

## 해상풍력발전단지의 해상변전소 변압기 적정 용량에 관한 연구

(A Study on the Adequate Capacity of Substation Transformer for Offshore Wind Farm)

문원식\* · 조아라 · 허재선 · 배인수 · 김재철\*\*

(Won-Sik Moon · Ara Jo · Jae-Sun Huh · In-Su Bae · Jae-Chul Kim)

### Abstract

This study suggests the methodology to decide the number and adequate capacity of substation transformer in a large-scale offshore wind farm (OWF). The recent trend in transformer capacity of offshore substation is analyzed in many European offshore wind farm sites prior to entering the studies. In order to carry out the economic evaluation for the transformer capacity we present the cost models which consist of investment, operation, and expected energy not supplied (EENS) cost as well as the probabilistic wind power model of wind energy that combines the wind speed with wind turbine output characteristics for a exact calculation of energy loss cost. Economic assessment includes sensitivity analysis of parameters which could impact the 400-MW OWF: average wind speed, availability, discount rate, energy cost, and life-cycle.

Key Words : Economic Evaluation, Offshore Substation, Redundancy, Sensitivity Analysis, Transformer Capacity

### 1. 서 론

2013년까지 유럽에 설치된 풍력발전기는 117GW에 이르며, 연간 생산되는 전기에너지는 257TWh인데 이는 유럽 전체 에너지 사용량의 8%에 이르는 양이다 [1]. 2030년까지 유럽은 육상풍력의 경우 250GW, 해상풍력의 경우 150GW 용량의 풍력단지 설치를 목표

로 하고 있다[2]. 특히 2050년까지 북유럽에서 남유럽 바다에 이르는 거대 해상풍력발전단지를 메시 형태의 거대 발전단지로 연계할 목표를 두고 적극적인 기술 개발을 진행하고 있다[3]. 우리나라에서도 서남해안을 중심으로 대규모 해상풍력발전단지를 건설할 목표로 사업을 진행하고 있다[4].

해상풍력발전단지는 바다에 설치된 다수의 풍력터빈에서 전기에너지를 생산하고 이를 육상계통으로 전송하기 위한 발전시설로써 육상의 풍력발전단지과 비교하여 많은 설치 투자뿐만 아니라 유지보수와 설비 폐기까지 많은 비용이 소요된다. 따라서 모든 요소에 있어서 비용을 절감하도록 설계하는 것이 필수적이며, 필요한 시스템 가용성의 달성과 자본 투자 및 운전비

\* Main author : Ph.D candidate with Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.

\*\* Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.

Tel : 02-824-2416, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

Received : 2015. 6. 22

Accepted : 2015. 7. 6

용의 절감 사이에서 균형을 찾아야 한다[5].

본 논문에서는 해상변전소의 투자비용과 운영비용, 그리고 변압기의 고장률을 통한 신뢰도 비용을 고려하여 해상변전소를 구성하는 모든 비용이 최소화되는 적정 변압기 용량 및 설치 개수에 관한 방법을 제시한다. 또한 풍속 특성을 반영하기 위한 확률론적 풍력발전 모델을 적용하였으며, 우리나라에서 계획 중인 400MW 시범단지의 사례연구를 통해 실질적인 연구 결과를 제시하였다.

## 2. 해상풍력발전단지 구성

해상풍력발전단지의 구성은 그림 1과 같이 단지의 규모 또는 형태에 따라서 다양하게 이루어진다. 크게 풍력터빈과 각 풍력터빈을 연결하는 해저케이블로 구성된 내부 전력망과 효율적인 에너지 변환을 위한 변압기가 탑재된 해상변전소, 그리고 해상변전소와 육상연계점을 연결하는 외부 전력망으로 구성된다[6].

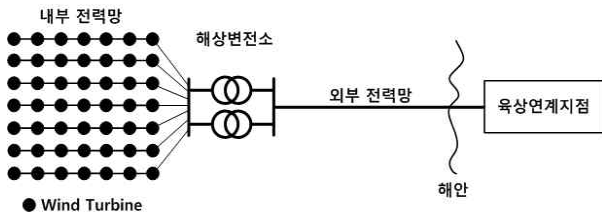


Fig. 1. Configuration of offshore wind farm

내부 전력망은 해상풍력발전단지 내의 풍력터빈들을 해저케이블을 통해 연결하여 각 풍력터빈에서 생산되는 에너지를 해상변전소로 집약시키는 역할을 한다. 해상변전소는 내부 전력망의 배전급 전압레벨(33kV)을 외부 전력망의 고압레벨(154kV)로 승압시켜 각 풍력터빈에서 생산된 전력을 보다 효율적으로 육상으로 전송할 수 있게 된다. 해상변전소와 육상연계지점을 연결하는 외부 전력망은 해상변전소를 통해 승압된 고압의 전압레벨로 해상풍력발전단지에서 생산된 에너지를 해저케이블을 통해 육상으로 전송하게 된다.

유럽을 중심으로 해외 해상풍력발전단지의 해상변

전소 설치 사례를 분석하여 표 1에 나타냈다[7]. 대부분의 해상풍력발전단지에서 해상변전소를 건설하여 육상의 전력계통과 연계하고 있다. 변압기는 대부분 1-2대로 구성되며 풍력발전단지의 용량대비 약 110~130%의 변전소 용량으로 구성되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 변압기의 고장으로 인해 발생하는 손실비용과 운영비용 등을 초기투자비용과 비교하여 해상변전소를 건설 시에 적정 예비율(Redundancy)을 산정해야함을 의미한다.

Table 1. Installation examples of offshore substation in overseas

해상풍력단지 (국가)	풍력단지 용량(MW)	변압기 용량(MVA)	개수	변전소 용량(MVA)
Alpha Ventus (독일)	60	75	1	75
Barrow (영국)	90	120	1	120
Lillgrund (스웨덴)	110	120	1	120
Ormonde (영국)	150	85	2	170
Belwind Phase 1 (벨기에)	165	185	1	185
Gunfleet Sands (영국)	173	120	2	240
Walney Phase 1 (영국)	184	120	2	240
Walney Phase 2 (영국)	184	180	1	180
Borkum West 2 (독일)	200	225	2	450
Humber Gateway (영국)	219	140	2	280
EnBW Baltic 2 (독일)	288	150	2	300
Thanet (영국)	300	180	2	360
Veja Mate (독일)	400	240	2	480

### 3. 변압기 용량 분석을 위한 고려사항

#### 3.1 해상풍력발전단지 특성

해상 변전소를 설계할 때 중요한 것은 전반적인 시스템 가용성이 미치는 영향과 운전비용, 초기 자본 투자비용에 따른 설계 결과를 명확하게 이해하는 것이다[5]. 해상풍력발전단지 내의 많은 컴포넌트들 중 해상변전소는 단지로부터의 에너지가 집약되는 곳으로 해상변전소 내 변압기 고장시 전력전송에 직접적으로 영향을 주게 된다[8]. 결국 변압기 예비율을 결정하는 문제는 에너지 관점의 신뢰도 측면에서 매우 중요한 부분을 차지한다. 공급지장 에너지를 계산하기 위해서는 컴포넌트의 고장률, 고장시 평균 수리시간 및 이와 관련된 비용 데이터가 필요하게 되며 최종적으로 이를 통해 컴포넌트의 예비율을 결정할 수 있게 된다. 이 때 계산된 결과를 비용으로 환산하여 연간 손실금액을 구할 수 있게 된다[9].

또한 풍력발전단지의 발전원은 바람이기 때문에 풍력단지가 설치되는 곳의 바람자원 특성을 분석하는 것은 매우 중요하다. 특히 풍력발전기에서 생산된 전기에너지가 육상으로 송전되기 위해서는 반드시 변전소의 변압기를 거치기 때문에 변압기의 고장은 전체 전력전송에 직접적인 영향을 미치게 된다. 바람을 통해 풍력발전기에서 생산된 전력이 변압기의 고장으로 인해 전력전송이 이뤄지지 않는다면 오히려 풍력터빈에 남아있는 전력이 풍력발전 단지의 주파수에 악영향을 미치게 되어 2차 손실까지 발생할 수 있다. 따라서 풍속의 빈도와 풍력터빈의 출력 특성을 통한 풍력발전 단지의 확률론적 전력생산량 도출은 변압기 고장으로 인해 발생하는 공급지장 비용을 산출하는데 중요한 요소가 된다.

#### 3.2 해상풍력발전단지의 출력 모델

해상변전소의 변압기 용량 설계는 발생 가능한 투자 및 손실비용을 최소화해야 한다. 해상 구조물의 특징을 고려한다면, 전력망 고장 발생 시 고장 복구 시간이

육상보다 길어질 것이고, 그로인해 발전된 전력을 송전하지 못하는 손실에 대한 정확한 계산이 필요하다. 따라서 전력손실비용과 고장 시 공급지장 에너지 비용의 정확한 계산을 위해 풍력발전단지의 확률론적 출력 모델이 필요하다[10].

풍력단지 지역의 풍속에 관한 확률분포와 풍속에 대한 풍력터빈의 출력특성을 통해 발전 출력에 대한 풍력발전단지 출력에 대한 확률밀도 함수를 도출한다. 발전단지의 출력에 대한 확률밀도함수는 발전단지의 평균 전력생산과 변전소 변압기의 고장에 따른 신뢰도 비용 산출에 응용된다[11]. 참고문헌에서 제시된 수식을 이용하여 풍속과 설치된 풍력터빈의 출력특성을 통한 풍력터빈의 평균 출력을 식 (1)과 같이 구할 수 있다[12-13].

$$P_{avg} = \int_0^{P_{WT}} x \cdot f_p(x) dx \quad (1)$$

여기서  $P_{avg}$  : 풍력터빈의 평균 출력(MW)

$P_{WT}$  : 풍력발전단지 용량(MW)

$x$  : 풍력터빈의 출력(MW)

$f_p(x)$  : 풍력터빈 출력  $x$ 의 확률

### 4. 변압기 용량 산정을 위한 비용모델

해상변전소 내 변압기뱅크 구성 결정과 용량 산정 시 고려되는 비용요소를 초기투자비용과 변전소 운영비용, 공급지장비용 등 세 가지로 구분하였다.

#### 4.1 초기투자비용

초기투자비용이란 해상풍력발전단지의 해상변전소 구성에 대한 비용을 의미하며 변압기 설비비용, 설치 및 주변설비 비용으로 구성되며 식 (2)를 통해 제시하였다[14].

$$C_{inv} = \frac{3}{2} \times \alpha_N \times (A_t + B_t \times S_{rated}^\alpha) \quad (2)$$

여기서  $A_t$  : 오프셋 상수,  $-1.5244 \times 10^8$

- $B_t$  : 기율기 상수,  $2.7043 \times 10^5$
- $\alpha$  : 변압기 용량 지수, 0.4473
- $S_{rated}$  : 변전소 용량(VA)
- $\alpha_N$  : 다수 변압기 설치에 대한 조정률

### 4.2 변전소 운영비용

변전소의 운영비용( $Cost_{operation}$ )은 변압기의 손실 비용( $C_{loss}$ )과 유지보수비용( $C_{r/m}$ )을 포함하며, 수식 (3)-(5)에 나타내었다. 변압기의 손실비용은 풍력터빈에서 생산된 전력이 변압기를 통과하며 발생하는 손실을 의미한다[14]. 또한 변압기 유지보수비용은 변압기 고장에 따른 수리비용과 점검비용을 포함한다.

$$Cost_{operation} = C_{loss} + C_{r/m} \quad (3)$$

$$Cost_{loss} = C_e \times \sum_{i=1}^N \left( S_n \times P_0 + \frac{P_1}{S_n} \times S_{in}^2 \right) \quad (4)$$

$$Cost_{r/m} = N \times (Cost_{repair} \times \lambda + Cost_{mt}) \quad (5)$$

- 여기서  $C_e$  : 전력판매 단가
- $N$  : 변압기 수
- $S_n$  : 변압기 정격 용량(VA)
- $S_{in}$  : 변압기 입력 전력(VA)
- $P_0$  : 무부하 손실 파라미터(pu)
- $P_1$  : 부하 손실 파라미터(pu)
- $C_{repair}$  : 변압기 고장시 예상 수리비용 (억원/회)
- $C_{mt}$  : 변압기 연간 점검비용(억원/회)
- $\lambda$  : 변압기 고장률(회/년)

또한  $P_0$ 과  $P_1$ 은 각각 다음 수식 (6)과 (7)에 나타내었다.

$$P_0 = -0.0018 \times S_n + 0.73 \quad (6)$$

$$P_1 = -0.0082 \times S_n + 3.37 \quad (7)$$

### 4.3 공급지장비용

공급지장비용이란 해상변전소 변압기의 고장으로 수리 또는 변압기 교체 기간 동안 전송하지 못한 공급 지장 에너지 비용을 의미한다. 고장이 발생하면 변압기 용량에 해당하는 송전 가용량을 잃어버리게 되어 풍력터빈에서 전기를 생산하더라도 육상으로 전송하지 못하게 되어 손실비용이 발생한다. 이를 수식 (8)에 표현하였으며, 변압기의 비가용 확률  $P_{unavail}(i)$ 은 수식 (9)에 나타내었다[12].

$$Cost_{EENS} = C_e \times 8760 \times \sum_{i=1}^N P_{unavail}(i) \times P_{avg} \quad (8)$$

$$P_{unavail}(i) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (9)$$

- 여기서  $P_{unavail}(i)$  :  $i$  개 변압기의 비가용 확률
- $\lambda_i$  :  $i$  개 변압기의 고장률(회/년)
- $\mu_i$  :  $i$  개 변압기의 수리율(회/년)

### 4.4 변압기 비용 모델을 위한 파라미터

해상변전소의 변압기 용량에 따른 비용을 산출하기 위한 파라미터를 표 2에 제시하였다[15].

Table 2. Parameters for cost model of offshore substation

항목	수치	비고
다수 변압기의 설치 조정률	2대: 130% 3대: 160%	변압기 단가 기준
변압기 부대설비 및 설치 비용	50%	변압기 단가 기준
선박대여료	2.8억/day	계획수리비용 기준
선박대여기간	9일	해양조건에 영향 받음
수리기간	6개월	변압기 교체로 인한 비 가동 시간
유지보수시간	8시간	연간 유지보수 시간
유지보수비용	1,400만원/h	인건비
변압기 고장률	0.03	변압기 열화에 따라 상이

## 5. 사례연구

### 5.1 모의 해상풍력발전단지의 용량 평가

본 절에서는 앞서 제시한 해상변전소 변압기 비용모델을 400MW급 해상풍력발전단지에 적용하여 변압기의 적정 수량을 결정하는 사례연구를 제시한다. 모의 해상풍력발전단지에 관한 데이터는 표 3과 같으며, 해상변전소를 구성하는 변압기의 예비율을 고려한 CASE 분류를 표 4에서 제시하였다.

Table 3. Parameters of offshore wind farm

항목		수치
풍력터빈	정격용량	7MW
	터빈 수	57기
	시동풍속	3.5m/s
	정격풍속	13.5m/s
	종단풍속	25m/s
풍력자원(평균풍속)		6.94m/s
가용률(Availability)		95%
발전단가		246원/kWh
운영 주기		20년
할인율		7%
발전단지 역률		0.95

Table 4. Case classification for transformer capacity evaluation

CASE	변압기 구성	전체 용량
1	변압기 2대 50% 용량	100%
2	변압기 2대 55% 용량	110%
3	변압기 2대 63% 용량	125%
4	변압기 3대 33% 용량	100%
5	변압기 3대 38% 용량	113%
6	변압기 3대 43% 용량	128%

표 4의 변압기 구성에서 나타난 백분율은 풍력발전단지의 용량을 100% 기준으로 하였을 때의 용량을 의미한다. 즉 CASE 1의 경우 발전단지를 구성하는 풍력

터빈의 전체 용량 대비 50% 용량(200MVA)의 변압기 2대를 통해 400MVA 용량의 변전소를 구성했다는 의미이며, CASE 4의 경우 풍력터빈 전체 용량의 33% 용량(133MVA)의 변압기 3대로 400MVA 용량의 변전소를 구성했다는 의미가 된다. 위 표에서 제시한 다음의 6가지 경우로 나눠 각각의 경우를 통해 산출한 비용 결과를 그림 2에 나타냈다.

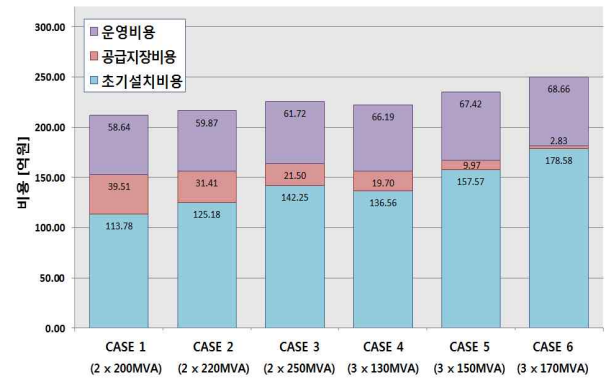


Fig. 2. Evaluation of offshore substation transformer considering redundancy

7MW 풍력터빈 57기로 구성된 해상풍력발전단지에서는 풍력발전단지 용량의 50% 용량 변압기 2대로 구성된 CASE 1에서 최소비용이 산출되었다. 변압기의 예비율이 높을수록 공급지장비용이 감소하는 경향이 나타났으나, 변압기 수량에 따른 전체 비용 변화는 초기설치비용이 변압기의 예비율 비용보다 더 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 즉 400MW 해상풍력발전단지의 경우 발전단지 용량 대비 예비율없이 50% 용량의 변압기 2대로 구성하는 것이 가장 경제적인 것으로 분석되었다.

### 5.2 사례연구 결과에 대한 민감도 분석

불확실성을 내포하고 있는 프로젝트의 발생 가능한 결과를 추정하는 대표적 방법으로 민감도 분석을 사용한다. 본 분석 단계에서는 앞서 파라미터 변동 시 사용했던 할인율, 전력판매단가, 가용률, 수명 이외에 변압기 고장율, 평균 풍속을 고려하였다. 사례연구의 최종 결과인 CASE 1을 대상으로 민감도 분석을 수행

하였으며, 현재 관심의 대상인 입력변수를 기본사례의 값을 기준으로 -15%에서 +15%까지의 범위 내에서 5%씩 변화시키면서 각 파라미터 변화에 따른 결과를 기록하여 그림 3에 나타내었다. 그 결과 평균 풍속, 발전단지의 가용률의 순서로 비용 결과에 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 결과에 미치는 영향이 큰 순서대로 데이터 관리에 주의가 필요하다는 것을 분석할 수 있었다.

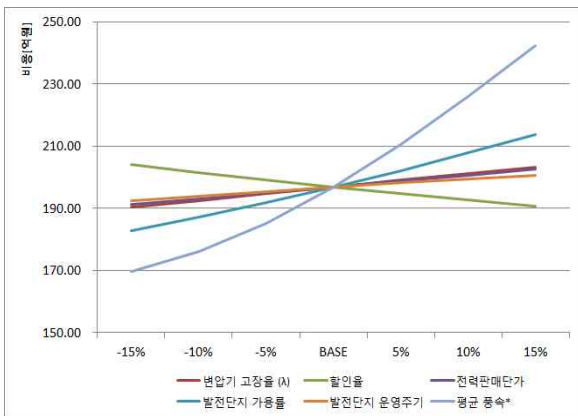


Fig. 3. Sensitivity analysis graph of CASE 1 result

## 6. 결 론

본 연구는 대규모 해상풍력발전단지의 해상변전소를 구성하는 변전소의 적정 설치 용량 및 개수를 결정하는 방안을 제시하였다. 구체적 연구에 앞서 유럽 중심의 해외 사례를 통해 해상변전소 변압기의 동향을 분석하였다. 경제성기반의 해상변전소 변압기 용량 산출을 위해 비용 모델을 제시하였으며, 신뢰성을 고려한 분석을 위해 풍속에 따른 풍력단지의 출력에 대한 확률론적 모델을 적용하여 변압기의 고장률에 따른 공급장비용을 산출하였다. 400MW 모의 해상풍력발전단지의 사례 연구를 통해 변압기의 적정 용량을 제시하였고, 파라미터의 변화가 미치는 영향을 분석하고자 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 향후 국내 대규모 해상풍력발전단지 건립 시 해상변전소 변압기의 적정 용량 및 개수를 설계하는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 향후 최적화 방법을 적용하여 해상풍력발전단지의 해상변전소 변압기 적정

용량을 산정할 수 있는 연구를 진행하고자 한다.

### 감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호: R14XA02-9)

## References

- [1] A breath of fresh air—EWEA 2007 Annual Report, European Wind Energy Association (EWEA), 2007.
- [2] Building a stable future—EWEA 2013 Annual Report, European Wind Energy Association (EWEA), 2013.
- [3] Strategic research agenda / market deployment strategy, European Wind Energy Technology Platform, European Wind Energy Association (EWEA), 2014.
- [4] J. Won, W. Moon, J. Huh, and J. Kim, "A study on Siting of HVAC Offshore Substation for Wind Power Plant using Submarine Cable Cost Model," KIEE, Vol. 62, No. 4, pp. 451-456, 2013.
- [5] CIGRE, Working Group B3.26, Guidelines for the Design and Construction of AC Offshore Substations for Wind Power Plants, CIGRE Documents 483, Dec. 2011.
- [6] John Twidell and Gaetano Gaudiosi, "Offshore Wind Power", Independent Pub Group, 2009.
- [7] G. Gerdes, A. Tiedmann, and S. Zeelenberg, "Case study: European offshore wind farms – a survey for the analysis of the experiences and lessons learnt by developers of offshore wind farms," DENA, 2007.
- [8] T. Sulawa, I. Jami, and R. Pound, "Balancing Availability, Reliability and Future Regulatory Impact Against Overall Project Capex for Offshore Wind Farms", 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium, Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, Jul. 2009.
- [9] R. Billington and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, Second Edition, Plenum Publishing Corporation, 1984.
- [10] Y. Zang, A. A. Chowdhury, and D. O. Koval, "Probabilistic wind energy modeling in electric generation system reliability assessment", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 47, No. 3, pp. 1507-1514, May/June 2011.
- [11] M. Lee, G. Kim, S. Jeong, D. Ko, and K. S. Kang, "Assessment of offshore wind energy at Younggwang in Korea", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 21, pp. 131-141, May 2013.
- [12] W. Moon, A. Jo, and J. Kim, "Economic evaluation of power grid interconnection between offshore wind power plants", KIEE, Vol. 63P, No. 4, pp. 339-344, 2014.
- [13] W. Moon, J. Kim, and J. Won, "Transformer Capacity Evaluation of Offshore Wind Farm Substation Applied to

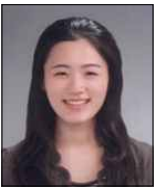
- Korean site,” T&D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES, pp.1-5, April 2014.
- [14] S. Lundberg, “Performance comparison of wind park configurations”, Dept. Elect. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., 2003, Tech. Rep. 30R.
- [15] A. R. Henderson, L. Greedy, F. Spinato, C. A. Morgan, “Optimising redundancy of offshore electrical infrastructure assets by assessment of overall economic cost,” European Offshore Wind Energy Conference 2009 Stockholm, Sweden, Sep. 14-16, 2009.

◇ 저자소개 ◇



**문원식**(文原植)

1982년 2월 15일생. 2009년 숭실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2011년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사수료.



**조아라**(趙아라)

1987년 5월 9일생. 2014년 숭실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



**허재선**(許宰善)

1985년 1월 23일생. 2009년 숭실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2011년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사수료.



**배인수**(裴引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 강원대학교 전기공학과 교수.



**김재철**(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 부총장, 전기공학부 교수. 본 학회 회장.