

Development of Demand Response Algorithm Considering Transient Stability

沈建輔[†] ·金正勳^{*}
(Keon-Bo Shim · Jung-Hoon Kim)

Abstract - Nowadays large-scale blackout was occurred in many developed countries. The de-regulation and competition in power industry might have an effort on the disaster. The demand response algorithm for protecting it is needed, and developed introducing the concept of transient stability by nonlinear transition matrix. Two case studies are carried out.

Key Words : 전력계통, 부하차단, 과도안정도, 계통의 안정화, 비선형 전이행렬법

1. 서 론

작년 미국 북동부 지역의 대 정전 사태를 비롯한 전 세계의 선진국들의 정전사태는 전력시장의 도입으로 인한, 신규설비에 대한 제한된 투자와 전력기술의 급격한 변화는 전력계통의 안전도 문제에 중요성을 더더욱 부각시켰다.

우리나라 역시 거제도에 발생했던 정전사태는 이러한 문제가 우리의 재난으로 다가올 수 있음을 보였다. 이러한 우려에 대한 이유는 우리나라의 전력산업은 시대적 요청에 따라 경쟁체제를 도입하여 기능별 회사로 분리가 진행되고 있는 실정이기 때문이다.

경쟁체제 도입은 전력시장을 형성하기 때문에 低價 및 高品質의 전력을 공급하여 시장 점유율을 통한 이익 창출을 위해 각각의 전력회사들은 경영합리화와 기술개발을 위해 노력할 것이다. 그러나 전력을 수송하기 위해서는 물리적인 제약이 수반되므로 전력시장에서 형성된 전력거래가 아무리 경제적이랄 할지라도 전력거래를 중단할 수밖에 없는 경우가 발생할 수 있다. 즉, 전력수송이 가능한 범위 내에서는 자유로운 전력거래가 가능하지만 범위를 초과 또는 위반하게 되면 모든 전력거래가 중단될 수밖에 없는 상태 즉, 전력수송이 불가능한 상태가 발생하기 때문이다. 따라서 이러한 상황이 발생하지 않도록 합리적으로 결정된 기준 내에서 전력수송이 가능해야 된다.

본 논문에서는 전력계통에서 선로사고 및 발전기 사고와 같은 상정사고가 발생한 경우에 계통의 안정적 운영을 위한

대책으로 과도안정도를 고려한 부하 차단량을 결정하는 알고리즘을 개발하였다. 본 논문에서 제안하고자 하는 방법은 문헌[5]에서 제안한 방안을 토대로 하고, 과도안정도의 해석을 위해서는 전력계통의 동 특성 방정식을 차분형 대수식으로 변환하여 해석하는 비선형 전이 행렬법[6]을 이용하였다.

2. 과도안정도 해석

2.1 전력계통의 동태문제

전력계통에서 동태문제는 발전기, 여차기, 터빈-조속기, 보일러 및 각종 제어장치 등이 고려되어야 하며, 이들의 동특성 방정식은 일반적으로 미분방정식의 형태로 표시된다. 이 미분 방정식은 적절한 상태방정식을 도입함으로써 다음과 같은 1계 미분방정식의 연립된 형태인 표준형 방정식으로 변환될 수 있다.

$$X(t) = f(X(t), u(t)) \quad (1)$$

여기서, $X(t)$: 상태 벡터

$u(t)$: 입력 벡터

식 (1)을 선형 부분과 비선형 부분으로 나누어 표현하면 다음과 같이 표현된다.

$$X(t) = AX(t) + g(X(t), u(t)) \quad (2)$$

여기서, A : 선형부분의 상태 계수행렬

$g(X(t), u(t))$: 비선형 부분을 표시하는 함수벡터

식 (2)와 같이 표현된 전력계통의 동태문제는 선형 부분이 많고, 비선형 부분을 표시하는 함수벡터 $g(X(t), u(t))$ 도 몇 개의 성분만이 존재한다. 또한 입력벡터 u 도 주어진 시간대에서는 크게 변화하지 않는다고 가정할 수 있다. 그러므로 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$X(t) = AX(t) + g(X(t), u) \quad (3)$$

즉, 전력계통의 동태문제는 식 (3)과 같은 비선형 연립 1계 미분방정식의 해를 구하는 문제로 귀착된다. 따라서 본 연구에서

[†] 교신저자, 正會員 : 弘益大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博
E-mail : khshim@dreamwiz.com

^{*} 正會員 : 弘益大 工大 電子電氣工學部 研究員 · 工博
接受日字 : 2005年 6月 14日
最終完了 : 2005年 8月 29日

는 비선형 연립 1계 미분방정식의 해법으로 비선형 천이행렬법[6]을 도입하였다.

2.2 비선형 천이행렬법

전력계통의 동태문제를 해결하기 위한 방법의 한가지 방안으로 다음과 같이 정의되는 비선형 천이행렬을 도입하여 일반적인 비선형 연립 방정식의 해를 구하면 된다.

식 (3)과 같은 비선형 미분방정식에서 만일 $g(X(t), u(t))$ 가 해석적 함수라고 하면 이 방정식의 해는 다음과 같이 구해진다.

$$X(t_k + \tau) = \Phi_0 X(t_k) + \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_j \frac{d^{j-1} g(x(t))}{dt^{j-1}} \quad (4)$$

여기서, Φ_0 : 선형 상태 천이행렬

Φ_j : j계 비선형 천이행렬

식 (4)에서 j계 비선형 천이행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi_j = \frac{1}{j!} I \tau^j + \frac{1}{(j+1)!} A \tau^{j+1} + \frac{1}{(j+2)!} A^2 \tau^{j+2} + \dots + \frac{1}{(2j)!} A^j \tau^{2j} + \dots \quad (5)$$

3. 부하차단에 관한 수학적 모델링

3.1 제어변수

계통의 상정사고 시 계통의 안정도를 유지하기 위한 제어변수로 부하모선의 부하차단 량을 다음과 같이 정의하였다.

$$u_i = P_{Li}^{old} - P_{Li}^{new} = P_{Li}^{sh} \quad (6)$$

여기서, P_{Li}^{old} : i 모선의 부하차단 이전의 부하 크기

P_{Li}^{new} : i 모선의 부하차단이후의 부하 크기

P_{Li}^{sh} : i 모선의 부하 차단량

단, 부하의 차단은 single step에서 가능하고, 부하 차단이 가능한 모든 모선에서 동일한 시간 t_{sh} 에서 발생한다고 가정한다. 또한, 고장의 제거시간 t_{cl} 이후에 부하 차단이 가능한 것으로 가정한다($t_{sh} > t_{cl}$).

3.2 비용함수

계통의 과도 안정도를 고려한 부하 차단량의 결정을 위하여 비용함수를 다음과 같이 정의한다.

$$C(u) = \sum_{i=0}^{N_{sh}} (P_{Li}^{old} - P_{Li}^{new})^2 = \sum_{i=0}^{N_{sh}} (P_{Li}^{sh})^2 \quad (7)$$

여기서, n_{sh} : 부하 차단이 가능한 모선의 수

3.3 제약 조건

3.3.1 static equality

상정사고 시 고장을 제거한 상태에서 안정적인 운전점(stable equilibrium point : SEP)에서 정상적인 계통의 운전 상태를 표현하는 등호 제약조건은 다음과 같다.

1) 고장제거후의 안정 운전과 관련된 전력 방정식.

$$f(V_S, P_{GS}, u) = 0 \quad (8)$$

단, 전력계통의 모선 수가 n 인 경우에 이 방정식은 $2n$ 개가 되며, V_S 와 P_{GS} 는 안정적 운전점(SEP)에서의 전압과 발전기의

유효 전력을 나타낸다.

2) 고장 후의 안정 운전점에서 각 발전기의 운전과 관련된 방정식.

$$h_i(V_S, \delta_S) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

단, 계층에 연결된 발전기의 개수가 m 인 경우를 나타낸다.

3.3.2 Dynamic equality

전력 계통의 과도안정도 해석을 위한 동특성 방정식을 차분형 대수식으로 변환한 비선형 천이 행렬법 [6]의 대수식을 표현하면 다음과 같다.

$$X(t_k + \tau) = \Phi_0 X(t_k) + \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_j \frac{d^{j-1} g(x(t))}{dt^{j-1}} \quad (10)$$

$k=1, 2, \dots, n_T$

여기서, X : 계통의 과도특성 변수

τ : 시간의 증분

Φ_0 : 선형 상태천이 행렬

Φ_j : j계 비선형 천이 행렬

$g(x(t))$: 동특성 방정식의 비선형 부분

n_T : 시간대 수

3.3.3 부등호 제약조건

제어 변수인 각 모선의 부하 차단량 u_i 에 대한 부등호 제약조건은 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$0 \leq u_i \leq P_{Li}^{old} \quad i = 1, 2, \dots, n_{sh} \quad (11)$$

3.4 최적화 문제

과도안정도를 고려한 부하 차단량을 결정하기 위한 문제는 다음과 같이 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

$$\min_u C(u) \quad (12)$$

subject to $f(V_S, P_{GS}, u) = 0$

$$h_i(V_S, \delta_S) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$X(t_k + \tau) - \Phi_0 X(t_k) - \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_j \frac{d^{j-1} g(x(t))}{dt^{j-1}} = 0$$

$$k=1, 2, \dots, n_T$$

$$0 \leq u_i \leq P_{Li}^{old} \quad i = 1, 2, \dots, n_{sh}$$

4. 알고리즘

최적화 문제의 방정식과 제약 조건에 따른 함수의 최적화를 위하여 Lagrange 미정계수를 도입하여 확장된 목적함수를 정리하면 다음과 같다.

$$L = C(u) + \lambda^T f(V_S, P_{GS}, u) + \mu^T h(V_S, \delta_S)$$

$$\gamma^T [X(t_k + \tau) - \Phi_0 X(t_k) - \sum_{j=1}^{\infty} \Phi_j \frac{d^{j-1} g(x(t))}{dt^{j-1}}] \quad (13)$$

여기서, λ, μ, γ 는 $2n, m, p \times n_T$ 개의 Lagrange 미정계수이다.

확장된 Lagrangian의 최적화를 위한 Kuhn-Tucker의 필요조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial X_k} = \gamma^T [X(t_k + \tau) - \phi_0 X(t_k) - \sum_{j=1}^{\infty} \phi_j \frac{d^{j-1} g(x(t))}{dt^{j-1}}] = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial V_s} = \lambda^T \frac{\partial f}{\partial V_s} + \mu^T \frac{\partial h}{\partial V_s} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \delta_s} = \mu^T \frac{\partial h}{\partial \delta_s} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{GS}} = \lambda^T \frac{\partial f}{\partial P_{GS}} + \mu^T \frac{\partial h}{\partial P_{GS}} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial C}{\partial u} + \lambda^T \frac{\partial f}{\partial u} + \mu^T \frac{\partial h}{\partial u} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = f(V_s, P_{GS}, u) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = h(V_s, \delta_s) = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma} = X(t_k + \tau) - \phi_0 X(t_k) - \sum_{j=1}^{\infty} \phi_j \frac{d^{j-1} g(x(t))}{dt^{j-1}} = 0 \quad (21)$$

부하 차단량의 변화분은

$$\frac{\partial L}{\partial u} = \frac{\partial C}{\partial u} + \lambda^T \frac{\partial f}{\partial u} + \mu^T \frac{\partial h}{\partial u} \quad (22)$$

으로 계산되며, 수정된 부하 차단량은 다음과 같다.

$$u^{new} = u^{old} + \alpha \frac{\partial L}{\partial u} \quad (23)$$

과도안정도를 고려한 부하 차단량의 결정을 위한 최적화를 위하여 본 논문에서 제안한 방법의 계산 흐름도는 그림 1과 같다.

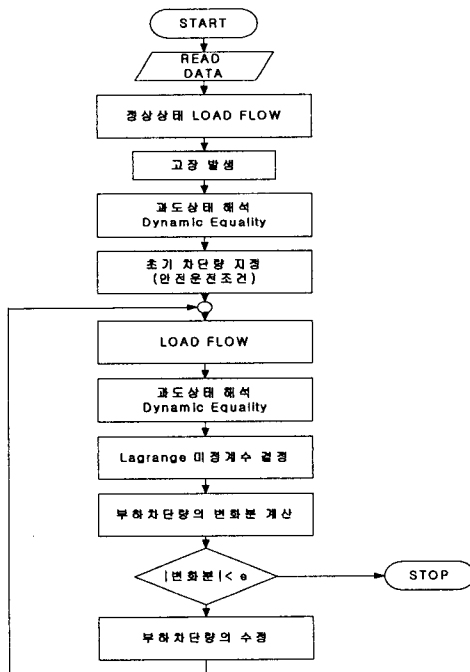


그림 1. 부하 차단량 결정 흐름도
Fig 1. Flowchart of Load Shedding

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 과도안정도를 고려한 부하차단 알고리즘

의 효율성을 입증하기 위하여 발전기 1대와 부하가 연결된 2모선의 샘플 시스템 A와 2개의 발전기와 부하로 구성된 3모선의 샘플 시스템 B를 선택하였다.

5.1 샘플 시스템의 구성

5.1.1 샘플 시스템 A

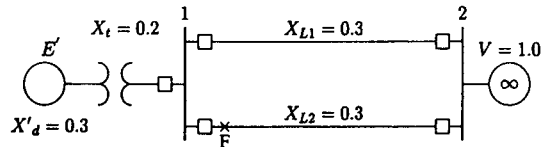


그림 2. 샘플 시스템 A
Fig 2. Sample System A

그림 2에서 보는 바와 같이 1대의 발전기 모선에 2회선의 송전선로와 부하가 연결된 시스템으로서, 시스템의 선로 데이터와 발전기의 데이터, 부하 등에 관한 데이터를 표 1과 2에 보였다.

표 1 선로 데이터

Table 1 Line Data of System A

| 모선번호 p-q | 선로 임피던스 | 서셉턴스 B_{pw} |
|----------|---------------|---------------|
| 1-2 | $0.0 + j 0.3$ | $0.0 + j 0.0$ |
| 1-2 | $0.0 + j 0.3$ | $0.0 + j 0.0$ |

표 2 발전기 및 모선 데이터

Table 2 Generator and Bus Data of System A

| 모선번호 | 전압 크기 V | 전압 위상각 δ | 발전출력 $P_G + jQ_G$ | 부하 $P_L + jQ_L$ | H | D | X'_d |
|------|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----|--------|--------|
| 1 | 1.0 | 0 | $0.8 + j 0.074$ | $0.0 + j 0.0$ | 5.0 | 0.0075 | 0.3 |
| 2 | 1.0 | 0 | $0.0 + j 0.0$ | $0.8 + j 0.074$ | | | |

2회선의 송전선로중에서 1회선의 3상 단락 고장이 발생한 것으로 가정하였으며, 고장 발생 0.5[s] 후에 고장을 제거하고 0.4[s]에서 부하 차단을 실시하는 절차를 가정하였다. 과도 안정도를 계산하기 위한 Δt 는 0.01[s]로 하여 1[s] 동안을 고려하였다.

5.1.2 샘플 시스템 B

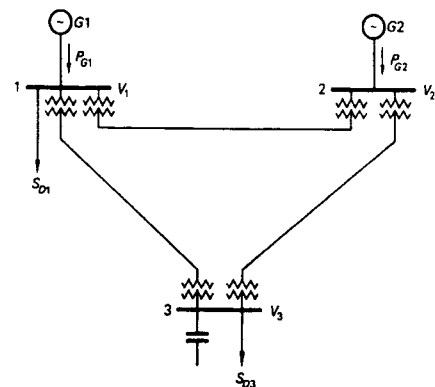


그림 3. 샘플 시스템 B
Fig 3. Sample System B

그림 3에서 보는 바와 같이 2개의 발전기 모선과 부하가 연결된 시스템으로서, 시스템의 선로 데이터와 발전기의 데이터, 부하 등에 관한 데이터를 표 3과 4에 보였다.

표 3 선로 데이터

Table 3 Line Data of System B

| 모선번호 p-q | 선로 임피던스 | 서셉턴스 B_{ω} |
|-------------|----------------|----------------------|
| 1-2 | 0.03 + j 0.12 | 0.0 + j 0.06 |
| 1-3 | 0.035 + j 0.12 | 0.0 + j 0.12 |
| 2-3 | 0.04 + j 0.12 | 0.0 + j 0.05 |

표 4 발전기 및 모선 데이터

Table 4 Generator and Bus Data of System B

| 모선 번호 | 전압 크기 V | 전압 위상각 δ | 발전출력 $P_G + jQ_G$ | 부하 $P_L + jQ_L$ | H | D | X_d |
|----------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------------|------|--------|-------|
| 1 | 1.0 | 0 | 0.8 + j 0.2 | 0.45 + j 0.15 | 5.0 | 0.0075 | 0.3 |
| 2 | 1.0 | 0 | 0.5 + j 0.1 | 0.0 + j 0.0 | 10.0 | 0.0075 | 0.5 |
| 3 | 1.0 | 0 | 0.0 + j 0.0 | 0.8 + j 0.25 | | | |

모선 2에서 3상단락 고장이 발생한 것으로 가정하였으며, 고장 발생 0.5[s] 후에 고장을 제거하고 0.3[s]에서 부하 차단을 실시하는 절차를 가정하였다. 과도 안정도를 계산하기 위한 Δt 는 0.01[s]로 하여 1[s] 동안을 고려하였다.

5.2 계산 결과

5.2.1 샘플 시스템 A

샘플 시스템 A에 대한 결과를 표 5에 보였다. 초기의 부하 차단량을 부하의 10[%]로 가정하여 계산을 시작하였으며, 반복계산회수 6회에서 부하 차단량의 변화분이 0.1보다 작게 나타나서 최종적인 부하 차단량이 0.0711[p.u.]로서 전체 부하의 약 9[%] 정도이다.

표 5 샘플 시스템 A의 계산 결과

Table 5 Results of System A

| 반복 회수 | 비용함수 $C[\times 10^{-4}]$ | 부하차단량 변화분 $\frac{\partial L}{\partial u}$ | 부하 차단량 $P_L^* [p.u]$ |
|----------|-----------------------------|--|-------------------------|
| 0 | 64.00000 | 0 | 0.08 |
| 1 | 55.25786 | 5.69352 | 0.0743 |
| 2 | 51.67808 | 2.41253 | 0.0719 |
| 3 | 50.87068 | 0.57631 | 0.0713 |
| 4 | 50.61702 | 0.15436 | 0.0711 |
| 5 | 50.61702 | 0.03785 | 0.0711 |

5.2.2 샘플 시스템 B

샘플 시스템 B에 대한 결과를 표 6에 보였다. 초기의 부하 차단량을 부하의 10[%]로 가정하여 계산을 시작하였으며, 반복계산회수 5회에서 부하 차단량의 변화분이 0.1보다 작게 나타나서 최종적인 부하 차단량이 0.0787[p.u.]로서 전체 부하의 약 6.3[%] 정도이다.

표 6 샘플 시스템 B의 계산 결과

Table 6 Results of System A

| 반복 회수 | 비용함수 $C[\times 10^{-4}]$ | 부하차단량 변화분 $\frac{\partial L}{\partial u}$ | 부하 차단량 $P_L^* [p.u]$ |
|----------|-----------------------------|--|-------------------------|
| 0 | 156.2500 | 0 | 0.1250 |
| 1 | 63.4011 | 45.3752 | 0.0859 |
| 2 | 58.3440 | 3.2168 | 0.0803 |
| 3 | 57.6963 | 0.4219 | 0.0792 |
| 4 | 57.6608 | 0.0253 | 0.0787 |

5.3 계산 결과에 대한 검토

본 논문의 사례 연구 결과, 작은 규모의 샘플 시스템만을 검토하였지만, 2모선의 샘플 시스템에서는 전체 부하의 약 9.0[%] 정도, 3모선 샘플시스템에서는 약 6.1[%]의 부하를 차단하면서 과도안정도를 만족하는 결과를 얻었다. 따라서 시스템의 규모가 증가할수록 사고 발생 시에 과도안정도를 만족하는 부하 차단량은 전체적인 부하의 크기에 대한 비율이 작아진다는 점을 확인할 수 있었으며, 추후 규모가 더 큰 시스템 및 실규모의 시스템에 대한 본격적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

전력계통에서 선로 및 발전기의 사고는 필연적으로 발생하고 있는 현상으로서, 이러한 사고가 발생하는 경우에 계통을 안정적으로 운전하면서 지속적으로 전력을 공급하고자 하는 노력이 오래 전부터 이루어져 왔다. 본 논문은 이러한 노력의 일환으로서 사고가 발생한 경우에 계통의 안정운전과 전력의 지속적인 공급을 위한 대책 중에서 제어가 가능한 모선에 연결된 부하차단을 시행하는 전략에 대한 것이다. 따라서 본 논문에서는 과도안정도를 만족하면서 적절한 부하를 인위적으로 차단하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 본 논문의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 전력계통에서 과도안정도 해석을 위하여 비선형 천이행렬법을 이용한 프로그램을 개발하였다.
- 2) 과도 안정도를 제약조건으로 하는 부하차단 알고리즘을 수립하였으며, 수립된 알고리즘을 이용하여 최적의 부하 차단량 결정 프로그램을 개발하였다.
- 3) 개발된 부하 차단량 결정 프로그램을 두 개의 샘플 시스템에 적용하여 과도안정도를 만족하면서 최적의 부하 차단량을 각 시스템별로 구하였다. 2모선의 샘플 시스템에서는 전체 부하의 약 9.0[%] 정도, 3모선 샘플시스템에서는 약 6.3[%]의 부하를 차단하면서 과도안정도를 만족하는 결과를 얻었다.
- 4) 따라서, 시스템의 규모가 증가할수록 사고 발생 시에 과도안정도를 만족하는 부하 차단량은 전체적인 부하의 크기에 대한 비율이 작아진다는 점을 확인할 수 있었으며, 추후 규모가 더 큰 시스템 및 실규모의 시스템에 대한 본격적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발 사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. A. Nireberg and D.A. McInnis, "Fast acting load shedding," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 2, May 1992.
- [2] B. ingelsson, P.O. Lindstom, J.O. Sjodin, D. Karlsson, and G. Runvik, "Special protection scheme against voltage collapse in the South part of Swedish grid," Paris, CIGRE Report 38-105, Aug.1996
- [3] M. la Scala, M. Trovato and C. Antonelli, "on-line dynamic preventive control : An algorithm for transient security dispatch," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 13, no. 2, May 1998
- [4] E. De Tuglie, M. la Scala, P. Scarpellini, "Real-time preventive actions for the enhancement of voltage-degraded trajectories," IEEE Trans. on Power Systems.
- [5] enrico De Tuglie, Maria Dicorato, Massimo La Scala, and Pierangelo Scarpellini "A Corrective Control for Angle and Voltage Stability Enhancement on the Transient Time-Scale" IEEE Trans. on Power Systems. vol. 15, no. 4, Nov. 2000
- [6] 김정훈, 비선형 천이행렬을 이용한 전력계통 동특성 해석, 공학박사학위논문, 서울대학교, 1985.
- [7] 서울대학교 생산기술연구소, 전력계통의 동태 안정도 계산 프로그램 개발에 관한 연구, 연구보고서, 1979.
- [8] V. Miranda, J.N. Fidal해, J.A. Peças Lopes, "Real Time Preventive Actions for Transient Stability Enhancement with a Hybrid Neural Network - Optimization Approach", IEEE Trans. on Power Systems. vol. 10, no. 2, Nov. 1995
- [9] Hadi Saadat, Power System Analysis, McGRAW-Hill, 1999.
- [10] K. R. Padiyar, Power System Dynamics Stability and Control, John Wiley & Sons, 1996.

저 자 소 개



심 건 보(沈 建 輔)

1957년 2월 1일 생. 1980년 홍익대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1989년~현재 홍익대학교 과학기술연구소.



김 정 훈(金 正 勳)

1955년 9월 13일 생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1981년~현재 홍익대 전자전기공학부 교수