

◎ 速報研究論文

동적계획법을 이용한 선내 발전시스템의 최적부하분담 방법에 관한 연구

유 희 한*

A Study on Optimal Electric Load distribution of Generators on
board using a Dynamic Programming

H. H. Yoo

Key words : Dynamic Programming(동적계획법), Optimal Load Distribution(최적부하분)
Parallel Operation(병렬운전), Automatic Load Sharing Device(자동부하분담장치)
Lagrange Multiplier(라그랑지 승수), Incremental Operating Cost(증분운전비)

Abstract

Since the oil crisis, we have been concerned about the energy saving techniques of electric generating systems. As a part of the effort to save energy, automatic electric load sharing device was developed. Usually, ship's electric generating system consists of two or three sets of generator. And, electric generating system is operated as single or parallel operation mode according to the demanded electric power. Therefore, it is important to investigate generators operating mode for the supply of required electric power in the ship in order to decrease the operating cost. So, this paper suggests the method to solve the optimal electric load distribution problem by dynamic programming. And, this thesis indicates that the proposed method is superior to the lagrange multiplier's method in obtaining optimal load distribution solution in the ship's electric generating system.

1. 서 론

오일쇼크 이래로 선박에서는 운항비 및 인건비 절감을 목표로 하는 추진플랜트의 성능에너지화와

성인력화가 최대의 과제로 대두되면서 이를 위한 실용적 방안의 일환으로 주기관 및 선내 발전기들 간의 병렬운전에 의한 운전모드의 합리화를 추구 해오고 있다^{1,2,3)}.

* 정희원, 한국해양대학교 기관시스템공학부(원고접수일 : 2000년 3월)

선박의 발전시스템에는 주로 디젤발전기, 터보발전기 및 축발전기 등이 사용되고 있다. 이 중에서 터보발전기와 축발전기는 항해중에만 사용할 수 있으며 디젤발전기와 조합하여 계통이 이루어져야 한다. 한편, 선박에 있어서 선종에 따라 다소 차이는 있으나 선내 전력소비량은 항해시보다는 하역시 및 입출항시에 더 많이 소요되는 경우도 있다. 따라서, 선내 발전시스템은 항해중에는 단독운전 또는, 운전비가 저렴한 발전기와의 병렬운전 형태로서 운용되고, 하역시 및 입출항시에는 디젤발전기의 단독운전 또는 병렬운전 형태로서 수요전력을 감당하고 있다. 본 연구에서는 이와같은 운전을 원활히 수행하기 위하여, 발전장치들의 부하분담에 대한 이론적 고찰을 행하고, 동적계획법^{5,6,7,8)}을 이용한 선내 발전시스템의 최적부하분담 방법을 제안한다

2. 이론적 고찰

2.1 선내 발전기의 최적부하분담

선내 발전기의 조합방법은 여러 가지가 있지만, 우선 용량이 서로 다른 발전기 3대(G_1, G_2, G_3)로서 선내 수요전력(P kW)을 공급하는 것으로 한다. 각 발전기의 출력(x_1, x_2, x_3 : 단위(kW))에 대한 운전비(단위 : won/h)를 각각 f_1, f_2, f_3 라 하고, Fig.1과 같이 2차 곡선으로 가정한 경우의 발전기의 최적부하분담 방법에 대하여 고찰해 보기로 한다.

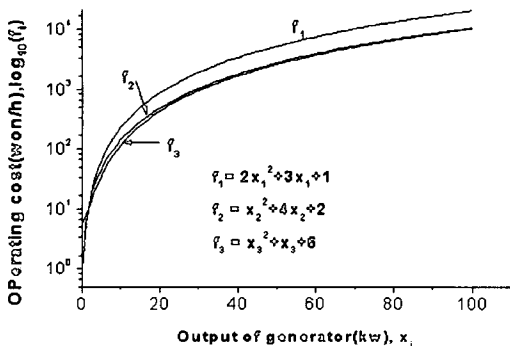


Fig. 1 Operating cost of each generator

2.2 Lagrange 승수법을 이용한 최적부하분담

전력시스템 운용의 경제적 부하분담문제 (Economic Load Dispatch Problem : ELD)분야에서 사용되어온 고전적 방법인 Lagrange 승수법을 적용하기 위해, 각 발전기의 출력과 운전비를 식(1)과 같이 표현하고, 선내 수요전력을 P 라 가정하였다. 따라서, 최적부하분담문제는 식(2) 조건하에서 식(3)의 F 를 최소로 하는 x_1, x_2, x_3 를 구하는 문제로 생각할 수 있다.

Table 1. Optimal loads of each generators by Lagrange multiplier

Required power (kW)	λ	x_1 (kW)	x_2 (kW)	x_3 (kW)
10.000	10.600	1.900	3.300	4.800
20.000	18.600	3.900	7.300	8.800
30.000	26.600	5.900	11.300	12.800
40.000	34.600	7.900	15.300	16.800
50.000	42.600	9.900	19.300	20.800
60.000	50.600	11.900	23.300	24.800
70.000	58.600	13.900	27.300	28.800
80.000	66.600	15.900	31.300	32.800
90.000	74.600	17.900	35.300	36.800
100.000	82.600	19.900	39.300	40.800
110.000	90.600	21.900	43.300	44.800
120.000	98.600	23.900	47.300	48.800
130.000	106.600	25.900	51.300	52.800
140.000	114.600	27.900	55.300	56.800
150.000	122.600	29.900	59.300	60.800
160.000	130.600	31.900	63.300	64.800
170.000	138.600	33.900	67.300	68.800
180.000	146.600	35.900	71.300	72.800
190.000	154.600	37.900	75.300	76.800
200.000	162.600	39.900	79.300	80.800
210.000	170.600	41.900	83.300	84.800
220.000	178.600	43.900	87.300	88.800
230.000	186.600	45.900	91.300	92.800
240.000	194.600	47.900	95.300	96.800
250.000	202.600	49.900	99.300	100.800
260.000	210.600	51.900	103.300	104.800
270.000	218.600	53.900	107.300	108.800
280.000	226.600	55.900	111.300	112.800
290.000	234.600	57.900	115.300	116.800
300.000	242.600	59.900	119.300	120.800

$$f_1=2x_1^2+3x_1+1, f_2=x_2^2+4x_2+2, f_3=x_3^2+x_3+6 \quad (1)$$

$$x_1+x_2+x_3=P \quad (2)$$

$$F=f_1+f_2+f_3 \quad (3)$$

이 문제를 Lagrange 승수 λ 를 이용하여 정식화 하면 식(4)와 같이 된다.

$$L(x_1, x_2, x_3, \lambda)=f_1+f_2+f_3-\lambda(x_1+x_2+x_3-P) \quad (4)$$

식(4)의 Lagrange 함수 L 의 최적조건을 구하면 다음의 식 (5), (6), (7), (8)이 성립하게 된다.

$$\frac{\partial L}{\partial x_1}=\frac{\partial f_1}{\partial x_1}-\lambda=0 \quad \therefore x_1=(\lambda-3)/4 \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2}=\frac{\partial f_2}{\partial x_2}-\lambda=0 \quad \therefore x_2=(\lambda-4)/2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_3}=\frac{\partial f_3}{\partial x_3}-\lambda=0 \quad \therefore x_3=(\lambda-1)/2 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda}=0 \quad \therefore x_1+x_2+x_3=P \quad (8)$$

P 가 정해지면 식(5), (6), (7), (8)을 이용해서 F 를 최소화하는 즉, 최소 운전비용 F_{min} 을 구할 수 있게 된다. 상기 식에서 $\frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \frac{\partial f_2}{\partial x_2}, \frac{\partial f_3}{\partial x_3}$ 는 각각의 발전기의 운전출력의 증분에 대한 운전비의 증분비, 즉 증분운전비(incremental operating cost)를 의미한다. 최적조건식(5), (6), (7)에서도 알 수 있는 바와 같이 최적부하 배분상태에서는 다음의 관계식이 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1}=\frac{\partial f_2}{\partial x_2}=\frac{\partial f_3}{\partial x_3}=\lambda \quad (9)$$

즉, 선내 발전기의 최적부하배분을 행하기 위해서는 각 발전기의 증분운전비가 같아지도록 선내 전력부하를 각 발전기에 배분하면 좋다는 것을 의

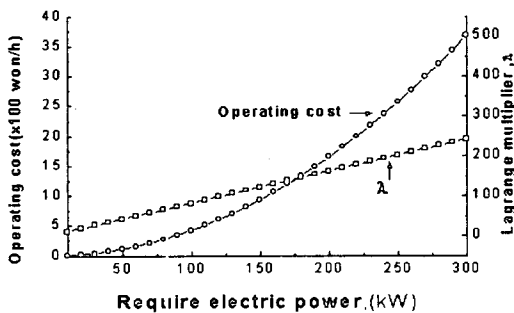


Fig. 2 Operating cost and λ value

미한다. Table1에 식(5),(6),(7),(8)을 이용하여 선내 수요전력 P 의 범위가 10-300 kW인 경우의 Lagrange 승수 및 각 발전기의 출력배분 값을 나타내었다. 또한, Fig.2에 선내수요전력에 따른 운전비와 Lagrange 승수 λ 의 변화를 나타내었다.

또한, Fig.3에, 발전기의 출력에 따른 운전비용이 서로 다른 발전기가 3대 있을 경우, 이를 모두 운전한다고 가정했을 경우, 선내 전력부하가 300 kw까지 변화할 때의 각 발전기의 최적부하 분담비를 나타내었다.

Fig.1 와 Fig.3 에서, 각 발전기의 용량제약이 없는 경우, 각 발전기의 최적부하배분에 있어서는 첫째, 운전비곡선의 기울기가 급격한 발전기의 부하 분담율이 작다는 것을 알 수 있고, 증분운전비 곡선이 다른 발전기의 증분운전비곡선에 비해 급격한 발전기는 선내 전력부하에 대해 부하 분담율의

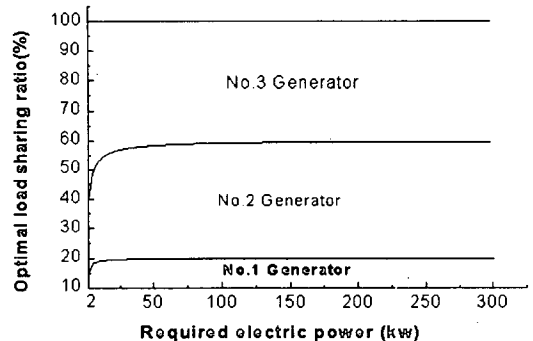


Fig.3 Optimal load sharing ratio of each generator

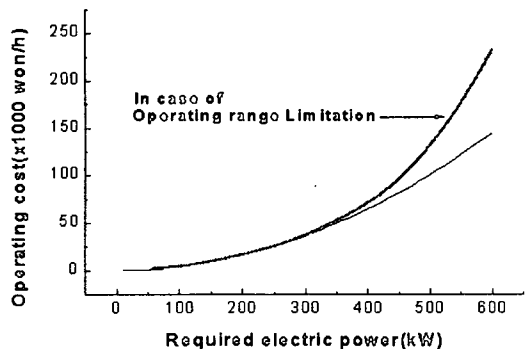


Fig. 4 Comparison of operating cost

변화가 작음을 알 수 있다. 이제까지는 선내 발전기는 모두 병렬운전시키고 각 발전기의 운전비곡선은 운전출력에 대하여 상한과 하한의 제한이 없고, 절선되는 부분이 없다는 조건하에서 최적부하분담을 다루었다. 그러나, 실제의 발전기 운전비곡선은 상한과 하한의 제한이 있고, 연속적 절선으로 표시되는 경우도 많다. 물론 이 경우에도 Lagrange 승수법을 이용한 최적부하배분 문제를 다룰 수 있지만 모든 발전기를 병렬운전하는 경우만으로 제한을 받게된다.

Fig.4에 각 발전기의 운전출력의 제한($30 \leq x_1 \leq 300$, $20 \leq x_2 \leq 200$, $10 \leq x_3 \leq 100$)이 있을 경우와 제한이 없을 경우에 대한 Lagrange 승수법에 의한 운전비 곡선을 나타내었다. 발전기의 운전출력의 제한으로 운전비가 차이가 나는 구간이 있음을 알 수 있다

또한, 발전기의 실제운용에 있어서는 발전기의 병렬 우선 순위를 정해 부하변동에 따라 순위가 높은 것부터 병렬운전하는 방법이 채용되고 있다. 저부하시의 효율은 일반적으로 현저히 낮을 뿐 아니라 운전출력의 하한 값의 제약이 있으므로 선내 요구전력 부하가 낮을 때는 일부의 발전기를 정지시키고 나머지 발전기로 최적부하배분을 행하는 것이 경제적이라 할 수 있다. 따라서, 이러한 경우는 최적 병렬발전기의 선택을 고려한 최적부하배분 문제로 되므로 Lagrange 승수법을 적용할 수 없게 된다. 따라서, 여기서는 다단 결정과정을 통한 시스템의 최적화 문제로 되므로 동적계획법을 이용하는 접근이 필요하다.

3. 동적계획법을 이용한 모델링

3.1 문제의 정식화

선내발전기의 대수를 n 대라하고 k 번째 발전기의 출력이 x_k 일때의 운전비용을 $f_k(x_k)$, 선내수요전력을 P , 선내 수요전력 P 에 대한 최소운전비용(목적함수)을 $F_n(P)$ 라 하면 최적부하배분문제는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n = P \tag{11}$$

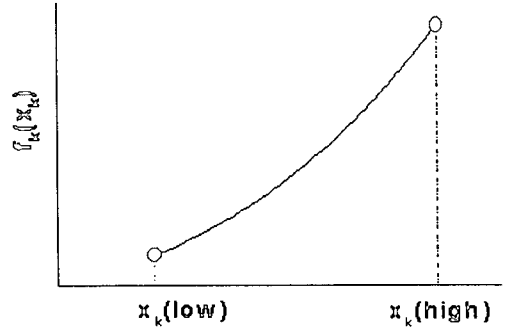


Fig. 5 Operating cost according to the operating limit

$$F_n(P) = \underset{x_1, x_2, \dots, x_n}{\text{Minimize}} [f_1(x_1) + f_2(x_2) + f_3(x_3) + \dots + f_n(x_n)] \tag{12}$$

$x_1 + x_2, \dots, x_n$ 식(12)에서 $f_k(x_k)$ 의 곡선은 Fig.5와 같이 표현된다. 즉, 출력의 상하한 구간은 운전비곡선을 이용하고, 정지시에는 $f_k(0) = 0$, 정지시를 제외한 출력 상하한 구간 밖의 출력에 대해서는 운전비용을 무한대로 취급한다.

이와 같이 해서 출력의 상하한 및 정지시의 조건을 모두 함수 $f_k(x_k)$ 의 형으로 조합하면 식(12)는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$F_k(P) = \min_x [F_{k-1}(P-x) + f_k(x)] \tag{13}$$

여기에서, $k = 1, 2, 3, \dots, n$, $F_0(P) = 0$ 이다.

3.2 문제의 적용

선내에 출력과 운전비용이 서로 다른 발전기가 3대 설치되어 있고, 각 발전기의 상하한 운전제한이 식(14)와 같고, 선내에서 요구되는 전력의 최소값이 10 kw이상일 경우, 각 발전기의 운전비가 출력 상하한 운전제한 내에서 식(1)과 같이 주어졌을 때 각 발전기의 출력에 대한 운전비 곡선은 Fig.6와 같다. 이 경우, 병렬발전기의 선택을 고려한 최적 부하배분문제를 식(15)로 표현할 수 있다.

$$30 \leq x_1 \leq 300, \quad 20 \leq x_2 \leq 200, \quad 10 \leq x_3 \leq 100 \tag{14}$$

$$F_3(P) = \min_x [F_2(P-x) + f_1(x)] \tag{15}$$

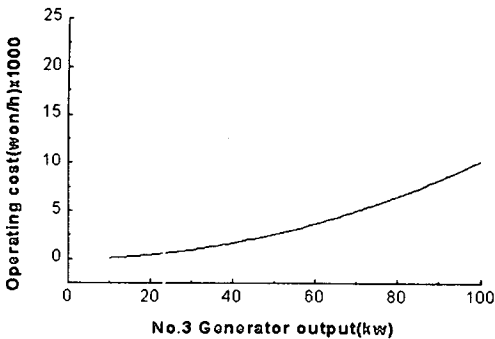
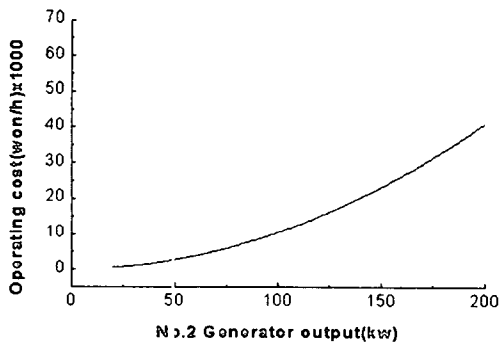
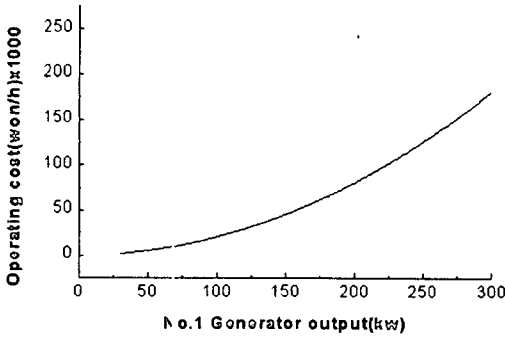


Fig. 6 Operating cost according to each generator output

상기 문제에서는 3개의 상호 연관된 결정을 내려야 한다. 즉, 3대의 발전기 각각에 몇kw의 전력을 할당할 것인가 이다. 정해진 순서는 없지만, 3대의 발전기는 3단계로 생각할 수 있다. 결정변수 $x_n(n=1, 2, 3)$ 은 단계 n 에 할당할 전력의 값이다. 시스템의 상태로서는 각 발전기의 누적출력으로 잡고, 단계 n 에서의 각발전기의 누적전력값을 $S_n(n=1, 2, 3)$ 으로 표현하면 S_3 는 선내수요전력이 된다. 동적계획법은 역순해법을 적용하므로 단계1

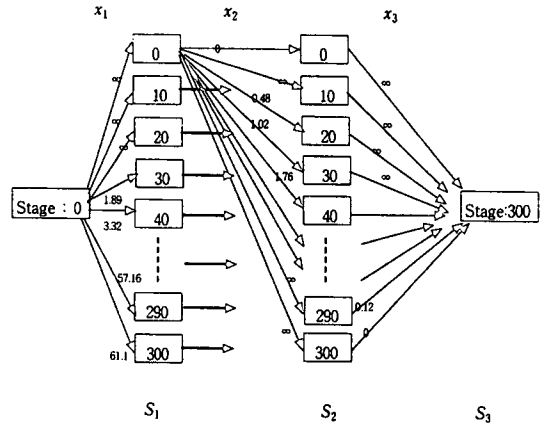


Fig. 7 Multi-stage decision process network for the minimum operating cost calculation

Table 2. Optimal electric load distribution by dynamic programming ($F_3(P)$ unit : (won/h) $\times 1000$)

P(kW)	G_1 출력	G_2 출력	G_3 출력	$F_3(P)$
10	0.00	0.00	10.00	0.12
20	0.00	0.00	20.00	0.43
30	0.00	20.00	10.00	0.60
40	0.00	20.00	20.00	0.91
50	0.00	24.00	26.00	1.38
60	0.00	29.00	31.00	1.96
70	0.00	34.00	36.00	2.63
80	30.00	24.00	26.00	3.27
90	30.00	29.00	31.00	3.85
100	30.00	34.00	36.00	4.52
150	30.00	59.00	61.00	9.40
200	40.00	79.00	81.00	16.53
250	50.00	100.00	100.00	25.66
300	67.00	133.00	100.00	37.51
350	83.00	167.00	100.00	52.69
400	100.00	200.00	100.00	71.21
450	150.00	200.00	100.00	96.36
500	200.00	200.00	100.00	131.51
550	250.00	200.00	100.00	176.66
600	300.00	200.00	100.00	231.81

과 단계2에서 그전단계는 아직 해결이 안된 상태이다. 따라서, 단계1과 단계2의 가능한 상태 S_n 은 모든 가능한 값을 고려해야 한다. Fig.7은 선내에서 요구되는 전력의 변화폭을 10 kw단위로 할 때,

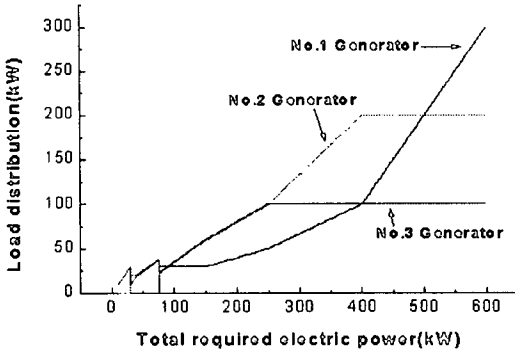


Fig. 8 Optimal electric load

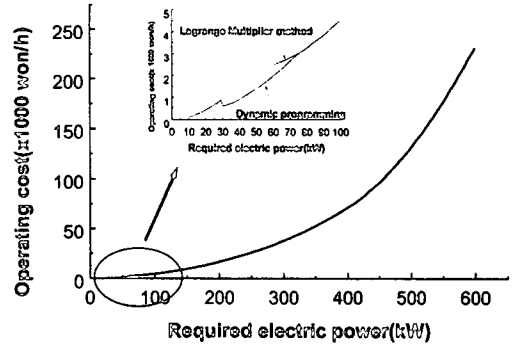


Fig. 10 Comparison of Operating cost

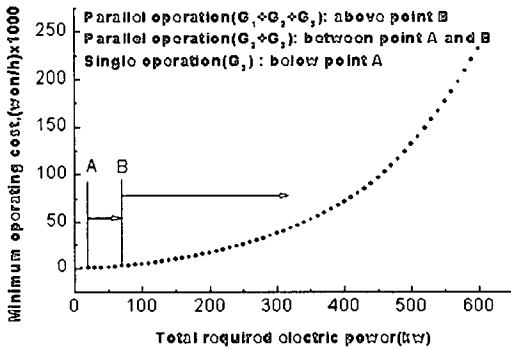


Fig. 9 Generator combination for minimum operating cost

선내수요 전력 값이 300 kw인 경우의 각 단계에서의 상태를 보여주고 있다.

각 가지는 한 상태에서 다음 상태로 가기 위한 전력의 할당값 (x_n)을 나타내고, 가지상의 숫자의 예는 그렇게 함으로써 얻어지는 목적함수의 기여치(즉, 각 발전기의 출력에 따른 운전비의 예를 나타낸다. 이 네트워크에서 알 수 있는 바와 같이 이 문제의 목적은 초기상태 0 으로부터 최종상태(선내수요전력)로 가는 경로 중, 경로상의 기여치의 합을 최소로 하는 경로를 찾는 문제이다. 선내 전체 수요전력을 10-600 kw 범위내에서 변경하면서 동적계획법을 이용한 각 발전기의 최적부하분담을 행한 결과를 Table2와 Fig.8에 나타내었다. 또한, Fig.9에 선내 수요전력에 따른 발전기의 병렬운전 시점을 나타내었다.

또한, Fig.10에서 알 수 있는 바와 같이 선내수

요전력에 따라 모든 발전기를 운전할 경우, 80 kW 이상의 영역에서는 Lagrange승수법에 의한 최적부하분배에 의한 운전비와 본 연구에서 제안하는 동적계획법에 의한 최적부하분담값이 잘 일치함을 알 수 있다. Fig.10에서 약 60 kW이하의 구간은 Lagrange승수법에 의한 해를 구할 수 없는 구간이고, 60 kW에서 80 kW사이에서는 동적계획법에 의한 선택적 병렬운전을 하는 것이 운전비가 낮음을 보여주고 있다.

4. 결 과

이상과 같이 선내 발전기의 최적부하분배 문제를 연구한 결과, Lagrange승수법에 의한 최적부하분배문제는 선내 발전기를 모두 병렬운전해야 한다는 조건에서는 유용한 방법이지만, 실제의 선박에서의 발전기의 운전은 병렬운전해야 할 발전기의 선택 및 발전기의 정지 등을 고려해야하므로, 동적계획법을 이용한 선내 발전기의 최적부하분담법이 유용함을 알 수 있었다. 모든 발전기를 병렬운전하지 않아도 되는 전력구간(본 논문의 경우, 10 kw에서 80 kw까지의 구간)이 적은 범위이지만, 이 구간에서의 동적계획법의 유용성이 있음을 알 수 있었다. 또한, 발전기를 모두 병렬운전 해야 하는 수요전력구간에서의 각 발전기의 최적부하값이 Lagrange승수법에 의한 최적해와 동적계획법에 의한 최적해가 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 금번의 연구에서는 선내 발전기의 운전비곡선을 간단한 2차식으로 가정하고, 같은 종류의 발전

기 간의 병렬운전만을 고려하여 보았지만, 터보발전기 또는 축발전기와의 병렬운전도 이들 발전기의 발전출력에 대한 운전비 특성이 모델링되면 동일한 방법으로 최적부하배분을 할 수 있다고 생각된다. 앞으로 이에 대한 연구는 발전장치의 자동부하분담장치 개발에 있어서의 소프트웨어기술로서 활용될 수 있을 뿐 아니라 선박 전력 공급플랜트의 기본설계시 구성기기의 최적규모 선정의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

參考文獻

1. 頼野尾彰 外 2名, タービン・ディーゼル發電システムの最適負荷分擔装置, 日本船用機關學會誌, 16卷, 8號, p38~44, 1981
2. 岡野益弘 外 2名, 最近の船用發電機システムについて, 日本船用機關學會誌, 15卷, 9號, pp.59~66, 1980
3. 赤木新介 外 2名, 船用熱電力供給 プラントの最適設計運用計劃, 日本機械學會論文集(C編), 50卷, 449號, pp.222~228, 1984

4. William D. stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, pp.241~267, 1980
5. 廣田 實, 船舶制御システムの工學, 成山堂, pp.236~240, 1990
6. Stanley M. Shinnars, Modern Control System Theory and Application, Addison-wesley pub. co., pp.485~490, 1978
7. Smith, D. K., Dynamic Programming, Ellis Horwood, Lodon, 1991
8. Sniedovich, M., Dynamic Programming, Marcel Dekker, New York, 1991

저 자 소개



유희안 (柳熙安)

1956년 1월생, 1979년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1987년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사) 1997년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사) 1982-1989년 한국기계 연구소 선임연구원 1991-1998년 포항공대 가속기 연구소 선임연구원 1998-현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 전임교수