

Soft-switching resonant technique을 적용한 고효율 PEMFC inverter

\*한경희, 조영래, 백수현  
\*동국대학교 전기공학과

High-efficiency fuel-cell power inverter with soft-switching resonant technique

\*K.H.Han, Y.R.Cho, S.H.Baek  
\*Dongguk Univ. Electric Department

**Abstract** - In order to reduce the capital and overall operating cost of a fuel-cell system, a high-efficiency fuel-cell power inverter with a simple framework is required. The high-order two-inductance two-capacitance (LLCC) resonant technique is adopted in this study to implement a low-frequency 60-Hz sine wave voltage inverter utilized in the proton exchange membrane fuel-cell (PEMFC) system. The methodology for inverting dc voltage into low-frequency ac voltage is usually generated by the pulse-width-modulation (PWM) technique. However, the PWM-type inverter output has high-frequency harmonic components. Although an adequately designed filter could be utilized to overcome this problem, there are still some undesirable effects introduced by the high-frequency switching loss, electromagnetic-interference, harmonic current, and load variation. A novel power inverter via the LLCC resonant technique is designed for inverting dc voltage into 60-Hz ac sine wave voltage in the PEMFC system. This circuit scheme has the merits of low harmonic components, soft switching, high efficiency, and simplified implementation. The effectiveness of the proposed resonant inverter used for the PEMFC system is verified by numerical simulations and experimental results.

와 공진형 인버터는 and 적은 스위칭 손실과 높은 전력 밀도를 갖는다. soft 스위칭과 클램프 회로가 dc/ac 전원에 적용됨은 위에서 언급된 문제들에 대응하기 위함이며, 그러하더라도, 좀더 많은 수의 센서장치가 제어장치로의 전압과 전류 신호를 feedback하기 위하여 필요하다. 각기 다른 부하유형 하에서 좋은 동적 응답을 달성하기 위하여 페루프의 PWM인버터에 많은 주의가 요구된다. 특정한 특성을 가짐에도 불구하고, 몇가지 문제는 남아 있다. (즉 부하의 급작스런 변화에 있어서 과도시 왜곡현상, 주기적인 부하 불균형에서의 주기적인 왜곡, 측정 가능한 시스템 상태 및 정확한 제한사항 등의 사전 시스템 지식이 요구됨이 그것이다.)  
본 연구의 목적은 전체 회로의 간략화를 위해서 외부 변환 신호 없이 고효율의 연료전지의 전력 인버터를 설계하는 것이다. 이 목표를 달성하기 위하여 저주파수의 정현파 인버터가 LLCC공진기술을 통해서 실현되었다. 공진형 인버터는 기하학적으로 중간 주파수 주변에서 동작하도록 설계되므로, 인버터의 출력전압은 부하의 변동에 의해서 영향 받지 않을 것이다. 이는 single 공진 인버터에 있어서 다양한 부하변동의 영향을 줄일 수 있게 한다. 마지막으로 제한된 연료전지 전력인버터는 폭넓은 동작영역과 다양한 유형의 부하에서 효율적으로 이용될 수 있다. 본 연구에서 수학적인 시뮬레이션의 결과로 그 효과를 알아보았다.

1. 서 론

지구전역의 급격한 산업화와 이로 인한 에너지 수급의 불균형 및 최근 환경문제의 대두와 더불어 대체 연료 및 재생 가능한 에너지의 실용화가 요구되고 있다. 또한 21세기 미래의 에너지 수급이 전략적인 확보를 위해 신 에너지 산업사회로의 이행이 요구된다.  
연료전지는 지역조건이나 기후조건 등의 제약이 없기어서 대규모 활용이 가능한 제 4세대 발전기술이다. 사용목적에 따라 다양한 용량으로 제작할 수 있고 쉽게 설치할 수 있어 소형 및 이동용 분산전원으로서의 주목을 받고 있다.  
특히 자동차 및 주택용으로 적합한 고분자 연료전지는 선진국에서 대규모로 개발 중이며, 연료전지시장을 선도해 나갈 전망이다.  
수 kW에서 수백 kW의 출력규모를 가지는 고분자 연료전지는 소형에서 중형의 수송수단에서부터 주택이나 공공시설에 사용할 수 있는 다양한 용도로 사용할 수 있어 그 시장성 성장이 매우 밝다.  
더욱이 전력소자의 발전은 다양한 속도의 교류 servo 구동회로와 UPS 시스템 등에 사용되는 pulse-width-modulate 인버터의 다양한 응용을 가능하게 하였다. PWM 인버터는 hard 스위칭을 사용하며, 이때 전력소자는 대전류, 고전압을 스위칭 한다. 게다가, PWM type의 인버터의 출력 voltage는 높은 주파수를 가지는 고조파와 EMI문제를 가진다. 그와는 달리, 공진형 인버터는 soft 스위칭을 사용하며, 이때의 전력소자는 zero current, zero voltage에서 스위칭 한다. 이 PWM 인버터

2. 본 론

**2.1 고분자 연료전지 시스템의 연구동향과 전망**  
고분자 전해질연료전지에 대한 연구는 1955년 미국의 General Electric(GE)에서 처음으로 시작되었다. 현재 GM, Ford 및 Chrysler가 주축이 된 산업계에서는 10에서 50kW급 연료전지 시스템을 개발하고 있으며 특히 메탈을 연료전지 시스템, 가솔린 연료전지 시스템, 그리고 수소연료전지 시스템 등 다양한 연료전지 시스템을 개발하고 있다. 이밖에도 캐나다의 경우, 1995년 연료전지 버스의 제작에 성공하여 시범운행이 성공적으로 끝나면 상업적 생산에 들어갈 예정이다. 독일 또한 압축 수소를 연료로 사용한 미네벤을 이미 1994년에 DaimlerChrysler에서 개발하였고, 이외에 프랑스, 영국, 스웨덴 등이 공동으로 혹은 단독으로 스택 개발이나 응용 프로그램에 참여하고 있다.  
국내에서는 1987년 에너지관리공단 산하 에너지자원기술지원 센터에 의해 연료전지 개발 기본계획이 확정되었으나 연구기관의 사정에 따라 이 계획은 계속 수정이 가해져 현재까지 진행되어 오고 있다. 고분자 전해질 연료전지 연구개발에 있어서 국내 우수기업 및 연구기관의 빠른 기술성장이 있었음에도 불구하고 국내의 연구개발 수준은 아직 연구경험 및 기술수준의 열세 등으로 인해 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있는 상태이다. 구성요소 제조에 대해서는 기본적인 기술습득이 이루어진 상태라고 볼 수 있으나, 연료전지의 성능향상을 위한 시스템 수준의 제어기술 및 스택 수명파 모니터링 기술 등에 대한 연구가 보다 지속적으로 이루어져야 할 것이다.  
가정용 곱누자 연료전지는 전기를 만드는 과정에서 발생하

는 가정○에 운수와 전기를 동시에 공급할 수 있는 장점이 있다. 특히, 일반 화력발전소의 발전효율이 20% 대에 머무르는데 반해 발전효율이 최대 32%에 달하고 열 회수효율까지 포함된 총 효율은 70%이상이다. 실용화가 이루어질 경우 기존의 발전소를 통한 전기 생산보다 송전 및 배전시설 비용을 절감하면서도 청정에너지를 안정적으로 공급할 수 있게 된다.

## 2.2 고분자 연료전지 시스템의 향후 연구방향

고분자 연료전지 시스템은 4가지 주요한 제어문제로서, 첫째는 공기와 연료의 공급시스템, 둘째는 물 관리시스템, 셋째는 열관리시스템, 넷째는 파워관리 시스템 등이 있다. 연료 전지 시스템의 제어측면에서 보면 파워, 압력 및 유동과 같은 빠른 동특성을 가진 인자가 전체 시스템의 특성을 결정짓게 된다. 이러한 특성들로 인해 연료전지 시스템을 위한 제어기법들은 체계적이고 통합적이어야 하며, 다양한 운전 환경 변화에 있어서도 연료전지스택의 보호와 견실한 성능을 갖는 알고리즘으로 통합 설계 되어야 한다. 즉, 제어입력의 포화조건 등 시스템을 불안정하게 할 수 있는 요인들을 모두 고려해서 알고리즘이 개발되어야 한다. 핵심부품의 건강상태 모니터링, 고장진단을 통한 치명적 고장의 판별 등을 수행 할 수 있고, 그 결과 스택의 수명연장과 고 효율 운전을 할 수 있는 제어로직 기능도 포함해야 한다.

## 2.3 고분자 연료전지의 개요

고분자 전해질형 연료전지의 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(Membrane)로써 다른 연료전지와 구별된다. 인산형 및 알칼리형 연료전지 시스템과 비슷하게 멤브레인을 이용하는 연료전지는 촉매로서 백금을 사용한다. 멤브레인 연료전지의 개발 목표는 최소 1.5g/kW의 백금 촉매를 쓰는 것이다. 이 백금 촉매는 일산화탄소에 의한 부식에 민감하므로 일산화탄소의 농도는 100ppm 이하로 유지하여야만 한다.

고분자 전해질 연료전지는 연료(수소)의 화학에너지가 전기 에너지로 직접 변화되어 직류 전류를 생산하는 능력을 갖는 전지(Cell)로 정의되며, 종래의 전지와는 다르게 외부에서 연료와 공기를 공급하여 연속적으로 전기를 생산한다.

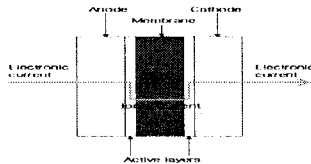


그림 1 고분자 전해질 연료전지의 기본 개념도

고분자 전해질 연료전지의 기본 개념은 수소와 산소의 전기 화학 반응에 의하여 물이 생성되며, 동시에 발생하는 전기를 이용하는 것으로 설명할 수 있다.

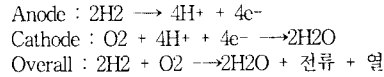
위의 그림에서 보는 바와 같이 수소는 연료극(Anode)으로 공급되고 산소는 공기극(Cathode)으로 공급된다. 연료극으로 공급된 수소는 전극촉매상에 수소이온(H+)과 전자(e-)로 분해되고, 이 중 수소이온만이 선택적으로 고분자 전해질막을 통과하여, 공기극으로 전달된다. 동시에 전자는 외부회선을 통해서 공기극으로 이동하는데, 이들이 공기극에 공급된 산소와 만나서 물을 생성하는 반응을 일으킨다. 이때에 일어난 전자의 흐름으로 인해 전류가 생성되고, 물생성 반응에서 열도 부수적으로 발생한다. 이렇게 생성된 전류는 직류 전류로써, 직류 전동기의 동력으로 사용되거나 전력변환기를 통해 교류 전류로 바꾸어 사용하기도 한다. 연료전지 반응에서 생성되는 부가적인 열은 난방용으로 사용될 수도 있다.

연료전지의 연료인 수소는 순수 수소를 이용하거나, 도시가스, 메탄올, 에탄올 같은 탄화수소를 이용하여 개질이라는 과정을 통해 생산된 수소를 이용한다. 공기극으로 공급되는 산소의 경

$$G_v = \frac{\bar{V}_o}{\bar{V}_i} = \frac{1}{Z_e Y_p} = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_p}{C_s} + \frac{L_s}{L_p} \frac{1}{\omega_s L_i C_s} - \omega_s^2 L_s C_p\right) + j \left(\frac{\omega_s L_s}{R_s} - \frac{1}{\omega_s R_i C_s}\right)}$$

우, 순수한 산소를 이용하면 연료전지의 성능을 높일 수 있지만 산소 저장에 따른 비용과 무게가 증가하는 문제가 있다. 따라서 공기를 그대로 이용하는 방식을 이용한다.

고분자 연료전지의 전극 반응은 아래의 식과 같으며, 최종적으로 전기와 열 및 물이 동시에 생성된다.



## 2.4 인버터 시스템 방식

새로운 전력 제어 기술을 가지는 고분자 연료전지 시스템의 형상이 그림 2에 나타나 있다. 여기서 연료전지의 입력은 울트라 커패시터에 의해 보충되어 과도현상 및 기동시에 버스 전압을 유지하는 데에 도우는 역할을 한다. 연료전지 stack의 출력단 다이오드 (Do)는 역전류가 stack으로 흐르는 것을 막아준다. 부의 전류고 인해서 cell의 역전현상이 발생할 수 있으며 연료전지 stack에 위험을 줄 수 있다. boost 컨버터의 스위칭으로 인하여 연료전지 stack으로부터 보이는 리플 전류는 감소되어야 한다. 제안된 전력인버터 회로는 PWM 직접 duty-cycle 제어를 사용하는 boost dc/dc 컨버터와 새로이 설계된 LLC 공진 인버터로 구성된다. 연료전지의 출력전압이 부하 변동에 따라 변화하기 때문에 직류전압 변환 제어를 하는 boost dc/dc 컨버터가 인버터에 일정한 dc 전압  $V_{in}$ 를 제공하기 위하여 사용된다. dc link 전압의 크기는 제어입력 U에 대하여 boost dc/dc 컨버터에 의해 제어된다. 안정된 정현파 전압( $v_o$ )출력을 제공하기 위하여 LLC 공진 회로가 기하학적인 중간 주파수에서 동작되며, 출력전압은 양호도의 변동에 대해서 영향을 받지 않는다. 이 구동회로는 풀 브릿지 스위치를 가지며, 직렬 공진 tank(Ls, Cs), 그리고 병렬 공진 Tank(Lp, Cp)를 가진다.

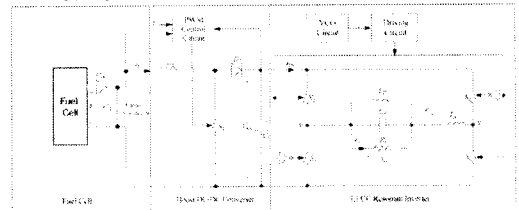


그림 2 고분자 전해질 연료전지의 기본 개념도

풀 브릿지 인버터에 의해 공급되는 구형파 입력 전압  $v_{uv}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$v_{uv} = \begin{cases} V_{IN} & \text{for } 0 < \omega t < \pi \\ -V_{IN} & \text{for } \pi \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

그러므로 입력 구형파 전압의 기본요소는 다음과 같이 나타난다.

$$v_i = V_m \sin \omega t \quad (5)$$

이때  $\omega_s = 2\pi f_s$ , 여기서  $f_s$ 는 스위칭 주파수이며,

$$V_m = 4\sqrt{2} V_{IN} \quad (6)$$

공진 Tank의 출력전압은 다음과 같이 표시된다.

$$v_o = V_o \sin(\omega_s t + \phi) \quad (7)$$

여기서  $V_o$ 와  $\phi$ 는 출력 전압  $v_o$ 의 크기와 위상을 나타낸다.

전압이득  $G_v$ 는 교류 출력전압과 구형파 입력 전압의 기본요소의 비로 정의된다. 식 (8)을 보자, 여기서  $\bar{V}_o$ 와

$\vec{V}_i$ 는  $v_o$ 의 패이저와  $v_i$ 의 패이저를 의미한다.

$Y_p = (1/R_L) + (1/(j\omega_s L_p)) + j\omega_s C_p$ 는 병렬공진 tank의 어드미턴스이다.  $R_L$ 은 부하저항이며,  $Z_{in} = j\omega_s L_s + (1/(j\omega_s C_s)) + (1/Y_p)$ 은 공진 tank의 총 임피던스이다. 식 (8)에 따라 전압이득의 위상은 다음과 같이 나타난다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\left( \frac{\omega_s L_s}{R_L} - \frac{1}{\omega_s R_L C_s} \right)}{\left( 1 + \frac{C_p}{C_s} + \frac{L_s}{L_p} - \frac{1}{\omega_s^2 L_s C_s} - \omega_s^2 L_s C_p \right)} \quad (9)$$

공진조건이 발생하면, 분모의 실수축이 zero가 된다.

$$1 + \frac{C_p}{C_s} + \frac{L_s}{L_p} - \frac{1}{\omega_s^2 L_s C_s} - \omega_s^2 L_s C_p = 0 \quad (10)$$

4차 LLCC 공진인버터의 radian 값에서 두 공진 주파수는 다음과 같으며,

$$\omega_{o1} = \left\{ \frac{K}{2} - 0.5 \left( K^2 - \frac{4}{L_s L_p C_s C_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\omega_{o2} = \left\{ \frac{K}{2} + 0.5 \left( K^2 - \frac{4}{L_s L_p C_s C_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

여기서  $K = (1/(L_s C_p))(1 + (C_p/C_s) + (L_s/L_p))$ . 만약,  $L_s = L_p$ ,  $C_s = C_p$ 가  $L_p/L_s = C_s/C_p$ 이도록 설계되면 (8), (9) 식은 (13), (14) 식으로 다시 표현될 수 있으며 여기서  $\omega_o$ 는  $\omega_{o1}$ ,  $\omega_{o2}$ 로 표현된다. 양호도 Q는 다음과 같다

$$Q = \frac{R_L}{\left| \frac{1}{\omega_s C_s} - \omega_s L_s \right|} \quad (15)$$

더욱이, 기하학적 중간 주파수 (radian)은 다음과 같다.

$$\omega_s = \sqrt{\omega_{o1} \omega_{o2}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} \quad (16)$$

스위칭 주파수는 기하학적인 중간 주파수에서 동작한다. 이 때, (13)식의 실수부분은 1과 같으며, 허수축은 zero이다. 결국, 전압이득  $|G_v|=1$ 의 크기는 양호도 Q에 영향받지 않으며, 출력전압  $V_o$ 의 크기는 식 (6)에 의해  $4V_M/\pi$ 와 같아진다. 다시 말해서, 직렬공진 tank의 임피던스는 zero이다. 병렬공진 tank의 어드미턴스는  $1/R_L$ 과 같다. 그리고, LLCC 공진 tank의 총 임피던스는  $R_L$ 과 같다. 이는 그림 2에서 보여지는 LLCC 공진 tank가 저항으로 간략화 되어지는 것을 의미하며, LLCC 공진 tank의 입력, 출력전압은 같은 위상에 놓인다.

그러므로, 영전류 스위칭(ZCS)은 기하학적으로 중간주파수에서 장점을 가지며, 스위칭 손실은 최소화된다. 요약하면, 기하학적 중간주파수에서의 LLCC 공진 인버터는 soft 스위칭, 저주파 스위칭, 고효율, 간소화된 적용의 장점들을 갖는다.

#### Remark :

직렬공진 tank를 기본으로 하는 기존의 직병렬 공진 converter와 비교하여 볼 때, 고차 공진 컨버터의 이점은 다음과 같다.

- 1) 공진 tank에 대한 reactive 요소의 첨가는 공진 tank의 양호도 변동에 상관없이 공진 컨버터의 동작특성을 개선시킬 수 있다.
- 2) 고차 컨버터는 특정 application 을 위해 최적설계에 사용될 수 있는 새로운 컨버터 topology이다.
- 3) 고주파 동작에서는 parasitic 회로 인덕턴스와 트랜지스터, 다이오드에 결합된 커패시터가 고려되어야 하며, 컨버터 설계에 있어서 그들의 포함하는 것은 피할 수 없다.

## 2.5 시뮬레이션 결과

LLCC 공진 인버터에 대한 출력전압의 주파수는 60Hz로 설계되었다. LLCC 공진회로의 파라미터는 다음과 같이 주어진다.

$$L_s = L_p = 43.97 \text{ mH}, \quad C_s = C_p = 160 \text{ } \mu\text{F} \quad (17)$$

60Hz에서 기하학적 중간 주파수는 (17)을 (16)에 대입하여 얻어지며, 스위칭 주파수  $f_s$ 대  $G_v$ 의 크기는 다른 양호도로 인해 그림 3과 같이 시뮬레이션 된다.

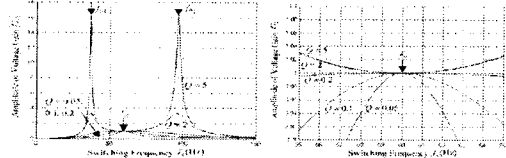


그림 3 LLCC 공진 인버터의 Gain plot(a),(b)

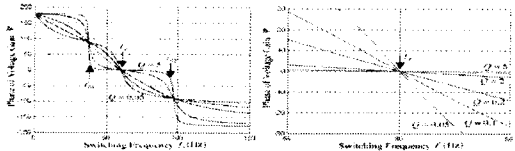


그림 4 서로다른 Q: LLCC 공진 인버터의 Gain plot(a),(b)

그림 3(a)는 그림 3(b)로 확대된다. 더욱이, 서로 다른 양호도로 인한 전압이득  $\phi$ 의 위상 대 스위칭 주파수  $f_s$ 는 그림 4에 나타난다. 그림 4(a)는 그림 4(b)로 확대된다. 시뮬레이션 결과로부터  $G_v$ 의 크기와 위상의 변동은 1%, 1°보다 작는데, 이는 다른 양호도에서 스위칭 주파수가 60Hz이기 때문이다.

## 3. 결 론

LLCC 공진 기술을 이용한 새로운 저주파 정현파 전압 인버터가 고분자 연료전지 시스템에서 구현되었다. 구동회로는 다음의 특성을 가진다.

- 1) 상이한 동작 조건하에서 안정적인 교류 출력 전압을 발생시키기 위한 별도의 궤환회로 없이 LLCC 공진 회로를 설계.
- 2) ZCS 소프트 스위칭 특성에 따른 높은 conversion 효율.
- 3) 출력 정현 전압에서의 낮은 고조파 요소와 파형왜곡.
- 4) 중부하 조건에 대한 무부하시 전압변동은  $\pm 5\%$  이내 이 새로운 인버터 이론은 설계자에게 재생 에너지를 변환하기 위한 대안적인 선택요소를 제공하는 것을 알 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] W. He, J.S.Yi and T.B.Nguyen, "Two-Phase Flow Model of the Cathode of PEM Fuel Cells Using Interdigitated Flow Fields", AIChE Journal, 46, pp.2053-2063,2000.
- [2] C.Marr and X.Li, "Composition and Performance Modelling of Catalyst Layer in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", Power Sources, 77, pp17-27, 1999
- [3] D.M Bernardi and M.W.Verbrugge, " Mathematical Model of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte", AIChE Journal, 37, pp.1151-1163, 1991.
- [4] R.B.Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, 1960.