

E-Highway를 위한 팬터그래프의 가공선 위치정보 취득에 관한 연구

A Study on Acquisition of Overhead Line Location Information of Pantograph for E-Highway

송광철¹, 안준재², 레동부³, 박성미⁴, 박성준^{5*}

Gwang-Cheol Song¹, Jun-Jae An², Tuan-Vu Le³, Seong-Mi Park⁴, Sung-Jun Park^{5*}

〈Abstract〉

As environmental regulations on carbon emissions are strengthened worldwide, the existing internal combustion engine-centered automobile industry is being reformed. In particular, large buses and large cargo trucks are pointed out as one of the main causes of environmental destruction due to excessive carbon emissions. The E-Highway power collection system, which has recently been proposed as a solution, uses the vehicle's battery as a backup power source or regenerative braking, depending on whether the pan head of the pentograph installed in the vehicle is in contact with the overhead line. It is used to store the excess energy generated. However, wear through contact due to continuous contact reduces the current collection effect and causes failure. In this paper, by using the current difference, the horizontal position information of the panhead in contact with the overhead line is acquired, thereby reducing the abrasion of the conductor and the panhead. Make it possible to follow the overhead line. The position estimation method proposed in this paper simply configures a device that can detect the position of the overhead line of the pantograph

1 주저자, (주)엘탑

E-mail: captain@ltop.kr

2 참여저자, 전남대학교 전기공학과, 석사과정

E-mail: canjunjae@naver.com

3 참여저자, (주)지엔이피에스, 책임연구원

E-mail: tvle@epskorea.kr

4 참여저자, 한국승강기대학교 승강기공학부, 교수

E-mail: seongmi@klc.ac.kr

5* 교신저자, 전남대학교 전기공학과, 교수

E-mail: sjpark1@jnu.ac.kr

1 Main Author, LTOP co., Ltd, CEO

2 Co-author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Master Course

3 Co-author, G&EPS, Responsible researcher

4 Co-author, Dept. of Lift Engineering, Korea Lift College, Professor

5* Corresponding, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Professor

by the difference in resistance. It is economical and has the advantage of reducing the volume. The characteristics of the pantograph estimating the location of overhead lines were analyzed using the difference between the two currents of the current collector, the feasibility of the positioning estimation system was verified through simulations and experiments.

Keywords : E-Highway, Pantograph, Current Collector, Current Difference, Carbon Emissions

1. 서론

전 세계적으로 기후 변화와 환경 문제에 대한 인식이 증가하면서, 다양한 친환경 정책이 시행되고 있다. 이러한 친환경 정책의 주요 목표 중 하나는 탄소배출 저감이며, 많은 나라들이 2050년까지 탄소 중립을 목표로, 다양한 연구들이 개발되고 있다. 국내 한국 정부 또한 세계적 추세에 발맞추어 2050년까지 탄소 중립을 달성하겠다는 목표를 설정하고 친환경 정책을 강화하고 있다[1][2].

이러한 친환경 정책 중 대형 버스와 대형 화물 트럭은 과도한 탄소배출로 환경 파괴의 주요 원인 중 하나로 지목되었으며, 이에 서울시는 2050년까지 모든 내연기관차 운행 제한 계획을 발표하였

다. 이와 같은 운행 제한 정책과 함께, 전기 버스와 전기 화물 트럭 등의 대체 수단에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대형 전기차는 충전시간 및 충전 인프라의 부족 등 다양한 문제를 야기하고 있으며, 이러한 문제점들을 극복하기 위해 제시된 해결책 중 하나가 E-Highway 시스템이다[3][4].

E-Highway 시스템은 기존 전기기관차에서 쓰이는 전력공급 방법을 사용하여 도로에 설치된 전력공급 시설과 차에 부착된 팬터그래프(Pantograph)를 적용함으로써, 전기차는 주행 중에도 충전 및 모터 구동을 원활하게 하는 새로운 교통 시스템이다[5][6]. 이러한 방식은 장거리 주행이나 경사진 곳을 주행할 때 디젤 엔진의 사용을 줄이는 장점을 가진다. 또한 이동하면서 충전하는 팬터그래프의 차충전시스템에서 전력집진을 위한 팬터그래프는 핵심요소이다. 150 [km/hour] 이상의 속력을 갖는 전기기관차에 설치되는 팬터그래프는 초기에는 더블암이 주로 사용되었으나, 무게 문제로 인하여 현재는 대부분은 싱글암 방식으로 사용한다. 하지만 전기기관차와 다른 특성을 갖는 전기차의 경우 150 [km/hour] 이하로 운행하게 된다. 따라서 전기차에서는 주변환경에 따라 싱글암 혹은 더블암 방식을 채택할 수 있다. 전기기관차의 경우 팬터그래프와 전동바퀴를 통하여 전력을 기관차 내의 모터로 전달되나, 전기차의 경우에는 차량 내 배터리 또

(단위 : 백만톤CO₂eq)

구 분	배 출 량	총배출량 대비 비율
공공 전기 및 열생산	222.2	32.7%
철 강	97.2	14.3%
화 학	53.0	7.8%
수 송	97.9	14.4%
상업 / 공공	12.2	1.8%
가 정	31.9	4.7%
그 외 에너지	76.1	11.2%
산업공정	51.0	7.5%
농 업	21.1	3.1%
폐 기 물	17.0	2.5%
총 계	679.6	100.0

(출처: 2022년 환경부 보도자료)

Fig. 1 Percentage of greenhouse gas emissions (2022)

는 모터로 충전하기 위해서는 전기기관차의 경우와 달리 두 개의 가공선이 설치되고 팬헤드(Panhead)도 두 개로 나누어서 설치된다[7][8].

전기기관차의 경우 정해진 선로 궤적을 통하여 운행됨으로 가공선 설치구조에 의해 가공선과 팬터그래프의 접촉이 이루어진다. 팬헤드의 특정 구간에만 마모가 일어나는 현상을 방지하기 위해 가공선 케이블을 지그재그 패턴 방식으로 설치한다. 이 방식은 팬헤드가 전체 길이에 걸쳐 미끄러지도록 배열하여 헤드의 마모 속도가 크게 감소하도록 한다. 이를 통해 헤드의 고장 발생률을 낮추고 수명연장의 효과를 기대할 수 있다. E-Highway의 경우 정해진 선로 궤적으로 운행되지 않기 때문에 운전자에 운행궤적에 따라 가공선과 팬터그래프의 접촉이 이루어진다. 이 경우 운전자의 운행능력 여하에 따라 전기집진 특성과 팬터그래프의 헤드마모 특성이 결정되는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 팬헤드와 가공선 케이블간의 위치정보를 검출할 수 있는 새로운 위치추정방식을 제안한다. 제안된 방식은 팬터그래프의 두암의 정규화된 전류차에 의한 위치추정방식이다. 또한 팬터그래프와 가공선의 채터링에 의한 위치 오차를

방지하기 위해 팬터그래프 특성에 맞는 LPF (Low-Pass Filter)를 설계하였다. 제안된 방식의 의한 추정된 위치는 E-Highway의 운전시스템에 제공하여 팬터그래프의 강인한 전기집진 특성을 유지할 수 있다.

2. 본 론

2.1 자동차 충전특성 방식

수소연료 전지전기 자동차(FCEV : Fuel Cell Electric Vehicle) 구성은 연료전지, 배터리, 파워트레인이며, 연료전지에서 수소를 통해 생산된 전기는 파워트레인을 통해 자동차 운행 및 배터리에 충전한다. 이러한 방식의 경우 전기 생산 및 변환과정에서 화학적 반응으로 인해 부식을 유발하며, 이를 방지 및 유지하기 위해 높은 비용이 소요된다는 단점이 있다. 또한 수소전기차는 일반적으로 순수 수소전기차로 구성되어 장거리 이송에는 적합하나, 하이브리드 타입으로 구성이 매우 어려운 단점이 있다.

전기자동차 충전용인 무선전력전송시스템(WPT : Wireless Power Transmission)은 전기에너지를 전자기파의 형태로 변환하여 운행 중에 물리적 접촉 없이 충전하는 방식이다. 이러한 방식은 배터리의 용량을 줄일 수 있으며 차량의 주행거리를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 인프라 설치 비용이 매우 높으며, 주행 중 송수신부의 코일의 정렬 상태가 불량하거나 송 수신부의 거리 차이로 생기는 효율 변동이 크다는 단점이 있다.

E-Highway 팬터그래프 방식의 경우 전력 전송 속도가 빠르며, 에너지 손실이 상대적으로 적고 기술의 신뢰성이 매우 높다는 장점이 있다. 그러나 구조물로 인해 매우 큰 부피를 차지하며, 차량의 전고와 가공선의 간격 차이로 인하여 대형차량만

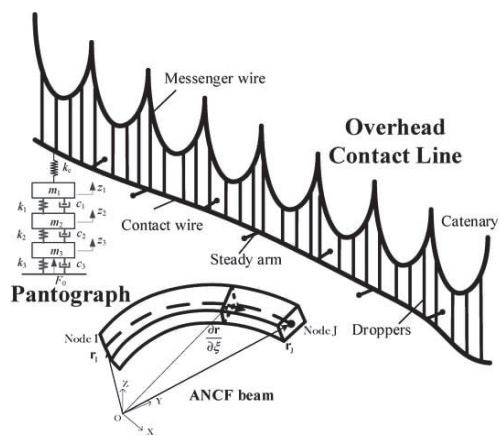


Fig. 2 Overhead line of pantograph

설치가 가능하다는 단점이 있다. 그러나 대형차량은 경사가 높은 고속도로 주행 시 유해가스 및 탄소배출이 급격히 증가한다. 따라서 고속도로에서는 대형차의 이러한 문제점 해결이 매우 시급하다.

세 방식 모두 현재 비싼 배터리의 크기를 줄여 경제적 측면으로 장점이 있고 장거리 운행을 가능하게 하며, 부족한 충전 인프라를 대체할 수 있는 기술이다. 이 중 고속도로 경사지의 대형차 주행에 따른 환경문제점을 해결할 수 있는 현실적인 방안은 E-Highway 팬터그래프 방식이다.

2.2 집전장치 토폴로지

Fig. 3은 집전장치의 토폴로지 다이어그램으로써, 분류는 크게 트롤리폴(Trolley Poll) 방식과 팬터그래프 방식으로 나뉘며 그중 트롤리폴 방식 같은 경우 고전적인 집전장치로써 도체로 된 봉을 차량의 지붕에 부착시켜 가공선에 접촉시키는 방식이다. 이러한 방식은 차량 측에 탑재된 간단한 스프링 장치나 탄성에 의해서 접촉을 유지하며, 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 그러나 가공선과의 접촉면이 넓지 않아 집전장치가 이탈할 가능성이 매우 높으며, 접촉압력을 조정하기 어렵다는 단점이 있다.

싱글암 또는 더블암 방식의 팬터그래프는 가공선과 팬헤드의 마찰로 생기는 가공선의 마모를 최소화하기 위해서 탄소로 구성된 판을 사용하게 되며, 가공선의 종변위에 대해 원활한 접촉성능을 가져 이선(Loss of contact)에 강인하며, 가공선의 접촉 면적이 크기 때문에 고속주행 시 탈선 방지가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 구조가 복잡하며, 부피가 크다는 단점이 있다.

현재 사용되는 E-Highway 팬터그래프는 Fig. 4와 같은 구조로 팬헤드, 플런저(Plunger), 프레임(Frame)으로 크게 3개의 부분으로 구분할 수 있다. 팬헤드 같은 경우 전기기관차 시스템과 달리 두 개의 집전판으로 구성되며, 프레임은 일반적인

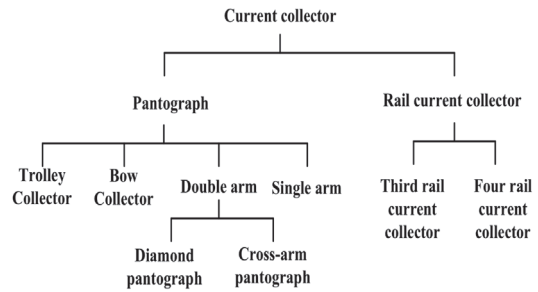


Fig. 3 Current collector topologies

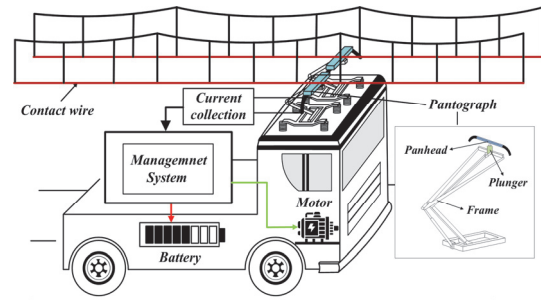


Fig. 4 Pantograph structures

로 상부암, 하부암으로 구분할 수 있다. 상부암과 하부암으로 구분되는 프레임은 수직으로 자유롭게 움직일 수 있기 때문에 가공선 높이에 상관없이 팬헤드가 접촉선으로부터 접촉력을 유지할 수 있다.

이러한 시스템 방식은 팬헤드가 가공선과 접촉할 때 안정적으로 추종하여 집전하는 여부에 따라서 집전 성능이 좌우된다. 따라서 팬터그래프의 신뢰성은 주행에 있어서 필수 조건이며, 가공선으로부터 어떠한 요소에도 방해받지 않고 일정한 전기를 공급받기 위해서는 팬터그래프의 가공선 위치 추종특성에 대한 탁월한 능력이 필요하다[9]-[11].

3. 가공선 위치정보 취득 알고리즘 제안

팬터그래프 팬헤드의 구체적인 구성은 Fig. 5와 같

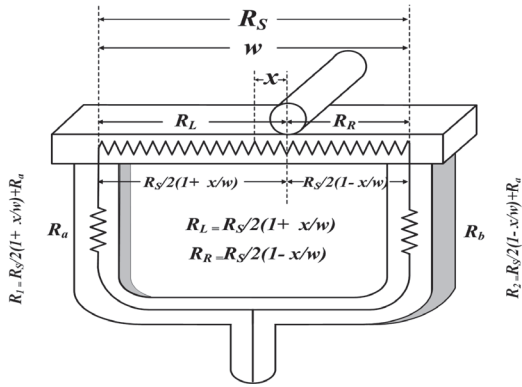


Fig. 5 Proposed topology circuit

이 탄소스트립과 구리선을 통하여 전력을 집진한다. 팬터그래프를 전기적인 관점에서 보면 Fig. 5와 같이 팬헤드부 저항(R_S), 팬헤드 지지부 및 전류패스인 두 암의 저항(R_a , R_b)으로 구성되며 두 암의 저항값은 동일하다. 전기차 운행 중 가공선은 팬헤드의 특정 위치에 접촉하며, 위치에 따라 두 암을 통한 전류루프를 형성하는 저항값은 변하게 된다. 가공선이 팬헤드의 정중앙에 위치하는 경우 두 암을 통한 전류루프를 형성하는 저항값은 동일한 값이 된다. 가공선과 팬헤드의 접촉점을 기준으로 각각 양쪽에 걸리는 저항을 R_L , R_R 이라고 가정하면, 팬헤드의 중앙의 위치한 평형상태에서는 R_L , R_R 의 저항값은 동일하며 식 (1)과 같다.

$$R_L = \frac{R_S}{2} = R_R \quad (1)$$

가공선의 팬헤드 위치(x)에 따라 좌우 팬헤드 저항값은 변하게되며, 가공선 위치가 팬헤드의 x 에 존재할 경우, 좌측과 우측 팬헤드의 전류루프를 형성하는 팬터그래프의 저항은 아래식과 같다.

$$R_L = \frac{R_S}{2} \left(1 + \frac{x}{w}\right) \quad (2)$$

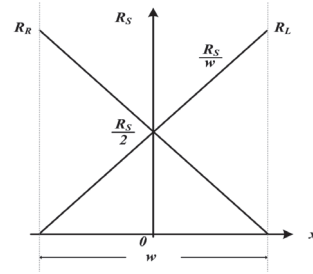


Fig. 6 Correlation between resistance and location information

$$R_R = \frac{R_S}{2} \left(1 - \frac{x}{w}\right) \quad (3)$$

Fig. 5에서 알 수 있듯이 팬헤드를 지지하는 두 암은 좌우 대칭으로 등가저항인 R_a , R_b 는 동일한 값이 된다. 가공선이 팬헤드의 중앙에 위치하는 경우, R_L , R_R 이 동일하여 휘스톤브릿지 평형조건에 따라 두 전압차는 제로가 된다. x 의 값이 상승할 경우, R_L 의 저항값은 증가하여 센싱된 전류의 값은 감소하게 되며, R_R 의 전류값은 증가한다. 따라서 두 전류차는 팬헤드의 접촉위치를 함수로 표현할 수 있다.

Fig. 6은 변화하는 접촉 위치에 따른 저항의 관계식을 나타낸다. $\frac{R_S}{2}$ 은 팬헤드와 가공선의 접촉 지점이 중앙에 위치하며, 식 (1)과 같이 R_L , R_R 저항이 값이 같다. 팬헤드부 저항(R_S)과 접촉 가능한 팬헤드의 전체 거리 w 의 대한 비를 $\frac{R_S}{w}$ 이며, 가공선과 팬헤드의 접촉위치 x 에 따른 두 암의 저항크기 변화를 R_L 과 R_R 나타낸다. 저항값의 변동으로 인한 전류는 각 I_L , I_R 과 같다. 전류의 차이로 생기는 결과를 통해 팬헤드와 가공선의 접촉된 지점의 x 를 추정하는 식은 아래와 같다.

$$x = \frac{w}{2R_S} (R_S + 2R_a) \left(\frac{I_L - I_R}{I_P}\right) \quad (4)$$

4. 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 시뮬레이션

제안된 팬터그래프의 가공선 위치 검출 알고리즘에 대한 타당성 검증을 위해 PSIM을 통한 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 7은 시뮬레이션 회로도이며, 구성은 크게 팬터그래프 모델링 부, 충전기 모델링 부, 위치추정을 위한 차동전압센서 부, 운전상태를 정의하는 동작부 및 해석을 위한 Visual C와의 인터페이스용 DLL부로 구성되어 있다.

Fig. 8은 가공선 팬헤드의 집전이 가능한 최대 길이로 왕복하여 집전하였을 때를 가정하여 시뮬

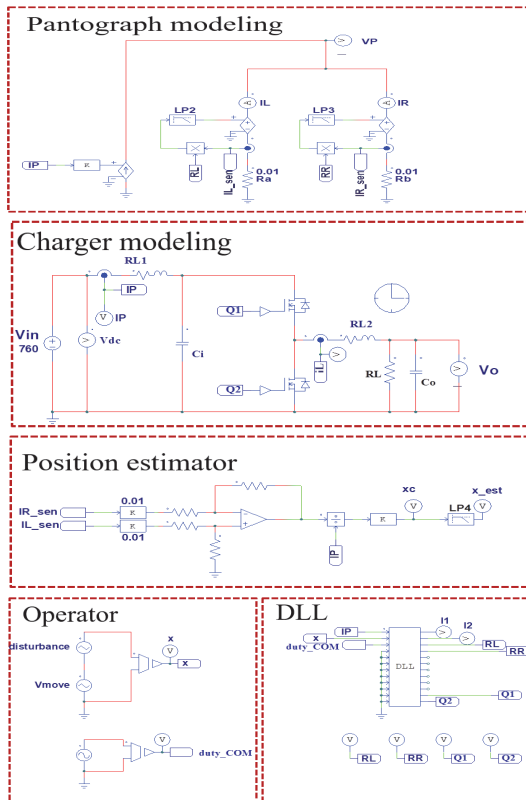


Fig. 7 The proposed simulation topology

레이션을 진행하였다. 접촉위치의 값은 x 로 식 2와 식 3을 통해 접촉위치 값의 따른 R_L 과 R_R 의 값을 도출하였고, Fig. 6의 팬터그래프 모델링 회

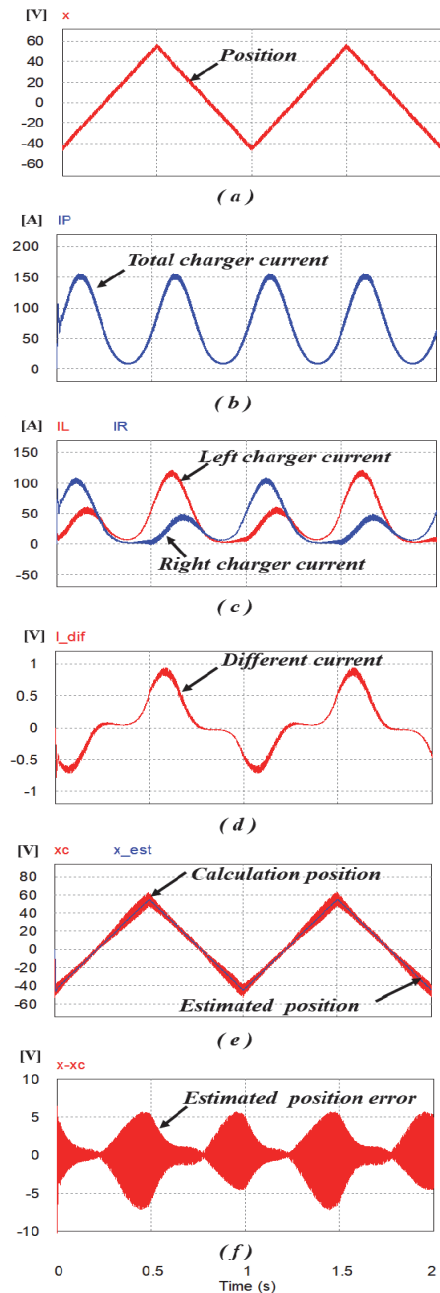


Fig. 8 Simulation result waveforms

Table 1. 2nd-Low-pass filter parameters for simulation

Parameter	Value
Gain	1
Cut-off Frequency	50Hz

로에 의해 접촉 위치에 따른 I_L 과 I_R 의 전류 값을 도출하였다.

위치 추정기는 I_L 과 I_R 를 검출하여 차동증폭기 구성하고, 노이즈에 강인함을 위해 LPF를 구성하였다.

Fig. 8(a)는 진동성분을 포함한 팬터그래프의 가공선 위치변화를 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 이때 충전전류파형을 나타내고 있다. 이 두 조건은 시뮬레이션 회로의 운전상태 조건에 따라 다양하게 구성할 수 있다. Fig. 8(c)는 운전상태에 따른 팬터그래프의 두 축 전류를 나타내고 있다. Fig. 8(d)는 Fig. 8(c)의 두 축 전류를 기반으로 한 차동출력을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 팬터그래프의 가공선 위치에 비례하는 전류파형을 관찰 할 수 있다. Fig. 8(e)는 충전전류의 크기에 종속하는 Fig. 8(d)에서 총 충전전류 I_{μ} 로 정규화한 파형이다. 그림에서 보는 바와같이 계산된 팬터그래프의 위치정보(Calculation position)는 진동성분을 포함하게 되며, 진동성분을 제거하기 위해 LPF를 설계하였으며, Table 1과 같다. LPF를 통과한 추정위치 정보(Estimated position)는 양호한 삼각파가 됨을 알 수 있다.

Fig. 8(f)에서 실제 위치정보와 추종위치 정보의 오차를 나타내고 있으며, 팬터그래프의 팬헤드와 가공선의 전체 접촉지점에서 6~7% 이내로 양호함을 알 수 있었다.

4.2 실험결과

Fig. 9는 도체 팬헤드의 횡 방향 위치를 추정하

Table 2. Experiment parameters

Parameter	Value
Panhead Resistor	0.6[Ω]
Frame Resistor	0.1[Ω]
Charge Voltage	48[V]
Load	2.4[Ω]
LPF Resistor	1[kΩ]
LPF Capacitor	100[nf]

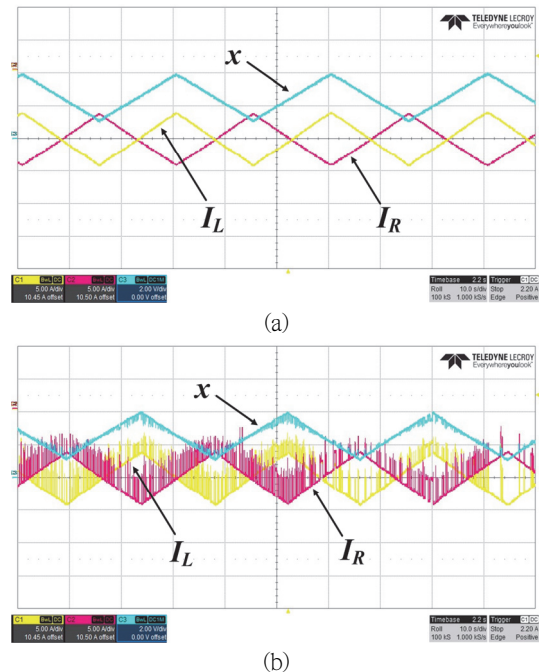


Fig. 9 Experimental result waveform

기 위해 제안된 필터를 설계하여 토폴로지의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다.

Fig. 9(a)는 가공선 팬헤드의 집전이 가능한 최대 길이로 왕복하였을 때 위치에 따른 두 축 전류와 차동출력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 양호한 출력이 이루어짐을 알 수 있었다.

전기철도용 팬터그래프와 달리 전기자동차용 팬터그래프는 노면의 상태에 집진부의 채터링이 발생할 수 있으며, 이때에도 위치추종이 가능하여야

한다. Fig. 9(b)는 집진부 채터링이 발생한 경우의 특성분석 파형이다. 실험파형에서 보는 바와 같이 두 축 전류에는 강한 노이즈 성분이 존재하나 LPF 기능을 겸비한 차동증폭기에서는 안정된 출력이 나타남을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서 팬터그래프를 팬헤드부와 집진전류 패스인 두 축 전류를 검출하고, 두 전류의 정규화된 전류차에 의한 팬터그래프의 가공선 위치추정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 제안된 방식에 대하여 시뮬레이션 및 모의실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 제안된 방식은 가공선 위치의 전 영역에서 위치 추정오차는 6~7 [%] 이내가 됨을 확인하였다.
- 팬터그래프와 가공선의 채터링 문제는 LPF 설계에 의해 해결할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 실제 적용을 위해서는 필터회로의 적절한 설계가 요구된다.
- 제안된 방식은 장치 구성이 비교적 간단하고 경제적인 장점을 가진다.
- 특히 제안된 충전전류를 기반으로 한 위치추정 알고리즘은 노이즈에 강인한 장점을 가진다.

따라서 제안된 시스템을 E-Highway 팬터그래프 방식에 적용할 경우 경제성 및 신뢰성에서 큰 장점이 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-002).

참고문헌

- [1] Jaehoon Choi, Jangyoung Choi, "Research Status of Hydrogen Fuel Cell System Based on Hydrogen Electric Vehicle" *Journal of Energy Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp.26-34, (2020).
- [2] Andreas Poullikkas, "Sustainable options for electricvehicle technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp.1277-1287, (2015).
- [3] Moritz Nolte (2019). E-Highway auf der A5: Deutschlands erste Teststrecke für Hybrid-LKWs. Herth + Bus. <https://herthundbuss.com/branche-mehr/e-highway-deutschlands-erste-teststreckefuer-hybrid-lkws>
- [4] European Environment Agency. Overview of Electricity Production and Use in Europe. Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment> (accessed on 6 July 2021).
- [5] Hitachi Energy. Grid Edge Solutions. Available online: https://www.hitachienergy.com/cn/zh_cn/offering/solutions/gradedge-solutions (accessed on 10 December 2021).
- [6] Rangaraju, S.; De Vroey, L.; Messagie, M.; Mertens, J.; Van Mierlo, J. Impacts of electricity mix, charging profile, and driving behavior on the emissions performance of battery electric vehicles: A Belgian case study. *Appl. Energy*, 148, 496–505, (2015).
- [7] Zhou, H.; Liu, Z.; Xiong, J.; Duan, F. Characteristic Analysis of Pantograph–Catenary Detachment Arc Based on Double-pantograph–Catenary Dynamics in Electrified Railways. *IET Electr. Syst. Trans.* pp 238–250, (2022).
- [8] Wei, W.; Wu, J.; Gao, G.; Gu, Z.; Liu, X.; Zhu, G.; Wu, G. Study on Pantograph Arcing in a Laboratory Simulation System by High-Speed Photography. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 44, pp 2438–2445, (2016).

- [9] Kim, H.; Hu, Z.; Thompson, D. Effect of cavity flow control on high-speed train pantograph and roof aerodynamic noise. *Railw. Eng. Sci.*, 28, 54–74, (2020).
- [10] Zhang, Y.D.; Zhang, J.Y.; Li, T.; Zhang, L. Investigation of the aeroacoustic behavior and aerodynamic noise of a high-speed train pantograph. *Sci. China Technol. Sci.*, 60, 561–575, (2017).
- [11] Liu, W.; Liu, Z.; Li, Y.; Wang, H.; Yang, C.; Wang, D.; Zhai, D. An automatic loose defect detection method for catenary bracing wire components using deep convolutional neural networks and image processing. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70, 5016814, (2021).

(접수: 2023.09.08. 수정: 2023.09.26. 게재확정: 2023.10.04.)