

Selection of Optimal Location and Size of Distributed Generation Considering Power Loss

李 洙 衡* · 朴 正 旭†

(Soo-Hyoung Lee · Jung-Wook Park)

Abstract - Increase in power consumption can cause a serious stability problem of an electric power system without construction of new power plants or transmission lines. Also, it can generate large power loss of the system. In costly and environmentally effective manner to avoid constructing the new infrastructures such as power plants and transmission lines, etc, the distributed generation(DG) has paid great attentions so far as a solution for the above problem. Selection of optimal location and size of the DG is the necessary process to maintain the stability and reliability of existing system effectively. However, the systematic and cardinal rule for this issue is still open question. In this paper, the method to determine optimal location of the DG is proposed by considering power loss when the DG is connected to an electric power grid. Also, optimal size of not only the corresponding single DG but also the multi-DGs is determined with the proposed systematic approach. The IEEE benchmark 30-bus test system is analyzed to evaluate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key Words : Distributed generation, GGDF, Optimal location, Optimal size, Power loss

1. 서 론

전 세계적으로 화력, 원자력, 수력, 기타 대체에너지를 이용한 발전 등 다양한 발전 방법이 이용되고 있으나, 아직까지는 화석연료 중심의 발전 방식이 가장 많이 이용되고 있다. 기존 화력발전소의 경우, 온실가스의 발생 등으로 인한 공해문제, 낮은 발전효율, 중앙집중식 대형 발전에 따른 과도한 소요비용, 전력 부하의 변화에 따른 대응력 부족 등 많은 문제점을 갖고 있어, 이를 해결하기 위한 새로운 방식의 접근이 논의되어 왔으며, 이에 따라 송배전 설비를 절감할 수 있고 건설기간이 짧으며, 침투부하에 대한 대응성이 높은 고효율 분산전원 기술이 그 대안으로 떠올랐다. 분산전원에 이용되는 기술은 10여 가지가 있으나, 기술의 파급도 측면에서 클 것으로 예상되는 것은 마이크로 가스터빈, 연료전지, 태양광발전, 풍력발전 등이 있다.

미국의 경우 1970년부터 가스터빈, 연료전지, 풍력발전, 태양광 발전에 대한 특허가 등록되어져 왔으며, 특히 90년대 들어서 가스터빈과 태양광 발전 특허가 크게 늘고 있다. 유럽의 경우 역시 90년대에 관련 특허 출원이 두드러지며, 미국과 마찬가지로 최근 들어 연료전지 특허가 활발해지고 있다. 일본의 경우 미국과 비슷한 수준으로 유럽과 한국을 압도하고 있다. 국내의 경우 절대적 수치가 큰 것은 아니나 선진국과 비교할 때 풍력의 상대적인 비중이 큰 특징을 보

인다.

이처럼, 전 세계적으로 관심을 끌고 있는 신·재생 에너지 관련 기술 및 시장의 동향을 고려할 때, 분산전원의 계통 연계 문제는 날로 중요해지고 있다. 분산전원을 기존의 전력계통에 연결할 때 안정성을 위해 고려해야 할 것으로, 사고발생시 역조류 방지를 위한 계통으로부터의 차단 문제와 사고 복구 후 재결합 문제 등이 있으며, 정상상태 운전에서는 전압 안정화와 전력손실 문제를 들 수 있다. 분산전원을 잘못 사용하거나 그 위치를 잘못 정하면 전력의 질적 저하와 전력 공급의 신뢰성 저하 및 시스템제어능력 저하를 가져올 수 있으며, 계통내의 전력손실을 증가시키고 전압의 안정성을 해할 수 있다[1]. 따라서 전력 시스템의 안정적인 운전을 위해서는 분산전원의 위치선정 및 용량결정 문제가 반드시 해결되어야 한다. 본 논문에서는 전력손실을 고려하여 계통 내 분산전원이 투입될 수 있는 최적의 위치를 찾고 그 위치에서 최적의 분산전원 용량을 찾는 방안을 제시한다.

2. 계통 내 분산전원의 최적 위치 선정

2.1 캐패시터 위치선정

대체로, 기존의 발전소는 전력소비지역과 멀리 떨어져 있어 송전선에서 리액티브 성분이 많이 발생하고, 이것은 소비지역의 전압감소를 야기 시킨다. 또한, 낮아진 전압을 정상으로 유지하기 위해 발전소에서 공급하는 전류를 늘릴 경우 송전손실이 증가하게 된다. 현재는 리액티브 성분이 있는 지역에 캐패시터 뱅크를 설치하여 이러한 문제를 해결하고 있는데, 캐패시터 뱅크를 리액티브 성분이 발생하는 모든 지

* 學生會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 工學碩博士課程

† 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 助教授 · 工博

E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr

接受日字 : 2007年 12月 24日

最終完了 : 2008年 3月 12日

역에 설치한다면 송전효율은 극대화 할 수 있지만 이 경우 설치비용이 급격히 늘어나 경제성 면에서 타당하지 않다. 따라서 최적의 효율을 낼 수 있는 방법은 리액티브 성분이 집중되는 지역에 캐패시터 뱅크를 연결하여 여러 지역에 캐패시터를 연결한 것에 버금가는 효과를 얻는 것이다[2]-[4].

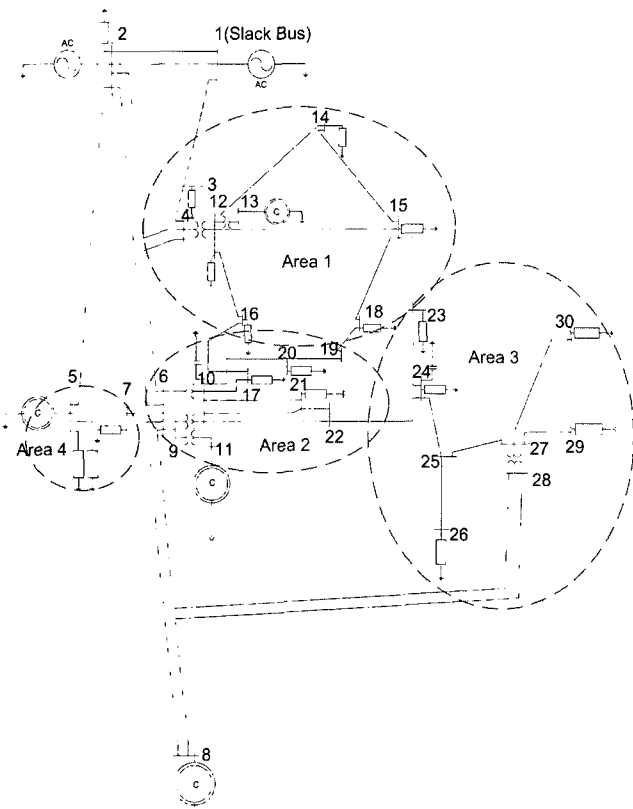


그림 1 IEEE 벤치마크 30 모선 시스템
Fig. 1 IEEE benchmark 30 bus system

그림 1은 IEEE 벤치마크 30 모선 시스템을 제시하고 있다. 그림 1에서 모든 임피던스 값은 1 pu이하 이므로, 그림 2와 식 (1)에서 P_i 와 Q_i 에 의해 전압 V_{i+1} 는 V_i 보다 작은 값을 갖는다[3], [4]. 따라서 전압 V_{i+1} 의 값과 V_i 값의 차이를 줄이기 위해서는 모선 i 에 캐패시터를 연결해 Q_i 의 크기를 줄여야 한다. 만일 캐패시터를 연결한 모선에 주변 모선과 이어주는 송전라인이 많이 있다면 캐패시터의 용량만 간단히 증가시켜 주변 모선에서의 전압강하를 방지할 수 있다. 그림 1에서 모선 6은 가장 많은 7개의 송전라인으로

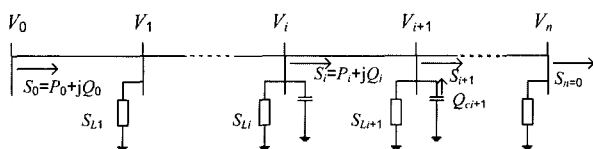


그림 2 전력분배 단선도
Fig. 2 One-line diagram of a distribution feeder

연결되어 있으므로 캐패시터 뱅크를 위한 적절한 위치일 가능성이 있으나, 모선 5와 모선 8의 기존 캐패시터 뱅크가 있어 새로운 캐패시터 뱅크로 인한 효과를 감소시킬 가능성이 있다. 반면 모선 10은 6개의 송전라인과 연결되어 있으나, 캐패시터 뱅크를 연결하여 6개의 주변 라인 모두에 효과를 줄 수 있으므로 모선 10이 더욱 적절한 위치가 될 수 있다 [2]-[4].

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + (r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2)(P_i^2 - Q_i^2) / V_i^2 \quad (1)$$

표 1은 모선 6과 모선 10에 각각 19 MVAR의 캐패시터를 연결했을 때의 효과로서, 모선 10에 연결했을 때 전압상승 비율이 모선 6에 연결했을 때 보다 크게 나타났다. 이는 모선 10에 연결했을 때가 모선 6에 연결했을 때 보다 리액티브 성분을 더 효과적으로 줄여줌을 뜻하고, 모선 10이 모선 6보다 캐패시터 뱅크를 설치하기에 좋은 위치임을 보여 준다.

표 1 캐패시터 뱅크 연결의 효과
Table 1 Effect of connected capacitor bank

모선 번호	캐패시터 뱅크를 달지 않았을 때 전압 (pu)	모선 6에 캐패시터 뱅크를 달았을 때 전압 (pu)	모선 10에 캐패시터 뱅크를 달았을 때 전압 (pu)	캐패시터 뱅크를 모선 10에 달았을 때와 모선 6에 달았을 때의 전압 차이 (pu)
4	1.003	1.013	1.012	10^{-3}
6	1.000	1.013	1.012	10^{-3}
7	0.992	1.004	1.003	10^{-3}
9	1.030	1.041	1.049	8×10^{-3}
10	1.013	1.023	1.041	18×10^{-3}
17	1.011	1.020	1.036	16×10^{-3}
20	1.002	1.011	1.026	15×10^{-3}
21	1.001	1.011	1.028	17×10^{-3}
22	1.001	1.011	1.028	17×10^{-3}
28	0.998	1.011	1.010	10^{-3}

2.2 분산전원의 연결

캐패시터 뱅크는 리액티브 성분을 줄여줌으로써 전력을 소비하는 지역에서의 전압을 안정시키고 시스템의 전력손실을 줄인다. 이 위치에 분산전원을 공급하면 발전기의 유효적인 무효전력이 캐패시터 뱅크와 같은 역할을 하고, 발전기에서 공급되는 미리 계획된 유효전력은, 캐패시터에서 공급되는 무효전력이 전력 손실에 영향을 주는 것과 비슷한 역할을 한다. 손실전력은 유효전력과 무효전력에 동일하게 영향을 받으므로, 캐패시터보다 분산전원이 더 효과적으로 손실을 감소시킬 수 있다[5], [6]. 한편, 캐패시터 뱅크는 해당 위치에서 필요한 무효전력을 공급함으로써 전압을 유지 하는데 반해, 분산전원은 무효전력이 유효적이므로 최적의 전압을 직접 계산해 공급해야 한다. 그림 3은 모선 10에 용량이 40 MW, -40~50 MVAR 인 분산전원을 연결한 후, 전력 공급량을 0 MW에서 40 MW 까지 변화시키고, 전압을 0.95

pu에서 1.25 pu까지 변화시킬 때, 전체회로의 전력 손실에 미치는 영향을 나타낸 것으로 전압이 1.06 pu와 1.15 pu 사이일 때 손실이 가장 적은 것으로 나타났다. 분산전원의 전압은 필요에 따라 적절한 제어를 통하여 원하는 값을 가질 수 있으며, 이 논문에서는 손실이 적은 1.06 pu의 값으로 선택하였다. 또한, 그림 3에서 분산전원이 공급하는 전력량을 변화시킬 때 전체회로에서의 전력손실이 크게 감소하지만, 분산전원의 전압을 변화시킬 때에는 상대적으로 작게 감소함을 알 수 있다. 식 (1)에 의해, 인접한 모선의 전압은 분산전원의 전력공급량보다는 분산전원이 연결된 모선의 전압에 의해 크게 영향을 받으므로, 인접한 모선에서의 전압 안정성을 해치지 않고 분산전원의 공급전력량을 변화시킬 수 있다. 즉, 전력손실은 분산전원이 공급하는 전력에 영향을 받고, 인접한 모선의 전압은 분산전원의 전압에 영향을 받는다. 따라서, 분산전원의 전력공급량은 주변 모선의 전압에 영향을 주지 않고 변화시킬 수 있으며, 분산전원의 전압을 전체 전력손실에 영향을 주지 않고 변화시킬 수 있다.

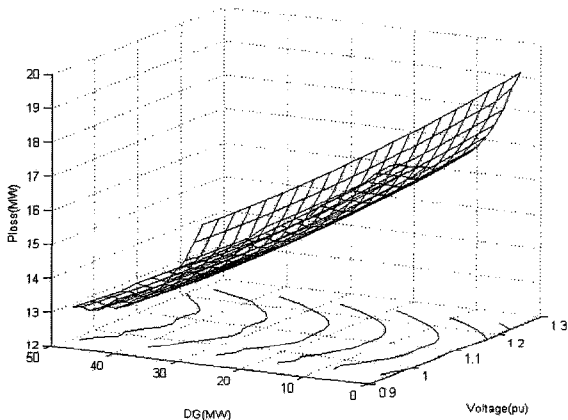


그림 3 분산전원의 전압 및 전력에 따른 시스템 전력손실
Fig. 3 Power loss corresponding to voltage and power of the DG

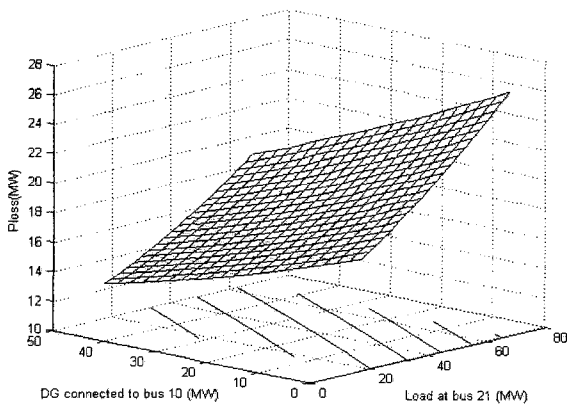


그림 4 모선 21의 소비전력 증가량과 모선 10의 분산전원 전력 공급량에 따른 시스템 전력 손실
Fig. 4 Power loss corresponding to DG power variation at bus 10 and load consumption variation at bus 21

그림 4는, 그림 1의 모선 21(Area 2)에서 전력소비량을 증가시키면 전체 회로의 전력손실이 급격히 증가하지만, 모선 10(Area 2)에 분산전원을 연결하면 전력손실의 급격한 증가를 완화할 수 있음을 보여준다. 그림 4의 아래쪽 평면에 나타난 직선들은 전력손실이 동일한 부분을 나타낸다. 예를 들어, 전력소비량을 20 MW 에서 60 MW 로 증가시킬 때, 분산전원에서 공급하는 전력량을 0 MW 로부터 50 MW 까지 늘리면 전체 회로의 전력손실은 일정하게 유지됨을 의미한다. 모선 10에 연결한 분산전원에서 생산한 전력은 주변 모선들 모두에 공급되므로, 모선 21의 증가된 전력소비량을 모두 충족시킬 수는 없다. 그 결과, 그림 4의 동일한 전력손실 부분을 나타내는 직선들에서, 모선 10의 분산전원에 의해 투입되는 전력량과 모선 21의 부하소비량이 정확히 일치하지는 않고 비례관계만을 나타낸다. 앞에서 언급되었듯이, 식 (1)로부터 분산전원에서 공급하는 전력의 양은 주변 모선의 전압에 큰 영향을 주지 않으므로, 분산전원으로부터 전력공급을 통해 전체 시스템의 송전손실을 줄이는 방법을 사용하여도 시스템의 전압안정성을 해치지 않는다.

2.3 분산전원의 최적위치 선정

그림 5는 그물모양으로 엮힌 회로망에서의 전력손실을 구하기 위해서 단순화된 회로를 보여주고 있다.

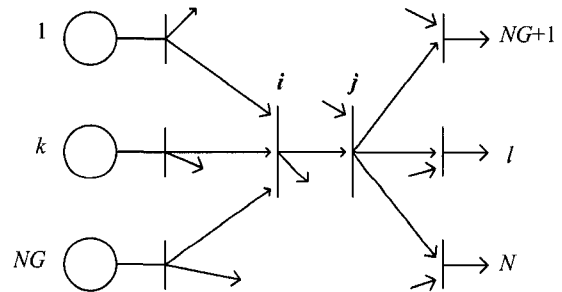


그림 5 전력의 공급과 수요
Fig. 5 Power generation and consumption

본 절에서 분산전원의 최적위치 선정을 위해 제안되는 수식에 필요한 변수들을 다음과 같이 정의한다. 단, $D_{kj,l}$ 와 $D_{jl,k}$ 은 Generalized Generation Distribution Factor(이하 GGDF)로 정의된 것을 사용하였고, 모선 사이를 흐르는 전력흐름의 상대적 크기를 나타내는 변수이다[8].

- P_k : k번째 발전기가 공급하는 전력.
- P_l : l번째 부하가 소비하는 전력.
- P_{kl} : 모선 k에서 l로 공급되는 전력.
- $F_{jl,k}$: k번째 발전기에서 부하 l에 연결된 모선 j를 경유해 부하 l로 전달되는 전력.
- $D_{jl,k}$: k번째 발전기가 공급하는 전력 중 $F_{jl,k}$ 가 차지하는 전력의 비율.
- $P_{loss,k}$: k번째 발전기가 공급하는 전력에 기인한 손실전력.
- $F_{kj,l}$: k번째 발전기에서 발전기 k에 연결된 모선 j를 경유해 부하 l로 전달되는 전력.
- $D_{kj,l}$: k번째 발전기가 공급하는 전력 중 $F_{kj,l}$ 이 차지하는

전력의 비율.

- $P_{loss,i}$: l 번째 부하가 소비하는 전력에 기인한 손실전력.
- $P_{loss,i,j}$: 모선 i 와 j 사이에서 발생하는 손실전력.

위 회로를 발전기 k 에서 생산된 전력이 각 부하로 전달되는 회로와 여러 발전기로부터 부하 l 로 전력이 전달되는 회로로 나누어 해석할 수 있는데, 전자의 경우는 다음과 같이 해석할 수 있다[7]. 아래의 그림 6으로부터 발전기 k 에서 부하 l 로 공급되는 전력은 다음의 식 (2)로 나타낸다.

$$P_{kl} = \sum_{j \in c(l)} F_{jl,k} = \sum_{j \in c(l)} D_{jl,l} P_k \quad (2)$$

식 (2)와 그림 6의 $c(l)$ 은 부하에 연결된 모선들을 의미하고, 발전기 k 를 기준으로 한 전력손실은 식 (3)으로 나타낸다. 식 (3)이 나타내는 전력손실은, 발전기 k 에서 공급하는 전력과, 전체 부하에서 실질적으로 사용하는 발전기 k 의 공급전력과의 차이이다.

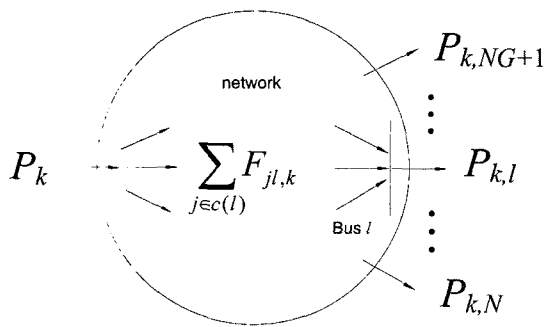


그림 6 발전기 k에서 각 부하로 전달되는 전력
Fig. 6 Power from generator k to loads

$$P_{loss,k} = P_k - \sum_{l=NG+1}^N P_{k,l} \quad (3)$$

같은 방법으로, 아래의 그림 7을 사용하여 여러 발전기로부터 부하 l 로 전력이 전달되는 경우를 해석할 수 있다.

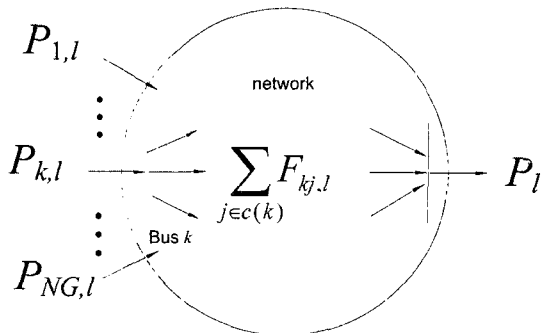


그림 7 발전기에서 부하 l로 전달되는 전력
Fig. 7 Power from generators to load l

앞선 해석과 마찬가지로, 발전기 k 로부터 부하 l 에 공급되는 전력은 다음의 식 (4)로 나타낸다.

$$P_{kl} = \sum_{j \in c(k)} F_{kj,l} = \sum_{j \in c(k)} D_{kj,l} P_k \quad (4)$$

여기서 $c(k)$ 는 발전기에 연결된 모선들이고, 부하 l 을 기준으로 한 전력손실은 다음의 식 (5)로 나타낸다. 식 (3)에서와 마찬가지로 식 (5)에서 의미하는 전력손실은, 부하 l 에 공급하기 위해 발전기들에서 생산한 전력과 부하 l 에서 사용하는 전력의 차이이다.

$$P_{loss,l} = \sum_{k=1}^{NG} P_{k,l} - P_l \quad (5)$$

위의 식 (3)과 (5)로부터 전력손실은 공급한 전력과 소비된 전력간의 차이이므로, 그림 8의 단위 회로에서 전력손실을 계산하면 식 (6)으로 나타낸다.

$$P_{loss,ij} = P_i - P_j = \frac{(P_i^2 + Q_i^2)R}{V_i^2} \quad (6)$$

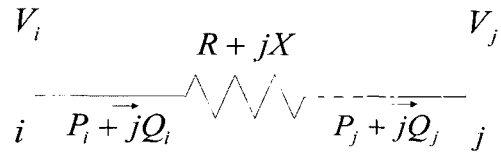


그림 8 단위회로
Fig. 8 Unit circuit

그림 5의 계통망을 그림 8의 단위 회로로 나눈 후, 식 (3)과 (5)를 적용하면 모선 i 는 발전기가 되고 모선 j 는 부하가 된다. 그림 8과 식 (6)에서, 손실전력은 회로로 흘러들어가는 전력과 회로의 저항, 전력을 공급하는 모선의 전압에 의해 결정된다. 2.2절에서 언급했듯이, 정상상태로 운전되는 경우 분산전원의 전압은 적절한 제어를 통해 일정하게 유지되므로, 분산전력을 공급했을 때 전력공급모선의 유효 및 무효전력과 저항만이 손실전력에 영향을 미친다.

그림 5의 회로에서 분산전원을 모선 i 에 연결하면, 주변으로 공급되는 전력의 양이 증가하므로, 모선 i 와 j 사이를 이동하는 전력의 양도 증가하게 된다. 반대로 모선 j 에 분산전원을 연결하면, 모선 j 가 부하에서 소비하는 전력을 직접 담당할 수 있으므로 모선 i 와 j 사이를 이동하는 전력은 감소하게 된다. 대체로 계통의 저항은 일정하게 유지되므로, 식 (6)으로부터, 전력이동이 감소하면 전력손실도 감소한다. 따라서 계통망에서 분산전원을 연결할 때, 부하에서 소비하는 전력이 많은 곳에 연결하면 손실전력을 효과적으로 줄일 수 있다. 현실적 조건을 고려하여, 몇몇 주요한 모선을 골라 분산전원을 투입한다고 가정한다. 분산전원의 최적 위치 선정을 위하여 그림 1의 계통망을 전력공급 경로에 따라 상대적으로 부하소모량이 큰 지역을 네 곳(그림 1의 Area 1에서부터 Area 4까지)으로 나누었으며, 표 2는 그에 따른 총 부하의 크기를 나타내고 있다.

표 2 각 지역에 포함되는 모선과 부하량

Table 2 Buses included in each area.

지역	포함되는 모선	총 부하의 크기
Area 1	3, 4, 12, 13, 14, 15, 16, 18	45 MW
Area 2	10, 11, 17, 19, 20, 21, 22	44 MW
Area 3	23, 24, 25, 26, 27, 29, 30	28.4 MW
Area 4	5, 7	117 MW

표 2로부터, 지역들을 부하의 크기 기준으로 나열하면 Area 4, Area 1, Area 2, Area 3의 순이고, 발전기 1로부터 각 지역까지 연결되는 송전선의 저항크기를 기준으로 나열하면 Area 3, Area 2, Area 1, Area 4의 순이다. 식 (6)으로부터, 전력손실을 기준으로 한 적절한 분산전원의 위치는 Area 4, Area 1, Area 2, Area 3의 순이다. 같은 방법으로, 각 지역에 대하여 그 내부의 모선들을 비교하면 표 3에서 제시된 것처럼, 각 개별지역의 분산전원 최적 위치 선정을 위해 우선 부하가 가장 큰 모선과 가장 작은 모선으로 나눌 수 있다.

표 3 각각의 지역에서 부하가 가장 큰 모선과 작은 모선
Table 3 Buses with the largest and smallest loads in each area

지역	지역 내에서 부하가 가장 큰 모선	지역 내에서 부하가 가장 작은 모선
Area 1	12	16
Area 2	10	22
Area 3	27	26
Area 4	5	7

표 4와 5는 Area 1, Area 2, Area 3, Area 4에서 부하가 가장 큰 모선과 가장 작은 모선에 각각 분산전원(DG1=30 MW, DG2=40 MW, DG3=50 MW (Q=-40~50 MVAR))을 연결했을 때 평균손실 및 손실민감도를 계산한 것이다. 표 4의 전력손실 민감도는 분산전원으로부터 30 MW에서 50 MW로 전력 공급량을 늘렸을 때의 민감도를 나타낸다. 분산전원에서 공급하는 전력이 작을 때에는 위에서 설정한 지역 모두가 분산전원의 공급전력을 바로 소비할 수 있으므로, 지역 내 부하크기와 분산전원 설치시 전체 시스템의 전력손실과의 관계가 명확하게 나타나지 않는다. 따라서 부하소비가 가장 작은, Area 3의 총 부하소비를 넘어서는 30 MW부터 분석을 하였다. 표 4의 전력손실 민감도로부터 전력의 소비량이 큰 지역에서의 전력손실 감소가 빠름을 알 수 있다. 단, Area 2의 경우는 Area 4와 인접해 있는데 Area 4의 소비전력이 매우 커서 이에 영향을 받아 손실의 감소가 빠른 것으로 분석할 수 있다. Area 2의 결과를 감안 하더라도, Area 4에서 전력손실 감소가 가장 빠름은 변함없으며, 이것은 부하의 용량이 큰 지역에 분산전원을 연결하는 것이 전력손실 감소의 측면에서 좋음을 보여준다. 표 5에서도 표 4에서의 분석과 같은 결과를 이끌 수 있으며, 표 5의 민감도와 표 4의 민감도를 비교하면, 부하의 용량이 큰 모선에 분산전원을 연결하는 것이 전력손실의 감소에 유리함을 알 수 있다. 특히, 표 5의 Area 3에서의 민감도는 분산전원의 공급전력 증가에 따라 전력손실이 증가함을 보이고, 이것은 부하의 소모량이 작은 곳에 용량이 큰 분산전원을 연결하면 오히려 전력손실이 증가함을 의미한다. 위 결과에 따라 분산

전원이 위치하기에 가장 좋은 지점은, 분산전원의 용량이 가장 큰 Area 4의 모선 5가 될 수 있다. 같은 방법으로 각 지역 Area 1, Area 2, Area 3에서 분산전원이 위치하기 가장 좋은 모선은, 각각 모선 12, 모선 10, 모선 27이 될 수 있다. 2.1절에서는 식 (1)을 이용하여 캐패시터 뱅크를 계통에 연결할 때, 그림 2의 무효전력 Q를 감소시켜 인접한 모선의 전압강하를 방지함을 보였다. 같은 방법으로 그림 2의 모선 i+1에 분산전원을 연결하면 모선 i에서 모선 i+1로 흐르는 유효전력 P_i가 감소하므로 전압강하가 줄어들게 된다. 그림 1의 계통망을 부하소모량이 큰 광역지역으로 나누고 그중에서 분산전원을 부하소모량이 큰 모선에 연결하면, 앞에서 언급한 유효전력 P_i 감소효과를 극대화 할 수 있으므로 전력손실의 감소효과뿐만 아니라 전압유지효과도 극대화 할 수 있다. 즉, 부하가 큰 모선에 연결한 분산전원은 전력손실을 줄일 뿐만 아니라 인접한 모선의 전압에도 긍정적인 영향을 미치므로, 부하의 전력소비를 고려해 분산전원의 위치를 선택하는 것은 시스템의 안정적인 운영을 위해서도 적합한 방법이다. 분산전원을 연결하면 분산전원이 연결된 모선에서 주변 모선으로 흘러가는 전력이 증가하므로, 그림 8과 식 (6)에 의해 분산전원을 연결한 모선 주변의 전력손실이 급격히 증가한다. 따라서 분산전원을 연결한 지역 내의 전력손실을 고려해야 한다. 그림 9는 각각의 설정한 지역에 분산전원을 연결했을 때 분산전원이 연결된 지역에서의 전력손실을 나타내는 그래프이다. Area 3의 경우 분산전원의 공급전력량이 증가함에 따라 지역 내의 전력손실이 꾸준히 증가하는데, Area 3의 부하소모량에 해당하는 28.4 MW 만큼의 분산전원을 연결할 때 손실전력은 초기 값과 비교해 심각하게 크지 않다. Area 4는 분산전원의 공급전력량이 지역 내 부하소모량 117 MW 근처를 지나면서 손실전력이 증가하기 시작한다. 분산전원으로부터의 공급전력이 각 지역에서 요구하는 부하량을 크게 웃돌 때, 각 지역에서의 전력손실은 증가하는 양상을 보인다. 정리하면, 분산전원의 공급전력이 각 지역의 부하량을 넘어설 때, 전력손실이 급격히 감소하는 지역은 보이지 않지만, Area 3에서는 그 값이 최소값에 비해 크게 증가하는 것은 확인할 수 있다. 전력손실이 급격히 증가하면, 열화로 인한 여러 문제가 발생할 수 있으므로, 각 지역에서의 전력손실의 급격한 증가를 허용하지 않으면서 전체회로의 전력손실을 줄이기 위해서는 분산전원의 최대용량을 각 지역에서 요구하는 부하량과 비슷하게 해야 한다.

표 4 부하가 가장 큰 모선에 분산전원 연결 시 평균손실 및 손실민감도

Table 4 Average power loss and its sensitivity corresponding to DG power at bus with the largest load

	DG1	DG2	DG3	$\Delta P_{loss}/\Delta P$
Area 1 (모선 12)	14.688	13.905	13.212	-0.0738
Area 2 (모선 10)	14.165	13.214	12.352	-0.09065
Area 3 (모선 27)	14.371	13.659	13.114	-0.06285
Area 4 (모선 5)	13.418	12.705	11.398	-1

표 5 부하가 가장 작은 모선에 분산전원 연결 시 평균손실 및 손실민감도

Table 5 Average power loss and its sensitivity corresponding to DG power at bus with the smallest load

	DG1	DG2	DG3	$\Delta P_{loss}/\Delta P$
Area 1 (모선 16)	14.618	13.954	13.446	-.05896
Area 2 (모선 22)	14.009	13.114	12.356	-.08265
Area 3 (모선 26)	16.466	17.763	19.797	.16655
Area 4 (모선 7)	13.920	13.239	11.924	-.0998

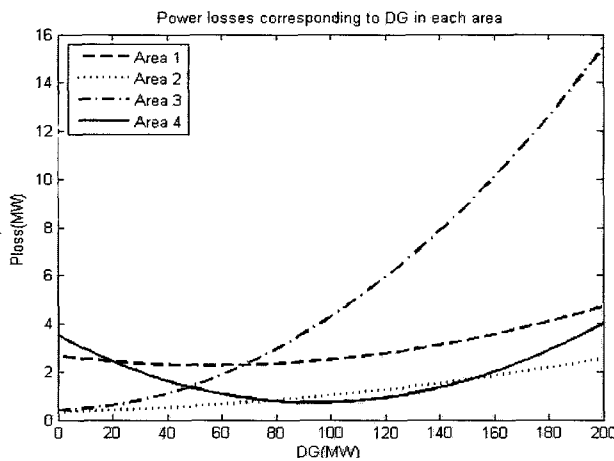


그림 9 각 지역의 분산전원 용량에 따른 각각의 지역에서의 전력손실

Fig. 9 Power losses in each area corresponding to DG in each area

3. 계통 내 분산전원의 최적 용량 선정

3.1 단일 분산전원의 용량 선정

앞의 2장에서 분산전원을 연결하기 위한 좋은 위치로 모선 12, 10, 27, 5가 될 수 있었고, 가장 최적의 지점은 모선 5로 결정되었다. 식 (6)은 $P_i = P_j$ 일 때 전력손실이 가장 작음을 보여주므로, 설정한 각 지역에서의 부하크기와 비슷한 용량의 분산전원을 연결하면 각 지역 간 전력의 이동에서 생기는 손실이 최소가 됨을 알 수 있다. 따라서 모선 5에 분산전원을 연결하였을 때 Area 4에서 소모하는 전력의 양은 117 MW이므로 분산전원이 공급할 전력을 최대 120 MW로 설정하고 전력손실을 확인하였다. 그림 10은 Area 2와 Area 3에서 약간의 전력손실 증가 외에는 모든 영역에서 손실이 감소함을 보여준다. Area 4의 전력손실이 부하소모량 117 MW 주변에서 보이는 변화는, 분산전원의 용량을 부하소모량과 비슷한 수준 이상으로 크게 하면, Area 4에서의 전력손실이 증가할 수 있음을 의미한다.

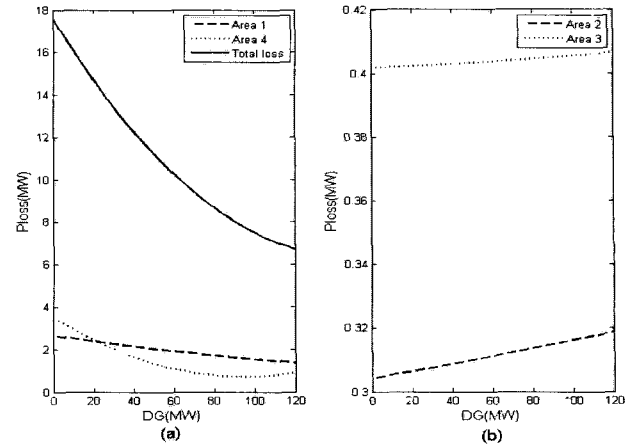


그림 10 모선 5에 분산전원을 연결하였을 때 전력손실의 변화
Fig. 10 Power losses when DG is connected to bus 5

손실이 증가하는 Area 2, Area 3과 시스템의 전체 전력 손실을 고려할 때, 지역에서 요구하는 부하만큼의 분산전원을 연결하면 지역 내 손실 증가를 최소화하면서 전체 손실을 줄일 수 있다. 따라서 하나의 분산전원을 계통에 연결할 때, 연결할 지역에서의 부하를 고려한 값의 결정방법은 손실을 줄이는 유용한 방법이다.

기존의 Newton-Raphson 법을 이용한 조류계산 및 회로 해석은 정확하지만 해석하는 시간이 오래 걸리므로, 시스템이 커지면 결과예측을 위해 시간적으로 효율적인 방법이 요구된다. GGDF를 사용한 해석이 그 대안이 될 수 있는데, 특정 모선에 연결된 부하가 증가할 때 분산전원을 공급하면 분산전원이 없을 때에 비해 슬랙 모선으로부터 공급되는 전력의 양이 줄어들게 되므로, 그림 1의 회로에서 1번 모선의 발전량을 분산전원이 연결된 모선에서의 발전량으로 옮기는 것으로 해석이 가능하다[8], [9].

$$A_{l-k,g} = \frac{X_{lg} - X_{kg}}{X_{lk}} \quad (7)$$

$$D_{l-k,R} = \frac{F_{l-k} - \sum_{p \neq R} A_{l-k,p} G_p}{\sum_q G_q} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 X_{lg} 는 모선 l 에서의 전압변화량, ΔV_l 및 모선 g 에서의 전류변화량, ΔI_g 와 $\Delta V_l = X_{lg} \Delta I_g$ 의 관계를 만족하고, X_{kg} 는 모선 k 에서의 전압변화량, ΔV_k 및 모선 g 에서의 전류변화량, ΔI_g 와 $\Delta V_k = X_{kg} \Delta I_g$ 의 관계를 만족하는 리액턴스성분이다. X_{lk} 는 선로의 리액턴스이며, G_p 는 기준 발전기 G_R 을 제외한 발전기, G_q 는 G_R 을 포함한 모든 발전기를 의미한다.

$$D_{l-k,g} = A_{l-k,g} + D_{l-k,R} \quad (9)$$

위의 식 (7), (8), (9)로부터 모선 g 의 분산전원에 의한 GGDF $D_{l-k,g}$ 를 구한 후, Newton-Raphson을 통해 계산한

초기의 조류 값 F_{l-k} 와 다음의 식 (10)에 대입하면 발전기 용량 변화에 따른 새로운 조류 값이 구해진다.

$$F_{l-k}^{New} = F_{l-k} + D_{l-k,g} \Delta G_g - D_{l-k,R} \Delta G_R \quad (10)$$

구해진 새로운 조류를 나타내는 변수 F_{l-k}^{New} 의 값을 식 (6)에서 전력을 나타내는 변수 P_i 에 대입하면, 전력손실을 구할 수 있다. 그림 11은 모선 12, 10, 27, 5에 각각 분산전원을 공급할 때의 전체 전력손실을 GGDF와 Newton-Raphson을 각각 이용하여 구한 손실이다. Newton-Raphson방법은 유효전력 및 무효전력을 모두 고려하여 조류계산을 하지만 GGDF방법은 유효전력만을 고려하여 조류계산을 하므로, 두 방법으로 계산한 전력손실에는 약간의 차이가 있지만, GGDF를 통한 예측이 잘 맞음을 보여주며 GGDF기법의 선형화를 통해 계산시간을 효과적으로 단축시키는 장점이 있다. 또한 GGDF를 이용한 조류계산방법은 초기의 전력흐름을 기반으로, 변화한 전력흐름을 예측하는 것이므로 발전기용량 또는 부하용량이 초기 값에 비해 현저하게 커지면 전력의 흐름을 정확하게 예측할 수 없다. 이러한 이유로 인해 전체 시스템 부하의 절반가량을 차지하고 있는 Area 4에 분산전원을 연결했을 때는 상대적으로 다른 지역에 연결했을 때 보다 투입 분산전원의 용량이 커질수록 오차가 더 발생하였다. 따라서 초기 부하량으로부터 피크타임 부하량까지의 변화율이 작고 시스템의 규모가 매우 큰 경우에 GGDF기법이 유용하며, 이를 통해 계산시간을 줄일 수 있기 때문에 실시간 계통내 분산전원 운용에 효과적이다.

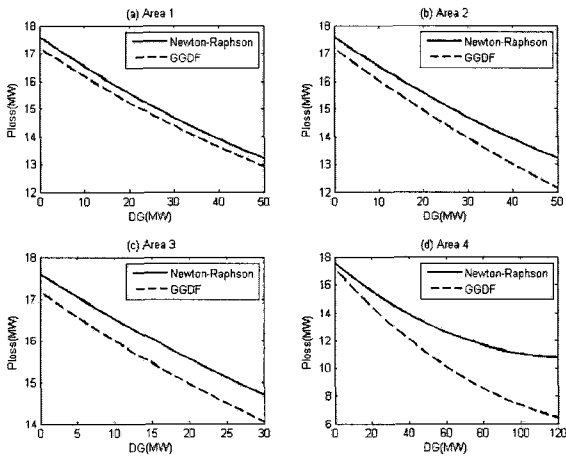


그림 11 DG용량에 따른 전력손실
Fig. 11 Power losses corresponding to DG sizes

3.2 복수 분산전원의 용량선정

3.2.1 순차적 연결

앞 절에서는 계통망에 하나의 분산전원을 연결하였을 때 시스템에 미치는 영향을 계산하였다. 이번 절에서는 앞의 내용을 확장하여, 여러 분산전원을 순차적으로 연결할 때 전

력손실에 어떤 영향을 미치는지 알아본다. 여러 분산전원을 순차적으로 연결할 때, 모선 12의 분산전원 용량이 45 MW가 된 후 모선 10에 분산전원을 연결하고, 모선 10의 분산전원 용량이 44 MW가 된 후에, 모선 27에 분산전원을 연결하였다. 마찬가지로 모선 27의 분산전원 용량이 28.4 MW가 된 후 모선 5에 분산전원을 연결하고, 그 용량을 전체 분산전원 용량의 합이 250 MW가 될 때까지 증가시켰다. 그림 12는 각 지역 및 시스템 전체의 전력손실의 변화를 나타낸다. 그림 12의 (b)를 보면, 모선 12와 모선 10에 분산전원을 연결하고 전력 공급량을 증가시킬 때, 지역 2와 지역 3에서 급격한 전력손실의 증가를 보여준다. 또한, 모선 27에 분산전원을 연결하고 전력 공급량을 증가시킬 때 지역 3에서 전력손실의 변화가 급격한 감소 후 급격한 증가를 보이는데, 이러한 현상은 전력의 흐름방향이 급격히 바뀌어 생기는 현상이다.

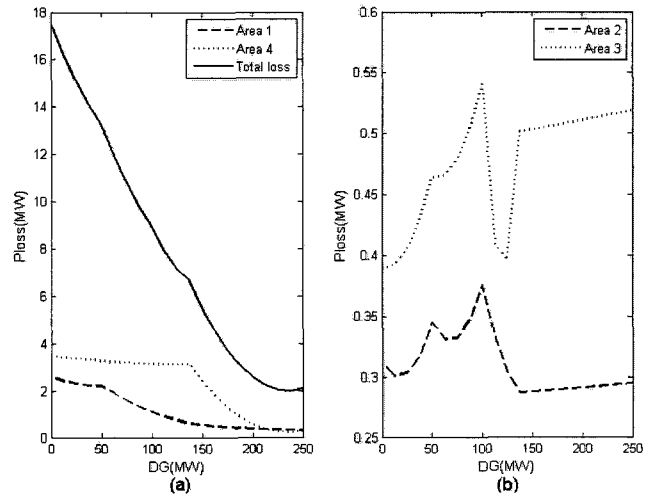


그림 12 분산전원을 순차적으로 연결했을 때 전력손실 변화
Fig. 12 Power losses when four DGs are connected successively

3.2.2 동시 연결

그림 13은 각 분산전원의 최대용량을 기준으로, 각각 같은 비율의 전력을 공급하는 분산전원을 동시에 연결한 결과이다. 분산전원의 용량을 증가시키는 동안 그림 12(b)와 그림 13(b)를 비교하면, Area 3의 전력손실은 그림 12의 경우가 높음을 알 수 있다. 이때, 전체 전력손실은 두 경우 모두 비슷한 수준을 유지함을 그림 12(a)와 그림 13(a)를 통해 알 수 있다. 따라서 복수의 분산전원을 연결할 때에는, 어느 한 분산전원이 최대용량을 생산할 때 연결하는 것 보다, 가능한 분산전원을 모두 연결한 후 용량을 함께 증가시키는 것이, 특정 지역에서의 급격한 전력손실증가를 막는데 유리하다. 그림 13에서는 지역 3을 제외한 모든 지역에서의 손실은 감소함을 보여준다. 한편, 분산전원의 공급전력 1 MW 증가에 따른 Area 3에서의 평균 전력손실 증가량은, 모선 27(Area 3)에서 분산전원을 공급할 때 13.3967×10^{-3} MW로 가장 크고, 모선 5(Area 4)에 분산전원을 투입할 때 0.0392×10^{-3}

MW로 가장 작다. 따라서, 모선 27에서의 발전기 용량을 줄이고, 줄인 용량만큼 모선 5를 비롯한 다른 모선들의 분산전원에서 공급량을 늘리면, Area 3에서의 전력손실을 줄일 수 있다. 표 6처럼 각 분산전원의 용량을 조정하여 모의실험을 통해 그림 14의 결과를 얻었고, 이때 Area 3을 비롯한 모든 지역에서의 전력손실이 감소하였다. 시스템의 전체 전력손실은 2.273 MW로 분산전원이 연결되지 않은 경우의 17.599 MW에 비해 13%에 불과하다. 분산전원에서 공급하는 전력이 시스템 부하소모량의 총합 234.4 MW근처를 넘으면 오히려 슬랙 모선으로 전력이 공급되므로 시스템의 전체 전력손실은 증가한다. 따라서 설치된 분산전원에서 공급하는 전력의 총합은 시스템 부하소모량의 총합을 넘지 않아야 한다.

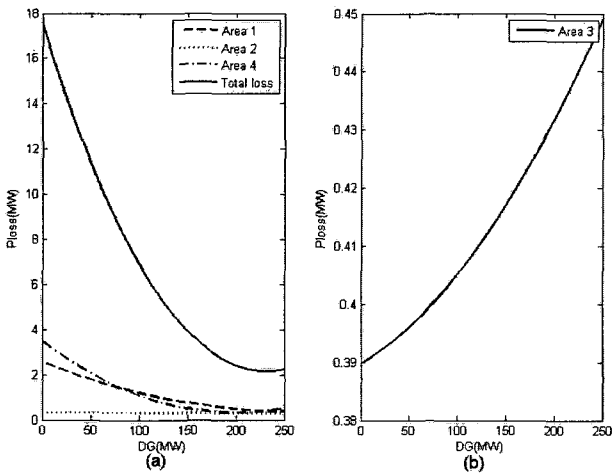


그림 13 분산전원을 네 개의 지역에 동시에 연결했을 때 전력손실 변화

Fig. 13 Power losses when four DGs are connected at the same time

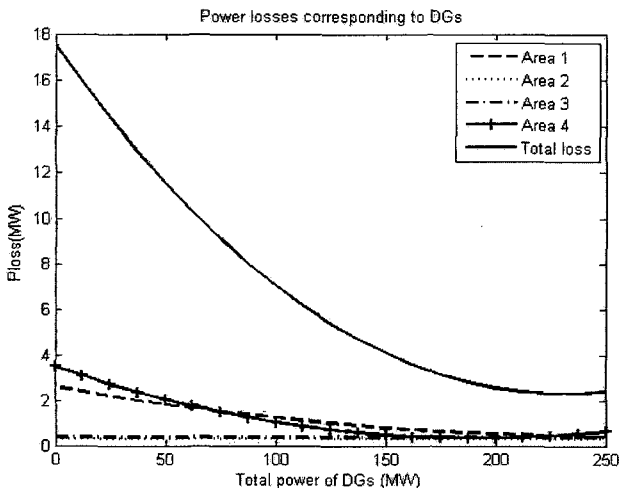


그림 14 조정된 분산전원에 의한 전력손실
Fig. 14 Power loss by when each value of DGs is adjusted

표 6 조정된 발전기 용량
Table 6 Adjusted DG size

지역	발전기 용량
Area 1 (모선 12)	49 MW (20.90%)
Area 2 (모선 10)	44 MW (18.77%)
Area 3 (모선 27)	19.4 MW (8.28%)
Area 4 (모선 5)	122 MW (52.05%)

4. 결 론

본 논문에서는 전력손실을 고려하여, 분산전원이 주변의 모선 및 라인에 주는 영향을 최소화할 수 있도록, 분산전원의 위치 및 용량을 최적화하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 사용하면 플러그 앤 플레이(Plug and Play)를 위한 분산전원의 위치와 용량을 복잡한 계산이나 시행착오를 줄이고 결정할 수 있다.

기존의 원거리 송전방식으로도 풍력, 태양광, 연료전지 등 신·재생 에너지를 연결 할 수는 있지만, 이들은 기존의 발전소에 비해 대부분 규모가 작기 때문에, 분산전원으로 사용하는 것이 적합하다. 전력 사용량이 많은 대도시의 중심에 태양전지, 연료전지 등 소규모 발전 설비를 갖추면 새로운 대규모 발전소와 송전시설을 건설하지 않고도 효율적으로 필요한 전력을 공급할 수 있다. 특히 에너지 저장시설을 설치하였을 경우에는 대도시 지역의 시간에 따른 전력 소비량과 공급량이 균형을 이룰 수 있도록 동작해 손실을 획기적으로 줄일 수 있을 것이다.

계통망에서 사고가 발생할 경우, 차단기가 작동하여 영향 받는 특정 지역에 정전이 일어날 가능성이 있다. 분산전원을 최적화하여 연결하면 연결된 지역에서 필요한 전력은 분산전원이 대부분 공급할 수 있으므로 송배전계통 사고로 인한 대규모 정전을 예방할 수 있을 것이다. 또한 대규모 발전소, 변전소 및 송전시설의 최소단위 유지로 환경에 대해서도 긍정적인 영향을 준다. 따라서 분산전원의 최적 위치 및 용량 선정은 전력의 효율적 사용면과 환경영향 면에서 매우 긍정적인 역할을 할 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원 대학전력연구센터사업을 통한 연세대학교 계통적용 신전력기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] G. Carpinelli, G. Celli, S. Mocci F. Pilo, A. Russo, "Optimisation of embedded generation sizing and siting by using a double trade-off method", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No.4, pp. 503-513, July 2005.
[2] J.J. Grainger, and S.H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses

- on distribution feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.100, pp. 1105-1118, March 1981.
- [3] M. Baran, and F.F. Wu, "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, pp. 735-743, January 1989.
- [4] M. Baran, and F.F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, pp. 725-734, January 1989.
- [5] Jasmon, G.B.; Lee, L.H.C., "New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion", IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.140, No.2, pp. 87-90, March 1993.
- [6] Haiyan Chen, Jinfu Chen, Dongyuan Shi, and Xianzhong Duan, "Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation", IEEE in Proc. of PES General Meeting, pp. 1-8, June 2006.
- [7] Y.-C. Chang, and C.-N. Lu, "Bus-oriented transmission loss allocation", IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.149, No.4, pp. 402-406, July 2002.
- [8] Wai Y. Ng, "Generalized generation distribution factors for power system security evaluations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.3, pp. 1001-1005, March 1981.
- [9] A. Galetovic, C.M. Montecinos, "The new Chilean transmission charge scheme as compared with current allocation methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No.1, pp. 99-107, February 2006.

저 자 소 개



이수형 (李洙衡)

1982년 3월 3일생. 2008년 연세대 전기전자공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기전자공학부 석·박사 통합 과정
Tel : 02-2123-7842
E-mail : reasonable@yonsei.ac.kr



박정욱 (朴正旭)

1973년 7월 18일생. 1999년 연세대 전기공학과 졸업. 2003년 미국 Georgia Institute of Technology 전기컴퓨터공학부 졸업(공학). 2003년~2004년 미국 University of Wisconsin-Madison 박사 후 전임연구원. 2004년~2005년 LG전자 선임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 조교수
Tel : 02-2123-5867
Fax : 02-313-2879
E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr