

## A New Stabilizing Method for Transiently Unstable Systems by Using Transient Energy Function

金正祐\* · 全瑩煥†  
(Jung-Woo Kim · Yeong-Han Chun)

**Abstract** - Transient security assessment(TSA) is becoming an essential requirement not only for security monitoring but also for stabilizing control of power systems under new electricity environments. It has already been pointed out that fast transient stability study is an important part for monitoring and controlling system security.

In this paper, we discuss an energy function method for stabilizing control of transiently unstable systems by introducing generator tripping system to enhance the transient stability of power systems. The stabilization with less tripped power can be obtained by tripping the generators faster than out-of-synchronism relay. Fast transient stability assessment based on the state estimation and direct transient energy function method is an important part of the stabilizing scheme. It is possible to stabilize the transiently unstable system by tripping less generators before the action of out-of-synchronism relay, especially when a group of generator are going to be out-of-synchronism. Moreover, the amount of generator output needed for tripping can be decided by Transient Energy Function(TEF) method. The main contribution of this paper is on the stabilizing scheme which can be running in the Wide Area Control System.

**Key Words** : transient energy function, energy margin, critical time, mode of instability

### 1. 서 론

우리나라와 같이 부하가 지속적으로 증가하는 시스템에서, 송전망의 보강이 충분하지 않은 경우에는 계통의 안정도 마진이 줄어들게 되고, 고장과 같은 외란에 의해 발전기의 동기 탈조와 같은 과도 불안정 현상이 일어나게 된다. 전력 계통의 과도안정도는 상정사고 등 대규모 외란이 계통에 유입되었을 때, 계통이 유입된 외란을 극복하고 안정하게 유지될 수 있는지의 여부를 나타내는 것으로, 과도안정도가 확보되지 않을 경우에는 외란에 의해 동기탈조가 발생하게 되고, 이에 따라 계통이 붕괴되는 것을 방지하기 위해 부하를 차단하는 등, 공급 신뢰도를 악화시키기 때문에 사전에 안정도를 확보하는 것은 전력계통의 운영에 있어서 매우 중요한 문제이다.

현재 과도안정도 해석 방법으로 쓰이고 있는 시간모의방법은 계통 요소들을 자세히 표현할 수 있는 장점을 갖고 있는 반면, 안정 여부 판정만으로 제한되며 계통을 해석하는데 있어서 많은 시간과 경험을 필요로 하는 등 계통의 온라인 해석을 하는데 있어서의 어려운 측면을 다수 지니고 있다.

이러한 문제점 때문에, 실시간 급전 시스템에 안정도의 반영이 어렵고, 이에 따라 계통의 안정도 반영을 위해서는

오프라인으로 안정도를 검토할 수밖에 없었다. 이는 전력 조류 패턴이 수시로 바뀔 수 있는 상황에서 계통의 안정도를 고려하는데 많은 어려움이 따르고, 계통의 불안정한 상태를 야기할 수 있다. 계통에 과도 불안정 상태가 일어나면 일반적으로 불안정한 요소인 발전기를 계통에서 분리시키는데, 이는 발전기와 계통을 보호하려는 조치로, 계통의 수급 불균형 상태를 일으키게 된다. 이로 인한 발전력 부족으로 부하 차단이 일어나거나, 사고가 심할 경우 대규모 정전까지 사고가 확대된다. 이러한 경우, 불안정 발전기 그룹의 발전력을 감발 운전함으로써 계통을 안정화 시킬 수 있지만 이러한 경우에는 대부분의 경우 운전비용의 증가라는 대가를 치르게 된다. 불안정 발전기 그룹이 원자력 발전기와 같은 운전비용이 저렴한 발전기 군으로 이루어지는 경우에는 전체 운전비용이 상승하기 때문이다. 따라서 과도 불안정을 야기하는 시스템을 운전하기 위해서는 문제 해결을 위한 보다 효과적인 제어 방법에 대한 연구가 필요하다.

이에 따라 본 논문에서는 과도불안정 시스템을 안정화시키는 방법으로 불안정 발전기 군에서 최소한의 용량으로 짧은 시간 내에 발전기를 탈락시킴으로써, 계통을 안정화 시키는 방안을 모색하였다. 이를 위하여 빠른 과도안정도 판별이 가능하고 안정한 정도의 해석이 가능한 에너지 함수 방법을 통하여, 적절한 발전기의 탈락 용량과 탈락 시간을 산정함으로써 계통의 추가적인 사고를 막고, 계통을 안정화 시키는데 그 주안점을 두었다. 다시 말해, 과도안정도 제어를 실시간으로 실행함으로써, 과도안정도 문제 발생 시 동기탈조 보호 계전기가 발전기의 동기탈조를 감지하여 차단하기 전에, 불

\* 學生會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 碩士課程

† 교신저자, 正會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 副教授 · 工博

E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

接受日字 : 2008年 3月 14日

最終完了 : 2008年 3月 24日

안정 요소인 발전기 중 일부를 초기에 계통에서 탈락시켜, 발전기 탈락 용량을 줄이고 부하차단이 일어나지 않도록 하는 등, 계통 피해를 최소화하는데 그 목적을 두고 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 에너지 함수 방법

에너지 함수 방법은 등면적법과 함께 과도안정도를 다루는 대표적인 직접법으로, 외란에 의해 발생하는 계통 동요 현상을 에너지 함수를 이용하여 과도에너지와 임계에너지로 계산하여 안정도를 판별하는 방법이다. 과도에너지는 외란 기간동안 계통에 유입된 에너지로 발전기를 계통으로부터 분리시키려는 에너지이고, 임계에너지는 계통의 과도에너지를 흡수할 수 있는 능력을 말한다. 여기서의 에너지는 고장 제거후의 계통을 위치에너지와 운동에너지로 구성된 함수로 계산한다.

#### 2.1.1 관성 중심 기준축에 의한 계통의 정식화

에너지 함수 방법은 식(1)의 관성중심(COI : Center of Inertia) 기준축에 대한 각 발전기의 운동방정식으로부터 얻어진다.

$$M_i \ddot{\omega} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

여기서,  $\theta_i = \delta_i - \delta_{COI}$ ,  $\tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_{COI}$

$$\delta_{COI} = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i, \quad \omega_{COI} = \sum_{i=1}^n M_i \omega_i$$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}), \quad M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

#### 2.1.2 에너지 함수

에너지 함수는 식(1)에서 식(2)와 같이 에너지 적분에 의해 얻어진다. 이는 운동에너지와 위치에너지 두 요소로 구성되는 에너지 함수이다.

$$V = \int_{t_s}^t \sum_{i=1}^n \left[ M_i \tilde{\omega}_i - P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \right] \dot{\theta}_i dt \quad (2)$$

과도에너지와 임계에너지는 안정 평형점을 하한으로 하고, 고장제거 시점, 제어불안정 평형점을 각각 상한으로 하여 구할 수 있다.

### 2.2 과도안정도 제어 방법

본 논문에서 제안하는 과도안정도 제어 방법의 목적은 과도안정도 문제 발생 시에, 불안정 모드의 발전기를 계통에서 빠르게 분리시켜 계통을 안정화 시키고 그에 따른 계통의 피해를 최소화시키는데 있다. 이 방법은 동기탈조 보호 계전기가 발전기의 동기탈조를 감지하여 발전기를 차단하기

전에, 과도 불안정을 판단하여 적절한 양의 과도 불안정 발전기를 탈락시킴으로써 나머지 다른 과도 불안정 발전기를 안정화시킬 수 있고, 결과적으로 동기탈조 보호계전기가 동작하기 전에 계통을 안정화시킬 수 있다는 장점이 있다.

본 논문은 계통을 안정화시키는데 따르는 손실을 최소화하는 데 그 목적이 있고, 이를 에너지 함수 방법을 통해 구현하고자 한다. 과도안정도 판별로만 사용되었던 기존의 에너지 함수 방법을 빠른 계산시간과 정량적 해석 등의 장점을 활용한다면, 효과적인 온라인 과도안정도 제어의 방법으로 사용 가능하다고 볼 수 있고, 이에 따라 에너지 함수를 이용한 과도안정도 제어 방법에 대하여 논한다. 이와 관련하여, 에너지 함수 방법은 계통의 안정에 대한 정량적 해석이 가능하기 때문에, 그 지수인 에너지 마진을 이용하여 제어 시점과 계통의 안정 여부에 관한 관계에 대하여 연구하였다.

과도안정도를 제어하기 위한 발전기 탈락에 대해, 에너지 함수 방법에서의 물리적 특성에 대한 분석과 함께, 이로 인하여 변환된 계통 상태를 파악하는 문제에 있어서 정확한 해석이 필요하다. 에너지 함수 방법에서 계통을 해석하는데 있어서의 발전기 탈락에 의한 변화는 에너지 측면에서 해석할 수 있고, 이는 다시 말해 계통의 운동에너지와 위치에너지의 변화로 나타난다.

먼저, 과도에너지의 일부를 차지하는 운동에너지의 감소를 들 수 있는데, 발전기 탈락을 과도안정도 제어에서의 효과적인 방법으로 생각할 수 있는 이유도 여기에 있다. 다시 말해, 불안정 모드의 가속하고 있는 발전기 일부를 제거함으로써, 계통을 불안정하게 이끄는 요소 중 일부를 제거하는 것으로 해석할 수 있고, 이를 에너지 함수 방법에서의 과도안정도 제어로 생각할 수 있기 때문이다. 하지만 발전기 탈락에 의한 계통 구성 요소의 변화들로 과도안정도 제어 이후의 계통을 재해석해야 하고, 이에 따라 운동에너지 감소 이외에도 과도안정도 제어에 의한 계통의 상태 변화를 에너지 함수 방법에서 정확히 구현하여야 한다.

이에 따라, 발전력 부족으로 인한 수급 불균형과 발전기 탈락에 따른 관성 중심 기준축의 변화, 그리고 안정 평형점과 불안정 평형점의 *dimension* 변화 등을 에너지 함수 방법에서 새로이 해석해야 하고, 이는 과도에너지 중 위치에너지 보정작업에 해당된다. 따라서 이번 장에서는 에너지 함수를 이용한 과도안정도 제어 방법이 만들어지는 과정에 대해 다루고, 이와 연관되는 에너지 함수 방법에서의 보정 작업과 이를 이용하여 계통을 해석하는 알고리즘에 대하여 논한다.

#### 2.2.1 운동에너지 감소

본 논문에서 제안하고 있는 온라인 과도안정도 제어 방법은 불안정 모드의 발전기 중 일부를 빠른 시간 내에 탈락시키는 것이고, 이것은 과도에너지의 일부를 차지하고 있는 발전기의 회전자 운동에너지를 제거하는 것으로 해석 가능하다. 불안정 모드에 속한 발전기들은 계통의 운전점을 제어 불안정 평형점을 향하는 방향으로 진행시킬 것이고, 운전점을 불안정 평형점으로 진행시키는 에너지를 줄여 운전점이 제어 불안정 평형점에 도달하지 못하게 하는 데 그 의미를 갖고 있다.

그림 1은 편의상 계통을 2차원으로 표현한 에너지 함수 방법의 개념도이다. 운전점은 공으로 표현하였다. 운전점은 사고제거 직후에 위치해 있고, 진행방향은 경사의 제일 윗부분에 해당하는 제어 불안정 평형점을 향한다. 즉, 운동에너지 감소의 의미는 공에 표시된 점선의 화살표로 표현될 수 있고, 그것의 크기를 줄여 실선의 화살표로 만들어, 경계를 넘어서지 못하게 하는 데 있다.

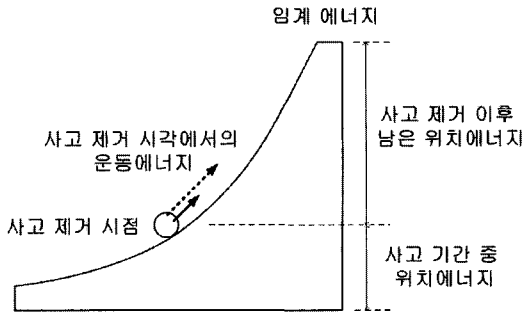


그림 1 과도안정도 제어 개념  
Fig. 1 The concept of transient stability

이를 식을 이용하여 해석하면 다음과 같다. 식 (3)은 계통의 과도에너지를 나타내는 식이다.

$$V^t = |V|^{\theta, \omega} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^{cl2} - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^t - \theta_i^e) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[ C_{ij} (\cos \theta_{ij}^t - \cos \theta_{ij}^e) - D_{ij} \int_{\theta_i + \theta_j}^{\theta_i' + \theta_j'} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (3)$$

첫째항은 사고제거 이후의 발전기 회전자 운동에너지를 나타내고, 나머지 항들은 계통의 위치에너지를 나타낸다. 따라서 발전기 탈락이 계통에 미치는 영향은 크게 운동에너지와 위치에너지로 나눌 수 있는 것을 확인할 수 있다.

이번 절에서 다루는 운동에너지의 감소는 과도안정도 제어에 의해 일차적으로 나타나는 효과이고, 탈락되는 각 발전기의 운동에너지에 해당하는 양만큼을 제거하는 문제로 비교적 계산이 용이하다. 전체 발전기 대수를  $n$ , 탈락시킬 발전기 대수를  $k$ 로 보면 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_{KE}' = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i^{cl2} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k M_j \omega_j^{cl2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-k} M_i \omega_i^{cl2} \quad i=1, 2, \dots, n \quad j=1, \dots, k \quad (4)$$

불안정 모드에 속한 발전기의 운동에너지는 나머지 군에 속한 발전기에 비해 계통을 불안정한 상태로 이끄는 힘이 크기 때문에 운동에너지를 제거함으로써 그만큼의 과도에너지 감소 효과를 보인다.

발전기 탈락에 의한 운동에너지 보정 작업은 위와 같이 진행될 수 있으며, 이러한 운동에너지 감소는 뒤이어 설명할 위치에너지에 대한 보정 작업과 함께 과도에너지를 줄여주는 중요한 역할을 함으로써 계통을 안정화시키는데 기여한다.

### 2.2.2 수급 불균형 정정

계통에서 볼 때, 발전기 탈락은 과도에너지를 줄여주기 위한 하나의 방법으로 볼 수 있지만, 이것은 과도안정도 제어 이후의 계통 특성을 변화시키는 원인이 된다. 따라서 발전기 탈락으로 인하여 변화된 계통을 정확히 해석해야 한다.

에너지 함수 방법에서, 과도안정도 제어에 따른 발전기 탈락이 계통에 미치는 영향에 있어서 가장 먼저 생각할 수 있는 점은 수급 불균형이다.

실제 계통에서는 조속기에 의해 남은 발전기들의 출력 증가로 인하여 부족한 발전 용량을 채우게 되고, 시간모의방법에서도 같은 방법을 사용하고 있지만, 본 논문에서 사용하는 에너지 함수 방법은 시간모의방법과는 달리, 어느 한 시점에서의 계통 해석을 통하여 과도안정도를 판별하는 것이기 때문에 이러한 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 남은 발전기들의 예비력을 이용하여 수급 불균형 문제를 해결하고자 하였다[1].

수급 불균형 문제의 보정작업으로, 남아있는 발전기의 관성 정수에 비례하여 부족한 발전 용량을 배분하는 것을 원칙으로 한다. 이는 관성 중심축에 대한 보정 작업과 그 개념을 같이 하고 있다. 이를 식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$P_{mi}(t^{cntl+}) = P_{mi}(t^{cntl-}) + \frac{M_i}{M_{T-k}} P_{T-k} \quad i=1, 2, \dots, n-k \quad (5)$$

$$\text{여기서, } M_{T-k} = \sum_{i=1}^n M_i - \sum_{j=1}^k M_j \quad P_{T-k} = \sum_{j=1}^k P_{mj} \quad j=1, \dots, k$$

식 (5)에서, 과도안정도 제어 시점을  $t^{cntl}$ 로 보면, 발전기 탈락 이전 시점을  $t^{cntl-}$ , 발전기 탈락 이후 시점을  $t^{cntl+}$ 로 표현할 수 있다. 또한 과도안정도 제어 이후, 계통에 남은 발전기를  $i$ , 탈락시킬 발전기를  $j$ 로 표현하였다. 따라서 발전기 탈락으로 인한 계통의 기계적 입력은 식 (5)와 같이 계산할 수 있고, 이 계산 과정을 거치면서 과도안정도 제어에 의해 발생한 계통의 수급 불균형 문제가 해결된다.

### 2.2.3 과도안정도 제어 시점에서의 관성 중심축 변환

본 논문에서는 사고제거 이후에 과도안정도 제어 시점이 계통의 안정도에 미치는 영향을 분석하는 방법에 대해 연구한다. 따라서 각 발전기의 회전자 위상각과 각속도는 발전기를 탈락시키는 시간에 따라 그 값의 변화 추이가 달라지므로 이에 대한 정확한 계산이 이루어져야 한다.

에너지 함수 방법에서의 과도안정도 판별의 경우, 각 발전기의 회전자 위상각과 각속도를 구하기 위해서 사고제거 시점까지 시간모의를 실행한다. 즉 사고 지속 기간동안의 축약된 계통 어드미턴스와 발전기의 내부 모션 전압을 이용하여 구하고자 하는 발전기의 위상각과 각속도를 구하게 된다. 식(6)은 발전기 동요 방정식의 기본형태로 각 발전기의 회전자 위상각의 각속도를 기계적 입력과 전기적 출력의 차이로 표현한 것이다.

$$P_{mi} - P_{ei} = M \dot{\omega}_i \quad (6)$$

식 (6)은 사고지속 기간중의 어느 한 시점에서의 상태를 나타낸 식이다. 따라서 사고 발생 이후부터 각 발전기의 회전자 위상각과 각속도의 초기값을 이용하여, 변하고 있는 위상각과 각속도를 시간에 따라 계산할 수 있다. 여기서 모든 발전기의 각속도는 초기에 정상상태에서 운전중이었으므로, 초기값은 "0"이다.

위와 같이 시간모의를 이용하여 구한 사고제거 시점에서의 각 발전기 회전자 위상각과 각속도를 각각  $\theta^{cl}$  과  $\omega^{cl}$ 로 놓을 수 있으며, 이 값들은 발전기 대수와 동일한  $n$ 개의 성분을 갖는 ( $n$ ) dimension 값이다.

사고제거 이후부터 발전기를 탈락시키는 시점까지의 값 또한 동일한 방법으로 구할 수 있다. 즉, 사고제거 이후 계통 어드미턴스 행렬을 이용하여 발전기 탈락 시간까지의 시간모의를 실시한다. 사고제거 이후의 전기적 입력과 기계적 입력과의 차이를 통하여 각 발전기 회전자 위상각과 각속도를 계산한다. 에너지 함수 방법에서 사고제거 이후 각 발전기의 전기적 출력을 계산하기 위해 사고제거 이후의 축약된 계통 어드미턴스 행렬을 사용한다.

발전기 탈락 이후의 계통을 해석하기 전, 모든 발전기의 회전자 위상각  $\theta_i^{ctrl}$  과 각속도  $\omega_i^{ctrl}$  을 위와 같은 방법을 이용하여 구하게 된다. 이는 발전기 대수를  $n$ , 탈락시킬 발전기 대수를  $k$ 로 놓는다면, 현재는 ( $n$ ) dimension의 값이다. 여기서 과도안정도 제어에 의해, 탈락시킬 발전기의 위상각과 각속도를 ( $n$ ) dimension에서 삭제시킨다. 이렇게 구성된 ( $n-k$ ) dimension의 위상각과 각속도는 발전기의 탈락으로 인하여 계통의 관성 중심이 변하게 된다. 즉, 과도안정도 제어 이전에는 관성 중심이 식 (7)을 만족하였지만, 과도안정도 제어 이후에는 관성 중심이 변하게 되어 식 (8)을 만족하지 않게 된다. 따라서 이에 대한 보정 작업을 해주어야 한다.

$$\sum_{i=1}^n M_i \theta_i = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n-k} M_i \theta_i = 0 \quad (8)$$

즉, 남은 발전기들에 대하여 관성 중심 기준축의 변환을 한다. 그림 2는 이와 같은 과정을 설명하고 있다. 남은 발전기들의 각속도 또한 탈락시킬 발전기의 데이터 삭제에 이은 관성 중심 기준축의 변환 작업을 거쳐 구하게 된다. 과도안정도를 판별하는 것은, 각 발전기의 상대적인 회전자 위상각 변화 추이를 보는 것이고, 여기서 상대적이란 의미는 각 발전기의 관성정수를 고려한 값을 나타낸다. 따라서 과도안정도 제어에 따른 발전기 탈락 이후의 계통에 대해 각 발전기의 회전자 위상각과 각속도에 대해 관성중심 변환이 이뤄져야 한다.

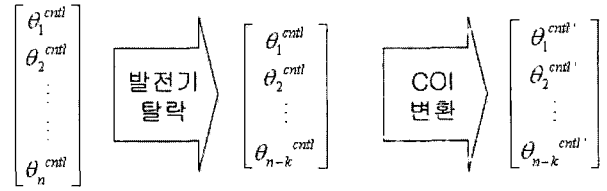


그림 2 발전기 탈락시의 회전자 위상각  
Fig. 2 COI transform of phase angle of stable generators

### 2.2.4 새로운 안정 평형점과 불안정 평형점

과도안정도 제어에 의한 발전기 탈락으로 인하여 계통 특성이 변하였기 때문에, 사고제거 이후의 계통 상태를 나타내는 안정 평형점과 불안정 평형점 또한 변하게 된다. 특히 에너지 함수 방법의 경우, 안정 평형점과 불안정 평형점의 차원(dimension)은 발전기 대수( $n$ )와 일치하고, 이를 이용하여 각 발전기별 에너지의 총합으로 과도안정도를 판별하기 때문에, 발전기의 탈락으로 인한 새로운 계통 해석이 필요하게 된다.

기존 계통에서 해당 발전기를 제거하고, 축약된 ( $n-k \times n-k$ ) 형태의 계통 어드미턴스 행렬을 구하여, 새로운 안정 평형점과 불안정 평형점을 구할 수 있다. 여기서 과도안정도 제어에 의한 발전기 탈락 이후의 계통 해석을 위하여, 사고 이후의 계통 어드미턴스 행렬만을 새로 구한다. 여기서  $k$ 는 탈락한 발전기 대수이다.

발전기 탈락 시점(과도안정도 제어 시점)에서의 각 발전기의 위상각과 각속도는  $\theta_i^{ctrl}$  와  $\omega_i^{ctrl}$  로 표현되며, 그 값은 이 시점에서 계산된다.

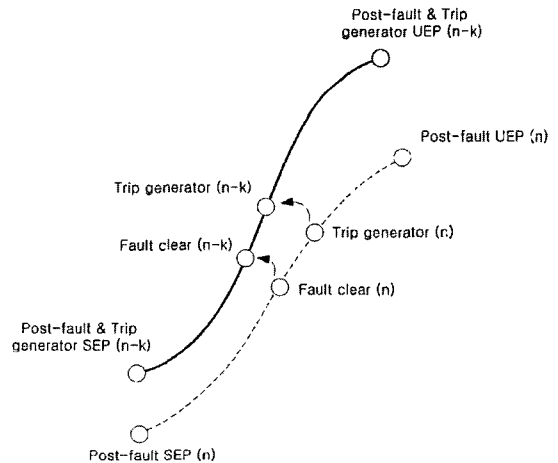


그림 3 과도안정도 제어 후 안정 평형점과 불안정 평형점  
Fig. 3 SEP and UEP after the control of transient stability

계산된 각 발전기의 회전자 위상각과 각속도를 앞 절에서 설명한 바와 같이 탈락된 발전기를 삭제시키고, 관성 중심 기준축으로 변환시키면 그림 3과 같이 ( $n-k$ ) dimension의 운전점으로 변하게 된다. 그림에서는 이해를 돕기 위해 2차원으로 도식하였지만, 실제로는 ( $n-k$ ) dimension의 값을 갖는 운전점이다. 이와 같이 변화된 계통의 특성으로 인

하여, 그림 3에서와 같이, 발전기 탈락이 고려된 과도안정도 제어 이후 새로운 안정 평형점과 불안정 평형점이 생기게 된다.

에너지 함수 방법은 사고제거 이후의 계통을 해석하는 방법이기에 때문에 새로운 안정 평형점과 불안정 평형점을 이용하여 안정도를 판별하게 되고, 최종 사고제거 시각은 발전기 탈락 시간이 된다. 탈락된 발전기를 고려하여 새롭게 계산된 계통의 안정 평형점과 불안정 평형점은 사고에 대한 해석을 위함이 아니라, 과도안정도 제어 이후의 계통 해석 차원에서 계산된 값이기 때문에, 발전기 탈락 시점 이후의 계통 동특성을 해석하여 과도안정도를 판별한다.

### 2.2.5 알고리즘

본 논문의 이론을 검증하기 위하여 포트란을 이용한 TEF 프로그램을 사용하였다. 발전기 탈락 시간과 관계되는 안정도를 판별하기 위하여 다음과 같은 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘은 발전기 탈락에 따른 계통 상태 변화에도 불구하고 안정도의 판별이 가능하고, 탈락 시간에 따른 계통 해석 또한 가능하게 하였다.

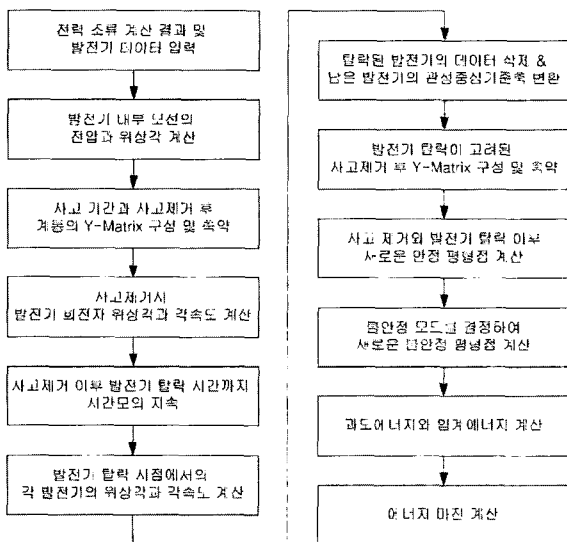


그림 4 알고리즘 흐름도  
Fig. 4 Flow of the algorithm

### 3. 사례 연구

본 논문에서 사용된 계통은 그림 5과 같다.

본 논문에서는, 하나의 모선에 연계된 두개 이상의 발전기는 그 특성과 발전 용량이 모두 동일하다고 가정한다. 실제 계통에서도 일반적으로 하나의 모선에 여러 개의 발전기가 연계되어있으며, 그 특성과 발전량이 같은 것이 일반적이다. 그림 5의 모선 5를 살펴보면, 발전기가 4대가 연계되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 미리 TEF 프로그램과 PSS/E의 시뮬레이션 결과를 통하여 모선 5의 발전기가 불안정 모드로 선별되었기 때문이다.

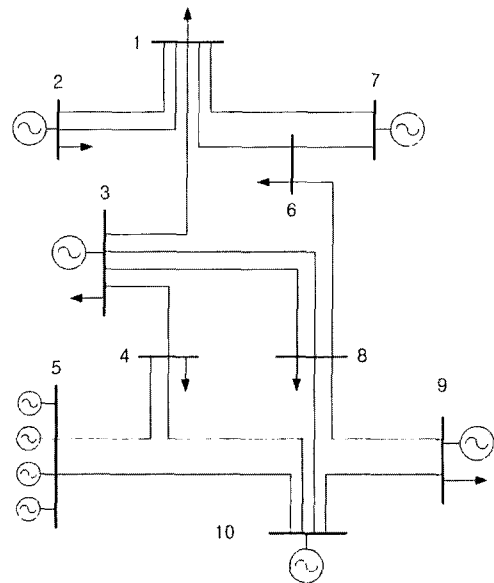


그림 5 사례연구 계통도 (9기 10모선)  
Fig. 5 A system for case study(9 generators-10 bus)

불안정 모드의 발전기 중 일부를 탈락시킴으로써 계통의 안정화를 가져오게 하는 것이 본 논문의 목표이므로, 필요에 따라 임의로 모선 5에 있는 발전기만을 4개로 확장시켰다. 사례연구 계통도에서의 각 모선별 발전량, 부하량, 예비력은 다음 표 1과 같다.

표 1 계통 데이터  
Table 1 The system data

모선	발전량(MW)	예비력(MW)	부하량(MW)
1	-	-	1380
2	300	300	550
3	500	200	100
4	-	-	50
5	250	50	-
	250	50	-
	250	50	-
	250	50	-
6	-	-	400
7	350	350	-
8	-	-	300
9	600	200	885
10	1010	190	-

과도안정도 평가를 위한 적용사고와 사고제거 시간, 사고제거를 위한 선로개방 등은 표 2와 같다. 즉, 사고는 모선 5에서 일어난 삼상단락사고이고, 사고 지속시간은 10cycle인 0.1667초로 한다. 사고제거는 모선 5와 모선 10 간의 선로제거로 한다. 안정도 신뢰수준은 N-1 상정사고에 대해 실시한다.

표 2 적용 사고  
Table 2 Contingency

사고 종류	사고 발생 모선	차단 선로	차단 시간
삼상 단락 사고	5	5 - 10	0.1667 sec

본문의 내용을 바탕으로 개선된 TEF 프로그램으로 발전기 탈락 용량별 임계 안정점을 찾고, 이를 PSS/E를 통하여 검증한다. 본 논문에서 제안하는 과도안정도 제어 방법에 대한 검증을 하기 위해, 먼저 시간모의방법인 PSS/E에 의한 안정도 판별을 실행한다. PSS/E에서의 안정도 판별은 각 발전기의 회전자 위상각에 대한 변화를 관찰하여 동기성을 잃는 발전기 여부에 따라 판별한다. 과도안정도 제어 시간은 사고제거 시점부터 시작하여 그 간격을 0.01초로 하였고, 각 제어 시점에 따라 계통의 안정 여부를 판별하였으며, 발전기 탈락 모델링은 발전기와 모선의 분리로 하였다.

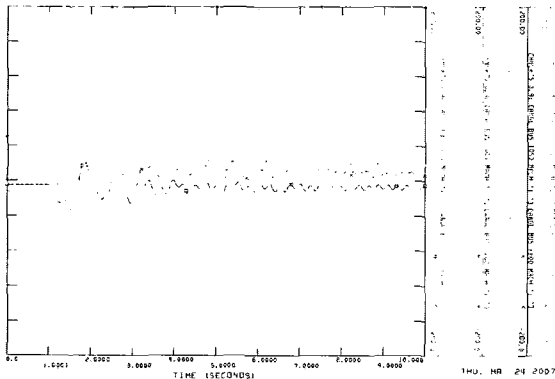


그림 6 PSS/E 검정 결과 1  
Fig. 6 PSS/E simulation result 1

그림 6은 상정사고에 의한 계통의 상태를 발전기의 회전자 위상각을 통하여 나타내고 있다. 모선 5에 연계된 4개의 발전기가 모두 동기성을 잃고 탈조하는 것을 볼 수 있고, 이는 계통이 사고로 인해 불안정한 상태임을 나타낸다.

이를 안정화시키기 위한 방법으로, 본 논문에서 사용되는 과도안정도 제어(발전기 탈락)를 실행하여 안정 여부를 판단한다. 여기서, 탈락 시킬 발전기 대수와 제어 시간에 따라 안정 여부가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 탈락 발전기 대수와 제어 시간을 각기 다르게 하여, 계통의 과도안정도를 판별하고, 안정한 정도를 나타내는 정량적 해석을 통하여 탈락될 발전기 대수에 따른 계통의 임계 제어 시간에 대해 알아본다.

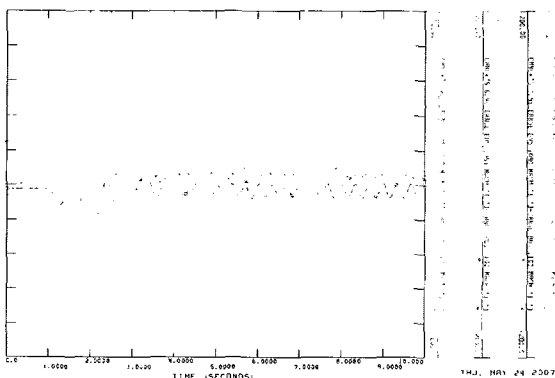


그림 7 PSS/E 검정 결과 2 (1기탈락, 0.1667sec)  
Fig. 7 PSS/E simulation result 2 (one generator tripped on 0.1667 sec)

그림 7은 발전기를 1기 탈락시켰을 때의 발전기 회전자 위상각을 나타내며, 과도안정도 제어 시점은 사고제거(10cycle)와 같은 시간으로, 사고제거와 동시에 제어가 이루어졌다고 가정하였다. 그림 7의 결과에서 알 수 있듯이, 발전기 1기를 탈락시킬 경우에는 제어 시점을 최대한 빠르게 하여도 계통은 불안정한 상태임을 알 수 있다.

다음으로는 발전기 2기를 동시에 탈락시킨 경우로, 탈락 시점은 사고제거 시점과 같은 10cycle로 한 경우이다. 그림 8를 살펴보면, 발전기들이 사고로 인하여 과도 상태를 거쳐, 다시 안정해짐을 볼 수 있다. 그림 9에서 나타내는 계통 주파수 또한 안정해지는 것을 볼 수 있다. 최저 주파수 59.42 Hz, 회복 주파수 59.53 Hz를 나타낸다.

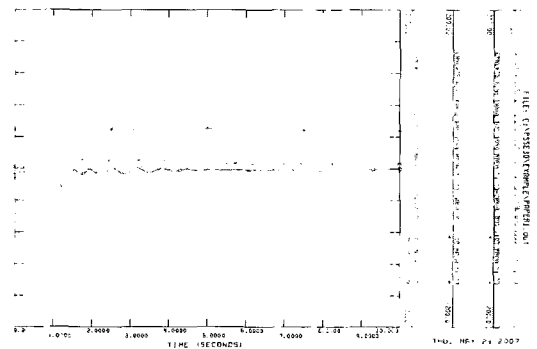


그림 8 PSS/E 검정 결과 3 (2기탈락, 0.1667sec)  
Fig. 8 PSS/E simulation result (two generators tripped on 0.1667 sec)

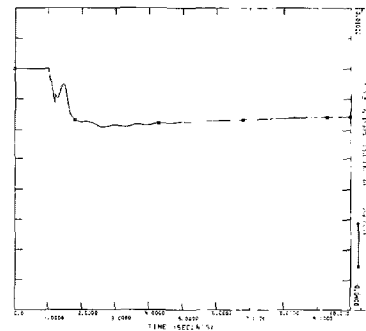


그림 9 PSS/E 검정 결과 3-1 (주파수)  
Fig. 9 PSS/E simulation result 3-1(frequency)

그림 8을 통해 사고제거와 동시에 발전기 2기를 탈락시키면 해당 사고에 대한 적절한 제어를 한 것으로 볼 수 있다. 그렇다면, 과도안정도 제어에 의한 발전기 2기 탈락에 해당하는 임계 제어 시간은 어떻게 되는지 알아볼 필요가 있다. 과도안정도 제어 즉, 발전기 탈락이 사고제거 이후 시점에서 일어나는 경우가 일반적이라고 판단할 수 있기 때문에, 발전기 탈락 용량과 탈락 시간과의 관계를 알아볼 필요가 있는 것이다. 따라서 과도안정도 제어 시간을 사고제거 시점 이후부터 0.01초씩 증가시켜가며 계통의 안정한 상태를 관찰한다. 그 결과 PSS/E를 사용하여 발전기 2기를 탈락 용량으로 산정하였을 경우, 과도안정도 임계 제어 시간은 0.22초로 나타났다.

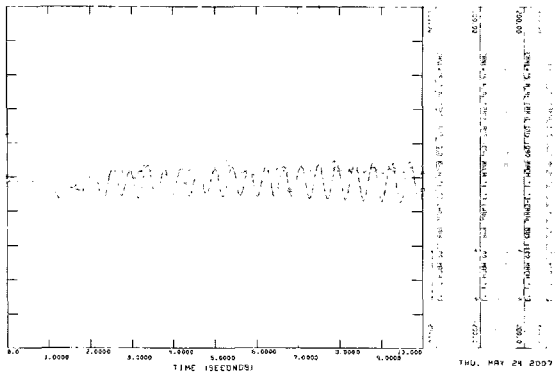


그림 10 PSS/E 검정 결과 4 (2기탈락, 0.23sec)  
 Fig. 10 PSS/E simulation result 4(two generators tripped on 0.23 sec)

그림 10는 앞에서와 같이 발전기를 2기만 탈락시키고, 과도안정도 제어 시간을 0.23초로 임계 제어 시간보다 한 단계 (0.01초) 증가시켰을 때의 상태를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 계통은 다시 불안정한 상태가 되었고, 발전기 2기를 탈락시킬 경우의 임계 제어 시간은 0.22초임을 확인 할 수 있다.

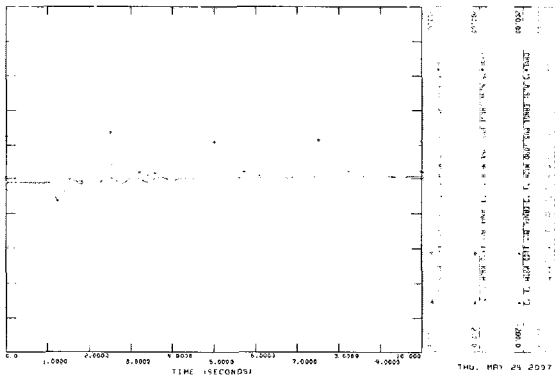


그림 11 PSS/E 검정 결과 5 (3기탈락, 0.23sec)  
 Fig. 11 PSS/E simulation result 95(three generators tripped on 0.23 sec)

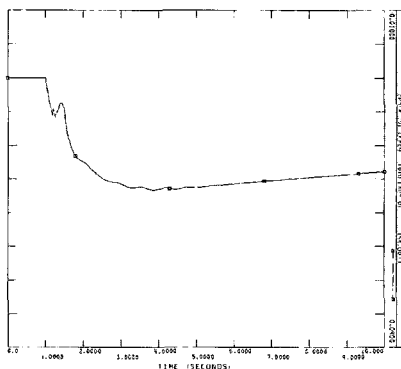


그림 12 PSS/E 검정 결과 5-1 (주파수)  
 Fig. 12 PSS/E simulation result 5-1 (frequency)

이번에는 과도안정도 제어 시간을 0.23초로 하고, 3대의 발전기를 탈락시켜 계통의 과도안정도를 판별하여 본다. 그림 11에서 볼 수 있듯이, 계통이 안정화되는 것을 볼 수 있다. 이는 과도안정도 제어 시점이 늦어질 경우, 추가적인 발전기 탈락으로 인하여 계통을 안정화 시킬 수 있다는 것을 뜻한다. 그림에서 동기탈조를 하는 하나의 발전기는 이미 계통에서 탈락시킨 발전기이다. 계통의 주파수 변화는 최저 59.0 Hz에서 59.17Hz까지 회복된다. 과도안정도 임계 제어 시간을 계산해 본 결과, 3대의 발전기 최대 탈락 시간은 0.28초로 계산되었다.

본 논문에서 제안하는 과도안정도 제어 방법을 따라 실행된, 시간모의방법에 의한 PSS/E 결과를 종합하여보면 표 3과 같다.

표 3 PSS/E 결과 데이터

Table 3 The results of PSS/E simulation

	발전기 1기 탈락	발전기 2기 탈락	발전기 3기 탈락
사고제거 시간	0.1667 초 (10cycle)		
임계 탈락 시간	-	0.22 초	0.28 초

시간모의방법을 이용하여 발전기의 탈락 용량 및 임계 제어 시간을 구하기에는 많은 계산시간이 필요하고 정량적인 해석이 불가능하여 많은 불편한 점이 있다. 하지만, 시간모의방법인 PSS/E의 결과를 신뢰하여 이를 기준으로 잡고, 이와 관련하여 본 논문이 제안한 알고리즘을 이용한 TEF 프로그램 결과를 살펴보면 다음과 같다.

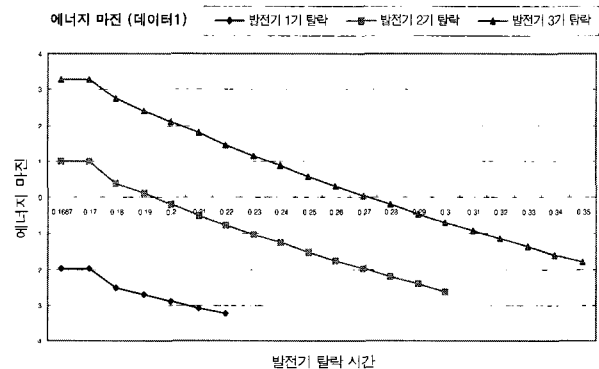


그림 13 TEF 프로그램 결과 데이터 1  
 Fig. 13 The result 1 of developed TEF program

그림 13는 계통의 안정한 정도를 나타내는 에너지 마진을 과도안정도 제어 시간과의 함수로 표현하였다. 과도안정도 제어 시간은 사고제거 시간부터 0.01초씩 증가시켜가며 계산하였으며, 탈락시킬 발전기 대수별로 제어 시간을 달리하여 도식하였다.

TEF 프로그램을 사용한 결과, 안정한 정도의 정량적 해석이 가능할 뿐만 아니라 에너지 마진과 발전기 탈락 시간

이 서로 선형적인 관계에 있음을 한눈에 알 수 있다. 또한 발전기 탈락 용량이 증가함에 따라 에너지 마진도 증가하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 초기에 0.1667초와 0.17초의 에너지 마진값이 같은 이유는 사고제거 이후의 계통을 TEF 프로그램에서 시간모의하는데 있어서  $\Delta t$ 의 값을 0.005초로 하였기 때문에 나타나는 현상이다.

표 4 TEF 프로그램과 PSS/E의 결과 비교 1  
Table 4 Comparison results 1 of TEF and PSS/E

	임계 제어 시간	
	TEF 프로그램	PSS/E
발전기 1기 탈락	-	-
발전기 2기 탈락	0.19 초	0.22 초
발전기 3기 탈락	0.27 초	0.28 초

표 4의 결과 비교에서 알 수 있듯이, TEF 프로그램이 PSS/E보다 다소 보수적으로 나타남을 볼 수 있다.

본 논문에서 제안한 에너지 함수를 이용한 과도안정도 제어 방법의 정확성을 검증해 보기 위해, 계통의 상태(선로 임피던스와 어드미턴스 값)를 조금씩 변화시켜가며 추가로 두 개의 데이터를 만들어, 위와 같은 방법으로 PSS/E와 TEF 프로그램의 결과를 비교하여 보았다.

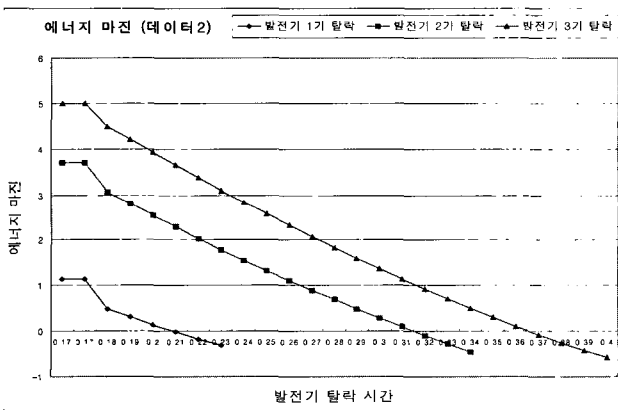


그림 14 TEF 프로그램 결과 데이터 2  
Fig. 14 The result 2 of developed TEF program

표 5 TEF 프로그램과 PSS/E의 결과 비교 2  
Table 5 Comparison result 2 of TEF and PSS/E

데이터		임계 제어 시간	
		TEF 프로그램	PSS/E
2	1기 탈락	0.20	0.20
	2기 탈락	0.31	0.31
	3기 탈락	0.36	0.37

TEF 프로그램의 결과를 탈락 발전기 용량과 시간대별로 그림 14 같이 결과를 그래프로 표현하였다. 표 5는 데이터 1

과 같은 방법으로 TEF 프로그램과 PSS/E 결과를 나타낸다. 기준으로 잡은 PSS/E와의 비교에서 TEF 프로그램이 정확한 것을 볼 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 빠른 발전기 탈락만을 이용한 과도안정도 제어 방법이 불안정한 계통을 안정화 시키는데 기여함을 보였다. 과도안정도 제어 방법으로 많은 방법들이 존재하고, 현재까지 가장 효과적으로 알려진 발전기 차단은 보통 부하 차단과 연결지어 해석되어왔다. 이 때문에 계통의 피해를 감수할 수밖에 없었으나, 본 논문에서는 동기탈조 보호계전기가 동작하기 이전에 이루어지는 빠른 발전기 차단으로 부하 차단 없이 계통을 안정화 시키는 방안을 모색할 수 있게 하였다.

또한 과도안정도 제어 시점과 발전기 탈락 용량 등에 대한 문제를 연구하였다. 계산시간이 적게 걸리는 에너지 함수 방법을 이용한 TEF 프로그램은 온라인 과도안정도 판별에 사용될 수 있을 뿐 아니라, 온라인 과도안정도 제어에도 사용가능함을 보였다. 에너지 함수 방법이 정량적인 해석이 가능하다고는 하나, 현재까지 이에 대한 활용은 미비하였다. 하지만, 본 논문에서는 이를 과도안정도 제어에 활용하여 발전기 차단 용량과 차단시간을 산정하는 데 있어 효과적인 해결책을 제시하였다.

TEF 프로그램을 현재 계통해석에 쓰이고 있는 시간모의 방법인 PSS/E와 비교하였을 때, 그 정확성이 떨어지지 않으며 근소한 차이로 보수적인 결과를 산출함을 알 수 있었다. 또한 PSS/E에서 해석할 수 없는 발전기 탈락 시간 또는 발전기 탈락 용량과 계통의 안정성과의 관계를 알 수 있었는데, 개념적인 이해를 벗어나 에너지 마진을 이용하여 직접 이들이 선형적인 관계에 있음을 확인할 수 있다.

또한 경제적인 계통 운영에서의 효과를 기대할 수 있다. 현재의 급전 시스템은 예방운전 개념으로 감발 운전 등으로 운영되기 때문에 값이 싼 발전기임에도 최대출력을 내지 못하여 비경제적인 계통 운영의 원인이 되는 경우가 많다. 하지만, 온라인 과도안정도 제어가 가능하다면 사고 발생시 즉각적인 제어로 계통을 안정화시킬 수 있기 때문에 경제적인 계통 운영이 가능하다. 즉, 현재의 보수적인 계통 안정화 방안에 의한 운영의 문제점을 보완할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-104) 주관으로 수행된 과제임

### 참고 문헌

[1] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Department of Electrical Engineering and Computer Engineering Iowa State University, Prentice-Hall, Inc, 1992



[2] 한국전력공사 기술연구원, "에너지 함수를 이용한 전력 계통의 과도안정도 평가에 관한 연구", 1990

[3] Edward Wilson Kimbark, Sc.D, "Power System Stability", John Wiley & Sons, 1948

[4] P. Kundur, G. K. Morison, L. Wang, "Techniques For On-Line Transient Stability Assessment And Control", IEEE, pp.46~51, 2000

[5] Fang Ming, Weixing Lu, Ye Yang, Yixin Ni, Hengxin Qu, Yonghua Peng, "Transient Stability Control of An Area Network", IEEE, pp.451~455, 1995

[6] Steven M. Rovnyak, Kejun Mei, Guang Li, "Fast Load Shedding for Angle Stability Control", IEEE, pp.2275~2279, 2003

[7] K. W. Chan, C. H. Cheung, H.T. Su, "Time Domain Simulation Based Transient Stability Assessment and Control", IEEE, pp.1578~1582, 2002

[8] Louis Wehenkel, Mania Pavella, "Preventive vs. Emergency Control of Power Systems", IEEE, pp.1~6, 2004

[9] Zhihong Yu, Xiaoxin Zhou, Zhongxi Wu, "Design of a Fast Transient Stability Control Scheme in Power System", IEEE, 2006

[10] P. Kundur, " Power System Stability and Control", McGraw-Hill, pp.128~136, 1994

[11] Hadi Saadat, "Power System Analysis", WCB/Mcgraw-Hill, pp.461~464, 1999

[12] Peter W. Sauer, "Power System Dynamics and Stability", Prentice Hall, pp.283~320, 1998

[13] A. L. Bettiol, Y. Zhang, L. Wehenkel, M.Pavella, "Transient Stability Investigations on a Brazilian Network by SIME", pp.1~6, APSCOM-97, HongKong, November 1997

[14] Erick E. Aponte, J. Keith Nelson, "Time Optimal Load Shedding for Distributed Power Systems", pp.269~277, IEEE Trans. VOL.21, NO.1, February 2006

[15] Y. Yuan, J. Kubokawa, H. Sasaki, "Optimal Power Flow Solution with Multi-Contingency Transient Stability Constraints", IEEE, pp.2009~2013, 2002

[16] Yan Xia, Ka Wing Chan, Tak Sing Chung, "A TEF Approach for Solving Transient Stability Constrained OPF", IEEE, pp.1485~1489, 2004

[17] Anthony N. Michel, A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Using Individual

Machine Energy Functions", pp.266~276, IEEE Trans, Vol. CAS-30, No. 5, May. 1983

[18] Damien Ernst, Mania Pavella, "Closed-loop Transient Stability Emergency Control", IEEE, pp.58~62, 2000

[19] Yunping Chen, Kunpeng Zhou, "A New Energy Function Based Power System Stability Control Scheme Using Real-Time Data", IEEE, pp.163~168, 2000

[20] Steven M, Rovnyak, Guang Li, Kejun Mei, "One-Shot Controls for Preventing Loss of Synchronism", IEEE, pp.2045~2052, 2003

[21] 정연재, 장동환, 전영환 "에너지 마진을 이용한 과도안정도 제약 급전 알고리즘", KIEE, Trans. Vol. 55A, No. 1, pp. 1~6, Jan, 2006

## 저 자 소 개



### 김 정 우 (金正祐)

1979년 8월 28일생. 2005년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2007년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업  
 Tel : 02-3410-8697  
 Fax : 02-451-2493  
 E-mail : jung790828@hotmail.com



### 전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985~1994년 한국전기연구소 근무. 1997년~1998년 동경대 조수 역임. 1998년~2002년 한국전기연구원 그룹장. 2002년~현재 홍익대 전자전기공학부 교수  
 Tel : 02-320-1620  
 Fax : 02-320-1110  
 E-mail : yhchun@hongik.ac.kr