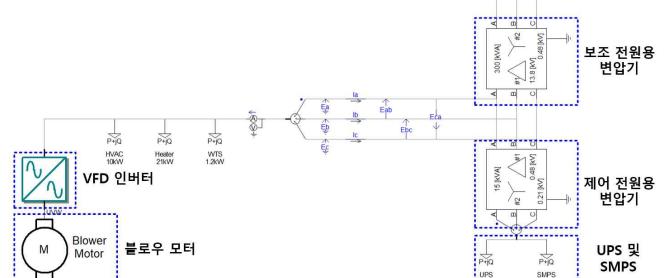
FCGS부는 그림 3과 같이, 연계용 변압기, 인버터, 연료전지, TB 등으로 구성된다. 여기서, 연계용 변압기는 2[MVA]의 정격 용량을 가지며, 13.8[kV]/0.48[kV]의 변압비를 적용한다. 또한, 인버터는 1.4[MW]의 정격용량을 가지며, DC 645[V]를 AC 480[V]로 변환한다. 한편, 연료전지는 다수의 연료전지 셀을 직·병렬로 조합하여 연료전지 스택을 구성하며, 연료전지 스택의 정격전압은 645[V], 정격전류는 2,520[A]이다.



[그림 3] FCGS부의 구성

#### 3.2 FCGS 제어전원 공급장치부

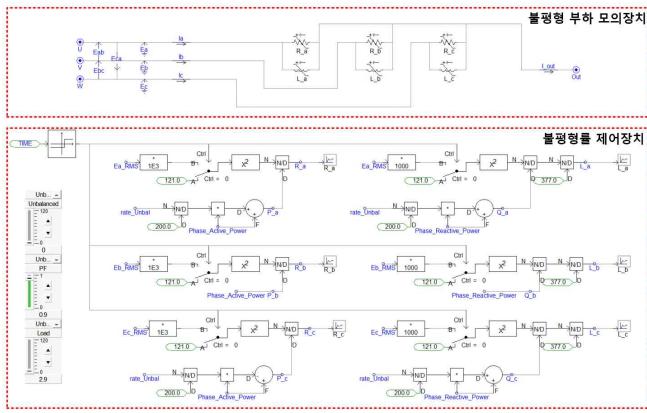
한편, FCGS 제어전원 공급장치부는 그림 4와 같이, 보조전원용 변압기, 제어전원용 변압기, UPS, VFD 인버터, 블로우모터, 등으로 구성된다. 여기서, 보조 전원용 변압기의 정격용량은 300[kVA], 변압비는 13.8[kV]/0.48[kV]이며, 제어 전원용 변압기의 정격용량은 15[kVA], 변압비는 0.48[kV]/0.21[kV]이다. 또한, UPS는 제어전원의 전력을 안정적으로 공급하며, VFD 인버터는 블로우 모터의 입력 주파수와 전압을 제어하여 회전속도와 토크를 조절한다. 한편, 블로우 모터는 연료전지 발전에 필요한 산소를 공급하는 역할을 하며, 정격용량은 150[kW], 정격전압은 480[V], 정격주파수는 60[Hz]이다.



[그림 4] FCGS 제어전원 공급장치부의 구성

#### 3.3 불평형 발생장치부

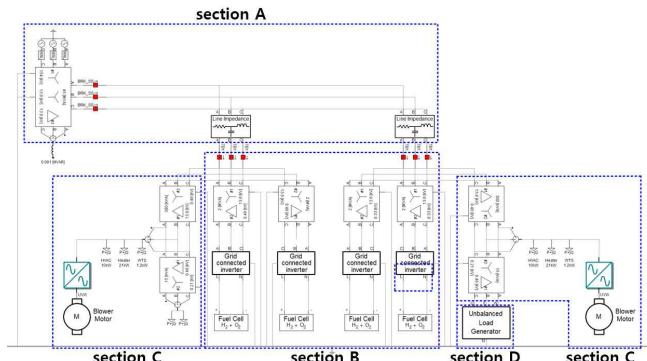
불평형 발생장치부는 그림 5와 같이, 불평형 부하 모의장치와 불평형률을 제어장치로 구성된다. 여기서, 불평형률을 제어장치는 부하의 크기 및 역률, 불평형률을 바탕으로 불평형 부하 모의장치의 가변 임피던스 값을 제어하여 불평형 부하전류를 발생시킨다[2].



[그림 5] 불평형 발생장치부 모델링

### 3.4 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로, 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파의 운용특성을 평가하기 위한 전체 시스템을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, section A는 수배전반부, section B는 FCGS부, section C는 FCGS 제어전원 공급장치부, section D는 불평형 발생장치부를 나타낸다.



[그림 6] 전체 시스템

## 4. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

### 4.1 시뮬레이션 및 시험 조건

상기에서 제시한 내용을 바탕으로, 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파의 운용특성을 평가하기 위한 상정 시나리오는 표 1, 표 2와 같다. 여기서, 표 1은 제어 전원용 변압기 2차측의 부하 불평형률에 의한 불평형 부하전류 상정 시나리오를 나타내며, 표 2는 블로우 모터의 속도에 따른 고조파 상정 시나리오를 나타낸다. 또한, 불평형 전류 및 고조파는 제어전원용 변압기 2차측에서 측정한다.

[표 1] 불평형 전류 시나리오

시나리오	제어 전원[kW]	불평형률 [%]
case I	3	25
case II	3	50
case III	3	75
case IV	3	100

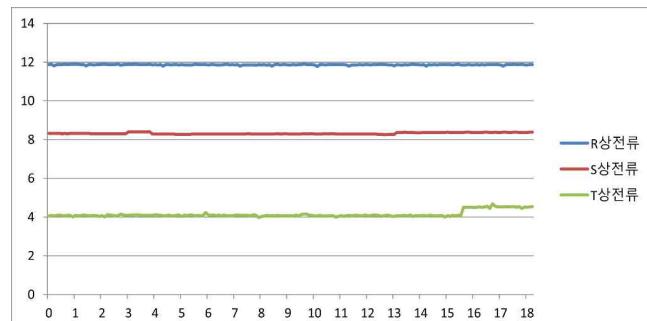
[표 2] 고조파 시나리오

시나리오	블로우 모터의 속도[Hz]
Case V	0
Case VI	15
Case VII	30
Case VIII	45
Case IX	54

### 4.2 설계통의 불평형 전류 및 고조파 운용특성

#### 4.2.1 불평형 전류 운용특성

상기에서 제시한 불평형 전류 상정 시나리오를 바탕으로, 부하 불평형률이 가장 큰 시나리오인 case IV를 나타내면 그림 7과 같다. 즉, 불평형 부하에 의해 제어 전원용 변압기 2차측의 상전류가 R, S, T상에서 각각 12[A], 8[A], 4[A]로 발생하여, 중성선에 큰 전류가 흐름을 알 수 있다.



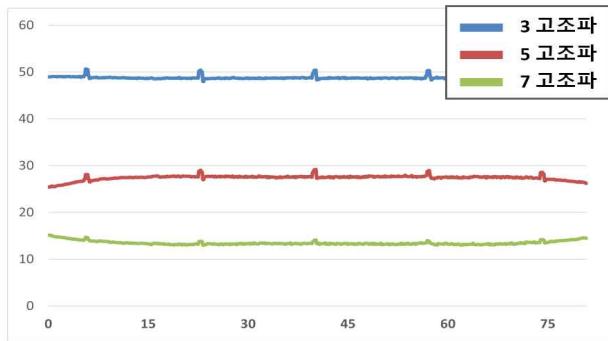
[그림 7] 불평형률이 100[%]인 경우

#### 4.2.2 고조파 운용특성

상기에서 제시한 고조파 상정 시나리오를 바탕으로, 블로우 모터의 속도에 따른 고조파의 운용특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 블로우 모터의 속도가 0[Hz]에서 54[Hz]로 상승한 case V와 case IX를 비교하면, 종합 고조파가 약 1.2배 상승함을 알 수 있다. 또한, 블로우 모터의 54[Hz]인 case IX를 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 3고조파, 5고조파, 7고조파는 각각 48.6[%], 27.5[%], 13.3[%]로 발생하여, 고조파 전류 제한기준인 3[%]를 크게 초과함을 알 수 있다. 따라서, 블로우 모터의 속도에 의한 고조파는 제어 및 통신 기기에 심각한 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 블로우 모터의 속도에 따른 고조파 운용특성

시나리오	종합 고조파 [%]	3 고조파 [%]	5 고조파 [%]	7 고조파 [%]
Case V	61.99	52.82	23.16	14.46
Case VI	61.79	52.17	22.33	14.14
Case VII	61.32	49.38	21.62	16.54
Case VIII	70.47	49.09	22.88	16.22
Case IX	74.51	48.62	27.52	13.31



[그림 8] 블로우 모터가 54[Hz]인 경우

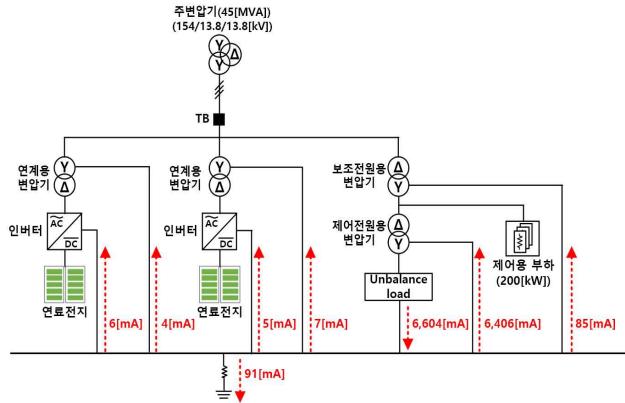
### 4.3 모델링에 의한 불평형 전류 및 고조파 운용특성

#### 4.3.1 불평형 전류 운용특성

상기에서 제시한 불평형 전류 상정 시나리오를 바탕으로, 불평형 전류의 운용특성을 나타내면 표 4와 같다. 여기서, case I과 case IV를 비교하면, 불평형 전류가 약 3.9배 상승함을 알 수 있다. 또한, 부하 불평형률이 가장 큰 시나리오인 case IV의 불평형 전류 흐름도를 나타내면 그림 9와 같다. 즉, 불평형 전류가 6,604[mA]로 발생하여, 제어전원용 변압기, 접지, 보조전원용 변압기에 각각 6,406[mA], 91[mA], 85[mA]로 전류가 유입됨을 알 수 있다. 따라서, 불평형 전류는 FCGS 제어전원 공급장치에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 4] 불평형 전류의 운용특성

시나리오	불평형 전류 [mA]	제어전원용 변압기 [mA]	보조전원용 변압기 [mA]
case I	1,698	1,624	21
case II	3,390	3,244	43
case III	5,076	4,856	64
case IV	6,604	6,406	85



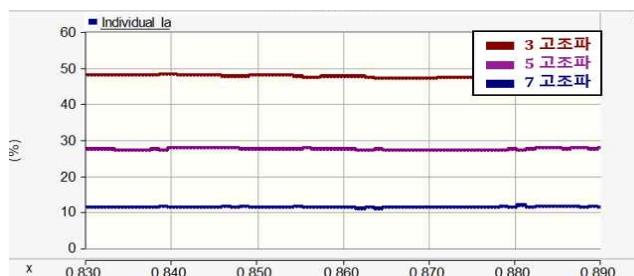
[그림 9] case IV의 불평형 전류 흐름도

#### 4.3.2 고조파 운용특성

상기에서 제시한 고조파 상정 시나리오를 바탕으로, 블로우 모터에 따른 고조파의 운용특성을 나타내면 표 5와 같다. 여기서, 블로우 모터의 속도가 0[Hz]에서 54[Hz]로 상승한 case V와 case IX를 비교하면, 종합 고조파가 약 1.2배 상승함을 알 수 있다. 한편, 블로우 모터의 속도가 가장 빠른 시나리오인 case IX를 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 3고조파, 5고조파, 7고조파는 각각 48.3%, 27.5%, 13.3%로 발생하여, 고조파 전류 제한기준인 3%를 크게 초과함을 알 수 있다. 따라서, 블로우 모터의 속도는 제어 및 통신 기기에 심각한 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 5] 블로우 모터의 속도에 따른 고조파 운용특성

시나리오	종합 고조파 [%]	3 고조파 [%]	5 고조파 [%]	7 고조파 [%]
Case V	61.19	52.27	22.18	13.10
Case VI	61.64	51.78	22.05	14.1
Case VII	60.97	48.6	21.74	15.93
Case VIII	69.37	48.71	22.24	15.92
Case IX	73.87	48.34	27.71	13.54



[그림 10] 블로우 모터의 속도에 따른 고조파 운용특성

## 5. 결 론

본 논문에서는 실계통에서 발생하고 있는 불평형 전류와 고조파를 분석하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 FCGS부, 제어전원 공급장치부, 불평형 발생치부 등으로 구성된 대용량 연료전지 발전시스템의 불평형 전류 및 고조파 모델링을 제시한다. 상기에서 제시한 바탕으로 불평형 전류의 운용특성을 평가한 결과, 불평형 전류는 6,604[mA]로 발생하여, 제어전원용 변압기, 접지, 보조전원용 변압기에 각각 6,406[mA], 91[mA], 85[mA]로 전류가 유입되어 연료전지 제어 시스템에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 고조파의 운용특성을 평가한 결과, 블로우 모터의 속도에 따라 종합 고조파가 약 1.2배 상승하여, 제어 및 통신 기기에 심각한 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

### 감사의 글

이 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2024-004 09639, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

### 참고문헌

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