

가치평가법을 사용한 정전관련비용의 산정

이 범* · 김정민* · 최남섭**

Power Interruption Cost Calculation based on Value-based Methodology

Buhm Lee* · Kyoung-Min Kim* · Nam-Sup Choi**

요약

본 연구에서는 SCDF를 사용하여 전력공급의 가치를 산정하고, 부하점별 중요도를 다면적인 평가를 하는 방법을 제시한다. 이의 방법으로 지속정전, 순간정전, 전압 Sag/Swell에 대응할 수 있는 SCDF를 제공하고, 이 SCDF를 사용하여 정전과 관련하여 어느 부하점에 어느 정도의 비용이 발생하는지를 계산하였으며, 이들 비용을 다면평가를 통해 어느 부분이 어느정도 취약한지를 평가하고 어느 부분의 확장이 필요한 지를 수치적으로 설명할 수 있도록 하였다. 본 연구를 우리나라의 실배전계통에 적용하여 평가하고 유용성을 검증하였다.

ABSTRACT

This study presents a Power Quality(PQ) costs calculation methodology based on Value-Based Methodology. A SCDF including Voltage Sag Costs is presented to calculate Sustained Interruption Costs, Momentary Interruption Costs, and Voltage Sags Costs. Authors compared between interruption costs without Back-Up Power Supply and interruption costs with Back-Up Power Supply, and showed reduction of interruption costs by investing Back-UP Power Supply by multi-lateral analyzation. By applying this method to the real system, evaluated and analyzed power quality of the system.

키워드

Power Quality, Evaluation, Reliability, Value-Based Methodology, Interruption Cost
전력 품질, 평가, 신뢰도, 가치 평가법, 정전 비용

1. 서론

여수국가산단, 광양의 제철소와 같은 대형 플랜트들은 공장설비와 함께 자체적인 전원설비를 갖고 있는데, 생산설비의 투자에 비해 전원설비의 확충이 부족하여 문제가 발생하기도 한다. 수년전의 대규모정전의 경우 피해를 입은 플랜트와 피해가 없는 플랜트가 있는데,

이들의 피해를 가른 것은 자체 발전설비의 확충과 같은 전원설비가 얼마나 잘 운영되고 있는지에 따라 판가름 났다. 단순히 많은 액수의 투자가 이루어졌다는 사실이 바람직한 것이 아니라, 꼭 필요한 부분에 꼭 필요한 투자의 중요성이 그만큼 크다고 할 수 있다.

전력품질에서 가장 중요한 부분이 정전과 관련된 부분이라 할 수 있는데, 정전은 지속적인 정전, 순간적인

* 전남대학교 전기및반도체공학부(buhmlee@jnu.ac.kr, kkm@jnu.ac.kr, nschoi@jnu.ac.kr), * Received : Feb. 26, 2021, Revised : Mar. 23, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021

* Dept. of Electrical and Semiconductor Eng. Chonnam National Univ.

† 교신저자 : 최남섭

† Corresponding Author : Nam-Sup Choi

• 접수일 : 2021. 02. 26

• 수정완료일 : 2021. 03. 23

• 게재확정일 : 2021. 04. 17

정전, 정전은 아니지만 전압이 일시에 낮아지는 전압 Sag를 들 수 있다. 지속적인 정전과 순간적인 정전을 평가하기 위해 신뢰도가, 전압 Sag를 평가하기 위한 전압 Sag/Swell 이 사용된다.

IEEE에서는 신뢰도의 개념을 정의하고 평가하기 위해서 IEEE Std. 1366[1]을 발표하였는데, 이 기준은 정전에 대한 기준과 용어를 정의하고 있으며 종합적인 평가를 위한 지수로 SAIFI, SAIDI, ASIFI, ASIDI, MAIFI 등의 지수로 표시하는 방법을 제시하였다. 또한 IEEE Std. P1564[2]를 통하여 전압 Sag/Swell을 SARFIx 와 같은 지수로 표시하는 방법을 제시하고 있다.

IEEE Std.로 제시하는 방법은 이미 발생하여 낮아진 전력품질을 평가하는데 초점을 맞추고 있기 때문에, 전력 품질을 예측하고 전력 품질을 개선하고자 하는 배전계통의 운영자들은 이들 표준안을 사용하는데 어려움이 있었다. 이를 개선하여 계획단계에 있어 실제적으로 측정하기 어려운 부하점의 신뢰도를 예측하여 계산하기 위하여 Roy Billinton[3] 등은 확률론적 방법으로 개별 기기의 고장율과 지속시간을 이용하여 부하점의 신뢰도를 예측할 수 있는 계산 방법을 제시하였다.

또한 IEEE Std.에서는 여러 가지 지수를 제시하고 있는데, 이들 지수는 고장빈도라던가 고장지속시간 같은 다양한 평가의 측면에서 전력 품질을 나타내는 방법으로, 단위 및 크기 또한 상이한 것이 현실이다. 이를 극복하기 위해 신뢰도를 금전적인 액수로 바꾸어 평가하는 방법[4] 등이 사용되어 왔으나 전력 품질에 대한 금액에 대한 입장차이가 있어서 한계가 있으며, 신뢰도, 전압 Sag, 고조파 등을 포함하여 금액으로 표시하는 방법에 대한 시도도 일부 연구자에 의해 진행되어 왔다.

본 연구에서는 전력 품질의 비용을 산정한 Sector Customer Damage Function(SCDF)를 사용하여 전력 공급의 가치를 산정하고, 부하점별 중요도를 다면적인 평가를 하는 방법을 제시한다. 이 방법을 사용하면 추가적으로 계통을 확충함에 있어서 어느 부하점이 어느 정도 중요하며 어떤 부하점을 우선적으로 확장하는지를 결정하는데 도움을 줄 수 있다.

이의 방법으로 지속정전, 순간정전, 전압 Sag/Swell에 대응할 수 있는 SCDF를 제공하고, 이

SCDF를 사용하여 정전과 관련하여 어느 부하점에 어느 정도의 비용이 발생하는지를 계산하였으며, 이들 비용을 다면평가를 통해 어느 부분이 어느 정도 취약한지를 평가하고 어느 부분의 확장이 필요한 지를 수치적으로 설명할 수 있도록 하였다. 본 연구를 우리나라의 실 배전계통에 적용하여 평가하고 유용성을 검증하였다.

II. 전력의 품질

2.1 부하점에서의 전력품질

부하점에서의 전력 품질은 전압, 주파수, 지속정전, 순간정전, 전압 Sag/Swell, 고조파 등을 들 수 있는데, 이들에 대한 기준은 IEEE Std. 1159[5]에 의해 정하고 있다. 이중, 주파수는 계통 전체를 통해서만 제어될 수 있으며(P-F Control) 전압은 지역적으로 무효 전력을 사용해서 제어될 수 있기에(V-Q Control), 배전계통의 전력 품질에 포함시키지 않고 있다.

정전과 관련한 전력 품질로는 지속정전과 순간정전 관련하여 IEEE Std. 1366[1]에서 표준을 정하고 있고, 전압 Sag/Swell과 관련하여 IEEE Std. P1564[2]에서 예비표준을 발표한 바 있다. 이 외에도 고조파와 관련하여 IEEE Std. 519[6]에서 표준을 정하고 있다.

2.2 전력 품질의 표현

(1) 신뢰도

Roy Billinton[3] 등에 의해 확률론적 방법으로 표현되는 신뢰도는 부하점 i 에서 발생하는 기기의 지속 고장율을 λ_i^s [fr/yr]로, 고장지속시간을 r_i^s [min]으로, 순간고장율을 λ_i^M [fr/yr]로 계산하여 적용한다.

(2) 전압 Sag/Swell

IEEE Std. P1564[2]에서 전압 Sag/Swell은 부하점에서 전압강하 또는 상승을 Sag $\lambda_i^{sag x}$ [fr/yr] (x [%] Sag($x=50,70,90$))로 측정하여 계산하도록 하고 있다. 본 표준에는 전압 상승분도 포함하고 있으나, 정전과 관련된 고장에서 주로 영향을 미치는 것은 전압 Sag이다.

2.3 전력품질의 단위 및 문제점

전력품질의 단위는 빈도[fr/yr], 지속시간[min] 등과 같이 여러 개의 단위로 구성되어 있으며, IEEE Std. 1366[1]의 지수 역시 SAIFI나 ASIFI 같은 지수는 빈도로 표시하고 있고 SAIDI나 ASIDI 같은 지수는 지속시간으로 표시하고 있어서 단위가 각기 상이하다. 이렇게 단위가 상이함에 따라 동일한 잣대로 평가하기 어려운 것이 현실이다.

이를 해결하기 위하여 신뢰도를 금전적인 액수로 바꾸어 평가하는 방법[4]이 사용되어 왔으며, 모든 전력 품질을 금전적인 액수로 바꾸어 평가하려는 시도가 있어 왔다.

III. 가치평가법에 의한 전력품질 평가

3.1 Sector Customer Damage Function(:SCDF)

신뢰도를 가치로 평가하기 위해서는 정전이 발생하는 경우의 부하크기 및 고장지속시간을 금전적으로 변환시켜야 하는데, 이의 방법으로 SCDF를 구성하여 산정하는 방법을 사용한다. SCDF는 중립적인 기관에서 부하점에 대한 실질적인 조사를 통해 얻을 수 있는데, 우리나라의 전력설비에 대해서도 정전비용 연구[7]이 있었다. 하지만 우리나라의 전력설비에 대한 연구는 바로 적용하기에 어려움이 있어서, 본 연구에서는 외국에서 연구된 신뢰도 및 전압 Sag와 관련된 SCDF[8,9]를 적용하였다. 본 연구에서 사용된 SCDF를 표 1에 나타내었다.

표 1. SCDF
Table 1. SCDF
[1000 Won]

Load Type	Sag	0-1 [hr]	20 [hr]	60 [hr]	240 [hr]	480 [hr]
Large User	0.039	0.854	1.282	1.891	3.373	7.004
Industrial	0.064	1.381	3.288	7.722	21.39	47.44
Commercial	0.013	0.324	2.524	7.269	26.62	70.56
Agricultural	0.003	0.051	0.292	0.552	1.754	3.502
Residential	0.001	0.001	0.079	0.410	4.177	13.34
Govt.&Inst.	0.002	0.037	0.314	1.268	5.574	22.13
Office & Bldg.	0.170	4.061	8.396	17.90	58.51	101.3

표 1의 SCDF를 살펴보면, 사무용 부하의 정전비용이 가장 크고, 그 다음이 산업용과 상업용이라고 할 수 있다. 농업용 전기는 정전이 되어도 정전비용이 그다지 발생하지 않는 반면, 상업용의 경우는 정전시간이 증가함에 따라 급속하게 비용이 증가하는 특성을 보이고 있다. 사무용의 경우는 모든 정전시간에 대해서 가장 크게 나타난다. SCDF는 여러 기관에서 작성된 바 있는데, 작성된 기관에 따라 상당한 차이를 보이고 있다. 예를 들어 플랜트의 경우는 일정시간까지는 정전비용이 급격히 증가[10]하다가 일정시간이 지나면 완만하게 증가하는 특성을 갖는 반면, 냉동식품의 경우는 초기에는 비용이 급증하지 않으나 정전시간[11]이 증가함에 따라 급속하게 비용이 발생하는 특성을 보인다.

3.2 정전 및 전압 Sag 비용

본 연구에서는 지속정전, 순간정전, 전압 Sag를 SCDF를 사용하여 비용으로 산출하였으며, 전압 Sag의 경우 일정 크기를 초과하지 않는 것은 전압 Sag로 일정 크기를 초과하는 것을 순간정전으로 계산하였다. 이들 비용의 계산은 식 (1), (2), (3)과 같이 하였다.

(1) 신뢰도

$$MR_s = \sum_{i=1}^N L_i \{SR(r_i^s) \lambda_i^s\} \text{ [천원/yr]} \quad (1)$$

$$MR_M = \sum_{i=1}^N L_i \{SR(r_i^M) \lambda_i^M\} \text{ [천원/yr]} \quad (2)$$

(2) 전압 Sag

$$MS = \sum_{i=1}^N L_i \{SR(r_i^{sag x}) \lambda_i^{sag x}\} \text{ [천원/yr]} \quad (3)$$

여기서,

$SR(r_i^*)$: i 부하점에서의 SCDF

λ_i^* : i 부하점에서의 고장빈도[fr/yr]

r_i^* : i 부하점에서의 고장지속시간[hr]

L_i : i 부하점에서의 부하[MW]

N : 부하점의 수

S : 지속정전

M : 순간정전

$sag x$: x [%] 전압강하의 Sag

IV. 사례연구

4.1 배전계통

본 연구에서는 우리나라의 대형 배전계통을 대상으로 사례연구를 하였다. 배전계통은 그림 1에 부하특성은 표 2에 나타내었다. 전압 Sag는 실측자료를 확보할 수 없어서 1년에 4번 정도 영향이 있다고 가정하였다.

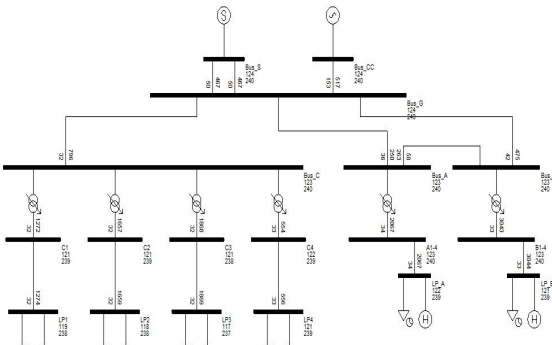


그림 1. 배전계통

Fig. 1 Distribution system

표 2. 부하특성

Table 2. Load characteristic

Load Point	Load (Induction) [kW]	Load (Others) [kW]	Number Of Load	Volt. Sags	Load Type
LP_A	14,190	54,808	200	4.0	Office & Bldg.
LP_B	35,370	67,774	300	4.0	Industrial
LP1	20,000	19,000	100	4.0	Office & Bldg.
LP2	37,000	16,000	80	4.0	Industrial
LP3	23,000	29,000	120	4.0	Commercial
LP4	0	12,000	60	4.0	Office & Bldg.

4.2 정전 및 전압 Sag 비용의 산정

그림 1의 계통과 표 2의 부하특성을 대상으로 하여 표 1의 SCDF와 식(1-3)으로 지속정전비용, 순간정전비용, 전압 Sag비용을 계산한 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3. 정전 및 전압 Sag 비용

Table 3. Interruption and voltage sag cost

[1000 Won]

Load Point	Sustain Interruption Cost	Momentary Interruption Cost	Volt. Sag Cost	Load Type
LP_A	83,946	60,742	106,250	Office & Bldg.
LP_B	51,235	30,928	59,795	Industrial
LP1	240,853	102,539	60,056	Office & Bldg.
LP2	130,496	47,387	30,725	Industrial
LP3	138,209	10,907	6,123	Commercial
LP4	74,109	31,550	18,478	Office & Bldg.
(Tot)	718,848	284,053	281,427	

그림 1의 배전계통은 LP_A와 LP_B는 기존에 있는 설비이고, LP1 - LP4는 새로 건설하는 설비인데 LP_A와 LP_B만큼 백업전원이 잘 갖추어져 있지 않다. 부하점 별로 지속정전비용, 순간정전비용, 전압 Sag비용을 그림 2에 나타내었다.

Interruption and Volt. Sags Cost

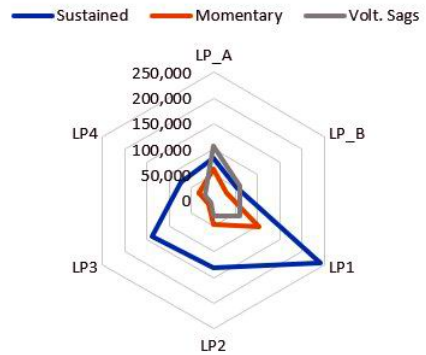


그림 2. 정전 및 전압 Sag 비용

Fig. 2 Interruption and voltage sags cost

그림 2에서 LP1 - LP4에서 지속정전비용이 크게 나오는 특성을 보이고 있는데, 이는 LP_A와 LP_B와 같은 백업전원이 없기 때문에 고장지속시간이 길어져서 발생하는 결과이다.

4.3 백업 전원을 고려한 비용의 산정

그림 1의 계통에 LP1 - LP4에 백업전원을 공급하는 경우에 발생하는 비용을 계산하였고, 이를 표 4에 나타내었다.

표 4. 백업전원 공급시의 비용

Table 4. Costs with Power Supply Back-Up
[1000 Won]

Load Point	Sustain Interruption Cost	Momentary Interruption Cost	Volt. Sag Cost	Load Type
LP_A	83,946	60,742	106,250	Office & Bldg.
LP_B	51,235	30,928	59,795	Industrial
LP1	94,999	102,539	60,056	Office & Bldg.
LP2	52,698	47,387	30,725	Industrial
LP3	43,625	10,907	6,123	Commercial
LP4	29,230	31,550	18,478	Office & Bldg.
(Tot)	355,733	284,053	281,427	

표 4에서 백업전원을 공급해도 LP1 - LP4의 지속정전비용만 줄어들 뿐, LP_A, LP_B의 지속정전비용은 줄어들지 않으며 순간정전비용과 전압 Sag 비용은 변함이 없음을 알 수 있다. 부하점 별로 지속정전비용, 순간정전비용, 전압 Sag비용을 그림 3에 나타내었다.

Inetrruption and Volt. Sags Cost with Power Supply Back-Up

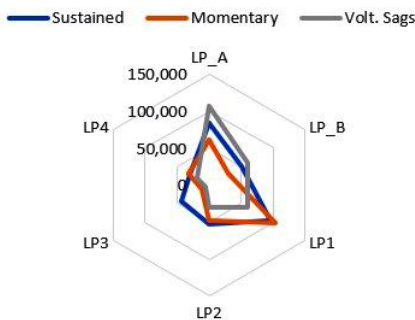


그림 3. 백업전원 공급시의 비용

Fig. 3 Costs with power supply back-up

그림 3은 새로 확장되는 LP1 - LP4에 백업전원을 공급함에 따라 지속정전비용이 줄어들며, 이로 인해 보다 정전과 관련한 비용을 작게 할 수 있음을 보여주고 있다.

4.4 백업 전원의 효과

표 3-4와 그림 2-3으로부터 백업전원을 확보하여 비상시에 전력공급을 하는 경우의 정전비용 감소의 정도를 그림 4에 나타내었다.

Reduction of Sustained Interruption Cost by Power Supply Back-Up

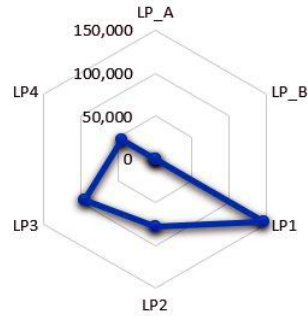


그림 4. 전원백업으로 인한 지속정전비용의 감소

Fig. 4 Reduction of Sustained interruption cost by power supply back-up

그림 4로부터 LP1은 크게 정전비용이 감소하며 LP2, LP3도 상당한 비용감소가 함을 알 수 있다.

이와 같은 비용감소의 주된 원인은 백업전원이 있는 경우 복구시간이 짧기 때문이다. 백업전원을 확보하더라도 고장빈도[fr/yr]를 줄여주는 못하지만, 고장지속시간[min]을 전원을 절체할 수 있는 시간(일반적으로 30[min])으로 줄여주기 때문에 정전지속시간 감소로 인한 비용감소이다. 그렇기 때문에 IEEE Std. 1366에서 제시하는 고장빈도를 나타내는 SAIFI나 ASIFI의 경우 백업전원이 있어도 크게 개선되지 않지만, 고장지속시간을 나타내는 SAIDI나 ASIDI의 경우는 크게 개선된다. 정전과 관련된 부분을 지수로 나타내는 경우에는 이들을 서로 살펴가면서 분석을 해야 하지만, 정전과 관련된 부분을 비용으로 나타내면

쉽게 어느 정도의 비용이 감소하는지를 알 수 있고, 비용이 크게 감소하는 부분에 대해 보강을 하면 쉽게 신뢰도 등을 높일 수 있다.

설비의 보강시에 계산해야 하는 중요한 부분은 백업전원을 확보하는데 들어가는 비용이다. 만약 백업전원설비비용보다 정전비용감소가 크다면 효과가 매우 클 것으로 예상되며, 백업전원설비비용에 비해 정전비용감소가 크지 않다면 상대적으로 효과가 작을 것으로 예상된다.

V. 결 론

본 연구에서는 가치평가법을 사용하여 정전과 관련한 요소인 지속정전, 순간정전, 전압 Sag의 비용을 산정하고, 비용의 개념으로 배전계통을 평가할 수 있도록 하였다.

(1) SCDF를 도입하고, 여기에 전압 Sag 비용을 추가하여 배전계통에 대해 정전과 관련한 비용을 계산할 수 있도록 하였다.

(2) 확장 중에 있는 실 배전계통에 지속정전비용, 순간정전비용, 전압 Sag비용을 산출하여, 배전계통을 확장할 때 정전과 관련한 비용이 증가할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 확장부분에 백업전원을 확보하는 방법으로 정전과 관련한 비용을 계산한 결과, 정전빈도가 감소하는 것은 아니기 때문에 순간정전이나 전압 Sag가 감소하는 것은 아니지만, 정전지속시간을 감소시킴으로 인해 정전비용이 감소함을 알 수 있었다.

(4) 설비투자비용 대비 정전비용이 보다 감소하는 부분에 대해 설비투자를 하면, 보다 경제적으로 운전할 수 있음을 알 수 있었다.

(5) 향후 전력품질 전반에 대해 평가하고 비용을 감소시킬 수 있는 방안에 대해 연구하고자 한다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2019년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업(플랫폼)의 결과입니다.

References

- [1] IEEE, "IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, IEEE Std. 1366", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2001.
- [2] M. Bollen, D. Sabin, and R. Thallam, Voltage-Sag Indices - Recent Developments in IEEE P1564 Task Force, *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*, Montreal, QC, Canada, 2003, pp. 34-41.
- [3] R. Billinton and R. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", New York, *Springer*, 1984.
- [4] R. Billinton and P. Wang, "Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis Using Analytical and Sequential Simulation Techniques," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, no. 4, 1998, pp. 1245-1250.
- [5] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std. 1159", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1995.
- [6] IEEE, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 1992.
- [7] C. Park, S. Choi, and C. Huh, "Assessment of Interruption Costs for Residential Customers," *Journal of the the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 18, no.4, 2004, pp. 131-137.
- [8] Y. Bin, W. Xiu-Li, B. Zhao-Hong, and W. Xi-fan, "Distribution Network Recon-figuration for Reliability Worth Enhancement," *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2002, pp. 2547-2550.
- [9] P. Heine, P. Pohjanheimo, M. Lehtonen, and E. Lakervi, "A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 17, no. 2, 2002, pp. 290-296.

- [10] K. Song, Y. Kim, and Y. Bae, "Study on Multi Parameter Measurement and Analysis of Distribution High Voltage Cable Connection Part," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 1, 2021, pp. 53-60.
- [11] J. Joo, J. Oh, Y. Lee, and K. Park, "ESS Optimization and Stable Operation for Battery Level Calculation and Failure Prediction Algorithm," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 1, 2020, pp. 71-78.

저자 소개

이범(Buhm Lee)



1981년 고려대학교 전기공학과
졸업(공학사)
1989년 고려대학교 대학원 전기
공학과 졸업(공학석사)
1995년 고려대학교 대학원 전기
공학과 졸업 (공학박사)

1995년 ~ 현재 전남대학교 교수

김경민(Kyoung-Min Kim)



1988년 고려대학교 전기공학과
졸업(공학사)
1991년 고려대학교 대학원 전기
공학과 졸업(공학석사)
1996년 고려대학교 대학원 전기
공학과 졸업 (공학박사)

1997년 ~ 현재 전남대학교 교수

최남섭(Nam-Sup Choi)



1987년 고려대학교 전기공학과
졸업(공학사)
1989년 KAIST 전기및전자공학과
졸업(공학석사)
1994년 KAIST 전기및전자공학과
졸업 (공학박사)

1995년 ~ 현재 전남대학교 교수

