'88 추계학술대회

'88 — C — 5

비선형 투자비 함수를 이용한 장기 전원개발계획 수립에 관한 연구

김 준 현　　　최 인 홍

한양대학교　　　전기공학과

A Study of Long-Term Generation Expansion Planning Using Nonlinear Invest Cost Function

Joon-Hyun Kim　　　In-Hong Choi

Hanyang University　　Dept.of Electrical Engir.

ABSTRACT

Generally, average invest cost is widely used for expansion planning of generation in power system. But, other cost which is followed by adding generating capacity in electric system is increased in accordance with increasing plant reasons.

In this study, we represent the invest cost with quadratic function and analyze its effect on the expansion planning. It is hoped that this method is used in expansion planning of generating system.

1. 서 론

전원개발계획은 전력회사의 경영에 있어 가장 큰 영향을 미치고 나아가서 국가 경제에도 큰 영향을 미치는 중요한 것이다. 이는 장래의 전력수요에 대처하여 적정설비를 유지하는 것으로 전력회사 경영의 기본이 되며 이로부터 설비의 운영계획등이 수립되는 것이다.

이러한 전원개발계획 수립에 대하여 여러가지 최적화기법을 이용한 많은 연구가 진행되어 WASP, MNI,EGEAS등 여러가지 실용화된 프로그램들이 개발 사용되고 있다.[1]

일반적으로 장기전원 개발계획에서는 투자비용 산정에 있어서 평균건설단가를 사용하여 순수한 발전소 건설비만을 산정하고 있으나 실제로는 발전기의 증설에 따라 송전설비 및 기타 운영상의 추가 비용이 발생하게 되므로 이들 비용까지를 투자비로 평가함이 타당할 것이다.[1,2]

본 연구에서는 투자비를 신규투입발전용량의 비선형 함수로 취급하고 이에 따른 발전기조합의 변화를 검토하여 이들 추가비용의 영향을 분석하고자 한다.

2. 최적화 모형

전원개발계획수립은 투자비, 운전비 및 공급지장비등, 비용의 합으로 표현되는 총 비용을 최소화하는 과정이다.

본 연구에서는 이들의 평가에 있어서 프랑스 MNI 모형을 기본으로 하여 투자비를 2차 함수로 취급한다.

2.1 투자비 모형

MNI모형에서는 투자비를 단순히 평균건설단가만을 적용하였으나[1] 본 연구에서는 계통 확대 및 단위용량 대형화등에 수반되는 계통안정도 유지를 위한 계전기,차단기등의 보조설비 비용 부담을 발전설비 신규 투입용량의 비용으로 간주하고 이를 간단히 2차 함수로 가정하여 비선형 함수로 취급한다.

(투자비) = (발전소 건설비) + (파급비용)

즉,

$$I_i^t = a_i^t u_i^t + b_i^t (u_i^t)^2$$

2.2 운전비 모형

운전비 모형은 MNI의 방법을 적용한다.

2.2.1 화력 발전소의 가능 출력

$$X_{k\nu} = \mu_k + q_\nu \sigma_k \qquad (2.1)$$

$$k=1.....kk\ ,\quad \nu=1........N$$

$X_{k\nu}$:임의의 군의 가능출력, μ_k : K군의 평균출력

σ_k : 군의 표준편차　　kk :군의 수

N_ν :이산점의 수　　q_ν : 연속정규분포곡선에서의 확률변량

2.2.2 양수 발전

(1) 양수 시간대

최적양수계획조건하에서는 각 시간대의 증분양수비용이 같도록 양수량 P_h 가 결정된다. 즉,

$$\partial C_1(P_{h1})/\partial P_{h1} = \partial C_2(P_{h2})/\partial P_{h2} \ldots = \lambda \qquad (2.2)$$

P_{pt} :t 시간에서의 양수량

$C_t(P_{pt})$:t 시간에서의 총 양수 비용

λ :증분양수 비용

(2) 양수 발전시간대

최적양수발전조건하에서는 각 시간대에서의 증분 발전절감비용이 같도록 발전량 P_{gt} 가 결정된다.

$$\partial C_1'(P_{g1})/\partial P_{g1} = \partial C_2'(P_{g2})/\partial P_{g2} \ldots = \mu \qquad (2.3)$$

P_{gt} :t 시간에서의 양수발전출력

$C_t'(P_{gt})$:t 시간에서의 총 양수 발전 절감비용

μ : 증분양수발전회수비용

따라서 양수 및 발전의 최적상태는 $\lambda = \mu$ 일 때 이며 실제적으로는 $|\lambda - \mu| < \varepsilon$ 일 때 최적양수 운전상태가 된다.

2.4 공급지장비 모형

공급지장비는 MNI 모형과 같이 공급지장용량의 2차함수로 취급한다. 이때,

(공급지장비) = .

(한계공급지장비) * (공급지장 에너지)

로 결정된다. 즉,

$$f_d = D.L_d.t = (a+b.L_d + c.L_d^2)\, L_d.t \qquad (2.4)$$
$$= (a.w + b.w^2 + c.w^3)\, P_{max}.t$$

f_d : 공급지장비 D : 한계 공급지장비

P_{max} : 첨두 부하 w : L_d/P_{max}

t : 지속시간 L_d : 공급지장용량

a,b,c: 계수

대상기간에 대한 공급지장비는 다음과 같다.

$$f_d = \sum_i P_{ri} \sum_j f_{dij} \qquad (2.5)$$

P_{ri} : i 경우의 확률 j : 시간대

f_{dij} : j 시간대의 i 의 경우의 공급지장비

2.5 부하모형

본 연구에서는 부하지속 곡선을 계단형으로 표시하여 이산형 부하지속 곡선을 사용한다.

3. 최 적 화 이 론

고려 대상 기간동안 매년마다 신규발전설비가 투입되고 이에 따라 운전비용과 공급지장비용이 발생하며 이를 Pontryagin의 이산형 최대원리의 문제로 취급 한다[4].

3.1 문제의 구성 및 최적조건

최대성원리 문제로서 전원개발계획을 모형화하면

$$X_i(t+1) = X_i(t) + U_i(t)$$
$$i = 1 \ldots . n \qquad (3.1)$$

i : 전원의 종류 t : 특정 연도

$U_i(t)$: t 년도 전원의 신규 투자량

$X_i(t)$: t 년도 전원의 설비용량

식(3.1) 에 대하여 발생하는 비용은 아래와 같다.

$G^t[X(t) + U(t)]$: t년도 운전비의 현재가치

$D^t[X(t) + U(t)]$: t년도 공급지장비 현재가치

$\sum_{i=1}^{n}\{a_i U_i(t) + b_i [U_i(t)]^2\}$: t년도 투자비의 현재가치

$S[X(N)]$: 고려기간 이후 무한시점까지의 운전비와 공급지장비의 합의 현재가치

위의 비용을 전체 고려기간에 대하여 합한 것이 총비용이며 목적함수가 된다. 즉,

$$J = \sum_{t=0}^{N-1}\{\sum_{i=1}^{n}(a_i U_i(t) + b_i(U_i(t))^2)$$
$$+ G^t[X(t) + U(t)]$$
$$+ D^t[X(t) + U(t)]\} + S[X(N)] \qquad (3.2)$$

$X(0)$: 초기치 (기존설비 상태)

$U_i(t) \geq$ 제약조건

식(3.1)과 (3.2)를 Lagrange 승수를 이용 결합하여 다음의 새로운 목적함수를 정의한다.

$$\bar{J} = S[X(N)] \qquad \ldots\ldots (3.3)$$
$$+ \sum_{t=1}^{N-1}\{\sum_{i=1}^{n}[a_i^t U_i(t) + b_i^t(U_i(t))^2]$$
$$+ G^t[X(t) + U(t)]$$
$$+ D^t[X(t) + U(t)]$$
$$- \sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t+1)[X_i(t+1) - X_i(t) - U_i(t)]\}$$

$\lambda_i(t)$: t년도 i전원에 대한 Lagrange미정계수

여기서 Hamiltonian을

$$H^t = \sum_{i=1}^{n}[a_i^t U_i(t) + b_i^t(U_i(t))^2] \quad \ldots (3.4)$$
$$+ G^t[X(t) + U(t)]$$
$$+ D^t[X(t) + U(t)]$$
$$+ \sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t+1)[X_i(t) + U_i(t)]$$

로 정의하면 식 (3.3) 은 다음과 같이 된다.

$$\bar{J} = S[X(N) - \sum_{i=1}^{n}\lambda_i(N)X_i(N)$$
$$+ \sum_{t=1}^{N-1}[H_t - \sum_{i=1}^{n}\lambda_i^t(t)X_i(t)] + H^0 \qquad (3.5)$$

식(3.5)의 변분은

$$dJ = \sum_{i=1}^{n}[\partial S/\partial X_i(N) - \lambda_i(N)]dX_i(N)$$
$$+ \sum_{t=1}^{N-1}\sum_{i=1}^{n}\{[\partial H^t/\partial X_i(t) - \lambda_i(t)]dX_i(t)$$
$$+ (\partial H^t/\partial u_i(t))dU_i(t)\} + \sum_{i=1}^{n}(\partial H^0/\partial X_i(0))dX_i(0)$$
$$+ \sum_{i=1}^{n}(\partial H^0/\partial U_i)dU_i(0) \qquad (3.6)$$

$X_i(0)$ 와 $U_i(0)$ 는 주어진 값이므로 각각

$$dX_i(0) = 0, \qquad dU_i(0) = 0$$

로 된다.

이 최적에서는 $d\bar{J} = 0$이 되어야 하므로 식 (3.6)에서 다음의 조건이 만족되어야 한다. 즉,

$$\lambda_i(N) = \partial S/\partial X_i(N) \qquad (3.7)$$
$$\lambda_i(t) = \partial H^t/\partial X_i(t)$$
$$\partial H^t/\partial U_i(t) = 0 \qquad (3.8)$$
$$i = 1 \ldots\ldots n$$

식 (3.7)을 다시쓰면 다음과 같은 보조방정식이 된다.

$$\lambda_i(N) = -\partial S/\partial X_i(N)$$
$$\lambda_i(t) = \partial G^t/\partial X_i(t) + \partial D^t/\partial X_i(t) + \lambda_i(t+1)$$
$$i = 1 \ldots\ldots n \qquad (3.9)$$

식 (3.8)은

$$a_i^t + 2b_i^t U_i(t) + \partial G^t/\partial U_i(t) + \partial D^t/\partial U_i(t)$$
$$+ \lambda_i(t+1) = 0$$
$$i = 1 \ldots\ldots n \qquad (3.10)$$

식 (3.9), (3.10)으로 부터 방정식을 풀어 $U_i(t)$를 결정한다.

3.2 물리적 의미

식(3.9)를 풀어서 쓰면

$$\lambda_i(N) = \partial S/\partial X_i(N)$$
$$\lambda_i(N-1) = \partial G^{N-1}/\partial X_i(N-1) + \partial D^{N-1}/\partial X_i(N-1)$$
$$+ \partial S/\partial X_i(N) \qquad (3.11)$$

$$\lambda_i(t) = \sum_{k=t}^{N-1}[\partial G^k/\partial X_i(k) + \partial D^k/\partial X_i(k)]$$
$$+ \partial S/\partial X_i(N)$$
$$i = 1 \ldots\ldots n$$

이 된다.

이 식에서 우변을 분석해 보면 이는 t년도 부터 무한시점까지의 설비의 증분에 대한 운전비와 공급지장비의 합을 나타낸다. 즉, $\lambda_i(t)$ 는 설비증분에 의한 현재 이후의 이득을 나타내는 것으로 이를 i전원의 사용 가치 (Use value) 라고 부른다.

또한 $\lambda_i(t+1) - \lambda_i(t)$ = i전원의 (t + 1) ~ (t) 사이의 유효가치감소 또는 경제적 감가상각을 나타내며, 이에 의해 식(3.9)를 정리하면

$$-(\partial G^t/\partial X_i(t) + \partial D^t/\partial X_i(t))$$
$$= \lambda_i(t+1) - \lambda_i(t) \qquad (3.12)$$

가 되어, 최적상태에서는 설비증분에 대한 비용증분이 유효가치 감소와 같게 됨을 알 수 있다.

G 와 D 는 $X_i(t) + U_i(t)$ 의 함수이므로

$$\partial G^t/\partial X_i(t) = \partial G^t/\partial U_i(t)$$
$$\partial D^t/\partial X_i(t) = \partial D^t/\partial U_i(t) \qquad (3.13)$$

이 된다.

식 (3.13) 을 식(3.10)에 대입하면

$$\partial I_i/\partial U_i(t) - \lambda_i(t) = 0 \qquad (3.14)$$

의 최적해를 얻을 수 있다. 즉, 최적 투자란 (한계투자비용) = (유효가치) 일 때 임을 알 수 있다.

3.3 해 법

본 연구에서는 이상과 같은 최대성 원리 문제의 해법으로서 경사법을 적용하였다[5]. 즉, 최적조건이

$$\lambda_i(N) = \partial S/\partial X_i(t)$$
$$\lambda_i(t) = \partial G^t/\partial X_i(t) + \partial D^t/\partial X_i(t) + \lambda_i(t+1)$$
$$a_i^t + 2b_i^t U(t) - \lambda_i(t) = 0 \quad \text{for } U_i(t) > 0$$
$$a_i^t + 2b_i^t U(t) - \lambda_i(t) = 0 \quad \text{for } U_i(t) = 0$$
$$i = 1 \ldots\ldots n \qquad (3.15)$$

로 되는 $U_i(t)$를 구하는데 $\partial H/\partial U_i(t)$가 $U_i(t)$에 대한 H^t의 경사이므로

$$U_i(t)^{new} = U_i(t)^{old} - \alpha \cdot \partial H^t/\partial U_i(t)$$
$$i = 1, 2 \ldots\ldots n$$
$$t = 1, 2 \ldots\ldots N-1 \qquad (3.16)$$

와 같이 하여 수렴조건이 만족할때 까지 계산을 수행한다.

$\partial H_i/\partial U_i(t)$ 는 (3.10) 으로 주어진다.

4. 사례연구

4.1 입력자료

입력자료는 발전기군, 발전소자료, 부하곡선의 계수, 공급지장비 함수의 계수등이 사용되었다. 투자비함수의 순수발전소 건설비 이외의 비용에 의한

영향을 분석하기 위하여 투자비함수의 2차항의 계수를 여러단계로 변화시켰다. 사용된 입력 자료를 표 1, 표 4로 나타내었다.

4.2 결과분석

투자비함수의 2차항의 계수를 변화시켰을 때의 각 발전기 군의 증설 용량의 변화와 각각의 경우에 대한 각 발전기 군의 용량비를 그림 1 - 그림 9 로 나타내었다.

그림 1은 순수 발전소 건설비만을 고려했을 때의 발전소 군의 조합이다. 그림 2는 2차항의 계수를 1차항 계수의 30%를 주었을 때의 발전소 군의 조합을 나타낸 것이고 그림3은 2차항의 계수로서 1차항 계수의 50% 값을 주었을 때의 발전소 군의 조합이다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 발전소 유형 B군의 증설이 2차항 계수증가에 따라 상대적으로 억제되고 유형 D와 유형 F의 증설방향으로 진행하는 것을 알 수 있다.

그림 4- 그림 11 까지의 각 유형별 용량변화를 살펴보면 A군의 경우는 2007년 까지는 2차항의 계수와 거의 관계가 없으나 이 이후에는 2차항의 계수가 클수록 용량이 증가함을 보이고 반면에 B와 C군의 경우에는 B / A = 0.5 일 때 가장 큰 선호도를 보이고 있다.

이상과 같은 결과에서 2차항의 계수 즉, 계통의 대응비용은 어떤 일정한 경향을 나타내기 보다는 최적화 과정에서 깊이 관련되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

장기 전원 개발 계획 수립에 있어서 일반적으로 투자비를 증설 용량의 선형 함수로 취급하고 있어 발전소 건설 비용만이 고려되고 있다.

본 연구에서는 투자비를 2차 함수로 표현하여 발전소 건설 비용 뿐아니라 신증설에 따른 계통에의 파급 비용까지를 포함하는 새로운 투자비 모형을 제시하였다.

이 모형을 모델 계통에 적용하여 선형 함수로 취급했을 때와는 크게 다른 증설 패턴이 나타나는 것을 확인하였다. 비록 모든 조건이 고려된 최적 전원 개발 계획 모형까지는 이르지 못하였지만 발전소 건설비 이외의 투자비 즉, 파급 비용에 대한 적절한 방법이 제안된다면 매우 실용적으로 사용되리라 기대된다.

6. 참고문헌

1. Expansion Planning for Genrating Systems
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 1984
2. 전원개발 계획기법에 관한 설명자료
한국전력공사 기술연구원 1987
3. 전원계획 모형의 개발에 관한연구
서울대학교공과대학부속
생산기술연구소 1983
4. Applied Optimal Control
ARTHUR.E BRYSON JR.Yu-CHi HO
A HALSTED PRESS BOOK 1975
5. Nonliner Programming
MORDECAI AVRIEL PRENTICE-HALL 1976
6. 경제성 공학
김영휘외 3 청문각 1987

유 형	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
발전소 군	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J

표 1

INPUT DATA OF POWER PLANT

PLANT NAME	NTYPE	NUNIT	CAP.	ISTATY.	IRTREY.	LIFEY	MAINT	F.O.R.	FLCST	FICST	A	B
1	8	1	55.0	1977	1996	15	20	2.0	74.20	1.71	387.0	.01
2	8	36	5.0	1980	1996	15	20	2.0	74.30	2.28	387.0	.01
3	7	2	300.0	1979	1998	20	20	4.0	61.50	.89	420.0	.01
4	7	4	10.0	1979	1988	20	21	1.4	30.00	5.63	420.0	.01
5	7	1	270.0	1979	1988	20	20	4.0	54.90	.89	420.0	.01
6	5	1	50.0	1965	1996	25	39	11.4	38.40	4.07	877.0	.01
7	5	1	50.0	1965	1991	25	44	9.0	38.40	4.07	877.0	.01
8	5	1	75.0	1968	1994	25	38	4.0	39.30	3.64	877.0	.01
9	5	1	60.0	1966	1990	25	46	5.3	35.90	2.24	877.0	.01
10	5	1	60.0	1966	1990	25	63	8.1	39.30	2.24	877.0	.01
11	4	1	105.0	1982	2016	25	39	5.0	35.00	.65	637.0	.01

표 2

COEFFICIENT OF LOAD

YEAR	CONST.	1ST	2ND	3RD	4TH	5TH	LOAD FACTR.
1992							
	1.000000	-1.795753	10.114000	-27.350730	32.140900	-13.315810	.002320
	1.000000	-1.401679	8.413850	-23.100590	26.692760	-11.034420	.055590
	1.000000	-2.318379	14.355500	-39.793400	46.075060	-19.502370	1.000000
	1.000000	-1.700717	10.465740	-29.071290	33.966900	-14.090290	.006030
1993							
	1.000000	-1.827373	10.247640	-27.848210	32.430950	-13.420540	.001600
	1.000000	-1.415455	8.470125	-23.216830	26.803860	-11.072650	.054520
	1.000000	-2.321010	14.363910	-39.823000	46.906340	-19.594010	1.000000
	1.000000	-1.732138	10.565400	-29.284110	34.177070	-14.165030	.004690
1994							
	1.000000	-1.850761	10.380420	-28.136470	32.720060	-13.525100	.001290
	1.000000	-1.431001	8.533094	-23.354090	26.936160	-11.118620	.053710
	1.000000	-2.326754	14.392290	-39.874810	46.957900	-19.612010	1.000000
	1.000000	-1.757400	10.672730	-29.515000	34.445350	-14.246350	.003800

표 3

EACH YEAR OF DATA

YEAR	CAPACITY	ENERGY
1992	1500.00	3663.00
SEASON	CAP. FACT.	ENG. FACT.
1	.70850	.18720
2	.61700	.25090
3	1.00000	.33690
4	.79160	.22500

YEAR	CAPACITY	ENERGY
1997	1500.00	3663.00
SEASON	CAP. FACT.	ENG. FACT.
1	.70850	.18720
2	.61700	.25090
3	1.00000	.33690
4	.79160	.22500

YEAR	CAPACITY	ENERGY
2002	1500.00	3663.00
SEASON	CAP. FACT.	ENG. FACT.
1	.70850	.18720
2	.61700	.25090
3	1.00000	.33690
4	.79160	.22500

표 4

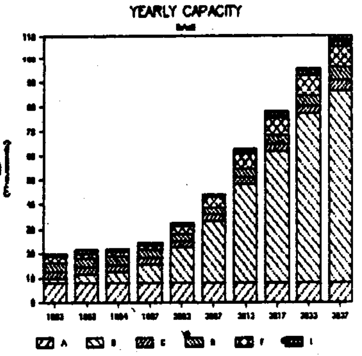

그림 1

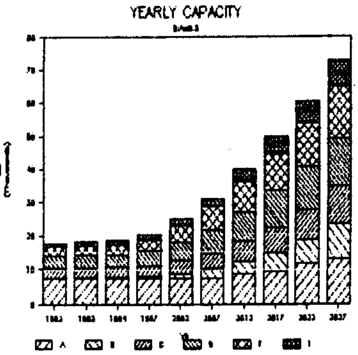

그림 2

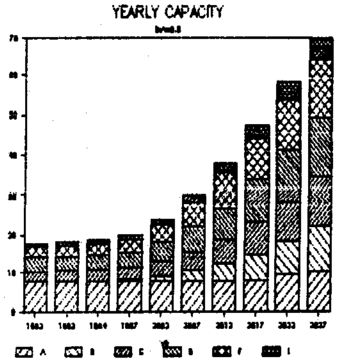

그림 3

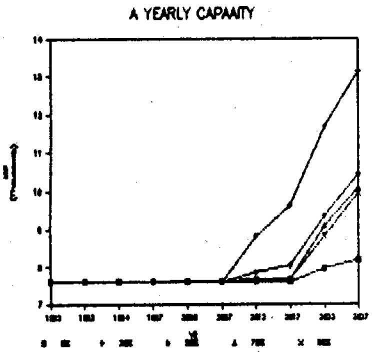

그림 4

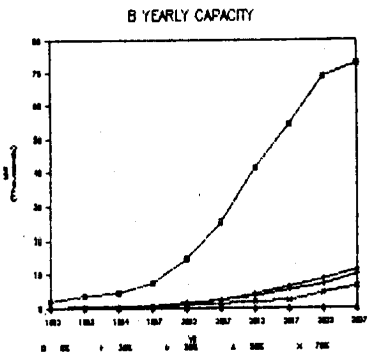

그림 5

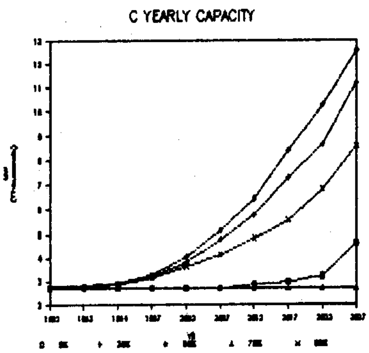

그림 6

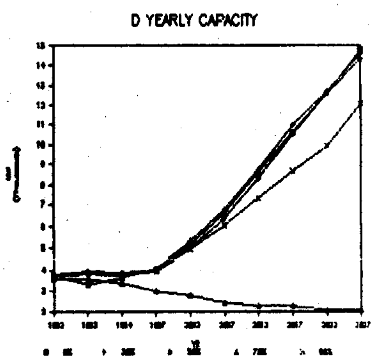

그림 7

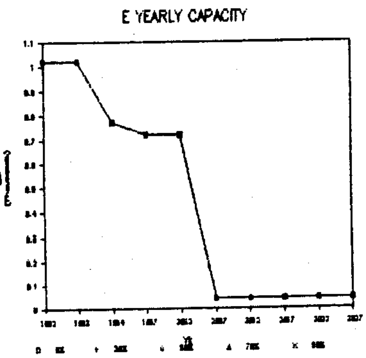

그림 8

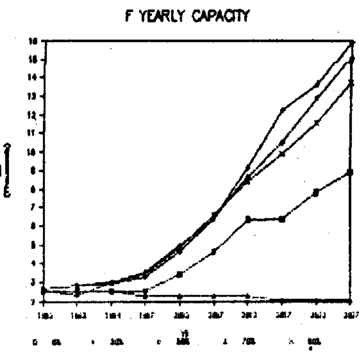

그림 9