

Economic Dispatch Algorithm as Combinatorial Optimization Problems

민 경 일* · 이 수 원** · 최 인 규*** · 문 영 현†
 (Kyung-II Min · Su-Won Lee · In-Kyu Choi · Young-Hyun Moon)

Abstract - This paper presents a novel approach to economic dispatch (ED) with nonconvex fuel cost function as combinatorial optimization problems (COP) while most of the conventional researches have been developed as function optimization problems (FOP). One nonconvex fuel cost function can be divided into several convex fuel cost functions, and each convex function can be regarded as a generation type (G-type). In that case, ED with nonconvex fuel cost function can be considered as COP finding the best case among all feasible combinations of G-types. In this paper, a genetic algorithm is applied to solve the COP, and the λ -P function method is used to calculate ED for the fitness function of GA. The λ -P function method is reviewed briefly and the GA procedure for COP is explained in detail. This paper deals with two kinds of ED problems, namely ED with multiple fuel units (EDMF) and ED with prohibited operating zones (EDPOZ). The proposed method is tested for all the ED problems, and the test results show an improvement in solution cost compared to the results obtained from conventional algorithms.

Key Words : Combinatorial Optimization Problems, Economic Dispatch, Genetic Algorithm, Multiple Fuel Option, Prohibited Operating Zone, λ -P Table Method

1. 서 론

경제급전(Economic dispatch; ED)은 계통에 투입된 모든 발전기의 발전비용이 최소화 되도록 발전기마다 최적의 발전량을 분배하는 것을 목적으로 한다. 전통적인 경제급전에서는 2차 다항식의 연료비함수를 사용하며, 제약조건은 전력수급 조건과 발전기 출력제한만을 고려하기 때문에 일반적으로 라그랑지 승수법(Lagrangean multiplier method)을 이용하여 구한다[1]. 그러나 실제 전력계통에서의 발전기는 복합연료(Multiple fuel; MF)[2] 옵션이나 운전금지구역(Prohibited operating zones; POZ)[3],[4] 등과 같은 nonconvex한 연료비 함수의 고려를 필요로 한다. 한 발전기에 두 개 이상의 연료를 수용할 수 있는 복합연료를 사용하는 발전기의 경우 각 연료에 따라 연료비함수가 다르므로 발전기 입출력 관계는 piecewise quadratic 함수로 표시된다. 그리고 실제 발전기 기동시 기기의 물리적인 한계 때문에 각 발전기의 운전범위 내에서 발전이 불가능한 구간이 발생하는데, 이 경우 발전기 입출력 특성은 발전금지 구간을

가지는 불연속의 비용곡선으로 표시된다. 이와 같은 경제급전은 전통적인 방법으로는 구할 수 없으며, 최근까지 유전알고리즘(Genetic algorithm; GA)[5]-[7], 시뮬레이티드 어닐링(Simulated annealing)[8], Hopfield neural network(HNN)[9], 타부썬치(Tabu search) [10], 진화프로그래밍(Evolutionary programming) [11]-[13], particle swarm optimization[14]-[16] 등과 같은 휴리스틱한 방법을 중심으로 많은 연구가 이루어졌다.

최적화문제는 일반적으로 두 가지로 분류할 수 있다[17]. 첫째로 최적화문제의 변수가 연속적인 함수최적화문제(Function optimization problem; FOP)가 있고, 불연속적인 변수를 갖는 조합최적화문제(Combinatorial optimization problem; COP)가 있다. 지금까지의 휴리스틱을 기반으로 연구된 논문을 살펴보면 모두 경제급전을 함수최적화문제로 접근하였다. 그러나 하나의 nonconvex한 연료비 곡선을 convex한 곡선 단위로 쪼개어 각각을 하나의 Generation type(G-type)으로 생각한다면, 각 발전기에 대한 최적의 G-type의 조합을 찾는 조합최적화문제로 접근할 수 있다. 유전알고리즘을 이용한 경제급전을 예로 들면, 함수최적화문제의 경우 하나의 유전자가 모든 발전기의 출력량을 표현하도록 인코딩하는 반면, 조합최적화문제에서는 모든 발전기의 G-type을 표현하도록 인코딩한다. 조합최적화문제로 접근한 경제급전에서는 임의의 G-type의 조합에 대한 적응도를 판단하기 위해 기존의 경제급전 방법을 이용할 수 있으므로 지역적으로는 최적의 해를 구할 수 있다.

조합최적화문제는 휴리스틱한 접근법 외에도 혼합정수계획법(Mixed integer programming)[18]이나 라그랑지 완화법

* 정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정
 ** 정 회 원 : 성균관대 정보기술분야 밀착형 산학협력
 인재양성사업단 연구교수 공박
 *** 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원
 † 교신저자, 펠로우회원 : 연세대 전기전자공학과 교수
 E-mail : moon@yonsei.ac.kr
 접수일자 : 2009년 4월 28일
 최종완료 : 2009년 6월 22일

(Lagrangian relaxation)[18]-[19]으로도 해를 구할 수 있으나, 본 논문에서는 조합최적화문제에 뛰어난 성능을 보이는 것으로 알려진 유전알고리즘을 사용하였다[20],[21].

본 논문에서는 적용도 검사를 위한 경제급전을 수행하기 위하여 λ-P 함수법[22],[23]을 사용하였다. λ-P 함수법은 한계연료비곡선의 역함수를 이용하여 경제급전을 계산하며, 발전출력제약의 처리가 간단하고 빠르기 때문에 경제급전을 반복 수행하는데 매우 유용하다. λ-P 함수법에 대해서는 부록에서 간략히 설명하였다.

본 논문에서는 다음의 두 가지 nonconvex한 연료비 함수를 다루었다.

- 복합연료 옵션을 고려한 경제급전 (ED with multiple fuel units; EDMF)
- 운전금지구역을 고려한 경제급전 (ED with prohibited operating zones; EDPOZ)

위의 각각의 연료비에 대한 경제급전을 테스트해보았고, 기존의 방법들과의 결과를 비교하였다.

2. 경제급전문제의 정식화

2.1. 일반적인 경제급전

경제급전문제는 보통 아래의 최적화 문제로 정식화 된다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{n_g} F_i(P_i) \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^{n_g} P_i = P_D + P_{Loss} \tag{2}$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad \text{for } i = 1, \dots, n_g \tag{3}$$

- 단, F_i 발전기 i 의 연료비 함수
- P_i 발전기 i 의 발전출력
- P_D 시스템의 총부하량
- P_{Loss} 시스템의 총손실
- P_i^{\min} 발전기 i 의 최소출력
- P_i^{\max} 발전기 i 의 최대출력
- n_g 총 발전기 수

문제를 단순화하기 위하여 P_{Loss} 는 종종 생략되거나 P_D 에 포함시킨다. 그리고 연료비 함수는 비선형 특성을 가지지만 보통 다음과 같이 2차 함수로 근사화한다[1].

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \tag{4}$$

이 때, a_i, b_i, c_i 는 발전기 i 의 연료비용계수이다.

2.2. EDMF

복합연료발전을 고려한 경제급전문제는 다음과 같이 2차의 piecewise 함수로 표현할 수 있다[2].

$$F_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1}P_i^2 + b_{i1}P_i + c_{i1}, & \text{if } P_{i1}^{\min} \leq P_i \leq P_{i1}^{\max} \\ a_{i2}P_i^2 + b_{i2}P_i + c_{i2}, & \text{if } P_{i2}^{\min} \leq P_i \leq P_{i2}^{\max} \\ \vdots & \vdots \\ a_{in}P_i^2 + b_{in}P_i + c_{in}, & \text{if } P_{in}^{\min} \leq P_i \leq P_{in}^{\max} \end{cases} \tag{5}$$

이 때, a_i, b_i, c_i 는 발전기 i 의 연료비용계수이며, P_{ij}^{\min} 는 $P_{i-1,j}^{\max}$ 와 같은 값이다.

2.3. EDPOZ

운전금지구역을 고려한 경제급전에서 연료비함수는 다음과 같이 모델링할 수 있다[3],[4].

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \\ P_{i,j-1}^u \leq P_i \leq P_{i,j}^l \\ P_{i,n_p}^u \leq P_i \leq P_i^{\max} \end{cases} \tag{6}$$

단, $P_{i,j}^l$ 과 $P_{i,j}^u$ 는 i 번 발전기의 j 번째 운전금지구역의 상한값과 하한값을 의미하며, n_p 는 i 번 발전기의 운전금지구역의 개수이다.

3. 조합최적화문제로 접근한 경제급전

유전알고리즘은 일반적으로 조합최적화문제를 해결하는데 효과적인 것으로 알려져 있으며[20], 지금까지 수많은 연구가 진행되어 셀 수 없이 다양한 구현방법들이 제시되었다. 하지만 공통적으로 나타나는 전형적인 구조가 있다 [20],[21]. 대부분의 유전알고리즘은 다음의 두 단계의 절차를 반복적으로 수행한다. 최초의 해집단에서 출발하여 선택 (Selection) 연산을 통해 부모해(Parent)를 선별하고 그 다음 교차(Crossover)와 변이(Mutation)을 통해 다음세대의 자식해(Offspring)를 만든다. 이 두 과정의 반복을 통해 최적해에 접근하게 된다. 유전알고리즘에서 문제의 인코딩방식(Encoding scheme)과 적합도함수(Fitness function)는 문제에 따라 달라지며, 최적해를 구하는 과정에서 큰 영향을 미친다. 이 절에서는 조합최적화문제에서 최적해를 구하기 위한 GA-COP 방법을 제안하고 그 절차를 설명한다.

3.1 G-type과 인코딩 방식

G-type(Generation type)은 nonconvex한 연료비용함수를 convex한 단조증가함수(Monotonous convex curve)가 되도록 나누었을 때, 각 연료곡선에 차례로 매겨진 순서를 말한다. 즉, 그림 1과 같이 EDMF에서는 연료옵션의 번호, EDPOZ에서는 운전가능구역(Operating zone)에 차례로 매겨진 번호를 뜻한다. 그림 1의 (a)와 (b)는 3개씩의 G-type을 가지고 있다. 보통 유전알고리즘을 적용할 때, 대부분의 최적화문제들의 해집합은 이진수로 표현하며 그 길이는 상수로 고정되도록 표현한다. 함수최적화문제로 접근한 지금까지의 경제급전에서 대표적으로 사용된 인코딩방법은 그림 2(a)와 같이 모든 발전기의 발전량의 벡터를 하나의 염색체(Chromosome)로 표현하는 것이다[5]. 그러나 제안하는 방법에서는 조합최적화문제로 접근하기 때문에 그림 2(b)와 같

이 발전기마다 G-type이 작을 이를 수 있도록 정수코딩을 하였다.

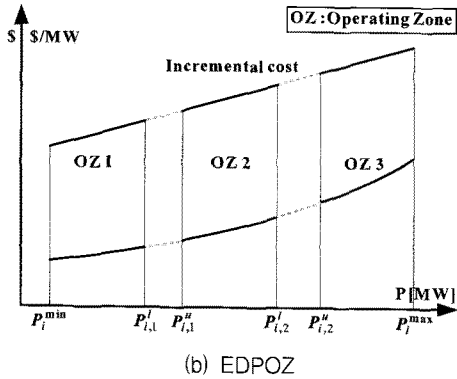
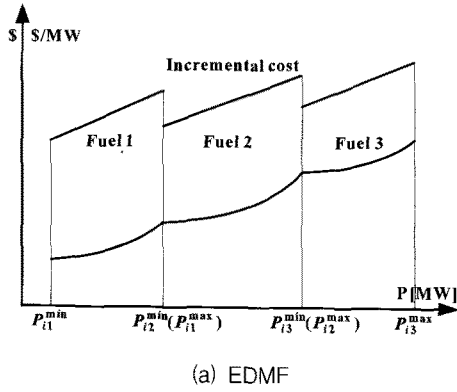


그림 1 EDMF와 EDPOZ의 연료비함수 및 한계연료비함수와 G-type

Fig. 1 Fuel cost functions, incremental fuel cost function of EDMF and EDPOZ, and G-type

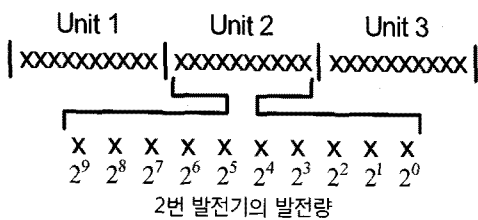


그림 2 3개의 발전기 시스템에 대한 코딩방식
Fig. 2 Encoding illustrations in a 3-generator system

조합최적화문제의 인코딩의 경우 염색체의 개수는 발전기의 수와 동일하므로 함수최적화문제에 비해 염색체의 길이가 상당히 짧다. 따라서 실익은 수렴(premature convergence)의 가능성이 높으므로 이를 보완하기 위해서 함수최적화문제의 경우보다 상대적으로 해집단의 개수를 늘리는 방안 등을 강구하여야 한다.

3.2 적합도 함수 (Fitness function)

제안된 방법에서 해집단 내의 해 i 의 적합도 함수는 다음 식을 이용한다[20].

$$f_i = (C_w - C_i) + (C_w - C_b) / (p_s - 1), p_s > 1 \quad (7)$$

여기서 C_w : 해집단 내에서 가장 나쁜 해의 비용
 C_b : 해집단 내에서 가장 좋은 해의 비용
 C_i : 해 i 의 비용

P_s 의 값을 높이면 선택압이 높아지며 일반적인 함수최적화문제에서는 보통 3~5정도의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.

3.3 GA-COP를 이용한 경제급전 알고리즘의 절차

3.3.1 전처리 과정

임의의 발전조합에 대한 경제급전을 계산하기 위한 λ -P 함수법이 사용된다. λ -P 함수법을 적용하기 위해서는 한계연료비함수의 역함수를 구하는 과정이 필요하다. 한계연료비함수는 1차식으로 표현되므로 역함수를 쉽게 구할 수 있으며 GA-COP를 적용하기에 앞서 λ -P 함수를 구해 놓는다.

3.3.2 GA-COP 과정

```

n 개의 초기 염색체 생성;
적합도 검사;
repeat {
    for i = 1 to k {
        두 염색체 p1, p2 선택;
        offspring_i = crossover(p1, p2);
        offspring_i = mutation(offspring_i);
    }
    offspring_1, ..., offspring_k를 해집단 내의 k
    개의 염색체와 대치;
    적합도 검사;
} until(정지 조건 만족)
남은 해 중 최상의 염색체를 return;
    
```

그림 3 GA-COP의 기본적인 알고리즘
Fig. 3 Fundamental structure of GA-COP

GA-COP과정은 일반적인 유전알고리즘과 거의 유사한 과정을 따른다. GA-COP에서 연산자는 일반적인 것을 사용하였다. 선택연산을 하기 위해 룰렛휠(Roulette wheel) 방식을 사용하였으며, 교차연산에 사용된 방식은 k 점교차(k -point crossover)로 염색체의 길이에 따라 k 개의 조정이 가능하다. 변이연산은 일반적으로 널리 쓰이는 균등 변이(Uniform mutation)를 사용하였다. 적합도는 λ -P 함수법을 이용하여 얻어진 경제급전의 해를 식(7)에 적용하여 계산하였다. GA-COP 알고리즘의 전체적인 구조를 그림 3에 나타내었다.

4. Case Studies

제안한 GA-COP의 알고리즘은 Microsoft Visual C++ 6.0을 이용하여 구현하였으며, 개인용 컴퓨터(Pentium D CPU 3.00 GHz)를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 제안한 방법에 의한 테스트 결과와 기존의 방법에 의한 결과를 비교하였다.

4.1 EDMF

EDMF를 테스트하기 위해서 10기 시스템[2]에 시뮬레이션을 하였다. 시스템의 총부하는 2400 MW부터 2700 MW까지 100 MW씩 늘려서 테스트 하였다. 이 테스트에서는 교차연산으로 2점교차(2-point crossover)방식을 적용하였으며, 유전알고리즘의 파라미터 값은 다음과 같이 설정하였다.

- p_c	2.0	- p_m	50
- 교차비율	0.2	- 교차비율	1.0
- 변이비율	0.1	- 변이비율	0.3
- 해집합 개수	100	- 해집합 개수	1000

제안한 방법에 의한 시뮬레이션 결과는 HM [2], IEP [12], IGA_MU [7], AHNN [9], MPSO [14], AIS [24], A-Life [25]과 같은 휴리스틱한 방법들과 비교하였다. IGA_MU와 A-Life는 인용논문에 게재된 결과만을 수록하였다. 제안한 GA-COP에 의한 시뮬레이션 결과 및 기존의 방법에 의한 결과를 표 1~표 4에 정리해 놓았다. 표 1~표 4에서와 같이 GA-COP는 매우 우수한 결과를 보였다. 여기서 각각의 방법마다 결과값의 유효 소수점자리가 다르지만 일부 방법들 간에 정확한 비교를 위해 부득이 유효 소수점 자리를 통일하지 않고 그대로 두었다. 제안한 방법은 HM의 2600 MW의 경우와 AHNN의 2400 MW~2600 MW 경우를 제외하고는 몇 가지 기존방법과 함께 가장 비용이 적은 결과를 보였다. 표 5는 프로그램을 100번 수행한 후 수렴빈도를 기록한 것이다. 모든 테스트 결과는 표 5에 나온 G-type으로 수렴하였다. 2400 MW와 2500 MW의 경우 최저해를 각각 91번, 86번 도출하였으며 나머지도 최저해에 상당히 근접해 있음을 볼 수 있다. 2600 MW와 2700 MW의 경우 100번 모두 최저해를 도출하였다.

100대의 발전기 시스템에 대해서도 시뮬레이션을 해 보았다. 이 때, 발전기 데이터는 위의 10기 시스템과 동일한 발전기가 10대씩 있다고 가정하였다. 그리고 부하는 위의 시뮬레이션에서의 부하에 10배라고 가정하였다. 시뮬레이션은 다음의 파라미터를 사용하였고, 각 파라미터의 특성을 알아보기 위해 파라미터마다 값을 변경하여 시뮬레이션을 하였고 그 결과를 비교하였다.

표 1 기존방법과 GA-COP의 EDMF 결과비교 (Demand = 2400 MW)

Table 1 Comparison of conventional methods and GA-COP for EDMF (Demand = 2400 MW)

S	U	HM		AHNN		IEP		MPSO		AIS		A-Life		GA-COP	
		F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN
1	1	1	193.2	1	189.1	1	190.9	1	189.7	1	189.68	1	189.74	1	189.74
	2	1	204.1	1	202.0	1	202.3	1	202.3	1	202.40	1	202.34	1	202.34
	3	1	259.1	1	254.0	1	253.9	1	253.9	1	253.81	3	253.90	1	253.90
	4	3	234.3	3	233.0	3	233.9	3	233.0	3	233.02	3	233.05	3	233.05
2	5	1	249.0	1	241.7	1	243.8	1	241.8	1	241.94	1	241.83	1	241.83
	6	1	195.5	1	233.0	3	235.0	3	233.0	3	233.06	3	233.05	3	233.05
	7	1	260.1	1	254.1	1	253.2	1	253.3	1	253.37	1	253.27	1	253.27
3	8	3	234.3	3	232.9	3	232.8	3	233.0	3	232.85	3	233.05	3	233.05
	9	1	325.3	1	320.0	1	317.2	1	320.4	1	320.45	1	320.38	1	320.38
	10	1	246.3	1	240.3	1	237.0	1	239.4	1	239.40	1	239.40	1	239.40
TP		2401.2		2400		2400		2400		2400		2400		2400	
TC		488.5		481.7		481.779		481.723		481.723		481.72		481.723	

※ S : Subsystem, U : Unit, F : Operating fuel (G-type), TP : Total power [MW], TC : Total generation cost [\$]

표 2 기존방법과 GA-COP의 EDMF 결과비교 (Demand = 2500 MW)

Table 2 Comparison of conventional methods and GA-COP for EDMF (Demand = 2500 MW)

S	U	HM		AHNN		IEP		MPSO		AIS		GA-COP	
		F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN
1	1	2	206.6	2	206.0	2	203.1	2	206.5	1	205.88	2	206.52
	2	1	206.5	1	206.3	1	207.2	1	206.5	1	206.33	1	206.46
	3	1	265.9	1	265.7	1	266.9	1	265.7	3	266.48	1	265.74
	4	3	236.0	3	235.7	3	234.6	3	236.0	3	235.79	3	235.95
2	5	1	258.2	1	257.9	1	259.9	1	258.0	1	256.87	1	258.02
	6	3	236.0	3	235.9	3	236.8	3	236.0	3	236.65	3	235.95
	7	1	269.0	1	269.6	1	270.8	1	268.9	1	269.20	1	268.86
3	8	3	236.0	3	235.9	3	234.4	3	235.9	3	235.51	3	235.95
	9	1	331.6	1	331.4	1	331.4	1	331.5	1	332.23	1	331.49
	10	1	255.2	1	255.4	1	254.9	1	255.1	1	255.02	1	255.06
TP		2501.1		2500		2500		2500		2500		2500	
TC		526.7		526.23		526.304		526.239		526.24		526.239	

표 3 기존방법과 GA-COP의 EDMF 결과비교 (Demand = 2600 MW)

Table 3 Comparison of conventional methods and GA-COP for EDMF (Demand = 2600 MW)

S	U	HM		AHNN		IEP		MPSO		AIS		GA-COP	
		F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN
1	1	2	216.4	2	215.8	2	213.0	2	216.5	2	216.01	2	216.54
	2	1	210.9	1	210.7	1	211.3	1	210.9	1	210.77	1	210.91
	3	1	278.5	1	279.1	1	283.1	1	278.5	3	278.73	1	278.54
	4	3	239.1	3	239.1	3	239.2	3	239.1	3	239.47	3	239.1
2	5	1	275.4	1	276.3	1	279.3	1	275.5	1	275.25	1	275.52
	6	3	239.1	3	239.1	3	239.5	3	239.1	3	238.55	3	239.10
	7	1	285.6	1	286.0	1	283.1	1	285.7	1	286.55	1	285.72
3	8	3	239.1	3	239.1	3	239.2	3	239.1	3	239.27	3	239.10
	9	1	343.3	1	342.8	1	340.5	1	343.5	1	343.07	1	343.49
	10	1	271.9	1	271.9	1	271.9	1	272.0	1	272.32	1	271.99
TP		2600		2600		2600		2600		2600		2600	
TC		574.03		574.37		574.473		574.381		574.381		574.381	

표 4 기존방법과 GA-COP의 EDMF 결과비교 (Demand = 2700 MW)

Table 4 Comparison of conventional methods and GA-COP for EDMF (Demand = 2700 MW)

S	U	HM		AHNN		IEP		MPSO		IGA_MU		AIS		GA-COP	
		F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN	F	GEN
1	1	2	218.4	2	225.7	2	219.5	2	218.3	2	218.12	2	218.38	2	218.25
	2	1	211.8	1	215.2	1	211.4	1	211.7	1	211.68	1	211.66	1	211.66
	3	1	281.0	1	291.8	1	279.7	1	280.7	1	280.86	3	280.54	1	280.72
	4	3	239.7	3	242.3	3	240.3	3	239.6	3	239.65	3	239.69	3	239.63
2	5	1	279.0	1	293.7	1	276.5	1	278.5	1	278.63	1	278.30	1	278.50
	6	3	239.7	3	242.3	3	239.9	3	239.6	3	239.61	3	239.65	3	239.63
	7	1	289.0	1	302.8	1	289.0	1	288.6	1	288.57	1	288.57	1	288.58
3	8	3	239.7	3	242.3	3	241.3	3	239.6	3	239.71	3	239.84	3	239.63
	9	3	429.2	1	355.1	3	425.1	3	428.5	3	428.45	3	428.42	3	428.52
	10	1	275.2	1	288.8	1	277.2	1	274.9	1	274.7	1	274.95	1	274.87
TP		2702.2		2700		2700		2700		2700		2700		2700	
TC		625.18		626.24		623.851		623.809		623.8093		623.809		623.8092	

표 5 10기 시스템에서 EDMF 수행시 GA-COP의 수렴빈도 (100회 시행)

Table 5 Frequency of convergence after 100 trial for 10-generator system

총수요 [MW]	비용 [\$]	Hit	G-type
2400	481.7226	91	1 1 1 3 1 3 1 3 1 1
	481.8281	7	2 1 1 3 1 3 1 3 1 1
	486.3992	2	2 1 1 3 1 3 1 3 3 1
2500	526.2388	86	2 1 1 3 1 3 1 3 1 1
	526.4551	11	1 1 1 3 1 3 1 3 1 1
	528.8229	3	2 1 1 3 1 3 1 3 3 1
2600	574.3808	100	2 1 1 3 1 3 1 3 1 1
2700	623.8092	100	2 1 1 3 1 3 1 3 3 1

표 6에는 100기 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 모든 결과값은 표에 수록된 경우로만 수렴하였으며, 모든 경우에 대해서 90%가 넘는 높은 비율로 최저해를 도출하였다.

그림 4에서 그림 7까지는 교차비율, 해집단 개수, 변이비율, 선택압에 따른 수렴특성의 그래프를 나타내었다. 그림 4을 보면 교차비율이 높을수록 수렴특성이 좋아졌다.

일반적인 함수최적화문제에서 교차비율이 0.2~0.4 정도임을 감안할 때, 조합최적화문제에서 교차비율이 높을수록 수렴특성이 좋다는 사실은 특이한 현상이라 할 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 해집단 개수에 따른 수렴특성은 해집단 개수가 많을수록 향상되었으며 개수가 많아질수록 개선되는 비율이 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다.

표 6 100기 시스템에서 EDMF 수행시 GA-COP의 수렴빈도 (100회 시행)

Table 6 Frequency of convergence after 100 trial for 100-generator system

총수요 [MW]	비용 [\$]	Hit
24000	4817.2262	95
	4817.3222	4
	4817.4023	1
25000	5262.3876	91
	5262.5830	8
	5262.7827	1
26000	5742.8922	96
	5743.5067	4
27000	6238.0915	90
	6239.0082	5
	6239.3620	4
	6240.1262	1

변이비율에 대해서는 그림 6에서 보는 바와 같이 수렴특성에 큰 차이를 보이지 않았다.

그림 7의 선택압에 따른 수렴특성비교를 보면 선택압이 클수록 빨리 수렴되었으며 해가 개선되는 비율도 점점 줄어드는 추이를 보였다. 전체적으로 볼 때, 조합최적화문제에 접근한 경제급전의 경우 해의 인코딩 길이가 함수최적화문제에 비해 상당히 짧기 때문에 해집단의 개수가 많을수록 유리하다고 여겨진다.

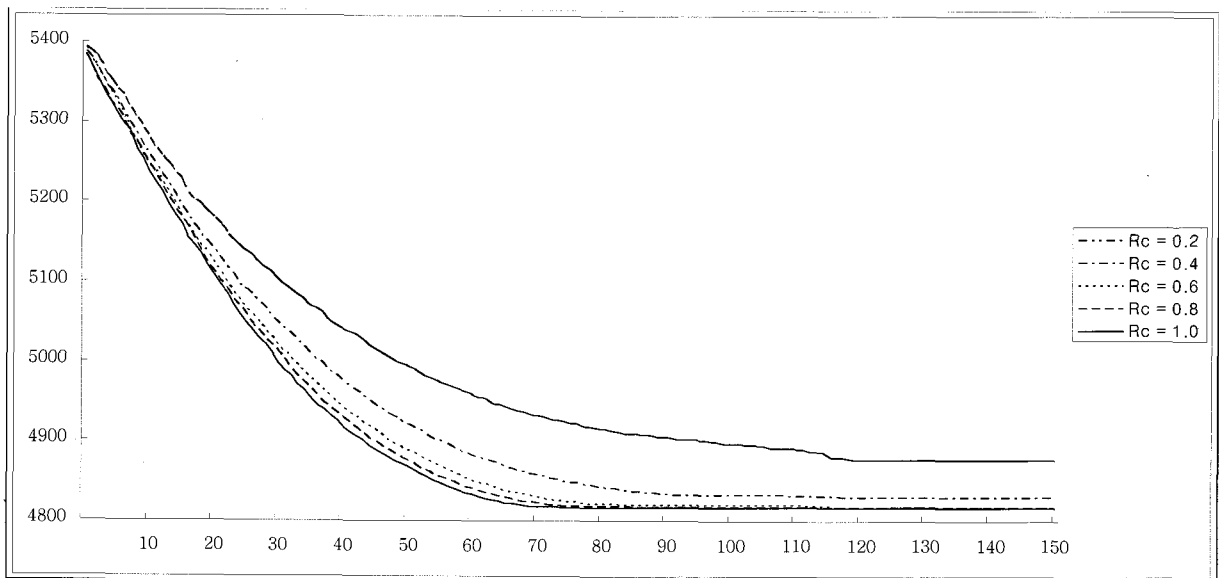


그림 4 100기 시스템의 교차비율에 따른 수렴특성 (해집단 수 1000, 변이비율 0.3, 선택압 50)

Fig. 4 Convergence Characteristics of 100-generator system for Crossover rate (population 1000, mutation rate 0.3 and p_s 50)

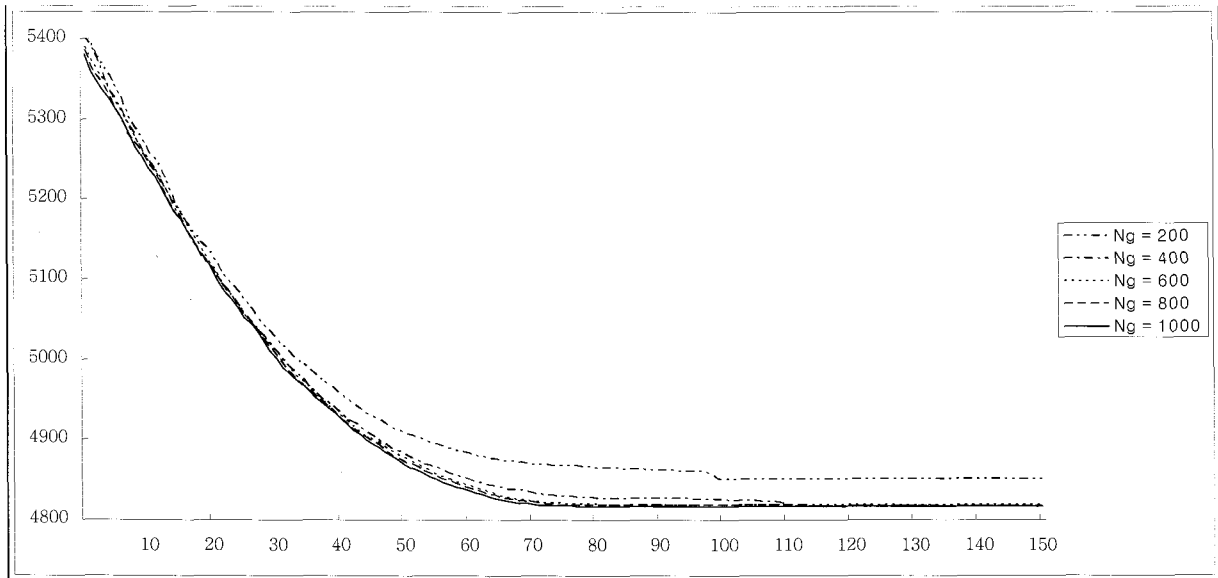


그림 5 100기 시스템의 해집단 수에 따른 수렴특성 (교차비율 1.0, 변이비율 0.3, 선택압 50)

Fig. 5 Convergence Characteristics of 100-generator system for Population (crossover rate 1.0, mutation rate 0.3 and p_s 50)

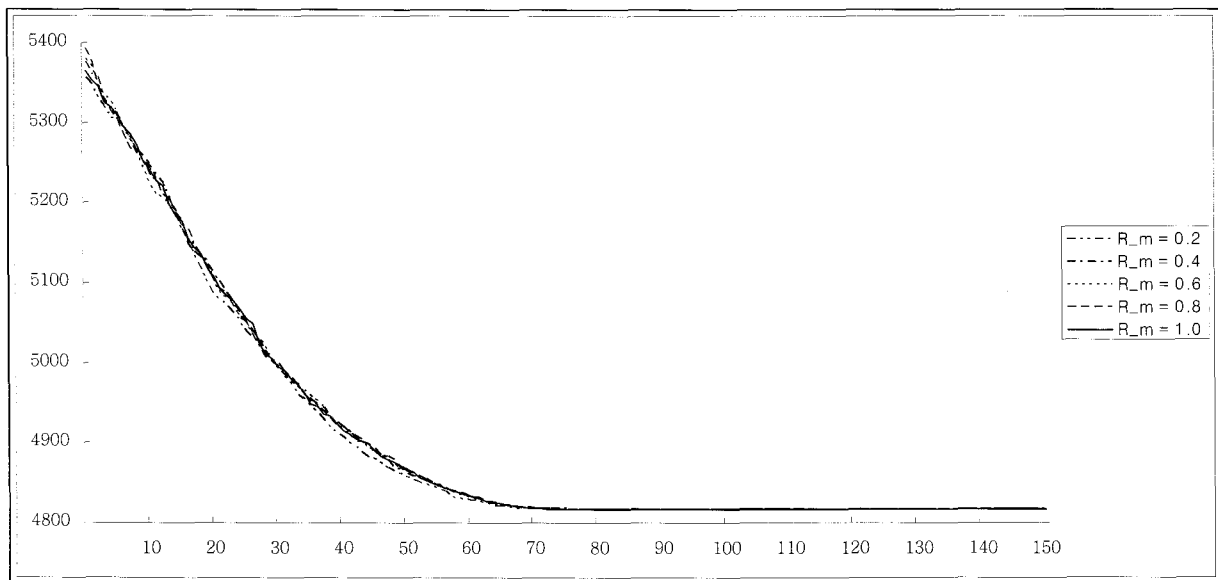


그림 6 100기 시스템의 변이비율에 따른 수렴특성 (교차비율 1.0, 해집단수 1000, 선택압 50)

Fig. 6 Convergence Characteristics of 100-generator system for Mutation rate (crossover rate 1.0, population 1000 and p_s 50)

또한 그 영향으로 교차비율과 선택압은 클수록 수렴특성이 좋은 것으로 추측된다. 변이의 경우에는 해집단의 개수가 많고, 인코딩의 길이가 짧으므로 전체적인 해의 수렴에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 보인다.

4.2 EDPOZ

EDPOZ에 대한 시뮬레이션은 15기 시스템에 대해 시행되었다[3]. 총부하는 2650 MW로 두었으며, 2점교차(2-point

crossover)를 적용하였다. 적용된 유전알고리즘의 파라미터 값은 다음과 같으며, 운전급지구역은 표 7에 나타내었다.

- p_s 2.0
- 교차비율 0.2
- 변이비율 0.1
- 해집합 개수 100

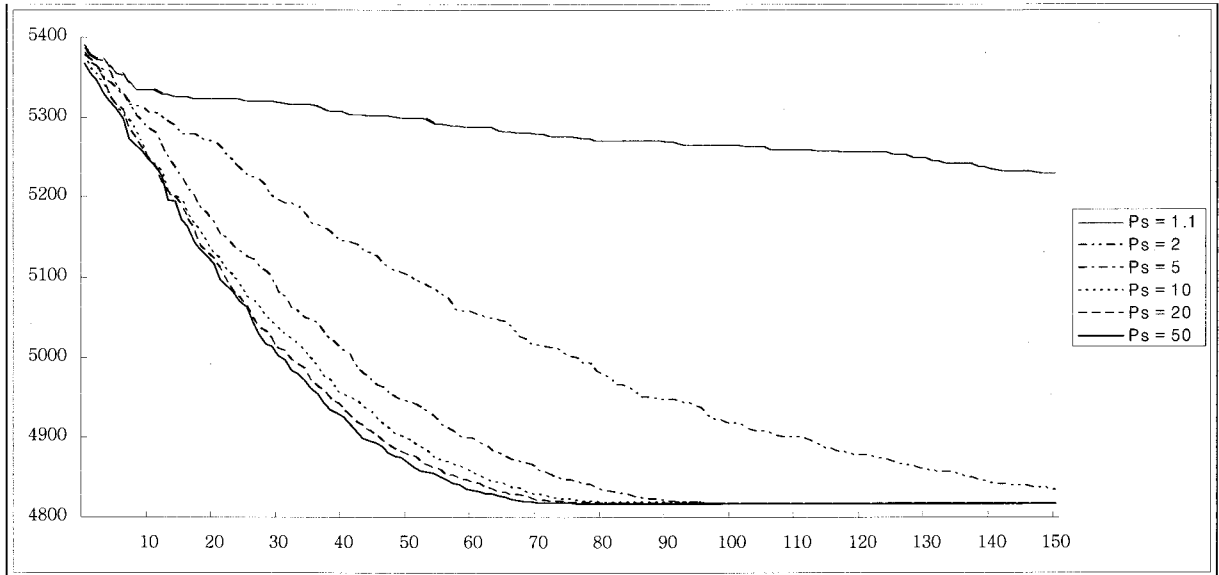


그림 7 100기 시스템의 선택압(p_s)에 따른 수렴특성 (교차비율 1.0, 변이비율 0.3, 해집단수 1000)

Fig. 7 Convergence Characteristics of 100-generator system for Selection pressure (crossover rate 1.0, mutation rate 0.3 and population 1000)

표 7 15기 시스템의 운전금지구역

Table 7 Prohibited operating zone for 15-generator system

Unit	Zone 1 [MW]	Zone 2 [MW]	Zone 3 [MW]
2	[185, 225]	[305, 335]	[420, 450]
5	[180, 200]	[260, 335]	[390, 420]
6	[230, 255]	[365, 395]	[430, 455]
12	[30, 55]	[65, 75]	-

제안된 방법은 λ - δ 반복법(λ - δ iterative method) [3], fast computation evolutionary programming (FCEP) [4], mixed integer quadratic programming (MIQP) [26]에 의해 구해진 결과와 비교하였다. 표 8에서 볼 수 있듯이 λ - δ 반복법의 비용만 제외하면 모든 방법이 동일한 발전량과 연료비용으로 계산되었다.

수렴빈도를 알아보기 위해 100번 프로그램을 돌려본 결과 100번 모두 최적해의 비용인 32544.97 MW가 나왔으며 운전가능구역(G-Type)의 조합은 [1 4 1 1 3 4 1 1 1 1 1 2 1 1] 이었다.

5. 결 론

본 논문은 nonconvex한 연료비함수를 가지는 경제급전을 계산하기 위해 조합최적화문제의 관점으로 접근하였다. 경제급전을 조합최적화문제로 풀기 위하여 유전알고리즘을 사용하였다. 그리고 유전알고리즘의 적합도를 계산하기 위해

표 8 EDPOZ의 결과 비교

Table 8 Comparison to results of EDPOZ

Unit	λ - δ 반복법 [MW]	FCEP [MW]	MIQP [MW]	GA-COP [MW]
1	450	450	450	450
2	450	450	450	450
3	130	130	130	130
4	130	130	130	130
5	335	335	335	335
6	455	455	455	455
7	465	465	465	465
8	60	60	60	60
9	25	25	25	25
10	20	20	20	20
11	20	20	20	20
12	55	55	55	55
13	25	25	25	25
14	15	15	15	15
15	15	15	15	15
비용 [\$ /h]	32549.8	32544.97	32544.97	32544.97

서 λ -P 함수법을 사용하였다. λ -P 함수법에 대해 간략히 소개하였고, 조합최적화문제를 풀기 위한 GA-COP의 과정을 자세히 설명하였다. 본 논문에서는 EDMF와 EDPOZ의 두 가지 형태의 경제급전을 다루었다. 제안한 방법은 EDMF와 EDPOZ에 대해서 각각 10기 및 100기 시스템과 15기 시스템에 적용하여 테스트하였다. 테스트 결과는 기존

의 다양한 휴리스틱한 방법의 결과와 비교되었으며, 몇 가지 기존방법들과 함께 대부분의 경우 가장 우수한 결과를 보였다. 교차비율, 변이비율, 해집단 개수, 선택압에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 조합최적화문제의 경우 함수최적화문제에 비해 인코딩 길이가 매우 짧기 때문에 해집단의 개수가 많아야 유리하며 교차비율과 선택압은 큰 값일수록 좋은 해를 도출하였다. 반면 변이비율은 수렴특성에 큰 영향을 미치지 못하였다. 테스트 결과를 통해 제안한 GA-COP 방법이 nonconvex한 연료비함수를 가지는 경제급전을 계산하는데 효과적임을 보였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*. New York: Wiley, 1996.
- [2] C. E. Lin and G. L. Viviani, "Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-103, No. 6, pp. 1170-1175, June 1984.
- [3] F. N. Lee, A. M. Breipohl, "Reserve constrained economic dispatch with prohibited operating zones," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, No. 1, pp. 246-254, Feb. 1993.
- [4] P. Somasundaram, K. Kuppusamy, P. R. Kumudini Devi, "Economic dispatch with prohibited operating zones using fast computation evolutionary programming algorithm," *Electr. Power Syst. Res.* vol. 70, pp. 245-252, 2004.
- [5] D. C. Walters and G. B. Sheble, "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, No. 3, pp. 1325-1331, Aug. 1993.
- [6] P. H. Chen, H. C. Chang, "Large-scale economic dispatch by genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, No. 4, Nov. 1995.
- [7] C. L. Chiang, "Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, No. 4, pp. 1690-1699, Nov. 2005.
- [8] K. P. Wong and Y. W. Wong, "Thermal generator scheduling using hybrid genetic/simulated annealing approach," in *IEE Proc. C*, vol. 142, pp. 372-380, July 1995.
- [9] K. Y. Lee, A. Sode-Yome, and J. H. Park, "Adaptive Hopfield neural network for economic load dispatch," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, pp. 519-526, May 1998.
- [10] W. M. Lin, F. S. Cheng, and M. T. Tsay, "An improved Tabu search for economic dispatch with multiple minima," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, pp. 108-112, Feb. 2002.
- [11] Y. M. Park, J. R. Won, and J. B. Park, "A new approach to economic load dispatch based on improved evolutionary programming," *Eng. Intell. Syst. Elect. Eng. Commun.*, vol. 6, No. 2, pp. 103-110, June 1998.
- [12] N. Sinha, R. Chakrabarti, and P. K. Chattopadhyay, "Evolutionary programming techniques for economic load dispatch," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 7, No. 1, pp. 83-94, Feb. 2003.
- [13] T. Jayabarathi, G. Sadasivam, V. Ramachandran, "Evolutionary programming based economic dispatch of generators with prohibited operating zones," *Electr. Power Syst. Res.* vol. 52, pp. 261-266, 1999.
- [14] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin and K. Y. Lee, "A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost functions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, No. 1, pp. 34-42, Feb. 2005.
- [15] T. A. A. Victoire and A. Ebenezer Jeyakumar, "Hybrid PSO-SQP for economic dispatch with valve-point effect," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 71, pp. 51-59, 2004.
- [16] A. I. Selvakumar and K. Thanushkodi, "A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, pp. 42-51, Feb. 2007.
- [17] C. H. Papadimitriou, K. Steiglitz, *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*, Dover, 1998.
- [18] Tao Li and Mohammad Shahidehpour, "Price-based unit commitment: a case of lagrangian relaxation versus mixed integer programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, No. 4, Nov. 2005.
- [19] Qiaozhu Zhai, Xiaohong Guan, and Jian Cui, "Unit commitment with identical units: successive subproblem solving method based on lagrangian relaxation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, No. 4, Nov. 2002.
- [20] 문병로, *유전알고리즘*, 두양사, 2005.
- [21] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs*, Springer, 1999.
- [22] K. I. Min, J. G. Lee, S. J. Kim, H. S. Hong and Y. H. Moon, "Economic dispatch algorithm by λ -P tables reflecting actual fuel cost curves," presented at the IFAC Symposium on PPS, Kananaskis,

Canada, Paper No. pps 533, June 2006.

[23] M. Madrigal and V. H. Quintana, "An analytical solution to the economic dispatch problem," IEEE Power Eng. Review, pp. 52-55, Sep. 2000.

[24] B. K. Panigrahi, S. R. Yadav, S. Agrawal, M. K. Tiwari, "A clonal algorithm to solve economic load dispatch," Electr. Power Syst. Res., vol. 77, pp. 1381-1389, 2007.

[25] Satoh. T., Kuwabara. H., Kanezashi. M., Nara. K., "Artificial life system and its application to multiple-fuel economic load dispatch problem," Evolutionary Computation CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress, vol. 2, pp. 1432-1437, May 2002.

[26] L. G. Papageorgiou, E. S. Fraga, "A mixed integer quadratic programming formulation for the economic dispatch of generators with prohibited operating zones," Electr. Power Syst. Res. vol. 77, pp. 1292-1296, 2007.

부 록

λ-P 함수법 (λ-P function method)

λ-P 함수법[22],[23]을 이용한 경제급전은 쌍대성(Duality) 이론을 기반으로 그림 A.1과 같이 한계연료곡선의 P축과 λ축을 서로 바꾼 λ-P 함수(λ(P))를 이용한 방법이다. λ-P 함수법은 한계연료비용 λ가 결정되면, 전체발전출력량을 직접적으로 구할 수 있다는 사실을 이용한 것이다.

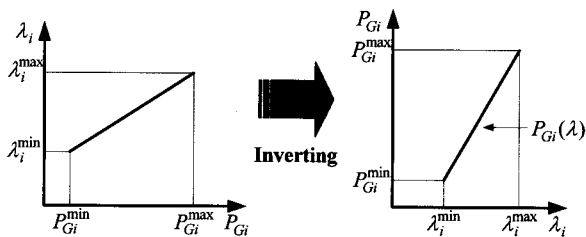


그림 A.1 한계연료비 곡선의 인버팅 과정
Fig. A.1 Inverting process of incremental fuel cost function

경제급전의 한계연료비 등중분 조건을 고려하면, 전체 발전량 P_{Gtl} 과 최적의 한계발전비용 λ^* 는

$$P_{Gtl}(\lambda^*) = \sum_{i=1}^{n_g} P_{Gi}(\lambda^*) = P_D \quad (A.1)$$

로 나타낼 수 있다.

P_{Gtl} 이 단순증가함수라고 가정하면 최적의 한계발전비용

λ^* 는 이분법이나 내삽법 등을 이용하여 구할 수 있다. λ-P 함수법은 발전출력 제약조건에 대한 정보가 $P_{Gi}(\lambda)$ 에 모두 내포되어 있기 때문에 Kuhn-Tucker 조건을 적용할 필요가 없는 것이 특징이며, must-run 조건을 쉽게 처리할 수 있다는 장점이 있다. 주어진 문제는 convex-quadratic 프로그래밍 문제이므로 duality gap이 0인 쌍대문제로 볼 수 있다.

3대의 발전기 시스템에 대한 λ-P 함수법 예를 그림 A.2에서 그래프로 설명하였다. 1번과 3번 발전기는 must-run 조건하에 운전되고 있으며, 2번 발전기는 경제적 효율에 따라 가동중지를 할 수 있는 경우를 나타내었다.

λ-P 함수법을 이용한 경제급전은 다음의 4단계로 이루어진다.

- Step 1) 모든 발전기에 대하여 P-λ 함수를 λ-P 함수로 인버팅한다.
- Step 2) 모든 발전기의 λ-P 함수를 합하여 총발전함수 $P_{Gtl}(\lambda)$ 을 구한다.
- Step 3) 이분법(Bisection method)이나 내삽법(Interpolation method) 등을 이용하여, 식(6)으로부터 λ^* 를 구해낸다.
- Step 4) $P_{Gi}(\lambda^*)$ 를 이용하여 각 발전기의 발전출력을 구한다.

손실을 고려한 경우에도 페널티계수를 λ-P 함수에 적용하면 위의 방법과 비슷하게 계산할 수 있다. 손실을 고려한 경우에 대한 경제급전의 계산원리는 참고문헌[22]에 자세하게 설명되어 있다.

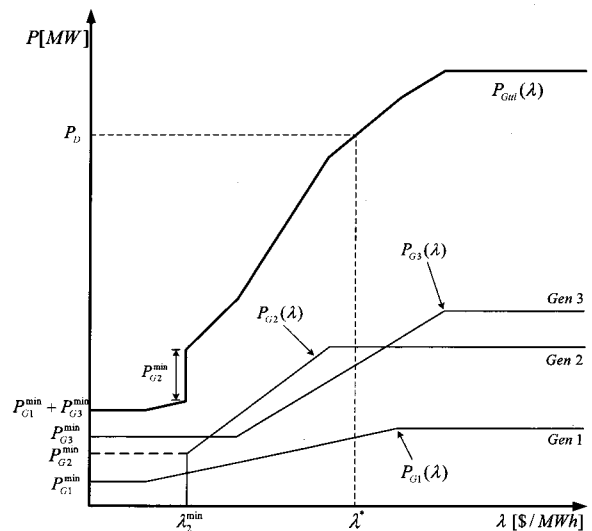


그림 A.2 발전기 3대의 $P_{Gi}(\lambda)$ 및 $P_{Gtl}(\lambda)$
Fig. A.2 $P_{Gi}(\lambda)$ and $P_{Gtl}(\lambda)$ for 3 generators

저 자 소 개



민 경 일 (閔 庚 一)

1978년 5월 9일생. 2001년 홍익대 공대 전자전기공학과 졸업. 2003년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

Tel : 02-2123-2771

E-mail : kimin@yonsei.ac.kr



이 수 원 (李 洙 原)

1968년 5월 4일생. 1991년 전북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2001~2006년 군산대 BK21 계약교수, 2006~2008년 연세대 BK21 TMS정보기술사업단 연구교수, 2008~현재 성균관대 BK21 정보기술분야 밀착형 산학협력 인재양성사업단 연구교수.

Tel : 031-290-7164

E-mail : swon@skku.edu



최 인 규 (崔 仁 圭)

1967년 1월 26일생. 1993년 전북대 전기공과 졸업. 2004년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.

Tel : 042-865-5644

E-mail : choiik@kepco.co.kr



문 영 현 (文 永 鉉)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 Oregon State Univ. 대학원 졸업(공학박사). 현재 연세대 공대 전기전자공학과 교수.

Tel : 02-2123-2771

E-mail : moon@yonsei.ac.kr