

Monte Carlo Simulation을 이용한 Power Wheeling 영향평가 알고리즘에 관한 연구

° 조재한* 남광우* 김용하* 이 범** 최상규***

*인천대학교 전기공학과 **여수대학교 전기공학과 ***인양과학기술대학교 전기제어과

A Study on Algorithm for Evaluating Power Wheeling Effects using Monte-Carlo Simulation

Jae-Han Cho* Kwang-Woo Nam* Yong-Ha Kim* Buhm Lee** Sang-Gyu Choi***

*University of Incheon **Yosu National University ***Anyang Technical College

Abstract - This paper presents a algorithm for evaluating contingency case power wheeling effects using Monte-Carlo simulation. The effects of wheeling on generating cost, transmission losses, and system security are considered. For a specific operating condition, the effects are quantified by the sensitivity of specific quantities of interest with respect to wheeling level. This model is utilized within a Monte-Carlo simulation to calculate probability distribution functions of the incremental effects of wheeling on operating cost, transmission losses, and system security. The model and solution methods are applied on a IEEE RTS-96 system power system and the results are presented.

1. 서 론

최근, 미국과 일본 등의 여러개의 전력회사를 소유하고 있는 국가들에서 나타나듯이 송전망의 사용에 대한 규제완화(Deregulation)와 송전망의 자유로운 접근(Open access)과 같은 전력산업의 새로운 추세는 전력계통의 운용에 새로운 문제를 야기시키고 있다. 우리나라의 전력사업도 현재와는 판이하게 상이해질 것으로 예상되며, 특히 송전계통의 운용 및 계획은 질적으로 달라질 것이다. 그러므로 현재 우리나라의 전력사업에 대한 변화추이, 전력사업의 규제완화로 인한 민자화, 밀집 않은 장래의 인접국가의 다른 계통과의 연계가능성 등을 고려할 때 전력탁송(Power Wheeling)에 대한 연구가 꼭 필요하다고 하겠다.

전력탁송은 제 3자가 소유하고 있는 송전망을 통하여 전력판매자로부터 전력구매자에게 전력을 공급하는 것으로서 정의된다. 이때, 전력탁송에 대한 가격결정은 전력탁송을 제공하는 것이 탁송회사와 전력구매자 양자에 경제적으로 유익한가를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 따라서, 지금까지의 전력탁송에 대한 대부분의 연구는 전력탁송에 대한 가격결정을 어떤 방법으로 할 것인가에 집중되어 왔다[2,3,4]. 그런데, 계약된 전력조류가 탁송회사의 회로망을 통해 들어와서 나갈 때에 탁송회사 회로망의 전력조류도 변하게 된다. 이 경우 전력탁송은 탁송회사의 계통안전도에도 영향을 주게 된다. 따라서, 전력탁송에 따른 계통안전도에 관한 영향평가 연구도 필요하다고 하겠다.

본 연구에서는 전력탁송에 따른 탁송회사의 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 미치는 영향을 분석할 수 있는 기법을 개발함에 연구의 목적을 두고 있다. 이의 방법으로 몬테카를로 시뮬레이션을 도입하여 상정사고를 고려한 전력탁송에 따른 영향평가를 효율적으로 할 수 있도록 하였다. 또한, 이를 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하고, 실제계에 적용하여 유용한 정보를 도출하였다.

2. 문제의 정식화

본 연구에서 제안하는 방법의 알고리즘의 전반적인 흐름도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 보듯이 제안하는 알고리즘은 몬테카를로 시뮬레이션에 기초하여 N_{max} 시행의 반복계산이 수행된다. 각 반복계산에서 먼저, 지정된 계통상태가 임의로 선택된다. 그후에 최적운전점을 결정하기 위한 최적조류계산이 수행된다. 그 운전점에서 전력탁송에 관한 관심량인 발전비용, 송전손실, 계통안전도의 감도가 계산되고 저장된다. 이때, N_{max} 시행의 반복계산 결과는 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 대한 전력탁송의 증분영향의 확률분포함수를 결정하기 위하여 이용된다. 이 확률분포함수는 전력탁송의 영향에 대한 실질적인 상황을 나타내게 된다.

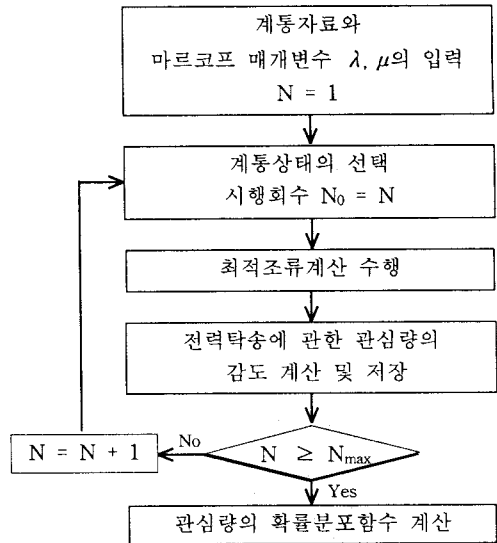


그림 1. 제안한 알고리즘의 흐름도

지금, 전력탁송에 대한 영향평가를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 식으로 표현되는 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수 그리고 조류안전도지수를 사용하였다.

1) 발전비용

$$F_1 = \sum_{j=1}^{N_G} (a_j + \beta_j P_{Gj} + \gamma_j P_{Gj}^2) \text{ [\$]} \quad (1)$$

단, P_{Gj} : j 발전기 MW 출력

a_j, β_j, γ_j : j 발전기의 연료비함수 계수

N_G : 발전기 수

2) 송전손실

$$F_2 = \sum_{l=1}^{N_l} R_l I_l^2 \text{ [MW]} \quad (2)$$

단, R_l : l 선로의 저항
 I_l : l 선로의 전류
 N_l : 선로 수

3) 전압 안전도 지수

$$F_3 = \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{V_i - V_{i,av}}{V_{i,st}} \right)^2 \quad (3)$$

단, V_i : i 모선의 전압크기
 $V_{i,av} = \frac{1}{2} (V_i^{\max} + V_i^{\min})$
 $V_{i,st} = \frac{1}{2} (V_i^{\max} - V_i^{\min})$
 w_i : i 모선의 가중치

4) 조류 안전도 지수

$$F_4 = \sum_{l=1}^{N_l} w_l \left(\frac{S_l}{S_l^{\max}} \right)^2 \quad (4)$$

단, S_l : l 선로의 피상조류
 S_l^{\max} : l 선로의 MVA 용량
 w_l : l 선로의 가중치

전력계통에 있어서 전력탁송의 영향은 계통의 운전점 근처에서 전력탁송에 기인한 상기의 관심량에 대한 증분 변화에 의해 측정할 수 있다.

2.1 최적조류계산

본 연구에서는 전력탁송에 대한 영향평가를 위한 관심량의 감도계산을 위해 수렴성이 보장되며 대규모계통에 대해서도 계산시간이 빠른 참고문헌[1]에서 제안된 최적조류계산법을 이용하였다.

2.2 감도계산

그림 2는 i 모선에 전력판매자가 연결되고, j 모선에 전력구매자가 연결되어 있는 것을 나타낸다.

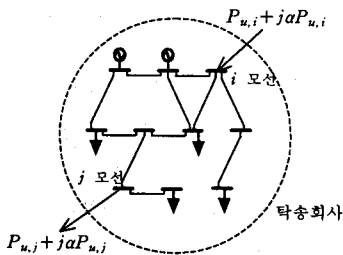


그림 2. 탁송계통

이 그림에서 P_u 는 전력탁송변수를 의미하며, α 는 탁송 전력의 유효전력에 대한 무효전력의 비를 나타낸다. 계통에 대한 전력탁송의 영향은 식(1)~(4)를 P_u 로 미분함으로써 정량화 되어질 수 있다. 본 연구에서는 탁송전력 P_u 에 대한 식(1)~(4)의 미분치의 효율적인 계산을 위해 다음 식(5)로 표현되는 Costate 방법을 이용하였다.

$$\frac{dF(x, P_u)}{dP_{u,i}} = \frac{\partial F(x, P_u)}{\partial P_{u,i}} - \hat{x}^T \tau \frac{\partial g(x, P_u)}{\partial P_{u,i}} \quad (5)$$

$$\text{단, } \hat{x}^T = \frac{\partial F(x, P_u)}{\partial x} \left[\frac{\partial g(x, P_u)}{\partial x} \right]^{-1}$$

$\frac{\partial g(x, P_u)}{\partial x}$: Jacobian

2.3 몬테카를로 시뮬레이션

지금까지 몬테카를로 시뮬레이션은 전력계통확률분석에 있어서 광범위하게 이용되어져 왔다. 몬테카를로 시뮬레이션의 기본적인 아이디어는 매우 단순하다. 즉, 몬테카를로 시뮬레이션은 확률분포에 따른 모든 가능한 계통상태 중에서 합리적인 개수의 난수발생으로 지정한 계통을 시뮬레이션하는 것이라 할 수 있다. 이때, 시뮬레이션의 결과는 관심량에 대한 확률분포함수로 나타나며, 이 결과들은 기대치와 같은 적당한 확률적인 지표의 계산에 이용된다. 한편, 몬테카를로 시뮬레이션에 있어서 주요한 문제는 첫째로 시험회수는 계통의 오류의 모든 가능성을 포착할만큼 충분히 커야 한다. 그리고 두 번째는 지정된 시험에 대한 영향의 분석은 가능한 현실에 가까워야 한다. 본 연구에서는 전력계통에 대한 전력탁송의 영향을 평가하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션이 선로와 발전기 고장의 조합을 포함할 수 있는 계통상태를 임의로 선택하기 위하여 적용된다. 그후 최적조류계산이 일체의 계통운전조건을 결정하기 위하여 수행되며, 이 운전점에서 관심량에 대한 전력탁송의 영향은 계통에 있어서 어떤 두 모선사이의 전력탁송에 관한 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수, 조류안전도지수에 대한 감도를 계산하는 것에 의해 양적으로 표현되고 그 결과들이 저장된다. 그리고 충분한 수의 실험을 위한 반복계산이 수행되어진 후에 계산된 감도에 대한 확률분포를 얻을 수 있다.

3. 사례 연구

본 연구에서 제안한 알고리즘을 IEEE RTS-96 신뢰도 테스트 계통에 적용하였다. 그림 3 ~ 10은 계통의 어떤 두 모선사이의 탁송에 관하여 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수, 조류안전도지수의 최대감도에 대한 확률분포함수이다. 이때 α 는 0.0과 0.4의 두가지 경우에 대해서 테스트하였으며 확률분포함수는 500회 실험의 반복계산만에 얻어졌다. 최대감도는 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 가장 바람직 하지 못한 영향을 준다는 것을 의미한다. 한편, 이들 감도에 대한 확률분포는 광범위한 운전상태에 걸쳐서 전력탁송의 영향에 대한 실질적인 상황을 보여준다.

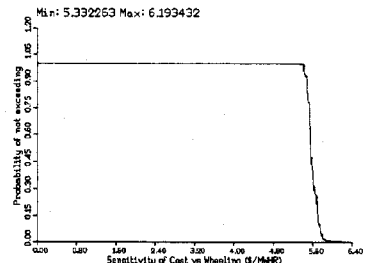


그림 3. 발전비용 감도의 확률분포함수($\alpha=0.0$)

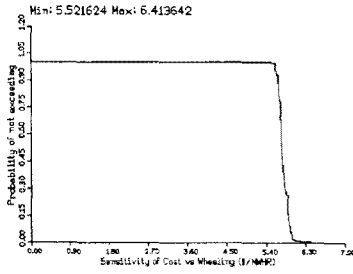


그림 4. 발전비용 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)

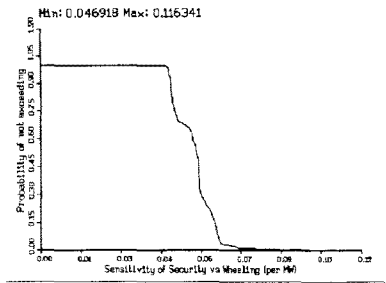


그림 9. 조류안전도지수 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)

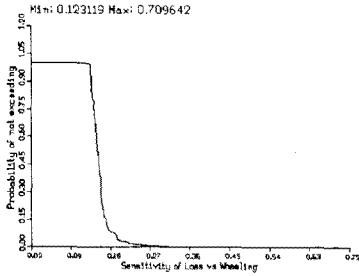


그림 5. 송전손실 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)

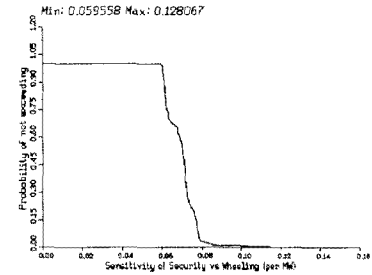


그림 10. 조류안전도지수 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)

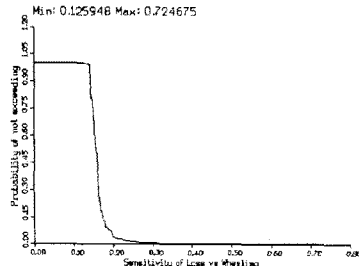


그림 6. 송전손실 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)

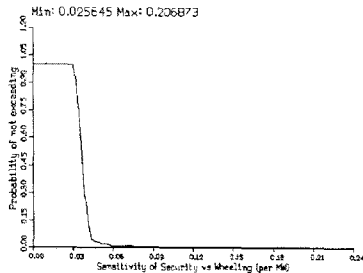


그림 7. 전압안전도 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)

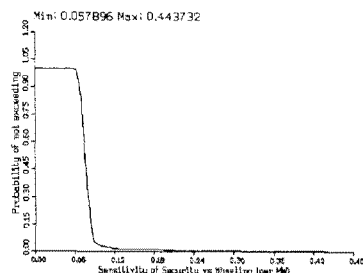


그림 8. 전압안전도 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)

4. 결 론

본 연구에서는 상정사고까지를 고려한 전력탁송에 대한 영향평가를 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 전력탁송 영향평가 알고리즘을 제안하였다.

그리고 본 연구에서 제안한 알고리즘을 이용하여 어떤 두 모선사이의 전력탁송에 관하여 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수 그리고 조류안전도지수의 감도에 대한 확률분포함수를 계산할 수 있었으며, 이 계산된 자료는 탁송요금을 결정하고 전력탁송이 존재할 때 계통의 운전 을 계획하는 것에 대한 포괄적인 길잡이를 제공할 수 있 을 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 조재한, 김용하, 이범, 최상규, "Power Wheeling 산정 알고리즘의 개발", 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집 pp. 40-42, 1999.5
- [2] H. H. Happ, "Cost of wheeling methodologies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 147-156, February 1994
- [3] Hyde M. Merrill, Bruce W. Erickson, "Wheeling Rates Based on Marginal-Cost Theory", IEEE transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 1445-1450, October, 1989
- [4] A.A. El-Keib, X. Ma, "Calculating Short-Run Marginal Costs of Active and Reactive Power Production", IEEE transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 559-564, May, 1997
- [5] Y. Z. Li., A. K. David, "Wheeling Rates Power Flow under Marginal Cost Pricing", IEEE transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1263-1269, August 1994
- [6] T. A. Mikolinnas, B. F. Wollenberg, "An Advanced Contingency Selection Algorithm", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, pp. 608-617, February 1981