

퍼지 엔트로피 함수를 이용한 송전 네트워크 클러스터링

장세환, 김진호, 이상혁, 박준호  
부산대학교

The transmission Network clustering using a fuzzy entropy function

Jang Se-hwan, Kim Jin-ho, Lee Sang-hyuk, Park Jun-ho  
Pusan National University

**Abstract** - The transmission network clustering using a fuzzy entropy function are proposed in this paper. We can define a similarity measure through a fuzzy entropy. All node in the transmission network system has its own values indicating the physical characteristics of that system and the similarity measure in this paper is defined through the system-wide characteristic values at each node. However, to tackle the geometric mis-clustering problem, that is, to avoid the clustering of geometrically distant locations with similar measures, the locational informations are properly considered and incorporated in the proposed similarity measure. In this paper, a new regional clustering measure for the transmission network system is proposed and proved. The proposed measure is verified through IEEE 39 bus system.

1. 서 론

송전 네트워크 시스템의 지역적인 운영과 계획은 효율적이고 경제적인 시스템관리를 위해 필요하다. 그래서 각 시스템의 상관관계에 대한 많은 연구가 이루어졌다. [1-4] 하지만, 대부분의 연구가 동적 그룹화에 중점을 두고 있다. 이 점에서 우리는 위치에 따른 비용, 손실, 지역적 거리 등과 같은 위치적 정보를 고려한 일부의 지역으로 전체 시스템을 나누는 새로운 연구가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 유사한 위치적 정보를 지닌 송전 네트워크 시스템에서의 노드들을 지역적 상관관계를 고려하는 퍼지 엔트로피 함수를 이용한 클러스터링 방법을 제안한다.

송전 네트워크 시스템에서 위치적 비용은 그 노드에서 전기가 소비되는 가격을 나타낸다. 송전 네트워크 시스템의 물리적인 특성 때문에 전기는 공급지점에서 소비지점으로 이동할 때 손실이 발생한다. 그래서 손실을 보상하기 위해 추가적인 공급을 제공해야만 한다. 또한 송전 네트워크 시스템의 각 선로에는 수용능력 한계를 가지고 있기 때문에 낮은 단가로 생산된 전기를 전 네트워크에 자유롭게 모두 공급할 수는 없다. 그러므로 각 지점 또는 노드에서 위치 가격은 네트워크 위상과 공급/소비의 상대적 배치에 의존하여 다르게 결정된다.

유사측도는 거리측도의 상보적 의미로 알려져 있다. [5-10] 그래서 클러스터링 측도를 유사측도 뿐만 아니라 지역적인 정보 즉 거리 측도도 고려한다. [10]에서 거리 측도 또는 퍼지 엔트로피함수를 통해서 유사측도를 구하였다. 그 때, 퍼지엔트로피 함수를 해밍거리(Hamming distance)를 사용하여 구성하였다. [10]에서 제안한 유사측도에서 우리는 멀리 떨어져 있는 점에 대한 비현실적인 결과를 얻었다. 그래서 본 논문에서는 비현실적인 결과를 개선하기 위해 지역적 정보 즉 위치적

정보를 고려한 변형된 유사측도를 제안하고 증명하였다.

2. 퍼지엔트로피 함수

2.1 퍼지엔트로피, 거리측도와 유사측도

이 절에서는 퍼지엔트로피, 거리측도, 유사측도의 정의와 관련된 성질에 대하여 소개한다.

정의 2.1 [Liu,1992] 실함수  $e: F(X) \rightarrow R^+$  또는  $e: P(X) \rightarrow R^+$  가 다음의 특성을 만족하면 퍼지 집합  $F(X)$ , 또는 일반집합  $P(X)$ 에 대하여 퍼지 엔트로피이다.

- (E1)  $e(D) = 0, \forall D \in P(X)$
- (E2)  $e([1/2]) = \max_{A \in F(X)} e(A)$
- (E3)  $e(A') \leq e(A), A'$ 는 집합  $A$ 의 뽀족함이다.
- (E4)  $e(A) = e(A'), \forall A \in F(X)$ .

여기서  $[1/2]$ 는 소속함수 값이 전부 1/2인 퍼지집합이다.

정의 2.2 [Liu, 1992] 실함수  $d: F^2 \rightarrow R^+$ 는 퍼지 집합  $F(X)$  또는 일반집합  $P(X)$ 에 대하여 다음의 특성을 만족하면 거리측도이다.

- (D1)  $d(A,B) = d(B,A), \forall A, B \in F(X)$
- (D2)  $d(A,A) = 0, \forall A \in F(X)$
- (D3)  $d(D, D^c) = \max_{A, B \in F} d(A, B), \forall D \in P(X)$
- (D4)  $\forall A, B, C \in F(X), A \subset B \subset C$ 를 만족하면  $d(A, B) \leq d(A, C)$ 이고  $d(B, C) \leq d(A, C)$ 이다.

정의 2.3 [Liu, 1992] 실함수  $s: F^2 \rightarrow R^+$  또는  $P^2 \rightarrow R^+$ 는 다음 특성을 만족할 경우 유사측도이다.

- (S1)  $s(A, B) = s(B, A), \forall A, B \in F(X)$
- (S2)  $s(A, A^c) = 0 \forall A \in F(X)$
- (S3)  $s(D, D) = \max_{A, B \in F} s(A, B), \forall A, B \in F(X)$
- (S4)  $\forall A, B, C \in F(X), A \subset B \subset C$ 이면  $s(A, B) \geq s(A, C)$ 이고  $s(B, C) \geq s(A, C)$ 이다.

Liu는 또한 이렇게 세 가지의 공리적인 정의를 소개하면서 거리측도와 유사측도사이에는 일대일 대응이 존재함을 소개하고,  $d + s = 1$ 의 특성을 가짐을 나타내었다.

2.2 변형된 유사 측도

이번 절에서 엔트로피 함수를 이용한 변형된 유사측도를 구할 것이다. 다음과 같이 유사측도의 정의[Liu,1992 정의 2.3]를 만족시키는 유사측도를 [10]에서 구하였다.

$$s(A, B) = 2 - 2d((A \cap B), [1]) - 2d((A \cup B), [0]) \quad (1)$$

제안된 유사 측도는 유사한 특성값을 가지고 있는 노드들을 클러스터링할 수 있다. 그러나 대규모시스템에서는 유사한 수치를 지니지만, 서로 멀리 위치하고 있는 노드들이 있다. 그 때, 비록 노드들이 유사한 수치를 가지고 있지만, 동일한 클러스터로 클러스터링하는 것은 비현실적이다. 그러므로 지역적인 정보를 고려한 다른 특성값이 필요하다

다. (1)식과 함께 다음과 같은 기하학적인 거리값을 고려한다.

$$s_2(A, B) = 2/(1 + distance), \quad (2)$$

다음처럼 결합된 유사측도를 고려한다.

$$s(A, B) = \omega_1 s_1(A, B) + \omega_2 s_2(A, B) \quad (3)$$

이 때,  $s_1(A, B) = 2 - 2d((A \cap B), [1]) - 2d((A \cup B), [0])$  이고,  $\omega_1, \omega_2$  는 가중치값이다.

우리는 다음처럼 (3)식의 유용성을 입증할 수 있다. (1) 식인  $s_1(A, B)$ 은 이미 [10]에서 유용성을 입증하였다.  $s_2(A, B)$ 의 유용성을 입증하기 위해서 정의 2.3의 간략화 형태를 제안한다. (S2)는 두 노드가 노드들 중에 가장 멀리 위치할 때 최소값을 가진다. (S4)에서  $A \subset B \subset C$ 는 A와 C 사이의 거리가 A와 B 또는 B와 C의 거리보다 더 먼 것을 의미한다. 그래서 우리는 정의 2.4에서 지역적 정보에서의 유사 측도를 제안한다.

정의 2.4 만약 s가 다음의 성질을 가지면, 실함수  $s: P^2 \rightarrow R^+$ 는 지역적 지점에서 유사 측도로 불린다.

- (S1)  $s(A, B) = s(B, A), \forall A, B \in P(X)$
- (S2)  $s(A, A^c)$ 는 최소값을 만족한다.  $\forall A \in P(X)$ , 이 때  $A^c$ 는 A로부터 가장 먼 지점이다.

- (S3)  $s(D, D) = \max_{A, B \in P} s(A, B), \forall A, B \in P(X)$
- (S4)  $\forall A, B, C \in P(X)$ , 만약 A, B, C가 삼각의 지점을 만족한다면 이때  $s(A, B) \geq s(A, C)$ 와  $s(B, C) \geq s(A, C)$ 이다.

(2)의 증명은 다음처럼 유도된다. 거리의 상대적인 값은 같다. 그래서 (S1)은 쉽게 입증된다. (S2)로부터, A와 A<sup>c</sup>의 거리가 가장 멀다. 그래서  $s_2(A, A^c)$ 는 최소값이다. 모든  $A, B \in P(X)$ 에서, (S3)의 부등식은 다음처럼 증명된다.

$$s_2(A, B) = 2/(1 + distance(A, B)) \leq 2/(1 + distance(D, D)) = s_2(D, D).$$

위에서  $distance(D, D)$ 는 가장 작은 값이다. 즉 0이다. 그래서 (S3)은 입증할 수 있다. 마지막으로 (S4)는  $\forall A, B, C \in P(X)$ 이고, A, B, C가 삼각 지점을 만족한다. 그 때,  $s_2(A, B) = 2/(1 + distance(A, B)) \geq 2/(1 + distance(A, C)) = s_2(A, C)$

이 때,  $distance(A, C)$ 는  $distance(A, B)$ 보다 길다. 유사하게,  $s_2(B, C) = 2/(1 + distance(B, C)) \geq 2/(1 + distance(A, C)) = s_2(A, C)$ 도 만족한다. 그래서 우리는 (3)을 동시에 특성값과 지역적 정보를 가진 특별한 지점을 측정하기 위한 변형된 유사측도로 사용한다. 변형된 유사 측도는 다음의 사례를 통해 사용되어진다.

### 3. 사례연구

테스트 시스템으로서, 우리는 IEEE 39모선 신뢰도 테스트 시스템을 고려한다. 네트워크화 된 전력시스템에서, 전력 송전 네트워크의 물리적인 특성 때문에, 전기는 공급노드들(즉, 공급하는 모선)로부터 소비노드(소비되는 모선)까지 송전되었을 때 손실이 발생한다. 그리고 손실을 보상하기 위해서 추가적인 전력을 공급해야만 한다. 게다가, 전력시스템의 송전 네트워크의 수용한계 제한은 낮은 단가의 전력을 전 네트워크에 공급하는 것을 제한한다. 그러므로 각 노드의 전기 가격은 즉 각 노드에서 전기가 소비되어지는 가격은 네트워크의 위상, 전력이 생산되고 소비되어지는 양과 위치에 따라 다르게 결정되어진다.

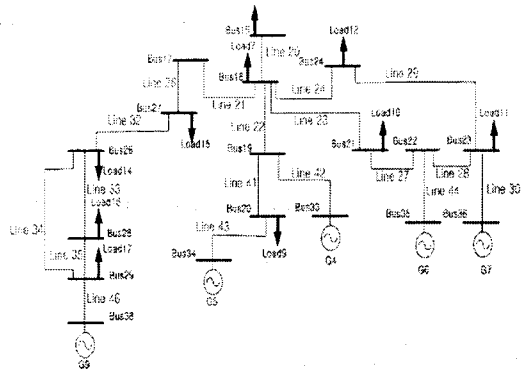


그림 1. IEEE 39 모선 시스템의 한 지역

각 노드의 전기의 가격은 각 노드에서 위치 가격으로 정의되어진다. 그리고 위치 가격은 전력의 위치값을 나타낸다. 위치값(노드가격)은 송전 비용 즉 네트워크 혼잡과 송전 중 손실된 비용과 생산비용을 포함한다. 표 1.은 그림 1의 IEEE 39모선에서 각 kWh당 각 모선의 위치값을 나타내고 있다. 또한 각 모선의 기하학적인 위치 정보를 보여주고 있다.

표1. 각 모선의 위치적 가격과 위치 정보

Bus	locational price (\$/kWh)	Location (per unit)
BUS15	43.79	(6.6, 4.9)
BUS16	45.84	(6.5, 4)
BUS17	47.90	(5, 4.5)
BUS19	45.84	(6.9, 2.8)
BUS20	45.84	(6.9, 1.7)
BUS21	45.84	(8.7, 2.8)
BUS22	45.84	(10, 2.8)
BUS23	45.84	(11.1, 2.8)
BUS24	45.84	(8.2, 4.3)
BUS26	55.00	(2.7, 3)
BUS27	51.45	(4.6, 3.5)
BUS28	55.00	(2.7, 1.5)
BUS29	55.00	(2.7, 0.8)
BUS33	45.84	(8, 1.7)
BUS34	45.84	(5.5, 1)
BUS35	45.84	(10, 1.6)
BUS36	45.84	(11.1, 1.6)
BUS38	55.00	(2.7, 0)

각 노드의 위치 가격은 28.53 부터 55.00 까지 있다. 그리고 39개 모선의 위치 정보는 그림 1에 도시되어 있는 모선의 위치를 2차 평면 좌표로 가정하여 산출하였다. 고려되어진 결합 유사측도는 제안된 측도를 이용하여 다음처럼 표현된다.

$$s(A, B) = \omega_1 s_1(A, B) + \omega_2 s_2(A, B),$$

(1,1)은 모선1과 모선1의 변형된 측도를 이용해서 구한 유사성을 나타내고 있다.  $2 + 0.4 = 2.4$ 의 값을 가지는 것은 당연하다. (1,2) 또한 모선 1과 모선2 또는 모선2와 모선1의 유사성을 나타내고 그 값은 2.08이다. 그래서 39X39 대칭적인 행렬을 구할 수 있다. 39X39 전체 행렬의 부분을 표2에 나타내었다. 연산과정에서, 우리는 가중치를  $\omega_1 = 1$  그리고  $\omega_2 = 0.5$  로 할당하였다. 만약 더 많은 지역적 정보를 고려한다면, 그 때 우리는  $\omega_2$ 를 조절

할 수 있다.

표 2. 39모선 사이의 결합된 유사측도

	Bus15	Bus16	Bus17	...	Bus36	Bus38
BUS15	3	2.0121	1.6802	...	1.2665	1.0714
BUS16	2.0121	3	1.7376	...	1.3232	1.1403
BUS17	1.6802	1.7376	3	...	1.2207	1.2011
BUS19	1.6033	1.883	1.5262	...	1.3726	1.1642
BUS20	1.4372	1.5998	1.419	...	1.3845	1.1951
BUS21	1.4663	1.5705	1.3571	...	1.543	1.0959
BUS22	1.3628	1.4255	1.2811	...	1.7611	1.0602
BUS23	1.2978	1.3476	1.2355	...	1.9091	1.0364
BUS24	1.7009	1.7336	1.4382	...	1.403	1.084
BUS26	1.1707	1.2392	1.4046	...	1.0436	1.5
BUS27	1.4419	1.5728	1.8984	...	1.1555	1.3367
BUS28	1.1199	1.1939	1.2891	...	1.0462	1.8
BUS29	1.0964	1.1686	1.2441	...	1.0454	2.1111
BUS33	1.4077	1.5339	1.3546	...	1.4876	1.1381
BUS34	1.3584	1.4805	1.4037	...	1.3016	1.3368
BUS35	1.3111	1.3814	1.2577	...	1.9524	1.0695
BUS36	1.2665	1.3232	1.2207	...	3	1.0429
BUS38	1.0714	1.1403	1.2011	...	1.0429	3

표2의 결과를 통해서, 우리는 표3과 표4처럼 유사성 수치에 의해 주어진 전력시스템의 송전네트워크의 모선을 클러스터링할 수 있었다.

표 3. 유사성 수치에 의한 클러스터링 (유사성 1.8이상)

Singularity	20,21,22,23,33,35,36
Group1	17,27
Group2	15,16,19
Group3	28,29,38
Group4	24
Group5	26

표 4. 유사성 수치에 의한 클러스터링 (유사성 1.2이상)

Singularity	17
Group1	15,16,19,20,21,22,23,24
Group2	26,27,28,29,33,34,35,36,38

표 3과 표 4는 유사성 수치가 더 낮을 수록 클러스터링 된 그룹의 수가 더 적은 것을 나타낸다. 이전에 언급한 것처럼, 가중치를 통해 위치가격 또는 지역정보를 고려정도를 조절할 수 있다.

#### 4. 결 론

우리는 거리측도, 유사측도, 그리고 퍼지 엔트로피 측도를 소개하였다. 그리고 퍼지 엔트로피는 거리측도의 함수로 표현되어질 수 있다. 거리 측도를 이용하여 유사측도 또한 구할 수 있다. 대규모 송전 네트워크의 클러스터링을 위해서 지역적인 정보는 유사 측도를 정식화하는데 적절히 고려되어야만 한다. 그러므로 본 논문에서 우리는 지역적 정보를 고려한 변형된 유사측도를 제안한다. 그리고 제안된 변형된 유사측도를 전력시스템의 송전네트워크에 대해서 입증한다. IEEE 39 모선 신뢰도 테스트 시스템을 이용하여 사례연구가 이루어졌다. 그리고 사례연구의 결과로부터, 우리는 클러스터의 수와 유사성 수준의 정도사이의 상관관계를 확인할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학연구소(R-2005-7-064) 주관으로 수행된 과제임.

#### [참 고 문 헌]

- [1] W. Li and A. Bose, "A coherency based rescheduling method for dynamic security", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, 810-815, 1998.
- [2] S.K. Joo, C.C. Liu, L.E. Jones, and J.W. choe, "Coherency and aggregation techniques incorporating rotor and voltage dynamics", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, 1068-1075, 2004.
- [3] A.M. Gallai and R.J. Thomas, "Coherency Identification for large electric power systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-29, No. 11, 777-782, 1982.
- [4] F.F. Wu, N. Narasmithamurthi, "Coherency Identification for power system dynamic equivalents", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. CAS-30, No. 3, 140-147, 1983.
- [5] D. Bhandari, N. R. Pal, "Some new information measure of fuzzy sets," Inform. Sci. 67, 209-228, 1993.
- [6] Liu Xuecheng, "Entropy, distance measure and similarity measure of fuzzy sets and their relations," Fuzzy Sets and Systems, 52, 305-318, 1992.
- [7] J. L. Fan, W. X. Xie, "Distance measure and induced fuzzy entropy," Fuzzy Set and Systems, 104, 305-314, 1999.
- [8] J. L. Fan, Y. L. Ma, and W. X. Xie, "On some properties of distance measures," Fuzzy Set and Systems, 117, 355-361, 2001.
- [9] S.H. Lee, S.P. Cheon, and Jinho Kim, "Measure of certainty with fuzzy entropy function", LNAI, Vol. 4114, 134-139, 2006.
- [10] S.H. Lee, J.M. Kim, and Y.K. Choi, "Similarity measure construction using fuzzy entropy and distance measure", LNAI Vol.4114, 952-958, 2006.
- [11] The IEEE Reliability Test System-1996, A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, Issue 3, 1999