

전력계통 선로조류 민감도 분석에 관한 연구

박종배*, 이찬주**, 신종린**, 김발호***

*안양대학교 전기전자공학과, **건국대학교 전기공학과, ***홍익대학교 전기제어공학과

A Study on the Transmission Line Flow Sensitivity Evaluation

Jong-Bae Park*, Chan-Ju Lee**, Joong-Rhin Shin**, Balho H. Kim***

*Anyang University, **Konkuk University, ***Hongik University

Abstract - 본 연구에서는 총괄비용법 가운데 선로의 이용정도에 따른 송전요금의 결정에서 활용될 수 있는 모선에 대한 선로의 조류 민감도를 유도하였다. 또한, 발전기 및 부하의 증가에 대한 조류 민감도를 일반화 하였으며, 기존의 반복적인 조류계산 수행 전략과 결과를 비교하였다. 제안된 방법론은 샘플 및 실계통에 적용하여 호주 빅토리아주의 선로 민감도 방법론과 비교 분석 하였다.

$$S_{jk} = P_{jk} + jQ_{jk} = \dot{V}_j I_{jk}^* = \dot{V}_j [y_{jk}(\dot{V}_j - \dot{V}_k) + y_{jj} \dot{V}_j \dot{V}_j^*] \quad (2)$$

$$P_{jk} = G_{jk} [-V_j^2 + V_j V_k \cos(\theta_j - \theta_k)] + B_{jk} [V_j V_k \sin(\theta_j - \theta_k)] \quad (3)$$

따라서, i-모선의 주입전력 증가에 따른 j-k 선로에서의 전력조류 민감도를 유도하면 아래의 식과 같이 된다.

1. 서 론

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} = [-G_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) + B_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k)] V_j V_k \left[\frac{\partial \theta_j}{\partial P_i} - \frac{\partial \theta_k}{\partial P_i} \right] + [-2G_{jk} V_j + G_{jk} V_k \cos(\theta_j - \theta_k) + B_{jk} V_k \sin(\theta_j - \theta_k)] \left[\frac{\partial V_j}{\partial P_i} \right] + [G_{jk} V_j \cos(\theta_j - \theta_k) + B_{jk} V_j \sin(\theta_j - \theta_k)] \left[\frac{\partial V_k}{\partial P_i} \right] \quad (4)$$

전력산업의 효율성 제고를 위한 전력산업 구조개편은 전력산업 주체의 수직적 분할과 관련된 요금의 분할로 특징지어진다. 이 가운데 송전선 이용료는 에너지 가격과 더불어 전기요금의 가장 중요한 부분을 차지하며, 효율적인 전력시장을 구축하기 위해서는 참여자에게 적절한 신호를 제공할 수 있어야 한다.[3,4,7] 송전선 요금을 결정하는 방법론은 크게 한계비용법과 총괄비용법으로 나뉘어진다. 한계비용법은 단기한계비용법과 장기한계비용법으로 구성되며, 총괄비용법은 우편요금제, 계약경로법, 거리용량병산제 등으로 구성된다.[5,6,7] 양 방법론 가운데 어느 한 방법론도 절대적이지 않다. 따라서, 각국은 한계비용법과 총괄비용법을 적절히 혼합하여 송전요금을 결정하고 있다.[2,3,4] 본 연구에서는 총괄비용법 가운데 가장 바람직하다고 판단되고 있는 거리용량병산제에서 활용될 수 있는 특정 모선(발전, 부하)에 대한 선로의 조류 민감도를 해석적인 방법으로 도출하였다.[1] 또한, 상기 방법론을 기존의 조류계산 전산모형을 반복적으로 수행하여 특정 선로의 각 모선에 대한 민감도를 계산하는 휴리스틱한 방법 및 호주 빅토리아주에서 사용하고 있는 모선 전력 변화에 대한 선로 전류의 변화 민감도(2)와 비교 분석하였다.

여기서, $\frac{\partial \theta_j}{\partial P_i}, \frac{\partial \theta_k}{\partial P_i}, \frac{\partial V_j}{\partial P_i}, \frac{\partial V_k}{\partial P_i}$ 값은 Jacobian의 역행렬로부터 얻어지는 값이다. (4) 식에서 전압을 일정하다고 가정하면 다음과 같은 전력조류 민감도 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} = [-G_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) + B_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k)] \cdot V_j V_k \cdot \left[\frac{\partial \theta_j}{\partial P_i} - \frac{\partial \theta_k}{\partial P_i} \right] \quad (5)$$

일반적으로 주입전력은 식(6)의 관계를 가지므로, 상기 식(4), 식(5)는 i-모선의 발전증가(i-모선 부하 일정)에 대한, j-k 선로의 유효전력의 민감도를 나타낸다.

$$P_i = P_{G,i} - P_{L,i} \quad (6)$$

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} = \frac{\partial P_{G,i}}{\partial P_i} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_{G,i}} = \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_{G,i}} \quad (7)$$

마찬가지로 i-모선의 부하증가(i-모선 발전력은 고정)에 대한 j-k 선로의 유효전력의 변화는 아래와 같이 되며, 식(4), 식(5)와 부호가 달라짐을 알 수 있다.

$$\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_i} = \frac{\partial P_{L,i}}{\partial P_i} \frac{\partial P_{jk}}{\partial P_{L,i}} = -\frac{\partial P_{jk}}{\partial P_{L,i}} \quad (8)$$

2. 본 론

2.1 선로의 전력조류 민감도

특정 선로(j-k 선로)를 흐르는 전력조류 가운데 특정 지역(i-모선)의 발전/부하가 미치는 영향을 분석하는 것은 송전선 이용료의 설정에서 매우 중요한 부분이다. 본 연구에서는 i-모선의 발전/부하를 단위만큼 증가하였을 때, j-k 선로의 전력조류에 미치는 영향을 일반적인 식으로 유도하였다. i-모선에서의 계통 주입전력의 증가에 따른 j-k 선로에서의 유효전력 민감도를 유도하면 아래와 같다. 즉, j-모선에서 j-k 선로로 주입되는 전류는 아래의 식과 같이 된다.

$$I_{jk} = y_{jk}(\dot{V}_j - \dot{V}_k) + y_{jj} \dot{V}_j \dot{V}_j^* \quad (1)$$

j-모선에서 k-모선으로 흐르는 전력방정식 및 선로의 조류는 아래와 같다.

2.2 선로의 전류 민감도

다음으로 호주의 빅토리아 주에서 사용하고 있는 방법론을 소개한다. i-모선의 발전/부하 변화에 대한 j-k 선로의 전류변화를 기준으로 선로 민감도를 결정하는 방법이다. 단, 여기에서는 j-k 선로의 충전용량은 무시하며, 따라서 j-k 선로를 흐르는 전류는 k-j에 흐르는 전류와 동일하게 되며 다음과 같은 전류 식이 얻어진다.

$$|I_{jk}|^2 = |y_{jk}|^2 [(V_j \cos \theta_j + jV_j \sin \theta_j) - (V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k)]^2 = |y_{jk}|^2 \{V_j^2 + V_k^2 - 2V_j V_k \cos(\theta_j - \theta_k)\} \quad (9)$$

따라서, i-모선의 주입전력 변화에 대한 j-k 선로의 전류변화는 아래와 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial I_{jk}}{\partial P_i} = \frac{|y_{jk}|^2 V_j V_k \sin(\theta_j - \theta_k) \left[\frac{\partial \theta_j}{\partial P_i} - \frac{\partial \theta_k}{\partial P_i} \right]}{\sqrt{(G_{jk}^2 + B_{jk}^2)(V_j^2 + V_k^2 - 2V_j V_k \cos(\theta_j - \theta_k))}} \left[\frac{\partial \theta_j}{\partial P_i} - \frac{\partial \theta_k}{\partial P_i} \right] \quad (10)$$

상기 식 (10)은 i-모선의 발전력 증가에 대한 j-k 선로의 전류변화를 의미함으로 i-모선의 부하 증가에 대한 j-k 선로의 전류변화 관계는 부호가 반대가 된다.

3. 사례 연구

본 연구에서는 상기 두 방법론과 전력조류 전산모형을 이용하여 휴리스틱하게 구하는 방법론의 결과와 비교하였다. 상기 민감도 해석 식을 사용하지 않고, j-k 선로에서의 전력조류 변화를 계산하는 절차는 아래와 같다.

첫째, 기준 케이스에 대한 전력조류계산을 실시하여, 각 선로에서의 조류 방향과 크기를 구한다.

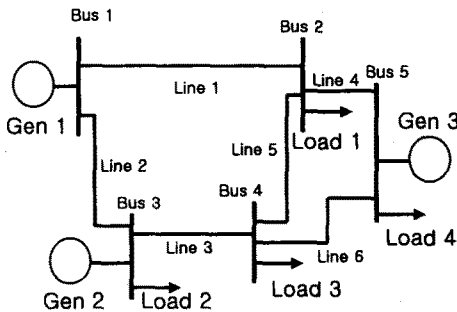
둘째, 특정 부하모선(i-모선)에서 부하를 단위(예:1MW)만큼 증가시키고, 전력조류계산을 실시한 다음 각 선로에서의 조류의 방향과 크기를 구한다.

셋째, 두 번째의 결과와 첫 번째의 결과로부터 i-모선의 부하증가에 대한 선로의 조류 변동을 계산한다.

넷째 : 모든 모선 부하모선에 대하여, 상기 두 번째 및 세 번째 과정을 거치면 선로의 민감도 행렬이 생성된다.

3.1 샘플 전력시스템

본 연구에서는 아래 그림과 같이 5-모선, 6-선로, 3-발전기, 4-부하를 가지는 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다. 또한, 1번 모선 발전기를 슬랙으로 지정하였다.



(그림 1) 샘플 전력시스템

대상 계통의 선로 및 조류계산 자료는 아래와 같다.

(표 1) 샘플 전력시스템 선로 데이터

From	To	R	X	Tap ratio
1	2	0.0050	0.020	1
1	3	0.0075	0.030	1
3	4	0.0050	0.020	1
2	5	0.0125	0.050	1
2	4	0.010	0.040	1
4	5	0.0175	0.070	1

(표 2) 샘플 전력시스템 조류계산 입력 데이터

모선	전압	위상각	P_L	Q_L	P_G
1	1.040	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.998	0.0	700.0	70.0	0.0
3	1.030	0.0	250.0	25.0	300.0
4	1.01	0.0	250.0	25.0	0.0
5	1.00	0.0	300.0	30.0	200.0

3.2 사례연구 결과

대상 시스템의 조류계산 결과는 아래의 표와 같다.

(표 3) 조류계산 결과

모선	V	Angle (DEG)	P_g	Q_g	P_L	Q_L
1	1.040	0.00	1039.24	55.98	0.00	0.00
2	0.998	-8.23	0.00	0.00	700.00	70.00
3	1.029	-4.52	300.00	100.00	250.00	25.00
4	1.010	-7.98	0.00	0.00	250.00	25.00
5	1.029	-10.23	200.00	151.00	300.00	30.00

상기 조류계산 결과 및 자코비안 역행렬로부터 식(5) 및 식(10)에 해당하는 선로의 민감도 행렬을 계산할 수 있다. 또한, 기준 케이스를 포함하여 5번의 조류계산을 수행하면, i-모선 부하증가에 따른 j-k 선로의 민감도를 계산할 수 있다. 이러한 3가지 방법론의 계산 결과는 아래에 수록하였다.

(표 4) i-모선 부하 증가에 대한 j-k 선로의 전류변화

Line No.	Bus from	Bus to	1	2	3	4	5
1	1	2	0.000	0.809	0.294	0.505	0.694
2	1	3	0.000	0.213	0.708	0.523	0.349
3	3	4	0.000	0.200	-0.284	0.491	0.328
4	2	5	0.000	-0.039	0.056	0.096	0.463
5	2	4	0.000	0.054	-0.077	-0.132	-0.024
6	4	5	0.000	0.047	-0.067	-0.114	0.363

(표 5) i-모선 부하 증가에 대한 j-k 선로의 조류변화

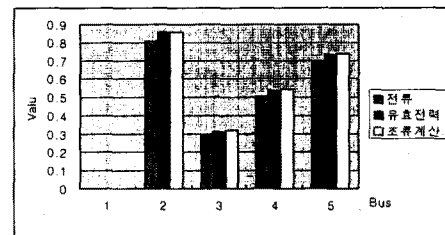
Line No.	Bus from	Bus to	1	2	3	4	5
1	1	2	0.000	0.855	0.311	0.533	0.733
2	1	3	0.000	0.219	0.729	0.538	0.360
3	3	4	0.000	0.210	-0.299	0.518	0.346
4	2	5	0.000	-0.052	0.074	0.127	0.614
5	2	4	0.000	-0.152	0.215	0.369	0.068
6	4	5	0.000	0.052	-0.074	-0.127	0.404

* 민감도 해석식 적용 결과

(표 6) i-모선 부하 증가에 대한 j-k 선로의 조류변화

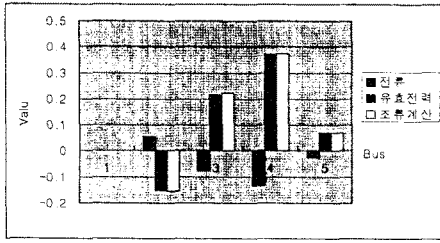
Line No.	Bus from	Bus to	1	2	3	4	5
1	1	2	0.000	0.857	0.321	0.545	0.737
2	1	3	0.000	0.222	0.721	0.531	0.356
3	3	4	0.000	0.213	-0.307	0.510	0.343
4	2	5	0.000	-0.053	0.077	0.130	0.613
5	2	4	0.000	-0.153	0.220	0.374	0.069
6	4	5	0.000	0.053	-0.077	-0.130	0.404

* 5번 조류계산 수행 결과(부하증가량 : 1MW)



(그림 2) 1번 선로에 대한 민감도 비교

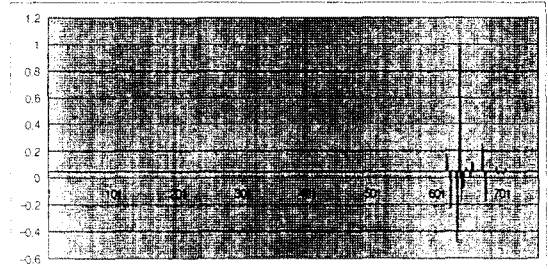
(그림 5) 신용인-청원 선로의 민감도: 평택 슬랙



(그림 3) 5번 선로에 대한 민감도 비교

위 그림 2는 선로 1에 대한 각 모선의 민감도를, 그림 3은 선로 5에 대한 각 모선의 민감도를 적용한 세 가지 방법 결과를 비교한 것이다(여기서, 전류는 전류의 민감도 식 적용을, 유효전력은 유효전력 민감도 식 적용을 의미함). 사례연구 결과, 전력조류 민감도 식에 의한 방법론의 결과는 모든 선로에서 유사하게 나타났다. 하지만 전류 민감도 식에 의한 결과는 5번 선로에서 방향이 바뀌고 크기도 상당한 차이가 발생하였다(기타 5개의 선로에 대해서는 유사한 결과 도출). 그림 1 계통에서 기존의 조류 방향은 5번 선로를 제외한 모든 선로에서 왼쪽에서 오른쪽으로 향하고 있고, 5번 선로는 2번 모선에서 4번 모선 방향이다. 따라서, 2번 모선에서의 부하의 증가는 당연히 5번 선로에 역조류로서 작용하여야 하며, 4번 모선의 경우는 선로조류 증가를 일으켜야 하지만, 전류의 민감도 식으로부터 유도된 식은 물리적인 의미와 일치하지 않음을 알 수 있다.

다음으로 상기 알고리즘을 우리나라 실계통(1999년 9월 1일 자료)에 적용하였다. 대상 시스템은 삼천포 발전기를 슬랙으로 하며, 전체 757개 모선 및 908개의 변압기 및 선로를 갖는다. 이 중 발전기 모선은 209개, 부하 모선은 548개이다. 이는 발전기 및 선로의 운전여부(on/off), 모선 분리 운전 여부가 반영된 수치이다. 본 연구에서는 주요 북상조류 선로 가운데 하나인 신용인-청원 선로에 대하여 선로의 민감도를 계산하여 보았다. 또한, 슬랙을 평택화력으로 변화 시켰을 때, 선로의 민감도가 어떻게 변하는가도 분석하였다. 아래의 두 개의 그림은 각각 슬랙을 변화하였을 때, 신용인-청원 선로의 민감도를 표시한 것이다.



(그림 6) 슬랙 변화시 신용인-청원선로 민감도 차이

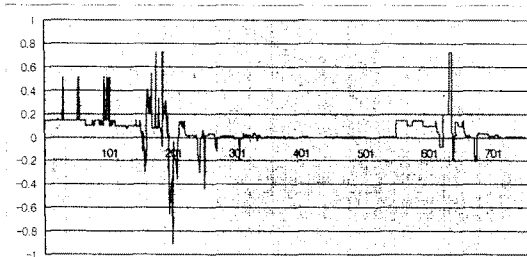
위의 차이로부터 삼천포 모선을 슬랙으로 하였을 때의 각 모선 부하에 대한 신용인-청원 선로의 민감도가 높게 나타났음을 알 수 있고, 일부 모선의 경우 그 영향이 상당히 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서, 선로의 민감도에 기초한 송전요금의 산정시에는 상당한 주의를 요한다.

4. 결 론

본 연구는 총괄비용법 가운데 선로의 사용 정도에 따른 요금 결정 방법론에서 활용될 수 있는 선로조류의 각 모선에 대한 민감도를 구하는 방법론을 제안하였다. 제안한 해석적인 방법론의 한번의 조류계산과 차코비안 역행렬로부터 선로조류의 민감도를 계산할 수 있으므로 상당히 편리하며, 기존의 전산모형을 이용한 휴리스틱한 방법론과 비교했을 때, 유사한 결과를 도출하였다. 또한, 이를 호주 빅토리아에서 사용하고 있는 선로전류 민감도와 비교하여, 빅토리아 방법론의 문제점을 도출하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, 1996.
- [2] Victorian Power Exchange (System Planning and Development Division), VPX Approved Statement of Charges: Transmission Use of System Charges for Victoria, April 1998.
- [3] NECA, Transmission and Distribution Pricing Review: Draft Report, March 1999.
- [4] KEMA Consulting Co., KEPCO Restructuring Programme Technical Advisor Pricing Methodology: Volume 1. Transmission Pricing Methodology, Jan. 2001
- [5] Young-Moon Park, Jong-Bae Park, Jung-Uk Lim, Jong-Ryul Won, "An Analytical Approach for Transaction Costs Allocation in Transmission System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, December 1998, pp. 1407-1412.
- [6] 박종배, 이원구, 김발호, "경제성 평가 방법을 이용한 전력락송 요금의 계산: 우편요금제를 중심으로", 전기학회논문지 A, 제49권, 제5호, 2000년 5월, pp. 199-204.
- [7] 한국전력공사, 송전선 혼잡처리 및 송전선 이용료 설정에 관한 연구, 2000. 2.



(그림 4) 신용인-청원 선로의 민감도: 삼천포 슬랙

