

EMS 기능고도화의 실현을 위한 계통 민감도 계산 프로그램 개발

최훈관 남궁재용 문영환 남해곤
한국전기연구소 전남대학교

Development of Power System Sensitivity Program for Enhanced Energy Management System

Heungkwan Choi, Jaeyong Namkung, Younghwan Moon, Haekon Nam
Korea Electrotechnology Research Institute, Chonnam Univ.

Abstract - The B-coefficient method is well-known and universally used method for its simplicity and computation speed. However, the B-coefficient method has a weak point of accuracy when it is applied to the ill-conditioned systems where generators produce excessive reactive power.

This paper describes the developed module to be applied to commercial program package of calculating the penalty factors by Jacobian method. The effectiveness of the proposed program has been demonstrated using the IEEE 30 bus system.

1. 서 론

EMS의 중심기능은 시스템의 경제적인 운영을 담당하는 기능으로서, 이는 기동정지계획과 경제급전분야로 나뉜다. 본 논문에서는, EMS의 독자적인 기술개발을 위한 첫 단계로서, 경제급전의 실현에 필수적인 계통 민감도 계산 프로그램 개발결과를 소개한다.

먼저, Meyer가 제안한 'B-계수 산정법'에 의한 송전계통의 손실 계산 방법을 분석하여 그 유용성과 제한성을 확인하였으며, 그 후에 Full 자코비안 또는 Decoupled Load Flow에서 사용되는 자코비안을 사용하여 발전력 변화에 대한 송전손실 민감도 계산을 효과적으로 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그리고, 여러 지역 계통이 연계된 경우의 연계 조류의 변화량에 대한 송전손실의 민감도를 용이하게 계산할 수 있도록 프로그램을 보완하였다. 한편, 개발한 프로그램을 일반적인 데이터 format은 물론 CAPI 형태의 전력계통 데이터베이스의 자료까지 처리할 수 있도록 확장시키면서, 기존의 EMS 프로그램에 탑재할 수 있도록 개발하였다.

개발한 Penalty Factor 계산 프로그램을 IEEE 30모선모델계통에 적용하여 프로그램의 실용성과 적정성을 검증하였다.

2. 계통 손실감도 계수 계산

2.1 경제급전과 페널티 계수

일반적으로 경제급전을 실현하기 위한 최적 발전력분담의 계산에는 발전기의 페널티계수를 사용하여 송전선로의 손실에 의한 비용을 고려한다. 그러나, 한전을 포함한 상당수 전력회사의 EMS에서는 B 계수법을 사용함으로써 계통의 손실 정보를 실시간으로 사용하지 못하는 문제점이 있다. B 매트릭스법을 사용하는 경우는 손실계수를 계통의 부하레벨, 연계선조류의 크기 및 계통의 상태변화에 따라서 표의 형태로 미리 결정하여 놓고, 실시간 정보와 가장 유사하게 근접되는 경우의 값을 활용하여 발전기의 페널티 계수를 결정하게 된다. 그러나 이 방법은 실제 계통의 상태와 표의 계통상태가 정확히 일치하지 않을 우려가 많고, 특히 계통이 자주 변화하는 고정장계통에서는 이용하기가 매우 불편하다는 단점이 있다. 그러므로, 실시간으로 계통의 상태와 부하레벨, 그리고 연계선 조류량을 구할 수 있도록, 전력 조류해의

계산과정 중에 일어나는 자코비안을 활용하여 계통의 감도계수를 계산하는, 수정된 EMS 경제급전 모듈의 개발 및 장착이 필요하다.

계통감도 계수는 실시간 모드에서 EMS에 사용되는 계수들과 계통 운용자를 도와줄 수 있는 여러 가지 정보를 포함한 계통감도로 나눌 수가 있는데 경제급전에 사용되는 계통감도 계수로는

- 각 발전기의 발전량 변화에 대한 계통 손실
- 연계 조류량 변화에 대한 계통손실

을 들 수 있다. 발전기의 페널티계수에 사용되는 계통손실 감도계수는 α_{Loss} / α_i 이며, 발전기의 페널티 계수 (Penalty factor) PF_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$PF_i = \frac{1}{1 - \alpha_{Loss} / \alpha_i} \quad (2.1)$$

2.2 B 계수법

송전손실을 발전기 출력의 2차 함수로 표현하는 B-계수 산정법은 Y_{BUS} 를 사용하고 reference frame transformation에 의해 변환된 송전손실 관계식을 이용한다.

모선주입 전력 S_i 는 다음과 같다.

$$S_i = P_i + jQ_i = I_i^* V_i \quad (2.2)$$

이 때의 모선전압과 모선주입전류로 표기된 송전 네트워크의 손실은 다음 식 (2.3)과 같이 계산된다.

$$S_{Loss} = P_{Loss} + jQ_{Loss} = \sum_{i=1}^N P_i + jQ_i = \sum_{i=1}^N I_i^* V_i = I_{BUS}^H V_{BUS} \quad (2.3)$$

송전손실을 Y_{BUS} 를 사용하여 표현하면, 식 (2.4)와 같다.

$$S_{Loss}^* = V_{BUS}^H I_{BUS} = V_{BUS}^H Y_{BUS} V_{BUS} \quad (2.4)$$

이 경우 모선전압은 식 (2.5)와 같이 근사화하여 계산하는데, 모선전류는 모선전력이 변하면 크게 변할 수 있기 때문에 많은 오차를 수반할 수 있다. 한편, Z_{BUS} 는 Y_{BUS} 처럼 Sparsity행렬이 아니기 때문에, 대규모 계통에 Z_{BUS} 를 직접 사용하면 많은 컴퓨터 기억용량을 필요로 하게 된다. 그러므로, 이를 처리하는 기법에 따라 송전손실 계수 계산 알고리즘의 효율성이 크게 달라질 수 있다.

$$V_i = \frac{P_i + jQ_i}{I_i} \quad (2.5)$$

2.2 자코비안을 이용한 계통손실 감도 계수 계산

i 발전기의 발전량이 P_i 로부터 미소량 ΔP_i 만큼 증대되어 발전량이 $P_i + \Delta P_i$ 로 변화하며 스윙모선을 제외한 발전기들의 발전량과 부하모선의 전력이 그대로 유지될 때, 계통손실은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\alpha_{Loss}}{\alpha_i} = \lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_{Loss}}{\Delta P_i} \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 이용한 계통손실 감도계수의 계산에는 두 가지의 방법이 있을 수 있다.

- $\frac{\alpha_{Loss}}{\alpha_i}$ 를 구하는 방법

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = \lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_{loss}}{\Delta P_i} = \lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_i + \Delta P_{ref}}{\Delta P_i} = 1 + \lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\Delta P_{ref}}{\Delta P_i} \text{ 인 관계}$$

를 이용하여 $\frac{\partial P_{ref}}{\partial P_i}$ 를 구한 후 이 값에 1을 더하여 구하는 방법
본 논문에서는 계산의 편의성을 고려하여 두 번째의 방법을 이용하였다.

i 발전기의 발전량 P_i 가 미소변화 할 때 위상각 θ 와 전압의 크기 V 가 변화하므로 P_{ref} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{ref} &= \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial |E_i|} \Delta |V_i| \\ &= \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_i} \Delta P_i + \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_i|} \frac{\partial |V_i|}{\partial P_i} \Delta P_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

한편 P_{ref} 는 무효전력 Q 에 의하여서도 변화하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{ref} &= \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial |E_i|} \Delta |V_i| \\ &= \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_i} \Delta Q_i + \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_i|} \frac{\partial |V_i|}{\partial Q_i} \Delta Q_i \end{aligned} \quad (2.8)$$

윗 식으로부터

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial P_j} = \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial P_j} + \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_i|} \frac{\partial |V_i|}{\partial P_j} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P_{ref}}{\partial Q_j} = \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial Q_j} + \sum_i \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V_i|} \frac{\partial |V_i|}{\partial Q_j} \quad (2.10)$$

이를 행렬의 형태로 바꾸어 써보면 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial Q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial \theta}{\partial P} \right)' & \left(\frac{\partial \theta}{\partial Q} \right)' \\ \left(\frac{\partial |V|}{\partial P} \right)' & \left(\frac{\partial |V|}{\partial Q} \right)' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial |V|} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

(2.11) 식으로부터 알 수 있는 바와 같이 스윙모선의 전력에 대한 감도는 (2.11) 식의 우변 행렬과 스윙모선 전력의 θ 및 V 변화량에 대한 감도에 의하여 구해 질 수 있다. (2.11) 식의 우변 행렬에 대한 값은 식(2.11)의 형태로 보아 쉽게 얻어질 수 없는 형태이다. 즉 모선전력과 무효전력이 독립변수가 되어 있고 모선전압의 각도 및 모선전압 V 가 종속변수로 되어 있기 때문에 해석적으로 구하는 것은 상당히 어렵다.

이러한 난점을 해결하기 위하여 주어진 식을 변형하고 연쇄의 법칙을 적용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial V} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)' & \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right)' \\ \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)' & \left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial Q} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)' & \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)' \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right)' & \left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial Q} \end{pmatrix} = J' \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial Q} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.12)$$

(2.12)식의 처음항과 끝항을 이용하면 다음 식이 유도된다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial Q} \end{pmatrix} = (J')^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial V} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

(2.12)식과 (2.13)식을 비교하면, 다음과 같은 식이 유도된다.

$$(J')^{-1} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial \theta}{\partial P} \right)' & \left(\frac{\partial \theta}{\partial Q} \right)' \\ \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)' & \left(\frac{\partial V}{\partial Q} \right)' \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

한편, 스윙모선의 발전력변화에 대한 감도는 J' 의 역행렬을 구할 필요 없이, 식 (2.12)식으로부터 유도된 다음과 같은 선형시스템을 풀어서 구한다.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial V} \end{pmatrix} = J' \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ref}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{ref}}{\partial Q} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

스윙모선전력의 θ 및 V 에 대한 편미분 $\frac{\partial P_{ref}}{\partial \theta}$, $\frac{\partial P_{ref}}{\partial V}$

은 전력방정식을 미분하여 해석적으로 구할 수 있다. 한편, 전력계통해석에서 사용되는 전압파라미터는 자코비안을 대칭화하기 위하여 $d|V_i|/|V_i|$ 대신 $d|V_i|$ 을 사용한다.

한편 실제 전력계통에서는 스윙모선을 하나로 하여 전력조류 문제를 풀지 않을 수도 있으며(여러 지역이 연결된 전력조류), 여러 가지 제어요소가 개입됨으로써 자코비안에 수정이 가해지기도 한다. 그리고, Fast decoupled 알고리즘을 사용하는 경우에는 계산시간을 크게 단축시킬 수 있게 된다.

3. 감도 계산 프로그램 개발

3.1 Penalty Factor 프로그램 개발

각각의 입력 데이터에 대하여 올바른 자료가 입력되었는지 확인하는 과정을 거친 후 모선, Branch, 변압기 등의 데이터를 할당하고 자코비안 행렬을 이용하여 Penalty Factor를 계산하도록 하였다. 이러한 처리 절차를 그림 3.1의 순서도에 자세히 나타내었다. 단, 그림 3.1에는 Power Flow 부분을 생략하였다. Penalty Factor 계산을 위한 자코비안 행렬의 취급 기법으로는 Forward and Backward Substitution, Unsymmetric Mixed Block Factorization, Combining Off-Diagonal 등이 사용되었다. 또한, 이 감도계산 프로그램은 EMS 중의 OPF Package의 한 모듈로 사용할 수 있도록 개발되었으며, OPF Package는 Fast Decoupled Power Flow, Newton-Raphson Power Flow, Sensitivity Calculation, Security Optimization, Cost Minimization, Loss Minimization 등으로 구성되어 있다.

3.2 EMS의 Database 환경

일반적으로 EMS는 방대한 전력계통 데이터의 처리를 위하여, Database-Server를 이용한 관계형 데이터베이스(RTDB)를 구축하고 있다. 그러나, 일반적인 계통 데이터는 IEEE Common format for Exchange of Solved Load Flow Data 형태, 또는 PSS/E format 이므로, 이러한 데이터베이스 형식을 사용할 수 있도록 프로그램을 구성하였다.

3.3 입출력 설계

자코비안법을 이용하여 계통 손실 감도를 계산하는데는 전력계통 데이터가 필요하다. 융통성을 높이기 위하여, 데이터의 입력은 보편적 형태인 IEEE format과 PSS/E format은 물론, EPRI에서 마련한 Open EMS를 위한 Database 규약인 CCAPI(Control Center Application Program Interface)의 데이터까지 인터페이스 할 수 있도록 설계하였다.

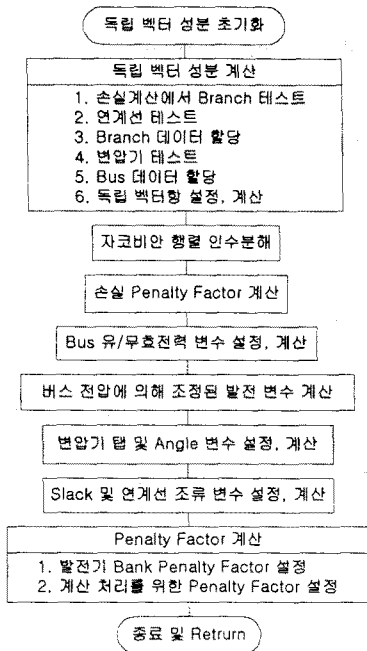


그림 3.1 감도 계산 Flowchart

4. 사례연구

4.1 IEEE 30 모델계통

다음 그림 3.2와 같은 IEEE 30모선 모델계통을 대상으로 하여, B 계수법과 자코비안을 이용한 계통손실감도계산법을 이용한 민감도 계산을 수행하였다.

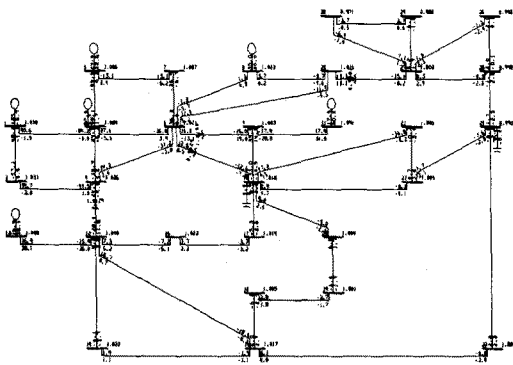


그림 3.2 IEEE 30 Bus Model System

4.2 손실 감도 계산 결과

가. IEEE 30 모선 모델 적용 결과

표 4.1에 IEEE 30 모선 모델에 대하여 B-계수법과 자코비안법을 사용하여 계산한 Generator Penalty Factor 계산결과를 나타내었다.

표 4.1 Penalty Factor 계산 결과

발전기 번호	모선 번호	패널티계수		
		B-계수법		AC 조류계산법
		Original	AC 조류계산 값으로의 환산	
1	1	0.926798E+00	0.100000E+01	0.100000E+01
2	2	0.950888E+00	0.102599E+01	0.103067E+01
3	5	0.100296E+01	0.108218E+01	0.109404E+01
4	8	0.974627E+00	0.105161E+01	0.106905E+01
5	11	0.985696E+00	0.106355E+01	0.106770E+01
6	13	0.961416E+00	0.103735E+01	0.105522E+01

나. 비교 및 검증

B-계수법과 자코비안법에 의한 손실감도 계산 결과를 비교해 본 결과 각각 0.45%, 1%, 1.6%, 0.4%, 1.7% 이므로, 최대 1.7%, 최소 0.45%의 오차를 가지고 있음을 알 수 있었다.

5. 연구결과

본 논문에서는, B 계수법에 의한 송전계통의 손실 계산 방법에 대하여 분석하여 그 유용성과 제한성을 확인하였다.

사례연구에서는 정상적인 계통을 대상으로 하였기 때문에 B-계수법과 자코비안법의 계산결과가 거의 차이가 없는 것으로 나타났지만, 발전기가 과도한 무효전력을 출력하는 경우와 같은 조건하에서는 B-계수법 계산결과에 상당한 오차가 수반될 수 있다. 이와 같이 B-계수법은 그 정확도에서 문제가 발생할 수 있으나, 자코비안법은 실시간에서 계통상태를 추정하고 이 추정된 계통의 데이터를 이용하여 실시간에서 송전손실의 민감도를 계산하기 때문에 정확한 결과가 구해진다. 한편, 본 연구 결과의 특징은 개발한 프로그램은 상용 모듈화 하였던 것이며, 한전을 비롯한 많은 전력회사의 EMS 프로그램에서 Penalty Factor의 계산을 위하여 사용하고 있는 B-계수법과의 교체가 용이하도록 설계하였다. 또한 개발한 프로그램은 여러 지역 계통이 연계된 경우의 연계 조류의 변화량에 대한 송전손실의 민감도를 비교적 용이하게 계산할 수 있도록 하였으며, 방대한 실제계통 데이터의 처리를 위한 관계형 데이터베이스(RTDB) 환경에서 이용 가능하도록 프로그램 모듈을 개발하였다. 프로그램의 입력데이터 형식은 가장 보편적인 형태인 IEEE Common format for Exchange of Solved Load Flow Data와 PSS/E Data format을 인터페이스하고 있으며, 차후에는 실제 계통 데이터를 적용하여 실용성과 정확성을 검증할 것이다.

본 연구는 1998년도 과학기술부의 특정 엔지니어링 핵심공통기반기술개발사업 지원에 의해 수행되었음

6. 참고 문헌

- [1] L. K. Kirchmayer, Economic Control of Interconnected System, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1959.
- [2] H. H. Happ, "Optimal Power Dispatch," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, No. 3, 1974.
- [3] H. H. Happ, "Optimal Power Dispatch - A Comprehensive Survey," H.H. Happ, "Optimal Power Dispatch," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, No. 3, 1974.
- [4] W. S. Meyer and V.D. Albertson, "Improved Loss Formula Computation by Optimally Ordered Elimination Techniques," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, No. 1, 1971.
- [5] G. L. Kusic, Computer-Aided Power System Analysis, New Jersey, Prentice-Hall, 1986.
- [6] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation and Control, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1984.
- [7] J. Carpentier, P. Bornard, "TOWARDS AN INTEGRATED SECURE OPTIMAL OPERATION OF POWER SYSTEM", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Nov. 1991, Hong Kong