

전압의존형 부하모델과 손실재분배 알고리즘을 적용한 B계수 산정법

채명석*
군장대학

이명환, 김병섭, 신종린
건국대학교

A Method of Determining B-coefficient Applying VDLM/LRDA

Myung-Suk Chae*
Kun-Jang College

Myung-Hwan Lee, Byung-Seop Kim, Joong-Rin Shin
Konkuk University.

Abstract - The basic purpose of economic dispatch problem is that minimize fuel cost with inequality constraint of generator output. To solve this problem it is very important to express power loss equation that have quadratic function of generator output power included B-coefficient. This paper presents a method in determining B-coefficient by use A-matrix that is calculated by loss re-distribution algorithm (LRDA) considering voltage dependent load model (VDLM)s. The proposed algorithm is tested with IEEE 6 bus sample system, which shows the result in each cases by the change of load component factor.

1. 서 론

경제급전문제는 각 발전출력의 2차 함수로 표현된 발전 연료비 함수를 최소화하는 문제이다. 이러한 최적화 문제의 목적함수는 발전출력 변수의 연료비함수이고, 연료비 함수를 최소화하는데 필요한 제약조건은 부동호제 약조건과 등호제약조건으로 나눌 수 있다. 그 중 전자는 정상운전 상태에서 출력 가능한 발전 유효전력의 최대한 계와 최저한계를 지정한 것이고, 후자는 최적화 방법을 통해 개선되는 해가 과연 정상상태 조건을 만족하고 있는가를 평가할 수 있는 평형방정식 형태의 제약조건으로 구성된다.

발전연료비 최소화문제의 수치기법 중 일반화된 방법으로는 라그랑지 미정계수법을 들 수 있으며 라그랑지 함수는 발전연료비 목적함수와 미정계수를 포함한 등호 제약조건인 합성 형태로 나타낸다. 결과적으로 발전출력의 1차 편미분을 통하여 충분비용함수를 얻을 수 있고, 미정계수 λ는 충분손실을 포함한 페널티계수로 나타낸다. [1][2]. 경제급전문제를 해결하기 위해 가장 중요한 문제는 손실방정식을 표현하는 방법으로, 기존방법과 같이 B계수를 포함한 발전출력의 2차 함수로 표현하고 발전출력 증분에 대한 충분손실을 구하는 것으로 가정하고 각 계수를 산정한다.

본 논문에서는 충분 손실량을 구하는데 필요한 A계수를 계산하기 위해 전압의존형 부하모델(VDLM)을 적용한 손실재분배 알고리즘(LRDA)을 사용하여 실 계통 특성에 가깝도록 계수를 산정하였다. 또한, B계수 산정은 발전출력의 2차함수인 손실방정식의 2계미분을 통하여 결정하였다. 마지막으로 제안한 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 IEEE 6 모선계통에 적용한 결과를 보인다.

2. 본 론

2.1 VDLM의 표현

기존 전력경제급전문제에서 대부분 부하의 표현은 단

지 정전력 부하로 가정하고 문제들을 해석하였다. 하지만, 계통의 말단에 있는 부하의 구성은 가정용, 산업용, 상업용 등으로 분포되어 있다. 본 논문에서는 이러한 기존 전력경제급전 문제의 단점을 개선하기 위하여 식 (1-a)와 식(1-b)와 같이 다항식형태의 전압의존형 부하 모델을 사용한다.

$$P_{Li}(V) = P_{L0}[a_P + b_P V_i + c_P V_i^2] \quad (1-a)$$

$$Q_{Li}(V) = Q_{L0}[a_Q + b_Q V_i + c_Q V_i^2] \quad (1-b)$$

여기서,

P_{L0}, Q_{L0} : 정격 운전 전압에 대한 부하 모선의 유효 및 무효전력

a_P, a_Q : 정전력 부하 성분 계수

b_P, b_Q : 정전류 부하 성분 계수

c_P, c_Q : 정임피던스 부하 성분 계수

2.2 VDLM을 적용한 LRDA의 정식화

전압의존형 부하모델(VDLM)을 적용한 손실재분배 알고리즘(LRDA)은 기존 전력 조류계산에서 정전력 부하만으로 취급하던 부하형태를 실계통 조건에 맞게 모델링 하고, 슬랙모선이 담당하던 계통 손실을 각 발전기가 전기적 특성을 고려하여 분담하게 하는 방법을 적용함으로써 슬랙 모선의 손실 부담을 완화하도록 하였다. 식 (2)는 손실재분배 알고리즘을 정식화한 것이다.

$$f_i = P_{Gi} - P_{Li} - P_i + P_i^{loss} = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$P_i(V, \delta) = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad i \in G$$

$$P_i^{loss} = 0, \quad i \in L$$

P_i^{loss} 는 각 발전기가 분담하는 송전손실로 각 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하여 분담한다[8].

결과적으로, N모선으로 이루어진 전력 계통인 경우, 전압의존형 부하모델을 적용한 전력 방정식은 형태는 식 (3.a)와 식(3.b)와 같이 쓸 수 있다.

$$f_i = P_{Gi} - P_{Li}(V) - P_i(V, \delta) - P_i^{loss} = 0 \quad (3.a)$$

$$g_i = Q_{Gi} - Q_{Li}(V) - Q_i(V, \delta) = 0 \quad (3.b)$$

여기서, P_{Gi}, Q_{Gi} 는 i 번째 유효 및 무효전력 발전량을 나타내며, $P_i(V, \delta), Q_i(V, \delta)$ 는 계통에 유입되는

유효 및 무효전력 나타낸다. 또한, $P_{Li}(V)$ 와 $Q_{Li}(V)$ 는 i 번째 부하모선의 유효 및 무효전력을 나타내는 요소로 전압크기의 변화에 따른 부하특성을 고려하기 위한 부하모형이다.

이러한 전압의존형 부하모형을 적용한 손실재분배 조류계산 알고리즘은 뉴턴-랩슨법이 적용되며, 식(3.a)와 식(3.b)에 전압의 크기와 위상각에 대해 1계 미분을 취하면 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, 전압의존형 부하모형을 적용함으로써 변화하는 자코비안 요소는 J_{12}, J_{22} 이며, 손실재분배 알고리즘의 적용을 통해 변화하는 요소는 J_{11} 이 된다.

3. VDLM과 LRDA를 적용한 계수산정

라그랑지 미정계수법을 이용한 경제급전문제 해석에서 가장 중요한 요소는 발전출력의 1차 편미분을 통해 산정되는 페널티 계수의 결정이다. 페널티계수는 발전출력 변동에 따른 손실변화의 함수로, 여기서 사용되는 손실함수의 선정 또한 중요한 문제이다.

본 논문에서는 페널티계수의 결정에 필요한 손실함수를 B계수가 포함된 발전출력의 2차 함수로 표현한다. 또한, 기존의 전력경제급전 해석방법에서 정전력 부하로만 가정했던 부하구성을 정전류, 정임피던스 모델을 추가함으로써 단일패턴부하의 단점을 개선하고, 실제계에 근접한 해석을 위해 손실재분배 알고리즘을 적용하여 각각의 계수를 산정 하도록 하였다.

3.1 B계수 산정

손실방정식은 식(5)와 같이 B계수를 포함한 2차 다항식형태로 쓸 수 있고,

$$P_L = \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K P_m B_{mn} P_n + \sum_{n=1}^K P_n B_{n0} + B_{00} \quad (5)$$

다음과 같이 2차 편미분형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial P_n^2} = 2B_{nn} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial P_m \partial P_n} = 2B_{mn} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에서 각 발전기의 출력에 대한 계통 손실의 2차 편도함수를 구할 수 있다면 B계수를 구할 수 있다.

3.2 VDLM과 LRDA를 적용한 A계수 산정

N모선 계통에서 전력 손실은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_L = 2 \sum_{n=1}^N |V_n|^2 2g_{nn} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N |V_n| |V_k| g_{nk} \cos(\theta_k - \theta_n) \quad (8)$$

여기서,

V_n : 모선 n의 전압벡터

g_{nk} : 모선 n과 k 사이 컨덕턴스

g_{nn} : 모선 n의 컨덕턴스

발전모선 n의 증분손실을 표현하기 위해 식 (8)을 미분하고 chain rule을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \quad (9)$$

전력계통에서 발전기의 출력에 대한 전압위상각의 변화는 매우 선형적이기 때문에, $\frac{\partial \theta_j}{\partial P_n}$ 대신 A_{jn} 계수의 집합을 다음과 같이 사용한다.

$$A_{jn} = \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \approx \frac{\Delta \theta_j}{\Delta P_n} \quad (10)$$

식 (10)의 A_{jn} 계수를 산정하기 위한 알고리즘은 그림 1과 같다.

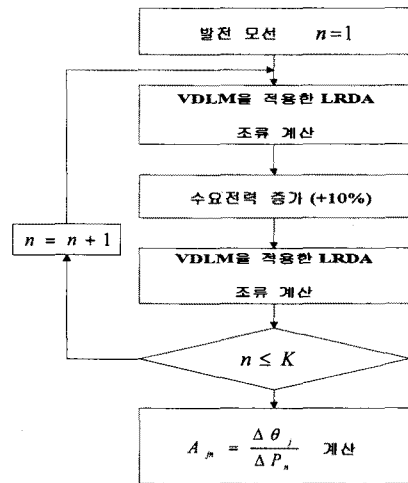


그림 1. A계수 산정 알고리즘

Fig 1. Algorithm for determining A coefficient

이 알고리즘을 통해 A_{jn} 계수를 구할 수 있고, 또한 P_n 의 2차 편미분 형태를 통해 식(6)과 식(7)을 이용하여 B계수를 계산한다.

여기서, $\frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} = 2 \sum_{k=1}^N |V_k| |V_n| g_{jk} \sin(\theta_k - \theta_j)$

$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} A_{jn}$ 이다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 IEEE의 6모선 계통을 시험하였다. 특히, 손실재분배 알고리즘의 계산과정에서 적용된 전압의존형 부하모델의 각 성분 계수를 달리함으로써 A계수 및 B계수 영향을

표를 통하여 제시하였다.

표 1은 전압의존형 부하모델의 성분계수인 정전력, 정전류, 정임피던스를 사례별로 나타낸 것이다.

표 1. 사례별 부하 성분 계수

Table 1. Load component coefficient

	α_P	α_Q	β_P	β_Q	γ_P	γ_Q
기준	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CASE 1	0.85	0.70	0.03	0.05	0.12	0.25
CASE 2	0.74	0.65	0.04	0.08	0.22	0.27

표2와 표3은 모의 계통의 모선 및 선로데이터를 나타낸다.

표 2. 6모선 계통의 모선 data

Table 2. Bus data of 6-bus system

모선	전압	위상	P_G	Q_G	P_L	Q_L
1	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.10	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00
3	1.00	0.00	0.00	0.00	27.50	6.50
4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.00	0.00	0.00	0.00	15.00	9.00
6	1.00	0.00	0.00	0.00	25.00	2.50

표 3. 6모선 계통의 선로 data

Table 3. Line data of 6-bus system

선로	모선		선로		Y/2	TAB
	i	j	R	X		
1	1	4	0.080	0.370	0.007	1.0000
2	1	6	0.123	0.518	0.01	1.0000
3	2	3	0.723	1.050	0.00	1.0000
4	2	5	0.282	0.640	0.00	1.0000
5	4	3	0.000	0.133	0.00	0.9090
6	4	6	0.097	0.407	0.0076	1.0000
7	6	5	0.000	0.300	0.00	0.9760

표4와 표5는 사례별 A계수와 B계수의 계산결과를 비교한 것이다.

표 4. A 계수 비교

Table 4. Comparison of A coefficient

A 계수	기준	CASE 1	CASE 2
A11	0.00000	0.00000	0.00000
A12	0.00000	0.00000	0.00000
A21	-0.10218	-0.10138	-0.10084
A22	-0.19464	-0.19267	-0.19130
A31	-0.26952	-0.26939	-0.26931
A32	-0.51341	-0.51196	-0.51092
A41	-0.19935	-0.19928	-0.19922
A42	-0.37975	-0.37872	-0.37795
A51	-0.27640	-0.27607	-0.27584
A52	-0.52651	-0.52465	-0.52330
A61	-0.26386	-0.26382	-0.26380
A62	-0.50262	-0.50137	-0.50047

표 5. B 계수 비교

Table 5. Comparison of B coefficient

B 계수	기준	CASE 1	CASE 2
B11	0.08223	0.08242	0.08255
B12	0.15664	0.15663	0.15660
B21	0.15664	0.15663	0.15660
B22	0.29838	0.29767	0.29710

5. 결 론

본 논문에서 제시한 방법은 경제급전 문제를 해석하는데 요구되는 B계수를 구하는 과정에서 A계수 결정알고리즘에서 가정했던 부하증가의 사례를 실 계통에 근접한 방법을 제시하였다. 본 논문의 알고리즘 특성과 사례연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 실 계통에 근접한 해를 얻기 위해 전압의존형 부하모델(VDLM)을 적용하였으며, 부하의 성분별 계수의 변화에 따른 A계수 및 B계수의 변화를 볼 수 있었다.

나. 기존의 조류계산에서 발생하는 수치적 가정인 슬랙모선 전담의 송전손실을 각 발전기의 전기적 특성에 맞게 분담함으로써 기존 계통에서 발생하는 단점을 보완하여 계수를 결정하도록 하였다.

다. 이러한 사례연구를 통해서 지금까지 경제급전 문제해석에서 무시했던 부하의 변화를 고려하여 증분손실 계산에 필수적인 A계수 및 B계수 산정에 새로운 방향을 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] O. I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory - Second Edition*: McGraw Hill Book Co., New York, 1982.
- [2] Pai, M. A. *Computer Techniques in Power System Analysis*, Tata McGraw-Hill, 1979, pp 111-136
- [3] A. J. Wood, and B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation & Control*: J. Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1984.
- [4] L. K. Kirchmayer, *Economic Operation of Power Systems*: John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1958.
- [5] C. A. Gross, *Power System Analysis - Second Edition*: J. Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1986.
- [6] Eugene F. Hill, William D. Stevenson, JR., "An Improved Method of Determining Incremental Loss Factors from Power System Admittances and Voltage," *IEEE Trans. Power App. & Syst.*, Vol. PAS-87, NO. 6, June, 1968.
- [7] Eugene F. Hill, William D. Stevenson, JR., "A New Method of Determining Loss Coefficients," *IEEE Trans. Power App. & Syst.*, Vol. PAS-87, No. 7, July, 1968
- [8] J. R. Shin, K. S. Kim, M. S. Chae "Determination of Precise Voltage Profile with Loss Re-Distribution and Static Voltage Dependent Load Models", *ICEE*, July 1998.