

경제급전을 위한 B-계수와 조류계산에 의한 페널티계수 산정법의 개발 및 성능비교

남해곤* 문영환** 최홍관** 남궁재웅**
*전남대학교 전기공학과 **한국전기연구소 시스템제어연구팀

Penalty Factor Computation Algorithms for Economic Load Dispatch Based on B-Coefficient and AC Load Flow and their Performance Comparison

H. K. Nam* Y. H. Moon** H. K. Choi** J. Y. NamKung**
*Chonnam National University **KERI

Abstract - This paper presents an improved method of calculating the penalty factors for economic load dispatch based on B-coefficient and AC load flow and their performance comparison. The algorithm for calculating B-coefficients by Meyer is improved and its performance is compared with that of AC load flow. The B-coefficient method is superior to the load flow method in its simplicity and computation speed. However, accuracy of the B-coefficient method is not satisfactory when it is applied to the ill-conditioned systems where generators produce excessive reactive power.

1. 서 론

총 연료비를 최소화하는 발전력분담을 얻는 경제급전 문제에서 송전손실을 고려한 발전기의 페널티계수의 정확한 산정이 매우 중요하다. 대부분의 EMS에서는 B-계수법을 사용하여 페널티 계수를 결정하는데, 지금까지 관행은 연간 수 개의 예상되는 부하수준에 대하여, 예를 들면 연간 첨두부하와 비첨두부하에서, B-계수를 계산하여 사용한다. B-계수법에서는 일단 B-계수가 결정되면, 페널티 계수 또는 발전기의 참여율 (participation factor)을 매우 간단한 연산에 의해 결정할 수 있는 장점이 있으나, 어떤 한 운전점을 기준으로 송전손실을 발전량의 이차함수로 적합하여 페널티계수를 계산하므로 운전상태가 기준점으로부터 상당히 이격되거나 네트워크 토폴로지가 변하는 경우 상당한 오차를 유발할 수 있다 [1,2]. 이에 반하여 AC 조류계산에 의한 페널티계수는 [1,2] 토폴로지와 부하 변경 등 계통운전조건의 변화를 정확하게 반영할 수 있는 장점이 있으나 계산시간이 비교적 많이 소요되는 단점이 있다. Happ에 의하면 [2] 두 방법간의 비용 차이는 네트워크 토폴로지가 변하지 않으면 그리 크지 않다.

본 논문에서는 Meyer가 제안한 B-계수 산정법의 [3] 계산과정을 개선한 페널티계수 산정법과 AC 조류 계산을 사용한 페널티 계수 산정 소프트웨어 (S/W) 개발하여 5-모선 계통, 6-모선 계통, New England 39-모선, 그리고 IEEE 118-모선 계통에 대해 적용하여 성능을 시험하였다.

2. 경제급전과 페널티계수

경제급전 알고리즘에서는 식 (1)과 같이 각 발전기의 연료비증분과 페널티계수 (penalty factor, PF)의 곱이 같도록 각 발전기의 출력을 결정한다 [1-4].

$$\frac{dF_i}{dP_i} PF_i = \lambda, \quad i=1,2,\dots,M \quad (1)$$

$$PF_i = \frac{1}{1-\partial P_L/\partial P_i} \quad (2)$$

위에서 F_i , P_i 그리고 PF_i 는 각각 발전기 i 의 연료비, 유효전력 출력, 페널티계수, 그리고 P_L 은 선로손실이다.

3. B-계수법

이 절에서는 Meyer가 제안한 B-계수 계산과정을 [3] 개선한 결과를 기술한다. 이 방법에서는 송전손실을 네트워크 방정식으로 나타내고, 이 방정식내의 부하전류를 기준프레임 변환과 non-conforming 부하 가정을 통하여 소거하여 발전기 전류만으로 나타내고 다시 발전기 전류를 발전기의 유효전력으로 나타낸다. 그 과정은 다음과 같다.

3.1 송전손실

B-계수법에서는 송전손실을 식 (3)-(4)와 같이 발전량의 이차함수로 나타낸다.

$$P_L = \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M P_n B_{nm} P_m + \sum_{i=1}^M B_0 P_i + B_{00} \quad (3)$$

또는

$$P_L = P_G^T \tilde{B} P_G + \tilde{B}_0 P_G + B_{00} \quad (4)$$

여기서, M 은 발전기 수이고

$$P_G = [P_1^G, \dots, P_M^G]^T \quad (5)$$

이 B-계수를 그림 1의 네트워크를 예로 들어 유도한다. 이 계통의 모션전압과 모션주입전류 벡터를 각각 V_{BUS} 와 I_{BUS} 로 표기하면 손실은

$$S_{loss} = P_{loss} + j Q_{loss} = I_{BUS}^H Z_{BUS} I_{BUS} \quad (6)$$

임을 보일 수 있다 [3-4]. 단, 그림에서 발전기는 모션번호 처음 1에서 M까지에 연결된 것으로 하였다.

3.2 기준프레임 변환에 의한 B-계수 산정

각 모선의 주입전류는 발전기 성분과 부하성분으로 나눌 수 있다. 즉,

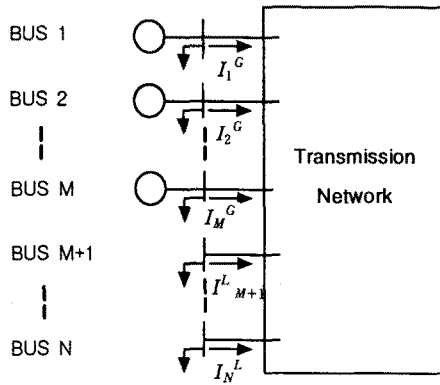


그림 2. 송전계통에 연결된 부하 및 발전기

$$I_i = I_i^G + I_i^L, \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

또한 각 모선의 전류는 총 부하전류의 일차함수로 표현된다는 non-conforming 부하를 가정한다. 즉

$$I_i^L = l_i I_L + I_i^0, \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

위에서 I_L 은 총부하전류, I_i^L , l_i , 과 I_i^0 는 각각 모선 i 에서의 부하전류, 부하 배분율, 정전류를 나타낸다.

기준 프레임 1로의 변환

식 (7)로 주어진 모선의 전류벡터를 식 (8)을 대입하여 나타내면

$$I_{BUS} = C_1 I_1 + I_0 \quad (9)$$

또는

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_M \\ \vdots \\ I_{M+1} \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{M \times M} & \vdots & I_1^0 \\ \dots & \dots & I_M^0 \\ 0_{(N-M) \times M} & \vdots & I_{M+1}^0 \\ \vdots & \vdots & I_N^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^G \\ \vdots \\ I_M^G \\ \vdots \\ I_L \\ \vdots \\ I_N^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1^0 \\ \vdots \\ I_M^0 \\ \vdots \\ I_{M+1}^0 \\ \vdots \\ I_N^0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이 식을 식 (6)에 대입하여 손실을 I_1 의 함수로 나타내면

$$S_{loss} = (C_1 I_1 + I_0)^H Z_{BUS} (C_1 I_1 + I_0) \quad (11)$$

기준 프레임 2로의 변환

식 (11)에서 기준 프레임 1에서의 전류 I_1 은 발전기 전류와 총 부하전류로 구성된다. 송전 손실을 발전기 유효전력만으로 나타내기 위한 두 번째 단계로 I_1 의 성분 중에서 총 부하전류 I_L 을 소거한 새로운 기준 프레임상의 전류 I_2 로 표현한다. 총 부하전류 I_L 은 slack 모선 r 의 전압관계식을 사용하여 소거된다. 이 모선의 전압은

$$V_r = \sum_{i=1}^M z_{ri} I_i^G + I_L \sum_{i=1}^N z_{ri} l_i + \sum_{i=1}^N z_{ri} I_i^0 \quad (12)$$

여기서 z_{ri} 는 Z_{BUS} 의 (r, i) -번째 요소이다. 이 식으로

부하 총 부하전류는

$$I_L = \sum_{i=1}^M t_i I_i^G + I^r \quad (13)$$

여기서

$$t_i = -z_{ri} / \sum_{j=1}^M z_{rj} l_j \quad (14)$$

$$I^r = (V_r - \sum_{i=1}^M z_{ri} I_i^0) / (\sum_{j=1}^M z_{rj} l_j) \quad (15)$$

식 (13)을 사용하여 기준 프레임 1의 전류의 성분 중에서 I_L 을 소거하면 I_1 과 I_2 관계는

$$I_1 = C_2 I_2 + D_2 I^r \quad (16)$$

또는

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_M \\ \vdots \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{M \times M} & \vdots \\ \dots & \dots \\ I_1^0, \dots, I_M^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^G \\ \vdots \\ I_M^G \\ \vdots \\ I_L^G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} I^r \quad (17)$$

식 (16)을 식 (11)에 대입하면 송전손실은 다음과 같이 계산됨을 보일 수 있다.

$$S_{loss} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 \quad (18)$$

여기서

$$I_0' = I_0 + C_1 D_2 I^r \quad (19)$$

$$H_1 = (C_1 C_2 I_2)^H Z_{BUS} (C_1 C_2 I_2) \quad (20)$$

$$H_2 = (C_1 C_2 I_2)^H Z_{BUS} I_0' \quad (21)$$

$$H_3 = (I_0')^H Z_{BUS} (C_1 C_2 I_2) \quad (22)$$

$$H_4 = (I_0')^H Z_{BUS} I_0' \quad (23)$$

발전기 출력으로의 변환

이 방법에서는 non-conforming 부하의 가정 외에 발전기 무효전력은 유효전력의 선형함수로 나타낼 수 있다는 가정이 사용된다. 즉,

$$Q_i^G = S_i P_i^G + Q_i^{G0}, \quad i = 1, \dots, M \quad (24)$$

여기서 S_i 와 Q_i^{G0} 는 기저부하와 비기저부하의 두 개의 운전점에서의 조류계산에 의하여 결정되는데, 편의상 Q_i^{G0} 는 모선의 무효전력 부하에 반영한다. 이 조건하에서 발전기 전류는

$$I_i^G = a_i^G P_i^G, \quad i = 1, \dots, M \quad (25)$$

$$a_i^G = \frac{\cos \theta_i + S_i \sin \theta_i}{|V_i|} + j \frac{\sin \theta_i - S_i \cos \theta_i}{|V_i|} \quad (26)$$

임을 보일 수 있다. 여기서 $|V_i|$ 와 θ_i 는 각각 모선 i 의 전압 크기와 위상각이다. 따라서, 발전기 전류벡터 I_2 는 발전기 유효전력 벡터 P_G 의 선형변환으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$I_2 = \text{diag}[a_1^G, \dots, a_M^G] P_G \quad (27)$$

이 식을 식 (20)-(22)에 대입하면 다음과 같은 B-계수를 얻을 수 있다.

$$B = \text{real}(F^H Z_{BUS} F) \quad (28)$$

$$B_0 = \frac{1}{2} [(I_0')^H Z_{BUS} F + F^H Z_{BUS} I_0'] \quad (29)$$

$$B_{00} = \text{real} [(I_0')^H Z_{BUS} I_0'] \quad (30)$$

$$F = C_1 C_2 \text{diag}[a_1^c, \dots, a_m^c] \quad (31)$$

위에서 모션 임피던스 행렬 Z_{BUS} 는 스파스하지 않다. 대형 전력계통에 적용하기 위해서는 Z_{BUS} 행렬과 어떤 벡터의 곱 연산을 아래 식과 같이 Z_{BUS} 대신 스파스한 모션 어드미턴스 행렬 Y_{BUS} 를 사용하고 선형연립방정식 문제로 변환하여 식 (28)-(30)을 계산한다 [3,6].

$$w = Z_{BUS} x = Y_{BUS}^{-1} x \Leftrightarrow Y_{BUS} w = x \quad (32)$$

4. AC 조류계산에 의한 페널티계수

4.1 기준발전기 페널티계수

여러 개의 발전기로 구성된 계통에서, 부하의 변동없이 발전기 i 의 출력이 ΔP_i 만큼 증가하고 계통의 전력수급이 평형을 이루기 위하여 기준발전기의 출력이 ΔP_{ref} 만큼 변한다고 가정하자. 발전기 i 의 출력과 기준발전기의 출력 외에는 다른 변동이 없으므로 전력수급의 평형을 위해서는 ΔP_{ref} 는 선로손실의 증가와 $-\Delta P_i$ 의 합이 되어야한다. 즉,

$$\Delta P_{ref} = -\Delta P_i + \Delta P_{loss} \quad (33)$$

β_i^{ref} 를 $-\Delta P_{ref}$ 와 ΔP_i 비라 정의하면

$$\beta_i^{ref} = -\frac{\Delta P_{ref}}{\Delta P_i} = \frac{\Delta P_i - \Delta P_{loss}}{\Delta P_i} \quad (34)$$

또는

$$\beta_i^{ref} = 1 - \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_i} \quad (35)$$

경제급전은 총 부하가 결정된 상태에서 총 연료비를 최소로 하는 운전상태이다. 따라서 기준발전기 페널티계수를 사용한 경제급전은 "임의의 발전기출력을 임의의 미소량만큼 기준발전기로 이동할 때 총 비용의 변화가 없을 때 발전기는 경제급전 상태에 있다"로 정의할 수 있다. 발전기 i 와 기준발전기의 출력이 각각 ΔP_i 와 ΔP_{ref} 만큼 변할 때 비용의 증가는

$$\Delta F_T = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} \Delta P_i + \frac{dF_{ref}(P_{ref})}{dP_{ref}} \Delta P_{ref} \quad (36)$$

경제급전 조건을 만족하기 위해서는

$$\frac{\partial F_T}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} + \frac{dF_{ref}(P_{ref})}{dP_{ref}} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P_i} = 0 \quad (37)$$

이 식에 식 (34)을 대입하면

$$\frac{1}{\beta_i^{ref}} \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \frac{dF_{ref}(P_{ref})}{dP_{ref}} \quad (38)$$

여기서 기준발전기 페널티계수를 다음 식으로 정의한다.

$$PF_i^{ref} = \frac{1}{\beta_i^{ref}} = -\frac{1}{\partial P_{ref} / \partial P_i} \quad (39)$$

B계수를 사용한 송전손실은 한 발전기에서의 출력증가는 다른 발전기 출력의 변동없이 총 부하의 증가와 선로손실의 증가에 의하여 흡수된다는 가정 하에 유도된다. 따라서 B-계수를 사용한 페널티계수와 기준모션 페널티계수는 서로 다른 조건하에 계산되므로 이들 두 페널티계수는 동일하지 않으며, 다음 관계가 성립함을 보일 수 있다 [4,6,7].

$$PF_i^{ref} = \frac{PF_i^B}{PF_{ref}^B} \quad (40)$$

위에서 위첨자 B는 B-계수법을 사용하여 계산한 페널티계수를 나타낸다.

4.2 AC 조류계산에 의한 페널티계수

AC 조류계산을 사용한 기준발전기 페널티계수의 유도는 지면의 제약으로 여기서는 식 (41)의 결과만 제시하고 자세한 것은 문헌 [4-6]을 참고하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} \partial P_{ref} / \partial P_1 \\ \vdots \\ \partial P_{ref} / \partial P_N \\ \dots \\ \partial P_{ref} / \partial Q_1 \\ \vdots \\ \partial P_{ref} / \partial Q_N \end{bmatrix} = (J^{-1})^T \begin{bmatrix} \partial P_{ref} / \partial \theta_1 \\ \vdots \\ \partial P_{ref} / \partial \theta_N \\ \dots \\ \partial P_{ref} / \partial |V_1| \\ \vdots \\ \partial P_{ref} / \partial |V_N| \end{bmatrix} \quad (41)$$

위에서 J 는 조류계산의 Jacobian 행렬이고, 발전기의 페널티계수는 좌측 벡터에서 발전기의 유효전력 성분과 관련된 항만을 선택하여 사용한다.

5. 사례 연구

B-계수를 사용한 페널티계수는 non-conforming 부하와 발전기 무효전력이 유효전력의 선형함수로 나타낼 수 있다는 가정 하에 유도되었다. 따라서 B-계수에 의한 페널티계수는 계통조건이 이 두 가정을 만족하지 않으면 상당한 오차를 유발할 수 있다. 이에 반하여 기준발전기 페널티계수의 유도에는 어떠한 가정도 사용되지 않기 때문에 정확하다고 할 수 있다. 따라서 이 절에서는 아래 4개의 계통에 대하여 B-계수에 의한 페널티계수와 기준발전기 페널티계수를 계산하여 B-계수의 정확성을 검증하였다. 비교의 편의를 위하여 B-계수를 사용하여 계산한 페널티계수에서 기준발전기의 페널티계수가 1이 되도록 환산한

$$\beta_i^B = (1 - \frac{\partial P_{loss}^B}{\partial P_i}) / (1 - \frac{\partial P_{loss}^B}{\partial P_i}) \quad (42)$$

를 정의하여 β_i^B 와 β_i^{ref} 를 비교하였다.

비교에 사용된 4개의 계통과 그 특성은 다음과 같다.
5모션 계통: 문헌 [7, pp200]에서 사용된 계통으로 2기의 발전기로 구성되고 일반적인 부하와 발전특성을

표 1. 페널티계수의 비교

계통	모선 번호	B-계수법 β_i^B	조류계산 β_i^{ref}
5-모선	3	1.0275	1.0345
6-모선	2	0.94347	1.0422
	3	0.97304	1.0506
New England	30	0.99168	0.99986
	33	0.96755	0.97014
	36	0.97104	0.97397
IEEE 118-모선	39	1.00386	1.00919
	10	1.13685	1.02347
	26	1.10619	1.02118
	65	1.02348	1.01666
	100	0.97400	1.01451

가진다. 즉, 부하와 발전기의 역률이 일반적인 0.9-1.0 범위에 있다.

6모선 계통: 문헌 [4, pp78]에서 B-계수를 유도하기 위해 사용된 계통으로 4-6번 모선에 연결된 무효전력 부하가 유효전력 부하와 그 크기가 같아 2-3번 모선에 연결된 발전기의 무효전력 출력이 유효전력보다 큰 비정상적인 계통이다.

New England 39모선 계통: 대규모 계통을 39모선 계통으로 축약한 실제 계통을 비교적 충실하게 반영한 계통이다 [8].

IEEE 118모선 계통: 54개의 모선이 발전기 모선이며 이중에서 30기 이상의 발전기에서 유효전력 출력이 영 또는 음의 값을 가지는 비정상적인 계통이다. 표 1은 각 계통의 β_i^B 와 β_i^{ref} 를 보여주고 있다.

표에서 정상적인 계통인 5-모선 계통과 New England 39-모선 계통에 대해서는 B-계수법으로 계산한 β_i^B 가 β_i^{ref} 와 비교적 양호하게 일치하고 있다. 그러나, 비정상적인 계통조건을 보이는 6-모선 계통과 IEEE 118-모선 계통에 대해서는 B-계수법으로 계산한 β_i^B 가 β_i^{ref} 와 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 이 두 계통에서 식 (24)의 계수 S_i 가 큰 값을 가지고 B-계수에 의한 페널티계수가 이 값에 민감하게 영향을 받기 때문으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 효율적인 경제급전 알고리즘의 구현을 위하여, 기존의 B-계수 산정알고리즘을 대폭 개선하고 AC 조류계산에 의하여 페널티계수를 계산하는 프로그램을 개발하여 두 방법을 비교하였다. AC 조류계산에 의한 페널티계수는 어떠한 가정도 사용되지 않기 때문에 정확하고 계통의 토폴로지 등 계통의 환경변화를 반영하는 장점이 있으나 계산시간이 B-계수법에 비하여 많이 소요되는 단점이 있다. B-계수법은 정상적인 계통조건에는 비교적 정확하나 비정상적인 계통조건에서는 상당한 오차를 보였다. 이 두 방법은 각각 장단점이 있으므로 서로 단점을 보완하도록 병용되면 매우 효율적인 알고리즘이 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 과학기술부의 특정엔지니어링 핵심 공동기반 기술개발 사업지원에 의해 수행되었음

[참고문헌]

- [1] H. H. Happ, Optimal Power Dispatch, IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, No. 3, 1974, pp. 820-830.
- [2] H. H. Happ, Optimal Power Dispatch a Comprehensive Survey, IEEE Trans. on PAS, Vol. 96, No. 3, 1977, pp. 841-854.
- [3] W.S. Meyer, "Efficient Computer Solution for Kron and Kron-Early Loss Formulas," Proc. 1973 PICA Conference, IEEE 73 CHO 740-1, PWR, pp. 428-432
- [4] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984.
- [5] T. E. Dy Liacco, discussion of reference [2].
- [6] 남 해곤, "경제급전을 위한 계통손실감도 산정 알고리즘의 개발"의 최종보고서, 1998. 7.
- [7] W. D. Stevenson, Elements of Power System Analysis, 4th Ed., McGraw-Hill Book Co., 1982.
- [8] EPRI, Phase II: Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Power System, Vol. 2, Final Report EPRI EL-2348, 1982, pp. 6.1-6.18