

ANP 모델이 전력 시스템의 비교 지표에 미치는 영향

김성호, 김길유, 김태운

한국원자력연구소

Effects of the ANP Models on the Comparison Indicators of Electric Power Systems

Seong Ho Kim*, Kilyoo Kim, Taewoon Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

(*Corresponding author: shokim@kaeri.re.kr)

초 록

서로 갈등적인 관계에 있는 다중 기준 하에서 다양한 국가 전력 시스템을 정량적으로 비교하는 데에는 전력 시스템의 비교 지표가 필요하다. 이러한 비교 지표를 산출하기 위하여 해석적 망형 과정(Analytic Network Process; ANP) 모델 가운데 상호 의존도 수준이 낮은 되먹임 모델 및 상호 의존도가 없는 독립성 모델이 개발되었다. 이러한 ANP 모델은 구성요소로 교점들(nodes)과 상호작용 관계를 표현하는 가지들(arcs)을 포함하고 있다. 의사결정 목표 교점에는 세 가지 유형의 리스크 성향이 포함되었다. 이러한 리스크 성향은 원자력 발전소 같은 위험 설비에 대한 전문가(그룹)의 리스크 성향이며, 더 구체적으로 말하면, 리스크 감수 성향, 리스크 혐오 성향, 리스크 중립 성향 등이다.

여기서 수행된 연구의 주요 목적은 ANP 모델을 구성하는 교점들 가운데 하나인 평가 기준 교점에서의 변화가 전력 시스템의 비교 지표에 미치는 영향을 해석하려는 것이다. 이러한 모델 변이가 비교 지표에 미치는 영향을 알아보기 위한 사례 연구에서 각 발전원의 특성을 비교할 평가 기준은 기준 사례와 비교 사례 각각에 대하여 상이하게 선정되었다: 기준 사례의 경우에는 보건성을 대표하는 생명 단축 [yr/TWh], 환경성을 대표하는 지구 온난화 [g CO₂-eq./kWh], 사회성을 대표하는 지속가능 정도[-], 경제성을 대표하는 발전 단가 [₩/kWh] 등이 선정되었다; 반면에, 비교 사례의 경우에는 보건성을 대표하는 사고 사망 [death/GWh]만이 다르고 나머지는 동일하게 선정되었다.

이러한 보건성을 대표하는 생명 단축 또는 사고 사망의 선정은 다음과 같은 비교 지표에 영향을 미친다는 것이 발견되었다: (1) 되먹임 모델에서는 성향 가중치 및 기준 등급에 영향을 준다. (2) 되먹임 모델과 독립성 모델에서는 시스템 등급에 영향을 준다. 향후에는 더욱 더 다양한 상호의존 모델들이 정량화될 필요성이 있다고 본다.

주제어: 리스크 성향, 상호의존 현상, 해석적 망형 과정(ANP) 기법, 전력 계통, 비교 지표

1. 서론

다기준 의사결정 (Multi-Criteria Decision Making; MCDM) 문제를 다루는 접근방법의 하나로 해석적 계층 과정(Analytic Hierarchy Process; AHP) 기법이 1976년에 Saaty [1]에 의해 제안된 이후로 여러 분야에서 사용되고 있다. 이 기법의 주요 특징은 1) 계층 내에 있는 요소들의 영향력에 대한 상대적인 중요도 정도를 둘씩 짝을 지어 비율척도로 쌍대비교 (Pair-wise Comparison)를 하여 상대적 중요도를 일관성에 맞도록 추정하며; 2) 정량적인 정보뿐만 아니라 정성적인 정보도 동시에 종합적으로 평가하며; 3) 기준별 가중치와 대안별

평가치를 선형적인 산술 가중평균을 사용하여 결합하는 것이다.

한편, 1996년에 Saaty [2]에 의해 제안된 ANP 기법은 이러한 AHP 기법의 일부 특징을 사용하면서 의사결정 요소간 상호작용 현상(예: 되먹임, 내부의존성, 외부의존성)을 고려하고 있다. 더욱 더 진보된 접근방법으로 알려진 이러한 ANP 기법은 단방향의 수목 계층 구조를 다루는 AHP 기법을 일반화시킨 기법으로 망형 구조(network structure)를 다룰 수 있는 의사결정 도구이다. 복잡한 실-세계적인 문제의 상호작용 모델링 측면을 고려한다면 ANP 기법의 적용가능성은 앞으로 더욱 더 열려 있다고 볼 수 있다.

기존에는 우리나라의 국가 에너지 시스템별 종합적 비교 평가 시스템의 방법론을 구축할 목적으로 간단한 ANP-기반 되먹임 모델이 개발되었으며 수치적인 사례가 제시되었다 [3]. 여기서는 이러한 모델을 더욱 더 확장하여 3가지 유형의 리스크 성향을 포함시켰다. 이 연구의 주된 목적은 ANP 모델에서 평가 기준 클러스터에서 요소의 변화가 전력 시스템의 비교 지표에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 이를 위해 사례 연구가 수행되었다. 객관적 증거는 문헌조사에 따라 수집되었고, 주관적 증거는 7명의 에너지 전문가 집단에게 설문조사를 실시하여 추출되었다.

2. 해석적 망형 과정 (ANP) 기법

여기서는 이러한 ANP 기법이 국가 에너지 시스템을 위한 체계적이면서 과학적인 비교 지표의 구축에 필수적인 각 에너지 시스템의 환경성, 위해성, 보건성, 사회성의 종합적 의사결정 도구로 사용되었다. Fig. 1에 국가 전력원의 비교 지표 산출을 위한 ANP 기법의 적용 흐름도가 제시되었다.

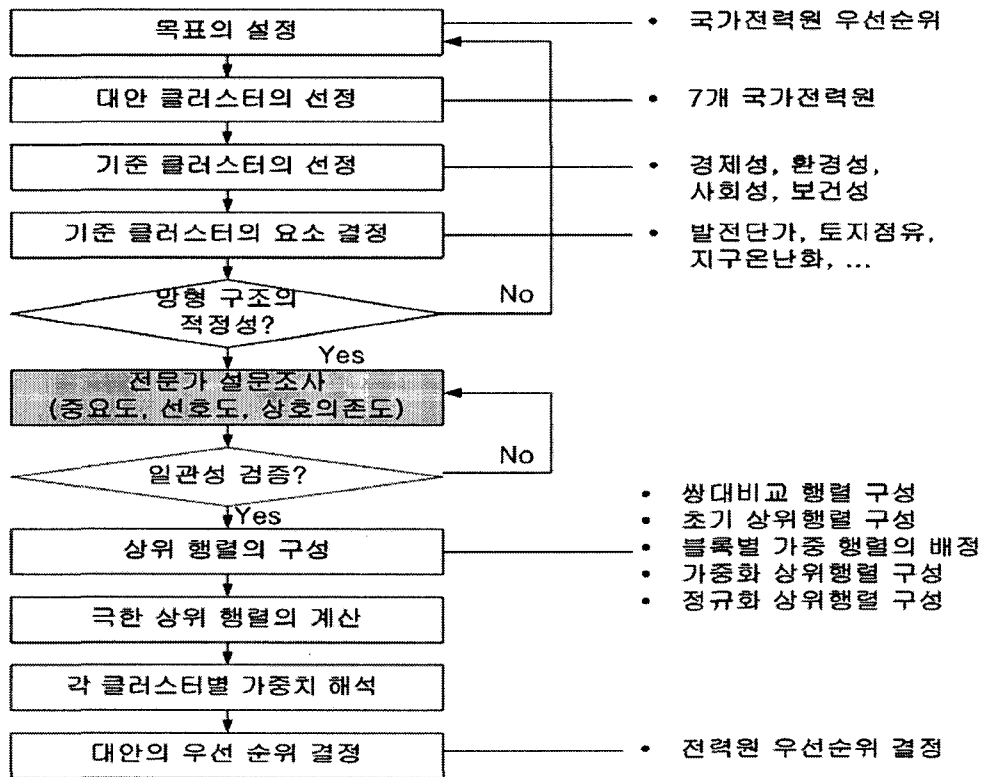


Fig. 1: A Flow Chart for an ANP model

망형 구조의 모델링의 절차는 다음과 같이 6단계로 구분될 수 있다 [3]: 1) 다중 의사결정

문제의 구조화 단계; 2) 전문가 견해 추출 단계; 3) 초기 상위행렬의 구성 단계; 4) 가중화 상위행렬의 구성 단계; 5) 극한 상위행렬 구성 단계; 6) 결과의 해석 단계. Fig. 2에 문제의 구조화 단계에서 확정된 발전원 비교 지표 문제의 의사결정 망형 구조가 주어졌다.

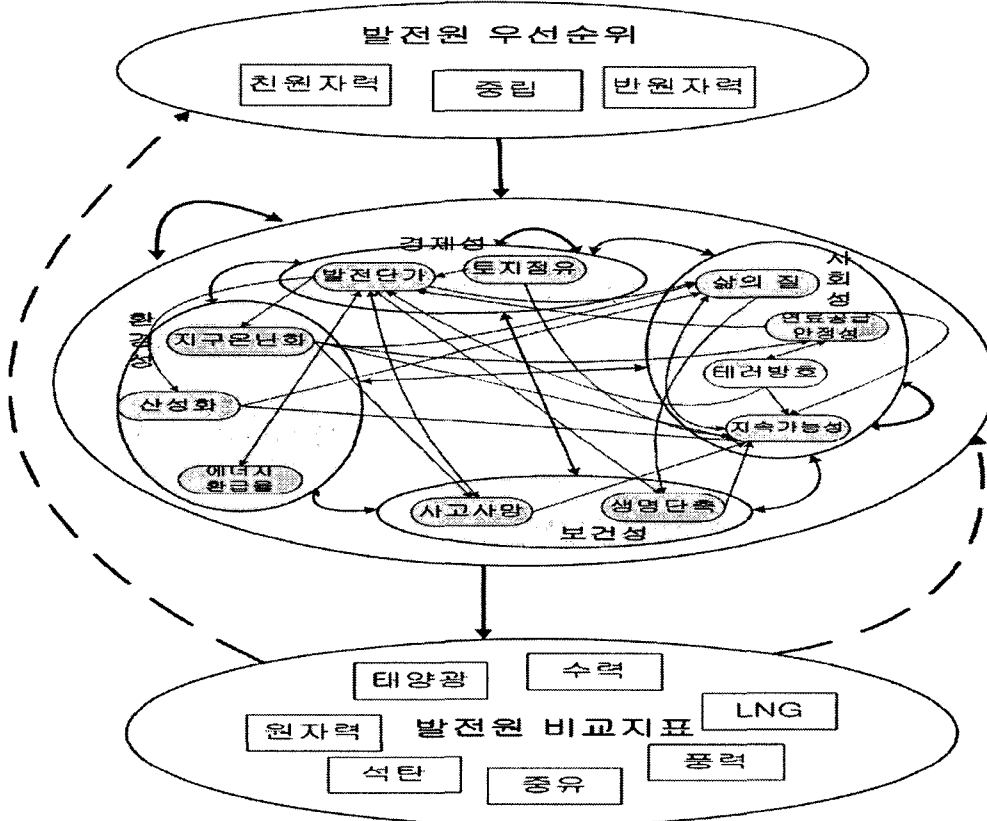


Fig. 2: A Decision Network Structure for Electric Power System Comparison Indicators

3. 사례 연구

의사결정 대안에서 기존 발전원으로는 원자력 발전소, 석탄-화력 발전소 등이, 재생에너지 지원으로는 태양광 발전(Photovoltaic; PV) 시스템이 고려되었다. 이러한 대안들은 4 가지 평가 기준에 따라 비교된다. 경제성 차원에서는 발전 단가(Generation Cost; GC), 환경성 차원에서는 지구 온난화(Global Warming; GW), 사회성 차원에서는 지속 가능성 정도(Degree of Sustainability; DS), 마지막으로 보건성 차원에서는 생명단축(Years Of Lost Life; YOLL) 또는 사고 사망자수(Accident Mortality; AM) 등이다.

의사결정 목표에서는 원자력 발전소와 같은 대형 위험 설비에 대한 세 가지 유형의 리스크 성향이 포함되었다. 첫째, 리스크 감수 성향(risk-loving attitude)은 미래의 에너지 조화 계획(energy mix planning)에서 기저부하 공급원으로 원자력 위주의 정책을 수용하는 것에 찬성하는 찬-원자력 성향을 의미한다. 둘째, 리스크 혐오 성향(risk-averse attitude)은 에너지 계획에서 원자력 발전소를 단계적 폐지(phase out)시키며 운영 중인 원자력 발전소조차도 닫는 것에 찬성하는 반-원자력 성향을 뜻한다. 마지막으로, 리스크 중립 성향(risk-neutral attitude)은 필요한 경우에는 원자력 발전이 에너지 계획안에 포함되는 것을 찬성하는 원자력-중립적인 성향을 말한다.

3.1 기준-집합 {GC, GW, DS, YOLL}으로 이뤄진 방향 그래프 모델(Digraph Model)

기본 사례로서 여기서는 대안 클러스터가 발전원에 대한 의사결정자의 리스크 성향에 미치는 현상을 나타내는 되먹임 효과(feedback effect)가 고려되었다. Fig. 3에서는 평가 기준-집합 {GC, GW, DS, YOLL}의 계층망형(hierarchical network; hiernet) 구조들이 제시되었다. Fig. 3에서, 왼편은 망형 구조로 표현된 되먹임 모델의 구조를 나타낸다. 오른편은 일방향 수목 구조(또는 계층 구조)로 표현된 독립성 모델의 그래프 구조를 보이고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 되먹임 모델의 구조에서 수준 3에서 수준 1로 가는 가지를 제거하면 바로 독립성 모델의 구조가 된다. 즉, 되먹임 효과가 없는 계층 구조로 바뀐다.

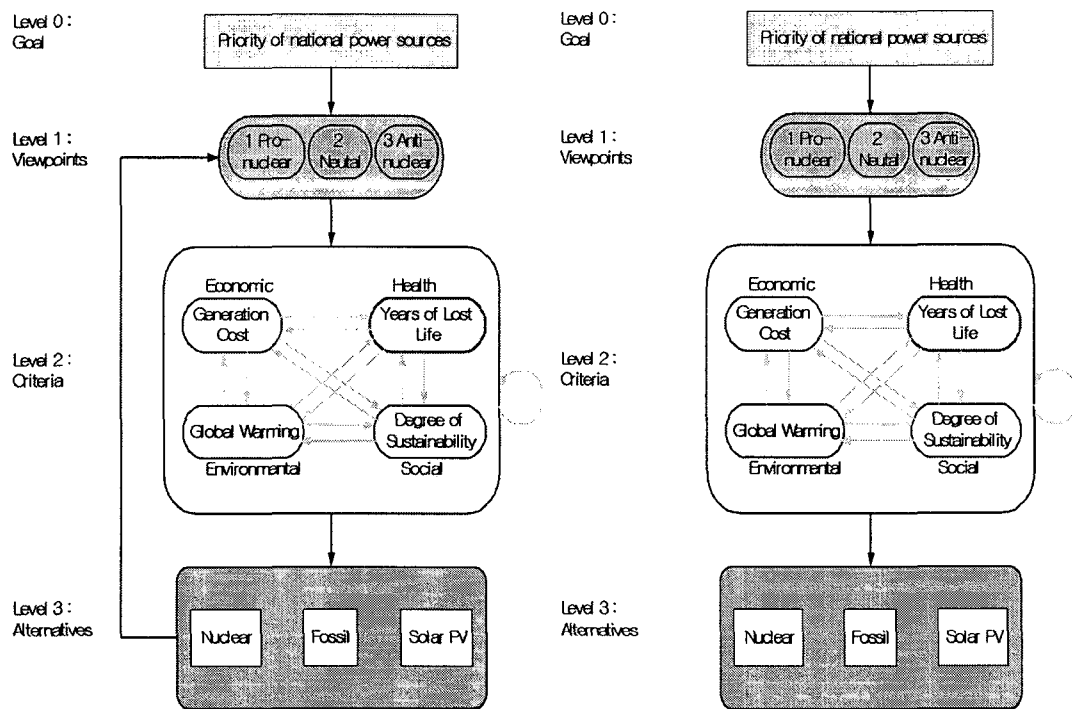


Fig. 3: Hiernet Structures for the Criterion-Set {GC, GW, DS, YOLL}

주관적 증거는 쌍대 비교 기법에 따라 추출되었으며, 중요도는 고유 벡터 기법에 따라 얻어졌다. Table 1에 정리된 기준-집합 {GC, GW, DS, YOLL}에 관한 발전원별 평가치 (valuation) 또는 효용(utility)이 비교 지표들의 계산에 사용되었다. 여기서는 특히 발전원별 생명단축 년수(YOLL)가 보건 영향의 대표치로 선정되었다.

Table 1: Valuation of Power Systems Regarding Each Criterion

구분	발전원		
	원자력	석탄	태양광
GC발전단가[V/kWh]	40.53	42.00	716.40
GW지구온난화[gCO ₂ -eq/kWh]	23.6	1094	13
DS지속가능정도[-]	0.1458	0.1012	0.1548
AM사고사망[death/GWh]	0.18	5.27	0.00001
YOLL생명단축[yr/TWh]	10	61.25	56.25

주: 청색(이탈릭체)은 주관적 평가에서, 흑색(보통체)은 문헌자료에서 얻어졌다.

되먹임 모델에 대한 Table 2에서는 성향 가중치 인자, 기준 가중치 인자, 발전원별 종합 점수인 적절성 지표(appropriateness indices) 등과 같은 비교 지표들이 정리되어 있다. 설문 에 응한 에너지 전문가 집단의 견해에 따르면, 세 가지 유형의 성향이 통합화된 결과로 볼 때, 원자력 발전이 화석 연료 또는 태양광 발전 보다 더 선호적인 것으로 나타난 것으로 보인다. 이 집단은 평균적으로 46% 찬-원자력 성향을 보이고 있으며, 네 가지 기준들 가운데 에서 보건성(즉, 생명 단축)의 중요도를 약 30%로 가장 높게 치고 있다.

독립성 모델에 대한 Table 3에는, 리스크 성향별 적절성 지수가 정리되어 있다. 모든 성 향에 대하여 원자력 발전이 선호되는 것으로 나타나고 있다. 되먹임 모델과 독립성 모델을 비교하면, 기준의 중요도가 바뀌었음을 알 수 있다.

Table 2: The feedback model comparison indicators for the criterion-set {GC,GW, DS, YOLL}

		Element	Score	Ranking
Attitude Cluster	1	Pro-nuc	0.4597	1
	2	Neutral	0.2227	3
	3	Anti-nuc	0.3176	2
Criteria Cluster	4	Economic	0.2691	2
	5	Environment	0.2613	3
	6	Social	0.1705	4
	7	Health (YOLL)	0.2991	1
System Cluster	8	Nuclear	0.5206	1
	9	Fossil	0.1926	3
	10	PV	0.2868	2

Table 3: The independence model comparison indicators for the set {GC,GW,DS,YOLL}

Score (Ranking)	Attitude		
	1 Pro-nuc	2 Neutral	3 Anti-nuc
4 Economic	0.4088 (1)	0.2847 (2)	0.0560 (4)
5 Environment	0.1552 (3)	0.2999 (1)	0.3878 (1)
6 Social	0.1514 (4)	0.1388 (4)	0.2204 (3)
7 Health	0.2846 (2)	0.2766 (3)	0.3358 (2)
8 Nuclear	0.5334 (1)	0.5117 (1)	0.5084 (1)
9 Fossil	0.2538 (2)	0.1928 (3)	0.1038 (3)
10 PV	0.2128 (3)	0.2955 (2)	0.3878 (2)

3.2 기준-집합 {GC, GW ,DS, AM}으로 이뤄진 방향 그래프 모델

비교 사례로서 여기서는 계층 망형 구조의 평가 기준-집합 {GC, GW, DS, AM}에 대한 발전원 비교 지표들이 얻어졌다. 이것이 기본 사례와 다른 유일한 점은 보건성 차원의 대표 기준으로 생명 단축 대신에 사고 사망자수(AM)가 선정된 것이다.

되먹임 모델에서는, Table 4에 따르면, 보건성이 가중치 30% 정도로 가장 중요하다고 나타났다. 태양광 발전에서 사고 사망자수는 거의 없는 것으로 가정되었으므로, 찬-원자력 성향의 집단적인 견해에서도 태양광 발전이 원자력 발전보다 더 선호적으로 나타났다. 기준 사례에 대한 Table 2와 비교한다면, 기준 중요도 및 적절성 인자 등은 평가 기준-집합의 영향을 받는 것으로 보인다.

독립성 모델의 결과가 정리된 Table 5에서는, Table 3에 비교하면, 리스크 성향별 종합 점수들이 평가 기준-집합의 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 바꿔 말하면, 각 성향에 대하여 보건성 차원의 대표로 생명단축을 선정한 경우에는 원자력 발전이 가장 선호적이었으

나, 사고 사망자수를 선정한 경우에는 태양광 발전이 가장 선호적인 것으로 바뀌었음이 관측된다.

Table 4: Comparison indicators of the feedback model for the set {GC, GW, DS, AM}

Element		Score	Ranking
Attitude Cluster	1 Pro-nuc	0.4020	1
	2 Neutral	0.2235	3
	3 Anti-nuc	0.3745	2
Criteria Cluster	4 Economic	0.2489	3
	5 Environment	0.2747	2
	6 Social	0.1744	4
	7 Health (AM)	0.3020	1
System Cluster	8 Nuclear	0.2940	2
	9 Fossil	0.1472	3
	10 PV	0.5588	1

Table 5: Overall scores of the independence model for the set {GC, GW, DS, AM}

Score (Ranking)	Attitude		
	1 Pro-nuc	2 Neutral	3 Anti-nuc
8 Nuclear	0.3212 (2)	0.3055 (2)	0.2580 (2)
9 Fossil	0.2192 (3)	0.1591 (3)	0.0629 (3)
10 PV	0.4596 (1)	0.5354 (1)	0.6791 (1)

4. 결론

국가 에너지 시스템의 종합적인 비교 평가에는 비교 지표의 개발이 필수적이다. 이러한 비교 지표는 구축된 방법론의 영향을 받는다는 것이 알려지고 있다. 여기서는 의사결정자의 리스크 성향이 반영된 계층망형 모델이 개발되었다.

이 모델의 평가 기준-집합이 비교 지표에 미치는 영향을 파악하기 위하여 보건성 측면의 한 요소(즉, 생명단축 또는 사고사망)만 상이한 두 가지 기준-집합들이 선정되었다. 생명단축 또는 사고사망의 선정이 여러 가지 비교 지표에 미치는 영향은 다음과 같다: (1) 되먹임 모델에서는 성향 가중치 및 기준 등급에 영향을 주었다; (2) 되먹임 모델과 독립성 모델 모두에서는 시스템 등급에 영향을 주었다.

향후에는 다양한 정도의 상호의존성 모델들이 개발되고, 그 특성이 연구될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 과제 (발전원별 종합 위험도 비교평가 연구)의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

1. T.L. Saaty (1980): *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, Inc.
2. T.L. Saaty (1996): *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process*, RWS Publications, Pittsburgh, PA.
3. 김성호 외 (2005): 발전시스템의 종합적인 평가: 해석적 망형과정 기법의 적용, 한국에너지공학회(2005년도) 춘계학술발표회 논문집.