

평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 전체송전용량 산정 기법에 관한 연구

이병하\*, 백정명\*\*  
인천대\*, 인천대\*\*

A Study on Determination of Total Transfer Capability Using the Bus Power Sensitivity of Line Flows in Transfer Lines

Byung Ha Lee\*, Jung-Myoung Baek\*\*  
University of Incheon\*, University of Incheon\*\*

**Abstract** - 전체송전용량은 열 안정도, 과도안정도, 전압안정도 등에 의하여 제한을 받게 되는데, 한전 전력시스템에서는 주로 전압안정도에 의하여 제한을 받는다. 현재에도 상당한 규모로 북상조류가 흐르고 있어서, 전력시스템의 안정도를 고려한 용통전력의 한계가 중요한 문제로 부각되고 있다. 본 논문에서는 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용하여 전체송전용량을 산정하는 기법이 IEEE 39 모선 테스트 시스템에 적용되며, 실제적으로 운용하고 있는 경제급전의 순서인 Merit order(우선 순위)를 적용하여 전체송전용량 산정을 하는 것과의 결과를 비교 검토한다.

으로 표현된다. 이 식이 모선  $i$ 와 모선  $j$  사이의 선로에 흐르는 조류 방정식(Line flow equation)이다. 이 식 (1)을 모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 유효전력( $P_{ij}$ )과 무효전력( $Q_{ij}$ )으로 분리해서 나타내 보면,

$$P_{ij} = y_{ij} [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (2)$$

$$Q_{ij} = -y_{ij} [V_i^2 \sin(\theta_{ij}) + V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (3)$$

을 얻을 수 있고 위의 식 (2)가 유효 선로 조류 방정식, 아래 식 (3)이 무효 선로 조류 방정식이다. 이러한 한 쌍의 선로 조류 방정식은 각 선로마다 존재하므로  $L$ 개의 선로가 존재하는 전력 시스템이라면 모두  $2L$ 개의 선로 조류 방정식이 존재하게 된다. 전체송전용량 산정을 위한 접속선로가 주어지면 이 접속선로들이 평가 선로가 되며, 이 평가 선로들에 흐르는 유효전력의 합( $F_{flow}$ )은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$F_{flow} = \sum_{i,j \in N_L} y_{ij} [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (4)$$

$$= \sum_{l \in N_L} F_l$$

여기서  $N_L$ 은 평가선로의 집합을 나타내고, 모선  $i$ 와 모선  $j$ 는 각 평가선로에서의 from bus와 to bus의 모선들을 나타내고,  $F_l$ 은 평가선로  $l$ 의 유효전력의 크기를 나타낸다.

$m$  모선의 유효전력의 부하를 변화시키는 것으로 가정하면,  $m$  모선의 유효전력  $P_m$ 이 제어변수가 된다.

평가선로 조류의  $m$  모선 유효전력에 관한 민감도는 Chain rule을 적용하여 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$S_{(P_m)} = \frac{\partial F_{flow}}{\partial P_m} \quad (5)$$

$$= \sum_{i \in I, l \in N_L} \left( \frac{\partial F_l}{\partial \delta_i} \frac{\partial \delta_i}{\partial P_m} + \frac{\partial F_l}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_m} \right)$$

$$+ \sum_{j \in I, l \in N_L} \left( \frac{\partial F_l}{\partial \delta_j} \frac{\partial \delta_j}{\partial P_m} + \frac{\partial F_l}{\partial V_j} \frac{\partial V_j}{\partial P_m} \right)$$

3. 전체송전용량 산정 기법 적용 및 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제시하는 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 전체송전용량 산정 기법을 전력시스템에 적용하기 위해 IEEE 39 모선 테스트 시스템을 사용하였다(그림1). 10기의 발전기와 39개의 모선과 46개의 선로가 있다. 이 시스템을 그림 1에서와 같이 굵은 사선으로 2 개의 지역으로 크게 나누어, 이 사선 아래 지역을 A Area, 이 사선 위 지역을 B Area라고 표기한다. 이 때, A 지역과 B 지역을 연결하는 표 1에서와 같이 접속선로가 3 개 존재한다. 이 접속선로를 통하여 A 지역으로부터 B 지역으로 송전할 수 있는 전체송전용량을 산정한다. A 지역 내의 발전기들은 발전량을 점차 증가 시키고, B 지역 내의 발전기들은 발전량을 점차 감소시켜 가면서 반복조류계산기법을 적용하여 분석하되, 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 순서와 통상적으로 사용하고 있는 Merit order에 의한 순서의 시나리오에 따라 전체송전용량을 산정하고 그 결과를 분석한다. A 지역과 B 지역은 그림 1에서 보여준 바와 같고, 10개의 발전기들의 발전비용은 발전기의 순서대로 G1부터 G10까지 순서대로 작아진다고 가정하고, Merit order는 이 순으로 매겨진다. 이러한 IEEE 39 모선 테스트 시스템에 대하여, 접속선로 조류

1. 서 론

우리나라의 전력산업은 전력을 생산하는 6개의 발전회사와 송변배전 설비의 한전과 전력운용의 전력거래소 등의 기능별 회사들로 분리되어 경쟁체제로 운영되고 있다. 경쟁체제 도입으로 형성된 전력시장에서 경제적인 전력거래가 무리 없이 수행될 수 있도록 지역 간의 전력수송이 가능해야 된다. 우리나라의 전력계통은 지역적 특성상 서해안지역, 호남지역, 영남지역 등의 원거리 발전군과 대규모 부하밀집지역인 수도권지역으로 나눌 수 있고, 이들 간의 원활한 전력수급을 위하여 원거리 발전군으로부터 수도권으로 상당한 규모의 북상조류가 흐르고 있어서, 전력시스템의 안정도를 고려한 용통전력의 한계가 중요한 문제로 부각되고 있다.

용통전력 한계의 지표로 많이 활용되고 있는 전체송전용량은 열 안정도, 과도안정도, 전압안정도, 미소신호 안정도 등의 전력시스템의 안정도에 의하여 어떤 값으로 제한되어 결정되며[1-2], 전체송전용량은 가장 심각한 상정사고에 대하여 안정도 조건들을 만족하면서 공급할 수 있는 최대 송전 전력을 말한다. [3]에서 전압안정도 관점에서 여러 가지 무효전력 보상설비들의 효과를 고려한 송전용량 한계에 관한 연구가 수행되었다. 대규모 시스템에 대하여 연속조류계산 기법에 근거한 CPFLOW 툴을 사용하여 최대송전용량 한계를 계산하는 연구가 발표되었다 [4]. 퍼지 알고리즘을 적용하여 가용송전용량을 계산하는 기법이 제시되고 이를 간단한 시스템에 적용하는 연구가 수행되었다[5].

현재, 한전 시스템의 경우 전체송전용량은 주로 전압 안정도에 의해 제한을 받고 있으므로 전압안정도를 고려하여 전체송전용량을 산정하고 있으며, 발전기들은 경제급전 운용을 하고 있으므로 실제통 운용에 기반을 두어 Merit order(우선 순위)를 적용하여 발전기들을 투입하거나 제거하는 시나리오를 사용하여 전체송전용량을 산정하고 있다. 그러나 Merit order가 아닌 접속선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용하여 전체송전용량을 산정할 수 있다.

본 논문에서는 평가선로인 접속선로 조류의 모선 전력 민감도식을 유도하고, 접속선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 전체송전용량 산정 기법을 소규모 전력시스템에 적용하여 분석한다. 그리고 실제적으로 운용하고 있는 경제급전의 순서인 Merit order를 적용하여 전체송전용량 산정을 하는 것과의 결과를 비교하여 검토한다.

2. 평가선로 조류의 모선 전력 민감도

모선  $i$ 에서 모선  $j$ 로 흐르는 유효전력( $P_{ij}$ )과 무효전력( $Q_{ij}$ )은

$$P_{ij} + jQ_{ij} = \overline{V_i I_{ij}} \quad (1)$$

$$= V_i e^{j\delta_i} [y_{ij} e^{-j\theta_{ij}} (V_i e^{-j\delta_i} - V_j e^{-j\delta_j})]$$

$$= y_{ij} (V_i^2 e^{-j\theta_{ij}} - V_i V_j e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})})$$

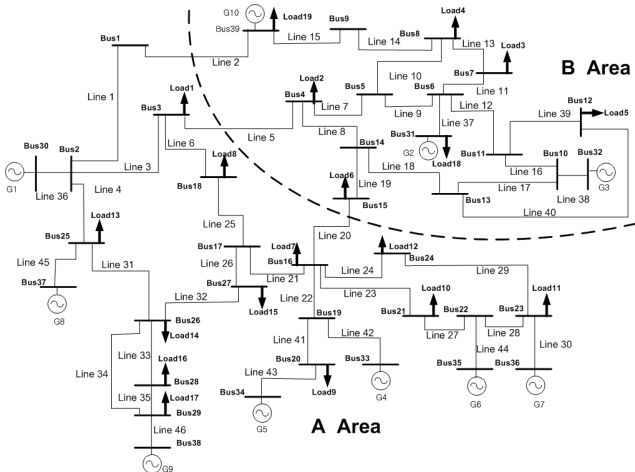
의 모선 전력 민감도를 계산하고, 발전기 모선들에 대한 순위를 나타내 보면 아래의 표 2와 같다.

이 접속선로의 송전용량의 측면에서 정적 전압 안정도를 고려한 가장 심각한 상정사고는 모선 16과 모선 15 사이의 선로인 Line 20의 탈락 시이다. 이 상정사고에 대하여 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 순서의 시나리오에 따라 전체송전용량을 산정한 결과가 표 3에 제시되어 있다.

가장 가혹한 상정사고인 발전 선로 Line 20의 탈락 시의 전체송전용량은 1294.345[MW]인 것으로 산정되었고, 정상상태에서의 각 평가선로에 흐르는 선로 조류는 표3에서와 같다.

그리고, 평가선로 조류인 접속선로의 모선 전력 민감도를 활용한 순서와 통상적으로 사용하고 있는 Merit order에 의한 순서의 시나리오에 따라 전체송전용량을 산정한 결과가 표4에 제시되어 있다. Merit order에 의한 순서의 시나리오에 따라 전체송전용량을 산정한 결과치는 1286.662[MW]이다. 이 결과를 보면 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 경우에 비하여 발전력이 변경되는 발전기의 분포가 달라지므로 평가선로에 흐르는 선로의 조류 분포가 달라지는 것을 알 수 있으며, 송전선로 손실의 크기와 분포도 달라진다. 그런데, 각 평가선로들의 선로조류의 합인 전체송전용량은 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

이러한 결과를 검토해 보면, 송전용량 차이는 송전선로 조류의 분포 변화에 의한 송전손실 분포 변화의 영향을 받으나, 양 케이스의 송전손실이 크게 차이가 나게 되는 특별한 상황이 아니면서 거의 비슷한 송전용량의 값을 나타낸다.



〈그림 2〉 IEEE 39 모선 테스트 시스템

〈표 1〉 A 지역과 B 지역 간의 접속 선로

No	선로 번호	접속 선로	
		FROM BUS	TO BUS
1	Line 2	1	39
2	Line 5	3	4
3	Line 20	16	15

〈표 2〉 접속선로 조류의 발전 전력에 관한 민감도

민감도 순서	발전기	접속선로 조류의 발전 전력에 관한 민감도
1	G1	0.998
2	G6	0.992
3	G7	0.986
4	G5	0.977
5	G4	0.976
6	G8	0.965
7	G9	0.950
8	G3	-0.990
9	G10	-0.996
10	G2	-0.998

〈표 3〉 접속 선로의 선로조류와 전체송전용량

No	접속 선로		선로 조류 [MW]
	FROM BUS	TO BUS	
1	1	39	198.423
2	3	4	554.488
3	16	15	541.434
계 (전체송전용량)			1294.345

〈표 4〉 발전량 변경 기법에 따른 전체송전용량 비교

No	접속 선로		민감도 순서에 따른 산정 (선로조류[MW])	Merit order에 따른 산정 (선로조류[MW])
	FROM BUS	TO BUS		
1	1	39	198.423	142.019
2	3	4	554.488	449.471
3	16	15	541.434	695.172
계 (전체송전용량)			1294.345	1286.662

#### 4. 결 론

현재, 한전 시스템의 경우 전체송전용량은 주로 전압 안정도에 의해 제한을 받고 있으므로 전압안정도를 고려하여 전체송전용량을 산정하고 있으며, 발전기들은 경제급전 운용을 하고 있으므로 실제통 운용에 기반을 두어 Merit order를 적용하여 발전기들을 투입하거나 제거하는 시나리오를 사용하여 전체송전용량을 산정하고 있다. 그러나 평가선로 조류인 접속선로의 모선 전력 민감도를 활용하여 전체송전용량을 산정할 수 있다.

본 논문에서는 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용한 전체송전용량 산정 기법을 적용하는 것에 대하여 분석하고 상용의 Merit order를 적용하여 전체송전용량 산정을 하는 것과의 결과를 비교하여 검토 하였다.

시뮬레이션 결과를 검토해 보면, 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용하는 경우는 Merit order에 의하여 전체송전용량을 산정하는 경우에 비하여 발전력이 변경되는 발전기의 분포가 달라지므로 평가선로에 흐르는 선로의 조류 분포가 달라지고 송전손실 분포 변화에 의한 영향을 받지만, 각 평가선로들의 선로조류의 합인 전체송전용량은 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 평가선로 조류의 모선 전력 민감도를 활용하는 순서에 의한 시나리오에 따라 산정되는 전체송전용량의 값은 실제적으로 운용하고 있는 경제급전의 순서인 Merit order에 의한 시나리오에 따라 산정되는 전체송전용량의 값과 약간의 차이는 있으나 거의 비슷한 수준이라는 것을 알 수 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] P.W. Sauer, K.D. Demaree and M.A. Pai, "Stability limited load supply and interchange capability", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No. 11, pp. 3637-3643, Nov., 1983.
- [2] James D. McCally, John F. Dorsey, Zhihua Qu, "A new methodology for determining transmission capacity margin in electric power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 944-951, Aug., 1991.
- [3] C. S. Indulker, B. Viswanathan, and S. S. Venkata, "Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compensated Schemes for A.C Transmission Systems", IEEE Trans.-PD, Vol. 4, No. 2, pp. 1246-1252, 1989.
- [4] A. J. Flueck, H. D. Chang, and K. S. Shah, "Investigating the Installed Real Power Transfer Capability of a Large Scale Power System Under a Proposed Multiarea Interchange Schedule Using CPFLOW", IEEE Trans.-PS, Vol. 11, No. 2, pp. 883-889, 1996.
- [5] A. B. Khairuddin, S. S. Ahmed, M. W. Mustafa, A. A. M. Zin, H. Ahmad, "A novel method for ATC computations in a large-scale power system", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1150-1158, May 2004.