

철도차량 보조전원장치의 전압 제어 안정성 증대를 위한 Anti-windup 기법의 적용 및 비교 분석

Application and Comparative Analysis of Anti-windup Method for Improving the Stability of Voltage Control of Auxiliary Power Supplies in Railway System

저자 (Authors)	최종용, 이수길, 이준희, 이현재, 손진근 Jong-Yong Choi, Su-Gil Lee, June-Hee Lee, Hyun-Jae Lee, Jin-Geun Shon
출처 (Source)	전기학회논문지 P 70P(4) , 2021.12, 233-239 (7 pages) THE TRANSACTION OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS P 70P(4) , 2021.12, 233-239 (7 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10671750
APA Style	최종용, 이수길, 이준희, 이현재, 손진근 (2021). 철도차량 보조전원장치의 전압 제어 안정성 증대를 위한 Anti-windup 기법의 적용 및 비교 분석. 전기학회논문지 P, 70P(4), 233-239.
이용정보 (Accessed)	가천대학교 210.102.***.52 2021/12/21 17:16 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Application and Comparative Analysis of Anti-windup Method for Improving the Stability of Voltage Control of Auxiliary Power Supplies in Railway System

철도차량 보조전원장치의 전압 제어 안정성 증대를 위한 Anti-windup 기법의 적용 및 비교 분석

Jong-Yong Choi · Su-Gil Lee · June-Hee Lee · Hyun-Jae Lee · Jin-Geun Shon

최종용* · 이수길** · 이준희** · 이현재* · 손진근†

Abstract

In this paper, Application and Comparative Analysis of Anti-windup Method for Improving the Stability of Voltage Control of Auxiliary Power Supplies in Railway System. Because it is easy to design, and the structure is simple, there is a problem in the widely used PI controller to occur. Various problems occur, such as response time delay and overshoot due to integrator windup caused by the accumulation of errors in the integral controller. To improve this, various anti-windup methods have been studied. Among the representative Anti-windup methods, it was checked whether various problems caused by integrator windup could be solved through the conditional integral Anti-windup method and the tracking Anti-windup method and the error control Anti-windup. After confirming through PSIM simulation before hardware experiment, DC power conversion system was designed and improvements were confirmed.

Key Words

Anti-windup, Auxiliary Power Supplies, Flyback converter, Integrator windup, PI controller

1. 서론

현재 전 세계적으로 환경오염 및 화석연료 과다사용으로 인한 고갈 문제 등 이유로 에너지에 대한 문제 때문에 친환경적인 방식과 탄소저감이 현대산업의 중요한 부분으로 잡혀가고 있다. 최근에 국토교통부와 한국교통연구원이 실시한 ‘제2차 국가기간교통망계획(안)’ 공청회에서 2040년까지 친환경차량 약 1000만대 보급한다고 발표하였고, 전기충전기 100만기, 수소충전기 1200기를 갖추고자 인프라도 구축하겠다고 밝혔다[1].

또한, 탄소 배출량을 감소 시키고자 신차 판매량 중 친환경차 비율을 약 5%에서 100%로 확대하겠다고 밝힘을 시작으로 그에 따라 운송 수단인 차량과 철도 분야에서도 많은 연구가 이루어지고 개발이 되고 있다. 미래에 친환경적인 교통수단 중 하나인 철도차량에는 많은 장치들로 이루어져 있다. 철도차량은 추진제어장치 시스템, 보조전원장치, 열차종합제어장치, 신호제어시스템 등 여러 가지 제어기기 및 시스템으로 구성되어 있다. 그 중에서도 보조전원장치는 철도 차량에 설치되어 있는 냉난방기, 전동 등 각종 전자장치에 필요한 전원을 공급하거나 비상시 사용되는 보조전원장치로 쓰일 수 있는데

이 장치는 고압의 전원을 변환할 수 있는 전력변환장치를 포함에 정밀 요소에 공급되어야 하는 장치까지 전압의 크기를 일정하게 유지하는 것이 중요하다.

이러한 이유로 전압 크기가 일정하게 유지될 수 있는 방안과 연구가 필요하다. 이때 전력변환장치를 제어시스템을 사용하여 전압의 크기를 일정하게 제어할 수 있으며 여기에 설계하기 쉽고 구조가 단순한 PI제어기를 보편적으로 사용해서 제어를 한다. 하지만 많이 사용되는 PI제어기에서도 문제점이 발생하는데 적분제어기를 사용하는데 있어 오차가 누적되게 되면은 포화현상이 발생하여서 그로 인하여 응답시간 지연과 오버슈트 같은 여러 가지 문제점이 발생하게 된다.

이러한 문제점들은 정상상태로 돌아가는데 시간이 걸리게 되고 경우에 따라서는 시스템 자체가 불안정해질 수도 있기 때문에 적분기 자체에 발생하는 적분기 누적(Integrator windup)을 사전에 개선할 필요가 있다. 이에 따라 이러한 문제점에 사용하기 위해 다양한 Anti-windup 기법에 대해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 그 중에서 가장 대표적인 방법인 조건부 적분 Anti-windup 기법과 추종 Anti-windup 기법이 있다[2-3].

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.
E-mail: shon@gachon.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0001-8357-4437>

*Dept. of Electrical Engineering, Gachon University, Korea.

**Korea Railroad Research Institute(KRRI), Korea.

Received : Oct. 22, 2021 Revised : Nov. 23, 2021 Accepted : Nov. 26, 2021

© The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이에 따라 본 논문에서는 철도차량 보조전원장치에 가장 적합하게 쓰일 수 있는 Anti-windup을 찾고 그 효과를 분석함으로써 보조전원장치의 전압 안정성을 개선함을 목적으로 한다.

이에 조건부 적분 Anti-windup 기법과 추종 Anti-windup 기법과 함께 오차 제어 Anti-windup 기법을 보조전원장치에 적용하였을 때의 결과를 비교, 분석하였다. 기법을 적용하기 전과 기법을 적용한 후 적분기 누적으로 인한 응답시간 지연, 오버슈트 문제점을 개선할 수 있는지 다양한 Anti-windup 기법에 대한 장단점을 비교하기 위해서 PSIM과 하드웨어 제작을 통해 이에 대한 결과를 비교 분석하였다. 또한, 소규모의 하드웨어 실증 실험을 위하여 전력변환장치는 플라이백 컨버터를 사용해 그 효과를 검증하였다.

2. 적분제어의 문제점과 Anti-windup 기법의 적용

2.1 적분기 누적의 문제점과 개선방안

가장 많이 사용되는 제어 방법이면서 구성하기 쉬운 제어 방법인 PI제어기는 일반적으로 포화가 존재하는 이상적이지 않는 제어시스템이 대부분이다.

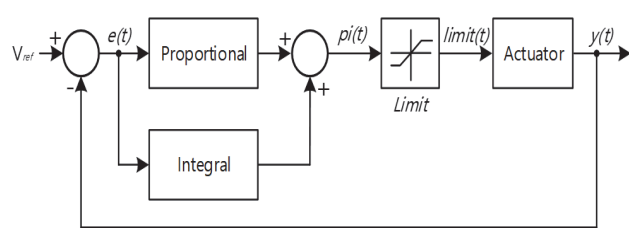


그림 1 Limit를 추가한 PI제어기 회로도

Fig. 1 Circuit diagram PI controller schematic with limits added

그림 1은 Limit를 추가하였을 때의 PI제어기의 전체적인 회로도를 나타낸다. 그림 1을 살펴보면 원하는 값을 얻기 위해 비례제어기 값 $p(t)$ 와 적분제어기 값 $i(t)$ 를 이용하여 제어하는 방식이다. Limit는 설계한 제어시스템의 제어 범위를 지정해주는 역할을 한다. 이렇게 설계한 PI제어기는 제어 과정 중에 여러 문제들을 발생하는데 그 중에서 적분기에서 오차가 누적이 되어서 포화가 발생하는 현상을 적분기 누적이라고 한다. 그림 2는 Limit 제한이 있는데 적분기 값이 그 제한을 넘어서서 오차가 발생하였다가 줄어드는 모습을 나타낸 그래프이다.

그림 2와 같이 Limit 한계치를 넘어서 적분기 오차가 누적되는 현상을 적분기 누적이라고 한다. 적분기 누적이 발생하게 되면 출력이 원하는 값에 가까워졌음에도 불구하고 포화가 발생하여서 원하는 값을 벗어나게 되고 응답시간 지연, 오버슈트 등 여러 문제점을 발생시킨다. 이러한 문제점을 개선하고자 적분기에 오차가 누적되어 포화가 되지 않도록 해주는 방법으로 다양한 Anti-windup 기법이 제안되고 있다[6-10].

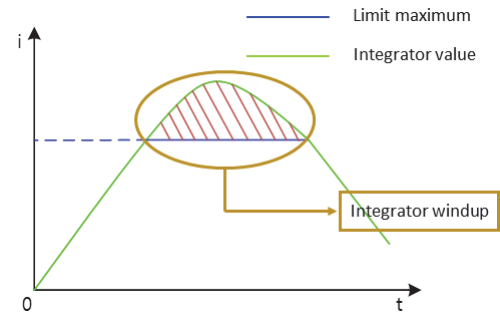


그림 2 적분기 누적 예시 파형

Fig. 2 Integrator windup example waves

2.2 조건부 적분 Anti-windup 기법

여러 Anti-windup 기법 중 하나인 조건부 적분 Anti-windup 기법은 다른 Anti-windup 기법보다 비교적 간단한 기법이다. 그림 3은 그림 1의 PI제어기에서 적분기제어기 입력 쪽에 스위치를 추가한 회로도이고, 이 회로도를 조건부 적분 Anti-windup 기법이라 한다.

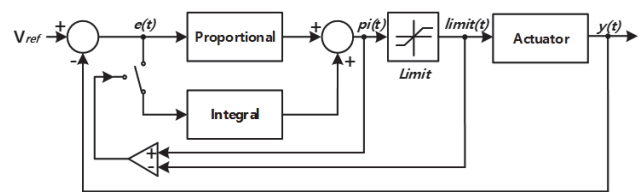


그림 3 조건부 적분 Anti-windup 기법의 회로도

Fig. 3 Circuit diagram of conditional integral anti-windup method

Limit를 기준으로 들어오기 전 값과 나온 후 값을 비교하여 나온 값에 따라서 적분기 앞에 있는 스위치를 ON/OFF 하는 방식이다. 일반적인 PI제어처럼 Limit 범위 내에서 제어기가 동작하면 비례제어기 및 적분제어기가 같이 동작하고, Limit 범위 외에서 제어기가 동작하면 오차가 누적되어 포화 상태가 되고 적분기 누적 현상이 발생한다. 적분기 누적 현상을 방지하고자 적분기에 있는 스위치를 OFF하여 적분제어기 동작을 멈춰서 비례제어기만 동작하게 하여 Limit 범위 내에서 동작하게 한다. 즉 그림 3에 Limit에서 $pi(t) \leq limit(t)$ 일 때 적분제어기에 연결된 스위치가 ON 상태가 되고, 비례제어기 및 적분제어기가 동시에 동작하다가 $pi(t) > limit(t)$ 가 될 때 적분제어기에 연결된 스위치가 OFF 상태로 되고, 비례제어기로만 동작하는 기법을 조건부 적분 Anti-windup 기법이라고 한다[6,7,8].

2.3 추종 Anti-windup 기법

그림 4는 그림 1의 PI제어기에서 적분제어기 입력 쪽에 Tracking값을 추가한 회로도이고, 이 회로도를 추종 Anti-windup 기법이라 한다. 추종 Anti-windup 기법은 그림 4와 같이 일반적인 PI제어처럼 Limit 범위 내에서 제어기가 동작할 때 비례제어기 및 적분제어기가 같이 동작하고 Limit 범위 외에서 적

분제어기에 포화가 발생 시 적분 값이 커지지 않도록 적분제어기에 피드백하여 포화가 발생하지 않도록 제어하는 기법이다. 즉 그림 4를 보면 $pi(t) > limit(t)$ 일 때 적분제어기 입력 쪽에 $Limit$ 제한 값을 벗어난 만큼 $Tracking$ 값을 적분제어기에 피드백하여 적분제어기에서 수정된 값이 나와 기준 전압을 추종하는 방식이다[6,9,10].

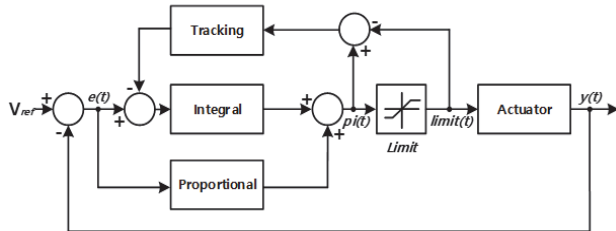


그림 4 추종 Anti-windup 기법의 회로도
Fig. 4 Circuit diagram of tracking anti-windup method

2.4. 오차 제어 Anti-windup 기법

그림 5는 오차 제어 Anti-windup 기법은 그림 1에서의 PI제어기에서 적분제어기 입력쪽에 스위치를 추가한 회로도이다. 그림 3의 조건부 적분 Anti-windup 기법과 비슷하지만 조건부 적분 Anti-windup 기법에 조건 1개를 더 추가하여 값에 따라서 적분기 앞에 있는 스위치를 ON/OFF 하는 방식이다. 조건부 적분 Anti-windup 기법은 적분제어기 이득의 초기 값이 적분기의 이전 정상 상태 값에 의존한다는 단점이 있고 이걸 보완해줄 수 있는 기법이 바로 오차 제어 Anti-windup 기법이다. $Limit$ 전,후를 비교하고, PI제어기에서 $e(t)$ 값이랑 $pi(t)$ 값을 곱해서 0보다 크고, $pi(t) \neq limit(t)$ 일 때 적분제어기에 연결된 스위치가 ON 상태가 되고, 비례제어기 및 적분제어기가 동시에 동작하다가 $pi(t) = limit(t)$ 가 될 때 적분제어기에 연결된 스위치가 OFF 상태로 되고, 비례제어기로 동작하는 기법을 오차 제어 Anti-windup 기법이라 한다[11].

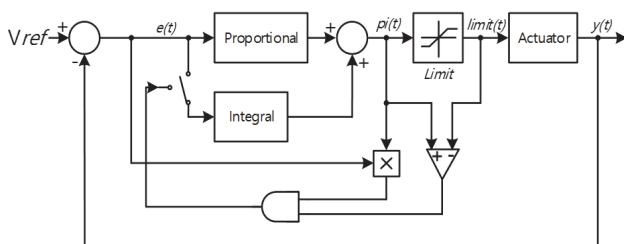


그림 5 오차 제어 Anti-windup 기법의 회로도
Fig. 5 Circuit diagram of error control anti-windup method

2.5. 모의실험을 위한 플라이백 컨버터의 조건 설계

철도차량 전력변환장치에는 대부분 LLC 컨버터와 같은 절연형 컨버터를 보조전원장치를 공급장치로 사용되는데 간단한 모의실험을 위해서 본 논문에서는 절연형 컨버터 종류인 플라이백 컨버터를 사용하여 비교 분석을 실시하였다.

표 1 설계된 플라이백 컨버터의 파라미터

Table 1 Parameters of the designed flyback converter

	Value	Units
Input Voltage	10	[V]
L_M	312.5	[μH]
N	1:3	$N_1 : N_2$
Frequency	20,000	[Hz]
Capacitor	940	[μF]
Resistor	300	[Ω]

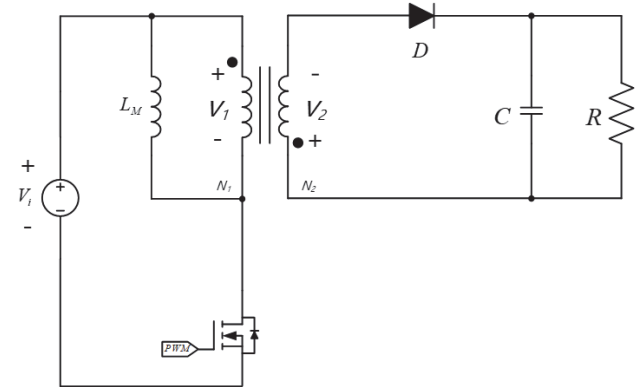


그림 6 설계된 플라이백 컨버터 회로도
Fig. 6 Designed flyback converter schematic

Anti-windup 기법 적용 전과 Anti-windup 기법 적용 후 효과를 비교 분석을 위해 표 1의 파라미터와 그림 6과 같은 플라이백 컨버터 회로도를 기반으로 설계 후 PSIM을 이용하여 모의실험을 진행하였다. 기법을 적용하기 전과 3가지 Anti-windup 기법을 적용하여 총 4가지 모의실험을 진행하였고, 비례제어 및 적분제어 상수 값은 모두 동일한 상태에서 진행하였다. 적분기의 누적 상태를 구현하기 위해 설계한 플라이백 컨버터에서 0[s]~1[s] 사이에는 입력단의 전원을 공급하지 않았으며 1[s] 이후에 입력단의 전원을 공급시켜 1[s] 이후 적분기가 포화 되도록 구현하였다.

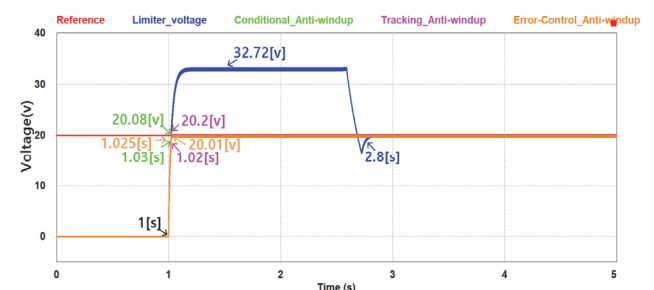


그림 7 Anti-windup 기법 적용 전과 3가지 Anti-windup 기법 적용 후에 따른 시뮬레이션 결과 출력 전압 파형

Fig. 7 The output voltage waveform of simulation results before applying the anti-windup method and after applying the three anti-windup method

여기서, Anti-windup 기법을 적용하기 전과 3가지 기법을 적

용하였을 때 정상 상태 응답이 10%에서 90%까지 도달하는데 걸리는 시간을 측정하였고, Anti-windup 기법을 적용하기 전과 3가지 기법을 적용하였을 때 비례기, 적분기 값도 같이 측정 을 하였다.

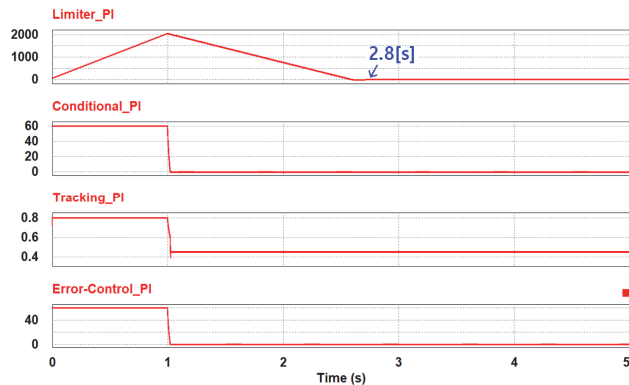


그림 8 Anti-windup 기법 적용 전과 3가지 Anti-windup 기법 적용 후 각 각의 PI제어 값

Fig. 8 Each PI control value before application of anti-windup method and after application of three anti-windup method

그림 7은 기준전압, Anti-windup 기법 적용 전, 조건부 적분 Anti-windup 기법, 추종 Anti-windup 기법, 오차 제어 Anti-windup 기법을 적용 후 시뮬레이션 결과 전압 파형을 보여준다.

기법을 적용하기 전 출력 전압은 기준 전압에 도달하기까지 약 2.8[s]가 소요되었다. 이에 반해 조건부 적분 Anti-windup 기법을 적용할 경우 약 1.03[s]만에 기준 전압에 도달하였으며, 오차 제어 Anti-windup 기법을 적용할 경우 약 1.025[s]만에 기준 전압에 도달하였으며, 추종 Anti-windup 기법을 적용할 경우 약 1.02[s]만에 기준 전압에 도달하였다. 이는 Anti-windup 기법을 사용함에 따라 적분기가 포화 되는 효과를 개선한 결과이다. 상승한 전압 최대값은 보이는 파형처럼 Anti-windup 기법 적용 전에는 32.72[V]였지만 오차 제어 Anti-windup 기법을 적용할 경우 20.01[V], 조건부 적분 Anti-windup 기법 적용할 경우 20.08[V], 추종 Anti-windup 기법을 적용할 경우 20.2[V]로 줄어든 것을 확인할 수 있다.

특히 추종 Anti-windup 기법이 나머지 Anti-windup 기법보다 상대적으로 더 빠르게 기준 전압에 도달 결과를 보였고, Anti-windup 기법 적용하였을 때 오버슈트측면에서는 오차 제어 Anti-windup 기법이 조건부 적분 Anti-windup 기법, 추종 Anti-windup 기법보다 각각 0.07[V], 0.18[V] 가량 상대적으로 줄어든 것을 보였다. 따라서 Anti-windup 기법들을 적용한다면 응답속도, 오버슈트면에서 전압 제어가 개선된 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 그림 7과 같은 순서로 PI제어 값을 나타낸 그림이다. Anti-windup 기법을 적용 전에는 0[s] ~ 1[s]동안 적분제어 기 값이 기준 전압을 얻기 위해 계속 값이 커진다. 1[s] 이후에는 전원이 공급되어 기준 전압을 추종하기 위해 적분제어 기

값이 줄어들고, 2.8[s] 때부터 그림 7과 같이 기준 전압에 도달 하는 것을 확인하였고, 조건부 적분 Anti-windup 기법, 추종 Anti-windup 기법, 오차 제어 Anti-windup 기법은 각각의 방식으로 0[s] ~ 1[s]에서 적분제어 기 값이 적분기 누적이 생기지 않도록 적분제어 기 값을 조절한다. 1[s] 이후에는 기준 전압에 빠른 시간 안에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 속응성 면에서는 추종 Anti-windup 기법이 우수 하였으며 오버슈트 감소면에서는 오차 제어 Anti-windup 기법 의 효과가 우수하게 나타났다.

3. 실험을 통한 Anti-windup의 적용과 검증

3.1 플라이백 컨버터를 통한 Anti-windup의 적용 및 검증

적분기 누적을 보상할 수 있는 3가지 Anti-windup 기법의 효과를 실제적으로 검증해보기 위하여 플라이백 컨버터를 이용한 실험을 진행하였다.

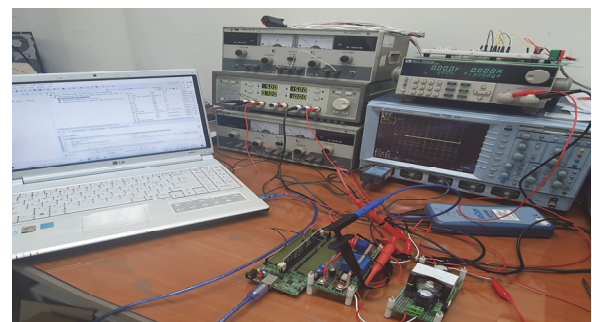


그림 9 Anti-windup 기법 비교분석을 위한 플라이백 컨버터의 실험 광경

Fig. 9 Experimental view of flyback converter for comparative analysis of anti-windup method

하드웨어 검증을 하기 위하여 표 1과 그림 6을 기반으로 플 라이백 컨버터를 실제로 설계하고 설계한 플라이백 컨버터를 TMS320F28335를 이용하여 디지털 제어를 실시하여 하드웨어 실험을 진행하였다. 그림 9는 설계한 플라이백 컨버터를 실험 하는 모습이다.

적분기 누적을 개선하기 위하여 조건부 적분 Anti-windup 기법과 추종 Anti-windup과 오차 제어 Anti-windup 기법을 각 각 적용하였다. 플라이백 컨버터에서 나오는 출력 전압을 전 압센서를 이용하여 3[V]로 변환시키고 변환시킨 3[V]를 TMS320F28335에 전달하여 디지털 제어를 그림 9와 같이 설 계한 플라이백 컨버터를 이용하여 하드웨어 실험을 진행하였다.

기법을 적용하기 전과 조건부 적분 Anti-windup 기법과 추 중 Anti-windup 기법과 오차 제어 Anti-windup 기법을 적용하 여 총 4가지 하드웨어 실험을 진행하였으며, PSIM 모의실험 때와 마찬가지로 비례제어 및 적분제어 상수 값은 모두 동일 한 상태에서 진행하였다. 적분기의 포화 상태를 구현하기 위 하여 설계한 플라이백 컨버터에서 0[s] ~ 1[s] 사이에는 입력

단의 전원을 공급하지 않았으며 1[s] 이후에 입력단의 전원을 공급시켜 1[s] 이후 적분기가 포화 되도록 구현하였다. PSIM 모의실험과 마찬가지로 Anti-windup 기법을 적용하기 전과 3가지 Anti-windup 기법을 적용하였을 때 정상 상태 응답이 10[%]에서 90[%]까지 도달하는 데 걸리는 시간을 측정하였다.

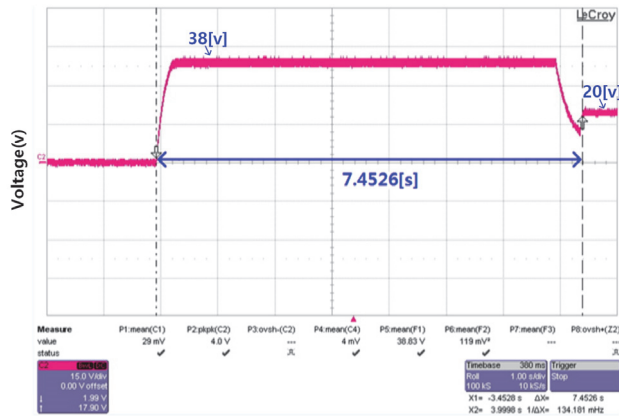


그림 10 Anti-windup 기법 적용 전의 출력 전압 파형

Fig. 10 Output voltage waveform before applying anti-windup method

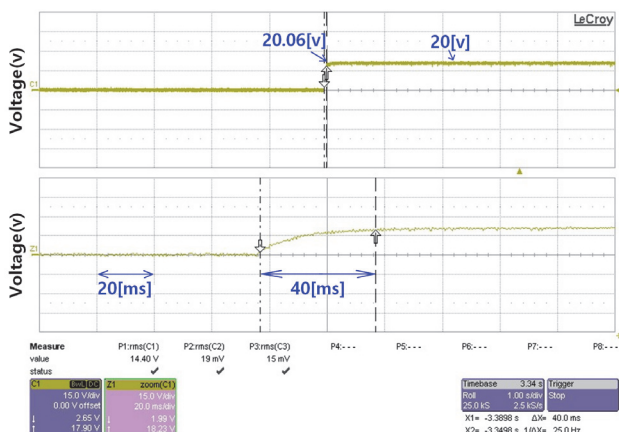


그림 11 조건부 적분 Anti-windup 기법 적용 시 출력 전압 파형

Fig. 11 Output voltage waveform when applied conditional integral anti-windup method

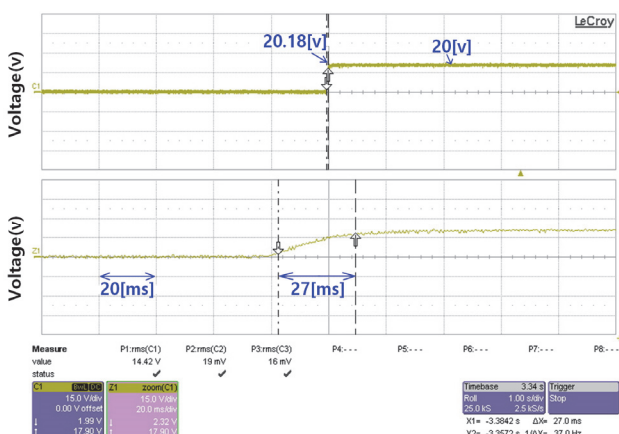


그림 12 추종 Anti-windup 기법 적용 시 출력 전압 파형

Fig. 12 Output voltage waveform when applied tracking anti-windup method

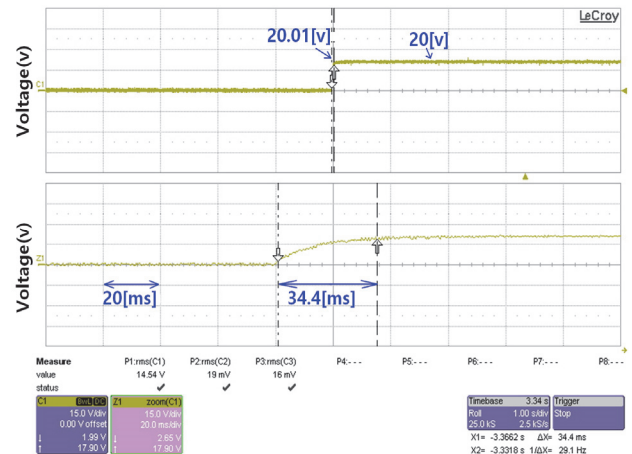


그림 13 오차 제어 Anti-windup 기법 적용 시 출력 전압 파형

Fig. 13 Output voltage waveform when applied error control anti-windup method

그림 10은 Anti-windup 기법 적용 전의 출력 전압 파형을 보여준다. 정상 상태 응답에 도달하는데 걸리는 시간을 측정 한 결과 약 7.4526[s]의 결과를 보였다. 그림 11에 조건부 적분 Anti-windup 기법과 그림 12에 추종 Anti-windup 기법과 그림 13에 오차 제어 Anti-windup 기법을 적용하였을 때의 결과를 살펴보면 정상상태 도달까지 걸리는 시간이 각각 40[ms], 27[ms], 34.4[ms]가 걸린 모습을 보였다. 이는 기법 적용하기 전의 결과인 7.4526[s]보다 각각 7.4126[s], 7.4256[s], 7.4182[s] 감소 된 것을 확인할 수 있다. 특히 추종 Anti-windup 기법은 다른 기법들보다 빠른 응답속도가 나타났다.

Anti-windup 기법 적용 전 전압이 상승한 최대값은 약 38[V]로 측정되었다. 하지만 Anti-windup 기법을 적용하였을 때의 결과를 살펴보면 전압이 상승한 최대값이 각각 20.06[V], 20.18[V], 20.01[V]가 측정되었다. 이는 기법을 적용하기 전의 결과인 38[V]보다 각각 17.94[V], 17.82[V], 17.99[V]의 값이 감소한 것을 확인할 수 있다. 특히 Anti-windup 기법들만 비교하였을 때 추종 Anti-windup 기법이 다른 기법들보다 오버슈트 측면에서 더 많이 감소된 것을 확인할 수 있다.

추종 Anti-windup 기법은 스위치를 ON/OFF 시키는 방식이 아니기 때문에 다른 Anti-windup 기법들 보다 조금 더 응답속도 면에서 빠르다는 것을 알 수 있다. 오버슈트 면에서는 오차가 발생 시 바로 스위치를 ON/OFF 하기 때문에 조건부 적분 Anti-windup 기법, 오차 제어 Anti-windup 기법이 추종 Anti-windup 기법보다 더 많이 감소하는 것을 알 수 있다.

이에 따라 실제적인 실험 환경에서 여러 기법들 중 추종 Anti-windup 기법이 응답속도 면에서 상대적으로 우수한 성능을 지닌 것으로 판단되고, 오차 제어 Anti-windup 기법이 오버슈트 면에서 상대적으로 다른 기법들 보다 더 많이 개선한 것을 확인하였다.

속응성 면에서는 추종 Anti-windup 기법이 우수하였으며 오버슈트 감소 면에서는 오차 제어 Anti-windup 기법의 효과가 우수하게 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 철도차량 보조전원장치의 전압 제어 안정성 증대를 위하여 다양한 Anti-windup 기법들을 분석하고 그 효과를 비교, 분석하였다. 전압 개선 안정성의 악영향을 미치는 포화 개선을 위해 Anti-windup 기법들을 적용하고 각각의 응답속도와 오버슈트 측면에서 비교 분석하였다.

여러 기법들 중 추종 Anti-windup 기법이 응답속도 부분에서 27[ms], 조건부 적분 Anti-windup 기법이 40[ms], 오차 제어 Anti-windup 기법이 34.4[ms]로 추종 Anti-windup 기법이 다른 Anti-windup 기법들 보다 상대적으로 우수한 성능을 보였고, 오버슈트 부분에서 오차 제어 Anti-windup 기법이 20.01[V], 조건부 적분 Anti-windup 기법이 20.06[V], 추종 Anti-windup 기법이 20.18[V]로 오차 제어 Anti-windup 기법이 다른 Anti-windup 기법들보다 상대적으로 많이 줄어든 것을 확인하였다. 그 결과 오차 제어 Anti-windup 기법은 오버슈트를 줄이는 게 다른 Anti-windup 기법에 비해 상대적으로 강인하며, 추종 Anti-windup 기법이 응답속도 부분에서 다른 Anti-windup 기법 보다 상대적으로 강인한 성능을 지닌 것으로 판단되었다.

이에 따라서, 고정밀 정전압이 필요한 마이크로컨트롤러와 MCU의 전원공급장치에는 오차 제어 Anti-windup의 사용이 바람직하다고 판단되며, 속응성이 주요 성능이 되는 승객용 차량에 사용되는 전원공급장치에는 추종 Anti-windup의 사용이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This research was supported by a grant from R&D Program of the Korea Railroad Research Institute, Republic of Korea. and was also supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194030202290).

References

- [1] KOREA TRANSPORT INSTITUTE “2021-2040 The 2ND National period transport network plan”
- [2] W. Cai, F. Yi, E. Cosoroaba and B. Fahimi, “Stability Optimization Method Based on Virtual Resistor and Nonunity Voltage Feedback Loop for Cascaded DC-DC Converters,” in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4575-4583, Nov.-Dec. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2443717.
- [3] K. A. Kim, P. S. Shenoy and P. T. Krein, “Converter Rating Analysis for Photovoltaic Differential Power Processing Systems,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 4, pp. 1987-1997, April 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2326045.
- [4] Youbin Peng, D. Vrancic and R. Hanus, “Anti-windup, bumpless, and conditioned transfer techniques for PID controllers,” in IEEE Control Systems Magazine, vol. 16, no. 4, pp. 48-57, Aug. 1996, doi: 10.1109/37.526915.
- [5] C. Bohn and D. P. Atherton, “An analysis package comparing PID anti-windup strategies,” in IEEE Control Systems Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 34-40, April 1995, doi: 10.1109/37.375281.
- [6] A. Scottedward Hodel and C. E. Hall, “Variable-structure PID control to prevent integrator windup,” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 2, pp. 442-451, April 2001, doi: 10.1109/41.915424.
- [7] L. Rundqwist, “Anti-reset windup for PID controllers,” Ph.D. Thesis, Department of Automatic Control, Lund Inst. of Technology, Sweden, 1991.
- [8] S. Pandey, A. Junghare, P. Dwivedi and N. K. Soni, “Experimental demonstration of anti-windup controller for non-linear magnetic levitation system,” 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), pp. 1-5, 2017, doi: 10.1109/ICOMICON.2017.8279085.
- [9] D. Kumar, R. A. Gupta and N. Gupta, “Minimization of current ripple and overshoot in four switch three-phase inverter fed BLDC motor using tracking anti-windup PI controller,” 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), pp. 1-6, 2017, doi: 10.1109/SPICES.2017.8091355.
- [10] D. Kumar, R. A. Gupta and N. Gupta, “Minimization of current ripple and overshoot in four switch three-phase inverter fed BLDC motor using tracking anti-windup PI controller,” 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/SPICES.2017.8091355.
- [11] G. S. John and A. T. Vijayan, “Anti-windup PI controller for speed control of brushless DC motor,” 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), 2017, pp. 1068-1073, doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8391874.

저자소개



최종용 (Jong-Yong Choi)

He received his M.S. degree in the Department of Electrical Engineering from Gachon University in 2021, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.

E-mail: cji5730@gachon.ac.kr



이수길 (Su-Gil Lee)

Su Gil Lee received the Ph.D. degrees in Electrical Engineering from SoongSil University. He is currently an principal researcher in Korea Railroad Research Institute. His research interests include wireless power transfer, electric vehicles, tilting train control, and Liquid hydrogen propulsion.

E-mail: sglee@krri.re.kr



이준희 (June-Hee Lee)

He received his B.S. and Ph.D degrees in Electrical and Computer Engineering from Ajou University Suwon, South Korea, in 2013 and 2018, respectively. Since 2018, he has been with the Korea Railroad Research Institute Uiwang, South Korea. His research interests include grid-connected systems high-power electric machine drive and power conversion systems.

E-mail: june99@krri.re.kr



이현재 (Hyun-Jae Lee)

He received his M.S. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. currently he is pursuing his Ph. D. degree in Gachon University, Gyeonggi-Do, Korea. His research interests are Power conversion and Power control.

E-mail: lhj501@gachon.ac.kr



손진근 (Jin-Geun Shon)

He received his B.S., M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Electrical Engineering from Soongsil University in 1990, 1992 and 1997. He was Chief Researcher in Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea, during 1992-1995. He was a Postdoctoral Researcher in the Department of Electrical and Electronic Engineering, Kagoshima University, from 2002 to 2003. He was also a Visiting Scholar in the Power Electronics Laboratory, Michigan State University, from 2009 to 2010. He is currently a Professor at the school of Electrical Engineering, Gachon University, Korea. His research interests are the power conversion, control and diagnosis of power utility.

E-mail: shon@gachon.ac.kr