

배전계통의 신뢰도 향상을 위한 분산형전원의 설치 및 운영

김규호**** 이상근** 김진오*** 김태균* 전동훈* 차승태*
 ****안산공과대학 **원주대학 ***한양대학교 *한전전력연구원

Placement and Operation of DG System for Reliability Improvement in Distribution Systems

Kyu-Ho Kim**** Sang-Keun Lee** Jin-O Kim*** Tae-Kyun Kim* Dong-Hun Jeon* Seung-Tae Cha*
 ****Ansan College of Tech. **Wonju College ***Hanyang Univ. *KEPRI

Abstract - This paper presents the scheme for reliability improvement by dispersed generation system (DGS) installation and operation in distribution systems. The objective functions such as power losses cost, operation cost of DGS, power buy cost and interruption cost are minimized for reliability improvement. The original objective functions and constraints are transformed into the equivalent multiple objective functions with fuzzy sets to evaluate their imprecise nature. The several indices for reliability evaluation are improved by dispersed generation system installation.

1. 서 론

지난 10년간 전 세계에서 수백만 가구가 대규모 정전사태를 겪은 바 있다. 전기공급의 중단은 경제적 손실뿐만 아니라 수도 및 가스공급 중단, 냉·난방 중단 전산망과 통신이 단절되고, 치안의 불안 등 국가·사회적인 마비현상을 일으킬 수 있다. 이들 정전의 근본적이고 중요한 문제점은 충분한 예비용량(reserve capacity)을 확보하지 못한 점과 전력분야에 대한 연구투자 및 설비투자가 부족했다는 점이다. 뉴욕 정전의 경우 금융기관, 관공서 및 경찰서 등에 설치된 태양전지(Photovoltaic Cell), 연료전지(Fuel Cell), 전지전력저장시스템(BESS), 열병합발전(Cogeneration) 등과 같은 분산형전원(DGs)이 혼란의 확산을 막는데 결정적 역할을 하였다. 따라서 분산형전원의 도입은 자체기동용량 및 순동예비력의 확보, 변전소, 배전 및 송전설비 등에 대한 투자의 지연 그리고 대도시권에 있어서는 전력수급의 지역간 불평형 및 전력수급의 문제를 완화할 수 있다[1].

또한, 계통계획자는 배전계통의 운영비용을 최소화하기 위해 계획단계에서 분산형전원의 설치위치와 용량을 결정하여 시간에 따른 부하와 비용을 분석하여 송전계통으로부터 전력을 구입하거나 분산형전원을 운영하여 운영비용을 줄일 수 있다. 상위계통으로부터 전력을 공급받지 못할 때에도 분산형전원의 운영에 의해 정전비용을 최소화함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있다[2,3].

본 연구에서는 배전계통의 효율적인 운영을 위하여 분산형전원을 설치함으로써 운영비용 및 정전비용을 최소화하는 방안을 제안하였다. 배전계통의 운영비용과 부하지역의 고장률 및 연간정전비용을 이용하여 구한 신뢰도 비용이 최소가 되도록 분산형전원을 설치하고 용량을 결정하였다.

2. 배전계통의 신뢰도 지수

2.1 수용가당 평균 정전빈도

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

$$SAIFI = \frac{\text{공급중단횟수}}{\text{전체수용가의수}} = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad [\text{회/수용가} \cdot \text{년}] \quad (1)$$

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

2.2 수용가당 평균 정전시간

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

$$SAIDI = \frac{\text{수용가 평균정전시간의 합}}{\text{전체 수용가의 수}} = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad [\text{분/수용가} \cdot \text{년}] \quad (2)$$

U_i : 부하점 i 에서의 연간 정전시간의 기대치

2.3 평균 공급율

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

$$ASAI = \frac{\text{수용가요구시간} - \text{수용가공급실패시간}}{\text{수용가요구시간}} = \frac{\sum_{i \in R} 8760N_i - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760N_i} \quad (3)$$

3. 신뢰도 향상을 위한 정식화

3.1 목적함수

손실비용

손실비용에 대한 목적함수는 각 시간대의 계통의 조류 계산에 의해 구해진 전력손실과 단위전력당 전력생산비용에 의해 식 (4)과 같이 구할 수 있다.

$$C_{Loss} = K_e \sum_{i=1}^T T^i P_{loss}(P_{DG}) \quad (4)$$

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

전력구입 비용

상위계통(송전계통)으로부터 전력구입비용은 단위전력당 전력구입비용 K_e 와 구입전력 $P_{Bus}(P_{DG})$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 계통에 연계되어 있는 분산형전원에서 전력을 공급 받을 때에는 상위계통에서 구입하는 전력이 감소되

어 전력구입 비용을 줄일 수 있다.

$$C_{Buy} = K_e \sum_{T=1}^{ng} T^i P_{Buy}^i(P_{DG}) \quad (5)$$

분산형전원 운영비용

분산형전원의 운영비용 C_{DGop} 는 단위 전력당 분산형전원 운영비용 K_{DG} 와 용량 P_{DG}^i 의 곱으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. ng 는 분산형전원의 수를 의미한다.

$$C_{DGop} = K_{DG} \sum_{i=1}^{ng} P_{DG}^i \quad (6)$$

정전비용

정전비용은 각 부하지점에서 분산형전원을 설치하였을 때의 연간 정전용량 $P_{Out}(P_{DG})$ 와 단위전력당 정전비용 K_{Out}^i 의 곱으로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{Out} = \sum_{i=1}^{ng} K_{Out}^i P_{Out}^i(P_{DG}) \quad (7)$$

여기서, 연간 정전용량은 각 부하지점의 침투 부하량 P_{peak}^i 과 신뢰도 지수인 고장률(λ)과 수리시간(r)을 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{Out}^i(P_{DG}) = P_{peak}^i \lambda^i r^i \quad (8)$$

3.2 제약조건

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

조류 방정식

분산형전원을 설치함으로써 전력조류의 변화가 발생하기 때문에 각 시간대에 대한 전력조류는 다음의 식 (9)를 만족하여야 한다.

$$F(x^i, P_{DG}^i) = 0 \quad (9)$$

여기서 P_{DG}^i 는 모선 j 에서 분산형전원의 크기, 즉 제어 변수이고 x 는 전압크기와 같은 상태변수이다.

분산형전원의 수 또는 총용량에 관한 제약

계통 유효전력손실은 분산형전원의 설치 수와 용량에 비례하여 감소되므로 설치 수를 증가시키고 용량을 크게 할수록 전력손실을 감소시킬 수 있다. 그러나 분산형전원의 설치비용이 증가되기 때문에 다음의 식 (10)과 같이 설치 수 또는 총용량을 제한할 필요가 있다.

$$P_{DG,k,\min} \leq P_{DG,k} \leq P_{DG,k,\max} \quad (10)$$

여기서 $P_{DG,k}$ 는 각 시간대 i 에서 모선 k 에 설치될 분산형전원의 수 또는 총용량이다.

운전제약 조건

배전계통은 대부분 방사상으로 구성되기 때문에 계통부하가 말단으로 갈수록 계통의 전체 전력손실은 증가하고 전압은 감소하게 된다. 그러므로 식 (11)과 같은 제약에 의하여 분산형전원의 설치위치가 최적으로 결정될 수 있다.

$$V_{\min}^i \leq V^i \leq V_{\max}^i \quad (11)$$

여기서, V^i 는 각 시간대 i 에서 모선전압의 크기이며, \max 와 \min 은 상·하한 값이다.

3.3 신뢰도 향상을 위한 알고리즘

목적함수와 제약조건을 Fuzzy Goal Programming으로 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 배전계통에 있어서 신뢰도를 향상시키기 위하여 분산형전원을 설치하고 운영하는 방안을 제시하였다. 분산형전원 설치와 관련된 상수는 다음과 같다.

에너지 비용상수 $K_e = \$0.06/\text{kWh}$

DGs의 용량[kW]: 30, 60, 90, 120, 150

$4P_{G,\min}^i$: 3개, 90[kW](Total capacity)

$4P_{G,\max}^i$: 6개, 900[kW](Total capacity)

$4V_{i,\min}$: 0.03[p.u.]

$4V_{i,\max}$: 0.15[p.u.]

Test years: 1

적용한 모델계통은 그림 1와 같은 IEEE 13모선 계통이며, 모선 데이터는 표 1에 나타내었으며 선로데이터는 참고문헌 [5]에 제시되어 있다. 표 2에는 부하지점에 따른 고장률, 수리 및 정전시간과 같은 신뢰도 지수를 나타내었고, 표 3은 부하종류별 정전비용을 나타내었다[6].

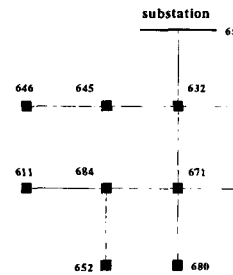


그림 1 IEEE 13모선 계통도

표 4는 제안한 알고리즘에 의하여 결정된 분산형전원의 설치 위치와 용량을 나타낸 것이다. 표의 결과로부터 모선 611, 652, 671, 675에 전체 600[kW]의 분산형전원이 설치되어야 함을 알 수 있다. 그림 2와 3은 분산형전원 설치전후의 전력손실의 변화와 계통의 최소전압의 변화를 나타내었으며 설치후에 상당히 향상되었다. 표 5는 계통손실 비용, 상위계통으로부터 전력구입 비용 및 정전비용 등을 비교하였다. 전력구입 비용과 정전비용의 경우 정전시 각 부하지점에 설치된 분산형전원에 의해 전력이 공급되므로써 효과적으로 감소됨을 알 수 있다. 표 6으로부터 분산전원을 설치함에 따라 신뢰도 지수가 더 좋아짐을 알 수 있다. 이는 정전시 각 부하지점에 설치된 분산형전원에 의해 전력을 공급함으로써 정전빈도와 정전 시간을 줄여서 전력 공급률이 향상되었기 때문이다.

표 1 IEEE 13모선 시스템의 부하 데이터

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

표 2 부하지점에 따른 신뢰도 지수

Node	Customer [가수]	고장률 [f/year]	수리율 [h]	고장시간 [h/year]
671	80	0.070	7.90	0.553
645	5	0.083	7.40	0.6142
646	9	0.083	7.40	0.6142
634	40	0.070	7.90	0.553
611	2	0.083	7.40	0.6142
652	5	0.080	7.51	0.6008
692	5	0.083	7.24	0.6009
675	50	0.060	6.59	0.3954

표 3 부하종류별 정전비용

수용가 타입	정전 지속시간과 비용(\$/kW)				
	1분	20분	1시간	4시간	8시간
대규모 수용가	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240

표 4 시뮬레이션 결과

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

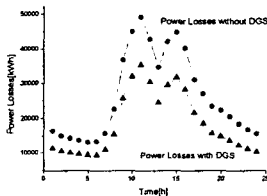


그림 2 전력손실의 변화

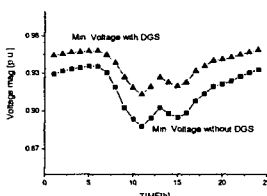


그림 3 최소전압의 변화

표 5 운영비용 및 신뢰도 비용의 비교

비용[\$/yr]	Without DGS	With DGS
손실비용	38,192.9	26,666.7
전력구입 비용	1,182,583.7	855,684.8
정전비용	2,980.1	1941.4

표 6 분산전원 설치에 따른 신뢰도 평가 지수

신뢰도 지수	Without DGS	With DGS
SAIFI	0.069097	0.029638
SAIDI	0.520234	0.223691
ASAI	0.999941	0.999974

5. 결론

본 연구에서는 배전계통에 있어서 신뢰도를 향상시키기 위하여 분산형전원을 설치하고 운영하는 방안을 제시하였다.

계통 전력손실 비용, 분산형전원 운영비용, 전력구입 비용 및 정전비용 등을 목적함수로 하여 계통 운영비용 및 신뢰도비용을 최소화함으로써 효과적인 배전계통 운영방을 수립할 수 있었다. 특히, 정전시 각 부하지점에 설치된 분산형전원에 의해 전력이 공급되므로써 전력구입 비용과 정전비용의 경우 효과적으로 감소됨을 알 수 있었으며, 정전빈도와 정전시간이 감소되어 전력 공급률이 향상되어 신뢰도 지수가 좋아졌음을 알 수 있었다.

또한, 다수의 목적함수와 제약조건에 대한 불확실한 성질을 평가하기 위하여 퍼지 Goal Programming으로 모델링 하였고, GA를 사용하여 최적해를 얻을 수 있었다.

향후 연구로는 각 부하지점의 부하형태(가정용, 상업용, 산업용, 공공기관 등)에 따른 정전비용의 영향을 고려하여 정확한 부하특성을 반영할 필요가 있다고 사료된다.

감사의 글

본 논문은 전력연구원의 연구지원(기금 119J03JP03)에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] T. Griffin, K. Tomovic, 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] 이유허, 김규호, 이상근, 유석구, "부하불평형 및 부하모형을 고려한 복합배전계통의 분산형전원 연계 방안", 대한전기학회 논문지, 제53A권, 제5호, pp.266-274, 2004
- [5] IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeders." IEEE Trans. on Power System, Vol. 6, No. 3, pp.975-9, 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.