

본산송전손실에 의한 확률시스템의 새로운 경제운영기법

- A New and Efficient Economic Operation Technique
of Thermal Unit with Distributed Transmission Loss Method -

이 봉 용

홍 위 대학교

윤 세 준*

홍 위 대학교

1. 서 론

전력시스템의 확률발전경제운영에 대한 연구는 주요한 것 만도 120여편 이상의 논문이 보여 주듯이 매우 관심이 큰 분야중의 하나이며 약 50년의 역사를 갖는다. 처음 발표된 이론이 등분본 연구비법¹⁾으로서 현재도 이것은 경제운영의 기본이 되고 있다. 시스템의 규모가 커짐에 따라서 송전손실을 고려한 송전손실기수법(B계수법)²⁾, 3)이나 계남비기수법⁴⁾, 5)이 적용되고 있다. 그러나 이들 방법은 모두 유효전력의 비본만을 목표로 하는 것이므로 최적경제운영의 목표를 달성할 수는 없으며, 따라서 별도의 무효전력제어책 취할 수단이 강구되어야 하고 최근까지 이 분야에 대한 연구도 계속되고 있다.^{6) - 8)}

유효전력과 무효전력을 동시에 제어할 수 있는 기법으로서 최적전력조류 계산이 1968년에 발표된 이래, 최적화기법을 이용한 최적경제운영이 많이 시도되고 있고^{9) - 11)} 이론적으로 최적경제운영의 목표가 달성될 수 있으나, 해결 얻는데 상당한 반복계산을 하여야 하므로 계산에 많은 노력이 필요하다. 이것이 최적화기법의 실기용은 가진 적용에 장애 요인이 되고 있다.

경제운영을 위한 방법은 실패통에 온카인 적용 가능해야 보다 의미를 갖는 것이며, 그건에서 도 경제운영의 목표를 충분히 달성할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 제3의 새로운 기법을 제시하고자 하며, 이론의 간결성과 최적목표달성의 용이성을 이기의 내용과 사개연구를 통해서 입증하고자 한다.

2. 모선 송전손실방정식

그림 1은 통상의 선로모형을 나타낸 것이다.

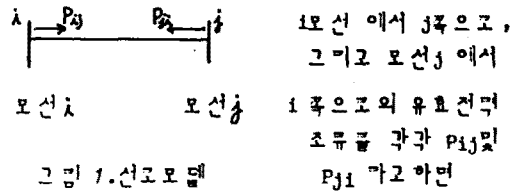


그림 1. 선로모형

1모선에서 j쪽으로,
그리고 모선 j에서
i쪽으로의 유효전력
조류들 각각 Pij 및
Pji 라고 하면
선로의 송전손실은

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (1)$$

적용 표시할 수 있으며, 물론 무효전력에 대해서도 동일한 기법이 적용될 수 있다. 식(1)은 모선 i, j 의 전압을 \dot{V}_i, \dot{V}_j , i - j 선로의 모선어드미턴스를 \dot{Y}_{ij} 라고 하면, i - j 선로의 전류는

$$\dot{I}_{ij} = -\dot{Y}_{ij} (\dot{V}_i - \dot{V}_j) \quad (2)$$

이므로

$$P_{Lij} = \text{Re} \{ \dot{V}_i \dot{I}_{ij}^* \} \\ = -\dot{V}_i^2 \dot{Y}_{ij} \cos \theta_{ij} + \dot{V}_i \dot{V}_j \dot{Y}_{ij} \cos (\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (3)$$

이 되고, 그러므로 i - j 선로의 송전손실은 식(3)에 의하여

$$P_{Lij} = -(\dot{V}_i^2 + \dot{V}_j^2) \dot{Y}_{ij} \cos \theta_{ij} + 2 \dot{V}_i \dot{V}_j \dot{Y}_{ij} \cos \delta_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (4)$$

단, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$

$\theta_{ij} = \pi - j$ 모선어드미턴스의 위상각

적용 표시된다. 그런데 이 송전손실이 양 모선의 상력에 의해서 결정된 것이므로, 양 모선에서 발생된 것으로 이산화시키고 평균적으로 1/2이 될것

이므로 각 모선에 할당되는 송전손실은

$$P_{Lij}^2 = -\frac{1}{2}(\dot{V}_i^2 + \dot{V}_j^2) \dot{Y}_{ij} \cos \theta_{ij} + \dot{V}_i \dot{V}_j \dot{Y}_{ij} \cos \theta_{ij} \cos \delta_{ij}$$

$$P_{Li} = -\frac{1}{2}(V_i^2 + V_j^2) Y_{ij} \cos \theta_{ij} + V_i V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (5)$$

와 같이 표시될 수 있다.

일반적으로 i 모선은 전 시스템모선과 연결되어 있으므로 i 모선에 해당되는 송전손실은 다음과 같다.

$$P_{Li} = \sum_{j=1}^n P_{Li} = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (V_i^2 + V_j^2) Y_{ij} \cos \theta_{ij} + \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (6)$$

단, n = 모선수

이 식을 모선송전손실방정식이라고 정의한다.

이렇게 해서 전 시스템의 송전손실이 결정된다.

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_{Li} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (V_i^2 + V_j^2) Y_{ij} \cos \theta_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (7)$$

3. 유효전력의 경제운영

3.1 경제운영의 조건

송전손실을 고려한 경제운영은 좌와 같이

$$\begin{aligned} \min F_T &= \sum_{i=1}^G f_i(P_{Gi}) \quad (8) \\ \text{subject to } & \sum_{i=1}^G P_{Gi} = P_D + P_L \\ & P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \end{aligned}$$

단, $f_i = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2$

i : 발전소의 순전비

P_{Gi} : 발전소의 출력

P_D : 주어진 시간의 전력 수요

$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$: 발전소의 최소 및 최대출력

G : 발전기의 수

처럼 요약되며, 부등호 처리를 별도로 할 때 식(8)은 다음과 같이 확장된다.

$$L = F_T - \lambda \left(\sum_{i=1}^G P_{Gi} - P_D - P_L \right) \quad (9)$$

에 대하여 L가 최소되는 필요조건으로부터

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = \frac{\partial F_T}{\partial P_{Gi}} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}} \right) = 0 \quad (10)$$

을 얻고, 다시 정리하면

$$\frac{df_i}{dP_{Gi}} \cdot PF_i = \lambda \quad (11)$$

단, $PF_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}}}$: 페널티계수

와 같다는 점은 이미 알려져 있는 관계식이다.

다만 페널티계수가 계수법으로부터 또는 전력조류 계산의 결과로부터 결정될 수 있다.

본 연구에서는 본산송전손실의 관계식(6)으로부터 보다 간편한 증분송전손실결정법을 제시하고자 한다.

3.2 증분송전손실

시스템의 송전손실은 식(6)을 다시 인용해서

$$P_L = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (V_i^2 + V_j^2) Y_{ij} \cos \theta_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (6)$$

이며, 한편 모선의 전력방정식은

$$P_{Gi} = P_{Di} + \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (12)$$

와 같다. 식(6)은 명시적(explicitly)으로

발전기출력의 함수가 아니다. 그러나 송전손실이 발전기출력과 시스템상태의 비명시적(implicitly) 함수인 점은 앞거져 있으므로

$$P_L = P_L(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gg}, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (13)$$

인 함수를 생각할 수 있고, 다음 관계가 성립된다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial \delta_g} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_L}{\partial P_{Gi}} \cdot \frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_g} \quad (14)$$

단, $g = 1, \dots, G$: 발전기모선

식(14)의 좌변은 식(6)으로 부터, 그리고 우변의 뒤의 항은 식(12)로 부터 결정될 수 있으므로 모두 결정되며, 증분송전손실만이 미지수로 남아게 된다.

즉, 선형행렬방정식

$$\left(\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \right) \left(\frac{\partial P_L}{\partial P_G} \right) = \left(\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \right) \quad (15)$$

이 되며, 이 행렬의 각 요소의 값은 식(6)과 (12)로부터

$$\frac{\partial P_L}{\partial \delta_g} \quad i) g = 1 \text{ 일 때} = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (16)$$

$$ii) g = j \text{ 일 때} = V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_{Gg}} = -2 \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos \theta_{ij} \sin \delta_{ij} \quad (18)$$

단, $g = 1, \dots, G$: 발전기모선

을 얻게 되며, 증분송전손실은

$$\left(\frac{\partial P_L}{\partial P_G} \right) = \left(\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \right)^{-1} \left(\frac{\partial P_L}{\partial \delta} \right) \quad (19)$$

로부터 쉽게 결정될 수 있다. 그리고 증분송전손실이 결정되었으므로 식(10)에 의한 유효전력의 경제운영이 가능해진다.

4. 전안제어

본산송전손실을 정의함으로써 얻게되는 이득은 증분송전손실의 용이한 결정뿐만 아니라, 아울러 전안제어모선의 전안결정도 극히 간편한 결과를 준다는 점이다. 목적함수를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$L = F_T - \lambda \left(\sum_{i=1}^G P_{Gi} - P_D - P_L \right) \quad (9)$$

이 식은 전압제어모선의 모선전압값 V_m 에 대해서도 최소화되어야 하며,

$$\frac{\partial L}{\partial V_m} = \frac{\partial F_1}{\partial V_m} - \lambda \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial P_{ai}}{\partial V_m} - \frac{\partial P_m}{\partial V_m} \right) = 0 \quad (20)$$

인 최소조건을 얻는다. 이식의 앞의 항은

$$\frac{\partial F_1}{\partial V_m} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial V_m} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial P_{ai}} \cdot \frac{\partial P_{ai}}{\partial V_m} \quad (21)$$

이 되므로 식(20)은 모두 계산이 가능하다. 그래서 결과를 정리하면 다음과 같은 선형행렬방정식을 얻게 된다.

$$[A][V_c] = [B] \quad (22)$$

단, V_c : 전압제어모선의 전압벡터

A : V_c 의 계수 행렬

B : 상수 벡터

이 행렬의 각 요소의 값은 다음과 같이 계산된다.

$$A_{mi} \quad i) m=i \text{ 일때} = \sum_{j=1}^n \{-2G_{ij}(b_i + 2C_i P_{ai})\} \quad (23)$$

$$ii) m=j \text{ 일때} = \{(G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \cdot (b_i + 2C_i P_{ai} - \lambda) + (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \cdot (b_i + 2C_i P_{ai} - \lambda) + 2 \cdot G_{ij} \cos \delta_{ij} \cdot \lambda\} \quad (24)$$

$$B_m = \sum_{j=1}^n \{(-V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} - V_j B_{ij} \sin \delta_{ij}) \cdot (b_i + 2C_i P_{ai} - \lambda) - 2V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \cdot \lambda\} \quad (25)$$

단, G_{ij} : 모선어드미턴스의 실수부

B_{ij} : 모선어드미턴스의 허수부

$m = 1, \dots, n$; G: 발전기모선

식(22)로 부터 전압제어모선의 모선전압은

$$[V_c] = [A]^{-1}[B] \quad (26)$$

으로서 간단히 구해진다. 다른 최적화기법에서는 V_c 의 값에 상당한 반복 계산을 요하나, 식(26)에 의하면 단 한번에 V_c 의 값이 결정된다는 것으로서, 이것은 강조되어도 좋을 것이다.

5. 사례 연구

본 연구에서 제시된 방법의 유용성을 입증하기 위하여 그림 2와 같은 5모선 계통에 최적화기법¹²⁾에 의한 한 방법과 본 연구의 알고리즘을 적용시켜 비교하여 검토하였다.

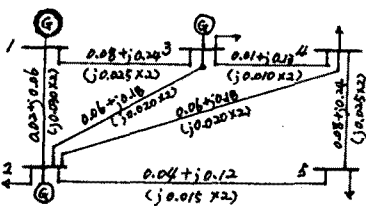


그림 2. 5모선 계통

(표-1)은 각 발전기수특성과 용량제한을 나타낸 것이다. (표-1) 발전기 특성

NO.	ALPHA	BETA	GAMA	P _{MAX}	P _{MIN}
1	140	2.0	0.006	80	10
2	120	1.5	0.007	95	10
3	80	1.8	0.007	20	60

(표-2)는 증분송전손실(ITL)과 연료비의 수렴과정의 수렴과정을 표시한 것이고 최적화기법의 한 방법과 본 연구에서 제시된 방법을 비교하여 나타낸 것이다.

(표-2) 증분송전손실과 연료비의 수렴과정

반복횟수	ITL ₁	ITL ₂	ITL ₃	COST
0	0.04617	0.03591	0.00518	697.957
1	0.03286	0.02872	0.008517	695.467
2	0.034152	0.02962	0.008227	695.572
3	0.03408	0.02967	0.008227	695.542
4	0.03418	0.02977	0.008144	695.534
5	0.03423	0.02983	0.008107	695.528
최적화 기법의 한 방법				695.52

(표-3)은 무효전력제어에 대한 전압과 증분송전손실의 향상된 변화과정을 표시한 것이다.

(표-3) 전압및 증분송전손실의 수렴과정 단위

반복횟수	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	P _L
0	1.060	1.050	1.040	1.000	1.000	2.505
1	1.060	1.060	1.046	1.044	1.033	1.591
2	1.059	1.060	1.048	1.045	1.034	1.628
3	1.060	1.060	1.049	1.046	1.034	1.616
4	1.060	1.060	1.050	1.047	1.034	1.612
5	1.060	1.060	1.051	1.048	1.035	1.609

6. 결 론

본 연구에서는 파워시스템의 최적경제운용을 위하여 증분의 수법과는 다른 제 3의 방법으로서 새롭고 효율적인 기법을 제시하였으며 그 주요점은 다음과 같다.

1) 선도의 증분송전손실은 해당모선에 1/2씩 합당하여 모선증분송전손실방정식을 정의하였다.

2) 모선증분송전손실방정식으로 부터 증분송전손실이 간편하게 결정될 수 있음을 보였고, 따라서 유효전력의 경제운용이 효과적으로 달성된다.

3) 모선증분송전손실방정식은 또한 전압제어에도 효율적임이 입증되었으며, 단 1회의 계산에 의해서 시스템의 최적전압이 결정된다.

4) 2와 3에 의하여 유효전력과 무효전력의

극제어가 동시에 달성된다.

5) 사례연구에서 최적화기법의 한 방법의 결과와 비교 하였으며, 본 연구의 성과가 입증됨을 보인다.

금후 보다 대규모 시스템에 대한 심층연구를 통해서 본 연구의 성과를 제시할 예정이다.

7. 참고문헌

1. H. H. Happ. "Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey", IEEE Trans., PAS - 96, pp.841 - 854, 1977.
2. L. K. Kirchmeyer and G. W. Stagg, "Analysis of Total and Incremental Losses in Transmission Systems", AIEE Trans., Vol. 70, part I, pp. 1197 - 1205, 1951.
3. W. D. Stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, 3rd ED. McGraw - Hill Korea 1975.
4. F. L. Alvarado, "Penalty Factors From Newton's Method", IEEE Trans, Vol. PAS - 97, No. 6, pp. 2031 - 2040, 1978.
5. Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control. John Wiley & Sons, Inc. 1984.
6. M.E. EL - Hawary and G. S. Christensen, Optimal Economic Operation of Electric Power Systems, Academic Press, Inc. 1979.
7. K. R C. Mamandur and R. D. Chenoweth, "Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization", IEEE Trans., Vol. PAS - 100, No. 7, pp. 3185 - 3194, 1981.
8. H. Glavitsch and M. Sperry, "Quadratic Loss Formula for Reactive Dispatch", IEEE Trans., Vol. PAS - 102, No. 12, pp. 3850 - 3853, 1983.
9. H. W. Dommel and W. F. Tinney, "Optimal Power Flow Solution", IEEE Trans., Vol. PAS - 87 No. 10, pp. 1866 - 1876, 1968.
10. A. M. Sasson et. al, "Optimal Load Flow Solutions Using Hessian Matrix", IEEE Trans., Vol. PAS - 93, pp. 31 - 41, 1973.
11. Davod I. Sun et. al, "Optimal Power Flow by Newton Approach", IEEE Trans., Vol. PAS - 103, pp. 2864 - 2880, 1984.
12. R. B. Gungor, N. F. Tsang, B. Webb, "A Technique for Optimizing Real and Reactive Power Schedules", IEEE Trans., Vol. 90, pp. 1781 - 1790, 1971.