

퍼지를 이용한 실시간 안정도 판별과 에너지 마진의 추정

최원찬^o, 김수남, 유석구
한양대학교

Real-time Stability Assessment and Energy Margin Estimation using Fuzzy

Won-Chan Choi^o, Soo-Nam Kim, Seok-Ku You
Hanyang Univ.

Abstract- In this paper, we propose real time transient stability assessment and energy margin estimation using fuzzy approximate reasoning. The proposed method used rotor angle, kinetic energy and acceleration power of generators at clearing time as fuzzy input. In order to calculate energy margin in transient energy function (TEF), we obtained controlling unstable equilibrium point (UEP) using mode of disturbance procedure (MOD). The proposed algorithm is tested on 4-machine, 6-bus, 7-line power system to prove of effectiveness.

1. 서론

최근 부하의 급격한 증가로 전력계통은 안정 한계점에 가까운 곳에서 운전되고 있다. 또한 고장과 외란이 계통 안정도에 미치는 영향이 점점 커지고 있다. 이에 따라, 외란 또는 고장 발생 시, 신속하고 정확한 계통 안정도 평가에 대한 요구가 더욱 커지게 됐다. 과거의 과도 안정도 판별 방법으로 시간 모의법인 단단법과 과도에너지 함수법에 의한 에너지 마진을 구하는 방법[1,2]이 있지만, 단단법은 많은 계산량이 요구되고, 과도에너지 함수법은 불안정 평형점을 찾는 데 많은 어려움이 있기 때문에 on-line 과도 안정도 판별이 불가능하였다. 그러나, 최근 통신 시설의 발전으로 인하여 고장 제거 순간에 계통으로부터 발전기의 위상각과 각속도를 얻을 수 있게 되어, 이를 이용한 계통 안정도 실시간 판별 및 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3,4]

본 논문에서는 실시간 안정도 판별을 위하여 퍼지 근사 추론을 사용하였다. 고장 제거 순간의 발전기의 운동에너지, 위상각, 가속 정수를 속도와 위상각을 이용하여 구하고, 퍼지 입력으로 이용하였다. 다양한 상정 사고를 통하여 얻은 데이터에 따라 입·출력사이의 퍼지 관계 규칙을 구성하였고, 출력은 외란의 영향 정도에 따라 분류하였다. 이를 이용하여 실시간으로 계통의 안정도를 판별하고, 계통이 불안정한 경우 퍼지를 이용하여 에너지 마진을 추정한다. 대기 계통에서 정확한 에너지 마진을 구하기 위하여 불안정 평형점을 MOD법[5]으로 구하였고, off-line에서 구한 에너지 마진으로 실시간 추정을 위한 퍼지 집합을 구성하였다. 제안된 알고리즘을 대기계통에 적용하여 임의의 외란 발생 시, 실시간으로 계통 안정도를 판별하고 에너지 마진을 추정함으로써 그 효용성을 입증하였다.

2. Lyapunov 직접법을 이용한 과도 안정도 해법

2.1 에너지 마진

과도 에너지 마진은 고장이 제거되는 순간의 과도 에너지에 대한 계통의 임계 에너지의 차로 나타낸다. 에너지 마진으로 계통의 안정 불안정 상태를 양으로 표시할 수 있다. 에너지 마진이 양의 수를 갖으면 계통이 안정하고 음의 수를 갖으면 불안정하다. 에너지 마진을 구하는데 이용되는 고장 제거 순간의 발전기 위상각(θ^u)과 각속도(ω^d)는 시간 모의법[2]으로 구해지고, 에너지 마

진은 식(1)에서 얻어진다.

$$\Delta V = \frac{1}{2} M_{eq} \omega_{eq}^{cl2} - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i^{cl}) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^{cl}) + D_{ij} \frac{\theta_{ij}^u + \theta_{ij}^u - \theta_{ij}^{cl} - \theta_{ij}^{cl}}{\theta_{ij}^u - \theta_{ij}^{cl}} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^{cl})] \tag{1}$$

$$M_{eq} = \frac{M_{cr} \cdot M_{sys}}{M_{cr} + M_{sys}}, \quad \omega_{eq} = \omega_{cr} - \omega_{sys}$$

cr : 경계 발전기 그룹, sys : 나머지 발전기 그룹

M_i : 발전기의 관성정수

θ^u : 고장 제거후 불안정 평형점

θ^{cl} : 고장 제거 순간의 위상각

ω^{cl} : 고장 제거 순간의 각속도

2.2 UEP결정의 위한 MOD법

임계 에너지의 결정은 과도 에너지 함수법에서 가장 많은 계산량과 시간을 요하는 부분이고, 임계 에너지의 정확도는 제어 불안정 평형점의 올바른 초기값 결정에 달려 있다. 초기의 TEF 연구에서는 제어 불안정 평형점 결정을 위해 lowest level법을 이용하였다. 그러나 이 방법은 많은 수의 불안정 평형점이 존재함으로 다기의 계통에는 적용이 어렵기[1] 때문에, 이 문제를 해결하기 위해 BCU법[2] 등 많은 방법이 제시되고 있고, 최근의 연구에서 MOD법[5]이 이용되고 있다. MOD법은 대기 계통에서 적당한 초기값을 가정함으로써 정확한 제어 불안정 평형점을 결정할 수 있다. 본 논문에서 MOD법을 이용하여 제어 불안정 평형점을 결정하였다.

3. 실시간 안정도 판별 및 에너지 마진 추정

3.1 퍼지 추론

퍼지 추론[6]은 수식적 기술이 어려운 시스템을 경험이나 직관으로 언어적 기술로 표현하고, 이것을 이용하여 유연성 있는 추론을 가능하게 하는 방법이다.

본 논문에서는 안정도 판별을 위해 퍼지 근사 추론을 사용하였고, 퍼지 입력 집합과 출력 집합의 소속 함수는 Gaussian 분포 곡선[6]을 이용하였다.

3.2 입력 퍼지 집합

퍼지 입력으로 사용된 고장 제거 순간의 발전기 위상각, 가속 정수, 운동에너지를 구하는데 필요한 변수인 고장 제거 순간의 발전기 위상각(θ^u)과 각속도(ω^d)는 시간 모의법[2]으로 얻었다.

3.2.1 발전기의 위상각

고장 제거 순간에 가장 큰 동요를 갖는 발전기의 위상각을 퍼지 입력($\theta_{fuzzy\ input}$)으로 선택하였다.

$$\theta_{fuzzy\ input} = \text{MAX } \theta_i^{cl} \tag{2}$$

3.2.2 발전기 운동에너지

고장 제거 순간의 발전기의 운동에너지는 식 (3)에 의하여 얻어진다.

$$V_{ke} = \frac{M_i}{2} \omega_i^2 \text{ cor} \quad (3)$$

M_i : 관성정수

$\omega_i \text{ cor}$: Center of inertia 기준의 상대 각속도

모든 발전기의 운동에너지 합에 가장 빠른 발전기의 관성 정수를 고려한 값을 퍼지 입력 ($V_{\text{fuzzy input}}$)으로 선택하였고, 식 (4)에 의하여 얻어진다.

$$V_{\text{fuzzy input}} = \frac{1}{M_i} \sum_{i=1}^n V_{i \text{ ke}} \quad (4)$$

3.2.3 발전기 가속 정수

고장 제거 순간의 발전기 가속 정수 (P_{acc})는 고장의 심한 정도를 나타내는 파라미터이다. 발전기 가속 정수는 식 (5)에 의하여 얻어진다. 여기서, $f_i(\theta)$ 은 전력 편차 방정식(4)으로 식 (6)에 의해 얻어진다.

$$P_{\text{acc } i} = f_i(\theta^{cl})/M_i \quad (5)$$

$$f_i(\theta) = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{\text{cor}} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } M_i = \sum_{i=1}^n M_i, \quad P_{\text{cor}} = \sum_{i=1}^n P_i - P_{ei}$$

전체 계통을 고려하기 위해 고장 제거 순간의 모든 발전기의 가속 정수 합을 퍼지 입력 ($P_{\text{acc fuzzy input}}$)으로 선택하였고, 식 (7)에 의하여 얻어진다.

$$P_{\text{acc fuzzy input}} = \sum_{i=1}^n f_i(\theta^{cl})/M_i \quad (7)$$

3.2.4 퍼지 입력 집합 분류

발전기 위상각 만으로도 계통의 과도 안정도 정도를 척도로 이용할 수 있다. 그러나, 회전자의 위상각이 110° 넘는 경우에도 다시 원래의 자리로 돌아오는 발전기가 있을 수 있기 때문에, 발전기의 운동에너지와 가속 정수를 퍼지 입력으로 추가하여 안정도 판별에 신뢰성을 높였다. 계통의 안정 정도에 따라 입력 변수를 5가지의 언어적 변수로 분류하였다. 표 1과 그림 1,2,3에 입력 소속함수를 나타내었다.

표 1. 퍼지 입력 소속 함수 집합 분류

언어 변수 입력 퍼지집합	VS Very Small	S Small	M Medium	L Large	VL Very Large
운동에너지	0.0	0.066	0.12	0.165	0.21
위상각	0.0	30	60	90	120
가속 정수	15	20	25	30	35

3.3 출력 퍼지 집합

출력 퍼지값인 불안정 지수(Risk level)는 계통 불안정 정도를 나타낸다. 계통의 불안정 정도에 따라 5개의 퍼지 집합으로 구성하였다. 0.0~1.0범위의 숫자로 불안정 정도를 표시하였고, 표 2와 그림 4에 출력 소속함수를 나타내었다.

표 2. 퍼지 출력 소속 함수 집합 분류

언어 변수 출력 퍼지집합	CS Completely stable	S Stable	SV Stable but vulnerable	AM Alarm	US Unstable
불안정지수	0.0	0.35	0.55	0.8	1.0

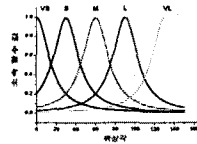


그림 1 위상각 소속함수

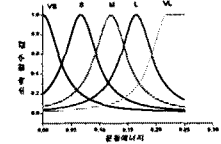


그림 2 운동에너지 소속함수

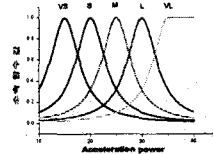


그림 3 가속 정수 소속함수

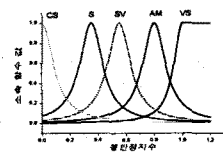


그림 4 불안정 지수 소속함수

3.4 퍼지 추론 규칙

퍼지 추론에 쓰인 규칙은 off-line에서 다양한 모의실험을 통하여 얻은 데이터를 이용하여 다음과 같은 IF-THEN형식으로 정하였다.

- RULE 1. IF V_{ke} is VS AND θ^{cl} is VS OR P_{acc} is VS THEN Risk Level is CS
- RULE 2. IF V_{ke} is S AND θ^{cl} is S OR P_{acc} is S THEN Risk Level is S
- RULE 3. IF V_{ke} is M AND θ^{cl} is M OR P_{acc} is M THEN Risk Level is SV
- RULE 4. IF V_{ke} is L AND θ^{cl} is L OR P_{acc} is L THEN Risk Level is AM
- RULE 5. IF V_{ke} is VL AND θ^{cl} is VL OR P_{acc} is VL THEN Risk Level is US

퍼지 규칙의 조건부는 발전기 운동에너지, 위상각, 가속 정수이며 결론부는 계통의 불안정 정도를 나타낸다. 입력 변수에 관계되는 규칙을 MIN연산과 MAX연산으로 계산한다.

3.5 비 퍼지화

비 퍼지화는 규칙에 따라 계산된 퍼지화 값을 보통 값인 불안정 지수로 바꾸어 주는 과정이다. 무게 중심법, 최대의 중간법, 평균의 최대법 등의 여러 가지가 제안되어 있다. 본 논문에서는 가장 보편적으로 쓰이는 비 퍼지화 방법인 무게 중심법 (center of gravity)를 사용하였고 식 (8)로부터 얻어진다.

$$\text{불안정 지수} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (8)$$

μ_i : 소속 함수값

b_i : 소속 함수의 중간값

3.6 에너지마진 추정

만약 불안정 지수가 0.8이 넘어 계통이 불안정하다고 판단되면 에너지 마진을 추정한다. 추정된 에너지 마진을 이용하여 계통의 안정화 전략에 지표로 사용할 수 있다. 에너지 마진에 대한 출력 퍼지 집합을 만들고, 상정 사고 시 가장 심하게 동요하는 발전기의 위상각과 모든 발전기의 운동에너지의 합을 퍼지 입력으로 이용하여 에너지 마진을 추정한다.

다음 그림 5는 안정도 판별과 에너지 마진 추정 순서도이다.

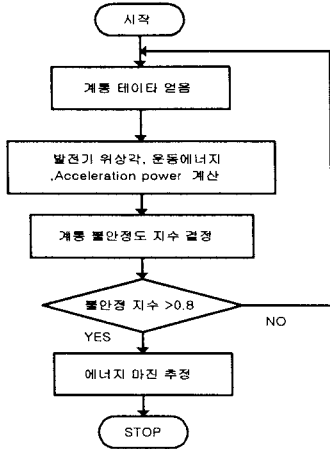


그림 5. 실시간 안정도 판별과 에너지 마진 추정 순서도

그림 6은 추정한 에너지 마진과 off-line에서 구한 에너지 마진을 비교한 그래프이다.

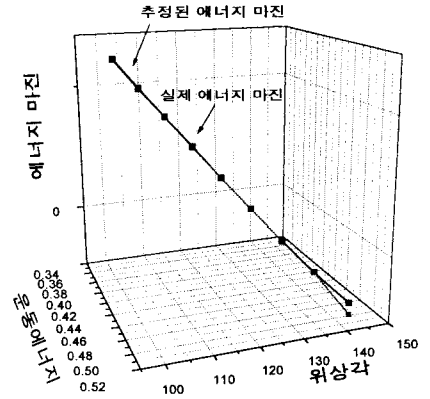


그림 6. *4-3 선로 고장시 에너지 마진 추정

4. 사례연구

본 연구에서 제안된 방법의 효용성을 입증하기 위해 4기 6모선 7선로의 모델 계통[7]에 적용하였다. 상정 사고는 3상 지락으로 가정하였고, 고장 선로를 제거함으로써 고장을 제거하였다. 4 가지 경우의 선로 고장을 고려하였고, 고장제거 시간에 따라 계통의 안정도 판별과 에너지 마진의 추정값을 계산하였다. 표 3은 사고 위치, 고장제거 시간에 따른 계통의 안정도지수와 시간 모의법에 의하여 구한 안정도를 비교한 것이다. 언어 변수는 추정된 계통의 상태를 언어로 표현한 것이다.

표 3. 상정사고에 따른 안정도 판별

사고위치	고장제거 시간(s)	경계 시간(s)	실제 안정도	퍼지추론으로 추정된 불안정 지수	언어 변수
*4-3	0.49	0.48	불안정	0.901	US
*4-3	0.33	0.48	안정	0.599	SV
*3-4	0.45	0.43	불안정	0.8701	US
*3-4	0.2	0.43	안정	0.3799	S
*1-6	0.4	*	안정	0.2071	VS
*2-5	0.54	0.53	불안정	0.9204	US
*2-5	0.35	0.53	안정	0.5457	SV

* 1-6번 고장제거 시간이 1초가 넘어도 계통이 안정하다.

표 4는 *4-3번 선로에서 고장이 발생 시 계통이 불안정할 때 에너지 마진을 추정한 결과이다. off-line에서 구한 에너지 마진과 퍼지로 추정한 에너지 마진을 비교하였다.

표 4. *4-3 선로 상정사고에 따른 에너지마진 추정

사고위치	고장제거 시간(s)	Off line에서 구한 에너지 마진	퍼지로추정된 에너지 마진	에러 (%)
*4-3	0.48	-0.01235	-0.0125	1.214
*4-3	0.49	-0.11053	-0.10966	0.784
*4-3	0.50	-0.2454	-0.24191	1.422

3. 결론

본 논문에서는 퍼지 근사 추론을 이용하여 계통의 안정도를 판별하고 에너지마진을 추정하였다. 근사 추론을 위한 입력 소속 함수 구성은 실시간 판별을 위하여 고장 제거 순간의 발전기의 운동에너지, 가속 정수, 회전자의 위상각을 이용하였다. 상정 사고에 따라 시간 모의법과 과도 에너지 함수 법을 이용하여 구한 계통의 데이터로 입, 출력 소속 퍼지 집합 구성과 추론 규칙을 정하고, 이것을 이용하여 과도 안정도 판별과 에너지 마진 추정을 위한 방법을 제안하였다. 대기 계통의 정확한 에너지 마진 계산을 위해 MOD 법으로 제어 불안정 평형점을 결정하였고, 에너지 마진 추정에 이용하였다.

사례연구를 통하여 제안된 방법에 효용성을 보였고, 실 계통에서 직접 얻을 수 있는 파라미터를 이용하였으므로 본 논문에서 제안된 방법으로 실시간 계통의 안정도 판별과 에너지 마진의 추정을 가능하다고 사료된다.

(참고 문헌)

- 유석구, 문병서, 김규호, "가변 직렬콘덴서를 이용한 과도 안정도 향상을 위한 유전알고리즘 응용", 전기학회 논문지, pp.38-45, 46권, 제 1호, 1997.
- 김수남, 유석구, "다기계통의 과도 안정도 향상", 1997년도 하계학술대회 논문집, pp 911-913 C 권, 1997.
- Stewart E. Stanton, "Application of Phasor Measurements and Partial Energy Analysis in Stabilizing Disturbances", IEEE Trans. vol 10, No. 1, pp. 297-306, February 1995,
- C. G. Groom, K. W. Chan, R. W. Dunn, A. R. Daniels, "Real-Time Security Assessment of Electrical Power System", in IEEE Trans. Power system, vol 11, No. 2, pp. 1112-1117, May 1996,
- A. A. Foud, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using The Transient Energy Fuction Method", Prentice Hall, 1992.
- H. J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory And Its Applications", Kluwer Academic Publishers, 1991.
- El-Abiad, A.H., and Nagappan, k., "Transient Stability Regions of Multimachine Power systems", IEEE Trans., vol PAS-85, No. 1, pp. 169-179, February 1966,