

하이브리드 내연발전에서 도서 운영 결손액을 고려한 분산전원 최적 용량 산정 알고리즘

손준호¹, 김미영^{2*}

¹LG전자 ESS영업/엔지니어링팀, ²호원대학교 전기공학과

Algorithm Calculating Optimal DG Capacity Considering Operating Deficit in Hybrid Internal Combustion Generation

Joon-Ho Son¹, Mi-Young Kim^{2*}

¹ESS Sales/Engineering Team, LG Electronics

²Dept. of Electrical Engineering, Howon University

요 약 지리적 특성상, 도서지역에 전력을 공급하기 위해서 ICG(Internal combustion generation)가 사용되고 있으며, 이로 인하여 상당한 운영비, 염해문제 및 환경오염이 발생하고 있다. 이러한 도서지역에 대해서, KEPCO는 매년 상당한 운영결손액을 감당하고 있는데, 특히 연료비 및 지급수수료가 운영결손액의 상당 부분을 차지하고 있다. 특히, 지급수수료를 줄이기 위하여 근거리 도서 사이의 해저케이블을 통한 ICG 통합운영(integrated ICG, IICG)이 고려되고 있다. 한편, 저탄소 사회에 대한 수요 때문에 도서지역에 분산형전원(Distributed Generation, DG)이 도입되고 있다. 이러한 상황에서, 환경적 특성으로 인해 DG 출력이 불충분한 경우 보조 동력원으로 IICG가 사용되는데, 즉, IICG에 DG를 도입한 하이브리드 내연발전(hybrid internal combustion generation, HICG)이 도입되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 HICG에서 한전 운영결손액에 상응하게 도입될 수 있는 최적 DG 용량을 산정하는 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 연료비와 최대부하 크기는 최적 DG 용량에 큰 영향을 미치며, 최대부하가 서로 다른 여러 도서에 제안된 알고리즘을 적용하여 그 유효성을 확인하였다.

Abstract Internal combustion generation (ICG) is used to supply power to islands due to geographical characteristics, but there are some problems, such as considerable operating cost, salt pollution, and environmental pollution. For these islands, KEPCO pays a significant amount of operating deficit each year, especially for the fuel and servicing costs, which account for a large portion of this deficit. Integrated ICG (IICG) through an offshore cable between near islands is being considered to decrease servicing costs. Distributed generation (DG) is also being introduced on the islands because of the demand for a low-carbon society. In hybrid internal combustion generation (HICG), DG is introduced into IICG, which can be applied because the DG output is insufficient due to environmental characteristics, and the IICG is used as an auxiliary power source. Therefore, this paper proposes an algorithm to estimate the optimal DG capacity that can be introduced in accordance with the KEPCO operating deficit in the HICG. According to simulations, the optimal DG capacity depends on the fuel cost and load capacity. The validity of the proposed algorithm was confirmed for multiple islands with different peak loads.

Keywords : Diesel generation, Hybrid internal combustion generation, Integrated operation, Operation deficit, Optimal DG capacity

본 논문은 호원대학교 학술연구비로 수행되었음.

*Corresponding Author : Mi-Young Kim(Howon Univ.)

Tel: +82-63-450-7535 email: mykim2017@howon.ac.kr

Received August 14, 2018

Revised (1st September 21, 2018, 2nd October 1, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

도서자가발전시설에 대한 운영 결손액(operating deficit)을 지원하기 위하여 놓여준 전기공급사업이 시행되고 있는데, 2018년 계획된 금액은 1,198억원이다[1]. 도서지역 운영 결손액의 상당부분은 내연발전(Internal Combustion Generation, ICG) 운영비용 중 고정비의 하나인 지급수수료(servicing cost)에서 발생하고 있다. 이는 사업소 표준정원 산정기준에 따라 발전설비에 적용되므로, 발전하는 도서를 줄이기 위하여 해저케이블을 통한 근거리 도서간 ICG 통합운영(Integrated Internal Combustion Generation, IICG)이 고려되고 있다. 그 결과, 통합하는 도서의 설비 투자비는 해저케이블 및 발전설비 증가로 인하여 증가하나, 통합되는 도서에서는 별도의 운영인력이 배치되지 않으므로 지급수수료가 상당히 감소하게 된다[2]. 그러므로 도서간 거리가 상당히 근접하고 ICG 용량이 작은 도서들은 IICG에 의해서 편익이 발생할 수도 있다. 한편, 저탄소 사회에 대한 요구에 의해 도서지역에 신재생에너지가 다수 설치되고 있고, 이에 기반한 하이브리드 내연발전(Hybrid Internal Combustion Generation, HICG)이 활발히 진행되고 있는데, 이는 IICG에 태양광발전 및 풍력발전 등의 분산전원(Distributed Generation, DG)이 도입되어 주전원으로 사용되고 IICG는 보조전원으로 사용되는 것을 말한다.

이러한 원가 결손액을 발생시키는 도서지역에 DG를 도입하는 전력공급방안을 마련하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 연구 [3]에서는 안정성 측면에서 디젤발전과 DG 접목 기준을 검토하였으며, 연구 [4]에서는 울릉도를 대상으로 신재생에너지 자원현황 및 발전소 운영실적, 전력수요시설 개발 계획에 기반한 복합전력시스템 구성방안이 연구되었다. 도서지역용 마이크로그리드에 대해서, 전력회사와 발전사업자 각 측면에서 비용과 편익요소를 다양하게 고려하여 경제성을 평가하는 알고리즘이 제안되었다[5]. 탄소배출권가격 상승에 따른 마이크로 발전사업자의 적정 연평균수익률을 확보하기 위한 전력량 요금 가중치가 산정되었다[6]. 또한, 비용-편익 분석틀인 HOMER을 이용하여 도심지 상업빌딩에 적용되는 마이크로그리드의 DG 최적 용량 산정 기법이 연구되었다[7]. Zanzibar Island에 설치된 DG를 고려한 배전계통에 대해 전력손실 최소화 및 전압품질 향상을 고려한 배전계통 최적 설계기법이 연구되었다[8]. 한편,

IRENA(International Renewable Energy Agency)에서는 기후변화에 대응하는 도서지역의 역할, 소규모 도서의 DG 개발현황 및 실증 결과를 설명하고 있다.[9]

그러므로 본 논문에서는 IICG에 DG가 도입된 HICG의 경제성 평가에 기반하여, 한전 운영 결손액에 상응하게 도입될 수 있는 최적 DG 용량을 산정하는 알고리즘을 제시하였다. 부하 분포가 다른 다수 도서를 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 최적 DG 용량은 연료비 소비비가 및 최대부하에 따라 다르게 결정됨을 확인할 수 있었고 DG 도입 용량을 산정하는데 있어서 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

2. HICG의 경제성 분석을 위한 비용요소[2]

일반적으로 도서지역 IICG의 운영비용은 설비 투자비, 변동비, 고정비로 구성되는데, 변동비는 연료비를 말하며 고정비는 감가상각비, 지급수수료, 수선유지비, 기타비용을 말한다. 본 논문에서 고려되는 HICG의 비용요소에 대한 상세사항은 다음과 같다.

2.1 설비 투자비

도서지역에 HICG를 적용하게 되면, IICG(ICG, 해저케이블 등) 관련 설비 투자비 외에도 DG 관련 설비(신재생전원, ESS(Energy Storage System), PCS(Power Conditioning System), EMS(Energy Management System) 투자비가 고려되어야 한다. 설비 투자비는 설비의 연도별 가격 하락, 도서지역 가중치 등을 고려하여 산정된다.

2.2 연료비

HICG의 발전기에서 발생하는 연료비는 연료소비량(L/kWh)에 연료비 소비원가(천원/L)를 적용하여 산정된다. HICG의 연료비에 있어서, 통합하는 도서에서는 DG 도입으로 인하여 연료비가 감소하고, 통합되는 도서에서는 발전설비가 철거되어 연료비가 발생하지 않으므로, 전체적으로 연료비는 감소하게 된다. 유가변동에 민감한 연료비 소비원가(천원/L)에는 IEA 고/저유가 증가율을 반영한다[10].

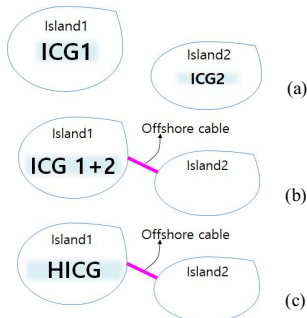


Fig. 1. Power supply methods between two islands (a) ICG operation, (b) IICG operation, (c) HICG operation

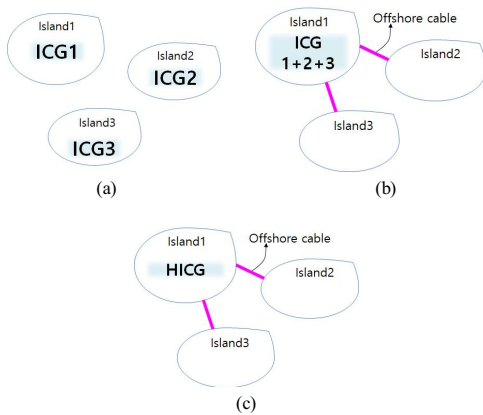


Fig. 2. Power supply methods between three islands (a) ICG operation, (b) IICG operation, (c) HICG operation

2.3 고정비

도서 발전설비의 고정비는 감가상각비, 수선유지비, 기타비용, 지급수수료로 구성되는데, 한전관리 도서발전소 종합원가 계산서를 보면, 일반적으로 감가상각비 3%, 수선유지비 21%, 지급수수료 74%, 기타비용 2%가 발생되고 있다[11]. HICG 도입으로 인하여 지급수수료 감소는 기대할 수 없으나, 이미 IICG로 인하여 통합하는 도서에는 다른 도서의 순환점검을 위하여 운영인력(도서별 1명)이 증가하고 통합되는 도서에서는 운영인력이 배치되지 않는다. 그러나 DG 도입 부지 임대비용은 고정비에 추가된다.

3. 하이브리드 내연발전의 경제성 평가 방안

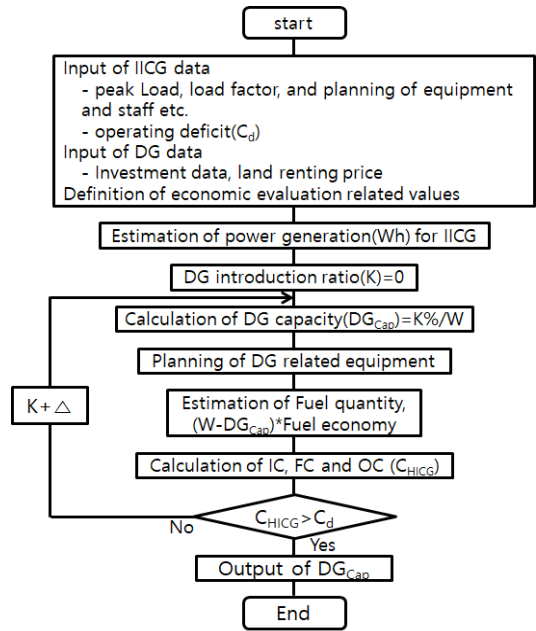


Fig. 3. Economic evaluation algorithm for HICG operation

HICG의 경제성 평가는 IICG 운영에 의한 발전설비 및 운영인력 계획에 기반하는데, 이는 내구연한이 가장 긴 해저케이블을 고려하여 30년 동안의 도서 수요를 예측하여 계획된다. 이들 계획은 해저케이블 포설 방안에 따라 좌우되는데, 본 논문에서는 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 2개 도서 및 3개 도서간 해저케이블 1회선 포설방안을 고려한다.

3.1 발전설비 및 운영인력 계획

해저케이블 1회선 포설 방안에 따른 통합운영에 HICG를 적용하기 위한 설비 및 운영인력은 참고문헌 [2]에 기반하는데, 여기에 DG 도입에 대하여 다음 항목을 추가로 고려한다.

- ① 신재생전원 도입량은 IICG 연간 발전량에 대한 백분율로 산정된다.
- ② ESS 및 PCS은 DG와 동일한 용량으로 도입된다.
- ③ EMS는 통합하는 도서에 1set를 설치한다.

3.2 하이브리드 내연발전의 경제성 평가 알고리즘

IICG 발전량의 일부를 DG로 대체하는 HICG의 경제성 평가 절차는 Fig. 3과 같으며, 경제성 분석은 설비 투

자비용(IC), 연료비용(FC), 운영비용(OC)을 합산하여, 현재가치로 환산한 후의 총비용으로 평가한다[2].

- ① 한전에서 제공하는 도서 관련 데이터를 활용하여, IICG에 대한 최대부하, 부하율, 발전설비 및 운영 인력 계획, 운영결손액을 결정한다. 또한, DG 설비 구축을 위한 투자비와 토지 대여 비용을 결정한다.
- ② ① 항의 데이터를 고려하여 IICG의 연간 발전량을 계산한다.
- ③ 연간 DG 도입량은 IICG 연간 발전량의 일정 비율(K%)로 산정된다.
- ④ DG 도입량을 고려하여 DG 관련 설비를 계획하는데, 이때 설비별 내용연수를 고려한다.
- ⑤ HICG의 연간 발전량(IICG 연간 발전량-DG 도입량)을 계산정하여 연료소비량을 산출한다.
- ⑥ 상기의 조건에 기반하여 투자비용(IC), 연료비용(FC), 운영비용(OC)을 합산하여, 현재가치로 환산한 후 HICG의 총비용(CHICG)을 산정한다.
- ⑦ CHICG이 운영결손액을 초과하면 시뮬레이션을 중지하고 이때 DG 도입량을 결정한다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

ICG로 통합 운용되는 9개 도서를 대상으로 상기의 HICG 경제성 평가 알고리즘을 적용하여, 유가에 대한 HICG의 유효성을 분석하고 한전 운영 결손액만큼 도입될 수 있는 최적 DG 용량을 산정한다.

4.1 경제성 평가 조건

HICG의 경제성 평가를 위한 기준값은 참고문헌 [2]에 기반하는데, 여기에 DG 도입에 대하여 다음 항목을 추가한다.

- ① 신재생전원 건설 기준단가는 3,166천원/kW을 적용하며, 연평균 감소율 3.37%를 적용한다[12].
- ② ESS 건설 기준단가는 800천원/kWh을 적용하며, BNEF 예측을 참조하여 연도별 발전가격 추이를 결정한다[13].
- ③ PCS 건설 기준단가는 458천원/kWh을 적용하며, 물가상승률을 적용한다.
- ④ EMS 건설 기준단가는 대당 75,000천원을 적용한다.
- ⑤ DG의 부지 임대단가는 10천원/kW·년으로 가정한다.

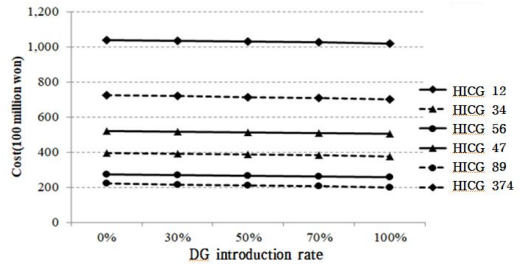


Fig. 4. HICG cost according to DG introduction rate under high oil price

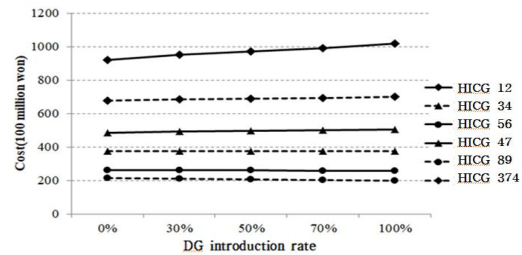


Fig. 5. HICG cost according to DG introduction rate under low oil price

한편, 부하증가, 내용연수 등을 고려하여 발전설비를 계획하는데, 이들 기준값은 참고문헌 [2]에 기반하며, 여기에 DG 도입 관련해 다음 항목을 추가한다.

- ① 신재생전원, PCS 및 ESS는 5년 이내 추가 증설이 없도록 계획한다.
- ② 내용연수는 EMS는 30년, 신재생전원 및 PCS는 20년, ESS는 10년으로 상정한다.

4.2 유가에 대한 HICG의 유효성 분석

일반적으로, 도서지역 DG 도입 유효성은 유가 변동에 크게 좌우되는데, IEA 고유가 및 저유가 적용에 대한 HICG 총비용(투자비+연료비+고정비)은 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 고유가 적용시 DG 도입 용량이 증대하여도 HICG의 총비용은 크게 변동하지 않는데, DG 설비에 대한 투자비가 증가하나 연료비도 상당히 감소하므로 DG 도입의 유효성이 증대하게 된다. 반면, Fig.5와 같이, 저유가가 적용되게 되면 DG 도입 용량 증대에 따른 HICG의 총비용은 증가하게 된다. 특히, 부하규모가 큰 도서(HICG 12(IICG 1+ICG 2)+DG)의 경우, DG 발전설비 투자비가 연료비 감소를 크게 상회하므로 DG 도입은 적합하지 않다. 그러나 부하가 작은 다른 도서에서는 부하가 작으므로 DG 도입 용량도 작고 연료비 감소도 적으므로 총비용이 증가하여도 그 금액이 상당하지

는 않다.

4.3 HICG 89의 경제성 평가 결과 분석

ICG 8-ICG 9 도서(최대부하가 적고 근거리)간 통합 운영에 대한 IICG 89의 설비 및 운영인력 계획은 Table 1과 같다. IICG 89는 최대부하가 상대적으로 큰 ICG 8로 통합되는데, '16년~'45년 ICG 8 최대부하는 81kW→253kW로 증가하므로, 발전설비는 240kW→450kW로, 주변압기는 400kVA→800kVA로 증설된다. 반면, ICG 9의 40kW, 80kW 발전기 3대, 200kVA 주변압기 2대 및 발전 부대설비는 철거된다. 또한, ICG 8과 ICG 9의 배전선로가 3상 6.6kV이므로, IICG 89에서는 해저케이블, 배전선로, 배전용개폐기가 신설된다. 또한, '16년 ICG 8과 ICG 9의 운영인력은 각 6명인데, IICG 89에서는 ICG 9의 비상주 순환점검 인력이 필요하므로 '16년 운영인력 1명이 추가되어 '45년까지 매년 7명의 인력으로 운용된다.

DG 도입 용량에 따른 HICG 89의 경제성 평가 결과는 Table 2와 같다. 해저케이블 1회선을 통한 IICG의 총비용은 고유가시 521억, 저유가시 485억원이다. HICG에 대해서, DG 도입 용량 증대에 따라 투자비는 상당히 증가하나, 연료비가 상당히 감소하고, 운용비는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서, 고유가시 DG는 100% 도입될 수 있고 저유가시 DG 도입은 유효하지 않다. 즉, 연간 발전량이 작은 도서에 DG가 도입되면, IICG로 전력을 공급하는 것보다 경제성이 확보됨을 알 수 있다.

4.4 HICG의 최적 DG 도입용량 산정

고유가시 DG 도입용량에 따른 HICG 경제성을 비교해 보면 Table 3과 같다. 설비 투자비는 DG 관련 설비 도입으로 증가하고 연료비도 DG 도입용량만큼 감소하게 된다. 따라서 DG 설비 도입 비용과 연료비 감소가 유사하므로 DG를 100% 도입하여도 경제성이 확보된다.

저유가시 DG 도입용량에 따른 HICG 경제성을 비교해 보면 Table 4와 같은데, 설비 투자비는 DG 관련 설비 도입으로 증가하나 연료비는 DG 도입용량만큼 감소하나 저유가로 그 비용이 크지 않다. 그러므로 DG 도입이 유효하지 않으나, 부하가 작은 도서의 경우 부하가 작으므로 DG 도입 비용도 작고 연료비도 적게 감소하므로 DG를 상당히 도입하여도 총비용이 크게 증가하지는 않는다.

Table 1. Planning of equipment and staff in IICG 89

Island	Planning of equipment and staff	Year	Establishing			Removing			
IICG 89 (ICG 8)	Diesel generator(kW)	2020	100	100	100	80	80	80	
		2033	150	150	150	100	100	100	
	Transformer(kVA)	2033	400	400		200	200		
	Offshore cable	Cable(km)	2018	2.472					
		Distribution line(km)	2018	0.19					
		Circuit breaker	2018 2038	1					
Staff	2018	7							
ICG 9	Diesel generator(kW)	2018				40	40	80	
	Transformer(kVA)					200	200		
	Accessory equipment(set)					1			
	Plant					1			
	Movable generator(kW)		80						
	Offshore cable	Distribution line(km)	2018	0.32					
		Circuit breaker	2018 2038	1					
	Staff	2018	0						

Table 2. HICG 89 cost(unit : 100 million won)

Operation method	DG introduction ratio	Invest cost	Fuel cost		Operation cost	Total	
			high	low		high	low
IICG 89	0%	133	147	112	241	521	485
HICG 89	30%	171	103	78	242	516	491
	50%	196	74	56	243	513	495
	70%	221	44	34	244	509	499
	100%	258	0	0	246	504	504

Table 3. Total cost for HICG according to DG capacity under high oil price(unit : 100 million won)

Integrated islands	DG introduction rate				
	0%	30%	50%	70%	100%
HICG 12	1,037	1,032	1,028	1,024	1,018
HICG 34	395	390	386	382	376
HICG 56	272	269	266	263	259
HICG 74	521	516	513	509	504
HICG 89	222	215	211	206	199
HICG 374	724	718	713	708	701

Table 4. Total cost for HICG according to DG capacity under low oil price(unit : 100 million won)

Integrated islands	DG introduction rate				
	0%	30%	50%	70%	100%
HICG 12	920	950	970	989	1,018
HICG 34	374	375	375	376	376
HICG 56	260	260	260	259	259
HICG 74	485	491	495	499	504
HICG 89	213	209	206	203	199
HICG 374	677	685	690	694	701

5. 결론

본 논문에서는 도서지역의 운영 결손액을 줄이고 신재생에너지 도입 확대를 도모하기 위하여, IICG로 운영되는 도서에 HICG를 적용하는 경우의 유효성을 확인하였다.

DG 도입용량에 따른 HICG와 유가와와의 관계를 분석한 결과, 부하가 작은 도서에서는 유가가 DG 도입에 크게 영향을 미치지 않으나, 부하가 큰 도서에서는 유가에 상당히 민감함을 확인하였다.

또한, DG 도입 용량에 따른 HICG에 대한 경제성 평가를 수행하여 DG 도입에 대한 편익 및 유효성을 확인하였다. 부하가 큰 도서에서는 DG 도입에 따라 설비 투자비는 증가하고 연료비는 고유가시 상당히 감소하고 저유가시 적게 감소하게 되므로, 고유가시 DG는 100% 도입될 수 있으나 저유가시는 DG 도입의 유효성은 없다. 그러나, 도서 부하가 작은 도서에서는 DG 도입 용량도 적으므로, DG 도입 용량이 증가하여도 총비용의 상당한 변화는 발생하지 않는다. 그러므로 연간 발전량이 작은 도서에 DG가 도입된 HICG를 적용하면 IICG만으로 전력을 공급하는 것보다 경제적으로 유리함을 알 수 있었다.

References

- [1] Electric Power Public Tasks Evaluation & Planning Center, 2018 action plan, Available From:http://www.etep.or.kr/home/busi_info/budget/pBudgetView.jsp (accessed Jan., 1, 2011.)
- [2] M. Y. Kim, D. S. Rho, G. H. Moon, I. Y. Seo, "Algorithm Deciding Offshore Cable Layout Valid for Integrated Power Supply Between Adjacent Islands", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.2 pp.28-36, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.2.28>
- [3] Korea Polytechnic University, "A Study on Optimal Implementation of Power Supply in Islands", 2011.
- [4] KEPCO Management Research Institute, "A Study on Economic Electric Power Supply Method for Remote Islands", KIEE summer conference, 2010.
- [5] Y. H. Nam, H. D. Lee, Y. R. Kim, F. Marito, M. Y. Kim, D. S. Rho, "Economic Evaluation Algorithm of Island Micro-grid for Utility and Independent Power Producer", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.66, No.7, pp.1032-1038, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.7.1032>
- [6] M. Y. Kim, "Analysis for Annualized Returns of Island Microgrid IPP According to CER Price", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.67, No.4, pp.512-521, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.4.512>

- [7] Y. V. P. Kumar, R. Bhimasingu, "Optimal sizing of microgrid for an urban community building in south India using HOMER", *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Dec. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/PEDES.2014.7042059>
- [8] M. Ismail, M. Y. Chen, X. Li, "Optimal planning for power distribution network with distributed generation in Zanzibar Island", *Proceedings of 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Sept. 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/ICECENG.2011.6057049>
- [9] IRENA, "A Path to Prosperity: Renewable Energy for Islands", 2016
- [10] IEA World Energy Outlook 2015.
- [11] KEPCO, Advance information disclosure, 2016 the full cost account for power plant of KEPCO managed islands, Available From: http://home.kepco.co.kr/kepco/IF/ntcob/list.do?boardCd=BRD_000282&menuCd=FN2502&categoryCd Group=CA4311, 2018 (accessed Oct., 1, 2018)
- [12] Korea energy economics institute, "Study on economical efficiency of solar and wind power generation considering system stability", 2014.
- [13] Korea energy economics institute, "Solar industry and module price forecasts and internal and external strategies", 2013.

손 준 호(Joon-Ho Son)

[정회원]



- 2009년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2011년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2016년 12월 : 일본 북해도대학 정보과학연구과 (공학박사)
- 2016년 12월 ~ 현재 : LG전자ESS 영업/엔지니어링팀 과장

<관심분야>

전력/배전계통 해석, ESS/분산전원 최적운영, DR

김 미 영(Mi-Young Kim)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2008년 12월 : 일본 북해도대학 시스템공학과 (공학박사)
- 2009년 8월 ~ 2014년 12월 : 한국 선급 책임연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전력계통, 풍력 전기설비, 분산전원 계통연계