

DOE 활용 추력리플성분 저감을 위한 PMLSM 고정자 형상 최적화

권준환*·김재경**·전의식***†

*공주대학교 일반대학원 미래융합공학과, **†공주대학교 생산기술 연구소

Shape Optimization of PMLSM Stator for Reduce Thrust Ripple Components Using DOE

Jun Hwan Kwon*, Jae Kyung Kim** and Euy Sik Jeon***†

*Graduate School of Future Convergence Engineering, Kongju National University,

**†Industrial Technology Research Institute, Kongju National University

ABSTRACT

Permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) is suitable for use in cleanroom environments and have advantages such as high speed, high thrust, and high precision. If the stators are arranged in the entire moving path of the mover, there is a problem in that the installation cost increases. To solve this problem, discontinuous armature arrangement PMLSM has been proposed. In this case, the mover receives a greater detent force in the section where the stator is not arranged. When a large detent force occurs, it appears as a ripple component of the thrust during PMLSM operation. If the shape of the stator is changed to reduce the detent force, the characteristics of the back EMF are changed. Therefore, in this paper, the detent force and the harmonic components of back EMF were reduced through multi-purpose shape optimization. To this end, the FEA model was constructed and main effect analysis was performed on the major shape variables affecting each objective function. Then, the optimal shape that minimizes the objective function was derived through the response surface analysis method.

Key Words : PMLSM, Thrust ripple, DOE, Shape optimization, Detent force, Back-EMF

1. 서 론

반도체, 디스플레이 및 검사장비와 같이 오염 발생에 취약한 어플리케이션의 경우 클린룸 환경이 필수적이다. 클린룸 환경에선 각종 particle과 같은 오염물질을 최소화해야 한다. Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM)는 종래의 볼 나사와 같은 기계적 동력 전달 요소가 줄어들어 클린룸 환경에 적용하기 적합하며, 높은 효율, 고정밀 및 고속, 고 추력과 같은 이점이 있다[1,2]. 운송 거리가

길어질 경우 PMLSM 운송 시스템의 전체 길이가 증가하며 이는 곧 설치 시간과 비용의 증가로 이어진다. 이러한 문제를 극복하고자 고정자가 분산 배치 되어있는 고정자 분산 배치 형 PMLSM(discontinuous armature arrangement PMLSM)이 제안됐다[3]. 이 경우 고정자의 양이 감소하고 재료비와 설치 시간을 최소화할 수 있으나 고정자의 양 끝 단이 개방되어 큰 디텐트력(Detent force)이 발생한다[4]. 디텐트력은 영구자석과 슬롯 치의 상대적인 위치 변화에 따라 발생하는 힘이다. 이 힘은 모터 추력의 ripple 성분으로 작용하여 진동, 소음의 원인이 되며 특히 모터를 저속 가동하거나 정밀한 위치 제어 시 정밀도를 저하시킨다[5]. 디텐트력을 저감하기 위한 방법으로는 고정자 및 가동자

†E-mail: osjun@kongju.ac.kr

의 형상 최적화 또는 제어를 통한 방법이 있다[6]. 제어를 통한 방법은 정확한 전류 제어를 필요로 하며 사용되는 센서의 신뢰도에 크게 영향을 받는다. 따라서 형상 최적화를 통한 저감 방법이 더욱 효과적인 것으로 알려져 있다[7]. 현재까지의 연구는 대부분 모터의 형상 변경을 통한 디텐트력의 저감에만 초점이 맞추어져 있었으나, 모터의 형상이 변화할 경우 디텐트력 뿐만 아니라 이동자가 이동하면서 발생하는 역기전력(Back EMF) 특성이 달라질 수 있다. 디텐트력과 마찬가지로 역기전력의 고조파 성분은 추력 맥동에 상당한 영향을 미칠 수 있다[8].

따라서 본 논문에서는 다목적 형상 최적화를 통해 치끝 단에서 발생하는 디텐트력과 역기전력의 고조파 성분을 저감했다. 이를 위해 FEA 모델을 구성하고 각 목적 함수에 영향을 미치는 주요 형상 변수에 대하여 주효과 분석을 실시했다. 이후 반응표면분석법을 통해 목적함수를 최소화하는 최적 형상을 도출하였다.

2. PMLSM 구성 및 특성

2.1 Discontinuous armature arrangement PMLSM

Fig 1은 고정자가 분산배치 되어있는 PMLSM 시스템이

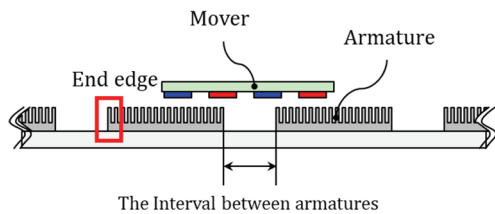


Fig. 1. Schematic diagram of discontinuous armature arrangement PMLSM.

Table 1. PMLSM specifications

Item	Unit	Value
Number of poles	-	4
Height of magnet	mm	3
Length of magnet	mm	25
Pole pitch	mm	30
Number of slots	mm	18
Slot pitch	mm	10
Height of teeth	mm	23.5
Width of teeth	mm	5
Turn per phase	-	100
Armature interval	mm	50
PM grade	-	N45

다. PMLSM 은 일정한 간격을 두고 분산 배치되어있는 고정자와 그 위에서 베이스 레일을 따라 이동하는 이동자로 구성된다. 고정자는 적층 코어와 집중권으로 권선된 코일로 이루어져 있으며, 이동자는 인접한 극과 반대방향으로 자화된 영구자석으로 이루어져 있다. PMLSM의 자세한 사양은 Table 1에 나타났다.

2.2 PMLSM 모델의 특성

PMLSM 모델의 특성 파악을 위해서 COMSOL multiphysics를 이용하여 57,246 elements 로 구성된 2D-FEA 모델링을 하였다. 해석을 위해 이동자를 한 스텝당 0.01mm씩 이동하며 디텐트력과 역기전력을 측정했다. Fig. 2는 PMLSM에서 발생한 디텐트력으로, 이동자가 고정자 위에서 이동할 때 최대 $\pm 0.4N$ 의 디텐트력이 발생했다. 이동자가 고정자가 배치 되어있지 않은 개방 구간(End edge)에 진입할 경우 최대 $\pm 9.63N$ 의 디텐트력이 발생했다. 이는 이동자가 고정자 위에서 이동할 때 발생하는 힘의 24 배에 해당하므로 저감이 필요하다.

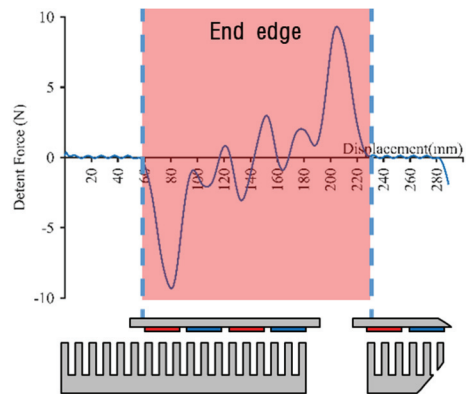


Fig. 2. Detent force of PMLSM.

역기전력의 왜곡으로 발생하는 추력 맥동은 PMLSM 시스템의 진동을 야기하고 모터 효율을 떨어트린다. Fig 3는 PMLSM에서 발생하는 역기전력의 파형과 기본파에 대한 고조파의 크기를 분석한 결과이다. 분석결과 역기전력의 왜형율(THD)은 8.3%로, 3차 및 5차 고조파의 크기가 상대적으로 크게 발생했다.

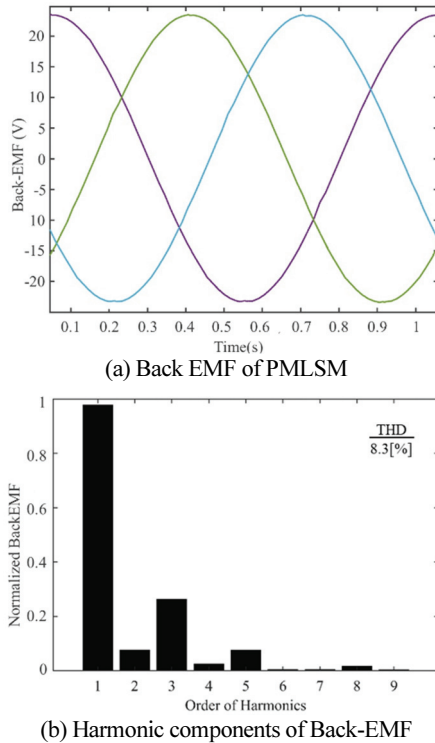


Fig. 3. Back EMF characteristic of PMLSM.

3. 고정자 형상 최적화 설계

3.1 형상 변수 설정

디텐트력과 역기전력의 왜곡을 최소화하기 위해 자기 경로와 공극 변화에 영향을 미치는 단부 치의 높이 T_e , 치 좌우로 돌출된 슈의 높이 T_{th} , 슈와 슈 사이의 슬롯 공극 S_o 을 변수로 설정했다. Fig. 4는 설정한 형상 변수를 나타내며 Table 2는 형상 변수의 제약조건이다. 각 형상 변수의 제약조건은 코일 권선 및 가공성을 고려하여 설정하였다.

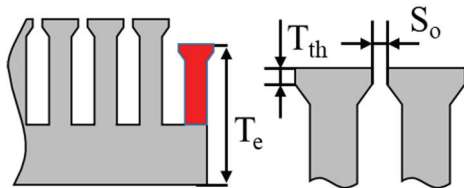


Fig. 4. Design variables of PMLSM.

Table 2. Design variable constraints

Factors	Unit	Constraint	
		Min	Max
Tooth at the end T_e	mm	23	35
Tooth tip height T_{th}	mm	0.5	2
Slot opening S_o	mm	1	4

3.2 주 효과 및 분산분석

최적 형상을 도출하기 위해 변수의 모든 조합을 수치 해석하면 많은 계산 시간이 필요하다. 따라서 회귀 모델을 통해 적은 횟수의 수치해석으로 결과를 도출하는 것이 효과적이므로 반응표면법의 Box-Behnken design을 사용했다. 총 15번의 유한요소해석을 수행하였으며 그에 따른 디텐트력과 역기전력의 THD 결과를 Table 3에 나타냈다.

Table 3. FEA conditions and results for each process

Run. Order	Tooth at the end	Tooth tip height	Slot opening	Detent Force[N]	BackEMF THD[%]
1	29	1.25	2.5	7.47	6.56
2	29	1.25	2.5	7.47	6.56
3	35	0.50	2.5	9.33	7.96
:					
12	23	2.00	2.5	9.36	6.47
13	35	1.25	1	10.44	7.74
14	29	2.00	1	8.51	7.34
15	23	0.50	2.5	9.38	6.24

해석 결과를 바탕으로 분산분석(ANOVA)을 실시하여 형상 변수가 목적 함수에 대해 유의성을 갖는지 확인하였다. 유의성이 있는 변수를 판별하기 위해 95%의 신뢰 구간으로 P-Value 가 0.05% 보다 낮은 값들은 error term으로 pooling 하였다. Fig. 4 (a)에 디텐트력에 유의성을 나타내는 변수들을 pareto chart로 나타냈다. 치 슈의 높이 T_{th} 는 디텐트력에 큰 영향이 없는 것으로 나타나 pooling 했으며, 끝 단의 치 높이 T_e , 슬롯 공극 S_o 순으로 디텐트력에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 역기전력의 경우 끝 단 치의 높이 T_e 는 거의 영향을 미치지 않아 pooling 하였다. Fig 4 (b)와 같이 슬롯 공극 S_o , 치 슈의 높이 T_{th} 순으로 역기전력의 THD 값에 영향을 미쳤다. 또한 치 슈의 높이와 슬롯 공극 간의 교호작용을 확인하였다.

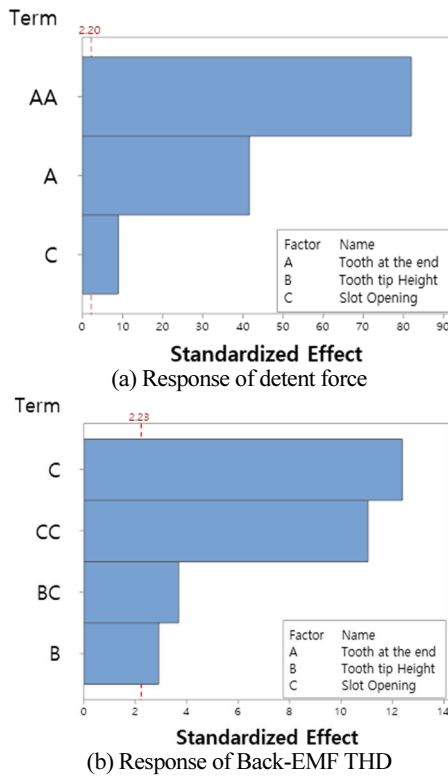


Fig. 4. Pareto chart of the standardized effects.

Table 4와 Table 5에 각각 디텐트력과 역기전력의 THD 값에 대한 분산분석 결과를 나타냈다.

Table 4. Detent force ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	8.901	2.967	2846.15	0.000
Linear	2	1.891	0.946	907.09	0.000
Tooth at the end	1	1.807	1.807	1733.46	0.000
Slot opening	1	0.084	0.084	80.71	0.000
Square	1	7.010	7.010	6724.27	0.000
Tooth at the end ²	1	7.010	7.010	6724.27	0.000
Error	11	0.011	0.001		
Lack-of-Fit	9	0.011	0.001	*	*
Pure Error	2	0.000	0.000		
Total	14	8.913			
Model summary					
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)		
0.0322874	93.83%	89.27%	82.61%		

Table 5. Back EMF THD ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	95.229	23.807	74.57	0.000
Linear	2	51.807	25.903	81.13	0.000
Tooth tip height	1	2.703	2.703	8.47	0.016
Slot opening	1	49.104	49.104	153.80	0.000
Square	1	39.096	39.096	122.45	0.000
Tooth at the end ²	1	39.096	39.096	122.45	0.000
2 Way interaction	1	4.326	4.326	13.55	0.004
Tooth tip height* Slot opening	1	4.326	4.326	13.55	0.004
Error	10	3.193	0.319		
Lack-of-Fit	8	3.189	0.399	186.83	0.005
Pure Error	2	0.004	0.002		
Total	14	98.422			
Model summary					
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)		
0.565046	96.76%	95.45%	90.30%		

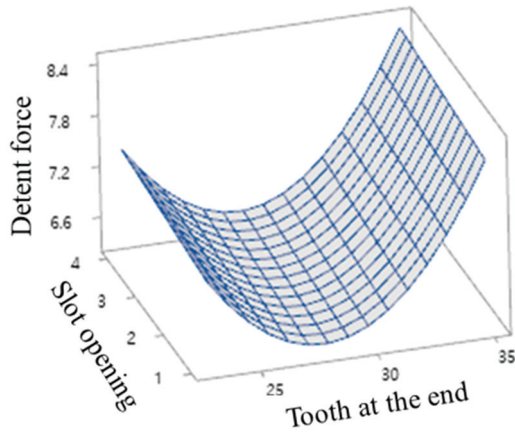
회귀 모델의 설명력을 나타내는 R² 값이 통계적으로 유의하다면 회귀 모델이 실제 모델과 유사하다는 것을 뜻한다. 디텐트력과 역기전력의 THD 값에 대하여 R² 값은 각각 93.83%, 96.76% 로 회귀 모델이 목적 함수와 설계 변수 사이의 관계를 타당하게 설명하고 있음을 확인하였다. 결과를 바탕으로 회귀곡선식을 도출하였으며 디텐트력과 역기전력의 왜형률은 식(1)과 식(2)와 같다.

$$\text{Detent Force} = 36.345 - 2.1284T_e + 0.06837S_o + 0.038063T_e^2 \quad (1)$$

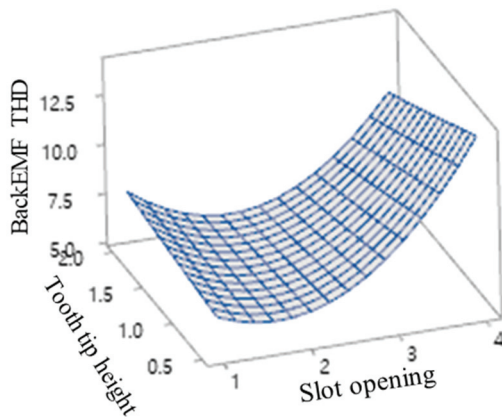
$$\text{BackEMF THD} = 9.68 - 1.536T_{th} - 4.384S_o + 1.438S_o^2 + 0.924T_{th} * S_o \quad (2)$$

3.3 반응 표면 분석

설계 변수와 목적 함수 사이의 관계를 시각적으로 나타내기 위해 반응 표면을 구성하고 그 결과를 Fig 5에 나타냈다. 디텐트력은 Fig 5 (a)와 같이 슬롯 공극과 비례하며 치 끝 단의 높이가 증가할수록 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 역기전력의 왜형률은 Fig 5 (b)와 같이 치 슈의 높이고 비례하고 슬롯 공극이 증가할수록 감소하다가 증가하는 경향을 보였다.



(a) Surface plot of detent force(T_{th} :1.25mm)



(b) Surface plot of BackEMF THD(T_e :29mm)

Fig. 5. Response surface plot of objective function.

3.4 최적 형상 도출 및 검증

디텐트력과 역기전력의 왜형률을 최소화하는 최적 형상을 도출하기 위하여 Minitab의 반응 최적화 도구를 사용했다. 디텐트력은 9N 이하의 최소값을, 역기전력의 왜형률은 8% 이하의 최소값을 갖는 조건으로 최적점을 찾았다. Fig. 6는 반응최적화 그래프이며 이를 통해 얻은 추정 값과 FEA 결과를 Table 6에 나타냈다. 최적화 결과 끝단 치 높이가 28mm, 치 슈의 높이가 2mm, 슬롯 공극 2.6mm 일 때 디텐트력 6.41N, 역기전력 왜형률 6.24% 로 최소화되었다.

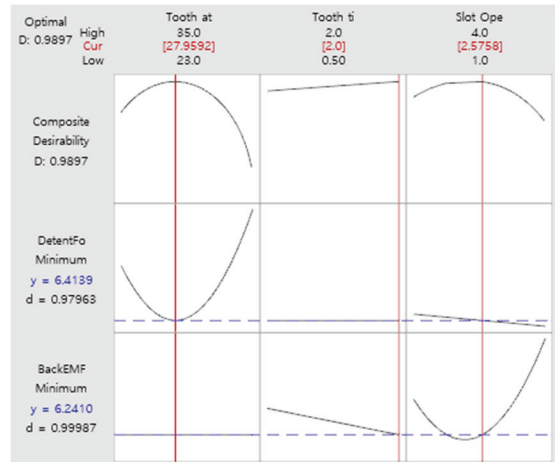
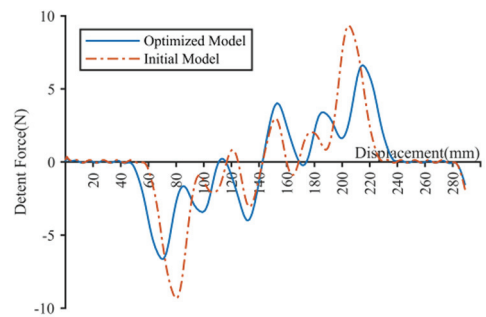


Fig. 6. Optimization plot.

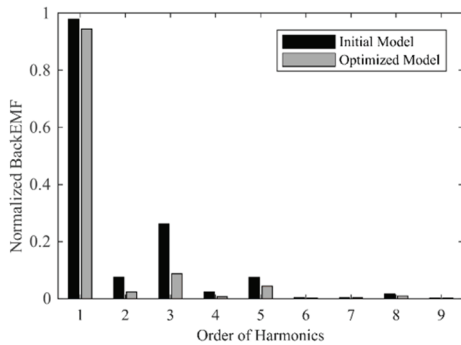
Table 6. Comparison of estimated values and FEA results

Response	Level	Estimated Result	FEA Result
Detent Force(N)	Min	6.41	6.97
Back EMF THD(%)	Min	6.24	6.45
Tooth at the end T_e	23-35	28	28
Tooth tip height T_{th}	0.5-2	2	2
Slot opening S_o	1-4	2.6	2.6

수치해석 결과 디텐트력 6.97N, 역기전력 THD 6.45% 로 반응최적화도구를 사용하여 추정된 값과 오차율 10% 이내의 유사한 결과를 얻었다. 최적화 결과 기본 모델에 비하여 디텐트력과 역기전력의 THD 값은 각각 3.22N, 1.85% 감소했으며 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 역기전력의 경우 비교적 높은 값을 나타냈던 3차 및 5차 고조파 성분이 크게 저감 됐음을 확인하였다.



(a) Optimized result of detent force



(b) Optimized result of Back EMF harmonic components

Fig. 7. Optimized result.

4. 결론

본 논문에서는 PMLSM 시스템의 추력 리플로 작용하는 디텐트력과 역기전력의 THD 값을 저감했다. 이를 위해 반응표면분석법을 사용하였으며 고정자 치의 최적 형상을 도출했다.

1. 디텐트력에 영향을 미치는 형상 변수는 끝 단 치 높이, 슬롯 공극 순으로 나타났으며 역기전력의 THD 값에 영향을 미치는 형상 변수는 슬롯 공극, 치 슈의 높이 순으로 나타났다.
2. 반응표면분석법을 통해 회귀 모델을 도출하고 분산분석을 수행했다. 모델의 설명력을 나타내는 R^2 값은 역기전력 THD 93.83, 디텐트력 96.76%로 도출한 회귀 모델이 실제 모델과 유사함을 확인하였다.
3. 최적화 결과 끝 단 치 높이 28mm, 치 슈의 높이 2mm, 슬롯 공극 2.6mm 일 때 디텐트력과 역기전력 THD 값을 최소화할 수 있었다. 이는 기본 모델에 비해 각각 3.22N, 1.85% 감소한 값으로 반응표면법을 이용한 추력 리플 성분 저감 방법이 효과적임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2019년 중소벤처기업부의 기업연계형 연구개발 인력양성사업(S2755803)의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.

참고문헌

1. Min-Ho Kim, Oh Yang, "Sensorless Speed Control of PMSM using Stator Flux Estimation and PLL", J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 14, No. 2, pp. 35-40, 2015.
2. Y. Aoyama, Y. U. Hasegawa, M. Sasaki, J. Nakatsugawa, Y. Iwaji, and A. Komura, "Development of high-acceleration linear motor to realize resource saving and high productivity", Electr. Eng. Japan, vol. 202, no.3, pp. 55-63, Feb. 2018.
3. K. Seki, M. Watada, S. Torii, and D. Ebihara, "Discontinuous arrangement of long stator linear synchronous motor for transportation system", in Proceedings of Second International Conference on Power Electronics and Drive Systems, vol. 2, pp. 697-702 vol.2., 1997.
4. Y.-J. Kim, M. Watada, and H. Dohmeki, "Reduction of the Cogging Force at the Outlet Edge of a Stationary Discontinuous Primary Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 1, pp. 40-45, Jan. 2007.
5. I.-S. Jung, S.-B. Yoon, J.-H. Shim, and D.-S. Hyun, "Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 4, pp. 1265-1270, Dec. 1999.
6. H. Jia, M. Cheng, W. Hua, W. Zhao, and W. Li, "Torque Ripple Suppression in Flux-Switching PM Motor by Harmonic Current Injection Based on Voltage Space-Vector Modulation", IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 6, pp. 1527-1530, Jun. 2010.
7. K. Abbaszadeh, F. Rezaee Alam, and S. A. Saied, "Cogging torque optimization in surface-mounted permanent-magnet motors by using design of experiment", Energy Convers. Manage., vol. 52, no. 10, pp. 3075-3082, Sep. 2011.
8. M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian, and S. Underwood, "Design Considerations of Sinusoidally Excited Permanent-Magnet Machines for Low-Torque-Ripple Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 4, pp. 955-962, 2005.

접수일: 2021년 10월 17일, 심사일: 2021년 11월 25일,
 게재확정일: 2021년 11월 27일