

과도 안정도를 고려한 가용송전용량(ATC) 계산에 관한 연구

논 문
58-3-2

A Study on The Available Transfer Capability(ATC) with Transient Stability Constraints

김 양 일* · 정 성 원* · 김 재 현†
(Yang-il Kim · Sungwon Jeong · Jaehyeon Gim)

Abstract - In recent years, electric power systems have been experiencing a rapid change due to the increasing electricity market. For the effective use of power system under the deregulated environment, it is important to make a fast and accurate calculation of the maximum available transfer capability(ATC) from a supply point to a demand point. In this paper, the purpose of this research is to calculate ATC fast and accurately for securing the stability of system and raising the efficiency as a result of anticipating transmission congestion according to transmission open access progressed in the future under the regulated environment of electricity market. In this paper, a study utilized a relation of the potential energy and energy function by which calculated CCT and then utilized a relation of PEBS for transient stability ATC calculation. In this paper, ATC was calculated as RPF and Energy Function method and calculation results of each method was compared. Contingence ranking method decided the weak bus by the Eigenvalues of Jacobian matrix and overloading branches by PI-index. As a result, a study proved the fast and accurate ATC calculation method considering transient stability suggested in this paper. Through the case study using New England 39 bus system, it is confirmed that the proposed method can be used for real time operation and the planning of electric market.

Key Words : Available Transfer Capability(ATC), Repeated Power Flow(RPF), Transient Stability

1. 서 론

최근 몇 년간 국내·외의 전력산업은 안정적인 전력공급을 목적으로 소비자의 선택권을 확대하고 경영효율화를 추구하기 위한 구조개편이 서서히 구축되면서 계통을 효율적으로 운영하기 위한 문제가 중요한 이슈로 나타나고 있다.

구조개편으로 인한 경쟁적인 전력시장의 규제환경에서 전력계통을 안정적으로 운영하면서 기존에 사용하고 있는 송전용량에 추가적으로 사용할 수 있는 가용송전용량(Available Transfer Capability: ATC)의 확보는 전력계통을 안정적으로 운영할 수 있게 할 뿐만 아니라 발전회사들의 경제급전을 가능하게 한다.[1]

ATC는 정상상태에서 주어진 제한치까지 전력계통의 한 지역에서 다른 지역까지 실제 전력을 증가시키는 것으로 요즘과 같이 규제된 전력시장에서 기존의 사용하고 있는 것 이외에 그 이상의 상업적인 활동을 위하여 물리적인 송전 네트워크에 남아있는 송전용량을 측정하는 것이다.[2] 지금까지 ATC 계산은 대부분 정상상태에서 실행가능성을 주로 고려하여 계산되어왔다. 일반적으로 ATC 계산에서 안전도 제한요소는 열적용량, 전압 및 과도안정도 제한 등을 고려하

여 계산하게 된다.[3] 하지만 대규모 계통에서 지역 간 전송은 정상상태의 한계뿐만 아니라 외란에 의한 바라지 않은 동적인 상태에 의해 제한되는데 최종적으로 ATC를 결정하기 위해서는 고려해야 할 많은 과도상태의 제약조건이 있다.[4]

정상상태의 ATC 계산에 주로 사용하는 방법은 연속조류계산(Continuation Power Flow: CPF)[5], 반복조류계산(Repeated Power Flow: RPF)[2] 및 안전도를 고려한 최적조류계산법(Security Constrained Optimal Power Flow: SCOPF)[6]을 주로 사용하고 있으며, 특히 RPF는 정확한 전압붕괴점을 계산할 수는 없으나 실용적인 관점에서 근사적인 전압붕괴점을 구할 수 있는 장점이 있다.

과도안정도는 전력계통의 운영상 매우 중요한 요소로 계통에서의 단순한 사고가 대형사고로 확대될 경우 손실비용은 매우 크기 때문에 이런 문제를 해결하고자 수많은 연구가 지속적으로 이루어져 왔다.

과도안정도를 고려한 ATC 계산은 Yamada, Nagata, Tanaka 등이 에너지 함수와 관련된 PEBS, Second-kick 방법들을 등면적법에 적용하여 해석하였다. 특히 전력전송시 가혹한 상정사고에 대한 상정사고 스크리닝을 통한 사고순위를 선정하고 동요 전·후의 에너지 마진과 스크리닝 지표의 관계를 이용하여 ATC를 빠르게 계산하였다.[7] 또한 비슷한 방법으로 상정사고를 사고 전에 미리 검사하여 사고순위를 선정하여 최대부하 전력 전송시 에너지 함수와 고유치값을 해석하고 이를 혼합한 형태의 상정사고 가혹도 지표를 이용하여 ATC를 빠르게 계산하였다.[8]

* 정 회 원 : 순천대학교 정보통신공학부 · 공박
† 교신저자, 정회원 : 순천대학교 정보통신공학부 교수
E-mail : jhg@sunchon.ac.kr
접수일자 : 2008년 9월 18일
최종완료 : 2008년 12월 30일

전력시장의 규제환경에서 전력계통을 효과적으로 운용하기 위해서는 공급지역으로부터 수요지역까지의 ATC를 빠르고 정확하게 평가하는 것은 매우 중요하다. 하지만 ATC 계산시 고려해야 할 전력계통의 상정사고는 수많은 경우의 수가 발생하므로 계산시간을 단축하기 위해서는 전력계통의 중요 상정사고에 대하여 순위를 결정해야 한다. 따라서 본 논문에서는 상정사고 우선순위를 선정하기 위하여 Jacobian 행렬의 고유치(Eigenvalues)와 선로의 과부하평가지수(Overload Performance Index: PI)를 이용하여 순위를 선정하였다. 선정된 상정사고 순위를 이용하여 정상상태에서 반복조류계산(RPF)법과 에너지함수법의 임계고장제거시간(Critical Clearing Time: CCT)을 이용하여 ATC를 계산하고 시간모의법(Time Domain Simulation)으로 과도안정도를 해석하였다. 특히 에너지함수법의 PEBS법은 에너지함수와 회전자 위치에너지의 변화만 알고 있으면 CCT를 빠른 시간 내에 구할 수 있으며 정확한 안정도 판별이 가능한 장점이 있다.

본 논문에서 제안한 ATC 계산은 계통의 정상상태와 과도안정도를 고려하여 결과를 비교하였으며 모의실험은 New England 39모선에 적용하였다.

2. 정상상태 ATC 계산

ATC는 전력계통의 모든 제약 조건을 고려하여 한 지역에서 다른 지역으로 추가로 전송할 수 있는 능력으로 현재 운전되고 있는 상태에서 계통의 안정도 한계까지 얼마의 여유가 있는지를 나타낸다. 그러므로 ATC 계산은 전력계통의 최대송전용량(Total Transfer Capability: TTC)에서 현재 전송전력량을 뺀 값으로 계산된다. 이때 계통의 최대송전용량은 선로의 열적용량, 전압 및 과도안정도에 의하여 제한되어진다. 본 논문에서는 먼저 정상상태에서의 반복조류계산(RPF)를 이용하여 ATC를 계산하였다.

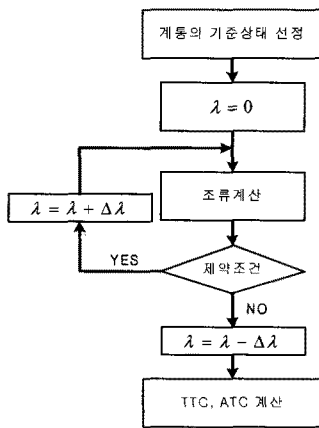


그림 1 최대송전용량 계산을 위한 흐름도(RPF)
Fig. 1 Flowchart for the total transfer capability(RPF)

RPF는 최대 주입전력량을 찾는 방법으로 전력을 주입하는 지역의 유효전력량을 계통 안전도의 위반을 발생시키지 않는 범위까지 증가시켜 최대송전용량을 구하는 방법이다.

본 논문에서 사용한 RPF 방법의 계산 절차는 참고문헌 [2]와 같고, 그 흐름도는 그림 1에 나타내었다. 최초 $\lambda=0$ 인 기준상태에서 제약조건을 위반하지 않는 범위까지 λ 를 증가시키면서 주입 전력량을 증가시킨다.(본 논문에서 λ 의 증대는 0.01로 하였다.) 결과적으로 제약조건을 벗어나게 되는 지점에서 $\lambda=\lambda_{max}$ 값과 최대송전용량이 결정된다.

3. 과도안정도해석

3.1 동요방정식

발전기 회전자의 운동방정식을 동요방정식(Swing Equation)이라 하며, 동요방정식은 식(3.1-3.2)와 같이 두개의 미분방정식으로 이루어져 있다.

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \tag{3.1}$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0 \tag{3.2}$$

여기서, δ_i :발전기 위상각, ω_i :발전기 각속도, M_i :발전기 관성정수, P_{mi} :발전기 기계적 입력, P_{ei} :발전기 전기적 출력

계통의 에너지 함수는 회전자 위상각과의 관계를 증명하기 위하여 관성중심(Center of Inertia: COI)으로 변형하여야 한다. 관성중심(COI) 변환을 위해 관성중심 δ_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \delta_i \tag{3.3}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i \tag{3.4}$$

여기서, $M_T = \sum_{i=1}^m M_i$ 이다.

3.2 다기계통의 에너지 함수법

전력계통에서 N 기 계통의 i 발전기에 대한 고장중과 고장제거 후 동요방정식은 식(3.5-3.6)로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m \tag{3.5}$$

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

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m \tag{3.6}$$

식(3.5-3.6)을 이용하여 각 발전기들 사이에서 $\theta = \theta_i^s$, $\omega = 0$ 으로 하여 평형점을 가지는 구간을 적분하면 고장제거 후 SEP(θ_i, ω)는 식(3.7)과 같다.

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 - \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} f_i(\theta) d\theta, \quad i=1,\dots,m \tag{3.7}$$

식(3.7)을 에너지함수로 표현하면 식(3.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V(\theta, \omega) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} f_i(\theta) d\theta_i \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m P_i(\theta_i - \theta_i^s) \\
 &\quad - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m [C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) \\
 &\quad - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j)] \quad (3.8) \\
 &= V_{KE}(\omega) + V_{PE}(\theta)
 \end{aligned}$$

3.3 위치에너지 경계면법(Potential Energy Boundary Surface: PEBS)

PEBS법은 위치에너지가 고장중의 위상각과 각속도의 고장제거에 따라 변할 때, 위치에너지의 첫 번째 최대값이 있는 곳이 불안정평형점(UEP)의 초기값이라는 가정을 이용한 방법이다.[9] 식(3.6)에 의해 고장제거 후 SEP를 계산하고 고장 동안의 파라미터를 이용하여 고장제거를 계산한다. 고장제거 후 고장제거에 따라 전력편차 방정식과 위치에너지를 구하여 식(3.9)와 같이 될 때 까지 반복한다.

$$\sum_{i=1}^m f_i(\theta)(\theta_i - \theta_i^s) = 0 \quad (3.9)$$

그리고 위치에너지 최대 값 (V_{PE}^{max})이 고장 제거후 정확한 dot product를 구해보면 $\sum_{i=1}^m f(\theta)(\theta_i - \theta_i^s)$ 로 정의되며 이 값이 “영(0)”이 되는 점이 PEBS crossing point가 된다. PEBS법을 이용하여 임계고장제거시간을 구하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

1. 고장제거후의 안정평형점(SEP) θ^s 를 구한다. 이때의 계통 파라미터는 고장제거후의 값이다.
2. 식(3.5)를 이용하여 고장동안의 계통파라미터를 이용하여 위상각제거 θ 를 구한다.
3. dot_product $f^T(\theta) \cdot \theta$ 와 위치에너지 (V_{PE})의 변화를 따라간다.
4. $f^T(\theta) \cdot \theta < 0$ 이라면 $f^T(\theta) \cdot \theta = 0$ 이 될 때까지 2), 3)을 반복한다. 여기서 $f^T(\theta) \cdot \theta = 0$ 인 점이 PEBS crossing point 이고 이때의 시간이 V_{PE} 가 최대가 되는 시간임을 알 수 있다. 이때의 위치에너지 최대값 ($V_{cr} = V_{PE}^{max}$)에 대응하는 값을 총 에너지의 변화에서 찾는다.
5. 고장동안 궤도로부터 $V(\theta, \omega) = V_{cr}$ 일 때의 시간이 고장제거시간(CCT)이 된다.

3.4 과도안정도 판정

과도안정도 판정은 임계에너지와 과도에너지 사이의 크기에 따라 결정된다. 임계에너지가 과도에너지 보다 크다면 안정하고, 작다면 불안정하다는 것이다.

그림 2에서 $f^T(\theta)$ 와 $(\theta - \theta_i^s)$ 의 내적이 “영(0)”이 되는 순간의 점 A는 계통의 위치에너지가 최대가 되는 점 B와 일치하는 것을 알 수 있고 이때의 B점이 임계에너지이다. 고장동안에 계통에서 발생하는 전체에너지가 임계에너지와

같아지는 점 C 순간의 D는 해당 선로 사고시 계통이 안정도를 유지하기 위한 임계고장제거시간(CCT)이 된다.

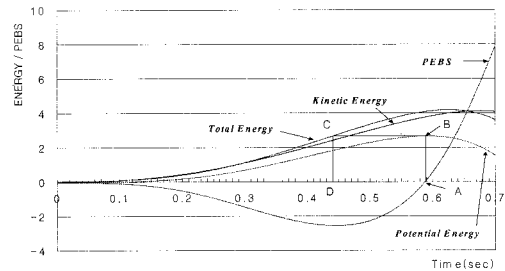


그림 2 에너지 함수와 PEBS

Fig. 2 Relations of transient energy function and PEBS

4. 과도안정도 ATC 계산

4.1 상정사고 우선순위

전력계통에서는 무수히 많은 상정사고가 발생하게 되는 데, 이때 모든 상정사고를 분석하는 것은 너무나 많은 시간이 소요된다. 따라서 중요 상정사고에 대하여 우선순위를 결정하고, 예상되는 사고를 이용하면 계통의 과도안정도를 해석하는 시간을 단축시킬 수 있다. 본 논문에서는 사고 이전의 계통에서 ATC를 빠르게 계산하기 위하여 Jacobian 행렬의 Eigenvalues를 이용하여 취약모션을 선정하고, 선로의 과부하지수를 이용하여 상정사고 우선순위를 선정하였다.

4.1.1 Jacobian Method

전력방정식을 Newton Raphson 방법에 적용시키면 다음과 같은 Jacobian 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

여기서, H, N, M, L은 자코비안의 소행렬이고, θ 와 V 는 각각 전압의 위상각과 크기, P와 Q는 각각 해당모션의 유효전력과 무효전력이다.

식(4.1)의 Jacobian 행렬에 역행렬을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

여기서 θ 와 V 의 편차를 구하여 Newton Raphson법의 알고리즘에 의해 새로운 θ , V 값을 다음과 같이 구한다.

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \quad (4.3)$$

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V \quad (4.4)$$

식(4.2)에서 자코비안 행렬의 Eigenvalues 중 하나라도 허수축을 교차하게 되면 안정영역에서 불안정영역으로 이동하게 된다. 이 Eigenvalue들이 허수축의 왼쪽에 있을 때 그 시스템은 안정하다고 할 수 있으며, 이때 가장 낮은 Eigenvalue 값을 갖는 모선이 취약모선이 된다.[10]

4.1.2 선로의 과부하평가지수(Overload Performance Index: PI)

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

$$PI = \sum_{i=1}^L \left(\frac{P_{flow\ i}}{P_i^{max}} \right)^{2n} \tag{4.5}$$

여기서, PI = 과부하 평가지수, $P_{flow\ i}$ = 선로 i 의 유효전력조류, P_i^{max} = 선로정격, $L = PI$ 에 포함되는 선로집합

ATC 평가 선로는 여러 지역 간의 선로들이 고려될 수 있으나 본 논문에서는 과도안정도 측면에서의 상정사고 우선순위에 기준하므로 사고 발생시 계통에 영향을 많이 주는 과부하지수에 의한 상정사고 순위로 지정하였다.

4.2 과도안정도를 고려한 ATC 계산

과도안정도를 고려한 ATC 계산을 위한 흐름도는 그림 3에 나타내었고, 본 논문에서 제시한 ATC 계산 방법은 다음과 같다.

- 1) ATC를 계산하기 위한 Base Case를 구성한다.
- 2) 계통의 정상상태에서 Jacobian 행렬의 Eigenvalues 값을 이용하여 취약모선을 선정하고, 선로의 과부하 지수(PI)를 상정사고 우선순위로 선정한다.
- 3) 정상상태에서 반복조류계산(RPF) 방법을 이용하여 ATC를 계산하고, 이때의 제약조건은 선로의 열적용량으로 한다.
- 4) 에너지함수법을 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.
- 6) 5)의 조건을 만족하면 프로그램이 종료되고, 만족하지 않으면 ATC를 감소시켜 3-4)의 조건을 반복하여 문제의 해를 구한다.

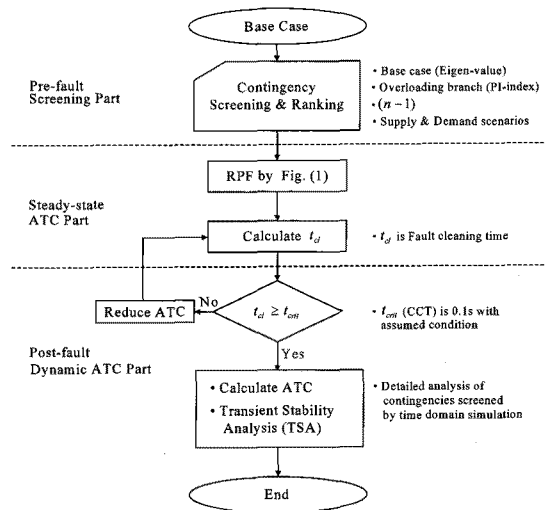


그림 3 ATC 계산을 위한 흐름도
Fig. 3 Flowchart for ATC calculation

5. 사례연구

사례연구를 위한 모의실험 계통은 New England 39모선을 3개의 지역으로 나누고 4개의 연계선로를 이용하여 ATC를 계산하였다. 이때 ATC 계산을 위한 시나리오는 송전지역과 수전지역으로의 전력 전송시 다음의 두 가지 경우를 선정하였으며, Case A는 송전지역을 Area 1번의 2번 발전기와 수전지역은 모선 15, 24, 27번으로 선정하고 Case B는 Area 3번의 8번 발전기와 모선 15, 24번으로 선정하였다.

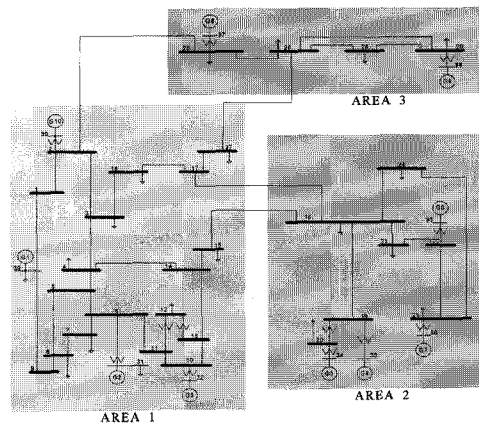


그림 4 New England 39모선 계통도
Fig. 4 New England 39-bus system

그림 4의 New England 39모선 계통은 10대의 발전기, 46개의 송전선로 및 11개의 변압기로 구성되어 있으며 총부하는 6149.5[MW]이고 발전기의 총 발전량은 6197.106[MW]이다. 이때, Swing 모선은 39번으로 하였다.

5.1 상정사고 우선순위 결과

표 1은 New England 39모선의 전체 모선 중 Jacobian

행렬을 이용하여 Eigenvalues를 계산한 결과 가장 취약한 모선으로 4번 모선이 선정되었다.

표 1 New England 39모선의 고유치

Table 1 Eigen-values of New England 39 bus system

Rank	Bus No.	Eigen-values	
		ΔP	ΔQ
1	4	-1.0197	0.00
2	27	0.000	0.00
3	5	4.331	0.00
4	15	31.299	0.17
5	21	42.643	4.04

표 2 New England 39모선의 PI 지수 결과

Table 2 PI-index of New England 39 bus system

Rank	Line		PI Index	비고
	From	To		
1	6	31	1.10E+06	발전기 연계선로
2	21	22	13.6510	
3	15	16	10.0510	지역간 연계선로
4	6	7	9.9150	
5	2	3	9.6880	
6	6	11	9.1218	
7	2	25	9.0958	
8	5	6	9.0298	
9	16	21	8.9249	
10	23	14	8.7129	

표 2는 과부하지수에 의해 선정된 선로의 상정사고 우선 순위로 6-31번 선로는 발전기와 연계된 선로로 상정사고에서 순위를 제외하면, 21-22번 선로사고가 상정사고 우선순위로 선정되었으며 지역간 연계선로의 상정사고는 15-16번 선로가 우선순위로 선정되었다.

5.2 정상상태 ATC 계산 결과

표 3은 RPF를 이용한 계산결과로 정상상태의 Base Case에서 송전지역과 수전지역으로의 전력 전송시 선로의 열적 용량을 고려하여 $\lambda = \lambda_{max}$ 가 될 때까지 ATC를 증가시킨 결과이다.

표 3 RPF를 이용한 사례의 ATC 계산 결과

Table 3 ATC results for case using RPF

Case	From	To	ATC[MW]		Overloading Branch	λ_{max}
			P[MW]	Q[Mvar]		
A-1	31	15	793.60	379.44	4-5	1.48
A-2		24	771.50	-230.50	4-5	1.50
A-3		27	736.22	197.81	4-5	1.62
B-1	37	15	659.20	315.18	15-16	1.06
B-2		24	722.12	-215.75	25-26	1.34

이때 Case A와 B의 결과에서 과부하 선로가 다르게 나타난 이유는 전력 전송시 선로의 제약조건에 위배되지 않기 위해 수전지역으로 향하는 조류가 우회선로를 이용하여 다른 선로에서 제약이 발생하였다.

5.3 과도안정도를 고려한 ATC 계산

Case A는 표 1의 결과를 이용하여 모선 4번에서 $t=0$ 초인 순간에 3상 단락사고가 발생하여 고장지속시간 0.1초 후에 3-4번 선로를 제거(Trip)시켜 사고가 제거되었다고 가정하였다. 또한 표 2의 결과를 이용하여 Case B-1은 과부하지수가 가장 높은 순위인 21-22선로, Case B-2의 경우는 지역간 연계선로의 가장 높은 순위인 15-16번 선로에 상정사고를 고려하였다.

표 4 과도안정도를 고려한 사례의 ATC 계산 결과(39모선)
Table 4 ATC results for case using transient stability

Case	From	To	ATC[MW]	
			P[MW]	Q[MW]
A-1	31	15	745.60	356.49
A-2		24	734.468	-219.44
A-3		27	699.70	188.0
B-1	37	15	614.40	293.76
B-2		24	660.404	-197.31

정상상태의 표 3과 비교시 가장 큰 값의 차이는 B-2의 선로 사고시 ATC 값이 61.72[MW] 차이를 나타내었으며, 이 결과는 상정사고로 인하여 계통의 ATC 값이 감소되었음을 알 수 있다. 결과적으로 RPF의 결과인 표 3과 표 4를 비교시 전체적으로 ATC 값이 감소되어 나타났다.

표 5의 고장제거시간(t_{cl})은 정상상태의 결과이며, 표 6은 고장제거 임계시간(t_{crit})의 계산 결과로 이때 t_{crit} 이 0.1초 보다 작다면 ATC는 더욱 증가시킬 수 있다.

회전자의 위치에너지를 나타내는 V_{PE}^{max} 의 값은 표 5에 비해 표 6이 높게 나타났으며, 위치에너지 최대 값의 결과에서 나타난 것처럼 상정사고시 동요기간 동안 발전기 회전자의 위치에너지가 증가하였다. 이것은 계통에서 상정사고시 선로의 사고보다는 모선에서의 사고로 인한 계통의 영향이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

표 5 고장제거시간(t_{cl}) 계산결과

Table 5 Results for t_{cl} (RPF)

Case	From	To	t_{cl}	V_{PE}^{max}	PEBS Crossing Time
A-1	31	15	0.078	1.3479	0.264
A-2		24	0.078	1.4019	0.264
A-3		27	0.086	1.6232	0.274
B-1	37	15	0.081	1.7217	0.317
B-2		24	0.041	1.5677	0.280

표 6 고장제거 임계시간(t_{crit}) 계산결과

Table 6 Results for t_{crit} (Transient stability)

Case	From	To	t_{crit}	V_{PE}^{max}	PEBS Crossing Time
A-1	31	15	0.1	2.8042	0.288
A-2		24	0.1	2.7432	0.286
A-3		27	0.1	2.7262	0.287
B-1	37	15	0.1	2.4820	0.343
B-2		24	0.1	2.6022	0.318

그림 5~8은 Case A-1과 B-2의 RPF와 PEBS법을 이용하여 계산한 고장제거시간(t_{cl})과 고장제거 임계시간(t_{crit})으로 (a)는 전체에너지 (b)는 위치에너지 (c)는 PEBS법의 관계를 그래프로 나타내었다.

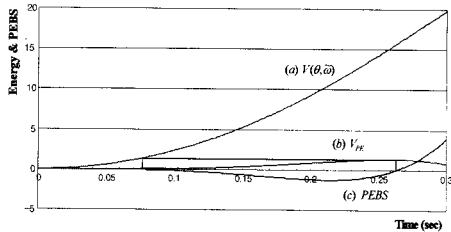


그림 5 위치에너지, 에너지 함수, PEBS 곡선(31-15, t_{cl})
Fig. 5 Potential energy, Energy function and PEBS curve (From 31 - To 15, t_{cl})

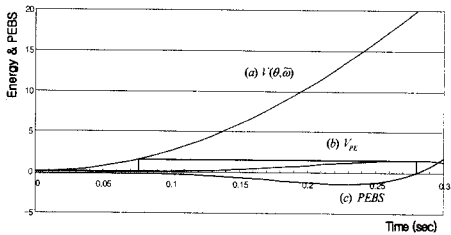


그림 6 위치에너지, 에너지 함수, PEBS 곡선(37-24, t_{cl})
Fig. 6 Potential energy, Energy function and PEBS curve (From 37 - To 24, t_{cl})

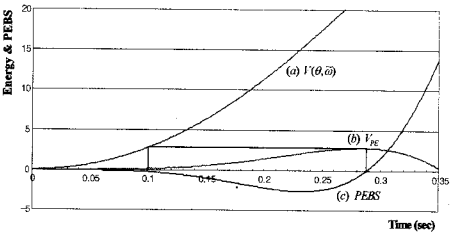


그림 7 위치에너지, 에너지 함수, PEBS 곡선(31-15, t_{crit})
Fig. 7 Potential energy, Energy function and PEBS curve (From 31 - To 15, t_{crit})

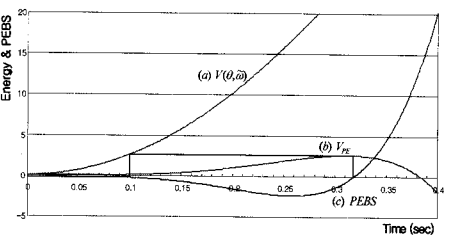


그림 8 위치에너지, 에너지 함수, PEBS 곡선(37-24, t_{crit})
Fig. 8 Potential energy, Energy function and PEBS curve (From 37 - To 24, t_{crit})

각 그림에서 위치에너지 최대 값의 결과에서 나타난 것처럼 상정사고시 동요기간 동안 발전기 회전자의 위치에너지가 증가한 것을 알 수 있다.

그림 9~10은 본 논문에서 제시한 CCT에 따른 발전기 회전자의 위상각을 Matlab 프로그램을 이용하여 시간모의법(Time Domain Simulation)으로 해석한 결과로서 Case A-1과 Case B-2를 나타낸 것이다.

차단기의 동작시간을 0.1초라 가정하였을시 (a)는 고장제거 임계시간 내(0.09초)의 안정한 상태를 나타내며 (b)는 고장제거 임계시간(0.1초) 이후의 계통이 불안정한 영역으로 탈조하는 것을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법에서의 결과가 정확히 계산되었음을 증명하였다.

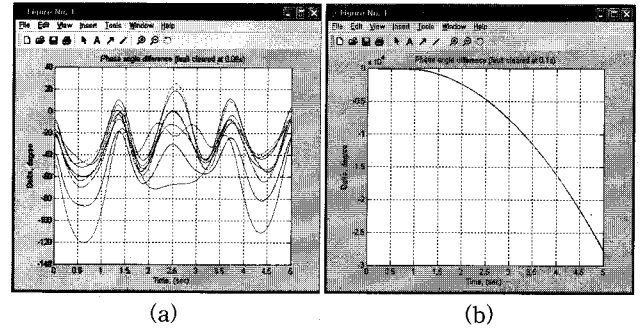


그림 9 과도안정도 해석 결과 (Case A-1)
Fig. 9 Analysis results of transient stability

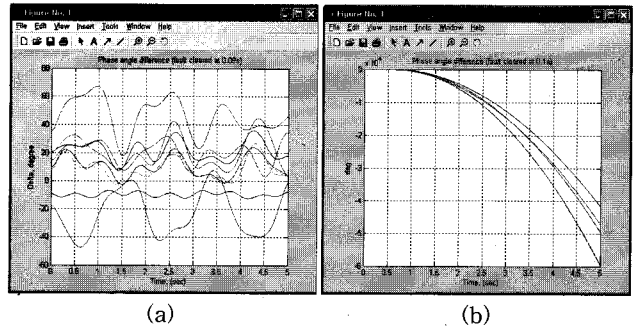


그림 10 과도안정도 해석 결과 (Case B-2)
Fig. 10 Analysis results of transient stability

6. 결 론

현재 국내의 전력수요는 지속적인 증가추세에 있으며 국내에 추진 중인 새로운 형태의 전력산업은 전력시장에 더욱 혼잡을 가중시키고 있어 ATC 계산은 더욱 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 ATC를 신속하게 계산하기 위하여 계통의 정상상태에서 Jacobian 행렬의 Eigenvalues와 과부하지수(PI-index)를 이용하여 중요한 사고를 우선순위로 선정하였다. 먼저 RPF를 이용하여 선로의 열적용량 제한치까지 증가된 ATC를 계산하였고, 과도안정도를 고려한 ATC계산은 에너지 함수법의 PEBS를 이용하여 기존의 CCT를 t_{cl} 과 t_{crit} 로 정하여 ATC를 계산하였다.

제한한 방법을 New England 39모선 계통에 적용한 결과 RPF에서는 선로의 열적용량 제한치까지 증가된 전력을 전송할 수 있었으나 CCT가 감소하였고, 과도안정도를 고려시 CCT를 0.1초까지 증가시킨 결과 ATC가 감소하여 나타났다.

RPF를 이용한 ATC 계산은 사값에 따른 최대송전용량을 계산함으로써 매우 정확한 결과를 얻을 수 있지만 ATC 계산시간이 길게 나타났으며, 과도안정도를 고려한 ATC 계산에서는 계통의 상정사고를 고려하여 발전기 회전자 위상각을 시간모의법으로 해석한 결과 제한한 CCT의 시간내에서는 위상각이 시간이 지남에 따라 점차 안정영역으로 수렴하였다. 연구결과와 같이 과도안정도를 고려한 ATC는 에너지함수의 PEBS를 이용하여 고장제거 순간의 회전자의 위상각에 따른 평형점만 구하면 빠른 시간내에 안정도를 해석할 수 있고, 대규모 계통에서 상정사고 순위를 미리 지정하여 관심선로와 모선을 대상으로 실험하여 전체적인 계산시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 제시한 방법은 계통 운영시 과도안정도를 고려하여 정확한 ATC 계산에 활용될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang and W. F. Tinney, "Available Transfer Capability Calculations", IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No. 4, pp. 1521-1527, Nov. 1998
- [2] Jae-Hyeon Gim, Yang-Il Kim, Sung-Won Jeung, "A Study on the Enhancement of Available Transfer Capability Using the Flexible AC Transmission System (FACTS)", KIEE International Transactions on Power Engineering, Vol. 4-A, No. 4, pp. 192-200, 2004
- [3] 김재현, "열적용량과 전압안정도를 고려한 ATC 계산 방법에 관한 연구", 조명전기설비학회 논문지, 2호, Jan. 2007
- [4] I. A. Hiskens, M. A. Pai, P. W. Sauer, "Dynamic ATC", Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 1629, Jan. 2000,
- [5] H. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, N. Balu, "CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior due to Load and Generation Variations", IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, pp. 623-634, May 1995.
- [6] P. Bresesti, D. Lucarella, P. Marannino, R. Vailati, F. Zanellini, "An OPF-Based Procedure for Fast TTC Analyses", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1504-1509, 2002
- [7] Y. Yamada, M. Nagata, K. Tanaka, "An Energy Function Based Contingency Screening Method for ATC Assessment with Transient Stability Constraints", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia

- Pacific., Vol. 2, pp. 886-890 Oct. 2002
- [8] M. Nagata, K. Tanaka, "A Hybrid Approach of Contingency Screening for ATC Assessment with Stability Constraints", CIGRE/PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems 2003, pp. 137-142, Oct. 2003
- [9] M. A. Pai, Peter W. Sauer "Power System Dynamics and Stability", Prentice-Hall, Inc., pp. 294-313, 1998
- [10] M. M. Salama, E. M. Saied, S. M. Abdelmaksoud, "Steady State Voltage Instability Assessment in Power System", Energy Conversion & Management, Vol. 40, No. 1, Jan. 1999

저 자 소 개



김 양 일 (金 良 一)

1971년 7월 24일생. 2000년 순천대 물리학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 졸업(박사).

현재 한국남부발전(주) 재직

E-mail : kimyi007@hanmail.net



정 성 원 (鄭 盛 元)

1975년 11월 26일생. 2002년 순천대 전기 제어공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 졸업(박사).

E-mail : ww180@sunchon.ac.kr



김 재 현 (金 在 顯)

1956년 1월 25일 생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사) 1993년 동 대학교 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 전기 제어공학과 교수

E-mail : jhg@sunchon.ac.kr

Tel : 061-750-3545

Fax : 061-752-9841