

국내 송전 계통망 토폴로지 분석

강석구, 윤성국
송실대학교

Analysis on Topology of Power Transmission Line System

Seok-Gu Kang, Sung-Guk Yoon
Soongsil University

Abstract - 전력 계통은 전력을 목적으로 전송한다는 관점에서 하나의 그래프로 볼 수 있다. 그래프를 형성함에 있어서 목적에 따라 어떠한 구성으로 이루어지는지 달라지기 때문에 전력 계통의 토폴로지(topology) 분석이 필요하다. 실제 전력 계통망의 연결 구조를 보면 노드(node)와 링크(link)의 관점에서 해석이 가능하다. 예를 들어 모선, 발전소, 변전소 등을 하나의 노드로 서로 간에 연결된 선로들을 링크로 볼 수 있다. 따라서 이러한 그래프 모델을 적용해서 전력망을 해석하고 토폴로지 특성을 분석할 수 있다. 본 연구는 미국 송전망과 국내 송전망의 실제 데이터를 이용하여 토폴로지 특성을 비교·분석한다.

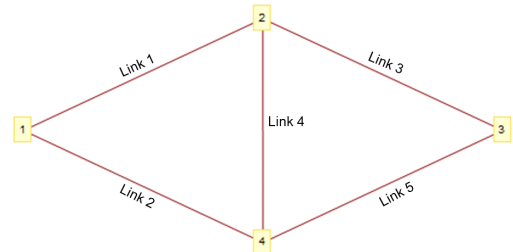
$$A: \begin{cases} A(t, i) = 1 \\ A(t, j) = -1 \\ A(t, k) = 0, \text{ with } k \neq i \text{ or } j \end{cases}$$

if the t -th link is from node i to node j .

즉, t 번째 링크가 노드 i 와 j 사이에 존재한다면 행렬 A 의 t 번째 행에서 i 열과 j 열은 각각 1과 -1의 값을 가지고 나머지 열은 0의 값을 가지게 된다. 이것은 그래프 토폴로지에 관한 정보를 갖고 있다. 예를 들어 <그림 1>은 1번부터 4번까지 4개의 노드와 이를 연결하는 총 5개의 링크로 구성된 시스템을 그래프 모델로 나타낸 것이다.

1. 서 론

개체와 개체 사이에 연결 관계가 있을 때 그 특징을 파악하고 활용하기 위하여 그래프 분석을 기반으로 한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그래프 분석에서는 개체는 노드(node)로, 연결 관계는 링크(link)로 표현하여 그래프에 적용할 수 있는 여러 알고리즘과 특징들을 이용한다. 이러한 그래프 이론은 비단 수학뿐만 아니라 물류 망, 인터넷, 소셜 네트워크 등 다양한 분야에서 응용, 연구되고 있다. 지식 기반 정보화 사회인 현대사회는 교통 통신망의 발전으로 인하여 개인 간 및 국가 간의 연결이 매우 다양하고 복잡하게 구성되고 있다. 복잡한 관계들을 해석하고, 단순화하여 대상간의 관계에 관한 문제를 해결하기 위해서 그래프 이론은 수치로 나타내기 힘들 것들을 수학적 모델링을 통하여 수치로 나타냄으로써 문제를 가시화하고, 도식화하여 더욱 쉽고, 효율적으로 해결할 수 있도록 한다.



<그림 1> 그래프 모델로 표현한 시스템

이 시스템의 링크-노드 입사 행렬 A 는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{link}(i, j) = \begin{cases} 1st \text{ link: } (1, 2) \\ 2nd \text{ link: } (1, 4) \\ 3rd \text{ link: } (2, 3) \\ 4th \text{ link: } (2, 4) \\ 5th \text{ link: } (3, 4) \end{cases} \Rightarrow A = \begin{bmatrix} 1, -1, 0, 0 \\ 1, 0, 0, -1 \\ 0, 1, -1, 0 \\ 0, 1, 0, -1 \\ 0, 0, 1, -1 \end{bmatrix}$$

이러한 추세는 전력 시스템에도 적용할 수 있다. 전력 시스템을 분석할 때 그래프 이론(graph theory)과 입사 행렬(incidence matrix)을 이용하여 분석하는 방법이 있다. 전력 시스템의 그물망 구조는 Z 임피던스 행렬(impedance matrix) 또는 Y 어드미턴스 행렬(admittance matrix)과 같은 네트워크 행렬로 나타낼 수 있다[4].

다음으로 라플라시안 행렬(Laplacian matrix) L 은 $L = A^T A$ 로 구해질 수 있으며 그 행렬의 크기는 $N \times N$ 이 되고 다음과 같이 정의한다.

본 논문에서는 그래프 이론의 노드와 링크 관점으로 계통망의 토폴로지(topology) 특성을 분석한다. IEEE 전력 시스템 모델과 국내 송전계통망인 345kV, 765kV 선로를 분석 대상으로 하고, 토폴로지 분석 결과에 대해 기술한다.

$$L(i, j) = \begin{cases} -1, & \text{if there exists link } i-j, \text{ for } j \neq i \\ k, & \text{with } k = -\sum_{j \neq i} L(i, j), \text{ for } j = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

<그림 1>에서 구한 행렬 A 를 예로 들면 L 은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}$$

2. 본 론

2.1 시스템 모델링

본 논문에서 적용하는 분석 방법 및 파라미터는 참고문헌[1]의 방식을 따른다. 송전망의 토폴로지를 그래프 이론과 입사행렬을 사용하여 모델링 하였다. 그래프는 노드와 링크로 구성할 수 있다. 송전망에서의 노드란 모선이나 발전기, 주 변압기 등을 의미하고 노드들 사이에 서로 연결선이 존재할 때 그것을 링크라고 한다.

2.3 파라미터 정의

토폴로지 특성을 분석하기 위해서 필요한 기본적인 파라미터들로서 미국 송전망 분석에 사용된 파라미터들로 다음과 같이 정의한다.

입력 데이터는 주어진 전력 시스템의 Bus, Branch에 관한 정보이며 그래프 관점에서는 Bus는 노드로 Branch는 링크로 볼 수 있다. IEEE에서 제공하는 미국 송전망 자료와 국내 송전망의 자료는 각각 워싱턴 대학과 전력거래소(KPX)의 웹 사이트에서 구할 수 있다[2-3].

노드의 인덱스는 $i(=1, \dots, n)$ 로 표기하고 Branch는 두 개의 Bus i 와 j 사이에 존재하는 연결선이며 링크와 동일한 의미를 가진다. 예를 들어 i 번 노드와 j 번 노드가 서로 연결되어 있다면 Branch는 (i, j) 로 표현될 수 있다. 또한 각 노드마다 도수(degree) 정보도 필요한데 이는 어떤 한 노드 i 에 연결된 링크 수 k_i 를 의미한다.

2.2 링크-노드 입사 행렬 구성

어떤 전력 시스템의 링크 수가 m 개, 노드 수가 N 개일 때 입력 데이터로부터 링크-노드 입사 행렬 A 를 다음과 같이 정의하며 그 행렬의 크기는 $m \times N$ 이 된다.

- N : 노드의 수 (네트워크의 크기)
- m : 노드 간에 연결된 총 링크 수
- k_i : 노드 i 가 가지는 링크 수
- $k = [k_1, k_2, \dots, k_N]$: 각 노드에서의 링크 수 (도수)
- $\langle k \rangle$: 하나의 노드를 기준으로 한 링크 수의 평균 값
- \bar{k} : 임의로 선택된 링크 (i, j) 를 기준으로 한 두 끝 점에서의 링크 수의 평균 값

- $r\{k > \bar{k}\}$: \bar{k} 보다 더 많은 링크 수를 가지는 노드의 비율
- ρ : 링크(i, j)를 기준으로 i, j 가 갖는 도수(k_i, k_j)간의 선형관계 정도를 나타내는 상관계수

위 파라미터 값들은 라플라시안 행렬 L 을 이용하여 식 (1) - (3)을 통해 구할 수 있다. 예를 들어 식 (3)의 $\text{diag}(L)$ 은 L 행렬의 대각 성분 $L(i, i)$ 을 벡터 형태로 표시하는데 이는 각 노드 i 의 도수를 의미한다.

$$m = \frac{1}{2} \sum_i L(i, i). \quad (1)$$

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_i L(i, i). \quad (2)$$

$$\underline{k} = [k_1, k_2, \dots, k_N] = \text{diag}(L). \quad (3)$$

다음은 도수 k_i 를 이용해서 \bar{k} , $r\{k > \bar{k}\}$, ρ 를 구하는 과정이다. 식 (6)은 두 변수 간에 어떤 선형적 관계를 갖고 있는지 보편적으로 이용되는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 나타낸다.

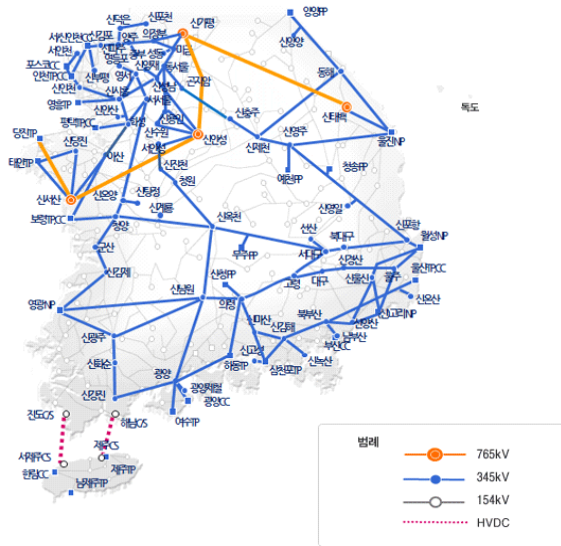
$$\bar{k} = (2m)^{-1} \sum_{(i,j)} (k_i + k_j). \quad (4)$$

$$r\{k > \bar{k}\} = \frac{\|(k_i - \bar{k})(k_j - \bar{k})\|_{\infty}}{N}. \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\sum_{(i,j)} (k_i - \bar{k})(k_j - \bar{k})}{\sqrt{\sum_{(i,j)} (k_i - \bar{k})^2 \sum_{(i,j)} (k_j - \bar{k})^2}}. \quad (6)$$

2.4 토폴로지 특성

앞에서 정의한 파라미터들을 토대로 IEEE 전력 시스템 모델과 국내 송전 계통도 <그림 2>에 대해 토폴로지 분석을 실시하였다. 국내 송전 계통의 경우는 발·변전소를 포함한 345kV와 765kV 송전선로에 대해 각각 구분하여 분석하였다.



<그림 2> 국내 345kV, 765kV 송전 계통도 [3]

<표 1> 전력 시스템의 토폴로지 특성

	(N, m)	$\langle k \rangle$	\bar{k}	ρ	$r\{k > \bar{k}\}$
IEEE-30	(30, 41)	2.7333	3.4390	-0.0875	0.2333
IEEE-57	(57, 78)	2.7368	3.1795	0.2434	0.2105
IEEE-118	(118, 179)	3.0339	3.8436	-0.1528	0.3051
IEEE-300	(300, 409)	2.7267	3.5966	-0.2240	0.2367
국내 345kV	(93, 118)	2.5376	3.2246	-0.1817	0.1828
국내 765kV	(5, 4)	1.6	1.75	-0.3333	0.6

<표 1>에서 IEEE 30, 57, 118 Bus 시스템은 미국 중서부 지역의 송전망을 나타내고, IEEE 300 Bus 시스템은 미국 북동부 지역인 뉴잉글랜드의 송전망을 나타낸다. 국내 전력계통의 경우는 345kV, 765kV 송전선로에 대해 각각 분석하였다. 미국 송전망에 대한 결과는 참고문헌에서 분석한 결과와 동일함을 확인하였다[1].

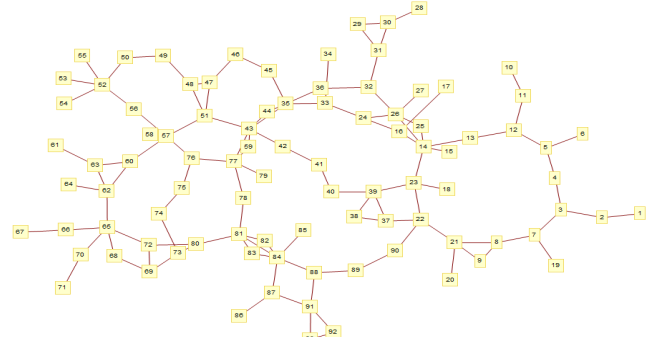
우선 국내 송전망 345kV 시스템은 발전소 22개, 변전소 71개로 총 93개의 Bus가 존재하며 이들 간에 118개의 Branch로 연결되어 있는 구조이다. 위 데이터 중 765kV를 제외한 송전망의 평균 링크 수 $\langle k \rangle$ 는 네트워크의 크기 N 과 상관없이 약 2.5~3정도로 비슷한 값을 가진다.

그리고 $\langle k \rangle$ 는 \bar{k} 와 비교했을 때 그 값이 항상 작다. 그 이유는 $\langle k \rangle$ 가 각각의 노드를 기준으로 하는 평균인 반면 \bar{k} 는 링크를 기준으로 한 두 끝 노드에서의 평균값이기 때문이다.

또한 765kV를 제외한 $r\{k > \bar{k}\}$ 은 대부분(약 70~82%)의 노드들이 3이하의 링크 수를 가지는 분포를 따르고 있다는 것을 보여준다.

ρ 는 두 변수 사이에 존재하는 상관관계, 방향(+,-) 정도를 나타내는 수치로 사용되며 그 범위는 $-1 < \rho < 1$ 이다. 이 값이 |1|에 근접할수록 두 변수들의 연관된 정도가 강하고, 대체적으로 0.3 이상이면 상관관계가 존재한다고 평가한다. 따라서 ρ 는 765kV를 제외한 다른 경우에서 매우 약한 선형 관계를 갖는 것을 확인하였다. 이는 실제 송전망에서 링크에 존재하는 도수들 사이에는 큰 상관관계가 없다는 것을 의미한다. <그림 3>은 실제 국내 345kV 송전 계통망을 Mathematica를 사용하여 그래프 모델로 재구성한 결과를 보여준다. 실제 국내 345kV 계통망은 환상망의 구조를 가지는 것을 확인할 수 있다.

반면 765kV의 경우는 장거리를 수송하기 위한 송전망으로 직선 형태의 그래프 구조를 갖는다. 따라서 $\langle k \rangle$, $r\{k > \bar{k}\}$, ρ 의 값이 다른 송전망과 상이한 파라미터 값을 가지고 있음을 확인하였다.



<그림 3> 그래프 형태로 나타낸 345kV 송전 계통도

3. 결 론

본 논문에서는 그래프 이론과 입사행렬을 이용하여 IEEE 전력 시스템 모델과 실제 국내 송전계통인 345kV와 765kV 선로에 대해 그래프 분석을 수행하였다. 국내 송전망의 경우 345kV, 765kV는 파라미터 값이 서로 매우 상이한 값을 가지고 있음을 확인하였다. 765kV는 장거리 전력 전송용으로 단순한 구조를 가지는 반면 345kV는 사고 예방을 위해 환상망으로 구성되어 있고 좀 더 조밀한 연결이 되어있기 때문이다. 향후에는 결집 계수(clustering coefficient)와 algebraic connectivity라는 수학적인 양을 측정하여 154kV 송전계통과 배전계통까지 연계한 심도 있는 분석을 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 20134010200570)

[참 고 문 헌]

- [1] Zhifang Wang, Anna Scaglione, and Robert J. Thomas, "Generating Statistically Correct Random Topologies for Testing Smart Grid Communication and Control Networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 1, pp. 29-30, June 2010
- [2] Washington Univ, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- [3] KPX, http://kpx.or.kr/KOREAN/servlet/action?index=page&menu_idx=270
- [4] 문대성, 김윤성, 원동준, "분산전원과 토폴로지를 고려한 배전계통에서의 전기품질 모니터 위치 선정 기법", *Trans. KIEE*, Vol. 57, No. 10, p. 1745, October 2008