

송전손실을 고려한 온라인 경제급전 알고리즘

전동훈*, 김건중**, 최장출**, 장경철**, 임종호**, 이상중***
 * 전력연구원, ** 충남대학교, *** 서울산업대

On-Line Economic Dispatch Algorithm including Transmission Loss

D.H.Jeon*, K.J.Kim**, J.H.Choi**, K.C.Jang**, J.H.Lim**, S.J.Lee***
 * KEPRI ** Chungnam Univ. *** Seoul Industry Univ.

Abstract - In this paper, we propose the generalized on-line economic dispatch algorithm including transmission loss. it was derived from the process developing matrix form of the classic ELD problem. it can rapidly calculate generation power using transmission loss and transmission loss sensitivity calculated from the result of power flow analysis. Transmission loss sensitivity $\partial P_{loss}/\partial P_G$ is derived using optimization technique.

$$\underline{P_{Gi}} \leq P_{Gi} \leq \overline{P_{Gi}}$$

여기서, i 번째 발전기의 비용함수 $f_i(P_{Gi})$ 는 보통 발전기 출력 P_{Gi} 의 2차식으로 표현된다.

$$f_i(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (2)$$

2.2 온라인 경제급전 알고리즘의 유도

식(1)의 최적화문제는 식(3)과 같이 행렬형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & f(P_G) \\ \text{s.t } & 1_G^T P_G - 1_D^T P_D - P_{loss} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$f(P_G) = B_G^T P_G + \frac{1}{2} P_G^T C_G P_G$$

- 1_G : 단위벡터 ($NG \times 1$)
- 1_D : 단위벡터 ($ND \times 1$)
- P_G : 벡터 ($NG \times 1$)
- P_D : 벡터 ($ND \times 1$)
- P_{loss} : 상수 (1×1)
- B_G : 벡터 ($NG \times 1$)
- C_G : 행렬 ($NG \times NG$)

식(3)은 라그랑지안 쌍대함수를 이용하여

$$\text{Min } L(P_G, \lambda) \quad (4)$$

여기서,

$$L = f(P_G) + \lambda(1_G^T P_G - 1_D^T P_D - P_{loss})$$

와 같이 변환시킬 수 있고, 식(4)로부터 변수 P_G, λ 에 대한 최적조건식을

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial P_G} &= B_G + C_G P_G + \lambda(1_G - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_G}) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= 1_G^T P_G - 1_D^T P_D - P_{loss} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 유도할 수 있다. 따라서, 식(3)이 최적해를 갖기 위한 필요충분조건은 최적조건식(5)을 동시에 만족하는 P_G, λ 를 찾는 것으로 이러한 해는 역행렬 연산 등의 복잡한 계산과정없이 최적조건식으로부터 간단하게 결정될 수 있다. 즉 식(5)는

1. 서 론

경제급전이란 발전비용을 최소화하면서, 동시에 전력평형식과 발전출력 허용범위를 만족시키는 각 발전기의 출력을 결정하는 문제로서 실제통을 대상으로 전력수급 계획 수립이나 운용 측면에서 경제급전을 수행할 경우에는 송전손실은 물론 실제통 운용시 고려되어야 하는 각종 제약조건들을 충분히 반영하면서 빠른 시간내에 발전 출력 배분이 이루어져야 할 것이다.

본 논문에서는 해석시점의 대상계통에 대한 송전손실과 송전손실감도($\partial P_{loss}/\partial P_G$)만 알면 송전손실을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로 간단한 연산을 통해 빠른 시간내에 경제급전을 수행할 수 있다는 점과 실제 실제통에서 송전손실과 송전손실감도는 부하수준에 따라 일정하게 증가, 또는 감소한다는 점에 착안하여 조류계산결과로부터 송전손실과 송전손실감도를 부하수준별로 미리 결정하여 송전손실의 고려여부에 관계없이 충분히 빠른 시간내에 전력평형식과 발전출력 허용범위 등의 제약조건을 만족하면서 발전비용을 최소화 하는 각 발전기의 출력을 결정할 수 있는 온라인 경제급전 알고리즘을 제시하였다. 또한 송전손실감도의 계산을 위해 전력조류해석시의 자코비안행렬을 이용하는 송전손실감도 계산식을 최적화기법을 사용하여 유도하였다.

2. 본 론

2.1 경제급전(Economic Dispatch)

경제급전 문제는 발전비용을 최소화하면서, 동시에 전력평형식과 발전출력 허용범위를 만족시키는 각 발전기의 출력을 찾는 것으로서 식(1)과 같이 발전비용 최소화를 목적함수로 하고, 전력평형식과 발전출력 허용범위를 제약조건으로 가지는 최적화문제로 표현할 수 있다.

$$\text{Min } F(P_G) = \sum_{i=1}^{NG} f_i(P_{Gi}) \quad (1)$$

$$\text{s.t } \sum_{i=1}^{NG} P_{Gi} - P_D - P_{loss} = 0$$

$$\begin{bmatrix} C_G & 1_G - \frac{\partial P_L}{\partial P_G} \\ 1_G^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_G \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_G \\ 1_D^T P_D + P_{loss} \end{bmatrix} \quad (6)$$

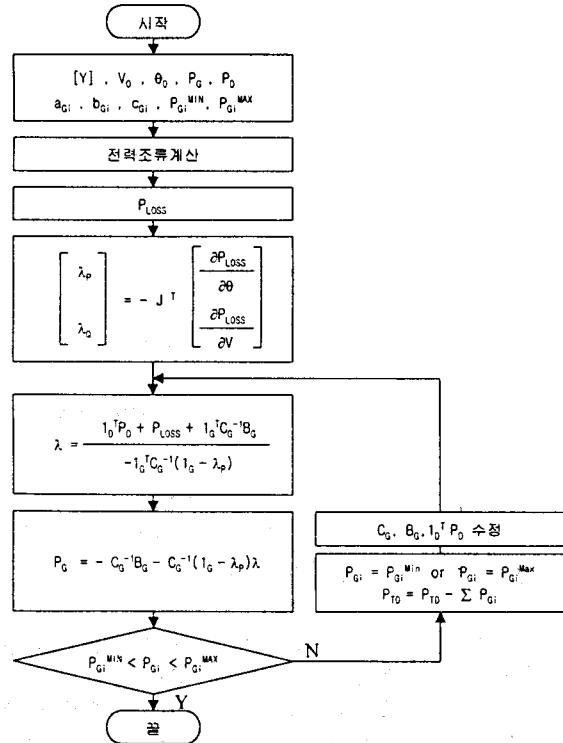
와 같이 표현될 수 있고, 다시 식(6)으로부터 P_G, λ 를 결정하는 식(7)(8)을 유도할 수 있다.

$$\lambda = -\frac{1_D^T P_D + P_{loss} + 1_G^T C_G^{-1} b_G}{1_G^T C_G^{-1} (1_G - \lambda_P)} \quad (7)$$

$$P_G = -C_G^{-1} b_G - C_G^{-1} (1_G - \lambda_P) \lambda \quad (8)$$

따라서, 최적해 P_G, λ 를 구하는 방법으로는 식(6)에서 역행렬 연산을 통해 계산하는 방법과 식(7)(8)을 통해 직접 계산하는 방법이 있겠으나, 행렬요소 C_G 가 발전기별 비용함수의 2차항 계수로 이루어진 대각행렬로써 C_G 의 역행렬이 행렬요소의 역수를 취해 간단히 계산되므로 식(6)을 이용하는 것보다 식(7)(8)을 이용하여 직접 계산하는 것이 훨씬 더 효과적이며, 이 경우 계산 시간은 실제계에 적용하여 온라인 경제급전을 수행할 수 있을 만큼 충분히 빠르다.

식(7)(8)에 의한 계산결과와 발전출력에 대한 부등호 제약조건을 고려하기 위해 발전출력의 허용범위를 위반한 발전기가 있을 경우, 위반한 발전기의 출력을 최대값이나 최소값에 고정시킨 후, 일련의 과정을 거쳐 $1_G, (1_G - \lambda_P), B_G, C_G, 1_D^T P_D$ 를 수정하고, 다시 식(7)(8)로부터 수정된 조건에 맞는 최적해를 결정할 수 있으며, 이러한 과정은 모든 발전기가 발전출력에 대한 허용범위를 만족시킬 때까지 반복된다.



(그림 1) 온라인 경제급전 알고리즘의 순서도

한편 본 논문에서 제시한 일반화된 등증분연료비 계산식(7)과 발전출력 계산식(8)을 사용하여 송전손실을 고려한 경제급전을 수행하기 경우에는 어느 순간 대상계통의 송전손실과 송전손실감도($\partial P_{loss}/\partial P_G$)가 있어야 하는데, 이는 계산시점 바로 전 단계 계통에 대한 전력조류계산 결과를 이용하여 간단히 해결될 수 있으며, 또한 대규모 전력계통에서 송전손실과 송전손실감도는 부하수준에 따라 일정하게 증가 또는 감소하므로 조류계산결과로부터 송전손실과 송전손실감도를 부하수준별로 미리 결정하여 경제급전을 수행하여도 크게 문제는 없다. 송전손실감도의 계산식은 다음절에서 유도하였다.

(그림 1)은 지금까지 설명한 온라인 경제급전 알고리즘의 순서도이다.

2.3 송전손실감도($\partial P_{loss}/\partial P_G$)의 유도

전력계통의 송전손실 변화는 전력조류방정식의 계산결과로부터 파악될 수 있다. 이 문제는 전력계통의 송전손실 최소화를 목적함수로 하고, 전력조류방정식을 제약조건으로 가지는 최적화문제로 표현할 수 있다.

$$\text{Min } P_{LOSS} \quad (9)$$

$$\text{s.t } P(V, \theta) = P^{SPEC} \\ Q(V, \theta) = Q^{SPEC}$$

여기서, P^{SPEC}, Q^{SPEC} 는 모선에 대해 지정된 유,무효 전력이다.

식(9)는 라그랑지안 쌍대함수를 이용하여

$$\text{Min } M \quad (10)$$

여기서,

$$M = P_{LOSS}(V, \theta) + \lambda^T [P(V, \theta) - P^{SPEC}] + \lambda^T [Q(V, \theta) - Q^{SPEC}] \quad (11)$$

와 같이 변환할 수 있고, 이로부터 변수 $V, \theta, \lambda_P, \lambda_Q$ 에 대한 최적조건식을

$$\frac{\partial M}{\partial V} = \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial V} + \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)^T \lambda_P + \left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)^T \lambda_Q = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = \frac{\partial P_{LOSS}}{\partial \theta} + \left(\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)^T \lambda_P + \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta}\right)^T \lambda_Q = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \lambda_P} = P(V, \theta) - P^{SPEC} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \lambda_Q} = Q(V, \theta) - Q^{SPEC} = 0 \quad (15)$$

와 같이 유도할 수 있다.

여기서, 새롭게 도입된 변수 λ_P, λ_Q 는 매우 중요한 물리적인 의미를 가지고 있다. 변수 λ_P, λ_Q 는 다음과 같이 라그랑지안 함수 M 을 P^{SPEC}, Q^{SPEC} 에 대해 미분하여 얻을 수 있다.

$$\left[\frac{\partial M}{\partial P^{SPEC}}\right] = -\lambda_P \\ \left[\frac{\partial M}{\partial Q^{SPEC}}\right] = -\lambda_Q \quad (16)$$

한편 임의의 운전점에 대한 조류계산결과는 변수 λ_P, λ_Q 에 대한 최적조건이 이미 만족되어 있는 최적조건식(14)(15)를 만족한다. 따라서, 식(11)의 라그랑지

안 함수 M은 모선전력의 단위변화에 대한 계통손실의 증분(송전손실감도)을 의미하는 변수 λ_P, λ_Q 와 계통손실 증분만을 포함한다. 그러므로, 식(16)은 다음의 식(17)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial P_{Loss}}{\partial P^{SPEC}} \right] &= -\lambda_P \\ \left[\frac{\partial P_{Loss}}{\partial Q^{SPEC}} \right] &= -\lambda_Q \end{aligned} \quad (17)$$

이러한 송전손실감도 λ_P, λ_Q 는 최적조건식 (12)(13)으로부터 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial M}{\partial \theta} \\ \frac{\partial M}{\partial V} \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V} \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_P \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = -J^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Loss}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{Loss}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.4 사례연구

전체 부하가 1000(MW), 송전손실이 50(MW), 송전손실감도가 0.07(모든 발전기가 일정한 것으로 가정)인 전력계통에 (표1)과 같은 5대의 발전기가 주어졌을 경우에 대한 사례연구를 수행하여 제시한 알고리즘에 의한 계산결과(표2)의 정확성을 확인하였다.

(표 1) 발전기의 입출력계수 및 발전출력 허용범위

	a _i	b _i	c _i	P _{Gmin}	P _{Gmax}
1	240	2.45	0.5	50	200
2	80	3.51	0.5	10	200
3	80	3.88	0.5	10	100
4	300	1.55	0.3	100	300
5	400	1.12	0.1	200	500

(표 2) 계산결과와의 비교

	송전손실을 고려하지 않은 경우		송전손실을 고려한 경우
	기존방법	제안방법	
1	108.97	108.97	122.6
2	107.91	107.91	121.5
3	100.00	100.00	100.0
4	183.11	183.11	205.8
5	500.00	500.00	500.0
발전비용	54797.96	54797.97	60697.42
Lambda	111.42	111.42	178.65

다음 6모선 계통을 대상으로 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용한 사례연구를 수행하여 온라인 경제급전 알고리즘의 실제 적용 가능성을 확인하였다. (표3)은 해석시점 전단계의 계통에 대한 조류계산 결과다.

(표 3) 조류계산 결과(해석시점 전 단계)

모선번호	TYPE	전압(P.U.)		전력(P.U.)	
		크기	위상각	P	Q
1	기준	1.05	-0.000	1.078	0.159
2	발전기	1.05	-0.064	0.500	0.743
3	발전기	1.07	-0.074	0.600	0.896
4	부하	0.99	-0.073	-7.000	-0.700
5	부하	0.98	-0.092	-7.000	-0.700
6	부하	1.00	-0.104	-7.000	-0.700

송전손실 P_{Loss} = 0.07873(P.U)

(표4)는 해석시점의 송전손실감도를 계산한 것으로써 이때의 부하와 송전손실은 전 단계보다 각각 0.015(P.U), 0.011(P.U) 증가하였다. (표 5)는 사례연구에서 사용한 입력자료와 (표4)의 송전손실감도를 이용한 경제급전 결과를 보인 것이다.

(표 4) 송전손실감도 계산결과(해석시점)

모선번호	TYPE	송전손실감도 λ_P
1	기준	0.06836
2	발전기	0.03653
3	발전기	0.04214

송전손실 P_{Loss} = 0.07983(P.U)

총부하 P_{DTotal} = 2.11500(P.U)

(표 5) 발전기 입출력계수 및 발전출력 허용범위

모선번호	a _i	b _i	c _i	P _{Gmin}	P _{Gmax}
1	60	2.45	0.3	50	200
2	70	3.51	0.4	0	50
3	80	3.88	0.5	0	60

(표 6) 계산결과

모선번호	송전손실을 고려하지 않은 경우		송전손실을 고려한 경우
	기존방법	제안방법	
1	101.500 (MW)	101.500 (MW)	109.48 (MW)
2	50.00 (MW)	50.00 (MW)	50.00 (MW)
3	60.00 (MW)	60.00 (MW)	60.00 (MW)
발전비용	6757.65	6757.65	7283.65
Lambda	40.294	40.294	40.645

3. 결 론

본 논문에서는 일반화된 온라인 경제급전 알고리즘과 송전손실감도 계산식을 제시하였다.

- ① 송전손실 고려여부에 관계없이 사용 가능하도록 일반화된 경제급전 알고리즘을 제시하였으며, 이를 통해 발전출력 허용범위 및 전력조류방정식 등의 제약조건을 만족하면서 발전비용을 최소화하는 각 발전기의 출력을 결정하였다.
- ② 제시한 알고리즘이 역행렬 연산없이 앞서 제시한 식(7)(8)을 이용하여 발전출력을 신속하게 계산할 수 있다는 점과 실제 계통에서 송전손실과 송전손실감도는 부하수준에 따라 일정하게 증가, 또는 감소하므로 부하수준에 따른 송전손실감도를 미리 계산하여 경제급전에 사용할 수 있다는 점에서 볼 때, 본 알고리즘은 실제 계통에 적용, 온라인 경제급전을 수행할 수 있다.
- ③ 한편 송전손실을 고려한 경제급전을 위하여 전력조류방정식을 만족하면서 송전손실을 최소화하는 최적화 문제로부터 송전손실감도 계산식을 유도하였다.

향후 수화력협조 문제를 포함하여 발전기 출력배분시 고려되어야 하는 사고율, 예비력 등의 각종 제약조건을 충분히 고려한 온라인 경제급전 알고리즘에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Power Generation Operation & Control, 1984
- [2] S.J.Lee, K.J.Kim, "Three Kinds of Voltage Collapse Proximity Indices based on the system loss Sensitivity and their Application to Contingency Evaluation", ICEE '95, 1995