

선형계획법에 의한 계통연계형 마이크로그리드의 최적 운용에 관한 연구

논 문

60-8-25

Linear Programming based Optimal Scheduling for Grid-connected Microgrid

박 재 세*
(Jae-Sae Park)

Abstract - Recently, interests on microgrids have been growing as clean power systems. Microgrids include small scaled distributed generation such as wind and solar power as well as diesel generators as main power sources. To operate a microgrid effectively, optimal scheduling for the microgrid is important. Especially, in the grid-connected mode, power trades between the microgrid and the power grid should be considered in optimal scheduling. In this paper, mathematic models for optimal operation of a microgrid were established based on the linear programming. In particular, the shiftable load was considered in the models to optimize it in microgrid operation. To show feasibility of the proposed models, they were applied to optimal microgrid operation and the results were discussed.

Key Words : Microgrid, Grid-connected mode, Optimal operation, Linear programming

1. 서 론

마이크로그리드는 소규모 신재생 전원을 주 전원으로 하고 있으며, 디젤 발전기나 기타 열병합 발전설비를 또한 전원으로 사용하고 있는 소규모 청정 전력시스템으로 최근 그 관심이 고조되고 있으며 상용화를 위한 많은 연구가 이루어지고 있다 [1-6].

마이크로그리드 또한 일반 전력계통과 같이 주파수 유지가 중요한 요구사항이 된다. 이를 위해서 계통연계형에서는 마이크로그리드 내의 전력수급의 불균형은 전력계통과의 전력거래로 이를 해결한다. 즉, 과공급의 경우는 전력계통으로 전력을 역송전하며 공급부족의 경우는 전력계통으로부터 부족분을 수전받는다.

경제적인 마이크로그리드의 운용을 위해서 최적화에 기반한 마이크로그리드의 운용이 요구된다. 특히, 마이크로그리드는 신재생 전원을 포함하고 있는데, 마이크로그리드의 운용측면에서는 일사량, 풍량 등 날씨조건에 따라 발전량이 변동되는 신재생 전원을 확정적으로 고려하기가 현실적으로 어렵다. 이에 대한 현실적인 대안은 전력저장장치를 이용하여 출력을 안정화하는 것인데, 이런 목적의 전력저장장치는 운용적인 측면 보다는 제어적인 관점에서 접근이 이루어지고 있다 [7-9].

최근 마이크로그리드의 운용을 위해서 지능형 에이전트 기반의 마이크로그리드의 운용에 관한 연구가 이루어지고 있다[10-12]. 이는 마이크로그리드 내의 전원, 전력장치 및

부하의 소유자가 다 다른 경우 최적화가 아닌 시장관점의 운용에서 지능형 에이전트 기반의 마이크로그리드의 운용에 대한 새로운 방법을 제시한 것이다. 그러나 마이크로그리드 내의 전원, 전력장치 및 부하의 소유자가 동일한 경우에는 최적화에 의한 운용계획이 효과적이다[13]. 본 논문에서는 일인 소유의 마이크로그리드 또는 운용을 위임받은 경우로 문제를 한정하여 접근하고자 한다.

마이크로그리드 운용의 최적화를 위해서는 마이크로그리드를 비선형으로 모델링하고 이에 대한 최적해를 구하는 것이 실제에 근사하지만 많은 연구에서와 같이 마이크로그리드를 선형적인 관계로 근사화하여 이에 대한 운용을 모델링하는 것도 일반적으로 많이 이용되는 방법이며, 특히, 최적화 관점에서는 선형최적화가 최적해를 보장할 수 있다는 장점이 있다는 것이 일반적으로 알려져 있다[14].

따라서 본 논문에서는 마이크로그리드의 계통연계 운용의 최적화를 위해서 마이크로그리드의 전력수수관계 및 전력회사와 전력거래를 선형화하여 모델링하고 선형계획법에 의해서 최적해를 도출하도록 한다. 특히, 날씨에 의해서 출력이 변동되는 신재생 전원은 전날 예측된 기상정보를 토대로 시간구간별 발전가능한 양을 알 수 있다는 가정을 가지고 문제를 접근하며, 실제 신재생 전원의 발전을 안정되게 하기 위해서 사용되는 전력저장장치는 제어관점에서만 다룬다고 보고 본 논문에서는 신재생 전원의 출력을 시간대별로 고정된 값으로 이용한다. 특히, 운용관점에서는 신재생발전원의 경우, 운용비용이 들지 않아 최대한 발전하는 것이 운용측면에서 효과적이므로 이를 최적화 변수로 고려하지 않고 전체 모델링에서 제약조건에 고정된 출력의 정보만을 이용하고자 한다. 제시된 마이크로그리드의 최적운용을 위한 선형화된 수리적 모델의 적용가능성을 검토하기 위하여 테스트 마이크로그리드에 적용하여 그 운용결과를 검토하고자 한다.

* 정 회 원 : 인천대학교 전기공학과 교수

E-mail : js8700@incheon.ac.kr

접수일자 : 2011년 5월 26일

최종완료 : 2011년 6월 28일

2. 계통연계형 마이크로그리드 및 운용

그림 1은 일반적인 마이크로그리드의 구성을 보여준다. 마이크로그리드는 소규모의 신재생 전원 또는 고효율 전원 등이 분산되어 있으며, 전력저장장치 및 부하들로 구성된 소규모 전력시스템이다 [15]. 그림 1에서 DG는 Distributed Generation, DS는 Distributed Storage, PCC는 Point of Common Connection, CHP-DG는 Combined Heat and Power Distributed Generation의 약자를 의미한다.

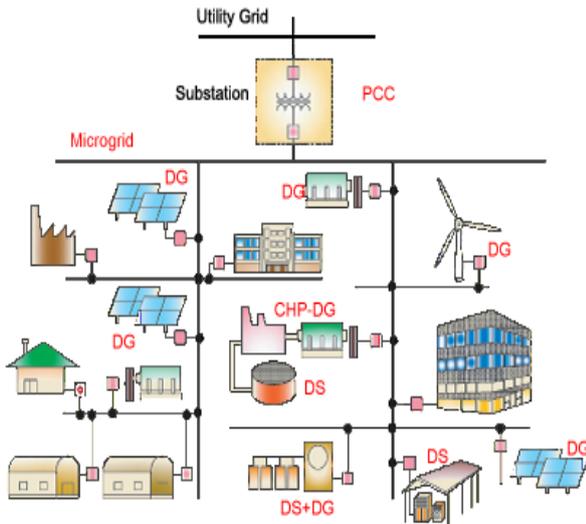


그림 1 마이크로그리드의 구성
Fig. 1 Configuration of a microgrid

일반적인 경우는 전력계통과 연계되어 운전하지만 상위 연계 계통에서의 전력고장 등에 의해서 일시적으로 전력계통에서 분리되어 독립적으로 운전될 수 있다. 특히, 마이크로그리드 내의 주파수 유지를 위해서 과잉 전력공급의 경우는 여분의 전력을 전력계통으로 역송전하며, 전력이 부족한 경우는 연계된 전력계통으로부터 전력을 송전받는다. 효율적인 마이크로그리드의 운용을 위해서는 일반적인 전력계통과 같이 운용구간에 대한 운용계획을 수립하여 마이크로그리드를 수립된 운용계획 하에서 운전하는 것이 요구된다.

본 논문에서는 운영 전일에 전력가격 정보와 예측된 부하를 토대로 최적의 운용 계획을 수립하는 것으로, 1장에서 기술한 것과 같이 신재생 전원은 날씨정보를 통해서 운용구간별 출력을 예상하고 이 데이터를 이용한다. 그리고 출력의 안정화에 이용되는 전력저장장치는 제어문제로 고려하여 본 논문에서 다루는 운용계획에서는 고려하지 않는다.

3. 마이크로그리드의 최적 운용을 위한 수리적 모델

본 논문에서는 계통연계형 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 선형계획법에 의거하여 수립하였으며, 목적함수는 마이크로그리드 운용의 수익을 최대화하는 것으로 식 (1)과 같이 모델링하였다. 여기서 전술한 바와 같이 연료를 사용하지 않는 신재생 전원은 운용비용이 발생하지

않으므로 목적함수에 포함되지 않는다. 식 (1)에서 첫째 항은 전력회사에 전력을 판매하여 발생하는 수익, 둘째 항은 전력회사로부터 전력을 구입하여 발생한 비용, 마지막 항은 연료를 사용하는 발전기들에 의해서 발생한 발전비용을 각각 나타낸다.

$$MAX \sum_{i=1}^N (P_{S_i} \cdot P_{MG_i} - P_{B_i} \cdot P_{FG_i} - \sum_{j=1}^L C_j \cdot P_{FG_j}) \quad (1)$$

여기서,

N: 일일 운용구간 수

i: 운용구간을 나타내는 식별자

P_{S_i} : i번째 운용구간에서 전력회사로 전력판매 가격 [원/kWh]

P_{MG_i} : i번째 운용구간에서 전력회사로 전력판매량 [kWh]

P_{B_i} : i번째 운용구간에서 전력회사로 전력구입 가격 [원/kWh]

P_{FG_i} : i번째 운용구간에서 전력회사로 전력판매량 [kWh]

L: 연료를 사용하는 발전기 수

j: 연료를 사용하는 발전기 식별자

C_j : j번째 발전기의 발전단가 [원/kWh]

P_{FG_j} : j번째 발전기의 발전량 [kWh]

각 운용구간 중의 제약조건들은 다음과 같이 정의된다. 먼저, 연료를 사용하는 각 발전기들은 식 (2)와 같이 운전범위 내에서 운전되어야 한다. 여기서 PC_{FG_j} 는 연료를 사용하는 발전기의 최대발전용량을 나타낸다.

$$P_{FG_j} \leq PC_{FG_j} \quad (2)$$

그리고 연료를 사용하는 발전기들에서 생산한 전력은 마이크로그리드로 공급되거나 전력회사로 판매될 수 있는데, 이 관계는 식 (3)과 같다. 여기서 P_{FGMG_j} 는 j번째 발전기에 의해서 생산된 전력 중 마이크로그리드로 공급되는 것을 나타내고 P_{FGPG_j} 는 전력회사로 판매되는 것을 나타낸다.

$$P_{FGMG_j} + P_{FGPG_j} = P_{FG_j} \quad (3)$$

그리고 연료를 사용하지 않는 신재생전원의 경우도 마찬가지로 발전된 전력은 마이크로그리드 내부로 공급될 수 있거나 전력회사로 판매될 수 있으므로 식 (3)과 같이 식 (4)로 나타낼 수 있다. 여기서 k는 신재생전원의 식별자를 나타내고 P_{NFGMG_k} 는 k번째 신재생전원에 의해서 생산된 전력 중 마이크로그리드로 공급되는 것을 나타내고 P_{NFGPG_k} 는 전력회사로 판매되는 것을 나타낸다. 특히, 1, 2장에서 기술한 바와 같이 신재생전원 날씨조건 내에서 최대로 생산하는 것이 좋으므로 식 (2)와 같이 용량을 고려한 최적화변수로 고려하지 않는다. 즉, 신재생전원의 발전용량 P_{NFGk} 는 입력데이터로 주어진다.

$$P_{NFGMG_k} + P_{NFGPG_k} = P_{NFG_k} \quad (4)$$

전력회사로의 전력판매는 연료를 사용하는 발전기와 신재생전원에 의해서 생산되므로, 이 관계는 식 (5)와 같이 나타낸다. 여기서 M은 신재생전원의 수를 나타낸다.

$$\sum_{j=1}^L P_{FGPG_j} + \sum_{k=1}^M P_{NFGPG_k} = P_S \quad (5)$$

부하의 경우 운용구간에 따라 조정할 수 있는 가변부하 (shiftable load)와 조정할 수 없는 고정부하(fixed load)로 구분할 수 있다. 즉, 전체 가변부하량을 최적화에 의해서 각 운용구간의 가변부하량의 최적화 변수로 그 관계는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 P_{SLi} 는 각 운용구간의 가변부하를 나타내며 P_{SLT} 는 최적화하여야 할 전체 가변부하량을 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^N P_{SL_i} = P_{SLT} \quad (6)$$

전력 공급 및 부하의 균형은 식 (7)로 나타낼 수 있다. 여기서 P_{FL} 는 고정부하의 양을 나타내며, 전체 부하는 연료를 사용하는 발전원과 신재생전원 및 전력회사로부터 구입한 전력으로 공급된다.

$$\sum_{j=1}^L P_{FGMG_j} + P_{B_i} + \sum_{k=1}^M P_{NFGMG_k} = P_{FL} + P_{SL} \quad (7)$$

전체적인 계통연계 마이크로그리드의 최적 운용의 전체 개요는 그림 2와 같이 도식화할 수 있다. 여기서 발전기는 연료를 사용하는 발전기를 의미한다.

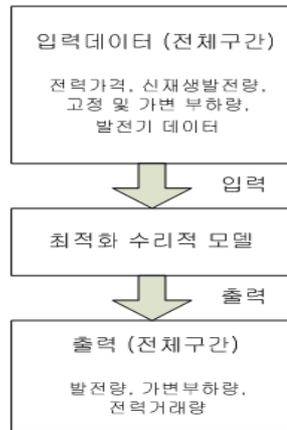


그림 2 최적 마이크로그리드 운용을 위한 정보 흐름
Fig. 2 Information flow for optimal microgrid operation

4. 시뮬레이션

3장에서 수립된 계통연계형 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델의 타당성을 검토하기 위하여 마이크로그리드의 각 운용시간별 조건은 다음과 같이 선정하였다. 시뮬레이션 및 결과 검토의 편의를 도모하기 위하여 다음과 같이 운용조건을 설정하거나 가정하였다. 본 논문에서는 선형 계획법에 의거한 최적해는 LINDO를 적용하였다 [14].

- 전체 운용구간은 12개의 구간으로 설정하였다.
- 전력회사와의 거래 가격은 전력구매 가격과 전력구입 가격으로 구분하여 동일한 경우 (Case 1), 동일하지 않는 경우 (Case 2)로 구분하여 검토하였다.
- 신재생전원의 안정된 출력을 위해서 고려되는 저장장치의 전력량은 최적화변수로 고려하지 않았다.

4.1 Case 1

각 운용구간별 전력거래가격, 고정부하량, 날씨 정보로부터 구한 신재생 전원 2기의 예상 발전량은 표 1과 같다. 그리고 전체 가변부하량은 20 kWh로 설정하였다.

표 1 운전조건

Table 1 Operation condition

운용구간	전력가격 (원/kWh)	고정부하 (kWh)	신재생전원발전량 (kWh)	
			NFG1	NFG2
1	40	80	10	0
2	42	80	12	0
3	45	100	15	0
4	47	110	14	0
5	50	130	15	5
6	55	140	17	8
7	60	155	20	10
8	65	160	22	6
9	55	170	20	5
10	50	155	18	0
11	45	120	15	0
12	42	90	12	0

연료를 사용하는 발전기는 3기를 고려하였으며, 각 발전기의 발전단가와 최대발전용량은 표 2와 같이 설정하였다.

표 2 연료를 사용하는 발전기 데이터

Table 2 Data of generators using fuels

발전기	발전단가 (원/kWh)	최대발전용량 (kWh)
FG1	30	50
FG2	40	40
FG3	50	30

제시된 계통연계형 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 이용하여 수립된 Case 1의 최적운용 결과는 표 3과 같다. 표 3에서 확인할 수 있듯이 전력 공급 및 수요의 균형이 이루어지며, 가변부하는 전력가격과 부하량이 고려된 운용구간 1로 배분된다. 전체적인 최적화변수들의 값은 타당한 것으로 확인된다.

표 3 Case 1의 최적운용 결과

Table 3 Results of optimal operation of Case 1

운용 구간	고정부하 (kWh)	가변부하 (kWh)	발전량 (kWh)		
			FG1	FG2	FG3
1	80	20	50	40	-
2	80	-	50	40	-
3	100	-	50	40	-
4	110	-	50	40	-
5	130	-	50	40	30
6	140	-	50	40	30
7	155	-	50	40	30
8	160	-	50	40	30
9	170	-	50	40	30
10	155	-	50	40	30
11	120	-	50	40	-
12	90	-	50	40	-
운용 구간	발전량 (kWh)		전력구입 (kWh)	전력판매 (kWh)	
	NFG1	NFG2			
1	10	0	-	-	
2	12	0	-	22	
3	15	0	-	5	
4	14	0	6	-	
5	15	5	-	10	
6	17	8	-	5	
7	20	10	5	-	
8	22	6	12	-	
9	20	5	25	-	
10	18	0	17	-	
11	15	0	15	-	
12	12	0	-	12	

4.2 Case 2

Case 2에서는 전력구입 가격과 전력판매 가격이 다른 경우에 대해서 검토를 수행한다. 모든 조건은 Case 1의 경우와 동일한 것으로 설정하였으며, 표 1의 전력가격은 전력구입 가격과 동일하게 설정하고 전력판매 가격만 표 4와 같이 추가적으로 고려된다.

제시된 계통연계형 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 이용하여 수립된 Case 2의 최적운용 결과는 표 5와 같다. 표 5에서 확인할 수 있듯이 전력판매 가격과 전력구입 가격의 차이에 따라서 운용에서 차이가 발생함을 알 수 있다. 즉, 운용구간 5에서 FG3의 발전량이 Case 1에서는 30 kWh인데 반하여 Case 2에서는 20 kWh로 달라진다. 이는 전력구입 가격이 50 원/kWh로 FG3를 이용하여 발전하는 것이 전력을 구입하는 것보다 운용 면에서 유리하지만 전력판매 가격이 48 원/kWh로 판매하는 것은 발전단가인 50 원/kWh로 불리하기 때문에 마이크로그리드에서 필요한 양만큼을 발전하기 때문이다. 이와 같은 결과는 합리적인 결과로 수립된 최적운용을 위한 수리적 모델이 타당함을 보여준다.

표 4 운용구간 별 전력판매 가격

Table 4 Price for selling power to power grid according to intervals

운용구간	1	2	3	4	5	6
판매가격 (원/kWh)	38	40	43	45	48	53
운용구간	7	8	9	10	11	12
판매가격 (원/kWh)	58	63	53	48	43	40

표 5 Case 2의 최적운용 결과

Table 5 Result of optimal operation of Case 2

운용 구간	고정부하 (kWh)	가변부하 (kWh)	발전량 (kWh)		
			FG1	FG2	FG3
1	80	20	50	40	-
2	80	-	50	40	-
3	100	-	50	40	-
4	110	-	50	40	-
5	130	-	50	40	20
6	140	-	50	40	30
7	155	-	50	40	30
8	160	-	50	40	30
9	170	-	50	40	30
10	155	-	50	40	30
11	120	-	50	40	-
12	90	-	50	40	-
운용 구간	발전량 (kWh)		전력구입 (kWh)	전력판매 (kWh)	
	NFG1	NFG2			
1	10	0	-	-	
2	12	0	-	22	
3	15	0	-	5	
4	14	0	6	-	
5	15	5	-	10	
6	17	8	-	5	
7	20	10	5	-	
8	22	6	12	-	
9	20	5	25	-	
10	18	0	17	-	
11	15	0	15	-	
12	12	0	-	12	

4.3 결과 검토

Case 1, 2를 통해서 주어진 마이크로그리드 운용조건에 대해서 제시한 최적운용을 위한 수리적 모델을 통해서 타당한 운용결과가 도출됨을 확인할 수 있었다. 특히, 본 논문에서는 선형계획법에 의거하여 수리적 모델을 수립하고 이에 대한 최적해를 구하였으므로, 일반적으로 알려져 있는 선형계획법이 최적해를 보장한다는 사실을 통해서 도출된 운용계획은 최적운용계획임을 보장할 수 있다. 특히, 전력판매 가격이 달라지는 조건에 대해서도 합리적인 결과가 도출되었으며, 이는 제시한 최적운용을 위한 수리적 모델이 전력판매 가격과 전력구입 가격이 같거나 다른 경우 모두 적용이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 선형계획법에 의거하여 계통연계형 마이크로그리드의 최적 운용을 위한 수리적 모델을 제시하였다. 특히, 선형계획법에 의거하여 수립한 수리적 모델과 그 해는 최적해를 보장한다는 장점이 있다. 또한 계산 속도 면에서도 일반적으로 알려진 바와 같이 선형계획법에 의한 수리적 모델이 최적해를 구할 때 다른 최적화 기법 보다 빠르다는 장점이 있다. 본 논문에서 제시한 수리적 모델에 의해서 마이크로그리드의 두 가지 운용 조건에 대해서 타당한 해가 도출됨을 통해서 또한 제시한 수리적 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과에서 제시한 계통연계형 마이크로그리드를 위한 최적운용을 위한 수리적 모델은 일인 소유의 또는 운용이 위임된 계통연계형 마이크로그리드의 최적운용에서 실제 적용이 가능할 것으로 판단되며, 이에 대한 활용이 기대된다.

마이크로그리드에 연료전지, 마이크로터빈 기반의 열병합 발전이 도입이 예상된다. 따라서, 추후 연구로는 제시한 계통연계형 마이크로그리드의 최적운용 모델에 열병합 발전을 고려할 수 있도록 수리적 모델을 확장할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2010년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] N. Hatziargyriou, H. Asano, H. R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 5, Issue 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007.

[2] M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter, N. Hatziargyriou, and T. Green, "Real-Word MicroGrids - An Overview," 2007 International Conference of System of Systems Engineering, pp.1-8, 2007.

[3] R.H. Lasseter, "Microgrids", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, pp. 146-149, 2001.

[4] J.A.P Lopes, C.L. Moreira, and A.G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, Issue 2, pp.916-924, May 2006

[5] F. Katiraei, M.R. Iravani, and P.W. Lehn, "Micro-grid Autonomous Operation during and Subsequent to Islanding Process", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, Issue 1, pp.248-257, Jan. 2006

[6] G. Hernandez-Gonzalez, and R. Iravani, "Current Injection for Active Islanding Detection of Electronically-interfaced Distributed Resources", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, Issue 3, pp.1698-1705, July 2006

[7] J.-Y. Kim, J.-H. Jeon, S.-K. Kim, C. Cho, J. H. Park, H.-M. Kim, and K.-Y. Nam, "Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 12, pp.3037-3048, Dec. 2010.

[8] J.-H. Jeon, J.-Y. Kim, H.-M. Kim, S.-K. Kim, C. Cho, J.-M. Kim, J.-B.o Ahn, and K.-Y. Nam, "Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 12, pp.2919-2929, Dec. 2010.

[9] J.-Y. Kim, S.-K. Kim, and J.-H. Park, "Contribution of an Energy Storage System for Stabilizing a Microgrid During Islanded Operation," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 194-200, Jun. 2009.

[10] H.-M. Kim, W. Wei, and T. Kinoshita, "A New Modified CNP for Autonomous Microgrid Operation based on Multiagent System," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 139 - 146, Jan. 2011.

[11] H.-M. Kim, T. Kinoshita, and M.-C. Shin, "A Multiagent System for Autonomous Operation of Islanded Microgrid based on a Power Market Environment," Energies, Vol. 3, Issue 12, pp.1972-1990, Dec. 2010.

[12] H.-M. Kim, and T. Kinoshita, "A Multiagent System for Microgrid Operation in the Grid-interconnected Mode," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 246-254, Jun. 2010.

[13] H.-M. Kim, and T. Kinoshita, "A New Challenge of Microgrid Operation", Communications in Computer and Information Science, Vol. 78, pp.250-260, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Sep. 2010.

[14] L. Schrage, Optimization Modelling with LINGO, Lindo Systems Inc., 2006.

[15] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids Management-Controls and Operation Aspects of Microgrids,"IEEE Power Energy, Vol. 6, Issue 3, pp.54-65, May-Jun. 2008.

저 자 소 개



박재세 (朴載世)

1952년 1월 25일생. 1975년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 성균관 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인천대학교 전기공학과 교수.

Tel : 032-835-8766

E-mail : js8700@incheon.ac.kr