
몬테카를로 시뮬레이션에 의한 전력탁송 영향평가 이 범*

Power Wheeling Effects Evaluation using Monte-Carlo Simulation

Lee, Buhm*

요 약

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 상정사고를 고려한 전력탁송에 따른 영향평가를 할 수 있도록 하였으며, 이로써 전력탁송에 따른 탁송회사의 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper presents an algorithm for evaluating power wheeling effects considering contingency using Monte-Carlo simulation. The effects of power wheeling on generating cost, transmission losses, and system security are considered. And, 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 to calculate probability distribution functions of the incremental effects of power wheeling with a Monte-Carlo simulation. The proposed method is applied to IEEE RTS-96 system and the results are presented.

키워드

Power Wheeling, Monte Carlo Simulation, Transfer Capability

1. 서 론

다수의 전력회사를 운영하고 있는 미국 등 많은 국가들은 규제완화를 통하여 송전망의 독점적 사용을 피하고 이를 효율적으로 사용하도록 하고 있다. 특히, 송전망의 자유로운 접근(Open Access)을 통하여 설비의 효율적인 사용을 시도하고 있다.

이에 발맞추기 위하여 우리나라도 다수의 전력회사로의 분할 등의 방법으로 전력산업의 개편을 추진중에 있다. 이와 같은 전력사업의 규제완화로 인한 민자화, 멀지 않은 장래의 인접국가의 다른 계통과의 연계가능성 등을 고려하면, 현재와는 판이하게 다른 상황에 직면할 것으로

예상되며, 특히 송전계통의 운용 및 계획은 질적으로 달라질 것이다. 이와 관련하여 야기되는 문제점중 하나로, 제 3의 전력회사가 소유하고 있는 송전망을 통하여 전력판매회사로부터 전력구매회사에게 전력을 공급하는 전력탁송(Power Wheeling)으로 인한 문제가 대두될 것으로 예상된다.

전력을 탁송함에 있어, 전력탁송을 제공하는 것이 탁송회사와 전력구매자에게 경제적으로 유익한지의 여부가 매우 중요한 역할을 한다. 따라서, 이와 관련한 대부분의 연구[1~3]는 전력탁송에 대한 가격결정을 어떤 방법으로 할 것인가에 집중되어 왔다. 그러나, 전력판매자의 전력조

류가 탁송회사의 회로망을 통해 흘러가게 되면, 탁송회사 회로망의 전력조류도 변하게 되는데, 이는 탁송회사의 계통안전도에도 영향을 미치게 된다. 따라서, 전력탁송에 따른 경제성 뿐만 아니라, 계통안전도에 관한 영향평가도 검토하여야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 전력탁송시 탁송회사에서 발생하는 발전비용, 송전손실, 전압 및 조류안전도를 계산할 수 있도록 정식화하고, 몬테카를로 시뮬레이션의 도입을 통한 상정사고까지도 고려하여 문제를 풀 수 있는 방법을 개발함으로써 전력탁송이 탁송회사에 미치는 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 제안한 방법을 시험계통에 적용하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

II. 정식화

본 연구에서는 전력탁송에 대한 영향평가를 위해 다음과 같이 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수 그리고 조류안전도지수를 정식화하였다.

1) 발전비용

전력계통을 운용하는데에는 발전비용이 소요되는데, 발전비용은 연료비의 합계로 나타난다.

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

여기서,

a_j, β_j, γ_j : j 발전기의 연료비합수 계수

P_{Gj} : j 발전기 MW 출력

N_G : 발전기 수

2) 송전손실

전력탁송에 따라 전력을 경유하는 계통은 전력의 흐름에 따른 손실이 발생하게 되는데, 송전손실은 다음과 같이 나타난다.

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

여기서,

R_l : l 선로의 저항

I_l : l 선로의 전류

N_l : 선로 수

3) 전압안전도지수

전력계통의 모든 모선은 일정 전압을 유지하여야 하기 때문에, 전압안전도지수를 다음과 같이 구성하였다.

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

여기서,

$$V_{i,av} = \frac{1}{2} (V_i^{\max} + V_i^{\min})$$

$$V_{i,st} = \frac{1}{2} (V_i^{\max} - V_i^{\min})$$

V_i : i 모선의 전압크기

w_i : i 모선의 가중치

4) 조류안전도지수

전력계통의 모든 선로의 조류는 피상조류의 최대치 내에서 유지하여야 하기 때문에, 조류안전도지수를 다음과 같이 구성하였다.

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

여기서,

S_l : l 선로의 피상조류

S_l^{\max} : l 선로의 MVA 용량

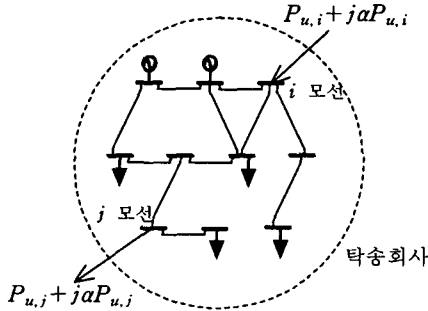
w_l : l 선로의 가중치

여기서, 전력탁송에 따른 영향을 파악해야 하므로, 식(1)~식(4)를 사용하여 전력계통의 운전점 근처에서 계산하면, 해당지점에서의 전력탁송의 영향을 관심량에 대한 증분변화로 알 수 있다.

III. 해법

3.1 탁송계통의 감도

탁송계통의 원리는 다음과 같다.



여기서,

$P_{u,*}$: 전력탁송변수

α : 탁송전력의 유효전력에 대한 무효전력 비율

그림 1. 탁송계통

Fig. 1 Wheeling system

그림 1의 탁송계통은 i 모선에 전력판매자가 연결되고, j 모선에 전력구매자가 연결되어 있는 것을 나타내고 있다. 여기서, 계통에 대한 전력탁송의 영향은 식(1)~식(4)를 $P_{u,*}$ 로 미분함으로써 정량화 되어질 수 있다. 본 연구에서는 탁송전력 $P_{u,*}$ 에 대한 식(1)~식(4)의 미분치의 효율적인 계산을 위해 다음으로 표현되는 Costate 방법[4]을 사용하였다.

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

여기서,

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

단, $\frac{\partial g(x, P_u)}{\partial x}$ 은 Jacobian 이다.

3.2 최적조류계산

전력탁송에 대한 영향평가를 하기위한 감도계산을 위하여는 최적조류계산이 요구된다. 본 연구에서는 수렴성이 보장되며 대규모계통에 대해서도 빠른 계산이 가능한 방법[5]을 사용하였다.

3.3 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 전력계통의 확률분석에 광범위하게 이용되어져 왔다. 이 방법은 확률분포에 따른 모든 가능한 계통상태 중에서 합리적인 개수의 난수발생으로 지정된 계통을 시뮬레이션하는 것으로, 이의 결과는 관심량에 대한 확률분포함수로 나타나며, 또한 이 결과는 기대치와 같은 적당한 확률적인 지표의 계산에 이용된다. 한편, 몬테카를로 시뮬레이션에 있어서 주요한 문제는 첫째로 시험회수는 계통오류의 모든 가능성을 포착할만큼 충분히 커야 한다. 그리고 두 번째는 지정된 시험에 대한 영향의 분석은 가능한 현실에 가까워야 한다.

본 연구에서는 전력계통에 대한 전력탁송의 영향을 평가함에 있어, 선로와 발전기 고장의 조합을 포함할 수 있는 계통상태를 임의로 선택하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였다. 또한, 실제의 계통운전조건을 결정하기 위하여 운전점에서 최적조류계산을 시행하고, 이 운전점에서 어떤 두 모선사이의 전력탁송에 관한 발전비용, 송전손실, 전압안전도지수, 조류안전도지수에 대한 감도를 계산하여, 관심량에 대한 전력탁송의 영향을 구하고 저장하는 것을 반복하였다. 그리고 충분한 수의 실험을 위한 반복계산이 수행되어진 후에 계산된 감도에 대한 확률분포를 구하였다.

3.4 알고리즘

본 연구에서 제안한 알고리즘의 흐름도를 다음에 나타내었다.

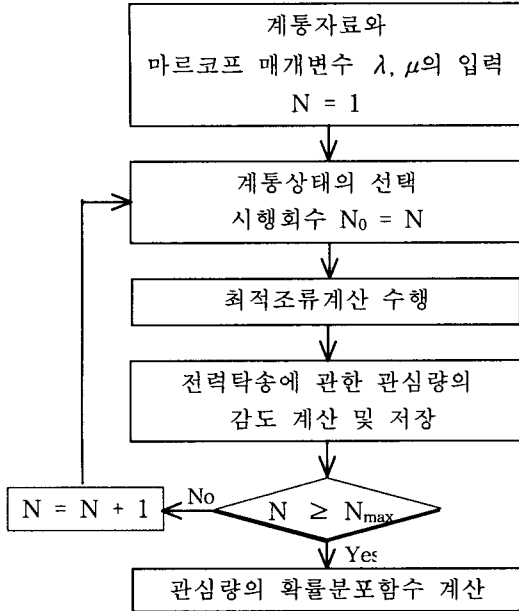


그림 2. 제안한 알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm

그림 2와 같이 제안한 알고리즘은 몬테카를로 시뮬레이션에 기초하여 N_{max} 시행의 반복계산을 시행하였다. 우선, 각 반복계산에서 지정된 계통상태를 임의로 선택한후, 최적인전점을 결정하기 위한 최적조류계산을 시행한다. 또한, 각 운전점에서 전력탁송에 관한 관심량인 발전비용, 송전손실, 계통안전도의 감도를 계산하고 저장하였다. 여기서, N_{max} 시행의 반복계산 결과는 발전비용, 송전손실, 계통안전도에 대한 전력탁송의 증분영향의 확률분포함수를 결정하기 위하여 이용하였다. 이와 같은 방법으로 구한 확률분포함수로부터 전력탁송의 영향에 대한 실질적인 상황을 파악할 수 있다.

IV. 사례 연구

본 연구에서 제안한 알고리즘을 신뢰도 시험 계통인 IEEE RTS-96 계통에 적용하고 그 결과를 그림 3~10에 나타내었다. 이때 Q/P 를 나타내는 α 는 '0'과 '0.4'의 두 가지 경우에 대해

서 계산하였으며, 확률분포함수는 몬테카를로 시뮬레이션 방법으로 500회 반복 계산하여 얻었다.

(1) 발전비용감도

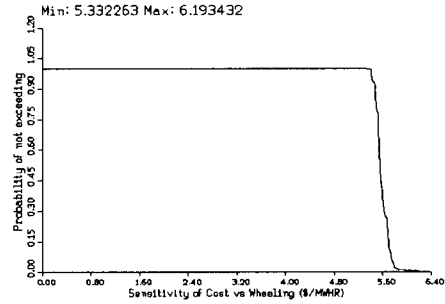


그림 3. 발전비용 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)
Fig. 3 Probabilistic function of production cost sensitivity

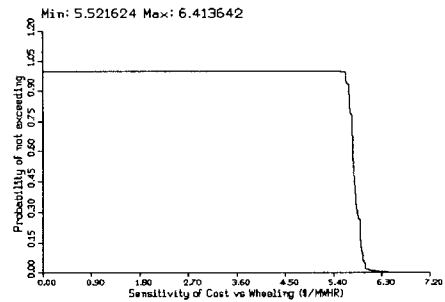


그림 4. 발전비용 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)
Fig. 4 Probabilistic function of production cost sensitivity

(2) 송전손실감도

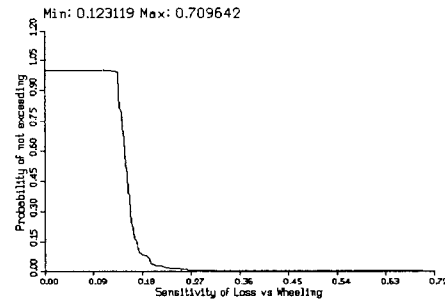


그림 5. 송전손실 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)
Fig. 5 Probabilistic function of transmission loss sensitivity

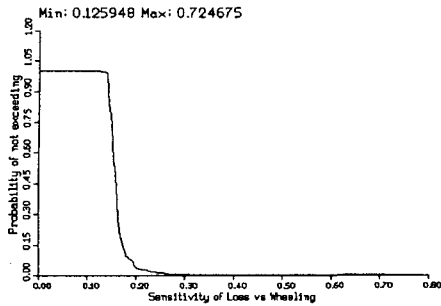


그림 6. 송전손실 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)
Fig. 6 Probabilistic function of transmission loss sensitivity

(3) 전압안전도지수감도

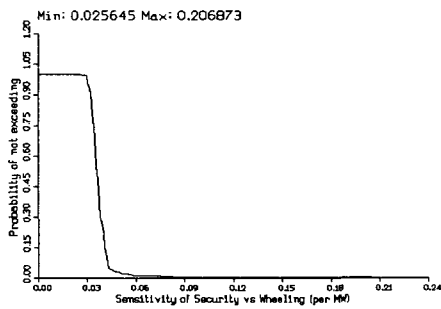


그림 7. 전압안전도 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)
Fig. 7 Probabilistic function of voltage instability sensitivity

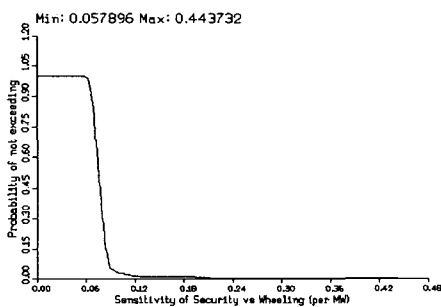


그림 8. 전압안전도 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)
Fig. 8 Probabilistic function of voltage instability sensitivity

(4) 조류안전도지수감도

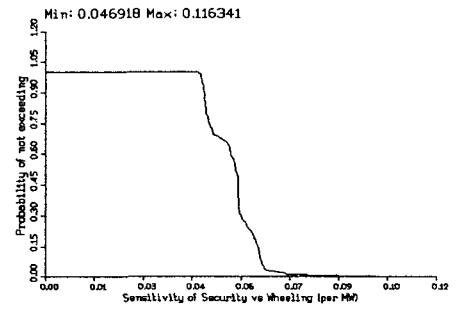


그림 9. 조류안전도지수 감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.0$)
Fig. 9 Probabilistic function of contingency indices sensitivity

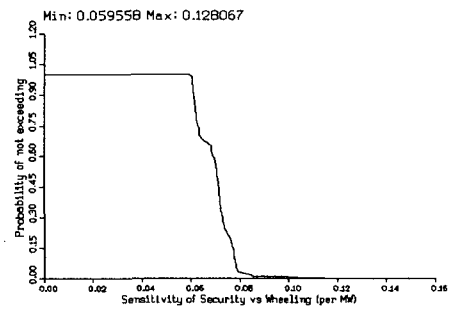


그림 10. 조류안전도지수감도의 확률분포함수 ($\alpha=0.4$)
Fig. 10 Probabilistic function of contingency indices sensitivity

그림 3으로부터 $\alpha=0.0$ 일 경우에 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 확률적인 고장이 발생하면, 전력탁송의 발전비용감도가 5.6[\$/MWH]까지는 만족할 확률이 '1'이며, 6.2[\$/MWH]를 초과하면 만족할 확률이 '0'이 되고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 4는 발전비용감도를 $\alpha=0.4$ 에 대해 했을 때의 결과를 그림 3의 경우와 마찬가지로 구한 것이다. 여기서, 최대감도는 발전비용 등에 가장 바람직하지 못한 영향을 준다는 것을 의미하며, α 에 의해 감도가 달라짐을 알 수 있다. 그림 5~10은 같은 방법으로 송전손실감도, 전압안전도지수감도, 조류안전도지수감도에 대해 각각의 결과를 도출한 것이다.

즉, 위의 확률분포함수로부터, 이들 감도에 대한 확률분포는 광범위한 운전상태에 걸쳐서 전

력탁송의 영향에 대한 실질적인 상황을 보여준다. 본 연구에서 제안한 탁송제통의 각종 감도를 확률분포로 제공함에 따라, 탁송계통에서 탁송요금 및 계통안전정도를 결정하는데 중요한 자료로 활용할 수 있다 하겠다.

V. 결론

본 연구에서는 상정사고를 고려하여 전력탁송이 탁송회사에 미치는 영향을 계산하였다. 이를 위하여, 전력탁송시 발생하는 발전비용, 송전손실, 전압 및 조류안전도를 계산할 수 있도록 정식화하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 도입하여 상정사고까지도 고려할 수 있도록 하였다.

제안한 방법을 시험계통에 적용하여, 어떤 두 모선사이의 전력탁송에 관한 발전비용 등의 감도에 대한 확률분포함수를 계산하였다. 또한, 이와 같이 계산된 결과를 통하여, 탁송요금 및 계통의 안전운전의 지표로 사용할 수 있는 자료를 제공할 수 있도록 하였다.

참고문헌

[1] H. H. Happ, "Cost of wheeling methodologies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 147-156, February 1994

[2] 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

[3] 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

[4] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", Wiley, 1984

[5] 조재한, 김용하, 이범, 최상규, "Power Wheeling 산정 알고리즘의 개발", 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집 pp. 40-42, 1999. 5

[6] 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

[7] 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

저자소개



이 범(Lee, Buhm)

1981년 고려대 전기공학과(공학사)
1989년 고려대 대학원 전기공학과(공학석사)
1995년 고려대 대학원 전기공학과(공학박사)

현재 여수대 전자통신·전기공학부 부교수

※ 관심분야: 최적조류계산, 경제운용 고조파, 신뢰도