

# Clarke 변환을 응용한 3상 유도전동기의 Inter Turn Short Circuit 진단 Diagnosis of Inter Turn Short Circuit in 3-Phase Induction Motors Using Applied Clarke Transformation

고 영 진\*, 김 경 민\*\*★

Yeong-Jin Goh\* and Kyoung-Min Kim\*\*★

## Abstract

The diagnosis of Inter Turn Short Circuits (ITSC) in induction motors is critical due to the escalating severity of faults resulting from even minor disruptions in the stator windings. However, diagnosing ITSC presents significant challenges due to similarities in noise and losses shared with 3-phase induction motors. Although artificial intelligence techniques have been explored for efficient diagnosis, practical applications heavily rely on model-based methods, necessitating further research to enhance diagnostic performance. This study proposed a diagnostic method applied the Clarke Transformation approach, focusing solely on current components while disregarding changes in rotating flux. Experimental results conducted over a 30-minute period, encompassing both normal and ITSC conditions, demonstrate the effectiveness of the proposed approach, with FAR(False Accept Rates) of 0.2% for normal-to-ITSC FRR(False Rejection Rates) and 0.26% for ITSC-to-normal FRR. These findings underscore the efficacy of the proposed approach.

## 요 약

고정자 권선단락은 미세한 턴이 단락되어 급격히 고장이 심각해짐에 따라 ITSC의 진단이 중요시되고 있다. 그러나, 3상 유도전동기의 노이즈 및 손실등과 유사한 특징을 가짐에 따라 ITSC진단에 많은 어려움이 있다. 이를 효율적으로 진단하기 위해서 인공지능 기법으로 연구되고 있으나, 현장에서는 모델기반 기법이 두루 활용되고 있음에 따라 모델기반 기법에 대한 진단 성능개선 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 논문에서는 회전하고 있는 자속에 변화를 무시하며, 전류 성분만을 이용할 수 있도록 Clarke변환 방법을 응용하여 진단방법을 제안하였다. 이에 30분간의 정상 및 ITSC 상태의 측정 결과, 정상상태를 ITSC 상태로 오인식하는 경우 0.2%, ITSC상태를 정상상태로 오거부하는 경우 0.26%로 효율적인 진단 방법임을 실험을 통해 알 수 있었다.

*Key words* : Clarke Transformation, 3-phase induction motor, stator winding short circuit, ITSC, MCSA

\* Dept. of Electrical Engineering, Tongmyong University

\*\* Dept. of Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University

★ Corresponding author,

E-mail : kkm@jnu.ac.kr, Tel : +82-61-659-7316

※ Acknowledgment: This study was financially supported by Chonnam National University(Grant number: 2022-0198) Manuscript received Dec. 11, 2023; revised Dec. 20, 2023; accepted Dec. 21, 2023.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

유도전동기의 고정자 고장은 국부적으로 미세한 턴 단락이 발생되어 인근 권선에도 영향을 미쳐 급격하게 심각한 고장을 유발하게 된다. 이러한 이유로 미세한 턴 단락을 ITSC(Inter Turn Short Circuit)라 지칭하며 이를 진단하여 대형 사고를 미연에 방지하는데 목적으로 많은 연구가 이뤄지고 있다[1-3].

이를 진단하기 위해 데이터를 취득하는 방법으로는 크게 진동 및 소음 등의 물리적 센서를 이용하는 방법과 센서없이 전류신호만을 이용하여 분석하는 MCSA(Motor Current Signature Analysis)로 구분된다. 진동 및 소음등의 취득방법은 추가적인 회로 구성 및 센서가격의 부담등의 문제가 있는 반면, MCSA방법은 인버터단자에서 직접 추출된 전류신호를 취득가능하다는 용이함으로 인해 연구가 많이 이뤄지고 있다[4-5].

진단기법으로는 최근 AI(Artificial Intelligence) 기술 발달에 따른 딥러닝기반 기법과 제어 시스템에 직접 적용된 모델기반 기법으로 구분되어 연구되고 있다[6].

딥러닝의 방법으로 지도학습과 비지도학습으로 연구되고 있으며, 이중 90% 이상 지도학습으로 연구되고 있다. 지도학습은 크게 ANN, CNN(Convolutional Neural Network), DNN의 방법으로 연구되고 있으며, 최근에는 CNN을 이용하여 많은 연구들이 이뤄지고 있다[7].

그러나, 딥러닝기반 기법은 대규모의 데이터베이스가 요구되며, 사전학습하는데 많은 시간과 적용하고자 하는 현장 및 환경에 따라 진단성능이 차이가 발생되어 실 적용에 많은 어려움이 따른다. 또한, 취득된 데이터는 모델기반 기법에 의존성이 높아 입력데이터의 특징에 대한 다양한 기법이 필요하다.

모델기반기법은 DFT(Discrete Fourier Transform) 기반 스펙트럼분석방법, 측대파분석방법, D-Q변환을 기반한 PVA(Park's Vector Approach), EPVA(Extended Park's Vector Approach) 등이 제안되었다[8]. 시스템 자체적으로 진단이 가능함에 따라 효용성은 우수하나, ITSC와 같은 진단에는 정확한 선형분리에 어려움이 있다.

그럼에도 불구하고 시스템 적용에 용이하다는 점에 의해 제품개발도 이뤄지고 있음에 따라 진단성능의 개선하기 위해서 연구가 이뤄지고 있다. 또한, 앞선 딥러닝기반 기법의 입력데이터로 활용 가능한 기법임에 따라 새로운 데이터셋 추출의 측면에서 연구되고 있다.

한편, D-Q변환의 기법을 기반한 PVA, EPVA는 3상을 2상으로 변환하는 과정 중,  $\alpha - \beta$ 축으로 Clarke 변환

을 통해 회전자축과 자속을 동일하게 움직이게 하여 PVA기법이 활용되고 있다[9].

Clarke 변환은 전동기의 토크제어에 활용되는 방법 중 하나로  $\alpha$ 축은 자속제어,  $\beta$ 축은 전류제어에 활용되고 있다[10]. 통상적으로 MCSA를 활용한 고장진단의 측정되는 전류데이터를 이용하고 있으며, 자속과 전류의 합성에 의해 이뤄짐에 따라, 복잡한 해석이 필요하는 반면, 전류 데이터만을 이용할 경우, 부하 또는 전동기 상태에 따른 전류와의 관계만이 성립될 수 있다.

이에 본 연구에서는 종래의 모델기반 기법 중 D-Q변환의 기법을 기반으로 Clarke변환을 이용한 새로운 ITSC진단을 연구하도록 한다.

## II. 본론

### 1. Clarke 변환

Clarke 변환은 3상 유도전동기의 교류 파형이 120도 등간격이 균등하게 발생한다는 전제하에 구성된다[7].

식 (1)에서  $I_a$ 는 a상의 전류,  $I_b$ 는 b상의 전류,  $I_c$ 는 c상의 전류를 나타내며,  $I_\alpha$ 는 d-q 변환에 의한 d축의 전류,  $I_\beta$ 는 q축의 전류를 의미하며 이 과정을 Clark변환 또는 정지좌표계라고 부른다.

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_u \\ I_v \\ I_w \end{bmatrix} \tag{1}$$

다음 그림 1은 3상을 2상으로 변환하는 과정을 나타내고 있다.

이때, 두 개의 상만이 존재함에 따라 리자쥬 패턴으로 도시할 경우 원의 형태로 나타낼 수 있으며, 상 불평형 고장이 발생되었을 경우  $I_\alpha$ 와  $I_\beta$ 가 불평형성을 가지게 되고, 리사쥬 원의 모형을 타원으로 나타나게 된다.

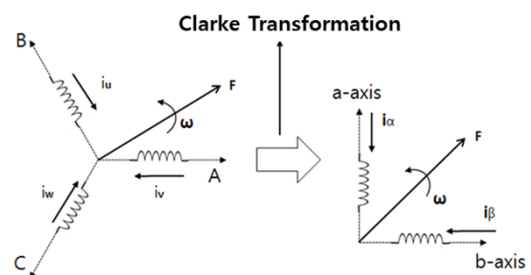


Fig. 1. Transformation of Clarke.  
그림 1. Clarke 변환과정

2. 제안하는 방법

통상적으로 리사주 원의 패턴이 왜곡되어 타원의 형상을 고장으로 인식할 수 있으나, ITSC와 같은 상황은 미세한 고장임에 따라 전동기의 노이즈 등과 유사하여 정상상태와 ITSC의 판별은 어려운 실정이다.

한편, 고장이 발생하게 되면, 원의 패턴은 45도 방향으로 커지는 특징을 가지고 있기 때문에 이를 부각시키기 위해서 Clarke변환에서 진보된 PVA는 EPVA라는 방법으로 다음 식 (2)를 적용하곤 한다.

$$|I_d^s + jI_q^s|^2 = \left(\frac{3}{2}\right)(i_d^2 + i_q^2) + 3i_d i_q \cos(2\omega t - \alpha_d - \beta_q) \quad (2)$$

EPVA는 식(2)를 이용하여 FFT에서 두 배의 성분을 이용하여 고장진단에 적용하고 있다.

한편, 모터 벡터제어를 기반으로 보았을 경우, d축의 성분은 전류축, q축의 성분은 자속축임에 따라 자속의 변화로 해석이 어려움을 최소화하기 위해 d축의 성분만을 추출하기 위해 EPVA의 방법을 응용하여 d축과 q축을 제곱을 취하여 긴 타원의 형태로 구성하도록 하였다.

3. 실험환경

가. 데이터 수집 방법

MCSA를 이용한 고장진단을 위해 그림 2와 같이 3상 유도전동기에 다이나모미터를 연결하여 전부하 상태에서 측정하도록 하였다.

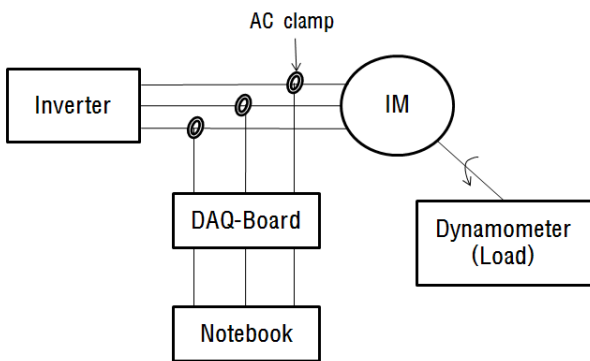


Fig. 2. Process of data acquisition.

그림 2. 데이터 수집 과정

이때, 유도전동기는 1[HP]용량을 가지며, 전부하의 속도는 1,690[rpm]이다. MCSA측정을 위해 Fluke사 i5s AC current clamp를 이용하였으며, National Instruments의 USB-DAQ 9215A with BNC로 데이터를 수집하도록 하였다.

나. 고장데이터 생성방법

ITSC의 임의의 데이터 수집을 위해 그림 3과 같이 고정자 권선을 단락시켜 주도록 하였다.

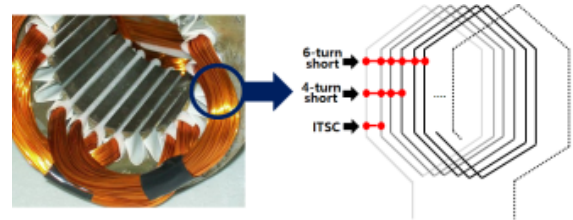


Fig. 3. Configuration of ITSC.

그림 3. ITSC 단락 구성

그림 3에서 ITSC는 인접한 두 개의 권선의 단락, 4턴 단락은 4개의 권선, 6턴 단락은 6개의 권선 단락인 것을 의미한다.

이를 이용하여 그림 4의 다이나모장치에 연결하여 주어 ITSC의 전류데이터를 수집하도록 하였다.

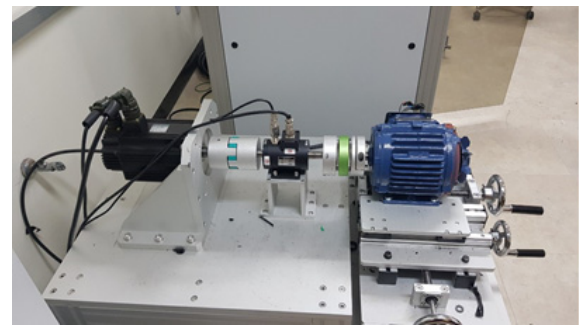


Fig. 4. Dynamo system utilized in the experiment.

그림 4. 실험에 사용된 다이나모 시스템

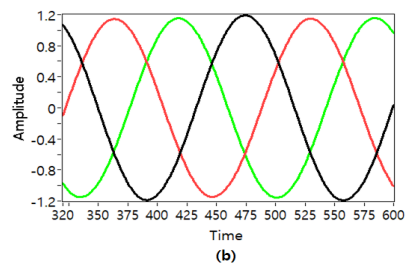
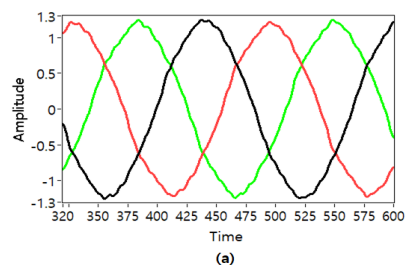


Fig. 5. Before (a) and after (b) applying IIR filter.

그림 5. IIR필터 적용 전(a)과 적용 후(b)

다. 필터링 적용

3상 유도전동기는 고조파를 포함하고 있음에 따라 측정된 데이터는 노이즈성분이 포함되어 있다. 원활한 분석을 위해 측정되는 데이터에 로우패스필터의 무한 임펄스응답(IIR) 버터워즈 3차 필터에 컷오프 100[Hz]를 동일하게 적용하여 주었다.

다음 그림 5-(a)는 필터를 적용하기 전의 3상 신호를 나타내며, 그림 5-(b)는 필터가 적용된 3상 신호를 나타낸다.

4. 실험 결과

가. Clarke 변환에 따른 패턴

다음 그림 6은  $i_\alpha, i_\beta$  만을 기준으로 표현된 패턴으로 각 상태별 1분간 측정된 결과를 나타낸다.

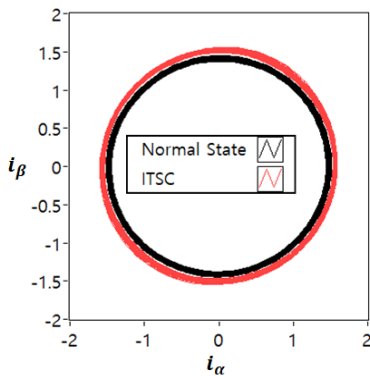


Fig. 6. Pattern of Clarke transform.

그림 6. Clarke변환의 패턴

그림에서 검은 실선의 모양은 정상 상태를 나타내며, 붉은 실선의 모양은 ITSC 상태를 나타낸다. 원의 크기에 있어서 차이는 있으나, 종래의 방법들에서 언급된 원의 왜곡정도를 확인하기에는 어려움이 있다.

나. 제안된 방법의 패턴

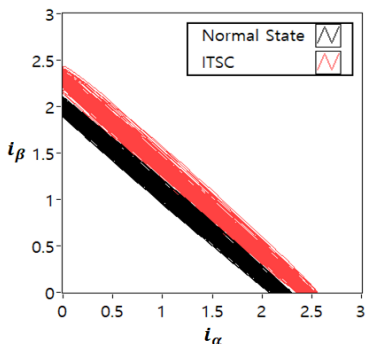


Fig. 7. Pattern of the proposed method.

그림 7. 제안된 방법의 패턴

본 논문에서 제안된 전류 또는 자속의 크기만을 고려한 패턴은 다음 그림 7과 같다.

그림에서  $i_\alpha$ 가 0에 가까운 값은 전류의 크기만을 나타내고,  $i_\beta$ 가 0에 가까운 값은 자속의 크기만을 나타낸다.

실험의 방법은 전류 데이터만을 고려했기 때문에 자속 성분을 제거한  $i_\alpha$ 가 0의 성분만을 이용하여 분석을 실시하도록 하였다. 이때, 오차율을 고려하여  $\pm 0.02$ 를 고려한 데이터만을 고려하였다.

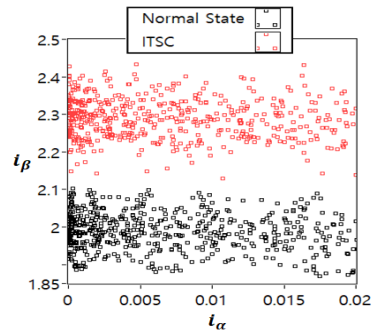


Fig. 8. Data on the ingredients of  $i_\alpha = 0$

그림 8.  $i_\alpha = 0$ 의 성분에 대한 데이터

그림 8은  $i_\alpha$ 의  $\pm 0.02$ 만을 고려한 데이터가 집약된 부분을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 약 2.1~2.2 사이 구간에 임계값을 설정할 경우 ITSC를 진단이 가능하다.

이 결과는 1분간의 데이터를 측정으로 이뤄진 결과이며, 그림 9와 같이 30분 누적 측정된 결과, ITSC 15,642개, 정상상태 15,642개로 총 31,284개 데이터로 분석하였다.

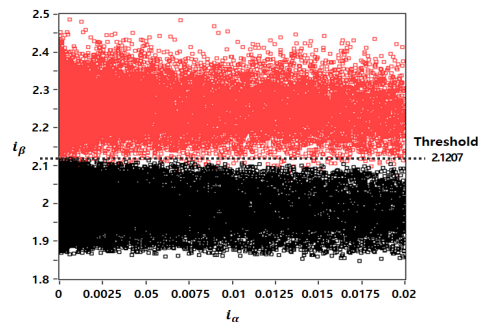


Fig. 9. Data from  $I_\alpha$ , measured for 30 minutes.

그림 9. 30분간 측정된  $I_\alpha$ 의 데이터

다음 그림 10은  $i_\beta$  기준으로 교차점의 플롯 수를 파악하기 위하여 생체 및 바이오 인식 시스템의 안정도를 평가하는데 활용되는 오인식율 FAR(False Accept Rate)

과 오거부율 FRR(False Rejection Rate) 방법을 적용 하도록 하였다. 오인식율은 비정상을 정상으로 판단하는 것을 의미하며 오거부율은 정상을 비정상으로 판단하는 것을 의미한다. 이때, 오인식과 오거부의 수가 최소가 될 수 있는 점을 동일오류율 EER(Equal Error Rate)라 하며, FAR과 FRR이 일치하는 시점의  $\beta$  값을 의미한다.

이를 활용하여 정상상태와 ITSC상태의 최적의 교차점 EER은 그림에서 확인할 수 있듯이 2.10623의 값을 알 수 있다.

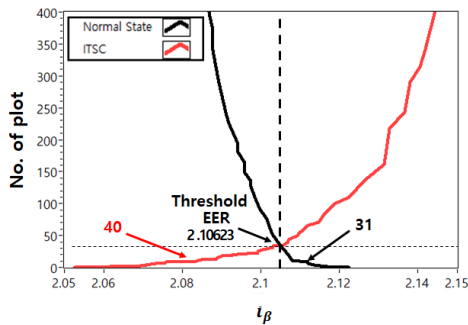


Fig. 10. Diagnostic performance analysis.  
그림 10. 진단 성능 분석

2.10623을 임계값으로 설정할 시, 정상상태를 ITSC로 오거부하는 플롯 수는 31개로 FAR 0.2[%]를 보이며, ITSC상태를 정상으로 인식하는 플롯 수는 40개로 FRR 0.26[%]로 오인식에 대한 최적의 임계값임을 알 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 ITSC 진단을 위해 모델기반 기법으로 Clarke 변환을 응용한 방법을 제안하였다. 유도전동기의 고장진단은 기동시 고장진단이 이뤄져야하나, 회전시 지속적으로 변하는 자속의 변화에 따라 해석이 어려움이 있다. 한편, Clarke 변환은 전동기의 벡터제어기법으로  $\alpha$ 축은 자속,  $\beta$ 축은 전류성분임이 알려져 있다. 이에 본 논문에서는 자속의 변화를 최소화하며, 측정되고 있는 전류성분만을 이용하기 위해 Clarke변환의  $\beta$ 축의 값을 이용하였으며, 이 값의 특징을 두드러지도록 하기 위해 EPVA에서 적용된 제곱의 방법을 적용하여  $\beta$ 축의 데이터를 특징화 시키도록 하였다. 종래의 방법은 전류와 자속을 합쳐진 상태에서 해석을 실시하는 반면, 이 방법은 측정되고 있는 시스템이 MCSA에서 전류기반으로 측정됨에 따라 전류원만을 이용하여 진단이 가능하다는 이점이 있다.

그 결과, 30분간의 누적 측정에서 임계값 2.10623로 설정할 시, 정상상태를 ITSC로 오인식하는 플롯 수는 31개로 오인식율 0.2[%]를 보이며, ITSC상태를 정상으로 인식하는 플롯 수는 40개로 오인식율 0.26[%]로 오인식됨을 알 수 있었다

### References

[1] A. Alloui, K. Laadjal, M. Sahraoui and A. J. Marques Cardoso, "Online Interturn Short-Circuit Fault Diagnosis in Induction Motors Operating Under Unbalanced Supply Voltage and Load Variations, Using the STLSP Technique," *in IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.70, no.3, pp.3080-3089, 2023.  
DOI: 10.1109/TIE.2022.3172751

[2] C. Liu, L. Xiao, J. Zou, Y. Xu and S. Li, "Analysis and Monitoring Method for Inter-Turn Short-Circuit Fault for PMSM," *in IEEE Transactions on Magnetics*, vol.59, no.11, pp.1-6, 2023.  
DOI: 10.1109/TMAG.2023.3294704

[3] Y.-J. Goh, G.-N. Kim, Y. H. Kim, B. Lee, and K.-M. Kim "Diagnosis Method for Stator-Faults in Induction Motor using Park's Vector Pattern and Convolution Neural Network," *Journal of IKEEE*, vol.24, no.3, pp.883-889, 2020.

[4] A. Siddique, G. S. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.20, pp.106-114, 2005.  
DOI: 10.1109/TEC.2004.837304

[5] W. T. Thomson, D. Rankin, and D. G. Dorrell, "On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase induction motors-industrial case histories verify the predictions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.14, pp.1372-1378, 1999. DOI: 10.1109/60.815075

[6] F. Karami, J. Poshtan and M. Poshtan, "Model-based fault detection in induction Motors," *2010 IEEE International Conference on Control Applications, Yokohama, Japan*, pp.1957-1962, 2010.  
DOI: 10.1109/CCA.2010.5611214.

[7] S. Shao, R. Yan, Y. Lu, P. Wang and R. X.

Gao, "DCNN-Based Multi-Signal Induction Motor Fault Diagnosis," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.69, no.6, pp. 2658-2669, 2020,

DOI: 10.1109/TIM.2019.2925247.

[8] J. Aguayo, A. Claudio, L. G. Vela and S. Gentile, "A survey of fault diagnosis methods for induction motors drives under inverter fault conditions," (*ICEEE*). *1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2004, Acapulco, Mexico, pp.367-372, 2004.

DOI: 10.1109/ICEEE.2004.1433910.

[9] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.37, no.5, pp.1227-1233, Sept.-Oct. 2001. DOI: 10.1109/28.952496.

[10] S. Riyadi, "Inverse Clarke Transformation based control method of a three-phase inverter for PV-Grid systems," *2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, Semarang, Indonesia*, pp.351-355, 2014.

DOI: 10.1109/ICITACEE.2014.7065770

---

## BIOGRAPHY

---

### Yeong-Jin Goh (Member)



2008 : BS degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.  
2010 : MS degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.

2016 : PhD degree in Electrical and Semiconductor Engineering, Chonnam National University.

2020.09~present : Professor, Tongmyong University

### Kyoung-Min Kim (Member)



1988 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1991 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1996 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

1997~present : Professor, Chonnam National University