

## 다기계통의 과도 안정도 향상

김수남<sup>o</sup> 유석구  
한양대학교

### An Improvement of Transient Stability of Multi-machine Power System

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

**Abstract** - This paper presents a method for optimal placement of series capacitors in order to improve the power system transient stability, using genetic algorithms. For the formulation, this paper considers the objective function which is the energy margin as the difference between transient energy and critical energy. The most important factor in determining an accurate critical energy is the controlling unstable equilibrium point (UEP). This paper proposes the controlling UEP methods, concurrently with the DFP(Davidon-Fletcher-Powell) method, which enables the enhancement of multi-machine analysis. The proposed method is applied to 6-bus, 7-line, 4-machine model system to show its effectiveness in determining the locations to install series capacitors and the it's size to be installed in system, simultaneously.

#### 1. 서 론

최근 전력 계통의 대규모, 복잡화에 따라 과도안정도 향상을 위한 연구에 있어서 다양한 방법들이 제시되고 있다. 일반적으로 사고중 또는 고장제거후의 계통 구조와 파라미터는 계통의 과도 안정도에 크게 영향을 주는 요인이 된다. 최근에 과도 안정도 향상을 위하여, 직렬커패시터의 설치에 따른 설치위치와 투입량 결정에 관한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 이것은 계통 외란중 전진선로의 리액턴스를 보상하여 사고 제거 후 전력계통의 송전능력 및 제어성을 향상시키기 위한 것이다. 전력 계통 과도 안정도 해석법에는 시간모의법과 Lyapunov에너지 함수에 의한 직접법이 있는데, 시간모의법은 시간이 많이 걸리는 단점이 있고, 직접법은 계통이 커질수록 정확한 안정영역을 결정하는 불안정 평형점의 결정이 어렵다는 단점이 있다[3].

본 연구에서는 과도 안정도 향상을 위하여 시간 모의법을 사용하여 고장 중 발생한 과도에너지를 구하고 Lyapunov에너지함수에 의한 직접법을 사용하여 고장제거 후의 임계에너지를 구하였다. 시간모의법을 고장이 제거되는 순간까지만 계산[3]함으로써 모의 시간을 줄였고, 임계에너지 결정에 있어서 가장 중요한 불안정 평형점을 DFP법에 기초한 controlling UEP법[4]를 사용하여 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 과도안정도 향상을 위한 직렬커패시터의 설치위치와 투입량을 동시에 적정 배치 하였다. 목적함수는 불안정한 외란 제거 시간에서

의 에너지 마진을 최소화 하고, 제약조건은 부하모선의 전압과 선로의 정격 유효전력으로 하였다.

#### 2.. 과도 안정도 향상을 위한 정식화

##### 2.1 과도에너지

고장이 제거된 순간의 전력계통은 동기기를 평형점으로부터 멀어지게 하는 과도한 에너지를 포함하고 있다. 이 과도에너지는 가속에너지(운동에너지)로 작용하는데, 고장이 제거된 후 계통에서 이 과도에너지를 흡수하거나 위치에너지로 변환하는 능력에 따라 안정 여부가 결정된다. 고장제거 순간의  $\theta^c$ ,  $\tilde{\omega}^c$ 는 단단법(Runge-Kutta)[3]으로 구해지고, 고장제거 순간의 과도에너지는 식(1)에서 얻어진다[5,6].

$$V_{cl} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^{c^2} - \sum_{i=1}^n P_i(\theta_i^c - \theta_i^d) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n [C_{ij}(\cos \theta_{ij}^c - \cos \theta_{ij}^d)] + D_{ij} \frac{\theta_i^c + \theta_j^c - \theta_i^d - \theta_j^d}{\theta_{ij}^c - \theta_{ij}^d} (\sin \theta_{ij}^c - \sin \theta_{ij}^d) \quad (1)$$

여기서,  $\theta^c$  : 고장제거 순간의 위상각  
 $\theta^d$  : 고장 전의 안정 평형점  
 $\tilde{\omega}^c$  : 고장제거 순간의 각속도

##### 2.2 임계에너지

임계에너지는 고장제거 후 계통의 감속에너지로서 작용하게 되고, 운동에너지가 영인 점에서 위치에너지의 값과 같게 된다. 이 임계에너지는 고장제거 후의 계통의 파라미터에 의하여 표현되는 함수이므로, 사고제거후의 계통 구조를 제어하여 임계에너지를 중대하는 것이 결과적으로 과도 안정도를 향상시킨다. 임계에너지를 결정하는 불안정 평형점( $\theta^u$ )은 DFP에 기초한 controlling UEP법[4]로 구해지고, 임계에너지는 식(2)에서 얻어진다[5,6].

$$V_{cr} = - \sum_{i=1}^n P_i(\theta_i^u - \theta_i^d) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n [C_{ij}(\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^d)] + D_{ij} \frac{\theta_i^u + \theta_j^u - \theta_i^d - \theta_j^d}{\theta_{ij}^u - \theta_{ij}^d} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^d) \quad (2)$$

여기서,  $\theta^u$  : 고장제거 후의 불안정 평형점  
 $\theta^d$  : 고장제거 후의 안정 평형점

### 2.2.1 평형점

계통의 안정영역 한계인 임계에너지는 불안정평형점에서 결정된다. COA(center of angle)을 기준으로한 동요 방정식[4]에서 기계적 입력과 전기적 출력의 차  $f_i(\theta)$ 를 식(3)과 같이 나타내었다.

$$f_i(\theta) = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_i} P_{COA} = 0 \quad (3)$$

$$\tilde{\omega}_i = 0 \quad (i=1,2,3,\dots,n)$$

여기서,  $M_i = \sum_{j=1}^n M_j$ ,  $P_{COA} = \sum_{j=1}^n P_j - P_e$

위 식 (3)에서, 하나의 안정평형점( $\theta^s$ )과 다수의 불안정 평형점( $\theta^u$ )을 뉴턴랩슨법으로 구할 수 있고, 또한 식(4)과 같은 전력편차방정식(power mismatch function)  $F(\theta)$ 를 DFP법으로 최소화하여 구할 수 있다.

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^n f_i(\theta) \quad (4)$$

**2.2.2 DFP 방법을 이용한 제어 불안정 평형점의 계산**  
 불안정평형점들은 계통내 기기의 수에 따라 이론상  $2^{N-1}-1$ 개로 매우 많아져 모든 불안정 평형점을 구한다는 것은 다기계통에서 사실상 불가능하여 고장 위치에 따른 고장제적을 구하고 고장제적에 따라  $F(\theta)$ 의 국부적인 최소점을 찾아 그 점을 초기점으로 하여 불안정 평형점을 찾는다. 다음은 DFP방법을 이용한 불안정평형점을 탐색하는 과정을 나타내었다.

step 1.

주어진 고장점에서 고장제적을 구한다.  $t=0$ 에서  $\theta, \tilde{\omega}$ 의 Taylor series 전개로 구할 수 있다.

$$\theta_i(t) \cong \theta_i(0^+) + \frac{1}{M_i} \left( f_i(0^+) \frac{t^2}{2} + f_i'(0^+) \frac{t^3}{24} \right) \quad (5)$$

여기서,  $f_i(0^+) = f_i(\theta)$

$$f_i(0^+) = \sum_{j=1}^n f_{i,j}(\theta) f_j(\theta) / M_i$$

$$f_{i,j}(\theta) = \frac{\partial f_j(\theta)}{\partial \theta_i} \quad (\text{자코비안행렬})$$

step 2.

식 (3)을 DFP로 계산( 초기값은 고장전 평형점)하여 고장제거 후 상태에서 안정평형점( $\theta^s$ )을 구한다.

step 3.

고장제적을 따라 함수  $F(\theta)$ 가 최대가 되는 위상각( $\theta^u$ )을 찾는다.

step 4.

방향벡터  $h$ 를 구한다.  $h = \theta^u - \theta^s$ .

step 5.

일차원 최소화 문제로 풀어 국부적인  $F(\theta)$ 의 최소점을 찾는다.

$$\min F(\theta(z)) \cong F(\theta(z^*)) \quad z > 0$$

$$(\theta(z) \cong \theta^s + z \cdot h \text{ and } \theta(z^*) \cong \tilde{\theta}^u)$$

2차 보간법(Quadratic interpolation method)을 사용하여 불안정 평형점의 초기점  $\tilde{\theta}^u$ 을 찾는다.

step 6.

$\tilde{\theta}^u$ 를 시작점으로 하고, DFP method를 이용하여  $f_i(\theta)$ 를 최소화하여 불안정 평형점  $\theta^u$ 를 구한다.

### 2.3. 목적함수의 정식화

본 연구에서는 고장제거 순간의 과도에너지를 임계에너지 증대 기대값으로 하여 에너지 마진( $\Delta V$ ) 최소화를 목적함수로 하였다.  $\alpha$ 는 안정도 여유분으로써 임계에너지 값이 고장제거 순간의 에너지값보다 크도록 하였다.

$$\text{Min} \Delta V = |(Vcl + \alpha) - Vcr| \quad (6)$$

제약은 상태변수( $X$ )로 선로의 정격 유효전력과 부하 모션의 전압크기로 하였다. 페널티 함수를 이용하여 다음과 같이 제약식을 갖지 않은 최소화 문제로 변형하였다[6].

$$\text{Min} P(X) = \text{Min} \{ |(Vcl + \alpha) - Vcr| \quad (7)$$

$$\mu \{ \sum (P_k - P_k^{\text{lim}})^2 + \sum (|\bar{V}_i - V_i^{\text{lim}}|^2) \}$$

$\mu$ : 페널티 계수

$\alpha$ : 안정도 여유분

### 3. 유전알고리즘

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 상·하한값 사이에서 랜덤하게 발생하여 실수로 지정하고, 선로 선택을 위한 개체의 유전자값이 1인 경우에 해당 위치의 선로 및 투입량이 결정되도록 하였다.

커패시터의 설치위치 및 투입량을 이용하여 변화된 계통 어드미턴스로 조류계산과 모션 어드미턴스 행렬 축약 등의 과정을 거쳐 과도에너지와 임계에너지를 구한다. 2.3절에서의 목적함수를 적합도 최대화 문제로 변형한다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{P} \quad (8)$$

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

다음은 과도안정도 향상을 위한 유전알고리즘의 순서도이다.

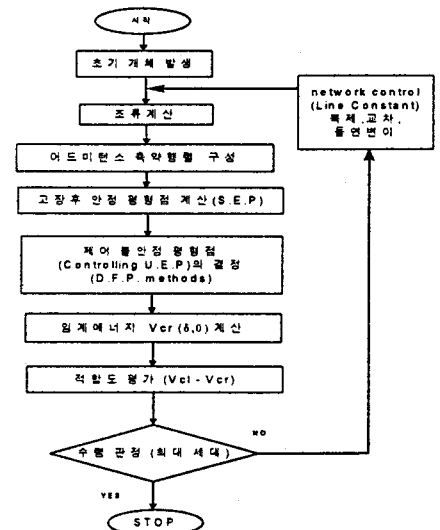


그림 1. 과도안정도 향상을 위한 유전알고리즘 순서도

## 2.4 사례연구

본 연구에서는 제안된 방법을 4기 6모선 7선로의 모델 계통[7]에 적용하여 효용성을 입증하였다. 사고는 3상지락 사고를 가정하였고 사고선로를 제거함으로써 고장을 제거한다. 보상을 10%일 때 유전알고리즘에서 개체는 50, 교차확률은 0.25, 돌연변이 확률은 0.05로 하여 주어진 사고제거 시간에서의 에너지 마진을 최소로 하는 목적함수를 최적화 하였다.

표1 사고위치에 따른 임계에너지 변화

사고위치	과도에너지 (pu)	임계에너지(pu)	
		보상전	보상후
3'-4	1.61	1.51	1.66
2'-3	1.46	1.36	1.51
4'-3	2.17	2.06	2.22

표2 사고위치에 따른 투입량의 변화

사고위치 (고장제거시간)	선택선로	투입량(pu)	총투입량 (pu)	안정도 여유분
3'-4 (0.43s)	1	0.019	0.095	0.05
	2	0.047		
	4	0.029		
2'-3 (0.55s)	1	0.016	0.078	0.05
	3	0.057		
	6	0.005		
4'-3 (0.48s)	2	0.040	0.083	0.05
	4	0.029		
	5	0.014		

그림2와 그림4는 선로3의 모선3에서 3상지락사고를 가정했을 경우 주어진 외란제거시간에 불안정했던 계통이 안정하게 제어됨을 운동에너지와 위치에너지의 변화로 보여준다. 그림 3은 유전알고리즘을 이용하여 임계에너지 중대와 커패시터 투입량을 결정하는데 있어서 세대수 변화에 따른 최적화 진행과정을 보여준다. 그림5의 경우 과도 안정도 판별법중 하나인 단단법을 이용하여 계통제어에 따른 8번 발전기의 동요곡선의 변화를 구하였다.

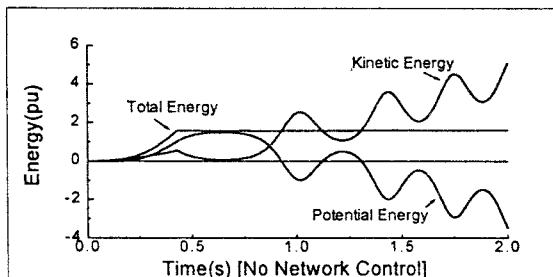


그림 2. 계통 비제어시 운동에너지와 위치에너지의 변화

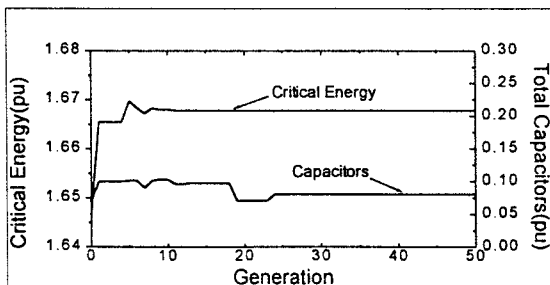


그림 3. 세대수 증가에 따른 임계에너지 변화와 커패시터 투입량의 변화

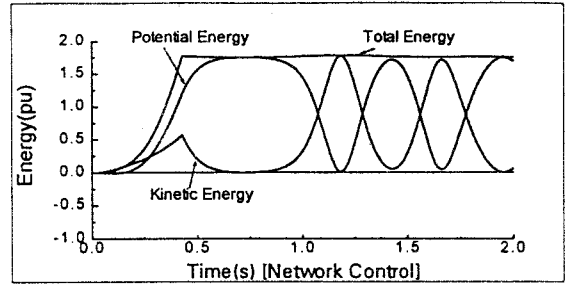


그림 4. 계통제어시 운동에너지와 위치에너지의 변화

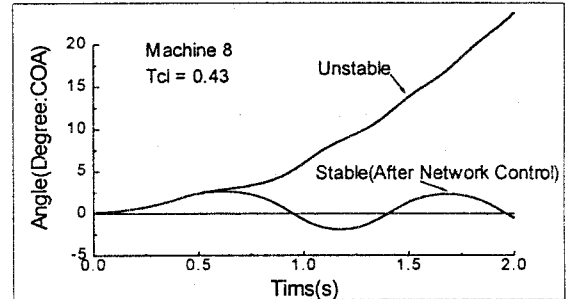


그림 5. 계통제어에 따른 발전기의 동요곡선의 변화

## 3. 결 론

본 연구에서는 다기계통에 있어서 과도 안정도 향상을 위한 방안을 제시하였다. 고장제거 순간의 과도에너지와 안정도 여유분을 임계에너지 중대 기대값으로 설정함으로써 과도 안정도 향상과 적정량의 커패시터 투입을 이루었다. 또한, 정확한 임계에너지의 결정을 위해 불안정 평형점을 DFP방법에 기초한 제어 불안정 평형점 방법을 사용함으로써 다기계통의 적용을 가능하게 하였다. 앞으로 대규모 전력계통에 적용하기 위해 좀 더 정확한 불안정 평형점의 결정과 계산시간의 단축을 위한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 趙建民, 川本俊治, "臨界에너지感度에 기초한過渡安定度의向上," T.IEE Japan, Vol. 114-B, No.4, 1994.
- [2] 유석구, 문병서, 김규호, "가변 직렬콘덴서를 이용한 과도안정도 향상을 위한 유전 알고리즘 응용," 전기학회 논문지, pp. 38-45, 46권, 제1호, 1997.
- [3] G. A. Maria, C. Tang, J. Kim, "Hybrid Transient Stability Analysis", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.5, No.2, May 1990.
- [4] T. Athay, R. Podmore and S. Virmani, "Transient Energy Stability Analysis". Engineering Foundation Conference System Engineering for Power, Henniker, New Hampshire, August, 1977.
- [5] A. A. Fouad, S. E. Stanton, "Transient Stability of a Multimachine power System. Part I : Investigation of System Trajectories, Part II : Critical Transient Energy", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No.7, July 1981.
- [6] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice-Hall, 1992.
- [7] A. H. El-Abiad & K. Nagappan, "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems," IEEE Trans. Vol. PAS-85, pp 169-179, February 1966.