

분산전원의 영향과 정전비용을 고려한 신뢰도 향상

(Reliability Improvement Considering Effect of Dispersed Generator
and Interruption Cost in Distribution Systems)

김규호* · 송경빈**

(Kyu-Ho Kim · Kyung-Bin Song)

요 약

본 연구에서는 배전계통의 부하지점의 부하형태에 따른 정전비용의 영향을 고려하여 분산전원을 설치함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하는 방안을 제안하였다.

가정용, 산업용, 상업용, 사무용 및 농업용 등 부하형태를 실제 계통과 유사하게 고려함으로써 정확한 신뢰도 지수와 운영비용을 구할 수 있고, 이를 통해 총 운영비용 최소화에 더욱 접근할 수 있다. 특히 정전시 각 부하지점에 설치된 분산전원에 의해 전력이 공급되어 전력구입 비용과 정전비용의 경우 효과적으로 감소됨을 알 수 있었으며, 정전빈도와 정전시간이 감소되어 전력 공급률이 향상되어 신뢰도 지수가 좋아졌음을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents a method to improve reliability considering dispersed generator(DG) installation and interruption cost with load types. It is used to the different interruption costs with load pattern of daily peak load. The objective functions such as power losses cost, operation cost of DG, power buy cost and interruption cost are minimized for reliability improvement and efficient operation. The several indices for reliability evaluation are improved by dispersed generator installation. The proposed method is applied to IEEE 13 bus test systems to demonstrate its effectiveness.

Key Words : Dispersed Generator(DG), Reliability Improvement, Interruption Cost, Load types

1. 서 론

최근 미국 북동부와 캐나다 남부지역의 8개주에

걸쳐 대규모 정전사태가 발생하여 공항, 수도 등 기간시설이 일시 마비되고 공장운영이 정지되는 사태가 발생하였다. 이 정전사고에서 금융기관, 관공서, 경찰서 등에 설치된 태양전지, 연료전지, 전지전력저장시스템(BESS), 디젤발전, 열병합발전 등에 설치되어 있는 분산전원(DG)이 정전에 따른 혼란의 확산을 막는데 결정적 역할을 하였다.

따라서 분산전원의 도입은 상위계통으로부터 전

* 주저자 : 안산공과대학 전기과 부교수

** 교신저자 : 송실대학교 전기공학부 조교수

Tel : 02-820-0648, Fax : 02-817-7961

E-mail : kbsong@ssu.ac.kr

접수일자 : 2006년 11월 6일

1차심사 : 2006년 11월 7일

심사완료 : 2006년 11월 15일

력을 공급받지 못할 때에도 분산전원의 운영에 의해 정전비용을 최소화함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있으며, 배전계통의 계획에서 부하증가에 따른 선로나 변전소의 증·신설과 비교하여 신뢰성이나 경제적인 공급이라는 기준을 통해 최적의 확장전략을 수립할 수 있으며, 대도시권에 있어서는 전력수급의 지역간 불평형 및 전력수급의 문제를 완화할 수 있다[1]. 배전계통에 분산전원을 연결하는 것은 계통을 운영하거나 안전도 문제에 큰 영향을 미치는 복잡한 문제이다. 다중목적함수의 성능지수를 제시하여 해석하는 방법이 연구되었다[2]. 배전계통의 운영비용을 최소화하기 위해 계획단계에서 분산전원의 설치 위치와 용량을 결정하여 시간에 따른 부하와 비용을 분석하여 송전계통으로부터 전력을 구입하거나 분산전원을 운영하여 운영비용을 줄일 수 있는 방안도 연구되었다[3-4]. 또한 배전계통에 분산전원의 설치 및 연계를 위하여 부하형태별 특성을 고려한 연구도 진행되었다[5].

본 연구에서는 배전계통의 효율적인 운영을 위하여 분산전원을 설치함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하는 방안을 제안하였다. 특히 배전계통의 부하지점의 부하형태(가정용, 산업용, 상업용, 사무용, 농업용 등)에 따른 정전비용의 영향을 고려하여 분산전원을 설치함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하고 신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 제안하였다.

2. 신뢰도 향상을 위한 정식화

2.1 목적함수

2.1.1 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 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 연간 정전용량은 각 부하지점(모선) j 의 첨두부하량 P_{peak}^j 과 신뢰도 지수인 고장률(λ)과 수리시간(r)을 이용하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 표 1은 각 부하지점 j 에서의 부하형태별 정전비용을 나타낸 것이다.

$$P_{Out}^j(P_{DG}^j) = P_{peak}^j \lambda^j r^j \quad (2)$$

표 1. 부하형태별 정전비용
Table 1. Interruption Costs with Load Types

수용가		정전 지속시간과 비용([\$/kW])				
분류	id	1분	20분	1시간	4시간	8시간
가정용	2	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
산업용	3	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
상업용	4	0.381	2.969	8.552	31.32	83.01
사무용	5	4.778	9.878	21.07	68.83	119.2
농업용	6	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120

2.1.2 손실비용

손실비용에 대한 목적함수는 각 시간대 i 의 계통의 조류계산에 의해 구해진 전력손실과 단위전력당 전력생산비용에 의해 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$C_{Loss} = K_e \sum_{i=1}^{nt} T_i P_{i, loss}(P_{DG}^i) \quad (3)$$

여기서 K_e 는 $\$/KWh$ 단위의 에너지 비용계수이고, T_i 는 각 시간대 i 의 지속시간이며, $P_{i, loss}$ 는 각 시간대의 유효전력손실, nt 는 각 시간대의 수이다.

2.1.3 전력구입 비용

상위계통(송전계통)으로부터 전력구입비용은 단위 전력당 전력구입비용 K_e 와 전력구입 $P_{i, Buy}(P_{DG}^i)$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 계통에 연계되어 있는 분산전원에서 전력을 공급받을 때에는 상위계통에서 구입하는 전력이 감소되어 전력구입 비용을 줄일 수 있다.

분산전원의 영향과 정전비용을 고려한 신뢰도 향상

$$C_{Buy} = K_e \sum_{i=1}^{ng} T_i P_{i, Buy}(P_{DG}^i) \quad (4)$$

2.1.4 분산전원 운영비용

분산전원의 운영비용 C_{DGop} 는 단위 전력당 분산전원 운영비용 K_{DG} 와 용량 P_{DG}^k 의 곱으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. ng 는 분산전원의 수를 의미한다.

$$C_{DGop} = K_{DG} \sum_{k=1}^{ng} P_{DG}^k \quad (5)$$

2.2 제약조건

제약조건은 전력조류 방정식, 네트워크 제약인 분산전원의 수 및 총용량과 운전제약인 전압크기로 표현할 수 있다.

2.2.1 조류 방정식

분산전원을 설치함으로써 전력조류의 변화가 발생하기 때문에 각 시간대 i 에 대한 전력조류는 다음의 식 (6)을 만족하여야 한다.

$$F(x_i, P_{DG}^i) = 0 \quad (6)$$

여기서 P_{DG}^i 는 모선 j 에서 분산전원의 크기, 즉 제어변수이고 x 는 전압크기와 같은 상태변수이다.

2.2.2 분산전원의 수 또는 총용량에 관한 제약

계통 유효전력손실은 분산전원의 설치 수와 용량에 비례하여 감소되므로 설치 수를 증가시키고 용량을 크게 할수록 전력손실을 감소시킬 수 있다. 그러나 분산전원의 설치비용이 증가되기 때문에 다음의 식 (7)과 같이 설치 수 또는 총용량을 제한할 필요가 있다.

$$P_{i, DG, \min}^i \leq P_{i, DG}^i \leq P_{i, DG, \max}^i \quad (7)$$

여기서 $P_{i, DG}^i$ 는 각 시간대 i 에서 모선 j 에 설치될 분산전원의 수 또는 총용량이다.

2.2.3 운전제약 조건

배전계통은 대부분 방사상으로 구성되기 때문에 계통부하가 말단으로 갈수록 계통의 전체 전력손실은 증가하고 전압은 감소하게 된다. 그러므로 식 (8)과 같은 제약에 의하여 분산전원의 설치위치가 최적으로 결정될 수 있다.

$$V_{i, \min}^j \leq V_i^j \leq V_{i, \max}^j \quad (8)$$

여기서 V_i^j 는 각 시간대 i 에서 모선 j 의 전압크기이며, \max 와 \min 은 상·하한 값이다.

2.3 부하모델링

계통에 대한 모델링이 실제 계통과 흡사할수록 정확한 신뢰도 지수와 운영비용을 구할 수 있고, 이를 통해 총 운영비용 최소화에도 더욱 접근할 수 있다.

부하모델은 1년을 8760시간으로 나눠 각 시간에 대한 부하량을 계산하므로, 부하지점의 특성을 나타내기 보다는 전체 계통의 부하가 일률적으로 증가하고 감소하는 형태를 나타낸다. 따라서 정확한 모델링을 위해서 각 부하지점의 부하형태(가정용, 산업용, 상업용, 사무용, 농업용 등)에 따른 영향을 고려하여야 한다. 다음에 제시된 그림 1은 여름철 하루 동안의 일일 피크부하에 대한 시간별 부하 백분률로서 가정용, 산업용, 상업용, 사무용으로 각각의 부하형태별 특성을 나타낸 것이다.

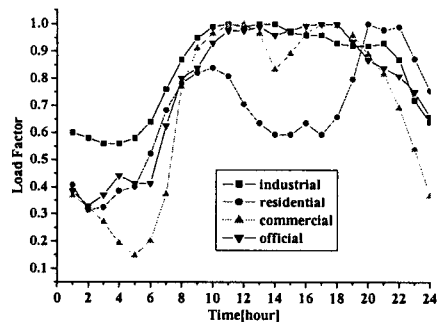


그림 1. 일일 피크부하에 대한 시간별 부하 변화
Fig. 1. Load Pattern for Daily Peak Load

3. 배전계통의 신뢰도 지수

3.1 수용가당 평균 정전빈도

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

$$SAIFI = \frac{\text{공급중단 횟수}}{\text{전체수용가의 수}} \quad (9)$$

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

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

3.2 수용가당 평균 정전시간

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

$$SAIDI = \frac{\text{수용가 평균정전시간의 합}}{\text{전체 수용가의 수}} \quad (10)$$

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

U_i : 부하점 i 에서의 연간 정전시간의 기대치

3.3 평균 공급률

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

$$ASAI = \frac{\text{수용가 요구시간} - \text{수용가 공급실패시간}}{\text{수용가 요구시간}} \quad (11)$$

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

3.5 배전계통 신뢰도 향상을 위한 알고리즘

목적함수와 제약조건을 Fuzzy Goal Programming으로 전환하기 위하여 제약조건들을 참고문헌 [5]에서 제시한 방법으로 목적함수로 변형하였고, 각각의 목적함수의 부정확한 특성을 퍼지집합을 이용하여 멤버십 함수로 변환하였다. 또한 정식화된 퍼지 멤버십 함수는 선형모델이나 다른 방법들을 이용하여 어떠한 변형 없이 GA를 사용하여 해를 구할 수 있다. 퍼지집합은 일반적으로 멤버십 함수로 나타내며 멤버십 함수의 값이 클수록 해가 보다 크게 만족된다. 결국 멤버십 함수의 값이 증가함에 따라 각각의 목적함수의 최적해도 향상된다는 것을 알 수 있다[5].

4. 사례연구

본 연구에서는 배전계통의 효율적 운영 및 신뢰도 향상을 위하여 부하지점의 부하형태(가정용, 산업용, 상업용, 사무용, 농업용 등)에 따른 정전비용의 영향을 고려분산전원을 설치하는 방안을 제시하였다. 분산전원 설치와 관련된 상수는 다음과 같다[5].

에너지 비용상수 $K_e = \$0.06/\text{kWh}$

DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150

$\Delta P_{G, \min}^i$: 3개, 90[kW](Total capacity)

$\Delta P_{G, \max}^i$: 6개, 900[kW](Total capacity)

$\Delta V_{i, \min}$: 0.03[p.u.]

$\Delta V_{i, \max}$: 0.15[p.u.]

Test years: 1

적용한 모델계통은 그림 2의 IEEE 13모선 계통이며, 모선 데이터는 표 2에 나타내었으며 선로데이터는 참고문헌 [6]에 제시되어 있다. 표 3에는 부하지점에 따른 고장률, 수리율 및 정전시간과 같은 신뢰도 지수를 나타내었고, 부하형태별 정전비용은 표 1에 나타내었다[7].

분산전원의 영향과 정전비용을 고려한 신뢰도 향상

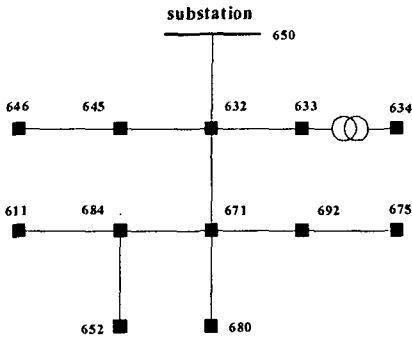


그림 2. IEEE 13모선 계통도
Fig. 2. IEEE 13 Bus Test Systems

표 2. IEEE 13모선 시스템의 부하 데이터
Table 2. Load model Id and Bus load data

Node	id	Ph-1		Ph-2		Ph-3	
		[kW]	[kVAR]	[kW]	[kVAR]	[kW]	[kVAR]
611	2	0	0	0	0	170	80
634	3	160	116	120	87	120	87
645	5	0	0	170	125	0	0
646	4	0	0	230	132	0	0
652	2	128	86	0	0	0	0
671	3	385	220	385	220	385	220
675	3	485	190	68	60	290	212
692	4	0	0	0	0	170	151

표 3. 부하지점에 따른 신뢰도 지수
Table 3. Failure Rate and Interruption Duration at Load Buses

Node	Cutomer [가구수]	고장률 [f/year]	수리율 [h]	정전시간 [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 부하형태를 고려하여 결정된 분산전원의 설치 위치와 용량을 나타낸 것으로서 모선 611, 652, 671, 675에 각각 150[kW]씩 전체 600[kW]의 분산전원이 설치되어야 함을 알 수 있다.

그림 3은 분산전원 설치전후의 계통의 모선 611의 c상의 전압의 변화를 나타내었으며 설치후에 상당히

향상되었음을 알 수 있다. 그림 4는 계통손실 비용 및 정전비용 등을 비교하였으며, 그림 5는 상위계통으로부터 전력을 구입하는 비용을 나타내었다. 전력 구입 비용과 정전비용의 경우 정전시 각 부하지점에 설치된 분산전원에 의해 전력이 공급되어 효과적으로 감소됨을 알 수 있다. 또한 그림 6은 분산전원을 설치함에 따라 신뢰도 지수의 변화를 비교하였다. 이는 정전시 각 부하지점에 설치된 분산전원에 의해 전력을 공급함으로써 정전빈도와 정전시간을 줄여서 전력공급률이 향상되었기 때문이다.

표 4. DG 설치 위치와 용량
Table 4. DG Installation Locations and Capacity

설치 위치[Bus]	용량[kW]
611	150
652	150
671	150
675	150
Total	600

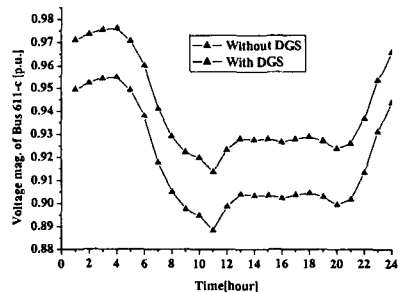


그림 3. 모선 611의 c-phase 전압의 변화
Fig. 3. Voltage variation of Bus 611, phase c

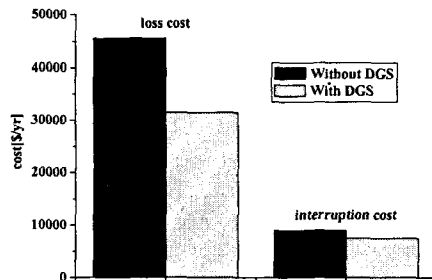


그림 4. 운영비용 및 신뢰도 비용의 비교
Fig. 4. Comparison of Operation and Reliability Costs

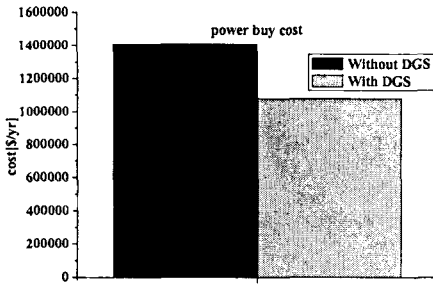


그림 5. 구입비용의 비교
Fig. 5. Comparison of Power Buy Cost

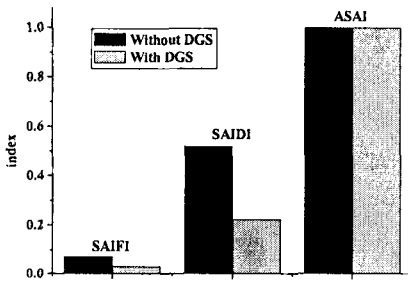


그림 6. 분산전원 설치에 따른 신뢰도지수 비교
Fig. 6. Comparison of Reliability Indices with DG

본 논문에서는 실제 계통과 유사하게 부하형태를 고려함으로써 정확한 신뢰도 지수와 운영비용을 구할 수 있으며 총 운영비용 최소화에도 더욱 접근할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 배전계통의 부하지점의 부하형태에 따른 정전비용의 영향을 고려하여 분산전원을 설치함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하는 방안을 제안하였다.

가정용, 산업용, 상업용, 사무용 및 농업용 등 부하형태를 실제 계통과 유사하게 고려함으로써 정확한 신뢰도 지수와 운영비용을 구할 수 있고, 이를 통해 총 운영비용 최소화에도 더욱 접근할 수 있다. 특히 정전시 각 부하지점에 설치된 분산전원에 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 신뢰도 지수에 대한 타당한 목표치를 결정하여 분산전원의 영향 및 전력품질 등을 분석할 필요가 있다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비지원으로 이루어졌음.

References

- (1) T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrestand and A. Law, "Placement of Dispersed Generations Systems for Reduced Losses", Proceedings of the 3rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2000, pp.1446-1454.
- (2) Luis F. Ochoa, Antonio Padilha-Feltrin, Gareth P. Harrison, "Evaluating Distributed Generation Impacts With a Multiobjective Index", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July, pp. 1452-1458, 2006.
- (3) P. Wang and R. Billinton, "Time Sequential Distribution System Reliability Worth Analysis Considering Time Varying Load and Cost Models", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, pp. 1046-1051, 1999.
- (4) A. Pregelj, M. Begovic, A. Rhatgi, D. Novosel, "On Optimization of Reliability of Distributed Generation Enhanced Feeders", System Sciences. 2003. Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on, pp. 63-68, 2003.
- (5) 이유정, 김규호, 이상근, 유석구, "부하불평형 및 부하모형을 고려한 복합배전계통의 분산형전원 연계 방안", 대한전기학회 논문지, 제53A권, 제5호, pp.266-274, 2004.
- (6) IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeds." IEEE Trans. on Power System, Vol. 6, No. 3, pp.975-979, 1991.
- (7) R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel and K. S. So, "A Reliability Test System for Educational Purpose - Basic Distribution System Data and Results", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 6, No. 2, pp. 813-320, 1991.

◇ 저자소개 ◇

김규호 (金圭浩)

1966년 3월 8일생. 1988년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 안산공과대학 전기과 부교수.

송경빈 (宋敬彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 텍사스 A&M 전기공학과 졸업(박사). 1996년 한전전력연구원 선임연구원. 1998년 대구효성가톨릭대학교 전임강사. 2000년 계명대학교 전임강사. 2002년 숭실대학교 전기제어시스템공학부 전임강사. 2004년~현재 숭실대학교 전기공학부 조교수.