

3MW급 연료전지용 EBOP의 병렬제어 알고리즘

황태식, 김형수, 김윤현, 김광섭
포스콘 기술연구소

A parallel control algorithm of 3MW EBOP for Molten Carbonate Fuel Cell(MCFC) power plant

Tai-Sik Hwang, Hyeong-Su Kim, Yun-Hyun Kim, Kwang-Seob Kim
POSCON Corporation R&D Center

ABSTRACT

발전용 연료전지 시스템은 수소와 산소를 공급받아 직류전기와 열로 변화시키는 연료전지 스택, 연료전지 스택에 연료와 공기를 공급해주는 MBOP(Mechanical Balance Of Plant), 연료전지의 출력을 계통에 연계시키는 EBOP(Electrical Balance Of Plant)로 구성된다. EBOP 시스템은 병렬 연결된 1.5MW PCU(Power Conversion Unit)로 구성되며, 각 PCU는 750kW 인버터가 병렬로 구성된다. 본 논문에서는 4병렬로 구성된 3MW급 연료전지용 EBOP의 병렬제어 알고리즘을 소개한다. 제안한 병렬제어 알고리즘은 과도응답이 빠르고 순환전류가 없는 제어특성을 가진다. 그리고 시뮬레이션과 실험으로 제안한 알고리즘의 성능을 확인한다.

1. 서 론

최근 고유가로 인해 미래 에너지원의 안정적 확보, 지구 환경문제, 전력수요 증대에 대한 대응이 절실히 요구되고 있다. 연료전지는 환경문제와 에너지문제를 동시에 해결해 줄 미래 기술로서 선진국을 중심으로 연구개발투자가 집중되고 있는 분야이다. 연료전지의 실용화는 그 자체로 에너지, 전력, 발전설비, 자동차를 포함한 동력기관 등의 산업에 막대한 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다. 연료전지가 지닌 장점으로 미루어 볼 때 연료전지의 시장 잠재력이 막대할 것이라는 데에는 이론의 여지가 없다. 연료전지를 에너지 분야의 바이오테크 혁명에 비유하기도 한다.

EBOP 시스템은 계통연계모드, 계통동기화모드, 독립운전모드로 구성된다. EBOP는 계통연계모드에서는 계통으로, 독립운전모드에서는 특별부하로 출력전력을 공급한다. 발전용 연료전지 시스템은 최초 구동하기 위해서 외부에서 전력을 공급해주어야 한다. 그리고 발전을 시작하면 EBOP로부터 공급받는다. 계통에서 사고가 발생하면 EBOP는 가능한 빠르게 계통을 차단하고 계통연계모드에서 독립운전모드로 가능한 빠르게 전환해야 한다. 독립운전모드는 출력전압을 ANSI범위로 제어하여 안정되게 부하에 전력을 공급해야 한다.^[1]

분산전원에서 사용하는 UPS(Uninterruptible Power Supply)와 같은 전압제어형 인버터는 각 인버터간의 선로임피던스 영향으로 순환전류가 발생할 수 있다. 따라서 순환전류를 제거하기 위한 병렬제어 알고리즘이 많이 연구되고 있다. 기존에 연구되어온 병렬제어는 정상상태 전류편차발생을 제거하는 알고리즘으로 연구되었다.^{[2][3]} 한편, 연료전지 시스템이나 마이크로그리드(Micro Grid)는 계통연계모드에서 독립운전모드로의 모드전환이 필요로 하므로 인버터간의 병렬제어와 부드러운 모드전환 및 빠른 과도응답 개선을 위한 연구가 진행되었다.^{[4][5]}

본 논문에서는 4병렬로 구성된 3MW급 연료전지용 EBOP의 독립운전을 위한 병렬제어 알고리즘을 소개한다. 제안한 병렬제어 알고리즘은 과도응답이 빠르고 정상상태에서 순환전류가 발생하지 않는다. 시뮬레이션과 실험으로 제안한 병렬제어 알고리즘의 성능을 검증한다.

2. 본 론

2.1 3MW EBOP 시스템 구성

연료전지용 EBOP 시스템은 전력변환부, 계통연계부, 제어부 등으로 구성되어 있다. 전력변환부는 연료전지 시스템의 출력과 계통을 연계하기 위해 연료전지의 출력인 직류전압을 교류전압으로 변환한다. 계통연계부는 전력계통의 상태를 감시하고 사고 발생시 계통으로부터 연료전지 시스템을 분리시키는 역할을 수행한다. 제어부는 유효전력 및 무효전력을 제어하거나 시스템을 보호하는 역할을 수행한다.^[1]

그림1은 3MW EBOP 시스템 구성도를 나타낸다. EBOP 시스템은 병렬 연결된 1.5MW PCU로 구성되며, 각 PCU는 750kW 인버터가 병렬로 구성된다.

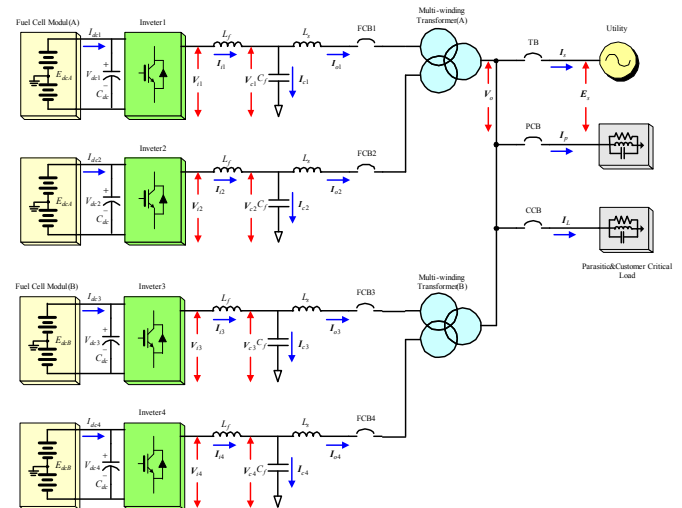


그림 1 3MW EBOP 시스템 구성도

2.2 독립운전모드에서 병렬제어 알고리즘

2.2.1 제어기 구성

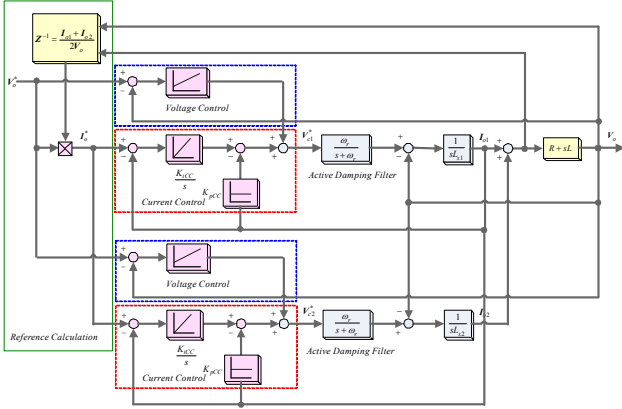


그림 2 병렬 제어 구성도

3MW EBOP는 4병렬이지만 1.5W PCU가 병렬로 구성되어 각 다권선 변압기가 거의 동일한 특성을 가진다. 따라서 여기서는 2병렬로 구성된 시스템에서 제어기를 설계하여 4병렬로 확장한다. 그림1은 독립운전을 위한 병렬제어 구성도이다. 이 제어기는 전압제어기와 전류제어기가 병렬로 구성되어 과도상태에는 전압제어기, 정상상태에는 전류제어기가 응답을 결정한다.

여기서, 전압제어 및 전류제어 PI 이득은 다음과 같다.

$$K_{pCC} = 2\zeta L_s \omega_{cc}, K_{iCC} = L_s \omega_{cc}^2 \quad (1)$$

$$K_{pVC} = \frac{\omega_{vc}}{\omega_r}, K_{iVC} = \omega_{vc}$$

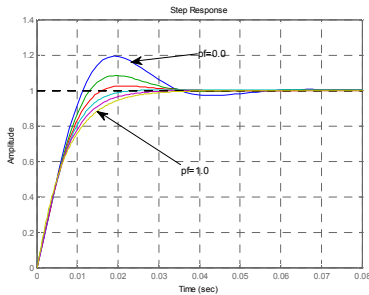
2.2.2 과도 상태 특성

과도 응답 특성을 확인하기 위해 제어기 및 시스템의 병렬 구조를 생략하였으며 이때, 전압제어의 출력은 다음과 계산할 수 있다.

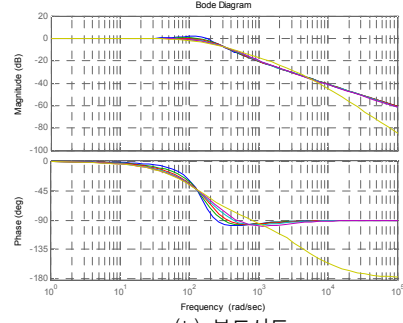
$$I_o = \frac{\frac{L_s \omega_{cc}^2}{L+L_s}}{s^2 + \frac{(2\zeta\omega_{cc}L_s + R)}{L+L_s}s + \frac{L_s \omega_{cc}^2}{L+L_s}} I_o^* + \frac{\frac{1}{L+L_s}s}{s^2 + \frac{(2\zeta\omega_{cc}L_s + R)}{L+L_s}s + \frac{L_s \omega_{cc}^2}{L+L_s}} \frac{sK_{pVC} + K_{iVC}}{s} \frac{\omega_r}{s + \omega_r} (V_o^* - V_o) \quad (2)$$

따라서 식 (3)으로부터 임출력 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{I_o(s)}{I_o^*(s)} = \frac{\frac{L}{L+L_s} \omega_{vc} s + \frac{L_s \omega_{cc}^2 + R \omega_{vc}}{L+L_s}}{s^2 + \frac{2\zeta\omega_{cc}L_s + R + L\omega_{vc}}{L+L_s}s + \frac{L_s \omega_{cc}^2 + R \omega_{vc}}{L+L_s}} \quad (3)$$



(a) 단위 응답



(b) 보드선도

그림 3 제안하는 병렬제어 시스템의 단위응답 및 보드선도

여기서, $L_s = 40\mu H$, $\omega_r = 5000\text{rad/s}$, $\omega_{cc} = 500\text{rad/s}$,

$\omega_{vc} = 100\text{rad/s}$, $S_{Rated} = 833\text{KVA}$, $Z_{base} = 0.1470$, $pf = 0 \sim 1.0$,

$R = Z_{base} \cdot pf$, $L = Z_{base} \cdot \sqrt{1 - pf^2} / \omega_e$ 이다.

그림3은 제안하는 병렬 제어 시스템의 단위응답 및 보드선도를 나타낸 것이다. 부하 역률 변동에 대한 응답의 변화가 심하지 않으므로 부하변동에 강인하다. 그리고 과도 응답특성은 약 100rad/s를 유지하며 무부하에서 제어가능하다.

2.2.3 정상상태 병렬제어 특성

병렬제어 특성을 확인하기 위해 정상상태에서 해석을 한다.

인버터1의 출력전류는 다음과 같다.

$$I_{o1} = \frac{K_{iCC}}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_o^* - \frac{Ls^2 + Rs}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_o + \frac{s}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} \frac{sK_{pVC} + K_{iVC}}{s} \frac{\omega_r}{s + \omega_r} (V_o^* - V_o) \quad (4)$$

$$= \frac{K_{iCC}}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_o^* - \frac{Ls^2 + Rs}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_{o2} + \frac{L\omega_{vc}s + R\omega_{vc}}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} (2I_o^* - I_{o1} - I_{o2})$$

마찬가지로 인버터2의 출력전류는 다음과 같다.

$$I_{o2} = \frac{K_{iCC}}{(L+L_{s2})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_o^* - \frac{Ls^2 + Rs}{(L+L_{s2})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_o + \frac{L\omega_{vc}s + R\omega_{vc}}{(L+L_{s2})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} (2I_o^* - I_{o1} - I_{o2}) \quad (5)$$

인버터 1,2의 정상상태 전류는 다음과 같으며, 순환전류가 발생하지 않는다.

$$I_{o1}|_{s \rightarrow 0} = I_o^* + \frac{R\omega_{vc}}{K_{iCC}} (2I_o^* - I_{o1} - I_{o2}) \Big|_{s \rightarrow 0}, \quad I_{o2}|_{s \rightarrow 0} = I_o^* + \frac{R\omega_{vc}}{K_{iCC}} (2I_o^* - I_{o1} + I_{o2}) \Big|_{s \rightarrow 0} \quad (6)$$

$$\hat{I}_{o1}^c = \hat{I}_o^c + \frac{R\omega_{vc}}{K_{iCC}} (2\hat{I}_o^c - \hat{I}_{o1}^c - \hat{I}_{o2}^c), \quad \hat{I}_{o2}^c = \hat{I}_o^c + \frac{R\omega_{vc}}{K_{iCC}} (2\hat{I}_o^c - \hat{I}_{o1}^c + \hat{I}_{o2}^c)$$

$\therefore \hat{I}_{o1}^c = \hat{I}_{o1}^c - \hat{I}_{o2}^c = 0, \quad \hat{I}_{o1}^c = \hat{I}_{o2}^c = \hat{I}_o^c$

식 (4),(5)로부터 출력 전압은 다음과 같이 계산되며 정상상태 오차가 없다.

$$V_o = \left(\frac{K_{iCC}}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} + \frac{K_{iCC}}{(L+L_{s2})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} \right) \frac{V_o^*}{2} - \frac{s(R+Ls)^2 s}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_{o2} - \frac{s(R+Ls)^2}{(L+L_{s2})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} I_{o1} \quad (7)$$

$$+ \left(\frac{\omega_{vc}}{(L+L_{s1})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} + \frac{\omega_{vc}}{(L+L_{s2})s^2 + (K_{pCC} + R)s + K_{iCC}} \right) (V_o^* - V_o)$$

$$\therefore V_o|_{s \rightarrow 0} = V_o^*$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

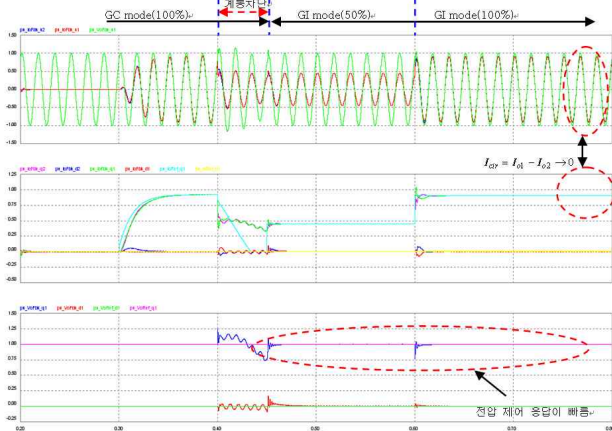


그림4 GC mode(100%) → GI mode(50%) → GI mode(100%)

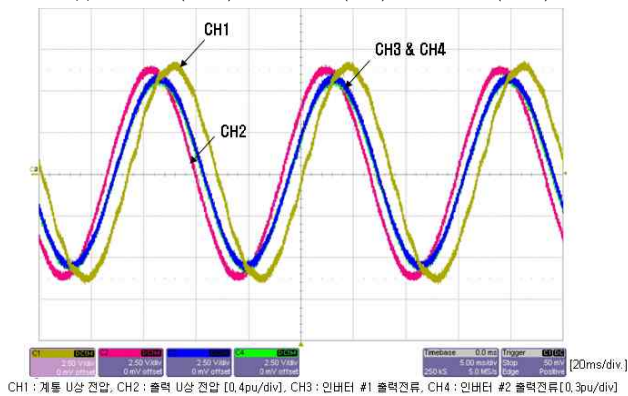


그림5 GI mode(1.5MW)의 시험결과

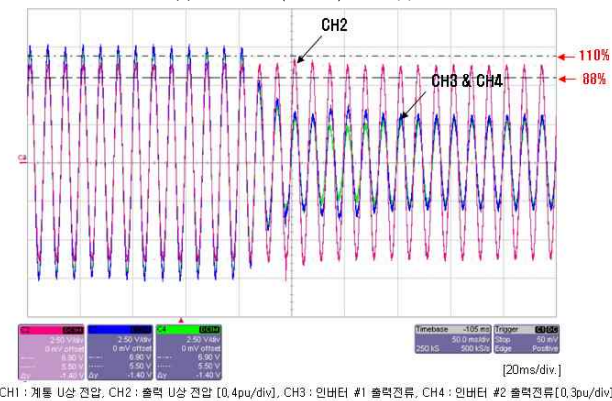


그림6 GC mode(100%) → GI mode(700kW)의 시험결과

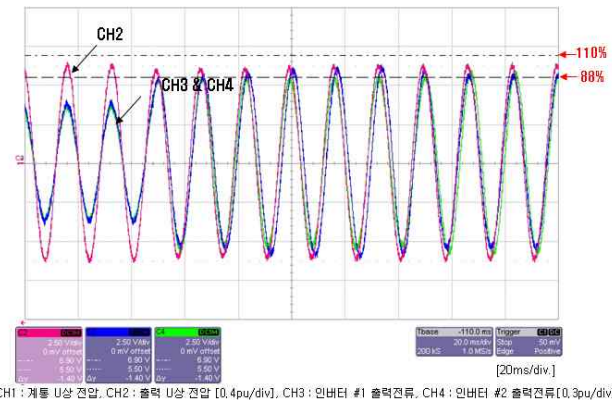


그림7 GC mode(50%) → GI mode(1.5MW)의 시험결과

본 논문에서 설계한 병렬제어기의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 Psim을 이용하였으며 이때, 순환전류 특성을 확인하기 위해 인버터간의 계통연계 리액터의 값을 다르게 설정하였다.(+150%).

성능검증을 위하여 3MW급 EBOP 시제품을 제작하여 실험을 수행하였다. 4대의 인버터에서 각 정격 출력전류는 1650A이며 전체 용량은 4MVA이다. 연료전지 모의장치를 위해 12펄스 다이오드 정류기를 사용하였으며 정격 DC전압은 620V이다.

그림4는 계통연계모드(GC mode)에서 계통을 차단 후 독립 운전모드(GI mode)로 전환할 때 전류 및 전압 응답의 시뮬레이션 결과이다. 정상상태에서 인버터 1과 2사이에 전류편차가 0으로 수렴하며 빠른 전압응답을 가진다. 그림5는 정상상태에서 GI mode의 전류 및 전압 파형의 실험결과이다. Ch3과 Ch4는 인버터 1과 2의 전류를 나타낸 것으로 거의 동일하게 나오므로 순환전류가 없는 것을 알 수 있다. 그림6,7은 GC mode에서 GI mode로 전환할 때 전류 및 전압의 과도 응답의 실험결과이다. ANSI 전압범위(88%-110%)에서 출력전압이 거의 일정하게 나온다.

4. 결 론

본 논문에서는 3MW급 연료전지용 EBOP의 병렬제어 알고리즘을 소개하였다. 제안하는 병렬제어는 전압제어기와 전류제어기가 병렬로 구성된다. 과도상태에는 전압제어기가, 정상상태에는 전류제어기가 응답을 결정한다. 그리고 시뮬레이션 및 실험결과로부터 부하변동에도 전압응답이 빠르고 정상상태에서 각 인버터사이에서 순환전류가 발생하지 않는 것을 입증하였다.

따라서 포스콘은 MW급 대용량 시스템 핵심기술(병렬제어)을 확보하였으며 EBOP 핵심기술을 신재생에너지(태양광, 풍력 등) 시스템으로 확대 적용할 수 있다. 향후, 차세대 에너지 전력망(Micro-Grid, Smart Grid) 개발에도 빠른 대응이 가능하리라고 본다.

참 고 문 헌

- [1] Tai-Sik Hwang, Kwang-Seob Kim, Byung-Ki Kwon, "Control strategy of 600kW E-BOP for molten carbonate fuel cell generation system", Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on, 17-20 Oct. 2008 pp. 2366 - 2371
- [2] M. Prodanović, T. C. Green, and H. Mansir, "A survey of control methods for parallel three-phase inverters connection," in Proc. IEE PEVD Conf.(IEE Conf. Publ. No. 475), Sep. 2000, pp. 472 - 477.
- [3] Josep M. Guerrero, Lijun Hang, and Javier Uceda, "Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, NO. 8, Aug. 2008. pp. 2945-2869.
- [4] Juan C. Vasquez, Josep M. Guerrero, Alvaro Luna, Pedro Rodríguez and Remus Teodorescu, "Adaptive Droop Control Applied to Voltage-Source Inverters Operating in Grid-Connected and Islanded Modes", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, NO. 10, Oct. 2009. pp. 4088-4096
- [5] Chien-Liang Chen, Yubin Wang, Jih-Sheng Lai, "Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Microgrid Applications", APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE 15-19 Feb. 2009 pp. 1288 - 1294