

## TEF를 이용한 과도안정도 제어 방법에 관한 연구

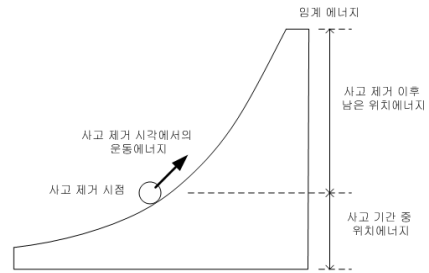
김정우      전영환      김정훈  
홍익대학교

### A study on the transient stability control using TEF

Jung-Woo Kim      Yeong-Han Chun      Jung-Hoon Kim  
Hongik University

**Abstract** - 본 논문에서는 과도안정도 문제 발생 시, 외란이 계통에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 효과적인 제어 방법을 다룬다. 전력계통의 과도안정도는 외란에 의해 야기되는데, 이 외란의 영향을 받아 동기성을 잃고 가속하는 발전기들이 과도에너지를 계통에 유입시킨다. 따라서 가속하는 발전기들 중 일부를 제거하여 계통으로 유입되는 과도에너지를 줄이고 계통을 새로운 정상상태로 만들고자하는 것이 본 논문의 주된 내용이다. TEF 프로그램을 통하여 발전기 제거 시간과 계통의 안정성과의 관계를 다루고, 이를 PSS/E를 이용하여 검증한다. 실제 계통에서의 선로제거나 발전기 또는 부하 탈락은 0.1초로 가정하여 사례연구를 실행하였으며, 계통사고는 삼상 단락 사고로 하였다.

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



<그림 1> 에너지 함수 개념

## 1. 서 론

전력계통의 안정도는 심각한 상정사고에 대하여 계통이 이를 이겨내고 안정하게 유지되는 여부를 판단한다. 외란에 의해 발생하는 계통 동요와 그와 관계되는 발전기간의 동기 상실 문제를 전력 계통의 과도안정도 문제라 하고, 이는 보통 대규모 발전소와 인접한 선로 또는 모선 등에서 발생하는 사고에 의해 야기되며, 외란의 성질과 크기에 밀접한 관계가 있다. 현재 대부분의 과도안정도 해석은 복잡한 계통을 해석하는데 편리한 시간모의방법에 의해 행하여지고 있지만, 계산시간이 오래 걸리고 정량적 해석이 불가능하여 온라인 계통해석에 취약한 면을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 계산시간이 빠르고 정량적인 해석이 가능한 에너지함수를 이용하여 과도안정도를 판별함으로써, 효과적인 과도안정도 제어를 위한 방법을 고려했고자 한다. 또한 과도안정도 문제 발생 시, 외란을 극복하고 계통의 불안정 요소를 최소화할 수 있는 새로운 정상상태로의 계통운영 방법에 대해 다룬다.

## 2.2 과도안정도 제어 방법

실제 계통에서는 일반적으로 두개 이상의 발전기가 하나의 발전소에서 운영되며, 이는 한 모선에 여러 개의 발전기가 연계되어 있는 것으로 해석된다. 이 발전기들은 보통 발전기 특성이 동일하고 그 출력 또한 일반적으로 같다. 이러한 상황에서, 외란에 의해 발전기가 동기탈조를 일으키는 경우, 탈조된 발전기를 계통에서 모두 분리시키는 데, 이는 대규모 발전력 탈락으로 심각한 수급 불균형 상태를 일으키고, 부하차단 등의 조치가 뒤따르며, 심각한 경우 광역 정전 사고까지 발생된다. 이러한 연속되는 계통 사고의 크기를 억제시키기 위해서는 과도안정도 문제 발생 시 빠른 제어가 필요하다.[2],[3] 따라서 본 논문에서는 모선에 연계되어있는 모든 발전기가 탈락되기 전에 일부의 발전기만을 탈락시켜 계통의 안정화를 가져올 수 있게 하는 방법을 고려했다.

## 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.[1]

### 2.2.1 발전기 탈락 모델링

과도에너지의 대부분을 차지하는 것이 동기탈조를 일으키는 발전기의 회전자 운동에너지이다. 따라서 발전기 탈락의 의미는 과도에너지의 일정량을 제거하여 에너지마진을 증가시키는 데 있다. 발전기 탈락은 식(3)과 같이 모델링한다.[1] 여기서 (-)는 발전기 탈락 전, (+)는 탈락 이후를 의미한다.

### 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.

$$P_{mi}^+ - P_{ci}^+ - \frac{M_i}{M_{T-x}} P_{COI}^+ = 0 \quad i=1, 2, \dots, n, i \neq x \quad (3)$$

여기서,  $M_{T-x} = \sum_{i=1}^n M_i - M_x$

$$P_{mi}^+ = P_{mi}^- + \frac{M_i}{M_{T-x}} P_{m-x}^- \quad i=1, 2, \dots, n, i \neq x$$

$$P_{ci}^+ = \sum_{j=1, j \neq i, x}^n [C_{ij}^+ \sin \theta_{ij} + D_{ij}^+ \cos \theta_{ij}] + E_i^2 G_i^+$$

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

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

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

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

### 2.1.2 에너지 함수

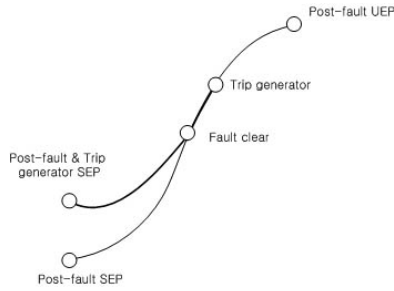
에너지 함수는 식(1)에서 식(2)와 같이 에너지 적분에 의해 얻어진다. 이는 운동에너지와 위치에너지 두 요소로 구성되는 에너지 함수이다.

### 2.2.2 새로운 SEP와 기존의 UEP

에너지 함수 방법은 사고제거 이후의 안정 평형점을 기준으로 계통을 해석하는 기법이기에 때문에, 과도에너지를 없애는 과정에서 발전기 탈락은 계통에서 볼 때 또 하나의 사고이므로 안정 평형점(SEP : Stable Equilibrium Point)이 바뀌게 된다. 따라서 새로운 안정 평형점을 구하기

$$V = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n \left[ M_i \tilde{\omega}_i - P_{mi} - \dot{P}_{ci} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \right] \theta_i dt \quad (2)$$

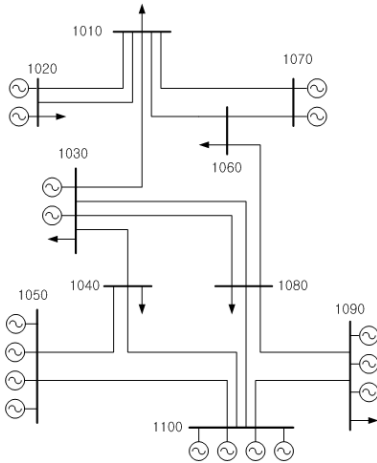
위해, 사고제거 이후 발전기 탈락까지 시간모의를 지속시킨다. 운전점은 그림 1을 바탕으로 그림 2와 같이 표현된다. 이 개념을 이용하여, 에너지 마진은 새로운 SEP와 기존의 UEP를 이용하여 계산한다.



〈그림 2〉 SEP와 UEP

### 2.3 사례 연구

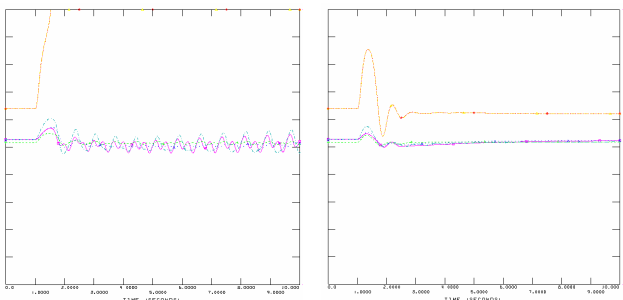
여기서는, 앞에서 살펴본 내용을 토대로 사례연구를 통하여 이론을 검증하도록 한다. 사례연구는 6기 10모선으로 각 모선별로 발전기를 그림 3과 같이 여러 개로 나눈 계통을 이용하였다. 각 모선에 연계된 발전기의 특성과 발전량은 동일하다고 가정한다. 사고는 모선 1050과 1100 사이에 삼상단락사고가 일어난 것으로 상정하고, 사고제거는 모선간의 선로 제거로 하였다. 사고지속 시간을 0.1초로 하고 PSS/E와 TEF 프로그램으로 각각의 결과를 비교하여보았다.



〈그림 3〉 6기 10모선 확장 계통

#### 2.3.1 PSS/E를 이용한 계통 해석

우선 이론의 검증을 위하여 시간모의방법인 PSS/E를 이용하여 계통의 안정성을 판별하였다. 그림 4의 좌측은 사고에 의해 1050모선의 발전기가 모두 가속되어 계통이 불안정한 것을 나타낸다. 반면, 본 논문의 이론을 적용한 그림 4의 우측은 사고 이후 1050의 발전기 일부를 탈락시켜 계통이 안정화되는 것을 볼 수 있다. PSS/E를 통한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 발전기를 1개 탈락 시켰을 경우 불안정하였고, 2개의 발전기를 탈락 시킨 경우는 사고제거 후 0.08초 이내, 3개를 탈락 시킨 경우는 사고제거 후 0.2초 이내까지 안정함을 보였다.

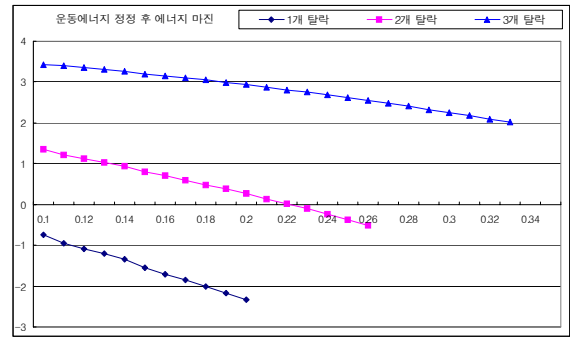


〈그림 4〉 PSS/E 검증 결과

#### 2.3.2 TEF의 에너지 마진을 이용한 계통 해석

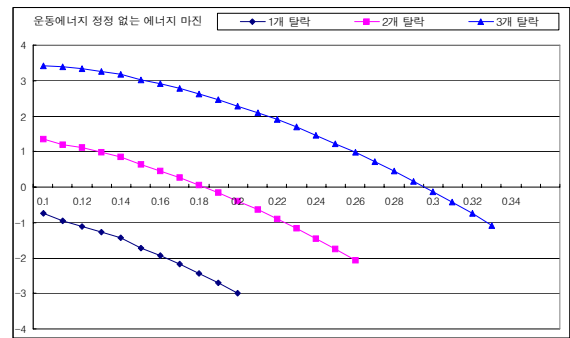
TEF를 이용하여 안정성 여부를 판별해보면, 에너지 마진이 -2.6312로

불안정하다. 그림 5와 6은 TEF 프로그램을 이용한 에너지 마진을 발전기의 탈락 개수와 시간에 따른 그래프로 나타낸 것이다.



〈그림 5〉 운동에너지 정정 후 에너지 마진

시간모의방법인 PSS/E를 이용한 안정도 판별이 정확하다고 가정하면, 운동에너지 정정을 거치지 않은 에너지 마진이 운동에너지 정정을 한 에너지 마진에 비해 그 결과가 정확하게 나타난다. 에너지 함수에서의 운동에너지는 계통으로부터 분리되려는 발전기군의 관성 중심과 나머지 계통의 관성 중심간의 상호 운동과 관련되어 결정된다. 즉, 운동 에너지는 각 그룹의 발전기 회전자 상호운동과 관련되어 있고, 이것을 고려한 것이 운동에너지 정정이다. 그림 5는 운동에너지 정정을 한 일반적인 에너지 마진을 나타내고, 그림 6은 운동에너지 정정을 거치지 않은 에너지 마진을 나타낸다. 운동에너지 정정을 거치게 되면 일반적으로 운동에너지가 감소하게 되고, 이에 따라 에너지 마진은 운동에너지가 감소한 만큼 증가하게 된다.



〈그림 6〉 운동에너지 정정 없는 에너지 마진

에너지 함수를 이용하여 도출한 결과에서 알 수 있듯이, 발전기 탈락 시간과 에너지 마진은 선형관계를 갖는다. 따라서 발전기 탈락 시간과 탈락 개수에 따라 계통의 안정성 여부가 정량적으로 해석 가능함을 보였다.

### 3. 결 론

에너지 함수 방법을 통하여 에너지마진을 발전기 탈락 개수와 탈락 시간과의 관계로 표현할 수 있었고, 이를 이용하여 효과적인 과도안정도 제어가 가능함을 보였다. 발전기 탈락 이후를 해석하는데 있어, 운동에너지 정정 여부가 문제가 되었고, 이에 대한 연구는 계속 진행 중에 있다.

#### [참 고 문 헌]

[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] Steven M. Rovnyak, Kejun Mei, Guang Li, "Fast Load Shedding for Angle Stability Control", 2003 IEEE, 2275~2279, 2003  
 [3] Steven M. Rovnyak, Guang Li, Kejun Mei, "One-Shot Controls for Preventing Loss of Synchronism", 2003 IEEE, 2045~2052, 2003  
 [4] Yunping Chen, Kunpeng Zhou, "A New Energy Function Based Power System Stability Control Scheme Using Real-Time Data", 2000 IEEE, 163~168, 2000  
 [5] 김용학, "온라인 과도안정도 평가를 위한 고속 상정고장 선택 및 여과 알고리즘 개발", 전남대학교 전기공학과 대학원, 2005.02