

과도안정도 에너지 마진 향상을 위한 TCSC 적정치의 실시간 산정

김수남\*<sup>o</sup> 유석구\*  
한양대학교\*

Real-Time Estimation of TCSC Quantity for Improvement of Transient Stability Energy Margin

Soo-Nam Kim\*<sup>o</sup> Seok-Ku You\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - This paper presents a method for real-time estimation of TCSC quantity in order to enhance the power system transient stability energy margin using fuzzy neural network in multi-machine system. This paper has two parts, the first part is to estimate the energy margin. To get critical energy, we use the potential energy boundary surface(PEBS) method which one of the transient energy function(TEF) method. And the second is to determine the TCSC quantity and the line to be injected. In order to make training data in this step, we use genetic algorithm. The proposed method is applied to 6-bus, 7-line, 4-machine model system to show its effectiveness.

이 가지는 수렴오차는 신경망에 의해 개선될 수 있다[4]. 이러한 이점 때문에 신경망과 퍼지 시스템을 결합한 퍼지 신경망을 구성하여 계통의 복잡한 함수로 결정되는 에너지마진과 TCSC의 양을 추정하려 한다. 제안된 알고리즘을 4기 6모선 7선로 계통에 적용하여 그 효율성을 입증하였다. 그림 1은 제안된 알고리즘의 개요를 보여준다.

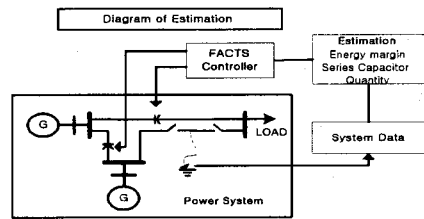


그림 1 TCSC 적정량 산정의 개요도

1. 서 론

전력 수요의 증대와 더불어 전력 계통이 복잡화, 대용량화되는 한편 전력의 질적 향상에 대한 인식이 점점 고조되면서 계통의 안정적 운용을 위한 조류제어, 전압제어, 안정도 향상에 필요한 기술 개발이 요구되고 있다. 특히, FACTS기기중 하나인 TCSC는 thyristor로 스위칭되는 직렬커패시터로써 기존의 선로 리액턴스를 보상하여 계통의 단상 사고선로가 아닌 정상선로를 통한 전력전송을 증진시킬 수 있다. 본 논문에서는 에너지마진에 따른 적정량의 TCSC의 투입량을 실시간으로 결정함으로써 계통의 과다안정도를 증진시키고자 한다.

다기계통에 있어서 직렬커패시터의 적정위치와 적정량을 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 결정할 연구가 있으나, 계산시간으로 인해 실시간에 적용하기에는 어려움이 따른다[1,2]. 본 논문은 유전 알고리즘으로 계산된 결과를 퍼지신경망의 학습 데이터로 이용하여, 커패시터의 투입량을 에너지 마진의 경제값에 가깝게 보상하고 실시간 산정을 가능하게 하였다.

제안된 알고리즘은 두 단계로 나뉘는데, 첫 번째 단계는 에너지 마진을 추정하여 과도안정도를 판별한다. 이 과정에서 에너지 마진을 추정하기 위해 학습데이터를 Lyapunov 직접법에 근거한 과도에너지 함수법을 사용하여 구성하였다[3]. 직접법에 있어서의 가장 난제인 임계 에너지를 구하는 방법으로 PEBS법을 사용함으로써 실제 다기 계통에 적용이 가능하게 하였다. 두 번째 단계로 추정된 에너지마진으로 계통의 안정도를 판별하고, 계통 불안정시 에너지마진과 고장선로의 위치에 따른 TCSC의 적정량과 투입선로를 퍼지신경망이 결정하게 된다.

퍼지와 신경망은 서로의 장단점을 상호 보완할 수 있다. 신경망은 학습 능력과 병렬처리가 가능한 뛰어난 계산 모델이다. 그러나, 신경망은 random한 초기값을 가지고 학습함으로써 학습 시간이 매우 길고, 구조적으로 불명확하지 않고 추상적인 지식을 반영하기가 힘들기 때문에 올바른 입력의 선택이 매우 중요하다. 반면, 퍼지추론은 애매한 정도를 쉽게 표현하지만, 소속함수에 의한 이산화 때문에 출력시 항상 자체의 수렴 오차를 가지고 있다. 퍼지추론

2. 본 론

2.1 과도에너지 마진

전력계통 안정도 해석에 있어서 TEF법은 과도에너지 마진의 계산을 기본으로 하고 있다. 이러한 과도에너지 마진을 계산하기 위해서는 두 개의 에너지값을 계산해야 하는데, 그 첫째가 고장제거순간의 위치에너지와 운동에너지의 합으로 계산되는 과도에너지이고 두 번째로 계산되어야 하는 것이 계통 고유의 임계에너지이다.

본 논문에서는 제안한 에너지 마진 추정을 위한 학습데이터를 구축하기 위해, 과도에너지는 고장제거 순간까지를 시간모의법인 Runge-Kutta법으로 계산한 위상각과 각속도를 이용하여 구하였고, 계통의 임계에너지를 구하기 위해서 PEBS방법을 사용하였는데, PEBS법은 고장중의 위상각과 각속도의 고장제거에 따라 위치에너지의 첫 번째 최대값이 임계에너지라는 가정을 이용한 방법이다[5].

2.2 유전 알고리즘

TCSC의 투입량 산정과 투입선로의 선택을 위한 학습데이터를 구축하기 위해 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하였다. 제안하고자 하는 최적화 방안은 TCSC를 사용하여 선로의 파라미터 값을 변화시키면서 계통의 과다안정 상태의 에너지마진과 계통안정을 위해 설정한 에너지마진과의 차를 최소화하는 것이다.

2.2.1 초기화

커패시터의 설치선로와 투입량을 동시에 결정하기 위해 두 종류의 개체에 대하여 초기화한다. 선로 선택을 위한 개체는 2진수로 선택선로수에 제한을 두었고 사고 선로는 선택되지 않도록 하였다. 투입량 결정을 위한 개체는 커패시터의 상하한값 사이에서 random하게 발생하여 실수

로 지정하고, 선로 선택을 위한 개체의 유전자값이 1 인 경우에 해당 위치의 선로 및 투입량이 결정되도록 하였다.

### 2.2.2 목적함수의 정식화

고려대상인 불안정상태의 에너지 마진과 목표치의 에너지마진과의 차이를 최소화하는 목적함수를 구성하였다 (2).

$$\text{Min}|V_{\text{exp}} - V_{\text{em}}| \quad (1)$$

여기서,  $V_{\text{exp}}$ 는 목표로 하고 있는 에너지 마진 값이다. 본 논문에서는 안정도의 여유를 위해 0.05로 하였다. 불안정한 상태의 에너지 마진  $V_{\text{em}}$ 은 항상 음의 값이므로, 결국 보상해야 할 전체 마진은 목표값과의 합이 된다.

### 2.2.3 연산자

복제, 교차(whole arithmetical crossover), 돌연변이(non-uniform mutation)의 3가지 유전자 작용자를 이용하여 개체의 유전자를 변화시킨다.

## 2.3 퍼지 신경망

제안된 퍼지 신경망은 퍼지추론의 후건부에 신경망을 사용하는 방법인데, 그림 2와 같이 전건부와 후건부의 두 개의 부분으로 나뉜다.

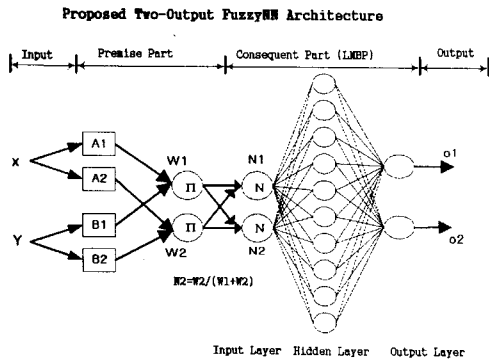


그림 2 제안된 퍼지신경망의 구조 (2입력 2출력)

입력이 소속함수를 통과하여 신경망으로 입력된다. 이것은 입력값의 범위가 입력의 종류에 따라 매우 불규칙하므로 신경망의 학습에 있어서 학습도를 떨어뜨리게 하는 요인을 퍼지의 소속함수를 이용하여 없앤 것이다.

### 2.3.1 퍼지입력(전건부)

Fuzzy rule은 다음과 같다.

If x is  $A_i$  and y is  $B_i$ , Then Output( $NN_i$ )

$$i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$M$ : number of Rule

소속함수는 삼각함수를 사용하였으며, 소속함수의 범위와 rule의 개수는 입력값의 범위와 학습데이터의 양에 따라 조정 가능하도록 하였다. 즉, 입력값으로 사용한 선로 번호와 송전용량, 사고제거시간, 에너지마진은 각각 다른 범위를 갖고 있어서, 적절한 소속함수의 입력범위가 하다.

### 2.3.2 신경망(후건부)

후건부의 신경망은 출력값과 목표값의 오차를 최소화하는 역전파 학습방법의 하나인 LMBP법을 사용하여 구성하였다[6]. 후건부의 신경망은 다중구조로 구성하였는데, 은닉층의 개수는 1이고, 은닉층의 뉴런수는 10개로 하였다. 또한 은닉층의 전달함수는 log sigmoid 함수로 출력층의 전달함수는 pure linear함수로 구성하였다.

이와 같은 방법으로 학습된 퍼지신경망을 이용하여 실시간으로 에너지마진을 추정하고 TCSC의 적정량과 투입선로를 결정한다. 에너지마진을 추정하는 첫 번째 추정기인 FuzzyNN1은 입력값으로 고장선로와 계통의 현재상태를 나타내는 고장선로의 사고전 송전용량 그리고 사고제거시간을 입력으로 한다(그림.6). 만약 추정된 에너지마진이 불안정한 값이라면 사고선로와 추정된 에너지마진과 계통 운영자의 목표값인 에너지마진과의 차이를 FuzzyNN2의 입력값으로 하여 TCSC가 보상하여야 할 양과 투입선로를 결정한다. 여기서 사고선로를 입력으로 하는 것은 투입선로를 결정하기 위함이다. 다음의 그림 3은 지금까지의 과정을 보여준다.

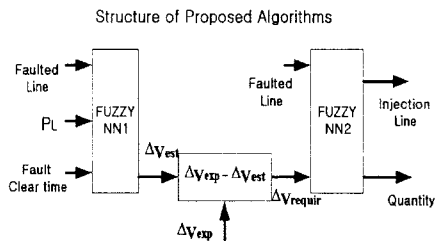


그림 3 퍼지신경망을 이용한 추론과정

## 2.4 사례연구

제안된 알고리즘의 효율성을 증명하기 위하여 IEEE 과도안정도 Test 모델(그림.4)을 이용하여 모의하였다.

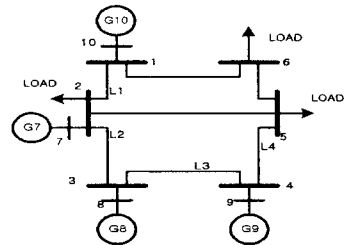


그림 4 IEEE 과도안정도 모의계통도

사고선로는 L1, L2, L3, L4로 하여 모선 가까이에서의 3상 지락사고를 모의하였다. 고장제거 시간은 각각의 사고의 경우에 대하여 0.2s~1.1s까지 10개의 데이터를 구축하였고 선로조류의 변화를 주기 위하여 부하값을  $\pm 0.3$  [pu] 변화 시켜 전체 120개의 학습데이터를 구성하였다. 불안정시 보상해야 할 에너지마진에 대한 데이터를 구하기 위해 마진의 목표값을 0.0~1.0까지 0.1씩 변화시켜 전체 40개의 필요한 마진의 양에 따른 직렬커패시터의 투입량을 구하였다.

다음 그림 5는 L4번 선로 고장시 에너지 마진의 변화와 계통의 과도에너지를 보여주는 그림이다. PEBS방법으로 구한 임계에너지와 Runge-Kutta법으로 계산한 과도에너지를 보여준다. 모의결과 임계에너지와 과도에너지가 같아지는 A점에서 에너지마진은 zero가 되고(B점), 이때의 시간 0.47s는 임계고장제거시간이 됨을 알 수 있다.

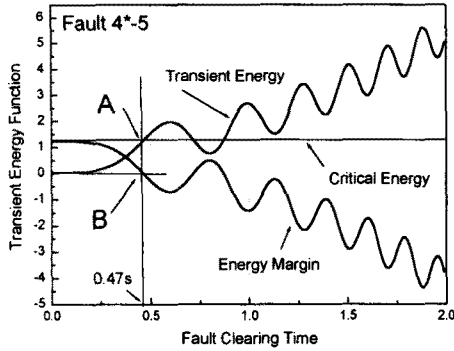


그림 5 고장제거시간과 과도에너지 함수

다음 그림 6은 L1선로의 고장시 고장전의 송전용량과 고장제거시간에 따른 에너지마진을 그린 그림이다.

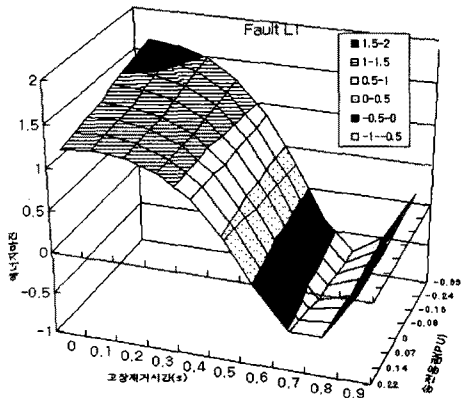


그림 6 선로조류와 고장제거시간에 따른 에너지마진의 변화량

다음 표 1은 TEF를 이용한 FuzzyNN1의 학습데이터 120개중 5개의 sample과 테스트결과를 보여준다.

[표 1] FuzzyNN1의 학습용 데이터와 테스트 결과 (120개중 5개)

패턴번호	고장선로	고장전 선로 조류(PU)	고장제거 시간(s)	에너지 마진	추정된 에너지마진
12	L1	0.166	0.3	1.4	1.39
40	L2	-0.204	1.1	-0.75	-0.75
67	L3	0.11	0.2	0.61	0.61
84	L3	0.197	0.5	-0.77	-0.76
120	L4	0.124	1.1	-0.288	-0.30

GA를 이용하여 TCSC의 적정량을 추정하는 학습데이터를 구성하는 과정에서 투입선로의 선택수는 1로 제한하였다. 고려대상인 4개의 선로사고의 경우 선로L2,L4사고 시 선로L3, 그리고 L1,L3사고시 L2의 선로가 커패시터 투입의 최적선로로 선택되었다. 이 결과로 사고선로의 위치와 투입선로의 거리가 가까울수록 제어효과가 뛰어나음을 알 수가 있다. 계통사고시 음의 값을 갖는 불안정한 에너지마진과 안정을 위한 목표값의 절대차를 FuzzyNN2의 입력값으로 학습시키기 위해 목표값 조정과 사고제거시간

을 달리하여 데이터를 구성하였다. 다음 표 2는 GA를 이용한 학습데이터 40개중 5개의 sample과 학습된 FuzzyNN2의 테스트 결과를 보여준다. 선로는 실수값으로 추정되는데 정수값에 거의 근사함을 알 수 있다.

[표 2] FuzzyNN2의 학습데이터와 테스트결과(40개중5개)

패턴 번호	사고 선로	필요한 에너지 마진	GA결과 투입 선로	추정 선로	GA결과 투입량(pu)	추정된 투입량(pu)
3	2	0.36	3	3.01	0.4259	0.4107
13	4	0.22	3	2.99	0.3544	0.3515
18	4	0.42	3	2.99	0.5530	0.5577
22	3	0.34	2	1.99	0.3140	0.3136
33	1	0.23	2	1.99	0.3999	0.3819

다음 표 3는 불안정한 계통사고시 TCSC의 적정량이 제안된 알고리즘으로 추정된 결과를 보여준다. 첫 번째 사례는 에너지 마진이 안정한 경우이다.

[표 3] 제안된 알고리즘을 사용한 TCSC의 실시간 산정

사고 선로	사고전의 조류(pu)	사고제거 시간(s)	에너지 마진	투입선로	투입량 (PU)
L1*	0.1668	0.3	1.4	0.0	0.0
L2	-0.17	0.45	-0.46	2.82	0.51
L3	0.19	0.45	-0.44	2.00	0.35
L4	0.12	0.5	-0.26	3.02	0.46

### 3. 결 론

본 논문은 에너지마진과 과도안정도 향상을 위한 직렬커패시터의 적정량의 실시간 추정을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 퍼지신경망을 실시간 추정에 사용하였고, TEF와 GA를 이용하여 학습데이터를 마련하였다. 제안된 알고리즘을 과도안정도 모의 계통에 적용하여 그 효용성을 입증하였다. 향후 연구과제로는 실제 대규모 계통에 적용하기 위하여 학습 데이터의 수를 늘리고 다양한 계통의 외란상태에 대한 데이터를 구축해야 할 것으로 사료되고 그에 따른 퍼지신경망 추정기의 성능향상이 필요할 것으로 보인다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] 趙建民, 川本俊治, "臨界エネルギー感度に基づく過渡安定度の向上," *T.IEE Japan*, Vol. 114-B, No.4, 1994
- [2] 유석구, 문병서, 김규호, "가변 직렬커패시터를 이용한 과도안정도 향상을 위한 유전 알고리즘 응용," *전기학회 논문지*, pp. 38-45, 1997년, 1월호.
- [3] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice-Hall, 1992.
- [4] J.S.R.Jang, "ANFIS : Adaptive Network Based Fuzzy Inference System", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics*, Vol.23, No.3, May/June, 1993
- [5] Sauer, Pai, "Power System Dynamics and Stability", Prentice-Hall, 1998.
- [6] M. T. Hagan and M. Menhaj, "Traning Feed-forward Networks with the Marquardt Algorithm", *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol.5, No.6, November 1994.