

**부하형태에 따른 정전비용을 고려한 배전계통의 신뢰도 향상**

김규호\* 배인수\*\* 김진오\*\* 이상근\*\*\*  
\*안산공과대학 \*\*한양대학교 \*\*\*원주대학

**Reliability Improvement Considering Interruption Cost with Load Type in Distribution Systems**

Kyu-Ho Kim\* In-Su Bae\*\* Jin-O Kim\*\* Sang-Keun Lee\*\*\*  
\*Ansan College of Tech. \*\*Hanyang Univ. \*\*\*Wonju College

**Abstract** - This paper presents a method to improve reliability by dispersed generation (DG) installation considering load types and interruption cost. The objective functions such as power losses cost, operation cost of DGS, power buy cost and interruption cost are minimized for reliability improvement and efficient operation. The several indices for reliability evaluation are improved by dispersed generation system installation.

$K_{Out}^i$ 의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, 연간 정전용량은 각 부하지점의 침투 부하량  $P_{peak}^i$ 과 신뢰도 지수인 고장률( $\lambda^i$ )과 수리시간( $r^i$ )을 이용하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{Out}^i(P_{DG}) = P_{peak}^i \lambda^i r^i \tag{2}$$

**1. 서 론**

표 1 부하형태별 정전비용

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

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 등의 분산전원(DGs)이 혼란의 확산을 막는데 결정적 역할을 하였다. 따라서, 상위계통으로부터 전력을 공급받지 못할 때에도 분산전원의 운영에 의해 정전비용을 최소화함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 분산전원의 도입은 배전계통의 계획에서 부하증가에 따른 선로나 변전소의 증신설과 비교하여 신뢰성이나 경제적인 공급이라는 기준을 통해 최적의 확장전략을 수립할 수 있으며, 대도시권에 있어서는 전력수급의 지역간 불평형 및 전력수급의 문제를 완화할 수 있다[1].

**손실비용**

손실비용에 대한 목적함수는 각 시간대의 계통의 조류 계산에 의해 구해진 전력손실과 단위전력당 전력생산비용에 의해 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$C_{Loss} = K_e \sum_{i=1}^{nt} T^i P_{loss}^i(P_{DG}) \tag{3}$$

또한, 계통계획자는 배전계통의 운영비용을 최소화하기 위해 계획단계에서 분산전원의 설치위치와 용량을 결정하여 시간에 따른 부하와 비용을 분석하여 송전계통으로부터 전력을 구입하거나 분산전원을 운영하여 운영비용을 줄일 수 있다[2,3].

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

본 연구에서는 배전계통의 부하지점의 부하형태(가정용, 산업용, 상업용, 사무용, 농업용 등)에 따른 정전비용의 영향을 고려하여 분산전원을 설치함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하는 방안을 제안하였다.

**전력구입 비용**

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

**2. 신뢰도 향상을 위한 정식화**

**2.1 목적함수**

**연간정전비용과 정전용량**

정전비용은 각 부하지점에서 분산전원을 설치하였을 때의 연간 정전용량  $P_{Out}^i(P_{DG})$ 와 단위전력당 정전비용

$$C_{Buy} = K_e \sum_{i=1}^{nt} T^i P_{Buy}^i(P_{DG}) \tag{4}$$

**분산전원 운영비용**

분산전원의 운영비용  $C_{DCop}$ 는 단위 전력당 분산전원 운영비용  $K_{DC}$ 와 용량  $P_{DC}^*$ 의 곱으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.  $n_{DC}$ 는 분산전원의 수를 의미한다.

$$C_{DCop} = K_{DC} \sum_{i=1}^{n_{DC}} P_{DC}^* \quad (5)$$

## 2.2 제약조건

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

### 조류 방정식

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

$$F^i(x^j, P_{DC}^j) = 0 \quad (6)$$

여기서  $P_{DC}^j$ 는 모선  $j$ 에서 분산전원의 크기, 즉 제어 변수이고  $x$ 는 전압크기와 같은 상태변수이다.

### 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.

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

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

### 운전제약 조건

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

$$V_{\min}^i \leq V^i \leq V_{\max}^i \quad (8)$$

여기서,  $V^i$ 는 각 시간대  $i$ 에서 모선전압의 크기이며,  $\max$ 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 최소화에 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 대

한 시간별 부하 백분율로서 가정용, 산업용, 상업용, 사무용으로 각각의 부하형태별 특성을 나타낸 것이다.

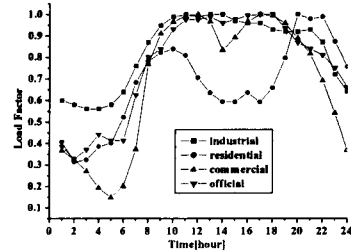


그림 1 일일 피크부하에 대한 시간별 부하 변화

## 3. 배전계통의 신뢰도 지수

### 3.1 수용가당 평균 정전빈도

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

$$SAIFI = \frac{\text{공급중단횟수}}{\text{전체수용가의수}} = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad [\text{회/수용가} \cdot \text{년}] \quad (9)$$

$\lambda_i$ ,  $N_i$ : 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.

$$SAIDI = \frac{\text{수용가 평균정전시간의 합}}{\text{전체 수용가의 수}} = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad [\text{분/수용가} \cdot \text{년}] \quad (10)$$

$U_i$ : 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.

$$ASAI = \frac{\text{수용가요구시간} - \text{수용가공급실패시간}}{\text{수용가요구시간}} = \frac{\sum_{i \in R} 8760N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760N_i} \quad (11)$$

### 3.4 다중 신뢰도 지수

방사형 배전계통 피더에서 보호 장치의 배치는 네트워크의 신뢰성을 극대화하기 위해 설계되어진다. 그러므로, 에너지원이 변전소에 위치한다고 가정할 때 신뢰도 지수들을 최소화할 수 있다. 본 논문에서는 신뢰도 지수들 중 수용가당 평균 정전시간(SAIDI)과 수용가당 평균 정전빈도(SAIFI)를 조합한 다중 신뢰도지수(CFDI

: Composite Frequency & Duration Index)를 살펴보고자 한다. 위 두 가지 지수 중 어느 것으로도 보호 장치의 위치를 최적화 할 수 있으며 지속적으로 순간적인 정전의 영향을 알아볼 수 있다. 다중 신뢰도지수는 다음과 같이 정의된다.

$$CFDI = W_{SAIFI} \frac{SAIFI - SAIFI_T}{SAIFI_T} + W_{SAIDI} \frac{SAIDI - SAIDI_T}{SAIDI_T} \quad (12)$$

$W_x$ : 적정신뢰도 지수 가중치

$T$ : 신뢰도지수의 목표 값(Target value)

### 3.5 배전계통 신뢰도 향상을 위한 알고리즘

목적함수와 제약조건을 Fuzzy Goal Programming 으로 전환하기 위하여 제약조건들을 참고문헌 [4]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[4].

## 4. 사례연구

본 연구에서는 배전계통의 효율적 운영 및 신뢰도 향상을 위하여 부하지점의 부하형태(가정용, 산업용, 상업용, 사무용, 농업용 등)에 따른 정전비용의 영향을 고려 분산전원을 설치하는 방안을 제시하였다. 분산전원 설치와 관련된 상수는 다음과 같다[4].

에너지 비용상수  $K_e = \$0.06/\text{kWh}$

DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150

$AP_{G,\min}^P$ : 3개, 90[kW](Total capacity)

$AP_{G,\max}^P$ : 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 참고문헌 [4]와 같이 그림 2의 IEEE 13모선 계통이며, 모선 데이터는 표 2에 나타내었으며 선로데이터는 참고문헌 [5]에 제시되어 있다. 표 3에는 부하지점에 따른 고풍률, 수리율 및 정전시간과 같은 신뢰도 지수를 나타내었고, 부하형태별 정전비용은 표 1에 나타내었다[6].

표 4는 부하형태를 고려하여 결정된 분산전원의 설치 위치와 용량을 나타낸 것으로서 모선 611, 652, 671, 675에 전체 600[kW]의 분산전원이 설치되어야 함을 알 수 있다. 이것은 참고문헌 [5]의 결과와 같으며, 특히 부하형태를 고려함으로써 실제 계통과 유사하게 모델링을 한 것임을 알 수 있다.

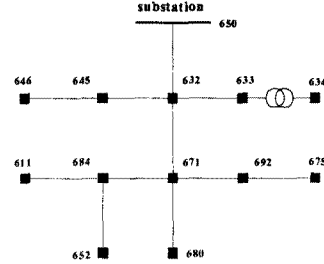


그림 2 IEEE 13모선 계통도

표 2 IEEE 13모선 시스템의 부하 데이터

Node	id	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	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

Node	Cutomer [가수]	고장률 [f/year]	수리율 [h]	고장시간 [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	80	0.070	7.90	0.5530
675	50	0.060	6.59	0.3954
692	5	0.083	7.24	0.6009

표 4 사례레이선 결과

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

그림 3은 분산전원 설치전후의 계통의 모선 611의 c 상의 전압의 변화를 나타내었으며 설치후에 상당히 향상되었음을 알 수 있다. 그림 4는 계통손실 비용 및 정전 비용 등을 비교하였으며, 그림 5는 상위계통으로부터 전력구입하는 비용을 나타내었다. 전력구입 비용과 정전비용의 경우 정전시 각 부하지점에 설치된 분산전원에 의해 전력이 공급되므로써 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 전력공급율이 향상되었기 때문이다.

특히 실제 계통과 유사하게 부하형태를 고려함으로써 정확한 신뢰도 지수와 운영비용을 구할 수 있고, 이를 통해 총 운영비용 최소화에 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 최소화에 더욱 접근할 수 있다.

특히, 정전시 각 부하지점에 설치된 분산전원에 의해 전력이 공급되므로 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 등을 분석할 필요가 있다.

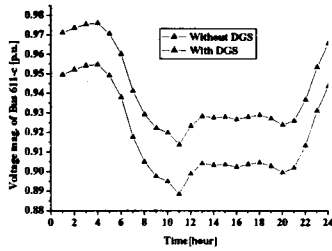


그림 3 모선 611의 c-phase 전압의 변화

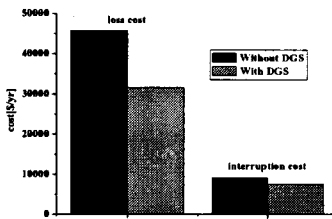


그림 4 운영비용 및 신뢰도 비용의 비교

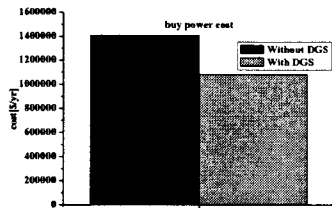


그림 5 구입비용의 비교

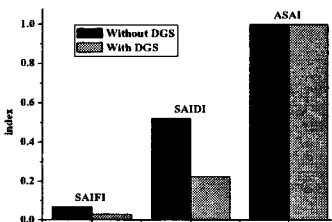


그림 6 분산전원 설치에 따른 신뢰도지수 비교

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제(R-2004-B-220)임.

### 참고 문헌

- [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] 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.
- [3] A. Pregelj, M. Begovic, A. Rohatgi, 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
- [4] 김규호, 이상근, 김진오, 김태균, 전동훈, 차승태, "배전계통의 신뢰도 향상을 위한 분산형전원의 설치 및 운영", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권, pp 348-350, 2004
- [5] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power System, Vol. 6, No. 3, pp.975-979, 1991
- [6] 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.