

평균풍속 및 유가변동에 따른 최적 마이크로그리드 구성

The Optimal Microgrid Configuration Depending on the Change of Average Wind Speed and Fuel Cost

김 규 호[†] · 임 성 용^{*}
(Kyu-Ho Kim · Sung-Yong Lim)

Abstract - This paper presents the optimal network configuration for electric stations using HOMER software. For the given data such as annual average wind speed and grid costs, this software calculates the NPC(Net Present Cost), operating cost and COE(Cost of Energy). Based on these simulation results, it is possible to find the optimal network configuration for electric stations depending on the grid cost and average wind speed. When the rising grid cost is considered, it is essential to use grid and renewable energy together. Depending on the increase of the grid cost, NPC of the configuration using renewable energy and grid can be gradually getting smaller than NPC of the configuration using only grid.

Key Words : Electric stations, HOMER, Net present cost, Cost of energy

1. 서 론

최근 일산화탄소, 이산화탄소 등의 공해가스로 인한 많은 환경문제를 때문에 신재생 에너지를 이용한 발전시스템이 보편화되고 있으며 전기자동차가 보급되기 시작하면서 전기자동차 충전을 위한 전기 스테이션 설치가 많아져 전기수요가 늘고 있다[1, 2]. 그러나 전기를 생산하는데 필요한 화석연료가 점점 고갈되고 있어 그리드 내 전력 가격은 점차 증가할 것이며 신재생에너지를 이용한 발전 시스템이 지금보다도 더 보편화 될 것이라 예상되지만 독립형 신재생 에너지 발전 시스템은 안정성, 신뢰도 등의 문제를 가지고 있다. 전력공급에서 가장 중요한 것은 전력 수요에 맞게 공급이 충분해야하는 신뢰도 및 안정성이지만 신재생 에너지의 특성상 기상조건의 영향을 많이 받기 때문에 독립형 신재생 에너지발전 시스템은 안정성을 만족시키는 부분에서 한계를 보인다[3]. 또한 안정성만을 고려하여 그리드로만 전력을 공급받기에도 화석연료의 고갈로 인한 그리드 내 전력 가격 상승이 문제가 될 수 있으며 전기를 생산하는 과정에서 공해가스로 발생하기 때문에 환경적인 측면에서도 그리드의 전력만 사용하는 것은 좋은 방법이 아니다[4, 5]. 이 문제를 해결하기 위해서는 신재생에너지의 계통연계 및 에너지 저장장치로 쓰이는 배터리 설치가 필수적이다[6]. 마이크로그리드는 보통 풍력발전기, 태양광 발전기 등의

신재생 에너지 발전기원으로 이루어져있다. 마이크로그리드는 분산형 전원 시스템으로 소비자 근처에 설치되어 질 수 있으며 이를 계통에 연결할 수 있기 때문에 설비 및 보수비용, 전력 송전 및 배전 시에 발생하는 전력손실도 줄일 수 있다. 이는 안정성, 신뢰성 또한 만족시킬 수 있어 신재생 에너지를 활용한 마이크로그리드가 계통에 연결되어졌을 때 전기품질이 향상된다고 볼 수 있다[7, 8].

본 논문에서는 그리드 내 전력 가격과 평균 풍속에 따라 어떤 종류의 신재생 에너지를 이용하여 마이크로그리드를 구성을 하는 것이 더 경제적인지 분석하였다. 특히 일사량 및 부하사용량 리소스 값은 특정 값으로 설정하였고 평균 풍속 및 유가는 변수로 고려하여 다양한 시뮬레이션을 하였고 변수에 따른 최적의 마이크로 그리드를 설계하였다.

2. 평균 에너지비용 및 순 현재비용

본 논문에서는 평균풍속 및 유가변동에 따른 최적 마이크로그리드 구성을 위해 평균 에너지비용(Cost Of Energy : COE) 및 순 현재비용(Net Present Cost : NPC) 값을 사용한다. COE는 평균에너지 비용을 나타내며 단위는 \$/kWh 이다. NPC는 순 현재비용으로서 미래의 현금 흐름을 현재가치화한 것으로 설계된 마이크로그리드의 프로젝트기간 동안 발생하는 초기 설치비용, 교체비용, 유지보수 및 운영비용, 연료비 및 기타 수익을 포함하며 단위는 \$ 이다. NPC는 식 (1)과 같이 C_{NPC} 로 표현하여 계산할 수 있다.

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, n)} \quad CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National University, IT Fusion Research Institute, Korea.

E-mail : kyuho@hknu.ac.kr

^{*} Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National University, Korea.

Received : November 18, 2014; Accepted : December 29, 2014

$C_{ann.tot}$ 는 총 연간 비용(Total Annualized Cost)을 나타내고 $CRF(i, n)$ 는 자본회수계수(Capital Recovery Factor)를 나타낸다. 또한 i 는 연이율(Interest Rate)을 의미하며 n (Project Time)은 대출기간 또는 프로젝트기간이다.

평균 에너지 비용 COE 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$COE = \frac{C_{ann.tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid.sales}} \quad (2)$$

E_{prim} 는 주요 총 부하량(Total amounts of primary load) 이고, E_{def} 는 지연 총 부하량(Total amounts of deferrable load)이다. $E_{grid.sales}$ 는 연간 그리드에 판매한 에너지의 양 (Amounts of energy sold to the grid)을 나타낸다.

3. 마이크로그리드 구성

최적 마이크로그리드를 구성하기 위해 태양광발전기, 풍력발전기, 배터리, 컨버터, 인버터 등의 설비들을 사용하였다.

3.1 태양광 발전기

다음의 식 (3)은 태양광 발전기에 적용되는 식이다.

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \frac{I_T}{I_S} \quad (3)$$

f_{PV} 는 PV 감쇠계수[%](PV derating factor)를 나타내고 Y_{PV} 는 PV 어레이의 정격용량[kW](Rated capacity)을 나타낸다. 또한 I_T 는 PV 어레이 표면의 태양복사[kW/m²] (Global solar radiation incidence on the surface of the PV array)를 나타내고 I_S 는 표준 일사량(Standard amount of radiation)을 나타내며 이 값은 1[kW/m²]이다.

태양광 발전의 1년당 지출비용(CAP_{PV})은 식 (4)와 같이 정의 된다.

$$CAP_{PV} = AP_{PV} \times \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] + O/MC_{ost} \quad (4)$$

식 (4)에서 AP_{PV} 는 태양광 발전기의 원금(Principal amount)이고 O/MC_{ost} 는 운영 및 유지보수 비용(Operation and Maintenance Cost)이다. i 는 연이율(Interest Rate), n (Project Time)은 대출기간 또는 프로젝트기간을 나타낸다[9].

3.2 풍력 발전기

본 논문에서는 그림 1 및 그림 2와 같은 전력곡선 특성을 갖는 Generic 3kW와 Generic 10kW 두 종류의 풍력발전기모형을 사용하였으며 두 발전기의 수명은 15년으로 선정하였다.

풍력발전기의 발전량(P_{Wind})은 식 (5)과 같이 계산된다.

$$P_{Wind} = C_P \times \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5)$$

C_P 는 풍력발전기의 출력계수(Power Coefficient)를 나타내고, ρ 는 공기밀도(Density of Air)를 나타낸다. 또한 A 는 회전자의 단면적[m²](Swept area)이고 v 는 풍속[m/s] (Wind speed)이다[10].

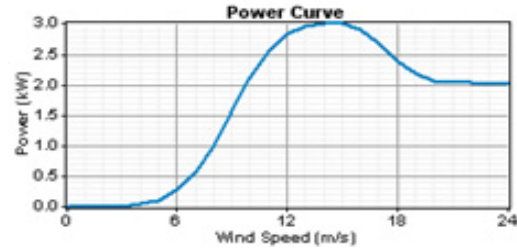


그림 1 Generic 3kW 전력곡선

Fig. 1 Power Curve of Generic 3kW

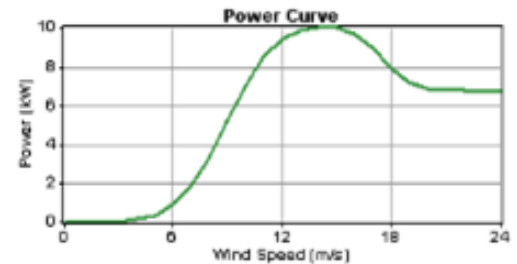


그림 2 Generic 10kW 전력곡선

Fig. 2 Power Curve of Generic 10kW

풍력발전기의 1년당 지출비용(CAP_{Wind})은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$CAP_{Wind} = AP_{Wind} \times \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] + O/MC_{ost} \quad (6)$$

식 (6)에서 AP_{Wind} 는 태양광 발전기의 원금(Principal amount)이고 O/MC_{ost} 는 운영 및 유지보수 비용(Operation and Maintenance Cost)이다. i 는 연이율(Interest Rate), n (Project Time)은 대출기간 또는 프로젝트기간이다.

3.3 배터리

배터리에는 부하추종 급전 방식(Load-following dispatch)과 순환충전 급전 방식(Cycle-charging dispatch)이 있다. 부하추종 급전 방식은 발전기가 배터리를 충전시

키지 않고 신재생에너지 전원으로 충전하는 방식이고 순환 충전 급전 방식은 발전기에서 부하가 필요로 하는 양보다 더 많은 양의 전력을 생산하여 과잉 전기에너지를 배터리를 충전하는 방식이다. 여기서 Battery wear cost는 다음의 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$CAP_{BW} = \frac{C_{Rep.Batt}}{N_{Batt} Q_{Lifetime} \sqrt{\eta_{Rt}}} \quad (7)$$

$C_{Rep.Batt}$ 는 배터리 뱅크 교체 비용(Replacement cost of the battery bank)이고 N_{Batt} 는 배터리 뱅크의 배터리 수 (Number of batteries in the battery bank)를 나타낸다. 또한 $Q_{Lifetime}$ 는 배터리의 하나의 수명(Lifetime throughput of a single battery)이고 η_{Rt} 는 충·방전 효율(Round-trip efficiency)이다[9].

4. 마이크로그리드 설계 & 시뮬레이션

4.1 마이크로그리드 설계

본 연구에서는 그림 3과 같이 그리드와 컨버터, 인버터, 풍력발전기, 태양광발전기 그리고 남은 전기에너지를 저장할 배터리로 마이크로그리드를 구성하여 시뮬레이션 하였다.

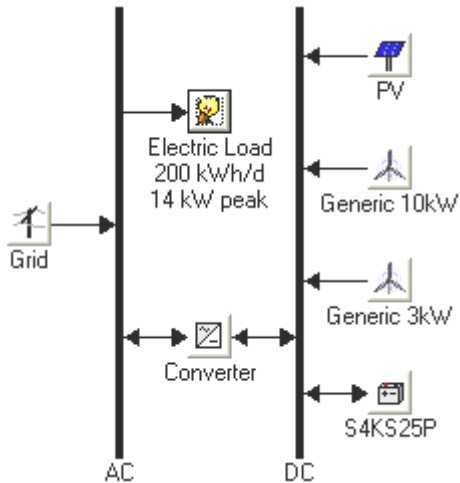


그림 3 마이크로그리드 설계
Fig. 3 Design of micro-grid configuration

4.2 마이크로그리드 리소스

일일 부하 사용량과 일사량은 그림 4, 그림 5와 같이 선정하여 입력하였다. 일사량이나 부하 사용량에 비해 풍속 및 그리드 내 전력 가격은 지역에 따라 차이가 많이 날 수 있기 때문에 이를 고려하여 풍속의 경우 1m/s 간격으로 3~8m/s의 값을 변수로 설정하였고 그리드 내 전력 가격의 경우 0.1\$/kWh 간격으로 0.3\$/kWh~0.8\$/kWh의 값을 변수로 설정하였다. 또한 디바이스

들 각각의 용량 및 개수에 따른 비용 산정은 표 1 - 표 5와 같이 선정하여 입력하였다.

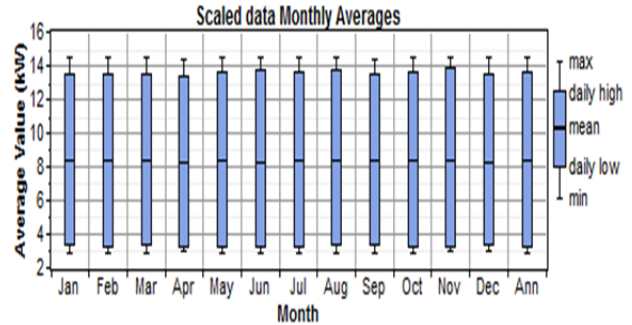


그림 4 월별 부하 사용량
Fig. 4 Monthly load profile

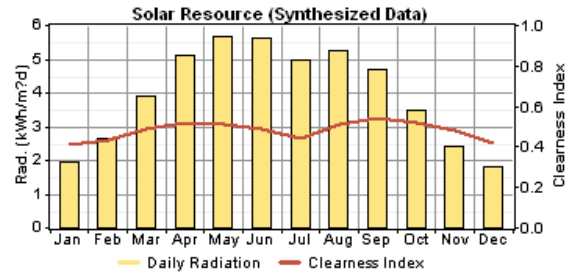


그림 5 월별 일사량 및 청명도
Fig. 5 Monthly Global Horizontal Radiation and Clearness index

표 1 PV 비용 산정

Table 1 Determination of Photo Voltaic Cost

Size	Capital	Replacement	O&M
1kW	7,000\$	7,000\$	0\$/yr

표 2 Generic 10kW 비용 산정

Table 2 Determination of Generic 10kW Cost

Quantity	Capital	Replacement	O&M
1	27,000\$	23,000\$	300\$/yr
2	50,000\$	43,000\$	350\$/yr

표 3 Generic 3kW 비용 산정

Table 3 Determination of Generic 3kW Cost

Quantity	Capital	Replacement	O&M
1	11,000\$	7,000\$	200\$/yr
2	20,000\$	12,000\$	375\$/yr

표 4 배터리 비용 산정

Table 4 Determination of Battery Cost

Quantity	Capital	Replacement	O&M
1	120\$	120\$	1.50\$/yr

표 5 Inverter/Converter 비용 산정

Table 5 Determination of Inverter and Converter Cost

Size	Capital	Replacement	O&M
1kW	900\$	900\$	0\$/yr

표 6은 본 논문에서 고려된 각 장치 별 용량 및 개수를 나타낸다.

표 6 각 장치별 고려된 용량

Table 6 The Sizes of Each Device to Consider

Devices	용량 또는 개수(kW or EA)
PV	0, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75
Generic 3kW	0, 1, 2, 3
Generic 10kW	0, 1, 2, 3
Battery (Surrette 4KS25P)	0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200, 250
Converter (Inverter)	0, 5, 10, 15, 20

4.3 시뮬레이션 결과 및 비교

그림 6은 그림 3-그림 5 및 표 1-표 6에 대한 시뮬레이션 결과로서, 각 조건에서의 NPC 수치가 가장 적게 산출된 마이크로 그리드 구성을 구분하여 연속적으로 이어 나타낸 것이다.

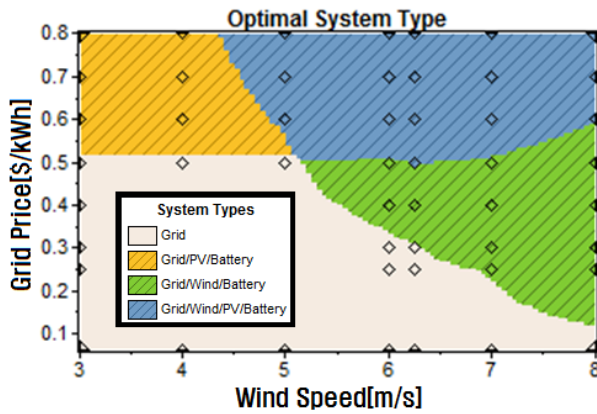


그림 6 최적시스템 유형 그래프

Fig. 6 The Graph of Optimal System Type

그림 6에서 x축은 풍속 값을 나타내고 y축은 그리드 내의 전력 가격을 나타낸다. 평균 풍속이 4.3m/s 이하인 지역에서는 그리드 내 전력 가격이 0.5\$/kWh 이하일 때 오직 그리드의 전력

만 사용하는 것이 경제적이고, 0.5\$/kWh를 초과한 경우에는 태양광발전기와 배터리를 설치하여 그리드와 병행하여 전력을 사용하는 것이 경제적이다. 평균 풍속이 4.3m/s 이상, 5m/s 이하의 지역인 경우에는 그리드 내 전력 가격이 0.5\$/kWh를 초과할 시 그리드 내 전력 가격에 따라 태양광발전기와 배터리를 그리드와 병행하여 사용하거나 태양광발전기와 풍력발전기 그리고 배터리를 그리드와 함께 병행하여 사용하는 것이 경제적이고, 0.5\$/kWh 이하인 경우에는 오직 그리드의 전력을 사용하는 것이 경제적이다. 만약 평균풍속이 5m/s를 초과하는 지역이라면 그리드 내 전력 가격에 따라 그림 6을 참고하여 가장 최적인 마이크로 그리드를 구성하여 전력을 사용하는 것이 경제적이다. 위 사례 연구 결과를 정리하면 표 7과 같다. 여기서 G는 그리드, P는 태양광발전기, B는 배터리 그리고 W는 풍력발전기를 의미한다.

표 7 조건에 따른 최적시스템 정리표

Table 7 Optimal configuration according to the conditions

	Wind Speed(m/s)						
		3	4	5	6	7	8
Grid price (\$/kWh)	0.3	G	G	G	G	G/W/B	G/W/B
	0.4	G	G	G	G/W/B	G/W/B	G/W/B
	0.5	G	G	G	G/W/B	G/W/B	G/W/B
	0.6	G/P/B	G/P/B	G/P/W/B	G/P/W/B	G/P/W/B	G/P/W/B
	0.7	G/P/B	G/P/B	G/P/W/B	G/P/W/B	G/P/W/B	G/P/W/B
	0.8	G/P/B	G/P/B	G/P/W/B	G/P/W/B	G/P/W/B	G/P/W/B

다음은 평균풍속이 6m/s인 지역에 대하여 유가변동에 따른 NPC 수치를 4가지 마이크로 그리드 구성으로 나누어 그림 7과 같이 나타내었다.

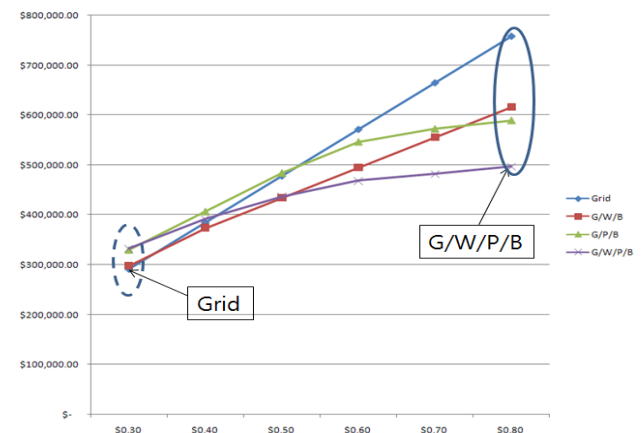


그림 7 유가변동에 대한 NPC 비교

Fig. 7 NPC comparison depending on the grid cost

왼쪽 점선원은 그리드 내 전력 가격이 0.3\$/kWh인 경우를 나타내고 오른쪽 실선원은 그리드 내 전력 가격이

0.8\$/kWh인 경우를 나타낸다. 왼쪽 접선원의 경우에는 그리드의 전력만 사용하는 것이 경제적이고 오른쪽 실선원의 경우에는 태양광발전기, 풍력발전기, 배터리와 그리드를 함께 병행하여 사용하는 것이 경제적이라는 것을 알 수 있다. 또한 그리드 내 전력 가격이 저렴한 왼쪽 접선원의 경우에는 NPC 수치의 최대값과 최소값의 차이가 크지 않지만 그리드 내 전력 가격이 점차 증가함에 따라 NPC 수치의 최대값과 최소값의 차이가 점차 증가하므로 그리드 내 전력 가격이 증가할 경우를 대비하여 신재생에너지를 이용한 마이크로그리드 구성을 미리 갖추는 것이 비용절감에 유리할 것이다.

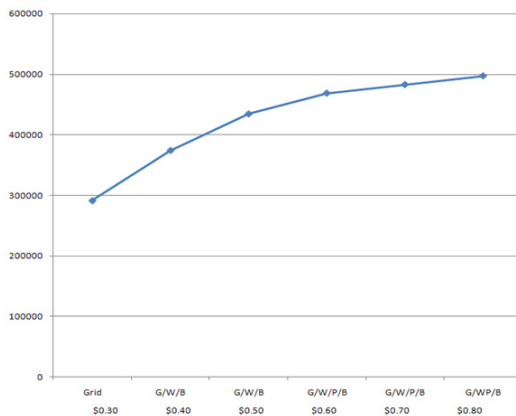


그림 8 유가변동에 따른 최적구성

Fig. 8 The optimal configuration depending on the grid cost

그림 8은 그림 7에서 NPC가 가장 작은 마이크로그리드 구성의 NPC 수치를 선으로 나타낸 것이다. 초기 그리드 내 전력 가격이 0.3\$/kWh인 경우에는 그리드의 전력만 이용하는 것이 경제적이지만 그리드 내 전력 가격이 0.4\$/kWh 이상 0.5\$/kWh이하인 경우에는 풍력발전기 및 배터리를 그리드에 연계하여 사용하는 것이 경제적이며, 그리드 내 전력 가격이 0.6\$/kWh이상인 경우에는 풍력발전기, 태양광발전기 및 배터리를 그리드에 연계하여 사용하는 것이 가장 경제적이라는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 그리드 내 전력 가격과 평균 풍속에 따라 어떤 종류의 신재생 에너지를 이용하여 마이크로그리드를 구성을 하는 것이 더 경제적인지 분석하였다.

평균풍속이 6m/s인 지역에서의 그리드 내 전력 가격이 0.3\$/kWh인 경우에는 그리드의 전력만 사용하는 것이 경제적이고, 그리드 내 전력 가격이 0.4\$/kWh~0.5\$/kWh인 경우에는 풍력발전기 및 배터리를 그리드에 연계하여 사용하는 것이 경제적이며, 그리드 내 전력 가격이 0.6\$/kWh 이상인 경우에는 풍력발전기, 태양광발전기 및 배터리를 그리

드에 연계하여 사용하는 것이 경제적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 그리드 내 전력 가격이 증가할수록 신재생에너지를 이용한 마이크로그리드의 NPC와 그리드의 전력만 사용한 경우의 NPC 차이가 증가한다는 결과도 도출할 수 있었다. 이에 경제적인 전력사용을 위해서는 각 지역 특성에 맞는 마이크로그리드를 구성하여 앞으로의 그리드 내 전력 가격 상승에 대비해야할 것으로 사료된다.

그러나 본 논문에서는 평균 일사량과 평균 부하 사용량을 일정 값으로 설정하여 결과를 도출했기에 일사량과 부하 사용량이 본 논문과 다른 지역의 경우 다소 정확성이 떨어질 수 있다. 이에 향후 연구에서는 일사량 또는 부하사용량도 변수로 두어 보다 세밀하고 정확한 결과를 내도록 할 예정이다.

References

- [1] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, and Y. Yuan, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems," IEEE Trans. Power systems, Vol. 26, No. 2, pp. 802-810, May. 2011.
- [2] A. Ashtari, E. Bibeau, S. Shahidinejad, and T. Molinski, "PEV Charging Profile Prediction and Analysis Based on Vehicle Usage Data," IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 1, pp.341-350, Mar. 2012.
- [3] A. M. O. Haruni, et al, "Dynamic operation and control of a hybrid wind-diesel standalone power systems," in Proceedings of IEEE APEC, pp.162-169, 2010.
- [4] J. Baker, and A. Collinson, "Electrical energy storage at the turn of the millennium," Power Engineering Journal, vol. 13, pp. 107-112, Jun. 1999.
- [5] L. Joerissen, J. Garche, C. Fabjan, and G. Tomazic, "Possible use of vanadium redox-flow batteries for energy storage in small grids and stand-alone photovoltaic systems," Journal of Power Sources, vol. 127, pp. 98-104, Mar. 2004.
- [6] Andrew Mills, et al, "Simulation of hydrogen-based hybrid systems using Hybrid2", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, No. 10, pp. 991-999, 2004.
- [7] S. Qiuye, et al, "Impact of Distributed Generation on Voltage Profile in Distribution System," in Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on, 2009, pp. 249-252.
- [8] G. Pepermans, et al, "Distributed generation : definition, benefits and issues," Energy Policy, Vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [9] Charles Kim, "Lecture Note on Analysis and Practice for Renewable Energy Micro Grid Configuration," 2013. www.mwfr.com

- [10] M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh and R. Niwas, "Modified PQ Control for Power Quality Improvement of Standalone Hybrid Wind Diesel Battery System," Power India conf, 5th, IEEE, pp.1-6, Dec.2012.

저 자 소 개



김 규 호(Kyu-Ho Kim)

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



임 성 용(Sung-Yong Lim)

1990년 1월 4일생. 2014년 한경대 전기공학과 졸업. 2014~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.