



4

전기의 세계

기획 시리즈 모빌리티 제어 기술 동향

자유 기고문 전력 계통 단선고장 검출을 위한

군집화 성능 지표 기반 준 지도학습 알고리즘



2024년 전기 에너지 미술대회



대회요강

- 자격 : 초등학교
- 주제 : **“나라면 이렇게 전기(에너지)를 만들겠어요!!”**
 - 1~2학년** 환경을 지키는 전기 에너지 슈퍼히어로
 - 3~4학년** 우리 동네의 에너지 모험
 - 5~6학년** 탄소중립과 재생에너지
- 규격 : 8절 흰색 도화지
(작품에 다른 재료 붙이지 말 것 / 가로, 세로 무관)
- 재료 : 크레파스, 수채화물감, 포스터물감, 색연필, 사인펜 등



심사발표

- 심 사 방 법 : 예선/본선 [예선 : 작품사진(jpeg)심사]
[본선 : 작품 원본 심사 (전문 심사위원 심사)]
- 심 사 기 준 : 전기에너지관련 학년별 주제내용에 부합하고, 독창성, 창의성, 작품의 완성도 기준
- 예선심사 발표 : 2024년 5월 17일 (금)
- 최종심사 발표 : 2024년 6월 7일 (금)
- 심사결과 안내 : 홈페이지 공지
- 본선작 전시 : 대한전기학회 하계학술대회 기간 로비 전시
(7월 10일~12일 제주국제컨벤션센터(ICC제주))



접수기간

- 예선 접수기간 : 2024년 4월 1일(월) ~ 5월 3일(금)까지
- 본선 우편접수기간 : 2024년 5월 20일(월) ~ 5월 31일(금)까지



시상내역

- 시 상 내 역 : 대한전기학회 학회장상(대상) 외 전기관련 대기업 및 협·단체 상 수여

대 상	협·단체상 수상	입 상
상장 및 50만원 상당의 부상	상장 및 부상	상장

- 시 상 방 법 : 수상자는 개별 안내 (전기학회 주관의 별도 시상식은 미개최)
※ 협·단체상의 경우 상장수령기간에 다소 소요될 수 있으니 양해 바랍니다.



출품요령

- 예선 접수신청 : 대한전기학회 홈페이지 (www.kiee.or.kr) 접수 및 작품사진 업로드
- 본선 우편접수 : 예선 통과본에 한해 원본 (그림 뒷면 초등학교/학년/반/이름, 연락처 기재)을 우편접수(배송비는 발신자 부담)
- 우편접수 주소 : 서울시 강남구 테헤란로7길 22
한국과학기술회관 1관 901호 대한전기학회 경영지원팀
- 응시작품은 주판사에 귀속함. (본선은 대상과 협·단체상에 준함)
- 자세한 내용은 홈페이지 참조 (www.kiee.or.kr)
※ 마감당일 우편발송시, 마감일 이후 도착하더라도 접수가능(국내)



- ※ 상장(부상)은 학생의 소속 학교 주소지로 발송됩니다.
- ※ 출품된 작품으로 인해 발생하는 저작권의 법적 책임은 출품자(본인)에게 있습니다.
- ※ 수상작은 별도기간에 전시될 수 있습니다.
- ※ 작품 접수(예선/본선)에 출품자 정보 미입력으로 불이익은 책임지지 않습니다.
- ※ 수상 작품의 저작권 및 소유권은 주최기관에 귀속됩니다.

문의 : 대한전기학회 사무국 (02-553-0155 / account@kiee.or.kr)

주 최 사단법인 대한전기학회

주 관 사단법인 대한전기학회 여성과학기술위원회

후 원

CONTENTS

The Korean Institute of Electrical Engineers

전기계뉴스



나라면 전기(에너지) 이렇게 만들겠어요”...

전기학회 초등학생 미술대회 개최 | 2

ICT 인력양성 사업 성과 공유의 장 열린다 | 2

전력기금 요율 3.7%서 2.7%로 단계적 인하 결정 | 3

기획시리즈 - 모빌리티 제어 기술 동향

최대 노름 최소화 기반 단일정책 다중목적 강화학습 연구 | 8

강인 제어를 위한 외란 관측기 설계 연구 동향 | 14

모델 기반 제어기 설계의 기본 | 19

자유기고문

전력 계통 단선고장 검출을 위한

군집화 성능 지표 기반 준 지도학습 알고리즘 | 25

학회 소식

학회일지 | 30

학회소식 | 31

회원가입안내 | 32

전기의 세계

KIEE Magazine

Vol. 73, No. 4 April 2024

발행일 2024년 4월 1일
발행인 이병준
편집인 허 진
발행처 사단법인 대한전기학회
(06130) 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22
과학기술회관 1관 901호
Tel 02-553-0151 Fax 02-566-9957
http://www.kiee.or.kr

학회 본부 임원

회장 이병준
차기회장 이준호
부회장 박종배 이준호 문승일 김석주 김홍근 차준민
협동부회장 김구환 김상권 김태욱 노대석 서정철 신윤용
심은보 오호진 육심균 이경숙 이인호 이찬주
정기석 최원호 최호진
감사 김세호 장용무
총무이사 송화창 전동훈 최홍석 박은섭 이정호 신용준
재무이사 허 돈 안길영
기획·정책이사 차한주 허 진 김슬기
편집이사 남순열 정호성 허 진
학술이사 주성관 배성우 최영준 오현진 우정욱
회원·교육이사 조현종 최승연 김지희
사업이사 김정주 장병훈 한경희
산학협동이사 손성용 정상용 박재성
국제이사 강승택 김래영
기술이사 장길수 신정훈
소통이사 김정수 박정욱 서정호 유희덕 이상복

부문의 회장

A부문 회장 차준민 B부문 회장 홍선거
C부문 회장 김용상 D부문 회장 김경호
E부문 회장 최상열 I부문 회장 손진근

전임 편집인

2016년 이병국 2017년~2018년 정인성
2019년~2021년 강승택 2022년~2024년 허 진

온라인

수협은행 1010-2175-5210(대한전기학회)
국민은행 349401-04-009338(대한전기학회)
편집·디자인 드림기획 031-705-3812

인쇄 드림기획 031-705-3812

표지 2 전국 초등학생 전기에너지 미술 대회

표지 3 지화기술단 표지 4 효성

학회 사무국 직원별 담당 연락처(☎ 02-553-0151~7)

사무국장

김정훈 : 업무총괄, 하계학술대회, D부문의, I부문의
electran@kiee.or.kr ☎ 0156

경영지원팀

팀장 이상필 : 총무, 미니드론경진대회, E부문의
elecproc@kiee.or.kr ☎ 0152

차장 서영은 : 교육원, 본부위원회, 여성과학기술위원회, C부문의
account@kiee.or.kr ☎ 0155

차장 최순례 : 회원관리, 회계관리, 지회, 홈페이지관리
member@kiee.or.kr ☎ 0154

편집팀

팀장 송호석 : 학회지, 본부위원회, A부문의
elecjour@kiee.or.kr ☎ 0153

부장 전필준 : 국문논문, 연구용역, 전문위원회, B부문의, D부문의
jun@kiee.or.kr ☎ 0157

과장 박소희 : 영문논문(JEET), 국제업무, KIEE-CEO클럽, I부문의
jeet@kiee.or.kr ☎ 0151

전기계 뉴스



나라면 전기(에너지) 이렇게 만들겠어요"...전기학회 초등학생 미술대회 개최 4월 1일부터 5월 3일까지 예선 접수... 최종 선정 작품은 하계학술대회서 전시

전기에너지에 대한 초등학생들의 인식을 높이는 미술대회가 열린다.

27일 대한전기학회(회장 이병준)는 내달 1일부터 오는 5월 3일까지 약 한 달 간 '2024년 초등학생 전기에너지 미술대회' 예선접수를 시작한다고 밝혔다.

전기에너지에 대한 초등학생들의 인식을 알아보는 한편 ▲전기의 편리성 ▲에너지 절약 ▲전기에너지 사용 등 전기에 대한 관심을 고취하기 위해 '나라면 이렇게 전기(에너지)를 만들겠어요'를 주제로 마련된다.

세부주제는 ▲환경을 지키는 전기 에너지 슈퍼히어로(1~2학년) ▲우리 동네의 에너지 모험(3~4학년) ▲탄소중립과 재생에너지(5~6학년) 등이다.

대회에 참가코자 하는 초등학생들은 8절 흰색 도화지에 크레파스, 수채화물감, 포스터물감, 색연필, 사인펜 등을 이용해 그린 그림의 사진을 전기학회 홈페이지(www.kiee.or.kr)에 등록 및 접수하면 되며, 작품에 다른 재료를 붙여선 안된다.

오는 5월 3일 접수 마감되는 예선심사를 거쳐 본선 진출작이 결정되며, 본선에 선정된 작품은 실물을 전기학회 사무실로 우편접수해야 한다. 예선 심사 통보는 5월 17일이며, 본선 접수기간은 5월 20일부터 31일까지다.

이후 6월 7일 최종 심사 결과가 홈페이지를 통해 안내될 예정이다.

대상에 선정된 작품에는 상장과 50만원 상당의 부상이 제공되며, 협·단체상 역시 상장 및 부상이, 입상자에게는 상장이 주어진다.

대상과 협·단체상 수상작들은 오는 7월 10일부터 13일까지 3박 4일간 제주국제컨벤션센터에서 열리는 '2024년 대한전기학회 하계학술대회'에 전시된다.

전기학회 관계자는 "이번 대회를 통해 초등학생들이 전기에너지에 대한 소중함을 되새기는 기회가 될 것으로 기대한다"며 "평소 이 분야에 관심이 많은 학생들의 많은 참여를 바란다"고 말했다.



'2024년 초등학생 전기에너지 미술대회' 포스터.
[사진=전기학회]

ICT 인력양성 사업 성과 공유의 장 열린다

'ITRC 인재양성대전', 내달 17~19일까지 코엑스에서 개최 인천대학교, 6G 이동통신 하드웨어 및 위성통신기술 선보여

ICT 분야의 인력양성 사업 성과를 공유하는 자리가 마련된다.

과학기술정보통신부가 주최하고 정보통신기획평가원, 대학정보통신연구센터협의회가 주관하는 '대학정보통신연구센터(ITRC) 인재양성대전'이 내달 17일부터 19일까지 2박 3일간 코엑스에서 개최된다.

과학기술정보통신부는 ICT 분야의 연구혁신과 인재양성을 위해 ITRC를 선정하고 지속적으로 지원하고 있다.

이와관련 그동안 지원사업의 성과를 공유하는 한편 산·학·연 연구자들의 교류를 위해 ITRC들의 축제이자 박람회인 인재양성대전을 이번에도 개최하는 것이라는 게 협의회 측의 설명이다.

컴퓨터와 네트워크 기술, 인공지능 응용 기술, 바이오와 SW의 결합기술이 대거 공개된다.

특히 인천대학교가 처음으로 무선전력이 요체인 6G 이동통신 하드웨어와 위성통신기술을 NS-위성 RTDC 기술 연구센터 전시관에서 소개할 예정이며, RIS 및 밀리미터파 신호 빔조각이 시연될 계획이다.

협의회 관계자는 "과기정통부 장·차관, 정보통신기획평가원 관계자를 비롯해 여러 기업과 연구인력들이 박람회장 찾아 당대 최고의 과학기술에 대한 상호작용이 기대된다"며 "3일이라는 기간이 극히 짧게 느껴질 정도의 행사가 될 것"이라고 전했다.



내달 열리는 ITRC 인재양성대전 포스터.
[사진=대학정보통신연구센터협의회]

전기계 뉴스



전력기금 요율 3.7%서 2.7%로 단계적 인하 결정
정부, 부담금 정비 및 관리체계 강화방안 발표
 올 7월 3.2%↓, 내년 7월부터는 2.7% 적용
 산업계 및 국민 부담 약 8600억 감소 전망



김윤상 기획재정부 2차관(왼쪽 네 번째)이 지난 26일 정부세종청사에서 국민·기업 부담 완화를 위한 '부담금 정비 방안'에 대해 관계 부처와 함께 설명하고 있다.
 [사진=연합뉴스]

정부가 '전력산업기반기금'의 요율을 현행 3.7%에서 2.7%로 인하하기로 했다. 이에 주택용은 물론, 산업용 등 전기요금 부담이 일부 완화될 전망이다. 4인가구 기준 연평균 8000원 경감되고, 기업의 경우는 연간 62만원 줄어든 것으로 예상된다.

정부는 27일 윤석열 대통령 주재로 열린 제23차 비상경제민생회의에서 이같은 내용을 담은 '부담금 정비 및 관리체계 강화방안'을 발표했다.

이번 개편은 지난 2002년 부담금 관리체계를 도입한 이후 최초로 실시한 전면 정비다. 정부는 총 91개 부담금 항목 중 3분의 1 수준인 32개 부담금을 폐지·감면하기로 했다.

김윤상 기획재정부 차관은 "전력기금 등 국민들이 잘 모르고 있는 부담금을 그동안 관행적으로 징수해 왔는데, 이를 과감하게 정리하는 게 맞다고 본다"면서 "기금의 여유분을 최대한 활용하고 지출 효율화 작업을 같이 하려고 한다"고 밝혔다.

정부는 이번 개편을 통해 부담금 중 가장 규모가 큰 전력기금의 요율을 단계적으로 낮추기로 결정했다.

'전력기금'은 전기사업법에 따라 전기요금의 3.7%를 징수하는 일종의 준조세다. 이 기금은 2001년 당초 전력산업이 민영화될 경우 취약해질 수 있는 전력산업 기반이나 공익사업을 위해 도입됐다. 현재까지는 전력산업의 지속적 발전과 기반 조성에 필요한 재원을 확보한다는 취지로 운영되고 있다.

현재 3.7%의 요율은 오는 7월에 3.2%로 낮아지고, 내년 7월부터는 2.7%로 총 1%p 인하된다.

그동안 전력기금은 매년 2조원 수준을 유지했다. 연도별로 보면 ▲2017

년 2조396억원 ▲2018년 2조1107억원 ▲2019년 2조873억원 ▲2020년 1조9718억원 ▲2021년 2조1479억원 ▲2022년 2조816억원 ▲2조5894억원 등이 전력기금으로 적립됐다.

특히 올해에는 처음으로 3조원이 넘는 기금이 건힐 것으로 전망됐다. 정부는 올해 전력기금 징수 목표액을 3조2028억원으로 잡았다. 이는 지난해 징수 목표액과 비교해 23% 늘어난 수치다. 전력기금이 연간 3조원을 넘어서기는 올해가 처음이다.

기업들은 전력 사용량이 높은 상황에서 전기요금에 수차례 인상되면서 전력기금에 대한 부담 역시 커지고 있다고 토로해왔다.

한국경제인협회는 지난 21일 기획재정부에 전력기금의 요율 조정을 건의하며 "전력기금은 국내 부담금 가운데 가장 많은 징수액을 기록하고 있고, 감사원과 국회 등에서도 수입이 과하다는 문제가 지적됐다"고 강조했다. 중소기업중앙회도 성명을 발표하고 "최근 전기료 급등으로 중소기업들의 부담이 심각한 상황에서 이번 인하 결정은 매우 시의적절하다"고 평가했다.

이번 전력기금 요율 조정을 통해 1년차에 4328억원, 2년차에 8656억원 감면될 것으로 예측된다. 뿌리업종 기준으로 연 62만원, 4인가구 기준으로 연 8000원이 경감된다.

일각에서는 전력기금 감소에 따라 전력기금을 활용한 사업들에 차질이 생기는 것 아니냐는 우려의 목소리를 내고 있다. 그러나 별 문제가 없을 것이라는 게 정부의 입장이다.

산업부 관계자는 "그동안 적립해 놓은 전력기금의 여유분이 있다. 이 재원을 활용하면 되기 때문에 자원 부족 현상이 발생하지는 않을 것"이라고 말했다.

기획시리즈



모빌리티 제어 기술 동향

모델 기반 제어기 설계의 기본
강인 제어를 위한 외란 관측기 설계 연구 동향
최대 노름 최소화 기반 단일정책 다중목적 강화학습 연구

모빌리티 제어 기술 동향



강창묵(Chang Mook Kang)
인천대학교(Incheon National University)



존경하는 대한전기학회 회원 여러분

전기의세계 기획시리즈를 통해 D부문의 정보 및 제어 부문회에서 최근 주목받고 있는 모빌리티의 제어 기술 동향을 소개드리고자 합니다.

국내 지능형 로봇 산업의 발전을 위해 정부에서 다양한 정책이 제시되고 있습니다. 2019년 산업통상자원부는 “지능형 로봇 3차 기본 계획”을 발표하였으며 3차 기본 계획의 핵심은 서비스 로봇 분야 집중 육성과 더불어 로봇 산업 생태계 활성화입니다. 또한, 정부는 “2021 지능형 로봇 실행계획” 및 “2021 로봇산업 선제적 규제혁신 로드맵 실행계획”을 바탕으로 지능형 로봇산업을 집중 육성 중입니다.

로봇분야의 세계 시장 규모 및 전망

(단위: 십억달러, %)

년도	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	CAGR
로봇	62.8	71.2	80.8	91.7	104.1	118.2	134.3	13.5

출처 Robotics Technology Market Statistics (Allied Market Research, 2020)을 근거로 네모아이씨지 재추정

전 세계 로봇 시장 규모는 2019년 628억 달러로 평가되었으며, 연평균 13.5%로 성장하면서 2025년까지 1,343억 달러에 이를 것으로 예상됩니다. 세계 로봇시장 규모는 노동력 대체, 인건비 절감, 고령화에 대한 대응, 산업 경쟁력 제고, 국방력 강화 등을 위한 각국의 적극적 활용정책으로 높은 성장세를 유지할 전망으로 보입니다. 컴퓨터 프로세싱 역량의 향상, 인공지능 기술 발전, 센서 및 사물인터넷 확산, 초고속 통신 보편화, 클라우드·빅데이터 보급, 오픈소스 확산 등의 기술 발전 또한 로봇 도입을 촉진하고 있습니다.

이 중 자율주행 기술이 적용된 모바일 로봇은 산업현장 뿐 아니라 가정과 일상생활에서도 활용되고 있으며 교육, 의료, 해양, 물류 등 다양한 분야에서 활발하게 사용되고 있습니다. 식당 서빙 로봇과 공항 안내 로봇을 예로 들 수 있으며 관련 핵심 기술들은 기술개발 수준을 넘어서 상용화 단계에 들어서고 있습니다. 이동을 통한 다양한 서비스에 활용이 가능하다는 점을 통해 자율주행 로봇은 기존의 산업용 로봇이 진출하지 못하던 분야에까지



출처 캠페온

KT 방역로봇 캠페온



출처 LG전자

LG전자에이스타

그 가능성을 넓히고 있습니다.

국내 주요 모바일 로봇 관련 회사를 분야별로 살펴보면 다음과 같습니다. 먼저 물류/배송분야의 국내 기업들입니다. 유진로봇은 청소 로봇 아이클레보 시리즈를 비롯해 배달 서비스 로봇 고카트, 모바일 플랫폼 터틀봇 등을 생산하고 있습니다. 독자적인 기술력인 자율주행솔루션을 탑재한 ‘고카트’는 스스로 엘리베이터를 호출해 층간 이동 및 자동문 통과가 가능하며, 복잡한 동선을 가진 병원이나 호텔, 폭이 좁은 양로시설 등에서 활용 가능합니다.

엔티로봇은 무인 물류 운반 로봇, 착용형 보행 로봇, 고속 외관 검사 로봇 등을 주로 생산하고 있습니다. 병원에서 혈액 등의 의료 검체, 수술도구, 의료품, 의약품, 폐기물 등의 다양한 물류를 운반해 주는 물류 운반 로봇(모델명: Sbot2-MD) 개발하였으며, 별도의 가이드라인 없이 자율주행하며 장애물 회피 가능합니다.

코로나로 인해 많은 관심을 받게 된 방역 분야에서는 KT가 자율주행로봇 전문업체 도구 공간과 협력하여 사무실과 대중시설에서 자율주행 방역 서비스가 가능한 이동형 방역 로봇 ‘캠페온’을 개발하였습니다. 실내 자율주행기술을 기반으로 이동하면서 UVA/UV-C 조사 및 소독액을 분사하여 방역합니다. 클라우드에서 원격제어 및 배터리 잔량과 소독액 사용량, 정상 작동 여부 등을 확인할 수 있습니다.

SK텔레콤과 한국오므론제어기에서는 5G 네트워크 무선 통신을 통한 체온 분석 및 얼굴 인식이 가능하고 자율주행 이동하며 UVC 살균기능을 탑재한 로봇 개발하였습니다. 열화상 및 일반 카메라를 이용하여 얼굴 인식 및 체온을 측정하고 5G 무선 통신을 통해 서버에서 이상 유무를 자동으로 판단할 수 있습니다. 모바일 로봇에 UVC 램프 및 손 소독 장치를 탑재하고 이동 방역 작업 수행하는 로봇입니다.



KT 호텔 로봇 '엔봇'

서비스 로봇 분야에서는 인천공항공사가 지능형 안내 로봇인 LG전자의 '에어스타' 상용화 중입니다. 에어스타는 인공지능(AI) 기반의 자율주행·음성인식 기능 등 각종 첨단 정보통신 기술(ICT)이 집약된 공항 안내 로봇으로, '세계 최초 상용화 공항 안내 로봇'이라는 세계 신기록을 보유하고 있습니다. 프로젝트 주관사인 LG CNS가 중앙관제 시스템을, LG전자가 두뇌 격인 AI를, 중소기업 푸른기술이 하드웨어 개발을 각각 맡은 '합작품'입니다.

또한 KT에서는 '기가지니 호텔' 솔루션을 진화시켜 AI 호텔 로봇 '엔봇(N bot)'을 상용화 중입니다. 객실 내의 기가지니 호텔 단말기를 통해 음성이나 터치로 객실 용품을 요청하면 배달을 로봇이 직접 대신하는 서비스를 제공합니다. 엔봇은 KT 융합기술원에서 자체 기술로 개발한 3D 공간맵핑 기술, 자율주행 기술 등 첨단 정보통신 기술(ICT)이 적용돼 객실까지 자율주행으로 이동 가능합니다. 호텔 엘리베이터와의 통신을 통해 스스로 엘리베이터를 승하차하며 층간 이동도 가능합니다.

이러한 자율주행 기반 모바일 로봇이 사용되는 공간은 주로 공간이 일률적이지 않고 점점 복잡해지는 추세입니다. 이로 인해 사전에 정해진 작업만을 수행하는 경우보다 상황에 따라 적절한 동작을 해야 하는 필요성이 커져 로봇의 자율주행 기능이 매우 주목받고 있습니다. 특히 한 자리에서 고정되어 단순 반복 작업을 수행하는 제조용 공정 로봇과는 달리 물류, 방역 및 서비스 로봇 등은 주어진 환경 내에서 가능한 한 자유롭게 이동할 수 있어야 하며, 이러한 환경에는 사람이나 동적/정적 장애물의 존재 가능성이 있습니다. 자율주행 기술은 로봇이 자동으로 장애물을 회피하거나 돌발상황에서 경로를 재설정하는 기술로 항상 같은 작

업 환경을 보장하지 않는 다양한 환경에서 가장 중요한 기술이며, 본 고에서는 이러한 자율주행을 위한 주요 제어 기술의 동향을 살펴보고자 합니다.

향후 근 미래에 다양한 다수의 로봇이 인천공항, 컨벤션센터 등 대규모 시설 등에서 활용되는 것을 고려하면, 기본적인 제어기술과 더불어 이기종 및 다수 로봇을 통합 관제할 수 있는 시스템의 역할이 중요해 질 것으로 보입니다.

[참고문헌]

- [1] 중소기업 전략기술로드맵 2024-2026, 지능형 로봇, 중소벤처기업부, 2024
- [2] 배송 로봇 및 물류 로봇 시장, 연구개발특구진흥재단, 2020.04
- [3] 이슈보고서, 로봇산업 동향 및 성장전략, 한국수출입은행, 2022.09

저자소개

강창목(Chang Mook Kang)

2012년 한양대학교 전기공학과 졸업
2018년 동 대학교 대학원 졸업(공학)
2019년~현재 인천대학교 전기공학과 교수
현재 당 학회 평의원 및 D부문의 편집이사
주 연구분야 : 자율주행, 로봇, 인공지능, 최적제어 등





최대 노름 최소화 기반 단일정책 다중목적 강화학습 연구

Single-Policy Multi-Objective Reinforcement Learning Based on Maximum Norm Minimization

이명훈 | 인천대학교 전기공학과

Myoung Hoon Lee | Department of Electrical Engineering, Incheon National University



요약

본 논문에서는 다중목적 제어 문제를 해결하고 효율적으로 파레토 전선을 이루는 파레토 최적점들을 얻기 위해 Maximum Norm Minimization (MNM) 라는 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘을 제안한다. 다섯 가지 복잡한 다중목적 로봇제어 학습환경에서의 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 MNM의 성능을 검증한다.

Abstract

In this paper, we propose Maximum Norm Minimization (MNM), a class of single-policy Multi-Objective Reinforcement Learning (MORL), to solve multi-objective control problems and obtain Pareto optimal points which constitute the Pareto front. We provide simulation results of the proposed MNM algorithm in five complex robotic multi-objective environments to validate the performance of MNM in multi-objective control problems.

1. 서론

기존의 강화학습은 단일목적 강화학습으로 하나의 목적에 대응하는 스칼라 형태의 보상을 최대화함으로써 학습한다. 그러나 실세계 제어 문제는 여러 목적들을 동시에 고려해야 하는 경우가 많으며 단일 목적(또는 스칼라 보상)으로는 충분하지 않다. 본 논문에서는 다중목적 제어 문제를 해결하고 한 번에 여러 목적들을 동시에 고려하여 학습하는 다중목적 강화학습 기술을 고려한다.

다중목적 강화학습은 일반적으로 각각의 목적에 대응하는 목적 보상들에 목적별 중요도를 의미하는 가중치(weight)를 곱하여 더한 weighted sum 스칼라화를 통해 학습하며, 학습 과정에

서 사용되는 정책 수에 따라 단일정책(single policy) 다중목적 강화학습, 그리고 다중정책(multi-policy) 다중목적 강화학습으로 구분한다. 단일정책 다중목적 강화학습은 다중목적 제어 문제를 해결하기 위해 하나의 정책 네트워크를 사용하는데, 하나의 인공신경망을 사용하기 때문에 다중정책 다중목적 강화학습에 비해 학습속도가 상대적으로 빠르지만, 하나의 고정된 목적별 중요도만을 학습이 가능하다는 단점이 있다. 반면에 다중정책 다중목적 강화학습은 여러 개의 정책 네트워크를 사용하기 때문에, 여러 개의 목적별 중요도 조합을 고려한 학습이 가능하다. 그러나, 다중정책 다중목적 강화학습에서 정책 네트워크들은 정책 간에 서로 학습 경험을 공유하지 않기 때문에, 각 정책은 중복된 학습과

정을 비효율적으로 반복할 수 있으며, 단일정책 다중목적 강화학습에 비해 계산 비용이 높아 학습이 오래 걸린다는 단점이 있다.

본 논문에서는 다중목적 제어 문제를 해결하고 효율적으로 파레토 전선을 이루는 파레토 최적점들을 얻기 위해 Maximum Norm Minimization (MNM)라는 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘을 제안한다. 파레토 전선은 다중목적 공간에서 다른 것에 지배되지(dominated) 않는 파레토 최적점의 집합으로 정의되며, 다중목적 강화학습의 성능은 학습을 통해 얻은 파레토 최적점들이 그리는 파레토 전선의 부피(hypervolume), 그리고 파레토 최적점들 간의 평균 제곱 거리로 평가한다. 제안된 MNM 알고리즘은 목적들의 목적별 중요도에 따라 반복적으로 가중치를 변경하여 부피 합을 개선하고 파레토 최적점의 평균 제곱 거리를 감소시키기 위해 다중목적 공간을 탐색한다. 가장 먼저, MNM은 현재 시점의 파레토 전선의 파레토 최적점 간의 거리를 측정한다. 다음 각 목적의 최대 및 최소 보상 값을 기반으로 파레토 최적점간 거리를 정규화한다. 다음으로, 정규화된 파레토 최적점 간 거리 중 가장 큰 값을 최대 노름이라고 하며, MNM은 최대 노름을 최소화하기 위해 최대 노름을 구성하는 두 파레토 최적점의 중앙에 새로운 파레토 최적점이 생기도록 새로운 가중치 벡터를 설정하고 학습한다. 위의 두 과정을 반복함으로써 MNM은 다중목적 공간에서 파레토 전선을 확장하고 밀도를 높일 수 있다. 제안하는 MNM은 하나의 정책 네트워크를 사용하여 학습속도가 빠르면서도, 여러 목적별 중요도 조합을 고려하는 것이 가능한 새로운 단일정책 다중목적 강화학습이다. 마지막으로, OpenAI에서 제공하는 다섯 가지 복잡한 다중목적 로봇제어 학습환경에서의 시뮬레이션 결과를 기존의 다른 다중목적 강화학습 알고리즘과의 비교를 통해 제안한 MNM의 성능을 검증한다.

2. 다중목적 강화학습과 평가 지표

본 장에서는 다중목적 강화학습의 기본 개념과 다중목적 강화학습을 평가하는 데 사용되는 지표에 대해 다룬다. 먼저 기본적인 강화학습을 다중목적 강화학습으로 확장하는 방법을 소개

하며, 파레토 최적성의 개념과 다중목적 강화학습의 성능을 평가하는 데 사용되는 두 가지 효과적인 지표를 정의한다.

2.1 다중목적 강화학습

기본적인 (단일목적) 강화학습은 5개의 요소 $\langle S, A, R, P, \gamma \rangle$ 로 구성된다. 여기서 S 는 상태 공간, A 는 행동 공간, R 은 보상 공간, P 는 상태 전이 확률의 공간이며, γ 는 미래 보상에 대한 할인 계수이다. 다중목적 강화학습은 다중 스칼라 보상의 보상 벡터를 고려하는 단일 목적 강화학습의 확장이다. 다중목적 강화학습 프레임워크에서 주요 목표는 다음의 m 개의 목적 함수 벡터를 최대화하는 최적 정책 π 를 찾는 것이다.

$$J(\pi) = [J_1^\pi, J_2^\pi, \dots, J_m^\pi] \dots\dots\dots (1)$$

$$J_j^\pi = \mathbb{E}_{(s_t, a_t) \sim \rho_\pi} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t r_j(s_t, a_t) \right] \dots\dots (2)$$

다중목적 강화학습에서는 모든 목적 함수를 동시에 최대화하는 하나의 고유한 최적 정책은 존재하기 어렵다. 대신, 다중목적 강화학습은 다른 정책에 지배되지 않는 파레토 최적점 집합을 얻는 것을 목적으로 한다.

2.2 파레토 전선의 평가 지표

파레토 최적점들이 그리는 파레토 전선을 평가하기 위해 본 논문에서는 Hypervolume Metric (HM)과 Sparsity Metric (SM)

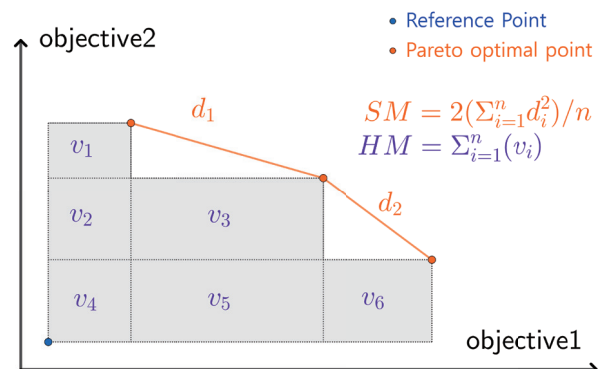


그림 1 파레토 전선의 평가지표 HM과 SM의 도식

라는 두 가지 지표를 사용한다. HM은 다중목적 공간에서 파레토 전선의 체적을 제공하고, SM은 근접한 두 파레토 최적점 사이의 거리의 평균을 측정한다. 상세한 도식은 그림 1에서 찾을 수 있다. HM은 파레토 전선에 의해 지배되는 체적의 합을 측정하는데, HM이 높을수록 학습 결과가 더 좋음을 의미한다. SM은 파레토 전선을 구성하는 파레토 최적점들의 희소성을 측정한다. SM은 작을수록 파레토 전선 및 학습 결과가 더 좋음을 의미한다.

3. Maximum Norm Minimization

본 장에서는 다중목적 문제를 해결하고 파레토 전선을 구성하는 명시적인 파레토 최적점들을 얻기 위한 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘인 MNM을 제안한다. 먼저 MNM의 주요 목표를 설명하며, 최대 노름 최소화를 기반으로 하는 반복적 목적 가중치 벡터 탐색 알고리즘인 MNM을 제안한다. 이후 MNM과 임의의 강화학습 알고리즘이 결합된 MNM 기반 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘에 대해 논의한다.

3.1 MNM의 주요 목표

단일정책 다중목적 강회학습의 주요 목표는 (1)의 목적 벡터를 최대화하는 대신, (3)의 식과 같이 가중 합(weighted sum)을 통해 스칼라화된 보상을 최대화하는 최적 정책을 찾는 것이다.

$$J(\pi, \omega) = \sum_{j=1}^m \omega_j J_j^\pi \dots\dots\dots (3)$$

여기서 ω 는 (4)의 식과 같은 속성을 만족하는 가중치 벡터가 된다.

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_1, \dots, \omega_m]^\top, \omega_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad \dots (4)$$

가중치 벡터 ω 는 각 목적에 대한 목적별 중요도를 나타낸다. 즉, 가중치 벡터 ω 는 강화학습 에이전트가 다중목적 공간에서 학습하는 방향을 결정한다. 가중치 벡터 ω 에 대해, 단일정책 다중목적 강화학습은 (3)의 스칼라화된 보상을 최대화하여 파레토 최

적점 집합에 포함된 최적 정책을 제공한다. 가중치 벡터 ω 의 모든 가능한 조합으로 최적점을 얻으면 다중 목적 공간에서 파레토 전선을 얻게 된다.

3.2 MNM기반 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘

MNM의 주요 목표는 다중목적 공간에서 강화학습 에이전트가 현재 시점에서 아직 파레토 전선의 확장이 충분하지 않은 영역을 학습하도록 목적 가중치 벡터를 찾는 것이다. MNM에 의해 결정된 목적 가중치 벡터는 식 (3)의 가중치 벡터 ω 로 사용된다. MNM에 의해 매 학습 에피소드마다 학습이 충분하지 않은 방향의 목적 가중치 벡터로 새롭게 설정되며, MNM이 설정하는 ω 를 바탕으로 강화학습 에이전트는 (3)의 식을 최대화하는 정책을 학습한다. 두 과정을 반복하여 강화학습 에이전트는 효율적으로 다중목적 공간을 탐색하고 파레토 전선을 구성하는 명시적인 파레토 최적 정책을 얻게 된다.

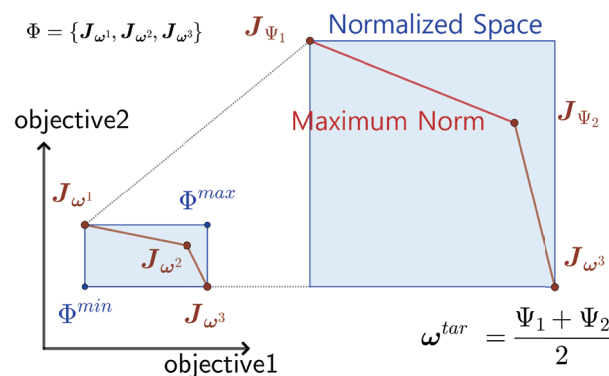


그림 2 MNM 알고리즘의 도식

MNM 알고리즘의 상세 실행 순서는 다음과 같으며, 상세한 도식 및 알고리즘은 그림 2, 알고리즘 1과 같다.

(s.A1-1) 각 목적 j 에 대해 보상의 최소값과 최대값을 찾는다.

(s.A1-2) 각 파레토 점 i 에 대해 정규화된 보상 벡터를 계산한다.

(s.A1-3) 각 목적 j 에 대해 정규화된 보상 벡터를 j 번째 목적을 기준으로 오름차순으로 정렬한다.

(s.A1-4) 최대 노름 가중치 벡터 ψ 를 찾는다.

(s,A1-5) 목적 가중치 벡터를 결정한다.

Algorithm 1 Maximum Norm Minimization

```

1: Input: number of objectives  $m$ , number of the Pareto optimal points  $n$ , Pareto set  $\Phi$ 
2: Output:  $\omega^{tar}$ 
3: for objectives  $j = 1, 2, \dots, m$  do
4:    $\Phi_j^{min} = \min_{i=1}^n J_{j,\omega^i}^\pi$ 
5:    $\Phi_j^{max} = \max_{i=1}^n J_{j,\omega^i}^\pi$ 
6: end for
7: for objectives  $j = 1, 2, \dots, m$  do
8:   for Pareto optimal points  $i = 1, 2, \dots, n$  do
9:      $(\Phi_j^{rel})_i = \frac{J_{j,\omega^i}^\pi - \Phi_j^{min}}{\Phi_j^{max} - \Phi_j^{min}}$ 
10:   end for
11: end for
12:  $\omega^{tar} = \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{2}$ 

```

알고리즘 1 MNM 알고리즘 의사코드

MNM 기반 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘의 상세 실행 순서는 다음과 같으며, 상세한 도식 및 알고리즘은 이하와 같다.

(s.A2-1) 강화학습 알고리즘 A, 파레토 최적점 집합 $\emptyset$ 및 기저 가중치 벡터 집합 β 를 초기화한다.

(s.A2-2) (각 반복 k에서) 목적 가중치 벡터를 결정한다. 기저 가중치 벡터가 파레토 최적 집합 $\emptyset$ 에 포함되어 있지 않으면, 기저 가중치 벡터가 목적 가중치 벡터로 선택된다. 그렇지 않으면, (s.A1-1)-(s.A1-5)를 실행한다.

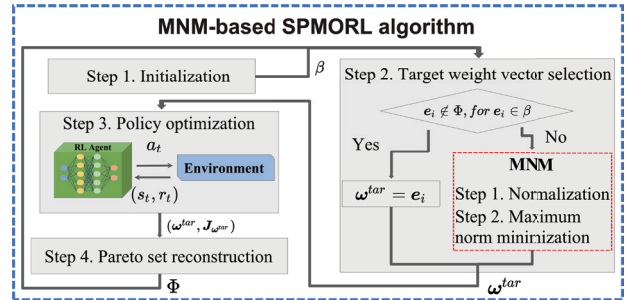
(s.A2-3) 주어진 목적 가중치 벡터에 대해 강화학습 A를 수행하여 보상 벡터를 얻는다.

(s.A2-4) 새로 얻은 파레토 최적점으로 파레토 최적 집합 $\emptyset$ 를 업데이트한다.

(s.A2-5) 파레토 최적성을 기반으로 파레토 최적 집합 $\emptyset$ 를 재구성한다.

(s.A2-2)-(s.A2-5)는 충분히 큰 학습(훈련) 에피소드 K에 대해 반복된다. K번의 반복적인 학습 후, 알고리즘 2에서 제안된 MNM 기반 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘은 파레토 전선을 구성하는 명시적인 파레토 최적 정책을 제공한다. 알고리즘 2의 MNM 기반 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘에 의해 얻은 파레토 최적 집합 $\emptyset$ 은 다중목적 공간에서 파레토 전선 P를 그린다. 파레토 최적 집합 $\emptyset$ 의 모든 파레토 최적점이 다중목적 공

간에 표시되면, 파레토 전선 P의 그림을 얻게 된다.

**그림 3** MNM 기반 단일 정책 다중 목적 강화학습 알고리즘의 도식**Algorithm 2** MNM-based SPMORL algorithm

```

1: Input: RL algorithm A, number of iteration K
2: Output: Pareto set  $\Phi$ 
3: Initialize RL A
4: Initialize Pareto set  $\Phi = \emptyset$ 
5: Initialize basis weight vector set  $\beta = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 
6: for iteration  $k = 1, 2, \dots, K$  do
7:   if  $e_i \notin \Phi$ , for  $e_i \in \beta$  then
8:      $\omega^{tar} = e_i$ 
9:   else
10:    Get  $\omega^{tar}$  by MNM in Algorithm 1
11:   end if
12:   Get  $J_{\omega^{tar}}$  by performing policy optimization using A
13:   Update  $\Phi \leftarrow (\omega^{tar}, J_{\omega^{tar}})$ 
14:   for Pareto optimal points  $i = 1, 2, \dots, n$  do
15:     if  $J_{\omega^i} \neq J_{\omega^{tar}}$  then
16:       if  $J_{j,\omega^i}^\pi \leq J_{j,\omega^{tar}}^\pi$  for all  $j, j = 1, 2, \dots, m$  then
17:         Remove  $(\omega^i, J_{\omega^i})$  from  $\Phi$ 
18:       end if
19:     end if
20:   end for
21: end for

```

알고리즘 2 MNM 기반 단일정책 다중목적 강화학습 알고리즘 의사코드

Environment	Metric	MNM (ours)	PGMORL	RA	PFA	MOEA/D
Ant-v2 (1.8×10^6 steps)	Hypervolume (HM) ($\times 10^6$)	23.3	9.6	8.6	9.4	9.3
	Sparsity (SM) ($\times 10^5$)	1.07	1.14	2.81	3.10	1.90
	Number of points	44	27	20	20	20
Walker2d-v2 (1.8×10^6 steps)	Hypervolume (HM) ($\times 10^6$)	9.8	7.8	7.9	7.7	7.8
	Sparsity (SM) ($\times 10^5$)	14.6	14.0	8.8	37.8	18.1
	Number of points	32	30	37	23	28
HalfCheetah-v2 (1.8×10^6 steps)	Hypervolume (HM) ($\times 10^7$)	1.4	1.3	1.0	1.1	1.2
	Sparsity (SM) ($\times 10^5$)	2.7	16.0	50.7	18.0	45.2
	Number of points	62	33	28	32	27
Hopper-v2 (3×10^6 steps)	Hypervolume (HM) ($\times 10^6$)	6.0	5.7	5.7	5.9	5.7
	Sparsity (SM) ($\times 10^5$)	9.0	11.3	24.7	27.1	19.1
	Number of points	17	15	20	20	15
Humanoid-v2 (2.4×10^6 steps)	Hypervolume (HM) ($\times 10^6$)	11.3	6.4	8.8	9.7	8.8
	Sparsity (SM) ($\times 10^5$)	1.5	2.3	1.7	3.0	1.6
	Number of points	32	23	16	18	17

표 1 MNM 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능 지표 비교 표**4. 실험 및 시뮬레이션**

본 장에서는 MNM의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 및 비교 결과를 제시한다. MNM 알고리즘은 연속적인 상태 및 행동 공

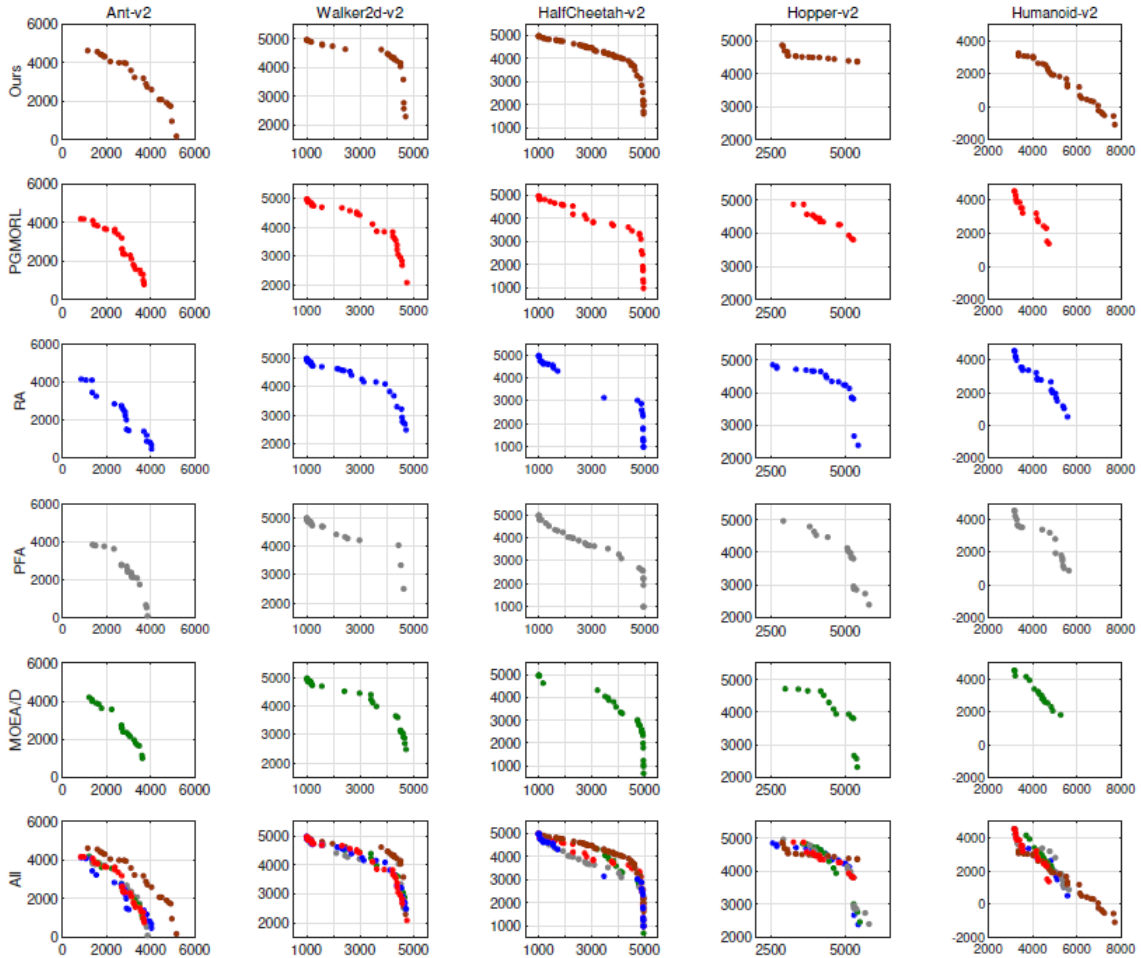


그림 4 MNM 알고리즘과 기존 알고리즘의 성능 환경별 파레토 프론트

간을 갖고 두 개의 다중목적에 갖는 다섯 가지 OpenAI-MuJoCo 환경 (Ant-v2, Walker2d-v2, HalfCheetah-v2, Hopper-v2, Humanoid-v2, [1])에서 실험되며, 기존에 연구된 4가지 다중목적 강화학습 알고리즘[2]~[4]의 비교를 통해 성능을 검증한다. MNM은 모든 (단일목적) 강화학습 알고리즘 (예: DQN, DDPG, SAC, NAF 및 PPO)에 적용하여 다중목적 강화학습 프레임워크를 구현할 수 있으며, 본 논문에서는 SAC 알고리즘 [5]을 사용하였다. 각 알고리즘의 파레토 전선을 평가하기 위해 성능지표로 HM, SM 및 파레토 최적점의 수를 사용하였다.

HM, SM 및 최적점 수에 대한 시뮬레이션 결과는 표 1에서 확인할 수 있으며, 학습을 통해 얻은 파레토 전선을 그림 5에서 확인할 수 있다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이, MNM은 대부분의

환경의 평가지표에서 기존 다중목적 알고리즘들의 성능보다 우수한 결과를 보였다. MNM이 최고의 성능을 보이지 못한 몇 가지의 평가지표에서도, 그 차이는 크지 않은 반면 다른 지표의 성능이 다른 알고리즘에 비해 크게 우수해 종합적으로 MNM이 뛰어난 성능을 보임을 확인할 수 있다. 그림 5를 통해 제안한 MNM이 그린 파레토 전선(갈색)이 대부분의 환경에서 다른 알고리즘들보다 더 나은 결과를 보였으며, 특히 일부 환경에서는 다른 알고리즘들의 배 이하의 학습 스텝 수로도 더 좋은 결과를 보임을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 다중목적 제어 문제를 해결하고 효율적으로 파

레토 전선을 얻기 위해 Maximum Norm Minimization (MNM)를 제안하였다. 또한, 5개의 복잡한 로봇 다중목적 환경에서 기존의 다른 다중목적 알고리즘과의 시뮬레이션 결과 비교를 통해 제안된 MNM 알고리즘의 성능을 검증하였다. 이후의 연구 주제는 다소 단순하게 두 점의 평균을 기반으로 목적 가중치 벡터를 선택하는 MNM의 접근방법 대신 좀 더 효율적으로 목적 가중치 벡터 선택 방법을 찾는 연구를 수행하여, 이를 통해 더 정교하고 효율적으로 다중목적 제어 문제를 해결하고 파레토 전선을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

[참고문헌]

- [1] E. Todorov, T. Erez, and Y. Tassa, "MuJoCo: A physics engine for model-based control," in 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5026-5033, 2012.
- [2] Simone Parisi, Matteo Pirota, Nicola Smacchia, Luca Bascetta, and Marcello Restelli, "Policy gradient approaches for multi-objective sequential decision making," 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), IEEE, 2323-2330, 2014.
- [3] Jie Xu, Yunsheng Tian, Pingchuan Ma, Daniela Rus, Shinjiro Sue- da, and Wojciech Matusik, "Prediction-guided multi-objective reinforcement learning for continuous robot control. In International Conference on Machine Learning, PMLR, 10607-10616, 2020.
- [4] Qingfu Zhang and Hui Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Transactions on evolutionary computation, 11, 6, 712-731, 2007.
- [5] T. Haarnoja, A. Zhou, K. Hartikainen, G. Tucker, S. Ha, J. Tan, V. Kumar, H. Zhu, A. Gupta, P. Abbeel et al., "Soft actor-critic algorithms and applications," arXiv preprint arXiv:1812.05905, 2018.

저자소개

이명훈(Myoung Hoon Lee)

2016년 경북대학교 전자공학부 졸업(학사)

2021년 울산과학기술원 전기및전자공학과 졸업
(공학박사)

2021년~2023년 한양대학교 전기정보통신
기술연구소 박사후연구원

2023년~현재 인천대학교 전기공학과 조교수
주 연구분야 : 최적제어, 분산제어, 강화학습 등





강인 제어를 위한 외란 관측기 설계 연구 동향

Research trends in disturbance observer design for robust control

정용우 박사, 최우영 교수 | 부경대학교

Yong Woo Jeong, Woo Young Choi | Pukyong National University



요 약

본 기고문에서는, 제조업, 이동체 구동 시스템 관련 분야에서 사용되는 구동모터의 제어 성능을 저감하는 외란 성분들에 대한 분석과 이를 보상하기 위한 외란 관측기의 연구 동향에 대하여 정리한다.

Abstract

In this paper, we summarize the analysis of disturbance components that reduce the control performance of drive motors used in manufacturing and mobile vehicle drive system-related fields, and the research trends of disturbance observers.

1. 서보 모터 제어 시스템의 외란 성분

최근 제조업, 이동체 구동 시스템 관련 분야에서 각각의 제어 목적을 달성하기 위한 제어 알고리즘 개발 연구들이 진행되고 있다. 제조업에 적용되는 정밀 위치 제어의 경우, 장치 이송의 움직임은 시점과 속도의 방향이 변화하는 시점에서 발생하는 마찰 성분이 발생한다. 이러한 마찰 성분은 비선형성을 지니며, 이를 그림 1과 같은 정적 모델 (Coulomb model, the Stribeck model, the Karnopp model) 및 동적 모델 (Dahl model, the Bristle model, the reset integrator model, and the LuGre model)로 표현할 수 있다 [1]. 이러한 비선형 마찰 성분은 장비의 움직임 중 진동을 야기하여, 공정의 cycle-time을 증가시키기에, 생산성 증진을 최우선 목표로 하는 제조업에서는 이를 해결하고자 하는 연구는 선택

이 아닌 필수 사항이 되었다. 비선형 마찰은 장비의 작동과 관련된 주파수 영역보다 상대적으로 높은 주파수 대역의 주파수를 포함하기에, 장비의 가동 주파수 대역 뿐 아니라, 높은 범위의 주파

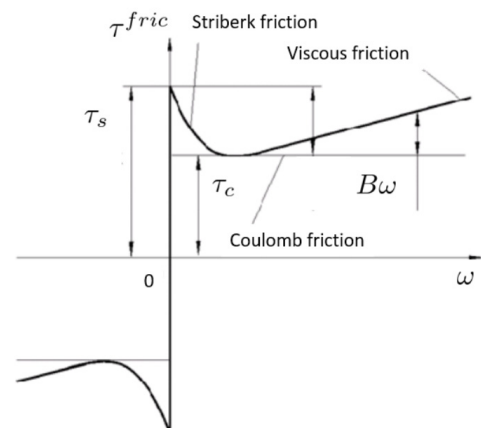


그림 1 비선형 마찰 그래프 [4]

수 대역을 포함하기에, 이러한 주파수 대역에 맞는 제어 성능 증진 연구가 필요하다 [2-3].

로봇팔, 드론, 무인 이동체 등과 같이, 전기 모터의 회전축에 연결된 기구부의 질량과 형태가 상황에 따라 변하는 경우, 모터 회전축의 관성 모멘트가 변한다. 이러한 모멘트 변화는 모델 기반 제어 기법을 사용하는 모터 제어 시스템의 외란으로 작용하여, 제어 성능을 저하 시킬 수 있다 [5-7]. 또한, 모터의 장시간 구동 시, 권선 저항에서의 온도가 변하기에, 인버터 제어기 구성을 위해 사용되는 저항값에 부정확성이 발생한다. 영구 자석을 사용하는 3상 모터의 경우, 그림 2과 같이 온도의 변화에 따라 토크 발생과 관련된 자속 특성이 변한다. 이와 같은 모터 제어를 위한 모델 계수들의 부정확성은 모터 제어 시스템의 외란으로 작용하여, 인버터 회로 내부의 전류에 고조파 성분을 발생시킨다 [8]. 이러한 전류의 고조파 성분은 모터 토크 제어의 진동을 야기할 뿐 아니라, 고장 진단 및 위치 sensorless 제어를 위한 역기전력 추정 성능 저하를 일으킨다. 이러한 고조파 성분 또한, 동작 속도에 비례하여, 다양한 범위의 주파수 대역에 포진하기 때문에, 넓은 범위의 주파수 대역에 대한 제어 성능 증진 연구가 필요하다 [9].

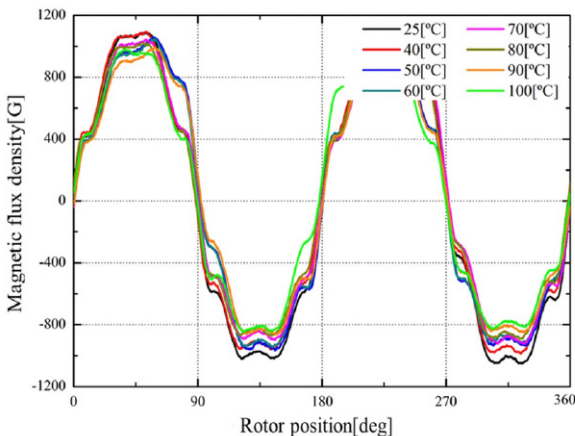


그림 2 온도에 따른 영구자석의 자속분포 변화 [9]

2. 외란 관측기

외란이 포함된 시스템을 제어하기 위해, Feedback-Linearization 기법 및 선형 제어 기법이 자주 사용되었고, 이를 통해, 제어

시스템의 제어 대상 (Plant)을 선형화하여, 특정 주파수 대역에서 최적의 제어 성능을 얻을 수 있다 [10-12]. 하지만, 이러한 기존 제어 기법은 앞서 언급된 동역학 모델의 부정확성 혹은 가변되는 주변 환경으로 인해 발생하는 외란에 지속적인 영향을 받게 된다. 이러한 영향을 저감하여 제어 시스템 성능을 증진시키기 위해, 외란 관측기법과 결합된 외란 보상 제어 기법들이 연구되고 있다 [13-18].

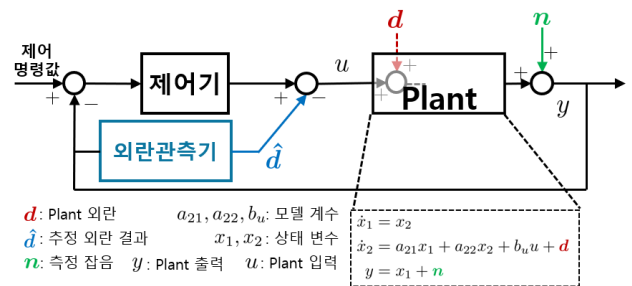


그림 3 외란 관측기를 활용한 제어 시스템

그림 3는 외란 관측기가 결합된 제어 시스템을 나타낸다. 대부분의 비선형 시스템이 Byrnes-Isidori normal form으로 표현된다는 점과 Feedback-Linearization의 결과를 고려하여, 그림 3의 검은색 점선과 같이 모터 구동과 관련된 제어 대상 (Plant)을 일반적인 2차 선형 동역학 방정식으로 표현했다. 청색 부분은 외란 관측기와 추정된 외란 $\hat{d}$ 을 나타낸다. 적색 부분과 녹색 부분은 외란 d 와 측정 잡음 n 을 나타낸다. 추정된 외란 $\hat{d}$ 이 Plant의 외란 d 을 상쇄하는 메커니즘을 가지기에, 고정된 제어기 환경에서는, 외란 관측기의 추정 성능 $\tilde{d} = d - \hat{d}$ 에 따라, 전체 제어 시스템의 성능이 결정된다 [19].

이러한 외란 관측기의 경우, 그림 3의 y 를 기반으로 외란을 추정하기에, 측정 잡음 n , 추정하고자 하는 외란 d 의 주파수 입력 대역, 외란 관측기의 구조에 의해 외란 관측기의 추정 성능이 결정된다. 그림 4는 주파수 영역에서 설계되는 외란 관측기를 나타낸다. 이러한 관측기를 설계하기 위해서는, 시스템의 동역학이 선형으로 표현된다고 가정하고, 시스템 전달함수의 정보를 이용하여, 잡음이 포함된 측정값을 바탕으로 외란 성분을 계산해 낸다. 그 후, 필요한 주파수 대역에 성분들을 추출하기 위해, 필터링 작업을 진행한 결과를 제어 입력에 역으로 보상한다.

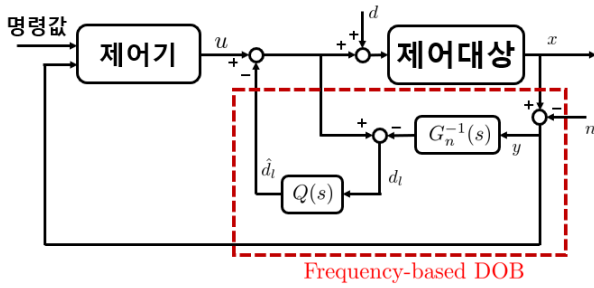


그림 4 주파수 영역 외란관측기

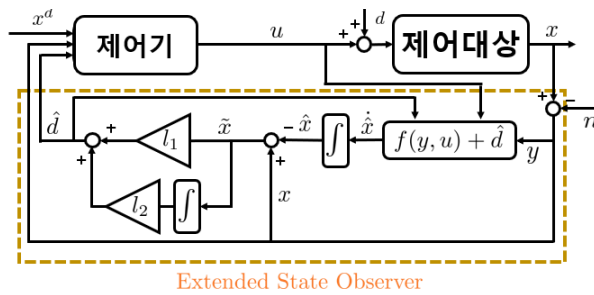


그림 5 ESO 기반 외란 관측기

그림 5는 Extended State Observer (ESO) 를 사용한 외란 관측 기법에 대한 설명을 나타낸다. 측정된 값과, 동역학 모델을 활용하여 추정된 값의 차이를 이용하여, 외란을 추정한다. ESO 구조를 기반으로 하여, Generalized PI Observer (GPIO), Nonlinear PI Observer 등과 같이 다양한 외란 관측기 구조가 개발되었다. 이에 대하여 일반화한 외란 관측기 구조는 그림 6과 같다.

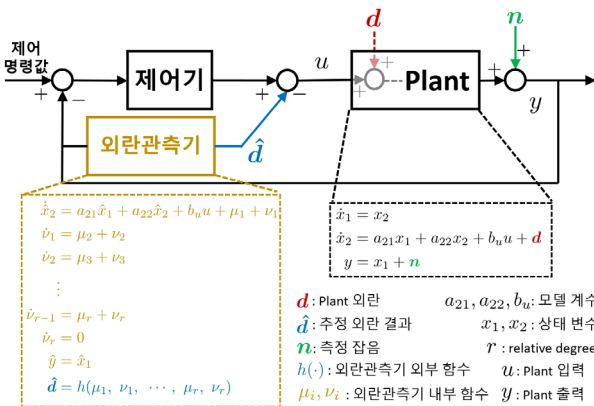


그림 6 일반화된 외란 관측기 구조

그림 6의 황색 점선 영역은 일반화한 외란 관측기의 구조를 나타낸다.는 측정값과 관측기의 변수의 차이를 입력으로 하는 외란 관측기 내부/외부 함수의 조합으로 표현될 수 있고, 은 관측기

의 relative degree를 나타낸다. 외란 관측기 추정 성능의 주파수 응답은 측정 잡음과 외란에 대하여와 같이 정량적으로 도출되어 외란 관측기의 성능 평가에 사용될 수 있고, 이러한 주파수 응답은 그림 6의 외란 관측기의 relative degree, 내부/외부 함수 구조, 이득값에 따라 변한다.

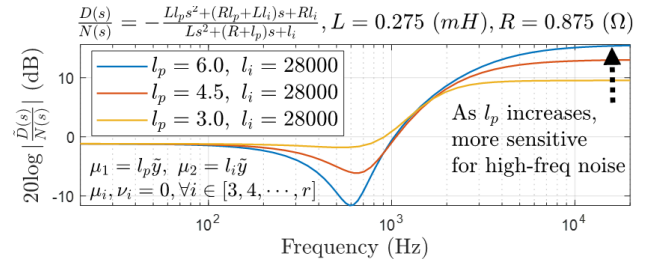
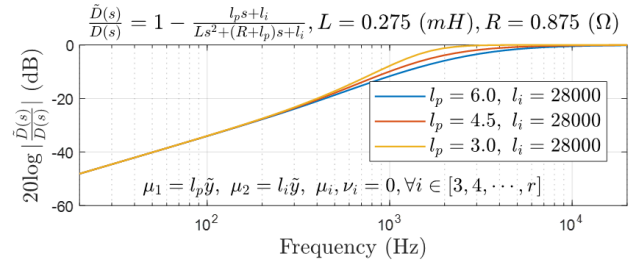


그림 7 이득값에 따른, 3상모터 인버터 시스템 외란 관측기 주파수 응답

그림 7는 임의 선정된 외란 관측기 구조의 주파수 응답 예시를 보여준다 ($\mu_1 = l_p \tilde{y}, \mu_2 = l_i \tilde{y}, \nu_2 = 0, (\mu_i, \nu_i) = (0, 0), \forall i \in [3, 4, \dots, r]$) [19]. 그림 2 (a)와 같이, 주파수 응답 전달함수의 분모 부분이 일반화된 2차 전달함수로 표현될 경우, $\tilde{D}(s)/D(s)$ 의 exponential decay frequency, damping ratio 그리고 시스템의 pole과 zero의 관계를 고려하여, 외란 관측기 이득값 l_p, l_i 를 설계할 수 있다 [20]. 이를 바탕으로, 그림 7 (a)의 파란색 선과 같이 l_p 를 크게 설정할 경우, $\tilde{D}(s)/D(s)$ 의 exponential decay frequency가 증가하기에, 외란 추정 성능이 좋고 판단될 수 있지만, 이득값이 변함에 따라 그림 2 (b)와 같이 $\tilde{D}(s)/N(s)$ 의 고주파 대역에서의 증폭을 야기하여, 제어 시스템 성능에 악영향을 끼침을 확인할 수 있다. 따라서, 입력되는 외란에 대한 추정 성능뿐 아니라, 측정 잡음에 대한 외란 추정 성능 또한 같이 고려하여 외란 관측기가 설계되어야 한다.

최근, 주파수 응답의 설계 자유도를 높이기 위해, relative degree가 3인 경우의 연구도 수행되었지만, relative degree가 증가할수록, 외란 관측기의 이득값 선정에 대한 설계 복잡성이 증가함을 확인할 수 있다 [21]. 이로 인해, 해당 논문에서는 특정한 pole 구조를 지닌 선형 외란 관측기에 대한 외란 관측기 성능 분석 연구만 진행되었다. 또한, 외란 관측기의 이득값 선정 방식을 통해 설계된 외란관측기 구조의 주파수 응답이, 제어 시스템에 요구되는 주파수 응답과 일치하도록 하는 이득 선정 방식에 대한 연구가 부족한 실정이다.

3. 결 론

앞서 언급된 제조 장비, 이동체 구동 시스템, 신재생 에너지 관련 분야의 정밀 모션 제어, 인버터 제어에 요구되는 넓은 영역의 주파수 대역에서의 제어 성능 개선을 위해, 그림 6의 relative degree, 외란 관측기 내부/외부 함수 구조 형태, 관측기 이득 값과 같은 다수의 독립 변수에 대한 경험적인 조정이 필요하다. 외란 관측기의 relative degree를 증가함으로써 더 많은 pole을 추가하거나, 더 다양한 pole-zero의 조합을 설계하여 넓은 주파수 대역에서의 개선된 주파수 응답을 가지는 외란 관측기를 개발을 시도할 수 있지만, 이에 따라 외란 관측기 구조 설계 및 이득값 선정에 대한 복잡성이 증가한다. 이러한 외란 관측기 설계 복잡성을 완화하며, 제어 시스템이 목표로 하는 주파수 응답 대역을 고려하는 외란 관측기 구조 설계와 이에 대한 이득 산정 알고리즘 개발 연구가 필요하다.

[참고문헌]

- [1] Johanaström, Karl, and Carlos Canudas-De-Wit, "Revisiting the LuGre friction model," IEEE Control systems magazine 28, no. 6, : 101-114, 2008.
- [2] Ruderman, Michael, and Makoto Iwasaki, "Observer of nonlinear friction dynamics for motion control," IEEE Transactions on Industrial Electronics 62, no. 9, 5941-5949, 2015.
- [3] Aggogeri, Francesco, Angelo Merlo, and Nicola Pellegrini, "Active vibration control development in ultra-precision machining," Journal of vibration and control, 27, no. 7-8, 790-801, 2021.
- [4] Jeong, Yong Woo, and Chung Choo Chung, "Observer-based Robust Control: Its Application to Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEJ Journal of Industry Applications, 12, no. 4, 575-587, 2023.
- [5] Li, Shihua, and Zhigang Liu, "Adaptive speed control for permanent-magnet synchronous motor system with variations of load inertia," IEEE transactions on industrial electronics, 56, no. 8, 3050-3059, 2009.
- [6] Li, Shihua, and Hao Gu, "Fuzzy adaptive internal model control schemes for PMSM speed-regulation system," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 8, no. 4, 767-779, 2012.
- [7] Park, Sunghyuk, Wonho Kim, and Sung-Il Kim, "A numerical prediction model for vibration and noise of axial flux motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61, no. 10, 5757-5762, 2014.
- [8] Zhang, Li, Ming Zhang, Xiaoyong Zhu, Chenyang Dong, and Zifeng Pei, "Adaptive Harmonic Decoupling Sensorless Control Strategy of A New Five-Phase Flux-Intensifying Permanent Magnet Motor under Healthy and Faulty Conditions," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.
- [9] Park, Chang-Seok, and Jae Suk Lee, "A torque error compensation algorithm for surface mounted permanent magnet synchronous machines with respect to magnet temperature variations," Energies, 10, no. 9, 1365, 2017.
- [10] Sira-Ramirez, Hebert J., and Ramón Silva-Ortigoza, "Control design techniques in power electronics devices," Springer Science & Business Media, 2006.
- [11] Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li, Applied nonlinear control, Vol. 199, no. 1, Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1991.
- [12] Chen, Ben M. H_∞ Control and its Applications. Vol. 235. Springer, 2013.

- [13] Chen, Wen-Hua, Jun Yang, Lei Guo, and Shihua Li, "Disturbance-observer-based control and related methods—An overview," IEEE Transactions on industrial electronics, 63, no. 2, 1083-1095, 2015.
- [14] Jo, Nam Hoon, Hyungbo Shim, and Young Ik Son, "Disturbance observer for non-minimum phase linear systems," International Journal of Control, Automation and Systems, 8, 994-1002, 2010.
- [15] Eun, Yongsoon, Jaeho Lee, and Hyungbo Shim, "Data-driven inverse of linear systems and application to disturbance observers," In 2023 American Control Conference (ACC), pp. 2806-2811. IEEE, 2023.
- [16] Gil, Jeonghwan, Sesun You, Youngwoo Lee, and Wonhee Kim, "Nonlinear sliding mode controller using disturbance observer for permanent magnet synchronous motors under disturbance," Expert Systems with Applications, 214, 119085, 2023.
- [17] Nguyen, Ngo Phong, Hyondong Oh, Yoonsoo Kim, and Jun Moon, "Disturbance observer-based continuous finite-time sliding mode control against matched and mismatched disturbances," Complexity 2020, 1-14, 2020.
- [18] Lee, Han-Sol, Juhoon Back, and Chang-Sei Kim, "Disturbance Observer-based Robust Controller for a Multiple-Electromagnets Actuator," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023.
- [19] Jeong, Yong Woo, and Chung Choo Chungk, "Nonlinear proportional-integral disturbance observers for motion control of permanent MAGNET synchronous motors," IEEE Control Systems Letters, 6, 3062-3067, 2022.
- [20] Nise, Norman S, Control systems engineering. John Wiley & Sons, 2020.
- [21] Zuo, Yuefei, Jiahao Chen, Xiaoyong Zhu, and Christopher HT Lee, "Different active disturbance rejection controllers based on the same order GPI observer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69, no. 11, 10969-10983, 2021.

저자소개

정용우 (Yong Woo Jeong)

2016년 동아대학교 전기공학과 졸업
 2023년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
 2022년~2023년 주식회사 썬테크 책임 연구원
 2023년~현재 부경대학교 Post-Doc
 주 연구분야 : 제어이론, 자율주행, 모터 및
 ESS 제어



최우영 (Woo Young Choi)

2015년 부경대학교 제어계측공학과 졸업
 2021년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
 2021년~2022년 한국과학기술연구원
 박사후연구원
 2022년~2023년 계명대학교 자동차시스템공학과
 교수
 2023년~현재 부경대학교 제어계측공학과 교수
 주 연구분야 : 제어이론, 자율주행, 미래 모빌리티





모델 기반 제어기 설계의 기본

Model Based Controller Basic Design

김원희 | 중앙대학교 에너지시스템 공학부

Wonhee Kim | School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University



요 약

Proportional-integral-derivative (PID) 제어기는 그 간단하면서도 효과적인 구조로 다양한 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. PID 제어기는 고전적이면서도 강력한 방법으로, 제어 대상 시스템의 특성을 고려하여 안정성, 반응성 및 추적성을 향상시키는 데 사용되고 있다. PID와 다양한 고급 제어 알고리즘이 오래동안 연구가 되었으나, 산업체에서는 PID 제어기는 모델링 정보 없이 간단한 지식으로 제어기 튜닝이 가능하기에 여전히 PID 제어기 사용을 선호하고 있다. 하지만 PID 제어기는 성능의 한계가 있는 알고리즘이며, 국내 산업체가 선진 업체와 경쟁을 위해서는 비선형 제어 알고리즘 등 모델 기반의 고급 제어 알고리즘 설계 적용이 필요한 상황이다. 본 고에서는 독자들의 모델 기반의 제어기 설계를 돕기 위하여 모델 기반의 제어기 설계에 대한 기본을 소개할 것이다.

Abstract

Proportional-integral-derivative (PID) controllers are widely used for various application systems due to their simple yet effective structure. PID controllers, as classical yet robust methods, are employed to enhance stability, responsiveness, and tracking performance by considering the characteristics of the controlled systems. Although various advanced control methods have been researched, industries still prefer PID controllers because they allow controller tuning with simple knowledge without requiring modeling information. However, PID controllers have limitations in performance, and there is a need for the application of advanced control algorithms, such as nonlinear control algorithms, and model-based advanced control algorithms, for domestic industries to compete with advanced companies. In this paper, we will introduce the basics of model-based control design to assist readers in model-based controller design.

1. 서 론

제어 공학은 현대 공학의 중요한 분야 중 하나로, 시스템의 동작을 분석하고 제어하는 기술을 다루는 학문이다. 이 분야는 자동차, 항공우주, 로봇공학, 생산 시스템, 에너지 관리 등 다양한 응용 분야에서 핵심적인 역할을 수행하며, 기술의 발전과 함께 그

중요성이 더욱 부각되고 있다. 따라서, 제어 시스템은 현대 산업 및 기술 분야에서 핵심적인 역할을 수행하며, 제어기 설계는 이러한 시스템의 핵심 구성 요소 중 하나로 자리를 잡고 있다. 특히, Proportional-integral-derivative (PID) 제어기는 그 간단하면서도 효과적인 구조로 다양한 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. PID 제어기는 고전적이면서도 강력한 방법으로, 제어 대상 시스

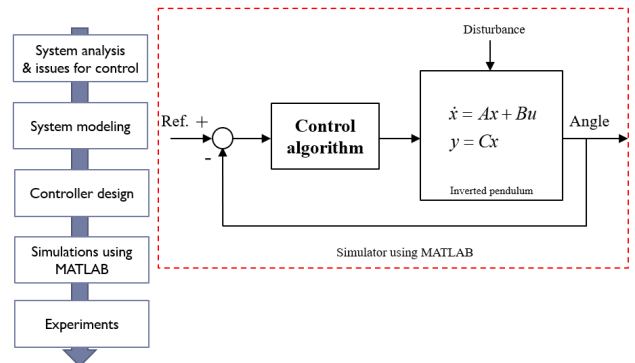
템의 특성을 고려하여 안정성, 반응성 및 추적성을 향상시키는 데 사용되고 있다 [1].

PID 제어기 이외에 Lead-lag 제어기, Linear quadratic Regulator (LQR) 등 다양한 선형 제어 알고리즘이 연구되었다 [1]. 현대 제어 시스템은 다양한 형태와 복잡성을 갖추고 있으며, 이에 따라 선형 제어 알고리즘으로만으로는 충분히 대응하기 어려운 문제들이 존재한다. 특히, 비선형 시스템은 선형 시스템보다 더 복잡한 동적 특성을 갖추고 있어, 전통적인 제어 이론의 적용이 한계를 보이는 경우가 많기에 이를 극복하기 위해 다양한 비선형 제어 알고리즘이 설계가 되었다 [2-5].

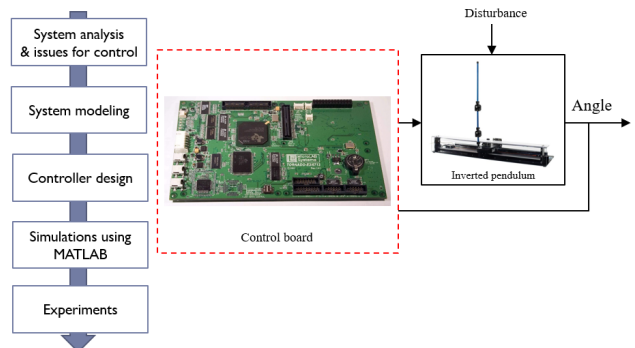
하지만, 산업체에서는 PID 제어기는 모델링 정보 없이 간단한 지식으로 제어기 튜닝이 가능하기에 여전히 PID 제어기 사용을 선호하고 있다. 하지만 위에서 언급한 것처럼 PID 제어기는 성능의 한계가 있는 알고리즘이며, 국내 산업체가 선진 업체와 경쟁을 위해서는 비선형 제어 알고리즘 등 모델 기반의 고급 제어 알고리즘 설계 적용이 필요한 상황이다. 본 고에서는 독자들의 모델 기반의 제어기 설계를 돕기 위하여 모델 기반의 제어기 설계에 대한 기본을 소개할 것이다.

2. 제어기 설계 과정

먼저 제어기 설계과정에 대해 설명을 하도록 한다. 그림 1에 역진자 시스템에 대한 알고리즘 설계 과정 예시를 보여 주고 있다. 제어기 설계를 위해서는 먼저 시스템의 특성을 분석을 해야한다. 예를 들면, 시스템을 제어하는데 외란이 발생하거나, 모델의 불확실성이 있어서 어려움이 있는지 확인을 해보아야 한다. 시스템을 제어하는데 어려움을 분석을 해야 그에 적합한 제어기 설계를 할 수 있다. 이 후 시스템에 대한 수학적 모델링을 구하고 이를 이용한 제어 알고리즘을 설계 한다. 그리고 설계된 제어 알고리즘을 MATLAB 등을 이용한 모의실험으로 성능을 검증하고, 최종적으로 실험적으로 검증을 한다. 본 고에서는 모델링 설계 후 제어기 설계시 어떻게 활용을 하는지에 대한 설명을 중점적으로 하고자 한다.



(a) 모델링 및 제어기를 모의실험으로 구현



(b) 설계된 알고리즘을 실험 환경을 이용하여 구현

그림 1 역진자 시스템의 제어기 설계 과정 예시

3. 모델 기반 제어기 설계

기본적으로 제어 알고리즘 설계는 주파수 영역과 시간 영역에서 설계를 하는데, 본 고에서는 시간 영역에서의 설계를 기반으로 설명을 할 예정이다. 제어기 설계 과정을 정리하면 다음과 같다.

1. 시스템의 모델링 설계 (시간 영역)
2. 추종 오차 정의
3. 추종 오차 동역학 설계
4. 추종 오차 동역학 및 목표 동역학 설계
5. 추종 오차 동역학이 목표 동역학이 되도록 제어 입력 설계

기본적으로 대부분의 시간 영역에서의 제어기 설계는 위와 같은 과정을 통하여 설계된다. 위 과정에 대하여 이해를 하면 쉽게 제어기 설계가 가능하다.

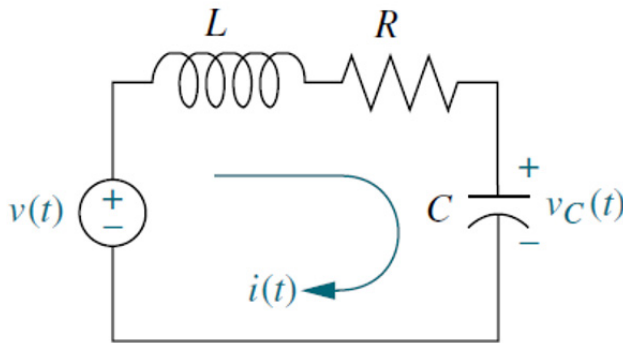


그림 2 RLC 회로

시스템을 모델링 하기 위해서는 시스템의 동특성이 반영된 미분 방정식을 이용해서 구해야 한다. 예를 들면 그림 2와 같은 RLC 회로는 전압식을 이용하면 다음과 같은 미분 방정식을 구할 수 있다.

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau = v(t) \quad (1)$$

제어 알고리즘을 설계하기 위한 모델링은 식 (1)과 같은 미분 방정식을 구한 후 유도 된다.

식(1)의 미분방정식을 구한 후 상태변수를 정의하면 시간 영역에서의 모델링인 상태공간식 (State-space equation)을 구할 수 있다 [7].

(1) 노멀폼의 모델링을 이용한 제어기 설계

상태 공간식은 상태변수를 어떻게 정의하는지에 따라 다양한 형태로 구할 수 있는데, 먼저 노멀폼 (Normal form)에 대한 제어기 설계에 대한 설명을 한다. 제어기 설계는 식 (3)의 미분방정식 상태에서 유도를 진행한다.

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 u \quad (2)$$

노멀폼은 제어를 하고자 하는 대상인 출력을 상태변수로 정의하고 이후 상태변수들을 다음과 같이 정의를 한다.

$$\begin{aligned} x_1 &= y \\ x_2 &= \frac{dy}{dt} \\ x_3 &= \frac{d^2 y}{dt^2} \quad \cdots \cdots \cdots (3) \\ &\vdots \\ x_n &= \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \end{aligned}$$

이후 상태공간식을 구하기 위하여 각 상태변수의 1차 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{dy}{dt} \\ \dot{x}_2 &= \frac{d^2 y}{dt^2} \\ \dot{x}_3 &= \frac{d^3 y}{dt^3} \quad \cdots \cdots \cdots (4) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= \frac{d^n y}{dt^n} \end{aligned}$$

그리고 x_n 의 미분은 식 (2)를 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_n = -a_0 x_1 - a_1 x_2 \cdots - a_{n-1} x_n + b_0 u \quad (5)$$

(4)와 (5)를 이용한 상태공간식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 & -a_5 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix}$$

지금부터 출력 $y = x_1$ 를 지령 r 추종을 위한 제어기를 설계한다. 먼저 추종 오차를 정의 한다.

$$e_1 = r - x_1 \quad (7)$$

나머지 추종오차 $e_2, \dots, e_n$ 를 정의 하는 방법은 제어 알고리즘에

따라 다양한다. 본 고에서는 추종 오차를 다음과 같이 정의 한다.

$$\begin{aligned} e_1 &= r - x_1 \\ &\vdots \\ e_n &= r^{(n-1)} - x_n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

그리고 (6)과 (8)을 이용한 추종 오차의 동역학을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{r} - \dot{x}_1 = e_2 \\ &\vdots \\ \dot{e}_n &= r^{(n)} - \dot{x}_n = r^{(n)} - a_1 x_1 - \dots - a_n x_n - bu \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

우리가 제어 알고리즘을 설계하는 목표는 추종오차가 0으로 수렴을 하기 위함이다. 즉 추종오차 동역학 (9)의 추종오차 e 가 0으로 수렴하도록 제어 입력을 설계해야 한다. 이를 위해서 먼저 추종오차 동역학의 목표 동역학을 정의해야한다. 목표 동역학은 제어알고리즘을 어떻게 설계하는지에 따라 다르게 정의할 수 있다. 본 고에서는 기본적인 선형제어기 설계를 설명하기에 목표 동역학을 다음과 같이 정의 한다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{e}_2 \\ &\vdots \\ \dot{e}_n &= -k_1 e_1 - \dots - k_n e_n \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

목표 동역학에서 제어 이득 $k_1, \dots, k_n$ 은 오차 동역학의 시스템 행렬의 A_e 고유행렬 실수 부분이 음수이면, 추종 오차는 0으로 수렴을 하게 된다.

원 추종 오차 동역학 (9)가 목표 동역학 (10)이 되기 위해서는 제어 입력을 다음과 같이 설계를 하면 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_n \end{bmatrix}$$

$$u = \frac{1}{b} \left(r^{(n)} - a_1 x_1 - a_2 x_2 - \dots - a_n x_n + k_1 e_1 + \dots + k_n e_n \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

(2) 일반 선형 시스템의 모델링을 이용한 제어기 설계

앞 절에서 설명한 제어 알고리즘은 설계하기에는 쉬우나, 노멀 폼에만 적용이 가능하다는 단점이 있다. 이번 절에서는 일반 선형 시스템에 대한 제어 알고리즘 설계를 소개한다.

선형 시스템의 일반 형태는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

출력 $y = Cx$ 를 지령 출력 $y_d = Cx_d$ 를 추종하는 제어 알고리즘 설계를 위하여 먼저 지령 상태 변수 x_d 의 동역학을 다음과 같이 정의 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= Ax_d + Bu_d \\ y_d &= Cx_d \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

(13)식은 출력 $y = Cx$ 를 지령 출력 $y_d = Cx_d$ 에 수렴시 이를 유지하는 동역학이며, $x = x_d$ 를 유지하기 위한 입력 u_d 를 지령 입력으로 정의한다. 즉 (13)식은 $x = x_d$ 의 정상상태 식이며 u_d 는 정상상태 시의 제어 입력이다. 추종오차 $e = x_d - x$ 를 정의하고 추종오차 동역학을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}_d - \dot{x} \\ &= Ax_d + Bu_d - Ax - Bu \\ &= Ae + Bu_d - Bu \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (14)$$

추종오차 동역학의 목표 동역학을 다음과 같이 정의 한다.

$$\dot{e} = (A - BK)e \quad \dots\dots\dots (15)$$

(14)식을 (15)로 만들어주기 위한 제어 입력은 다음과 같다.

$$u = u_d + Ke \quad \dots\dots\dots (16)$$

다시 돌아가서 제어 입력 (16)을 추종 오차 동역학 (14)에 인가

하면 (17)식의 과정을 통하여 추종 오차 동역학이 (15)로 유도 되는 것을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{e} &= Ae + Bu_d - B(u_d + Ke) \\ &= Ae + Bu_d - Bu_d - BKe \quad \dots\dots\dots (17) \\ &= (A - BK)e\end{aligned}$$

제어 이득 행렬 K 는 오차 동역학의 시스템 행렬 $A - BK$ 의 고유행렬 실수 부분이 음수가 되도록 설정한다.

본절에서 제시된 제어 알고리즘은 일반 선형 시스템에 적용을 할 수 있다는 장점이 있으나, x_d, u_d 를 직접 구해야 한다는 어려움이 있다. 다음 DC모터의 제어 알고리즘 설계를 예시로 x_d, u_d 를 구하는 방법을 알려주기로 한다.

DC모터의 동역학은 다음과 같다 [6].

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J}[-B\omega + Ki] \quad \dots\dots\dots (18) \\ \dot{i} &= \frac{1}{L}[-K_t\omega - Ri + v]\end{aligned}$$

식 (18)에서 ω 는 속도, i 는 전류, 그리고 v 는 전압 입력이다. 이제 속도가 지령속도 ω_d 를 추종하기 위한 제어 알고리즘을 설계한다. 본 고에서는 지령속도를 상수로 가정한다. 식 (18)로부터 지령 동역학을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_d &= \frac{1}{J}[-B\omega_d + Ki_d] \\ \dot{i}_d &= \frac{1}{L}[-K_t\omega_d - Ri_d + v_d] \quad \dots\dots\dots (19)\end{aligned}$$

위 식에서 i_d 는 지령 전류, 그리고 v_d 는 지령 전압 입력이다. ω_d 는 상수이기에 지령 속도의 미분은 0이다. 식 (19)를 이용하면 지령 전류와 지령 전압 입력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}i_d &= \frac{B\omega_d}{K} \\ v_d &= K_t\omega_d + Ri_d = K_t\omega_d + \frac{BR\omega_d}{K} \quad \dots\dots\dots (20)\end{aligned}$$

이제 지령 상태변수와 입력을 구하였으니, (15)-(17) 과정을 이용하면 제어 알고리즘 설계를 할 수 있게 된다.

모델 기반의 제어 알고리즘 설계 과정을 다시 정리하면 다음과 같다.

1. 추종 오차 정의
2. 추종 오차 동역학 설계
3. 추종 오차 동역학 및 목표 동역학 설계
4. 추종 오차 동역학이 목표 동역학이 되도록 제어 입력 설계

이 과정을 이해를 하면 비선형 제어 알고리즘 등의 제어기 설계를 하는데 많은 도움이 된다.

4. 결 론

본 고에서는 모델 기반의 제어 알고리즘 설계에 대한 기본 개념에 대한 설명을 하였다. 기존의 PID 제어기로 시스템의 제어 성능을 어느정도까지는 낼 수 있으나, 한계가 명확하다. 따라서 산업체에서도 모델 기반의 제어 알고리즘을 양산품에 적용을 하며, 제어 성능의 향상에 이바지 할 수 있기를 기대한다.

[참고문헌]

- [1] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback control of dynamic systems Upper Saddle River: Prentice hall, 2002.
- [2] G. Kim, S. You, S. Lee, D. Shin, and W. Kim, "Robust Nonlinear Torque Control Using Steering Wheel Torque Model for Electric Power Steering Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 7, pp. 9555-9560, 2023.
- [3] S. You, G. Kim, S. Lee, D. Shin, and W. Kim, "Neural Approximation-based Adaptive Control using Reinforced Gain for Steering Wheel Torque Tracking of Electric Power Steering System," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems,

vol. 53, no. 7, pp. 4216-4225, 2023.

- [4] J. Yim, S. You, Y. Lee, and W. Kim, "Chattering Attenuation Disturbance Observer for Sliding Mode Control: Application to Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 5, pp. 5161-5170, 2023.
- [5] K. Byeon, S. You, Y. Lee, S. Kim, D. Kang, J. Choi, and W. Kim, "Robust Arbitrary-Time Path-Tracking Control Using Reduced Order Kinematic Model for Unmanned Ground Vehicles," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, accepted.
- [6] S. You, J. H. Gil, and W. Kim, "Extended State Observer Based Robust Position Tracking Control for DC Motor with External Disturbance and System Uncertainties," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 14, no. 4, pp. 1637-1646, 2019.
- [7] N. S. Nise, Control systems engineering. John Wiley & Sons, 2020.

저자소개

김원희 (Wonhee Kim)

2003년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업
(공학사)

2005년 동 대학교 전자통신전파공학부 졸업
(공학석사)

2012년 동 대학교 전기공학과 졸업(공학박사)

2005년~2008년 삼성전자 선임연구원

2012년~2013년 효성중공업연구소 책임연구원

2014년~2016년 동아대학교 전기공학과 조교수

2016년~현재 중앙대학교 에너지시스템공학부 교수

현재 당 학회 평의원 및 D부문의 편집이사

주 연구분야 : 제어이론 및 응용





전력 계통 단선고장 검출을 위한 군집화 성능 지표 기반 준 지도학습 알고리즘

Semi-Supervised Learning Based on Clustering Performance Index for Open Power Conductor Fault Detection

이영우 교수 | 한양대학교 ERICA 전자공학부

Youngwoo Lee | Hanyang University ERICA, Division of Electrical Engineering



요 약

본 고에서는 준 지도학습 방법론인 셀프 트레이닝 기법을 응용한 던 인덱스 기반 가중 투표 방식을 제시하였다. 모의 계통을 시뮬레이션 환경에서 설계했고, 모의 계통에서 수집된 데이터를 통해 제안된 방법의 효과를 검증하였다.

Abstract

This study proposed a weighted voting method based on the Dunn index, applying the self-training technique, a semi-supervised learning methodology. A simulation environment was designed for the test power grid, and the effectiveness of the proposed method was validated using data collected from the test grid.

1. 서 론

전력계통에서 안전하고, 안정적인 품질의 전력을 공급하는 것은 중요하다. 그러나 계통에서는 다양한 이유로 고장이 발생하며 이는 전력 품질의 저하, 높은 크기의 사고 전류와 전압으로 인한 인명 피해로 이어질 우려가 있다[1]. 그러나 계통에서 고장을 판별하는 일은 다양한 원인, 수용가 부하 혹은 분산 전원 연결 양상 같은 이유로 어렵다. 이러한 문제점을 해결하고자 다양한 방법들이 제안되었다. 먼저 계통 내의 고장을 진단하기 위해 전류나 전압정보를 사용하는 기법이 제시되었다. 특히 전류와 전압의 위상차 정보 또는 역상분, 영상분 정보를 통해 검출하는 방법이 있으나 이러한 기법으로는 단선과 다른 이벤트를 구분하기 힘들다는

단점이 있다[2~4]. 최근에는 Phasor Measurement Unit (PMU)가 고해상도의 데이터를 수집 할 수 있음에 따라 SVM, 인공신경망 등의 인공지능 기반 단선 검출 기법들이 제시되었다 [5~7]. 제안된 인공지능 기반 기법들은 각 데이터의 라벨의 정확도가 높다는 전제하에 적용이 가능하다는 한계를 가지고 있다. 하지만 전력계통에서 수집된 데이터에 라벨을 부여하는 일은 전문 인력이 필요하고 많은 시간 및 노력을 필요로 때문에 지도학습 알고리즘을 이용한 계통의 고장 분석은 현실적으로 쉽지 않다.

따라서 본 고에서는 통신 장애 등의 이유로 라벨이 없는 데이터가 많은 문제를 해결하기 위해 새로운 준 지도학습 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 계통 고장 특성 추출을 위한 Dunn

index 기반 데이터 추출기법과 데이터가 존재하지 않는 라벨의 Pseudo 라벨을 위한 Dunn index 기반 Weighted voting 기법으로 구성된다.

먼저 MATLAB/Simulink 기반 계통 시뮬레이션을 통해 수집된 단선 및 비단선 데이터를 이용하여 Training data set을 구성하고 Dunn index를 기반으로 Effective feature를 가진 데이터 세트를 선별한다. Weighted voting 단계에서는 분류기의 가중 투표 방식에 사용되는 가중치를 Dunn index 기반으로 설정하여 Pseudo 라벨을 부여한다. Dunn index는 각 분류기가 예측에 미치는 영향을 조절한다.

해당 알고리즘의 성능을 검증하기 위해서 Pseudo 라벨을 부여하는 단계에서 Dunn index 기반으로 계산된 voting 방식과 Soft voting 방식을 비교하였다. 그리고 데이터 세트를 추출하는 과정에서 Dunn index 기반으로 분류기 학습을 위한 데이터를 선별했을 때와 무작위로 학습 데이터를 추출한 방식 사이의 학습

결과를 비교하였다.

2. 모의 계통 데이터 수집

준 지도학습을 이용하여 계통의 단선 판별을 수행하기 위해 다음 그림 1과 같은 모의 계통을 MATLAB/Simulink에서 구성하고 데이터를 수집하였다.

해당 모의 계통은 피더 3개로 구성되어 있으며, 피더 별로 다른 특징을 가지고 있다. 피더 1과 피더 3번은 태양광 발전기와 고압 수용가가 연결되어있다. 그리고 피더 2번은 오직 부하만 연결되어있다. 모의 계통에서 각 피더에서 수집하는 데이터 수는 다음과 같다. 1번 피더에서 데이터를 측정하는 계측점은 14개, 고장점은 5개, 그리고 고장 클래스가 10개이므로 700개의 데이터가 수집된다. 피더 2번은 계측점 8개, 고장점 2개이므로 160개, 피더 3번은 계측점 8개, 고장점 3개로 240개를 수집된다, 따라서 모의 계통으로부터 총 1100개의 자료를 수집하였다.

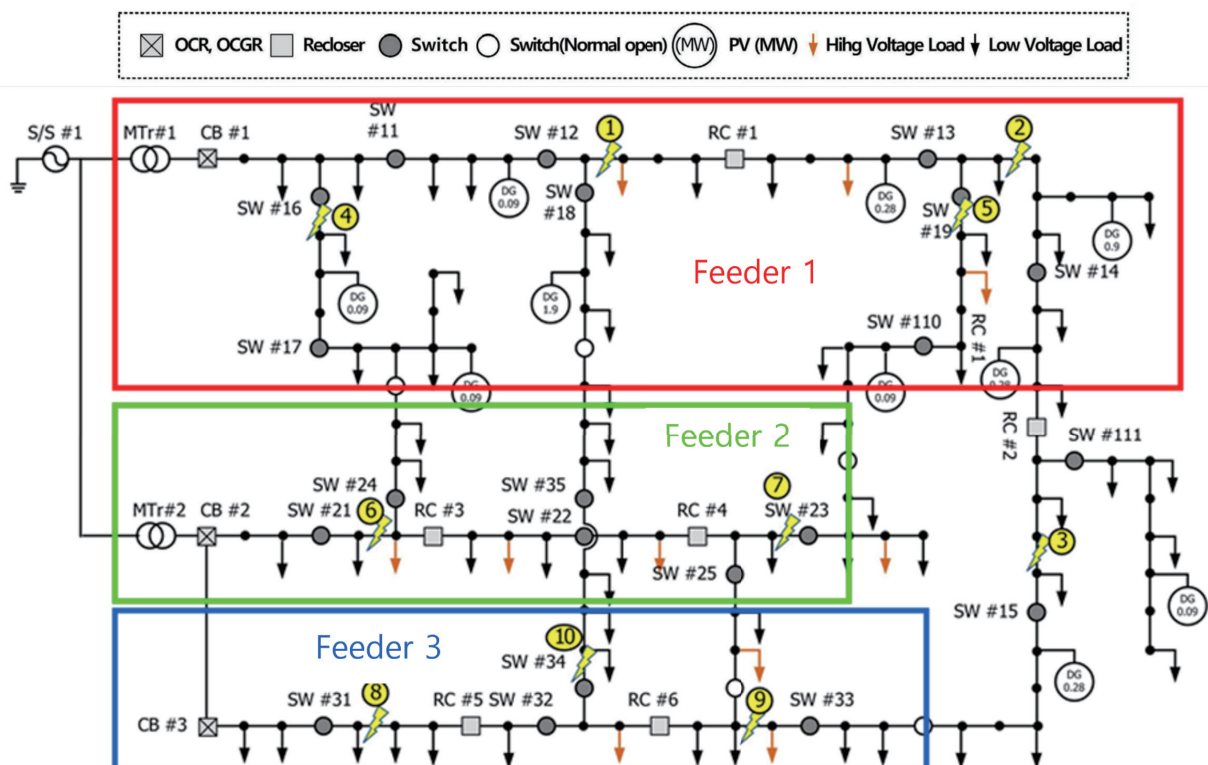


그림 1 데이터 수집을 위한 모의 계통 시뮬레이션

3. 던 인덱스 기반 임시 라벨링 기법

3.1 학습 데이터 세트 추출

전력 시스템이 가지고 있는 다양한 측정 정보 중 고장과 관련이 높은 정보를 선별하여 분류기를 학습하는 것이 중요하다. 이를 위해서 계통이 가지고 있는 독립 변수들(전류, 전압 위상차 등)을 적절히 조합한 학습 데이터 세트가 필요하다. 적절한 데이터 세트를 선별하기 위해서 비 지도학습에서 사용되는 군집화 알고리즘과 그리고 군집화 결과를 평가하는 지표로 사용되는 “던 인덱스(Dunn index)”를 사용한다. 우선 k 개의 독립 변수로 구성된 집합에서 n 개를 선택해 구할 수 있는 총 조합의 수는 다음과 같다.

$$C = {}_k C_n = \frac{k!}{(k-n)!n!} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 C 는 k 개의 독립 변수로 구성할 수 있는 총 데이터 세트의 개수이다. 따라서 생성된 데이터 세트를 비지도 학습의 일종인 K-means 알고리즘으로 군집화를 실시한 후에 군집화된 결과를 던 인덱스로 평가한다. C 개 만큼 생성된 데이터 세트의 던 인덱스를 평가하는 식은 다음과 같다.

$$DI_i = \frac{\delta(c_0, c_1)}{\max_{k \in \{0,1\}} \Delta_k} \dots\dots\dots (2)$$

DI_i 는 i 번째 데이터 세트의 던 인덱스 값을 나타내며 c_0, c_1 는 데이터 세트를 두 개의 군집으로 구별했을 때 각 군집에 해당하는 중심점이다. δ 는 두 점 사이의 거리를 나타내며, Δ_k 는 k 번째 군집의 내부 점 간의 평균 거리를 의미한다. 클러스터 간의 거리

가 크고 클러스터의 내부의 있는 점이 모여있을수록 던 인덱스 값이 커지게 된다. 개의 데이터 세트를 던 인덱스 값을 구한 뒤 가장 큰 값을 가지는 데이터 세트를 k 개 만큼 수집한다. 그리고 각각의 데이터 세트를 학습시킬 k 개의 분류기를 생성하고 학습시킨다.

3.2 가중 투표를 사용한 임시 라벨링 부여

앞 절에서 구한 k 개의 데이터 세트와 일대일 대응하는 신경망(분류기)을 생성하고 학습시킨다. k 개의 분류기는 라벨이 없는 데이터를 임시로 분류한다. 라벨이 없는 데이터의 개수를 u 개라고 할 때, k 개의 분류기가 라벨이 없는 데이터에 대한 임시 라벨을 부여한다. 예측된 데이터 표본을 행렬로 표현하면 다음과 같다.

$$YP = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{i1} & \dots & y_{k1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{1u} & \dots & y_{iu} & \dots & y_{ku} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

y_{ij} 는 라벨이 없는 데이터 세트에서 i 번째에 해당하는 포인트를 j 번째 분류기를 통해 클래스를 예측한 결과이다. k 개의 분류기는 라벨이 없는 데이터 전체에 대하여 클래스를 구별하기 때문에 각각의 분류기는 u 개 만큼 예측 결과를 도출한다. 이를 하나의 행렬에 표현한 것을 YP 라 정의하고, $YP \in R^{u \times k}$ 이다.

또한, 라벨이 없는 데이터의 임시 라벨을 부여하기 위해서 k 개의 분류기의 예측 결과의 가중 합을 임시 라벨로 부여하는데 이때의 가중치는 던 인덱스를 기반으로 계산된다. k 개의 가중치를 벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_k]^T$$

$$w_i = \frac{e^{DI_i}}{\sum_{n=1}^k e^{DI_n}} \dots\dots\dots (4)$$

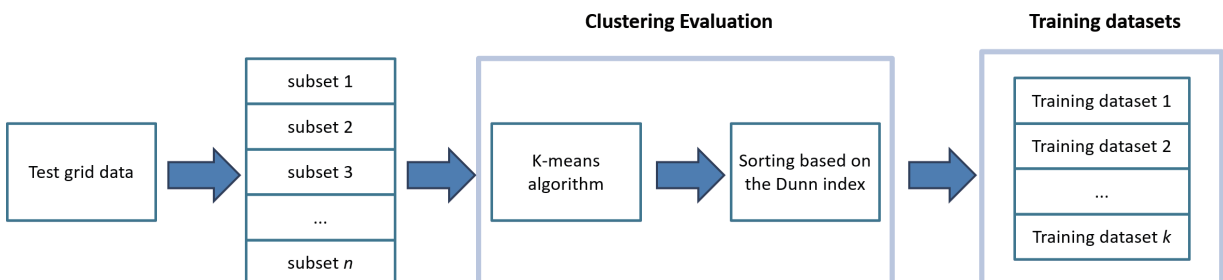


그림 2 분류기 학습을 위한 k 개의 데이터 세트 선별 과정

$W \in R^k$ 는 가중치 w 로 이루어진 벡터이다. w_i 는 i 번째 분류기의 예측값에 곱해지는 가중치 값이다. 총 분류기의 개수가 k 개다. 라벨이 없는 데이터 표본 하나의 임시 라벨은 k 개의 분류기의 예측값에 가중치를 곱한 결과와 같다. 최종적으로 총 u 개의 라벨이 없는 데이터 포인트들은 다음과 같다.

$$PL = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{i1} & \cdots & y_{k1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{1u} & \cdots & y_{iu} & \cdots & y_{ku} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_i \\ \vdots \\ w_k \end{bmatrix} = YPW \quad \dots\dots\dots (5)$$

$PL \in R^u$, PL 은 라벨이 없는 데이터 u 개에 대하여 임시로 라벨을 부여한 결과이다.

3.3 학습 데이터 업데이트

앞 절에서 구한 임시 라벨을 활용하여 학습 데이터를 업데이트한다. 그림 3는 학습 데이터를 업데이트하는 과정을 설명한 그림이다.

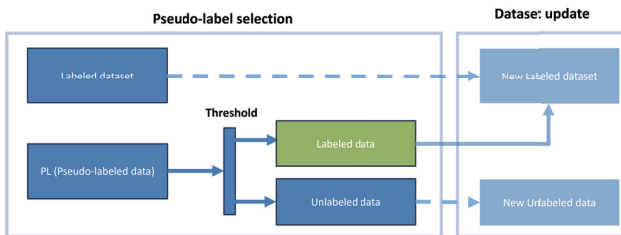


그림 3 분류기 학습을 위한 k개의 데이터 세트 선별 과정

학습 데이터 업데이트에 사용되는 임시 라벨 PL 의 원소들은 특정 임계값을 기준으로 분류된다. 임계값을 넘은 원소들은 새로운 학습 데이터로 사용되고, 임계값을 넘지 못한 원소들은 라벨이 없는 상태로 다시 남게 된다. 앞 절(3.1, 3.2, 3.3)에서 설명한 단계들을 새롭게 갱신된 학습 데이터 세트에서 다시 반복한다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 데이터의 독립 변수의 개수를 3개, 분류기를 3개, 학습 데이터 업데이트에 사용되는 임계값을 0.75로 설정하여 정확도를 출력한 그래프이다. 라벨이 있는 데이터를 50개씩

점진적으로 늘려가며 정확도를 확인하였다.

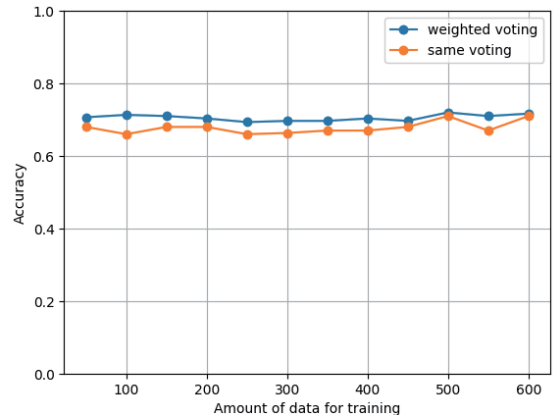


그림 4 Dunn index 기반 Weighted voting 방식과 Soft voting의 정확도 비교 결과

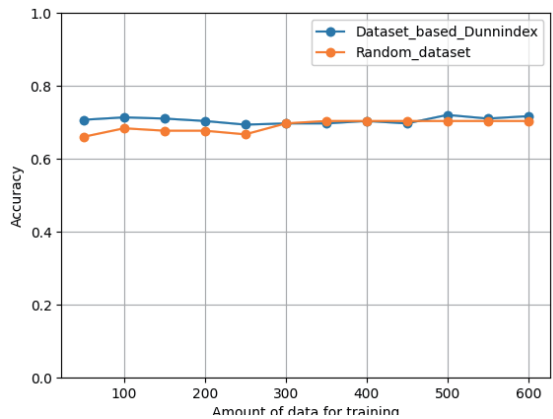


그림 5 제안된 데이터 세트 추출 방법과 무작위 데이터 세트 추출 비교 결과

그림 4는 제안된 Dunn index 기반 weighted voting 방식을 Soft voting과 비교한 그래프다. 학습 데이터의 개수와 무관하게 제안된 방식이 Soft voting 방식에 비해 높은 정확도를 갖는다. 그림 5는 분류기의 학습을 위한 데이터를 제안된 방식인 Dunn index 기반으로 평가한 데이터 세트를 사용하는 것과 무작위로 추출된 데이터 세트를 사용해 분류기를 학습한 결과를 나타내는데 학습 데이터 세트의 크기가 300개 이하인 구간에서 제안된 방식이 비교군에 비해 높은 정확도를 갖는 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 고에서는 라벨이 있는 데이터가 부족한 계통에서 라벨이

없는 데이터를 활용하여 단선을 판단하기 위해 던 인덱스를 기반으로 한 준 지도학습 방법이 제안되었다. 해당 방법은 세 가지의 과정으로 분류된다. 던 인덱스를 통해 데이터 세트를 평가하고, 여러 개의 분류기의 결과를 가중 투표 방식을 통해 도출하고, 특정 임계값을 넘은 데이터를 새로운 학습 데이터 세트에 업데이트 하는 단계로 구성되어 있다. 제안된 방법에서 Dunn index 기반으로 설계된 가중 투표 방식이 기존의 Soft voting에 비해 미세하게 더 나은 성능을 보여주는 것을 확인했다. 그러나 제안된 준 지도학습 방법은 분류기의 개수와 학습 데이터 세트를 추출하는데 사용되는 독립 변수의 개수가 학습 결과에 영향을 끼치므로, 데이터가 수집되는 계통의 사정에 맞춰 독립 변수의 개수나 데이터 세트의 개수 조절이 필요하다.

[참고문헌]

- [1] O. Samuelsson, M. Hemmingsson, A. H. Nielsen, K. O. H. Pedersen, and J. Rasmussen, "Monitoring of power system events at transmission and distribution level," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp. 1007-1008, May. 2006.
- [2] F. Gao, J. S. Thorp, S. Gao, A. Pal, and K. A. Vance, "A voltage phasor based fault-classification method for phasor measurement unit only state estimator output," Electric Power Components and Systems, vol. 43, no. 1, pp. 22-31, 2015. workshops. 2012.
- [3] A. Rahmati and R. Adhami, "A fault detection and classification technique based on sequential components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 6, pp. 4202-4209, Dec. 2014.
- [4] J. S. Hong, S. Y. Hyun, Y. W. Lee, J. H. Choi, S. J. Ahn and S. Y. Yun, "Detection of Open Conductor Fault Using Multiple Measurement Factors of Feeder RTUs in Power Distribution Networks With DGs," IEEE Access, vol. 9, pp. 143564-143579, 2021,
- [5] N. Shahid, S. A. Aleem, I. H. Naqvi, and N. Zaffar, "Support vector machine based fault detection & classification in smart grids." 2012 IEEE Globecom
- [6] M. Tarafdar Hagh, K. Razi and H. Taghizadeh, "Fault classification and location of power transmission lines using artificial neural network," 2007 International Power Engineering Conference, pp. 1109-1114, 2007.
- [7] M. F. Guo, N. C. Yang and W. F. Chen, "Deep-Learning-Based Fault Classification Using Hilbert-Huang Transform and Convolutional Neural Network in Power Distribution Systems," IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 16, pp. 6905-6913, AUG. 2019.

저자소개

이영우(Youngwoo Lee)

2017년 한양대학교 전기공학과 졸업
(공학박사)

2017년~2018년 University of California,
Berkeley 기계공학과
박사후연구원

2018년~2019년 삼성전자 메모리 사업부
스텝 엔지니어

2020년~2023년 전남대학교 전기공학과 부교수
2023년~현재 한양대학교 Erica 전자공학부 부교수
주 연구분야 : 비선형 제어, 최적제어, 모터 제어 등



학회 소식

2024년도 제3차 이사회

일 시 2024년 3월 8일(금) 16:30-18:10

장 소 전기학회 회의실

참석자 이병준, 이준호, 문승일, 김석주, 차준민, 홍선기, 김용상, 김경호, 손진근, 노대석, 신윤용, 최효진, 송화창, 최홍석, 이정호, 허 돈, 안길영, 차한주, 허 진, 남순열, 정호성, 주성관, 배성우, 오현진, 우정욱, 최승연, 김정주, 한경희, 정상용, 박재성, 장길수, 신정훈, 김정수, 박정욱, (감사) 장용무

(이상 35명)

주요 회의 내용

1. 신입회원 승인 : 원안대로 승인 함
 - 총 22명 [정회원 8명, 준회원(석사) 2명, 준회원(학부) 8명, 다수년 3명, 종신 1명]
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 승인 함.
2. 지회 경비 보조 관련 규칙 개정(안)
 - 총무이사 및 회원교육이사로부터 지회 학술활동 활성화 위한 제안 설명을 듣고 찬반 여부를 진행한 결과, 출석 임원 과반수 이상의 찬성으로 원안 승인함. 또한, 지회 예산에 대한 집행 결산 보고를 철저히 보고 받기로 함.
3. 기획정책위원회 규정 개정(안) / 위원회(전문위원회) 설치 규정의 제목 변경(안) / 연구조사위원회 규정 개정(안) / 전기역사 전문위원회 규정 개정(안)
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 승인함.
4. 전문위원회 신설 및 폐지에 관한 규정 제정(안)
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 승인함.
5. 2024년 전기역사위원회 위원 인준
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 원안대로 인준함.
6. 전임회장 호칭 변경(안)
 - 총무이사로부터 제안 설명을 듣고 논의 결과 부결함.
7. IEEE-PES award 제정을 위한 준비 진행 현황
 - 국제이사로부터 제안 설명을 듣고 IEEE-PES 측과 추가 연락 진행한 결과를 토대로 차기 이사회에 심의 안건으로 상정하기로 함. 또한 이와 별개로 IEEE 본부와 전기학회와의 MOU 체결을 국제위원회에서 추진하기로 함.



학회 소식

회원님의 원고를 기다립니다.

우리 학회 잡지인 「전기의 세계」는 회원 모두가 만들어가는 잡지입니다.

원칙적으로 회원 누구나 자유롭게 기고할 수 있는 열린 저자 체제로 운영하고 있습니다.

다만 원고 모집의 어려움으로 담당 편집위원을 연간 계획과 같이 지정하여 원고를 모으고 있을 뿐입니다.

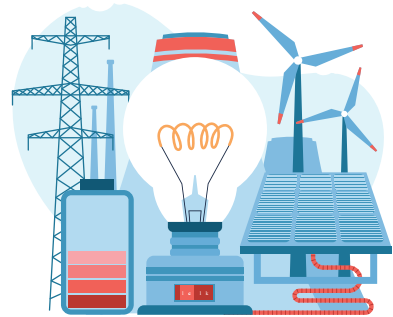
특히, 다음 칼럼에 대한 원고를 널리 모집하며 채택된 원고는 소정의 원고료도 드리고 있습니다.

회원소리 : 전기계, 전기학회에 대한 제언이나 느낀 점을 포함한 임의 내용으로 분량은 A4기준 4면 내외입니다.

회원/회원사 동정 : 회원이나 회원사의 동정을 공지하는 난이므로 동정이나 새소식을 보내주세요.

건강/취미 이야기 : 건강이나 취미에 관련된 내용으로 분량은 A4기준 3면 내외입니다.

- 문의처 대한전기학회 사무국 전필준
- 전 화 02-553-0157
- E-mail jun@kiee.or.kr



학 회 일 지

2024.2.19. ~ 2024.3.19

2.19(월)

2차 소통위원회 (학회 회의실)

2.20(화)

2차 전기공학교육위원회 (온라인회의)

2.21(수)

2차 기술협의회 (온라인회의)

2.22(목)

2차 학술위원회 (학회 회의실)

2.23(금)

A부문회 2차 이사회 (학회 회의실)

1차 연구조사위원회 (온라인회의)

2.27(화)

2차 국문지 편집위원회 (온라인회의)

3.1(금)

회지 「전기의 세계」 73권 3호(3월호) 발간
 전기학회 국문논문지 73권 3호(3월호) 발간
 전기학회 영문논문지 19권 3호(3월호) 발간

3.7(목)

KIEE CEO클럽 TF회의 (학회 회의실)

3.8(금)

본부 3차 이사회 (학회 회의실)
 3차 기획정책위원회 (학회 회의실)

3.11(월)

2차 영문논문지 편집위원회 (온라인회의)

3.15(금)

E부문회 2차 이사회 (학회 회의실)

편집위원

허 진(편집위원장 인천대학교)

강창목(인천대학교)

박형준(한국전자통신연구원)

이일무(한국전기기술인협회)

이기덕(부위원장 한국전기기술연구원)

강현일(한밭대학교)

오은성(한서대학교)

임동국(울산대학교)

조수연(부위원장 한국자동차연구원)

노종석(중앙대학교)

유경상(한국에너지기술연구원)

조춘남(한국폴리텍대학)

강동원(중앙대학교)

민찬식(한국폴리텍대학)

이상봉(영남대학교)



구독 안내

회원 가입 안내

☞ 회원의 구분 및 자격

구분	자격
정회원	① 4년제 대학교를 이수한 분 (박사과정 포함) ② 2~3년제 대학 졸업한 후 실무 경력 2년 이상인 분 ③ 고교 졸업 후 실무경력 4년 이상인 분 또는 전기공학 분야의 학술 및 응용에 관하여 상당한 경력이 있는 분
준회원(석사)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학원 전일제 석사과정 재학 중인 분
준회원(학부)	전기공학(학과 또는 관련 분야)을 전공하는 대학교 학부생으로 재학 중인 분

☞ 입회비 및 연회비

입회비 및 연회비

구분	입회비	연회비	합계
정회원	15,000원	70,000원	85,000원
준회원(석사)	10,000원	40,000원	50,000원
준회원(학부)	면제	10,000원	10,000원

다수년 회원 및 종신 회원 : 정회원으로써 다수년 회비 또는 종신회비 납부를 희망하는 분

구분	입회비	3년	5년	7년	합계
다수년 회원	15,000원	140,000원	210,000원	350,000원	3년 : 155,000원 5년 : 225,000원 7년 : 365,000원
종신 회원		1,050,000원 [15년분 연회비]			1,065,000원

회원의 혜택

1. 학회지 "전기의 세계" PDF 파일 매달 이용 제공
2. 전자도서관 : 전기학회 국문논문지(통합권), 전기학회 논문지 P권, 영문논문지 2종 (JEET, IJCAS), 학술대회 논문 등 열람 권한 부여
3. 학회 및 유관 기관의 각종 행사 및 주요 소식 등 정보 제공
4. 하계학술대회 및 부문회 춘·추계 학술발표대회와 각종 학술행사에 참가 및 발표기회 부여
5. 대한전기학회 교육원 교육강좌 수강시 회원 자격 부여
6. 전기공학 및 기술발전에 업적이 있는 회원에게 학회상 수여 : 공로상, 학술상, 논문상, 기술상, 표창 등
7. 회원의 학술활동(논문 및 원고)을 학회 발간물에 게재(심사완료 이후) 및 다른 회원에게 홍보할 기회 부여
8. 국내외 학술활동에 관한 정보제공
9. 일정한 자격을 갖춘 회원의 경우 대한전기학회 시니어 회원, 대한전기학회 펠로우(석학)회원 신청자격 부여

회원 가입 절차 및 회비 납부

1. 회원 가입 절차
 - ① 대한전기학회 홈페이지에서 온라인 가입 (<https://www.kiee.or.kr>) → ② 입회비와 연회비 납부 → ③ 이사회에서 신규 회원 승인 → ④ 회원 활동
2. 회비 납부 방법 및 문의처

홈페이지 로그인 후 마이페이지에서 입회비 및 연회비 확인 후 결제방법 (카드 또는 무통장) 선택하여 결제 가능

 - ① 카드선택 : 전자결제 등록된 모든 신용카드는 사용가능
 - ② 무통장(온라인 입금) 선택
계좌번호 : 수협은행 1010-2175-5210 / 국민은행 349401-04-009338
예금주 : 대한전기학회
 - ③ 담당 및 문의처 : 경영지원팀 서영은 팀원, 02-553-0155, account@kiee.or.kr



정확한 설계 완벽한 감리

JH 지화기술단

주식회사
J E E H W A

전 기

전기설계(전문 1종)
전기종합감리
전기안전점검

정보통신

정보통신설계
정보통신종합감리

소 방

소방설계
소방시설물감리

친환경연구

전략기술연구개발
친환경관리방안연구





How to light up the world? Ask HYOSUNG

세상에 힘이 되는 전력기술로 온 세상을 밝히고 있습니다.

효성중공업은 전 세계를 무대로 다양한 에너지 분야에서 고품질의 제품과 서비스를 통해 고객 여러분을 만나고 있습니다. 변압기, 차단기 등 최고 품질의 전력설비와 HVDC, STATCOM, ESS 등 스마트 그리드 솔루션을 통해 전력 전송 기술의 첨단화를 이끌고 있습니다. 고효율 전동기, 풍력용 발전기와 같은 친환경 신재생 에너지의 발전시스템을 제공하여 녹색기술 분야를 이끌어 나가고 있습니다.

'Global No. 1'을 모토로 글로벌 환경과 미래까지 생각하는 효성중공업은 끊임없는 도전과 혁신을 통해 글로벌 시장을 이끌어 나가고 있습니다.

HYOSUNG HEAVY INDUSTRIES

(04144) 서울특별시 마포구 마포대로 119 (공덕동) www.hyosungheavyindustries.com