

**분산전원 설치에 따른
신뢰도 평가와 최적용량과 위치결정**

박정훈^{*} · 신동석^{*} · 김진오^{*} · 김규호^{**} · 조종만^{***}

^{*}한양대학교 전기공학과 · ^{**}안산공과대학 전기공학과 · ^{***}한국전력거래소

**Reliability estimation and optimal capacity and allocation
by distributed generation installation**

Jung-Hoon Park^{*} · Dong-Suk Shin^{*} · Jin-O Kim^{*} · Kyu-Ho Kim^{**} · Jong-Man Cho^{***}

^{*}Dept. of EE, Hanyang University ^{**}Ansan College of Tech. ^{***}KPX

Abstract - This paper proposes determining a optimal number, size and allocation of DGs(Distributed Generations) needed to minimize operation cost of distribution system, obtains economic benefit in operation planning of DG and improves system reliability. System reliability is assessed whether DG install and reliability cost consider.

DG optimal allocations are determined to minimize total cost with power buying cost, operation cost of DG, loss cost and outage cost using GA(Genetic Algorithm). And it was determined installed load-point and order.

1. 서 론

본 논문에서는 분산전원의 설치에 따른 신뢰도 지수 평가와 배전계통 운영비용의 최소화에 의한 분산전원의 용량과 최적의 위치를 결정하는 기법을 제안하였다.

계통의 신뢰도 평가를 위해 분산전원의 설치여부에 따른 신뢰도 지수 계산과 신뢰도 비용의 고려 여부에 따른 신뢰도 지수 계산을 하였다.

분산전원의 용량은 운영계획기간 동안의 부하증가량과 선로 제한 용량을 고려하여 선정하고, 분산전원의 위치는 각 부하점의 고장율과 연간 정전비용에 의해 구해진 신뢰도 비용과 배전계통의 총 운영비용의 합이 최소가 되는 위치로 결정한다. 최적의 위치 선정을 위해 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용한다.

분산전원의 도입은 배전계통의 계획에서 부하증가에 따른 선로나 변전소의 중·신설과 비교하여 신뢰성이나 경제적인 공급이라는 기준을 통해 최적의 확장전략을 수립한다. 비용의 최소화에 의해 배전계통 계획자는 계통의 계획 단계에서 분산전원의 용량과 위치를 결정하며 시간에 따른 부하량과 그에 따른 전력비용을 분석하여 적절하게 전력을 구입하거나 분산전원을 운영하여 운영 비용을 줄일 수 있다. 또한 계통에 전력이 공급되지 못할 때도 분산전원의 운영에 의해 정전비용을 최소화함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 이처럼 운영비용과 정전비용의 최소화에 의한 총 비용을 최소화할 수 있는 위치에 분산전원을 설치하여 운영할 때 계통의 운영자는 최대의 이익을 얻을 수 있다.

2. 본 론

2.1 분산전원의 운영

분산전원은 다음과 같이 운영한다. 첫째, 피크부하용으로서 배전계통에서 계통의 부하가 피크에 도달하는 시간대에는 전력 구입량으로 부하량을 충당하지 못할 경우가 발생하거나 비싼 전력요금을 지불하고서야 전력을 구입하는 상황이 발생하게 되는데 이때 분산전원을 운영하여 전력 부족분만큼을 충당한다. 또한, 부하량이 선로용량을 초과할 때에도 분산전원을 운영하여 계통에 전력을 공급한다. 둘째, 전력 공급원으로 배전계통에서 부하량은 부

하 종류와 부하 특성 및 각 부하들의 소비 형태에 따라 차이가 난다. 각 부하에 전력을 공급하기 위해서 전력을 구입할 때 그 구입비용은 시간에 따른 부하량의 변화에 의해 차이를 보인다. 따라서, 계통에 연계되어 있는 분산전원을 전력 공급원으로 이용할 때는 시간에 따른 전력 구입비용과 분산전원의 운영비용을 비교하여 더 저렴한 전력원을 선택하여 운영함으로써 운영비용을 줄이고자 한다. 셋째, 정전시 전력 공급원(대기용)으로서 배전계통에 사고로 인한 정전 발생시 차단기와 리클로저와 같은 차단설비에 의해 각 부하점은 계통에서 분리된다. 이 때 분산전원이 설치된 부하점에서는 계통에서 분리된 부하점에서 단독으로 운전하여 부하점에 전력을 공급한다. 이렇게 정전시 부하점에 설치된 분산전원은 부하점에 전력을 공급함으로써 궁극적으로 계통의 신뢰도를 향상시키고 그에 따른 정전비용을 감소시킬 수 있다.

2.2 계통의 모델링

본 논문에서 분산전원 한대의 용량은 주어지며, 계통에 설치될 분산전원의 총 설치대수는 운영계획기간 동안의 부하증가량과 주어진 한대의 용량에 의해 결정된다.

분산전원은 계획 초기년도에 모두 설치되며, 하나의 부하점에 한 대의 분산전원만 설치한다. 선로나 모선용량 제한에 의해 분산전원의 용량과 설치될 부하점이 결정된다. 분산전원의 위치는 각 부하점의 고장율과 연간 정전비용에 의해 구해진 신뢰도 비용과 배전계통의 총 운영비용의 합이 최소가 되는 위치로 결정한다. 분산전원이 도입된 복합배전계통의 운영최적화를 위해서 유전알고리즘을 이용하였다.

2.3 배전계통의 신뢰도 지수

배전계통의 신뢰도를 나타내는 지수로는 배전계통 전체에서의 수용가당 평균 정전빈도(SAIFI : System Average Interruption Frequency Index) 및 수용가당 평균정전시간(SAIDI : System Average Interruption Duration Index)과 각 부하점(load point)에서의 평균 공급 가용지수(SAIFI : Average Service Availability Index)와 이러한 신뢰도 지수들 중 수용가당 평균정전시간(SAIDI)와 수용가당 평균 정전빈도(SAIFI)를 조합한 다중지수(CFDI : Composite Frequency & Duration Index) 등이 이용된다.

2.3.1 다중 신뢰도 지수 (Composite Frequency & Duration Index : CFDI)

$$CFDI = W_{SAIFI} \frac{SAIFI - SAIFI_T}{SAIFI_T} + W_{SAIDI} \frac{SAIDI - SAIDI_T}{SAIDI_T} \quad (1)$$

W_s : 적정신뢰도 지수 가중치
 T : 목표 값(Target value)

2.4 배전계통의 운영비용

배전계통의 운영비용은 전력구입비용, 분산전원 운영비용 그리고 정전비용으로 구분하며, 각각의 비용은 다음의 목적함수에서 표현된다. 목적함수는 송전계통에서의 전력구입비용, 분산전원의 운영비용, 정전비용, 그리고 손실비용의 합을 최소화하는 것이다.

2.4.1 목적함수

목적함수는 다음의 식 (2)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{Total} = C_{Buy} + C_{DGop} + C_{Out} + C_{Loss} \quad (2)$$

- C_{Total} : 총 운영비용의 합
- C_{Buy} : 송전계통에서 전력구입비용
- C_{DGop} : 분산전원의 운영비용
- C_{Out} : 정전비용
- C_{Loss} : 손실비용

송전계통에서의 전력구입비용 C_{Buy} 는 시간에 따른 단위 전력당 전력구입비용 K_j 와 분산전원의 운영비용 K_{DG} 를 서로 비교하여 더 저렴한 비용을 선택하여 결정한다. 전력구입비용 C_{Buy} 는 식 (3)에 의해 구할 수 있으며, 지수 α 는 분산전원의 운영여부를 나타낸다. 전력구입비용과 분산전원 운영비용의 비교에 의해 구할 수 있다. 분산전원의 운영비용 C_{DGop} 는 시간에 따른 분산전원의 운영 대수의 결정에 의해 식(4)에 의해 구할 수 있다. 정전비용 C_{out} 는 분산전원이 설치되지 않았을 때의 모든 부하점의 정전비용과 운영계획에 따라 분산전원이 설치된 후 분산전원이 설치된 부하점의 정전비용의 차에 의해 식 (5)과 같이 구할 수 있다. 손실비용 C_{Loss} 은 각 부하점당 시간에 따라 계통의 조류계산에 의해 구해진 전력 손실과 연간 단위 전력당 전력생산비용에 의해 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$C_{Buy} = \sum_{j=1}^m K_j \cdot (P_{Buy} - \alpha \cdot P_{DG} \cdot n_{DG}) \quad (3)$$

$$C_{DGop} = \alpha \cdot K_{DG} \cdot P_{DG} \cdot \sum_{i=1}^n n_{DG_i} \quad (4)$$

$$C_{out} = \sum_{i=1}^m K_{out_i} \cdot P_{out_i} - \sum_{i=1}^m K_{ic_i} \cdot P_{out_i} \quad (5)$$

$$C_{Loss} = \sum_{i=1}^m K_{Loss} \cdot P_{Loss} \quad (6)$$

- j : time duration ($j=1, 2, \dots, m$)
- i : load point ($i=1, 2, \dots, n$)
- i_{DG} : 분산전원이 설치된 부하점
- K_j : time j 일 때 단위전력당 구입전력비용
- K_{DG} : 단위전력당 분산전원 운영비용
- K_{out} : 단위전력당 정전비용
- K_{Loss} : 단위전력당 전력생산비용
- P_{Buy} : time j 일 때 송전계통에서 구입한 전력
- P_{DG} : 분산전원의 용량
- P_{out} : 부하점 i 에서 정전 시 공급받지 못한 전력
- P_{Loss} : 계통의 전력손실
- n_{DG_j} : time j 일 때 분산전원의 총 운전대수
- $\alpha = \begin{cases} 0 & : K_j \leq K_{DG} \\ 1 & : K_j > K_{DG} \end{cases}$: 분산전원의 운전 여부

2.4.2 제약조건

부하증가량에 따른 구입하는 전력과 분산전원에 의해 공급받는 전력의 차이가 선로제한용량을 초과할 수 없다. 그리고, 전압 강하 제한 조건을 만족해야 한다.

$$0 < P_{Buy} - \alpha \cdot P_{DG} \cdot n_{DG} < P_{LC} \quad (7)$$

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (8)$$

P_{LC} : 선로제한용량

V_i : node 의 전압

V_{min} : 최저 전압

V_{max} : 최고 전압

2.4.3 손실비용

배전계통을 운영할 때 송전선로의 저항성분에 의한 전송 손실이 발생하게 된다. 이러한 송전 손실로 인한 비용은 손실 비용(Loss Cost)이라 하며 배전계통의 경제적인 운영을 위하여 배전계통을 구성할 때 반드시 고려하여야 하는 사항이다. 분산전원의 위치를 결정하기 위해서 배전계통의 조류 계산에 의해 손실이 최소가 되는 위치를 결정하고자 한다.

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^m r_i \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^4} \quad (9)$$

r_i : 선로 i 의 저항

P_i : 선로 i 에서의 유효전력

Q_i : 선로 i 에서의 무효전력

V_i : 선로 i 에서의 전압

3. 사례연구

사례연구를 위해 RBTS(Roy Billinton Test System)의 2번 모선 배전계통을 사용하였다. RBTS 2번 모선은 총 4개의 피더를 가지는 전형적인 도시형 배전계통으로서 아래 그림 1과 같다. 배전계통의 부하특성은 초기년도의 부하량이 20[MW]이고, 부하증가율은 연간 5[%], 설치하고자 하는 분산전원 한대의 용량은 2[MW], 분산전원의 운영계획기간은 12년으로 한다. 기본적인 부하특성과 신뢰도 파라미터는 참고문헌[3]을 참조하였다.

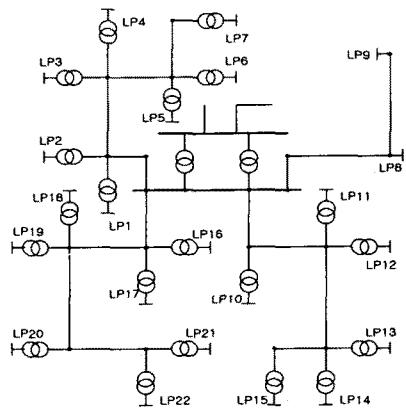


그림 1. RBTS 2번 모선 배전계통

4. 결과 및 해석

4.1 분산전원의 위치결정

배전계통의 계획기간 동안의 부하증가량과 선로제한용량에 의해서 계통에 설치될 분산전원의 설치여부와 설치대수는 결정된다. 유전알고리즘에 의해서 손실 비용만을

고려했을 때와 전체 비용을 고려했을 때의 각각의 분산전원의 최적의 위치를 결정할 수 있다. 표 1은 분산전원을 설치할 부하점을 나타내고 있다.

표 1. 분산전원이 설치될 부하점

DG 설치 부하점	손실비용만 고려	전체비용 고려
	6, 7, 15, 18, 21, 22	2, 7, 14, 15, 16, 22

다음 표2는 손실비용만 고려한 경우와 전체비용을 고려한 경우의 각각의 비용을 비교하고 있다. 전체비용을 고려한 경우에는 손실비용만을 고려했을 때보다 연간 796,065[\$]의 이익을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 신뢰도 비용 적용 여부에 따른 비용의 비교

비용[\$/yr]	손실비용만 고려	전체비용 고려
손실비용	310,615	352,955
신뢰도비용	1,242,460	530,710
총 운영비용	10,526,965	9,730,900

4.2 신뢰도 평가

분산전원의 설치 여부에 따른 신뢰도 지수와 배전계통의 운영비용에서 신뢰도 비용의 적용 여부에 따른 신뢰도 지수를 산정하였다. 다중 신뢰도 지수를 구하기 위한 SAIFI의 목표값을 0.15, SAIDI의 목표값을 2.85, 적정 신뢰도 가중치는 1로 한다.

표 3. 분산전원 설치에 따른 신뢰도 지수의 비교

신뢰도 지수	DG 미설치	DG 설치
SAIFI	0.248827	0.216905
SAIDI	3.614251	3.155236
ASAI	0.999587	0.999640
CFDI	0.927002	0.553135

표 3에서 볼 수 있듯이 분산전원을 설치함에 따라 신뢰도 지수가 더 좋아짐을 알 수 있다. 이는 정전시 각 부하점에 설치된 분산전원에 의해 전력을 공급함으로써 정전빈도와 정전시간을 줄여서 전력 공급률이 향상되기 때문이다.

표 4. 신뢰도 비용 적용 여부에 따른 신뢰도 비교

신뢰도 지수	손실비용만 고려	전체비용 고려
SAIFI	0.217971	0.216905
SAIDI	3.161583	3.155236
ASAI	0.999639	0.999640
CFDI	0.562465	0.553135

손실비용만을 고려할 때와 손실비용과 신뢰도 비용을 모두 고려한 전체비용을 고려하였을 때의 신뢰도 지수와 다중 신뢰도 지수는 표 4와 같이 구할 수 있다. 전체비용을 고려했을 경우가 상대적으로 손실비용만을 고려하였을 때보다 신뢰도 지수가 좋음을 알 수 있다. 이는 신뢰도 비용을 고려하였을 때는 다른 부하에 비해 신뢰도 비용이 높은 상업부하의 영향에 의해 손실만을 고려했을 때의 경우보다 더 좋은 결과를 얻었다.

4.3 유전알고리즘에 의한 수렴곡선

아래의 그림 2은 손실비용만을 고려할 때와 전체비용을 고려하였을 때의 각각의 경우에 대한 유전 알고리즘에 의한 수렴곡선이다.

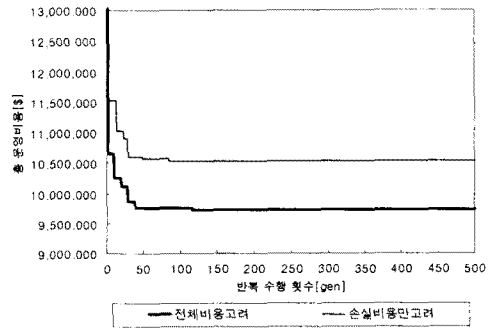


그림 2. 총 운영비용의 수렴곡선

손실비용만을 고려할 때는 반복회수가 85회 이상에서 총 운영비용 10,526,965[\$/yr]에서 수렴하고, 전체비용을 고려하였을 때는 반복회수가 116회 이상에서 총 운영비용 9,730,900[\$/yr]에서 수렴한다.

손실비용만을 고려했을 때가 전체비용을 고려했을 때보다 좀 더 빨리 수렴함을 보이고 있다. 이것은 손실비용만을 고려할 때의 제약조건이 전체비용을 고려했을 때보다 적기 때문이다.

5. 결 론

배전계통 운영자는 비용의 최소화에 의해 계통의 계획 단계에서 분산전원의 용량과 위치를 결정하여 시간에 따른 부하량과 전력비용에 적절할 때 전력을 구입하거나 분산전원을 운영하여 운영비용의 줄일 수 있다. 또한 계통에 전력이 공급되지 못할 때도 분산전원의 운영에 의해 정전비용을 최소화함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 그리고 분산전원의 설치여부와 신뢰도 비용의 적용 여부에 따른 각각 신뢰도 지수의 비교하였으며, 배전계통의 총 운영비용을 계산하였다. 이 계산 결과를 가지고 총 운영비용의 최소화에 의한 분산전원의 최적의 위치와 설치순서를 결정하였다. 계산된 신뢰도 지수에서 알 수 있듯이 분산전원의 도입과 신뢰도 비용을 고려하였을 때에 계통의 신뢰도가 향상됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 01-중-04 사업의 연구비에 의하여 연구되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Richard E. Brown, Jiuping Pan, Xiaoming Feng and Krassimir Koutlev, "Siting Distributed Generation to Defer T&D Expansion", Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, Vol.2, p.622-627, 2001.
- [2] G. Cell, F. Pilo, "Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks", Power Industry Computer Applications, PICA, Innovative Computing for Power-Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference, p.81-86, 2001.
- [3] 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.