

에너지 마진을 이용한 과도안정도 제약 급전 알고리즘

論 文
55A-1-1

A Dispatch Algorithm with Transient Stability Constraints by using Energy Margin

鄭 然 在* · 張 東 煥* · 全 瑩 煥†
(Yun-Jae Jung · Dong-Hwan Chang · Yeonghan Chun)

Abstract - The emergence of competitive power market makes dispatch algorithm with transient stability constraints increasingly important for the transparent power system operation. Heuristic and off-line evaluation for the operation point can produce a discrimination among market players in the deregulated power system. In this paper, a dispatch algorithm with transient stability constraints is proposed. Energy margin under the TEF(Transient Energy Function) structure is adopted as a measure for the stability index. Implementation issues and simulation results are discussed in the context of a 10-bus system

Key Words : 과도안정도, 에너지 마진, 에너지 함수법, 급전계획알고리즘, 안정도제약 급전계획

1. 서 론

세계적으로 추진되고 있는 전력 시장의 자유화와 이에 따른 경쟁의 도입으로, 전력 시스템의 운영 패턴이 더욱 다양해질 것으로 전망이 되고 있다. 또한 경쟁의 심화에 따른 전력시스템의 보수적 운영이 제약을 받게 되고, 향후 전력수요의 증가로 송전망 운영은 더욱 중요한 요소가 될 것이다. 과도안정도 제약조건을 오프-라인으로 분석하여 발전기 출력이나 선로 조류의 제약으로 처리하게 되면, 과도하게 보수적으로 운영이 되기 때문에 경제성을 해치게 될 뿐 아니라, 투명한 계통 운영에 제약을 받게 되고 특정 발전사업자가 상대적으로 불이익을 받게 될 가능성이 높아진다. 따라서 경제 급전 알고리즘이 전력시스템의 안정적 운영을 위한 여러 제약조건들을 포함하여, 실질적으로 안정적인 운영이 보장되는 급전결과가 더욱 더 필요하다.

안정도 제약 급전 알고리즘의 연구는 목적함수에 직접 안정도제약 조건을 추가하는 방법[1]과 안정도 제약에 대한 미분 방정식을 차분 방정식으로 바꾸어서 제약 조건화하는 방법[2] 등이 발표되어 왔으나, 실 계통에 적용하기에는 정식화 과정이 너무 복잡하고 시간이 많이 걸리는 단점이 있었다.

본 연구는 이러한 과도 안정도 문제를 기존 OPF 제약조건에 에너지 마진의 제약 조건을 부가하여, 최적화 문제와 안정도 제약을 순환적으로 계산하는 방법을 적용하여 문제

를 단순화 하였다.

2. 본 론

2.1 과도 안정도를 고려한 급전알고리즘 정식화

2.1.1 최적조류계산

최적조류계산의 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Min } f(P_g) \tag{1}$$

$$\text{s.t. } P_g - P_L - P(V, \theta) = 0 \tag{2}$$

$$Q_g - Q_L - Q(V, \theta) = 0 \tag{3}$$

$$S(V, \theta) - S^M \leq 0 \tag{4}$$

$$V^m \leq V \leq V^M \tag{5}$$

$$P_g^m \leq P_g \leq P_g^M \tag{6}$$

$$Q_g^m \leq Q_g \leq Q_g^M \tag{7}$$

여기서 $f(P_g)$ 은 비용함수, P_g 는 발전기의 발전량, 식 (2),(3)은 각각 유효,무효전력 조류방정식을 나타내며, 식 (4)는 송전선로 용량 제약식을, 식 (5)는 전압 제약식을, 식 (6),(7)은 각각 발전기들의 유효전력 출력 제약식을 나타낸다.

2.1.2 과도안정도를 고려한 최적조류계산의 정식화

과도 안정도를 고려한 최적조류계산의 정식화는 다음과 같다.

† 교신저자, 正會員 : 홍익대학교 전자전기공학부 교수
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr

* 正會員 : 홍익대학교 전기정보제어공학과 석사과정
接受日字 : 2005年 6月 29日
最終完了 : 2005年 9月 15日

$$\text{Min } f(P_g) \quad (8)$$

$$P_g - P_L - P(V, \theta) = 0 \quad (9)$$

$$Q_g - Q_L - Q(V, \theta) = 0 \quad (10)$$

$$S(V, \theta) - S^M \leq 0 \quad (11)$$

$$V^m \leq V \leq V^M \quad (12)$$

$$P_g^m \leq P_g \leq P_g^M \quad (13)$$

$$Q_g^m \leq Q_g \leq Q_g^M \quad (14)$$

$$\Delta V \geq 0 \quad (15)$$

여기서 ΔV 는 사고 발생 시 발전기의 과도 안정도 여부를 나타내는 에너지 마진으로 식 (16)으로 주어진다.[3]

$$\Delta V = -\frac{1}{2} M_{eq} \omega_{eq} - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i^d) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^d) - D_{ij} \frac{\theta_i^u - \theta_i^d + \theta_j^u - \theta_j^d}{\theta_{ij}^u - \theta_{ij}^d} (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^d) \quad (16)$$

여기서,

$$M_{eq} = \frac{M_{sys} \times M_{cr}}{M_{sys} + M_{cr}}$$

$$M_{sys} = \sum_{i \in A} M_i \quad A : \text{안정한 발전기 그룹의 집합}$$

$$M_{cr} = \sum_{i \in B} M_i \quad B : \text{불안정한 발전기 그룹의 집합}$$

$$\omega_{eq} = \omega_{cr} - \omega_{sys}$$

$$V_{free} = \frac{1}{2} M_{eq} \omega_{eq} : \text{정정된 운동에너지}$$

θ^u : 불안정 평형점

θ^d : 사고제거 시 위상각

$$C_{ij} = E_i E_j R_{ij}, \quad D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$$

위 식 (16)의 첫 번째 항목은 운동에너지를 나타내고, 두 번째에서 네 번째 항목까지 더한 것이 위치에너지를 나타낸다.

정규화된 에너지 마진(ΔV_n)은 식 (17)에서와 같이 에너지 마진을 정정 운동에너지로 나눈 값으로서 사고의 심각성에 대한 척도를 나타낸다.[1]

$$\Delta V_n = \frac{\Delta V}{V_{KEcorr}} \quad (17)$$

2.2 과도안정도를 고려한 최적조류계산 알고리즘

OPF와 에너지 함수 방법에 의한 과도안정도를 고려한 방법을 순환적으로 계산하는 방법은 다음과 같다.

2.2.1 알고리즘의 구성

step 1 : 주어진 전력시스템에서 OPF(optimal power flow)프로그램을 수행한다. OPF의 결과 P, Q, V, δ , 그리고 사회적 비용을 저장한다.

step 2 : step1에서의 OPF의 결과(P,Q,V, δ)는 에너지 함수 프로그램에서 전력조류방정식의 파라미터로 활용되어 안정·불안정을 판정한다.

에너지 함수프로그램에서 안정하면 프로그램을 종료한다. 불안정하면 step 3을 실행한다.

step 3 : 에너지 함수 프로그램에서 확인된 위험발전기의 출력과 정규화된 에너지 마진을 관계를 저장한다. 정규화된 에너지 마진과 위험발전기의 출력관계를 에너지 민감도 대신 활용하기 위해서이다. 또한 에너지 마진 대신 정규화된 에너지 마진을 이용한 이유는 과도에너지의 두 요소인 사고제거시 운동에너지와 사고제거시 위치에너지를 동시에 고려하면서 사고제거시 운동에너지를 가중인자로 활용하여 발전량과 안정도의 관계를 보다 정확하게 계산하기 위함이다.

step 4 : 최초 위험 발전기들의 출력을 10% 제한한다.

위험 발전기들의 과도에너지를 줄이기 위해서 위험발전기들의 출력을 제한한다.

10%제한한 이유는 발전량 10%제한은 정규화된 에너지 마진과의 관계를 확연히 나타낼 수 있을 정도의 출력제한량이기 때문이다.

step 5 : step 4위험발전기의 10%제한한 결과로 다시 OPF를 수행한다.

위험발전기 10%를 제한한다는 것은 제약조건으로 위험발전기의 출력량을 10%제한한 값을 최대 발전량으로 하여 OPF를 수행한다. OPF를 수행하여 새로이 결정된 결과(P, Q, V, δ)를 저장한다.

step 6 : step 5의 OPF의 결과로 나온 (P, Q, V, δ)로 에너지 함수 프로그램을 수행하여 안정·불안정을 확인하고, 제한 발전량과 정규화된 에너지 마진을 저장한다.

step 7 : step 6의 결과가 불안정하면 step 8을 수행한다. 위험발전기 10%제한이 불안정하기 때문에 발전량을 더 줄이기 위해서 이다. 또 안정하면 step 9를 수행한다.

step 8 : 최초 위험발전기들의 발전량을 15%제한한다. 5%를 더 제한한 이유는 처음 10%제한 발전량과 정규화된 에너지 마진의 상관 관계가 확연히 나타났고, 발전 제한량이 정규화된 에너지 마진이 0에 가깝게 나타나게 하여 오차를 줄이기 위함이다. 발전량 처음보다는 작은 차단량인 5%를 제한하여 최초발전량의 15%를 제한하게 하였다. OPF 수행한 후 에너지 함수 프로그램을 수행하고, 제한 발전량과 정규화된 에너지

지 마진을 저장한다. step 10을 수행한다.

step 9 : 최초 위험발전기들의 발전량을 5% 제한한 후 OPF를 수행한 후 에너지 함수 프로그램을 수행하고, 제한 발전량과 정규화된 에너지 마진을 저장한다. step 10을 수행한다.

step 10 : 위험발전기의 제한량과 정규화된 에너지 마진의 관계를 2차식으로 구성한다. 위험발전기와 정규화된 에너지 마진 관계를 2차식으로 구성한 이유는 사고제거시 운동에너지가 속도의 2차식이라는 점에 착안하였다. 가속화력을 적분하면 운동에너지와 같은 식이 되므로 가속화력은 운동에너지와 2차식의 관계를 가진다. 다시 말해서 발전량을 제한함으로써 운동량은 2차 함수의 관계를 가진다. 수식적으로 표현하면 동요방정식에서

$$P_m - P_e = P_a = M\ddot{\delta} \quad (18)$$

여기서, P_a : 가속화력

식 (18)의 양변에 $\dot{\delta}$ 를 곱하면

$$M\dot{\delta} \ddot{\delta} = P_a \dot{\delta} \quad (19)$$

가 된다

식 (19)를 δ 에 대해서 적분하면 식 (20)과 같다.

$$\frac{1}{2} M\omega^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} P_a \, d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta} P_m - P_e \, d\delta \quad (20)$$

이 된다.

식 (20)의 좌변은 사고제거시 운동에너지와 같은 식이므로 가속화력은 ω^2 에 비례함을 이용하였다.

step 11 : step 9와 step 10에서 불안정 발전기 군에 대해서 안정도 조건을 만족하는 최대 발전량을 산출한다. 불안정 발전기의 발전 감소량 ΔP 와 정규화된 에너지 마진 사이의 관계를 식 (21)과 같이 2차식으로 가정한다.

$$\Delta V_n = a (\Delta P)^2 + b (\Delta P) + c \quad (21)$$

여기서, a, b, c : 계수

불안정 발전기의 출력 변화에 따른 정규화된 에너지 마진의 관계를 3번 계산하면 a, b, c 계수를 계산할 수 있으므로, 불안정 발전기에 대한 발전기 출력 감소량 ΔP_{max} 은 식 (22)로부터 구할 수 있다.

$$a (\Delta P_{max})^2 + b (\Delta P_{max}) + c = 0 \quad (22)$$

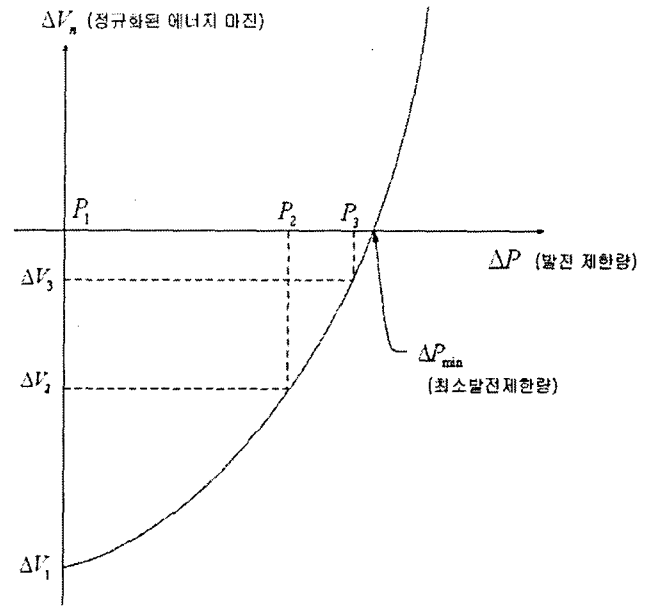


그림 1 발전감소량과 정규화된 에너지 마진

Fig. 1 Reduced Power and Normal Energy Margin

step 12 : step 11의 나온 위험발전기의 결과인 ΔP_{max} 는 불안정 발전기가 안정하기 위한 발전기 출력 감소량이므로, 적절한 마진을 적용한다. 예를 들어, ΔP_{max} 대신에 ($\Delta P_{max} \times 1.1$)을 감소시킨 값을 불안정 발전기의 출력으로 두고 이를 제약 조건으로 OPF를 수행한다.

2.2.2 알고리즘의 흐름도

앞 절에서 설명한 알고리즘을 흐름도로 나타내면 그림 2와 같다.

(1) 사례 연구

앞에서 제안한 알고리즘을 6 발전기, 10모선 18선로 시스템에 대해서 적용하여 알고리즘의 효용성을 검증하였다. 본 사례연구에 적용한 조건은 다음과 같다.

1. 차단기 동작시간은 0.2초
2. 전압제약 조건은 $0.95 < V < 1.05$
3. 발전기 발전비용은 $f(P) = aP^2 + bP + c$ 인 2차 함수라고 가정

그림 3의 계통도를 이용하여 각 스텝별로 알고리즘을 적용하여 계산한 결과는 다음과 같다.

Step 1 : 과도안정도를 고려하지 않고 급전계획한 결과는 표 1과 같다.

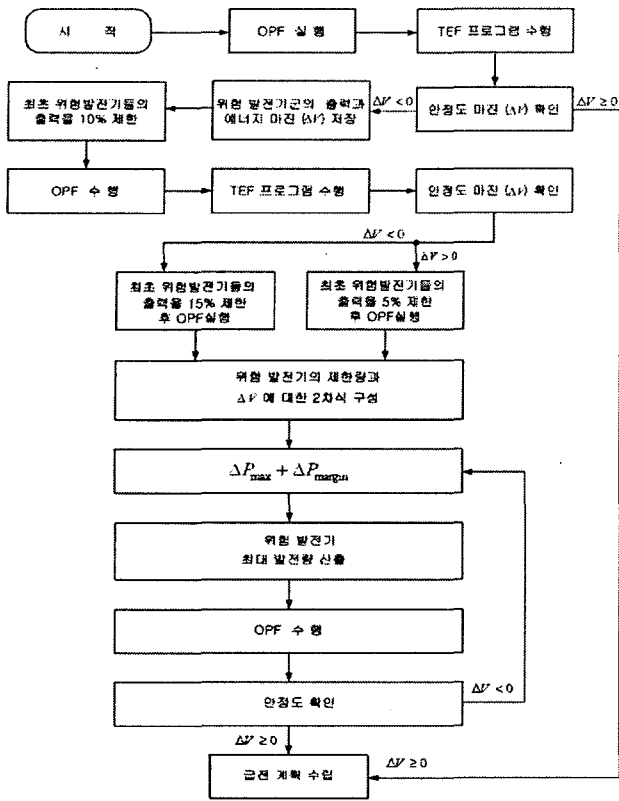


그림 2. 알고리즘의 흐름도
Fig. 2. Flow Chart of the Algorithm

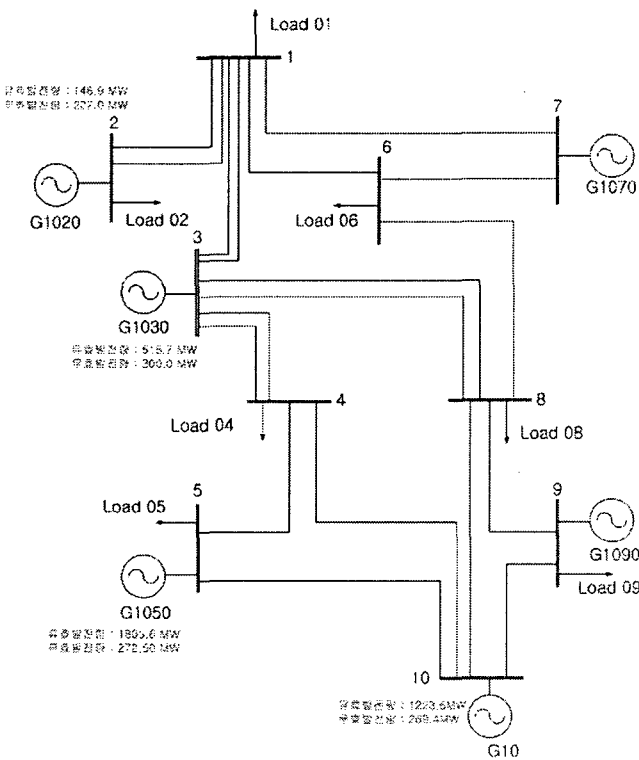


그림 3. 사례연구 계통도
Fig. 3. Case Study System

표 1. 과도안정도를 고려하기 전 급전 계획

Table 1 Dispatch Results without Stability Constraints

발전기명	유효발전량	무효발전량
G1020	148.9	227.0
G1030	515.7	300.0
G1050	1805.6	272.5
G1070	535.0	-71.8
G1090	1219.7	156.9
G1100	1223.6	269.4

총 발전 비용 : 14230.405*10⁸ 원/시간

Step 2 : 급전계획 결과에 대해 상정사고에 대한 과도안정도를 에너지 함수법을 이용하여 평가한 결과는 표 2와 같다.

표 2 안정도 판정 결과

Table 2 Results of the Stability Assessment

사고발생모션	개방선로	정규화된 에너지 마진
1050	1050-1040 1	-0.43167
1050	1050-1100 1	-0.63132
1100	1100-1080	38.29354
1090	1090-1080	11.62445
1090	1090-1100	4.85061
1070	1070-1010	96.8850
1100	1100-1090	26.49621
1030	1030-1010	114.06755
1030	1030-1040	107.75851
1030	1030-1080	80.26752
1020	1020-1010	61.66964
1100	1050-1100	36.09763

불안정 발전기 : 1050모션 발전기

Step 3 : 1050 모션의 발전기가 불안정한 것으로 나타났으므로 이 발전기의 발전량을 10% 감소시키고 급전계획을 수행한다.

표 3. 1050 모션 발전기 출력 10% 감소 후 급전계획 결과
Table 3 Dispatch Results with Constraints of 10% reduced Power at Bus 1050

발전기명	유효발전량	무효발전량
G1020	181.0	5.10
G1030	550.8	269.3
G1050	1625.0	228.4
G1070	568.6	-69.40
G1090	1256.8	154.5
G1100	1263.3	251.7

총발전비용 : 14243.791*10⁸ won per hour

Step 4 : step 3의 급전계획 결과에 대해 안정도를 판정하여 표 4와 같은 결과를 얻었다.

표 4. 안정도 판정 결과

Table 4 Results of the Stability Assessment

사고발생모선	개방선로	정규화된 에너지 마진
1050	1050-1040 1	0.20562
1050	1050-1100 1	-0.08184
1100	1100-1080	27.09243
1090	1090-1080	9.80639
1090	1090-1100	3.92994
1070	1070-1010	60.30865
1100	1100-1090	22.47648
1030	1030-1010	110.08684
1030	1030-1040	108.82433
1030	1030-1080	94.5690
1020	1020-1010	49.62194
1100	1050-1100	24.31634

Step 5 : step 4의 결과가 불안정하므로 1050모선 발전기의 발전량을 15% 감소시키고 급전계획을 다시 수행한다. 그 결과는 표 5와 같다.

표 5. 15%차감 후 발전량

Table 5 Dispatch Results with Constrains of 15% reduced Power at Bus 1050

발전기명	유효발전량	무효발전량
G1020	197.3	4.80
G1030	568.7	269.3
G1050	1534.8	228.4
G1070	585.6	-69.40
G1090	1256.8	154.5
G1100	1263.3	251.7

Step 6 : ΔP 와 ΔV 의 2차 함수 관계식으로부터 $\Delta V=0$ 가 되는 ΔP_{max} 를 계산하고, 10%의 마진을 주어서 안정한 급전계획을 계산한다.

표 6. 최종 급전계획 발전량

Table 6 Final Dispatch Results with Stability Constraints

발전기명	유효발전량	무효발전량
G1020	187.1	5.00
G1030	557.5	260.4
G1050	1591.0	220.9
G1070	575.0	-69.0
G1090	1263.7	154.1
G1100	1270.7	248.9

발전 총비용 : 14249.293×10^8 원/시간

Step 7 : 안정도 제약 조건이 포함된 급전결과를 이용하여 과도 안정도를 평가하여 결과를 확인한다.

표 7. 안정도 평가 결과

Table 7 Results of the Stability Assessment

사고발생모선	개방선로	정규화된 에너지마진
1050	1050-1100	0.007296

Step 8 : 과도안정도를 고려한 급전계획 수립(표 6.)

2.2.3 사례연구 분석

처음에 과도 안정도를 고려하지 않고 계산된 급전계획 결과는 주어진 상정사고에 대해서 불안정한 결과를 보여 주었다. 과도안정도 제약으로 인해 계산된 재급전 결과는 불안정 발전기의 출력을 감소시킴으로써, 같은 상정사고에 대해서도 안정한 결과를 보여 주었다. 이를 PSS/E 시간모의 프로그램으로 확인한 결과 그림 4와 같이 안정함을 알 수 있다.

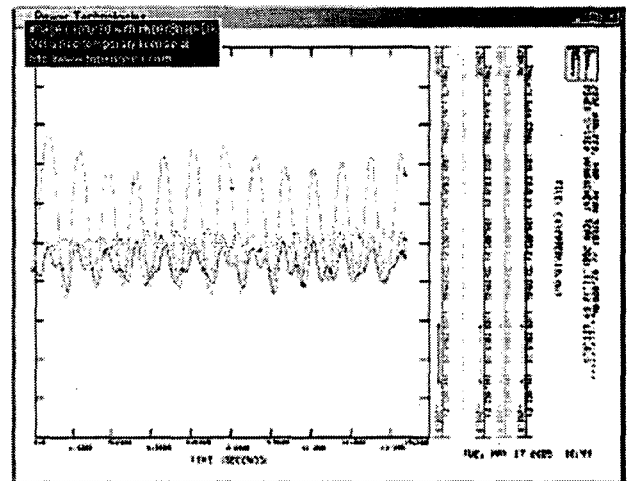


그림 4 PSS/E 시간모의 검정 결과

Fig. 4 PSS/E simulation results

3. 결 론

본 연구에서는 과도안정도 제약을 에너지 함수방법에 의한 에너지 마진 제약으로 직접 급전 알고리즘에 포함시킨 알고리즘을 제안하였다. 에너지 함수 방법은 시간모의법과 달리 직접 에너지 마진을 이용하여 안정도를 판정하기 때문에 급전알고리즘의 제약으로 이용하면 계산 시간적인 측면에서 매우 유리하다. 본 알고리즘을 6-발전기, 10-모선 시스템에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

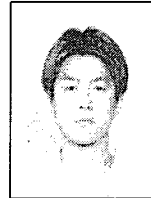
감사의 글

이 논문은 2003년도 홍익대학교 학술연구 조성비로 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Yasuyuki Tada, Hiroshi Okamoto, Ryuya Tanabe, "Optimal Operation Solutions of Power systems with Transient Stability Constraints" IEEE Trans. on Circuit and Systems, vol. 48, no. 3, Mar. 2001
- [2] Deqiang Gan, Robert J. Tomas, Ray D. Zimmerman "Stability-Constrained Optimal Power Flow" IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, no. 15, May 2000
- [3] A. A. Fouad, Vijay Vittal "Power system transient stability analysis using the transient energy function method" Prentice Hall, 1992
- [4] Edward Wilson Kimbark, "Power system stability" vol. 1, 1948
- [5] Vincent Del Toro "Electric Power systems" Prentice-Hall", 1992
- [6] K. Uyemura, J. Matsuki, I. Yamada, and T. Tsuji. "Approximation of an Energy Function in Transient Stability Analysis of Power System." Electrical Engineering in Japan 92, no.4, 96-100, 1972
- [7] Peter W. Sauer, M.A. Pai "Power system dynamics and stability", Prentice Hall, 1998
- [8] M.A. Pai "Power system Stability analysis by Direct Method of Lyapunov. North-Holland Systems and Control Series 3, 1981
- [8] Allen J. Wood "Power Generation Operation and control", John Wiley & Sons, Inc., 1984

저 자 소 개



정연재 (鄭然在)

1976년 11월 21일생. 2003년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 현재 동 대학원 전기정보제어공학과 석사과정.

Tel : 02-320-1620

Fax : 02-320-1110

E-mail : wintertree1228@msn.com



장동환 (張東煥)

1978년 7월 27일생. 2003년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2005년 현재 동 대학원 전기 정보제어공학과 석사과정.

Tel : 02-320-1620

Fax : 02-320-1110

E-mail : 3347821@dreamwiz.com



전영환 (全榮煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985 - 1994년 한국전기연구소 근무. 1997년 동경대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996-1998년 동경대 조수 역임. 1998-2002년 한국전기연구원 그룹장. 2002년-현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 02-320-1620

Fax : 02-320-1110

E-mail : yhchun@hongik.ac.kr