

내부고장을 고려한 고온형 연료전지 대규모 발전단지의 병렬운전 변압기 적정뱅크수에 관한 연구

(A Study on the Proper Number of Banks of Parallel Operation of Transformer
in Large-scale Power Plants Using the High Temperature Fuel Cell
Considering the Internal Failure)

정영환* · 채희석 · 성인제 · 김재철**

(Young-Whan Chong · Hui-Seok Chai · In-Je Sung · Jae-Chul Kim)

Abstract

High temperature fuel cell system, such as molten carbonate fuel cells(MCFC) and solid oxide fuel cells(SOFC), are capable of operating at MW rated power output. The power output change of high temperature fuel cell imposes the thermal and mechanical stresses on the fuel cell stack. To minimize the thermal-mechanical stresses on the stack and increase the systems reliability, we should divide the power plant configuration to several banks. However, the improvement of reliability in fuel cell power plant system causes an increase of the investment cost, for example, replacement costs, labor costs, and so on. For this reason - the balance between investment and reliability improvement - many studies about the appropriate level of investment have been conducted.

In this paper, we evaluate the cost for operation and installation, the benefit for electric energy and thermal energy sales, and the system reliability for several cases : these cases relate with the bank configuration.

Key Words : High Temperature Fuel Cell, Molten Carbonate Fuel Cell Plant

1. 서 론

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학과 교수
* Main author : Ph.D candidate student with Dept.
of Electrical Eng., Soongsil Univ
** Corresponding author : Professor, Dept. of
Electrical Eng., Soongsil Univ
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2013년 11월 7일
1차심사 : 2013년 11월 12일, 2차심사 : 2013년 12월 26일
심사완료 : 2014년 1월 22일

화석연료의 고갈에 대한 경고 및 기후변화에 대응하
고, 지구 온난화를 막기 위해 신재생에너지의 보급 및
개발이 많은 관심을 받고 있다. 또한 신재생 에너지
공급 의무화제도(Renewable Portfolio Standard,
RPS)가 2012년부터 국내 발전사업자들을 대상으로
시행됨에 따라 국내 발전사업자들은 2022년까지 점진
적으로 발전량의 일정부분 이상을 신재생 에너지 전

력으로 공급해야만 한다[1].

발전사업자들에게 여러 가지 신재생 에너지들이 대안으로 제시가 되었고, 많은 연구와 관심이 집중되었으나, 태양광 발전의 경우 대용량 발전이 힘들고 지리적 제약이 크다는 단점이 있고, 풍력발전은 지리적인 제약이 너무 크게 작용한다는 점에서 합리적인 대안으로 선택되지 못하고 있다. 따라서 태양광 발전과 풍력 발전만을 이용해서 화석연료를 이용한 발전량을 대체한다는 것은 큰 무리가 따르고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 여러 가지 유형으로 개발된 연료전지는 그 용량에 따른 다양한 용도, 태양광이나 풍력발전에 비해 무난한 입지조건, 타 신재생 에너지에 비해 높은 단위 면적 당 출력 전력 및 에너지 밀도 등의 이유로 합리적인 해결책으로 제시되고 있다.

이러한 이유로 현재 국내에는 PAFC(Phosphoric Acid Fuel Cell, 인산형 연료전지) 및 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell, 용융 탄산염 연료전지)를 이용한 발전단지가 다수 운영 중에 있으며, 최근에는 삼척에 8.4MW급 연료전지 발전단지와 경기도 화성에 세계 최대 수준인 60MW급 연료전지 발전단지가 건설 중에 있다.

그러나 이러한 대규모 연료전지 발전단지는 발전설비가 차지하는 면적에 비해 생산되는 전력이 다른 신재생 에너지원들에 비해 월등히 높기 때문에 발전단지 내부에서 고장이 발생했을 경우, 큰 고장전류가 발생한다. 또한 발전설비들을 구성하는 케이블의 길이가 매우 짧아 보호설비가 있음에도 불구하고 같은 변압기에 연결된 인접 스택에게로 고장이 과급되고 스택의 수명에 영향을 미친다. 연료전지의 수명 보장과 연료전지 발전단지 신뢰성 향상에 있어 बैं크 및 모션분리는 합리적인 대안으로 제시되고 있다[2].

따라서 본 논문에서는 MCFC를 이용한 발전단지의 구성에 따른 신뢰성을 검토하고, 이에 따른 경제성을 평가하여 합리적인 बैं크 구성을 제안하고자 한다.

2. 연료전지의 특성

MCFC의 수명목표는 일반적으로 약 40,000시간으로 보고 있으며 판매사에서는 다른 구성기기에 비해

스택본체를 약 5년마다 교환하여 지속적으로 운전할 것을 권장한다.

MCFC의 시간경과에 따른 출력전압의 변화를 아래의 그림 1에 나타내었다[3].

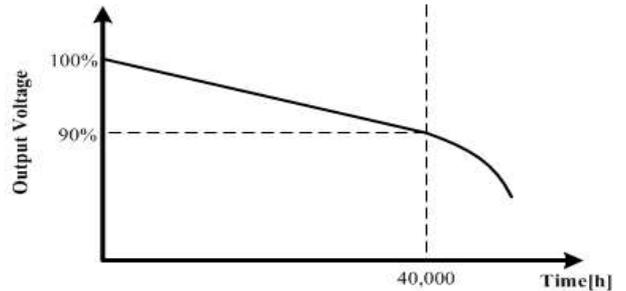


그림 1. MCFC의 시간경과에 따른 출력전압의 변화
Fig. 1. Change in MCFC output voltage over time

따라서 5년 주기로 MCFC의 스택이 교체 될 경우, MCFC의 출력특성은 아래의 그림 2와 같다.

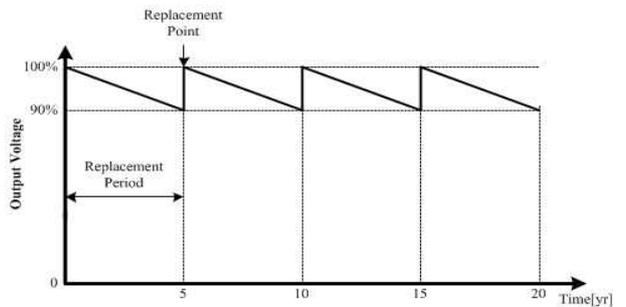


그림 2. MCFC의 수명
Fig. 2. Life cycle of MCFC

3. 대규모 연료전지 발전단지의 구성

일반적으로 대규모 연료전지 발전단지는 아래의 그림 2에 나타낸 것과 같이 1~3MW급 연료전지 발전모듈을 모션으로 결합하여 계통연계용 변압기를 통해 연계하는 구성으로 이루어진다.

이때 발전단지의 용량에 따라 20MW급 이하는 한국 전력공사의 분산전원 연계규정에 의해 22.9kV급 배전계통에 연계할 수 있고, 그 이상은 154kV급 계통에 연계된다.

따라서 본 논문에서는 현재 많은 나라에 시판되어

상용되고 있는 미국 FuelCell Energy(FCE)사의 2.8MW급 MCFC 연료전지 DFC3000 모델을 이용하여 60MW급 대용량 발전단지의 구성하였다.

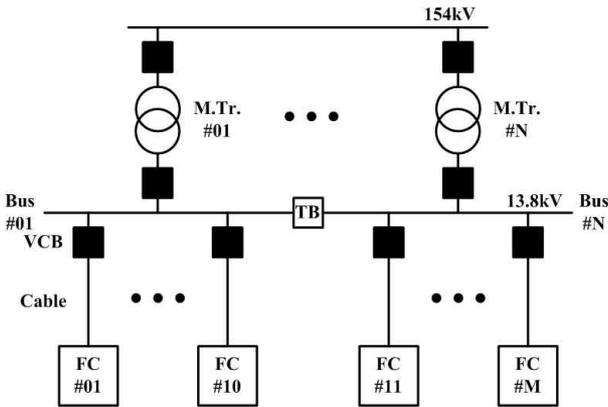


그림 3. 대용량 연료전지 발전단지 기본 구성
Fig. 3. Basic Structure of Large Fuel Cell Plant

제안하는 발전단지에서는 신뢰성 확보를 위해 배크를 분할할 경우, 모선과 분할이 동시에 이뤄진다고 가정하였다. 또한 발전단지 구성에 이용된 DFC3000에 대한 사양은 아래의 표 1에 나타내었다[4].

표 1. FCE사 DFC3000의 사양
Table 1. Specification of DFC3000

전력 출력 항목	
정격 출력	2,800kW
정격 출력 전압	13,800V
정격 주파수	60Hz
효율	47± 2%
연료 소비 항목	
천연가스(정격운전시)	362scfm(= 615.4Nm ³ /hr)
크기	
L × W × H	21.06 × 16.06 × 7.80m

3.1 신뢰도 데이터

본 장에서는 대규모 연료전지 발전단지의 신뢰도 평가에 필요한 데이터들을 나타내었다. 계통 구성을 위한 내부 케이블(15kV 이하)의 길이는 표 1에 언급한

크기에 유지보수 등에 필요한 공간적 여유를 적용하여, 평균 120m를 적용하였다. 또한 신뢰도 분석을 위한 고장률 및 복구시간에 관한 데이터는 아래의 표 2에 나타내었다. 여기서, 연료전지의 고장데이터를 수집하여 모듈의 고장률을 직접적으로 산출한 연구는 아직까지 존재하지 않으나 IEEE Std 493-2007에서 제공하는 여러 가지 발전원의 유형 중 분산형 발전기의 고장률 및 고장 복구 사용시간이 가장 유사할 것이라 가정하여 분산형 발전기의 신뢰도 데이터를 적용하였다[5].

표 2. 신뢰도 데이터
Table 2. Reliability Data

항목	고장률	고장복구 시간
케이블(15kV 이상)	0.047146f/km · yr	31.6hr
케이블(15kV 이하)	0.020243f/km · yr	95.5hr
연료전지 모듈	0.1691f/yr	32.7hr
메인 변압기	0.0062f/yr	356.1hr

IEEE에서 제공하는 발전원의 고장률데이터는 250~750kW급과 750kW~7MW급이 제공되고 있으며 본 연구에서는 연료전지의 용량을 고려하여 750kW~7MW급의 데이터를 적용하였다.

연료전지 발전단지의 경우, 내부 선로의 길이가 굉장히 짧기 때문에 내부 고장이 발생했을 경우, 같은 모선에 연결된 모든 연료전지가 일시적으로 차단되었다가, 고장 발생 연료전지를 계통에서 제거하고 다시 투입되는 형태로 보호협조설비가 구성되어있다. 따라서 변압기를 제외한 내부고장 발생 시 절체에 소요되는 시간을 1분으로 가정하였으며, 계통연계용 메인 변압기의 경우에는 5분의 절체시간을 적용하였다.

3.2 경제성 분석 데이터

경제성 평가 요소에 있어 편익은 연료전지 발전단지를 운영함에 따라 발생하는 전력판매 이익과 열판매 이익이라는 사실은 자명하다. 비용요소에 대해서는 여러 가지가 존재할 수 있다. 연료전지 주요 기기에 관한 요소, 시공 및 설치에 필요한 요소, 대지사용비

용, 연료비, 보험료 등이 존재하지만, 본 연구에서는 발전단지 건설 확정에 따른 대지의 변동 즉 대지사용 비용은 일정하고, 기타 보험료나 금융관련 비용은 일정하다고 가정하여, 뱅크 구성이 달라짐에 따라 변동될 수 있는 변압기 및 보호기기의 비용, 내부고장에 따라 발생하는 연료소모량 변화 등에 중점을 두고 비용요소를 연료전지 주기기 및 설치비용, 뱅크구성 변화에 따른 변압기 및 보호기기 설치비용 및 유지보수비용, 연료비 등으로 비용요소를 제한하였다. 경제성 분석을 위한 여러 가지 고려사항은 아래의 표 3에 나타내었다.

표 3. 경제성 분석 데이터
Table 3. Data for Economic Evaluation

항목	적용값
평균 표준 열량	43.34J/Nm ³
도시가스 단가	20.0101won/MJ
계통 한계 가격	126.63won/kWh
신재생에너지 가중치	2.0

표 3에서 평균 표준 열량은 한국도시가스협회에서 공시하는 “경기도 도시가스 공급규정”에서 최저 열량과 최고열량의 평균값을 취했다[6]. 또한 도시가스 단가는 2013년 2월 22일부터 시행되고 있는 경기지역의 도시가스 단가를 적용하였다. 계통 한계 가격은 전력통계정보시스템에서 제공하는 2011~2012년 사이의 평균값을 적용하였다[7].

MCFC의 가격은 MW당 약 300만 US\$로 형성되어 있고 이는 한화로 약 30억 원 정도가 된다. 유지보수에 필요한 비용은 연료전지 가격의 약 25%가 매년 소요되는 것으로 보고 있다. 또한 설치비용은 MW당 약 2.4억 원이 사용된다[8].

표 4. MCFC 비용 데이터
Table 4. Cost Data for MCFC

항목	적용값
설비비용	30억원/MW
유지보수비용	7.5억원/MW
설치비용	2.4억원/MW

또한 본 논문에서 가정한 변압기 및 보호설비에 대한 가격은 아래의 표 5에 정리하였다[9].

마지막으로 발전단지 고장에 따른 연료전지 스택이 받는 피해를 아래 6과 같이 정리하였다. 이때 연료전지의 성능은 앞서 언급한바와 같이 운전 시간에 따라 선형적으로 저하되기 때문에 trip에 의한 연료전지 스택의 피해는 수명 내 허용 횟수만큼 성능 저하를 가속시킨다고 가정하였다.

표 5. 변압기 및 차단기 비용 데이터
Table 5. Cost Data for Tr. & CB

항목	적용값
변압기	
60/75 MW	7억원
30/45 MW	4억원
20/30 MW	3.5억원
15/20 MW	3억원
차단기	
GCB (154kV/40kA)	1.64억원

표 6. MCFC 비용 데이터
Table 6. Cost Data for MCFC

trip의 종류	목표수명 내 허용횟수	스택 피해비용
장시간 trip	3회/5년	1.25억원/회
단시간 trip	40회/5년	9,375천원/회

4. 결과분석

본 논문에서는 MCFC를 이용한 발전단지의 뱅크 구성에 따른 신뢰성을 검토하고, 이에 따른 경제성을 평가하여 합리적인 뱅크 구성을 제안하고자 한다. 뱅크 수 변화에 따른 연료전지 발전단지의 신뢰도 변화를 아래의 그림 4에 나타내었다. 연료전지 발전단지의 신뢰도 평가과정은 참고문헌 [10]의 과정을 적용하였다.

그림 4에서 볼 수 있듯이, 뱅크 수가 증가함에 따라 신뢰도가 향상된다는 사실을 확인 할 수 있다. 이는 1년 동안 경험하는 고장시간 및 고장 빈도가 감소한다는 것을 의미한다. 그러나 뱅크 수가 점차 증가함에 따라 신뢰도 지수의 개선 효과는 점차 감소하고 있음을

확인 할 수 있다. 뱅크 수가 증가함에 따라 변압기의 필요 기기수 및 보호 설비들이 증가하게 되는데 이는 무조건적인 신뢰도 증가의 추구는 뱅크 수에 따른 설비비용이나 노무비 등 비용적인 요소를 고려하여 수용가에게는 신뢰도 높은 전력은 공급할 수는 있지만 운영자 측면에서는 비용이 증가하여 운영이 어려워짐을 의미한다. 따라서 신뢰도와 경제성 사이에서 적절한 수준의 뱅크 구성이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

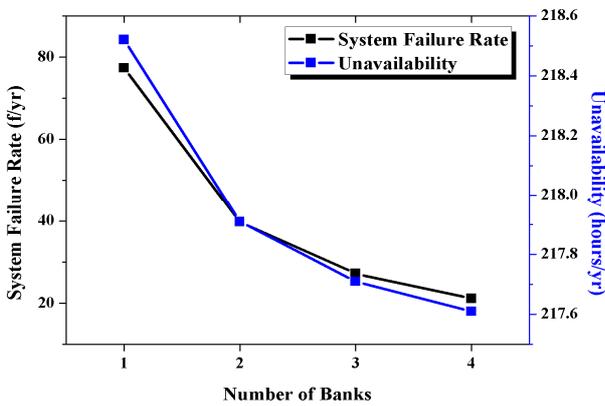


그림 4. 뱅크수 변화에 따른 신뢰도 지수의 변화추이
Fig. 4. Results of the changes of reliability index with changing bank configuration

따라서 각 상황에 따른 비용의 변화를 아래의 표 7에 나타내었다. 경제성 평가의 대상 기간은 연료전지 발전단지의 목표수명인 20년을 기준으로 진행하였고, 현가로 환산하여 비교하였다.

표 7. 뱅크수 변화에 따른 경제성 분석
Table 7. Economic evaluation with changing of bank configuration

	1 뱅크	2 뱅크	3 뱅크	4 뱅크
①	220.5000			
②	10.2800	18.9280	34.3750	55.1890
③	183.5680			
④	1,369.7742	1,369.8733	1,369.9055	1,369.9202
⑤	17.4261	12.8411	11.3096	10.5728
⑥	1,792.2963	1,788.6752	1,788.7205	1,790.0799
⑦	1,654.5705	1,654.6902	1,654,7291	1,654.7489
⑧	553.9211			
⑨	2,208.4916	2,208.6113	2,208.6501	2,208.6680

- ① 연료전지 설치비용(모듈, 시공비, 노무비 포함) [억원]
- ② 메인 변압기 및 보호기기 설치 비용 [억원]
- ③ 운영/유지보수 비용 [억원]
- ④ 연료비 [억원]
- ⑤ 트립으로 인한 연료전지 스택 수명 저감 비용 [억원]
- ⑥ 총비용(=①+②+③+④+⑤) [억원]
- ⑦ 전기에너지 판매 수익 [억원]
- ⑧ 열에너지 판매 수익 [억원]
- ⑨ 총 수익(=⑦+⑧) [억원]

또한 이를 토대로 편익-비용 분석(Benefit-Cost Ratio, B/C Ratio) 결과를 비교한 결과를 아래의 그림 5에 나타내었다. 단 여기서 편익-비용에 관한 분석식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$B/C Ratio = \frac{Benefit_{total}}{Cost_{total}} \quad (1)$$

이때 프로젝트의 경제성 판단 여부는 B/C Ratio의 값이 1보다 큰 경우에 있다고 판단할 수 있다.

그림 5에서 볼 수 있듯이, 연료전지 발전단지는 열에너지와 전기에너지를 모두 팔아 최대의 이익을 추구 할 경우에 경제성이 있는 것으로 분석이 되었다. 또한 이때의 뱅크 구성은 2 뱅크에서 가장 큰 경제적 가치가 있는 것으로 분석되었다.

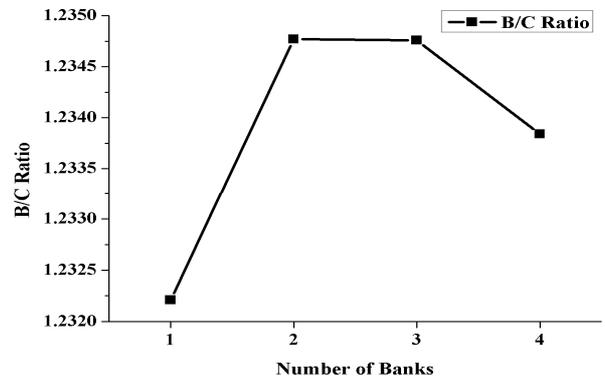


그림 5. 뱅크수 변화에 따른 B/C ratio의 변화추이
Fig. 5. Results of the changes of B/C ratio with changing of bank configuration

따라서 현재 경제사정을 고려한 대용량 연료전지 발전단지 적정수준의 बैं크 구성은 2 बैं크라고 할 수 있다.

5. 결 론

현재 국내에서 건설 중에 있는 대용량 연료전지 발전단지는 전 세계적으로 그 유래가 없다는 점에서 그 의미가 굉장히 크다. 또한 선례가 없는 상황에서 발전단지 구성에 여러 가지 시험적 의미가 많기 때문에 과투자/부족투자가 발생할 우려가 있다.

본 논문에서는 앞서 언급된 발전단지 구성의 문제를 보다 합리적이고 체계적으로 분석하였다. 이를 통해 बैं크 구성에 따른 신뢰도 수준을 정량적으로 표현하였고, 결과적으로 대규모 연료전지 발전단지에 대한 적정수준의 बैं크 구성을 도출하였다. 그 결과 현 상황에서 2 बैं크가 적정한 수준이라 판단된다.

References

[1] Ministry of Knowledge Economy, "Renewable Portfolio Standard Management and Operational Guidelines", 2013. 03.
 [2] Y. H. Chong, H. S. Chai, J. C. Kim, S. M. Cho, "A Study on the Operation Condition by Electrical Fault in the High Temperature Fuel Cell Plant", Transactions of the Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 27, No. 8, 2013. 08.
 [3] C. S. Nam, "Hydrogen Fuelcell Handbook", Sungandang, 2011.
 [4] FuelCell Energy, Inc. "DFC3000 Specifications"
 [5] IEEE Std 493-2007. "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", 2007.
 [6] Korea City Gas Association, "City Gas Supply Regulation - Gyeonggi-do", 2012.
 [7] Electric Power Statistics Information System, <http://www.kpx.or.kr/epsis/>.

[8] M. W. Ellis, M. R. Von Spakovsky, D. J. Nelson, "Fuel Cell Systems : Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century", Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 12, 2001.
 [9] J. Y. Hwang, J. H. Park, Y. J. Won, K. W. Ahn, J. H. Kim, "Study on Supporting Replacement Cost to the Insufficient Breaking Capacity Breaker for 154kV Customer", KIEE conference, 2008. 11.
 [10] R. Billinton et al., "Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd Edition", Plenum Press, New York, 1984.

◇ 저자소개 ◇



정영환(鄭泳煥)

1956년 9월 11일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 한양대대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 숭실대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한국수력원자력 중앙연구원 플랜트건설기술연구소 처장.



채희석(蔡熙石)

1984년 10월 06일생, 2011년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학과 석박 통합과정.



성인제(成仁濟)

1987년 1월 18일생, 2013년 2월 안양대 공대 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학과 석사과정.



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.