

# 과도 안정도를 고려한 수송능력 산정 알고리즘의 개발에 관한 연구

論 文
55A-1-5

## A Study on Development of Power Transfer Capability Calculation Algorithm Considering Transient Stability

金龍河<sup>†</sup> · 崔祥圭<sup>\*</sup> · 李范<sup>\*\*</sup> · 趙成麟<sup>\*\*\*</sup> · 吳錫賢<sup>\*\*\*</sup> · 金東槿<sup>§</sup>

(Yong-Ha Kim · Sang-Kyu Choi · Byum Lee · Sung-rin Cho · Seok-Hyun Oh · Dong-keun Kim)

**Abstract** - This paper presents a power transfer capability calculation algorithm considering transient stability. The theoretical development is straightforward: dynamic equations are converted to numerically equivalent algebraic equation and then integrated into the standard formulation for power transfer capability calculation. The proposed method is applied to IEEE-24 Reliability Test System and the results shows the effectiveness of the method.

**Key Words** : 수송능력, 과도안정도제약조건, 동요방정식, 단단법, Trapezoidal Rule

### 1. 서 론

전력계통은 그 구조상 사고가 필연적일 수밖에 없고 이런 이유 때문에 과도안정도는 계통 운영상에 고려해야만 하는 필수적 요건 중에 하나이다. 과도안정도는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 회전자 위상각 안정도의 유지여부에 관한 계통능력을 말한다. 과도 안정도는 외란의 정도와 운전조건에 따라 달라지며 계통이 안정한가 불안정한가의 판별은 보통 외란 발생 후 약 1~2초 이내 결정된다. 이것은 실제 기기에서 제1차 동요가 안정될 때까지 주기가 대체로 1초 정도로 되기 때문이다. 동기 발전기들이 동기속도에서 운전하면서 규정된 전기적 출력을 내는 정상적인 전력계통에서 낙뢰, 산불 등에 의한 지락 또는 단락 고장 등으로 인하여 동기 탈조하는 문제를 야기할 수 있으며 전력계통에서 이와 같은 과도 불안정을 통해서 동기를 잃는 경우 손실비용은 매우 크다. 따라서 이러한 문제를 피하기 위하여 지금까지 많은 학자 및 기술자들에 의해 과도안정도분야에 대한 연구가 활발하게 진행되어져 왔다.[1,2,3] 본 연구에서는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 전력계통의 안전한 운전을 위하여 전력계통의 수송능력계산 문제에 과도안정도 제약조건을 고려할 수 있는 방법을 제안한다. 이를 위하여 과도안정도제약식을 수송능력계산문제에 고려할 수 있도록 먼저, 과도안정도 제약조건식을 정식화하였다. 또한 과도안정도 제약조건식은 미분방정식을 포함하고 있으므로 이 제약조건

을 곧바로 수송능력계산문제의 운전제약으로 사용하여 수송능력을 계산할 수가 없으므로 trapezoidal rule[4]을 이용하여 미분방정식으로 표현되는 과도안정도 제약조건식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환한 다음 수송능력계산문제의 과도안정도 운전제약조건으로 포함시켰다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산을 선형화한 다음 LP문제로 수송능력계산을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용시켜 본 연구의 타당성을 검증하고 각종 유용한 정보를 도출하였다.

### 2. 과도안정도

#### 2.1 단단법

단단법(step by step method)이란 전력계통의 외란 발생시에 있어서 연속적으로 변동하는 입출력, 각속도 등의 제량이 아주 짧은 시간에서는 계단적으로 변화하는 것으로 생각하고, 각 계단마다의 미소변화를 축차 계산해서 이것을 차례차례로 접속해 나가는 계산 방법이다. 즉, 임의의 동기기가 계통에 외란이 발생해서 입출력의 평형이 깨어지게 되면 각속도, 위상각이 이에 따라서 변동하게 되는데 이때의 변동상황은 다음 식(1)의 동요방정식을 풀면 구할 수 있다.

$$\frac{d^2\delta_i}{dt^2} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad (1)$$

단,  $\delta_i$  : 발전기  $i$ 의 회전자 위상각

$f$  : 계통의 공칭 주파수,

$H_i$  : 발전기  $i$ 의 관성정수

$P_{mi}$  : 발전기  $i$ 의 기계적 입력

$P_{ei}$  : 발전기  $i$ 의 전기적 출력

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 인천대학교 전기공학과 교수  
E-mail : yhkim@incheon.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 안양과학대학 전자통신정보학부 교수

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 여수대학교 전자통신전기공학부 교수

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 한국전력공사

<sup>§</sup> 正會員 : 인천대학교 전기공학과 석사

接受日字 : 2005年 9月 15日

最終完了 : 2005年 11月 1日

위의 식(1)에서  $\delta_i$ 은 단단법에서 다음 식(2),(3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta\delta_i^{(m+1)} = \Delta\delta_i^{(m)} + \frac{\pi f}{H_i}(P_{mi} - P_{ei})(\Delta t)^2 \quad (2)$$

$$\delta_i^{(m+1)} = \delta_i^{(m)} + \Delta\delta_i^{(m+1)} \quad (3)$$

$$P_{ei} = \frac{1}{X_{di}}(E_i V_i \cos\theta_i \sin\delta_i - E_i V_i \sin\theta_i \cos\delta_i)$$

$V_i$  : 발전기  $i$ 가 포함된 모선의 전압의 크기

$\theta_i$  : 발전기  $i$ 가 포함된 모선의 전압위상각

$E_i$  :  $i$ 번째 발전기의 과도리액턴스 배후전압 크기

$X_{di}$  :  $i$ 번째 발전기의 과도리액턴스

$m$  : 계산시점,  $\Delta t$  : 계산시간 interval

이를 통해서 계통의 외란 발생 후 1~2초 사이의 각 시점 별로 각 발전기의 위상각의 변화를 구함으로써 그 계통이 외란 발생 후에도 안정한가 불안정한가를 판정할 수 있다.

### 2.2 과도안정도 제약조건

본 연구에서는 전력계통에 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 일어났을 경우 전력계통의 안전한 운전을 위하여 전력계통의 수송능력계산 문제에 다음에 설명하는 과도안정도제약조건을 고려할 수 있는 방법을 제안한다. 먼저, classical model에 따르면 동요방정식은 다음 식(5)로 정식화된다[6].

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i \quad (4)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i}(P_{mi} - \frac{1}{X_{di}}(E_i V_i \cos\theta_i \sin\delta_i - E_i V_i \sin\theta_i \cos\delta_i)) = K_i(P_{mi}, E_i, V_i \cos\theta_i, V_i \sin\theta_i, \delta_i) \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} G & -B \\ B & G \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V \cos\theta \\ V \sin\theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_x \\ I_y \end{vmatrix} \quad (6)$$

단,  $G, B$  : 모선 어드미턴스 행렬의 실수, 허수 부분

$V_i \cos\theta_i$  : 발전기  $i$ 가 포함된 모선의 전압의 실수부

$V_i \sin\theta_i$  : 발전기  $i$ 가 포함된 모선의 전압의 허수부

$w_i, \delta_i$  :  $i$ 번째 발전기의 회전자 각속도 및 각도

위의 식(6)에서  $i$ 번째 모선에 유입전류의 실수부분과 허수부분은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{xi} = \frac{E_i \sin\delta_i}{X_{di}}, I_{yi} = -\frac{E_i \cos\delta_i}{X_{di}} \quad (\text{generator buses})$$

$$I_{xi} = 0, I_{yi} = 0 \quad (\text{nongenerator buses})$$

또한, 과도안정도를 만족시키기 위한 운전제약조건은 다음 식(7)로 표현된다.

$$\widehat{\delta}_i = \delta_i - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \widehat{\delta}_i^{\text{lim}} \quad (7)$$

단,  $ng$  : 발전기의 수,

$\widehat{\delta}_i^{\text{lim}}$  :  $\widehat{\delta}_i$ 에 대한 상한치

$\widehat{\delta}_i$  : center-of-inertia(COI) reference frame에 대한

회전자 각도

결국 본 연구에서 과도안정도를 만족시키기 위한 운전제약조건은 식(4)~(6)의 등호제약조건과 식(7)의 부등호제약조건으로 구성된다. 지금,식(4)~(6)로 표현되는 등호제약조건은 미분방정식이므로 곧바로 수송능력계산의 등호제약조건으로 사용할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 trapezoidal rule을 이용하여 이 미분방정식으로 표현되는 과도안정도 제약조건을 다음과 같이 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환하였다.

$$\delta_i^{m+1} - \delta_i^m - \frac{\Delta t}{2}(\omega_i^{m+1} + \omega_i^m) = 0 \quad (8)$$

$$\omega_i^{m+1} - \omega_i^m - \frac{\Delta t}{2}(K_i^{m+1} + K_i^m) = 0 \quad (9)$$

( $m=1,2,\dots,NT$   $i=1,2,\dots,ng$ )

단,  $\Delta t$  : 적분스텝 길이,  $NT$  : 적분스텝의 수

그리고 식(6),(7)을 각각의 적분스텝에 대하여 구성하면 다음 식(10)~(12)과 같이 표현된다.

$$\sum_{k=1}^n (G_{ik} V_k^{m+1} \cos\theta_k^{m+1} - B_{ik} V_k^{m+1} \sin\theta_k^{m+1}) - I_{xi}^{m+1} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^n (B_{ik} V_k^{m+1} \cos\theta_k^{m+1} + G_{ik} V_k^{m+1} \sin\theta_k^{m+1}) - I_{yi}^{m+1} = 0 \quad (11)$$

$$\delta_i^m - \frac{\sum_{j=1}^{ng} H_j \delta_j^m}{\sum_{j=1}^{ng} H_j} \leq \widehat{\delta}_i^{\text{lim}} \quad (12)$$

### 3. 과도안정도를 고려한 수송능력 계산문제

#### 3.1 수송능력

일반적으로 수송능력 계산문제는 주어진 부하 및 계통조건 하에서 연구지역에서 참여지역으로 또는 참여지역에서 연구지역으로 보낼 수 있는 최대전력수송능력을 계산하는 문제이며 다음과 같이 정식화된다.

$$\text{Max} \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (13)$$

S.t. 조류방정식

운전제약조건

제어변수의 상·하한

단,  $P_{ij}$  : 선로  $i$ - $j$ 사이를 흐르는 유효전력

$K$  : 지역(Area)들을 연결하는 연계선의 집합

본 연구에서는 위의 식(13)로 정식화되는 수송능력 문제의 효율적인 계산을 위하여 가상발전기 개념[5]을 도입하여 수송능력계산 문제를 다음과 같이 정식화하였다.

$$\text{Max.} \mu \sum_{(i,j) \in K} (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (14)$$

S.t. 전력평형식

운전제약조건

제어변수의 상하한

단,  $\mu$  : 가중치

$\Delta P_{Mi}, \Delta Q_{Mi}$  : 가상발전기 출력 변화량

3.2 과도안정도제약조건을 고려한 수송능력계산문제의 정식화

앞의 식(14)로 구성되는 수송능력계산문제에 과도안정도 제약식을 고려하면 수송능력계산문제는 다음과 같이 정식화 된다.

목적함수

$$\text{Max. } \mu \sum_i^n (|\Delta P_{Mi}| + |\Delta Q_{Mi}|) + \sum_{(i,j) \in K} P_{ij} \quad (15)$$

제약조건식

$$\sum_i P_{Gi} - P_L - q = 0 : \text{전력평형식} \quad (16)$$

$$V_{Di}^{\min} \leq V_{Di} \leq V_{Di}^{\max} : \text{부하모선 전압크기} \quad (17)$$

$$Q_{Gi}^{\max} \leq Q_{Gi}(X, U) \leq Q_{Gi}^{\min} : \text{발전기모선의 무효전력} \quad (18)$$

$$F_i(X, U) \leq F_i^{\max} : \text{선로피상조류} \quad (19)$$

단,  $P_L$  : 총계통부하

$q$  : 총계통손실

$X$  : 상태변수( 부하모선 전압크기, 위상각)

$U$  : 제어변수( 변압기 탭, 발전기모선 전압크기, 조상설비, 발전기의 유효 전력출력)

과도안정도 제약조건: 식(8)~식(12)

제어변수관련 제약식

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} : \text{변압기 탭} \quad (20)$$

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} : \text{발전기 모선전압} \quad (21)$$

$$b_{ci}^{\min} \leq b_{ci} \leq b_{ci}^{\max} : \text{Shunt Capacitor} \quad (22)$$

$$b_{ri}^{\min} \leq b_{ri} \leq b_{ri}^{\max} : \text{Shunt Reactor} \quad (23)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} : \text{발전기의 유효전력출력} \quad (24)$$

본 연구에서는 과도안정도를 고려한 수송능력계산을 LP문제 제로 해결하였고 이 경우 비선형식의 선형화를 위하여 대규모 계통에서 계산속도와 정확도면에서 효율성이 우수한 것으로 입증된 Costate 방법을 이용하였다.

본 연구에서 제안한 과도안정도를 고려한 수송능력계산 문제에 대한 계산 흐름도는 그림1과 같다.

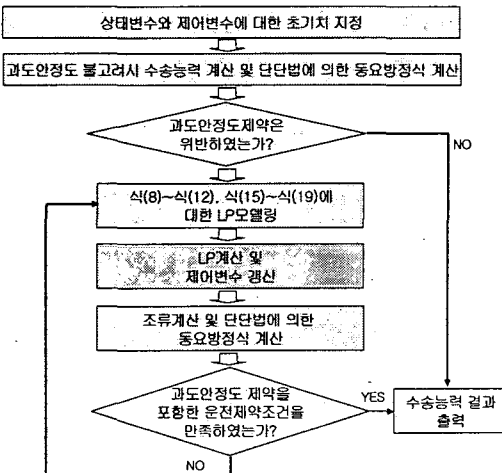


그림 1. 과도안정도를 고려한 수송능력산정 흐름도  
Fig. 1 Flow chart of Transfer Capability Calculation considering Transient stability

4. 사례연구

그림2는 본 연구에서 사례연구를 위해서 적용한 IEEE RTS-24모델계통을 보여준다. 그리고 표1은 각 발전기에 대한 과도리액턴스 및 관성정수를 나타낸다.

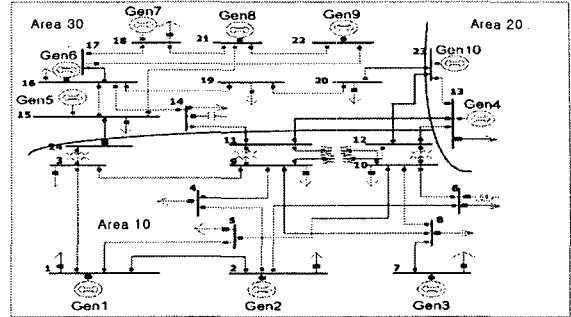


그림 2 IEEE RTS-24 모선 모델계통

Fig. 2 IEEE RTS-24 Model System

표 1 과도리액턴스 및 관성정수

Table 1 Transient reactance and inertia constant

발전기번호	$X'_d$ [PU]	H[sec]
1	0.62	40
2	0.166	10
3	0.5198	40
4	0.2	20
5	0.1	8
6	0.12	6.4
7	0.06	10
8	0.067	11.2
9	0.07	7
10	0.5	40

본 연구에서는 그림2의 계통으로부터 20번, 30번 지역에서 10번 지역으로 보낼 수 있는 최대수송능력을 계산하였으며, 먼저 과도안정도를 고려하지 않은 수송능력 계산 결과를 이용하여 단단법을 통한 과도안정도를 판별을 수행하였다. 즉, 그림 2의 24모선 모델계통의 선로 5-10의 5번 모선 부근에서 3상 단락고장이 발생하였을 경우를 가정하고 고장난 5번-10번 모선간의 선로 양단 차단기를 고장 발생 후 각각 0.3초, 0.4초, 0.5초에 동작하여 고장을 제거한 경우에 대한 결과를 얻어 보았다. 이 때 사고발생 후 고장제거시간에 따른 각 발전기별 위상각 추이를 살펴보면 그림 3,4와 같다.

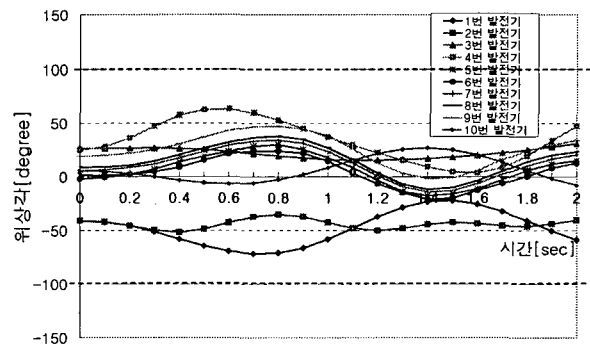


그림 3 사고발생 0.3초후 고장제거시 발전기 위상각 변화  
Fig. 3 Generator angle change of fault elimination case after 0.3 second that fault occur.

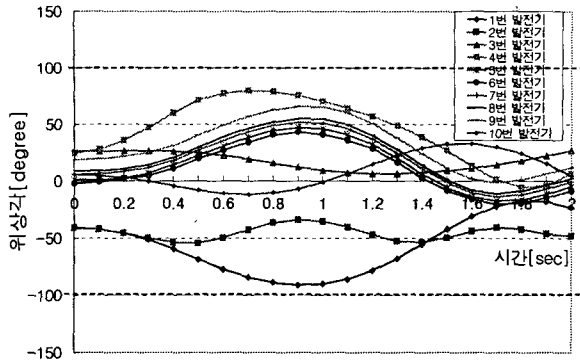


그림 4 사고발생 0.4초 후 고장제거시 발전기 위상각 변화  
 Fig. 4 Generator angle change of fault elimination case after 0.4 second that fault occur.

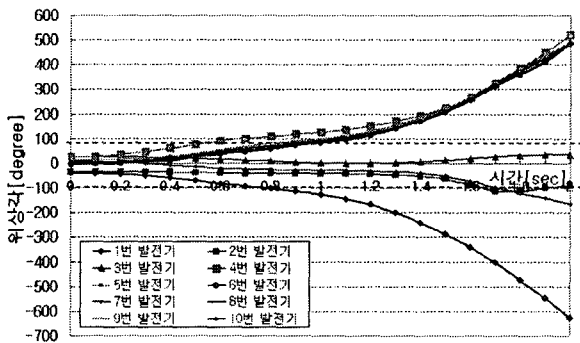


그림 5 사고발생 0.5초 후 고장제거시 발전기 위상각 변화  
 Fig. 5 Generator angle change of fault elimination case after 0.5 second hat fault occur.

위의 그림 3,4,5의 결과에서 알 수 있듯이 과도안정도를 고려하지 않은 수송능력 결과를 이용하여 과도안정도 판별을 할 경우 사고발생 후 0.3, 0.4초에 고장 제거 시 까지는 고장제거시점이 지연될수록 발전기 위상각의 동요는 증가하지만 식(12)의 과도안정도 제한치(본 연구에서는  $\pm 100^\circ$ )[3]를 위반하지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 0.5초에 고장을 제거할 경우에는 3번 발전기를 제외한 모든 발전기가 과도안정도 제한치를 위반하여 과도안정도가 불안정하게 된다는 것을 알 수 있다. 다음에는 사고발생 0.5후 고장제거시의 경우에 대하여 본 연구에서 제시한 과도안정도를 고려한 수송능력 계산 결과를 이용하여 과도안정도를 판별을 수행하였다. 이 경우 모든 발전기의 위상각이 과도안정도 제한치를 만족하였으며, 그림 6은 0.5후 고장제거시 발전기 위상각 위반량이 가장 큰 1번 발전기에 대하여 과도안정도 고려시와 불고려시에 각각에 대하여 시간변화에 따른 발전기 위상각 변화를 비교한 것을 보여 준다. 이 그림을 통하여 알 수 있듯이 과도안정도를 고려하지 않은 수송능력결과는 0.5초후 고장제거시 과도불안정 상태가 되는 반면에 과도안정도를 고려한 수송능력 결과는 발전기의 위상각 변화가 과도안정도 제한치를 위반하지 않으므로 계통의 과도안정도가 안정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 즉, 과도안정도제약을 반영함으로써 과도불안정상태로 나타난 사고발생 0.5초후 고장제거 시에도 계통의 과도안정도가 안정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

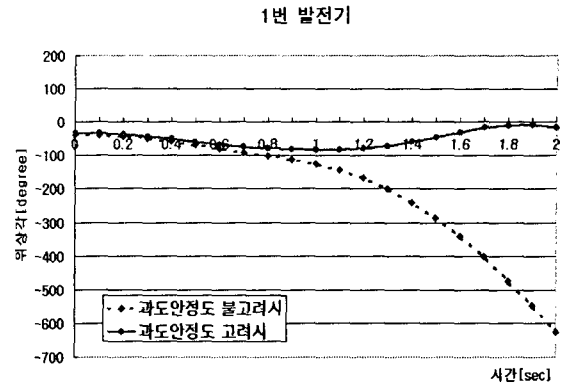


그림 6 사고발생 0.5초 후 고장제거시 1번 발전기 위상각 변화  
 Fig. 6 1th generator angle change of fault elimination case after 0.5 second

다음에 그림 7은 과도안정도 불고려시 수송능력 계산결과와 과도안정도 고려시의 수송능력 계산결과에 관한 그래프이다. 과도안정도 불고려시는 반복회수 7회 만에 최대 수송능력은 826.985[MW]로 계산된 반면에 과도안정도 고려시는 반복회수 3회 만에 최대 수송능력은 727.268[MW]로 계산되었다. 이 결과로부터 과도안정도 제약조건을 고려할 경우 과도안정도는 만족되는 반면에 수송능력은 감소한다는 것을 알 수 있다.

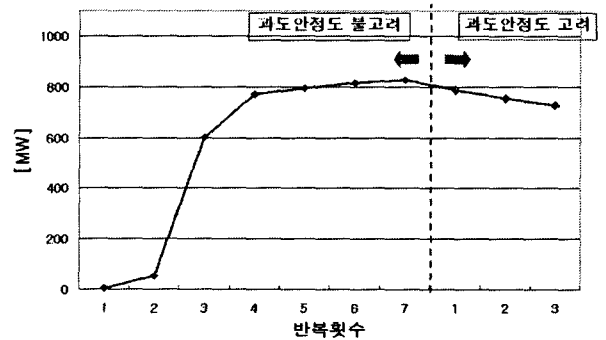


그림 7 과도안정도 고려시와 불고려시의 수송능력  
 Fig. 7 Transfer capability Calculation Result considering and unconsidering transient stability

### 5. 결 론

본 연구에서는 과도안정도 제약을 고려하여 수송능력을 산정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 즉 과도안정도제약조건을 수송능력계산문제에 반영하기 위하여 과도안정도제약식을 정식화하였고 이와 같이 정식화된 과도안정도제약식은 미분방정식으로 표현되므로 곧바로 수송능력 계산문제의 등호 제약조건으로 사용할 수 없다. 본 연구에서는 trapezoidal rule을 이용하여 미분방정식으로 표현되는 과도제약식을 수학적으로 등가적인 대수방정식으로 변환함으로써 과도안정도제약식을 수송능력 계산문제에 반영할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 이와 같이 정식화된 비선형 수송능력계산문제의 효율적인 계산을 위해 정확도면에서 우수한 것으로 입증된 Costate방법을 사용하여 비선형식으로 표현되는 수송능력 계산문제를 선형화한 다음 LP문제로 수송능력계산을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였고 본 방법의 유용성을 검증하였다.

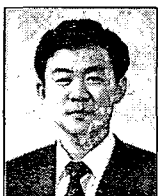
**감사의 글**

“본 논문은 2004년도 인천대학교 자체연구비의 지원과 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2004-B-132)주관으로 수행된 과제임.”

**참고 문헌**

- [1] M. La Scala, M. Trovato, and C. Antonelli, "On-line Dynamic Preventive Control: An Algorithm for Transient Security Dispatch", IEEE T-PWRS, Vol. 13, No. 2, May, 1998, pp. 601-610
- [2] E. De Tuglie, M. La Scala, and P. Scrapellini, "Real-Time Preventive Actions for the Enhancement of Voltage-Degraded Trajectories" IEEE T-PWRS, Vol.14, NO.2, May, 1999, pp.561-568
- [3] D. Gan, R. J. Thomas and R. Zimmermann, "Stability Constrained Optimal Power Flow" forthcoming in IEEE T-PWRS, 2000.
- [4] F. Alvarado, "Parallel solution of transient problems by trapezoidal integration," IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems, vol. 98, no. 3, pp. 1080-1090, May/June 1979
- [5] 조재한, 남광우, 김용하, 이 범, 최상규 "Monte Carlo Simulation을 이용한 Power Wheeling 영향평가 알고리즘에 관한 연구", KIEE Summer Annual Conference, pp 1111-1113, 7. 1999
- [6] P. W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.

**저 자 소 개**



**김용하(金龍河)**

1959년 5월 16일생.  
 1982년 고려대학교 전기공학과 졸업.  
 1987년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).  
 현재 인천대학교 전기공학과 교수.



**최상규(崔祥圭)**

1960년 12월 22일생.  
 1983년 고려대학교 전기공학과 졸업.  
 1986년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).  
 현재 안양과학대학 전자통신정보학부 교수.



**이범(李范)**

1959년 10월 28일생.  
 1981년 고려대학교 전기공학과 졸업.  
 1989년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).  
 현재 여수대학교 전자통신전기공학부 교수.



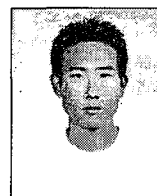
**조성린(趙成麟)**

1961년 1월 10일생.  
 2004년 인천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 현재 동대학원 전기공학과 박사과정. 한국전력공사 근무.



**오석현(吳錫賢)**

1976년 4월 18일생.  
 2003년 인천대학교 전기공학과 졸업.  
 2005년 인천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
 현재 한국전력공사 근무.



**김동근(金東權)**

1976년 12월 24일생.  
 2003년 인천대학교 전기공학과 졸업.  
 2005년 인천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).