

에너지 저장장치를 이용한 마이크로 그리드의 최적운영 및 신뢰도 지수 개선

Optimal Operation Scheme and Reliability Index Improvement of Micro Grid Using Energy Storage Systems

김 규 호*
 (Kyu-Ho Kim)

Abstract - The micro grid considered in this paper consists of a diesel generator, a photovoltaic array, a wind turbine, a fuel cell, and a energy storage system. This paper explains and simulates the micro grid components in terms of accuracy and efficiency of having a system model based on the costs of fuel as well as operation and maintenance. For operational efficiency, the objective function in a diesel generator consists of the fuel cost function similar to the cost functions used for the conventional fossil-fuel generating plants. The wind turbine generator is modeled by the characteristics of variable output. The optimization is aimed at minimizing the cost function of the system while constraining it to meet the customer demand and safety of micro grid. The operating cost in fuel-cell system includes the fuel costs and the efficiency for fuel to generate electric power. To develop the overall system model gives a possibility to minimize of the total cost of micro grid. The application of optimal operation can save the interruption costs as well as the operating costs, and improve reliability index in micro grid.

Key Words : Optimal operation, Micro grid, Wind turbine, Photovoltaic, Diesel engine, Fuel cell, ESS, Interruption costs, Reliability index

1. 서 론

신재생에너지 기술의 발전과 보급이 전 세계적으로 급속히 증가하고 있으며, 현재 신재생에너지를 기반으로 하는 분산전원의 보급의 문제점은 분산전원의 경제성이 낮다는 점과 발전출력이 외부상황에 따라 자주 변한다는 것이다. 신재생에너지를 더욱더 많이 보급하기 위해서는 경제적인 문제를 해결하고 신재생에너지원의 출력을 제어하는 성능개선이 필요하다. 풍력과 태양광 발전시스템과 같이 자연발생적인 힘에 의존하는 신재생에너지원은 발전출력을 인위적으로 제어하기 어렵다. 일반적으로 발전기는 부하변동에 맞춰 발전량을 조정하면서 수요와 공급의 평형점을 찾는다. 이런 기술적 문제를 해결할 수 있는 방법은 그림 1과 같이 신재생에너지원과 에너지 저장장치(Energy Storage System : ESS)를 조합해 하나의 그리드를 구성하는 것이다. 특히, 다양한 신재생에너지원으로 마이크로 그리드를 구성하여 평상시 주 계통으로부터의 전력 유입도 허용하며 사고로 인해 전력 유입이 불가능하더라도 자체적인 운영을 통해 그리드 내의 전력공급을 지속할 수 있도록 운영하고 있다. 태양광 발전 시스템의 경우 일반적으로 일사량 및 전력량을 측정할 경우 일사량 변화가 양호한 날에 대하여 일사량은 일출 시점을 기준으로 일사량과 전력량이 같이 측정되기 시작하여



그림 1 마이크로 그리드의 에너지 저장 장치 운용
 Fig. 1 ESS Operation of Micro Grid

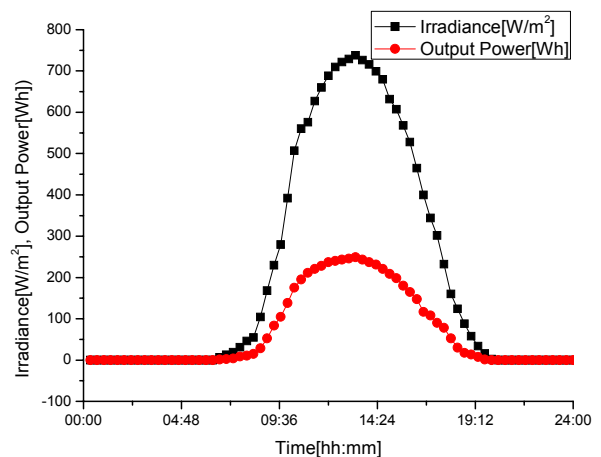


그림 2 일일 일사량에 따른 전력변화
 Fig. 2 Power Change according to Daily Irradiation

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
 Hankyong Univ., IT Fusion Research Institute, Korea
 E-mail : kyuhoh@hknu.ac.kr

Received : December 31, 2013; Accepted : January 21, 2014

일사량이 가장 많은 정오시간 근처에서 그림 2와 같이 전력량이 최대로 발생된다. 태양광발전 시스템의 모델링은 일사량에 따른 모듈의 출력으로 나타낼 수 있으며 운전 및 유지보수에 관한 비용으로 구성할 수 있다[1-3].

본 논문에서는 에너지 저장장치가 포함된 마이크로 그리드의 운영 방안을 제시하였다. 전력을 공급하는 전력공급원으로는 디젤터빈, 태양광발전 시스템, 풍력 발전기 및 연료전지 발전기 등을 이용하였으며 에너지 저장장치가 포함된 마이크로 그리드의 운영을 통하여 에너지 저장장치의 효율성에 대하여 확인할 수 있었다. 또한, 신뢰도 지수를 평가함으로써 마이크로 그리드 운영의 효율성을 입증하였다.

2. 마이크로 그리드 모델링

2.1 전력 공급원

마이크로 그리드는 그리드에 속한 전력 공급원의 출력을 입력으로 받아 운영비용을 최소화 하도록 운용한다. 마이크로 그리드에서 사용된 전력 공급원에 대한 모델링을 수식적으로 표현하였다[1].

디젤발전기

디젤발전기(Diesel Generator : DiG)는 기존의 화석연료 발전비용 모델을 이용해 비용함수를 모델링 할 수 있으며 식 (1)과 같다[4].

$$C_{DiG} = \sum_{i=1}^D (a_i + b_i P_{DiG,i} + c_i P_{DiG,i}^2) \quad (1)$$

여기서,

D : DiG 발전기 수

P_{DiG} : 디젤 발전출력[kW]

C_{DiG} : 디젤 발전기 발전비용[\$]

a_i, b_i, c_i : 발전기의 비용계수 (i, \dots, N)

태양광발전 시스템

일사량에 의해 전력발생량이 변화하지만 일사량의 증가에 비례하여 전력이 변화하지 않는다. 이것은 태양광 모듈이 고정식인 경우 태양의 위치가 변화함에 따라 주위온도와 모듈의 온도가 변화하여 생기는 현상으로 볼 수 있다. 즉 태양과 모듈의 방향에 따라 그리고 모듈의 온도 및 기타 조건에 의한 것이다. 이러한 조건들을 고려하여 태양광발전 모듈에 대한 비용함수의 정식화는 다음과 같이 나타내었다 [4,5].

$$P_{PV,i} = P_{std} \frac{G_{ing}}{G_{std}} (1 + k(T_c - T_r)) \quad (2)$$

$$C_{PV} = \sum_{i=1}^P C_{PV(O/M),i} P_{PV,i}$$

여기서,

$P_{PV,i}$: 태양광발전기 출력[kW]

C_{PV} : 일사량(G_{ing})에 따른 모듈의 출력 비용함수[\$]

P_{std} : 기준상태(std)에서 모듈의 최대출력[kW]

G_{ing} : 일사량 [W/m^2]

G_{std} : 기준 1000 [W/m^2]에서 일사량

k : 전력의 온도계수

T_c : 셀의 온도

T_r : 기준 온도

$C_{PV(O/M),i}$: 운전 및 유지보수 비용[\$/kW]

P : 태양광발전 시스템 수

풍력 발전기

풍력 발전기에서의 발전 출력은 풍속에 의해 그 양이 결정되며 일반적으로 유도발전기를 사용한다. 여기서 디젤 발전기와 연료전지 발전기의 상, 하한 발전 한계는 정해져 있으나 풍력 발전기의 경우에는 기후에 영향을 받기 때문에 지역별 풍속데이터를 이용해 식 (3)에 의해 발전기의 상한치가 결정된다.

$$C_{WT} = \sum_{i=1}^W C_{WT(O/M),i} P_{WT,i} \quad (3)$$

$$P_{WT,i} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ a_i + b_i v + c_i v^2 & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{WTR,i} & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases}$$

여기서,

v, v_{ci}, v_{co}, v_r : wind, cut-in, cut-out, rated speed [m/sec]

$P_{WT,i}$: 발전기 정격출력[kW]

C_{WT} : 풍력 발전비용[\$]

$C_{WT(O/M),i}$: 운전 및 유지보수 비용[\$/kW]

W : 풍력 발전기 수

연료전지 발전기

연료전지 발전기의 운영비용은 거의 대부분이 연료투입 비용이며 여기에 연료가 전력으로 변환되는 경우의 효율을 포함시켜 비용함수를 계산한다.

$$C_{FC} = C_{natural} \sum_{i=1}^F \frac{P_{FC,i}}{\eta_{FC}/100} \quad (4)$$

여기서,

P_{FC} : 연료전지 발전기 출력[kW]

$C_{FC}, C_{natural}$: 연료전지 발전기 발전비용[\$] 및 천연가스 비용[\$/kW]

$\eta_{FC} : \eta_1 \eta_2$ 연료전지 발전기 효율 [%]

F : 연료전지 발전기 수

에너지 저장장치

에너지 저장장치(Energy Storage System : ESS)는 발전소에서 과잉 생산된 전력을 저장해 두었다가 일시적으로 전력이 부족할 때 공급을 하는 저장장치를 말한다. 여기에는 전기를 모아두는 배터리와 배터리를 효율적으로 관리해주는 관련 장치들이 있다[3]. 배터리식 ESS는 리튬이온과 황산화나트륨 등을 사용한다. ESS는 신재생에너지를 안정적으로 공급하기 위해 필수적인 미래 유망 사업이다. 특히, 에너지 저장장치는 에너지를 저장하는 장치로서 태양광 발전 또는 풍력발전 시스템 등 전력 공급원과 주전원으로부터 부하에 공급할 전력량이 부족할 때 필요하다. 또한, 마이크로 그리드의 전력 공급원이 전력수요량을 초과할 때는 배터리에 저장한다. 에너지 저장장치에 충전 상태(State Of Charge : SOC)를 결정할 때 에너지 저장장치는 음의 에너지를 포함할 수 없기 때문에 배터리의 최대 충전상태와 최소 충전상태를 만족해야 한다.

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (5)$$

또한, 전력 공급원은 직접 부하에 전력을 공급하고 에너지 저장장치에 저장할 수도 있다. 이러한 관계는 다음 식 (6)으로 표현할 수 있다[3].

$$P_i = P_{Load,i} + P_{ESS,i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

여기서,

P_i 는 전력 공급원 i 의 출력

$P_{Load,i}$ 는 전력 공급원 i 에서 공급하는 부하

$P_{ESS,i}$ 는 전력 공급원 i 의 전력(충전 +, 방전 -)

N 는 전력 공급원의 수

2.2 목적함수

목적함수는 식 (7)과 같이 각 전력 공급원에 대한 비용합수와 네트워크로부터 구입하는 구입전력비용 C_{Buy} 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Total \ Cost \ Func. = C_{DiG} + C_{PV} + C_{WT} + C_{FC} + C_{Buy} \quad (7)$$

여기서, C_{Buy} 는 다음과 같이 정의할 수 있으며, K_e 는 구입전력비용 계수이고, $P_{s,Buy}$ 는 네트워크로부터 구입하는 전력이다.

$$C_{Buy} = K_e P_{s,Buy}, \quad (8)$$

2.3 제약조건

전력조류방정식

$$F(x_i, P_k) = 0 \quad (9)$$

여기서, P_k 는 각모선 k 에 연결된 전력 공급원의 출력이고 x_i 는 상태변수이다.

전력수급 방정식

$$\sum_{i=1}^D P_{DiG,i} + \sum_{i=1}^W P_{WT,i} + \sum_{i=1}^F P_{FC,i} + \sum_{i=1}^P P_{PV,i} + P_{s,Buy} + P_{ESS} = P_{Load} + P_{Loss} \quad (10)$$

여기서, 좌변항의 마이크로 그리드의 전력 공급원, 계통으로부터의 구입전력 $P_{s,Buy}$ 와 에너지 저장장치의 출력 P_{ESS} 의 합은 마이크로 그리드의 전체부하 P_{Load} 와 계통손실 P_{Loss} 의 합과 같아야 한다. P_{ESS} 는 충전 시 +이고 방전 시 -의 값을 갖는다.

전력 공급원 출력

$$P_{k,\min} \leq P_k \leq P_{k,\max} \quad (11)$$

여기서, $P_k, P_{k,\max}, P_{k,\min}$ 는 각모선 k 에 연결된 전력 공급원의 출력과 상하한 치이다.

3. 마이크로 그리드의 신뢰도 평가 및 운영 절차

3.1 연간정전비용과 정전용량

정전비용은 각 부하지점(모선) j 에 분산전원을 설치하였을 때의 연간 정전용량 $P_{Out}^j(P_{DG}^j)$ 와 단위전력당 정전비용 K_{Out}^j 의 곱으로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{Out} = \sum_{j=1}^n K_{Out}^j P_{Out}^j (P_{DG}^j) \quad (12)$$

여기서, 연간 정전용량은 각 부하지점(모선) j 의 침투부하량 P_{peak}^j 과 신뢰도 지수인 고장률(λ^j)과 수리시간(r^j)을 이용하여 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{Out}^j (P_{DG}^j) = P_{peak}^j \lambda^j r^j \quad (13)$$

3.2 배전계통의 신뢰도 지수

수용가당 평균 정전빈도

SAIFI(System Average Interruption Frequency Index)는 대상지역의 수용가당 평균 정전횟수를 나타내는 지수이다 [4].

$$SAIFI = \frac{\text{공급중단 횟수}}{\text{전체수용가의 수}} \quad (14)$$

$$= \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} [\text{회/수용가} \cdot \text{년}]$$

λ_i, N_i : 부하점 i 에서의 고장률과 수용가의 수
 R : 계통의 부하지점 집합

수용가당 평균 정전시간

SAIDI(System Average Interruption Duration Index)는 대상지역의 수용가당 연평균 정전시간을 의미한다.

$$SAIDI = \frac{\text{수용가 평균정전시간의 합}}{\text{전체 수용가의 수}} \quad (15)$$

$$= \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} [\text{분/수용가} \cdot \text{년}]$$

U_i : 부하점 i 에서의 연간 정전시간의 기대치

평균 공급률

ASAI(Average Service Availability Index)는 대상지역 내 수용가 요구시간을 기준으로, 어느 정도 공급이 되는지를 나타내는 지수이다.

$$ASAI = \frac{\text{수용가 요구시간} - \text{수용가 공급실폐시간}}{\text{수용가 요구시간}} \quad (16)$$

$$= \frac{\sum_{i \in R} 8760 N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i}$$

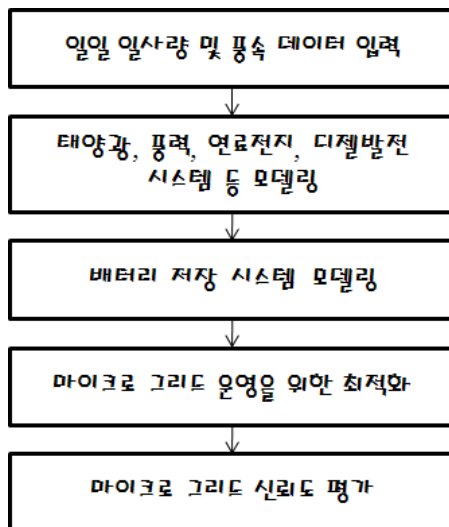


그림 3 마이크로 그리드 운영을 위한 순서도
 Fig. 3 Flowchart for Micro Grid Operation

3.3 마이크로 그리드 운영 절차

그림 3은 마이크로 그리드의 운영을 위한 순서도이다. 일일 일사량 데이터를 이용하여 태양광발전 시스템의 발전출력을 계산하고 태양광발전 시스템의 발전비용을 산정한다. 디젤발전기는 기존의 화석연료 발전비용 모델을 이용해 비용을 산출한다. 에너지 저장 시스템은 마이크로 그리드에 구성되어 있는 전력 공급원의 출력을 직접 부하에 공급하고 배터리에 저장할 수도 있게 모델링한다. 그리고 최적화기법에 의하여 마이크로 그리드를 최적으로 운영한 후에 신뢰도를 계산하여 신뢰도를 평가한다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 마이크로 그리드의 운영을 위하여 다수의 디젤발전기, 태양광발전 시스템, 풍력발전 시스템 및 연료전지 등이 포함된 그림 4의 IEEE 13 모선 계통을 이용하였다 [1]. 에너지 저장장치는 각 전력 공급원에 연결되어 있으며 각 모선의 전력 공급원으로부터 부하에 전력을 공급하고 남은 전력을 저장장치에 저장하는 것으로 하였다. 그리고 충전상태에 따라 전력 공급원에서 공급하는 전력이 부족할 때 또는 네트워크로부터의 전력이 부족할 때 사용함으로써 마이크로 그리드 운영에 효율성을 높일 수 있었다. 그림 4에서 네트워크 또는 마이크로 그리드 내에서 사고가 발생해도 항상 전력이 공급되어야 하는 중요한 부하는 점선으로 표현하였다. 표 1은 연료전지와 태양광발전 시스템에 대한 계수이며, 태양광발전에서 운전 및 유지보수 비용을 제외한 나머지 데이터는 그림 2의 자료를 사용하였다. 표 2는 디젤 및 풍력발전기에 대한 발전기 계수이며, 표 3은 부하지점에 대한 고장률, 수리율 및 정전시간이다. 또한 에너지 저장장치의 효율성을 확인하기 위하여 다음과 같은 3가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 하였다.

- Case 1. 네트워크로부터 전력을 공급 받음.
- Case 2. 네트워크와 전력공급원으로부터 전력을 공급 받음.
- Case 3. 에너지 저장장치를 포함하여 네트워크와 전력공급원으로부터 전력을 공급 받음.

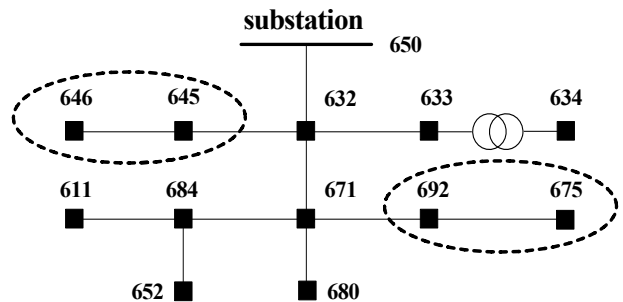


그림 4 IEEE 13 모선 계통
 Fig. 4 IEEE 13-bus System

표 1 연료전지 및 태양광발전기의 발전기 계수

Table 1 Coefficients of Fuel Cell and PV.

Bus	Gen. Type	$C_{natural}$	$C_{PV(O/M)}$	Pmin [kW]	Pmax [kW]	Eff[%]
611	F_Cell	0.05		0	100	90
634	PV		0.02	0	150	100
646	PV		0.02	0	100	100
652	F_Cell	0.07		0	100	85

표 2 디젤 및 풍력발전기의 발전기 계수

Table 2 Coefficients of Diesel and Wind Generator.

Bus	Gen. Type	a	b	c	Pmin [kW]	Pmax [kW]	$C_{(O/M)}$
671	Diesel	0.2731	0.1453	0.0042	30	800	-
675	Wind	0.1333	0.0233	0.0024	0	300	0.022
692	Wind	0.1333	0.0233	0.0024	0	300	0.022

표 3 부하지점의 고장률, 수리율 및 정전시간

Table 3 Failure, Repair Rate and Interruption Duration at Load Buses.

Bus	Customer	Failure Rate [f/year]	Repair Rate [h]	Interruption Time[h/year]
611	2	0.083	7.40	0.6142
634	40	0.070	7.90	0.5530
645	5	0.083	7.40	0.6142
646	9	0.083	7.40	0.6142
652	5	0.080	7.51	0.6008
671	50	0.060	6.59	0.3954
675	5	0.083	7.24	0.6009
692	80	0.070	7.90	0.5530

표 4는 표 1과 표 2의 전력공급원에 대한 발전기 계수와 표 3의 신뢰도 평가 데이터를 이용하여 마이크로 그리드의 최적운영 전후의 결과를 나타내었다. Case 1과 같이 마이크로 그리드에서 전력공급원으로부터 전력을 공급받지 않고 네트워크로부터 전력을 공급받을 때는 전력구입비용이 \$1,255,443.6 이었다. 그러나 Case 2와 같이 디젤발전기, 태

표 4 시뮬레이션 결과

Table 4 Simulation Results

	Case 1	Case 2	Case 3
Total operating costs of the micro grid [\$]	1,255,443.6	440,300.0	392,651.8
Operating costs of the Micro grid[\$]	-	1,499.1	1,351.0
Buying power costs from network [\$]	1,255,443.6	438,800.9	373,480.7
Interruption costs [\$]	2,980.09	1,218.75	1,218.75
SAIFI	0.069097	0.027767	0.027767
SAIDI	0.520234	0.196158	0.196158
ASAI	0.999941	0.999978	0.999978

양광발전 시스템, 풍력발전 시스템 및 연료전지 등과 같은 전력공급원으로부터 전력을 공급받을 수 있을 때 마이크로 그리드를 운영하는 운영비용은 \$1,499.1이고 네트워크로부터 전력을 구입하는 비용은 \$438,800.9가 되어 전체 운영비용은 \$440,300.0로 감소되었음을 알 수 있다. 또한, Case 3의 에너지 저장장치를 포함하여 네트워크와 전력공급원으로부터 전력을 공급 받을 때의 마이크로 그리드를 운영하는 운영비용은 \$1,351.01이고 네트워크로부터 전력을 구입하는 비용은 \$373,480.7가 되어 전체 운영비용은 \$392,651.8로 감소되었음을 알 수 있다.

또한, 표 4에서 각 Case에 대하여 정전비용 및 신뢰도 지수 등을 비교하였다. 정전시 각 부하지점에 설치된 전력공급원 또는 에너지 저장장치에 의해 전력이 공급되어 전력구입 비용과 정전비용이 효과적으로 감소되었으며, 정전빈도와 정전시간이 감소되어 전력공급률이 향상되었기 때문에 신뢰도 지수가 향상되었음을 알 수 있다. Case 2와 Case 3에서 정전비용 및 신뢰도 지수는 정전시 전력공급원인 에너지 저장장치이든 각 부하지점으로 전력이 공급되기 때문에 같아지는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 다수의 디젤발전기, 태양광발전 시스템, 풍력발전 시스템 및 연료전지 등으로 구성된 마이크로 그리드에 에너지 저장장치를 포함시킨 운영 방안을 제시하였다. 그리드내의 모든 전력 공급원에 에너지 저장장치를 설치하여 운영함으로써 에너지 저장장치의 효율성을 확인할 수 있었다. 마이크로 그리드에서 부하지점의 정전비용의 영향을 고려하여 전력공급원을 운영함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하였고 신뢰도지수를 향상시켰다. 특히, 정전시 각 부하지점에 설치된 전력공급원과 에너지 저장장치에 의해 전력이 공급되어 전력구입 비용과 정전비용의 경우 효과적으로 감소됨을 알 수 있었으며, 정전빈도와 정전시간이 감소되어 전력 공급률이 향상되어 신뢰도 지수가 좋아졌음을 알 수 있었다.

향후 연구로는 마이크로 그리드에서 시간대별 전력가격에 따른 수요반응을 고려하는 최적운영을 할 필요가 있다고 사료된다.

References

- [1] Kyu-Ho Kim Sang-Bong Rhee, "Operation Scheme of Micro Grid Considering Battery Storage System", KIEE Summer Conference, pp.175-176, 2013, July
- [2] G. Venkataramanan and C. Marnay. "A larger role for microgrids," IEEE Power & Energy Magazine, Vol.6, No.3, pp.78-82, May/June 2008.
- [3] F. Mohamed, and H. Koivo, "System Modelling and Online Optimal Management of MicroGrid," 6th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for

Offshore Wind Farms, pp.26 - 28, October 2006, Delft, The Netherlands.

- [4] S. Krishnamurthy, T. M. Jahns, and R.H. Lasseter. "The operation of diesel gensets in a CERTS Microgrid," IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [5] G. K. Kiema, M. J. Colgan and M. J. Brett, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 85, Issue 3, pp.321-331 (2005).

저 자 소 개



김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 안산공과대학 전기과 부교수. 2011년 - 2012년 미국 Baylor University 방문교수. 2008년 9월 - 현재 국립환경대학교 전기공학과 부교수