

대용량 MCFC 발전시스템을 이용한 비상부하 전력 공급 장치 설계 및 제어방법

金東熙[†], 金鍾秀^{**}, 崔奎英^{**}, 李秉國[†], 郭哲勳^{***}

Design and Control Method for Critical Load Supply Equipment using MCFC Electricity Generation Systems

Dong-Hee Kim, Jong-Soo Kim, Gyu-Yeong Choe, Byoung-Kuk Lee, and Cheol-Hoon Kawk

요 약

본 논문에서는 동특성이 느린 용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) 스택을 사용하여 계통 사고 시 추가적인 UPS (Uninterruptible Power Supply) 없이 비상부하 (Critical Load)로 전력 공급이 가능하고, 사고 발생 후에도 정격전력으로 발전 가능한 비상부하 추종형 백업 시스템을 제안한다. 제안된 MCFC 발전 시스템용 비상부하 추종형 백업 시스템은 3상 인버터로 구성된 PCS (Power Conditioning System) 출력단에 3상 PWM 컨버터를 연결한 구조이고, 비상부하 추종이 가능한 추가적인 제어 알고리즘을 가지는 Load Leveler를 제어한다. 제안된 비상부하 추종형 백업 시스템의 회로와 제어 알고리즘의 타당성을 5kW 기반의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

ABSTRACT

This paper proposes critical load following back-up system using MCFC stack. This system enables MCFC generation system to supply power to critical load without UPS and to generate rated power under grid fault state. This back-up system includes 'Load Leveler' that is connected with 3-phase inverter and is controlled by additional algorithm that includes critical load following. The proposed system and algorithm are verified by computer simulation based on 5kW system.

Key Words : MCFC, Grid-Connected, Stand-alone, UPS, Load Leveler, Intentional-islanding

1. 서 론

최근 화석에너지 고갈과 유가 상승에 맞물려 전력 수요가 급격히 증가함에 따라 새로운 대체 에너지에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있고, 환경오염에 대한

인식도 증가하여 친환경적인 대체 에너지에 대한 관심이 매우 높다. 이 중 여러 가지 장점으로 인해, 연료전지는 수소경제 체제가 도래하고 있는 지금의 시점에서 가장 전망 좋은 대체에너지라 볼 수 있다^{[1],[2]}. 연료전지 중 MCFC는 고온형 연료전지 중 하나로 고효율로 동작할 수 있고 고온이기 때문에 열원으로 사용하여 열병합 발전 형태로도 사용할 수 있다. 하지만 계통과 연계된 형태로 운전하는 경우, 계통에 사고가 발생하게 되면 단독운전 방지운전이 동작되고, MCFC는 출력을 내보내지 않게 된다. MCFC의 예열 온도는 상승률은 20°C/h-30°C/h로, 전원이 오프 되면 MCFC의 동작

[†]교신저자 : 정회원, 성균관대 정보통신공학부 부교수

E-mail : bkleesku@skku.edu

^{**}학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정

^{***}정회원, 성균관대 정보통신공학부 박사과정

^{***}정회원, YPP(주) 상무, 공학박사

접수일자 : 2010. 8. 13

1차 심사 : 2010. 9. 6

2차 심사 : 2010. 10. 28

심사완료 : 2010. 11. 2

이 멈추게 되어 온도가 떨어지게 되므로 계통이 정상이 되면 다시 동작 온도까지 예열 시간이 필요하고, 또한 시스템 출력을 내보내지 않으므로 고온형 연료전지의 특성상 느린 전력 상승률로 인해 시스템 정격 출력까지 가동하는데 총 1-2일의 시간이 소요되기 때문에, 정전사고가 발생해도 MCFC의 예열은 반드시 필요하고 계통에서 전력을 공급 받지 못하기 때문에 다른 방법으로 전력 수급이 필요하다^[3].

다른 한편으로는 전기 에너지품질에 대한 요구가 늘어나고 있다. 데이터 서버, 의료기기 및 반도체 공정 같은 경우 정전이 없는 고품질의 전력을 공급받지 못하면 인명 피해나 천문학적 손실이 발생하기 때문에 UPS의 수요가 늘어나고 있다. 특히 삼성전자 기흥반도체 공정의 정전 사고는 짧은 정전 사고로 인해 천문학적 손실이 발생하였다. 데이터 서버나 의료기기 같은 경우는 일반적인 UPS로 전력 공급이 가능하지만, 반도체 공정 같은 대규모의 시설은 단순한 UPS 시설로 정전 문제를 쉽게 해결 할 수 없는 실정이다.

이러한 문제점을 해결 할 수 있는 방안으로 MCFC 발전을 분산 전원으로 이용해 상시 발전 시스템으로 사용하고 계통에 사고가 발생할 경우 계통과 차단되어 비상부하로 전력을 공급한다면, 분산전원으로서의 역할과 계통 이상 시 비상부하로 지속적인 전력을 공급할 수 있기 때문에 발전 용량에 따라 대규모의 반도체 공정의 정전사고를 방지할 수 있는 UPS 기능까지 수행할 수 있다. 또한 상시로 동작을 하기 때문에 정상 동작 유무의 체크도 가능하여 정전에 대한 신뢰성도 만족할 수 있고, 발전과 UPS 기능을 하기 때문에 가동 효율을 극대화 할 수 있다. 하지만 고온형 연료전지는 발전을 위해 MBOP (Mechanical Balance of Plant)에서 reforming 과정과 heat balance 과정을 거쳐야 하기 때문에 부하 추종능력이 상당히 떨어지는 단점이 있다^{[4],[5]}. 그러므로 계통사고 시 연료전지가 비상 부하에 전력을 공급할 경우, 비상 부하의 전력 이용량이 변동 할 경우 연료전지 발전의 느린 동특성 때문에 빠른 부하 추종을 할 수 없고, 이에 따라 발전량이 남게 되는 경우가 발생한다^[6].

본 논문에서는 기존의 MCFC 발전시스템의 동작 및 한계점을 소개하고 이를 극복할 수 있는 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템은 연료전지 시스템을 상시 발전을 하는 분산전원으로 이용하고 계통사고 시 비상부하로 전력을 공급하는 UPS 기능까지 수행하는 백업 시스템이며, 계통이 정상 상태에서 사고가 발생한 뒤 이를 백업하는 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 모의

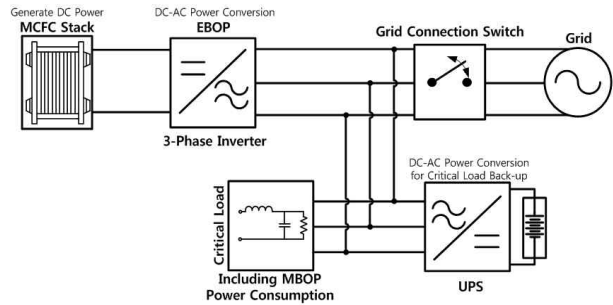


그림 1 기존 MCFC 발전 시스템 구성도
Fig. 1 Block diagram of conventional MCFC generation system

하여, 백업 시스템이 계통의 사고에 따른 전체 시스템을 충분히 담당 할 수 있음을 검증 하였다.

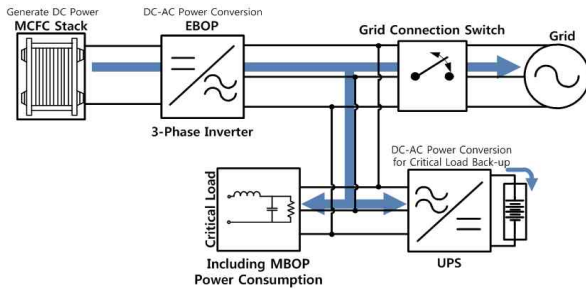
2. 비상부하 백업시스템 설계 및 제어

2.1 기존 MCFC 발전시스템

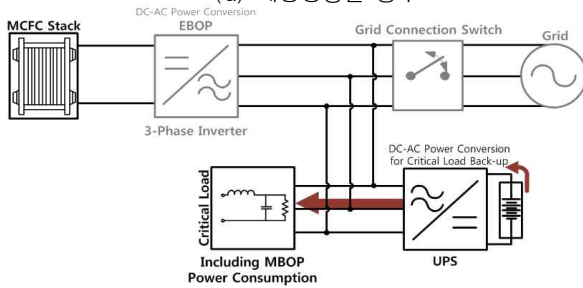
MCFC 발전 시스템은 대용량 및 600°C 이상의 고온으로 운전되며 40% 이상의 높은 효율로 발전을 한다. 하지만 고온의 동작 조건을 유지하기 위해 MBOP에는 시스템의 heat balance 동작을 하게 되므로 정상 동작 중에도 고온 유지하기 때문에 MBOP는 일종의 부하로 동작하게 된다. 따라서 기존 MCFC 발전 시스템의 개념도는 그림 1과 같이 직류 전력을 발전하는 MCFC 스택, 출력된 직류 전력을 교류로 변환할 수 있는 EBOP (Electrical Balance of Plant), 교류 전력을 이용하여 부하로 동작하는 MBOP 및 계통과 연계 유무를 결정짓는 스위치로 구성되고 계통 사고 시 전력을 공급받기 위해 UPS가 추가된다.

그림 2는 계통 상태에 따른 기존 시스템의 전력 흐름도로 계통이 정상일 경우는 발전된 전력이 MBOP에서 heat balance를 맞추기 위해 소비되고 계통사고 시 비상부하 및 MBOP로 전력공급을 위해 배터리에 충전되며 나머지 전력을 계통으로 공급된다. 이는 그림 2-(a)로 표현된다.

계통에 사고가 발생할 경우 시스템은 계통과 차단되고 MCFC는 MBOP의 heat balance 동작을 통해 MCFC스택 온도유지를 하게 된다. 이때 전력은 UPS가 충전된 배터리의 에너지를 전력변환을 통해 공급받고 전력흐름은 그림 2-(b)로 표현되고 동작을 멈춘 기기는 회색으로 표시하였다. 계통사고 시 UPS의 전력 공급 능력은 배터리 용량으로 정해진다.



(a) 계통정상일 경우



(b) 계통사고일 경우

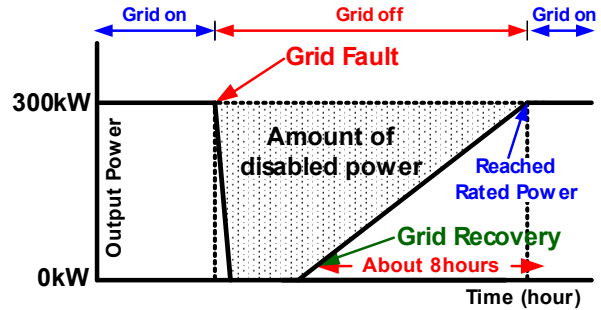
그림 2 기존 시스템 전력 흐름도

Fig. 2 Power flow of conventional system

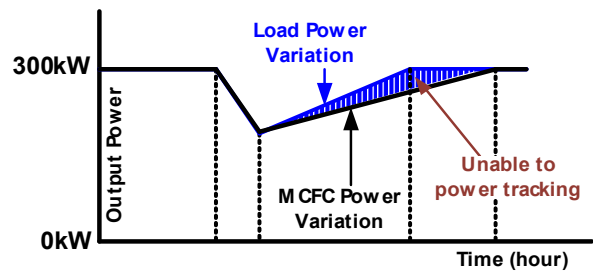
(a) Grid normal case (b) Grid fault case

2.1.1 기존 시스템의 한계점

FCE社의 DFC300 제품은 최대출력이 300kW이고 최대출력을 발전하기 위해 15kW 정도가 MBOP에서 지속적으로 소비된다^[7]. 시스템의 온도 유지가 되지 못하면 앞서 언급 하였듯이 MBOP의 예열 온도 상승률이 20°C/h-30°C/h이기 때문에 효율적인 운전을 위해 출력이 없더라도 온도 유지는 반드시 필요하다. 또한 MCFC는 부하변동에 따른 스택의 온도변화에 의한 구성품의 열충격 방지를 위해 출력전력 변화량을 0.17%/min로 제한하고 있고, DFC300의 경우에는 분당 최대 0.51kW의 부하 변동이 가능하다. 이에 따라 MCFC 발전을 계통연계형으로 운전할 경우 정상 동작의 경우에는 문제가 되지 않지만 계통에 사고가 발생하면 anti-islanding 운전에서 따라 계통과 분리되고 MCFC 및 EBOP는 동작을 멈추게 되어, MBOP에서 시스템의 온도 유지를 위해 15kW 정도의 최소의 전력을 UPS를 통해 공급 받는다. 따라서 계통에 사고가 제거되어 복전이 되면 약 588분 동안 300kW의 출력 상승이 있어야지만 최대 전력으로 재발전 가능하다. 이에 따라 MCFC를 독립운전으로 사용할 경우에는 부하의 순간적인 변화로 인해 일반적인 방법으로는 MCFC 발전 시스템을 독립적으로 사용할 수 없다. 위의 두 가지 경우를 그림 3-(a)와 3-(b)로 나타내었다.



(a) 계통연계 운전



(b) 독립 운전

그림 3 계통연계 유무에 따른 MCFC 출력 변화 양상

Fig. 3 MCFC output power variation according to existence and nonexistence of grid connection (a) Grid-Connected operation, (b) Stand-alone operation

따라서 다른 전력변환장치의 추가 없이 MCFC 발전을 계통연계 운전으로 사용할 경우 계통 사고 시 정상 동작까지 장치간의 지연시간이 존재하고, 독립운전으로 사용할 경우는 부하의 전력소비 변화량이 느린 시스템만 적용가능하다. 또한 비상부하로 전력을 공급 능력은 배터리의 용량으로 결정되고 배터리가 전부 방전되었을 경우에는 더 이상 비상부하로 전력공급이 이루어질 수 없다.

2.1.2 제안한 시스템

기존의 MCFC 시스템의 계통사고 시 한계점을 극복하기 위해 이를 백업할 수 있는 장치를 추가하여 전체 시스템을 구성하였다. 그림 4는 MCFC 발전 및 백업 시스템 구성도로 그림 1의 기존 시스템에 백업 시스템 및 스테틱 스위치가 추가되어 구성된다. 이때 백업 시스템은 계통사고 시 MCFC 발전시스템의 한계를 극복할 수 있게 만들 수 있는 전력변환장치로 구성되어 있으며 자세한 설명은 2.2절에서 언급한다. 스테틱 스위치는 MCFC가 계통사고 시 단독운전이 가능하도록 계통으로의 전력 유입을 차단하고, 이에 따라 계통의 상

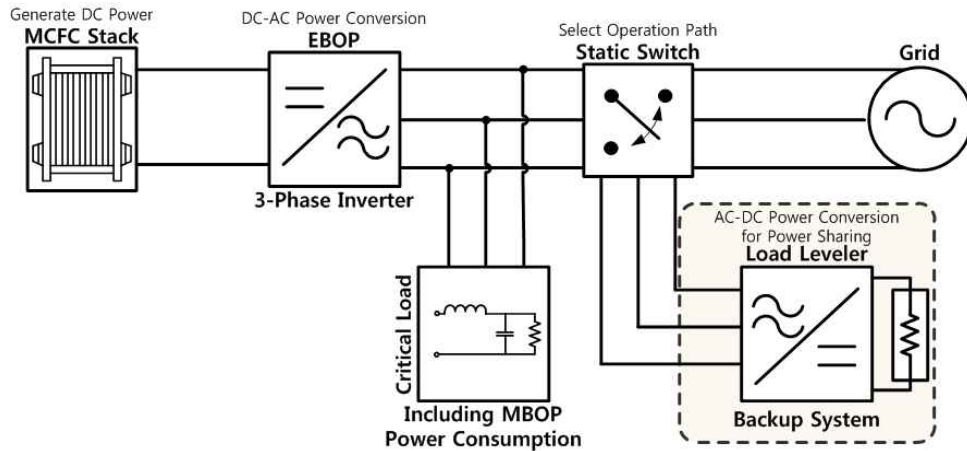


그림 4 제안한 시스템 구성도
Fig. 4 Block diagram of proposed system

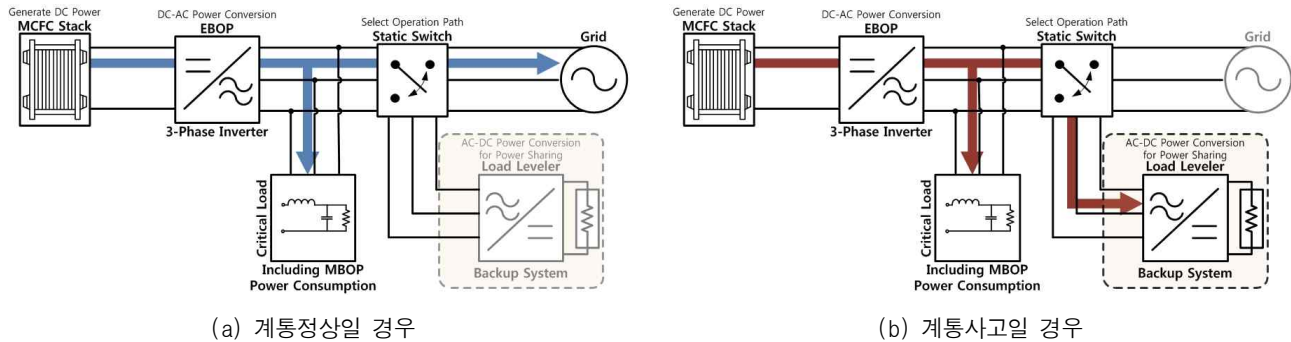


그림 5 제안한 시스템의 전력 흐름도
Fig. 5 Power flow of proposed system (a) Grid normal case, (b) Grid fault case

태에 따라 MCFC에서 발전된 전력이 계통에 연계되거나 백업시스템으로 연결 될지 상대적으로 동작된다. 계통 상태에 따른 전력 흐름도를 그림 5와 같이 표현하였다.

계통이 정상일 경우 스테틱 스위치는 계통과 연결되어 있기 때문에 백업시스템은 전체 시스템에서 분리되어있다. 이때 EBOP는 계통의 전압에 동상인 전류를 정출력으로 계통으로 보내고 그림 5-(a) 전력 흐름을 가진다. 계통에 사고가 발생할 경우 스테틱 스위치는 백업시스템과 연결 되고 전체 시스템은 계통과 차단된다. MCFC 스택은 발전을 멈추지 않고 지속적으로 최대 출력으로 발전을 하며 이에 따라 EBOP도 지속적으로 전력을 변환한다. MCFC 발전 시스템은 백업시스템의 도움을 받아 비상부하로 전력을 공급하여 UPS 기능을 할 수 있다. 이에 따라서 MCFC 발전 시스템은 상시로 최대 전력으로 발전을 하기 때문에 계통 사고 제거 후에도 최대 전력으로 출력 가능하고, 비상전

원으로 전력을 공급할 수 있기 때문에 UPS 없이도 비상부하로 전력공급이 가능하다. 이때 전력흐름은 그림 5-(b)로 표현하였다.

2.2 Load Leveler

앞서 언급한 MCFC 발전시스템의 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나로 MCFC 자체의 동특성을 빠르게 하거나, 이를 보완할 수 있는 반도체 스위치를 이용한 전력변환장치를 추가하는 방법이 있다. 후자의 방법을 이용하면, 계통에 사고가 발생하면 MCFC를 고의로 단독운전을 동작시켜 (Intentional-islanding)^[8] 최대전력으로 발전을 하고 전력변환장치가 MCFC의 발전량과 부하의 전력소비량의 차이만큼의 전력을 감당하게 되면 지속적으로 최대 출력으로 발전이 가능하므로 계통 복전 후에도 즉시 최대 출력으로 운전 가능하다. 마찬가지로 독립운전을 할 경우 MCFC는 최대 전력으로 발전을 하고 전력변환장치가 MCFC의 발전

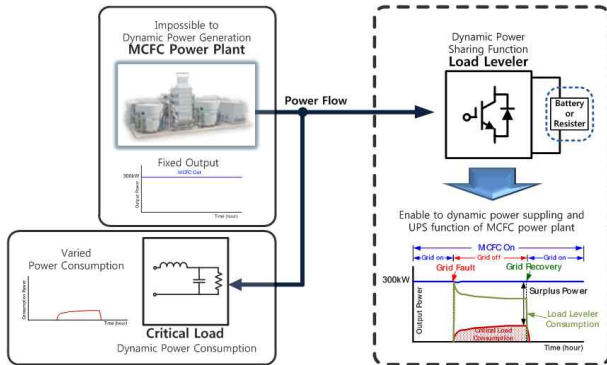


그림 6 Load Leveler의 기능에 따른 전력 흐름도 및 파형
 Fig. 6 Power flow and waveform according to Load Leveler function

량과 변화하는 부하의 전력소비량의 차이만큼의 잉여 전력을 감당하기 때문에 MCFC를 이용하여 독립 발전 시스템으로 구성할 수 있다. 이에 따라 계통연계 운전 을 하는 경우 계통에 사고가 발생하여도 계통으로 전력공급만 차단한다면 지속적으로 최대 출력으로 발전 이 가능하므로 계통 복전 후에도 즉시 최대 출력으로 운전 가능하다.

위와 같은 기능을 하는 비상부하 백업시스템을 본 논문에서는 'Load Leveler'로 지칭을 한다. 이 시스템을 사용하면 계통 사고 시 MCFC 발전이 정격전력으로 출력 가능하여 그림 3-(a)와 같은 현상이 일어나지 않고, 비상부하로 전력을 공급하기 위한 UPS 기능을 추가적으로 할 수 있다. 이는 계통 사고 시 MCFC 발전 시스템이 지속적으로 발전을 가능하게 하므로, 기존 UPS가 30분 동안 비상부하를 백업 하는 것과는 달리 연료만 주입되면 지속적으로 비상부하로 전력을 공급할 수 있다. 위와 같은 기능에 따라 계통 사고 시 Load Leveler를 추가한 전체 전력 흐름도를 그림 6으로 나타내었다.

2.2.1 Load Leveler 선정

Load Leveler는 MCFC의 발전량과 비상부하의 전력 소비량을 제외한 나머지 전력을 담당해야 하므로 소비 전력을 임의로 변경 할 수 있는 토폴로지가 되어야 한다. Load Leveler가 동작하는 시기, 즉 MCFC가 단독 으로 운전하는 상황에서 비상부하의 전력 소비량이 거의 변동이 없다면 MCFC가 전력변동률이 낮지만 0.5kW/min로 변동가능 하므로 단순한 저항기 형태로 토폴로지를 꾸밀 수 있다. 하지만 비상부하가 변동하는 경우에는 저항기로는 발전전력과 비상부하의 소비

전력의 차이만큼을 속응성있게 제어하지 못하므로 전력변환 장치를 이용해야 한다.

Load Leveler의 입력은 MCFC가 단독 운전 시 EBOP의 출력이므로 3상 교류 전압원 형태가 된다. 따라서 AC-DC나 AC-AC 전력 변환 회로를 사용해야 하는데 AC-AC 전력변환장치의 경우 매트릭스 컨버터나 2-stage 형태로 구성해야하기 때문에 제어의 어려움이나 전체 시스템이 복잡해 질 수 있다. AC-DC의 경우에는 3상 다이오드 정류기, 위상정류 회로 및 PWM 컨버터 등이 있다. 다이오드 정류기의 경우 출력전압의 크기를 가변 할 수 없기 때문에 감당할 수 있는 전력을 변화 할 수 없고, 위상정류 회로는 단위역률로 제어할 수 없는 단점이 있지만 출력 전압을 가변 할 수 있고 사이리스터의 특성상 대용량 시스템에서는 강점을 가진다. PWM 컨버터의 경우에는 단위역률로 제어할 수 있고 출력전압도 가변 할 수 있는 장점을 가지지만 상대적으로 위상정류 회로보다는 작은 용량에 적합하다. 본 논문에서는 300kW의 DFC300 모델을 5kW로 축소하여 전체 시스템을 구성 할 것이므로 AC-DC 3상 PWM 컨버터를 Load Leveler로 선정 하였다.

MCFC 발전전력과 비상부하의 소비전력의 잉여전력의 차이만큼을 Load Leveler에서 감당한다. 전력을 감당하는 두 가지 방법으로 PWM 컨버터의 부하를 배터리로 설정하여 전력을 저장하거나 저항으로 설정하여 전력을 태우는 방법이 있다. 전자의 방법은 전체 시스템의 잉여전력량을 예상하고 계통 사고시간이 평균적으로 얼마인지 통계적인 방법으로 구하여 배터리 용량을 산정할 수 있다. 후자의 방법은 순수 저항부하를 사용하여 잉여전력을 모두 소모하여 전체 시스템의 전력 밸런스를 맞춘다. 배터리를 사용하는 방법은 배터리 산정에서 충전 방식까지 여러 가지 방법이 있으므로 시스템을 설계할 때 여러 가지 요소에 따라 trade-off 관계가 성립한다. 저항을 사용하는 경우는 실제로는 저항에서 많은 열이 발생하므로 저항기의 정확한 선정이 필요하다. 하지만 저항에서 발생하는 열을 MBOP의 heat balance에 사용하거나 폐열로 이용하는 방법을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 저항부하를 이용하여 잉여전력을 소모하는 Load Leveler를 모 의하였다.

2.2.2 Load Leveler 동작, 전체 시스템 제어

PWM 컨버터는 3상 교류 입력전압을 원하는 크기의 직류 출력 전압 V_o 로 출력 가능하므로 출력 저항

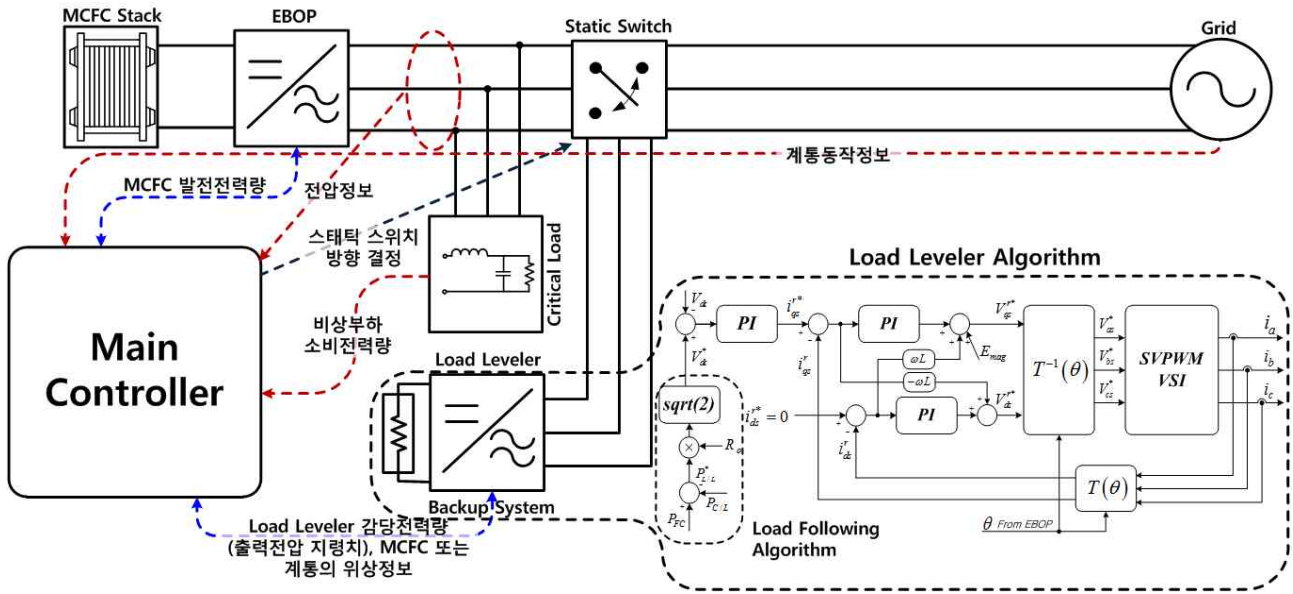


그림 7 전체 시스템 제어 개념 및 부하 추종형 Load Leveler 알고리즘
 Fig. 7 Concept of entire system control and load following algorithm of Load Leveler

R_o 의 크기와 직류 출력 전압에 의해 시스템에 맞는 전력을 소모 할 수 있다. 출력 저항 R_o 의 크기는 제어하려는 V_{dc} 의 최댓값 $V_{dc,max}$ 와 Load Leveler에서 소비하려는 전력 $P_{L/L}$ 값으로 정할 수 있다. PWM 컨버터는 스위치가 동작하지 않으면 다이오드 정류기 형태이므로 $V_{dc,max}$ 값은 교류 입력 전압이 220V일 경우 정류되는 값 311V보다 커야하며, 380V일 경우 537V보다 커야 되며, 스위치 및 출력 DC link 커패시터의 내압을 고려하여 적절한 값을 선정해야한다. 이를 식(1)로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$R_o = \frac{V_{dc,max}^2}{P_{L/L}} \quad (1)$$

PWM 컨버터는 부스트 컨버터 형태로 동작하므로 일반적으로 2-3배의 승압비를 가질 수 있다. 높은 승압비로 시스템을 구성하면 출력전압의 가변 범위가 넓기 때문에 정밀한 제어가 가능하지만 높은 출력전압으로 인하여 스위치나 커패시터 선정 폭이 좁아질 수 있다. 본 논문에서는 EBOP의 출력이 220V로 설정하였고, 이에 따라 PWM 컨버터의 출력전압은 최소 311V이다. 선정한 $V_{dc,max}$ 값은 600V로 이때 PWM 컨버터에서 기저부하를 제외한 모든 전력을 감당하게 된다. 600V로 출력전압을 선정하면 반도체 스위치 및 커

패시터의 내압을 부스바, PCB 도선 및 전선의 부유인덕턴스에 의한 RBSOA의 디레이팅을 고려하여 900V 및 1200V 급으로 선정할 수 있다^[9]. 출력전압을 더 낮게 제어하게 되면 낮은 전압 내압을 가진 반도체 스위치를 선정할 수 있으나 이에 따라 시스템의 전류 경계가 커지게 때문에 적절한 trade-off가 필요하다. 식 (1)로 선정한 저항값은 72Ω 이다.

그림 7은 MCFC의 출력전력과 비상부하의 소비전력의 차이를 담당할 수 있는, 부하추종형 Load Leveler 알고리즘 및 제어 개념도이다. 우선 Load Leveler의 알고리즘의 아래 블록은 MCFC의 출력전력 P_{FC} 와 비상부하의 소비전력 $P_{C/L}$ 의 차이로 전력 지령치 $P_{L/L}^*$ 를 만들고, 출력 부하 R_o 와 곱한 뒤 제곱근을 취하면 전압 지령치가 만들어 지며 식 (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{L/L}^* = P_{FC} - P_{C/L} \quad (2)$$

$$V_{dc}^* = \sqrt{P_{L/L}^* \times R_o} \quad (3)$$

식 (2)에서 P_{FC} 와 $P_{C/L}$ 이 같아지는 상황인 연료전지 출력과 비상부하에서 소모하는 전력의 크기가 같아지는 경우는 V_{dc}^* 가 0이 되는 경우이므로 PWM 컨버터가 동작하지 않는 경우가 된다. 이 경우는 다이오드

정류기의 출력 전압보다 낮지만 MCFC의 발전량이 비상부하의 전력소비량보다 항상 높게 설계 되므로 제어에 문제 되지 않는다.

전체 시스템 제어는 단일 CPU로 제어되거나 다수의 CPU가 통신을 통해 제어 될 수 있다. 상위 제어기는 계통의 정상동작을 체크하여 EBOP의 동작모드, 스테틱 스위치의 연결 방향 및 Load Leveler의 동작을 결정한다. 계통이 정상일 경우에는 EBOP는 계통으로 정전류제어를 통해 전력을 공급하며 스테틱 스위치는 계통으로 연결되어 Load Leveler는 전체시스템에서 분리되어있고 비상부하에서는 MBOP의 heat balance 동작으로 인해 일정한 전력을 소비한다. 전력의 흐름은 그림 5-(a)와 같다.

계통에 사고가 발생되어 계통으로 전력 공급을 멈춰야 할 경우 스테틱 스위치는 Load Leveler와 연결되고 전체 시스템은 계통과 차단된다. EBOP는 비상전원에 전력을 공급하기 위해 정전류제어에서 정전압제어로 동작 모드 절체가 필요하며 지속적으로 MCFC의 발전 전력과 비상부하 전력소비량을 센싱하여 잉여전력이 Load Leveler에서 담당해야 하는 전력 지령치가 되고 위상은 EBOP의 출력전압과 같은 위상으로 제어되므로 EBOP의 위상정보를 받아 추가적인 연산 없이 제어된다. 전력의 흐름은 그림 5-(b)와 같다.

3. 시스템 성능 검증

본 논문에서는 PSIM 6.0 시뮬레이션 툴을 이용하여 제한한 전체 시스템과 비상부하 백업시스템 알고리즘을 검증 하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라메타는 DFC300 모델을 5kW급으로 축소하여 표 1과 같은 파라메타로 선정하였다. 시뮬레이션 구성은 그림 8과 같고 그림 7과 동일하게 구성하였다. 정전 시 동작하는 비상부하는 최대 1.5kW에서 MBOP의 heat balance를 맞추기 위한 0.25kW까지 동작하고 load bank로 구성하여 순시적으로 전력소비량을 변화 시킬 수 있게 하였다. EBOP 및 Load Leveler는 10kHz로 동작하고, 스위치 2세트를 상대적인 관계로 동작시켜 스테틱 스위치로 모의하였다.

우선 EBOP가 계통과 연계되어 정전류를 계통으로 송전하는 경우와 단독으로 Load Leveler가 정상적으로 동작하는 것을 확인하기 위해 3상 전압원을 입력으로 하여 비상부하의 전력소비량이 변함에 따라 Load Leveler에서 이를 백업하는 정전상태를 모의하였고, EBOP와 연결하여 계통에 사고가 발생하여 제거되는 과정에서 Load Leveler가 시스템을 백업하는 현상과,

표 1 시뮬레이션 파라메타
Table 1 Simulation parameter

Parameters	값 [단위]	
	DFC 300	시뮬레이션 모델
EBOP 출력 정격	300 [kW],	5 [kW]
EBOP 출력 전압	480 [V]	220 [V]
EBOP 출력 주파수	60 [Hz]	60 [Hz]
L/L 정격	-	5 [kW]
L/L 전압 가변 범위	-	502 - 600 [V]
L/L 출력 저항	-	72 [Ω]
스위칭 주파수	-	10 [kHz]
비상부하 운전 범위	25 [kW] 이상	0.25 - 1.5 [kW]
L/L 운전 범위	-	3.5 - 4.975 [kW]

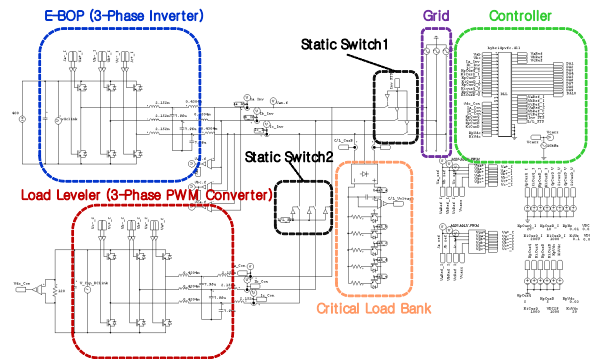


그림 8 시뮬레이션 구성도
Fig. 8 Simulation scheme

계통이 정상 운전 후 사고가 발생하여 MCFC가 정전압 제어를 하여 비상부하로 전력을 공급하는 UPS 운전을 하는 경우를 모의하였다.

그림 9는 계통이 정상일 경우 각 부 파형으로 EBOP에서는 정전류로 계통에 전력을 공급하여 5kW로 지속적인 발전을 한다. 따라서 첫 번째 파형과 같이 계통의 상전압과 같은 위상으로 정전류를 계통에 주입한다. MBOP의 heat balance를 맞추기 위한 전력 소비량을 비상부하에 추가하였기 때문에 지속적으로 250W의 전력이 소모됨을 두 번째 파형을 통해 확인 가능하다. 세 번째 파형은 계통과 Load Leveler에 연결된 스테틱 스위치로 계통으로만 연결 되어 있기 때문에 Leveler로는 전력 공급이 되지 않는다.

그림 10은 계통 사고 발생 후 Load Leveler가 MCFC의 발전량과 비상부하의 전력소비량 차이만큼의 전력을 감당할 수 있는지 Load Leveler 단독으로 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 이때는 Load Leveler의 입력을 3상 전압원으로 사용 하였다. 그림 9와 마찬가지로 첫 번째 파형은 입력 상전압과 입력 상전류파형이

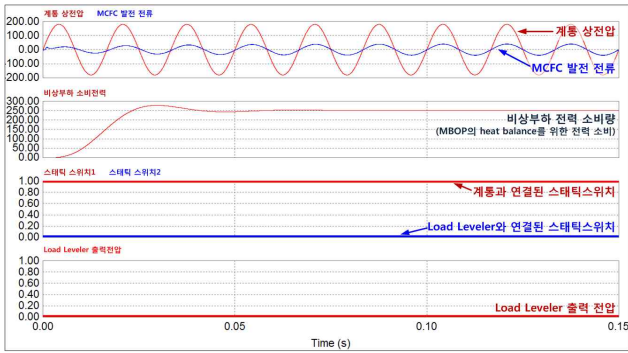


그림 9 계통이 정상일 경우 각 부 파형
Fig. 9 Simulation waveforms when the grid is normal

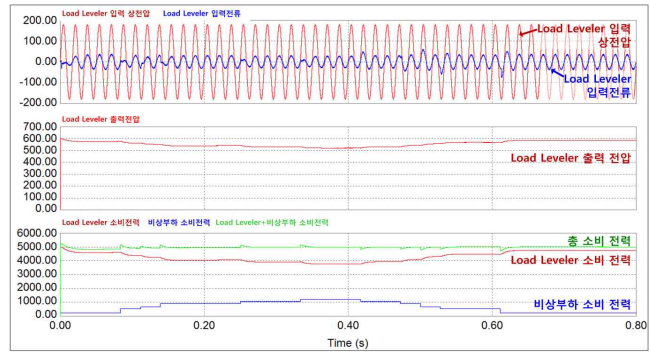


그림 10 Load Leveler 단독 테스트
Fig. 10 Simulation waveforms only operate Load Leveler

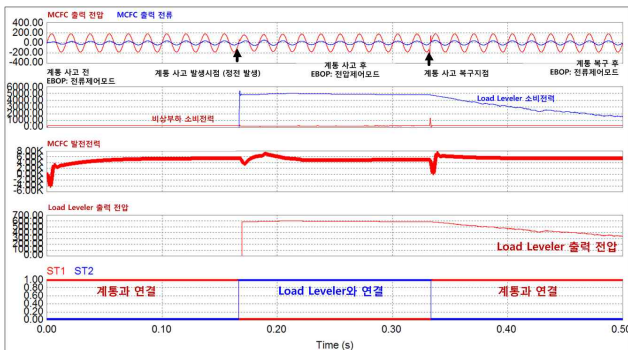


그림 11 계통 상태에 따른 백업시스템 동작 (비상부하는 MBOP만 사용)
Fig. 11 Back-up system operation following the state of grid (critical load used only MBOP)

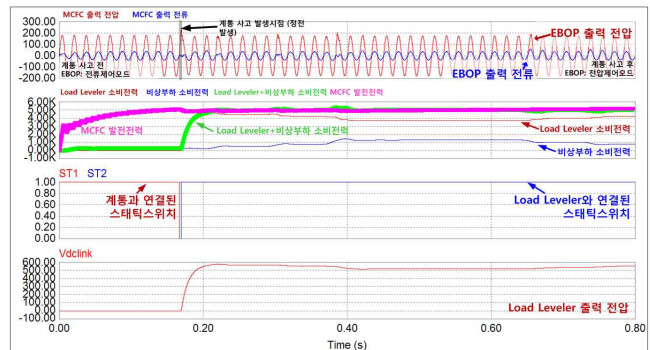


그림 12 계통 상태에 따른 백업시스템 동작 (계통 사고 시 UPS 기능)
Fig. 12 Back-up system operation following the state of grid (UPS operation when grid fault)

며 두 번째 파형은 Load Leveler의 출력 전압이다. 마지막 파형은 비상부하의 소비전력, Load Leveler 소비전력과 그 둘의 합인 총 소비전력의 파형이다. 비상부하의 전력소비량이 변함에 따라 Load Leveler 입력전류와 출력 전압이 가변되어 전체 시스템에서 소비되는 총 전력을 일정하게 제어한다. 따라서 정전상태에서도 MCFC는 오프되지 않고 정출력으로 발전이 가능하며, 비상부하로 전력을 공급하므로 UPS기능도 수행할 수 있음을 알 수 있다.

그림 11은 계통 상태에 따라서 제안한 백업시스템의 동작을 확인한 파형으로 비상부하는 오직 MBOP의 heat balance를 맞추기 위 250W만 소비하도록 모의하였다. 계통이 정상일 경우는 스태틱 스위치는 계통과 연결되어 있고 MCFC는 계통으로 전력을 공급한다. 따라서 Load Leveler는 전체 시스템과 분리되었기 때문에 전력 소비량이 없다. 계통에 사고가 발생되면 스태틱 스위치는 계통과 전체시스템을 분리시키고 Load

Leveler를 연결한다. 이에 따라 MCFC 발전 시스템은 비상부하에 전력을 공급하기 위해 정전압 제어를 통하여 전압원으로 동작하고 비상부하는 일정하게 전력을 소비함에 따라 Load Leveler에서는 잉여전력을 담당하게 된다. 비상부하는 250W 소비되기 때문에 Load Leveler에서 나머지 4750W를 담당하고 MCFC는 일정하게 5kW를 발전하게 된다. 계통에 사고가 제거되어 스태틱 스위치는 계통으로 다시 연결되고 MCFC 발전 시스템은 정전류 제어모드로 동작하여 계통으로 전력을 공급한다. 이에 따라 계통 복전 후 계통으로 전력을 정격 출력까지 지연시간 없이 정격전력으로 공급할 수 있다. Load Leveler는 전체 시스템과 차단되어 전력을 공급받지 못하기 때문에 출력 DC-Link에 충전되었던 전압이 출력 부하와 RC회로가 되어 지수 함수적으로 감소한다. 정전이 발생하는 시점과 계통에 사고가 제거되는 시점에서 EBOP는 전류제어모드에서 전압제어모드로 전환하며 이 과정에서 과도 상태가 발생

하여 MCFC 발전전력도 흔들리게 된다. 이러한 현상은 제어기가 순간적으로 변함에 따라 발생하는 문제로, 일반적인 알고리즘으로는 해결이 힘들고 간접전류 제어 같은 방법으로 해결가능하다^{[10],[11]}.

그림 12는 계통 상태에 따른 전체 시스템의 동작을 검증한 파형으로 계통에 사고가 발생할 경우 MCFC 발전시스템은 Load Leveler를 이용하여 비상부하에 전력을 공급하는 UPS기능을 수행하였다. 계통이 정상일 경우 MCFC 발전시스템은 계통으로 5kW에 해당되는 정전류를 계통으로 주입한다. 이때는 비상부하의 전력 소비가 없고 Load Leveler 또한 동작하지 않는다. 계통에 사고가 발생하면 MCFC의 EBOP의 동작은 정전류 제어에서 정전압 제어로 전환하고 비상부하에 전력을 공급하기 위한 강제적 단독운전으로 강제적으로 전환하게 된다. 비상부하의 전력 소비 패턴을 순시적으로 변화시켜 MCFC 발전시스템이 비상부하로 전력을 공급하여 UPS 기능으로 동작하고, Load Leveler에서 잉여전력을 감당하여 MCFC의 발전 전력의 변화 없이 정출력으로 발전을 가능하도록 한다. 제어모드가 EBOP는 정전압으로 제어 되며 또한 정전류를 출력하기 때문에 계통에 사고가 난 후에도 정출력을 유지할 수 있기 때문에 기존의 시스템과 달리 정출력까지의 도달 지연시간이 없다.

각각의 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 Load Leveler는 MCFC가 계통 사고 후에도 정출력으로 지속적으로 발전 가능하게 하며 계통 사고 제거 후에도 지속적으로 정출력으로 발전가능하기 때문에 신뢰성 있는 시스템을 완성 할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은 느린 통특성을 가지는 MCFC 발전 시스템이 계통에 사고가 발생하여도 지속적인 출력을 가능하게 하여 계통에 사고가 제거 된 후에도 정출력으로 지속적인 발전을 가능하게 만드는 비상부하 전력공급 장치 시스템을 제안하였고 5kW의 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이에 따라 제안한 시스템은 계통 사고 후에도 비상부하로 전력을 공급할 수 있어 추가적인 UPS 설치 없이 정전에 대한 해결책이 될 수 있고, 또한 계통사고 제거 후에도 정격출력으로 발전가능하기 때문에 기존 MCFC 발전 시스템에서 발생한 정격출력까지 도달시간이 없다. 따라서 제안한 시스템을 대용량 MCFC 발전 시스템에 적용가능하고, 이러한 시스템을 반도체 공정이나 대규모의 데이터 서버에 적용하

여 분산 전원으로서의 발전과 대용량의 UPS 기능까지 할 수 있을 것이라 예상된다.

본 연구는 지식경제부, 한국산업기술진흥원, 대경광역경제권 선도산업지원단의 대경광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 박수억, 이덕기, 최상진, “신재생 에너지기술 시장평가 (태양광, 연료전지, 풍력중심으로)”, *한국 신재생 에너지 학회 춘계 학술대회*, pp. 557-584, 2005.
- [2] 최영재, 전재호, 전중환, “용융탄산염 연료전지 시스템”, *전력전자학회지*, Vol. 12, No. 4, pp. 39-43, 2007.
- [3] Wei He, “Operating Characteristics of a Molten Carbonate Fuel-Cell Power-Generation System”, *Int J.Energy*, pp. 1331-1344, 1999, April.
- [4] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained: Second Edition*, Wiley.
- [5] Q Lamquet, R Massa, F Parodi, W Prandoni, S Spelta “Dynamic Model of an Hybrid Plant Based on MCFC Fuel Cells and Microturbine for Process Analysis and Control”, *Power Tech Conference Proceedings, 2003*, Vol. 2, June.
- [6] 한수빈, 정봉만, 최수현, “연료전지시스템과 부하관리 응용”, *전력전자학회지*, Vol. 2, No. 2, pp. 21-25, 1997.
- [7] FuelCell Energy, Inc “Molten Carbonate Fuel Cell Product Design Improvement”, *Technical Progress Report*, 2005, March.
- [8] Standard for Interconnection Distributed Resources with Electric Power Systems, *IEEE Std. 1547-2008*, 2.
- [9] 김종수, 최규영, 정혜만, 이병국, 조영진, “전기자동차용 3.3kW 탑재형 배터리 충전기 설계 및 제작”, *전력전자 학회 논문지*, Vol. 15, No. 2, pp. 369-375, 2010.
- [10] 유대식, 배영상, 최세완, 김효성 “연속적인 운전모드의 전환을 위한 계통연계형 인버터의 간접전류 제어기법”, *전력전자학회 논문지*, Vol. 11, No. 1, pp. 72-79, 2006.
- [11] Zhilei Yao, Lan Xiao “Seamless Transfer of single-phase Grid-Interactive Inverters Between Grid -Connected and Stand-Alone Modes”, *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 25, No. 6, 2010, June.

저 자 소 개



김동희(金東熙)

1984년 5월 27일생. 2009년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 동 대학원 태양광시스템협동과정 석사과정.



김종수(金鍾秀)

1975년 3월 5일생. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정. 2000년~2005년 SEMIKRON Korea Application Engineer.



최규영(崔奎英)

1980년 4월 11일생. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년~2005년 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원. 2005년~2006년 성균관대 연구조교수. 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 부교수. IEEE Senior Member. 당 학회 재무이사.



곽철훈(郭哲勳)

1965년 10월 9일생. 1993년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 고려대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 건국대 공대 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~2002년 국제전기(주) 연구소 책임연구원. 2002년~2008년 이화전기(주) 부장. 2008년~현재 와이피피(주) 상무.