

상정사고를 고려한 ATC 계산에 관한 연구

정성원*, 황건호*, 김양일*, 김재현*
순천대*

A Study on the Available Transfer Capability(ATC) calculation with Contingency

Sungwon Jeong*, Keonho Hwang*, Yang-il Kim*, Jaehyeon Gim*
Suncheon National University*

Abstract - This paper proposed a methods to ATC calculation using energy function. In this paper, ATC was calculated as PTDF, LODF, RPF and Energy Function method and calculation results of each methods was compared. Contingency ranking method decided the overloading branches by PI-index. As a result, a study proved the fast and accurate ATC calculation method considering contingency suggested in this paper.

1. 서 론

전력계통을 안정적으로 운영하면서 기준에 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].

본 논문에서는 에너지 함수법을 이용하여 상정사고가 고려된 ATC 계산 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저 ATC 계산 시간을 단축하기 위하여 상정사고 우선순위 방법을 이용하였다. 계산의 정확성을 위하여 정상상태에서 반복조류계산방법[3]으로 ATC를 계산하고, 에너지 함수법의 임계고장제거시간(Critical Cleaning Time: CCT)을 이용하여 과도안정도를 판별함으로써 동적 ATC를 계산하였다. 안전도 제한요소를 포함한 ATC를 계산하기 위하여 PTDF, LODF법[4]을 이용하여 각 계산의 결과를 비교하였으며, 모의실험은 WSCC 9모선 계통에 적용하였다.

2. 과도안정도 해석

2.1 동요방정식

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

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

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

여기서, δ_i :발전기 위상각, ω :발전기 각속도, M_i :발전기 관성상수

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 결정된다는 대기초를 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, 1

기 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.

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

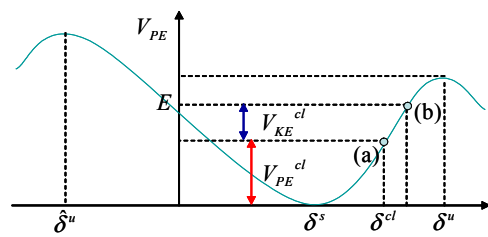
$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} M \omega^2 + V_{PE}(\delta) \right] = 0 \tag{8}$$

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

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

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 N기 계통에서는 무수히 많게 되며, 에너지 함수법에서의 안정 평형점과 불안정 평형점까지의 에너지가 임계에너지가 되므로 이 점들을 정확하게 계산하는 것은 매우 중요하다.[3]



<그림 1> 위치에너지 곡선

2.3 에너지 함수법

전력계통에서 N기 계통의 i발전기에 대한 고장중과 고장제거 후 동요방정식은 식(11-12)로 나타낼 수 있다.

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

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

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

$$M_i \frac{d\theta_i}{dt} = f_i(\theta) \quad t > t_{cl}$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (12)$$

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

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

$$\begin{aligned} V(\theta, \omega) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m \int_{\theta_i}^{\theta_i^0} f_i(\theta) d\theta \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m P_i(\theta_i - \theta_i^0) - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m [C_{ij}(\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^0) \\ &\quad - \int_{\theta_{ij}^0}^{\theta_{ij}} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_{ij} + \theta_j)] \\ &= V_{KE}(\omega) + V_{PE}(\theta) \end{aligned} \quad (14)$$

3. ATC 계산

3.1 과부하지수

계통에서 상정사고에 의한 중요 선로들의 과부하 여부를 검토하기 위해 사용되는 과부하지수는 다음과 같다.

$$PI = \sum_{l=1}^L \left(\frac{P_{flow\ l}}{P_l^{\max}} \right)^{2n} \quad (15)$$

여기서, PI = 과부하 평가지수, $P_{flow\ l}$ = 선로 l 의 유효전력조류

P_l^{\max} = 선로정격, L = PI 에 포함되는 선로집합

ATC 평가선로는 여러 지역간의 선로들이 고려될 수 있으나 본 논문에서는 과도안정도 측면에서의 상정사고 우선순위에 기준하므로 과부하지수에 의한 상정사고 선로로 지정하였다.

3.2 상정사고를 고려한 ATC 계산

본 논문에서 제시한 상정사고를 고려한 ATC 계산 방법은 다음과 같다.

- 1) ATC를 계산하기 위한 Base Case를 구성한다.
- 2) 사고 이전에 선로의 과부하 지수를 상정사고 우선순위로 선정한다. (이 조건은 대규모 계통에서 고장 전 상정사고 우선순위를 미리 지정하여 ATC 계산의 소요시간을 단축시킬 수 있다.)
- 3) 정상상태에서 반복조류계산(RPF) 방법[5]을 이용하여 ATC를 계산하고, 이때의 제약조건은 선로의 열적용량으로 한다.

- 4) 에너지 함수법을 이용하여 t_{cl} (고장제거시간)을 계산한다.
- 5) 4)의 조건을 이용하여 계산된 t_{cl} 과 우선순위에 선정된 상정사고를 고려하여 t_{crit} (고장제거 임계시간)을 비교한다.

- $t_{cl} \geq t_{crit}$ 이면 시스템은 안정한 상태이며,

- $t_{cl} \leq t_{crit}$ 이면 시스템은 불안정 상태이다.

본 논문에서는 고장제거 임계시간(cct)을 0.1초(Relay 또는 고속 차단기 동작시간을 0.1초로 가정)로 선정하였다.

6) 5)의 조건을 만족하면 프로그램이 종료되고, 만족하지 않으면 ATC를 감소시켜 3-4)의 조건을 반복하여 문제의 해를 구한다.

3.3 선형 ATC

본 논문에서는 제시한 기법의 ATC 계산 결과를 비교하기 위하여 선형 ATC 계산 기법인 PTDF, LODF 방법을 이용하여 ATC를 계산하였으며, 계산 방법은 참고문헌[2]의 방법을 이용하였다.

4. 사례연구 (모의실험)

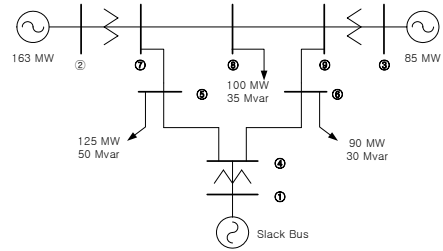
사례 연구를 위한 모의실험 계통은 그림 2와 같이 WSCC 9모선 계통을 이용하였다. 9모선은 3대의 발전기와 9개의 송전선로 및 3개의 변압기로 구성되어 있으며, 총 부하는 315[MW]이다.

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

표 1은 과부하지수에 의해 선정된 선로의 상정사고 우선순위로 5-7번 선로가 선정되었다.

상정사고 순위에 따라 상정사고 조건은 $t = 0.0$ 초인 순간에 5번 모선에서 3상 단락사고가 발생하였다고 가정하였으며 고장제거 이후 시스템은 고장 전의 상태로 복구되는 것으로 하였다.

모의실험에서 모든 발전기와 연결된 선로는 200[MW], 다른 선로의 용량한계는 100[MW]이며 모선전압 기준은 ± 1.0 [pu]로 설정하였다.



〈그림 2〉 WSCC 9모선 계통도

〈표 1〉 WSCC 9모선 PI 지수

Rank	Line		PI Index
	From	To	
1	5	7	7.7492
2	7	8	5.6845
3	6	9	4.5548
4	4	6	3.8088
5	4	5	3.7404
6	8	9	3.4675

선형 ATC 방법이 유효전력만을 고려한 방법이므로 PTDF와 LODF 방법에서는 무효전력은 고려하지 않았다. 정상상태의 RPF에서 λ 값 증대는 0.01로 하였으며, 에너지 함수법에서는 과도안정도를 고려하여 ATC를 계산하였다. 결과의 검증은 PSS/E 프로그램과 비교하여 제약 조건의 위반여부를 확인하였다.

〈표 2〉 WSCC 9모선 ATC 계산 결과

Case	From	To	ATC			Overloading Branch
			P[MW]	Q[Mvar]	PSS/E	
PTDF	2	6	87.0	-	79.25	5-7
LODF	2	6	14.383	-	-	5-7
RPF	2	6	77.4	25.8	-	5-7
Contingency ATC	2	6	54.9	18.3	-	-

표 2는 ATC 계산 결과를 나타내며, 정상상태의 RPF와 과도안정도를 고려한 ATC 계산 결과는 22.5[MW], 7.5[Mvar] 감소되어 나타났다. RPF에서는 선로의 열적용량 제한치까지 증가된 전력을 전송할 수 있었으나 CCT가 감소(0.07초)하여 나타났고, 과도안정도를 고려한 방법에서는 CCT가 증가(0.1초)하였으나 ATC가 감소한 결과가 나타났다. 결과적으로 계통에서의 상정사고를 고려한 정확한 ATC의 값을 계산하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 에너지 함수법을 이용하여 상정사고가 고려된 ATC 계산 방법을 제안하였다. 과부하지수(PI-index)를 이용하여 사고 이전에 상정사고의 우선순위를 지정하여 ATC 계산시간을 단축하였다. 제안한 방법을 WSCC 9모선 계통에 적용한 결과 RPF에서는 선로의 열적용량 제한치까지 증가된 전력을 전송할 수 있었으나 CCT가 감소하였고, 에너지 함수법을 이용한 방법에서는 CCT가 증가하였으나 ATC가 감소한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 PTDF, LODF 방법을 이용하여 ATC를 계산 결과를 비교하였다.

전력계통에서 과도안정도 평가는 심각한 상정사고에 대한 안정도 여부 판단하고 계통의 효율적인 운영을 위한 조치로 계통운영의 매우 중요한 분야이다. 본 논문에서 제시한 방법은 계통 운영시 과도안정도를 고려하여 정확한 ATC 계산에 활용될 수 있음을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] North American Electric Reliability Council(NERC), "Available Transfer Capability Definitions and Determination", June 1996
- [2] 김재원, "열적용량과 전압안정도를 고려한 ATC 계산 방법에 관한 연구", 조명전기설비학회 논문지, 2호, Jan 2007
- [3] M.A. Pai, P.W. Sauer, "Power System Dynamics and Stability", Prentice-Hall, 1998
- [4] Richard D. Christie, Bruce F. Wollenberg, Ivar Wangensteen, "Transmission Management in the Deregulated Environment," Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 2, pp170-194, February 2000
- [5] 김재원, 정성원, "전력계통의 가용송전용량 계산 기법에 관한 연구", 공업기술연구 논문집, 제6집, pp.153-157, 2006.12