

# 동적 안전도 평가 기술 개요

전영환  
(한국전기연구원)

## 1. 서론

계통의 안전도(security)란 전력계통이 발전기 탈락사고 및 송전선로 사고등 계통구성 설비의 예기치 못한 사고에서 기인된 외란의 영향에 얼마나 잘 견디어 낼 수 있는가 하는 것으로, 전력계통 운용에 있어서 안정적인 전력공급을 위해 매우 중요한 문제이다.

전력계통의 안정적인 운용을 위해서는

- i) 계통계획면에서 전력계통이 어떠한 조건에 놓이더라도 발전원으로부터 신뢰도 높은 전력을 안전하게 공급할 충분한 계통 구성이 선행되어야 하며(적정성 확보, adequacy),
- ii) 계통운용면에서, 강인하게 설계된 계통구성일지라도 그 계통이 놓여있는 주변 여건이 항상 변화할 뿐 아니라 예상치 못한 외란이 발생할 수 있으므로 사전에 계통사고 등의 파급영향을 분석하여 운전 대안을 강구해 두어야 한다. (안전성 확보, security)

계통 사고등의 대규모 외란 발생에 따른 긴급상태에서, 계통안전성 확보를 위해서는 다음과 같은 동적 및 정적 안전도 평가를 통해 계통의 안전성(security) 정도를 판단하고 불안정한(insecure) 상태가 될 가능성이 있을 경우는 필요한 제어를 수행하여야 한다.

- i) 과도상태에서 전력계통이 기능을 회복하여 새로운 운전점에서 정상 운전이 가능한지를 가려내는 동적 안전도 평가(dynamic security assessment).
- ii) 새로운 운전점에서 모든 계통구성 설비가 계통안전 운전 에 필요한 설비 운전한계 내에 존 재하는지를 가려내는 정적안전도 평가(static security assessment)

계통운용을 보수적으로 수행한다면 항상 높은 마진을 가지고 계통을 운영하게 되므로 이러한 안전도 평가를 온라인으로 수행할 필요가 없겠으나, 설비의 한계 등으로 인해 경제적인 운영에 막대한 영향을 미치게 되는 경우에는 안정한계에서 운전할 필요가 발생하게 되므로 이러한 안전도 평가를 온라인으로 수행할 수 있는 시스템을 갖추어야 한다. 특히 전력시장이 개설되는 상황하에서는 이러한 안정한계에서의 운전의 필요성이 신뢰도와 경제적 관점에서 절실히 요구될 것이다.

## 2. 동적 안전도 평가 (dynamic security assessment)

동적 안전도 평가는 안정도의 두 가지 측면인 angle 안정도(angle stability)와 전압 안정도(voltage stability)로 나눌 수 있으며 여기서는 angle 안정도에 대해서만 언급하기로 한다. 동적 안전도 평가에 있어 기존에는 각기 다른 초기조건에서 발생 가능한 상정사고(contingency)에 대해 off-line 으로 안정도(stability) 평가를 수행하였지만 실제 계통이 점점 커지고 복잡해짐에 따라 계통조건이 수시로 변동하게 되어 off-line 수행에는 한계를 가지게 된다. 따라서 보다 안전한 계통운용을 위해서는 수시로 변동하는 계통조건에서 다양한 상정사고들에 대한 계통의 안정도를 평가할 수 있는 on-line 동적 안전도 평가가 수행되어야 한다. 이러한 on-line 동적 안전도 평가는 수분이내의 짧은 시간동안 수많은 상정사고들에 대해 안정도 판정을 내려야 함으로 상세한 안정도 해석을 수행하기 전에 매우 안전한 상정사고들을 미리 걸러내어 잠재적으로 위험한 상정사고만을 골라내는 contingency screening 작업이 선행되어야 한다. 여기서 걸러진 상정사고(critical contingency)들은 다시 상세한 안정도 해석을 수행하게 되고, 이를 통해 stability limit (EX: 안정도 여유, 임계고장제거시간)를 결정하게 된다.

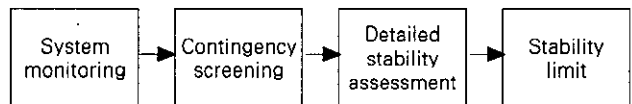


그림 1. 동적 안전도 평가

지금까지의 동적 안전도 평가 방법은 그림 2와 같이 분류할 수 있다.

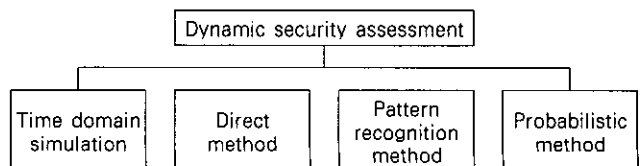


그림 2. 동적 안전도 평가 방법



시간영역(time domain) 모의는 미분방정식의 수치적분을 통해 안정도를 평가하는 방법으로 가장 보편적이고 신뢰도가 높지만 계산시간이 많이 소요되어 on-line 해석보다는 off-line 해석에 많이 사용되고 있다. 따라서 안정도 평가에 필요한 계산시간을 줄이기 위해서 많은 연구가 진행되었고 직접법(direct method)을 안정도 해석에 적용한 것이 그 예이다. 이 밖에도 Neural Network, 전문가 시스템을 이용한 패턴인식(pattern recognition) 방법이나 확률적인(probabilistic) 방법들이 제안되었다.

### 2.1 시간영역 모의 (time-domain simulation)

계통 고장 전·후의 동특성(dynamics)를 나타내는 미분방정식을 수치적분법을 사용하여 시간영역에서 해석하는 방법으로 현재 Runge-Kutta 방법이 가장 널리 이용되고 있다. 이 방법은 디지털 컴퓨터 기술의 발달과 더불어 널리 사용되고 있는 안정도 해석 tool로서 전력계통의 모델링에 제약이 없으며 정확도면에서도 매우 우수하다. 또한 고장후 시간에 따른 물리적 현상과 상태변수들의 정보를 직접 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단순히 안정, 불안정 여부를만 제시하므로 안정도 여유(stability margin)같은 index를 제시하지 못하며 많은 계산기 사용과 계산시간이 소요된다는 단점이 있다.

### 2.2 직접법 (direct method)

에너지 함수 개념을 이용하여 안정도를 평가하는 방법으로 계통의 고장은 기계적 입력과 전기적 출력이 균형을 이루어 운전하고 있던 발전기들의 평형점을 교란시키게 된다. 평형점을 이탈한 발전기들은 기계적 입력과 전기적 출력간의 불균형으로 인해 계통에 과도에너지(transient energy)를 유입시키게 되고 유입된 에너지는 중요기간 동안 발전기 회전자 운동에너지의 증감, 계통내의 위치에너지 변화로 나타난다. 따라서 유입된 에너지를 적절하게 흡수하여 다른 형태의 에너지로 변환시키지 못하게 되면 계통은 동기화를 상실하게 되고 결국 계통으로부터 분리되는 것이다. 여기서 유입된 에너지를 과도 에너지(transient energy)라고 하며 계통의 과도에너지 흡수 능력을 임계에너지(critical energy)라고 부른다.

이 방법은 미분방정식의 해를 수치적으로 직접 계산할 필요가 없어 안정도 판단 시간이 적게 소요되고 에너지 여유(energy margin), 임계고장제거시간(CCT: Critical Clearing Time)과 같은 안정도 index를 제공한다.

#### 2.2.1 Lyapunov 안정도 이론에 의한 직접법(Direct method of Lyapunov)

Lyapunov의 안정도 해석 이론을 계통의 안정도 평가에 적용한 방법이다. 계통의 운동방정식은 대수식으로 결합된 상미분방정식 시스템으로 표현할 수 있으므로 결국 계통의 과도 안정도 해석은 고장 제거후 계통의 안정 평형점의 안정도를 분석하는 것과 동일한 의미를 가지며 이는 시스템 안정도 이론에서 평형점의 안정도를 정성적으로 분석하는

것과 같다.

다음과 같은 시스템을 가정하면

$$\dot{x} = f(x) \quad f(x_e) = 0, \quad \text{여기서 } x_e \text{는 평형점} \quad (1)$$

안정도 해석 과정은

- i) 고장 제거후 계통의 적당한 Lyapunov 함수를 정의한다.
- ii) 점근 안정영역(critical value :h)을 계산하고 상태 변수가 안정영역에 포함되는지 여부를 판단하여 안정도를 판단
- iii) stability index (EX: 에너지 여유, CCT)를 계산한다.

Lyapunov의 직접법에 의한 평형점  $x_e$ 의 안정도 해석은 상태변수로 표현되는 Lyapunov함수  $V(\cdot)$ 가 평형점 근방의 모든점  $x \in B_r(x_e) = \{x \mid V(x) < h\}$ 에서 positive definitness 하고 위 식의 궤적을 따라 미분하여 얻은 도함수가 negative definitness를 만족한다면 평형점  $x_e$ 는 국부적으로 안정하다는 것을 의미하는데 여기서 Lyapunov 안정도 이론에 의해 추정된 안정영역은 사용된 Lyapunov 함수에 따라 다르게 되므로 전체 안정 영역에 근사한 안정 영역을 추정할 수 있는 함수를 적절히 정의하는 것이 대단히 중요하다.

#### 2.2.2 에너지 함수 (transient energy function : TEF) 방법

Lyapunov 함수의 일종인 에너지 함수를 이용하여 과도 에너지와 임계에너지를 계산하여 안정도를 판별하는 방법으로 과정은 다음과 같다.

- i) 고장 제거후의 계통을 위치에너지와 운동에너지로 구성된 에너지 함수로 정의
- ii) 에너지 함수를 이용하여 과도에너지 및 임계에너지를 계산
- iii) 과도에너지 및 임계에너지를 이용하여 안정도 판별
  - 임계에너지 > 과도에너지 : 안정(stable)
  - 임계에너지 < 과도에너지 : 불안정(unstable)
  - 에너지 여유 : 임계에너지 - 과도 에너지

에너지 함수는 식(2),(3)의 판성 중심(COI) 기준축에 대한 발전기의 운동방정식으로부터 얻어진다.

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (2)$$

$$\dot{\theta}_i = \overline{\omega}_i, \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

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

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

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

위 식(2),(3)의 에너지 적분을 통해 식(4)와 같이 운동에너지  $V_{ke}$  와 위치에너지  $V_{pe}$  두 요소로 구성되는 에너지

함수 (TEF)를 얻을 수 있다.

$$V = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n \left( M_i \dot{\omega}_i - P_{mi} + P_{ei} + \frac{M_i}{M_T} P_{coi} \right) \delta_i dt = V_{ke} + V_{pe} \quad (4)$$

과도에너지와 임계에너지는 에너지 적분에서 적분상한값을 각각 고장제거 시점, 제어 불안정 평형점으로 하여 구할 수 있다. 그러나 1기 무한대 모션 계통에서는 불안정 평형점의 수가 한 개만 존재하는데 반해 n기 계통에서는 무수히 많은 불안정 평형점들이 존재하게 된다. 따라서 정확한 임계에너지 계산은 불안정 평형점의 선택과 밀접한 관계를 가지고 있다.

초기에는 임계에너지를 계통의 물리적 상태를 고려하지 않고 불안정 평형점 중에서 최소 위치에너지를 갖는 불안정 평형점에서 추정하였으나 그 후 외란의 영향을 고려한 임계에너지 계산 방법이 제시되었는데 외란이 임계적으로 제거되면 발전기 회전자각 궤적은 어느 한 불안정 평형점에 접근하게 되고 임계에너지는 이점에서 주어지는 위치에너지가 된다는 것이다. 그리고 이 불안정 평형점을 제어불안정 평형점(controlling UEP)이라고 부르며 정확히 식별하여 계산하는 과정이 에너지 함수 방법에서 매우 중요하다.

제어불안정 평형점을 정확히 파악하고 계산하기 위해 MOD(mode of disturbance) 방법 또는 제어불안정 평형점을 직접 계산하지 않고 임계에너지를 구하는 PEBS(potential energy boundary surface) 방법, BCU(boundary of stability region based controlling UEP) 방법등이 제시되었다.

### 2.2.3 등면적 판별법 (equal area criterion)

과도 기간의 계통 동특성을 운동에너지와 위치에너지간의 상호변환으로 해석하는 것으로 고장으로 인해 증가된 운동에너지는 모두 위치에너지로 변환 될 때까지 동요하게 된다.

즉, 운동에너지와 위치에너지의 크기에 의해 계통은 안정 또는 불안정하게 되며 두 에너지의 차가 에너지 여유가 된다. 1기 무한대 모션 계통에 있어서 두 송전선 중 1회선에 고장이 발생하여 고장 발생한 송전선을 개방하여 고장을 제거한 경우를 상징하여 보자.

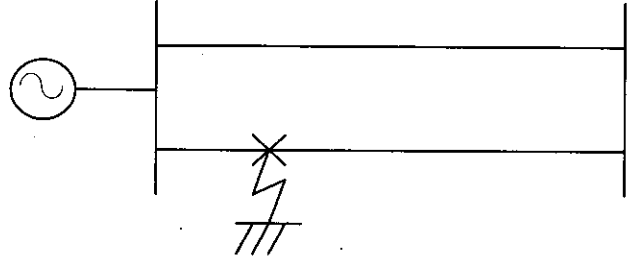


그림 3. 1기 무한대 모션 계통

그림 4와 같이 등면적 판별법을 이용하여 상정사고의 안정도를 해석하면 고장전에는 평형점  $\delta^{s1}$  에서 운전하고 있다. 고장이 발생하면 기계적 입력과 전기적 출력간의 불균형에 의해 발전기 회전자는 전력각 곡선  $C_3$ 을 따라 고장제거 시점  $\delta^{c1}$  까지 가속되고 고장제거 이후의 전력각 곡선은  $C_2$ 가 된다. 고장 제거후 기계적 입력이 전기적 출력에 비해 적게되므로 발전기 회전자는  $A_1=A_2$ 가 되는 지점인  $\delta^m$ 까지 증가후 점점 줄어들고 이후 동요하게 되고 system damping에 의해 새로운 평형점  $\delta^{s2}$ 에 수렴하게 된다. 여기서 영역  $A_1$ 은 고장에 의해 계통으로 유입되는 운동에너지이고 영역  $A_2$ 는 고장 제거후 계통이 흡수하여 변화시킨 위치에너지를 나타내는데 결국  $A_1 < A_2$ 이 되면 계통은 안정하다고 말할 수 있고 운동에너지와 위치에너지의 차이인 에너지 여유는  $A_3$ 과 같다. 또한 임계고장 제거점은 영역  $A_3$ 이 '0'이 되는 고장 제거점이 된다. 이처럼 등면적 판별법을

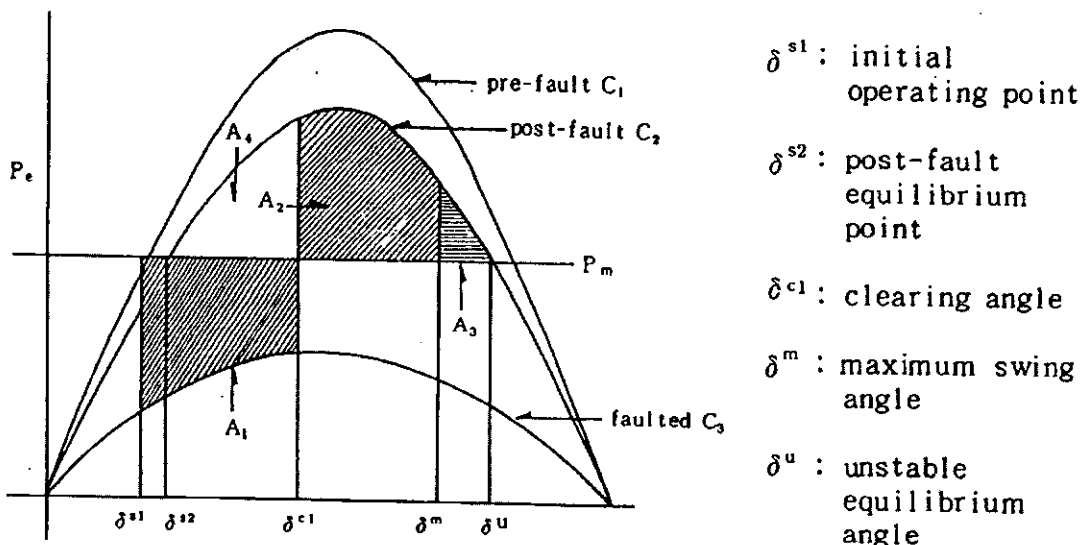


그림 4. 등면적 판별법에 의한 안정도 해석

사용하면 미분방정식을 풀지 않고도 과도 안정도를 판단할 수 있다. 그러나 계통이 3기 이상의 다기 계통일 경우에는 앞선 방법을 직접 적용하는 것이 불가능한데 이런 문제를 해결하기 위해 확장된 등면적 판별법(extended equal area criterion : EEAC)이 제안되었다.

### 2.2.4 확장된 등면적 판별법 (EEAC)

등면적 판별법을 다기계통의 안정도 해석에 적용하고자 제안된 방법으로 먼저 다기계통을 2기 계통으로 등가화 한 후 이를 다시 1기 무한대 모선(OMIB: one machine infinite bus)으로 등가하고 등면적 판별법을 이용하여 안정도를 판별하는 것으로 그 과정은 다음과 같다.

i) 주어진 상정사고에 대해 다기계통을 두 그룹으로 분리한다.

“cluster of critical machine(s)”:(critical cluster) & “remaining system machines”

ii) 각 그룹의 machines를 등가화 시킨다.(2기 계통으로 등가화)

iii) 1기 무한대 모선(OMIB)로 등가

iv) 등면적판별법으로 과도안정도 해석 ; CCT & 안정도 여유 계산

다기계통을 1기 무한대 모선(OMIB)으로 등가하여 해석하는 과정에서 주어진 상정사고에 대해 다기계통을 실제 불안정 상태로 갈 확률이 큰 기기들과 나머지 기기들의 두 그룹으로 구분하는 critical cluster(CC) identification은 매우 중요하고 어려운 문제이다. 기존에 제시된 방법들로서는 초기 가속력이 기기들을 불안정하게 하는 가능성의 척도라고 판단하여 이를 바탕으로 critical cluster를 구분하는 accelerations criterion 과 초기 acceleration 과 각 기기의 고장위치와의 전기적 거리를 사용하는 composite criterion 등이 있다. 그러나 이들 방법들에 의해 선택된 후보 critical cluster 수가 너무 많고 또 실제 critical한 정도를 알 수 없으므로 정확히 critical cluster가 선별되었는지 보장할 수

없다. 이러한 문제를 개선하기 위해 최근에는 주어진 초기 critical cluster에 의해 얻어진 상태들을 Taylor 전개를 이용하여 주어진 임의의 시간에서의 발전기각을 근거로 하여 critical cluster를 선별하는 critical machines ranking(CMR) 방법이 제시되기도 하였다.

### 2.4 hybrid method

hybrid method는 앞서 설명한 시간 영역모의 방법과 직접법을 함께 사용하는 방법으로 계통 모델링에 제약을 받지 않는 시간영역의 장점과 계산시간 속도와 안정도 index를 얻을 수 있는 직접법의 장점을 동시에 사용하고자 하는 것이다. 기존의 제안된 방법으로는 초기 시간영역 모의를 통해 critical cluster구분하고 이를 등면적판별법으로 안정도를 판단하는 등가 발전기 해석법(SIME: single machine equivalent)과 시간영역모의와 에너지 함수를 동시에 사용한 second kick 방법등이 있다.

### 2.5 패턴인식 & 확률적 방법

앞서 소개한 방법들 이외에 패턴인식 및 확률적 방법등의 연구가 진행되어 왔다. 고전적 패턴인식 방법은 구분해야 하는 패턴의 수가 많고 복잡해짐에 따라 정확히 구분하지 못하는 경우가 있고 또한 단순히 사용자에 의해 정해진 rule에 따라 분류 하게된다. 요즘은 전문가 시스템이나 NeuralNetwork을 이용하여 패턴인식을 하는 방법이 많이 사용되고 있는데NeuralNetwork의 경우 이미 알고있는 데이터를 이용하여 입·출력 상관관계를 학습시키게 되면 사용자가 rule을 별도로 정하지 않더라도 학습에 의해 기억된 상관관계를 이용하여 패턴 구분이 가능하다. 그러나 학습 과정에서 많은 시간이 소요되며 또한 학습데이터를 어떻게 구성할 것인가와 NeuralNetwork의 입력이 되는 초기 시스템의 특징을 나타내는 요소들의 적절한 선택 역시 어려운 문제이다. 초기에는 입력으로 각 버스에서의 전압크기 와 위상각 또는 발전기, 부하모선, 선로에 흐르는 유·무효 전력을 사용하여 시스템 특징을 구분하여 왔는데 이들 요소들은 모두 static 시스템 조건만을 나타내고 있어 그 한계를

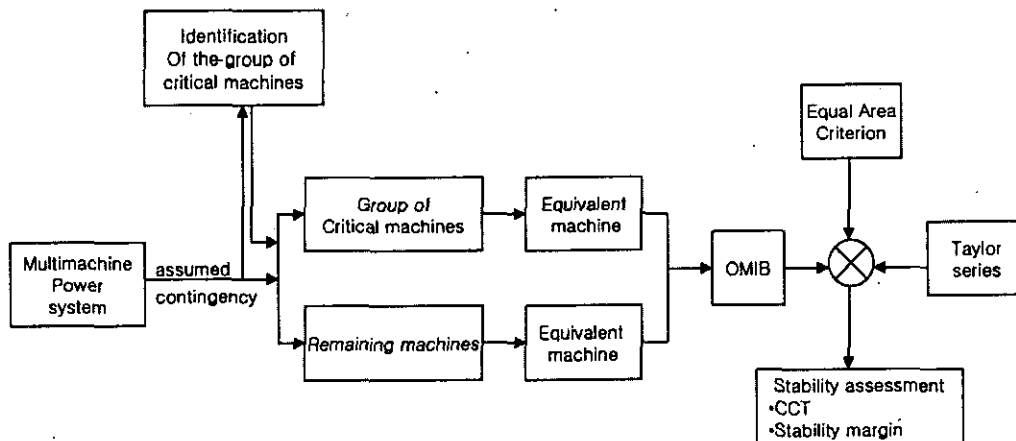


그림 5. 확장된 등면적 판별법

가지게 된다. 따라서 보다 좋은 성능을 얻기 위해 발전기 위상각, 발전기의 동기화력 또는 선로의 유효전력 손실 등을 이용하는 방법이 제시되기도 하였다.

확률적 방법은 초기에 "security function" 이라고 불리는 확률함수를 이용하여 안정도를 판단하였으나 이 함수는 계통의 불확실성이나 계통운전 환경의 영향을 고려하지 못하였다. 향후 계통의 안정도 확률을 평가하기 위해 고장의 확률적인 특성이나 운전 조건(기후, 부하 등)등을 고려하여 정상상태가 긴급상태(emergency state)로 이동할 확률을 통해 안정도를 평가하는 방법 등이 제안되었다.

### 3. 결론 및 향후연구방향

안전한 계통운용을 위해서는 수시로 변화하는 계통 조건 하에서 다양한 상정사고들에 대한 안전도 평가가 수행되어야 한다. 기존의 시간영역 모의를 이용한 off-line 동적 안전도 평가는 전력계통의 규모가 점점 커지고 복잡해지는 상황에서 한계가 있다. 따라서 on-line 상태에서의 동적 안전도 평가가 요구되고 있는데 이러한 on-line 동적 안전도 평가를 위해서는 짧은 시간동안 다양한 상정사고를 스크리닝 할 수 있어야 한다. 현재까지 에너지함수를 이용한 방법이나 등면적법 같은 직접법 및 NeuralNetwork, 전문가 시스템을 이용한 패턴인식 방법 등에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 이러한 방법들도 계산시간이나 정확성 면에서 극복해야 할 문제점을 안고 있다. 근래에는 시간영역 모의와 직접법을 동시에 적용하여 보다 빠르고 정확하게 안정도를 평가하려는 등가발전기 해석법(SIME) 및 fast second kick 방법 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 향후 보다 빠르고 정확한 on-line 동적 안전도 평가를 위해서는 최적의 상정사고 스크리닝 기법 및 과도 안전도 분석 기법 등에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

특히 2003년부터 도입 예정인 우리나라의 전력시장을 효율적으로 운영하기 위해서는 동적 안전도 평가 시스템의 도입이 꼭 필요하리라 전망된다.

#### 참고문헌

- [1] Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Pousseaus and M. Pavella, "SIME : A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection", *Electrical Power & Systems*, Vol.19, No.3 1997, pp. 195-208.
- [2] A. L. Bettiol, L. Wehenkel, M. Pavella, "Transient stability-constrained maximum allowable transfer",

- IEEE Transaction on Power Systems, Vol.14, No.2 May 1999, pp. 654-659.
- [3] Y. Xue, Th. Van. Cutsem and M. Pavella, "Extended equal area criterion justifications, applications", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.4, No.1 February 1989, pp. 44-51.
- [4] P. Kundur, G. K. Morison and L. Wang, "Techniques for on-line transient stability assessment and control", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 4, 2000, pp. 46-51.
- [5] Ebrahim Vaahedi, Yakout Mansour and E. K. Tse, "A general purpose method for on-line dynamic security assessment", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 13, No.1 February 1998, pp. 243-249.
- [6] Felix. F. Wu, Yu-Kun. Tsai and Yi-Xin. Yu, "Probabilistic steady-state and dynamic security assessment", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 3, No.1 February 1988, pp. 1-8.
- [7] Dejan.J.Sobajic and Yoh-Han.Pao, "Artificial neural-net based dynamic security assessment for electric power systems", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.4, No.1 February 1989, pp. 220-227.
- [8] Pavella Murthy, "Transient Stability of Power Systems"
- [9] Y. H. Song, L. Z. Yao, Y. X. Ni and P. L. Mao, "Integrated direct methods for transient stability analysis", *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 27 1999, pp. 139-155

## 저 자 소개



#### 전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월8일생, 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1985년 서울대학교 대학원 전기공학과 석사, 1986년 5월 - 1996년 한국전기연구원 전력계통연구부 근무, 1997년 2월 동경대학 공학부 졸업(공학박), 1996년 4월 - 1998년 2월 동경대 조수 역임, 1998년 2월 - 현재 한국전기연구원 FACTS & Power Quality 연구그룹장