

신뢰도를 고려한 태양광시스템의 배전계통 연계 알고리즘에 관한 연구

논문
60P-4-13

A Study on the Algorithm for Interconnection of PV System on Power Distribution System Considering Reliability

문종필†
(Jong-Fil Moon)

Abstract - In this paper, when photovoltaic (PV) systems are connected to power distribution system, most effective capacity and connected-point of PV system are presented considering power distribution system reliability. The reliability model of PV system is presented considering the duration of sunshine. Also the model of time-varying load and reliability test system bus2 model are used. To simulate the effects of PV system, various cases are selected; (1) base case which is no connection of PV system to power distribution system when faults are occurred, (2) 3[MW] case which is 3[MW] connection of PV system (3) 4[MW] case, and (4) 20[MW] case which is 20[MW] connection of PV system to the bus of power distribution system. The capacity limit of connected PV system is settled to 14[MW] for all cases except case 4. The reliability for residential, general, industrial, and educational customer is evaluated

Key Words : Reliability, PV System, Interconnection, Power Distribution System

1. 서론

현재 우리나라를 비롯한 세계 각국은 기후변화 및 온난화에 대한 대응으로 신재생에너지에 대한 관심이 어느 때보다 높다. 이러한 신재생 에너지는 분산전원 형태로 전력계통, 특히 배전계통에 주로 연계되어 운전하고 있는 실정이다. 분산전원이 연계되면, 계통에 이상 발생시 분산전원을 통하여 중요부하에 전력을 공급할 수 있고 또한 고장시 다른 선로로부터 전력을 받을 시 연계용량 확보에 유리한 점이 있다. 즉, 배전계통 신뢰도 향상을 이룰 수 있게 된다. 그러나 현재까지 대부분의 연구는 태양광 출력제어, 배전계통 연계시 보호협조 부분에 초점이 맞춰져 있고, 태양광 시스템(PV)을 연계할 경우 신뢰도 향상에 대한 연구는 미미한 실정이다 [1]. 태양광발전시스템은 2004년에 0.2[MW] 1건을 시작으로 하여 2009년에는 104.5[MW]가 설치되었으며, 2015년까지 정부의 세계 5대 신재생에너지 강국 도약 정책에 따라 설치용량이 기하급수적으로 증가할 것으로 예상되고 있다[2]. 이러한 PV시스템을 배전계통에 연계시 신뢰도 측면에서 가장 효과적인 위치에 가장 효과적인 용량을 연계하게 되면 배전계통 신뢰도를 가장 효과적으로 향상시킬 수 있으며, 또한 계통 신뢰도 향상을 위한 추가적인 비용을 절감할 수 있게 된다.

따라서 본 논문에서는 배전계통 신뢰도 측면에서 바라본 태양광시스템의 최적 용량 및 최적 연계위치 제안한다.

본 논문은 신재생 에너지의 분산전원 연계가 늘어나고 있는 상황에서, 신뢰도를 고려하여 분산전원의 최적의 용량 및

연계위치를 제안하여 계통 신뢰도 향상 효과를 얻을 수 있고, 향후 스마트그리드로 발전시 가장 기초적인 자료로 이용 가능할 것이다.

2. 배전계통 신뢰도 평가

2.1 PV 신뢰도 모델

태양광 발전시스템은 태양만 비추면 발전을 할 수가 있으나, 날씨가 흐리거나 갑자기 구름이 태양을 가리게 되면 즉시 발전을 멈추기 때문에, 에너지관리공단 통계에 따르면 평균 하루 평균 3.8시간만 발전을 하고 있는 실정이다. 이 3.8시간도 지속적인 시간이 아니라 하루 평균 값이기 때문에 신뢰성 측면에서는 좋지 않은 발전원이다.

본 논문에서는 계산을 간략화를 위하여 평균 4시간 발전하는 것으로 가정하여 모델링하였다. 즉 PV시스템에 하루 중에서 발전을 수행하고 있을 확률은 $4/24 = 1/6$ 이며 발전을 수행하고 있지 않을 확률은 $20/24 = 5/6$ 이다. 또한 발전 시간은 일조, 일몰시간을 고려하여 오전 9시~오후 5시로 설정하였다. 다음 그림 1은 태양광 발전시스템의 시간에 따른 발전정도의 예를 나타낸다.

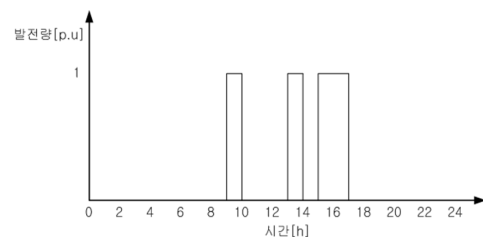


그림 1 시간에 따른 태양광 발전 추이 (예)
Fig. 1 Generation trend of PV system according to time

† 교신저자, 중신회원 : 충주대 전기공학과 조교수 · 공박
E-mail: moon@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 10월 19일

최종완료 : 2011년 11월 6일

2.2 배전계통 모델

신뢰도 평가를 위한 모델은 IEEE Bus2 모델을 사용하였다[3-6]. 그림 2는 이 모델을 나타낸다. 신뢰도 데이터는 참고문헌과 같으며 차이가 있는 데이터는 표 1~3에 나타내었다.

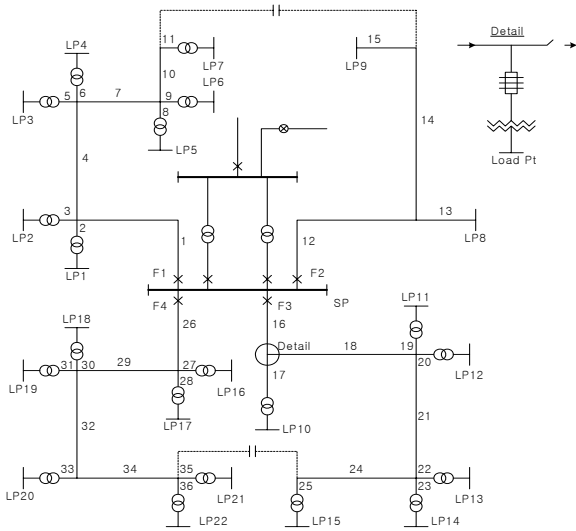


그림 2 RTS Bus-2 모델
Fig. 2 RTS Bus-2 model

표 1 수용가 데이터
Table 1 Customer's data

LP 개수	Load points (LP)	수용가 종별	LP당 평균부하 (MW)	수용가 수
5	1-3, 10, 11	주택용	1	400
4	12, 17-19	주택용	0.8	300
1	8	일반용	3.00	1
1	9	일반용	4.00	1
6	4, 5, 13, 14, 20, 21	산업용	1.5	1
5	6, 7, 15, 16, 22	교육용	0.6	20
합계	22		27.2	3,308

표 2 부하 데이터
Table 2 Load data

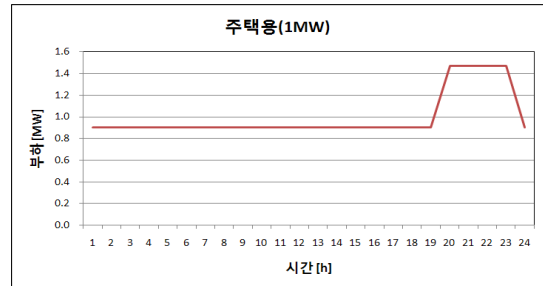
피더번호	LP	피더 평균 부하(MW)	수용가 수
F1	1-7	7.2	1,242
F2	8-9	7	2
F3	10-15	6.4	1,122
F4	16-22	6.6	942
TOTALS	22	27.2	3,308

표 3 고장률 및 복구시간
Table 3 Failure rate and repair time

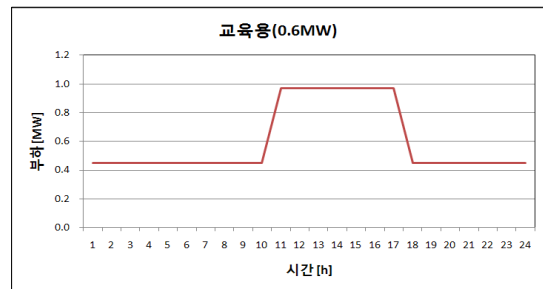
	고장률 (f/yr)	수리시간 (hour/f)	연계시간 (hour/f)
가공 선로	0.065	4	0.5
변압기	0.015	2	1

2.3 부하 모델

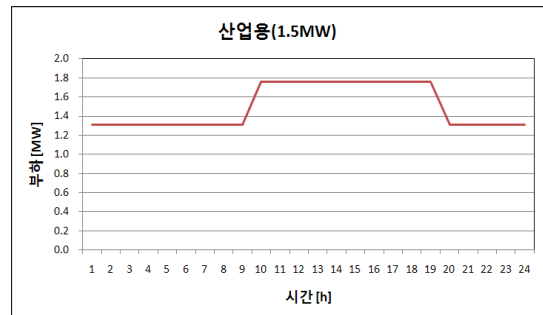
PV시스템이 시간에 따라 변하는 값이므로, 부하도 시간에 따라 변하는 시변부하로 모델링되어야 한다. 본 논문에서는 참고문헌 [7]에 근거하여 수용가 종별에 따라 부하를 모델링하였다. 그림 3은 수용가 종별에 따른 시변 부하 모델의 몇 가지 예를 나타낸다.



(a) 주택용 (1MW)



(b) 교육용 (0.6MW)



(c) 산업용 (1.5MW)

그림 3 수용가 종별에 따른 부하곡선
Fig. 3 Load curve according to the type of customers

2.4 배전계통 신뢰도 평가

배전계통 신뢰도 평가는 다음과 같이 크게 5가지로 분류하여 수행하였다.

- 1) 고장시 연계가 없는 경우
- 2) 고장시 용량에 관계없이 연계가 가능한 경우
- 3) 고장시 3[MW]까지만 연계가 가능한 경우
- 4) 고장시 4[MW]까지만 연계가 가능한 경우
- 5) 배전모선에 대용량(20[MW]) 열병합 발전설비가 연계되어 있는 경우

모든 경우에 대하여 배전계통의 사고시 피더당 용량인 14[MW]를 넘지 않도록 제약조건을 설정하였다.

3. PV시스템 연계위치 및 용량 결정

분산전원을 배전계통에 연계하게 되면, 계통에 사고가 발생하여 전력을 공급받지 못할 경우 분산전원을 통하여 전력을 공급받을 수 있으므로 전력신뢰도는 향상된다. 그러나 배전계통의 어느 위치에 어떠한 용량의 분산전원을 설치하는 것이 신뢰도 측면에서 가장 효율적인지에 대하여 설명한다. 신뢰도 및 비용측면에서는 현재 PV시스템은 경제성이 없다. 그러나 화석에너지의 고갈 및 에너지 비용이 점차 증가하고 있는 현실에서 무한정 사용 가능한 PV시스템은 향후 보다 많이 사용될 것이다. 본 논문에서는 PV시스템을 설치할 경우 어느 위치에 얼마 크기의 용량으로 우선적으로 설치해야 하는지 우선순위를 결정하고자 한다. 즉, 만약 PV시스템을 설치하고자 한다면 배전계통의 어느 위치에 얼마 크기의 용량을 설치하는 것이 신뢰도 측면에서 가장 효과적인지에 대한 문제로 변경한다. 여기서는 각 LP별 Unavailability를 평가하여 신뢰도가 가장 좋지 않은 순서부터 나열하여 분산전원을 설치하는 것으로 결정하였다.

다음 문제는 각 LP에 연계할 PV시스템의 용량을 얼마로 결정하는 것이 가장 효과적인가 이다. 이 문제는 부하모델에 따라 다음과 같이 3가지 경우로 나눌 수 있다.

- 1) 기저부하용량 DG 연계시
- 2) 평균부하용량 DG 연계시
- 3) 최대부하용량 DG 연계시

여기서 2번의 경우는 기저부하용량을 연계하였을 경우와 효과가 동일하기 때문에 기저부하용량을 설치하는 것이 보다 경제적이므로 케이스 선정에서 제외된다. 일조시간을 9시~17시로 설정하였으므로 앞의 수용가 종별에 따른 부하곡선을 고려하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

표 4 수용가에 따른 연계용량 및 고장시간 감소율

Table 4 Interconnected power and decreasing rate of repair time according to the type of customers

수용가 종류	연계용량	연계가능 시간	일조시간 고려시 고장시간 감소율
주택용 (1MW, 0.8MW)	기저부하용량	8[h]	5/6
일반용 (3MW)	기저부하용량	1[h]	47/48
일반용 (4MW)	설치불가(3MW초과)		
산업용 (1.5MW)	최대부하용량	8[h]	5/6
교육용 (0.6MW)	기저부하용량	1[h]	47/48
	최대부하용량	8[h]	5/6

위의 표에서 교육용 수용가에 대하여는 기저용량을 연계할지 또는 최대용량을 연계할지는 계통 상황에 따라 다르게 나타난다. 다시 말하면, 피더 연계용량 한계 3[MW]에 대하여, 교육용 수용가에 최대부하용량으로 연계할 경우 남은 용

량을 다른 부하에 추가로 연계 가능할 경우에는 기저부하용량으로 결정하는 것이 유리하고, 만약 남은 용량을 다른 수용가에 연계 불가능할 경우에는 최대부하용량으로 결정하는 것이 신뢰도 측면에서 유리하게 된다. 따라서 어떤 용량으로 결정할지는 계통 상황에 따라 결정하여야 한다.

이상의 분산전원 연계위치 및 연계용량 결정 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

- Step1. 계통 연계조건(가능, 불가능, 연계용량)에 따라 신뢰도 평가
- Step2. Unavailability가 높은 순서대로 정렬 후 순서 결정
- Step3. 순서에 따라 LP별 수용가 종별 확인 및 표 4에 따라 연계용량 결정
- Step4. 교육용 수용가의 경우에는 기저용량 및 최대용량 두 가지 경우 모두 계산
- Step5. 각 피더당 연계용량 3[MW]를 초과하는지 점검
- Step6. 3[MW]를 초과하면 해당 LP에 연계하지 않고 다음 순위의 LP에 연계가능한지 점검 후 연계
- Step7. 모든 LP에 대하여 결정시 신뢰도 계산 후 종료

4. 분산전원 연계시 배전계통 신뢰도 평가

본 장에서는 2.4절에서 설정한 5가지 경우에 대하여 신뢰도를 평가를 수행하였다. 한 예로 3번 Case의 경우, 고장시 3[MW]까지만 연계가 가능한 경우에 연계우선순위 및 연계용량을 결정한 결과는 표 5와 같다.

표 5 연계우선순위 및 연계용량

Table 5 Priority and power of PV interconnection

피더 번호	LP	U [h/yr]	기저용량설치		최대용량설치	
			연계용량	우선순위	연계용량	우선순위
F4	20	1.5510	1.76	1	1.76	1
F3	13	1.5510	1.76	2	1.76	2
F3	14	1.5510	1.76	주1)	1.76	주1)
F4	18	1.1480	0.72	3	0.72	3
F4	19	1.1480	0.72	주1)	0.72	
F1	3	1.1480	0.9	4	0.9	4
F1	4	1.1480	1.76	5	1.76	5
F3	11	0.9920	0.9	6	0.9	6
F3	12	0.9920	0.72		0.72	
F4	21	0.7791	1.76	주1)	1.76	
F4	22	0.7791	0.45	7	0.97	
F1	5	0.7678	1.76		1.76	
F1	6	0.7678	0.45		0.97	
F2	9	0.7670	0		0	
F1	7	0.6085	0.45		0.97	
F4	16	0.5890	0.45		0.97	
F4	17	0.5890	0.72		0.72	
F1	1	0.5890	0.9		0.9	
F1	2	0.5890	0.9		0.9	
F3	15	0.5711	0.45		0.97	
F2	8	0.4030	2.45	8	2.45	7
F3	10	0.3810	0.9		0.9	

주1) 피더당 연계용량 3MW 용량 초과로 인하여 연계하지 못하고 다음 순위의 수용가가 연결되는 경우

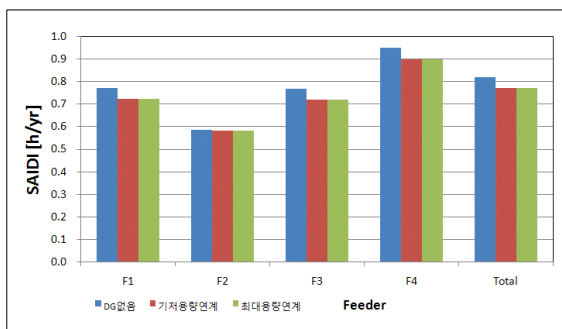
그림 4는 PV를 연계하지 않을 경우, 기저용량 연계할 경우, 최대용량을 연계할 경우에 대한 SAIDI, CAIDI, ENS지수를 나타낸다. 여기서 각 신뢰도 지수는 식 (1)~(3)과 같다.

$$SAIDI = \frac{\text{수용가 정전시간의 합계}}{\text{총수용가수}} [h/yr] \quad \text{식 (1)}$$

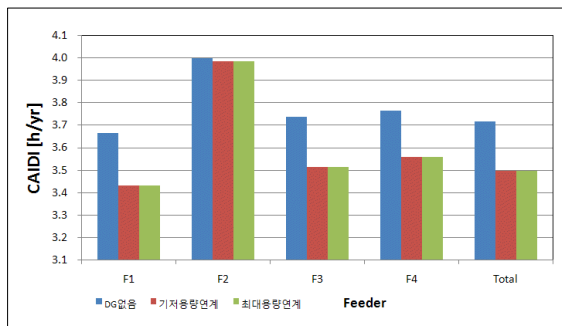
$$CAIDI = \frac{\text{수용가 정전시간합계}}{\text{수용가 정전횟수합계}} [h/yr] \quad \text{식 (2)}$$

$$ENS = \text{공급받지 못한 에너지합계} [kWh] \quad \text{식 (3)}$$

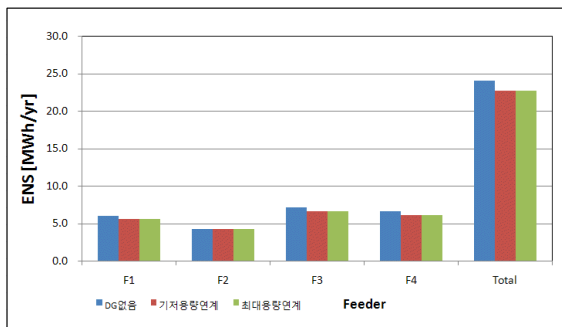
SAIDI는 수용가당 연간 평균정전시간, CAIDI는 정전을 경험한 수용가당 연간 평균정전시간, ENS는 정전으로인하여 공급받지 못한 kWh의 양을 나타낸다.



(a) SAIDI



(b) CAIDI



(c) ENS

그림 4 분산전원 유무에 따른 신뢰도 지수
Fig. 4 Reliability indices with and without PV system

앞의 결과와 같이 분산전원을 연계할 경우 교육용 수용가에 대하여 기저용량으로 설치하는 경우와 최대용량으로 설치하는 경우 신뢰도 지수에 약간의 차이를 보인다. 그러나 이 값은 기저용량과 최대용량으로 설치하는 경우 계통에 설치한 총 분산전원 용량값에서 차이가 있기 때문에 여기서는 설치한 분산전원 용량[MW]에 대하여 SAIDI값이 얼마나 개선되었는가를 평가하였다. 개선효과 수식은 다음 식 (4)와 같다.

$$\text{개선효과} = \frac{SAIDI - SAIDI_{DG}}{P_{DG}} \times 100[\%] \quad \text{식 (4)}$$

식 (4)에서, SAIDI는 PV를 연계하지 않았을 경우의 SAIDI를 나타내며, SAIDI_{DG}는 PV를 연계하였을 때의 SAIDI를 나타낸다. P_{DG}는 SAIDI_{DG}의 값이 나올 때의 PV 연계용량을 나타낸다. 따라서 설치한 PV의 용량대비 SAIDI 개선효과를 분석할 수가 있게 된다. 개선효과를 분석한 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6 분산전원 설치용량에 따른 SAIDI개선 효과

Table 6 Effect of SAIDI Improvement according to power of PV system

Case	DG없을 시 SAIDI	기저용량 설치시		
		SAIDI [y/yr]	설치용량 [MW]	개선효과 [%]
1	0.853	0.826	10.97	0.247
2	0.608	0.591	10.70	0.156
3	0.822	0.773	10.70	0.454
4	0.821	0.757	11.01	0.579
5	0.630	0.601	10.70	0.269

Case	DG없을 시 SAIDI	최대용량 설치시		
		SAIDI [y/yr]	설치용량 [MW]	개선효과 [%]
1	0.853	0.848	10.64	0.054
2	0.608	0.597	10.57	0.099
3	0.822	0.773	10.25	0.473
4	0.821	0.746	10.11	0.736
5	0.630	0.608	10.50	0.211

위 결과에서, PV를 설치할 경우 설치용량대비 최저 0.054[%]에서 최대 0.736[%]의 신뢰도 개선 효과를 보인다. 따라서 PV를 본 논문의 알고리즘에 따라 설치할 경우 임의로 설치위치 및 용량을 결정하는 것에 비하여 SAIDI를 개선할 수 있음을 보여준다.

그러나 여기서 도출한 SAIDI 개선효과는 기저용량설치와 최대용량설치 및 계통 상황에 따라 다르게 나타난다. 즉, 앞서 설명한 바와 같이 피더 연계용량 한계 3[MW]에 대하여, 교육용 수용가에 최저부하용량으로 연계할 경우 남은 용량을 다른 부하에 추가로 연계 가능할 경우에는 기저부하용량으로 결정하는 것이 유리하고, 만약 남은 용량을 다른 수용가에 연계 불가능할 경우에는 최대부하용량으로 결정하는

것이 신뢰도 측면에서 유리하게 된다. 따라서 어떤 용량으로 결정할지는 계통 상황에 따라 결정하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 활발히 연구되어 계통에 적용되고 있는 PV시스템에 대하여 계통에 연계될 경우 신뢰도 측면에서 가장 효과적인 위치 및 용량을 제안하였다. 우선, 일조시간을 고려하여 PV시스템의 신뢰도 모델을 설정하였고, RTS BUS2 모델을 이용하였다. PV가 일조시간 및 날씨 상황에 따라 출력이 변하기 때문에, 부하도 시간에 따라 변하는 시변 부하 모델을 사용하였다. 시뮬레이션을 위한 케이스 선정은 고장시 계통연계가 없는 경우를 기본 케이스로 선정하고, 국내 배전계통의 상황을 고려하여 연계가 가능한 경우, 3[MW]까지 연계가 가능한 경우, 4[MW]까지 연계가 가능한 경우, 모선에 대용량(20[MW])의 발전기가 연계되어 있는 경우로 분리하였으며, 계통의 용량제한은 14[MW]로 설정하였다.

본 논문에서는 분산전원을 설치할 경우 설치위치의 우선순위 결정 및 최적 설치용량 결정 문제를 연구하였다. 5가지 Case에 대하여 각각 분산전원 연계가 없는 경우, 교육용 수용가에 대하여 기저용량 만큼 분산전원 용량을 설치하는 경우, 최대용량 만큼 분산전원 용량을 설치하는 경우에 대하여 각각 우선순위를 결정하여 신뢰도를 평가하였다.

각각 기본신뢰도 지수 및 추가신뢰도 지수를 평가하여 상호 비교하여 신뢰도 개선효과를 검증하였으며, 기저용량 설치와 최대용량 설치시에 총 분산전원의 용량이 서로 상이하기 때문에 설치용량대비 SAIDI개선효과를 도출하여 신뢰도 측면에서 보다 효과적인 Case를 선정하였다. 기저용량을 설치할지 최대용량을 설치할지를 결정하는 문제는 계통 상황에 따라 다른 결과가 도출되는 것을 확인하였다.

System Data and Results”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, No. 2, May 1991.

- [5] J. Gates, R. Billinton, and G. Wacker, "Electric service reliability worth evaluation for government, institutions and office buildings," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 43-48, Feb. 1999.
- [6] L. Goel, "A C.J. Gates, R. Billinton, and G. Wacker, "Electric service reliability worth evaluation for government, institutions and office buildings," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14, No. 1, pp. 43-48, Feb. 1999.
- [7] Korea Electric Power Research Institute. A study on the improvement of pole-transformer load management (technical report). Korea Electric Power Corporation, 1999; TR.96ES15.S1998.86.

저 자 소 개



문 종 필 (文鍾必)

1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2009년~현재 충주대학교 전기공학과 조교수

Tel : 043-841-5146

Fax : 043-841-5140

E-mail : moon@cjnu.ac.kr

감사의 글

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원 및 2009년도 지식경제부 전력산업원천기술개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다

참 고 문 헌

- [1] Philip P. Barker, Robert W. De Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems: part1-radial distribution systems", IEEE PES Summer Meeting, Vol. 13, pp. 1645-1656, July 2000
- [2] 김선규, 정종욱, 정진수, "태양광 발전설비 운용실태에 관한 조사연구", 2010년 대한전기학회 전기설비부문회 추계학술대회 논문집, pp. 510-512, 2010년 11월.
- [3] Richard E. Brown, Electric Power Distribution Reliability, Marcel Dekker, Inc. 2002.
- [4] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, et. al, "Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution