ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 8, pp. 1145~1153, 2015
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.8.1145

무효전력 흐름 추적을 이용한 무효전력 취약지역 판단

Reactive Power Traceable System based Vulnerable Areas Detection for Reactive Power

최 윤 혁* · 배 문 성* · 이 병 준†
(YunHyuk Choi · MoonSung Bae · Byongjun Lee)

Abstract - The paper analyzes reactive power flow characteristic in power system by reactive power tracing. In addition, virtual buses are inserted in the algorithm to consider losses of transmission lines, and shunt capacitor treated as a reactive power generator. The results of simulation are analyzed by two points of view. The one is load's point of view and another is generator's point of view. Classic purpose of the reactive power tracing consists in the reactive power pricing. However, it is significantly used to select vulnerable area about line outage in this paper. To find the vulnerable area, reactive power tracing variations between pre-contingency and post-contingency are calculated at all load buses. In heavily load area, buses which has highest variation become the most vulnerable bus. This method is applied to the IEEE 39-bus system. It is compared with voltage variation result and VQ-margin to verify its effect.

Key Words : Reactive power tracing, Vulnerable area, Proportional sharing rule, Power flow, Virtual bus

1. 서 론

산업의 발달과 기후 변화로 인해 전기 에너지의 수요가 급증하고 있다. 최근 국내에 일어난 정전사태에서도 볼 수 있듯이, 한정된 전력 공급에 대한 급격한 수요의 증가는 전력 시스템의 불안정을 초래할 수 있다. 또한 신재생 에너지원과 같이 불안정한 요소들이 계통에 투입됨에 따라 계통의 안정적인 운영, 해석 및 제어의 역할과 중요성이 대두되고 있다.

전력계통의 운역과 계획에 있어서 전압 안정도는 매우 중요하게 고려해야 될 요소이다. 일반적으로 주파수는 유효전력, 전압은 무효전력과 밀접한 관련이 있다. 따라서 전압안정도 향상을 위해서 무효전력 관리는 계통 운영자 입장에서 매우 중요한 요소이다. 그러나 무효전력은 유효전력과 달리 변압기 및 선로 손실이 크며 국지적인 성격을 가지고 있어 이를 분석하기가 쉽지 않다. 또한 발전기에서만 생산되는 유효전력과 달리 무효전력은 조상설비, 선로의 capacitance 성분에 의해 생산이 되기도 하며 계통의 상태에 따라 변화하기 때문에 예측이 어렵다. 이러한 이유로 계통 내 무효전력의 흐름을 정확히 분석할 수 있는 방안이 필요하다.

무효전력 흐름 추적 기법은 계통 내 무효전력 부하에서 소비하는 무효전력의 근원을 추적한다[1-5]. 무효전력 흐름 추적 기법의 기본적인 알고리즘은 proportional sharing rule을 기반으로 계산한다. 이때, 변압기 및 선로 손실을 고려하기 위해 가상 모선을 구성하고 조상설비 등을 발전모선으로 처리한다. 유효전력 흐름 추적 기법과 관련된 연구는 활발히 진행되었으나 무효전력 흐름 추적 기법은 전력 시장에서의 무효전력 가격 책정을 위한 목적으로 연구가 진행되고 있으며, 계통 해석 관점의 연구는 부족하다[6-11].

일반적으로 선로 사고에 대한 무효전력 취약모선을 판단하는 지수로 전압 변동률을 이용한다. 하지만 전압은 국지적 특성을 갖기 때문에 사고 인근의 과전압 혹은 저전압 모선들의 전압 변동률은 비슷한 값을 가지므로 단순히 전압 변동률 값으로 무효전력 취약지역을 판단하는 것은 어렵다.

무효전력 흐름 추적 기법을 이용하면 조류계산의 결과를 바탕으로 계통 내의 전반적인 무효전력 흐름을 이해할 수 있고 선로 사고 후 무효전력 흐름의 경로 변화에 대한 탐색도 가능하다. 이러한 무효전력 흐름의 변화를 이용하여 기존의 전압 변동률보다 좀 더 정확히 무효전력 취약지역을 판단할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 무효전력 흐름 추적 기법을 이용한 무효전력 취약지역 판단 방안을 제안한다.

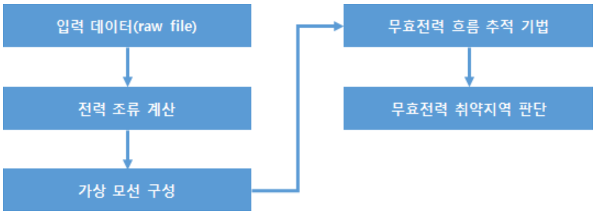

그림 1 무효전력 취약지역 판단 방안 순서도
Fig. 1 Flow chart of vulnerable areas detection method for reactive power

† Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Korea University, Korea
E-mail : leeb@korea.ac.kr
* Department of Electrical Engineering, Korea University, Korea
Received : January 9, 2015; Accepted : June 16, 2015

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위의 그림은 무효전력 흐름 추적 기법을 이용한 취약지역 판단 방안의 순서도이다. 전력조류계산을 통해 선로의 무효전력 흐름 및 모선의 무효전력 생산량과 소비량을 계산한다. Surge Impedance loading(SIL)을 이용하여 가상 모선의 유형을 발전 혹은 부하모선으로 규정하고 조상설비는 발전모선으로 표현한다. 가상 모선을 구성하고 proportional sharing rule을 기반으로 발전 측면과 부하 측면에서 계통의 무효전력 흐름을 계산한다. 이렇게 계산된 무효전력 흐름 추적 변화량을 이용하여 선로 사고에 대한 무효전력 취약모선을 판단한다. 사고 전 후의 무효전력 흐름 변화량을 바탕으로 과전압 혹은 저전압 지역의 무효전력 취약모선을 판별한다. 제안한 무효전력 흐름 추적 알고리즘과 취약모선 판단 방안은 IEEE 39-모선 계통에 적용한다.

제안한 방안에 대해 검증하기 위해서 전압 변동률과 VQ마진 감소율을 관찰한다[13]. 사고 전과 대비하여 사고 후 전압 변동률과 VQ마진 감소량을 계산하여 변동률이 크거나 VQ마진 감소량이 큰 모선일수록 무효전력에 대해 취약한 모선으로 볼 수 있다. 본 논문의 무효전력 흐름 추적 기법은 Fortran에 의해 구현되었고 검증을 위한 VQ해석은 VSAT을 이용한다.

2. 본 론

2.1 무효전력 흐름 추적 기법

2.1.1 전력 흐름 추적 기법

전력 흐름 추적 기법이란 특정 발전기에서 생산된 유효/무효전력이 최종적으로 소비되는 부하의 위치와 양을 추적한다[1]. 전력 흐름 추적 기법은 크게 두 가지로 관점으로 해석이 가능하다. 첫 번째는 발전 측면으로, 발전기에서 생산된 무효전력이 어느 부하로 도달하는 지를 추적하게 된다. 두 번째는 부하 측면으로, 부하에서 소비되는 전력은 어느 발전기로부터 공급을 받았는지를 추적하는 것이다.

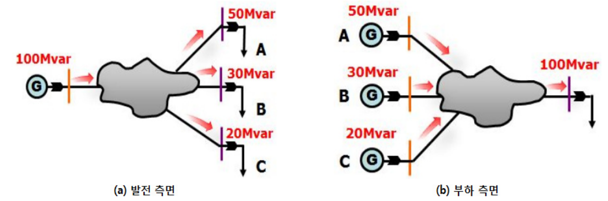

그림 2 발전과 부하 측면에서 무효전력 흐름 추적

Fig. 2 Reactive power tracing at generation and load side

그림 2-(a)는 발전 측면에서 전력 흐름 추적 결과로 발전기에서 생산된 100Mvar의 전력이 A, B, C 부하에 각각 50Mvar, 30Mvar, 20Mvar가 전달되는 것을 알 수 있다. 그림 2-(b)는 부하 측면에서 전력 흐름 추적 결과로 부하의 소비전력 100Mvar는 A, B, C 발전기로부터 각각 50Mvar, 30Mvar, 20Mvar를 공급받는 것을 알 수 있다.

2.1.2 Proportional Sharing Rule

전력 흐름 추적 기법은 proportional sharing rule을 바탕으로 하고 Proportional sharing rule는 다음과 같은 가정에서 출발한다.

◆ 가정1: 관찰 선로 조류는 앞단의 연결 모선으로부터 받는다.
◆ 가정2: 연결 모선들 중 가장 많은 조류량을 보내는 모선의 영향력이 가장 크다.

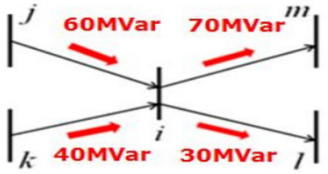

그림 3 Proportional Sharing rule

Fig. 3 Proportional Sharing rule

위의 그림에서 보면 모선 i로 100Mvar가 유입되고 있다. Proportional sharing rule에 따르면 60Mvar를 전달하는 모선 j는 40Mvar를 전달하는 모선 k보다 모선 i에서 나가는 조류에 더 많은 영향을 미치게 된다. 이는 각각의 선로에 흐르는 조류 양에 비례한다. 따라서 선로 i - l에 흐르는 30Mvar는 모선 j로부터 30 × 60/100 = 18Mvar를 공급받으며, 모선 k로부터 30 × 40/100 = 12Mvar 를 공급받는다. 이와 같이 모든 부하와 발전기에 대해 반복 연산을 수행하여 부하에서 소비하는 전력의 공급원을 탐색할 수 있다. 따라서, proportional sharing rule은 전력을 공급하는 양의 비율에 따라 그 영향력을 평가하게 된다.

2.1.3 Surge Impedance Loading(SIL)과 가상 모선

유효전력의 경우에는 발전기가 유일한 전력 생산 장치이고, 부하가 유일한 전력 소비 장치이다. 선로의 손실이 존재하긴 하지만 그 값이 매우 작아 전력 흐름 추적에 큰 영향을 미치지 못한다. 하지만 무효전력의 경우에는 발전기와 부하 외에도 변압기 및 선로의 무효전력 손실 및 공급이 존재한다. 선로가 무효전력을 공급하는지 소비하는지는 SIL(Surge Impedance Loading)을 통해 알 수 있다[12]. SIL은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P_{SIL} = \frac{V_B}{\sqrt{l/c}} \tag{1}$$

선로에 흐르는 유효전력의 양이 P_{SIL}보다 크면 선로는 무효전력 소비 선로가 되고, 작으면 무효전력 공급 선로가 된다. 실제 전력 계통에서는 무효전력을 공급하는 선로들도 상당수 존재 한다.

그림 4는 π-등가 선로의 무효전력 흐름을 나타낸다. 전력조류계산에서는 선로의 capacitance 계산을 위해 선형화된 π-등가 회로를 사용하고 있다. 선로의 capacitance 성분은 선로 양단 모선의 자기 임피던스로서 계산되며 선로에는 resistance와 reac-

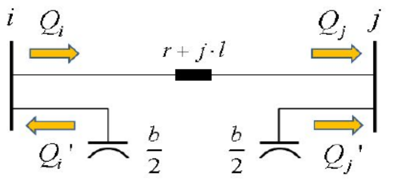

그림 4 π-등가 회로의 무효전력 흐름

Fig. 4 Reactive power flow of π-equivalent circuit

tance 성분 값만 남는다. 전력조류계산 수행 후 선로의 무효전력은 선로 양단의 무효전력 입출력의 합으로 계산된다. 즉, 위의 그림에서 모선 i쪽 무효전력 흐름은 Q_i와 $Q_i^{'}$의 합으로 결정되고, 모선 j쪽 무효전력 흐름은 Q_j와 $Q_j^{'}$의 합으로 결정된다. 따라서 선로에 흐르는 무효전력은 선로 양단에서 방향과 크기가 다르게 나타날 수 있다. 또한, 선로에서 무효전력이 들어오는 양보다 나가는 양이 많으면 공급 선로가 되고, 나가는 양보다 들어오는 양이 많으면 소비 선로가 된다.

선로의 무효전력 소비 및 공급을 고려하기 위해서 각 선로마다 가상 모선을 구성한다. 아래의 그림과 같이 가상 모선은 해당 선로의 무효전력 소비 및 공급에 따라 각각 부하모선 및 발전모선으로 처리한다. 가상 모선 구성이 완료되면 모든 선로는 이상적인 선로가 되고 무효전력을 생산 혹은 소비하지 않는 선로가 된다. 아래 그림은 무효전력을 공급하는 선로를 나타낸다.

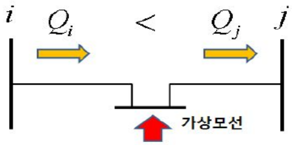

그림 5 무효전력 공급 선로

Fig. 5 Supply line for reactive power

가상 모선의 유형은 SIL로 결정할 수 있다. SIL이란 선로가 무효전력을 생산 혹은 소비하지 않을 때 선로에 흐르는 유효전력을 의미한다.

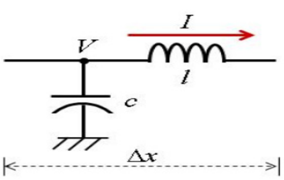

그림 6 선로 미소 단위 길이

Fig. 6 Unit length of line

위의 그림은 선로의 미소 단위 길이를 나타낸다. 위의 미소 단위에서 shunt capacitance에 의한 무효전력 생산량과 series inductor에 의한 무효전력 소비량이 같을 때, 선로는 무효전력을 생산 혹은 소비하지 않는다. 단위 길이 당 shunt capacitance가 생산하는 무효전력과 단위 길이 당 series inductance가 소비하는 무효전력은 다음과 같다.

$$Q_l = I^2 X_l = I^2 \omega l \quad (2)$$

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} = V^2 \omega c \quad (3)$$

선로의 resistance 성분을 무시한다면, 아래와 같은 조건에서 선로는 무효전력을 생산 혹은 소비하지 않는다.

$$V^2 \omega c = I^2 \omega l \quad (4)$$

위의 조건을 가지고 surge impedance Z_0가 아래와 같이 계산된다.

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{l}{c}} = Z_0 \quad (5)$$

위의 식에서 l은 단위 길이 당 inductance를 나타내고, c는 단위 길이 당 capacitance를 나타낸다. V_0는 base voltage가 된다. 최종적으로 surge impedance loading P_0은 다음과 같다.

$$P_0 = \frac{V_0^2}{Z_0} \quad (6)$$

선로에 흐르는 유효전력이 SIL보다 작으면 선로는 무효전력을 공급하는 선로가 되며, 선로에 흐르는 유효전력이 SIL보다 크면 선로는 무효전력을 소비하는 선로가 된다.

이러한 SIL 특성을 고려하여 가상 모선에서 SIL과 유효전력 흐름을 비교함으로서 발전모선과 부하모선으로 구분할 수 있다. 즉, SIL이 유효전력보다 크면 가상 모선은 발전모선이 되고, SIL이 유효전력보다 작으면 가상 모선은 부하모선이 된다.

계통에서는 선로 뿐 아니라 모선에서도 shunt capacitance나 inductance 성분에 의한 무효전력 손실 및 공급이 발생하게 된다. 이에 무효전력 추적 기법에서는 shunt capacitance 및 inductance를 각각 발전기와 부하로 처리한다. 따라서 전력조류계산 수행 후, 무효전력을 공급하는 모선은 발전모선으로, 무효전력을 소비하는 모선은 부하모선으로 구분된다.

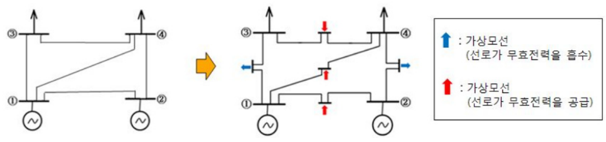

그림 7 가상 모선 구성 전과 후 비교

Fig. 7 Compare before and after configurating virtual bus

조상설비를 발전 혹은 부하모선으로 구분하고, 가상 모선을 구성하면 위의 그림과 같이 무효전력을 공급하는 모선은 모두 발전

모선이 되고 무효전력을 소비하는 모선은 모두 부하모선이 된다. 이렇게 계통을 재구성한 다음 proportional sharing rule을 적용하여 무효전력 흐름을 추적한다.

2.1.4 무효전력 흐름 추적 알고리즘

앞 절에서 언급한 바와 같이 전력조류계산 수행 후 가상 모선을 구성하고, 선로 및 조상설비의 무효전력 손실 및 공급을 발전모선 혹은 부하모선으로서 처리한 후 무효전력 흐름 추적 알고리즘을 적용한다.

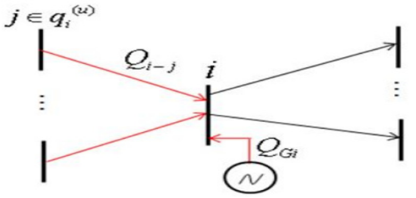

그림 8 임의 모선 i의 무효전력 흐름
Fig. 8 Reactive power tracing at i bus

위의 그림은 임의 모선 i에 대한 무효전력 흐름을 나타낸다. 위의 그림에서 각각의 변수들이 의미하는 바는 아래와 같다.

- Q_i - 모선 i로 유입되는 총 무효전력의 합
- Q_{i-j} - 모선 j와 모선 i 사이 선로에 흐르는 무효전력
- Q_{Gi} - 모선 i에서 생산하는 무효전력
- $q_i^{(u)}$ - 모선 i로 무효전력을 공급하는 모선들의 집합
- n - 계통 내 전체 모선 개수

위의 변수들로부터 아래와 같은 식을 구성할 수 있다.

$$Q_i = \sum_{j \in q_i^{(u)}} Q_{i-j} + Q_{Gi} \tag{7}$$
$$\rightarrow Q_i = \sum_{j \in q_i^{(u)}} \left(\frac{Q_{i-j}}{Q_j} \times Q_j\right) + Q_{Gi}$$
$$\rightarrow Q_{Gi} = Q_i - \sum_{j \in q_i^{(u)}} \left(\frac{Q_{i-j}}{Q_j} \times Q_j\right)$$

위의 Q_{Gi}에 관한 식을 i=1부터 n까지 확장시키면 행렬식 $[Q_G]$으로 나타낼 수 있다. 이를 이용하여 위의 관계식을 아래의 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$[Q_G] = [A_Q] \times [Q] \tag{8}$$
$$\rightarrow [Q] = [A_Q]^{-1} \times [Q_G]$$
$$where\,[A_Q]^{-1} = -\begin{matrix} 1 & \text{for} & i=j \\ \frac{Q_{j-i}}{Q_j} & \text{for} & j \in q_i^{(u)} \\ 0 & \text{for} & otherwise \end{matrix}$$

계통 내에 가상 모선을 포함한 모선의 총 개수가 n개일 때 위의 행렬식에서 $[A_Q]$는 n×n 행렬이 되며, $[Q_G]$와 $[Q]$는 n×1K 행렬이 된다. 행렬식 $[Q]$로부터 모선 i에 관한 일반식을 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} ([A_Q^{-1}]_{ik} \times Q_{Gk}) \tag{9}$$

위의 식에서 $[A_Q^{-1}]_{ik} \times Q_{Gk}$는 모선 k에서 생산된 무효전력이 무효전력 부하모선 i에 도달하는 양을 의미한다. 위의 식을 바탕으로 최종적으로 아래와 같이 식을 구성할 수 있다.

$$Q_{Li} = \frac{Q_{Li}}{Q_i} \times Q_i = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{Q_{Li}}{Q_i} \times [A_Q^{-1}]_{ik} \times Q_{Gk}\right) \tag{10}$$
$$= \alpha_{1i} Q_{G1} + \alpha_{2i} Q_{G2} + \cdot\cdot\cdot + \alpha_{ki} Q_{Gk}$$
$$where\, 0 \le \alpha_k \le 1 \text{ for } k = 1, \cdot\cdot\cdot, n$$

$$Q_{Gi} = \frac{Q_{Gi}}{Q_i} \times Q_i = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{Q_{Gi}}{Q_i} \times [A_Q^{-1}]_{ik} \times Q_{Lk}\right) \tag{11}$$
$$= \beta_{1i} Q_{L1} + \beta_{2i} Q_{L2} + \cdot\cdot\cdot + \beta_{ki} Q_{Lk}$$
$$where\, 0 \le \beta_k \le 1 \text{ for } k = 1, \cdot\cdot\cdot, n$$

식(10)은 모선 i의 부하 측면에서의 해석이며, 식(11)은 모선 i의 발전 측면에서의 해석이다. 이때, α_{ki}는 부하 측면에서의 계수이며, 무효전력 부하모선 i에 대한 무효전력 발전기 k의 기여도를 나타내며 0과 1사이의 값을 가지게 된다. α_{ki}가 0의 값을 가지게 되면 발전기 k에서 무효전력이 생산되지 않거나, 생산된 무효전력이 부하모선 i까지 도달하지 못함을 의미한다. 반대로 α_{ki}가 1의 값을 가지게 되면 발전기 k에서 생산된 무효전력이 모두 부하모선 i에서 소비됨을 의미한다. 부하모선 i가 발전모선 k로부터 공급받은 무효전력의 총 양은 기여도 계수와 모선 k에서 생산되는 총 무효전력 양의 곱으로 나타낼 수 있으며, $\alpha_{ki} Q_{Gk}$로 표현이 된다. β_{ki}는 발전 측면에서의 계수이며, 무효전력 발전기모선 i의 무효전력 부하모선 k에 대한 기여도를 나타낸다. 마찬가지로 β_{ki}도역시 0과 1사이의 값을 가진다. 0의 값을 가질 경우 모선 i에서 생산된 무효전력이 모선 k까지 도달하지 못함을 의미하며, 1의 값을 가질 경우 모선 i에서 생산된 무효전력이 모두 모선 k에서 소비됨을 의미한다. 이와 같이 무효전력 흐름 추적 알고리즘을 통해 각 부하에 대한 각 발전기의 기여도를 알 수 있다.

2.2 무효전력 취약지역 판단 방안

2.2.1 무효전력 흐름 추적 기법을 이용한 취약지역 판별 방안

이상적인 전기회로에서 전류는 옴의 법칙에 따라 전압이 동일하다면 임피던스가 적은 선로로 더 많은 양이 흐른다. 이는 곧 전류가 손실을 최소화 시키는 방향으로 흐르는 것을 의미한다.

마찬가지로 실 계통에서 전력 조류 흐름은 전력 손실을 최소화하는 상태를 나타낸다. 그러나 만약 상정사고가 발생하게 된다면, 전력 조류의 흐름은 달라진다. 전력 조류의 흐름이 달라졌다는 것은 사고 전 계통보다 사고 후 계통에서 전력 조류가 더 비효율적인 방향으로 흐른다는 것을 의미한다. 따라서 사고 전 후 변화된 무효전력의 흐름 해석은 무효전력 취약지역 판단에 중요한 지수가 된다.

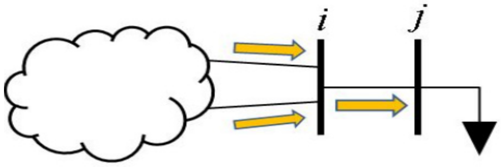

그림 9 무효전력 변화가 없는 부하모선

Fig. 9 Load bus with no reactive power change

하지만 모선 내로 유입되는 무효전력의 변화만을 관찰할 경우 위의 그림과 같이 무효전력 변화량을 찾을 수 없는 상황도 존재한다. 모선 j의 부하는 정적 부하이기 때문에 모선 i에서 모선 j로 흐르는 무효전력 양은 사고 전 후 변화가 없다. 따라서 단순히 모선 내 무효전력 유입의 변화를 가지고 취약지역을 판별하기에는 어려움이 따른다.

무효전력 흐름 추적 기법의 결과는 부하에서 소비되는 무효전력의 공급처를 알 수 있기 때문에 사고 전 후 무효전력 전달 경로가 어느 정도 변하였는지를 탐색하기에 유리하다. 위의 그림과 같은 상황에서도 부하모선 j의 무효전력 전달 경로 변화를 사고 전 후 무효전력 흐름 추적 변화량을 통해 확인할 수 있다.

무효전력은 실 계통 내에서 일반적으로 국지적인 성격을 가지고 있어, 생산된 무효전력이 대부분 인근 모선에서 소비가 된다. 따라서 발전기에서 생산된 무효전력은 발전기 앞단의 승압 변압기(step-up transformer)에서 대부분 소모되고, 조상설비와 선로의 무효전력 공급으로 흐름이 유지되고 최종 부하까지 전달된다.

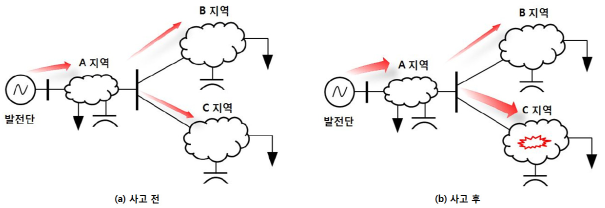

그림 10 사고 전 후 계통 모식도

Fig. 10 System diagram of before and after contingency

그림 10-(a)은 무효전력의 흐름을 나타낸 계통 모식도이다. 발전기에서 발전된 무효전력은 A지역의 부하에서 소비가 되며, A지역 커패시터에서 생산된 무효전력 역시 A지역에서 소비되며 남은 소량의 무효전력이 B지역과 C지역으로 전달이 된다. B지역과 C지역은 자체 커패시터에 의해 무효전력 부하를 충당한다.

하지만 그림 10-(b)과 같이 C지역에서 선로 사고가 발생하면 C지역에서 필요로 하는 무효전력은 증가한다. 따라서 무효전력 수급을 맞추기 위해 발전기의 무효전력 출력이 증가한다. A지역의 부하는 발전기로부터 충분한 양의 무효전력을 공급받게 되므로, A지역에서 생산된 무효전력은 무효전력이 부족한 C지역으로 전달되어 C지역의 수급을 맞추게 된다.

위의 계통 모식도에서 볼 수 있듯이 B지역 부하의 무효전력 공급처는 변하지 않았지만, C지역 부하의 무효전력 공급처는 달라졌다. 최종적인 무효전력 취약지역은 C지역이므로, 무효전력 흐름 추적 변화량을 가지고 취약지역을 판별할 수 있음을 알 수 있다.

하지만 A지역은 무효전력 취약지역이 아니지만 전달 경로 상에 있으므로 공급처가 변하였다. 이를 해결하기 위하여 무효전력 흐름 추적 변화량과 함께 전압 변동 지역을 함께 고려한다. 이와 같이 전압 변동이 발생한 모선 중에서 무효전력 흐름 추적 변화량이 가장 큰 모선을 선로 사고에 대해 가장 취약한 모선으로 판단할 수 있다.

2.2.2 무효전력 흐름 추적 변화량 계산

무효전력 흐름 추적 변화량은 부하 측면에서 사고 전 후 무효전력의 공급처와 양이 얼마나 달라졌는지를 계산함으로서 구할 수 있다.

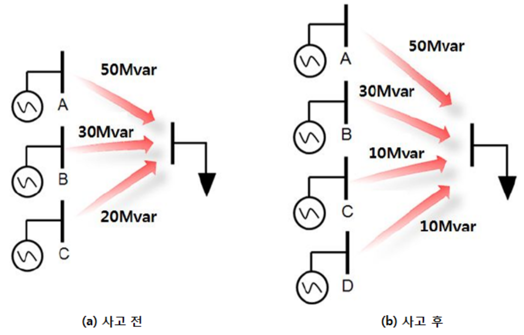

그림 11 사고 전 후 무효전력 흐름 추적 변화량

Fig. 11 Reactive power tracing change of before and after contingency

위의 그림은 사고 전 후 무효전력 흐름 추적 변화를 보여준다. 부하는 총 100Mvar이며, 사고 후 발전기 C에서 20Mvar를 공급받던 것이 사고 후 10Mvar로 감소하고, 나머지 10Mvar는 새로운 발전기 D로부터 공급받는 것을 알 수 있다. 부하가 공급받아야 할 100Mvar 중 사고 후 다른 공급원으로부터 받은 양은 10Mvar가 된다. 따라서 무효전력 흐름 추적 변화량은 10Mvar로 볼 수 있다. 이를 일반식으로 정리하면 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \triangle Q_{Li} &= |\triangle(\alpha_{1i} Q_{G1})| + |\triangle(\alpha_{2i} Q_{G2})| + \cdot\cdot\cdot + |\triangle(\alpha_{ki} Q_{Gk})| \\ \triangle(\alpha_{ki} Q_{Gk}) &= \alpha_{ki_{BASE}} Q_{Gk_{BASE}} - \alpha_{ki_{CON}} Q_{Gk_{CON}} \\ &\text{for } k = 1, \cdot\cdot\cdot, n \end{aligned} \tag{12}$$

위의 식에서 $\alpha_{ki_{BASE}}$와 $Q_{Gk_{BASE}}$는 각각 선로 사고 전 모선 k에서 부하 측면 계수와 무효전력 발전량을 나타내며, $\alpha_{ki_{CON}}$와 $Q_{Gk_{CON}}$는 사고 후 모선 k에서 부하 측면 계수와 무효전력 발전량을 의미한다. 무효전력 흐름 추적 변화량은 정적 부하가 존재하는 모선들을 대상으로 계산한다.

2.3 사례연구

2.3.1 IEEE 39-모선 계통 무효전력 흐름 추적 결과

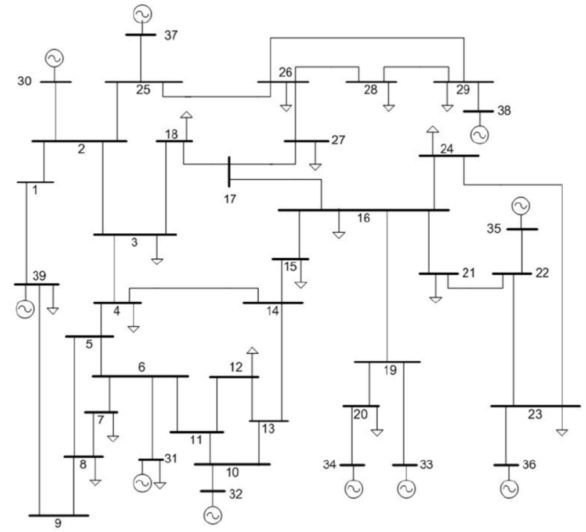

그림 12 IEEE 39-모선 계통도
Fig. 12 IEEE 39-bus system diagram

그림 12는 IEEE 39-모선 계통의 계통도를 나타내고 있다. 이 계통에는 19개의 부하모선과 10개의 발전모선이 있고 총 부하량은 6150MW이다. 15번 부하모선(무효전력 부하 153Mvar)에 대해서 부하 측면에서의 무효전력 흐름 추적 결과를 표 1에 나타낸다.

IEEE 39-모선 계통의 무효전력 흐름 추적 결과를 보면, 부하모선이 무효전력을 발전기로부터 직접 공급받는 비율이 높고 조상설비보다 선로의 무효전력 공급 비중이 높은 것을 알 수 있다.

2.3.2 선로 사고에 대한 IEEE 39-모선 계통 취약지역 판단 결과

선로 15-16을 탈락시키고, 사고 전 후 무효전력 흐름 추적 변화량을 계산하였다. 아래 표는 사고 전 후 무효전력 흐름 추적 변화량을 나타낸 것이다.

표 2의 부하모선을 대상으로 그림 13에는 변화량이 큰 모선들이 계통도에 표시되어 있다.

위의 계통에서 많은 양의 무효전력이 16번 모선에서 15번 모선으로 흐르고 있다. 15번 모선의 무효전력 흐름 추적 결과를 봐도 33, 34번 모선의 발전기로부터 많은 양의 무효전력을 공급받고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 15-16 선로가 탈락될 경우 15번 모선 인근의 지역이 무효전력 취약지역으로 판단된다. 아래의

표 1 무효전력 흐름 추적 결과
Table 1 Reactive power tracing Result

모선번호	유형	공급량 [Mvar]
30	발전기	1.02
33		49.8
34		14.87
35		2.51
3-18	선로	1.89
14-15		25.59
15-16		8.41
16-17		6.05
16-21		7.4
17-18		6.63
17-27		20.47
25-26		4.11
26-27		1.38
26-28		1.08
26-29		1.36

표 2 사고 전 후 무효전력 흐름 추적 변화량
Table 2 Reactive power tracing change of before and after contingency

모선번호	변화량 [Mvar]
1	0
3	0.2
4	62.63
7	12.99
8	20.21
12	2.55
15	146.89
16	9.84
18	28.63
21	15.95
23	5.15
24	24.14
25	1.3
26	0.48
27	3.06
29	3.26

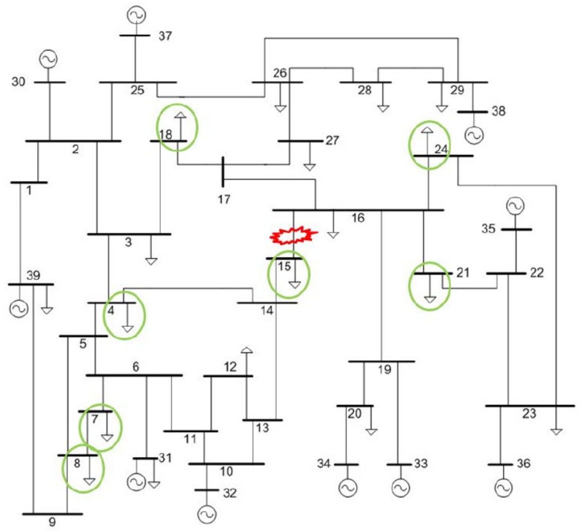

그림 13 무효전력 흐름 추적 변화량이 큰 모선들

Fig. 13 Large variation buses for reactive power tracing

표와 같이 실제 사고 전 후 발전기의 무효 전력 출력 증가를 살펴보면 31, 32번 발전기가 가장 많이 증가한 것을 알 수 있다.

표 3 IEEE 39-모선 계통의 무효전력 발전 증가량

Table 3 Reactive power generation increase of IEEE-39 bus system

모선번호	사고 전 [Mvar]	사고 후 [Mvar]	% 증가량
30	167.5	192.2	14.75%
31	222.3	274.9	23.66%
32	225.9	305.3	35.15%
33	147.5	126	-14.58%
34	184.9	174.9	-5.41%
35	263.1	238.9	-9.20%
36	134.3	120.5	-10.28%
37	19.3	20.2	4.66%
38	117	113.7	-2.82%

하지만 그림 13에서 볼 수 있듯이 무효전력 흐름 변화량이 큰 모선들은 취약지역으로 예상되는 지역 외에도 다양하게 분포되어 있다. 이는 앞 절에서도 언급한 바와 같이 무효전력의 경로가 변하면서 취약지역과 관계없이 나타난다. 따라서 전압 변동 지역 내에서 무효전력 흐름 추적 변화량이 큰 모선을 관찰한다.

표 4는 전압 변동이 큰 부하모선에 대해 무효전력 흐름 추적 변화량을 나타낸 것이다. 전압 변동은 앞서 예상한 취약지역과 비슷한 분포를 보이고 있다. 무효전력 흐름 추적 변화량과 전압 변동 모두 공통적으로 모선 15와 모선 4의 값이 크게 나타났다. 하지만 12, 7, 8번 모선의 경우에는 두 지표가 다른 양상을 보이고 있다. 무효전력 흐름 추적 변화율에 의하면 15, 4, 7, 8번 모선이 취약모선이나 12번 모선은 취약모선이 아닌 것으로 나타난다. 이를 검증하기 위해 위의 5개 모선에 대해서 VQ마진 감소율을 계산한다.

표 4 사고 전 후 전압 변동과 무효전력 흐름 추적 변화

Table 4 Voltage and reactive power tracing change of before and after contingency

모선번호	전압 변동 [p.u]	변화량 [Mvar]
4	0.0120	62.63
7	0.0134	12.99
8	0.0131	20.21
12	0.0192	2.55
15	0.0698	146.89

표 5 사고 전 후 VQ마진 감소율

Table 5 VQ margin reduction of before and after contingency

모선 번호	전압 변동률 [p.u]	변화량 [Mvar]	사고 전 VQ 마진 [Mvar]	사고 후 VQ 마진 [Mvar]	VQ 마진 감소율 [%]
4	0.0200	62.63	-1,007	-708	29.6
7	0.0134	12.99	-975	-650	33.3
8	0.0131	20.21	-1,201	-676	43.7
12	0.0192	2.55	-601	-440	26.7
15	0.0698	146.89	-1,393	-362	74

위의 표는 전압 변동이 큰 상위 5개 모선에 대한 VQ마진을 계산한 것이다. VQ마진 감소율은 사고 전 VQ마진 대비 사고 후 몇 %가 감소하였는지를 계산한 것이다. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 무효전력 흐름 추적 변화가 가장 작은 12번 모선은 VQ마진 감소율이 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 전압 변동은 크지만 다른 모선들에 비해 상대적으로 선로 사고에 대해 취약하지 않다는 것을 의미한다. 위의 결과는 무효전력 흐름 추적 변화량이 전압 변동률에 비해 지역 내 무효전력 취약모선을 판단하는 지수로 더 적절함을 보여준다.

3. 결 론

본 논문은 무효전력 흐름 추적 기법을 이용하여 전압안정도 해석에 중요한 영향을 미치는 무효전력의 흐름을 해석한다. 무효전력 흐름 추적 기법은 선로의 무효전력 손실 및 공급을 고려하기 위해 가상 모선을 선로마다 구성하고 그 유형은 SIL 값을 이용하여 결정한다. 가상 모선 구성 후 proportional sharing rule을 기반으로 무효전력 흐름 추적 알고리즘을 적용한다. 무효전력

흐름 추적 기법은 두 가지 관점으로 계통을 해석할 수 있다. 하나는 부하 측면 해석으로 부하에서 소비되는 무효전력의 공급원을 추적하는 것이고, 다른 하나는 발전 측면 해석으로 발전기에서 발전된 무효전력이 어느 부하에 도달하는지 추적하는 것이다.

또한 본 논문에서는 무효전력 흐름 추적의 변화량을 이용하여 선로 사고에 대한 무효전력 취약모선을 판단하는 방안을 제안한다. 기존의 전압 변동률을 이용한 무효전력 취약지역 판단 방법은 전압의 국지적 특성에 의해 동일 지역 내에서는 비슷한 전압 변화 값을 갖는 단점이 있다. 따라서 전압 변동 지역 내에서 무효전력 취약모선을 탐색하기 위해 무효전력 흐름 추적 변화량이 큰 모선을 관찰한다. 이를 통해 선로 사고 대비 전압 변동 지역 내에서 무효전력이 취약한 모선을 판별할 수가 있다. 이를 검증하기 위해 VQ마진 변화율과 전압 변동률을 이용한다. 이는 사고 전 VQ마진 대비 사고 후 VQ마진 감소량을 %로 계산하고 사고 전 후의 전압 변화를 계산한다.

IEEE 39-모선 계통에 무효전력 흐름 추적 기법을 적용하고 무효전력 취약모선을 판단한다. 그 결과 발전기에서 생산된 무효전력은 대부분 인근 선로나 변압기에서 소비되고 선로나 커패시터의 공급으로 무효전력 흐름이 유지되어 부하까지 도달하는 것을 확인하였고, 전압 변동 지역 내에서 무효전력 흐름 추적 변화량이 큰 모선이 작은 모선들보다 상대적으로 사고에 대해 취약한 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 무효전력 흐름 추적 변화량이 무효전력 취약지역을 판단하는 지수가 될 수 있음을 검증하였다.

향후 연구 방향으로 부하차단 지역 판단 및 취약 모선의 전압 제어 등에 무효전력 흐름 추적 변화량을 이용한 무효전력 취약지역 판단 방안을 적용할 예정이며, 이를 통해 선로 사고에 대한 전력계통의 전압안정도 해석에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20134030200340)와 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017650)

References

[1] Bialek, J.W., "Tracing the Flow of Electricity" IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 4, pp. 313-320, July 1996

[2] Bialek, J.W., and TAM, D.B., "Tracing the Generators' Output" Proceedings, IEE International Conference Opportunities and Advances in International Electric Power Generation, pp. 133-136, Durham, 18-20, March 1996

[3] Michio suwa, Shinichi Iwamoto, "A Power Flow Tracing Method Focused on Reactive Power and SC", Electrical Engineering in Japan, Vol. 156, No.1, pp. 33-43, July 2006

[4] N. C. Abi Samra, "Real and Reactive Power Tracking - Proof of Concept and Feasibility Study", EPRI Report, May 1999

[5] Kirschen, D., "Tracing active and reactive power between generators and loads using real and imaginary currents", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1312-1319, Nov. 1999

[6] Abhyankar, A.R., "Multiple solutions approach to tackle circular flows in real power tracing", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006

[7] Abhyankar, A.R., "Optimization approach to real power tracing: an application to transmission fixed cost allocation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 1350-1361, Aug. 2006

[8] Zhao Jinli, "Voltage stability control based on real power flow tracing", TENCON 2008- 2008 IEEE Region 10 Conference

[9] Mustafa, M.W., "Tracing the real power transfer of individual generators to loads using Least Squares Support Vector Machine with Continuous Genetic Algorithm", Electrical Control and Computer Engineering, 2011 International Conference on Digital Object Identifier

[10] Dai Y., Liu X. D., et.al., "A Cost Allocation Method for Reactive Power Service Based on Power Flow Tracing", Electric Power System Research, Vol.64, No.1, pp. 59-65, Jan. 2003

[11] Ashutosh Tiwari, V.Ajjarapu, "Reactive Power Cost Allocation Based On Modified Power Flow Tracing Methodology" IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007

[12] T.J.E. MILLER, "Reactive Power Control in Electric Systems" JOHN WILEY & SONS, 1982

[13] Thierry Van Cutsem, "Voltage Stability of Electric Power System" Springer, 1998

저 자 소 개

최 윤 혁 (YunHyuk Choi)

1981년 8월 25일생. 2005년 고려대 전기전자전파공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2012~2014 LS산전 시스템S/W연구단 선임연구원. 2014~현재 고려대 BK21-Plus 정보기술사업단 연구교수.
주요 관심분야 : 전력 계통 제어, 계통운영시스템

Tel : 02-3290-3803
Fax : 02-3290-3692
E-mail : lover9000p@korea.ac.kr

배 문 성 (MoonSung Bae)

1984년 11월 23일 생. 2011년 고려대 전기전자전파공학부 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주요 관심분야 : 전력 계통 무효전력 및 전압 안정도, 무효전력예비력, 계통운영시스템

Tel : 02-3290-3697

Fax : 02-3290-3692

E-mail : jubilate@korea.ac.kr

이 병 준 (Byongjun Lee)

1961년 7월 16일생. 1987년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 아이오와 주립대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 고려대 전기공학과 교수. 주요 관심분야 : 전력계통 해석, 안정도 및 제어

Tel : 02-3290-3242

Fax : 02-3290-3692

E-mail : leeb@korea.ac.kr