

엔진발전기와 연계된 BESS의 무순단 모드 전환 기법

Seamless Transfer Method of BESS Connected by Engine Generator

신은석* · 김현준* · 김교민* · 유승영* · 한병문*

(Eun-Suk Shin · Hyun-Jun Kim · Kyo-Min Kim · Seung-Yeong Yu · Byung-Moon Han)

Abstract - In remote islands PV (Photo Voltaic) panel with BESS (Battery Energy Storage System) supplies electric power to the customers in parallel operation with EG (Engine Generator) to save fuel consumption and to mitigate environmental load. BESS operates in voltage control mode when it supplies power to the load alone, while it operates in current control mode when it supplies power to the load in parallel with EG. This paper proposes a smooth mode change scheme from current control to voltage control of BESS by adding proper initial value to the integral part of voltage control, and a smooth mode change scheme from voltage control to current control by tracking the EG output voltage to the BESS output voltage using PLL (Phase-Locked Loop). The feasibility of proposed schemes was verified through computer simulations with PSCAD/EMTDC, and the feasibility of actual hardware system was verified by experiments with scaled prototype. It was confirmed that the proposed schemes offer a seamless operation in the stand-alone power system in remote islands.

Key Words : BESS(Battery energy storage system), Stand-alone, PLL synchronization, Seamless transfer

1. 서 론

최근 엔진발전기에 의해 전력을 공급하던 낙도에서 PV판넬과 BESS를 설치하여 1차적으로 전력을 공급하고 부족한 전력은 병렬로 연결된 엔진발전기를 보조적으로 운전하여 연료 절감과 환경개선을 위한 프로젝트가 국내외에서 많이 추진되고 있다.

이 시스템에서 통상 PV 판넬에서 얻은 전력은 BESS를 충전하고 충전된 전력은 우선적으로 부하에 공급된다. 만일 BESS가 공급하는 전력이 부하전력보다 작을 경우에는 병렬로 연결된 엔진발전기를 투입하여 부족한 전력을 충당한다. 또한 만일 부하전력이 감소하여 BESS만 가지고도 전력공급이 충분하면 엔진발전기를 분리하여 다시 BESS만 단독으로 전력을 공급한다.

엔진발전기가 연결된 경우 통상은 시스템의 전압과 주파수는 엔진발전기가 제어하고 BESS는 전류제어모드로 동작되지만 엔진이 분리된 경우에는 BESS는 시스템의 전압과 주파수를 제어하는 전압제어 모드로 동작된다[1].

따라서 BESS는 엔진발전기와의 병렬로 운전되다가 부하감소에 의해 엔진발전기가 분리될 경우 전류제어에서 전압제어로 신속하게 모드전환을 수행해야 하고 또한 부하가 증가하여 엔진발전기를 다시 투입할 경우에는 엔진발전기는 BESS와 동기화를 이룬 상태에서 전압과 주파수 제어를 시작하고 BESS는 전압제어에

서 전류제어로 신속하게 모드전환을 수행해야 한다.

이와 같이 BESS와 병렬로 운전되던 엔진발전기가 분리될 경우 그리고 분리된 엔진발전기가 다시 투입될 경우 BESS는 전압제어에서 전류제어로 그리고 전류제어에서 전압제어로 모드전환이 발생하는데 이때 부하공급전력에 품질문제가 없도록 과도현상이 충분히 완화된 모드전환이 필요하다[2, 3].

단독 운전을 위해 제안된 부하 차단 알고리즘은 인버터 전압을 정상 범위로 되돌리기 위해 의도적인 단독 운전을 위해 사용된다[4]. 그러나 무순단 기법을 적용하지 않았기 때문에 단독운전으로 모드를 전환 할 때 전류와 전압이 불안정하다.

[5, 6]에서는 위해 간접전류제어 기법이 제안되었다. 양방향 통신을 이용한 인버터를 통해 두 동작 모드에서 커패시터 전압을 제어한다. 이는 전환 시간 동안 중요부하에 안정적이고 변화 없는 전압을 제공한다. 하지만 3상의 경우 전압 지령치를 생성하기 위해 비선형 함수가 포함되어 제어 모델을 얻기 어렵고 복잡한 제어구조를 가지고 있어 연산량이 많다는 단점이 있고, 전압제어시 단일제어를 사용하여 무부하 시 전류가 불안정해 질 수 있다. [7]에서 정의된 커패시터 전압 제어를 위한 제어기는 제어블록도의 사인 및 코사인 테이블을 추종하기 위해 제안되었으며, 기존 제어 이론을 사용하여 설계되었다. 하지만 커패시터 전압의 위상 각과 크기가 계통이나 발전기의 인덕턴스 값을 사용함으로써 추종되기 때문에 정확한 인덕턴스 값을 알아야하며, 또한 동특성이 인덕턴스 변화에 크게 의존한다.

단순히 기준 전압 값을 변화시키는 것을 제안한 [8]에서는 계통 연계형 단상 인버터에서의 제어 알고리즘이 오직 전압제어 문제에만 초점을 두었고, [9, 10]에서 무순단 전환의 순서는 잘 묘사되었지만 모드전환 시 계통전류와 단상 인버터의 전압 제어가

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea

E-mail : erichan@mju.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea

Received : August 3, 2015; Accepted : November 23, 2015

의 출력이 같지 않아 인버터 전압과 계통전류의 불안정함을 발생시킬 수 있다.

또한, 부하의 전력 품질을 향상시키기 위해 Cascade 전류-전압 제어가 제안되었다[11]. 이 방식은 THD를 감소시킬 수 있으나, 무순단 모드 전환을 위한 전략이 없다.

단독운전으로 모드 전환시 발생하는 과도를 완화시키기 위해 드롭을 기반으로 하는 제어기도 제안되었다[12, 13]. 이는 무순단 모드 전환을 위한 마이크로그리드 동작에서 강인함을 제공한다. 하지만 드롭 운전으로 인해 동특성이 느리고 임의의 전류 제어가 불가능하여 최대 출력 운전 등이 제한되는 단점을 지닌다.

단독 운전 모드를 위한 커패시터 차동 전압 피드백 루프 및 내부 기준 전압 피드포워드를 이용한 다중 루프 전압 제어기는 계통 연계에서 단독운전으로 전환 시 전압의 연속성과 응답 시간 감소를 위해 설계되었다[14]. 이 방법은 모드 전환 시 순간 전압 변화에 관계없이 출력 전압의 왜곡이 발생한다.

본 논문에서는 기존 모드전환기법의 단점을 보완하기 위해 엔진발전기 분리 시 전압제어의 과도현상을 줄이기 위해 전압제어의 적분요소에 초기 값을 더해주어 전류제어에서 전압제어로 완전한 모드전환이 가능하도록 하였고 또한 재연계 시 엔진발전기의 출력전압을 BESS의 출력전압에 추종시켜 크기와 위상을 일치시켜 완전한 모드전환이 가능하도록 하였다. 이를 통해 모드 전환 시에 발생하는 전력의 과도 상태를 빠르게 정상 상태로 복구하여 지속적인 전력 공급을 실현하고 높은 전력 품질을 유지할 수 있다. 이는 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 통해 시뮬레이션을 진행하였으며 실험실규모의 프로토타입을 제작하여 제안한 이론에 대한 검증을 진행하였다.

2. 제안하는 무순단 제어

그림 1은 낙도에 설치된 독립형 전력시스템의 기본 구성을 나타낸 것이다. 맑은 날 낮 시간에는 PV판넬에 의해 생산된 전력은 DC-DC 컨버터를 통해 BESS에 충전된 후 DC-AC컨버터에 의해 부하에 전력을 공급한다. 엔진발전기는 BESS와 병렬로 연결하여 부하의 수요가 증가하거나 BESS의 잔존 충전용량이 충분하지 못한 경우에만 가동한다. 따라서 엔진발전기의 사용을 최소화하여 연료를 절감하고 환경부담을 완화하는 장점이 있다.

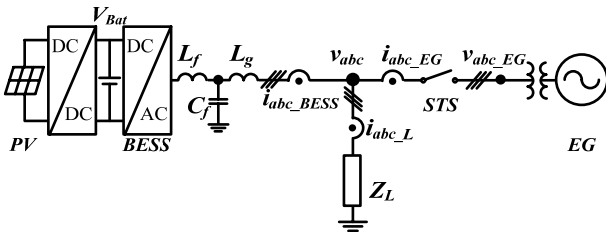


그림 1 엔진발전기와 연계된 BESS의 시스템 구성
Fig. 1 System configuration of BESS connected to Engine Generator

인버터의 AC 출력전압은 고조파를 함유하고 있어 이를 제거하기 위해 부하와 사이 LCL 필터를 설치한다. 엔진발전기는 변압기와 반도체 스위치 STS(Solid-State Transfer Switch)를 지나 부하와 연계되어 있다.

본 논문에서는 제안하는 무순단운전 알고리즘을 구현하기 위해 BESS의 출력전압과 전류, 부하의 전압과 전류, 그리고 STS에서 엔진발전기의 전압과 전류를 측정한다.

2.1 병렬운전 시 전류제어

BESS의 전류와 전압은 동기좌표에서 제어되며 센서를 통해 측정된 3상 전압 및 전류를 식 (1)과 (2)에 기술한 정지와 회전좌표변환을 통해 직류성분으로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} f_{de} \\ f_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \end{bmatrix} \tag{2}$$

그림 2는 PI 제어기를 이용한 BESS의 전류제어기를 나타낸 것이다. D축 전류와 Q축 전류 간의 결합성분을 제거하기 위해 제어 출력에 각각 상호 결합성분을 보상하였고 시스템의 동특성을 개선하기 위해 부하전압 V_{de} 와 V_{qe} 를 별도로 보상하였다. 전류제어를 통해 출력되는 BESS의 기준전압 $V_{de_ref}^*$ 와 $V_{qe_ref}^*$ 는 식 (3)으로 표현된다[15].

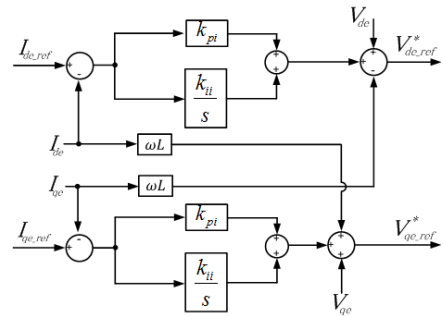


그림 2 전류 제어 블록도
Fig. 2 Current control block diagram

$$V_{de_ref}^* = (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s})(I_{de_ref} - I_{de}) - \omega L I_{qe} + V_{de} \tag{3}$$

$$V_{qe_ref}^* = (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s})(I_{qe_ref} - I_{qe}) + \omega L I_{de} + V_{qe}$$

전류제어기는 유효 및 무효전력을 제어하는 기능을 갖는데 유효전력(P)과 무효전력(Q)은 회전좌표상의 전류와 전압을 가지고

식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= 1.5(V_{de}I_{de} + V_{qe}I_{qe}) \\ Q &= 1.5(V_{de}I_{qe} - V_{qe}I_{de}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, V_{de} 와 V_{qe} 는 동기좌표상에서의 3상 전압을 그리고 I_{de} 와 I_{qe} 는 동기좌표상에서의 3상 전류를 나타낸다.

부하전압의 PLL이 정상적으로 되었다면 유효전력은 D축 성분 전류, 무효전력은 Q축 성분의 전류로 표현이 가능하다. 따라서 전류제어를 위한 기준치는 기준전력에서 구할 수 있다.

$$I_{de_ref} = \frac{P_{ref}}{1.5V_{de}}, \quad I_{qe_ref} = \frac{Q_{ref}}{1.5V_{qe}} \quad (5)$$

2.2 분리운전 시 전압제어

병렬 운전하던 엔진발전기가 분리될 경우 부하전압을 일정하게 유지할 수 없기 때문에 BESS가 발전기를 대신하여 전압제어를 수행하게 된다. 주파수는 60Hz로 그리고 선간 전압을 220V로 일정하게 제어한다. 선간 전압을 220V 일정전압으로 출력하기 위해서는 A상 전압을 최대 전압을 180V로 출력해야 하므로 기준전압 $V_{de_ref} = 180V$, $V_{qe_ref} = 0V$ 로 정한다.

그림 3은 전압제어기의 구성을 나타낸 것이다. 기준전압의 D축과 Q축 성분은 실측 값과 비교한 후 그 차를 PI제어기에 입력하여 기준전류 I_{de_ref} 와 I_{qe_ref} 를 얻는다. 전압제어기의 출력으로 나오는 기준전류는 그림 2의 전류제어기의 입력으로 공급되어 결과적으로 이중루프 제어방식으로 되어 있다. 이 이중루프 제어방식에서는 전압뿐만 아니라 전류도 간접적으로 제어하여 급작스러운 전류의 변화가 일어나지 않게 되어 안정적인 동작을 할 수 있다.

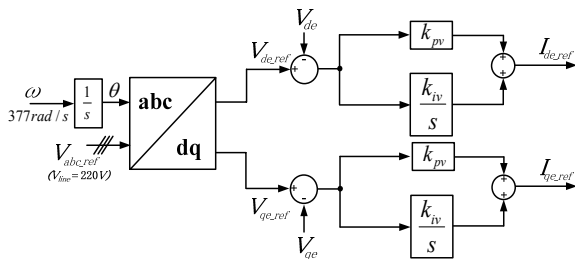


그림 3 전압 제어 블록도
Fig. 3 Voltage control block diagram

2.3 안정도 분석

그림 4는 BESS, LCL 필터, 부하, EG를 포함하는 전체 시스템의 등가회로를 나타낸 것이다. EG의 연계모드와 비연계모드에 대해 제어시스템의 안정도 분석을 위해 전압제어와 전류제어 각각에 대해 전달함수를 도출하였다. 통상 BESS가 부하에 전력을 공

급하고 EG는 백업전원으로써 동작하기 때문에 EG로 역전류가 흐르는 경우는 없다고 가정하였다. 또한 EG는 변압기를 통해 부하와 연결되고 내부 인덕턴스는 무시하였다.

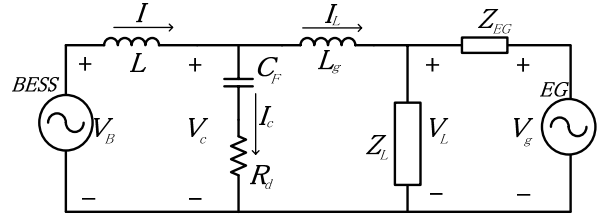


그림 4 전체 시스템 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of entire system

이 등가회로에 대해 키르히호프 전압과 전류 법칙을 적용하면 식 (6)~(8)이 유도된다[16].

$$I = \frac{1}{Ls}(V_B - V_c) \quad (6)$$

$$V_c = \frac{1 + C_f R_f s}{C_f s}(I - I_L) \quad (7)$$

$$I_L = \frac{V_c}{L_g s} \quad (8)$$

위 3식을 연립으로 풀어 I_L 와 V_B 로 정리하면, 전달함수 $G_{LCL}(s)$ 를 식 (9)와 같이 도출할 수 있다.

$$G_{LCL}(s) = \frac{I_L}{V_B} = \frac{C_f R_f s + 1}{LL_g C_f s^3 + (L + L_g)C_f R_f s^2 + (L + L_g)s} \quad (9)$$

식 (9)는 PI제어기를 포함한 페루프제어 전달함수이고 그 구성도는 그림 5와 같다. 이 구성도에서 k_{pc} 는 전류제어기의 비례이득이고 k_{ic} 는 전류제어기의 적분이득이다.

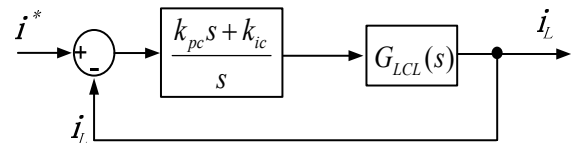


그림 5 페루프 전류 제어 블록도
Fig. 5 Current control closed-loop block diagram

$$I_L = \frac{1}{L_g s}(V_c - V_L) \quad (10)$$

식 (7), (8)과 식 (10)을 연계하여 부하 전류와 BESS 전압의 전달함수 $G_{LCL}(s)$ 는 (11)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$G'_{LCL}(s) = \frac{C_f R_d s + 1}{LL_g C_f s^3 + C_f (L + LR_d + L_g R_d) s^2 + (C_f R_d + L + L_g) s + 1} \quad (11)$$

식 (11)을 이용한 페루프 전압제어 블록도는 그림 6과 같이 이중루프 제어를 사용하여 나타낼 수 있다. 그림 6에서 k_{pv} 는 전압제어기의 비례이득이고, k_{iv} 는 전압제어기의 적분이득이다. 또한, $Z_L(s)$ 는 부하임피던스, V_L 은 부하전압을 나타낸다. BESS는 부하의 전압제어를 수행하므로 최종출력은 부하전압 V_L 이다.

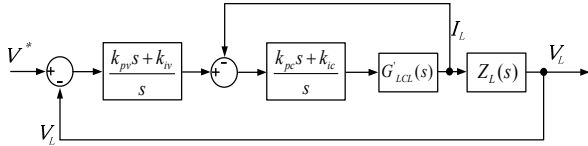


그림 6 페루프 전압 제어 블록도
Fig. 6 Voltage control closed-loop block diagram

그림 7은 전류제어 전달함수 식 (9)와 전압제어 전달함수 (11)의 보드 선도를 나타낸다. 이득은 $k_{pc}=10$, $k_{ic}=800$ 이고 $k_{pv}=1$, $k_{iv}=5$ 이다. 부하는 용량이 일정한 것으로 가정하여 순수 저항성 부하($R=10\Omega$)를 사용하였다. 이 보드 선도를 보면 전류제어기와 전압제어기는 위상여유가 충분하여 제어가 안정적임을 알 수 있다.

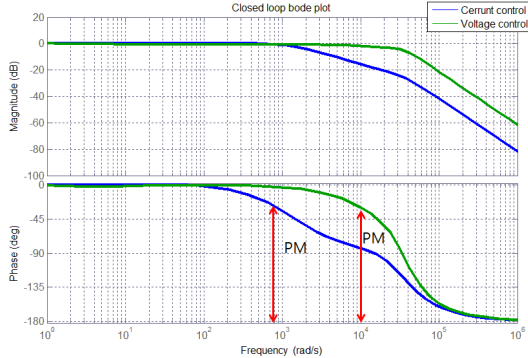


그림 7 페루프 전달함수 보드 선도
Fig. 7 Bode diagram of the closed-loop transfer function

3. 제안하는 모드 전환 기법

3.1 연계운전에서 분리운전으로 모드 전환

연계운전 시 전압제어기의 적분 값은 항상 0이라 하고 3상 부하의 각상이 균등하게 구성되었다고 하면, 부하전류는 동기좌표상에서 D축과 Q축의 직류성분 $I_{de,L}$, $I_{qe,L}$ 로 표현이 가능하다.

동기좌표상에서 표현된 부하전류 $I_{de,L}$, $I_{qe,L}$ 은 EG의 D축과 Q축 전류 $I_{de,EG}$, $I_{qe,EG}$ 와 BESS의 D축과 Q축 전류 $I_{de,BESS}$, $I_{qe,BESS}$ 의 합이다.

$$\begin{aligned} I_{de,L} &= I_{de,EG} + I_{de,BESS} \\ I_{qe,L} &= I_{qe,EG} + I_{qe,BESS} \end{aligned} \quad (12)$$

그러나 EG가 분리된 직후에는 $I_{de,EG} = 0$, $I_{qe,EG} = 0$ 이 되므로 $I_{de,L}$ 와 $I_{qe,L}$ 의 값은 감소하고 이에 따라 부하전압도 감소하게 된다. 따라서 부하전압을 회복하기 위해서는 EG가 부하에 공급하던 전력을 BESS가 더 공급해 주어야 한다. BESS가 전압제어를 통해 부하전압을 정상적으로 회복하기까지는 모드 전환 직후부터 일정한 과도시간이 걸린다. 이 과도시간은 전압제어기에 있는 적분이득을 적절히 조정하여 줄일 수는 있으나 정확하게 설정하지 않을 경우 전체 시스템의 동작이 불안정해 질 수 있다. 또한, 시스템의 증설이나 분리로 인해 시스템에 변화가 있을 경우 시스템의 응답특성을 변화시키고 제어기의 안정성을 저하시키며 제어기의 대역폭이 감소된다.

본 논문에서는 제어기의 이득을 변경하지 않고 과도시간을 줄일 수 있는 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 BESS의 전압제어가 정상상태에 도달할 때 전압제어기의 적분 값 $I_{de,i}$, $I_{qe,i}$ 은 전류제어의 입력 $I_{de,ref}$, $I_{qe,ref}$ 와 같게 되고, 전류제어가 정상적으로 수행이 되면 부하전류 $I_{de,L}$, $I_{qe,L}$ 와도 같게 된다.

$$\begin{aligned} I_{de,i} &= I_{de,ref} = I_{de,L} \\ I_{qe,i} &= I_{qe,ref} = I_{qe,L} \end{aligned} \quad (13)$$

결과적으로 전압제어기의 정상상태 적분 값은 부하전류와 같으므로 본 논문에서는 이를 이용하여 정상상태의 적분 값을 예측하고 모드전환 직후 적분기의 초기 값으로 사용하여 과도시간을 줄이는 것이다. 이 적분 값을 $I_{de,ref}^0$ 와 $I_{qe,ref}^0$ 로 표현하면 이 값은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I_{de,ref}^0 &= I_{de,EG} + I_{de,BESS} \\ I_{qe,ref}^0 &= I_{qe,EG} + I_{qe,BESS} \end{aligned} \quad (14)$$

적분 값 $I_{de,ref}^0$ 와 $I_{qe,ref}^0$ 은 모드전환 이전 EG 전류 $I_{de,EG}$, $I_{qe,EG}$ 와 BESS 전류 $I_{de,BESS}$, $I_{qe,BESS}$ 의 합으로 표현된다.

그림 8은 본 논문에서 제안하는 초기 적분 값을 적용한 전압 제어기의 구성을 나타낸 것이다. 모드 전환이 이루어진 직후, 적분기의 스위치가 온 되어 적분기에 $I_{de,ref}^0$ 와 $I_{qe,ref}^0$ 를 더해주고, 다음 제어주기에는 적분기의 스위치가 오프되어 다음 제어주기에는 동작하지 않는다.

따라서 초기 값으로 $I_{de,ref}^0$ 와 $I_{qe,ref}^0$ 를 가지고 제어를 시작하여 전압제어기의 출력 $I_{de,ref}$, $I_{qe,ref}$ 는 바로 정상상태의 값으로 출력할 수 있다. 그 결과 기준전압과 실측전압의 오차도 작게 되어 모드 전환 후에도 부하에 공급되는 전압과 전류는 고장 전과 같게 유지된다.

초기 적분 값을 결정하기 위해서는 부하전류 $I_{de,L}$, $I_{qe,L}$ 나 EG 전류 $I_{de,EG}$, $I_{qe,EG}$ 의 정보가 필요하다. 이 값들은 통신을 통해 저장해두거나 발전기의 드롭 특성을 이용하여 추정할 수 있다. 드

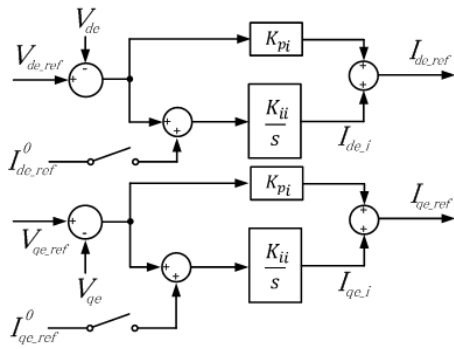


그림 8 제안하는 전압 제어 블록도

Fig. 8 Proposed voltage control block diagram

를 특성을 이용하여 발전기 전류를 추종하기 위해서는 모드 전환 전에 초기 적분 값 $I_{de_ref}^0, I_{qe_ref}^0$ 를 미리 결정해둬야 한다.

3.2 분리운전에서 연계운전으로 모드 전환

분리운전에서 부하전압은 BESS에 의해 제어되기 때문에 재연계하는 EG 전압과 위상 차를 갖는다. 이 위상 차를 제거하지 않고 재연계하면 큰 과도전류가 흐르게 되어 부하와 BESS에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 과도가 없는 안정적인 재연계를 위해서는 부하전압 V_{abc} 와 EG 전압 V_{abc_EG} 의 위상을 동기화하고 크기를 일치시켜야 한다. EG는 회전기이기 때문에 출력전압의 크기와 위상을 신속하게 조정하는 것은 불가능하다. 따라서 EG 전압 V_{abc_EG} 를 측정하여 전압의 크기 및 위상 정보를 얻은 후 BESS에 의해 제어되는 부하전압이 EG 전압을 추종하도록 크기와 위상을 제어한다[2].

그림 9는 연계운전 모드 전환 시 위상각을 추종하기 위한 PLL의 구성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 선택 스위치는 C에 연결할 경우 연계운전을, D에 연결할 경우 분리 운전을 위한 위상각 제어가 이루어진다.

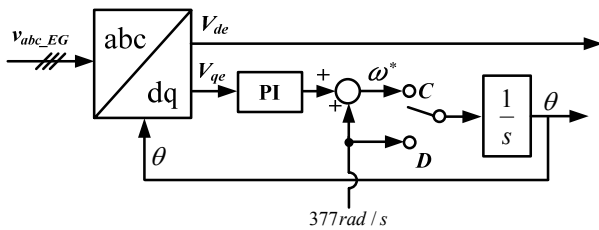


그림 9 EG위상 추종을 위한 PLL 블록도

Fig. 9 PLL for EG phase angle tracking

PLL을 이용한 위상동기화에서 PI제어기의 입력으로 Q축 성분 전압 V_{qe} 가 사용되는데 이는 다음 식을 통해 알 수 있다. 3상 전압 v_{abc} 가 정좌표변환 식 (1)에 의해 V_{ds} 와 V_{qs} 로 식 (15)와 같이 표현되고, V_{qe} 는 동기좌표변환 식 (2)를 이용하여 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ds} = V_m \cos \theta' \tag{15}$$

$$V_{qs} = V_m \sin \theta' \tag{16}$$

$$V_{qe} = V_m (-\cos \theta' \sin \theta + \sin \theta' \cos \theta) \tag{16}$$

식 (16)로 표현된 V_{qe} 는 Sine 함수의 원리와 충분히 작은 위상각 차에 대해 $\sin \theta \approx \theta$ 이므로 식 (17)과 같이 표현된다.

$$V_{qe} = V_m \sin(\theta' - \theta) = V_m (\theta' - \theta) \tag{17}$$

위 식에서 θ 는 제어기의 출력 BESS의 위상각이고 θ' 는 추종하려는 EG 전압의 위상각이다.

식 (17)을 통해 V_{qe} 는 위상각의 오차를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 3상 좌표계 변환이 이상적이고 페루프 전달함수의 차단주파수는 충분히 높다고 한다면 그림 9와 같이 PLL 시스템을 피드백 제어루프로 모델링 할 수 있다.

식 (6)에서 고정전압을 전압제어기의 지령전압으로 받던 BESS는 동기좌표계에서의 EG 전압 V_{de_EG} 와 V_{qe_EG} 를 기준전압으로 대치하여 전압제어를 수행한다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 모드 전환 기법의 타당성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용한 모델은 그림 10과 같고 각 회로정수는 표 1과 같다. EG를 차단하기 위해 반도체 스위치 STS(Solid-State Transfer

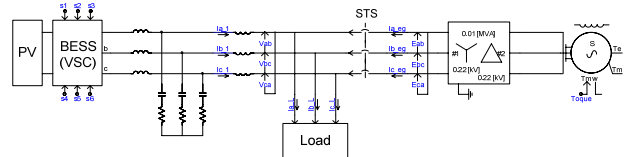


그림 10 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 회로도

Fig. 10 PSCAD/EMTDC Simulation circuit model

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameters

Parameters	Value
Line-to-Line Voltage(RMS)	220 V
Battery Voltage	450 V
Switching Frequency	10 kHz
Inverter Inductor	3 mH
Load Inductor	0.2 mH
Filter Capacitor	5 uF
Damping Resistor	1 Ω

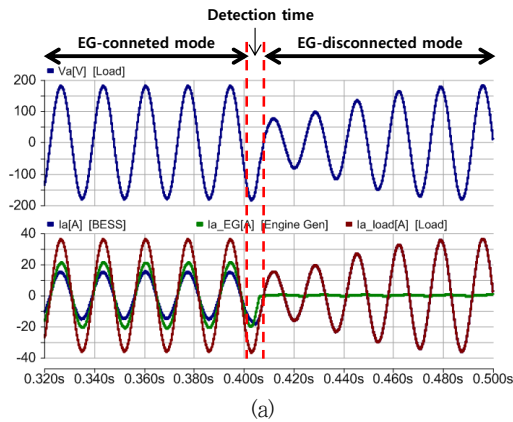
Switch)를 사용하였고, EG는 변압기를 통해 부하와 결합되는 것으로 하였다.

4.1 연계운전에서 분리운전으로 모드 전환

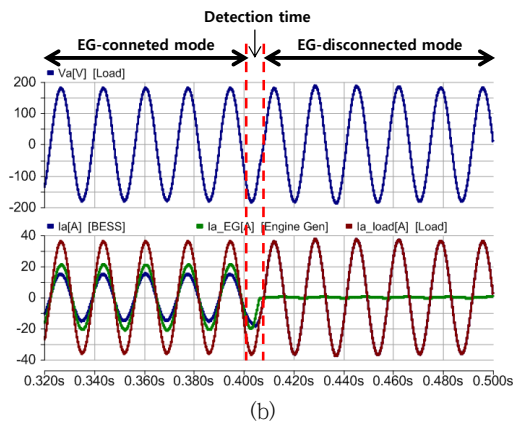
분리운전 모드 전환 시뮬레이션에서는 제안하는 초기적분 값을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 나누어 비교하였다. 그림 11은 모드전환 시의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 발전기와와의 분리는 0.4초에 발생하고 STS의 시간을 고려하여 약 8ms 후 0.408초에서 모드전환을 시작하도록 하였다.

그림 11의 (a)는 초기 적분 값을 적용하지 않은 파형을 나타낸다. 엔진발전기와 분리된 0.4초 이후부터 STS가 열리는 시간 0.408초까지 BESS는 전류제어를 수행하고, 그 이후부터 전압제어를 수행하게 된다.

전압제어로 모드 전환이 이루어진 직후에는 부하전압 V_a 와 부하전류 I_{a_load} 값은 분리 전보다 값이 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 이 때 전압제어기에 의해서 부하의 전압과 전류가 정상상태까지 도달하는데 과도시간이 약 60msec정도 걸리는 것을 알 수



(a)



(b)

그림 11 전류제어에서 전압제어로 모드 전환 시뮬레이션 결과; (a) 제안방식 적용 전, (b) 제안방식 적용 후

Fig. 11 Simulation results of mode change from Current control to Voltage control; (a) Without proposed method, (b) With proposed method

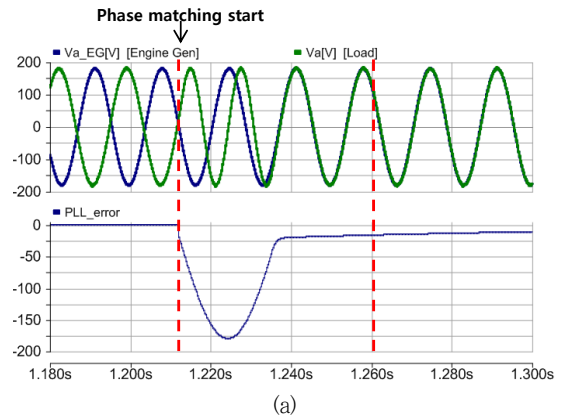
있다.

그림 11(b)는 모드 전환 시 전압제어기에 초기 적분치를 적용한 결과를 나타낸다. 제어기는 마찬가지로 BESS는 0.408초 이전까지는 전류제어를 수행하고 검출 이후 전압제어를 수행한다. 그림 10의 (a)와는 다르게 정상상태까지 과도시간은 약 4ms정도임을 알 수 있다. 또한 부하의 전압과 전류는 STS가 열리는 시간 근방을 제외하고 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

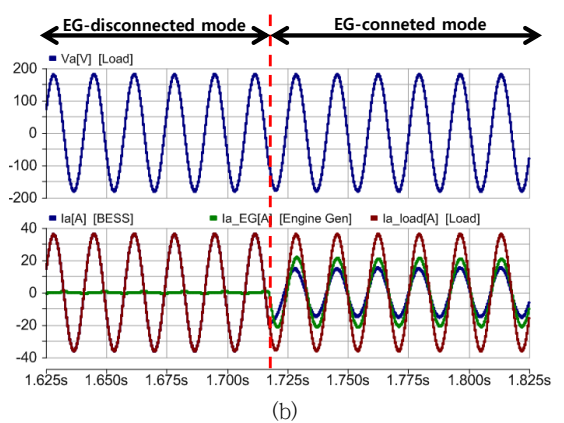
4.2 분리운전에서 연계운전으로 모드 전환

그림 12(a)는 PLL의 위상동기화를 적용하여 BESS가 전력을 공급하던 중 EG 전압과 위상동기화를 수행하는 것을 나타낸 것이다. 약 1.21초에 PLL 위상동기화 제어가 시작되면 부하전압 V_a 는 EG 전압 V_{a_EG} 와 위상이 일치되어 간다. PLL의 위상동기화 제어를 수행한 후 부하전압의 크기를 제어하면 EG전압이 동기좌표계에서 직류 값으로 고정되어 큰 과도현상 없이 일치시킬 수 있다.

위상동기화와 전압크기 제어를 통해 부하전압과 EG전압의 위



(a)



(b)

그림 12 전압제어에서 전류제어로 모드 전환 시뮬레이션 결과; (a) PLL 위상동기화, (b) 모드 전환 파형

Fig. 12 Simulation results of mode change from Voltage control to Current control; (a) PLL operation, (b) Mode change waveform

상이 같아지면 STS가 닫히게 되고 BESS는 전압제어에서 전류제어로 모드전환을 한다.

그림 12(b)는 BESS와 EG가 다시 연계되어 운전하는 과정을 보인 시뮬레이션 결과이다. 앞서 확인한 PLL 위상동기화를 수행한 후 약 1.72초에 연계운전을 시작한다. 부하전압 V_{abc} 와 EG전압 $V_{abc,EG}$ 의 위상차가 거의 없기 때문에 과도전류 없이 안정적인로 연계가 됨을 알 수 있다.

5. 하드웨어 실험 결과

본 논문에서 제안하는 모드전환기법을 하드웨어적으로 검증하기 위해 그림 1에 보인 회로구성과 표 1에 보인 데이터를 기반으로 하드웨어를 구축하고 실험을 실시하였다. 특히 제안하는 모드전환 알고리즘을 구현하기 위해 TMS320F28335 DSP 기반 제어 보드를 제작하고 여기에 C-코드로 프로그램 된 제어 및 시스템 모니터링 알고리즘을 구현하였다. 시뮬레이션 결과와 상호비교를 위해 실험조건은 시뮬레이션 조건과 동일하게 그리고 검출 시간도 약 8ms로 동일하게 설정하였다. 또한, STS의 on/off는 DSP 제어기에서 제어신호에 의해 원격으로 제어된다.

5.1 연계운전에서 분리운전으로 모드 전환

분리운전 모드 전환 실험에서는 시뮬레이션과 마찬가지로 초기적분 값을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어 실험파형을 비교하였다. 그림 13은 연계운전에서 분리운전으로 모드전

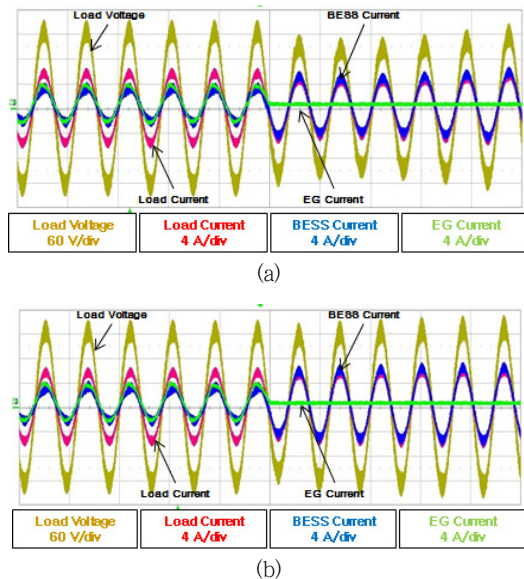


그림 13 전류제어에서 전압제어로 모드 전환 실험 결과; (a) 제안방식 적용 전, (b) 제안방식 적용 후

Fig. 13 Experimental results of mode change from Current control to Voltage control; (a) Without proposed method, (b) With proposed method

환을 한 실험결과를 나타낸 것이다. EG가 분리되면 EG전류는 0이 되며 BESS는 STS 가정에 의해 8ms 이후 고장을 검출하여 모드전환을 수행하게 된다.

그림 13의 (a)는 초기적분 값을 적용하지 않은 실험결과를 나타낸 것이다. EG가 분리되고 난 후 BESS는 전류제어에서 전압제어로 모드전환을 수행한다. 검출시간 동안은 BESS가 전류제어를 수행하고 있어 부하전압이 감소함을 알 수 있다. 약 8ms 후에 BESS는 전압제어로 모드전환이 이루어지고 이후 전압이 정상상태까지 회복하는 데에는 약 60ms정도 걸리는 것을 알 수 있다.

그림 13의 (b)는 전압제어기에 초기적분 값을 적용한 경우의 실험결과를 나타낸 것이다. 제어는 초기적분 값을 적용하지 않은 경우와 마찬가지로 BESS는 검출시간 이전까지는 전류제어를 수행하고 검출 이후 전압제어를 수행한다. 하지만 그림 13의 (a)와는 다르게 모드전환 후 부하전압이 빠르게 회복하는 것을 확인할 수 있다.

5.2 분리운전에서 연계운전으로 모드 전환

그림 14는 분리운전에서 연계운전으로 모드전환 시 부하전압과 EG 전압의 위상동기화와 부하전압과 전류, EG 전류, BESS 전류를 나타낸 것이다. 그림 14(a)에서 PLL 위상동기화 제어에 의해 부하전압이 부드럽게 EG 전압과 위상이 동기화됨을 알 수 있다. 위상동기화를 이룬 후 STS는 닫히고 연계운전으로 전환이 된다.

그림 14(b)는 PLL 위상동기화 후 EG의 연계운전 모드전환 시 부하전압과 전류, EG 전류, BESS 전류의 실험 결과를 나타낸 것

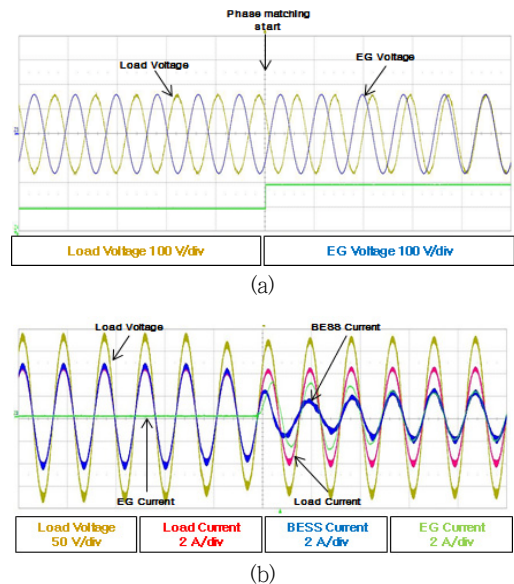


그림 14 전압제어에서 전류제어로 모드 전환 실험 결과; (a) PLL 위상동기화, (b) 모드 전환 파형

Fig. 14 Experimental results of mode change from Voltage control to Current control; (a) PLL operation, (b) Mode change waveform

이다. 부하전압이 EG 전압을 정확하게 추종하였기 때문에 과도현상 없이 연계가 가능하고 연계운전으로 전환이 되면 BESS는 전류제어로 전환이 되어 EG 전류는 증가하고 BESS 전류는 감소하여 부하의 전류를 서로 분담하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 BESS와 병렬운전 중인 엔진발전기를 분리운전할 때 발생하는 과도현상을 줄이기 위해 BESS 전압제어기 내의 PI 제어기 중 적분기에 초기 값을 더하여 과도현상이 거의 발생하지 않는 무순단 모드전환 기법을 제안하였다. 제안한 기법의 PI 제어기의 적분기 초기 값은 엔진발전기의 전류를 통신에 의해 직접 감지하거나 또는 Droop 제어기에서 주파수 변동에 따른 유효전력의 변동을 통해 엔진발전기의 전류를 추정하여 BESS전류와의 합으로 설정한다. 또한 분리운전에서 다시 연계운전으로 전환할 때 엔진발전기의 전압 위상정보를 감지하여 BESS의 출력전압 위상각이 엔진발전기의 출력전압 위상각을 추종하도록 제어하여 과도현상 없이 안정적인 연계가 가능하다.

제안하는 기법의 동작타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고 이를 기반으로 하드웨어 실험 장치를 구성하여 실험을 실시하였다. 그 결과 제안하는 기법은 분리운전 시 전압제어기의 과도현상을 크게 줄일 수 있었고, 재 연계운전 시 큰 과도현상 없이 연계됨을 확인할 수 있었다.

제안하는 기법은 낙도에서 일조량이 충분할 때는 태양광과 BESS를 이용하여 부하에 전력을 공급하고 그렇지 못할 때는 엔진발전기를 최소한으로 사용하여 연료절감과 친환경 전력공급에 유효할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20133010021790)입니다.

References

[1] K. S. Paprika, M. Ozdemir and M. T. Aydemir "Active and reactive power sharing and frequency restoration in a distributed power system consisting of two UPS units," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 31, pp. 220-226, 2009.

[2] T. Thanh-Vu, C. Tae-Won, L. Hong-Hee, K. Heung-Geun, and N. Eui-Cheol, "PLL-Based Seamless Transfer Control Between Grid-Connected and Islanding Modes in Grid-Connected Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions*

on, vol. 29, pp. 5218-5228, 2014.

[3] Lin, Ming-Chuan; Lu, Lin-Yu; Chu, Chia-Chi, "Implementations of seamless transfer and active islanding detections for microgrid applications," *Industrial Electronics (ISIE), 2013 IEEE International Symposium on*, vol. no. pp.1-6, 28-31 May 2013.

[4] Balaguer, I.J.; Qin Lei; Shuitao Yang; Supatti, U.; Fang Zheng Peng, "Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation," in *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.58, no.1, pp.147-157, Jan. 2011.

[5] Hyosung Kim; Taesik Yu; Sewan Choi, "Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive Inverters in Distributed Generation Systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.23, no.3, pp.1342-1347, May 2008.

[6] Sunjae Yoon; Junbum Kwon; Junsung Park; Sewan Choi, "Indirect current control for seamless transfer of three-phase utility interactive inverters," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, vol. no. pp.625-632, 6-11 March 2011.

[7] Sunjae Yoon; Hyeongmin Oh; Sewan Choi, "Controller Design and Implementation of Indirect Current Control Based Utility-Interactive Inverter System," in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.28, no.1, pp.26-30, Jan. 2013.

[8] Zhilei Yao; Lan Xiao; Yangguang Yan, "Seamless Transfer of Single-Phase Grid-Interactive Inverters Between Grid-Connected and Stand-Alone Modes," in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.25, no.6, pp.1597-1603, June 2010.

[9] Tirumala, R.; Mohan, N.; Henze, C., "Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, vol.2, no., pp.1081-1086 vol.2, 2002.

[10] Sangmin Jung; Youngsang Bae; Sewan Choi; Hyosung Kim, "A Low Cost Utility Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Generation," in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.22, no.6, pp.2293-2298, Nov. 2007.

[11] Qing-Chang Zhong; Hornik, T., "Cascaded Current-Voltage Control to Improve the Power Quality for a Grid-Connected Inverter With a Local Load," in *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.60, no.4, pp.1344-1355, April 2013.

[12] Mohamed, Y.A.-R.I.; Radwan, A.A., "Hierarchical Control System for Robust Microgrid Operation and Seamless Mode Transfer in Active Distribution Systems," in *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol.2,

no.2, pp.352-362, June 2011.

- [13] De Brabandere, K.; Bolsens, Bruno; Van den Keybus, J.; Woyte, A.; Driesen, J.; Belmans, R. "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.22, no.4, pp.1107-1115, July 2007
- [14] Qin Lei; Shuitao Yang; Peng, F.Z., "Multi-loop control algorithms for seamless transition of grid-connected inverter," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, vol. no. pp.844-848, 21-25 Feb. 2010.
- [15] Ochs, D.S.; Mirafzal, B.; Sotoodeh, P. "A Method of Seamless Transitions Between Grid-Tied and Stand-Alone Modes of Operation for Utility-Interactive Three-Phase Inverters," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.50, no.3, pp. 1934-1941, May-June 2014.
- [16] Liserre, M.; Blaabjerg, F.; Hansen, S., "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.41, no.5, pp.1281-1291, Sept-Oct. 2005.



김 교 민 (Kyo-Min Kim)

1990년 10월 18일생. 2015년 명지대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
E-mail : kyro1337@naver.com



유 승 영 (Seung-Yeong Yu)

1990년 10월 23일생. 2015년 명지대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
E-mail : dbtmddud90@naver.com



한 병 문 (Byung-Moon Han)

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 미 Westinghouse중앙연구소선임연구원. 현재 명지대 전기공학과 교수.
E-mail : erichan@mju.ac.kr

저 자 소 개



신 은 석 (Eun-Suk Shin)

1989년 7월 4일생. 2014년 명지대 전기공학과 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
E-mail : sinunsuk@naver.com



김 현 준 (Hyun-Jun Kim)

1985년 11월 12일생. 2011년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박사과정 통합과정
E-mail : inverter1112@naver.com