

Cross-Entropy를 이용한 전력계통계획의 확률적 기법 연구

논 문
58-11-9

Probabilistic Technique for Power System Transmission Planning Using Cross-Entropy Method

이 재 희* · 주 성 관†
(Jaehye Lee · Sung-Kwan Joo)

Abstract - Transmission planning is an important part of power system planning to meet an increasing demand for electricity. The objective of transmission expansion is to minimize operational and construction costs subject to system constraints. There is inherent uncertainty in transmission planning due to errors in forecasted demand and fuel costs. Therefore, transmission planning process is not reliable if the uncertainty is not taken into account. The paper presents a systematic method to find the optimal location and amount of transmission expansion using Cross-Entropy (CE) incorporating uncertainties about future power system conditions. Numerical results are presented to demonstrate the performance of the proposed method.

Key Words : Transmission Expansion Planning, Uncertainty, Cross-Entropy Method

1. 서 론

전력계통에서 송전설비의 증설은 계통 신뢰도 향상 [1], [2]뿐만 아니라 최대 송전용량의 증가로 인한 송전혼잡의 감소는 결과적으로 사회적 후생의 증대로 이어진다. 이런 혼잡비용의 감소는 대규모 송전설비건설에 대한 주요 경제적 평가 지표가 되어왔으며 사회적 비용이 최소화된 송전설비계획의 수립을 위해 현재까지 많은 연구가 수행되었다 [3]-[8]. 그러나 지금까지의 연구들은 송전설비계획 문제를 확정적인 예측 자료를 기반으로 연구되었기 때문에 예측 자료의 본질적인 변동성을 고려하기 힘들었다. 송전 계획 결정의 중요한 요소가 되는 연료가격, 전력수요, 발전기의 사고 및 유지보수, 계통설비의 사고, 발전기의 진출입 시기, 수자원의 가용성 등은 불확실성(uncertainty)이 존재한다. 특히 발전연료 가격의 불확실성은 송전설비계획의 결과에 민감한 영향을 끼치는 요소이기 때문에 확정적 자료로 수립된 송전설비계획에서는 발전연료 가격의 예측 정확성이 그 계획의 타당성 평가에 중요한 요소로 작용하였다. 그러나 완벽한 예측은 현실적으로 불가능하기 때문에 확정적인 방법의 송전설비계획은 타당성에 대한 의문과 함께 과잉/과소 투자에 대한 위험을 항상 동반하게 된다. 송전설비건설이 대규모 장기투자 사업임을 감안할 때 이런 예측에 대한 불확실성은 더욱 큰 위험요소로 작용할 것이다. 따라서 예측자료의 불확실성을 고려할 수 있고 미래 변동성에 능동적으로 대처하기 위해 확률적인 송전설비계획 기법이 필요하다.

정보이론에서 활발히 활용되고 있는 Cross-Entropy (CE) 기법은 극히 드문 사건(rare event)의 시뮬레이션을 목적으로 R.Y Rubinstein에 의해 제안된 이후 조합최적화의 문제로 확장되어 다양한 분야에 적용되고 있다 [10]. CE 기법은 복잡한 조합문제에 대해 계산속도와 정확성에서 우수한 기법으로 평가되고 있지만 전력계통분야에서도 발전기동정지계획(unit commitment)에 적용된 연구 [11]가 있을 뿐, 아직까지 활발히 활용되고 있지 않다. 예측자료의 불확실성을 확률적으로 처리하기 위한 복잡한 계산과정을 단순화 시키고 갈수록 비선형적 복잡성(complexity)이 증가하고 있는 송전설비계획 문제의 정확한 해결에도 이런 CE 기법이 적합할 것으로 보인다.

본 논문에서는 이러한 CE 기법을 활용하여 발전운영비와 신설설비의 건설비가 최소화될 수 있는 최적 설비 조합을 찾는 것을 목적으로 발전연료가격의 예측불확실성을 고려한 확률적 송전설비 계획 기법을 제시한다.

2. 송전설비계획 문제의 정식화

송전설비계획은 사회적 후생의 최대화를 목적으로 증가된 전력수요에 최소의 사회적 비용으로 전력을 공급할 수 있도록 송전설비 건설을 계획하는 것이다. 이러한 사회적 비용의 최소화는 전력산업의 시장체제 유무에 상관없이 계통계획에서 일반적으로 요구되는 사항이다 [8]. 여기서 전력수급을 위한 사회적 비용은 신규설비의 건설비용과 발전기 운용비용을 의미한다. 신규 송전설비의 투입으로 발전기의 경제급전이 달라지기 때문에 최적 송전설비의 위치와 용량을 결정하기 위해 발전기의 경제급전도 계산되어야한다. 신설 송전설비의 조합과 경제급전된 발전량은 비선형적 계통의 특성이 반영되어 두 변수를 동시에 결정하는 것은 어려운 문

* 정 회 원 : 고려대 전기전자전파공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 고려대 전기전자전파공학과 조교수·공학

E-mail : skjoo@korea.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 30일

최종완료 : 2009년 9월 23일

제로, 이를 CE 기법에 적용하여 해결하기 위해 가장 널리 활용되고 있는 수학적 모델인 혼합정수 비선형최적화(mixed integer nonlinear optimization) 문제에서의 정식화 [7]-[9], [13], [14]를 기반으로 송전설비계획 문제를 정식화하였다.

2.1 송전설비계획의 목적 함수

송전설비계획은 신규송전설비 건설조합(W)과 각 발전기의 발전량(P_G)을 결정변수로 송전설비의 건설비용과 발전기 운전비용의 합을 최소화를 목적으로 한다. 이는 식 (2.1)과 같이 정식화할 수 있다.

$$\underset{W, P_G}{\text{Minimize}} S(W, P_G) = \underset{W, P_G}{\text{Minimize}} \left[\sum_{i \in E+} C_{Ti} w_i + \sum_{j \in J} C_{Gj} p_{Gj} \right] \quad (2.1)$$

여기서 C_{Ti} 는 송전설비 건설단가를 의미하고, w_i 는 송전설비 건설용량, p_{Gj} 는 발전기 출력을 의미한다. 또한 $E+$ 는 건설 가능한 송전선로의 집합이고 J 는 모든 발전기의 집합을 의미한다.

송전설비의 건설 조합은 건설용량을 연속적인 값으로 모델링하면 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있으며 i 신규송전설비의 용량은 최대건설수량(n_i^{max})과 건설단위 용량(w_i^{unit})에 의해 최대 건설용량이 제한된다. 신설송전설비의 조합과 발전기의 운전비용은 식 (2.3)과 같이 각 발전기의 출력 조합의 샘플에 의해 계산된다.

$$W = \{(w_1, \dots, w_n) : 0 \leq w_i \leq n_i^{max} \cdot w_i^{unit}, i \in E+\} \quad (2.2)$$

$$P_G = \{(p_{G1}, \dots, p_{GJ}) : 0 \leq p_{Gj} \leq p_{Gj}^{max}, j \in J\} \quad (2.3)$$

여기서 W 는 혼합정수 비선형최적화 문제에서 이산적 정수 문제의 결정변수로, 본 논문에서는 이산적 문제와 연속적 문제를 동시에 풀이하기 위해 이산적 문제인 송전설비를 연속적 변수로 설정하고 페널티 함수를 이용하여 이산적 해로 수렴하게 하였다.

2.2 송전설비계획의 제약조건

송전설비계획의 제약조건은 모선별 전력조류 평형방정식, 선로 조류의 상하한 용량제약, 발전기 출력의 상하한 제약이 포함되어야 한다.

$$\sum_{i \in \Psi_s} P_{Gi} - \sum_{r, k \in \Phi_s} f_{srk} = P_{Ds}, \quad \text{for all } s \quad (2.4)$$

$$-P_{srk}^{max} \leq b_{srk}(\delta_s - \delta_r) \leq P_{srk}^{max}, \quad \text{for all } (s, r, k) \in E \quad (2.5)$$

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (2.6)$$

여기서 첨자 s, r, k 는 송전선로의 양 모선번호와 회선번호를 의미한다. 또한 Ψ_s 는 s 모선에서의 발전기 집합이고 Φ_s 는 s 모선과 연결된 송전선로 집합을 의미한다. 식 (2.4) 전력조류 평형방정식은 모든 모선 s 에서 모든 발전량 $\sum P_{Gj}$ 와 모든 유출 송전량 $\sum f_{srk}$ 의 합이 부하 P_{Ds} 와 동일해야함을 의미한다. 식 (2.5)의 선로조류의 상하한 용량 제약에서는

신규설비가 포함된 모든 송전선로 집합 E 에서의 모선 s 와 r 에 연결된 k 회선의 최대 송전량을 P_{srk}^{max} 로 나타내었으며, δ_s 는 모선 위상각을, b_{srk} 는 송전선로의 서셉턴스를 의미한다. 또한 식 (2.6)은 발전기 출력제약을 의미하며 여기서 P_{Gj}^{max} 는 발전기 최대 출력을 뜻한다.

3. CE 기법을 이용한 송전설비계획

3.1 조합최적화 문제의 CE 기법

조합최적화문제에 적용되는 CE 기법은 결정변수를 확률변수로 모델링하고, Monte Carlo 샘플링의 반복실험을 통해 확률밀도함수의 파라미터를 갱신하여 최적점으로 탐색영역을 이동해가는 반복 연산을 수행한다. 여기서 탐색영역이 이동한다는 것은 매 반복연산에서 정의역 영역을 수정하여 최적점의 근처에서 랜덤 추출 빈도를 높일 수 있도록 하는 것이다. 따라서 매 반복연산의 수정된 파라미터의 확률밀도함수를 의미하는 importance sampling density를 추정하는 것이 중요한 문제가 되는데, CE 기법에서는 이 문제를 두 분포의 Kullback-Leiber 거리 (cross entropy)의 최소화로 해결하였다 [10]. Kullback-Leiber 거리는 두 분포의 불확실 거리를 의미하는 것으로 두 분포 $g(\cdot)$ 와 $h(\cdot)$ 의 Kullback-Leiber 거리 ($D(g, h)$)는 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다 [10], [15].

$$D(g, h) = E_g \left[\ln \frac{g(X)}{h(X)} \right] \quad (3.1)$$

CE 기법의 반복연산에서는 확률분포 $g(\cdot)$ 는 $t-1$ 반복연산 확률분포 (g_{t-1})에서 $S(X) \leq \gamma_{t-1}$ 에 해당되는 부분을 의미하고 $h(\cdot)$ 는 t 반복연산 확률분포 (g_t)로 모델링된다. 여기서 $S(X)$ 는 결정변수의 한 조합(X)의 적합도 평가함수 (performance function)를 의미하고 γ_{t-1} 은 $t-1$ 반복연산에서 목적하는 주요추출영역이다. 최소화가 목적인 문제에서 반복연산이 진행될수록 g_t 에서 발생될 수 있는 결정변수 조합의 $S(X)$ 는 g_{t-1} 에서 발생될 수 있는 조합들의 $S(X)$ 보다 낮아지게 되는데, 이때 각 반복연산의 $S(X)$ 범위를 한정짓는 것이 γ 의 역할이다. 즉, $S(X) \leq \gamma_{t-1}$ 에 해당하는 조합(X)만 다음 반복연산의 g_t 의 파라미터 결정에 영향을 미치게 된다. 예를 들어 0, 1의 2진 조합 문제에서 $t-1$ 의 반복연산에서 적합도 평가결과가 $S([x_1=1, x_2=0]) < S([x_1=1, x_2=1]) < \gamma_{t-1} < S([x_1=0, x_2=0])$ 로 나타났다면 t 반복연산에서는 γ 보다 작은 평가를 받은 두 조합을 통해 $p(x_1=1) = \frac{1+1}{2}$, $p(x_2=1) = \frac{1}{2}$ 의 확률분포함수로 갱신된다. 각 반복연산에서 γ 는 고정된 값이 아니며 발생된 조합의 $S(X)$ 의 순위에 따라 결정되게 된다. 따라서 반복연산에서 γ_t 를 최종 목표 영역 γ^* 까지 감소시키면서 최종적으로 $S(X) \leq \gamma^*$ 에 해당하는 importance sampling density를 추정할 수 있다. 이 과정의 문제는 확률분포의 Kullback-Leiber 거리의 최소화는 g_{t-1} 의 주요

추출영역($S(X) \leq \gamma_{t-1}$)을 만족하는 조합과 g_t 의 유사도를 최대화시킬 수 있으며 이는 식 (3.2)의 최적화 문제 [10]로 정식화 된다.

$$\underset{\nu}{\text{Maximize}} E_{g_{t-1}} [I_{\{S(X) \leq \gamma_t\}} \text{IW}(X_i; u, \hat{\nu}_{t-1}) \ln g(X_i; \nu)] \quad (3.2)$$

여기서 $I_{\{S(X) \leq \gamma_t\}}$ 는 $S(X) \leq \gamma_t$ 가 참일 때 1이 되고 그렇지 않다면 0이 되는 함수이고 $\text{IW}(X_i; u, \hat{\nu}_{t-1})$ 는 파라미터 초기값 u 의 확률분포와 $t-1$ 반복연산의 파라미터 $\hat{\nu}_{t-1}$ 의 확률분포 g_{t-1} 에서 추출된 하나의 샘플 X_i 의 likelihood ratio를 의미한다. rare-event 시뮬레이션과 같이 정확한 발생 확률이 필요한 문제에서는 likelihood ratio는 중요한 정보로 작용하지만 조합최적화의 문제에는 조합의 정확한 발생 확률이 아닌 최적의 조합에만 초점이 맞추어지므로 likelihood ratio를 1로 설정하고 풀이하게 된다 [10].

송전설비계획 문제에 적용하기 위해 송전설비 건설조합과 각 발전기의 발전량을 연속적인 확률변수(random variable)로 모델링한 후, 랜덤 샘플링된 각 조합(X)는 S 의 적합도 평가함수로 평가된다. 식 (3.2)의 최적화 문제를 통해 구해진 확률분포 파라미터는 반복연산을 거듭할수록 최적해에 더욱 근접한 X 의 확률분포로 갱신된다.

3.2 CE 기법을 이용한 송전설비계획 알고리즘

송전설비 건설조합과 발전량의 결정변수는 정규분포의 확률변수로 모델링되며 정규분포의 파라미터 갱신은 평균과 분산을 이용한다. 초기 확률분포화된 결정변수는 건설 용량에 있어 치우침이 없어야 하기 때문에 평균은

$$\mu_{0,i} = w_i^{max} \cdot n_i^{max} \text{로 설정하고 분산은 } \sigma_{0,i} = \frac{w_i^{max} \cdot n_i^{max}}{2} \text{로 설정하는 것이 일반적이다. 먼저 추출 범위는 (2.2), (2.3)의 집합 조건으로 제한을 만족하며 발전량과 신설송전용량을 동시에 독립적으로 추출한다. 따라서 추출된 샘플은 결정변수 벡터 } X=(W, P_G) \text{로 구성된다.}$$

랜덤 추출된 조합 X 로 선로의 조류가 계산되며 식 (11)-(13) 제약조건의 적합성 검증과정을 거쳐 만족하지 못하는 조합에는 페널티항 [12]을 적용하여 해당 조합의 발생 확률을 낮출 수 있다. 페널티항을 목적함수 식 (2.1)에 더하여 정리하면 식 (3.3)과 같다.

$$S(W, P_G) = \sum_{i \in E+} C_{Ti} w_i + \sum_{j \in J} C_{Gj} P_{Gj} + H_1 \left| \sum_{j \in J, s \in S} (P_{Gj} - P_{Ds}) \right| + H_2 \sum_{s,r,k \in E} |P_{srk}^{max} - b_{srk}(\delta_s - \delta_r)| + H_3 \sum_{j \in J} |P_{Gj}^{max} - P_{Gj}| \quad (3.3)$$

실제 전력계통 계획에서 설비의 용량은 연속적인 값이 아닌 건설단위가 일정규격으로 제한된다. 따라서 식 (2.2)의 연속적인 조합에서 일정규격의 건설용량에 도달하기 위해서 식 (3.4)와 같이 건설비용의 정식화가 필요하다. 추출된 신설 송전설비 용량이 $(k-1)w_i^{unit} \leq w_i^{unit} < k \cdot w_i^{unit}$ 일 때,

$$C_{Ti} = c_{Ti} w_i \{1 - \alpha(w_i - (k-1) \cdot w_i^{unit})(w_i - k \cdot w_i^{unit})\} \quad (3.4)$$

여기서 $k=1, 2, \dots, n_i^{max}$ 이다. 건설용량(w_i)에 건설단위(w_i^{unit})를 벗어나면 건설비용(C_{Ti})이 페널티가 더해지는 것으로 연속적 건설용량을 건설단위로 수렴시킨다. 이때 c_{Ti} 는 1MW 당 건설단가이고 α 는 가중치를 의미한다.

발전연료가격의 예측 불확실성을 반영하기 위해 먼저 발전단가 C_G 의 확률적 모델이 필요하다. 확정적으로 예측된 발전단가에 과거 발전단가 예측오차의 표준편차를 더함으로써 식 (3.5)과 같이 모델링할 수 있다.

$$C_G = C_{G,forecast} \times \exp(\sigma_C \cdot \epsilon) \quad (3.5)$$

여기서 σ_C 는 연료가격의 변동성을 의미하고 ϵ 는 $N(0, \sigma^2)$ 의 정규분포로 시뮬레이션 과정에서 정규분포로부터 발생된 난수를 의미한다. 하나의 조합 X_i 에 대해 U 개의 C_G 를 랜덤 추출한다면 적합도평가함수 $S(W, P_G)$ 도 U 개가 계산된다. 여기서 X_i 의 최종 적합도평가는 m_c 개의 $S(W, P_G)$ 을 평균을 취하여 식 (3.6)과 같이 발전연료가격으로 변동되는 목적함수의 기댓값을 구할 수 있다.

$$\bar{S} = \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U S_u(W, P_G) \quad (3.6)$$

이와 같은 적합도 평가결과를 바탕으로 확률분포의 파라미터 갱신이 진행된다. 그림 1은 반복연산과정에서 조합 X 를 추출하는 확률밀도함수의 갱신과정을 보이고 있다. 반복연산 과정은 적합도 평가 결과가 우수한 조합을 더 높은 확률로 추출하는 것을 목표로 한다. $t-1$ 의 반복연산에서 γ_{t-1} 이하의 $\bar{S}(X)$ 로 평가된 X 조합이 다음 반복연산에서 더 높은 확률로 추출되는 확률분포 g_t 로 갱신하게 되는데, 여기서 확률분포 g_t 는 확률분포 g_{t-1} 에서 높은 평가를 받은 일부와의 cross-entropy를 최소화함으로써 두 분포의 유사도를 높일 수 있다.

따라서 확률분포 g_{t-1} 에서 추출된 샘플조합 X 의 적합도 평가 결과가 γ_{t-1} 이하인 샘플 조합의 확률분포로부터 t 반복계산의 확률분포 $g_t \sim N(\mu_t, \sigma_t^2)$ 를 식 (3.2)의 최적화를 통해 추정한다. 정규분포의 경우, 식(3.2) 최적화 문제는 식 (3.7), (3.8)과 같은 해석적 해를 구할 수 있다 [10].

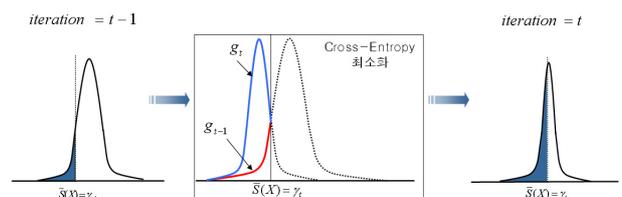


그림 1 확률밀도함수 갱신과정
Fig. 1 Updating probability distribution function

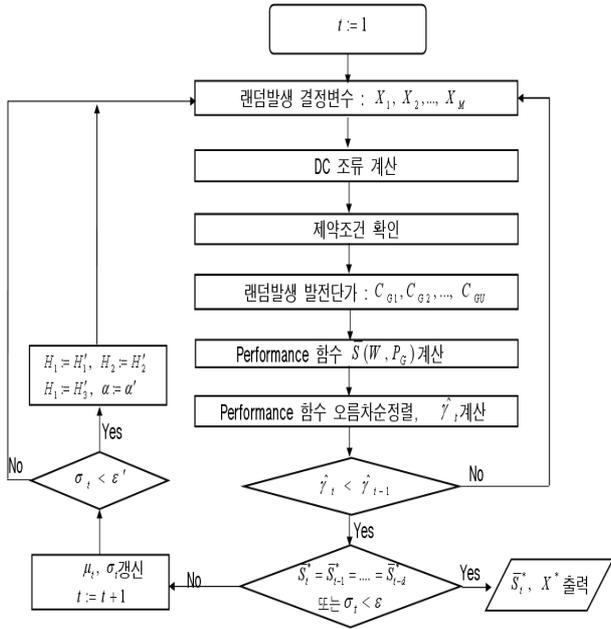


그림 2 송전설비계획 기법 흐름도
 Fig. 2 Algorithm of transmission expansion planning using Cross-Entropy method

$$\hat{\mu}_{t,i} = \frac{\sum_{k=1}^M I_{\{\bar{S}(X_k) \leq \hat{\gamma}_{t-1}\}} X_{k,i}}{\sum_{k=1}^M I_{\{\bar{S}(X_k) \leq \hat{\gamma}_{t-1}\}}} \quad (3.7)$$

$$\hat{\sigma}_{t,i}^2 = \frac{\sum_{k=1}^M I_{\{\bar{S}(X_k) \leq \hat{\gamma}_{t-1}\}} (X_{k,i} - \hat{\mu}_{t,i})^2}{\sum_{k=1}^M I_{\{\bar{S}(X_k) \leq \hat{\gamma}_{t-1}\}}} \quad (3.8)$$

여기서 M 은 샘플 X 의 개수를 의미하고 평가 함수 $\bar{S}(W, P_G)$ 를 오름차순으로 $\bar{S}_{t(1)} \leq \bar{S}_{t(2)} \leq \dots \leq \bar{S}_{t(M)}$ 와 같이 정렬하고 p -분위수(p -quantile) [15]를 이용하여 $\hat{\gamma}_t = \bar{S}_{t(\lceil pM \rceil)}$ 를 계산한다. 알고리즘의 수렴은 \bar{S}^* 의 값이 d 반복횟수 동안 동일하거나 확률분포의 파라미터 변화가 없을 때 수렴한 것으로 판정된다. 즉, 정규분포에서는 $\sigma_{t,i} \leq \epsilon$ 이 될 때 반복연산은 정지하고 최소 \bar{S}^* 와 X^* 를 출력한다. 패널티 상수가 초기부터 과도하게 설정되면 수렴의 정확성을 저하시킬 수 있다. 따라서 초기값으로 낮은 상수로 설정하고 최적지점 근처에서 상당히 큰 상수로 갱신해주는 것이 유용하다. 즉 $\sigma < \epsilon'$ 일 때, 패널티 상수 H 와 건설단위 수렴을 위한 상수 α 를 각각 H' , α' 로 갱신함으로써 최적해의 주위에 탐색영역에서 수렴속도를 높일 수 있다.

전체적인 알고리즘을 다음과 같이 정리할 수 있으며 그림 2과 같이 표현된다.

- 단계 1) 확률분포 파라미터 초기값 설정, $\mu = \mu_0, \sigma^2 = \sigma_0^2$
- 단계 2) 신설설비조합과 발전량의 랜덤 샘플 추출, $X_i = (W_i, P_{Gi})$
- 단계 3) $X_i = (W_i, P_{Gi})$ 적용 계통의 DC 조류 계산
- 단계 4) 발전단가(C_G) 랜덤 추출 및 각 샘플 X_i 의 적합도 평가함수(\bar{S}) 계산

- 단계 5) $\bar{S}_{t(1)} \leq \bar{S}_{t(2)} \leq \dots \leq \bar{S}_{t(M)}$ 로 오름차순 정렬 및 $\hat{\gamma}_t = \bar{S}_{t(\lceil pM \rceil)}$ 계산
- 단계 6) $\hat{\gamma}_t > \hat{\gamma}_{t-1}$ 이면 2단계, $\hat{\gamma}_t \leq \hat{\gamma}_{t-1}$ 이면 단계 7
- 단계 7) d 반복연산 동안 최적값 (\bar{S}^*)이 변화하지 않거나 정규분포의 표준편차 μ_i, σ_i 가 ϵ 보다 작을 때 단계 9, 그렇지 않으면 단계 8
- 단계 8) 식 (3.5), (3.6)의 파라미터 갱신 후 단계 2, 다음 반복연산 수행
- 단계 9) \bar{S}_t^* 및 X_t^* 출력

4. 사례 연구

제안하는 방법을 Gaver 6 모선 계통 [3]에 적용하여 효율성을 검증하기 위해 제안 알고리즘을 구현하고 결과를 분석하였다. 목표연도의 최대부하를 이용한 단년도 송전설비 계획에 대한 사례연구로 초기화과정으로 $M=1500, H_1=1, H_2=10, H_3=1, p=0.1, d=5, \epsilon=0.0001, \alpha=0.5$ 로 설정하였다. 시뮬레이션 결과는 10회 수행한 결과의 평균값이다.

그림 3의 Gaver 6 모선 계통은 6개의 모선과 6개의 송전선로로 구성되며, 3개의 발전기와 부하 정보는 표 1로 나타내었다. 모선 6의 계통 연계가 없을 경우 전력수급을 충족하지 못하게 되므로 G3발전기의 계통 연계가 필수적이다. 발전비용 산정을 위해 각 발전기 비용함수는 1차함수로 모델링되었으며 본 논문의 시뮬레이션에서는 [3]에서 제시된 공장에 \$100를 곱하여 건설비를 산정하였고 발전단가의 변동성을 분석하기 위해 발전기 3의 발전단가를 \$60/MWh로 가정하였다. 신설가능 설비 표 3의 15개의 선로를 각 3회선까지 신설 가능하도록 제한하였다.

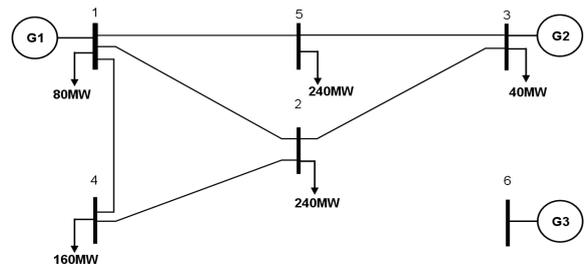


그림 3 Gaver 6모선 계통
 Fig. 3 Gaver's 6 bus system

표 1 모선 정보
 Table 1 Bus data

모선	최대발전용량 [MW]	발전단가 [\$/MWh]	최대부하 [MW]
1	150	10	80
2	-	-	240
3	360	20	40
4	-	-	160
5	-	-	240
6	600	60	-

표 2 신설선로 후보(E+)

Table 2 Candidates for transmission expansion

선로	건설비 [1000\$]	R	X	용량 [MW]
1-2	40	0.10	0.40	100
1-3	38	0.09	0.38	100
1-4	60	0.15	0.60	80
1-5	20	0.05	0.20	100
1-6	68	340	0.17	70
2-3	20	0.05	0.20	100
2-4	40	0.10	0.40	100
2-5	31	0.08	0.31	100
2-6	30	0.08	0.30	100
3-4	59	0.15	0.59	82
3-5	20	0.05	0.20	100
3-6	48	0.12	0.48	100
4-5	63	0.12	0.48	100
4-6	30	0.08	0.3	100
5-6	61	0.15	0.61	78

총 10회의 시뮬레이션 결과 평균 30초 정도의 시뮬레이션 시간이 소요되었으며 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. CASE 1은 확정적인 발전단가를 이용한 신설설비계획 결과로, 선로 3-5를 1회선, 선로 4-6을 3회선 건설이 가장 효과적인 계획으로 결정되었다. 그러나 발전기 3의 발전단가의 확정적인 예측과 달리 크게 변동할 가능성이 있다면 CASE 1의 확정적 시뮬레이션 결과로는 최적의 신설설비 조합을 결정하는 것은 쉽지 않을 것이다. 따라서 CASE 2에서는 불확실한 예측을 고려하여 송전설비의 신설을 결정하기 위해 발전기 3의 발전단가를 예측값 \$60/MWh를 중심으로 변동하는 로그정규분포 $Log-N(4.0943, 0.1^2)$ 로 가정하였다. 여기서 $4.0973 = \ln(60)$ 이다. 로그정규분포로부터 총 100회의 발전단가 샘플을 추출하였으며 결정된 송전설비 신설계획을 표 3의 CASE 2에서 보이고 있다.

표 3 송전설비계획 결과

Table 3 Solution for transmission expansion

	CASE 1 (확정적 발전단가)		CASE 2 (확률적 발전단가)	
	건설회선	건설용량 (MW)	건설회선	건설용량 (MW)
선로 2-3	0	0	1	100
선로 3-5	1	100	1	100
선로 4-6	3	300	3	300

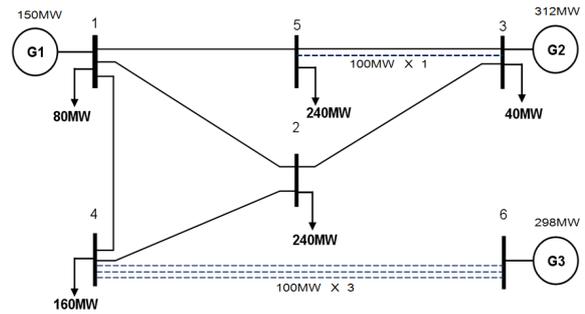


그림 4 CASE1 계획 결과

Fig. 4 Solution of deterministic approach (case 1)

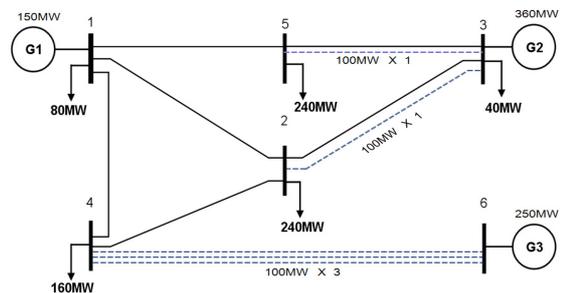


그림 5 CASE2 계획 결과

Fig. 5 Solution of probabilistic approach (case 2)

발전단가의 불확실성을 고려한 결과 CASE 1보다 1개의 추가 증설이 필요한 것으로 계산되었다. 발전기 3의 발전단가가 높아지면 선로 2-3의 1회선 증설비용 보다 발전기 2와 3의 발전량 재분배에 의한 발전기 운전비의 감소가 더 크게 된다. 이러한 경우의 기댓값이 확률적으로 더 큰 영향을 미치기 때문에 CASE 2와 같이 5개 회선 증설의 결론이 도출되었다. 그림 4와 그림 5는 두 계통계획 결과를 도식적으로 보이고 있다.

표 4 송전설비계획의 비용 비교

Table 4 Comparison of the results of two different approach

		CASE 1	CASE 2
건설비용 [\$]	선로 2-3	0	2000
	선로 3-5	2000	2000
	선로 4-6	9000	9000
발전비용 [\$]	발전기1	1500	1500
	발전기2	6240	7200
	발전기3	18874	15834
비용 합계[\$]		37614	37534
발전량 [MWh]	발전기1	150	150
	발전기2	312	360
	발전기3	298	250
발전량 합계[MWh]		760	760

발전연료가격이 통계적으로 로그정규분포와 같은 특성을 보인다고 할 때, 두 가지 방법에 의해 도출된 송전설비계획 결과의 총 사회적 비용의 기대값은 표 4와 같이 나타난다.

이 때 비용은 CASE 2에서 가정한 발전단가의 로그정규분포 확률모형에 의한 기대비용을 의미한다.

CASE 1의 계획에 따른 사회적 비용이 CASE 2에 비해 높게 책정되는 것을 알 수 있다. 따라서 발전단가를 확정적인 데이터로 설비계획을 수립한다면 발전기 3의 변동성에 의해 비용 최소화된 계획에 위험이 나타나게 된다. 이런 위험을 최소화하기 위해 변동성을 가지는 예측데이터를 확률적으로 모델링하고 확률적 기댓값에 의한 최적 설비계획의 수립하여야 유동적인 미래에 대한 최적의 계획안이 될 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통 송전설비계획 문제에 연료가격의 예측 불확실성을 고려하기 위해 Cross-Entropy 기법을 이용한 조합 최적화를 제안하였고 그 유용성 입증을 위해 Gaver 6 모션 계통의 송전설비계획문제에 적용하였다. 확정적인 송전설비계획 결과와 연료가격의 변동성을 반영한 확률적 송전설비계획 결과의 비교에서 과소 투자 계획에 대한 위험을 볼 수 있었으며 이로부터 본 논문의 확률적 계획 기법이 유동적인 미래에 최적의 계획을 수립할 수 있다는 결론을 도출할 수 있었다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 다양한 불확실성을 반영할 수 있도록 알고리즘을 개선하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-D00195)

참 고 문 헌

[1] 전동훈, 최재석, 김건중, "TRELSS를 이용한 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구," 대한전기학회논문지 전력기술부분A, vol. 53, pp. 453-462, Nov. 2006.

[2] 최재석, 강성록, 트룬턴트란, 김호용, 김슬기, "계통계획 수위용 공급지장비의 추정방법 및 이의 응용에 관한 연구," 대한전기학회논문지 전력기술부분A, vol. 53, pp. 285-295, May. 2004.

[3] L. L. Gaver, "Transmission Network Estimation using Linear Programming," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-89, Sept./Oct. 1970.

[4] S. T. Y. Lee, K. L. Hocks, and E. Hnyilicza, "Transmission Expansion of Branch-and-bound Integer Programming with Optimal Cost-Capacity Curves," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, pp. 1390 - 1400, Aug. 1974.

[5] M. V. F. Pereira and L. M. V. G. Pinto, "Application of Sensitivity Analysis of Load Supplying Capacity to Interactive Transmission Expansion Planning," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, pp. 381 - 389, Feb. 1985.

[6] N. Alguacil, A. L. Motto and A. J. Conejo, "Transmission Expansion Planning: A Mixed integer

LP Approach," IEEE Trans. Power Syst., vol. 18 No.2, pp. 1070-1077, Aug. 2003.

[7] E. L. Silva, H. A. Gil, and J. M. Areiza, "Transmission Network Expansion Planning under an Improved Genetic Algorithm," IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, pp. 1168 - 1175, Aug. 2000.

[8] R. A. Gallego, R. Romero, and A. J. Monticelli, "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, pp. 490 - 495, May 2000.

[9] 손민균, 김동진, 김진오, "위험도기반 최적송전확장계획," 대한전기학회 추계학술대회논문집, 2006.

[10] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, "The cross-entropy method," Springer, 2004.

[11] D. Ernst, M. Glavic, G. Stan, S. Mannor, and L. Wehenkel, "The Cross-Entropy Method for Power System Combinatorial Optimization Problems," Power Tech 2007, pp. 1290-1295, Jul. 2007.

[12] D. P. Kroese, S. Porotsky and R. Y. Rubinstein, "The Cross-Entropy Method for Continuous Multi-Extremal Optimization," Methodol. Comput. Appl. Probab., vol. 8, pp. 383 - 407, Feb. 2006.

[13] R. Romero and A. Monticelli, "A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, pp. 373-380, Feb. 1994.

[14] R. Romero, R. A. Gallego, and A. Monticelli, "Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing," IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, pp. 364-369, Feb. 1996.

[15] T. M. Cover, "Element of Information Theory," Wiley Interscience, 2005.

[16] P. Brandimarte, "Numerical Methods in Finance and Economics," Wiley, 2006.

저 자 소 개



이 재 희 (李才熙)

1981년 12월 12일생. 2007년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2009년 동 대학 대학원 전자전기공학과 졸업(공학석사). 현재, 동 대학원 전기전자전파공학과 박사과정.



주 성 관 (朱成官)

1971년 7월 6일생. 1995년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1999년 University of Washington 전기공학과 졸업(공학석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004~2006년, North Dakota State University 조교수. 2006년~현재, 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수.