

## 에너지함수법을 이용한 ATC 계산에 관한 연구

김양일, 정성원, 김재현  
순천대학교 정보통신공학부

### A Study for ATC Computation Using an Energy Function Method

Yang-il Kim, Sungwon Jeong, Jaehyeon Gim

School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

**Abstract** - Available transfer capability(ATC) quantifies the viable increase in real power transfer from one point to another in a power system. ATC calculation has predominantly focussed on steady-state viability. In many power systems, point-to-point transfer is not restricted by steady-state limits, but by undesirable dynamic behavior following large disturbance. In this paper, an energy function method for transient stability ATC computation is proposed, which utilizes a between the potential energy and energy function.

#### 1. 서 론

최근 전력산업은 안정적인 전력공급을 목적으로 소비자의 선택권을 확대하고 경영효율화를 추구하기 위한 구조개편이 서서히 구축되면서 계통을 효율적으로 운영하기 위한 문제가 중요한 이슈로 나타나고 있다. 전력계통을 안정적으로 운영하면서 기존에 사용하고 있는 송전용량에 추가적으로 사용할 수 있는 가용송전용량(ATC:Available Transfer Capability)의 확보는 전력계통을 안정적으로 운영할 수 있게 할 뿐만 아니라 경제급전을 가능하게 한다.[1]

ATC를 정하는 것은 정상상태에서 주어진 제한치까지 계통내의 한 지역에서 다른 지역까지 실제 전력을 증가시키는 것으로 일반적으로 ATC 계산에서 안전도 제한요소는 전압, 열적용량, 안정도제한 등을 고려하게 된다.[2] 특히, 대규모 계통에서 지역간 송전은 정상상태의 한계뿐만 아니라 외란에 의한 동적 상태에 의해 제한되며 ATC를 결정하기 위해서는 고려해야 할 과도상태의 많은 제약조건들이 있다.[3]

전력계통의 과도안정도 해석법은 시간모의법(Time Simulation)과 직접법(Direct Method)으로 나눌 수 있다. 직접법은 계산시간이 비교적 빠르고 정량적인 계산이 가능하며 대표적인 방법으로 등면적법(Equal Area Criterion)과 에너지함수법(Energy Function Method)이 있다.

본 논문에서는 에너지 함수법을 이용하여 상정사고가 고려된 ATC 계산 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저 정적 ATC 계산 방법 중 하나인 반복조류계산방법[4]으로 ATC를 계산하고, 에너지 함수법을 이용하여 과도안정도를 판별함으로써 동적 ATC를 계산하였다. 모의실험은 WSCC 9모선 계통에 적용하였다.

#### 2. 과도안정도 해석

##### 2.1 모델링

발전기 회전자의 운동방정식을 동요방정식(Swing Equation)이라 하며, 동요방정식은 식(1-2)와 같이 두개의 미분방정식으로 이루어져 있다.

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_m - P_e \tag{1}$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0 \tag{2}$$

여기서,  $\delta_i$ :발전기 위상각,  $\omega_i$ :발전기 각속도,  $M_i$ :발전기 관성정수

$P_m$ :발전기 기계적 입력,  $P_e$ :발전기 전기적 출력

계통의 에너지 함수는 회전자 위상각과의 관계를 증명하기 위하여 관성중심(Center of Inertia :COI)으로 변형하여야 한다. 관성중심축에 의한 개념은 계통의 과도안정도가 발전기들의 상호운동에 의해 결정된다는데 기초를 두며, 계통에서 고장이 복구되면 발전기는 절대 위상각이 아닌 기준 값과의 상대적인 차이로만 나타난다. COI 변형이 안된 상태에서도 안정도를 해석할 수는 있으나 다모선 계통에서의 고장 제거 후 에너지 산출에 문제가 발생하므로 COI로 변형을 한다. 전체시스템에 대한 COI는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \delta_i \tag{3}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i \tag{4}$$

여기서,  $M_T = \sum_{i=1}^m M_i$  이다.

##### 2.2 1기 무한대 모선 시스템에 대한 에너지 함수법

에너지 함수법은 고장제거 후 전력시스템에 대한 해석이 목적이며, 1기 무한대 계통에서 고장제거 후 동요방정식은 식(5)와 같다.

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e^{\max} \sin \delta \tag{5}$$

여기서,  $P_e^{\max} = \frac{E_1 E_2}{X}$

식(5)의 우변을  $\frac{-\partial V_{PE}}{\partial \delta}$  로 다시 정리하면 식(6)과 같이 위치에너지의 형태로 나타낼 수 있다.

$$V_{PE}(\delta) = -P_m \delta - P_e^{\max} \cos \delta \tag{6}$$

다시 식(5)를  $\frac{d\delta}{dt}$  로 미분하면 식(7-10)과 같이 나타낼 수 있으며, 결과적으로 식(10)은 운동에너지  $V_{KE}$ 와 위치에너지  $V_{PE}$ 의 합에 일치하는 에너지 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{M}{2} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 + V_{PE}(\delta) \right] = 0 \tag{7}$$

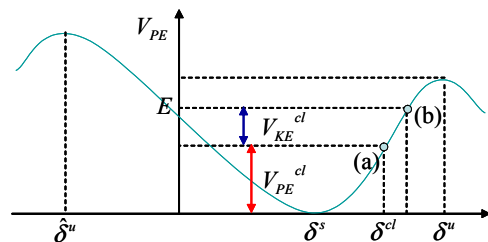
$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} M \omega^2 + V_{PE}(\delta) \right] = 0 \tag{8}$$

$$\frac{d}{dt} [V(\delta, \omega)] = 0 \tag{9}$$

$$\frac{d}{dt} [V(\delta, \omega)] = \frac{1}{2} M \omega^2 + V_{PE}(\delta) \tag{10}$$

식(10)의 관계를 그림 1의 위치에너지 곡선으로 나타내었다.

$\delta = \delta^*$  인 순간에, 고장 제거 후 SEP에서 운동에너지와 위치에너지는 “영(0)”이 되며 두개의 다른 평형점을 가지게 된다. 이 점을 불안정 평형점(Unstable Equilibrium Point :UEP)이라 하며  $\delta = \delta^*$  와  $\delta = \delta^*$  에서 위치에너지는 최대 값을 갖게 된다. 1기 무한대 계통에서는 평형점의 수가 두개로 주어지는데  $N$  기 계통에서는 무수히 많게 되며, 에너지 함수법에서의 안정 평형점과 불안정 평형점까지의 에너지가 임계에너지가 되므로 이 점들을 정확하게 계산하는 것은 매우 중요하다.[5]



<그림 1> 위치에너지 곡선

### 2.3 에너지 함수법

전력계통에서  $N$ 기 계통의  $i$  발전기에 대한 고장중과 고장제거 후 동요방정식은 식(11-12)로 나타낼 수 있다.

식(11-12)를 이용하여 각 발전기들 사이에서  $\theta = \theta^i, \omega = 0$  으로 하여 평형점을 가지는 구간을 적분하면 고장제거 후 SEP( $\theta_i, \omega$ )는 식(13)과 같다.

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = f_i^f(\theta) \quad 0 < t < t_{ci} \quad (11)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m$$

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = f_i(\theta) \quad t > t_{ci} \quad (12)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m$$

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 - \int_{\theta^0}^{\theta} f_i(\theta) d\theta_i, \quad i=1,\dots,m \quad (13)$$

식(13)을 에너지 함수로 표현하면 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m \int_{\theta^0}^{\theta} f_i(\theta) d\theta_i$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m P_i(\theta_i - \theta_i^0) - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m [C_{ij}(\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^0)]$$

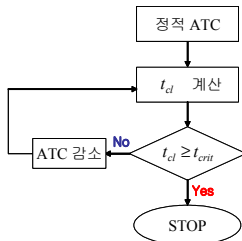
$$- \int_{\theta^0}^{\theta} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)]$$

$$= V_{KE}(\omega) + V_{PE}(\theta) \quad (14)$$

### 3. 동적 ATC 계산

동적 ATC 계산을 위한 흐름도는 그림 2에 나타내었고, 본 논문에서 제시한 동적 ATC 계산 방법은 다음과 같다.

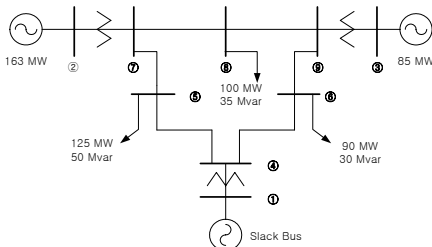
- 1) 정적 ATC는 RPF(Repeatd Power Flow) 방법[5]을 이용하여 계산하였으며 선로의 열적용량한계를 제약조건으로 하였다.
- 2) 에너지 함수법을 이용하여  $t_{ci}$  (고장제거시간)를 계산한다.
- 3) 계산된  $t_{ci}$  과  $t_{crit}$  (고장제거 임계시간)을 비교한다. ( $t_{ci} \geq t_{crit}$ ) 본 논문에서는 고장제거 임계시간을 0.1초(Relay 또는 차단기 동작시간을 0.1초로 가정)로 선정하였다.
- 4) 3)의 조건을 만족하면 프로그램이 종료되고, 만족하지 않으면 2)-4)의 조건을 반복하여 문제의 해를 구한다.



<그림 2> 동적 ATC 계산을 위한 흐름도

### 4. 실험 결과

사례 연구를 위한 모의실험 계통은 그림 3과 같이 WSCC 9모선 계통을 이용하였다. 9모선은 3대의 발전기와 9개의 송전선로 및 3개의 변압기로 구성되어 있으며, 총 부하는 315[MW]이다.



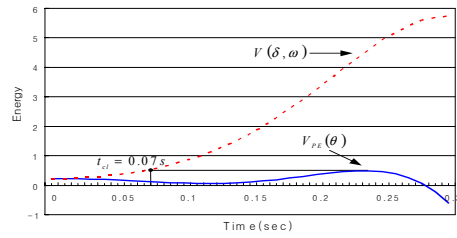
<그림 3> WSCC 9모선 계통도

모의 계통의 시뮬레이션 시나리오는 하나의 지역에서 다른 지역으로 송전하는 것을 기준으로 하였다. 수전하는 측의 모선은 6번으로 하고, 송전하는 측의 발전기 모선은 2번으로 선정하였다.

먼저 정적 ATC를 계산하기 위한 선로의 제약조건은 조류에 따라

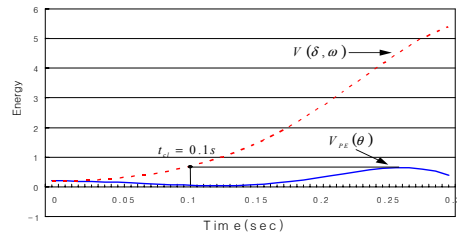
200[MVA]에서 250[MVA]까지 구분하여 선정하였고, 반복조류계산 결과 부하는 167.4[MW]까지 증가되었으며 제약조건 위반은 2-7번 선로에 나타났다.

에너지 함수법을 이용하기 위한 조건으로 선로의 상정사고는 5-7번 선로사고를 고려하였으며  $t=0$  인 순간에 사고를 발생시켜 나타난 위치에너지와 에너지 함수 사이의 그래프는 그림 4와 같다.



<그림 4> 위치에너지와 에너지 함수(정적 ATC 결과)

그림 4의 모의실험결과에서  $t_{ci}$ 는 0.07초이므로 계통은 불안정하게 된다. 그러므로 ATC를 감소시켜  $t_{ci}$ 이 임계고장 시간,  $t_{crit}$ 인 0.1초가 되어야 한다. 이 때의 위치에너지와 에너지 함수 사이의 그래프를 나타내면 그림 5와 같으며 부하는 144.9[MW]까지 증가하였다.



<그림 5> 위치에너지와 에너지 함수

표1은 ATC의 결과를 나타낸 것으로 과도 안정도를 고려하지 않는 반복조류계산방법의 ATC 결과는 77.4[MW]로 나타났지만, 과도안정도를 고려한 경우는 54.9[MW]로 감소되었다.

<표 1> ATC 결과

Case	From	To	ATC	
			P[MW]	Q[Mvar]
정적 ATC	2	6	77.4	25.8
에너지함수			54.9	18.3

### 4. 결 론

본 논문에서는 과도안정도 해석기법 중의 하나인 관성중심(COI) 형태의 에너지 함수법을 이용하여 선로의 열적 제약과 과도 안정도를 고려한 ATC 계산 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 WSCC 9모선 계통에 적용하여 ATC가 감소하였다. 그러므로 ATC 계산시에는 과도 안정도를 고려한 ATC 계산이 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] North American Electric Reliability Council(NERC), "Available Transfer Capability Definitions and Determination", June 1996
- [2] 김재현, "열적용량과 전압안정도를 고려한 ATC 계산 방법에 관한 연구", 조명전기설비학회 논문지, 2호, Jan 2007
- [3] Ian A. Hiskens, M.A. Pai, P.W. Sauer, "Dynamic ATC", Power Engineering Society Winter Meeting, vol.3, pp.1629, Jan 2000
- [4] 김재현, 정성원, "전력계통의 가용송전용량 계산 기법에 관한 연구", 공업기술연구 논문집, 제6집, pp.153-157, 2006.12
- [5] M.A. Pai, P.W. Sauer, "Power System Dynamics and Stsbility", Prentice-Hall, 1998