

Scale-free Network 방법론을 이용한 배전선로 계획

최낙현*, 이호철**, 박근표*, 김동현*, 윤용태*, 이상성**
서울대*, 기초전력연구원**

Distribution Line Plan Using Scale-free Network Methodology

Nack-Hyun Choi*, Ho-Chul Lee**, Geun-Pyo Park*, Dong-Hyeon Kim*, Yong-Tae Yoon*, Sang-Seung Lee**
Seoul National University*, Korea Electrical Engineering and Science Research Institute(KESRI)**

Abstract - 현대 사회에서 전력은 사회 전체적으로 그 영향력을 미치고 있으며 그 중요성은 날이 갈수록 더하고 있다. 이러한 전력 계통의 붕괴는 사회 전체적인 마비를 일으킬 수 있으며, 그에 따른 경제적 손실은 천문학적인 액수가 될 것이다. 기존 방사상 구조의 배전계통은 붕괴에 대한 안정적이고 계획적인 계통 형성보다는 필요에 따라 연결되는 방법을 이용하였다. 하지만 독립사업부제의 시행으로 배전계통에 유발되는 혼잡과 분산전원의 투입으로 인한 역조류는 현 계통에서 불안정한 결과를 초래할 수 있으며, 이는 새로운 계통으로의 전환을 요구하고 있다. 본 논문에서는 계통의 붕괴가 있더라도 좀 더 안정적으로 중요한 시설을 보호할 수 있는 계통의 구성에 대해 연구하였으며, 이 계통의 안정도를 검증하는 것에 초점을 맞추었다.

1. 서 론

현대 사회에서 전력은 가정집으로부터 산업용 공장까지 규모에 있어서나 경제적 가치에 있어서나 그 영향력이 지대하다. 이러한 전력 계통의 붕괴는 사회 전체적인 마비를 일으킬 수 있으며, 실제로서 1965년 미국 북동부 대규모 정전 사태, 1977년 뉴욕 정전 사태, 2006년 제주도 정전 사태 등을 통해 그 심각성을 알 수 있다. 전력계통이 붕괴되는 것을 완벽하게 막을 수 없다면, 계통이 붕괴되더라도 최소한의 피해를 갖도록 계통을 설계하거나, 붕괴 후에도 복구가 용이하도록 설계하여야 할 것이다. 또한 독립사업부제의 시행으로 인한 배전계통의 분리는 현 계통에서 혼잡을 유발할 수 있으며, 분산전원의 투입으로 인한 역조류는 계통에 불안정한 결과를 초래할 수 있다. 이러한 것들은 현 방사상 형태 계통의 한계점을 극복할 수 있는 새로운 계통으로의 전환을 요구하고 있다. 본 논문에서는 계통의 붕괴가 있더라도 좀 더 안정적으로 중요한 시설을 보호할 수 있는 계통의 구성에 대해 연구하였으며, 이 계통의 안정도를 검증하는 것에 초점을 맞추었다[1]. 현재 발전원이나 계통 연결에 대한 연구는 많이 진행되어 있지만, 실제로 분산 전원과 배전 계통이 더 높은 안정성을 유지하면서 개발될 수 있는 새 네트워크 모델에 대한 시스템적인 연구는 전무한 상황이다. 즉, 배전 계통에 돌발 상황 발생 시 주요 부하 및 계통 전체를 잘 유지할 수 있는 계통의 안정도와 추가 건설의 필요성 발생 시 기존의 구조를 유지하면서 능동적으로 추가가 가능한 네트워크 설계에 관한 연구가 필요하다. 이러한 연구는 기존의 계통 형성 방식과는 다르게 계획적인 네트워크 구성에 대한 가이드라인이 될 것이다. 이러한 조건을 만족시키는 방법으로서 본 논문에서는 Scale-free network 방법론을 제시하며, IEEE-30 모선[2]을 기반으로 Scale-free network를 구성하였고, 그 계통에 대해 Scale-free network가 아닌 계통과의 비교를 통해 안정성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 Scale-free network 이론

Scale-free network는 Albert. Barabasi 연구팀이 자연 발생적인 네트워크들을 바탕으로 조사한 결과 찾아낸 네트워크이며, 링크의 수에 대한 노드의 개수가 멱함수 법칙을 따르는 네트워크를 말한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

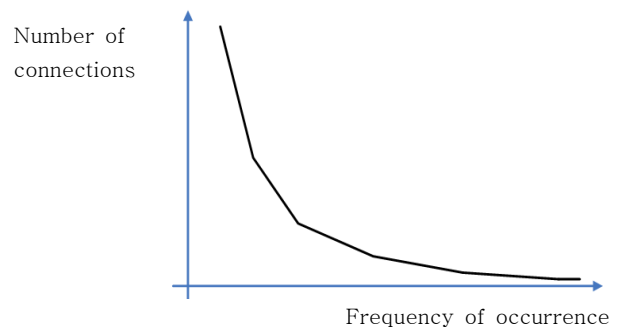
$$P(k) = c \cdot k^{-\tau} \quad (1)$$

여기서,

k : 노드에 연결된 링크의 수
P(k) : k개의 링크를 가질 확률

이와 같은 네트워크의 형성은 첫 번째로는 노드의 나이에 그 원인을 들 수 있다. 노드의 나이가 오래될수록 링크가 생길 기회가 많기 때문에 노드의 나이에 따라 링크의 개수도 달라질 수가 있다. 두 번째로는 노드

에 링크가 연결될 때 선택하는 성향을 들 수 있다. 일반적으로 새로운 노드가 생겨 기존의 네트워크에 연결될 때, 이미 링크를 많이 가진 노드에 연결하는 경향이 있다. 이러한 원인에 따라 링크가 연결되는 개수는 노드마다 다르게 되며 그 관계가 멱함수 법칙(Power-law distribution)을 따르면 그 네트워크를 척도 없는 네트워크(Scale-free network)라고 하며 <그림 1>과 같은 그래프로 나타낼 수 있다.



<그림 1> Naturally occurring network connections

<그림 1>을 확인해보면 몇몇 노드는 많은 링크를 가지게 되고 다수의 노드는 링크를 적게 가지게 된다. 여기서 많은 링크를 가지는 소수의 노드를 허브라고 정의한다. 이러한 허브는 많은 노드와 연결되어 있기 때문에 허브가 붕괴될 경우 다른 노드가 같이 붕괴될 우려가 있으며 이것에 대해서는 사례연구에서 언급하겠다.

2.2 배전계통의 설계 시의 제약조건

배전계통에 Scale-free network를 사용하기 위해선 전력만이 가지는 특징들을 고려해 주어야 하며, 기본 특징으로는 경제적 측면과 기술적 측면을 들 수 있다. 여기서 경제적 측면이란 새로운 장비 설치에 들어가는 건설비와 정전으로 인한 보상 비용이며, 기술적인 측면으로는 원활한 전력 수송과 최대한 정전 발생을 줄일 수 있도록 선로 예비력을 확보하는 것, 그리고 중요한 부하들에 대해 더 높은 안정성을 보장하는 것을 말한다. 본 논문에서는 중요 부하들에 더 높은 안정성을 보장하는 것을 목적으로 하고 있으며, 기본 제약 조건은 다음과 같다.[3]

2.2.1 전력의 공급량과 수급량이 일치해야 한다.

전력은 다른 상품과는 다르게 저장할 용이하지 않기 때문에 항상 공급과 수요를 맞춰주어 경제적인 발전이 가능하도록 한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{a=1}^A L_a^k = \sum_{a=1}^A G_a^k \quad (2)$$

여기서,

a : 버스의 번호

A : 버스의 최종 번호(버스의 총개수)

k : 전력 계통의 변화 발생시 단계 구분

L_a^k : k번째 단계에 a번째 버스 부하의 전력 수급량

G_a^k : k번째 단계에 a번째 버스에 연결된 발전기의 전력 공급량 (a번째 버스가 발전기가 아닐 경우는 0)

2.2.2 계통의 주파수가 일정 범위에 있어야 한다.

계통의 주파수가 일정 범위 안에 있어야 계통의 안정적인 운용이 가능하다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_l < f_k < f_h \quad (3)$$

여기서,

f_k : k번째 단계의 계통 주파수

f_l, f_h : 안정적인 계통 운영을 위한 최소, 최대 주파수

2.2.3 선로가 가지는 한계를 넘어 공급할 수 없다.

선로의 한계를 넘으면 계통에 이상이 발생하고, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_b < U_b \quad (4)$$

여기서,

P_b : 선로 b에 흐르는 전력량

U_b : 선로 b의 한계치

위와 같은 제약조건 하에 가장 효율적인 배전 계통을 구성하기 위해 먼저 가장 기본적인 모델로 단순화하여 접근하고자 한다. 먼저 배전계통의 부하들을 부하의 중요도에 따라 2~3 단계로 구분하였으며, 이에 따라 가중치를 부여하여, 선로가 많은 부하는 중요한 부하라는 전제하에 그 부하에 연결되어 있는 선로의 가중치를 결정하여 주었다. 또한 선로가 감당할 수 있는 제한 용량을 두지 않고, 단지 사용가능 선로의 유무로만 전력의 전달여부를 결정하였다. 이러한 기본 전제하에 현재 안정적인 네트워크로 인정받고 있는 Scale-free network를 배전계통에 적용하고자 한다.[4]

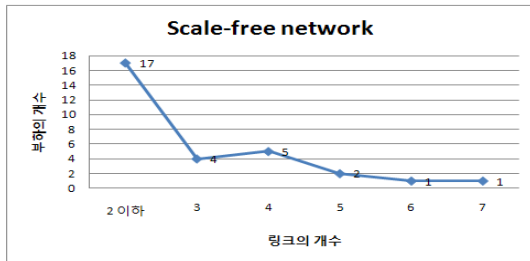
3 사례연구

선로의 기본 조건과 2.2에서 가정했던 전제 조건하에서 자연발생적인 네트워크를 추가 구성하였다. 이때 이용한 계통은 IEEE-30 모션이다.

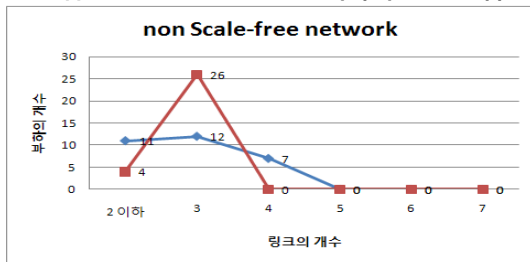
먼저 기존의 연결되어 있는 선로를 고려하여 각 부하의 가중치를 구하고 그 결과를 이용해 선로의 가중치를 구한다. 이 경우 부하별 가중치가 높으면 많은 선로가 연결되어 중요 부하를 보호할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

가중치를 구하면 그 값을 반영하면서도 랜덤하게 선로를 연결하고, 하나의 선로가 연결될 때마다 각 부하와 선로의 가중치를 다시 구해준다. 마찬가지로 중요 부하에 선로가 연결될 확률이 높기 때문에 중요 부하에는 선로가 많이 연결되어져서 보호할 수 있게 된다.

본 논문에서는 Scale-free network의 안정도를 비교하기 위해 같은 IEEE-30 모션의 부하배치를 이용하여 임의적으로 배전계통의 non Scale-free network 두 종류를 구성하였다.[4]



<그림 2> Scale-free network의 부하별 선로 개수

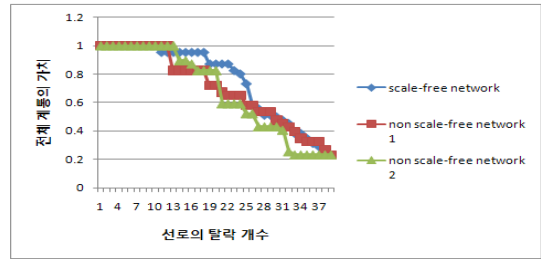


<그림 3> non Scale-free network의 부하별 선로 개수 (두 종류)

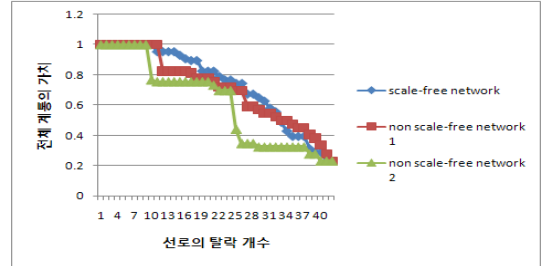
<그림 2>는 Scale-free network를 이용한 배전계통에 대해 선로와 부하의 관계를 그래프와 한 것이며, 선로의 개수가 많은 부하의 개수는 매우 적고 선로의 개수가 적은 부하는 매우 많다는 것을 볼 수 있다. <그림 3>에서는 Scale-free network와의 비교를 위해 선로의 개수가 부하마다 일정하도록 임의적으로 계통을 형성한 모델이다. 두 종류의 계통을 구성하였으며, 두 계통 모두 하나의 부하마다 2~4 사이의 선로를 갖도록 구성하였다.

위와 같은 network에 대해 각 선로마다 번호를 부여하고 선로를 랜덤하게 하나씩 탈락시키면서 부하의 생존여부를 관찰하였다. 전체 부하의

가치를 1로 정규화하고 각 부하의 가중치를 구한다음, 부하가 발전기로부터 고립되었을 때마다 부하의 가중치를 빼면서 Scale-free network와 non Scale-free network의 가중치를 비교하였다.



<그림 4> 계통 간의 비교 1



<그림 5> 계통 간의 비교 2

<그림 4>와 <그림 5>는 탈락하는 선로의 순서에 변화를 주어 전체 계통의 가중치를 계산한 그래프이다. 위의 결과와 같이 Scale-free network의 경우 다른 두 계통에 비해 전체 계통의 가치가 전반적으로 높은 것을 확인할 수 있으며, 이것은 곧 Scale-free network를 이용한 배전 계통이 어떠한 원인에 의한 붕괴에 좀 더 안정적임을 알려주는 결과라 할 수 있다. <그림 4>의 Scale-free network는 갑작스럽게 가치가 크게 떨어지는 구간이 있는데, 이 부분은 허브의 탈락과 관련이 있다. 여러 개의 허브 중 하나의 허브를 중심으로 선로가 탈락할 경우 위와 같은 결과가 나타날 수 있으며, 이는 계통에 치명적인 영향을 미치지만 그래도 다른 계통보다는 안정적임을 확인할 수 있다.

4. 결 론

효율적인 배전 계통이란 붕괴에 대한 민감도가 상대적으로 낮으며, 새로운 분산전원의 투입에도 문제가 발생하지 않아야 한다. 본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키는 계통으로서 Scale-free network를 이용한 배전 계통을 제시하였으며, 이와 같은 계통의 안정도를 검증하는데 초점을 맞추었다.

하지만 본 논문에서는 단순히 안정도만을 고려하였으며, 그 외 발전기와 선로의 용량, 부하의 필요 전력량 등을 고려하지 않았다. 특히 선로의 용량은 전력의 전달에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 추후 연구를 통하여 이러한 제약 조건들을 모두 고려한 알고리즘을 개선한다면 좀 더 실용적인 배전 선로 계통을 구성할 수 있다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며, 관련 기관 관계자 여러분에게 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Committee Report, "System Operations Challenges", COPWG, E. K. Nielson, chmn, IEEE Trans. on PWR-3, pp. 118-126, Feb. 1988.
- [2] 30 Bus Power Flow Test Case, R. Christie, (1993, Aug.), <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>[Online]
- [3] Arthur R. Burgen, Vijay Vittal, "Power Systems Analysis", Prentice-Hall, pp. 294-374, 2000.
- [4] M. Kato, "The Development of Power System Restoration Method for a Bulk Power System by Applying Knowledge Engineering Techniques", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.4, No.3, pp.1228-1235, Aug. 1989.