

정적 전압의존형 부하모형을 적용한 B계수 산정법

이명환* , 채명석 , 신중린
 건국대학교 전기공학과

A Computation Method of B-coefficient With Static Voltage Dependent Load Model

Myung-Hwan Lee* , Myung-Suk Chae , Joong-Rin Shin
 Dept. of Electrical Engineering Kon-Kuk Univ.
 Email: jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

압의존형 정적부하 모델을 사용하며, 다음과 같이 나타내었다 [4].

$$P_{Li}(V_i) = P_{Li}[a_{Pi} + b_{Pi}(V_i/V_D) + c_{Pi}(V_i/V_D)^2] \quad (1-a)$$

$$Q_{Li}(V_i) = Q_{Li}[a_{Qi} + b_{Qi}(V_i/V_D) + c_{Qi}(V_i/V_D)^2] \quad (1-b)$$

$$i \in S_{load}$$

여기서,

- P_{Li}, Q_{Li} : 기준상태의 운전 전압에 대한 i 모선의 유효 및 무효 부하전력
- a_{Pi}, a_{Qi} : 정전력 부하 성분 계수
- b_{Pi}, b_{Qi} : 정전류 부하 성분 계수
- c_{Pi}, c_{Qi} : 정임피던스 부하 성분 계수
- V_D : 기준상태 운전 전압
- S_{load} : 부하모선 집합

Abstract

In power system, economic dispatch problem is to minimize fuel cost with inequality constraints of generator output. To solve this problem it is very important to express power loss equation that have quadratic function of generator power included B-coefficient. This paper presents a method in determining B-coefficient by use A-matrix that is calculated by power flow considering voltage dependent static load model. 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. 서론

경제급전문제는 각 발전장의 한계영역내에서 발전출력의 2차 함수로 표현된 연료비 함수를 최소화하는 문제이다. 경제급전 문제의 해법은 일반적으로 라그랑지 미정계수법이 사용되며, 라그랑지함수는 총비용과 전력평형방정식을 합성한 형태로 표현된다. 또한 라그랑지함수는 발전출력의 1차 편미분을 통하여 증분손실함수인 페널티계수를 얻게된다[1][2]. 경제급전문제를 해결하기 위한 가장 중요한 문제는 손실함수를 표현하는 것으로 이 함수는 발전출력에 대해 B계수를 포함한 2차함수 형태를 가진다[3].

본 논문에서는 B계수를 산정하기위해 A계수를 구하는 과정에서 전압의존형 부하모형을 적용하여 실제통에 근접한 계수를 결정하도록 하였으며, 알고리즘의 효율성을 입증하기위하여 IE EE 6 모선계통에 적용한 결과를 보인다.

2. 전압 의존형 모델

2.1 전압 의존형 모델 표현

기존의 전력조류계산 문제에서 부하의 표현은 일반적으로 정전력부하로 표현된다. 본 논문에서는 전압에 따른 부하영향을 반영하여 경제급전문제의 실효성을 높이고자 다항식형태의 전

2.2 부하의 전압특성을 고려한 자코비안 수정

전체 N개의 모선으로 이루어진 전력 계통의 경우, 각 모선에서 만족하여야 하는 전력 방정식은 다음과 같다.

$$f_i = P_G - P_{Li}(V_i) - P_T(V, \delta) = 0 \quad (2-a)$$

$$g_i = Q_G - Q_{Li}(V_i) - Q_T(V, \delta) = 0 \quad (2-b)$$

여기서, P_G, Q_G 는 각 모선에서의 유효, 무효전력 발전 출력을 나타내고 각 모선에서 계통에 유입되는 유효전력, 무효전력은 각각 $P_T(V, \delta), Q_T(V, \delta)$ 이다.

$P_{Li}(V_i), Q_{Li}(V_i)$ 는 각 모선에서의 부하 전력이다.

전력 방정식 식(2)에 식(1)의 관계를 대입하고 테일러 급수 전개하여 일차근사식을 얻으면,

$$\begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta g \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

J는 자코비안(Jacobian)행렬을 나타내며, 그 요소들은 다음과

같다.

$$\begin{aligned} J_{11} &= \partial f_i / \partial \delta_i & J_{12} &= \partial f_i / \partial V_i \\ J_{21} &= \partial g_i / \partial \delta_i & J_{22} &= \partial g_i / \partial V_i \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 자코비안 요소는 기존의 형태와 동일하며 J_{12}, J_{22} 의 대각요소에만 전압미분항이 추가된 형태이다.

3. 전압의존형 부하 모델을 적용한 검제 급전

경제급전문제는 전력을 공급하는 각 발전기의 penalty factor를 결정하는 것이라 할 수 있다[5][6]. 본 논문에서는 penalty factor의 결정에 필요한 B계수를 결정하는데 기존의 부하의 패턴을 무시하던 것을 전압 의존형 부하모델을 고려함으로써 실제 등에 좀더 근접하게 하였다.

3.1 B계수 산정

손실을 B계수로 표현하면 다음과 같다.

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

식 (5)는 가장 간단한 형태의 손실표현으로, 선형성분과 상수항을추가해서 전력계통 손실을 2차 방정식으로 좀더 정확하게 표현하면 다음과 같다.

$$P_L = \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K P_m B_{mn} P_n + \sum_{n=1}^K P_n B_{n0} + B_{00} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)의 2차 편도함수를 구하면 동일하게 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial P_m \partial P_n} = 2B_{mn} \quad (8)$$

식 (7), (8)에서 각 발전기의 출력에 대한 계통손실의 2차 편도함수를 구할 수 있다면, B계수를 구할 수 있다.

3.2 전압의존형 모델을 적용한 A계수 산정

N모선 계통에서 전력 손실은 다음과 같다.

$$P_L = 2 \sum_{n=1}^N |V_n|^2 g_{nn} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N |V_n| |V_k| g_{nk} \cos(\theta_k - \theta_n) \quad (9)$$

V_n : 각 모선의 페이저 전압 또는 $|V_n| \angle \theta_n$

g_{nk} : 모선 n과 모선 k사이에서 직접 연결된 어드미턴스의 실수부

g_{nn} : 모선 n에 연결된 모든 어드미턴스의 실수부 합

발전기 n의 증분손실을 표현하기 위해 윗식을 미분해서 chain rule을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \quad (10)$$

전력계통에서 발전기의 출력에 대한 전압위상각의 변화는 통상적인 운전영역에서는 매우 선형적이기 때문에, $\frac{\partial \theta_j}{\partial P_n}$ 대신 상수 A_{jn} 의 집합을 다음과 같이 표현할 수 있다[6].

$$A_{jn} = \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \approx \frac{\Delta \theta_j}{\Delta P_n} \quad (11)$$

상수 A_{jn} 을 구하기 위해서는 다음과 같은 과정을 필요로 한다.

- 1) 전압의존형 부하모델을 적용한 조류계산 해를 얻는다. 본 논문에서는 전력시스템의 실제운전에 급전한 시스템의 해석을 위하여 조류계산 과정에서 앞에서 언급한 다항식 모델의 형태를 적용하였다.
- 2) 선택된 부하 형태에서 총 수요전력의 두가지 변화 (+10%이거나 -10%)상태를 정한다.
- 3) 각각의 변화상태에 대한 P_n 값과 모든 전압위상각의 값은 전압의존형 부하모델을 적용한 조류계산으로 얻을 수 있다.
- 4) 새 번째 단계에서 얻은 값은 $\theta_j \sim P_n$ ($n=1,2,\dots,K$) 평면에서 세점을 나타내게된다.
- 5) 네 번째 단계에서의 결과를 이용, 2가지 변화상태에 대하여 구한 직선의 기울기가 A_{jn} 이다.

이러한 과정을 통해 $\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} A_{jn}$ 를 구할 수 있고,

또한 P_n 의 2차 편미분형태를 통해 식(7)과 식(8)을 이용하여 B계수를 계산한다.

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

4. 사례 연구

본 논문에서는 IEEE의 6모선 계통에 전압의존형 부하모델의 성분 계수를 달리함으로써 A계수 및 B계수의 계산 결과를 제시한다. 사용한 부하모형의 정전력, 정전류, 정임피던스 계수들은 표1과 같다.

표 1. 사례별 부하 성분 계수

Table 1. Load component coefficients by case

	α_F	α_G	β_F	β_G	γ_F	γ_G
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

표2, 표3, 표4는 모의 계통의 모선, 선로, 발전기 data를 나타낸다.

표 2. 6모선 계통의 모선 data

Table 2. Bus data of 6-bus system

모선	전압	위상	P_C	Q_C	P_L	Q_L
1	1.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.10	0.00	50.00	0.00	0.00	0.00
3	1.00	0.00	0.00	0.00	55.00	13.00
4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.00	0.00	0.00	0.00	30.00	18.00
6	1.00	0.00	0.00	0.00	50.00	5.00

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	6	0.123	0.518	0.00	1.0000
2	1	4	0.080	0.370	0.00	1.0000
3	4	6	0.097	0.407	0.00	1.0000
4	6	5	0.000	0.300	0.00	0.9756
5	5	2	0.282	0.640	0.00	1.0000
6	2	3	0.723	1.050	0.00	1.0000
7	4	3	0.000	0.133	0.00	0.9091

표 4. 6모선 계통의 발전기 data

Table 4. Generator data of 6-bus system

발전기	P_{Gmin}	P_{Gmax}	α	β	γ
1	10.0	100.0	0.050	1.0	0.0
2	10.0	100.0	0.010	1.0	0.0

표5, 표6은 사례별 A계수와 B계수의 계산결과를 비교한 것이다.

표 5. B 계수 비교

Table 5. Comparison of B coefficient

B 계수	기 준	CASE 1	CASE 2
B11	0.05704	0.05702	0.05703
B12	-0.02513	-0.02513	-0.02513
B21	-0.02513	-0.02513	-0.02513
B22	0.18476	0.18473	0.18474

표 6. A 계수 비교

Table 6. Comparison of A coefficient

A 계수	기 준	CASE 1	CASE 2
A11	0.00000	0.00000	0.00000
A12	-0.47072	-0.47068	-0.47069
A21	-0.35849	-0.35845	-0.35846
A22	0.00000	0.00000	0.00000
A31	-0.26981	-0.26978	-0.26979
A32	-0.47691	-0.47687	-0.47688
A41	-0.20603	-0.20600	-0.20601
A42	-0.46228	-0.46224	-0.46225
A51	-0.33775	-0.33771	-0.33772
A52	-0.36424	-0.36421	-0.36422
A61	-0.26668	-0.26665	-0.26666
A62	-0.47160	-0.47157	-0.47158

5. 결론

본 논문에서 제시한 방법은 경제급전 문제를 해석하는데 요구되는 B계수를 구하는 과정에서 A계수 결정알고리즘에서 가정했던 각 부하상태에 대한 조류조건을 계산함에 있어 전압의존형 정적부하모델을 적용함으로써 실제통에 보다 근접된 방법을 제시하고자 하였다. 계산결과에서 불수 있듯이 각 계수의 값이 부하의 각 구성별 비율에 따라 변화하는 것을 볼 수있고, 이것은 경제급전 문제를 해석하는데 있어 전압에 의한 부하변화의 영향을 고려해야할 필요성을 보여주는 것이다.

참고문헌

- [1] L. K. Kirchmayer, *Economic Operation of Power Systems*: John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1958.
- [2] O. I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory - Second Edition*: McGraw Hill Book Co., New York, 1982.
- [3] 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.
- [4] P. Kundur, *Power System Stability And Control*: McGraw Hill, Inc., New York, 1994.
- [5] A. J. Wood, and B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation & Control*: J. Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1984.
- [6] C. A. Gross, *Power System Analysis - Second Edition*: J. Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1986.
- [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