

선형 계획법을 이용한 무효전력설비계획에 관한 연구
The Study of Reactive Power Planning Using Linear Programming

박 영 문	서울 대학교
서 보 혁	경북 대학교
이 근 준*	서울 대학교

1. 서 론

본 연구에서는 전선개발계획을 의한 무효전력설비설치량을 최적화하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 그동안 국내에서도 전선개발계획 분야의 연구가 활발하여 신규발전소건설에 대한 계획이 이론적으로 다듬어졌고 또한 송전선로확장에 대한 연구도 끝 이루어 질 것으로 생각된다.

본 연구에서는 장차의 발전소건설계획, 송전선로건설계획및 부하의 증가추세가 알려진 경우 각 모선의 전압을 규정이내로 유지하기 위한 무효전력의 신설량과 부하수준에 따른 무효전력설비의 투입량 각 모선의 발전기 단자전압을 동시에 구하는 알고리즘을 개발하였다.

2. 무효전력설비 및 투입량 최적화를 위한 정식화

2-1. 목적함수의 설정

무효전력설비 신규투자비용 J_c 는

$$J_c = W_L \cdot U_L + W_C \cdot U_C \quad (1)$$

- W_L : 무효전력흡수설비 단의투자단가
- W_C : " 발생 " "
- U_L : 신설 무효전력 흡수설비
- U_C : " 발생설비

계통의 전발전비용 J_o 는

$$J_o = \int B^T \cdot P_g \cdot dt$$

B = 각 모선발전소의 전력단가

P_g = 각 모선의 발전량

로 나타낼 수 있다.

물론 이 과정은 비선형연료비의 온전점 부근에서의 선형화로 취급하여도 관계없다. 실제 문제로서 J_o 의 적분은 전선계획적인 측면에서보아 다음과 같이 수정하여 쓰기로 한다.

$$J_o = \sum_{k=1}^{\ell} B^T \cdot k P_g \cdot \Delta T \quad (3)$$

k : 이산화한 부하수준의 구분수

$k = 1, 2, \dots, \ell$

따라서 최소화해야 할 목적함수는 (1)과 (3)의 합으로 표현하여야 하며 다음과 같다.

$$J = J_c + J_o \\ = W_L \cdot U_L + W_C \cdot U_C + \sum_{k=1}^{\ell} B^T \cdot k P_g \cdot \Delta T \quad (4)$$

이때 각 변수의 미소변화에 의한 목적함수의 변화분 ΔJ 의 값은

$$\Delta J = W_L \cdot \Delta U_L + W_C \cdot \Delta U_C + \sum_{k=1}^{\ell} B^T \cdot \Delta P_g \cdot \Delta T \quad (5)$$

한편 원래의 목적함수는 선형식으로 두었으므로 (4)식으로 표현한 비용의 최소화는 (5)식의 최소화와 같으며 결국 (5)식을 최적화함으로써 최적해를 구할 수 있게 된다.

지금 (5)식에서 무효전력을 ΔQ 만큼 변화시켰다고 하면 각 모선의 전압은 ΔV , 발전전력은 ΔP_g 만큼 변할 것이므로 이 관계를 고려해보면 ΔQ 가 작은 경우

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. (1)

일반적으로 $\Delta P - \Delta \theta$, $\Delta Q - \Delta V$ 간의 영향은 크나 $\Delta P - \Delta V$, $\Delta Q - \Delta \theta$ 와의 관계는 작으므로 (3) (6)식을

다음과 같이 근사화가 가능하다.

$$\Delta Q = J_3 \cdot \Delta \theta + J_4 \cdot \Delta V \cong J_4 \cdot \Delta V \quad (7)$$

$$\Delta P = J_1 \cdot \Delta \theta + J_2 \cdot \Delta V \quad (8)$$

무효전력 ΔQ 의 변화에 의한 ΔP 의 변화는 ΔQ 에 의한 $\Delta \theta$ 의 변화를 무시하면

$$\Delta P \cong J_2 \cdot \Delta V \quad (9)$$

로 쓸 수 있다.

따라서 목적함수의 변분 (5)식은

$$\Delta J = W_L \cdot \Delta U_L + W_C \cdot \Delta U_C + \sum_{k=1}^n B^T \cdot J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot \Delta Q \cdot \Delta T \quad (10)$$

로 표현된다.

2-2. 구속조건의 정식화

자급 어떤 부하상태에서 각 모선의 전압을 유효전력을, 무효전력을 라 하고 각각의 변분을 로 표현할때 다음과 같아진다.

$$V_{min} \leq KV^0 + \Delta V \leq V_{max} \quad (11)$$

$$P_{min} \leq KP^0 + \Delta P \leq P_{max} \quad (12)$$

$$Q_{min}^0 - \Delta U_C \leq KQ^0 + \Delta Q \leq Q_{max}^0 + \Delta U_C \quad (13)$$

다시 ΔV , ΔP 를 ΔQ 로 대치하면 의 조건식중 (11), (12)은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{min} \leq KV^0 + J_4^{-1} \cdot \Delta Q \leq V_{max} \quad (14)$$

$$P_{min} \leq KP^0 + J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot \Delta Q \leq P_{max} \quad (15)$$

2-3. 선형계획 문제로서의 설정

의에 관한 결과들은 표준형태의 선형계획법 (4)에 적용 가능하도록 정리하면 다음과 같아진다.

$$\text{Min} \{ W_L \cdot \Delta U_L + W_C \cdot \Delta U_C + \sum_{k=1}^n B^T \cdot J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot \Delta Q \cdot \Delta T \} \quad (16)$$

Subject to

$$\Delta Q \leq KJ_4 (V_{max} - KV^0)$$

$$-K_2 Q \leq KJ_4 (KV^0 - V_{min}) \quad (18)$$

$$KJ_2 \cdot KJ_4^{-1} \cdot \Delta Q \leq (P_{max} - KP^0) \quad (19)$$

$$-KJ_2 \cdot KJ_4^{-1} \cdot \Delta Q \leq (KP^0 - P_{min}) \quad (20)$$

$$-\Delta U_L - \Delta Q \leq Q^0 - Q_{min}^0 \quad (21)$$

$$\Delta Q - \Delta U_C \leq Q_{max}^0 - Q^0 \quad (22)$$

단 여기서 Max, min 은 각 변수의 사용 가능 최대, 최소량이며 '0' 은 각 변수의 운전상태에서의 값을 나타낸다.

또한 Q_{min}^0 / Q_{max}^0 는 부하수준 k 에서 다음과 같이 정의된다.

$$Q_{min}^0 = \text{발전기 발전 가능 최소무효전력} - \text{기존무효전력 흡수설비량} \quad (23)$$

(ΔU_C 에 의한 추가량 포함)

$$Q_{max}^0 = \text{발전기 가능 최대 무효전력} + \text{기존무효전력 발생설비량} \quad (24)$$

(ΔU_C 에 의한 추가량 포함)

최적화 전과정을 흐름도로 표시하면 다음과 같다.

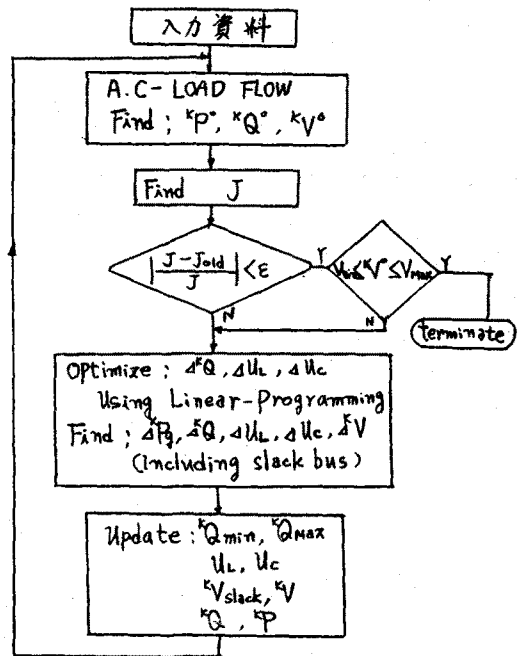


그림1. 최적화과정의 흐름도

3. 검토 및 결론

* 참고 문헌 *

본 연구의 결과는 우선 5-모선 계통에 대하여 검토하였으며 이 알고리즘의 장점은

1. 비선형 문제를 선형화하고
2. 무효전력설비의 변분으로부터 무효전력 루 자량은 물론 각 부하 수준에서 각 모선에 투입할 무효전력까지 동시에 구해진다는 점이다.
3. 또한 일반적으로 최적조류문제에서 slack bus의 전압은 고정하는 것이 룰레이나 이 알고리즘에서는 전계통의 연료비를 최소화하기 위한 slack bus의 전압을 선형계획법을 푸는 과정에서 구할 수 있다.

한편 검토 사항으로는 다음과 같은 점을 들 수 있다.

1. 사고상징에 관한 문제 - 일반적으로 무효전력설비, 각 모선전압의 조정문제는 사고를 고려하는 것이 룰레이나^(5,6), 장기전원개발계획의 측면에서 제외하였으며
2. 만일 전원계획의 측면을 떠나 일반적인 관점에서 생각한다면 특히 감응도가 큰 사고에 대해서만 Y_{Bus} 의 sensitivity를 고려하는 것으로 처리할 수 있다.
3. 실제 문제에서 필히 고려하여야 할 점으로는 변압기의 탭조정의 경우를 넣어 주어야 할 것이다. 이는 Jacobian의 요소를 수정하여 해결할 수 있는 것이다.

- (1) William. F. Tinney, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE PAS., 1967, PAS-86, No.11, pp1449-1460.
- (2) W.F.Tinney, J.W.Walker : Direct solutions of sparse Network equations by optimally ordered Triangular Factorization", Proc. of IEEE Vol.55, 1967. pp1801-1809.
- (3) Stott, B. And Alsac.O., "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans., Power Apparatus And System, Vol. PAS-95, pp859-860, 1974.
- (4) Mokhtar. S. Bazara "Linear Programming And Network Flows" 1977; by John Wiley & Sons, Inc. pp81-351.
- (5) G.Jee and P.Hsiang, R.R.shoults and M. S.chen: "Optimal Reactive power Planning", IEEE PAS., 1981, PAS Vol PAS-100, No.5 May, pp2189-2196.
- (6) R.A.Fernandes, F.Lange, R.C. Burchett, H.H.Happ, K.A.Wirgan, "Large Scale Reactive Power Planning", IEEE PAS, PAS-102 No.5, May. 1983.