

객체지향기법을 적용한 동적경제부하배분

백영식* 권규진*
* 경북대학교 전기공학과

DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH USING OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING

Young, SIK, BAEK* Gyu, Jin, KWON*
* Department of Electrical Engineering Kyung Pook Univ.

ABSTRACT

According to increase in electric power demand, the increasing rate of peak load compared with that of base load grows larger every year. Thus this paper deals with the optimal dynamic dispatch problem due to power rate limits and spinning reserve with loss or without loss. The first is adjusting module for gradual change of generator power by Object-Oriented Programming. The latter is an efficient dispatch module for the consideration of reasonable spinning reserve requirements. The proposed algorithm has been shown efficiency in real power system with loss.

1. 서론

최근 전력 수요가 급증함에 따라 기저 부하의 증가율에 비해 첨두 부하의 증가율이 현저히 커져 주야간 부하의 격차가 더욱 벌어지고 있으며^[1] 또한, 자동주파수제어와 같은 일상 수급운용 측면이나 계통안정성 측면에서 적절한 계통순동예비력을 유지하는 것이 중요한 문제로 대두된다. 그러므로 최근에는 계통순동예비력 지방수준을 확보하면서 부하의 변화를 추종하는 동적경제부하배분 문제가 대두되었다. 이를 위해 동적계획법이나 선형계획법 등을 이용한 접근방법들이 소개되었지만 어떤 방법에서도 계통규모의 증가나 여러 시간대에 걸쳐 부하가 급변하는 등의 가혹한 계통조건에도 정확하고 신속한 안정된 해를 충분히 보장하기는 어려운 것으로 알려지고 있다.^{[1][6]}

따라서 본 논문에서는 부하의 변화량을 미소 크기로 나누고 각각의 미소 량의 변화에 상응하도록 발전기 출력을 수정하고 특히 극심한 부하변화가 연속되는 경우 각각을 객체로 구성함으로써 상호 독립성을 유지하였다. 이러한 객체지향 프로그램을 사용할 경우, 본 논문에서는 각각의 제약에 따른 부하배분을 독립된 프로그램으로 작성하고 객체간의 메시지 전달로 제약에 위반되는 시간대와 수정하는 시간대를 정확히 일치시킴으로써 최적의 해를 유도하였다.

제안한 경제부하배분은 화력발전기 6대, 14대로 구성된 시험 계통에 적용한 수치계산예를 통하여 본 알고리즘의 수렴특성을 분석하고 그 결과의 최적 성을 검증하였으며 손실을 고려함으로써 실 계통에서의 효율성을 입증하였다.

2. 정식화

본 연구에서는 기존의 제약에서 발전기 출력변화를 상한한 제약과 순동예비력제약을 만족하면서 총연료비를 최소로 하는 최적화 문제로 정식화하였다.

2-1 목적함수

$$\text{Minimize } f = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{NG} F(P_{ij}) = \sum_{i=1}^N f_i \quad (1)$$

$$F(P_{ij}) = a_i P_{ij}^2 + b_i P_{ij} + c_i \quad (1-1)$$

$F(P_{ij})$ = i 발전기의 t 시간대에서의 비용함수
 P_{ij} = i 발전기의 t 시간대에서의 출력

NG = 발전기 대수
N = 시간대

2-2 제약식

① 수급 제약

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{it} = pd_t \quad (2)$$

$$pd_t = p_m + PTL_t, \quad p_m: \text{Total Load} \quad (2-1)$$

$$(\text{손실}) PTL_t = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{NG} P_{ij} B_{ij} P_{ij} + \sum_{i=1}^N B_i P_{it} + B_0 \quad (2-2)$$

② 출력 상한한 제약

$$P_i \leq P_{it} \leq \bar{P}_i \quad (3)$$

③ 출력변화를 상한한 제약

$$-D_i \leq P_{it} - P_{i(t-1)} \leq D_i \quad (4)$$

④ 예비력 제약

$$\sum_{i=1}^{NG} S_i \geq S \quad (5)$$

$$0 \leq S_i \leq D_i \quad (5-1)$$

$$P_{it} + S_i \leq \bar{P}_i \quad (5-2)$$

3. 제안한 방법

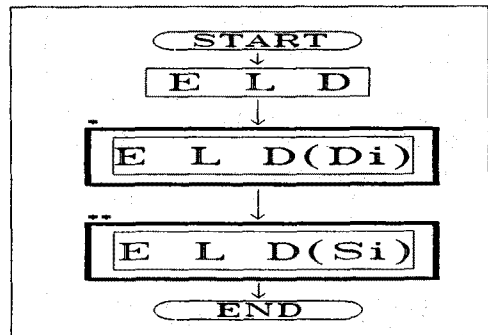


그림 1 제안한 알고리즘의 구성도

3-1 발전기 출력변화를 상한한 제약을 고려한 경제부하배분 그림 1에서 (*) 부분은 식 (4)를 만족하는 경제부하배분 영역으로서 이제부터의 모든 수식은 식 (4)를 만족하도록 전개된다.

$$P_{it} - P_{i(t-1)} = D_i + \alpha \quad (6)$$

$$P_{it} - P_{i(t-1)} = -(D_i + \alpha) \quad (7)$$

식 (6),(7)처럼 t 시간대에 $\alpha > 0$ 인 α 가 존재한다면 t 시간대의 어느 발전기는 출력변화에 의해되고 있다. 그러므로 출력변화를 제약을 고려하는 (*) 부분의 ELD를 수행하게되는데 이때 식 (6)은 $t \sim (t-1)$ 시간대에서 발전기 i 의 출력 차가 발전기 출력속도 상승률(D) 보다 더 크기 때문에 상한 차에 의해되며

식 (7)은 하한 치에 위배된다. 그러므로 위배가 일어나지 않으면 연이은 두 개의 시간대에서 발전기의 출력 차의 절대값이 발전기 출력속도 상승률(D_i)보다 작아야 한다. 하지만 이미 위배된 경우의 발전기는 최소 크기의 출력 수정으로 발전기 출력 상하 한만을 고려해서 부하배분한 출력 값에서 될 수 있으면 가까운 값을 가져야 한다. 그렇게 함으로서 첨가된 제약을 만족하는 최적의 해가 될 것이다. 식 (6),(7)의 경우를 보면 최소의 변화로 제약조건을 만족하기 위해서는 α가 0이 되도록 해야하며 식 (8)에서 처럼 P_{ik} 혹은 P_{ik-1}에 ΔP를 더하거나 빼어서 α=0이 되게 조정한다.

$$(P_{ik} \alpha P_{ik-1}) \pm \Delta P \quad (8)$$

이때, ΔP는 임의의 미소 량으로 한다.

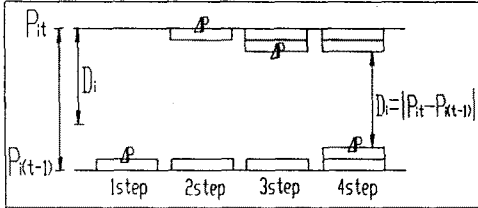


그림 2 ΔP를 이용한 발전기출력 수정

그림 2는 임의의 두 개의 시간대에서 발전기출력의 차가 발전기 출력속도 상승률(D_i)보다 큰 경우의 식 (8)의 적용 예를 나타낸다. 즉, t ~ t-1 시간대에서 i발전기의 출력 차가 출력속도 상승률(D_i)보다 더 큰 경우에는 t 혹은 t-1 시간대의 위배되는 발전기에 임의의 극소량의 값을 발전기 출력에 더해준다. 매우 작은 양의 출력을 수정하기 때문에 처음 한 번의 과정으로는 위배된 발전기를 만족되는 제약조건안으로 들 수 없으므로 이 과정을 반복해서 제약조건을 만족할 때까지 계속한다. α=0이 되게 조정하는 과정에서, 이 조정 효과는 t시간대에만 국한되는 것이 아니며 t시간대의 i발전기의 출력변화는 t-1, 과 t+1 시간대의 i발전기의 출력에 영향을 미치게 되며, 만약 처음의 EL D결과가 t시간대에서 출력변화를 위배했을 뿐 아니라 t-1, t+1시간대에서도 위배된다면, 그 결과는 점점 복잡성을 띠게 된다. 그러므로 본 논문에서는 객체지향기법을 사용하여 이런 복잡성을 해결하였다.

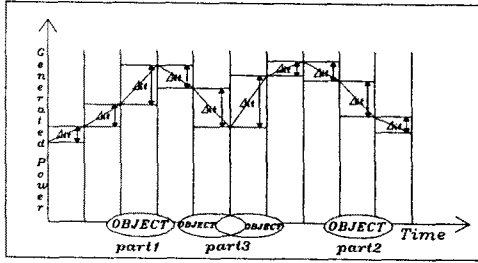


그림 3 객체 생성

즉, 본 논문에서는 객체지향기법을 이용하여 식 (4)를 만족하면서 경제부하배분을 수행하며 객체의 생성은 그림 3과 같이 이루어진다. 그림 3에서

$$\Delta_{ii} = P_{ik} - P_{ik-1} = \text{모든 } \Delta P \text{의 합} = \sum \Delta P$$

으로 표현할 수 있으며

만약,

$$|\Delta_{ii}| > D_i \quad D_i = \text{발전기 출력속도 변화율}$$

이면 객체(OBJECT)를 생성한다. 즉, 연이은 두 개의 시간대에서 발전기 출력의 차의 절대값이 발전기 출력속도 변화율보다 크다면 제약에 위배되는 경우이고 위배된 발전기 출력의 수정은 생성되는 객체를 이용해서 행해진다. 생성된 객체에서의 계산 과정은 다음과 같다.

i) 상한에 위배되는 경우

그림 3에서 part1처럼 Δ_{ik}-D_i > 0 이고 Δ_{ik} > 0인 경우를 나타내고 Δ_{ik}와 D_i의 차를 줄이기 위해서는 그림 2와 같이 t 혹은 t-1 시간대의 발전기 출력 값에 임의의 값인 ΔP를 더하거나 빼므로서 식 (9) 혹은 식 (10)을 수행한다.

$$(P_{ik-1} + \Delta P, P_{ii}) \quad (9)$$

$$(P_{ik-1}, P_{ii} - \Delta P) \quad (10)$$

만약 식 (9)를 수행했다면 t-1 시간대 NG대의 발전기중 위배된 i발전기의 수정된 출력변화량 만큼 나머지 NG-1대의 발전기 출력을 수정해 주어야만 한다. 그렇게 함으로서 t-1 시간대의 수급균형을 유지할 수 있다. 그리고 식 (9)를 수행할 때 t 시간대의 출력 값은 변하지 않으므로 기존의 입력으로 들어온 값을 가지면 된다. 마찬가지로 식 (10)을 수행했다면 t 시간대 NG대의 발전기중 위배된 i발전기의 수정된 출력변화량 만큼 나머지 NG-1대의 발전기 출력을 수정해 주면 된다. 그렇게 함으로서 t 시간대의 수급균형을 유지할 수 있다. 또한 식 (10)을 수행할 때 t-1 시간대의 출력 값은 변하지 않으므로 기존의 입력으로 들어온 값을 가지면 된다. 이렇게 해서 식 (9),(10)을 수행한 후 t-1 ~ t 시간대까지 NG대의 발전기출력으로 목적함수에서 제시한 비용함수식 (1-1)을 계산한 후 연료비가 작은 것을 선택해서 P_{ik}, P_{ik-1}를 수정하고 연료비가 크게 계산된 것은 수정되기 이전의 출력 값을 유지한다. 그리고 이 과정은 출력변화를 상한한 제약을 만족할 때까지 즉, α=0이 될 때까지 반복한다.

ii) 하한에 위배되는 경우

그림 3에서 part2처럼 Δ_{ik}+D_i < 0 이고 Δ_{ik} < 0인 경우를 나타내고 Δ_{ik}와 D_i의 차를 줄이기 위해서는 i)와 마찬가지로 그림 2와 같이 t 혹은 t-1 시간대의 발전기 출력 값에 임의의 값인 ΔP를 더하거나 빼므로서 식 (11) 혹은 식 (12)를 수행한다.

$$(P_{ik-1} - \Delta P, P_{ii}) \quad (11)$$

$$(P_{ik-1}, P_{ii} + \Delta P) \quad (12)$$

식 (11),(12)를 수행한 후 출력변화를 상한한 제약을 만족할 때까지 즉, α=0이 될 때까지 반복한다.

iii) 시간적으로 연속되는 경우

그림 3의 part3처럼 연이은 세 개이상의 시간대에서의 위배를 말하며 그림 2처럼 t ~ t-1 시간대의 발전기 출력과 ΔP의 계산 과정을 보면, 먼저 방법 ①은 만약 t 시간대에서 ΔP를 출력에 더하거나 빼어서 발전기 출력을 수정했다면 t-1 시간대에서는 발전기 출력의 수정이 없고 방법 ②는 반대로 t-1 시간대에서 ΔP를 출력에 더하거나 빼어서 발전기 출력을 수정하면 t 시간대에서는 마찬가지로 발전기 출력의 수정이 없다. 다시 말해서, 제안한 방법은 방법 ①과 방법 ②의 계산을 한 후에 목적함수를 만족하는 방법을 선택하고 다시 제약조건을 확인해서 발전기 출력의 위배가 있으면 과정을 되풀이하게 된다. 그리고 제약조건에 위배되는 시간대 그림 4의 (c),(d)처럼 세 개이상 일 때에도 같은 방법으로 출력을 수정한다.

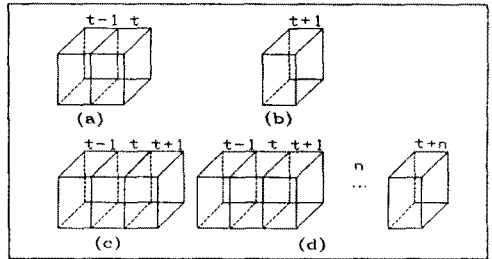


그림 4 연속된 위배구간에서의 객체 연결

그림 5는 생성되는 객체간의 연결 상태를 나타내는 것으로 detect객체는 발전기 출력변화에 위배되는지 검색하는 부분이고 만약 위배가 일어나면 그림 3의 경우처럼 객체가 생성된다.

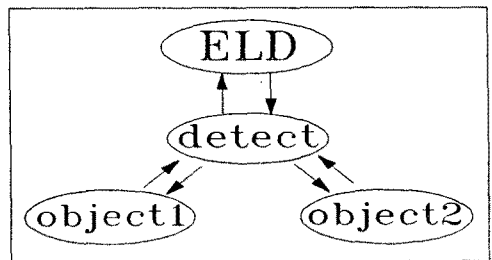


그림 5 객체 구성

이 때 생성되는 객체는 object1, object2 두 개이며 이것은 식 (9),(10)와 식 (11),(12)처럼 언제나 두 가지 방법으로 계산해서 가장 값싼 경우를 선택하기 때문에 두 개의 객체가 생성된다. 그리고 ELD클래스의 경우는 기존의 발전기 출력상하만 고려해서 부하배분한 결과치를 가지고 있어야 하므로 이것을 수행하는 dispatch를 상속하고 있다. 또한 class ELD의 detect객체와 class detect의 object1, object2객체는 필요한 데이터를 객체 생성시 같이 생성하고 있으며 그림 5의 경우 화살표는 메시지 전달을 의미한다.

식 (2)-(2-2)는 손실 분을 포함하는 경우를 나타내며 식 (2)에 식 (2-1),(2-2)을 대입하면,

$$L = \sum_{i=1}^{NG} P_{ii} - P_{Ri} - \left(\sum_{i=1}^{NG} P_{ii} B_{ii} P_{ii} + \sum_{i=1}^{NG} B_{ii} P_{ii} + B_0 \right) \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_{ii}} = \frac{dF_i(P_{ii})}{dP_{ii}} - \lambda(1 - 2 \sum_{i=1}^{NG} B_{ii} P_{ii} - B_0) \quad (22)$$

식 (21), (22)가 되고 식 (22)에서

$$PF_i = \frac{dF_i(P_{ii})}{dP_{ii}} = \lambda \quad (23)$$

식 (23)을 만족하는 PF_i

$$PF_i = \frac{1}{1 - (\partial PTL_i / \partial P_{ii})} = \frac{1}{1 - 2 \sum_{i=1}^{NG} B_{ii} P_{ii} - B_0} \quad (24)$$

즉, 식 (24)를 penalty factor라고 하고 손실을 고려한 발전기 출력 값을 계산할 때는 penalty factor를 사용해서 식 (23)을 만족하도록 한다.

3-2 계통에비력 제약을 고려한 경제부하배분

그림 1에서 (**) 부분은 식 (5)-(5-2)를 만족하는 경제부하배분 영역으로서 이 때의 객체 생성은 그림 7과 같다. 그림 5의 ELD에서 Reserve객체를 생성하고 Reserve객체 내에서 작업을 수행한다. 즉 detect객체에서의 과정이 종료되면 계산된 자료를 Reserve로 가져가서 그림 8처럼 BP_i를 결정된 후 발전기를 1, 2군으로 분류하고 각각에 대해서 Load를 다시 계산한 다음 경제부하배분을 한다. 시간대별로 구분해서 계통에비력을 고려할 경우는 앞서 만족한 출력속도 변화를 제약을 위반하는 사례가 생기게 되므로 전체 시간대에서 한꺼번에 계통에비력을 고려하게 된다.

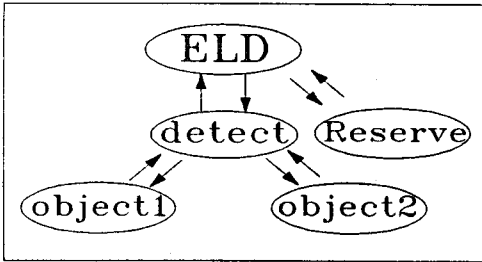


그림 7 계통에비력을 고려할 때의 객체 구성

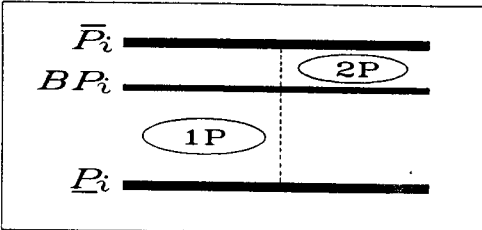


그림 8 Reserve객체 내에서의 발전기 출력에 따른 분류
그림 8에서

$$BP_i = \bar{P}_i - D_i, \quad D_i: \text{발전기 출력변화율} \quad (25)$$

$$\text{if } (BP_i < P_{ii}) \text{ -----} \rightarrow 1 \text{ group}(1P) \quad (26)$$

$$\text{if } (BP_i > P_{ii}) \text{ -----} \rightarrow 2 \text{ group}(2P)$$

식(26)과 같이 만약 $BP_i < P_{ii}$ 이면 1군으로 $BP_i > P_{ii}$ 이면 2군으로 발전기를 분류하고 발전에비력(RESERVE_sum)의 경우 1군은 D_i 로 2군은 $P_{max} - BP_i$ 로 결정되며 요구치에비력(RESERVE_const)과의 차이 즉,

$$mis = RESERVE_{sum} - RESERVE_{const} \quad (27)$$

식(27)에서 (mis<0)인 경우 1군의 부하를

$$Load_{1P} = Psum + mis$$

$$Psum = \sum_{i=1}^{NG} P_{ii} \quad (28)$$

식(28)과 같이하고 부하와 발전기 출력의 수급균형이 일치되도록 경제부하배분한다. 그리고 2군의 경우 부하를

$$Load_{2P} = Psum - mis \quad (29)$$

$$Psum = \sum_{i=1}^{NG} P_{ii}$$

식(29)과 같이하고 경제부하배분한다. 위에서 설명한 것은 손실 분을 고려하지 않은 경우이고 손실을 고려해서 나타내면 다음과 같다. 식(28)의 경우는 mis가 음인 경우의 1군의 부하를 말하는데 손실이 고려되면

$$Load_{1P} = Psum + mis - Loss_{1P} \quad (30)$$

식(30)과 같이 손실을 뺀 성분이 부하가 되며

$$PD_{1P} = Load_{1P} + Loss_{1P} \quad (31)$$

식(31)에서 구해지는 PD와 발전기 출력이 수급균형을 이루면서 경제부하배분을 수행한다. 2군의 경우도 식(29)에서 손실 분을 뺀

$$Load_{2P} = Psum - mis - Loss_{2P} \quad (32)$$

$$PD_{2P} = Load_{2P} + Loss_{2P} \quad (33)$$

식(32)을 부하로 하고 식(33)을 만족하는 경제부하배분을 수행한다.

4. 사례 연구

아래 표.1, 표.2는 제안한 알고리즘을 사용한 동적경제부하배분의 결과를 보인 것이다.

표.1

system	선형계획법[6]		제안된 방법	
	출력변화율고려	에비력고려	출력변화율고려	에비력고려
6 기	cost~425625 CPU time~1.28	cost~425672.3 CPU time~17.29	cost~425670.1 CPU time~3.75	cost~425670.1 CPU time~3.8
14 기	cost~18838 CPU time~0.53		cost~18837.8 CPU time~0.86	cost~18850 CPU time~0.9

표 1의 경우는 선형계획법으로 계산된 발전기 6기, 14기의 출력변화율과 에비력을 고려한 경우의 결과와 제안한 방법을 비교하고 있으며 제안된 방법이 연료비의 많은 절감을 가져올 수 있다. 표.2는 손실을 고려했을 때의 결과를 보인 것으로 이 경우는 입력 값으로 주어지는 B계수를 사용하여 손실을 계산한다.

표.2

system [손실분고려]	제안된 방법	
	출력변화율고려	에비력고려
6 기	cost~445312.4 CPU time~2.2	cost~445316.5 CPU time~2.3
14 기	cost~19732.1 CPU time~2.2	cost~19737.7 CPU time~2.3

5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문은 출력변화율과 에비력제약을 고려했을 때의 경제부하배분을 행하는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 즉, 부하변화량을 미소 크기로 나누고 이 미소 량에 상응하는 크기의 발전기 출력을 경제부하배분해서 제약조건을 만족하도록하였다.
- (2) 제안한 방법을 발전기 6대, 14대의 계통에 적용해서 기존의 선형계획법과 비교함으로써 제안된 방법의 효율성을 입증하였다.
- (3) 본 논문은 손실을 고려함으로써 실 계통에 적합한 알고리즘임을 입증하였다.

6. 참고문헌

- [1] 박경수, 부하의 동특성과 에비력 확보조건을 고려한 화력발전기의 경제부하배분에 관한 연구, 고려대학교 대학원 전기공학과 석사학위 논문, 1987
- [2] 송길영, 오광해, 김용하, 「출력변화율제약을 고려한 경제부하배분」, 하계학술대회논문집, pp 964-967, 1994
- [3] 송길영, 오광해, 권영구, 차준민, 김용하, 「순동에비력제약을 고려한 동적경제부하배분」, 하계학술대회논문집, pp 524-527, 1995
- [4] W.G.Wood, 「Spinning Reserve Constrained Static and Dynamic Economic Dispatch」, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 2 pp 381-388, February, 1982
- [5] C.B.Somuah and N.Khunaizi, 「Application of Linear Programming Redipatch Technique to Dynamic Generation Allocation」, IEEE Transactions on Power System, Vol. 5, No. 1, February 1990
- [6] 홍상은, 「발전설비의 부하수준」, 대한전기학회지, 1987.11