

## Reactive Power Tracing을 이용한 국내 계통 해석 및 선로 사고에 대한 민감도 분석

김홍주\*, 김태균\*, 이병준\*, 남수철\*\*, 신정훈\*\*  
고려대\*, 한전전력연구원\*\*

### Analysis of KEPCO System and Sensitivity Study by using Reactive Power Tracing

Hongjoo Kim\*, Taegyun Kim\*, Byongjun Lee\*, Su-chul Nam\*\*, Jeong-hoon Shin\*\*  
Korea University\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 Reactive Power Tracing 기법을 이용하여 무효전력의 흐름을 분석한다. 이 기법은 Real Power Tracing을 기반으로, 무효전력의 특성에 맞게 변형시킨 것이다. 이를 위해 Real Power Tracing과 달리 무효전력의 손실을 고려하기 위해 모든 선로 사이에 가상 모선을 추가하게 된다. 이를 이용하여 국내 계통에 적용하여 무효전력의 흐름을 발전원측면에서 생산된 무효전력이 어느 범위까지 도달하는지 분석한다. 또한, 기존 민감도 해석과 차별화된 Reactive Power Tracing을 이용한 선로 사고에 대한 민감도 해석 방안을 제시한다.

#### 1. 서 론

전력계통의 운영과 계획에 있어서 전압 안정도는 매우 중요하게 고려해야 될 요소이다. 전압은 무효전력과 밀접한 관련이 있으므로, 무효전력 관리는 계통 운영자 입장에서 반드시 수행되어야 할 사항이다. 그러나 무효전력은 유효전력과 달리 선로 손실이 크며 국지적인 성격을 가지고 있어 이를 분석하기가 쉽지 않다. 또한, 발전기에서만 생산되는 유효전력과 달리 무효전력은 조상설비, 선로의 capacitance 성분에서 생산이 되기도 하며 그 양은 조류계산을 수행하기 전까지는 정확히 예측하기가 힘들다. 이러한 이유로 계통 내 무효전력의 흐름을 정확히 분석할 수 있는 방안이 필요하다.

Real Power Tracing은 유효 전력의 전달 경로를 추적하여 흐르는 조류가 어느 발전기로부터 왔는지를 규명하는 방법이다.[1] 이를 변형하여 무효전력에 적용한 것이 Reactive Power Tracing이다.[2] 여기서는 앞의 방법과 달리 선로마다 가상모선을 추가하여 해석하게 된다. 이를 통해 특정 모선의 무효전력 부하가 어느 무효전력 발전원으로부터 얼마만큼의 양이 왔는지를 알 수 있다. 또한 발전원에서 생산된 무효전력이 최종적으로 어느 모선에 얼마만큼 도달하는지 알 수 있다. 무효전력의 특성이 국지적이라는 것만 알려졌을 뿐, 실 계통에서 생산된 무효전력이 어느 범위까지 전달되는지는 규명이 되어 있지 않다. 본 논문에서는 Reactive Power Tracing을 국내 계통에 적용하여 생산된 무효전력이 어느 범위까지 도달하는지를 관찰해 본다.

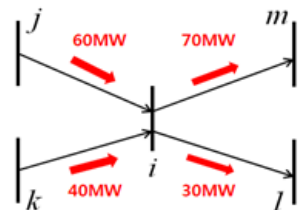
최근 국내외에서 Reactive Power Tracing에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 그 목적이 대부분 무효전력 가격 책정에 국한되어 있다. 그러나 무효전력의 흐름은 계통 안정도 해석이 있어서도 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 본 논문에서는 Reactive Power Tracing을 이용한 계통의 선로 사고에 대한 모선의 민감도 검토 방법을 제시한다. 이 검토 결과를 전압차를 이용한 민감도 분석의 결과와 비교해 본다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 Reactive Power Tracing 알고리즘

###### 2.1.1 Proportional Sharing Rule

Reactive Power Tracing은 Real Power Tracing과 마찬가지로 proportional sharing rule에서 출발한다. Proportional sharing rule에서는 선로조류는 더 많이 흘러들어온 모선의 영향을 더 받는다는 가정이 들어간다.



<그림 1> Proportional sharing rule 예시

<그림 1>에서 보면 모선-i로 100MW의 전력이 유입되고 있다. Proportional sharing rule에 따르면 60MW의 전력을 전달하는 모선-j는 30MW의 전력을 전달하는 모선-k 보다 모선-i에서 나가는 조류에 더 많은 영향을 미치게 된다. 이 비율을 수식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

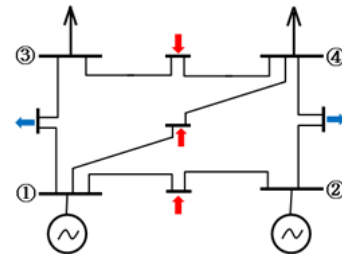
$$\text{From bus-j} : 30 \times \frac{60}{100} = 18MW \quad (1)$$

$$\text{From bus-k} : 30 \times \frac{40}{100} = 12MW$$

식 (1)은 모선-i에서 모선-j로 흐르는 30MW의 전력이 어느 모선으로부터 얼마만큼 왔는지를 나타낸다. 30MW의 전력은 proportional sharing rule에 따라 18MW는 모선-j로부터 왔으며, 12MW는 모선-k로부터 왔다고 볼 수 있다. 이와 같이 proportional sharing rule은 전력을 공급하는 양의 비율에 따라 그 영향력을 평가하게 된다. Reactive power tracing은 이러한 proportional sharing rule을 기반으로 알고리즘을 구성하게 된다.

###### 2.1.2 Reactive Power Tracing에서의 가상모선

유효전력과 달리 무효전력은 선로에서 손실이 크며 선로 capacitance에 의해 무효전력이 생산되기도 한다. 이를 반영하기 위해 아래 그림과 같이 각 선로마다 가상 모선을 만들게 된다.



<그림 2> Reactive Power Tracing에서의 가상모선

<그림 1>에서 파란색 화살표는 선로의 무효전력 손실을, 빨간색 화살표는 선로에서 무효전력을 계통에 공급함을 의미한다. Reactive power tracing에서는 모든 손실은 부하로, 모든 공급은 발전기와 동일하게 처리하고 계산하게 된다.

###### 2.1.3 Reactive Power Tracing 알고리즘

Proportional sharing rule로부터 reactive power tracing은 최종적으로 다음과 같은 식으로 구성된다.

$$Q_{Li} = \frac{Q_{Li}}{Q_i} \cdot Q_i = \sum_{k=1}^n \frac{Q_{Lk}}{Q_k} \cdot [T_Q^{-1}]_{ik} \cdot Q_{Gk} \quad (2)$$

$$Q_{Gk} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{Gik}}{Q_k} \cdot [T_Q^{-1}]_{ki} \cdot Q_{Gi} \quad (3)$$

식 (2)와 식(3)에서  $T_Q$ 는 식 (4)와 같이 나타난다.  $Q_L$ 는 부하의 무효전력 부하를 의미하며,  $Q_G$ 는 모선의 무효전력 발전량을 나타낸다. 식 (2)를 통해 모선-i의 무효전력 부하는 어느 무효전력 발전원으로부터 무효전력을 공급받고 있는지 알 수 있다. 마찬가지로 식 (3)을 통해 모선-i에서 생산된 무효전력이 어느 부하모선까지 얼마의 양이 전달되는지

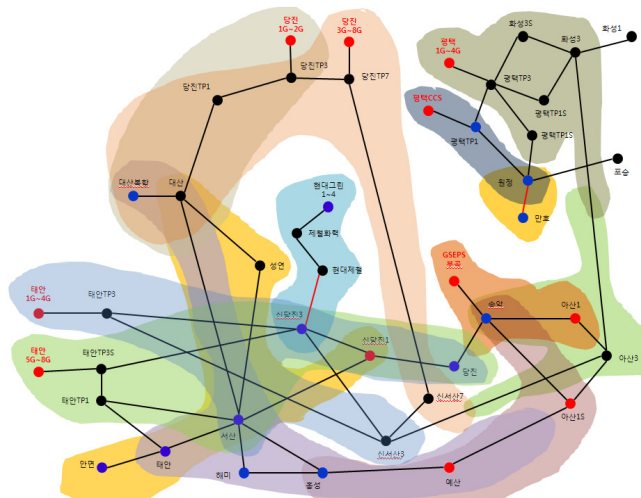
알 수 있다. 식 (2)에서  $(Q_{Li}/Q_i) \cdot [T_Q^{-1}]_{ik} \cdot Q_{Gk}$ 는 모선-k의 발전기에서 생산된 무효전력이 모선-i에 있는 부하에 도달하는 양을 나타낸다.

$$[T_Q]_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } i=j \\ -\frac{Q_{j-i}}{Q_i} = -(R_{ij}) & \text{for } j \in \alpha_i^{(u)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서  $Q_{j-i}$ 는 모선-j와 모선-i 사이에 흐르는 무효전력 양을 나타내며,  $Q_i$ 는 모선-i로 유입되는 총 무효전력 양을 의미한다.

## 2.2 국내 계통의 Reactive Power Tracing 사례 연구

Reactive power tracing은 두 가지 관점으로 계통을 해석할 수 있다. 발전기 측면에서는 생산된 무효전력이 어느 부하까지 전달되는지를 알 수 있고, 부하 측면에서는 부하에서 소비되는 무효전력이 어느 발전원으로부터 온 것인지 알 수 있다.



<그림 3> 국내 계통에서 무효전력의 도달 범위

위의 그림은 국내 계통 중에서 서산-화성-아산 지역 내에서 생산된 무효전력의 전달 범위를 reactive power tracing 시뮬레이션에 의해 얻은 결과이다. 도달 범위를 각각의 발전원마다 다른 색깔의 면적으로 나타내었다. 빨간색 모선은 무효전력 발전원이며 파란색 모선은 부하모선이다. 빨간색 선로는 선로가 계통에 무효전력을 공급함을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 생산된 무효전력은 대부분 선로 3-4개 정도 내의 인근 모선에서 사라지는 것을 볼 수 있다.

<표 1> 당진1G에서 생산된 무효전력의 도달 지역

당진1G	<모선>	<모선>	<모선>	<선로>	<선로>	<선로>	<선로>
	당진TP3	대산복합	당진1G	당진TP1	대산	당진TP3	당진TP3
	12.972	8.914	12.166	10.965	1.119	10.845	56.152

<표 1>은 당진1G 발전기의 reactive power tracing 시뮬레이션 결과이다. 무효전력 양의 단위는 MVar이다. 그림에서도 표시되었듯이 당진1G에서 생산된 무효전력은 3개의 선로로 연결된 대산복합까지 전달되며 더 멀리 도달하지 못하고 선로와 모선의 부하에서 모두 소비되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 국내 전 계통의 무효전력 도달 범위를 시뮬레이션을 통해 관찰할 수 있으며, 대부분 멀리 도달하지 못하고 인근 지역에서 소비되는 것을 볼 수 있다.

## 2.3 Reactive Power Tracing을 이용한 민감 모선 선정

전력 계통 내에서 생산된 전력은 최적의 경로를 찾아서 부하에 전달된다. 손실이 작은 선로로 더 많은 양이 흐르는 것이다. 계통에 선로 사고가 발생하게 되면, 선로를 통해서 전달되는 유효전력은 다른 선로로 우회해서 부하에 전달 될 것이다. 유효전력이 우회 선로로 흐르게 되면 기존 선로를 통해 전달 할 때에 비해 무효전력 손실이 커지게 된다. 기존의 선로에 비해 선로 인덕턴스가 더 커지기 때문이다. 본 논문에서는 이러한 사실을 기반으로 reactive power tracing을 통해 선로사고에 대

한 민감 모선 선정 방법을 제안한다.

Reactive power tracing을 이용하여 부하의 무효전력이 어느 발전원으로부터 왔는지를 분석할 수 있다. 계통에 선로사고가 발생하게 된다면 무효전력을 전달하는 발전원 및 양이 변하게 될 것이다. 무효전력의 전달 경로로 변화가 크다는 것은 선로 사고에 대해 더 비효율적인 방법으로 무효전력이 전달되었다는 것을 의미한다. 따라서 reactive power tracing의 결과 변화가 가장 큰 부하 모선이 해당 선로사고에 대하여 가장 민감한 모선이라고 볼 수 있다.

이를 시뮬레이션 하기 위하여 화성3-아산3의 345kV 선로사고를 적용한 후 reactive power tracing에 의한 결과 변화율과 전압변화율을 비교하였다.

<표 2> 사고 전, 후 모선-4690에 대한 reactive power tracing

모선	4690	24621	24622	24623	24624	24625	4615-4690	총부하
사고전	36.926	3.835	3.853	3.82	3.778	6.047	2.164	60.423
사고후	26.8669	5.6152	5.6335	5.6321	5.5448	9.5729	1.5576	60.423

<표 2>는 모선-4690의 부하가 어느 모선 혹은 선로로부터 무효전력을 공급받고 있는지를 나타낸다. 부하는 정적 부하 모델이므로 사고 전 후 값이 변하지 않는다. 사고 전, 후 결과를 비교해 보면 변화가 생겼음을 알 수 있다. 변화가 없는 무효전력 양은 49.758MVar이다. 따라서 변화량은  $1-49.758/60.423=0.1765$ 가 된다. 이와 마찬가지로 사고 전, 후 전압차가 큰 5개 모선에 대하여 reactive power tracing 변화율과 전압변화율을 비교해 보았다.

<표 3> 사고 전, 후 전압 변화율과 Tracing 변화율 비교

모선 번호	사고전 전압	사고후 전압	전압 변화율	Tracing 변화율
4260	1.04014	1.01032	0.02982	0.3241
6265	1.03998	1.01025	0.02973	0.3213
6335	1.03489	1.00571	0.02918	0.0818
6280	1.03138	1.00261	0.02877	0.075
6295	1.03037	1.00191	0.02846	0.0488

<표 3>의 모선들은 사고 전후 전압변화율이 가장 큰 부하모선들을 순서대로 5개 나열한 것이다. <표 3>에서 볼 수 있듯이 전압 변화율과 reactive power tracing 변화율 간의 상관관계가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 모선의 민감도 검토 방법에는 전압변화율, OCPF[3]등 여러 가지가 있을 수 있다. 이러한 방법들 중에서 어느 방법이 정확하다는 판단은 의미가 없다. 각각의 방법들이 서로 다른 목적을 가지고 있기 때문이다. 무효전력 공급지의 변화는 사고가 적용된 계통에서 중요한 현상이다. Reactive power tracing에 의한 민감도 검토를 이용하면 계통의 안정도 해석 및 향상에 있어 중요한 수단이 될 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 reactive power tracing을 이용하여 국내 계통의 무효전력 흐름을 분석하였다. Reactive power tracing은 real power tracing과 달리 각 선로마다 가상 모선을 추가해 준다. Reactive power tracing으로 국내 계통을 시뮬레이션 한 결과 발전기, 조상설비 혹은 선로에서 생산된 무효전력은 대부분 선로 3-4개정도 내의 인근 모선에서 사라지는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 본 논문에서는 reactive power tracing에 의한 민감 모선 선정 방안을 제시하였다. Tracing 변화율에 의한 민감도 검토 결과는 전압 변화율에 의한 민감도와 상관관계가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 추후에 다양한 시뮬레이션과 검증이 거쳐 reactive power tracing에 의한 민감도 분석을 체계화 할 필요성이 요구된다.

## <감사의 글>

본 결과물은 한국 에너지기술연구원(한전전력연구원)의 연구지원 및 한국과학재단의 연구지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

## [참고 문헌]

[1] Bialek, J.W., "Tracing the flow of electricity", IEE Proc.-Gen. Transm. Distrib. :p313-320, 1996  
 [2] N. C. Abi Samra, "Real and Reactive Power Tracking", EPRI Report, 1999  
 [3] H. Song, Baik and B. Lee, "Determination of load shedding for power-flow solvability using outage-continuation power flow(CPF)", IEEE Journal, 2006