

초고압 불평등 전계에서 정전링 설계변수에 대한 연구

김진성*, 서민성
국방기술품질원

A Study on the Design Parameters of the Static Ring in the Ultra-high Voltage Non-uniform Electric Field

Jin-Sung Kim*, Min-Seong Seo
Defense Agency for Technology and Quality

요약 발전소에서 생산된 전기는 여러 단계의 변전과정을 거쳐 소비자에게 전달된다. 이 때 각 소비자에게 적합한 전압으로 송전하기 위해 초기 송전단계 및 산업단지 및 공장과 같은 고전압이 필요한 경우에 사용되는 초고압변압기는 권선단부에서 고압의 불평등 전계가 형성되어 절연파괴의 위험을 내재하고 있다. 초고압변압기는 전압의 승압과 강압을 위해 권선, 철심이 가장 중요한 부품이다. 특히 권선의 경우 전압이 직접 인가되면서 전압의 크기를 변환하는데 핵심적인 역할을 한다. 이때 권선 단부는 그 형상에 의해 불평등 전계가 형성되고 특히 권선의 모서리에 높은 전계 스트레스가 발생한다. 이러한 불평등 전계에 의한 권선 단부의 전기적 응력을 분산하기 위하여 정전링을 사용하는데 이 정전링은 권선 상·하단 단부에 설치된다. 이러한 정전링을 설계하기 위해서는 다양한 변수를 고려하여야 하지만 그 중 정전링 곡률, 정전링 표면의 절연지 두께, 권선과 권선사이에 설치되는 배리어 수, 배리어 두께가 정전링에 발생하는 전계 스트레스에 어떠한 영향을 미치는지 유한요소법(Finite Element Method)을 통해 확인하였고 그 결과를 통해 정전링 설계 시 고려해야 할 사항을 제안하였다.

Abstract Electricity produced at power plants is distributed to consumers through several stages of substations. At this time, an ultra-high voltage transformer is needed in the initial transmission stage to transmit a voltage suitable for each consumer. A high voltage, non-uniform electric field is formed at the end of the winding of the ultra-high voltage transformer, which carries a risk of dielectric breakdown. The winding of the ultra-high voltage transformer is an electrode, which is the key to converting the magnitude of the voltage. A non-uniform electric field is formed along the shape of the winding end, resulting in high electrical stress. The static ring installed at the upper and lower ends of the winding is used to disperse the stress at the winding end. Several variables should be considered when designing a static ring. Among them, this study examined how the curvature of the static ring, the thickness of the insulating paper, the number of barriers, and barrier thickness affect the electrical stress of the static ring using the Finite Element Method. Suggestions to be considered when designing the static ring are proposed through the FEM results.

Keywords : Ultra-high Voltage Transformer, Non-uniform Electric Field, Static Ring, Electric Field Strength, Finite Element Method

*Corresponding Author : Jin-Sung Kim(Defense Agency for Technology and Quality)

email: jskima@dtaq.re.kr

Received April 3, 2020

Accepted July 3, 2020

Revised April 28, 2020

Published July 31, 2020

1. 서론

전력기기는 전기산업의 핵심기기로써 발전소에서 전기를 생산하고 변전소에 송전하여 여러 단계의 전압변환을 통해 소비자에게 배분하는 모든 과정에 필수적으로 사용된다.

특히 소비자에게 분배하는 과정인 변전소를 거치는데 변전소의 핵심기기가 바로 변압기이다. 변압기는 그 종류를 전압의 크기에 따라 초고압변압기, 고압변압기, 저압변압기로 분류되고, 용도 및 용량의 크기에 따라 전력용, 배전용, 가전용변압기로, 절연매체의 종류에 따라 유입, 가스, 몰드, 건식 변압기 등으로 구분된다. [1]

본 논문은 발전소에서 생산된 전기를 변전소로 이송하는 전력용 초고압변압기를 대상으로 한다. 수 백 kV이상의 전압을 변환하는 초고압변압기의 경우 권선 단부에서 발생하는 전압 스트레스를 분산하기 위해 정전링을 사용한다. 기존의 연구들은 대부분 초고압변압기 설계 시 고려해야 할 사항들을 정리하거나 특수 타입 변압기 설계 시 그 타입에 맞는 정전링을 설계한 연구는 있으나 정전링을 설계할 때 고려되어야 할 변수들과 그 연관성을 제시하지는 않았다[2-3]. 본 논문에서는 정전링 설계 시 고려되어야 할 요소들을 살펴보고 정전링 표면 전압 스트레스에 어떠한 영향을 미치는지를 유한요소법을 이용한 2D 전계해석으로 살펴보았다.

2. 시뮬레이션 모델

2.1 초고압 변압기 단부 절연 구조

권선 단부 정전링의 설계변수에 따른 전계의 세기의 차이를 확인하기 위한 시뮬레이션 모델 구조는 Fig.1과 같다.

고압, 저압권선에 인가되는 전압과 정전링과의 상관관계를 확인하기 위해 실제 실제와 달리 단순화된 모델을 적용하였다. 축대칭 모델로 해석하여 원통으로 이루어지는 고압권선과 저압권선은 레이어를 고려하지 않고 사각형으로 나타내었으며 유전율에 따른 영향을 최소화하기 위해 절연지와 절연유도 배제하였다. 정전링은 저압권선 위에 배치하였고 저압권선 한 레이어 높이만큼 절연거리를 두고 배치하였다. 정전링 역시 권선과 마찬가지로 절연지로 감싸 절연력을 키우는 것이 일반적이거나 기본 모델은 절연지를 제거하고 다른 변수에 따른 스트레스 분포를 확인하기로 하였다.

2.2 지배방정식

변압기의 절연구조는 일반적으로 절연유와 프레스토드로 구성되고 절연물은 유전율을 가지기 때문에 정적해석이 필요하다.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{1}$$

$$0 = \nabla \cdot \left(\vec{J} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \tag{2}$$

$$0 = \nabla \cdot \left\{ \left(\sigma + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla \phi \right\} \tag{3}$$

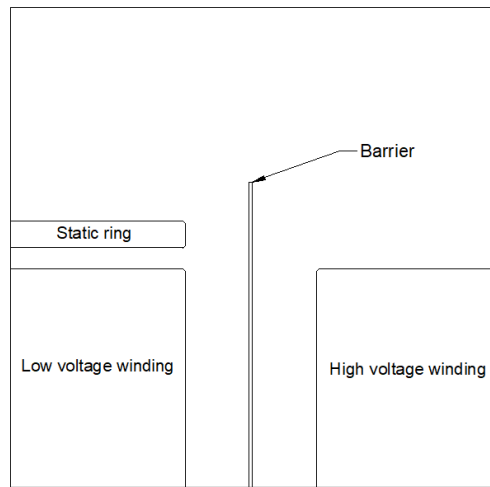


Fig. 1. The simplified structure of transformer for analysis

맥스웰 방정식의 양변에 발산을 취하고 정전계의 구성 관계식을 이용하여 식 3을 도출하였다. 또한 해석에 필요한 경계조건은 다음을 적용하였다.

$$\phi = p \text{ on } \Gamma_1 \tag{4}$$

$$\hat{n} \cdot (\epsilon \nabla \phi) + \gamma \phi = q \text{ on } \Gamma_2 \tag{5}$$

식(4)는 경계에 고정된 상수값을 적용한 Dirichlet 경계조건이고, 식(5)는 Mixed 경계조건으로 경계에 직교 방향의 변화율을 지정한다. 본 논문에서는 Dirichlet 조건으로 고저압 권선의 전압을 입력하고 해석모델 외곽 경계 중 Dirichlet 조건이 적용되지 않은 부분에 Neumann 경계 조건을 적용하였다[4-6].

3. 정전링 설계변수에 따른 결과 비교

정전링은 권선 단부에서 발생하는 불평등전계를 완화하여 권선의 절연파괴를 방지하는데 그 목적이 있다. Fig.2는 정전링이 없을 때와 정전링이 있을 때 전압의 분포와 전계강도 세기가 어떻게 형성되는지 확인할 수 있다.

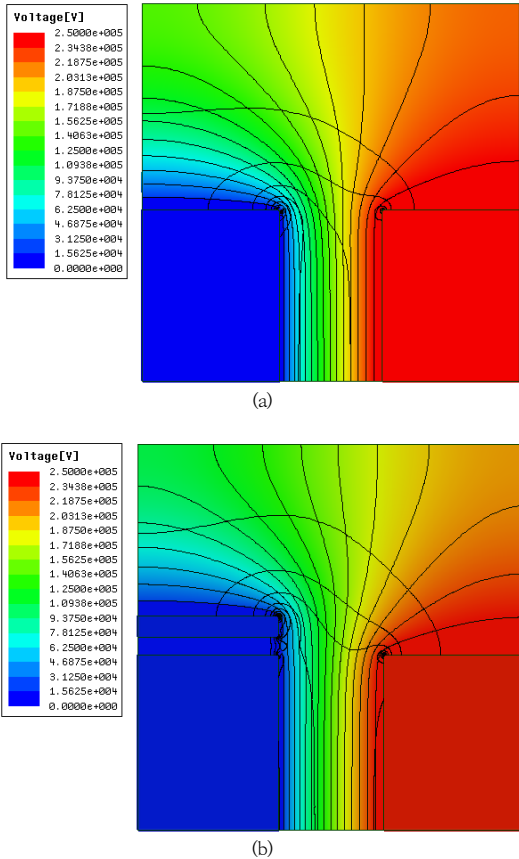


Fig. 2. Comparison of voltage and electric field strength distribution with and without static ring
 (a) Voltage and electric field strength distribution without static ring
 (b) Voltage and electric field strength distribution with static ring

Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 정전링이 없는 (a)의 경우 권선단부에서 전계의 세기가 가장 높은 것을 알 수 있다. 그에 반해 정전링을 설치한 (b)의 경우 권선단부에서 가장 높았던 전계 강도가 정전링 단부로 바뀐 것을 알 수 있다. 이렇듯 정전링을 사용하므로써 권선단부에 집중된 전계강도를 분산시켜 절연파괴를 완화 할 수 있음을 알 수 있다.

3.1 정전링 곡률에 따른 영향

Fig.2에서 확인한 정전링 단부에 집중되는 전계분포가 정전링 곡률에 따라 어떻게 변화하는지 FEM(Finite Element Analysis) 해석을 통해 비교하였다. 곡률에 따른 전계분포 변화만을 보기 위해 정전링과 권선을 싸는 절연지를 배제하고 절연유가 채워진 상태가 아닌 진공상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 입력전압은 Impulse 내전압 시험을 기준으로 250 BIL 에서 1550 BIL까지 수행하여 초고압변압기의 일반적인 시험조건을 가정하여 정전링 곡률반경을 1mm에서 20mm 까지 5mm 간격으로 변화하였을 때 그 결과를 Fig. 3과 같이 정리하였다.

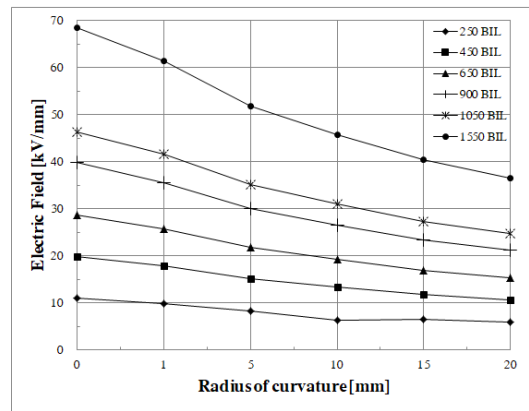
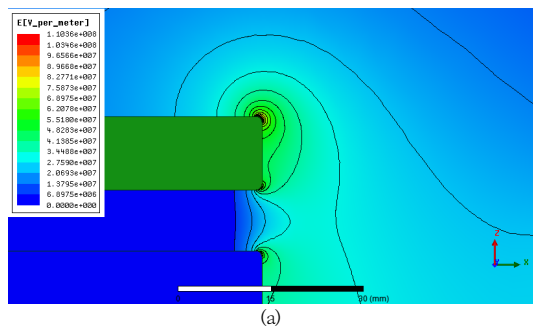


Fig. 3. Comparison of electric field strength according to radius of curvature

Fig. 3에서 가로축은 곡률반경의 크기를 나타내는데 여기서 0은 정전링이 없을 때 전계강도를 나타내는 것이다. 그래프를 통해 곡률반경이 클수록 정전링 표면의 전계 강도의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 국부적으로 집중되는 전기장을 정전링 모서리를 완만하게 해줌으로 전계의 세기가 완화되는 것을 확인하였다.



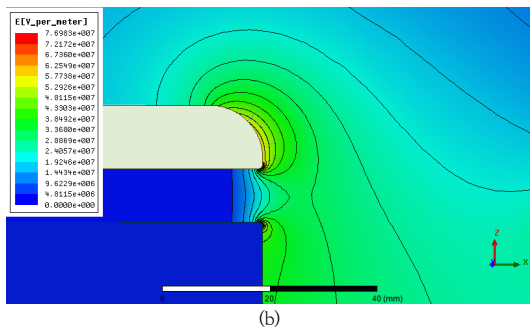


Fig. 4. Comparing of electric field distribution with difference of static ring's curvature
 (a) Electric field distribution with adopted 1mm radius of curvature static ring
 (b) Electric field distribution with adopted 10mm radius of curvature static ring

3.2 정전링 절연지 두께에 따른 영향

정전링은 보통 얇은 동박을 가공된 절연물위에 감아 전극을 형성한다. 이때 동박의 보호를 위해 절연지를 사용하는데 이는 동박의 물리적 보호뿐만 아니라 정전링 표면 전계강도 완화에도 그 목적이 있다. 이를 확인하기 위해 FEM 해석을 통하여 절연지 두께와 전계강도간의 영향을 확인하였으며, 마찬가지로 정전링의 곡률반경에 따른 영향도 같이 확인하였다.

FEM 해석은 최대 전압차가 발생하는 1550BIL을 입력전압으로 하여 3.1항에 적용한 곡률반경에 정전링표면에 절연지를 0, 1, 2, 3 mm를 감았을 때 전계강도의 차이를 비교하였다.

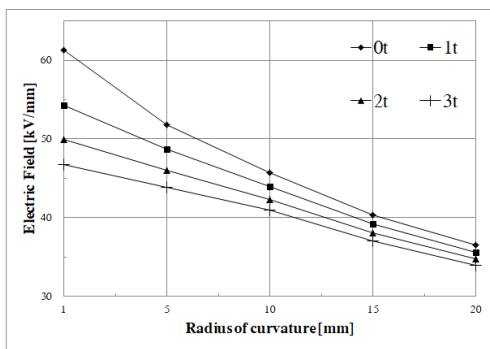


Fig. 5. Comparing of electric field strength with thickness of insulation paper on static ring

Fig. 5는 각 곡률반경을 가지는 정전링에 일정한 두께로 절연지를 감았을 경우 전계 세기의 차이를 나타내었다. 여기서 1t는 절연지 두께가 1mm를 의미한다. 곡률반경이 큰 경우 절연지를 두께가 3mm 정도 되더라도 그

차이가 크지 않지만 곡률이 거의 없는 1mm인 경우 절연지 두께에 따른 전계 세기의 차이가 확연함을 알 수 있다. 이는 전극 앞에 유전율을 가지는 절연지 표면에 축적된 양의 공간전하가 전극과 절연지 사이에 전기장의 균일성을 야기함으로써 인한 현상으로 사료된다[7-8].

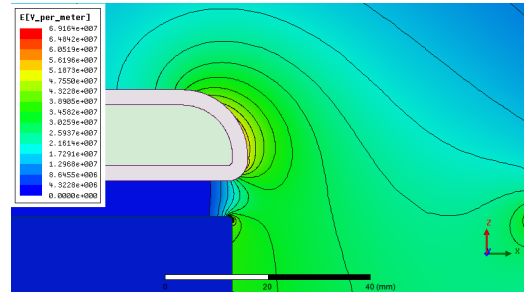


Fig. 6. Electric field distribution on paper insulated static ring with 10mm radius of curvature

3.3 전극간 배리어 수에 따른 영향

변압기 내부 고압권선과 저압권선 사이는 프레스보드라는 절연물로 배리어를 둘러 절연구간을 나누게 된다. 이는 필수적으로 설치되는 내부 구조물로서 배리어에 의한 정전링 표면 전계세기는 어떤 영향을 미칠지 확인이 필요하다. 마찬가지로 FEM 해석을 통해 결과를 확인하였고 해석조건 역시 프레스보드 배리어에 의한 영향을 확인하기 위해 정전링에는 절연지를 감지 않은 상태로 모델링하였고 정전링 곡률과 프레스보드 배리어 수에 따른 영향만 확인하였다.

프레스보드 배리어는 Fig. 1에서 표현한바와 같이 정전링 높이를 충분히 상회할 만큼의 높이로 가정하였고 최대 3개까지 설치하였을 때 전계세기의 차이를 시뮬레이션 하였다. 배리어간 간격은 배리어 수에 따라 일정한 간격을 가지도록 모델링 하였다.

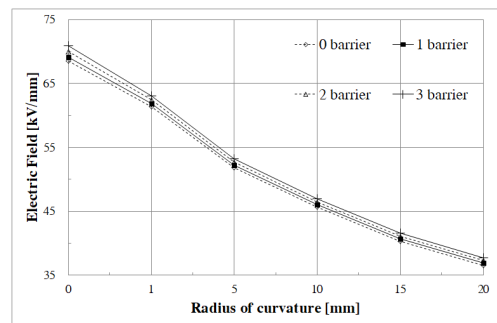


Fig. 7. Comparison of electric field strength according to the number of barriers

Fig. 7은 배리어 수에 따른 정전링 표면의 전계 세기를 나타낸 것이다. 마찬가지로 정전링은 각 곡률에 따른 전계세기를 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 배리어의 수와 정전링 표면의 전계세기는 큰 연관성이 없는 것을 알 수 있다. 오히려 배리어 수가 많을수록 정전링 표면의 전계강도는 더 높아짐을 확인 할 수 있다. 이는 상대적으로 유전율이 높은 프레스보드 배리어에 의해 절연 구간이 나뉘지면서 전극 쪽 전계분포의 밀도가 상승하여 전극에 해당되는 정전링 표면에 더 높은 전계강도가 형성된다 [9-10].

3.4 전극간 배리어의 두께에 따른 영향

전극간 배리어 개수와 마찬가지로 두께 역시 단부 전계강도에 영향을 미치는 요인이다. 하지만 이는 전기적 특성이 아닌 기계적 특성을 고려한 변수로 비록 변압기 내부의 전기적 설계 고려대상은 아니지만 이로 인한 단부 전계강도의 영향을 확인할 필요가 있다.

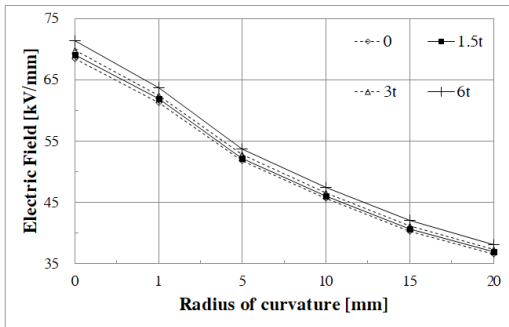


Fig. 8. Comparison of electric field strength according to the thickness of barriers

두께는 배리어가 없는 0t부터 최대 6t까지를 해석을 수행하였다. 배리어 개수에 따른 영향과 마찬가지로 정전링 표면에 큰 영향을 미치지지는 않았지만 두께가 두꺼울수록 더 큰 전계강도를 형성하는 것을 확인 하였다.

3. 결론

본 연구는 초고압변압기 권선 단부에 사용되는 정전링 설계 시 고려해야 할 정전링의 곡률반경, 절연지두께, 배리어 수, 배리어 두께의 연관성을 FEM 해석을 통해 확인 하였다.

Table 1은 정전링 곡률과 각 설계변수에 따른 전계강

도의 감소율을 비교한 것이다. 곡률이 없는 정전링을 기준으로 전계강도의 크기가 줄어든 만큼 그 비율을 표현 하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 곡률반경 20mm를 기준으로 정전링 곡률반경이 크고 절연지 두께가 두꺼우면 표면 전계강도는 최대 50% 줄어들지만 고저압 권선 사이에 설치되는 배리어는 전계강도 변화에 영향을 끼치지 못하고 오히려 배리어 수가 많거나 두꺼울 경우 정전링의 표면전계강도 감소율이 44%로 상승함을 확인하였다.

Table 1. Comparison of electric field strength reduction rate according to design variables

	Radius of curvature				
	1	5	10	15	20
Radius	10%	24%	33%	41%	47%
Thickness of paper	32%	36%	40%	46%	50%
Number of barrier	8%	22%	31%	39%	45%
Thickness of barrier	7%	21%	31%	39%	44%

본 논문은 초고압변압기 정전링 설계변수의 연관성을 통하여 향후 다양한 사양의 초고압변압기 정전링을 설계할 때 적용 가능하다는데 의의가 있다.

추가적으로 고저압 권선 사이의 절연거리와 정전링의 높낮이에 따른 전계강도 변화에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] W. D. Yeo, C. H. LEE, Y. S. HA, "A Overview Power Transformer Technology Trends", *Electrical Machinery and Energy Conversion Systems Society Annul Fall Conference*, KIEE, Korea, pp.151-154, Oct. 2003.
- [2] Zhang Peihong, Dan Tao, Shi Yajuan, "Parametric design of transformer end insulation structure and electric field analysis", *Journal of Harbin University of Science and Technology*, Vol.17, No.2, pp.76-79, 2012.
- [3] Yuanming SHUAI, Liangxian ZHANG, Chun YANG, Shanshan ZHANG, Zhao ZHANG, "Optimal Design of Static Plate Used in UHV Converter Transformer Based on PSO Algorithm", *International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE, China, pp.848-851, 2018.
- [4] M. Yea, J. Park, H. Lee, S. Lee, K. J. Han, "Electric Field Analysis of the Main Insulation Structure of HVDC Transformer Considering Nonlinear Property of Material using Relaxation Method and FEM", *Electrical Machinery and Energy Conversion Systems Society*

Annul Fall Conference, KIEE, Korea, pp.30-32, Oct 2014.

- [5] M. Kim, S. Lee, "Electric Field Analysis of HVDC Transmission Line using Finite Element Method", *The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol.33, No.4, pp.10-15, Jul. 2019.
- [6] S. H. Yoon, D. U. Kim, W. B. Kim, J. T. Kim, "Electric Field Analysis and Partial Discharge Characteristics for Void in the Epoxy Insulation", *Society of Electrophysics and Application Annul Fall Conference*, KIEE, Korea, pp.81-82, Oct. 2014.
- [7] M. A. Benziada, A. Boubakeur, A. Mekaldi, "Numerical Modeling of Electric Field Distribution in Point-Barrier-Plane Air Gaps under AC Voltage using Finite Element Method", *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, IEEE, Algeria, Nov 2019.
DOI:<https://dx.doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9014811>
- [8] M. A. Benziada, A. Boubakeur, A. Mekaldi, "Investigations of Non-uniform Pollution Impact on Electric Field Distribution in a Point-Barrier-Plane Arrangement under AC Voltage", *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, IEEE, Algeria, Nov 2019.
DOI:<https://dx.doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9014789>
- [9] Z. ANANE, A. BAYADI, "Electromagnetic Transient Analysis of Corona characteristics under damped impulses", *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, IEEE, Algeria, Nov 2019.
DOI:<https://dx.doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9014795>
- [10] A. Moussaoui, N. Zouzou, A. Zouaghi, M. Kachi, A. Bouchelkha "Influence of the Voltage Waveform and frequency on the Elimination of Charges by a Dielectric Barrier Discharge", *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, IEEE, Algeria, Nov 2019.
DOI:<https://dx.doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.901477995>

서민성(Min-Seong Seo)

[정회원]



- 2015년 2월 : 창원대학교 기계공학부 (공학사)
- 2016년 2월 ~ 2018년 12월 : 센트랄(주) 생산관리팀
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 품질경영본부

<관심분야>

기계공학, 품질경영, 메카트로닉스, 신뢰성 공학

김진성(Jin-Sung Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 인제대학교 나노공학부 (공학사)
- 2012년 2월 : 부산대학교 대학원 전자전기공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 2018년 12월 : LS산전 설계 및 기술개발 과장
- 2019년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원 품질경영본부

<관심분야>

전자기응용, 품질경영, 정보통신, 에너지변환