

Monte Carlo法에 의한 複合電力系統의 有效負荷持續曲線 作成法 開發 및 信賴度解析

論 文
48A-5-4

Development of the ELDC and Reliability Analysis of Composite Power System by Monte Carlo Method

文勝必* · 崔在錫** · 辛興教*** · 李順榮*** · 宋吉永§

(Seungpil Moon · Jaeseok Choi · Heungkyo Shin · Soonyoung Lee · Kilyeong Song)

Abstract - This paper presents a method for constructing composite power system effective load duration curves(CMELDC) at load points by Monte Carlo method. The concept of effective load duration curves(ELDC) in power system planning is useful and important in both HL I and HL II. CMELDC can be obtained from convolution integral processing of the probability function of unsupplied power and the load duration curve at each load point. This concept is analogy to the ELDC in HL I. And, the reliability indices (LOLP, EDNS) for composite power system are evaluated using CMELDC. Differences in reliability levels between HL I and HL II come from considering with the uncertainty associated with the outages of the transmission system. It is expected that the CMELDC can be applied usefully to areas such as reliability evaluation, probabilistic production cost simulation and analytical outage cost assessment, etc. in HL II, DC load flow and Monte Carlo method are used for this study. The characteristics and effectiveness of this methodology are illustrated by a case study of the IEEE RTS.

Key Words : Effective load duration curve, Composite power system, Reliability evaluation, Monte Carlo method, DC load flow

1. 서 론

전력계통의 중요한 임무는 수요자에게 양질의 전기에너지를 경제적이고 신뢰성 있게 공급하는 것이다. 그러나 계통 구성요소의 우발적인 사고로 인하여 적정한 전기에너지를 수요자에게 끊임없이 공급한다는 것은 불가능하다. 현대사회는 보다 높은 전력공급의 신뢰성을 요구한다. 그러나 전력계통의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 막대한 설비 투자가 필요하게 되고 대상으로 하는 계통의 신뢰도 수준 여하에 따라 증분 투자비가 급격히 증가하여 적정한 신뢰도수준의 유지는 어렵고도 중요하다. 이러한 전력계통의 신뢰도 평가에 있어 유효부하지속곡선은 각 발전기의 발전량 및 발전비용 그리고 신뢰도지수 등 종합적인 계통자료들을 제공하여 주기 때문에 중요한 역할을 담당하고 있다[1-5]. 한편, 근래 지방화시대를 맞이하면서 각 지역별 공급여유력 평가나 공급지장비 계산 및 신뢰도 평가가 주목받고 있다. 이를 위해서는 송전계통까지 감안한 복합전력계통 (HL II : Hierarchical Level II)에 대한 신뢰도 평가 및 그 응용 수법의 다양한 연구가 필수적이다. 그러나 복합전력계통에 대한 확률론적 신뢰도 평가 지수 및 해석수법이 이미 개발되었음에도 불구하고 그 응용 및 활용은 매우 미흡한 실정이다[6-8]. 그 이유는 복합전력계통의 신뢰도는 각 설비의 구성요소 및 각 지점의

부하크기등과 복잡하게 관련되어 있어 그 해석이 쉽지 않기 때문이며 복합전력계통에 대한 다각적인 각도에서의 확률론적 신뢰도 평가 방법의 기존연구가 부족한데서 비롯된다. 특히, 발전계통 신뢰도 평가 및 그 응용에서 중요하게 활용되고 있는 유효부하지속곡선개념이 복합전력계통까지 확장되지 못하고 있는것도 그 이유중 하나이다. 본 연구에서는 앞으로 복합전력계통에 대한 신뢰도 평가의 응용 및 활용범위를 크게 넓힐 수 있으리라 기대되는 복합전력계통의 유효부하지속곡선(가칭 CMELDC : Composite Power System Effective Load Duration Curve)을 작성할 수 있는 수법을 개발하고 제안한다. 나아가 각 부하지점별 유효부하지속곡선을 통하여 각 부하지점별 신뢰도지수를 계산하여 비교하고 평가한다. 이를 위해서는 조류계산을 필히 수행해야 한다. 그러나 교류법 조류계산은 계산시간이 너무나 크며 유량법(Flow Method)은 선로손실의 존재성과 같은 현실성을 너무 무시하는 단점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 직류법 조류계산을 이용하기로 한다. 직류법 조류계산은 계산 자체가 선형의 성질을 지니고 있으므로 선형계획법의 제약식을 그대로 적용할 수 있다. 나아가 직류법 조류계산을 제약으로 한 선형계획법을 이용하면 수렴판정이나 최적화과정의 반복을 피할 수 있어 보다 빠른 계산을 할 수 있다. 한편, 중요부하의 부하차단을 최소로 하기 위하여 각 부하지점의 중요도를 수치로 나타내고 이를 가중치로 삼아서 계통부하차단의 최소화를 목적함수로 삼아 정식화하였다. 또한 현대사회의 전력계통은 거대하고 복잡한 성향을 띠어가고 있다. 따라서 여기서는 이와 같이 거대하고 복잡한 운용조건을 갖고 부수적인 사건이 비교적 많은 계통의 해석에 있어 해석적 기법보다 유리하다고 알려져 있는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 이용하여 해석하였다. 끝으로 본 연구의 유용성을 보이기 위해 IEEE RTS에 적용하여 보았다.

* 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 12月 1日

最終完了 : 1999年 3月 16日

2. Monte Carlo法에 의한 상태모의

소규모계통이고 신뢰성이 높은 계통에서는 계통구성요소의 사고율이 아주 낮으므로 Monte Carlo법으로 신뢰도 평가를 하고자 한다면 시뮬레이션 시간이나 시뮬레이션 반복횟수를 상당히 늘려야 하지만 해석적 방법에서는 사고율이 낮을수록 여러 발전기나 송전선로가 동시에 탈락할 확률은 '0'에 더욱 가까워지므로 오히려 계산해야 하는 고장상태 차수를 줄여도 되기 때문에 고려해야 하는 상태수가 적어지므로 소규모계통이고 신뢰성이 높은 계통에서는 해석적 방법이 유리하다. 그러나 대규모 계통이나 신뢰성이 낮은 계통의 신뢰도평가를 하는 경우 해석적 방법에서는 여러 발전기나 송전선로가 동시에 탈락할 확률이 증가하여 고려해야 할 상태수가 기하급수적으로 증가하므로 Monte Carlo법이 더욱 유리하다[7]. 그러므로 여기서는 장래에 실제 적용을 위하여 다음과 같은 Monte Carlo법에 의하여 상태모의를 하도록 하였다[7].

복합전력계통에서 어떤 상태가 임의의 부하지점에 대하여 공급지장을 일으킬 상태의 확률을 계산하기 위하여 각 구성요소들의 상태가 운전상태와 고장상태 만을 갖는다고 가정하면 식 (1)과 같이 모의된다.

$$\left. \begin{array}{l} S_i=0 \text{ (운전상태)} \quad x \geq FOR_i \\ S_i=1 \text{ (고장상태)} \quad 0 \leq x < FOR_i \end{array} \right\} \quad (1)$$

단, FOR_i : i 번째 요소의 사고율

이때, 계통의 상태 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}$ 가 되고 S_i 는 i 번째 구성요소(발전기, 송전선로)의 상태이고 x 는 각 구성요소의 상태모의를 위하여 발생된 난수이다. 발생된 난수에 의해서 각각의 구성요소의 상태(운전상태($S_i=0$), 고장상태($S_i=1$))가 모의되고 이들로부터 계통의 상태벡터 S 가 모의된다.

각각의 요소를 n 번 모의할 경우 각 요소들의 사고율은 식 (2)와 같다.

$$FOR_i \approx \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (2)$$

N 번의 상태모의를 할 경우 어떤 상태벡터 S 가 1회 나왔다고 하면 이것의 확률은 식 (3)과 같다.

$$q(S) = \frac{1}{N} \quad (3)$$

이 모의중 상태벡터 S 가 출현한 횟수를 $n(S)$ 라고하면 이 상태의 출현확률은 $n(S)q(S)$ 가 되고 반복횟수를 무한히 크게 하면 출현확률은 식 (4)와 같이 되며 이는 해석적인 방법으로 구할 때의 출현확률에 수렴한다.

$$P(S) = \prod_{i=1}^M FORS_i \approx n(S)q(S) \quad (4)$$

단, $P(S)$: 상태벡터 S 의 출현확률
 M : 구성요소의 수
 $FORS_i = \begin{cases} FOR_i & (S_i=1, \text{고장상태}) \\ 1 - FOR_i & (S_i=0, \text{운전상태}) \end{cases}$
 $n(S)$: 상태벡터 S 가 출현한 횟수

3. 直流法潮流制約 線型計画法에 의한 潮流計算

임의의 계통상태에서 전력조류, 부하지점에서의 최대도달 가능전력 및 공급전력량을 산정하기 위해서는 최적화모델에 의한 최적조류계산을 수행하여야한다. 본 연구에서는 아래와 같이 직류법조류계산에 기초한 전력조류계산을 실시하여 각 상태에서의 전력조류, 최대가능전력 및 공급전력량을 각각 구하도록 하였다.

3.1 目的函數

복합전력계통의 신뢰도해석을 위해서 설정하는 목적함수는 ① 공급지장모션 개소의 수를 최소로 하는 방법 ② 최대 공급지장전력을 최소로 하는 방법 등이 있으나 본 연구에서는 중요한 부하는 가능한 한 차단하지 않고 전 계통의 부하 차단을 최소로 함을 목적함수로 삼기로 하고 이를 식 (5)과 같이 설정하였다[7].

$$\text{Minimize } \sum_{i \in NC} \{ W_i \sum_{k=1}^{MS} \beta_k (P_{Lik \text{ peak}} - P_{Lik}) \} \quad (5)$$

단, $P_{Lik \text{ peak}}$: 모션 i 의 k 부하종류의 최대부하[MW]
 MS : 부하종류의 수 (2~3개)
 P_{Lik} : 모션 i 의 k 부하종류를 공급할 수 있는 공급 부하전력(독립변수)[MW]

여기서, W_i 는 i 번째 부하모션의 중요도를 나타내는 가중치이며 β_k 는 각 부하모션마다 다른 종류의 부하들이 있으므로 이러한 중속된 부하의 중요도를 나타내는 k 부하종류의 가중치이다. 그리고 NC 는 부하모션의 집합을 나타낸다[7].

3.2 制約條件

식 (6)은 전력상차각 관계식을 응용한 직류조류제약, 식 (7)은 각 모션의 수급전력제약 그리고 식 (8)은 부하지점별 부하의 종류의 비를 나타낸다. 식 (9)~(11)은 발전기용량, 송전선로용량, 부하의 한계를 나타내는 제약조건이다.

(1) 전력상차각 제약

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1,n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n,1} & k_{n,2} & \dots & k_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} - P_{L1} \\ P_{G2} - P_{L2} \\ \vdots \\ P_{Gn} - P_{Ln} \end{bmatrix} \quad (6)$$

단, $k_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_{ij}} \quad (j \neq i)$

x_{ij} : 모션 i 와 모션 j 사이의 송전선로의 리액턴스[Ω]
 P_{Gi} : 모션 i 의 발전량 [MW]
 P_{Li} : 모션 i 의 공급부하전력 [MW]

(2) 각 모션의 수급전력 제약

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (j \neq i) \quad (7)$$

단, P_i : 모선 i 의 모선전력 (= $P_{Gi} - P_{Li}$)[MW]
 P_{ij} : 모선 i 와 모선 j 사이의 송전선로에 흐르는 선로조류[MW]

(3) 부하지점별 부하종류의 구성비 제약

$$P_{Lk} = \alpha_{ik} P_{Li} \quad (k=1 \sim MS) \quad (8)$$

단, α_{ik} : 모선 i 의 k 부하의 구성비 [pu]
 $\sum_{k=1}^{MS} \alpha_{ik} = 1.0$

(4) 발전기 출력상한 제약

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi} \max \quad (9)$$

단, $P_{Gi} \max$: 모선 i 에서의 최대발전용량[MW]

(5) 송전선로 용량제약

$$-P_{ijmax} \leq P_{ij} \leq P_{ijmax} \quad (10)$$

단, P_{ij} : 모선 i 와 모선 j 간 선로의 조류[MW]
 P_{ijmax} : 모선 i 와 모선 j 간 선로의 최대용량[MW]

(6) 부하의 한계제약

$$0 \leq P_{Li} \leq L_{pi} \quad (11)$$

단, L_{pi} : 모선 i 의 최대부하[MW]

일반적인 직류법조류계산식에서는 전력과 위상각의 관계식을 이용하여 n 개의 모선중 $n-1$ 개의 전력을 지정하고 나머지만 개의 모선(Swing모선)의 전력은 계산과정에서 구해낸다. 본 연구에서는 $n-1$ 대 $n-1$ 의 행렬을 n 대 n 의 행렬로 확장하여 직류법조류계산을 선형계획법의 제약조건으로 설정이 가능토록 하였다. 그러므로 임의의 주어진 계통 상태에 대하여 식 (6)~(11) 제약조건을 만족하면서 식 (5)를 최소화하는 각 모선의 부하종류별 공급부하전력 P_{Lk} , 공급부하전력 P_{Li} , 그리고 선로조류량 P_{ij} 등을 선형계획법을 이용하여 구할 수 있다.

4. 複合電力系統의 有效負荷持續曲線 및 信賴度指數 산정

4.1 複合電力系統에서의 有效負荷持續曲線

기존의 발전계통에서의 유효부하개념을 복합전력계통까지 확장할 수 있다[1]. 즉, 임의의 부하지점에서 크기가 C [MW]이고 상태 발생확률이 q 인 공급지장전력이 존재한다는 것은, 크기가 C [MW]이고 상태 발생확률이 0인 공급지장전력과 q 인 출현확률을 갖고 크기가 C [MW]인 가상부하가 그 부하지점에 동시에 존재한다는 것과 동일하다. 이때 그 부하지점에서의 확률적 계통부하와 공급지장전력에 기인한 확률적 사고부하를 합하여 복합전력계통의 유효부하라 정의할 수 있다. 임의의 i 부하지점에서의 확률변수를 정식화하면 식 (12)와 같다.

$$i x_e = i x_L + \sum i x_{oj} \quad (12)$$

단, $i x_e$: 복합전력계통의 유효부하 확률변수
 $i x_L$: 확률적 계통부하의 확률변수
 $i x_{oj}$: j 번째의 공급지장전력에 의한 확률적 사고부하의 확률변수

그러므로 임의의 i 부하지점에서의 j 번째 공급지장 전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수 $i \Phi_j(x_e)$ 는 식 (13)과 같이 정의될 수 있다.

$$i \Phi_j(x_e) = i \Phi_{j-1}(x_e) * f_{oj}(x_{oj}) \quad (13)$$

$$= \int_i \Phi_{j-1}(x_e - x_{oj}) f_{oj}(x_{oj}) dx_{oj}$$

단, $*$: 상승적분을 의미하는 연산자
 $i \Phi(x_e - x_{oj}) = i \Phi(x_L)$
 $f_{oj}(x_{oj})$: j 번째 공급지장전력의 사고용량 확률분포함수

만일 i 부하지점에서의 공급지장전력 전체의 사고용량 확률분포함수를 알고 있으면 모든 공급지장전력까지 상승적분된 유효부하지속곡선의 확률분포함수 $i \Phi_i(x_e)$ 는 식 (14)처럼 구할 수 있다.

$$i \Phi_i(x_e) = i \Phi_0(x_e) * f_{oi}(x_{oi}) \quad (14)$$

단, $f_{oi}(x_{oi})$: i 부하지점에서의 공급지장전력 전체의 사고용량 확률분포함수

식 (1)의 Monte Carlo법에 의한 상태모의, 식 (6)~(11)의 직류법조류계산을 제약으로 하는 선형계획법에 의한 부하차단량을 최소화하는 최적조류계산 그리고 식 (14)의 유효부하지속곡선 산출식을 이용하여 본 연구에서 제안하는 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법을 개념도로 나타내면 그림 1과 같다.

즉, Monte Carlo법을 이용하여 상태모의를 하고, 직류법조류 제약 선형계획법에 의한 조류계산을 통하여 모의된 상태의 전력부족용량과 부족용량별 확률을 구한후 이를 종합하여 각 부하지점에 대한 사고용량별 확률분포를 구한다. 이렇게 하여 구해진 사고용량별 확률분포와 부하지속곡선을 상승적분하여 복합전력계통의 유효부하지속곡선을 구할 수 있다.

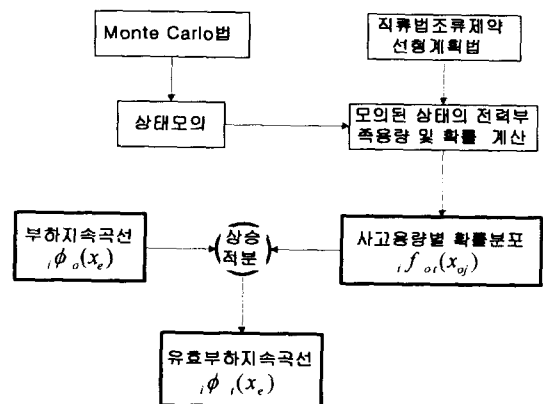


그림 1 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법의 개념도

Fig. 1 Concept diagram for Constructing the Composite Power System ELDC

4.2 複合電力系統에서의 信頼度指數 산정

전력계통의 신뢰도에 대한 척도로 사용되는 신뢰도지수는 다양한 방법으로 표현된다. 신뢰도를 검토하는 방법은 크게 확률론적 방법과 결정론적 방법으로 나누어진다. 이 중 확률론적 방법은 수요와 공급조건 그리고 사고의 발생확률을 고려하여 계통의 적정성이 확보될 수 없는 상태를 확률적으로 평가하는 것으로써 주로 발전계통만을 대상으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 복합전력계통의 신뢰도지수 산정에 있어서는 송전계통의 불확실성까지 고려해야 하므로 계산이 방대하고 복잡하여 지금까지 이에 관한 연구 및 그 응용이 다소 미흡한 실정이다. 신뢰도지수들 중 전력부족확률, 공급지장에너지 기대치 등이 대표적인 지수라 할 수 있으며 특히 유효부하지속곡선은 이들의 종합적인 자료들을 제공한다. 앞서의 복합전력계통의 유효부하지속곡선을 이용하여 각 부하지점별 전력부족확률(Loss of Load Probability : LOLP) 및 공급지장전력량의 기대치(Expected Demand Not Supplied : EDNS)를 각각 식 (15) 및 식 (16)과 같이 산정할 수 있다.

그림 2는 i 부하지점에서의 유효부하지속곡선 및 각 신뢰도지수를 보인 것이다.

$$LOLP_i = \int_{AP_i}^{\infty} \phi_i(x) dx \quad [pu] \quad (15)$$

단, $AP_i = i$ 부하지점의 최대가능공급전력 [MW]

$$EDNS_i = \int_{AP_i}^{AP_i + L_{p_i}} \phi_i(x) dx \quad [MWh] \quad (16)$$

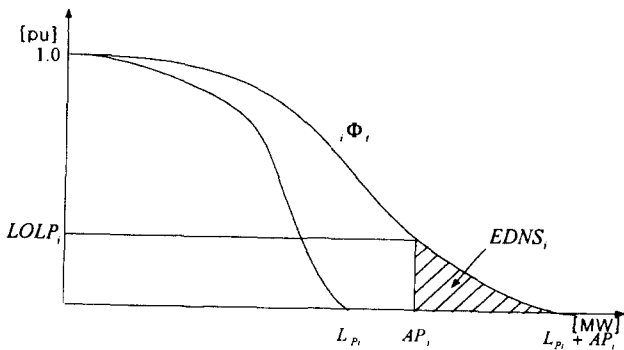


그림 2. 임의의 i 부하지점에서의 유효부하지속곡선 및 신뢰도지수

Fig. 2. Reliability indices and ELDC at # i load point

한편, 발전계통만을 대상으로 할 경우 유효부하지속곡선에서 신뢰도지수인 LOLP는 식 (15)와 같이 구할 수가 있다. 그러나 복합전력계통에서는 각 부하지점별 최대가능공급전력이 얼마나 되는가 전력공급여유력이 어느 정도 존재할 것인가를 미리 예측한다는 것은 어려운 일이다. 본 연구에서는 유효부하지속곡선으로부터 최대가능공급전력에 대응하는 시간축으로부터 LOLP를 구하는 기존의 방법을 역으로 이용하여 유효부하지속곡선을 작성하기 위한 시뮬레이션 과정에서 식 (17)과 같이 각 부하지점별 LOLP를 먼저 구한후 이에 대응하는 전력축상의 점으로부터 각 부하지점별 최대가능공급전력(AP_i)을 구할 수 있었다.

$$LOLP_i = \sum_{j=1}^N q(S) T_{of}(S) \quad (17)$$

$$= q(S) \sum_{j=1}^N T_{of}(S) \quad [pu]$$

단, $q(S) = \frac{1}{N}$

$q(S)$: 상태 S 의 출현확률

N : 총 반복횟수

$T_{of}(S)$: S 상태에서의 i 부하지점의 전력부족시간 [pu]

5. 흐름도

본 연구의 흐름도는 그림 3과 같다. 여기서 송전선로의 상정사고시는 식 (6)의 K 행렬의 변화로 인하여 선형계획법의 제약조건을 다시 수정하여야하고 발전기 상정사고시는 발전기의 상·하한치만 수정하면 된다.

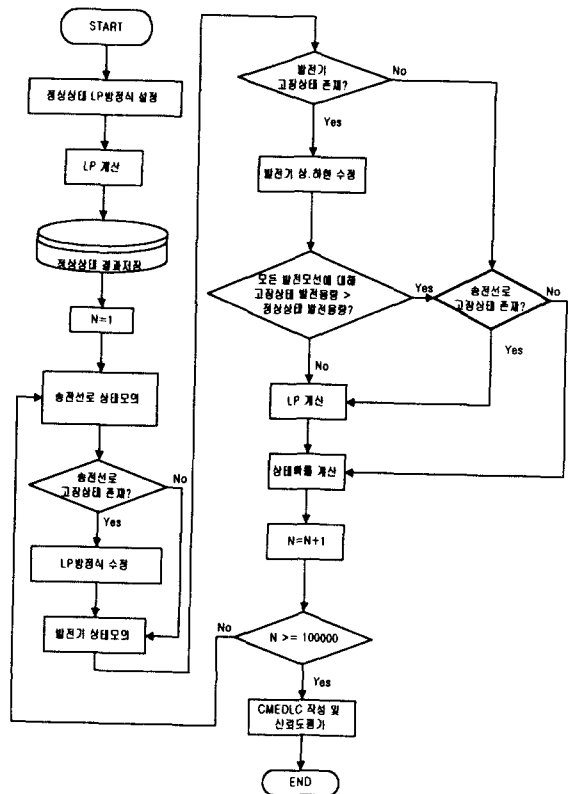


그림 3. 본 연구의 흐름도

Fig. 3. The flow chart for this study

6. 事例研究

본 연구에서 제안하는 수법을 그림 4와 같은 IEEE RTS 24Buses에 적용하여 그 유용성을 살펴보았다.

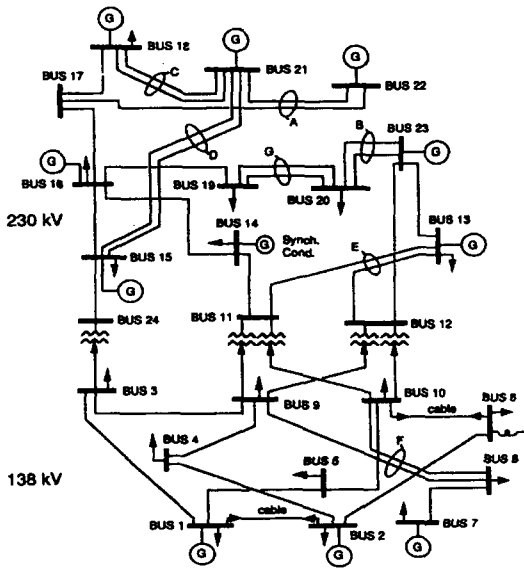


그림 4. 24모선 IEEE 신뢰도 시험계통
Fig. 4. IEEE reliability test system 24buses

표 1은 발전기 자료로서 각 발전모선별 발전기의 용량과 사고율을 보이고 있으며 표 2는 송전선로 자료로서 각 송전선로의 용량과 사고발생빈도, 사고지속시간을 보이고 있다. 표 3은 부하자료로서 각 부하지점의 최대부하, 부하모선의 가중치, 각 부하모선에 종속된 부하의 구성비율을 보이고 있다. 본 연구에서는 각 부하지점의 부하지속곡선을 최대부하의 100[%]에서 70[%]까지 직선이라 가정하고 계산하였다. 각 부하모선에 종속된 부하는 농사용, 주거용, 산업용 3종류로 분류하고 종속된 부하의 중요도를 의미하는 가중치는 각각 1.0, 1.1, 1.2로 설정하였다. 그리고 부하모선의 중요도를 의미하는 가중치를 230[kV]지역은 1.2로 138[kV]지역은 1.0으로 각각 설정하였다.

표 1. 발전기자료

Table 1. Generator data

모선	발전용량 P_{Gmax} [MW] / 사고율					
	발전기 #1	발전기 #2	발전기 #3	발전기 #4	발전기 #5	발전기 #6
1	20/0.02	20/0.02	76/0.02	76/0.02		
2	20/0.05	20/0.02	76/0.02	76/0.02		
7	100/0.04	100/0.04	100/0.04			
13	197/0.05	197/0.05	197/0.05			
15	12/0.02	12/0.02	12/0.02	12/0.02	12/0.02	155/0.04
16	155/0.04					
18	400/0.12					
21	400/0.12					
22	50/0.01	50/0.01	50/0.01	50/0.01	50/0.01	50/0.01
23	155/0.04	155/0.04	350/0.08			

표 2. 송전선로자료

Table 2. Transmission line data

From bus	To bus	용량 [MW] (P_{imax})	사고발생빈도 [occ/yr]	사고지속시간 [hr]
1	2	200	0.24	16
1	3	100	0.51	10
1	5	150	0.33	10
2	4	100	0.39	10
2	6	100	0.48	10
3	9	100	0.38	10
3	23	200	0.02	768
4	9	100	0.36	10
5	10	150	0.34	10
6	10	200	0.33	35
7	8	200	0.30	10
8	9	100	0.44	10
8	10	150	0.44	10
9	11	150	0.02	768
9	12	150	0.02	768
10	11	150	0.02	768
10	12	200	0.02	768
11	13	250	0.40	11
11	14	200	0.39	11
12	13	250	0.40	11
12	23	250	0.52	11
13	23	250	0.49	11
14	16	200	0.38	11
15	16	450	0.33	11
15	21	200	0.41	11
15	24	250	0.41	11
16	17	200	0.35	11
16	19	200	0.34	11
17	18	200	0.32	11
17	22	200	0.54	11
18	21	200	0.35	11
19	20	200	0.38	11
20	23	200	0.34	11
21	22	250	0.45	11

표 3. 부하자료

Table 3. Load data

모선 (i)	최대부하 [MW] (L_{Pi})	부하의 가중치 (W_i)	구성비율 [pu]		
			농사용 (α_{i1})	주거용 (α_{i2})	산업용 (α_{i3})
1	108	1.0	0.4	0.3	0.3
2	97	1.0	0.4	0.3	0.3
3	180	1.0	0.4	0.3	0.3
4	74	1.0	0.5	0.3	0.2
5	71	1.0	0.5	0.3	0.2
6	136	1.0	0.4	0.3	0.3
7	125	1.0	0.4	0.3	0.3
8	171	1.0	0.4	0.3	0.3
9	175	1.0	0.5	0.3	0.2
10	195	1.0	0.5	0.3	0.2
13	265	1.2	0.3	0.3	0.4
14	194	1.2	0.2	0.3	0.5
15	317	1.2	0.2	0.3	0.5
16	100	1.2	0.3	0.3	0.4
18	333	1.2	0.2	0.3	0.5
19	181	1.2	0.2	0.3	0.5
20	128	1.2	0.2	0.3	0.5

그림 5 ~8은 LOLP의 수렴성을 보이고 있다. 여기서 50,000회 정도에서 거의 수렴하고 있음을 알 수 있다.

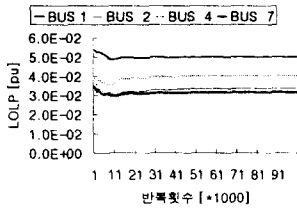


그림 5. 각 부하지점별 LOLP (1,2,4,7)
Fig. 5. LOLP at load points (1,2,4,7)

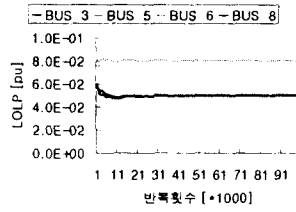


그림 6. 각 부하지점별 LOLP (3,5,6,8)
Fig. 6. LOLP at load points (3,5,6,8)

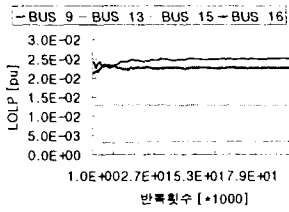


그림 7. 각 부하지점별 LOLP (9,13,15,16)
Fig. 7. LOLP at load points (9,13,15,16)

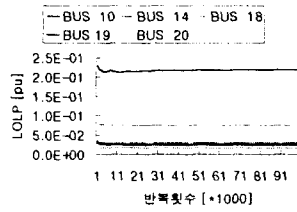


그림 8. 각 부하지점별 LOLP (10,14,18,19,20)
Fig. 8. LOLP at load points (10,14,18,19,20)

본 연구에서 제안하는 방법을 사용하여 얻어진 각 부하지점별 공급지장전력영역에서의 복합전력계통 유효부하지속곡선(CMELDC)는 그림 9~12와 같았다.

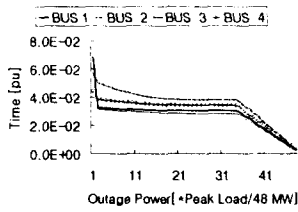


그림 9. 각 부하지점별 CMELDC (1,2,3,4)
Fig. 9. CMELDC at load points (1,2,3,4)

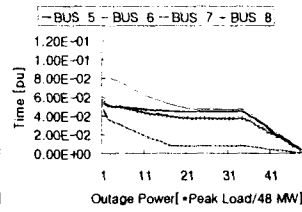


그림 10. 각 부하지점별 CMELDC (5,6,7,8)
Fig. 10. CMELDC at load points (5,6,7,8)

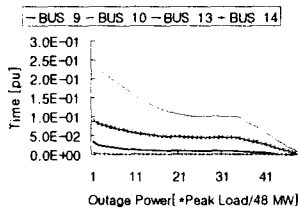


그림 11. 각 부하지점별 CMELDC (9,10,13,14)
Fig. 11. CMELDC at load points (9,10,13,14)

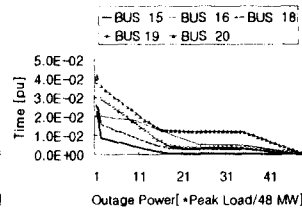


그림 12. 각 부하지점별 CMELDC (15,16,18,19,20)
Fig. 12. CMELDC at load points (15,16,18,19,20)

또한 각 부하지점별 LOLP, EDNS를 계산하면 표 4와 같았다.

표 4 각 부하지점별 신뢰도지수

Table 4. Reliability indices at Load Points

모선번호	LOLP[pu]	EDNS[MWh]
1	0.5008E-01	441.65
2	0.3384E-01	359.52
3	0.4986E-01	803
4	0.4044E-01	307.33
5	0.5048E-01	317.91
6	0.8026E-01	777.45
7	0.3173E-01	359.89
8	0.5018E-01	908.85
9	0.2496E-01	416.1
10	0.2193E+00	2653.55
13	0.3423E-02	327.4
14	0.7459E-01	1135.15
15	0.1282E-01	284.7
16	0.2266E-01	174.47
18	0.1663E-01	233.96
19	0.2564E-01	379.6
20	0.3040E-01	190.53

한편, 그림 13~21은 모선 #15와 #21 사이에 있는 2회선 송전선로중 한 회선만으로 운전한다고 가정할 경우의 계산한 CMELDC를 당초의 것과 비교하여 본 것이다. 이 그림에서 '을 붙인 것은 한 회선만으로 운전한 경우이다'

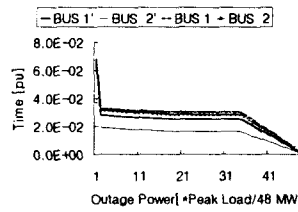


그림 13. 각 부하지점별 CMELDC (1,2)
Fig. 13. CMELDC at load points (1,2)

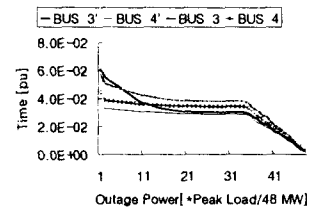


그림 14. 각 부하지점별 CMELDC (3,4)
Fig. 14. CMELDC at load points (3,4)

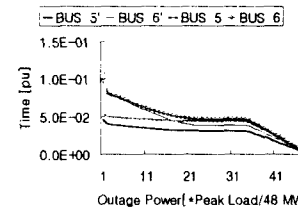


그림 15. 각 부하지점별 CMELDC (5,6)
Fig. 15. CMELDC at load points (5,6)

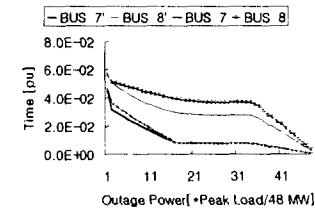


그림 16. 각 부하지점별 CMELDC (7,8)
Fig. 16. CMELDC at load points (7,8)

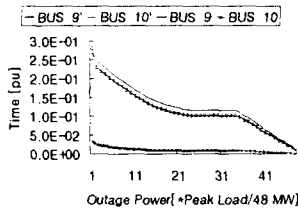


그림 17. 각 부하지점별 CMELDC (9,10)

Fig. 17. CMELDC at load points(9,10)

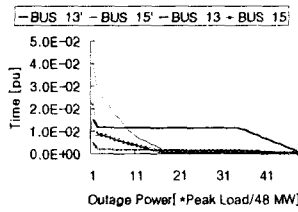


그림 18. 각 부하지점별 CMELDC (13,15)

Fig. 18. CMELDC at load points(13,15)

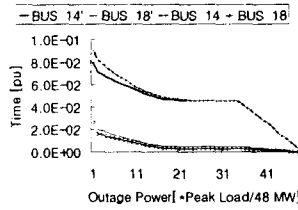


그림 19. 각 부하지점별 CMELDC (14,18)

Fig. 19. CMELDC at load Points(14,18)

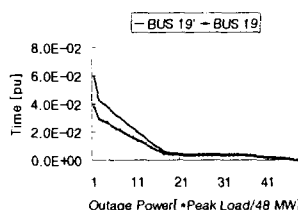


그림 20. 각 부하지점별 CMELDC (19)

Fig. 20. CMELDC at load points(19)

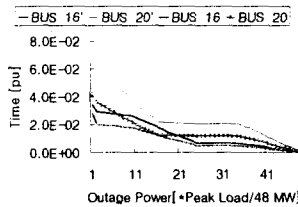


그림 21. 각 부하지점별 CMELDC (16,20)

Fig. 21. CMELDC at load points(16,20)

본 그림들에서 모선 15와 모선 21사이의 송전선로 1회선 제거시 부하모선 1~8은 CMELDC가 오히려 낮아지고 부하모선 9~20은 높아져 전체적으로 각 부하모선별 공급지장영역에서의 CMELDC가 다소 상승하고 있음을 알 수 있다. 또 다른 계산사례로서 각 모선의 위상각 제약을 주지 않은 경우(unrestricted case)와 $-1.0[\text{rad}] \leq \delta_i \leq -0.75[\text{rad}]$ 로 설정하였을 경우, 모선 #15와 #21사이의 송전선로 1회선을 제거한 상태에서 위상각 제약을 주지 않은 경우(unrestricted case)와 $-1.0[\text{rad}] \leq \delta_i \leq -0.75[\text{rad}]$ 로 설정한 경우들에 대하여 계산한 각 부하지점의 LOLP, EDNS를 보이면 표 5와 같다.

표 5에서 본 송전선로 1회선을 탈락시킬 경우 대체로 230[kV]지역의 신뢰도가 낮아짐(LOLP가 높아짐)을 볼 수 있다. 이는 230[kV]지역에서 본 송전선로의 영향을 보다 직접적으로 받는 것을 의미한다. 그리고 동일한 조건하에서 위상각 제약만을 $-1.0[\text{rad}] \leq \delta_i \leq -0.75[\text{rad}]$ 로 하였을 경우 대체로 230[kV]지역의 신뢰도는 높아지고 138[kV]지역의 신뢰도는 오히려 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 모선간의 거리가 커질수록 선로의 리액턴스가 증가하여 위상각이 커지게 되고 위상각

표 5. 송전선로 1회선을 제거한 상태 및 위상각제약을 달리할 경우의 LOLP비교

Table 5. Comparisons of the LOLPs under the one cct contingency and phase angle constraint of the transmission two ccts between bus #15 and bus #21

모선	① unrestricted		② $-1.0 \leq \delta_i \leq -0.75$		
	LOLP [pu]	EDNS[MW]	LOLP [pu]	EDNS[MW]	
138 [kV]	1	0.5008E-01	1.21	0.1406E+00	3.14
	2	0.3384E-01	0.985	0.1525E+00	3.17
	3	0.4986E-01	2.20	0.2374E+00	6.67
	4	0.4044E-01	0.842	0.9245E-01	1.68
	5	0.5048E-01	0.871	0.4047E+00	3.96
	6	0.8026E-01	2.13	0.8888E+00	16.1
	7	0.3173E-01	0.986	0.7571E-01	1.78
	8	0.5018E-01	2.49	0.1469E+00	6.07
	9	0.2496E-01	1.14	0.1431E-01	0.459
	10	0.2193E+00	7.27	0.3985E-01	1.68
230 [kV]	13	0.3423E-02	0.897	0.3120E-02	0.855
	14	0.7459E-01	3.11	0.6077E-01	2.39
	15	0.1282E-01	0.780	0.1092E-01	0.794
	16	0.2266E-01	0.478	0.2815E-01	0.447
	18	0.1663E-01	0.641	0.1041E-01	0.838
	19	0.2564E-01	1.04	0.1227E-01	0.358
	20	0.3040E-01	0.522	0.2013E-01	0.917
	합		27.592		51.308
	송전선로 #15~#21 1회선 제거				
	모선	③ unrestricted		④ $-1.0 \leq \delta_i \leq -0.75$	
LOLP [pu]		EDNS[MW]	LOLP [pu]	EDNS[MW]	
138 [kV]	1	0.5008E-01	1.21	0.1406E+00	4.72
	2	0.3384E-01	0.985	0.1525E+00	3.71
	3	0.4986E-01	2.20	0.2374E+00	10.8
	4	0.4044E-01	0.842	0.9245E-01	1.64
	5	0.5048E-01	0.871	0.4047E+00	4.45
	6	0.8026E-01	2.13	0.8888E+00	27.2
	7	0.3173E-01	0.986	0.7571E-01	1.14
	8	0.5018E-01	2.49	0.1469E+00	5.83
	9	0.2496E-01	1.14	0.1431E-01	0.443
	10	0.2193E+00	7.27	0.3985E-01	0.866
230 [kV]	13	0.3423E-02	0.897	0.3120E-02	0.816
	14	0.7459E-01	3.11	0.6077E-01	3.53
	15	0.1282E-01	0.780	0.1092E-01	0.955
	16	0.2266E-01	0.478	0.2815E-01	0.457
	18	0.1663E-01	0.641	0.1041E-01	1.16
	19	0.2564E-01	1.04	0.1227E-01	0.858
	20	0.3040E-01	0.522	0.2013E-01	1.08
	합		82.776		172.271

제약으로 인하여 선로의 조류가 적어진데서 비롯된다고 사료된다. 그러므로 138[kV]지역의 발전량은 부하량에 비해 모자라고 있음을 알 수 있다. 실제로 230[kV]지역의 최대부하의 합은 1,332[MW]이고 최대발전용량의 합은 2,721[MW]임에 비해 138[kV]지역의 최대부하의 합은 1,518[MW]이고 최대발전용량의 합은 684[MW]이다.

참고로, 표 5의 LOLP(①,③)를 토대로 하여 각 부하지점을 신뢰도 수준별로 분할하여 그림으로 보이면 각각 그림 22 및 23과 같다. 여기서 분할영역 기준은 표 6과 같다.

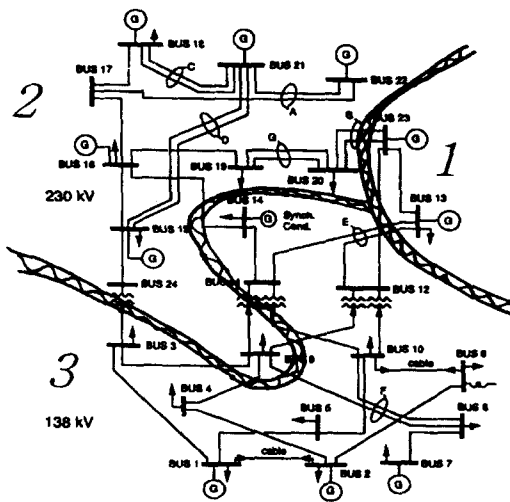


그림 22. 신뢰도 수준별로 구분한 IEEE RTS
Fig. 22. Reliability level zones by the LOLP(①)

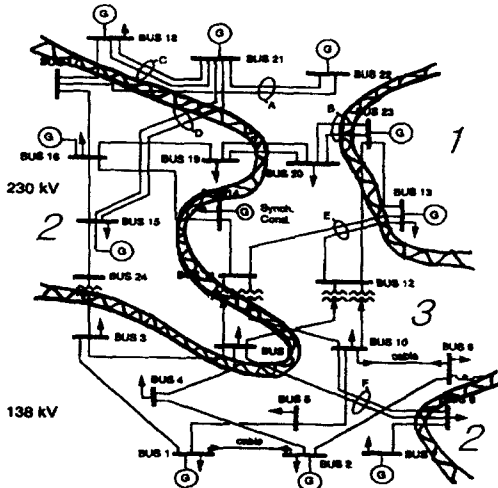


그림 23. 신뢰도 수준별로 구분한 IEEE RTS
Fig. 23. Reliability level zones by the LOLP(③)

표 6. 그림 22 및 그림 23에 대한 분할영역기준
Table 6. Criteria level of the reliability level zones for Fig.22 and Fig.23

zone	LOLP
1	0~0.01
2	0.01~0.301
3	0.301이상

7. 결 론

본 연구에서는 직류법조류계산을 제약으로 하는 선형계획법과 Monte Carlo법을 이용하고 최적의 부하차단을 시행한 가중치의 개념을 도입함으로써 각 부하지점의 부하특성(부하의 중요도)을 고려한 복합전력계통의 각 부하지점별 유효부

하지속곡선을 작성하는 방법을 개발하였으며 사례연구를 통하여 그 유용성을 살펴보았다.

본 연구에서 얻어진 몇가지 중요한 사항을 요약하면 다음과 같다.

1. 각 부하지점별 복합전력계통의 유효부하지속곡선을 작성하고 이것으로부터 각 부하지점별 신뢰도 평가를 할 수 있었다.
2. 직류법조류계산을 선형계획법의 제약식으로 설정함으로써 보다 빠르고 정확한 계통의 확률론적 신뢰도를 계산할 수 있었다.
3. 각 모선의 위상제약에 따른 계통의 신뢰도 변화를 볼 수 있다.
4. 가중치를 이용하여 각 부하의 중요도를 감안하여 중요한 부하의 부하차단을 최소로 하는 방법을 이용하였는데 앞으로 최적의 부하차단 계획수립에 있어 이를 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.
5. 더욱 규모가 큰 계통 적용시에는 본 연구에서 제안하는 Monte Carlo법을 이용한 복합전력계통의 유효부하지속곡선작성법 및 신뢰도 평가수법의 효용성이 더욱 클 것으로 사료된다.
6. 복합전력계통의 신뢰도 평가를 더욱 상세하고 용이하게 할 수 있다. 즉, 복합전력계통의 유효부하지속곡선을 작성하므로써 각 부하지점별 신뢰도지수 및 신뢰도 수준의 특성 파악을 다각적으로 해석 할 수 있는 기초를 마련하였다.

앞으로 본 연구에서 개발한 각 부하지점별 유효부하지속곡선을 이용하여 해석적인 방법에 의한 확률론적 공급지장비추정이나 건강도해석등과 같은 전력계통 신뢰도해석 응용분야에 관한 연구를 계속 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 경상대학교 생산기술연구소 학술연구재단의 지원에 의하여 이루어 졌음.

참고문헌

- [1] 송길영, 전력계통공학의 해석과 운용, 동일출판사, 1990.
- [2] R.L.Sullivan, Power System Planning, McGraw-Hill, 1977.
- [3] X. Wang, J.R and McDonald, Modern Power System Planning, McGraw-Hill, 1994.
- [4] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, Power Generation Operation and Control, John Wiley & Sons, 1984.
- [5] Roy Billinton, "Composite System Reliability Evaluation", IEEE, PAS-88(4), pp. 276-281. 1969.
- [6] Roy Billinton and Ronald N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, Plenum Press, 1984.
- [7] Roy Billinton and Wenyuan Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, 1994.
- [8] Roy Billinton and Easin Khan, "A Security Based Approach to Composite Power System Reliability Evaluation", IEEE, PS-7(1), pp. 65-72. 1992.

- [9] Roy Billinton and W. Ahang, "Enhanced Adequacy Equivalent for Composite Power System Reliability Evaluation", IEE, Proc.-GTD 143(5) pp. 420-426. 1996.
- [10] Roy Billinton and Ronald N. Allan, *Reliability Assessment of Large Electric Power Systems*, Kluwer Academic Pub., 1988.
- [11] Roy Billinton, "A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Data", IEEE PS-4(3), pp. 1238-1244, 1989.
- [12] 남궁재용, 이병준, 송길영, 최재석, "전력계통의 지역간 예비율 산정에 관한 연구", 대한전기학회, 1997년도 추계학술대회 논문집 : pp. 1112-1114. 1997.
- [13] 문승필, 조종만, 강진중, 최재석, "복합전력계통에서의 유효부하지속곡선 작성법의 개발", 대한전기학회, 1997년도 추계학술대회 논문집 : pp. 171-173. 1997.
- [14] 문승필, 김홍식, 장순용, 조종만, 강진중, 최재석, "Monte Carlo법을 이용한 복합전력계통의 유효부하지속곡선 작성법에 관한 연구", 대한전기학회 전력계통연구회, 1998년도 춘계학술대회 논문집 : pp. 227-229. 1998.
- [15] 문승필, 김홍식, 장순용, 조종만, 강진중, 최재석, "복합전력계통의 유효부하지속곡선을 이용한 신뢰도 평가 및 공급지장비 추정", 대한전기학회, 1998년도 하계학술대회 논문집 : pp. 1033-1035. 1998.

저 자 소 개



문 승 필 (文勝必)

1970년 3월 5일생. 1996년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 경상대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 경상대 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : (0591) 751-5342
E-mail : spmoon@cecc-1.gsnu.ac.kr



이 순 영 (李順榮)

1958년 12월 27일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1985년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년 8월~1991년 7월 Yale University 방문교수. 1996년 7월~1997년 12월 Pennsylvania State University 교환교수. 1986년~현재 경상대학교 전기공학과 교수

Tel : (0591) 751-5344
E-mail : sy_lee@nongae.gsnu.ac.kr



최 재 석 (崔在錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987~1988년 고려대 공대 전기공학과 시간강사. 1996년~1997년 University of Saskatchewan 방문교수. 1990년~현재 경상대 전기전자공학부 부교수

Tel : (0591) 751-5347
E-mail : jschoi@nongae.gsnu.ac.kr

송 길 영 (宋吉永)

전기학회논문지 제47권 제1호 참조
Tel : (02) 3290-3216
E-mail : song@eeserver.korea.ac.kr



신 흥 교 (辛興敎)

1958년 4월 21일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1988년 한양대 공대 전기공학과 강사. 1988년~현재 경상대 공대 전기전자공학부 교수

Tel : (0591) 751-5346
E-mail : hkshin@nongae.gsnu.ac.kr