

고분자 전해질 연료전지 발전 시스템의 병렬 운영을 위한 PCS 전력 분배 구동 알고리즘

논문

58-9-9

A PCS Power-sharing Operation Algorithm for Parallel Operation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Generation Systems

강 현 수*
(Hyun-Soo Kang)

Abstract - In this paper, a parallel operation algorithm for high power PEMFC generation systems is proposed. According to increasing the capacity of fuel cell systems with several fuel cell stacks, the different dynamic characteristics of each fuel cell stack effect on imbalance of load sharing and current distribution, so that a robust parallel operation algorithm is desired. Therefore, a power-sharing technique is developed and explained in order to design an optimal distributed PEMFC generation system. In addition, an optimal controller design procedure for the proposed parallel operation algorithm is introduced, along with informative simulations and experimental results.

Key Words : PEM Fuel Cell, Parallel operation algorithm, Power-sharing technique, PCS for Fuel Cell, Optimal Design

1. 서 론

제한된 화석 연료의 매장량과 화석 연료의 무분별한 사용에 따른 온실가스 제한 규정은 지구 온난화 문제를 야기할 뿐만 아니라 보다 구체적으로 추가적인 경제적 제한 조치들을 발생시킨다. 대표적인 예로 전 세계적인 CO₂ 규제 조치들로 말미암아 기존의 도덕적인 의무로서만 여겨왔던 신재생 에너지의 사용이 보다 실제적이고 경제적인 이득이 되는 역할로 변화 하고 있으며 이에 따라 무한 에너지원으로서의 신재생 에너지원의 수요가 급격히 증가되고 있다. 여러 신재생 에너지원 중에서 연료전지는 다른 신재생 에너지원에 비해 에너지의 저장성, 이동성, 고효율성 및 상시발전이 가능한 장점 때문에 수송용, 휴대용 및 분산 발전용 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 담당하고 있다 [1]. 이러한 연료전지는 전기 화학 반응으로 인한 발전 특성 때문에 고유의 비선형 직류 전압이 출력되므로 이를 사용자가 원하는 다양한 형태의 전력으로 변환 및 제어하기 위한 PCS의 사용은 필수적이다. 또한 사용되는 PCS의 효율과 신뢰성은 전체 발전 시스템의 효율과 신뢰성에 큰 영향을 미치므로 PCS는 반드시 고효율, 고성능, 고신뢰성을 가질 수 있도록 설계되고 운전되어야 한다.

이상의 응용분야에서 사용되는 다양한 연료전지 중에서 고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 비록 백금 촉매의 고비용성에도 불구하고 연료 전지 스택의 간단한 구조 및 상온에서 운전이 가능하다는 최고의 장점을 가지고 있으므로 최근에는 분산 전

원 및 발전용과 운송용 부문에서 200kW급까지 사용 영역을 점차 넓히고 있다 [2],[8],[9].

특히 철도 차량 및 자동차와 같은 운송용 응용 분야에서 연료 전지 시스템을 구성하기 위해서는 PEMFC를 사용하는 것은 일반적이다. 또한 이러한 분야에서의 사용 조건에 힘입어 PEMFC에 사용되는 백금(Pt) 촉매를 백금 합금 (Pt Alloy) 및 백금 충전제 (Pt Loading)로 변경하려는 연구도 진행되고 있다. 이에 따라 PEMFC의 단점으로 지적되어 온 연료 전지 스택의 가격 면에서도 많은 변화가 예상된다. 그 한 예로 미국 DOE의 Freedom CAR 프로젝트에서는 2005년의 연료 전지 스택의 단가를 kWe당 65\$에서 2015년에 kWe당 15\$으로 감소될 것으로 예상되며 이에 따라 전체 시스템의 비용 또한 2005년에 kWe당 125\$에서 2015년까지 30\$로 인하될 것으로 예상된다 [3]. 이러한 연료 전지 발전 시스템의 발전 방향으로 본다면 PEMFC 연료 전지의 가격은 더 이상 문제점이 되지 않고 오히려 전체 시스템 용량에 대한 적합성을 고려해야 한다. 현재까지 상용화된 PEMFC 단일 스택의 최고 용량이 150kW정도 내외로 제한적이라는 점에서 고용량 발전 및 대규모 운송 분야에서는 PEMFC를 병렬 운전하여 시스템을 구성하는 것이 더욱 중요한 문제이다 [4]. 이러한 관점에서 본다면 전체 시스템의 신뢰성을 높이기 위해서는 적절한 병렬 운전 기법이 필요하며 PEMFC 병렬 운전 기법은 각각의 상이한 PEMFC 스택의 운전 조건과 출력 전압 특성에 맞도록 적절하게 구성되어야 한다.

일반적인 PEMFC 스택에서 출력 전류나 부하 분배가 같은 경우라도 PEMFC 스택에서 출력되는 정격 전압 범위는 항상 다르게 출력된다. PEMFC 스택 설치 매뉴얼에 따르면, PEMFC 스택의 출력 전압은 정격 전압 값의 $\pm 5\%$ 일 때를 정상 상태로 정의한다. 따라서 PEMFC 스택의 출력 전압에서는 최대 10%의 전압 차이가 생길 수 있다 [13]. 또한 병렬 운전시 병렬 연결되는 N개의 PEMFC 스택 내에서는 연

* 정 회 원 : (주) 에이디티 수석 연구원 · 공박

E-mail : hskang@adtech21.com

접수일자 : 2009년 7월 23일

최종완료 : 2009년 8월 12일

료 주입 속도, 물 온도, 출력 전압, 열 손실 등이 서로 같지 않으며 이와 같이 실제적으로 문제가 되고 있는 사항 중, 특히 각 PEMFC의 출력 전압이 서로 다르다는 점에서 기존의 전류 분배 방법과는 제어 기법이 달라져야 한다.

연료 전지 스택의 수가 증가할수록 연료 전지 스택 내에서는 능동적인 전력 분배 기법이 적용되어야 하지만 연료 전지 스택간의 각각 상이한 특성들로 인해 이러한 병렬 운전은 더욱 복잡해지고 때로는 제어하기 힘들어진다. 따라서 PEMFC 스택의 병렬 운전 시 PCS의 입력 전압은 각각의 스택에 따라 서로 다른 값을 가지게 되며 이러한 전압의 차이는 연료 전지 스택간의 출력 전력의 차이가 발생하는 원인이 된다. 각각의 연료 전지 스택 간의 출력 전력의 차이는 병렬 운전되는 스택간의 출력 불평형을 야기하며 스택간의 온도 불평형의 원인이 된다. 일반적으로 스택의 온도가 정격 온도 이상으로 상승하거나 출력 전류 값이 정격 이상으로 지속되는 경우 스택의 수명은 급격히 감소하며 때로는 전체 수명의 1/2까지도 감소하게 된다.

본 논문에서는 이상에서 언급한 바와 같은 대용량 운송 및 발전 시스템의 설계 및 운전에 적용하기 위하여 병렬 연결된 PEMFC 시스템에 적합한 전력 분배 기법을 통한 병렬 운전 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 PCS에서의 입력 전력 제어 기법을 사용하여 간단한 구조의 전력 분배 기법을 제안한다. 제안된 병렬 운전 기법은 multi-string 형태의 주 제어기와 종속 제어기로 구성된 PCS 제어기를 이용하여 전체 PCS의 병렬 제어를 수행하도록 설계하였다. 이와 같은 병렬 제어 기법을 이용하여 병렬 연결된 각각의 연료 전지 스택의 출력 전력은 기존의 일반적인 전류 분배 기법을 사용하는 제어기의 병렬 운전시보다 균일하게 제어된다. 또한 제안한 PEMFC 병렬 운전 기법을 사용하는 multi-string 형태의 PCS를 제작하여 제안한 알고리즘의 타당성을 검토하였다. 이상의 시험 및 시뮬레이션 조건에서 각각 병렬 연결된 연료 전지 출력 전압의 최소치와 최대치를 모의하기 위하여서 각각의 입력 전원으로 별도의 dc 전원을 사용하였으며 이 각각의 입력 전압을 변동시켜서 서로 상이한 연료 전지 스택 전압을 모의하고 제안된 병렬 운전 알고리즘의 타당성을 실험을 통해 검증하였다.

2. PEMFC의 동작원리 및 등가 회로

2.1 동작 원리

PEMFC의 동작원리를 이해하기 위하여서는 기본 구조의 설명이 필요하다. 그림 1은 일반적인 PEMFC 단위 셀의 구조를 보여준다. 중앙에 고분자 전해질 막 (Membrane) 이 있고, 전해질 막의 양쪽에 연료극 (Anode)과 공기극 (Cathode)의 두 전극 (Electrode)이 위치한다. 이것은 일반적으로 일체형으로 제작되고 막-전극 접합체 (Membrane Electrode Assembly, MEA)라고 하며 전해질로는 대부분 수소이온에 대해서만 전도도를 가지는 나피온 (Nafion)이 사용된다. 전극 양쪽으로는 연료의 공급을 고르게 분포시키기 위한 가스 확산층 (Gas Diffusion Layer, GDL)이 존재한다. 연료 전지에서 분리판은 반응물을 공급하고, 생성물인

물을 제거하며 생성된 전자를 외부로 이동할 수 있게 해주는 집전체의 역할을 수행한다. 이에 따라 분리판 내부의 유로 형상 설계는 연료전지 성능에서 매우 중요하다.

PEMFC의 연료극에서는 산화반응이 발생한다. 공급된 수소는 수소이온 (H+)과 전자 (e-)로 분리되고 수소 이온은 전해질 막을 통해서 산소극으로 이동하여 산소극에서 환원 반응이 발생한다. 또한 분리된 전자는 집전판을 통해 외부 회로로 이동하며 이러한 일련의 과정을 통해 전류가 발생한다. 산소극에서는 산소와 수소이온 및 전류에 의해 이동된 전자의 환원반응이 발생하며 이에 따라 물과 열이 발생된다. 이상의 산소극과 수소극에서 발생하는 화학 반응식은 (1)-(3)과 같다 [1],[5].

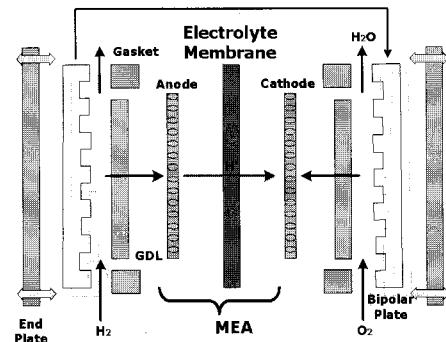
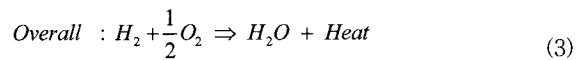
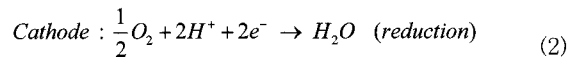
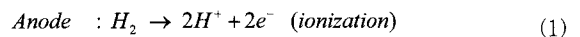


그림 1 PEMFC의 물리적 구조

Fig. 1 Physical structure of PEMFC



2.2 연료전지의 등가 회로

PEMFC 스택의 출력 전압은 평형전위에서 각 분극으로 인한 손실을 뺀 전압으로 나타난다. 스택내에서의 활성화분극과 농도분극은 압력의 함수이며, 출력 전압-전류 특성 역시 압력의 함수이기 때문에 유량 변화에 따른 압력도 PEMFC의 출력 특성을 알기 위하여 고려되어야 할 요소이다. 그러므로 비선형 출력 특성을 갖는 최종적인 PEMFC의 운전전압은 식 (4)와 같이 표현된다. 그림 2는 이러한 수식으로 표현되는 일반적인 PEMFC의 전기적 등가회로를 나타낸다 [5],[7].

$$V_{cell} = E - (i + i_c)r - A \ln \left[\frac{i + i_n}{I_o^{ref} a_c L_c \left(\frac{P_r}{P_r^{ref}} \right)^{\gamma} \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{ref}} \right) \right]} \right] + B \ln \left(1 - \frac{i + i_n}{i_L * P} \right) \quad (4)$$

여기서, $A = \frac{RT}{\alpha n F}$, $B = \frac{RT}{n F}$ 는 타펠기울기 (Tafel slope)이다.

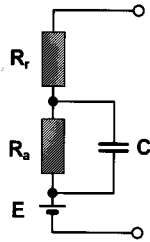


그림 2 PEMFC의 전기적 등가회로
Fig. 2 Electrical equivalent circuit of PEMFC

일반적으로 PEMFC에서 연료를 공급하기 위해서는 개질기 (Reformer), 블로어, 컴프레서, 가습기 (Humidifier), 솔레노이드 밸브, 전극판 (Bipolar plate) 등 다양한 기계적 주변장치 (Mechanical balance of plant, MBOP)를 사용한다. 이에 따라 연료 전지 스택 내부의 전기화학적 반응은 매우 빠른 반면 MBOP에 의한 기계적 시상수는 매우 느리며 또한 이러한 MBOP들의 동작 상태가 일반적인 생산 과정을 거쳐 나오는 상용화된 PEMFC 스택 전체에 일률적으로 같이 적용되기는 곤란하다. 따라서 대용량의 PEMFC 연료 전지 시스템을 구성하기 위해 연료 전지 스택을 병렬로 구성하는 경우 이러한 여러 가지 MBOP 장치의 동작 편차 및 연료 주입량이 미세한 차이는 각각 개별적인 연료 전지 스택의 출력 전압의 차이를 발생시킨다. 이러한 출력 전압의 개별적인 차이로 PEMFC 스택의 정격 전류 및 정격 동작 전압은 개개의 스택별로 상이하게 된다. 하지만 이러한 차이와는 별개로 스택의 정격 출력 전력은 항상 일정하며 이는 개개의 PEMFC 스택의 정격 출력 전류의 차이를 발생한다.

3. Multi-String Type의 PEMFC 병렬 시스템 설계

본 논문에서는 PEMFC와 같이 저전압 출력을 가지는 연료 전지를 단일 역률을 가지도록 계통 연계 발전하기 위하여 일반적인 전압형 dc/dc 컨버터와 전압형 dc/ac 인버터 [6],[10]를 이용하여 병렬 구동되는 PCS를 설계 하였다. 또한 PEMFC 발전 시스템의 발전 용량을 확장하기 위하여 두 개의 PEMFC를 병렬로 운전하였다. 이에 따라 발전 시스템에서 두 개의 PEMFC 스택이 사용되도록 가정하였으며 이상과 같은 병렬 시스템을 구현하기 위하여서 전체 PCS 시스템은 dc link 전압단을 공유하고 각각의 입력 전원을 가지는 multi-string 형태의 dc/dc 컨버터로 구성된 병렬 운전 구성을 가지게 된다. 따라서 전체 PCS 시스템의 구성은 이상에서 설명한 multi-string 형태의 2개의 dc/dc 컨버터와 dc link 전압을 ac 전압으로 변환하여 계통 전원과 단일 역률로 연계 운전을 수행하는 dc/ac 인버터, 그리고 인덕터와 커패시터로 구성된 필터부로 나뉜다.

3.1 Dc/dc 컨버터부의 병렬 입력단의 불평형 분석

두 개의 독립된 전원에 의하여 병렬 운전이 이루어 지는 경우에는 두 개의 PEMFC 스택과 두 개의 dc/dc 컨버터가 필요하다. 이와 같이 2개의 PEMFC 스택을 병렬 운전하기 위해서는 다음과 같은 두가지 방식의 PCS 구성이 가능하다.

하나는 두 개의 PCS를 연결하여 dc/ac 인버터 단에서 병렬 운전을 하는 방식이다. 이러한 경우는 일반적으로 두 개의 PCS를 운전하는 경우와 동일하기 때문에 따로 병렬 운전 알고리즘이 필요하지 않으며 동시에 자체적으로 부하가 완벽하게 분담되기 때문에 각각의 모듈에서는 정격 전압에서 정격 전력을 생산하게 된다. 하지만 이와 같은 경우에서 두 개의 PCS운전은 기본적으로 PCS의 설치 공간, 가격, 그리고 두 대의 PCS 설치에 대한 복잡성이 근본적인 문제가 된다. 이에 따라 나머지 하나의 방법으로 dc/dc 컨버터를 각각의 PEMFC 모듈에 연결하고 dc link단을 공유하여 각각의 PEMFC 스택을 병렬 운전하는 multi-string 형태의 병렬 운전 방식이 연료 전지 시스템의 병렬 운전 시스템 구성에 있어 보다 더 유리하다. 따라서 그림 3에서는 두 개의 PEMFC 스택을 이용한 병렬 발전 시스템의 전체 구성도를 나타낸다. 그림 3과 같이 두 개의 독립된 연료 전지를 사용하는 경우 두 개의 독립된 입력 전원의 임피던스 부정합에 의하여 각각의 전원의 출력 전류에는 불평형이 발생한다.

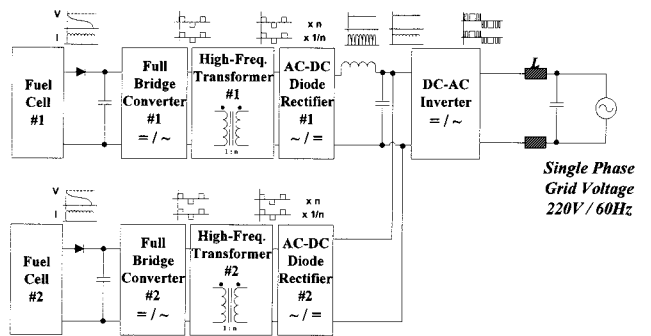


그림 3 두 개의 PEMFC 스택 입력을 가지는 병렬 발전 시스템의 구성도
Fig. 3 Block diagram of parallel generation system with two PEMFC systems

그림 4에서는 병렬로 연결된 연료 전지의 등가 모델을 통해 임피던스 부정합에 의한 출력 전류의 편차를 보인다. 그림 4에서와 같이 두 개의 PEMFC 스택에서 내부의 임피던스가 집중되어 있다고 가정하고 이때의 임피던스를 각각 ZA, ZB로 가정하면 두 개의 연료 전지 스택에서 부하로 흐르는 전류는 각각 식(5), 식(6)과 같이 나타난다. 이때 ZA와 ZB가 같지 않다면 입력 전압과 출력 전압이 동일하더라도 두 개의 스택에서의 입출력 전류는 다르게 되며 이는 동일한 스택에서의 전력 분배의 불평형을 야기한다. 이에 따라 이와 같은 방식에서 dc/dc 컨버터의 병렬 운전의 경우 부하의 분배에 따른 출력 전류의 분배를 통해 스택의 정격 전력 내에서 운전되도록 적절히 제어하는 알고리즘이 필요하다.

$$I_A = \frac{V_{FC1} - I_B Z_L}{Z_A + Z_L} \tag{5}$$

$$I_B = \frac{V_{FC2} - I_A Z_L}{Z_B + Z_L} \tag{6}$$

여기서 V_{FC1}과 V_{FC2}는 각각 PEMFC 스택의 출력 전압,

I_A 와 I_B 는 각각의 스택의 출력 전류 Z_A 와 Z_B 는 각각의 스택의 내부 임피던스이고 Z_L 은 시스템의 등가 부하이다.

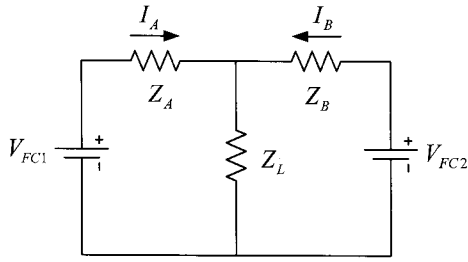


그림 4 병렬 연결된 PEMFC 입력의 간단한 등가 회로
 Fig. 4 Equivalent model of parallel operated PEMFC Stack A and B

3.2 PEMFC 발전 시스템의 병렬 운전 제어기 설계

그림 3에서 보이는 바와 같이 일반적인 multi-string 형태의 컨버터 병렬 운전에서 전류 제어기의 지령 값은 N대의 컨버터의 경우 1/N의 전류 지령치를 각각 전류 제어기의 지령 값으로 사용한다. 따라서 병렬로 연결되는 입력 전원의 갯수가 증가 할 때는 multi-string 형태의 종속 제어기의 갯수가 늘어나게 된다. 병렬 운전 되는 PEMFC의 PCS 제어기는 주 제어기와 종속 제어기로 이루어진다. 주 제어기는 안쪽 루프에 평균 전류 제어기를 가지고 외부 루프에 전압 제어기를 가지도록 구성되고, 전압 제어기의 출력은 전류 제어기의 전류 지령 값으로 사용된다. 종속 제어기는 오직 전류 제어기만을 가지며 multi-string 형태의 PCS 전류 증폭기 역할을 한다. 이러한 형태의 간단한 2병렬 구조의 PCS 제어 블록은 그림 5에 나타내어진다.

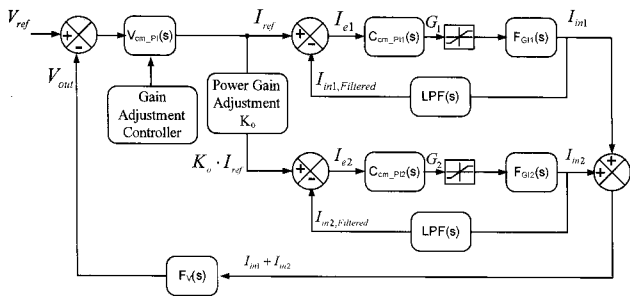


그림 5 분산 발전 시스템에서의 병렬 연결된 PCS 제어블럭
 Fig. 5 Control scheme for parallel PCS operation of distributed generation

그림 5에서는 PEMFC 스택의 병렬 운전을 위하여 전압 제어기를 구성하였다. 병렬 운전을 위하여 구성된 전압 제어기의 출력은 각각의 PEMFC 스택의 출력 전류의 평균치와 비교하여 전류 제어기를 구성하고 각각의 전류를 이용하여 그림 3에서 보이는 바와 같이 병렬 운전 시스템의 제어를 구성한다. 두 개의 컨버터를 이용한 multi-string 형태의 컨버터의 출력 전압은 공통의 dc link 커패시터 단의 전압으로 나타나기 때문에 주 제어기에서 전압 제어와 전류 제어

를 모두 수행하고 종속 제어기에서는 전류 제어만을 수행하게 된다. 전류 제어기의 경우 내부 제어기로 구성되므로 외부 제어기로 구성된 전압 제어기에 비해 빠른 제어 응답과 계인을 가지게 되며 차단 주파수 또한 전압 제어기에 비해 3배 이상 빠르게 구성된다. 이러한 보상을 통해 각각의 내부 전류 제어기는 두 dc/dc 컨버터 부하의 전력 분배를 구성한다. 이상의 제어기의 폐회로 상태 함수는 식 (7)과 식 (8)과 같이 얻어진다.

$$\frac{V_{out}}{V_{ref}} = \frac{F_i(s) \cdot F_v(s) \cdot V_{cm_pi}(s)}{1 + F_i(s) \cdot F_v(s) \cdot V_{cm_pi}(s)} \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} F_i(s) &= F_{i1}(s) + F_{i2}(s) \\ &= \frac{C_{cm_pi1}(s) \cdot F_{gi1}(s)}{1 + C_{cm_pi1}(s) \cdot F_{gi1}(s) \cdot LPF(s)} \\ &\quad + K_o \cdot \frac{C_{cm_pi2}(s) \cdot F_{gi2}(s)}{1 + C_{cm_pi2}(s) \cdot F_{gi2}(s) \cdot LPF(s)} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 PCS에서 multi-string 형태의 병렬 운전 제어하는 경우 두 dc/dc 컨버터의 제어기 중 하나를 주 제어기로 설정하면 나머지 하나는 자동적으로 종속 제어기로 설정되어야 한다. 본 논문에서는 주 제어기를 가지는 PCS의 dc/dc 컨버터의 경우 전압 제어기는 신호 처리 과정을 통하여 디지털 제어기로 구현하고 전류 제어기의 경우 빠른 속도 응답을 위해 아날로그 제어기로 구성한다. 따라서 이러한 전류 제어기의 입력은 주 제어기에서 D/A 컨버터를 이용하여 각각의 주 제어기와 종속 제어기 내의 아날로그 전류 제어기의 입력으로 연결한다. 결과적으로 이상과 같이 구성된 PCS의 hybrid 제어기는 빠른 응답을 가지는 아날로그 전류 제어기와 디지털 전압 제어기를 가지는 PCS 주 제어기와 아날로그 전류 제어기만을 가지는 PCS 종속 제어기로 구성된다.

4. PEMFC 병렬 운전을 위한 전력 분배 알고리즘

병렬 PEMFC 발전의 경우 각각의 연료 전지 스택의 수명을 안정화시키기 위하여 각각의 스택에 같은 크기의 부하 및 전력이 분배되도록 PCS를 제어하는 것이 필수적이다. 따라서 3.2절에서 설명한 바와 같이 PCS 내부의 multi-string 형태의 컨버터를 사용하여 dc link 전압 제어를 수행하는 동시에 전력 분배 제어를 구현하여야 한다. 먼저 전압 제어를 위해서 dc/dc 컨버터의 제어기는 내부의 전류 제어기와 외부의 전압 제어기로 구성된다. 이상의 두 가지 제어기를 가지는 PCS의 dc/dc 컨버터는 전압 제어기만을 가지는 기존의 dc/dc 컨버터와 비교하였을 때, 평균 전류 제어기를 가지는 PCS는 부하 변동에 대해 빠른 응답과 신뢰성을 가진다. 따라서 PEMFC 병렬 발전 시스템과 같이 PCS 병렬 운전을 하는 경우 각각의 연료 전지 스택의 부하 분배에 있어서 더 우수한 특성을 가진다. 이러한 전류 제어기는 [10] ~ [12]에 나와 있는 전류형 PCS 내부의 dc/dc 컨버터의 순시 입력

전류 제어기와 유사하다.

그림 6에서는 일반적인 PEMFC 병렬 발전 시스템에서 multi-string 형태의 PCS를 구성할 때 부하의 균등한 분배를 위한 주 제어기와 종속 제어기의 제어 구성도를 보인다. 그림 6의 주 제어기는 전압 제어를 수행하고 종속 제어기에서 전류 제어를 수행하며 물리적으로 두 개의 PEMFC 스택을 병렬 운전하기 위하여 두 개의 제어기로 나누어진다. 주 제어기의 전압 제어기 출력은 주 제어기와 종속 제어기 모두의 전류 제어기의 지령치로 설정되며 이에 따라 주 제어기와 종속 제어기의 전류는 같게 제어된다. 하지만 병렬 연결된 PEMFC 스택의 출력 전압이 달라지면 두 제어기의 출력 전류가 균일하게 제어된다고 해도 병렬 연결된 PEMFC 스택의 출력은 일정하게 유지되지 않는다. 또한 입력 전압 값의 변동으로 인해 dc/dc 컨버터의 전압 비가 달라지므로 각각의 전류를 일정하게 제어하기 위한 제어기의 게인이 달라지지 않으면 전류 제어가 힘들어진다. 따라서 multi-string 형태의 병렬 운전용 PCS에서 두 대의 dc/dc 컨버터의 출력 파워가 같게 하기 위해서 평균 입력전류를 동일하게 하는 것으로는 충분치 않다. 이와 같이 서로 다른 특성을 가지는 PEMFC 스택에서 필요한 발전량을 출력하기 위해서는 그림 7과 같이 각각의 PEMFC 스택에 출력 파워 지령을 분배함으로써 두 대 컨버터의 출력 파워를 같게 제어하며 동시에 두 PEMFC 스택의 출력 파워를 동일하게 할 수 있다.

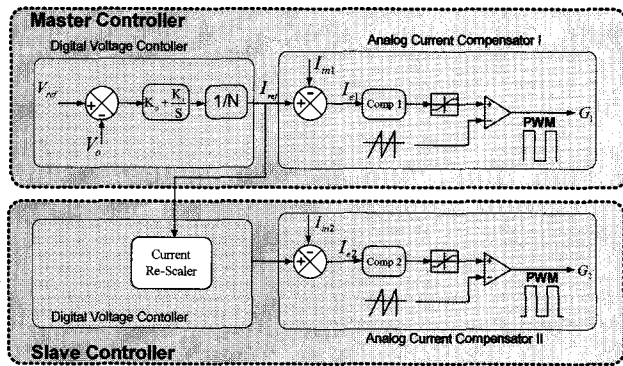


그림 6 PEMFC 발전 시스템에서 병렬 연결된 dc/dc 컨버터 시스템을 위한 일반적인 전류 분배 기법

Fig. 6 Conventional current-sharing algorithm for parallel operation of two dc-dc converters in PEMFC generation system

그림 7에서는 제안된 전력분배 알고리즘을 나타낸다. 일반적으로 병렬 운전되는 각각의 스택의 전압은 거의 유사하지만 실제로는 전압 차이가 존재하며 이 값은 최대 정격 전압의 10%까지 된다. 또한 지속적인 발전으로 인해 스택 자체의 성능저하 및 노후화, 연료전지 성능차이, 초기 출력 전압 차이 등이 결과적으로 스택 전압 불균형을 초래한다. 이러한 점에 의해 출력 전류가 같을지라도 실제 스택에서 출력되는 전력은 달라진다. 따라서 그림 7과 같이 제안된 전력 분배 알고리즘을 이용하면 이와 같은 경우에도 각각의 스택에서 균일한 전력을 출력하도록 제어한다.

그림 7에서 보이는 바와 같이 제안된 제어기의 전력 지

령치는 주 제어기의 전압 제어기에서 생성되며, 생성된 전류 지령은 전력 지령으로 변환되어 주 제어기의 d/a 컨버터를 통해 종속 제어기를 가지는 dc/dc 컨버터로 전달된다. 결과적으로 주 제어기에서 전달되는 전력 지령치는 종속 제어기에서 입력 전압을 고려하여 종속 제어기에 적합한 전류 지령치로 변경된다. 이와 같이 종속 제어기의 아날로그 전류 제어기에 맞는 전류 지령치로 변환된 전류 값은 종속 제어기의 전류 제어기의 입력으로 사용된다. 주 제어기와 종속 제어기의 아날로그 전류 제어기에서는 전류 제어기의 출력을 톱니파와 비교하여 전압 듀티에 적합한 pwm 신호로 생성하고 pwm신호는 multi-string 형태로 연결된 dc/dc 컨버터의 출력전압을 제어한다. 이상의 전압과 전류는 디지털/아날로그 hybrid 제어기를 통해 제어 된다.

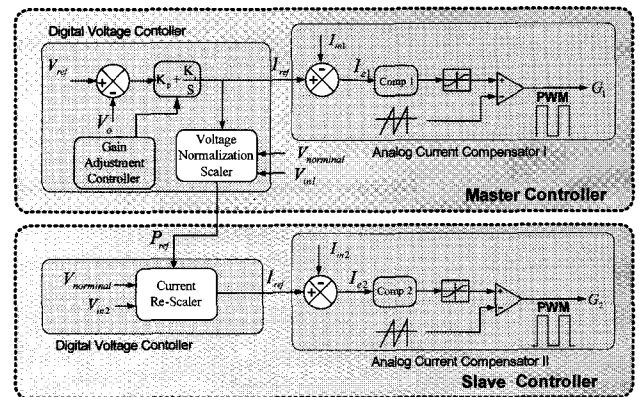


그림 7 PEMFC 발전 시스템에서 병렬 연결된 dc/dc 컨버터 시스템을 위한 제안된 전력 분배 기법

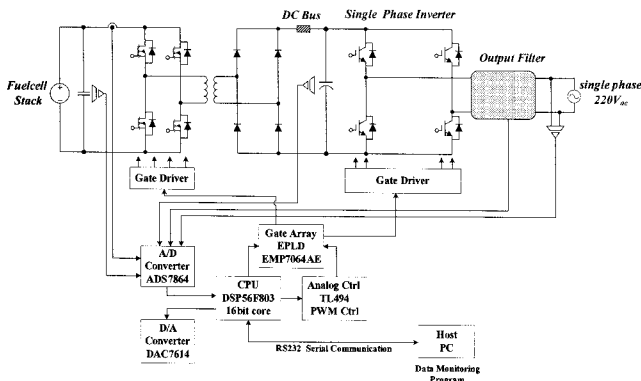
Fig. 7 Fig. 5 Proposed power-sharing algorithm for parallel operation of two dc-dc converters in PEMFC generation system

일반적으로는 전류 제어기의 응답은 아날로그 제어기를 통해 높은 차단 주파수로 설정해야 하고 동시에 전압 제어기의 경우는 전류 제어기 보다 낮은 차단 주파수로 설정 되어야 한다. 따라서 디지털 전압 제어기에 의한 샘플링 시간은 아날로그 전류 제어기의 성능에 영향을 미치지 않는다. 또한 N개 컨버터가 병렬 동작하는 경우 전력 지령치는 1/N 배로 계산된다. 결과적으로 일반적인 전류 분배 제어 알고리즘과 비교하면 새로운 전력 분배 알고리즘은 N개의 병렬 운전시에서도 간단한 구성이 가능하며 각기 다른 PEMFC 전원에서도 전력 분배 알고리즘을 적용하여 동일한 전력 제어가 가능하다.

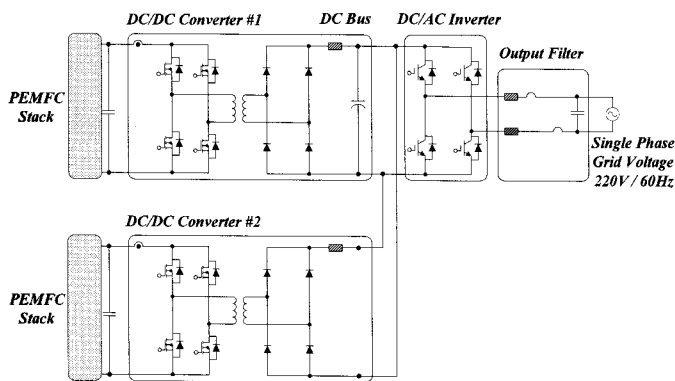
5. PEMFC 병렬 운전시스템 구현 및 실험 결과

그림 8에서는 두 개의 multi-string 형태의 dc/dc 컨버터 입력과 계통 연계를 위한 dc/ac 인버터 출력 구조를 가지는 PEMFC 스택 병렬 운전을 위한 PCS의 구성 블록도이다. 전체 발전 시스템은 1.2kW급의 PEMFC 스택을 2개 병렬 운전함으로써 전체 2kW급으로 모의 제작하여 계통 연계 운전을 수행하였다. 또한 입력으로 사용된 두 개의 PEMFC 스택은 수소 직접 방식으로 구성되었다. 하지만 본 논문은

서는 PEMFC 스택의 입력 전압 변동을 모의하기 위하여 독립된 dc 전원 소스를 사용하여 각각의 입력 전압의 불평형을 모의하였다. 먼저 그림 8의 (a)에서는 일반적인 단상 PCS의 제어기 및 하드웨어 구성도를 보인다. 이러한 두 개의 제어기를 병렬 연결하여 각각 주 제어기와 종속 제어기로 설정하였고 그림 8의 (b)에 보이는 하드웨어의 제어기로 구성하였다. 이에 따라 전체 PEMFC 스택을 이용하여 multi-string 형태의 병렬 운전용 PCS를 구성하면 그림 8의 (b)와 같다. 그림 8의 (b)에서 전체 PEMFC 병렬 운전용 PCS의 구현도를 보인다. 이와 같은 병렬 운전용 PCS는 각각 두 개의 1kW 정격의 dc/dc 컨버터와 계통 연계를 위한 2kW dc/ac 인버터로 구성된다.



(a) 디지털/아나로그 제어기를 가지는 단상 PCS 구성도
(a) Single phase PCS configuration with digital/analog controller



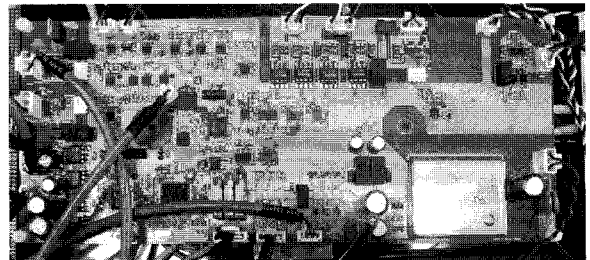
(b) 병렬 운전 시스템 구현도

(b) Experimental diagram of parallel operation system

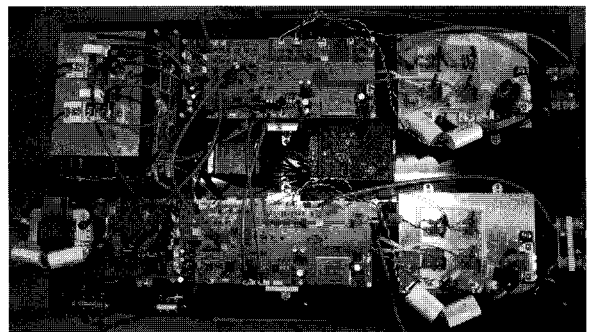
그림 8 PEMFC를 사용한 병렬 운전 발전 시스템 구성도
Fig. 8 Block Diagram of the parallel operation system using PEMFC

또한 그림 9의 (a)에서는 이상에서 사용한 PCS용 제어 보드를 보인다. 제어보드에서는 각각 아나로그 전류 제어기와 디지털 전압 제어기가 모두 설계되어 있는 hybrid 제어기로 구성된다. 이 PCS 시스템에서 제어기들은 각각의 제어 보드의 역할에 따라 주 제어기와 종속 제어기로 나누어지며 주 제어기는 전압 제어와 전류 제어가 모두 허용되고 종속 제어기로 사용되는 경우 전압 제어기는 무시되어 주 제

어기에서의 지령치를 추종하는 아나로그 전류 제어기만이 역할을 수행하도록 설계되어 있다. 이러한 설계 및 상위 제어기와의 통신과 내부 시퀀스 제어를 위해 각각의 제어보드에서는 DSP MC56F803과 아나로그 제어기인 TL494가 장착되어 있다. 이상의 자세한 설계 파라미터는 표 1과 같다.



(a) 56F803과 TL494 제어기를 이용한 PCS 제어보드
(a) Control board with 56F803 & TL494 controller, gate ICs, and sensing units.



(b) 구현된 병렬 운전용 PCS 시스템
(b) PCS of parallel operation system

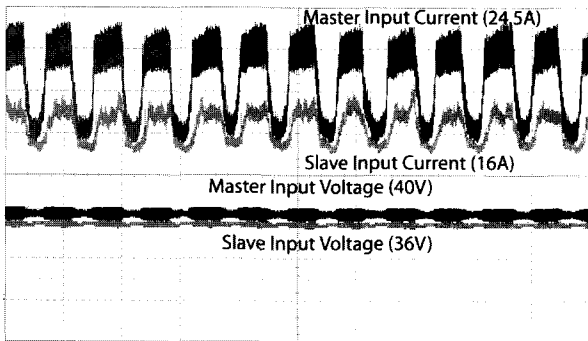
그림 9 PEMFC를 사용한 병렬 운전 발전 시스템 구현
Fig. 9 Implementation of the parallel generation system using PEMFC

표 1 설계 파라미터
Table 1 Design Parameters

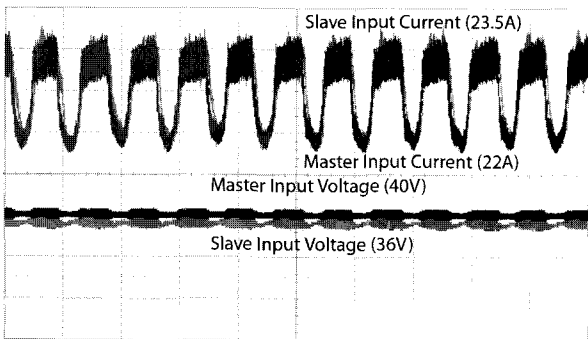
Parameters	Value	Unit
Rated output power	2	kW
Input voltage (PEMFC output voltage)	40~70	V
DC link voltage (dc/dc output voltage)	380	V
Output voltage (dc/ac output voltage)	220	V
Output current (dc/ac output current)	9.1	A
DC-DC converter switching frequency	30	kHz
DC-DC converter Output inductance	800	uH
DC-DC converter Output capacitor	1680	uF
DC-AC inverter switching frequency	10	kHz

그림 10과 그림 11에서는 그림 8과 그림 9에서 보이는 시스템을 사용하여 본 논문에서 제안한 전력 분배 알고리즘을 적용하여 병렬 운전을 수행하는 경우의 실험 결과를 나

타낸다. 그림 10의 실험 조건으로는 multi-string 형태의 PCS 제어기에서 주 제어기와 종속 제어기의 입력 전압 범위가 각각 정격 부하에서 40V와 36V로 10%정도의 오차가 발생한 경우를 가정하여 실험을 수행하였다. 입력 전압이 모두 40V로 일치하는 경우에는 일반적인 전류 분배 알고리즘과 본 논문에서 제안한 전력 분배 알고리즘을 사용하는 경우 모두 동일하게 전류 제어가 원활히 수행되며 각각의 입력 전원의 전력이 균일하게 분배된다. 하지만 입력 전압에 10%의 오차가 발생하는 경우 일반적인 전류 분배 알고리즘을 적용한다면 그림 10의 (a)에서 보이듯이 전류의 분배에 따른 제어가 원활하지 않게 되며 이는 특정한 스택에 전력을 더 배분하는 결과를 가진다. 실험 결과에 보이는 바와 같이 주 제어기의 입력 전원에 종속 제어기 보다 18%정도 더 많은 부하를 분담하는 경우가 발생한다. 따라서 본 논문에서 제안한 전력 분배 알고리즘을 적용한 그림 10의 (b)의 경우에는 전력의 지령에 따라 각각의 스택의 입력 전압에 따라 적합한 전류의 지령이 생성되며 각각의 제어기에서의 제어를 통해 전력의 분배가 원활하게 이루어짐을 알 수 있다. 그림 10의 (b)의 경우 주 제어기와 종속 제어기의 전력 분배비는 거의 동일하며 두 입력 전원이 공급하는 전력의 편차는 5% 이내로 거의 동일하다.



(a) 전류 분배 알고리즘 적용 시 입력 전류와 입력 전압
(a) Conventional Current Sharing Method



(b) 제안된 알고리즘 적용 시 입력 전류와 입력 전압
(b) Proposed Power Sharing Method

그림 10 분산 발전 시스템에 연결된 두 multi-string 형태의 dc/dc 컨버터의 입력 전류와 입력 전압 (10ms/div)

Fig. 10 Input currents and voltages of the multi-string typed two dc-dc converter for distributed generation system

이상의 실험 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 전력 분배 알고리즘의 경우 입력 전압 편차에 의해 발생하는 각각의 입력 전원의 전력 불균형을 최소화한다는 장점을 가진다. 또한 이러한 장점을 바탕으로 각각의 PEMFC 입력 전원의 출력을 정격 전력에서 운전함으로써 정격 이상의 전력에서 운전하는 경우에 발생하는 추가적인 발열로 인한 PEMFC 스택의 수명 저하를 방지하는 효과를 가질 수 있다. 그림 11에서는 이상의 병렬 운전된 PCS를 사용하여 계통에 대략 2kW의 전력을 공급하는 경우 계통의 전압과 계통에 공급되는 전류를 보인다. 실험 결과 PCS에서 단일 역률 제어를 수행하며 전력을 공급하고 있음을 알 수 있다.

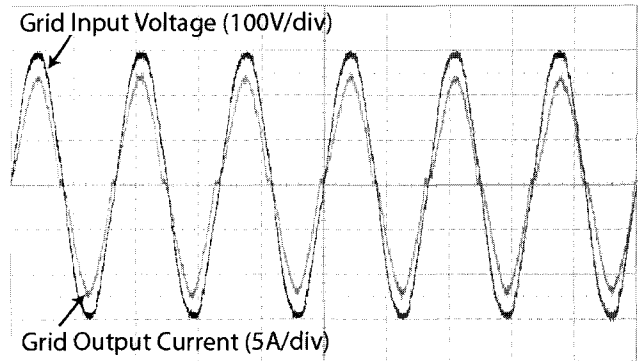


그림 11 분산 발전 시스템에서 PCS 내부 dc/ac 인버터의 계통 전압과 계통 전류 (10ms/div)

Fig. 11 Output grid voltage and output grid current of dc-ac inverter of PCS in distributed generation system (10ms/div)

6. 결 론

본 논문에서는 전력 분배 알고리즘을 사용하여 분산 발전용 PEMFC PCS를 설계하였고 대용량의 PEMFC 발전 시스템에 적합하도록 PEMFC 병렬 운전을 구현하였다. 병렬 연결된 PEMFC 발전 시스템에서는 연료 전지 발전 시스템의 안전성과 신뢰성을 향상시키기 위해 PEMFC 스택의 정격 전력 이내에서 사용하여 스택의 온도를 일정하게 유지하는 것이 가장 중요하며 이에 따라 연료 전지 발전 시스템의 병렬 운전을 구현하기 위해서 PCS의 병렬 운전 알고리즘의 최적설계를 구현하였다. 구현된 PCS의 구조는 multi-string 형태의 병렬 연결 시스템으로 구성하였고 각각의 제어기에 제안된 전력 분배 알고리즘을 적용하였다. 제안된 전력 분배 알고리즘을 적용하면 N개의 PEMFC 스택으로 구성된 대용량 발전 시스템에서도 PEMFC의 병렬 운전 구성이 용이하며 전체 제어가 간단하고 빠른 응답을 가질 수 있다. 또한 기존의 병렬 제어 알고리즘이 단순히 전체 부하의 균일한 분담을 위해 일정한 전류를 분배 제어하는 것과 달리 정격 전력을 유지하도록 각각의 제어기의 전류를 분배하고 제어함으로써 연료 전지 스택의 수명을 유지하는데 중요한 역할을 수행한다. 이상의 제안한 알고리즘을 실험을 통해 검증하였으며 제안한 알고리즘을 적용함에 따라 PEMFC 스택의 안정성과 신뢰성이 향상되며 대용량 시스템에 적합한 병렬 운전 구현이 용이할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] "Fuel cell system explained, 2nd ed," JOHN WIELY & SONS, LTD
- [2] R.K. Ahluwalia, X. Wang, "Fuel cell systems for transportation: Status and trends," Journal of Power Source, vol. 177(2008), pp.167-176, 2008.
- [3] A.R. Miller, K.S. Hess, D.L. Barnes, T.L. Erickson, "System design of a large fuel cell hybrid locomotive," Journal of Power Source, vol. 176(2008), pp.499-514, 2008.
- [4] J. Stumper, C. Stone, "Recent advances in fuel cell technology at Ballard," Journal of Power Source, vol. 176(2008), pp.468-476, 2008.
- [5] G.Y. Choe, J.S. Kim, H.S. Kang, B.K. Lee, W.Y. Lee, "PEMFC modeling for high efficiency fuel cell BOP," ICEMS, 2007
- [6] D.K. Choi, B. K. Lee, S.W. Choi, C.Y. Won, D.W. Yoo, "A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid systems," Journal of Power Source, vol. 152(2005), pp.245-255, 2005.
- [7] T.W. Lee, J. Hur, B.K. Lee, C.Y. Won, "Design of a fuel cell generation system using a PEMFC simulator," Electric Power Systems Research, vol.77 (2007), pp.1257-1264, 2007.
- [8] H.S. Chu, F. Tsau, Y.Y. Yan, K.L. Hsueh, F.L. Chen, "The development of a small PEMFC combined heat and power system," Journal of Power Source, vol. 176(2008), pp.499-514, 2008.
- [9] L.A. Riascos, M.G. Simoes, P.E. Miyagi, "On-line fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells," Journal of Power Source, vol. 175(2008), pp.419-429, 2008.
- [10] M. Mohr, F.W. Fuchs, "Voltage Fed Current Fed Full Bridge Converter for the Use in Three Phase Grid Connected Fuel Cell Systems," IPEMC, vol. 1, pp.1-7, 2006
- [11] X. Kong, A.M. Khambadkone, "Analysis and Implementation of a High Efficiency, Interleaved Current-fed Full Bridge Converter for Fuel Cell System," PEDS 2005, vol. 1, pp.474-479, 2005
- [12] X. Jiang, X. Wen, H. Xu, "Study on Isolated Boost Full Bridge Converter in FCEV," IPEC2005, vol.2, pp.827-830, 2005
- [13] Ballard Nexa ® Power module user's manual

저 자 소 개



강 현 수 (康鉉受)

1971년 9월 23일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2009년 8월 성균관대학교 전자 전기 컴퓨터공학과 졸업 (공학박) 1996년 3월-1999년 11월 LG 산전 중앙연구소 주임 연구원. 1999년 12월-현재 (주)에이디티 수석 연구원.

Tel : 031-459-5051

E-mail : hskang@adetch21.com