

# 양자 교환막형 연료전지의 등가 임피던스 모델을 이용한 인버터에 의한 맥동 전류의 영향에 관한 연구

(A Study on the Effects of Inverter Ripple Currents to the Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack by Using an Equivalent Impedance Model)

최우진\*

(Woo-Jin Choi)

## 요 약

본 논문에서는 인버터에서 발생하는 맥동전류가 양자 교환막형 연료전지에 미치는 영향을 임피던스 모델을 통하여 분석한다. 제안된 방법은 주파수 응답 분석법을 이용하여 연료전지 스택의 등가 임피던스를 유도하고, 유도된 모델을 이용하여 맥동전류의 영향을 분석한다. 모델을 통해 계산된 결과는 상용 연료전지 스택을 사용한 실험을 통하여 증명된다. 실험결과는 인버터에 의해 발생한 맥동전류로 인해 최대 10[%]까지 연료전지 스택의 출력이 감소할 수 있음을 보인다.

## Abstract

In this paper the effects of inverter ripple currents to the Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack (PEMFCs) is analyzed by the impedance model. The proposed method employs the frequency analysis technique to derive an equivalent impedance model of the fuel cell stack and the effects of the inverter ripple current are investigated. The calculated results are then verified by means of experiments on commercially available PEMFCs. The experimental results show that the ripple current can contribute up to 10[%] reduction in the available output power.

Key Words : Fuel cell, Modeling, Ripple current, Frequency Response Analysis, Equivalent Impedance

## 1. 서 론

연료전지는 화학적 에너지를 전기와 열에너지로 변

환하는 전기 화학적 발전 기기로서 가까운 장래에 다양한 응용분야에서 기존의 전력원들을 대체하게 될 것으로 기대되고 있다. 또한 연료전지는 휴대용 전자 기기를 구동하는 소형 전원에서부터 대형 발전플랜트에 이르기까지 다양한 분야에서 요구하는 조건을 만족시킬 수 있도록 구성이 가능하므로 유용하다.

연료전지 시스템은 연료전지 스택 외에 연료 변환 장치(Fuel Processor)와 공기, 물, 열에너지를 관리

\* 주저자 : 숭실대학교 강사  
Tel : 02-814-7965, Fax : 02-817-7961  
E-mail : cwj777@hanmail.net  
접수일자 : 2004년 10월 4일  
1차심사 : 2004년 10월 6일  
심사완료 : 2004년 11월 2일

하고 전력을 변환하는 주변장치(BOP : Balance of plant)로 이루어져 있다. 전체 시스템은 용량의 다양화가 가능하고 고효율이며, 환경 친화적이어서 기존 발전시스템에 대해 상당한 경쟁력을 가질 것으로 예상된다. 이미 노트북 컴퓨터나 휴대폰과 같은 휴대용 전자기기에 장착하여 시험한 결과가 발표되고 있으며 운송용 차량과 주거용 및 상업용 건물에 전력을 공급하는 것과 분산전원용 발전시스템에 이용하기 위하여 전 세계적으로 많은 시험 시스템들이 가동되고 있다. 특히 휴대용 기기들에 대한 응용은 현재 배터리의 짧은 동작시간으로 인한 불편을 크게 해소 시켜줄 것으로 기대되고 있으며, 운송 시스템에서 기존의 화석연료를 이용하는 내연기관을 대체할 경우 에너지의 효율적인 이용을 도모함과 동시에 배기가스가 없는 청정 기관의 이용으로 인해 대기 오염을 크게 줄일 수 있게 된다.

이러한 기대 아래 연료전지에 관한 많은 연구가 수행되고 있으며, 특히 연료전지를 모델링하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되어왔다[1-4]. 그러나 대부분의 제안된 모델링 방법들은 연료전지 자체만을 모델링 하였고, 전력 변환기는 단순한 전류원으로 대체해서 해석하였기 때문에 연료전지가 인버터와 같은 전력 변환기와 결속하였을 때 생기는 현상을 알기가 어렵다. 또한 지금까지 제안된 모델링 기법들은 설계자가 아니면 알기 어렵고 또, 기술의 속성상 공개하지 않는 연료전지의 설계 정수 (Design Parameters)들을 요구하며, 복잡한 화학 방정식을 이용하기 때문에 일반적으로 이러한 방식의 모델들은 광범위하게 사용되기 어렵다.

연료전지는 직류 전력을 발생시키기 때문에 상용 교류전원 (AC 120/240[V], 60[Hz])으로 이용하기 위해서는 전력 변환기(PCU : Power Conditioning Unit)의 사용이 필수적이다. 전형적인 PCU는 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터로 구성된다(그림 1). 이들 전력 변환기를 설계하는데 있어서 중요한 변수는 연료전지의 전압 변동률과 연료전지가 허용할 수 있는 맥동 전류의 크기이다. 전압 변동률은 무부하에서 전부하까지 연료전지의 출력전압의 변화를 말하며, 맥동 전류는 60[Hz] 단상시스템의 경우 연료전지가 직류성분과 더불어 공급해야하는 인버

터 주파수의 2배수 주파수인 120[Hz] 성분을 말한다. 이러한 맥동 전류가 연료전지의 성능에 미치는 영향에 대한 평가는 현재 완전히 이루어져 있지 않다. 따라서 일련의 시험들을 통해 연료 전지의 전기적 성능들(전압 변동률, PCU의 정격, 과도상태 응답특성과 맥동전류의 영향 등)을 평가할 수 있는 등가 임피던스 모델을 제시하는 것은 매우 유용한 일이 된다. 본 논문에서는 주파수 응답 분석법을 통해 유도된 연료전지의 등가 임피던스를 이용하여 연료전지의 전기적 성능을 평가하고, 맥동전류의 영향을 모델에 이용하여 분석하고, 그 결과를 실험 결과와 비교함으로써 모델의 타당성을 검증한다.

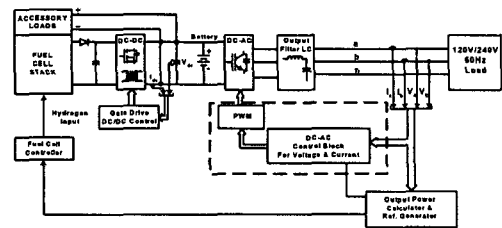


그림 1. 연료전지 발전시스템의 블록선도  
Fig. 1. Block diagram of a fuel cell power generation unit

## 2. 주파수 분석법을 이용한 연료전지 시스템의 모델링

그림 2는 연료전지의 모델링을 위한 실험장치이다. 실험장치는 양자 교환막형 연료전지 스택 (PEMFCs), 프로그래밍이 가능한 전자부하(PEL : Programmable Electronic Load), 주파수 응답 분석기(FRA : Frequency Response Analyzer), 전압/전류 프로브, 주파수 분석 소프트웨어를 탑재한 PC로 구성되어 있다. 장치를 이용하여 다음에 설명되는 직류시험과 교류시험이 수행되었다.

### 2.1 직류시험 및 직류 등가회로

직류시험은 연료전지 스택에 수소를 공급하여 연료전지를 동작시키고 PEL을 조작하여 무부하에서 전부하까지 변화시키며 연료전지의 출력전류에 대한 출력전압 값을 기록한다(그림 3). 전압 대 전류 특성곡선은 부하가 적을 경우에는 다소 비선형적이

만 대략 20[%] 이상의 부하에서는 부하가 증가함에 따라 선형적으로 전압이 감소하는 특성을 보인다. 따라서 초기의 비선형성을 무시하면 전압 대 전류 특성 곡선의 기울기를 계산함으로써 간략화 된 직류 등가회로를 구할 수 있다. 그림 4는 전압원과 그에 직렬로 연결된 저항으로 표현된 연료전지 스택의 직류 등가회로를 나타낸다. 서로 다른 종류나 정격의 연료전지들 간의 비교를 용이하게 하기 위하여 단위법(per-unit)을 이용하며, 표 1은 실험에 이용된 서로 다른 세 종류의 PEMFC들을 모델링하는데 사용되는 단위 제량들에 대한 정의와 그 값을 나타낸다.

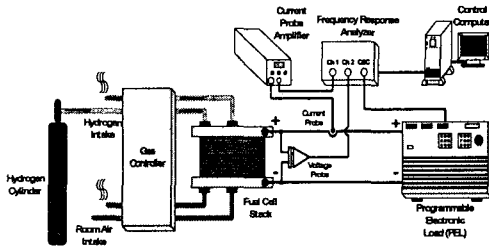


그림 2. 연료전지의 모델링을 위한 실험장치  
Fig. 2. Experimental setup for the modeling of the fuel cell stack

표 1. 연료전지의 모델링을 위한 단위 제량들  
Table 1. Base Values for fuel cell modeling

Fuel cell Type	$V_{o, no\ load}$ [V]	$V_{base}$ [V]	$I_{base}$ [A]	$P_{base}$ [W]	$R_{dc}$ [ $\Omega$ ]
SR 12	40.6	28.9	17.3	500	1.67
Nexa	42.2	26.6	45	1200	0.59
BCS	19.2	12	25	300	0.48

$V_{base}$  : 전부하시 연료전지의 출력 전압

$I_{base}$  : 전부하 전류(정격 전류)

$P_{base}$  : 정격 출력

$Z_{base} = V_{base} / I_{base}$  : 기저 임피던스

$R_{dc} = (V_{o, no\ load} / V_{base}) / I_{base}$  (1)

직류 등가회로에서 나타난 저항은 식 (2)를 이용하여 단위법으로 계산된다.

$$R_{dc, Per-unit} = \frac{R_{dc}}{Z_{base}} \quad (2)$$

또한 연료전지의 출력 전압은 부하의 가변에 따라 큰 변동(PEMFC의 경우 보통 40[%])을 나타내며, 이는 변압기와 같은 전기기기에서처럼 전압변동계수(VRF : Voltage Regulation Factor)로 표시될 수 있다. 전압변동계수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$VRF = \frac{V_{o, no-load} - V_{base}}{V_{base}} \quad (3)$$

따라서 식(1)~(3)으로부터,

$$VRF = R_{dc, Per-unit} \quad (4)$$

각 연료전지의  $R_{dc}$ , Per-unit와 VRF는 표 1로부터 계산될 수 있다. 이러한  $R_{dc}$ , Per-unit와 VRF가 낮은 연료전지 스택이 무부하에서 전부하까지의 출력 전압변동이 적으므로 전기적으로 우수한 성능을 갖는다고 할 수 있다. 또한 VRF는 전력 변환기(PCU)의 정격을 나타내는 지표로 사용될 수 있다. 먼저 PCU의 정격은 식 (5)처럼 계산된다.

$$VA = V_{o, no-load} \times I_{full-load} \quad (5)$$

식 (5)를 단위법으로 나타내면,

$$VA_{per-unit} = \frac{V_{o, no-load} \times I_{full-load}}{V_{base} \times I_{base}} \quad (6)$$

식 (1), (3) 그리고 (6)으로부터 PCU의 정격과 전압 변동계수의 관계는 식 (7)과 같이 나타난다.

$$VA_{per-unit} = VRF + 1 \quad (7)$$

식 (7)로부터 연료전지의 전압 변동률이 큰 경우 그의 PCU의 정격도 커짐을 알 수 있다. 표 2는 시험된 각 연료전지들의 VRF와 계산된 PCU의 정격값을 나타낸다. 표로부터 VRF가 적은 연료전지의 PCU에서는 스위칭 소자를 비롯한 인덕터와 캐패시터 같은 수동소자의 이용률이 높아져서 상대적으로 PCU의 가격이 낮아짐을 알 수 있다.

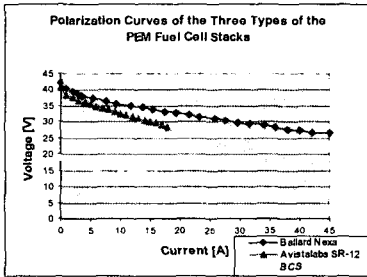


그림 3. 연료전지 스택의 전압/전류 특성곡선  
Fig. 3. V-I Curves of the PEM fuel cell stacks

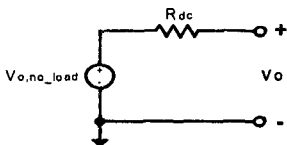


그림 4. 연료전지 스택의 직류등가회로  
Fig. 4. DC equivalent circuit of the fuel cell stack

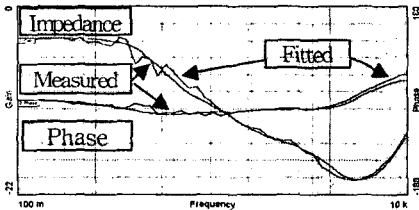


그림 5. 측정된 연료전지의 임피던스 스펙트럼 및 커브피팅 결과  
Fig. 5. Measured impedance spectrum of the PEMFCs and its curve fitting results

## 2.2 교류시험 및 교류 등가회로

교류시험의 목적은 연료전지 스택의 교류 임피던스(0.1[Hz]-10[kHz])를 구하는 것이다. 이 실험에서 연료전지는 PEL에 연결되어 전압/전류 특성곡선 상

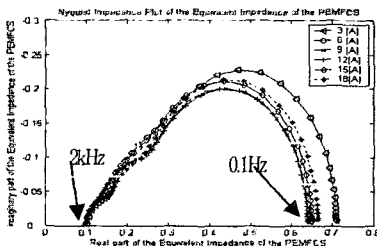


그림 6a. 각 동작점에서 SR-12의 Nyquist 임피던스 곡선  
Fig. 6a. Nyquist impedance plot of the SR 12 at the different operating points

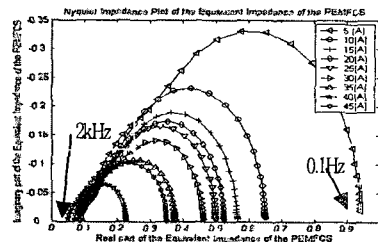


그림 6b. 각 동작점에서 Nexa의 Nyquist 임피던스 곡선  
Fig. 6b. Nyquist impedance plot of the Nexa at the different operating points

의 한 동작점을 기준으로 정현적으로 변화하는 작은 교류 전류를 출력하도록 제어되며, 이때의 전압과 전류값이 측정된다. 측정된 값들은 주파수 응답 분석 소프트웨어가 설치된 PC로 전송되어 연료전지의 교류 임피던스가 계산된다. 이러한 실험은 0.1[Hz]에서 10[kHz]까지의 주파수 대역에서 반복 수행되어 그림 5와 같이 임피던스의 크기와 위상이 보드선도 상에 그려지게 된다. 그림 5는 Avistalab의 SR-12(500[W] 스택)에 대한 실험 결과로 연료전지 스택이 직류 정격전류(18[A])에 1[A]의 최대치를 가진 정현파 전류가 중첩된 형태의 교류 전류를 출력하는 때의 결과를 보드선도 상에 그린 것이다. 또한, 이와 같은 실험은 각기 다른 직류 동작점에서 반복적으로 실시되었다. 그림 6a와 6b는 SR-12(500[W] 스택)와 Ballard Nexa (1200[W] 스택)의 임피던스의 변화를 복소 평면상에 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 동작점에 따른 임피던스의 변화는 SR-12가 Nexa보다 적은 것으로 나타났는데 이는 SR-12의 VRF가 Nexa와 비교해 작은 것과도 일치하는 결과이다(표 2).

측정된 주파수에 따른 일련의 임피던스 값들로부터 연료전지 내부의 전기적인 등가회로를 다음과 같이 얻을 수 있다. 복소 평면상에 그려진 반원은 저항과 커패시터(R-C)로 이루어진 하나의 시정수를 나타내며, 그림 5의 결과를 복소 평면상에 그려보면 겹쳐 있는 3개의 반원을 찾아볼 수 있다. 반원의 지름은 저항 성분의 크기를 나타내며, 정점은 특성 주파수를 나타내므로 이로부터 연료전지 스택의 등가 임피던스 회로와 특정한 동작점에서의 정수들을 계산해 낼 수 있다(그림 7과 표 3). 그림 7의 회로와 계산된 정수들로부터 얻은 주파수 응답은 실험결과와 일치했다.

양자 교환막형 연료전지의 등가 임피던스 모델을 이용한 인버터에 의한 맥동 전류의 영향에 관한 연구

표 2. 시험된 각 연료전지별 VRF와 PCU의 정격(단위법)

Table 2. VRF and VAPER-unit of the PCU for each fuel cell stack under test

연료 전지	VRF (or Rdc, Per unit)	VAPER-unit of the PCU
SR 12	0.4	1.4
Nexa	0.586	1.586
BCS	0.6	1.6

표 3. 각 연료전지 스택의 등가회로의 정수들

Table 3. Parameters of the equivalent circuit for each stack

Fuel Cell	R1 [Ω]	R2 [Ω]	R3 [Ω]	R4 [Ω]	R5 [Ω]	R6 [mΩ]	C1 [mF]	C2 [mF]	C3 [mF]	L1 [μH]
SR12	0.41	0.0115	0.17	0.15	0.085	0.07	80	9	25	2
Nexa	0.15	0.0115	0.15	0.15	0.065	0.07	70	75	55	48

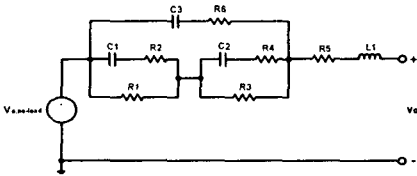


그림 7. 전부하에서 PEMFC의 교류등가회로

Fig. 7. AC equivalent circuit of the PEMFCs at the full load condition

### 3. 인버터에 의한 맥동 전류가 연료 전지스택에 미치는 영향에 대한 평가

단상용 연료전지 전력변환 시스템을 설계하는데 있어서 필요한 중요한 변수중 하나는 연료전지의 성능을 크게 저하시키지 않으면서 허용할 수 있는 맥동전류의 크기이다. 왜냐하면 맥동전류는 수소나 산

소와 같은 연료의 흐름에 영향을 주며, 이 같은 흐름의 변화는 적어도 연료전지의 수명에 부분적으로 영향을 미치게 되기 때문이다[5].

60[Hz] 단상부하를 구동하는 연료전지의 경우 맥동전류는 인버터 주파수의 두 배, 즉 120[Hz]이다. 현재 사용되고 있는 연료전지 스택의 맥동전류의 제한치는 부하가 10~100[%]일 때 정격전류의 15[%] 정도인 경우도 있고[6], Ballard Nexa 스택의 경우 정격 출력전류의 24.7[%](실효치)로 그 값을 제한하고 있다. 그러나 DC/DC 컨버터의 스위칭 주파수 성분은 커패시터를 이용하는 소용량 필터에 의해 쉽게 제거될 수 있으므로 제한을 두지 않는다.

그림 8은 연료전지의 등가회로가 PCU에 연결된 모양을 나타낸다. PCU는 DC/DC 스위칭 컨버터, DC/AC 인버터, 필터 그리고 변압기 등으로 구성되며 선택되는 토폴로지에 따라 그 구성이 달라진다 [7]. 그림 9와 표 4는 교류 등가 임피던스 회로와 120[Hz]에서의 회로정수들을 보여준다. 그림 9와 표 4로부터 정격운전 상태에서 연료전지 스택의 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{120Hz} = 0.1717 - j0.06 = 0.1818 \angle -19.26^\circ \text{ (SR-12)}$$

$$= 0.1115 - j0.061 = 0.1271 \angle -28.68^\circ \text{ (Nexa)} \quad (8)$$

식 (1)에 정의된 단위법을 이용하여 식 (8)을 다시 쓰면,

$$Z_{120Hz, per-unit} = \frac{Z_{120Hz}}{Z_{base}} = R_{120Hz, per-unit} - jX_{120Hz, per-unit}$$

$$= 0.1717 - j0.06 = 0.1818 \angle -19.26^\circ \text{ (SR-12)} \quad (9)$$

$$= 0.1115 - j0.061 = 0.1271 \angle -28.68^\circ \text{ (Nexa)}$$

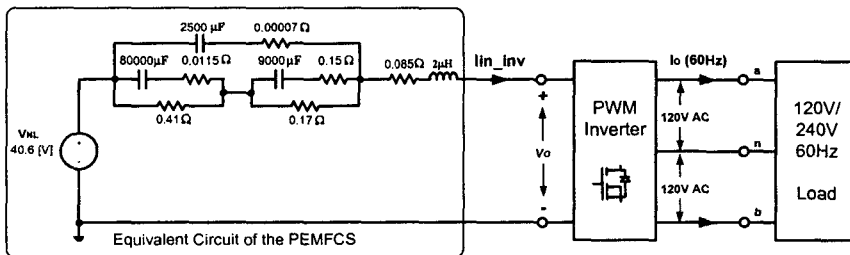


그림 8. 연료전지의 등가회로와 전력변환기(PCU)의 접속

Fig. 8. Interconnection of the fuel cell equivalent circuit with the power conditioning unit

식 (9)와 그림 9로부터 PCU에 의해 생긴 120[Hz] 맥동 전류가 연료전지 내부에서  $I_{ripple}^2 \cdot R_{120}$ [Hz]의 전력 손실을 만들게 됨을 알 수 있으며, 결국 이것이 연료전지 출력의 감소로 나타나게 된다. 맥동전류에 의한 출력의 감소를 단위법으로 나타내면,

$$P_{Loss, per-unit} = I_{ripple, per-unit}^2 \times R_{120Hz, per-unit} \quad (10)$$

120[Hz] 맥동전류는 출력의 감소 외에 출력단 전압의 맥동도 만들어 내게 되는데 그 크기는 식 (11)과 같이 계산된다.

$$V_{Ripple, per-unit} = I_{ripple, per-unit} \times R_{120Hz, per-unit} \quad (11)$$

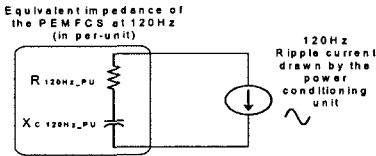


그림 9. 그림 8의 간략화된 교류등가회로  
Fig. 9. Simplified AC equivalent circuit of the Fig. 8

### 4. 실험결과 및 토의

제안된 모델의 타당성을 확인하기 위해 그림 2의 실험 장치를 이용하여 여러 가지 실험이 수행되었다. 그림 10a는 서로 다른 직류 동작점에서 120[Hz] 임피던스가 어떻게 변화하는지를 보여준다. 주목할 것은 90[%] 부하 상태에서 양자 교환막형 연료전지의 교류 임피던스는 최소가 된다는 것이다. 그림으로부터 SR-12의 경우 20~100[%] 부하조건에서 120[Hz]

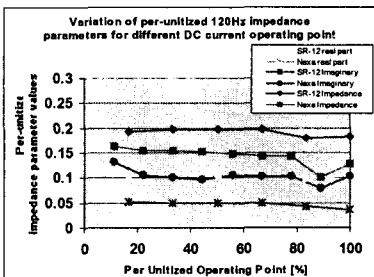


그림 10a. 부하조건에 따른 120(Hz) 임피던스 정수의 변화  
Fig. 10a. Variation of 120(Hz) impedance parameters at the different operating points

교류 저항값의 변화가 거의 없으나 Nexa의 경우 같은 구간에서 37[%]의 변동을 나타내는데 이는 SR-12의 경우 맥동전류에 의한 전력손실이 동작점에 관계없이 일정한 반면, Nexa의 경우에는 경부하에서 손실이 더 커짐을 의미한다. 그림 11은 100[%] 부하 조건에서 맥동전류의 크기가 증가함에 따른 출력의 변화를 식 (10)에 의해 계산된 결과와 함께 그래프로 나타내었다. 맥동전류의 최대치가 정격전류와 같아졌을 때 SR-12는 5.9[%], 그리고 Nexa는 9.5[%]의 출력이 감소됨을 알 수 있다. 또한 같은 조건에서 30[%]의 맥동전류에 대해 SR-12는 0.5[%], 그리고 Nexa는 0.84[%]의 출력이 감소되었다.

표 4. 간략화된 교류 등가회로의 정수들  
Table 4. Parameters for the simplified AC equivalent circuit

Fuel Cell	$R_{120Hz}$ [ $\Omega$ ]	$X_{C, 120Hz}$ [ $\Omega$ ]	$R_{120Hz}$ [pu]	$X_{C, 120Hz}$ [pu]
SR 12	0.1717	0.06	0.1028	0.0359
Nexa	0.1115	0.061	0.1889	0.1034

그림 12a와 13a는 SR-12 및 Nexa 연료전지가 정격 직류 전류만을 출력하도록 PEL을 제어하여 출력이 100[%]일 때 출력단 전압, 전류, 입력되는 수소의 유량과 연료전지 출력의 오실로스코프 파형을 나타낸다. 그림 12b와 13b는 연료전지가 정격 직류 전류에 동일한 크기의 최대치를 가지는 중첩된 120[Hz]의 맥동전류를 공급할 때 출력전압의 왜곡현상을 보여준다. 그림 12c와 13c에서는 입력되는 수소 유량의 변화가 없음에도 중첩된 120[Hz] 맥동전류에 의해 연료전지 스택의 출력이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

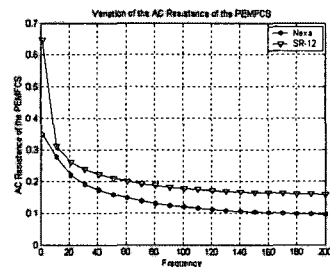


그림 10b. 정격운전시 연료전지의 교류저항 성분의 변화  
Fig. 10b. Variation of the AC resistance of the PEMFCs at the rated condition

양자 교환막형 연료전지의 등가 임피던스 모델을 이용한 인버터에 의한 맥동 전류의 영향에 관한 연구

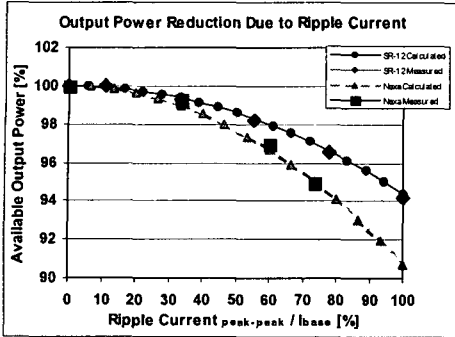


그림 11. 정격운전시 120(Hz) 맥동전류의 크기에 따른 출력의 감소

Fig. 11. Relationship between output power reduction and 120(Hz) ripple current (rated condition)

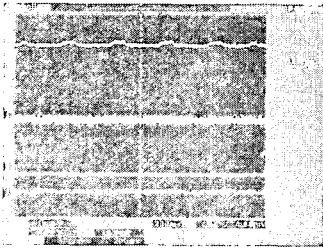


그림 12a. SR 12가 직류 부하전류(18(A))를 공급하는 경우  
Fig. 12a. SR 12 loaded by a constant load (18(A))

Channel 1 : PEMFCS voltage 10[V/div],  
Channel 4 : PEMFCS current 10[A/div],  
Channel 3 : Hydrogen flow rate 10[SLM/div],  
Channel M : PEMFCS output power 500[W/div],  
 $P_o = 503.4[W]$

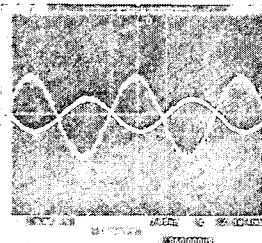


그림 12b. SR 12가 직류(18(A))에 교류 맥동성분 전류(18(A), 120(Hz))가 중첩된 부하전류를 공급하는 경우의 전압과 맥동전류의 파형

Fig. 12b. SR 12 Fuel cell terminal voltage and the ripple current for : 120(Hz) ripple current(17.3(A), peak to peak value) at the DC operating point of 18(A),  $P_o = 473.9[W]$ , Hydrogen flow rate : 7.18[SLM/min](W)

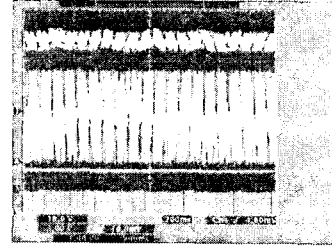


그림 12c. SR 12가 직류 (18(A))에 교류 맥동성분 전류 (18(A), 120(Hz))가 중첩된 부하전류를 공급하는 경우

Fig. 12c. SR 12 loaded by a constant load (18(A)) and a 120(Hz) ripple (18(A) peak to peak)

Channel 1 : PEMFCS voltage 10[V/div],  
Channel 4 : PEMFCS current 10[A/div],  
Channel 3 : Hydrogen flow rate 10[SLM/div],  
Channel M : PEMFCS outputpower, 1[kW/div],  
 $P_o = 473.9[W]$

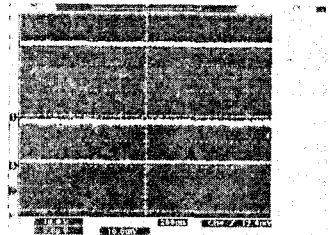


그림 13a. Nexa가 직류 부하전류(35(A))를 공급하는 경우  
Fig. 13a. Nexa loaded by a constant load (35(A))

Channel 1 : PEMFCS voltage 10[V/div],  
Channel 4 : PEMFCS current 20[A/div],  
Channel 3 : Hydrogen flow rate 10[SLM/div],  
Channel M : PEMFCS output power 2[kW/div],  
 $P_o = 1021.6$

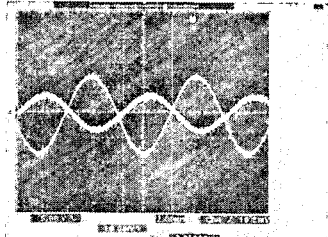


그림 13b. Nexa 가 직류 (35(A))에 교류 맥동성분 전류 (30.2(A), 120(Hz))가 중첩된 부하전류를 공급하는 경우의 전압과 맥동전류의 파형

Fig. 13b. Nexa Fuel cell terminal voltage and the ripple current for : 120(Hz) ripple current (30.2(A), peak to peak value) at the DC operating point of 35(A),  $P_o = 967.6[W]$ , Hydrogen flow rate : 11.74[SLM/min].

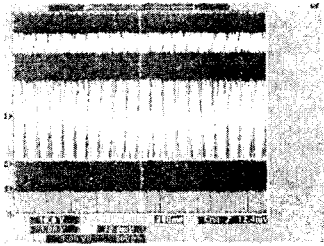


그림 13c. Nexa 가 직류 (35[A])에 교류 맥동성분 전류 (30.2[A], 120[Hz])가 중첩된 부하전류를 공급하는 경우

Fig. 13c. Nexa loaded by a constant load (35[A]) and a 120[Hz] ripple (30.2[A] peak to peak)

Channel 1 : PEMFCS voltage(10V/div),  
 Channel 4 : PEMFCS current(10A/div),  
 Channel 3 : Hydrogen flow rate(10SLM/div),  
 Channel M : PEMFCS output power.(2kW/div),  
 $P_o = 967.6[W]$

## 5. 결 론

본 연구에서는 양자 교환막형 연료전지 스택의 등가 임피던스 모델이 제시되었다. 실험결과는 제시된 모델이 PCU와 결합되었을 때 연료전지의 전기적 특성을 설명하는데 적합함을 보인다. 연료전지의 VRF와 PCU의 정격 사이의 관계를 보였으며, PCU에 의해 발생하는 120[Hz]의 맥동전류가 연료전지의 출력을 감소시키며 출력전압도 왜곡시킴을 실험을 통하여 확인했다. 120[Hz]의 맥동전류가 30~40[%] 정도로 제한될 때 이에 의한 출력의 감소가 0.5~1.5[%] 정도가 되므로 적절하다 하겠다. 맥동전류를 그 이하로 제한하는 것은 더욱 강력한 필터링을 요구하게 되며, 이러한 경우 필터에 의한 전력 손실이 새로운 문제가 될 수 있으며, 결국 전체 시스템의 효율에 영향을 주게 된다. 본 연구를 통하여 밝혀진 결과는 연료전지와 PCU의 전체 효율과 가격을 최적화하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

[1] G. Maggio, V. Recupero, L. pino, "Modeling Approach," Journal of Power Source, 101, pp 257-286, 2001.  
 [2] J.C. Amphlett, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge, A. Rodrigues, "A Model Predicting Transient Responses of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," Journal of Power Source 61, pp 183-188, 1996.

[3] M.D. Lukas, K.Y. Lee, H.G., "An Explicit Model for Direct Reforming Carbonate Fuel Cell Stack," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.16, No. 3, pp 289-295, September 2001.  
 [4] J.M. Correa, F.A. Farret, L.N. Carha, "An Analysis of the Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using an Electrochemical Model," IECON'01, pp 141-146, November 2001, Denver, CO.  
 [5] Randall S. Gemmen, "Analysis for the Effect of the Ripple Current On Fuel Cell Operating Condition," ASME 2001 IMECE, November 2001, New York, NY.  
 [6] DOE Future energy challenge: 2001 and 2003, Low cost fuel cell inverter design competition: <http://www.energy-challenge.org>, 2003.  
 [7] P. Enjeti, Book Chapter: Chapter #9: Power Conditioning Systems for Fuel Cell Systems, US Department of Energy Fuel Cell Handbook, Sixth Edition, 2002.  
 [8] W. Choi, Jo. Howze and P. Enjeti, "Development of an Equivalent Circuit Model of a Fuel Cell to Evaluate the Effects of Inverter Ripple Current," APEC 2004 Conference, Proceedings pp 355-361, Feb 2004, Anaheim California.

### 부록 1. 실험에 사용된 연료전지 스택들의 사양

	SR 12	Nexa	BCS
정격출력	500[W]	1200[W]	300[W]
출력전압	25-39[VDC]	22-50[VDC]	12-20[VDC]
수소의 순도	99.95[%]	99.99[%]	99.95[%]
수소 소모량	7.0 SLP @500[W]	18.5 SLP @1200[W]	3.5 SLP @300[W]
작동 개시 시간	7minutes	2minutes	1minute
동작온도	5~35[°C]	3~40[°C]	3~65[°C]
셀의 수	48	48	20

## ◆ 저자소개 ◆

### 최우진 (崔宇鎭)

1967년 1월 7일생. 1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~1998년 대우중공업 중앙연구소 전자기술실(주임 연구원). 1998~1999년 (주)세창산전 연구개발부(선임 연구원). 1999~2004년 Texas A&M University(박사). 현재 숭실대학교 전기공학과 강사.