

도시철도의 직류전력 공급을 위한 사이리스터를 사용한 병렬 듀얼 컨버터의 순차적 모드 전환 제어 알고리즘에 대한 연구

A Studies for Sequential Mode Change Control Algorithm of the Parallel Dual Converter of Using Thyristor for Supplying the Urban Railway DC Power

한 성 우[†] · 김 성 안* · 조 윤 현* · 변 기 식**
(Sung-Woo Han · Sung-An Kim · Yun-Hyun Cho · Gi-Sig Byun)

Abstract - This paper is proposed control algorithm for the using thyristor of the parallel dual converter for Urban railway power supply in order to return the regenerative power generated by regenerative braking in urban railway train. Conventional control algorithm of Thyristor dual converter for urban railway power supply has voltage variation within a control range of hysteresis band. The purposed control algorithm of the parallel thyristor dual converter is to maintain a constant voltage without voltage variation in accordance with variable load through the Sequential mode change. And the control algorithm need calculating optimum initial firing angle to consider magnitude of the load current slope. For this purpose, Proposed algorithm for sequential conversion mode of the dual converter was verified by applying for the simulation.

Key Words : Thyristor dual converter, Urban railway, Power supply system, Regenerative energy

1. 서 론

대한민국은 지구 온난화 지연을 위해 중기 온실가스 감축 목표를 2020년까지 온실가스 배출전망치(BAU) 대비 30%, 2030년까지 37%를 감축하기로 발표함에 따라 교통분야에서도 온실가스 감축 목표 달성을 위한 에너지 절감대책이 요구되고 있다[1].

최근 도시철도에서도 전동차의 운영효율 향상과 온실가스 감축을 위해 도시철도 전동차 정차 시에 발생하는 회생에너지를 재사용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있는 추세이다.

기존의 도시철도 전동차의 전력공급 시스템은 교류 전원으로부터 전차선에 직류를 공급하기 위하여 주로 다이오드 정류방식을 이용하고 있다. 다이오드 정류방식은 설비가 간단하며 유지보수에 유리하지만 소자 특성상 단방향 전력 공급만 가능하다. 따라서 회생에너지를 재사용 할 수 없으며 전차선에 인가되는 직류전압의 제어가 불가능한 단점을 갖고 있다.

도시철도 전동차의 회생 제동 시 발생하는 회생에너지를 재사용하기 위한 방법으로 기존 다이오드 정류방식 시스템에 IGBT 회생인버터나 에너지 저장장치를 이용하여 별도의 장치를 구성하는 방식이 연구되어 왔다[2, 3].

그러나 전력용 반도체 소자 특성상 용량제한과 낮은 효율 때문에 상용화에 어려움이 있다. 그러므로 별도의 장치 없이 회생에너지 재사용이 가능하고 용량제한에서 자유로운 사이리스터를 사용한 듀얼 컨버터 도시철도 전력공급 장치의 적용이 필요하다[4, 5].

사이리스터를 이용한 듀얼 컨버터는 12펄스 사이리스터 컨버터를 역병렬로 연결한 구성을 가지고 있다. 사이리스터 듀얼 컨버터는 전차선의 부하에 따라 Forward Mode와 Reverse Mode 운전을 통하여 제어되며, 순방향 사이리스터 컨버터는 Forward Mode 운전을 통하여 전차선에 전력을 공급할 때 동작하며, 역방향으로 연결된 사이리스터 컨버터는 Reverse Mode 운전으로 회생에너지가 발생할 경우 교류 전원측으로 전력을 환원 시켜줄 때 동작한다.

기존 사이리스터 듀얼 컨버터 제어는 컨버터의 모드 전환 시 히스테리시스 밴드 내의 전압변동률을 가지고 있다. 또한 모드 전환 시 부하의 기울기에 상관없이 일정한 초기 점호각을 적용함으로써 부하 기울기에 따라 다른 전압 변동률을 가지는 단점이 있다.

도시철도 전차선 전력 공급용 사이리스터 듀얼 컨버터의 목적은 부하변화에 따라 전차선 가선전압을 일정하게 유지시켜주는 것이다. 부하의 방향이 바뀔 경우에도 안정적인 모드 전환을 통하여 전압변동률을 최소화하는 것이 중요하다. 또한 전력 공급 시스템의 단순화를 위해 듀얼 컨버터를 병렬로 운전하는 제어 알고리즘이 필요하며 병렬 운전 시에는 각 컨버터의 부하 불균형을 방지하기 위하여 부하전류를 균등하게 분배하는 제어 알고리즘이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 사이리스터 듀얼 컨버터의 병렬운전을 위한 최적의 제어 알고리즘을 제안한다. 사이리스터 듀얼 컨버터 2대를 병렬로 연결하고 각 컨버터에서 모드 전환 알고리즘을 순차적으로

[†] Corresponding Author : R&D Center, Busan, Transportation Corporation, Korea

E-mail : h111641@humetro.busan.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea

** Dept. of Control & Instrumentation, Pukyong National University, Korea

Received : February 1, 2016; Accepted : February 22, 2016

적용하여 전차선으로 공급되는 출력전압의 변동을 최소화한다. 또한 부하의 기율기를 고려한 초기점호각을 적용함으로써 직류전압의 변동률을 저감시키며, 각 사이리스터 듀얼 컨버터의 전류제어를 통하여 부하전류를 균등하게 분배한다.

본 연구에서는 PSIM 시뮬레이션 구성도에 제안된 알고리즘을 적용하여 다양한 부하 변동에 따른 시뮬레이션 결과를 분석함으로써 제안된 제어 알고리즘의 유효성을 검증했다.

2. 듀얼 컨버터 구성 및 이론

그림 1은 사이리스터 듀얼 컨버터 시스템 개략도를 나타낸다. 사이리스터 듀얼 컨버터 시스템은 전차선에 필요한 전력을 공급하고 부하에 따라 공급 전력의 제어가 가능하다. 전동차가 정차 시 발생한 회생전력으로 전차선 가선전압이 상승하게 되면 듀얼 컨버터는 모드 전환을 통하여 상승된 전차선 전압을 교류 모션으로 되돌려 주어 회생전력을 재사용 할 수 있다.

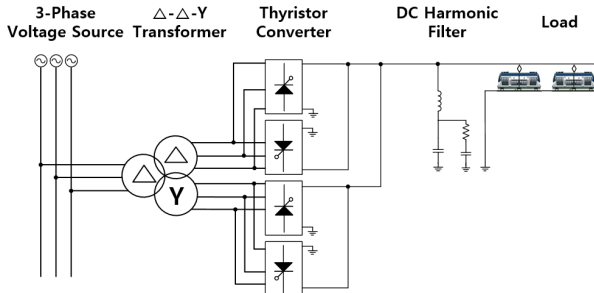


그림 1 사이리스터 듀얼 컨버터 시스템 개략도
Fig. 1 Configuration of a thyristor dual converter system

기존 회생 전력 시스템과 비교하면 회생전력의 용량 제한이 발생하지 않기 때문에 회생전력의 재사용에 한계가 없어진다. 또한 제안된 시스템은 간단한 구조를 가지고 있어 기존 시스템에서 발생한 복잡한 구조와 설치면적 증가 문제, 에너지 저장 장치의 수명 한계, 별도의 제어기 및 변압기 신설로 인한 유지보수 비용 증가, 에너지 손실 증가 등을 해소할 수 있으며 단위 변전소간의 전차선 구분장치(절연 섹션)가 필요 없는 등의 장점을 가진다[6].

단일 사이리스터 듀얼 컨버터는 2대의 3상 6펄스 위상제어 정류기를 역병렬 접속하여 동작이 가능하도록 구성되어있다.

기본적으로 하나의 컨버터는 Forward mode로, 다른 하나의 컨버터는 Reverse mode로 동작하도록 하며, 출력전압이 일정한 기준 전압 값을 추종하도록 컨버터를 제어 한다.

Forward mode와 Reverse mode 컨버터의 지연각을 각각 α_{Fwd} , α_{Rev} 라 하면 각각의 출력전압의 평균값은 다음과 같다.

$$V_{Fwd} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cos\alpha_{Fwd} \quad (1)$$

$$V_{Rev} = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cos\alpha_{Rev} \quad (2)$$

수식 (1)과 (2)로부터 점호각은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\cos\alpha_{Rev} = -\cos\alpha_{Fwd} = \cos(\pi - \alpha_{Fwd}) \quad (3)$$

따라서, α_{Rev} 와 α_{Fwd} 의 관계는 다음과 같다.

$$\alpha_{Rev} = \pi - \alpha_{Fwd} \quad (4)$$

출력전압의 크기는 수식 (2)와 (3)에 의하여 결정되며, 고조파는 수식 (5)에 의하여 결정된다.

$$V_0 = \frac{3V_L}{\pi} \cdot \left| \frac{\cos(6n-1) \cdot \alpha}{6n-1} - \frac{\cos(6n-1) \cdot \alpha}{6n+1} \right| \quad (5)$$

그림 2는 병렬 듀얼 컨버터의 구조적 개념도를 나타낸다. 하나의 부하에 2개의 듀얼 컨버터(#1, #2)를 전차선에 병렬로 연결한 구조를 가지고 있다.

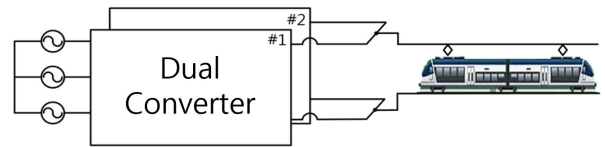


그림 2 병렬 듀얼 컨버터의 개념도
Fig. 2 Configuration of parallel thyristor dual converter

V_{ref} 는 기준전압, V_{dc} 는 전차선의 가선전압, $V_{ref,max}$ 는 최대 기준전압, $V_{ref,min}$ 은 최소 기준전압이다. 단일 듀얼 컨버터의 모드 전환은 V_{dc} 의 값에 따라 $V_{ref,max}$ 또는 $V_{ref,min}$ 을 기준으로 모드 전환이 이루어진다. 따라서 모드 전환 시 가선전압 V_{dc} 는 $V_{ref,max}$ 와 $V_{ref,min}$ 범위의 전압 변동이 발생한다. 따라서 듀얼 컨버터의 모드 전환 시 전차선 가선전압 V_{dc} 가 기준전압 V_{ref} 를 신속하게 추종하는 제어 알고리즘이 필요하다.

그러므로 병렬 듀얼 컨버터는 모드 전환 시 각각의 듀얼 컨버터가 순차적으로 모드 전환되어 임의의 부하에서도 안정적으로 V_{dc} 를 출력하는 병렬 듀얼 컨버터 제어 알고리즘을 가지고 있어야 한다.

3. 듀얼 컨버터 제어 알고리즘

3.1 단일 듀얼컨버터 제어 알고리즘

도시철도 전차선 전력공급용 사이리스터 듀얼 컨버터의 제어는 부하전류 I_{dc} 에 따라 Forward / Reverse Mode의 안정적인 모드 전환을 통하여 전차선 가선전압 V_{dc} 의 전압변동을 저감시키는 것이 중요하다. 제어 알고리즘의 기본적인 원리는 전동차의 정차 시에 전동차에서 발생하는 회생전력으로 인해 전차선 가선

전압 V_{dc} 가 상승하여 최대 기준전압 $V_{ref,max}$ 에 도달하면 듀얼 컨버터는 Reverse Mode로 동작하여 상승된 전차선 가선전압을 교류 모선으로 환류시킨다. 전동차의 기동 등으로 전차선에서 전력이 필요하여 전차선 가선전압 V_{dc} 가 최소 기준전압 $V_{ref,min}$ 이하가 되면 듀얼 컨버터를 Forward Mode로 동작한다.

그림 3은 단일 듀얼 컨버터 시스템 제어의 기본 블록 다이어그램이다.

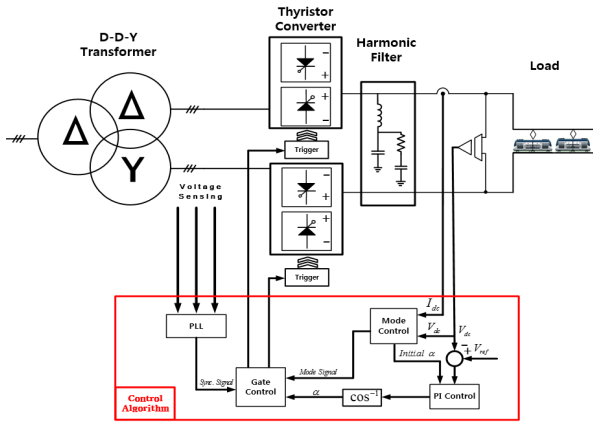


그림 3 단일 듀얼 컨버터 시스템 제어의 기본 블록 다이어그램
Fig. 3 Basic block diagram of a dual converter control system

제어 알고리즘은 듀얼 컨버터의 입력전압 즉, 3상 Δ - Δ -Y의 출력 전압을 검지하여 사이리스터의 점호각 α 를 적용하기 위한 기준이 되는 시점을 계산한다. 직류 전압 V_{dc} 와 부하전류 I_{dc} 를 검지하여 제어 알고리즘에 따라 듀얼 컨버터의 모드를 결정하며, Forward/Reverse Mode 전환 시 초기 점호각 $\alpha_{initial}$ 을 적용하여, V_{ref} 를 빠르게 추종하도록 한다. 그 이외의 경우에는 기준 전압 V_{ref} 와 가선전압 V_{dc} 를 이용한 PI제어를 통한 점호각 α 를 결정하여 사이리스터 컨버터를 제어한다[6-11].

표 1은 단일 듀얼 컨버터 제어 알고리즘 조건이며, 그림 4는 단일 컨버터 제어 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

제어 알고리즘의 순서는 가선전압 V_{dc} 및 부하전류 I_{dc} 를 검지하여 듀얼 컨버터 모드 전환 알고리즘에 입력된다. 먼저 모드 초기화 조건에 따라 기준전압 V_{ref} 및 부하전류 I_{dc} 가 모두 조건을 만족할 경우에는 Forward Mode 및 Reverse Mode를 초기화 시켜준다. 모드 초기화 이후에 모드 전환이 되도록 구성했다.

표 1에서는 듀얼 컨버터의 모드 전환 조건이 구성되어 있으며 모드 초기화 조건을 만족한 이후에 이루어지도록 되어있다.

모드 초기화 조건은 모드 전환 조건 보다 넓은 범위에 있으므로 모드 초기화가 되는 동시에 바로 모드 전환이 이루어진다.

따라서 모드 off구간이 발생하지 않도록 했다. 여기서 부하전류 I_{dc} 는 기율기에 따라 모드 전환 시점의 최고 및 최저 전압에 영향을 미친다. 따라서 부하전류 I_{dc} 기율기 값에 따라 최적의 초기 점호각 $\alpha_{initial}$ 을 적용할 수 있도록 했다. 부하전류 I_{dc} 의 기율기 값을 구간화하고 PI제어에 사용하는 누적 에러 값을 선정했다.

모드 전환 시점에서 최적 초기 점호각 $\alpha_{initial}$ 을 적용함으로써 전압의 변동률을 저감할 수 있도록 하였다.

표 1 단일 듀얼 컨버터 제어 알고리즘 조건

Table 1 Conditions of a thyristor dual converter control algorithm

		조 건
초기화 조건	Forward Mode 초기화	$I_{dc} < I_{zero}$ && $V_{dc} > V_{ref,max1}$
	Reverse Mode 초기화	$I_{dc} > -I_{zero}$ && $V_{dc} < V_{ref,min1}$
모드 전환 조건	Forward Mode 전환	모드 초기화, $I_{dc} > I_{zero2} \parallel V_{dc} < V_{ref,min2}$
	Reverse Mode 전환	모드 초기화, $I_{dc} < -I_{zero2} \parallel V_{dc} > V_{ref,max2}$

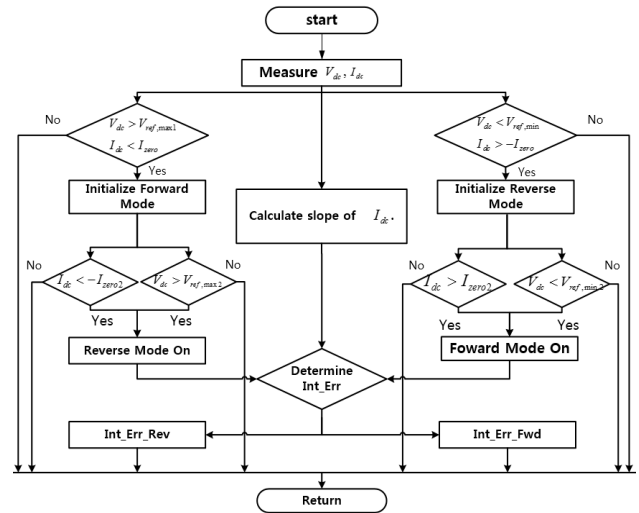


그림 4 단일 듀얼 컨버터 제어 알고리즘 순서도

Fig. 4 Flowchart of a thyristor dual converter control algorithm

3.2 병렬 듀얼컨버터 제어 알고리즘

그림 5는 병렬 듀얼 컨버터의 부하전류에 따른 모드 전환을 나타낸 그림이다. I_{total} 은 부하전류 I_{dc} 와 동일하며, I_{ref1} 과 I_{ref2} 는 각 듀얼 컨버터의 기준전류이다. I_{ref1} , I_{ref2} , I_{ref3} , I_{ref4} 는 듀얼 컨버터의 모드를 결정하기위한 제어의 기준전류이다. I_{Df} 는 듀얼 컨버터 간의 차전류 제어용 순환전류를 흘려주기 위해 각 컨버터 기준전류의 크기를 제한한다. 총 전류 I_{total} 은 각 듀얼 컨버터의 출력 전류 I_{ref1} , I_{ref2} 의 합으로 계산되며, 영전류 부근에서 안정적인 모드 전환을 위해 듀얼 컨버터 사이의 순환전류를 흐르게 하여 차전류 제어를 하며 I_1 과 I_2 가 I_{ref1} 과 I_{ref2} 를 추종하도록 한다.

병렬 듀얼 컨버터의 모드를 결정하기 위하여 조건에 따라

Flag신호와 gate신호를 결정해 줌으로써 순차적인 모드 전환이 이루어지도록 구성하였다.

병렬 듀얼 컨버터의 각 듀얼 컨버터가 같은 모드로 운전할 경우 각각의 듀얼 컨버터에 균등한 부하를 분배하며, 부하전류 I_{dc} 가 영전류 부근에 있을 경우에도 순차적인 모드 전환을 하기 위해 각각의 듀얼 컨버터에 다른 기준 전류 I_{ref1} , I_{ref2} 를 설정했다. 임의의 부하전류에도 어느 한 대의 듀얼 컨버터가 전압제어를 담당함으로써 일정한 전압을 유지하면서 듀얼 컨버터의 모드전환이 이루어지도록 구성하였다.

표 2는 부하전류 I_{dc} 의 값에 따른 병렬 듀얼 컨버터의 각 듀얼 컨버터 기준전류를 나타낸 표이다. Case1과 Case5의 조건 일 때는 I_{ref1} , I_{ref2} 를 동일한 크기($I_{dc}/2$)로 설정함으로써 각 듀얼 컨버터에 부하전류 I_{dc} 가 균등하게 분배될 수 있도록 구성하였으며, Case2와 Case4의 경우에는 하나의 듀얼 컨버터를 off 시키고 남은 하나에 부하전류 I_{dc} 를 흐르게 함으로써 차전류 제어와 동시에 하나의 듀얼 컨버터가 V_{ref} 를 추종하도록 하여 V_{dc} 를 유지시킨다. Case3의 경우에는 I_{ref1} 은 $I_{dc}/2$ 에 I_{Dif} 를 더해주고 I_{ref2} 는 $I_{dc}/2$ 에 I_{Dif} 를 빼줌으로써 각 듀얼 컨버터 간에 순환전류가 흐를 수 있도록 하여 차전류 제어를 한다.

표 2 부하전류에 따른 각 듀얼 컨버터의 기준전류 설정

Table 2 Reference current setting of each of the dual converter in accordance with the load current

Case	조 건	Mode#1	Mode#2	I_{ref1}	I_{ref2}
1	$I_{dc} < I_{Rev4}$	Reverse	Reverse	$I_{dc}/2$	$I_{dc}/2$
2	$I_{Rev4} < I_{dc} < I_{Rev3}$	off	Reverse	0	I_{dc}
3	$I_{Rev3} < I_{dc} < I_{Rev2}$	Forward	Reverse	$I_{dc}/2 + I_{Dif}$	$I_{dc}/2 - I_{Dif}$
4	$I_{Rev2} < I_{dc} < I_{Rev1}$	Forward	off	I_{dc}	0
5	$I_{dc} > I_{Rev1}$	Forward	Forward	$I_{dc}/2$	$I_{dc}/2$

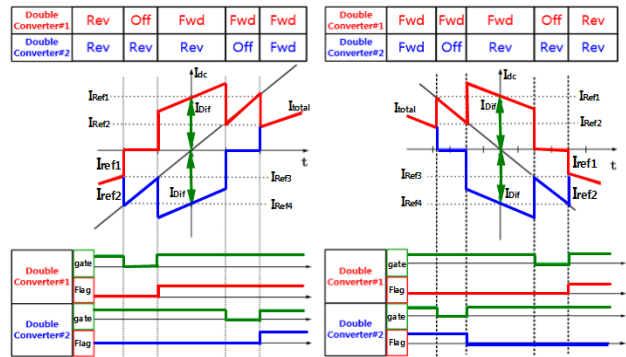


그림 5 병렬 듀얼 컨버터의 부하전류에 따른 모드 운전

Fig. 5 Mode of operation according to the load current dual parallel converter

그림 6은 병렬 듀얼 컨버터의 제어 블록다이어그램을 나타내

었다. 전차선 가선전압 V_{dc} 와 기준전압 V_{ref} 를 통하여 α 를 결정하며, I_1 과 I_2 를 이용한 점호각 α_{dif1} , α_{dif2} 는 표 2의 조건에 따라 계산한 I_{ref1} 과 I_{ref2} 를 통하여 결정된다. 점호각 α 에 차전류 제어를 위한 α_{dif1} , α_{dif2} 를 더해줌으로써 각각의 듀얼 컨버터 점호각을 결정한다.

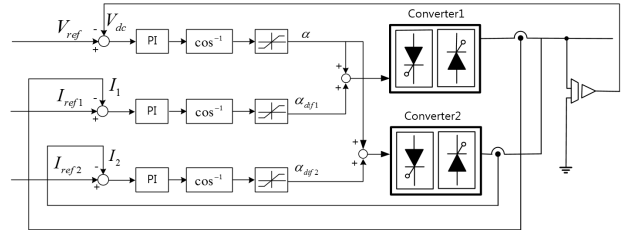


그림 6 병렬 듀얼 컨버터 제어 블록다이어그램

Fig. 6 Dual parallel converter control block diagram

4. 병렬 듀얼 컨버터 시뮬레이션

4.1 기존 제어 알고리즘과 제안한 제어 알고리즘 비교분석

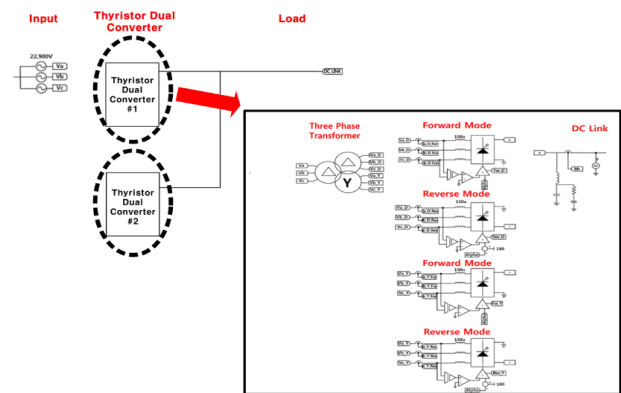


그림 7 병렬 듀얼 컨버터의 시뮬레이션 구성도

Fig. 7 Configuration simulation of parallel dual converter

그림 7은 병렬 듀얼 컨버터의 PSIM 시뮬레이션 구성도이다. 하나의 듀얼 컨버터 사양은 표 3과 동일하게 구성하였으며, 시뮬레이션에 적용한 제어 기준 값은 표 4와 같다.

먼저 $\pm 2,500A$ 의 크기와 주기 0.1Hz를 가지는 일정한 기술기 특성을 가지는 부하전류 I_{dc} 를 적용하여 병렬 듀얼 컨버터 시뮬레이션을 진행하였다.

4.1.1 일정한 변화율을 가지는 부하에 대한 특성 비교

그림 8과 그림 9는 일정한 변화율을 가지는 부하에 기존 제어 알고리즘과 제안된 제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과이다.

그림 8과 그림 9의 시뮬레이션 결과와 같이 제안된 제어 알고리즘의 가장 큰 특성은 부하전류 I_{dc} 의 부하가 바뀌더라도 V_{dc} 가

표 3 듀얼 컨버터 사양

Table 3 Dual converter specifications

	항 목	값
변압기	입력전압	3상 22.9kV
	결선	$\Delta - \Delta - Y$
	권선비	22,900 : 1,750 : 1,750/√3
	출력전압	3상 1,750V
듀얼 컨버터	정격 출력전압	DC 1,650V
	용량	8.25MW
	직류부하 전류	최고 전류 2,500A 최저 전류 -2,500A
듀얼 컨버터 제어	샘플링주기	10kHz
	제어주기	10kHz
	제어방식	Current & Voltage PI Control
	필터	Low Pass Filter 360Hz

표 4 병렬 듀얼 컨버터 시뮬레이션 제어 기준 값

Table 4 Dual parallel converter simulation control reference value

제어 기준	값	비 고
I_{ref1}	250A	$I_{dc,max} \times 0.1$
I_{ref2}	125A	$I_{dc,max} \times 0.05$
I_{ref3}	-125A	$I_{dc,min} \times 0.05$
I_{ref4}	-250A	$I_{dc,min} \times 0.1$
I_{Dif}	250A	
V_{ref}	1,650V	

V_{ref} 1,650V에서 크게 벗어나지 않는다. 제안된 제어 알고리즘을 적용한 듀얼 컨버터의 모드 전환시점은 최대 전차선전압 V_{max} 가 1,670V이며, 최소 전차선전압 V_{min} 은 1,630V의 값을 가진다. 기존 제어 알고리즘을 적용한 듀얼 컨버터의 V_{max} 1,705V, V_{min} 1,596V와 비교하면 전압변동을 크게 저감시켰음을 알 수 있다. 또한 I_{dc} 값에 따라 기준전류 I_{ref1} 과 I_{ref2} 가 결정 되고 있으며, I_{dc1} 과 I_{dc2} 가 기준 전류 값을 잘 추종하고 있음을 확인 할 수 있다.

표 5에서 그림 8과 그림 9의 시뮬레이션 결과 값을 비교하였다. 기존 제어 알고리즘에서는 최대 전차선전압 V_{max} 와 최소 전차선전압 V_{min} 의 차이가 109V이며, 제안된 제어 알고리즘을 적용한 경우에는 전압의 차이가 40V로 제안된 알고리즘의 전압변동이 69V 개선되었음을 알 수 있다.

4.1.2 일정하지 않은 변화율을 가지는 부하에 대한 특성 비교

그림 10과 그림 11은 부하 변화율이 일정하지 않을 경우의 기

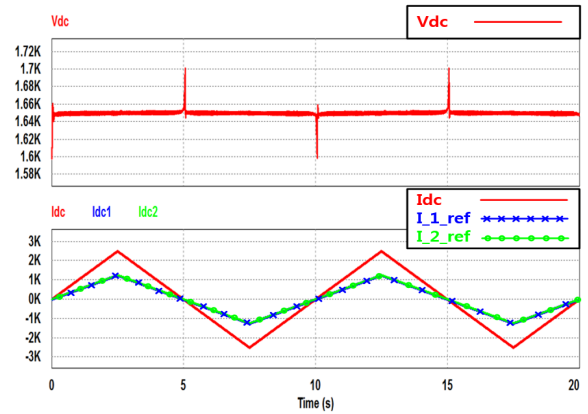


그림 8 기존 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(일정 부하 변화율)

Fig. 8 Simulation Result of Conventional Algorithm(Constant variation of load)

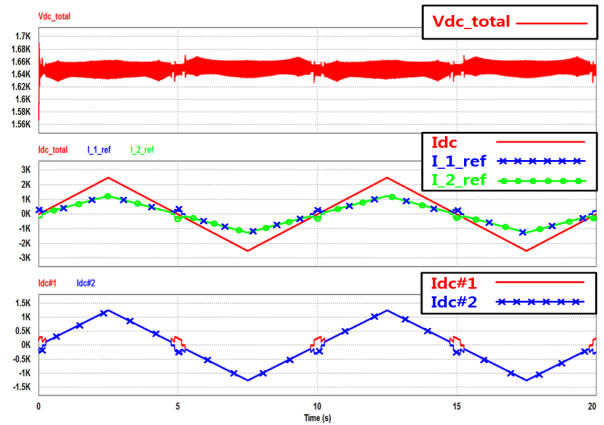


그림 9 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(일정 부하 변화율)

Fig. 9 Simulation Result of Proposed Algorithm(Constant variation of load)

표 5 병렬 듀얼 컨버터 시뮬레이션 결과 비교(일정한 부하 변화율)

Table 5 Dual parallel converter simulation result(Constant variation of load)

항 목	기존 알고리즘	제안된 알고리즘
V_{max}	1,705V	1,670V
V_{min}	1,596V	1,630V
$V_{max} - V_{min}$	109V	40V

준 제어 알고리즘과 제안된 제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 기존 제어 알고리즘을 적용할 경우, 모드 전환 시 제어 기준 이내의 전압변동을 가지며, 영전류 구간에서 누적된 에러

값에 의하여 전압이 크게 강하하여 기준전압을 추종하지 못하는 것을 알 수 있다.

하지만 제안된 제어 알고리즘을 적용할 경우, 부하전류 I_{dc} 의 기울기가 달라지거나 영전류 부근의 값을 가지더라도 V_{dc} 가 기준전압 V_{ref} 값 1,650V에서 크게 벗어나지 않으며 안정적인 운전을 하고 있다. 영전류 부근에서 전압 변동률이 가장 크며, V_{max} 는 1,696V이며, V_{min} 값은 1,628V이다. 기존 제어 알고리즘의 듀얼 컨버터와 비교하면 V_{max} 와 V_{min} 값이 개선되어 전압 변동이 감소하였다.

표 6에서 기존 제어 알고리즘과 제안된 제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과 값을 비교하였다. 기존 제어 알고리즘에서는 최대

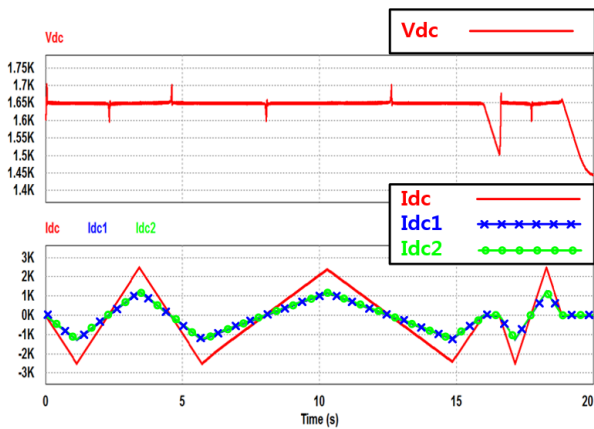


그림 10 기존 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(부하 변화율이 일정하지 않은 경우)

Fig. 10 Simulation Result of Conventional Algorithm(Diverse variation of load)

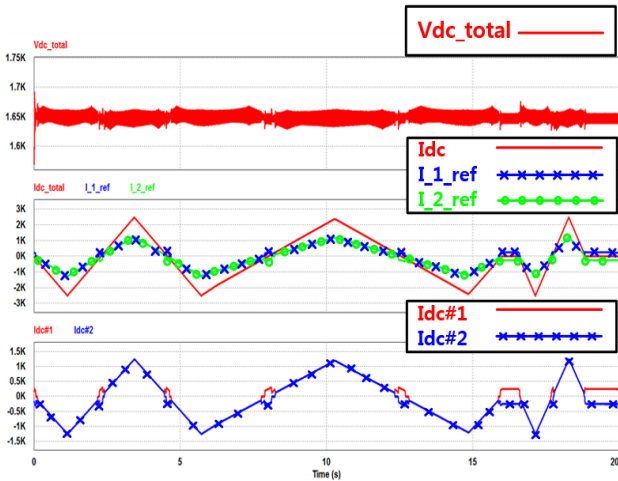


그림 11 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(부하 변화율이 일정하지 않은 경우)

Fig. 11 Simulation Result of Proposed Algorithm(Diverse variation of load)

전차선전압 V_{max} 와 최소 전차선전압 V_{min} 의 차이가 207V이며, 제안된 제어 알고리즘을 적용한 경우에는 전압의 차이가 68V로 제안된 제어 알고리즘의 전압변동이 139V 개선되었음을 알 수 있다.

4.2 제안한 제어 알고리즘을 적용한 각 사이리스터 듀얼 컨버터의 특성분석

그림 12와 그림 13은 제안된 알고리즘의 각 사이리스터 듀얼 컨버터 특성이다. 각 듀얼 컨버터는 병렬로 연결되어 있기 때문에 동일한 V_{dc} 값을 가지고 있다. I_1 와 I_2 가 I_{ref1} , I_{ref2} 를 잘 추

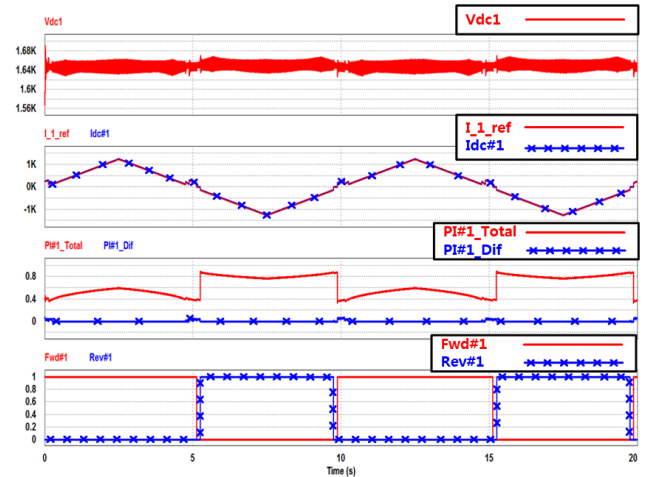


그림 12 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(듀얼 컨버터 #1)

Fig. 12 Simulation Result of Proposed Algorithm in constant variation of load (Dual Converter #1)

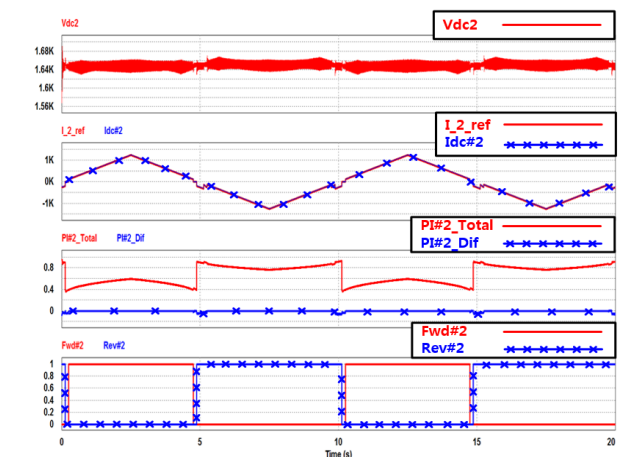


그림 13 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(듀얼 컨버터 #2)

Fig. 13 Simulation Result of Parallel dual converter in constant variation of load (Dual Converter #2)

중하고 있고 전압제어와 차전류 제어를 위한 PI값을 나타내었으며, Fwd#1, Fwd#2와 Rev#1, Rev#2를 통하여 듀얼 컨버터의 모드 특성을 나타내었다.

그림 14와 그림 15는 제안된 알고리즘을 적용한 병렬 사이리스터 듀얼 컨버터의 모드전환 특성이다.

그림 14는 부하전류 I_{dc} 가 양에서 음으로 전류의 방향이 바뀌고 있으며 Forward Mode로 운전하다가 제어 기준값에 의하여 Reverse Mode로 전환된다.

그림 15는 부하전류 I_{dc} 가 음에서 양의 값으로 전류의 방향이 바뀌고 있으며 모드는 Reverse Mode에서 Forward Mode로 전환된다.

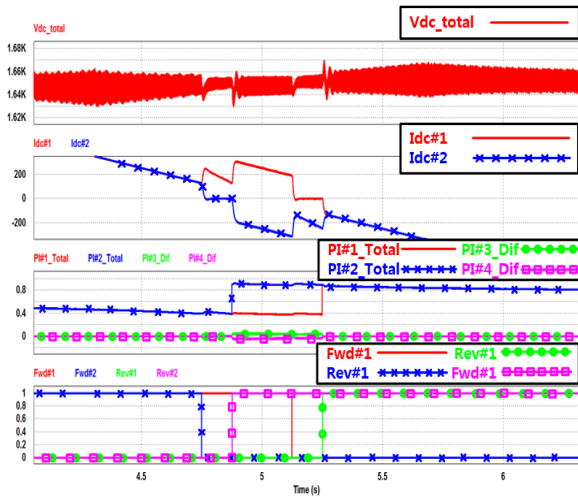


그림 14 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(모드전환 1)
 Fig. 14 Simulation Result of Proposed Algorithm in constant variation of load (Mode Change 1)

표 4의 조건에 따라 듀얼 컨버터의 모드 전환이 이루어지며 각 제어 구간이 변할 때마다 V_{dc} 가 변동하지만 V_{ref} 에 크게 벗어나지 않는다.

제안된 알고리즘은 그림 14와 그림 15에서 보여 주는 것과 같이 Fwd#1, Fwd#2, Rev#1, Rev#2를 통하여 각 듀얼 컨버터의 모드를 확인 할 수 있으며 단일 듀얼 컨버터와 다르게 임의의 시점에서도 하나의 듀얼 컨버터가 전압제어를 담당하고 있다. 이는 듀얼 컨버터가 V_{ref} 를 추종하면서 모드전환이 가능하도록 시뮬레이션이 되고 있음을 의미한다. 또한 각 듀얼 컨버터가 다른

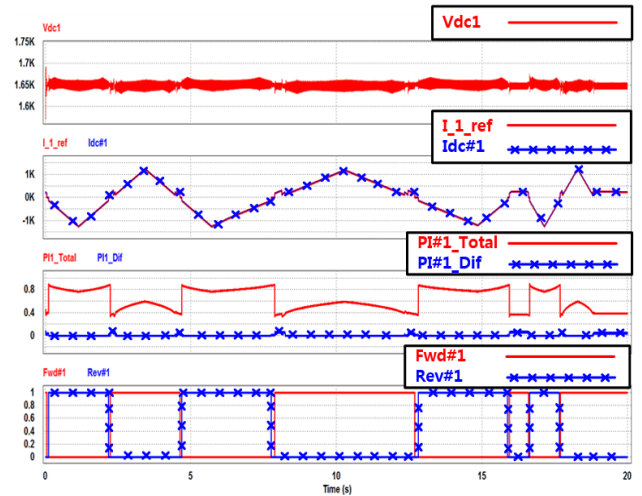


그림 16 부하 변화에 따른 병렬 듀얼 컨버터 시뮬레이션 결과 (듀얼 컨버터 #1)

Fig. 16 Simulation Result of Parallel dual converter in diverse variation of load(Dual Converter #1)

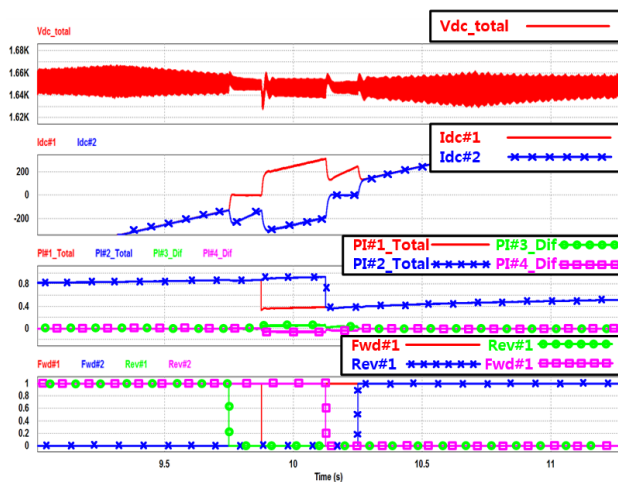


그림 15 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과(모드 전환 2)
 Fig. 15 Simulation Result of Proposed Algorithm in constant variation of load (Mode Change 2)

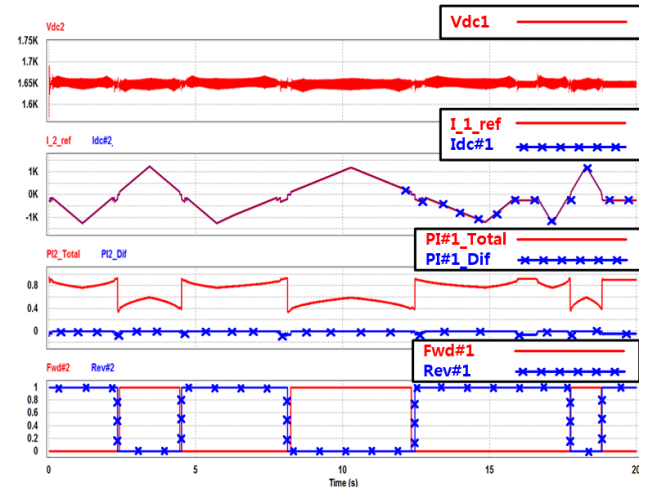


그림 17 부하 변화에 따른 병렬 듀얼 컨버터 시뮬레이션 결과 (듀얼 컨버터 #2)

Fig. 17 Simulation Result of Parallel dual converter in diverse variation of load(Dual Converter #2)

모드로 운전할 경우 I_{ref} 값을 설정하여 전류제어를 통한 I_{dc} 값을 제한하여 안정적인 운전이 가능하도록 구성되어있다.

그림 16과 그림 17은 부하 변화율이 일정하지 않을 때 제안된 알고리즘을 적용한 각 사이리스터 병렬 듀얼 컨버터의 특성이다. 부하전류 I_{dc} 의 변화에 대응하여 표 4의 조건에 따라 기준전류 I_{ref} 를 만들어 주면, 차전류 제어를 통하여 부하를 균등하게 분배하면서 순차적으로 모드 전환이 이루어짐으로써 전압변동률을 저감시키면서 안정적으로 모드 전환이 이루어지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

도시철도 전력공급 시스템은 전동차 운행에 따라 부하전력의 변화가 빈번하여 이에 대한 대책과 전동차 정차 시 회생제동으로 인하여 발생하는 회생전력을 재사용하기 위한 시스템이 필요하다.

기존의 다이오드 정류방식을 이용한 도시철도 전력공급 시스템은 부하의 변화에 따라 전차선 가선전압 V_{dc} 의 제어가 불가능하여 전차선 가선전압 V_{dc} 의 전압변동이 크고 소자의 특성상 회생전력을 재사용할 수 없다.

따라서 회생전력을 재사용하기 위해서는 에너지 저장장치나 IGBT 회생인버터 등, 별도의 장치가 필요하였다. 하지만 이러한 장치들은 낮은 효율성과 유지보수 비용 증가 등의 문제점을 가지며 전력공급 시스템의 안정성을 감소시키는 단점을 가지고 있다.

따라서 부하 변화에 따라 전차선 가선전압의 제어가 가능하며 회생전력을 재사용이 가능한 사이리스터 듀얼 컨버터 시스템의 제어 알고리즘을 고찰하였다.

본 논문에서는 도시철도 전력 공급용 사이리스터 듀얼 컨버터의 안정적인 운전을 위해서 모드 전환 시점에 전압변동을 저감시키고 전차선에 듀얼 컨버터 간 절연구분 장치를 설치하지 않기 위해 병렬 듀얼 컨버터로 운전이 가능한 제어 알고리즘을 연구하였으며, 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 각 구성요소를 설계사양에 맞추어 이론적 근거를 바탕으로 모델링하고 PSIM 시뮬레이션을 시행하여 도시철도 전차선 직류전력 공급용 사이리스터 사 용 병렬 듀얼 컨버터의 제어 알고리즘 타당성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 재원으로 철도운영 및 유지보수 효율화 기술개발 사업(15RTRP-B091404-02)의 지원을 받아 수행된 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

References

[1] Sung Ho Bea "Domestic Greenhouse Gas Reduction Policy" Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No 1, pp. 8-12, 2011.

[2] Chang-han Bae, Dong-uk Jang, Yong-gi Kim, Se-ky Chang, Jai-kyun Mok, "Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations" 7th International Conference on Power Electronics, pp. 801-805, 2007.

[3] Kyoungmin Kwon, Eun-Kyu Lee, Jaeho Choi, Seung-Gil Baek "Efficiency Improvement of ESS for DC Transit System" Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Vol. 4, pp. 2641-2646, 2012.

[4] Elena Agenjos, Antonio Gabaldon, Francisco G. Franco, Roque Molina, Sergio Valero, Mario Ortiz, Rafael J. Gabaldon, "Energy efficiency in railways : Energy storage and electric generation in diesel electric locomotives", 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution Part 1, pp. 1-7, 2009.

[5] Seung-Sam Seo, Sung-Woo Han, Gi-Sig Byun, "A Study on the Firing Angle at the Mode Conversion to Improve the Output Characteristics of the Double Converter for Urban Railway DC Power Supply", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 18, No 6, pp. 533-542, December 2015.

[6] Sung-Woo Han, "Development of algorithm for improving efficiency of dual converter power supply system of city railway", Master Thesis, Dong-A University, 2014.

[7] Reza Teymourfar, Ghias Farivar, Hossein Iman-Eini "Optimal stationary super-capacitor energy storage system in a metro line", 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), pp. 1-5, 2011.

[8] Junichi Nomura, Akihisa Kataoka, Katsuhisa Inagaki, "Development of a Hybrid Inverter and a Hybrid Converter for an electric railway", Power Conversion Conference - Nagoya, pp. 1164-1169, 2007.

[9] Zhongping Yang, Huan Xia, Bin Wand, Fei Lin "An Overview on Braking Energy Regeneration Technologies in Chinese Urban Railway Transportation "Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima ECCE-ASIA), pp. 2133-2139, 2014.

[10] Eui-Ho Song, Bong-Hwan Kwon. "A Current Source using the 12-Pulse Phase -Controlled Rectifier," The Transaction of Korea Institute of Electrical Engineers, Vol. 39, No 6, pp. 545-556, 1990.

[11] Bo Liljeqvist. "The Use of Voltage Controlled Thyristor Converters in Power Supply for DC Tranction Systems", Proceedings of the ASME/IEEE Spring Joint Railroad Conference, pp. 101-106, 1992.

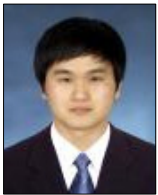
저 자 소 개



한 성 우 (SungWoo Han)

1985년 동아대학교 전기공학과 졸업(학사),
2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사),
2015년 3월 ~현재 부경대학교 대학원 제어
계측공학과 박사과정, 현재 부산교통공사 기
술연구원 수석연구원

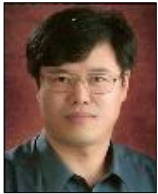
E-mail : h111641@humetro.busan.kr



김 성 안 (SungAn Kim)

2011년 동아대학교 전기공학과 졸업(학사),
2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사),
2013년 3월 ~현재 동 대학원 전기공학과
박사과정

E-mail : y3k9s1@nate.com



조 윤 현 (YunHyun Cho)

1984년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사),
1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사),
1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사),
1995년 ~현재 동아대학교 전기공학과 교수

E-mail : yhcho@dau.ac.kr



변 기 식 (GiSig Byun)

1981년 중앙대학교 전기공학과 졸업(학사),
1983년 동 대학원 졸업(석사), 1990년 W.S.U.
대학원 제어공학과 졸업(박사), 1990년 9
월 ~현재 부경대학교 제어계측공학과 교수

E-mail : gsbun@pknu.ac.kr