

## 복합계통의 송전설비 보강계획에 관한 연구

(A Study on Reinforcement Planning of Transmission Lines for Composite Power System)

차준민\*

(Jun-Min Cha)

### 요 약

본 연구에서는 전원설비와 송전설비를 모두 고려한 복합계통의 송전설비 보강계획을 위한 다양한 판단기준을 정량화하고 불확실한 평가항목을 종합적으로 고려하기 위해 Fuzzy 이론을 도입하여 설비보강계획 대체안중의 최적안을 결정하는 알고리즘을 개발하여 이의 유용성을 검증하였다. 즉, 각 대체안별로 평가항목에 대한 평가 결과를 구하고, 각 평가항목별로 계획입안자가 부여한 중요도에 따른 퍼지측도를 구한다. 이렇게 구한 퍼지측도와 평가치를 Sugeno 퍼지적분을 이용하여 각 대체안별 종합평가를 구하고, 이 종합평가가 가장 큰 대체안을 최적안으로 선정한다. 이러한 과정을 통하여 기존의 방법에서 반영할 수 없었던 비용이외의 항목도 고려하여 최적안을 결정할 수 있으며, 또한 평가항목별 중요도를 반영하여 최적안을 결정할 수 있다. 본 알고리즘을 검증하기 위하여 1998년도 한전계통의 345[kV] 선로상정사고 계산결과를 이용하여 최대전력수송능력(MLSC)이 작게 나타나는 경우에 대한 병목구간을 파악하고, 이를 해소하기 위해 실현 가능한 선로보강계획안의 대체안을 상정하였다. 이 대체안은 가공선로, 지중케이블에 대한 증설과 신설을 조합하여 구성하였으며, 이 대체안을 평가하기 위한 평가항목은 건설비, 보수유지비, 선로보강효과, 수용도의 4가지로 정하였다. 상정한 대체안에 본 연구의 알고리즘을 적용하여 최적설비보강계획안을 결정할 수 있었다.

### Abstracts

Fuzzy theory is used to quantify some subjective criteria and consider uncertain factors for transmission line reinforcement planning in this paper. Sugeno's fuzzy integral is also used in the proposed method, because it can be easily applied to multi attribute decision making problems such as power system planning. To verify the proposed algorithm, some bottle-neck lines are searched for the case that the amount of Maximal Load Supplying Capability(MLSC) is small using the results of contingency analysis for Korea Electric Power Corporation(KEPCO)'s 345[kV] transmission line in 1998. And several feasible alternatives are composed for line reinforcement which can dissolve the bottle-neck.

### 1. 서 론

우리 나라의 전력수요는 수십여년동안 급속히 증

가하여 왔으며, 최근의 경제위기를 극복하는 과정에서 전력수요 증가는 꾸준히 지속될 것으로 전망되고 있다. 그동안 한국전력에서는 대용량의 발전설비를 확충하여 전원 공급력 확보에 주력하여 왔으나, 전원의 원격화, 편재화 및 전력수요의 집중화에 의한 송전설비의 장거리화 및 대용량화라는 문제점이 제기

\* 정희원 : 대전대 공대 전기공학과 조교수 · 공박  
접수일자 : 2001년 1월 26일

되고 있으며, 이에 따라 계통사고발생의 빈도도 늘어날 수 있으며, 사고가 발생하면 그 영향은 매우 심각해질 것으로 예측된다.

각각의 상정사고에 대하여 현재의 계통이 수송할 수 있는 최대가능전력수송량을 계산하고 동시에 어느 상정사고하에서 어떤 선로를 보강하여야 하는가의 송전선로 보강을 위한 대체안을 결정하였다[1].

그러나 보다 합리적인 선로보강을 위해서는 복수개의 후보 대체안을 마련하고 이들을 종합적인 견지에서 상호 비교검토함으로써 가장 적절한 대체안을 선택해야한다. 복수개의 대체안을 비교 검토함에 있어서는 각 대안의 투자비용과 보수유지비용, 수송능력증강효과 그리고 입지 및 경과지 주민들의 수용도 등 차원이 서로 다른 평가항목에 대해 계통계획자가 주관적인 판단을 근거로 하나의 최적안을 선택해야 한다.

본 연구에서는 이러한 주관적인 판단기준을 정량화하고 불확실한 평가항목을 종합적으로 고려하기 위해 Fuzzy 이론을 도입하여 설비보강계획 대체안중의 최적안을 결정하는 알고리즘을 개발하여 이의 유용성을 검증하였다. 즉, 각 대체안별로 평가항목에 대한 평가 결과를 구하고, 각 평가항목별로 계획입안자가 부여한 중요도에 따른 퍼지측도를 구한다. 이렇게 구한 퍼지측도와 평가치를 Sugeno 퍼지적분을 이용하여 각 대체안별 종합평가를 구하고, 이 종합평가값이 가장 큰 대체안을 최적안으로 선정한다. 이러한 과정을 통하여 기존의 방법에서 반영할 수 없었던 비용이외의 항목도 고려하여 최적안을 결정할 수 있으며, 또한 평가항목별 중요도를 반영하여 최적안을 결정할 수 있다.

본 알고리즘을 검증하기 위하여 1998년도 한전계통의 345[kV] 선로상정사고 계산결과를 이용하여 최대전력수송능력(MLSC)이 작게 나타나는 경우에 대한 병목구간을 파악하고, 이를 해소하기 위해 실현 가능한 선로보강계획안의 대체안을 상정하였다. 이 대체안은 가공선로, 지중케이블에 대한 증설과 신설을 조합하여 구성하였으며, 이 대체안을 평가하기 위한 평가항목은 건설비, 보수유지비, 선로보강효과, 수용도의 4가지로 정하였다. 상정한 대체안에 본 연구의 알고리즘을 적용하여 최적설비보강계획안을 결정할 수 있었다.

## 2. 퍼지이론

### 2.1 퍼지측도

한 원소가 여러개의 집합중에 임의의 집합에 소속될 가능성이 애매한 상황일 때 이 소속정도를 나타내는 척도를 퍼지측도(fuzzy measure)라고 한다. 퍼지측도  $g$ 가 불확실한 상태를 계량화하여 표시하려면 다음의 세가지 조건을 만족해야 한다. 단,  $g$ 는 퍼지측도,  $X$ 는 전체집합,  $P(X)$ 는 전체집합  $X$ 의 멱집합,  $A_1, A_2, B, \dots$ 는  $P(X)$ 의 부분집합을 나타낸다[6].

$$\textcircled{1} g(\emptyset) = 0, g(X) = 1 \quad (1)$$

$$\textcircled{2} A \subset B \text{ 이면 } g(A) \leq g(B) \quad (2)$$

$$\textcircled{3} \text{부분집합의 연속(sequence) } A_i \in P(X), I \in X \text{에 대하여 } A_1 \subset A_2 \subset A_3 \cdots \text{ 또는 } A_1 \supset A_2 \supset \cdots \text{ 이면}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(A_n) = g(\lim_{n \rightarrow \infty} A_n) \quad (3)$$

본 연구에서는 여러 퍼지측도중 확률측도에서 덧셈조건을 완화시킨 식(4)의  $\lambda$ -퍼지측도를 사용하였다. 이것을  $n$ 개의 부분집합에 대해 일반화시킨 것이 식(5)이다.

$$g_\lambda(A \cup B) = g_\lambda(A) + \lambda g_\lambda(A) \cdot g_\lambda(B) \quad (4)$$

$$\text{단, } \lambda \text{는 } -1 < \lambda < \infty$$

$$g_\lambda(\cup_{i=1}^n A_i) = \frac{1}{\lambda} (\prod_{i=1}^n (1 + \lambda g_\lambda(A_i)) - 1) \quad (5)$$

$$(A_i \cap A_j = \emptyset, i \neq j)$$

### 2.2 퍼지적분

Sugeno의 퍼지적분은 어떤 대상이 여러 평가항목의 중요도에 차이가 있을때, 각 항목에 대한 평가치를 퍼지측도를 이용하여 종합하는데 사용된다. 집합  $X$ 를 어떤대상에 대한 평가항목이라고 하자.  $X$ 의 멱집합의 원소  $E \in P(x)$ 에 대해 정의되는 퍼지측도  $g(E)$ 는 대상의 전체적인 평가에 대해 항목  $E$ 의 평가치가 기대하는 정도, 즉 평가항목의 부분집합  $E$ 의 중요도이다. 그리고 함수  $h(x), x \in X$ 는 평가항목  $x$ 에 대한 평가치라 하면 전체 평가항목  $X$ 에서의 평가함

수  $h$ 의 중요도 함수  $g$ 에 대한 퍼지적분은 식(6)과 같이 정의된다[7].

$$f_x h(x_i) \circ g = \text{MAX}_{E \subseteq X} \text{MIN}_{x \in E} [\text{MIN} \{h(x_i), g(E)\}] \quad (6)$$

### 3. 최적설비보강계획 문제의 정식화

#### 3.1 평가항목별 평가치의 계산

설비보강 대체안별 건설비에 대한 평가치를 계산하기 위해서는 각 대체안별 건설비 데이터가 필요하며, 이 값은 345[kV] 선로 2회선을 추가로 건설하기 위한 비용을 뜻한다. 또한 건설비는 초기 투자비용으로서 고정비의 특성을 가지므로 이것을 내용년수에 따라 환산한 현가화된 값으로 평가치를 환산한다.  $i$  번째 대체안의 현가화된 건설비는 다음 식으로부터 계산한다.

$$pconst_i = \frac{const_i}{(1+r)^y} \quad (7)$$

단,  $const_i$  :  $i$  번째 대체안의 건설비 총액 [원]

$r$  = 할인율(discount rate) [%]

$y$  = 내용년수 [연]

건설비는 거리에 비례하며, 강, 산악, 도심지 통과 등에 따라 추가 비용까지도 고려해야 한다. 한편, 가공선로와 지중선로에 따라서도 달라지므로 대체안의 선로 종류, 지형, 거리를 반영한 총 건설비를 이용하여 평가치를 환산한다. 식 (8)의 현가화된 건설비를 이용하여 평가치를 환산하는 방법은 다양한 방법이 있지만, 일반적으로 건설비용이 적게 드는 것이 효용이 좋으므로 이를 감안하여 각 대체안별 건설비용을 [0,1]로 정규화한다. 본 연구에서는 건설비 특성을 고려하여 반비례 관계를 이용하여 다음식 (8)과 같이 정규화하였다.

$$Norm[C(i)] = \frac{pconst_{max} - C(i)}{pconst_{max} - pconst_{min}} \quad (8)$$

단,  $pconst_i$  :  $i$  번째 대체안의 현가화된  
건설비용 [억원/연]

$$pconst_{max} = \max_{i=1, \dots, n} \{ pconst_i \}$$

$$pconst_{min} = \min_{i=1, \dots, n} \{ pconst_i \}$$

$n$  ; 대체안의 수

각 대체안에 의해 선로를 건설하여 운영할 경우 여기에는 유지보수도 소요된다. 즉, 전선, 첩탑, 애자, 금구류 등의 고장시 수리 또는 교체비용이 소요되며 이 비용은 건설되는 선로의 종류가 가공송전 선로이냐, 지중케이블 선로이냐에 따라 달라지며 또한 송전선이 통과하는 송전선경과지의 지형등에 따라서도 달라질 것이다. 이러한 유지보수비용도 그 비용이 작을수록 효용이 크므로 건설비의 경우와 마찬가지로 다음 식과 같은 반비례 관계를 이용하여 0에서 1 사이의 정규화된 값으로 평가치를 구한다. 이것을 식 (9)에 보인다.

$$Norm[D(i)] = \frac{maint_{max} - D(i)}{maint_{max} - maint_{min}} \quad (9)$$

단,  $maint_i$  :  $i$  번째 대체안의 유지보수비용  
[억원/연]

$$maint_{max} = \max_{i=1, \dots, n} \{ maint_i \}$$

$$maint_{min} = \min_{i=1, \dots, n} \{ maint_i \}$$

각 대체안은 선로를 보강하거나 신규 건설하므로써 수송능력 증가 효과를 얻을 수 있다. 즉, 선로보강 대체안은 기존 선로의 데이터를 변경하여 [MW] 증가분을 구할 수 있으며, 신규 건설 대체안은 새로운 선로 데이터를 추가하여 최대전력 수송능력을 구한다. 이 값의 효용은 클수록 좋으므로 비례관계를 이용하여 상대적인 증가 효과를 0에서 1사이의 값으로 정규화된 평가치로 환산한다. 이에 대한 수송능력 증가 효과별 멤버쉽함수는 다음 표 1로 주어진다.

한편, 각 대체안을 실현하는데에는 공사의 난이성과 주민의 수용도 등과 같이 금액으로 직접 환산하거나 평가하기 어려운 부분도 있다. 즉, 실제 계획안을 실행하고자 할 때 앞서 살펴본 건설비, 유지보수

복합계통의 송전설비 보강계획에 관한 연구

비와 수송능력 증가효과 뿐만 아니라, 계획 입안자가 알고 있는 지역 여건과 기대효과 등이 중요하게 반영되어 결정되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 전문가의 오랜 경험과 판단을 바탕으로 다음과 같은 설비수용도에 대한 멤버쉽함수를 이용하여 대체안별로 설비수용도에 대한 평가치를 부여한다.

표 1. 수송능력 증가 효과에 대한 평가치 멤버쉽함수

수송능력 증가효과	멤버쉽함수(평가치)
매우 크다	0.9
크다	0.7
보통이다	0.5
작다	0.3
매우 작다	0.1

표 2. 설비수용도에 대한 멤버쉽함수

설비수용도	멤버쉽함수(평가치)
매우 쉽다	0.9
쉽다	0.7
보통이다	0.5
어렵다	0.3
매우 어렵다	0.1

3.2 퍼지측도의 계산

퍼지측도는 유계성, 단조성, 연속성의 세가지 조건을 만족시키는 측도의 일종으로 본 연구에서는 전체 중요도에 대해 평가항목의 부분집합이 차지하는 정도를 의미한다. 본 연구에서는 평가항목간의 밀접도를 의미하는 상관계수  $\lambda$ 를 도입하여 비가법성을 반영한  $\lambda$ -퍼지 측도를 이용하여 퍼지측도를 구하였는데 식 (10)으로 정의된다.

$$g_{\lambda}(j) = g_{\lambda}(j-1) + W_j C + g_{\lambda}(j-1) W_j C \quad (10)$$

단,  $g_{\lambda}(j)$ : j번째 평가항목까지 고려한 퍼지측도

$W_j$ : j번째 평가항목의 중요도

C; 유계성 승수 (> 0)

$\lambda$ ; 평가항목 상관계수 (-1 <  $\lambda$  <  $\infty$ )

$g_{\lambda}(j)=0, (j \leq 0 \text{ 일 때})$

여기서 C는 유계성 승수로서  $g_{\lambda}(n)=1$  (n:전체 평가항목의 수)이라는 유계성 조건으로부터 구하고 이때 퍼지측도 값과  $\lambda$ 의 확률 밀도를 나타내는 포아슨 분포함수는  $\lambda$ 가 커질수록 0에 수렴하므로 퍼지측도의 기대치는 일정한 값으로 수렴한다. 이것을 식 (11)과 (12)에 나타낸다.

$$P(k) = \frac{a^k}{k!} e^{-a}, k=0,1,2,\dots \quad (11)$$

$$g_{\lambda}(j) = \sum_{k=0}^{\infty} (g_{\lambda}(j)k \times P(k)) \quad (12)$$

단,  $g_{\lambda}(j)k$ ;  $\lambda=k$ 일 때 j번째 퍼지 측도 값

P(k); 포아슨 확률밀도함수에 따른

$\lambda=k$ 의 발생 확률

3.3 종합평가치의 산정

퍼지적분은 평가항목별 평가치와 퍼지 측도를 종합하여 종합 평가치를 구하는 방법으로서 확률적 기대치에 비해 퍼지 기대치를 의미하며, 각 방안의 의사결정자의 주관적 판단을 고려하여 종합적으로 평가하기 위해 사용된다. 즉, 대체안별로 3.1절에서 구한 평가항목별 평가치와 3.2절에서 구한 퍼지측도 값을 다음식으로 정의된 퍼지적분식을 이용하여 각 평가항목별로 종합 평가치를 구한다. 이 종합 평가치가 가장 큰 대체안을 최적으로 선정한다.

$$TOEF(i) = \max_{j=1,\dots,n} \min(\text{norm}[C(i,j)], g_{\lambda}(j)) \quad (13)$$

단, TOEF(i); i번째 방안의 종합 평가치

4. 사례연구

4.1 대체안의 설정

본 연구의 프로그램을 이용하여 n-1 rule에 의한 상정사고 분석 결과 양주345-서인천12 (2회선 2192[MW])에 병목이 생겼다고 상정한다. 이의 해소를 위한 설비 보강계획의 최적안을 선정하기 위해 다음 표 3과 같은 3가지 대체안을 가정한다. 이 대체안의 계통도를 그림 1에 보인다.

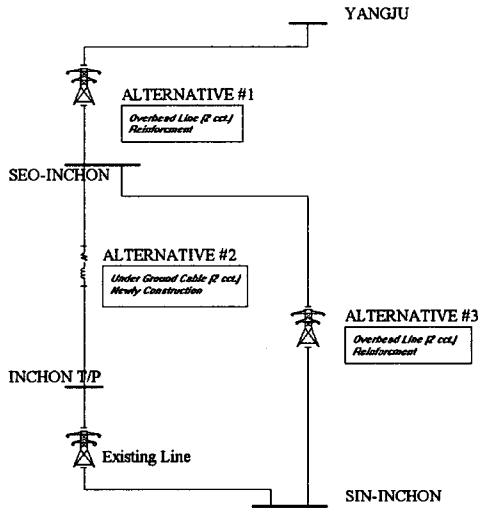


그림 1. 송전설비 보강계획의 대체안 구성

표 3. 설비보강계획 대체안

대체안	구간	종류
#1	서인천-양주345	가공선로 2회선
#2	서인천-서인천T/P	지중케이블 2회선
#3	서인천-신인천	가공선로 2회선

표 4. 각 대체안별 건설비와 보수유지비 데이터

대체안	건설비[억원]	보수유지비[억원/년]
#1	300	1.5
#2	200	1
#3	400	2

표 5. 각 대체안별 보강효과와 수용도

대체안	보강효과	수용도
#1	매우 크다	보통이다
#2	약간 작다	어렵다
#3	크다	매우 어렵다

### 4.2 입력자료

대체안 #2의 경우에는 서인천-신부평간의 345[kV] 선로(2회선, 15[km], OF 케이블 2,000[mm<sup>2</sup>])의 투자 계획에 소요되는 비용을 참조하였다.(98년도 : 240억 원, 99년도 : 286억원) 한편, 건설비를 현가화하기 위한 할인율은 8.5%로, 내용년수는 30년으로 가정하였

다. 우선 각 대체안별 소요예산 건설비와 보수유지비를 표 4와 같이 정하였다. 한편, Maximal load flow 계산 결과 얻은 수송능력 보강효과와 계통계획입안자의 경험과 판단을 근거로 얻은 설비수용도를 표 5에 보인다.

### 4.3 종합평가치 산정에 의한 최적안 선정

각 대체안을 평가하기 위하여 정한 평가항목에 대한 중요도는 다음 표 6과 같이 주어졌다고 가정하였다. 위에서 가정한 중요도를 이용하여 2절에서의 퍼지측도 값을 구하고 이를 평가치와 퍼지적분한 결과가 각 대체안의 종합평가치가 된다. 이것을 표 7에 보인다. 일례로 대체안 #1의 퍼지적분과정을 그림 2에 보인다.

표 6. 평가항목별 중요도

평가항목	중요도
건설비	0.8
보수유지비	0.5
보강효과	0.4
입지수용성	0.1

표 7. 각 대체안의 종합평가치

대체안 \ 평가항목	건설비	보수유지비	보강효과	수용도
#1	0.385	0.670	0.900	0.500
#2	0.578	1.000	0.300	0.300
#3	0.289	0.500	0.700	0.100

그림 2에서, 퍼지적분 식(13)을 이용하면, 평가항목 1번의 평가치(0.9)와 퍼지측도값(0.14788)의 최소값을 선택하고 이와 같은 과정을 각 평가항목에 대하여 반복한다. 이 값은 0.14788, 0.37521, 0.44879, 0.385이다. 이 중에서 최대값인 0.44879가 대체안 1의 종합평가치이다. 이 과정을 각 대체안별로 반복하면 각 대체안의 종합평가치를 모두 구할 수 있으며, 이 결과를 표 8에 보인다. 표 8에서 알 수 있듯이 이 종합 평가치가 가장 높은 대체안이 최적안으로 결정된다. 즉, 대체안 #2의 종합평가치가 0.557로 가장 높으므로 #2가 최적안이 된 것이다. 이는 중요도를 정할

복합계통의 송전설비 보강계획에 관한 연구

때 다른 평가항목보다 건설비에 대한 중요도가 상대적으로 컸기 때문에 건설비가 다른 대체안의 경우보다 저렴해서 평가치 결과가 높은 대체안 #2의 종합 평가치가 높은 결과로 얻어진 결론임을 알 수 있다. 즉, 중요도를 달리 정하면 이를 반영한 최적안을 선정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

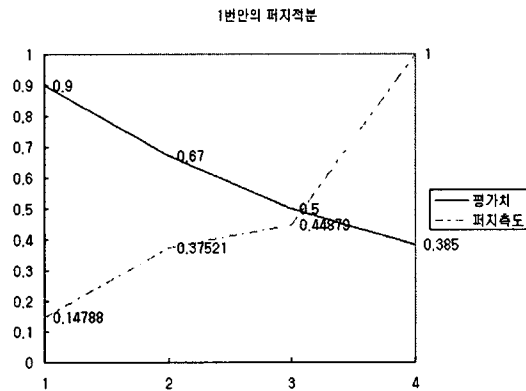


그림 2. 대체안 #1의 퍼지적분 과정

표 8. 각 대체안별 종합평가치

대체안	종합평가치
#1	0.449
#2	0.557
#3	0.375

5. 결 론

본 연구에서는 퍼지이론을 이용하여 최적선로 보강계획안 선정 알고리즘을 개발하였고 이를 한국전력 실계통에 대해 사례연구를 실시하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존의 상정사고에 의한 확정론적인 방법에서는 반영할 수 없는 주민의 수용도, 보강효과 등과 같은 주관적인 판단까지도 계량화하여 대체안의 평가에 반영할 수 있었다.

2) 평가항목에 대한 중요도를 부여하고 이를 퍼지적분을 통해 종합평가치를 구함으로써, 평가항목별 중요도에 의해 결정되는 최적안을 달리할 수 있음을 알 수 있었다.

3) 대체안 선정시에 가공선로와 지중케이블에 대

한 증설과 신설을 조합하여 구성하므로써 미래에 발상가능한 다양한 요구조건을 충족시키는 최적안을 선정할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 1999학년도 대전대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 한국전력공사 전원계획처, "전력계통 수송능력 진단을 위한 평가지수 개발에 관한 연구", 결과보고서, 1998. 10.
- [2] L. L. Carver, P. R. Van Home, K. A. Wirgau, "Load Supplying Capability of Generation - Transmission Networks", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No.3 May/June, pp.957-962, 1979.
- [3] J. Toyoda, L. N. Chen, T. Minakawa & T. Yamada : "New Indices and Computational Techniques for Composite Systems Reliability Evaluation", The paper of CIGRE Reliability Symposium, 1A-01, P.1(1991).
- [4] "電力系統의 輸送力評價 - 計劃段階에서의 系統余力評價에 關한 考察", 日本 電力中央研究所 研究報告 T91062, 1992.
- [5] "電力系統의 輸送力評價 - 系統余裕의 均一化手法의 開發", 日本 電力中央研究所 研究報告 T92046, 1993.
- [6] H.J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory-and Its Application, 2nd, Revised Edition, Kluwer Academic Publishers, 1991, pp. 241~282.
- [7] 이광형, 오길록, 퍼지이론 및 응용(1권), 흥릉과학출판사, 1991, pp. 9.26~9.35.
- [8] 本多中二, 大里有生, FUZZY工學入門, 日本 海文堂出版株式會社, 1989, pp. 119~135.
- [9] 차준민 외, "퍼지 다속성 의사결정문제의 감도해석을 통한 최적전원구성", 전기학회논문지, 42권 12호, pp.13-20, 1993. 12.
- [10] "퍼지이론을 이용한 최적선로보강계획", 차준민 외, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.83-86, 1999년 5월 28-29일.
- [11] "A Decision Making Method for Congested Transmission Lines of KEPCO system", Junmin CHA, et al, PowerCon 2000 Proceedings. Vol. 3, Institute of Electrical Engineers (IEEE), pp.1425-1429. 2000.12.

◇ 저자소개 ◇

차 준 민 (車 濬 敏)

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대학교 공대 전기공학과 졸업. 1991년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 대전대학교 공대 전기공학과 조교수.