

순차적 클러스터링을 이용한 지역별 그룹핑

김현홍*, 송형용*, 김진호**, 박종배*, 신종린*
 강원대학교**, 건국대학교*

Regional Grouping of the interconnected network system through Sequential Clustering

Hyun-Hong Kim*, Hyoung-Yong Song*, Jin-Ho Kim**, Jong-Bae Park*, Jung-Rin Shin*
 KyoungWon university**, Konkuk university*

Abstract - This paper introduces the method of sequential clustering as a tool for the effective clustering of mass unit electrical systems. The interconnected network system retains information about the location of each line. With this information, this paper aims to carry out initial clustering through the transmission usage rate, compare the results of similarity measures for regional information with similarity measures for regional price, and introduce the technicalities of the clustering method. This transmission usage rate used power flow based on congestion costs and modified similarity measurements using the FCM algorithm. This paper also aims to prove the propriety of the proposed clustering method by comparing it with existing clustering methods that use the similarity measurement system. The proposed algorithm is demonstrated through the IEEE 39-bus RTS.

1. 서 론

전력시스템에서 발전과 배전을 연계하는 송전망은 전력수급균형과 전력시스템의 안전운용에 있어서 매우 중요한 역할을 수행해왔다. 단일 전력시장 체계하에서의 송전망은 공동으로 이용하는 설비라는 인식하에 전력을 전달하는 기반시설로 지역적 운영과 계획보다 전력수급의 안정성에 더욱 큰 관점을 가지고 있었다. 그러나 전력시장의 메커니즘의 변화에 의한 경쟁적 전력시장 체계하에서는 지역적 운영과 계획이 매우 중요한 사안으로 부각되고 있다. [1-2] 세계적으로 선진화된 경쟁적 전력시장 체계하에서 가격 결정 방법론 변화의 가장 큰 목적은 시장참여자에게 시간과 위치에 대한 시장가격(LMP)신호를 제공하는 것이고, 이러한 시장가격을 통하여 시장 참여자에게 경제적이고 효율적인 장·단기적 사업 운영을 할 수 있는 기반을 제공하는 것이다[3-4]. 이러한 메커니즘의 변화에 따라 현재 한국 시장에서 또한 모선별 시장가격에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 현재 한국시장의 경우 모선별 한계가격에 대한 가격신호를 제공하기 보다는 한 지역에 대해서는 동일한 가격신호를 제공하여 지역 내에서는 차별화를 주지 않고자 하고 있다. 예를 들면 한국에서 시행하고 있는 지역 냉·난방중 난방요금의 경우 지역적으로 차이를 갖고 있으나, 그 편차의 상·하는 일정범위내에서 유지되도록 정부가 조정하고 있다. 이러한 논리에 의해 전력 가격 또한 유사한 메커니즘을 요구하고 있으며, 지역 내의 수용가가 비슷한 가격을 지불하여 지역적 가격 차이를 줄이도록 하고 있다. 이러한 지역 내의 수용가에 대해서 비슷한 가격을 주기 위해서는 모선을 기준으로 각기 다른 가격을 갖는 모선을 동일한 신호를 내보낼 수 있는 지역 클러스터링이 중요하다. 현재 많은 연구에서 지역별 전력수급의 상관관계에 의해 비용과 손실등과 같은 동적 그룹화를 중심으로 연구가 이루어져 왔으며, 일부 논문에서는 동적 그룹화의 방법에 모선의 물리적 거리를 반영한 연구가 이루어지고 있다[5-9]. 동적 그룹화와 같은 특정 유사측도에 의한 그룹화는 송전망을 비현실적으로 나누는 경우가 발생하고 이러한 비현실적인 문제를 해결하기 위해 지역정보를 통해 현실화하고 있다. 그러나 두 가지의 유사측도를 동시에 고려하는 경우 어느 한 쪽의 가중치에 의해서 경계선상의 모선들이 자의적으로 움직일 수 있다는 것이다. 또한 가격과 지역에 의한 이해관계등에 의해 최적의 가중치를 찾기는 굉장히 어려운 문제가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문은 다음과 같은 순차적 클러스터링 방법을 제안한다.

본 논문에서는 1차적으로 모선을 송전망 이용률을 기준으로 나

눈다. 지역가격은 송전망 혼잡에 큰 영향을 받는다. 결국 송전선 이용률에 따라 큰 영향을 받고 있다고 할 수 있다. 이러한 1차적 클러스터링을 기준으로 2차적으로 모선별 한계비용 비용으로 클러스터링하고 3차적으로 전기적 거리(물리적 정보)로 클러스터링 하게 된다.

2. 송전선 이용률에 의한 클러스터링 방법론

시장 참여자에게 시간과 위치에 대한 지역적 정보를 주기위한 모선별 한계가격에 대한 지금까지의 이론들은 잠재가격(Shadow Price)의 개념에 기반을 두고 있으며, 이는 구체적으로 라그랑지 승수(Lagrangian Multiplier)를 등식 및 부등식 제약조건, 즉 전력수급조건, 안정도, 신뢰도 및 품질 개선을 위한 제약요소 등의 내재 가치화 수치에 기반을 두고 있다. 또한 도출된 잠재가격을 기준으로 모선별 한계가격을 세 가지 구성요소, 손실비용, 혼잡비용, 에너지비용으로 분해할 수 있다. 본 논문에서는 모선별 한계가격의 구성요소 중 송전혼잡비용을 기준으로 클러스터링을 실시한다. 송전 혼잡비용은 송전선 용량의 한계에 의해 수급조건을 만족하기 위해서 타 송전선 혹은 비싼 발전기를 사용 함으로써 발생하게 된다. 즉 송전선 이용률에 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. 그림 4은 IEEE RTS시스템으로 39개의 모선과 10개 발전소로 이루어져 있으며, 각 모선은 모선별 한계가격과 지역정보를 지니고 있다.

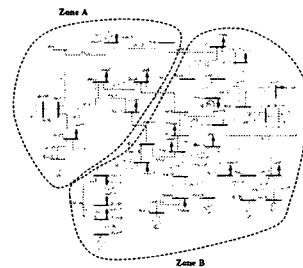


그림 1 IEEE RTS 시스템

그림 1의 테스트 시스템은 버스 25, 26사이의 선로 31에서 송전선 이용률이 최대를 나타내고 있다. 선로 31을 기준으로 버스 25와 26의 지역별 한계가격은 차이를 보이게 될 것이다. 그림 1과 같이 버스 25와 26을 기준으로 각 버스에서 전력을 전달할 수 있는 모든 송전선을 기준으로 클러스터링을 수행하게 된다.

1. 송전망 이용률이 가장 큰 선로의 두 모선 중 전력을 보내는 쪽 모선을 기준으로 그 모선과 가장 먼 모선간의 거리를 측정한다.
2. 이를 기준으로 클러스터링의 개수로 거리를 나눈후 나눈 거리 기준으로 클러스터링의 경계를 규정한다.
3. 클러스터링의 경계는 송전망 이용률이 가장 큰 선로에 이용하지 않고 전력을 받는 쪽의 모선으로 보낸다 가정하였을 때 2에서 규정된 경계를 기준으로 하여 송전망 이용률이 큰 모선을 순차적으로 경계지점으로 정의하여 클러스터링을 수행한다.

다시 말하면 사용자의 클러스터링의 개수를 기준으로 하여 송전망 이용률이 큰 모선을 순차적으로 클러스터링하는 방법이다. 클러스터링의 개수가 늘어나게 되면 모선의 개수가 많은 지역에 대해서 위와 같은 방법으로 클러스터링을 다시 수행한다. 이러한 초기 클러스터링 방법은 지역정보와 지역 가격을 동시에 고려할 수 있다.

만약 어떠한 모션의 인건에 집중적으로 송전제약이 발생하게 되더라도 송전망 이용률이 비슷할 것 이므로 동일한 지역으로 클러스터링이 된 것이다.

3. FCM 과 지역정보를 고려한 유사측도

3.1 FCM

본 절에서는 기존의 FCM에 대해서 간단하게 소개한다[11]. 소속 함수 행렬(Membership matrix) U 는 다음을 만족한다.

$$\sum_{j=1}^c u_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, n. \quad (1)$$

FCM에서 비용함수는 다음과 같다.

$$J(U, c_1, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^n J_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (2)$$

여기서, u_{ij} 는 0과 1사이의 값이고, c_i 는 퍼지그룹 i 의 중심점이다. $d_{ij} = |c_i - x_j|$ 는 i 번째 클러스터의 중심과 j 번째 데이터 값 x_j 의 유클리드 거리이다. 그리고 m 는 가중치를 나타낸다. 라그랑지안 승수에 의해서, 최소값에 도달하기 위한 (2)식의 필요조건은 아래와 같다.

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m}, \quad u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{ik}}\right)^{2/(m-1)}}.$$

결과적으로, 잘 알려진 FCM의 알고리즘은 다음과 같다.

Step 1 : 소속함수 행렬(membership matrix) U 를 초기화한다.

Step 2 : $c_i, i=1, \dots, c$ 를 계산한다.

Step 3 : (2)식을 계산한다. 허용오차 범위내로 들어오면 중단한다.

Step 4 : 새로운 U 를 계산한다.

(2)식을 최소화하기 위해서는, 유클리드 거리 $d_{ij} = |c_i - x_j|$ 가 더 작을수록, 더 작은 비용함수를 가지게 된다. 그래서 거리는 두 데이터 값 사이의 유사성을 의미한다. 다음 절에서, 퍼지집합에 의한 유사측도를 소개한다.

3.2 지역정보를 고려한 유사측도

본 논문에서는 변형된 유사측도를 제안한다. 제안된 유사측도는 Liu에 의해 소개된 유사측도 증명 순서를 따르나, Liu가 제안한 유사측도와는 다르다. 지역정보에 의한 거리측도를 고려하기 위해 다음과 같은 기하학적 거리식을 고려한다.

$$s(A, B) = 2/(1 + distance) \quad (3)$$

정의 1) 만약 s 가 다음의 성질을 가지면, 실함수 $s: P^2 \rightarrow R^+$ 또는 $F^2 \rightarrow R^+$ 는 지역적 지점에서 변형된 유사 측도 로 불린다.

(S1) $s(A, B) = s(B, A), \forall A, B \in P(X)$ or $F(X)$

(S2) $s(A, A')$ 는 최소값을 만족한다. $\forall A, B \in P(X)$ or $F(X)$, 이 때 A' 는 A 로부터 가장 먼 지점이다.

(S3) $s(D, D) = \max_{A, B \in P(X) \text{ or } F(X)} s(A, B), \forall A, B \in P(X)$ or $F(X)$

(S4) $\forall A, B, C \in P(X)$ or $F(X)$, 만약 A, B, C 가 삼각의 지점을 만족한다면, 그 때 $s(A, B) \geq s(A, C)$ and $s(B, C) \geq s(A, C)$ 이다.

정의 1에 의해서 변형된 유사측도로서 다음의 이론을 제안한다.

이론 1) 집합 $A, B \in F(X)$ or $P(X)$ 에서, d 가 헤밍거리 측도를 만족하면, 그 때

$$s(A, B) = 4 - 2d((A \cap B), [1]) - 2d((A \cup B), [0]) \quad (4)$$

는 집합 A 와 집합 B 사이의 유사측도이다.

증명) 제안된 (4)식이 유사성 정의의를 만족하는 것을 증명하고자 한다. (S1)은 집합 A 와 B 의 가환성을 의미한다. 거리의 상대적인 값은 같다. 그래서 (4)식이 (S1)을 만족하는 것을 알 수 있다.(S2)로부터, A 와 A' 의 거리가 가장 먼다. 그래서 $s(A, A')$ 는 최소값이다. 모든 $A, B \in P(X)$ 에서, (S3)의 부등식은 다음처럼 증명된다.

$$s(A, B) = 2/(1 + distance(A, B))$$

$$\leq 2/(1 + distance(D, D)) = s(D, D).$$

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, C 가 삼각 지점을 만족한다.

그 때, $s(A, B) = 2/(1 + distance(A, B))$

$$\geq 2/(1 + distance(A, C)) = s(A, C)$$

이 때, $distance(A, C)$ 는 $distance(A, B)$ 보다 길다.

유사하게, $s(B, C) = 2/(1 + distance(B, C))$

$$\geq 2/(1 + distance(A, C)) = s(A, C)$$

도 만족한다.

그래서 $s(A, B)$ 가 정의 1을 만족하는 것을 입증할 수 있다.

그러므로 제안한 유사측도 (4)식은 변형된 유사측도를 만족한다. 유사하게, 다음과 같은 다른 유사측도를 제안한다.

이론 2) 집합 $A, B \in F(X)$ 또는 $P(X)$ 에서, 만약 d 가 헤밍거리측도를 만족하면, 이 때

$$s(A, B) = 2 - 2d((A \cap B^c), [0]) - 2d((A \cup B^c), [1]) \quad (5)$$

는 집합 A 와 집합 B 의 유사측도이다.

증명) 증명은 이론1과 같이 동일한 과정으로 확인 할 수 있다.

4. 모션별 한계비용을 고려한 유사측도

본 논문에서는 경쟁적 시장에서 가격을 결정하는 방법론 중 시장참여자에게 위치에 따른 신호를 제공할 수 있는 시장가격(LMP)을 기준으로 유사측도를 계산한다. 모션별 한계가격은 송전혼잡, 전압제약, 손실 등 특정지역에 의한 송전네트워크의 특성을 잘 반영할 수 있으며, 지역의 클러스터링에 의해 비용함수의 변화를 쉽게 판단할 수 있다. 그러나 모션별 한계가격을 $d_{ij} = |c_i - x_j|$ 를 고려한 FCM을 적용하기 위해서 d_{ij} 는 유사성 성질을 만족해야만 한다. 즉 FCM에 의해서 지역에 따른 유사측도의 비용함수가 최소가 되는 각 그룹의 클러스터 중심점을 찾을 수 있으며, 모션별 한계가격을 0과 1사이의 소속등급의 정도로 그룹화를 할 수 있어야 한다.

증명) 증명은 이론1과 같이 동일한 과정을 통해 확인할 수 있다.

증명) 제안된 (4)식이 유사성 정의를 만족하는 것을 증명하고자 한다. (S1)은 집합 A 와 B 의 가환성을 의미한다. 그래서 (4)식이 (S1)을 만족하는 것을 알 수 있다. (S2)로부터,

$$s(A, A^c) = 4 - 2d((A \cap A^c), [1]) - 2d((A \cup A^c), [0])$$

이때, $2d((A \cap A^c), [1])$ 와 $2d((A \cup A^c), [0])$ 는 집합 A 와 임의의 집합 사이의 최대값이다. 임의의 집합 A, B 에서, (S3)의 부등식은 다음과 같이 증명된다.

$$\begin{aligned} s(A, B) &= 4 - 2d((A \cap B), [1]) - 2d((A \cup B), [0]) \\ &\leq 4 - 2d((D \cap D), [1]) - 2d((D \cup D), [0]) \\ &= s(D, D). \end{aligned}$$

부등식은 $d((A \cap B), [1]) \geq d((D \cap D), [1])$ 와

$$d((A \cup B), [0]) \geq d((D \cup D), [0])$$
로부터 만족한다.

마지막으로, (S4)는 $\forall A, B, C \in F(X), A \subset B \subset C$ 이면

$$\begin{aligned} s(A, B) &= 4 - 2d((A \cap B), [1]) - 2d((A \cup B), [0]) \\ &= 4 - 2d(A, [1]) - 2d(B, [0]) \\ &\geq 4 - 2d(A, [1]) - 2d(C, [0]) \\ &= s(A, C) \end{aligned}$$

이다. 또한

$$\begin{aligned} s(B, C) &= 4 - 2d((B \cap C), [1]) - 2d((B \cup C), [0]) \\ &= 4 - 2d(B, [1]) - 2d(C, [0]) \\ &\geq 4 - 2d(A, [1]) - 2d(C, [0]) \\ &= s(A, C) \end{aligned}$$

를 만족한다. 부등식은 역시 $d(B, [0]) \leq d(C, [0])$,

$$d(B, [1]) \leq d(A, [1])$$
를 만족한다.

1장에서 소개 하였듯이 3장의 지역별 유사측도와 4장의 비용에 의한 유사측도를 동시에 고려할 경우 아래와 같은 식을 세울 수 있다[9].

$$s(A, B) = \omega_1 s_1(A, B) + \omega_2 s_2(A, B) \quad (6)$$

식 (6)에서 볼 수 있듯이 2개의 유사측도를 동시에 고려할 경우 가중치에 의해서 그룹이 자의적으로 움직이는 모션이 발생한다. 또한 비용의 단위와 거리의 단위를 동일한 조건으로 단위와 하여야 하며, 가중치의 수학적 포괄레이션 또한 어려움이 있다. 결국 지역별 클러스터링의 이유가 지역별 신호를 주기 위함이라면 순차적인 방법에 의해 클러스터링하는 것이 더욱 효과적 일 것이다.

5. 사례연구

5.1 순차적 클러스터링 기법

본 논문에서는 IEEE RTS시스템을 이용하여 본 논문에서 제안한 순차적인 클러스터링 방법을 검증한다[12]. 그림 4의 테스트 시스템은 각 모션은 모션별 한계가격과 지역정보를 지니고 있다. 클러스터링 지역의 개수를 3개로 하였다. 본 논문에서 제안한 순차적 방법의 클러스터링 결과를 유도한 후 이전연구와의 비교를 통해 차별성을 제시한다[9].

각 노드의 위치가격은 28.53부터 55.00까지 분포되어 있으며, 390

선의 위치정보는 그림 3에 도시되어 있는 모선의 위치를 2차 평면 좌표로 가정하여 산출하였다. 1차적으로 39개의 모선을 송전망 이용률을 중심으로 3개의 그룹으로 클러스터링 하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 39개의 모선을 3차원 공간에 도시하였으며, x-y평면은 위치정보를 나타내고, z축은 위치 가격을 의미한다. x-y평면은 39개 모선을 평면에 투영시킨 것이다. 그림 2는 송전망 이용률에 의해 클러스터링을 수행한 결과이다.

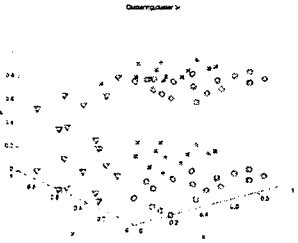


그림 2 송전망 이용률에 의한 클러스터링

초기 클러스터링 후 2차적으로 유사측도를 이용하여 클러스터링을 수행하게 된다. 이러한 클러스터링 모든 결과를 서로 비교하여 지역내에 동일한 신호를 내보낼 수 있는 클러스터링을 정의하게 된다. 그림 3은 지역정보를 통해 클러스터링을 수행한 결과이다. 지역 정보와 송전망 이용률에 의한 클러스터링의 결과는 중심점에 의한 차이로 볼 수 있다.

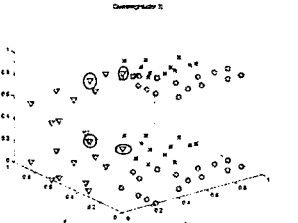


그림 3 지역정보의 유사측도에 의한 클러스터링

그림 4은 지역가격의 유사측도를 이용하여 클러스터링한 결과이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 클러스터링의 개수가 다시 변화하고 있는 것을 알 수 있다.

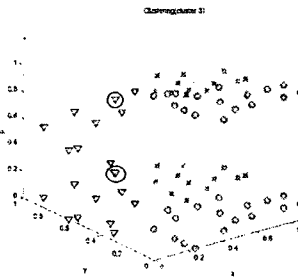


그림 8 지역가격의 유사측도에 의한 클러스터링

5.2 기존 연구와의 비교

식 (6)에서 제시하였듯이 두 가지의 유사측도를 동시에 고려하게 되면 표2와 동일한 결과를 얻을 수 있다[9]. 또한 순차적인 클러스터링 기법을 사용하면 표 1와 같은 결과를 얻을 수 있다. 표1의 기존 연구의 결과는 가중치를 약간씩 변화 시켜 클러스터링이 변화하지 않을 때의 결과이다.

표1 IEEE39 모선의 클러스터링 결과

기존 연구			순차적 클러스터링		
Zone A	Zone B	Zone C	Zone A	Zone B	Zone C
Bus 1	Bus 15	Bus 5	Bus 1	Bus 16	Bus 5
Bus 2	Bus 16	Bus 6	Bus 2	Bus 17	Bus 6
Bus 3	Bus 17	Bus 7	Bus 3	Bus 19	Bus 7
Bus 4	Bus 19	Bus 8	Bus 4	Bus 20	Bus 8

Bus 18	Bus 20	Bus 9	Bus 18	Bus 21	Bus 9
Bus 25	Bus 21	Bus 10	Bus 25	Bus 22	Bus 10
Bus 30	Bus 22	Bus 11	Bus 30	Bus 23	Bus 11
Bus 37	Bus 23	Bus 12	Bus 37	Bus 24	Bus 12
Bus 39	Bus 24	Bus 13	Bus 39	Bus 26	Bus 13
	Bus 26	Bus 14		Bus 27	Bus 14
	Bus 27	Bus 31		Bus 28	Bus 15
	Bus 28	Bus 32		Bus 29	Bus 31
	Bus 29			Bus 33	Bus 32
	Bus 33			Bus 34	
	Bus 34			Bus 35	
	Bus 35			Bus 36	
	Bus 36			Bus 38	
	Bus 38				

표 1에서 볼 수 있듯이 순차적 클러스터링의 결과와 유사측도를 동시에 고려한 결과가 유사함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 한지역내에서는 동일한 지역 신호를 갖는 클러스터링 방법을 제시하였다. 기존의 연구에서 가중치에 의해 자의적으로 움직이는 모선들에 대해서 순차적인 클러스터링 방법을 통해 해결할 수 있는 방법을 제시하였으며, 송전망이용률, 퍼지엔트로피 측도에 의한 거리측도, 유사측도를 소개하였다. 제안된 변형 유사측도를 IEEE 39 모선시뮬레이션 테스트 시스템을 통하여 유용성을 입증하였다. 본 논문에서 제시하는 순차적인 클러스터링 방법은 각 클러스터링과의 결과에 대해 비교함으로써 경제성상에 존재하는 일부모선의 변동성을 막을 수 있다. 본 논문은 지역가격을 기반으로 클러스터링을 수행하고 있다. 결국 지역가격에 의한 영향이 크게 작용한다. 이러한 지역가격은 전력 시스템의 계절별 특성에 따라 크게 좌우되므로 이러한 문제를 해결할 수 있는 하나의 클러스터링 기법이 향후 연구되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] I.J. Perez-Arriaga, et al., "Marginal pricing of transmission service: An analysis of cost recovery", IEEE Transactions on power system, Vol. 10, No. 1, February 1995.
- [2] Francois Leveque, "Transport pricing of electricity networks".
- [3] L. Chen, H. Suzuki, T. Wachi, and Y. Shimura, "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, no. 1, Feb. 2002.
- [4] T. Wu, Z. Alaywan, and A. Papalexopoulos, "Locational Marginal Price Calculation Using the Distributed-Slack Power Flow Formulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, no. 2, May. 2005.
- [5] W. Li and A. Bose, "A coherency based rescheduling method for dynamic security", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, 810-815, 1998
- [6] A.M. Gallai and R.J. Thomas, "Coherency Identification for large electric power system", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. Cas 29, No. 11, 777-782, 1982
- [7] Liu Xuecheng, "Entropy, distance measure and similarity measure of fuzzy sets and their relations, Fuzzy Sets and Systems, 52, 305-318, 1992
- [8] Jiulun Fan, Weizin Xie, "Distance measure and induced fuzzy entropy", Fuzzy Sets and Systems, 104,305-314, 1999
- [9] S.H. Lee, J.H. Kim, S.H. Jang, J.B. Park, Y. H. Jeon, S. Y. Sohn, "An Advanced Fuzzy C-Mean Algorithm for Regional Clustering of Interconnected Systems", LNAI, pp606-615, 2007
- [10] J.C. Bezdek, *Fuzzy Mathematics in Pattern Classification*, Ph.D Thesis, Applied Math. Center, cornell Univ.,Ithaca, 1973
- [11] J.S.R. Jang, C.T. Sun, and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997
- [12] 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, Issue3, 1999