

석탄화력 발전소 최적 변압운전 부하 범위 개선에 대한 연구

A Study on the Improvement of Optimal Load Range for Sliding Pressure Operation of coal-fired Power Plant

이 상 훈*, 왕 민 석*, 위 상 봉*, 손 영 득*

Sang-Hun Lee Lee*, Min-Seok Wang*, Sang-Bong Wee*, Yung-Deug Son*

Abstract

The coal-fired power plant is operated by a combined operation method, which is operated by sliding pressure operation under low load and by fixed pressure operation under high load for improved efficiency. The combined operation is divided into two and three valve open modes. Each plant is operated by selecting the turbine control valve mode in accordance with the manufacturer's recommendation, but is not really operating at the optimal sliding pressure operation according to load range, also Load range of each plant is configured differently. The internal efficiency of the high-pressure turbines is reduced due to loss of the turbine valves and the plant efficiency is reduced. To solve these problems, In this paper, the optimum load range is selected through the analysis method of thermal performance by each load in order to improve the optimum variable pressure operation load range by turbine control valve mode.

요 약

석탄화력발전소는 저부하에서 효율 향상을 위해 변압운전으로, 고부하에서는 정압으로 운전하는 복합변압운전 방식으로 운전하고 있으며, 복합변압운전에는 2밸브 및 3밸브 전개모드로 구분되어 운영되고 있다. 각 발전소는 제작사 권고에 따라 터빈제어밸브 모드를 선택하여 운전하고 있으나 최적의 변압운전 부하범위로 운전되고 있지 않고, 각 발전소별 부하범위 또한 상이하게 구성 되어있다. 최적의 변압운전 부하범위로 설정되지 않으면 터빈밸브 교축 손실 발생에 따른 고압터빈 내부효율 저하가 발생되어 플랜트 효율이 저하된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 터빈제어밸브 모드별 최적의 변압운전 부하 범위를 개선하기 위해 각 부하별 열 성능 분석 방법을 통해 최적의 부하범위를 선정하고자 한다.

Key words : Power Plant, Turbine, Sliding Pressure, Constant Pressure, Control Valve, 3 Valve, 2 Valve

* Dept. of Mechanical Facility Control Engineering, Korea University of Technology and Education

★ Corresponding author

E-mail : ydson@koreatech.ac.kr, Tel : +82-41-560-1297

※ Acknowledgment

This paper was supported by Education and Research promotion program in 2019

Manuscript received Jun. 5, 2019; revised Jun. 24, 2019; accepted Jun. 27, 2019.

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

화력발전은 석유, 석탄, 천연 가스, 폐기물 등 연료에서 나온 열에너지를 보일러, 증기터빈, 발전기 등의 기계장치를 통해 전기에너지로 변환하는 것이다. 국내 석탄 표준 화력인 500 MW급 석탄 화력의 수명 연장 및 출력 증강을 위한 실증 사업과 함께 고효율화, 안정화 등에 대한 연구가 국내·외에서 다각도로 이루어지고 있다[1]-[7]. 열역학적 공정 모델링 및 해석을 통한 발전 사이클의 열과 경제성에 관한 분석[1], 기존의 복잡한 제어로직 대

신 모델 기반의 간단한 제어로직에 의한 효율적으로 운영방법[2], 부하 증·감발 시험 및 과도운전 시험을 위한 초임계압 관류형 변압운전의 시뮬레이터 시스템 개발[3], 비선형 밸브제어 시스템[8] 등이 연구되고 있다. 또한, 증기터빈의 주증기(main steam) 압력 혹은 계통 주과수 급변 등에도 발전기의 안정적인 운전을 위해 터빈 속도 및 부하 제어 등의 제어 기능에 관련된 절차 및 방법을 제시하고 있다[4]. 증기터빈을 이용하는 화력발전소의 터빈제어는 터빈 입구에 설치된 주증기 제어밸브(Control Valve : CV)에 의해 터빈으로 유입되는 증기량이 조절되며 이는 보일러로부터 공급되는 증기상태 변화에 따라 터빈속도 및 발전기 출력이 결정된다. 500MW급 석탄화력 발전의 터빈설비 계통도 및 제어화면의 일부분을 그림 1에 나타내었으며 정상운전의 경우 주증기는 주증기 차단밸브(Main Stop Valve : MSV)와 CV를 통과하여 고압터빈에 유입된다. 발전소 부하를 조정하기 위한 방법으로는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 터빈의 입구 밸브 CV를 그대로 유지한 상태로 보일러의 부하, 즉 보일러 출구의 압력을 변경하여 운전함으로써 부하를 변경하는 방법이며, 두 번째 방법은 보일러의 부하를 유지한 상태에서 터빈 입구 밸브를 교축 시킴으로써 부하를 변경하는 방법이다. 이러한 방법의 차이에 따라 변압운전(Sliding Pressure Operation)과 정압운전(Constant Pressure Operation)으로 운전 방법을 구별할 수 있으며 대부분의 발전소는 이 두 가지 방법을 구간으로 나누어 병행하여 적용하는 하이브리드(정압+변압) 운전 방법을 사용한다. 그림 2는 MSV와 CV의 연결 구성에 대한 상

세도를 나타내었다. 발전소 운전 시 저부하에서는 효율 향상 및 원활한 제어를 위하여 그림 2와 같이 터빈 첫 번째 단에 4개의 구역으로 나누어져 있으며, 각 구역은 4개의 터빈 제어밸브(CV#1~4)로 연결되어 운전된다. 이 때 4개의 밸브 중 3개를 함께 제어하여 운전하는 방법을 3밸브 전개모드 운전이라 하며, 2개의 밸브를 함께 제어하여 운전하는 방법을 2밸브 전개모드 운전이라 한다.

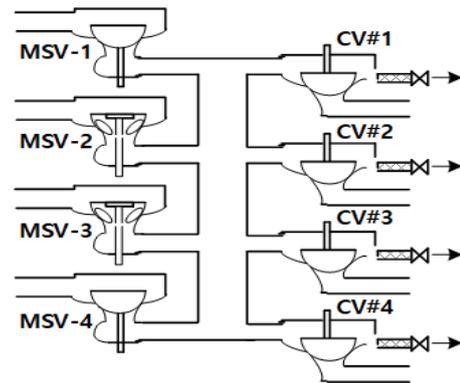


Fig. 2. Configuration of CV and MSV in turbine.
그림 2. CV와 MSV의 구성 터빈제어밸브

3밸브 전개모드 운전은 부하에 따라 터빈제어밸브 CV#1,2,3(동시)→#4 순서로 여는 방식이며 2밸브 전개모드 운전은 CV#1,2(동시)→#3→#4 순서로 여는 방식이다. 이러한 터빈 밸브 전개모드는 운전 방법에 따라 터빈 제어 밸브와 연결된 첫 단 입구의 증기 흐름에 영향을 주어 발전소 효율이 변화될 수 있다. 또한 변압운전에서 정압운전으로 전환되는 시점을 최적으로 설정하지 않으면 터빈밸브 교축 손실 발생에 따른 고압터빈 내부효율 저하가 발생

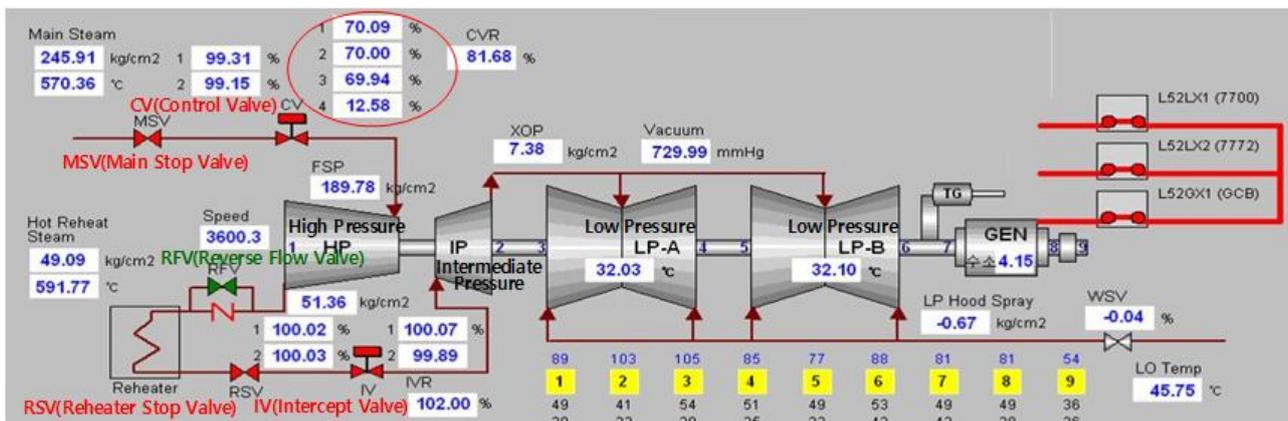


Fig. 1. Schematic and HMI of steam turbine power plant.
그림 1. 스팀터빈설비 계통도 및 제어화면

되어 플랜트 효율이 저하된다. 본 논문에서는 500 MW급 석탄화력 발전소의 터빈 밸브 전개모드에 따른 최적의 변압운전 구간을 설정하여 발전소 플랜트 효율 상승 시키는 방안을 제시하였다.

II. 본론

변압운전 방식은 부하에 따라 주증기 압력을 변화시켜 운전하는 방법으로 터빈에 유입되는 증기를 터빈 제어밸브에서 교축 없이 터빈을 운전하는 방식이다.

1. 복합 변압운전

복합변압운전은 변압운전 방식과 정압운전 방식을 복합한 방법으로 변압운전 부하 영역에서는 터빈 제어밸브 4개중 2~3개를 전개한 상태로 보일러에서 주증기 압력을 조절하여 부하를 조절하고, 정압영역(최저 및 최고 부하 영역)에서는 터빈 제어밸브를 교축 하여 부하를 조절하는 운전 방식으로 열소비를 향상 효과를 얻을 수 있고 제한된 범위에서 신속한 순간 부하제어도 할 있는 방식이다. 그림 3과 같이 밸브전개 방법에 따라 2밸브 전개 모드와 3밸브 전개 모드로 구분된다. 3밸브 전개모드 운전은 약 90% 이하 부하까지 3개의 밸브를 동시에 제어하여 출력을 조절하고 90% 이상의 부하에서는 1개의 밸브를 제어하여 출력을 조절한다. 2밸브 전개모드 운전은 약 75% 부하까지 2개의 밸브를 동시에 제어하여 출력을 조절하고 75%~90% 부하까지는 1개의 밸브를 이용하여 출력을 조절한다. 3밸브 전개모드 운전은 고부하에서 1개의 밸브로 제어되어 정압운전 구간에서 빠른 주파수 응답이 가능하고 변압운전 시 나머지 3개의 밸브를 개로한 상태로 보일러 토출압력과 온도로 출력을 제어하기 때문에 교축 손실이 적어 상대적으로 성능이 좋다. 그러나 변압 구간에서 빠른 주파수 응답이 어렵고 저부하에서 3개의 밸브를 제어하기 때문에 부하가 낮아질수록 교축손실이 2밸브 전개모드 대비 커지게 된다.

2. 변압운전 효과

변압운전 효과로는 보일러 수냉벽 응력 감소, 터빈 내부효율 향상 및 터빈축 열응력 감소에 따른 효율 상승이 있다.

가. 열응력 감소효과

변압운전의 경우 그림 4와 같이 저부하 영역에서 낮은 압력에 의한 증기온도 특성은 정압운전보다 높은 특성을 보여준다. 또한 일정온도 유지가 가능하여 온도변화에 따른 기기 열응력이 감소하여 설비 수명이 향상되고, 발전소 정지시 터빈 내부 급속온도가 높아 재기동시 온도 일치가 용이하여 기동시간이 단축되며 신속한 부하변동이 가능하다.

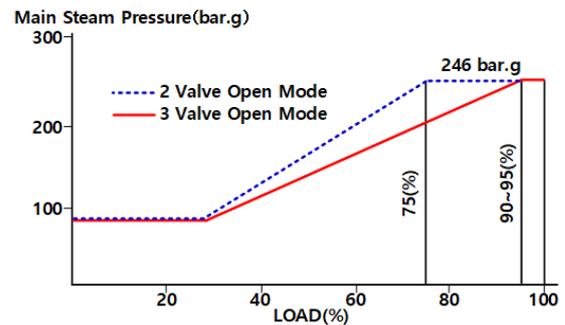


Fig. 3. Pressure characteristic of the 2/ 3 valve open mode. 그림 3. 2/ 3 밸브 전개 모드의 압력특성

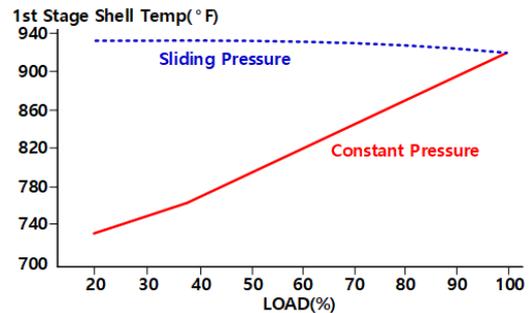


Fig. 4. Thermal stress characteristic in Sliding/Constant Pressure Operation. 그림 4. 정압/변압 운전시 열응력 특성

나. 열소비율 개선

변압운전 방식 채택시 일시적 부하 증감발의 경우 주증기 압력저하에 따른 열역학 손실에도 불구하고 정압운전 방식에 비하여 터빈 내부효율 향상과 보일러 급수펌프 동력감소 등 발전소 전체 열소비율 개선효과가 있다.

다. 재열기 열부하 감소

재열기는 고압터빈에서 포화온도까지 팽창한 증기를 재열하여 온도를 높인후 중·저압터빈에 공급한다. 정압운전에 비해 재열기의 열부하가 감소하므로 보일러 설계 및 운용 측면에서 상대적으로

유리하고, 전 부하범위에 걸쳐 재열기 온도가 균일해지므로 재열기 온도 조절능력이 향상된다.

3. 변압운전 부하범위

국내 석탄화력 발전소의 변압운전 부하범위 및 압력을 비교하면 표 1과 같으며 각 발전소 호기별 동일 용량, 동일 밸브전개 모드 경우에도 변압운전 부하범위 및 압력범위가 다른 것을 알 수 있다.

Table 1. Load range and pressure comparison in sliding pressure operation.

표 1. 화력발전소 변압운전 부하범위 및 압력비교

Power Plant	Capacity (MW)	Valve open mode	Load range (%)	Pressure range (kg/cm ²)
Unit O	500	2-Valve	28.8~98	249
Unit O	500	2-Valve	31.2~90	247.5
Unit O	550	3-Valve	28.4~84.9	92~250
Unit O	550	3-Valve	30~90	86~250

OO발전소 설계 기준을 고려하면 저부하에서도 플랜트의 효율의 최적화를 위해 변압운전을 최대 490MW까지 하도록 설계되었으나 변압운전의 최적화를 위한 열소비율 분석을 하여 최대 변압운전 구간을 450MW로 운전하고자 한다.

4. 최적의 변압운전 부하범위 선정

발전소 터빈밸브 전개모드에 따른 고압터빈 효율을 검토함으로 전체 열소비율에 미치는 영향을 도출해 낼 수 있다. 변압운전에는 고압터빈 효율뿐만 아니라 추가로 열소비율에 영향을 줄 수 있는지 검토가 필요하며 열소비율 변경 요인으로는 다음과 같다.

- 고압 터빈 효율
- 주증기 압력 변경 시 터빈 가용 에너지 (Available Energy) 변화
- 저부하에서의 주증기 온도 변화
- 저부하에서의 재열증기 온도 변화
- 주증기 압력 변화에 의한 BFP (Boiler Feed -water Pump) 소요 동력 변화

가. 최저안정부하(Minimum Stable Load)

석탄화력 발전소에서 최저 안정부하란 경유나 가스 등의 보조연료 없이 석탄 전소만으로 보일러 노

내에서 안정된 연소상태를 유지하면서 연속적인 운전이 가능한 가장 낮은 부하조건으로 정의하며, 최저 안정부하는 아래의 사항을 고려하여 30%이내 부하에서 결정한다.

나. 최고안정부하(Maximum Stable Load)

최고 부하범위는 복합변압 운전방식의 2밸브 및 3밸브 전개 모드의 경우 부하속응성, 주파수 추종 운전, 열소비율을 고려하여 선정한다.

다. 열 성능 분석 및 해석

열 성능 분석 프로그램 TFR(Throttle Flow Ratio)을 이용하였으며 TFR은 설계 값 대비 압력과 온도가 동일한 경우, 전체 유량 대비 현재의 유량 비라고 볼 수 있다. 일반적으로 발전소 제어에는 출력 100% 부하를 기준으로 하나, 이는 터빈용량의 100%(VWO : Valve Wide Open, 밸브 전개 출력) 대비 작으며 설계 기준과 다소 차이가 있다. 따라서 설계 기준의 터빈용량 100%(VWO)를 기준으로 식 (1)을 이용하여 분석하였다.

$$TFR = \frac{(Q/\sqrt{P/v})_{Current}}{(Q/\sqrt{P/v})_{VWO}} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량, P 는 압력, v 는 비체적이다.

5. 2, 3밸브 전개모드에서의 변압운전

2밸브 전개모드 운전에서 변압운전 구간의 성능 변화를 시험하였다. 운전조건으로 연속운전 출력기준을 480MW, 450MW, 400MW으로 하고 최대 변압운전 구간을 현재 설정된 490MW에서 480MW, 470MW, 460MW, 450MW로 변경하여 부하별 열 성능 분석을 하였다. 시험 결과는 그림 5와 같으며 480MW 연속 운전출력 기준으로 변압운전 범위를 490MW에서 450MW로 변경시 최대 0.05% 효율 향상을 나타내고 있다. 이처럼 최적의 변압운전 구간을 조정함에 따라 발전 플랜트 성능이 개선되었다.

3밸브 전개모드 변압운전 조건을 2밸브 전개모드 운전 조건과 동일하게 하였으며 최대 변압운전 구간을 현재 설정된 490MW에서 480MW, 470MW, 460MW, 450MW로 변경하여 부하별 분석을 하였다. 시험 결과 그림 6과 같으며 3밸브 전개모드에서는 2밸브 전개모드와는 달리 성능저하가 나타나 오히려 개선효과가 없는 것으로 나타났다.

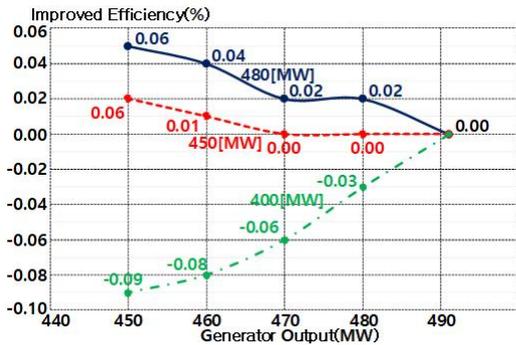


Fig. 5. Efficiency of sliding pressure operation at the 2 valve open mode.

그림 5. 2밸브 전개모드에서 변압운전의 효율

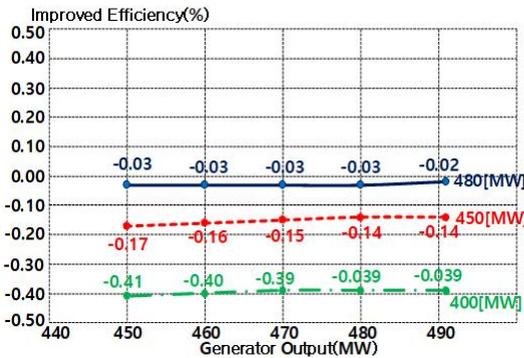


Fig. 6. Efficiency of sliding pressure operation at the 3 valve open mode.

그림 6. 3밸브 전개모드에서 변압운전의 효율

III. 결론

석탄화력 발전소 저부하에서 효율 향상을 위해 변압운전으로 운전되고 있으나, 최적의 변압운전 부하범위로 설정이 되지 않아 오히려 플랜트 효율 저하가 발생되고 있다. 발전소 터빈밸브 전개모드인 2밸브 및 3밸브 전개모드에서 각각의 부하 400MW, 450MW, 480MW 열 성능 시험결과 2밸브 전개모드는 연속출력운전 기준 480MW시 최대 변압운전구간을 490MW → 450MW 변경시 플랜트 효율 0.05% 상승하는 것으로 분석되었다. 3밸브 전개모드는 변압운전 변경 시 효율 상승효과는 없는 것으로 분석 되었다. 이는 표준석탄 화력은 2밸브 전개모드의 온도, 압력 조건에 맞게 터빈 구성품이 설계된 것으로 판단된다. 최근 발전소는 주증기와 재열증기의 압력과 온도를 높이는 추세이며, 3밸브 전개모드 운전에서는 고온, 고압을 견딜 수 있는 구성품으로 설계하여 적용하고 있다. 본 논문은 기

존 운영되고 있는 발전소에 대해 열 성능 분석을 통해 터빈 밸브 전개모드에 따른 변압운전 부하 범위를 재설정하여 적용함으로써 플랜트 효율이 상승됨을 입증하였으며 이에 따른 연료비 절감 등의 효과가 예상된다.

References

[1] S. H. Park, D. R. Rhim, C. S. Yeom, J. M. Cha, J. U. Shin, C. S. Lee, "Thermo-Economic Evaluation of 500 MW Class Coal Fired Power Plant Combined with Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle," *Journal of Energy & Climate Change*, vol.11, no.1, pp.1-12, 2016.

[2] G. P. Lim, M. S. Kim, I. K. Choi, D. Y. Park, H. Y. Kim, "The Development Of Program Based On Model to Control Generator Output in Power Plant," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol.59, no.3, pp.614-622, 2010.

[3] J. K. Lee, Y. S. Ahn, H. Jung, Y. K. Lee, B. S Han, "The Development of Full-Scope Replica Simulator for Variable Supercritical Pressure Once-through Fossil Power Plants," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol.4, no.3, pp.392-398, 1998.

[4] J. H. Woo, I. K. Choi, D. Y. Park, J. A. Kim, "Procedure to Verify the Turbine Control Function of a Steam Turbine Power Plant," in *Proc. of the 2010 KIEE Conference*, pp.1693-1694, 2010.

[5] Goutam Khankari, Sujit Karmakar, "Operational optimization of turbo-generator (TG) cycle of a 500MW coal-fired thermal power plant," *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, pp.1-6, 2014.

DOI: 10.1109/34084POWERI.2014.7117650

[6] I. Y. Choi, J. A. Kim, "A Study on Turbine Bypass System in a 500MW Rated Coal Fired Supercritical Thermal Power Plant with Sliding Pressure Operation," in *Proc. of the 2008 KIEE Conference*, pp.1663-1664, 2008.

[7] S. I. Seo, H. Y. Park, S. N. Lee, "Computational Studies on the Combustion and Thermal Performance

of the Coal Fired Utility Boiler,” *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol.21, no.3, pp.157-166, 2009.

[7] Y. D. Son, J. J. Jin, “A Nonlinear PD Controller Design and Its Application to MOV Actuators,” *Studies in Informatics and Control*, vol.28, no.1, pp.5-12, 2019.

BIOGRAPHY

Sang-Hun Lee (Member)



2004 : BS degree in Electrics Engineering, Chonbuk National University.
2016 ~ : MS degree in Mechanical Facility Control Engineering, Korea University of Technology and Education.

2005~Present : Deputy General Manager of Korea Western power Co., LTD

Min-Seok Wang (Member)



2004 : BS degree in Electrics Engineering, Hankyong National University.
2016 ~ : MS degree in Mechanical Facility Control Engineering, Korea University of Technology and Education.

1991~2002 : Electrical & Instrument Engineer, Korea Electric Power Co.(KEPCO)

2002~ : General Manager, Korea Western Power Co., Ltd.(KOWEPO)

Sang-Bong Wee (Member)



1979 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1981 : MS degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1990 : PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1981~1983 : Junior Researcher of Hyouosung Heavy Industry Co., LTD

1983~1995 : Senior Researcher of Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), Korea

1995~Present : Professor, Korea University of Technology and Education.

Yung-Deug Son (Member)



1997 : BS degree in Control and Instrumentation Engineering, Korea Maritime University.

2001 : MS degree in Ocean Electro-Mechanical Engineering, Kobe University.

2015 : PhD degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

1998 : Research student, Tokyo Institute of Technology.

2001~2009 : Senior Research Engineer, Hyundai Heavy Industries Co., LTD

2016~Present : Assistant Professor, Korea University of Technology and Education.