

# 에너지함수법을 이용한 가용송전용량(ATC) 계산에 관한 연구

(A study on the ATC(Available Transfer Capability) calculation using an Energy Function Method)

김재현\* · 정성원 · 김양일

(Jae-Hyeon Kim · Sung-Won Jeong · Yang-Il Kim)

## 요 약

가용송전용량(ATC)은 계통내의 한 지역에서 다른 지역까지 실제 전력을 증가시키는 것이다. 지금까지 ATC 계산은 대부분 정상상태에서 실행가능성을 주로 고려하여 계산되어 왔다. 하지만 ATC 평가시 과도안정도로 제약된 ATC 계산은 매우 중요한 부분이다.

ATC 평가시에는 제약조건으로 열적용량, 전압 및 과도안정도로 제약된 상정사고(n-1)시 안전도 평가가 요구된다.

본 논문은 자코비안 행렬의 고유치를 이용하여 상정사고 우선순위를 선정하였고, 에너지 함수법을 이용하여 선로의 열적용량, 전압안정도 및 과도안정도를 고려한 ATC를 계산하였다.

## 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. But ATC assessment with transient stability constraints has a dominant part in overall ATC calculation.

ATC assessment requires a reputation of (n-1) security assessment with constraints of thermal limits, voltage stability and dynamic stability.

An estimation of determinant contingency screening method is used for computing eigenvalue of Jacobian matrix. This paper proposed a methods to ATC calculation using energy function. Constraints is used thermal limits, voltage stability and transient stability.

Key Words : Available transfer capability(ATC), Energy Function Method, Eigenvalue, Repeated Power Flow(RPF), Transient Stability

## 1. 서 론

최근 전력산업은 안정적인 전력공급을 목적으로 소비자의 선택권을 확대하고 경영효율화를 추구하기 위한 구조개편이 서서히 구축되면서 계통을 효율적으로 운영하기 위한 문제가 중요한 이슈로 나타나

\* 주저자 : 순천대학교 공대 전기공학과 교수  
Tel : 061-750-3540, Fax : 061-750-3508  
E-mail : jhg@sunchon.ac.kr  
접수일자 : 2007년 11월 5일  
1차심사 : 2007년 11월 6일  
심사완료 : 2007년 11월 19일

고 있다. 전력계통을 안정적으로 운영하면서 기존에 사용하고 있는 송전용량에 추가적으로 사용할 수 있는 가용송전용량(ATC: Available Transfer Capability)의 확보는 전력계통을 안정적으로 운영할 수 있게 할뿐만 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 동적상태에 의해 제한되며 ATC를 결정하기 위해서는 고려해야 할 과도상태의 많은 제약조건들이 있다[3].

정상상태의 ATC 계산에 주로 사용하는 방법은 연속조류계산(Continuation Power Flow: CPF)[4], 반복조류계산(Repeated Power Flow: RPF)[5] 및 안전도를 고려한 최적조류계산법(Security Constrained Optimal Power Flow: SCOPF)[6]을 주로 사용하고 있으며, 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[7-8].

본 논문에서는 계통에서의 사고전에 상정사고의 우선순위를 미리 결정하여 ATC 계산시간을 단축하였으며, 방법으로는 전력방정식을 Newton Raphson 방법에 적용한 자코비안 행렬의 고유치를 이용하여 취약모선을 선정하였다. 또한 에너지 함수법을 이용하여 상정사고가 고려된 ATC 계산 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 먼저 정적 ATC 계산 방법 중 하나인 RPF 방법[5]으로 ATC를 계산하고, 에너지 함수법의 임계고장제거시간(Critical Clearing Time: CCT)을 이용하여 과도안정도를 판별함으로써 동적 ATC를 계산하였다. 제안된 방법은 WSCC(Western System Coordinating Council) 9모선 계통에 적용하였다.

## 2. Jacobian Method

전력계통에서 전압불안정을 예측하는 방법들은 정적상태와 동적상태로 나눌 수 있는데 동적인 방법은 계산시간과 결과들을 분석하기 위해 많은 시간을 필요로 하며 현재도 많은 연구가 진행 중에 있다. 반면 정적인 방법은 주로 자코비안 행렬의 고유치를 찾는 방법과 전압붕괴와 현재의 운전점까지의 거리를 제시해 주는 전압붕괴 근접도 지표를 찾는 방법이 주로 사용되고 있다[9].

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서 H, N, M, L은 자코비안의 소행렬이고,  $\theta$ 와 V는 각각 전압의 위상각과 크기, P와 Q는 각각 해당모선의 유효전력과 무효전력이다.

식 (2.1)의 자코비안 행렬을 역행렬을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

여기서  $\theta$ 와 V의 편차를 구하여 Newton Raphson 법의 알고리즘에 의해 새로운  $\theta$ , V값을 다음과 같이 구한다.

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \quad (2.3)$$

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V \quad (2.4)$$

식 (2.2)에서 자코비안 행렬의 고유치를 중 하나라도 허수축을 교차하게 되면 안정영역에서 불안정영역으로 이동하게 된다. 이 고유치들이 허수축의 왼쪽에 있을 때 그 시스템은 안정하다고 할 수 있다[10].

### 3. 과도안정도 해석

#### 3.1 동요방정식

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

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0 \quad (3.2)$$

여기서  $\delta_i$ : 발전기 위상각,  $\omega_i$ : 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. 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. 관성중심(COI) 변환을 위해 관성중심  $\delta_0$ 는 다음과 같이 정의된다.

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

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

여기서  $M_T = \sum_{i=1}^m M_i$  이다.

#### 3.2 1기 무한대 모선 시스템에 대한 에너지 함수법

에너지 함수법은 고장제거 후 전력시스템에 대한 해석이 목적이며, 1기 무한대 계통에서 고장제거 후 동요방정식은 식 (3.5)와 같다.

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e^{\max} \sin \delta \quad (3.5)$$

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

식 (3.5)의 우변을  $\frac{-\partial V_{PE}}{\partial \delta}$  로 다시 정리하면 식 (3.6)과 같이 위치에너지의 형태로 나타낼 수 있다.

$$V_{PE}(\delta) = -P_m \delta - P_e^{\max} \cos \delta \quad (3.6)$$

다시 식 (3.5)를  $\frac{d\delta}{dt}$  로 미분하면 식 (3.7~3.10)과 같이 나타낼 수 있으며, 결과적으로 식 (3.10)은 운동에너지  $V_{KE}$  와 위치에너지  $V_{PE}$  의 합에 일치하는 에너지 함수로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{M}{2} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 + V_{PE}(\delta) \right] = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} M \omega^2 + V_{PE}(\delta) \right] = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dt} [V(\delta, \omega)] = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt} [V(\delta, \omega)] = \frac{1}{2} M \omega^2 + V_{PE}(\delta) \quad (3.10)$$

식 (3.10)의 관계를 그림 1의 위치에너지 곡선으로 나타내었다.

$\delta = \delta^s$  인 순간에, 고장 제거 후 SEP에서 운동에너지와 위치에너지는 “영(0)”이 되며 두 개의 다

른 평형점을 가지게 된다. 이 점을 불안정 평형점 (Unstable Equilibrium Point: UEP)이라 하며  $\delta = \delta^u$  와  $\delta = \delta^u$  에서 위치에너지는 최대 값을 갖게 된다. 1 기 무한대 계통에서는 평형점의 수가 두 개로 주어 지는데  $N$  기 계통에서는 무수히 많게 되며, 에너지 함수법에서의 안정 평형점과 불안정 평형점까지의 에너지가 임계에너지가 되므로 이 점들을 정확하게 계산하는 것은 매우 중요하다[7].

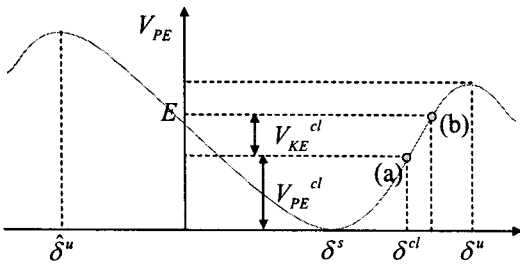


그림 1. 위치에너지 곡선  
Fig. 1. Potential energy curve

### 3.3 에너지 함수법

전력계통에서  $N$  기 계통의  $i$  발전기에 대한 고장 중과 고장제거 후 동요방정식은 식 (3.11~3.12)로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.11)$$

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

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (3.12)$$

식 (3.11~3.12)를 이용하여 각 발전기들 사이에서  $\theta = \theta_i^s$ ,  $\omega = 0$  으로 하여 평형점을 가지는 구간을 적분하면 고장제거 후 SEP( $\theta_i, \omega$ )는 식 (3.13)과 같다.

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 - \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} f_i(\theta) d\theta_i, \quad i=1,\dots,m \quad (3.13)$$

식 (3.13)을 에너지 함수로 표현하면 식 (3.14)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

$$= V_{KE}(\omega) + V_{PE}(\theta) \quad (3.14)$$

### 4. ATC 계산

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

- 1) ATC를 계산하기 위한 Base Case를 구성한다.
- 2) Jacobian 행렬을 이용하여 전압안정도 평가를 위한 계통의 취약모션을 선정한다. (이 조건은 고장전 상정사고 우선순위를 미리 지정하여 ATC 계산의 소요시간을 단축시킬 수 있다.)
- 3) 반복조류계산(RPF) 방법[5]을 이용하여 ATC를 계산하고, 이때의 제약조건은 선로의 열적 용량으로 한다.
- 4) 에너지 함수법을 이용하여  $t_{cl}$  (고장제거시간)을 계산한다.
- 5) 계산된  $t_{cl}$  과  $t_{crit}$  (고장제거 임계시간)을 비교한다.

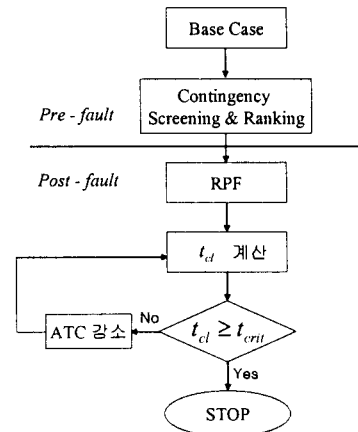


그림 2. ATC 계산을 위한 흐름도  
Fig. 2. Flowchart for ATC calculation

에너지함수법을 이용한 가용송전용량(ATC) 계산에 관한 연구

- $t_{cl} \geq t_{crit}$  이면 시스템은 안정한 상태이며,
- $t_{cl} \leq t_{crit}$  이면 시스템은 불안정 상태이다.

본 논문에서는 고장제거 임계시간을 0.1초(Relay 또는 차단기 동작시간을 0.1초로 가정)로 선정하였다.

- 6) 5)의 조건을 만족하면 프로그램이 종료되고, 만족하지 않으면 ATC를 감소시켜 2-3)의 조건을 반복하여 문제의 해를 구한다.

### 5. 실험 결과

#### 5.1 WSCC 9모선 계통

사례 연구를 위한 모의실험 계통은 WSCC 9모선 계통을 이용하였으며, 그림 3에서와 같이 3개의 지역으로 나누어 모의실험을 실시하였다. 모든 모선의 전압은 0.95~1.05[PU] 범위에 있으며, 과부하 되는 선로가 없게 선로용량을 산정하였고, 스윙모선은 Bus 1번이다. 표 1은 기준 값으로 WSCC 9모선 계통의 발전량과 부하량의 기준 값을 나타내었다.

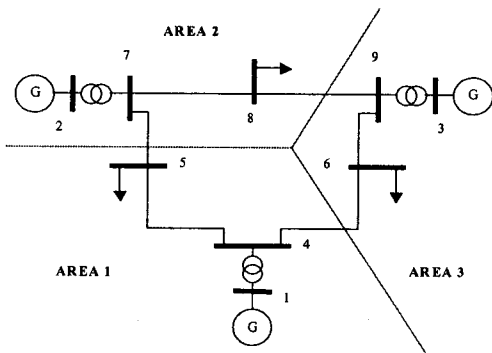


그림 3. WSCC 9모선 계통  
Fig. 3. WSCC 9 bus system

표 2는 Jacobian Matrix를 이용하여 조류계산을 수행하고 여기서 Eigen-value를 구하여 가장 취약한 모선을 선정한 결과 Bus 5번이 음의 부호 값을 나타내고 있어 가장 취약한 모선으로 선정되었다.

표 1. WSCC 9모선계통의 기준 값  
Table 1. Base case of WSCC 9bus system

AREA	Generation		Load		Loss	
	[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	[MW]	[Mvar]
1	72.0	27.05	125.0	50.0	0.3	7.1
2	163.0	6.65	100.0	35.0	2.9	32.6
3	85.0	-10.86	90.0	30.0	1.7	12.3
Total	319.6	22.84	315.0	115.0	4.9	52.1

표 2. WSCC 9모선계통의 Eigen-value  
Table 2. Eigen-value of 9 bus system

Bus No.	Eigen-value	
	$\Delta P$	$\Delta Q$
4	0.00	0.00
5	-0.41	0.00
6	3.98	0.66
7	16.71	2.56
8	17.74	1.33
9	20.87	1.23

#### 5.2 모의실험 결과

CASE 1 : 모의 계통의 시뮬레이션 시나리오는 하나의 지역에서 다른 지역으로 송전하는 것을 기준으로 하였다. 수전하는 측의 모선은 6번(Area 3)으로 하고, 송전하는 측의 발전기 모선은 2번(Area 2)으로 선정하였다.

먼저 정적 ATC를 계산하기 위한 선로의 제약조건은 조류에 따라 200[MVA]에서 250[MVA]까지 구분하여 선정하였고, 선로의 열적용량을 제약으로 하였다. RPF 계산 결과 부하는 167.4[MW]까지 증가 되었으며 제약조건 위반은 2-7번 선로에 나타났다. 그림 4는 이때의 위치에너지와 에너지 함수를 나타낸 것이다.

위의 조건을 기준으로 PSS/E 과도안정도 해석 결과를 그림 5에 나타내었다.  $t=0$  인 순간에 Bus 5번에 사고를 발생시켜  $t=0.07$  에 고장을 제거하고 5초간 모의실험 하였다. 실험결과 각 발전기 회전자들의 위상각이 고장제거시간( $t_{cl}$ )범위내에서 안정됨을 알 수 있다.

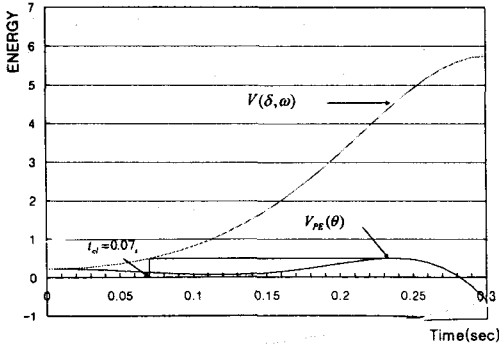


그림 4. 위치에너지와 에너지 함수(정적 ATC 결과)  
Fig. 4. Potential energy and energy function(Steady-state ATC result)

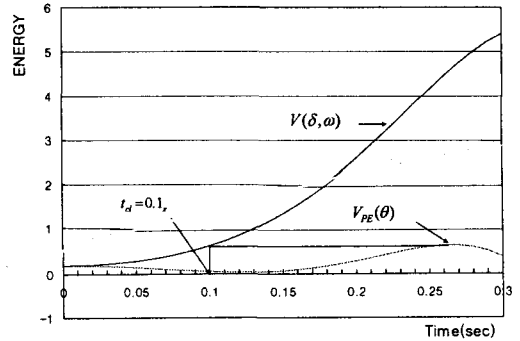


그림 6. 위치에너지와 에너지 함수  
Fig. 6. Potential energy and energy function

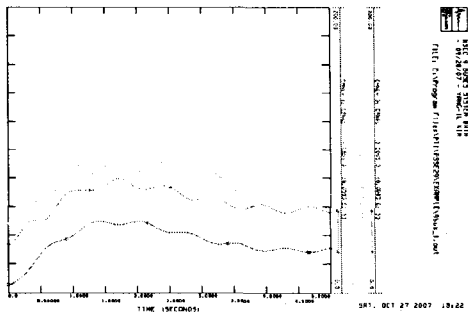


그림 5. 과도안정도 해석 결과  
Fig. 5. Analysis result of transient stability

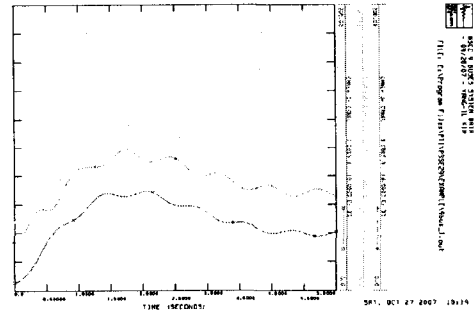


그림 7. 과도안정도 해석결과  
Fig. 7. Analysis result of transient stability

CASE 2 : 모의실험은 과도안정도를 고려한 에너지 함수법을 이용하기 위한 조건으로 선로의 상정사고는 5-7번 선로사고를 고려하였으며  $t=0$  인 순간에 사고를 발생시켜 나타난 위치에너지와 에너지 함수 사이의 그래프는 그림 6과 같다.

그림 4의 실험결과에서  $t_{cl}$  은 0.07초이므로 이 시간이 넘게 되면 계통은 불안정하게 된다. 그러므로 ATC를 감소시켜  $t_{cl}$  이 고장제거 임계시간( $t_{crit}$ )인 0.1초가 되어야 한다. 이때의 위치에너지와 에너지 함수 사이의 그래프를 나타내면 그림 6과 같으며, 부하는 144.9[MW]까지 증가하였다.

그림 7에서는  $t_{crit}$  을 0.1초로 하여 PSS/E로 해석한 결과 ATC는 감소하지만 그림 5에 비해 위상각은 조금 높게 동요하였다. 하지만 점차 안정적인 운전 점을 향하고 있음을 알 수 있다.

표 3은 ATC의 결과를 나타낸 것으로 과도 안정도를 고려하지 않는 Case A인 반복조류계산방법의 ATC 결과는 77.4[MW]로 나타났지만, Case B의 과도안정도를 고려한 경우는 54.9[MW]로 감소되어 증가하였다.

표 3. ATC 결과  
Table 3. ATC results

Case	From	To	ATC	
			P[MW]	Q[Mvar]
CASE A (RPF)	2	6	77.4	25.8
CASE B (EF)			54.9	18.3

정적 상태의 ATC보다 과도안정도를 고려한 ATC의 증대 값이 작았지만 전압안정도와 과도안정도를 둘 다 만족하는 결과 값을 계산하였다.

## 6. 결 론

현재 국내의 전력수요는 해마다 증가추세에 있으며, 또한 국내에 추진중인 전력산업 구조개편은 전력시장에 더욱 혼잡을 가중시키고 있어 ATC의 중요성이 대두되고 있다.

본 논문은 Jacobian Matrix의 Eigen-value를 이용하여 사고 이전에 상정사고의 우선순위를 지정하여 ATC 계산시간을 단축하였다. 과도안정도 해석은 관성중심(COI) 형태의 에너지 함수법을 이용하여 선로의 열적 제약과 과도 안정도를 고려한 ATC 계산 방법을 제안하였다. 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.

전력계통에서 과도안정도 평가는 심각한 상정사고에 대한 안정도 여부를 판단하고 계통의 효율적인 운전을 위한 조치로 계통운영의 매우 중요한 분야이다.

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

### 감사의 글

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

## References

- (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, 21권, 2호, pp. 86-93, 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) H. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, N. Balu, "OPFLOW: 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.
- (5) 김재현, 정성원, "전력계통의 가용송전용량 계산 기법에 관한 연구", 국립7개대학 공동논문집, 제6집, pp. 153-157, 2006.12.
- (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) M.A. Pai, P.W. Sauer, "Power System Dynamics and Stability", Prentice-Hall, 1998.
- (8) C. K. Tang, M. A. El-Kady, R. T. H. Alden, "Energy Margin from Time Domain Simulation using Partial Energy Function", Electrical and Computer Engineering, Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 665-668, Sep. 1994.
- (9) Y. L. Chen, "Weak Bus Oriented Reactive Power Planning for System Security", IEE Proc. vol. 143, No. 6, pp. 541-545, Nov. 1996.
- (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.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김재현 (金在顯)

1956년 1월 25일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 정보통신공학부 교수.  
Tel : (061)750-3545  
Fax : (061)750-3508  
E-mail : jhg@sunchon.ac.kr

### 정성원 (鄭盛元)

1975년 11월 26일생. 2002년 순천대학교 전기제어공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 박사수료. 현재 국립 순천대학교 전기 제어공학과 시간강사.  
Tel : (061)750-3540  
Fax : (061)750-3508  
E-mail : ww180@sunchon.ac.kr

### 김양일 (金良一)

1971년 7월 24일생. 2000년 순천대학교 물리학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 2월 동 대학원 졸업(박사).  
Tel : (061)750-3540  
Fax : (061)750-3508  
E-mail : kimyi007@hanmail.net