

선형계획법을 활용한 장기 전력계통 계획수립 기법개발

유현수*, 조강욱*, 이조련*, 김태훈*, 김진이*, 박만근**

한국전력거래소 계통계획팀*, 전원계획팀**

Long-term Power System Planning by using Mixed-Integer Programming

Heon-Su Ryu*, KangWook Cho*, Jo-Lyeon Lee*, Tae-Hoon Kim*, Jin-Yi Kim*, Marn-Geun Park**

Power System Planning team*, Power Planning team**, Korea Power Exchange

Abstract - 본 논문에서는 혼합정수 선형계획법을 이용하여 장기 전력계통 계획수립시 최적의 설비를 투자할 수 있는 기법을 제안하였다. 발전설비와 송변전설비는 하나의 망으로 연결되어 상호 보완적 영향을 주기 때문에 계통계획시 두 설비를 동시에 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 또한 계획기간 전체에 대해 투자비를 고려하여 비용을 최소화해야 한다. 이를 위해 선형계획법을 계통계획에 도입하여 최소비용의 투자비를 가지고 공급신뢰도 기준을 만족할 수 있는 최적 장기 전력계통 계획수립기법을 개발하였다. 개발된 기법을 Garver 6모선 계통 및 제3차 전력수급기본계획에 대해 모의하여 결과의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

장기 전력계통 계획이란 예측된 미래 부하에 전력을 안정적으로 공급할 수 있도록 발전설비 및 송변전설비를 언제, 어디에, 얼마만큼을 건설할 것인가를 결정하는 문제이다. 최적의 투자를 결정하기 위해 그동안 많은 연구와 기법이 개발되었다.

현재 우리나라는 발전설비 중심으로 적정전원 구성과 공급신뢰도 기준에 기초하여 발전자원의 적정성을 확보한 후, 송전망의 공급신뢰도 기준에 따라 송변전설비를 수립하는 순차적 설비계획을 수립하고 있다. 이 순차적 방식은 각각 설비에 대한 최적 설비계획을 따로 수립하기 때문에 준최적화 개념의 설비계획이라 할 수 있다. 또한 송변전설비계획의 경우 단년도(Static planning) 단위로 최적화된 설비계획을 전체 계획기간 동안 반복하는 설비계획이다. 그러나 하나의 망으로 연결된 발전설비와 송변전설비는 상호 보완적 영향을 주는 설비로서 두 설비간 경합성을 반영하는 것은 매우 중요하며, 임의 한 년도에 투자되는 설비가 다음 년도의 설비투자에 어떤 영향을 주는가에 대한 다년적(Dynamic planning) 영향 분석은 투자비용 최소화를 위해 필수평가 요소라 할 수 있다. 해외에서는 LP를 이용한 송전망투자계획 기법[1], 확률적 기법을 이용한 송전망계획[3] 등 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 혼합정수 선형계획법(MIP)를 이용하여 발전설비와 송변전설비간 경합성을 반영하고 계획전체 기간동안의 총 투자비를 최소화할 수 있는 최적화 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 Garver 6모선 계통에 적용하여 결과를 타당성을 검증하였고, 제3차 전력수급기본계획 수립시 사용한 데이터를 이용하여 우리나라 계통에 적용하였다. 발전설비와 송변전설비의 경합성에 의한 결과를 분석할 수 있었으며 제3차 수급계획의 결과와 비교 분석하였다.

2. 계통계획 문제의 정식화

2.1 계통계획 문제 특징

계통계획의 문제는 신규설비(발전 및 송변전)의 건설 여부를 결정짓는 이진수(binary) 문제로서 혼합정수 선형계획법을 이용하여 정식화할 수 있다. 정식화 수식에서 설비투자 여부는 이산형 결정변수를 사용하고, 발전기 운전출력은 연속형 결정변수를 사용할 수 있다. 최적화를 통해 신규설비의 투자 시기, 위치 및 용량을 결정한다. 이 과정에서 발전-송변전설비의 투자비용을 최적화함과 동시에 발전설비예비율 및 송전선로 상정고장 등과 같은 공급신뢰성을 확보해야 한다.

2.2 정식화 전제조건

장기전력계통 계획시에는 많은 투자대안과 장기간 계획이 수반되기 때문에 막대한 계산이 소요된다. 따라서 기본적인 전제조건이 필요하다. 즉 발전기 기동정지를 대신하여 발전기 최소출력을 0으로 설정하여 메리트오더에 의해 기동되는 것으로 가정하였고, 전력계통망은 DC 조류계산으로 모델링하였다. 또한 송전손실을 반영하기 위하여 구간 선형곡선(piece-wise linear curve)을 이용하였고, 선로상정고장을 반영하기 위하여 LODF (Line Outage Distribution Factor)를 사용하였다. 또한 연도별로 신규변전소 추가지점은 주어진 정보로 가정하였다.

2.3 문제 정식화

목적함수에 발전설비와 송전설비의 건설비를 포함시켜 전 계획기간 범위에서 동일한 잣대로 두 설비의 경합성을 평가하고자 하였으며, 또한 발전기의 운전비용을 포함하여 건설비와 운전비를 동시에 최소화하고자 하였다.

제약 조건에는 전력조류방정식을 DC로 모델링하여 송전계통으로 인한 계약을 반영하였다. 또한 선로별 송전손실을 선형화하여 포함하였으며, 상정고장을 반영하였다. 아래에서 소개하는 정식화 수식에는 손실항 q_{srkt} 을 선형화하는 수식은 제외하였다. 손실항을 선형화하는 자세한 수식은 [1]를 참조바람.

$$\min \sum_{t=1}^n \left\{ \sum_{(s,r,k) \in E^+} KT_{srk} wt_{srkt} PV(t) + \sum_{i \in I^+} KG_i wg PV(t) + \sigma \sum_{i \in I} DWGT(t) \lambda_{Gi} P_{G_{it}} PV(t) \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in \Psi_s} P_{G_{it}} - \sum_{(r,k) \in \Omega_s} f_{srkt} = P_{D_{st}} \quad (2)$$

$$- wt_{srkt} P_{srk}^{\max} \leq f_{srkt} \leq wt_{srkt} P_{srk}^{\max} \quad (3)$$

$$-(1 - wt_{srkt}) M_{sr} + B_{srk} (\delta_{st} - \delta_{rt}) \leq f_{srkt} \leq B_{srk} (\delta_{st} - \delta_{rt}) + (1 - wt_{srkt}) M_{sr} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{G_{it}} \leq P_{G_{it}}^{\max} w_{g_{it}} * BidRate_{G_i} \quad (5)$$

$$0 \leq wt_{srkt} - wt_{srkt-1} \quad (6)$$

$$0 \leq w_{g_{it}} - w_{g_{it-1}} \quad (7)$$

$$wt_{srkt} = -wt_{rskt} \quad (8)$$

$$f_{srkt} = -f_{rskt} \quad (9)$$

$$f_{srkt} + LODF_{srk.s'r'k'} \times f_{s'r'k't} \leq 150\% P_{srk}^{max} \quad (10)$$

$$Reserve_t \times \sum_s P_{Dst} \leq \sum_i P_{Gi}^{max} wg_{it} \quad (11)$$

상수기호

KT_{srk} : 송전선로 건설비

KG_{srk} : 발전기 건설비

P_{srk}^{max} : 송전선로 최대용량

B_{srk} : 송전선로 Susceptance

P_{Gi}^{max} : 발전기 최대출력

$BidRate_{Gi}$: 발전기 입찰률

$LODF_{srk.s'r'k'}$: 조류분배율

λ_{Gi} : 발전기 발전단가

M_{sr} : 매우 큰 상수

변수기호

wt_{srkt} : 송전선로 투자여부 결정변수 $\in(0,1)$

wg_{it} : 발전기 투자여부 결정변수 $\in(0,1)$

$PV(t)$: 현가화 비율

$DWGT(t)$: 부하지속곡선상 지속시간비율

P_{Gi} : 발전기 출력

P_{Dst} : 모선별 부하

f_{srkt} : 송전선로 조류

δ_{st} : 모선 위상각

$Reserve_t$: 예비율

집합기호

s : 송전단 모선

r : 수신단 모선

k : 회선수

t : 시간(년도)

n : 총 계획년도

i : 발전기

E+ : 후보 신규 송전선로 집합

I : 총(기존+신규)발전기 집합

I+ : 후보 신규 발전기 집합

Ψ_s : 모선 s에 연결된 발전기 집합

Ω_s : 모선 s에 연결된 송전선로 집합

식(2)는 각 모선에서 조류평형방정식이며, 식(3)은 선로의 상하한 용량제약이다. 식(4)는 DC 선로조류방정식을 나타내는데, 주지할 점은 송전투자 결정변수 $wt_{srkt}=1$ 이면 유효전력방정식으로 binding 되고, 결정변수 $wt_{srkt}=0$ 이면 매우큰 상수 M_{sr} 에의 제약이 unbinding된다는 것이다. 식(6)과(7)은 설비투자가 결정되면 그 해 이후에는 지속적으로 존재됨을 반영하는 제약이다.

2.4 상정고장 처리방법

각 선로의 LODF를 계산하여 송전선로의 n-1, n-2 상정고장을 반영하였다. 정식화 수식에서 식(10)은 상정고장을 반영하는 제약식이다. 세부 반영방법은 아래와 같다.

만일 선로 L1-2가 고장나면 이 선로에 흐르던 조류가 선로 L1-3과 L3-2의 각 회선에 50%씩 흐르게 된다. 원래 L1-3에 조류에 L1-2 상정고장으로 증가된 조류를 합한 조류가 선로용량보다 작도록 제약을 주었다,

$$\text{조류}_{L13} + LODF_{13,12} \times \text{조류}_{L12} \leq 150\% \times Cap_{L13}$$

$$LODF_{13,12} = 0.5$$

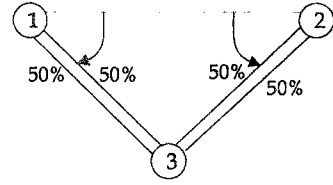


그림 1 LODF 계산 예

2.5 부하 반영방법

발전비용을 정확하게 계산하기 위해서는 계획기간동안 예측된 부하패턴을 가능한 한 많이 반영하여야 한다. 본 연구에서는 연도별 부하지속곡선을 n개 구간으로 나누어 반영하였다. 선택된 부하수준마다 부하지속시간을 가중하여 발전기 운전비용 계산에 포함하였다. 목적함수 식(1)을 보면 운전비용 항인 세 번째 항에 DWGT(t)의 가중치가 곱해져 있음을 알 수 있다.

그림 2에서 부하 수준이 L2라면 발전기 운전비용은 발전기 출력(Pg)×발전단가(λ)×(P2-P1)로 계산된다.

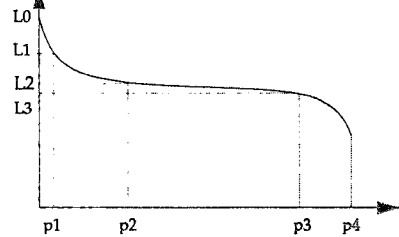


그림 2 부하지속곡선 구분

2.6 송전손실 처리방법

DC 조류계산에서는 송전손실을 처리할 수 없기 때문에 별도로 손실항목을 추가하여야 한다. 임의의 선로에서 발생하는 손실은 선로 양단의 위상차에 비례하여 증가하는 사실에 기초하여 구간 선형곡선 함수로 손실을 모델링하였다.

$$P_{sr,loss} = g_{sr} \sum_{i=1}^L \alpha_{sr}(i) \delta_{sr}(i)$$

여기서 g_{sr} : 선로conductance

α_{sr} : 손실곡선 구간 기울기

δ_{sr} : 선로위 양단 위상차

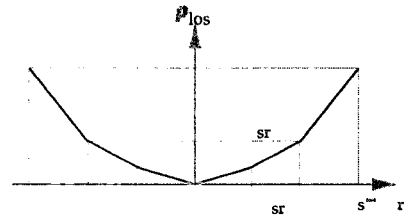


그림 3 구간 선형 손실곡선

발전비용을 정확하게 계산하기 위해서는 계획기간동안 하나 계산시간대별 각 선로의 LODF를 계산하여 송전선로의 n-1, n-2

3. 사례연구

3.1 3기 6모선 샘플계통(Garver's System[1])

개발된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 우선 소규모 계통에 적용 모의하였다. 수요가 증가될 때 대상

계통에서 발전기와 송전선로 중 어느 것을 건설하는 것이 더 유리한가를 확인할 수 있다.

가. 모의전제

- 모의기간: 2년
- 부하구간 : 매년 2개구간(on-peak, off-peak)
- 발전기 데이터

항 목	기존설비			신규 설비		
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
발전단가 [\$/MWh]	150	360	600	200	200	200

- 송전선로 데이터 : [1] 참조

나. 모의시나리오 구성

구분	후보설비 구성	발전기 후보	송전선로 후보	비 고
1안	송전선로만 건설	없음	(모든선로)	기준안
2안	발전기 + 송전선로	(G4-G6)	(모든선로)	발전+송전 결합성
3안	송전선로+상정고장	없음	(모든선로)	선로 n-1 고장적용

다. 모의결과

제1안의 경우 발전기 G3의 계통접속용 선로 및 계통보강용 송전선로 총 5회선을 건설하나, 제2안의 경우 신규 발전기G4를 건설하는대신 송전선로를 3회선만 건설하고, 제3안의 경우 상정고장에 대비하기 위하여 선로를 총7회선으로 증가하여 건설함을 알 수 있다.

구분	후보설비 구성	모의 결과
1안	송전선로만 건설	발전기 : 무 송전선로 : 5회선
2안	발전기+송전선로 건설	발전기 : 1대 송전선로 : 3회선
3안	송전선로+상정고장	발전기 : 무 송전선로 : 7회선

3.1 345kV 이상 우리나라 장기 전력계통[6]

가. 모의전제

- 모의기간: 08~20년(총 13년)
- 부하예측: 제3차 전력수급기본계획 예측치
- 매년 부하지속곡선을 3개구간으로 나눔
- 발전기 데이터: 제3차 전력수급기본계획 자료
- 송전선로 데이터: 2007년 장기송변전설비계획 자료
- 전력계통망: 345kV 이상 계통을 DC로 모델링

나. 모의시나리오 구성

시나리오	발전기 후보	송전선로 후보	특 징
1안	제3차 수급 수렴시 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로 - 계통보강 선로	발전기와 송전선로의 결합성 분석가능
2안	제3차 수급 수렴시 건설의향 제출설비	- 발전기 접속선로 - 신규변전소 접속선로	발전기건설시 계통제약 영향분석 가능

※계통보강선로는 수도권과 비수도권을 잇는 용통선로로 한정하였음

다. 모의결과

○안별 발전설비 건설 비교

제1안은 총 17,542MW를 건설하며, 비수도권에 원자력과 석탄을 많이 건설하는 반면, 제2안은 총 16,117MW를 건설하며, 수도권에 가스복합을 많이 건설하는 것으로 나타난다. 이는 제1안의 경우 수도권 부하공급을 위한 방법으로 비수도권에 운전비용이 싼 발전기(원자력, 석탄)를 건설하고 이를 용통할 수 있는 송전선로를 동시에 건설하는 것이 수도권에 직접 가스복합건설보다 유리하기 때문으로 분석된다

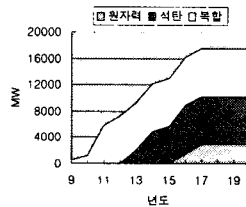


그림 4 제1안

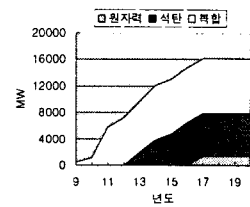


그림 5 제2안

○안별로 송전설비 건설 비교

시나리오	구 간	회선	필요성
제1안	신당진3-평택TP3	1회선	수도권-서해안 연계
	신태백3-신안성3	1회선	수도권-신울진 연계
	신태백3-의정부3	1회선	수도권-신울진 연계
제2안	신규발전기 및 신규변전소 연계선로		

○안별로 경제성 비교

제1안은 발전/송전설비의 건설비가 높은 반면 운전비용이 낮게 나오는데 이는 원자력, 석탄화력 등 건설비가 높은 발전기를 건설하고 신규 발전기/변전소 접속선로 외에 계통보강 선로 건설을 더 건설하기 때문이다.

제2안은 발전/송전 건설비가 낮은 반면 운전비용이 높게 나오는데 이는 반대로 수도권 지역에 신규 LNG설비를 건설하고 신규 발전기/변전소 접속선로만 건설하기 때문이다. 건설비(발전기/송전선로)와 운전비용을 합한 총비용 측면에서는 제1안이 유리한 것으로 나타남을 알 수 있다.

[단위:10억원]

시나리오	발전설비		송전선로 건설비	합계
	건설비	운전비용		
제1안	17,277	102,277	998	120,552
제2안	14,546	115,815	806	131,167

4. 결 론

본 연구에서는 장기 전력계통 계획을 수립하는데 선형 계획법을 도입하여 발전기와 송전선로를 동시에 결합성을 평가하고, 계획전제 기간 동안 투자되는 총비용을 최소화할 수 있는 기법을 개발하였다. 이 기법은 현행 발전설비 계획을 수립한 후 송변전설비계획을 수립하는 방식을 획기적으로 개선하는 기법으로서 장기 설비계획의 투자효율성을 높이는데 많이 기여할 것으로 예상된다. 실무적으로 사용하기 위해서는 고장전류 고려 등과 같은 기능을 추가 정교화하고 미래 불확실성 요인을 반영할 수 있는 기법으로 발전시켜야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Natalia Alguacil, et al., "Transmission Expansion Planning : A Mixed-Integer LP Approach", IEEE Trans. on Power System, Aug. 2003
- [2] Gerardo Latorre, "Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning", IEEE Trans. on Power System, May. 2003
- [3] Pedro Sanchez-Martin, et al., "Probabilistic Midterm Transmission Planning in a Liberalized Market", IEEE Trans. on Power System, Nov. 2005
- [4] Richard D. Christie, et al., "Transmission Management in the Deregulated Environment", Proceedings of the IEEE, Feb. 2000
- [5] 산업자원부, "제3차 전력수급기본계획", 2006. 12
- [6] 한국전력공사, "장기 송변전 설비계획", 2007. 1