

전압 정규화를 통한 조류계산의 수렴도 개선

신만철, 김건중, 엄재선, 전동훈, 이병일
충남대학교

The Improvement of Load Flow Convergence in applying Voltage Normalization Method

M.C.Shin, K.J.Kim, J.S.Eum, D.H.Jeon, B.Rhee
Chung-Nam Nat'l Univ

Abstract - When a Bus voltage is low, the Load-Flow is generally blown up. If Bus voltage is normalized, the convergence of Load-Flow is improved.

This paper introduces virtual bus with tap. In that case, the Bus admittance will be considered. And the convergence of Load-Flow in applying virtual bus is debated.

1. 서 론

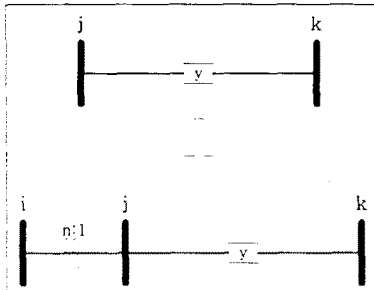
모선의 전압이 정규화 되어 있다면 조류계산의 수렴 특성은 좋아진다. 그러나, 특정 모선의 전압의 크기가 작을 경우 조류계산은 발산할 우려가 있다. 조류계산의 수렴특성을 개선키 위해 전압의 크기를 정규화하는 방법을 생각할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 전압의 크기를 정규화하는 방법으로서 tap이 달린 가상모선을 도입한다. 우선, 선로 성분의 구성에 따른 가상 모선의 적용 방법을 설명하고, 이를 조류계산에 적용하였을 때의 조류계산의 수렴특성을 비교 설명하고자 한다.

2. 모선 전압의 정규화

2.1 가상 모선의 도입

다음의 (그림 1)과 같이 j, k 모선이 있을 때, j 모선의 전압이 낮다고 가정한다. 이때 j 모선 전압에 대해 n:1의 tap 비로서 $V_i=1$ 이 되도록, 가상 모선 i를 취한다. 즉, $V_i=nV_j$ 이다.



(그림 1) 가상 모선의 도입

전류식을 계산하면 식(1)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} I_j \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{jj} & Y_{jk} \\ Y_{kj} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ V_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, $Y_{jj} = Y_{kk} = y$, $Y_{jk} = Y_{kj} = -y$ 이다.

가상 모선의 tap비를 고려하면 다음과 같다.

$$I_j = nI_i$$

$$V_j = \frac{1}{n} V_i$$

$$\begin{bmatrix} V_j \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_j \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

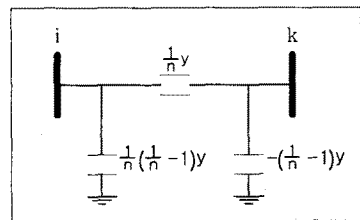
식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{jj} & Y_{jk} \\ Y_{kj} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix}$$

이를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{jj} & Y_{jk} \\ Y_{kj} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{n} Y_{jj} & \frac{1}{n} Y_{jk} \\ Y_{kj} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{n^2} Y_{jj} & \frac{1}{n} Y_{jk} \\ \frac{1}{n} Y_{kj} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 모선 구조도로 표시하면 (그림 2)와 같다.

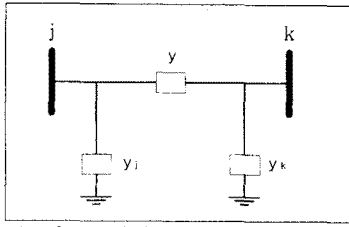


(그림 2) 가상 모선 적용시 등가 회로

2.2 가상 모선의 적용

2.2.1 병렬 콘덴서 고려

(그림 3)과 같이 병렬 콘덴서가 있는 선로를 고려하여 본다.



(그림 3) 병렬콘덴서가 있는 선로

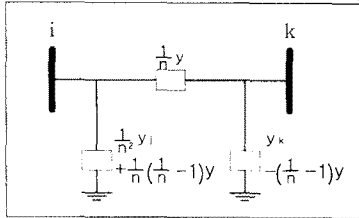
어드미턴스의 구성은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Y_{jj} &= y + y_j \\ Y_{jk} &= Y_{kj} = -y \\ Y_{kk} &= y + y_k \end{aligned} \quad (5)$$

j모선에 가상모선 i를 취할때, 어드미턴스의 구성은 다음과 같이 식(5)를 식(4)에 대입한 형태가 된다.

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n^2}(y + y_j) & -\frac{1}{n}y \\ -\frac{1}{n}y & y + y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

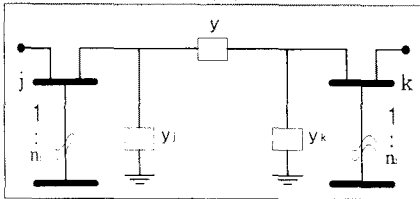
이를 모선 구조도로 나타내면 (그림 4)와 같다.



(그림 4) 가상 모선 적용후 등가회로

2.2.2 가상 모선을 여러개 취하였을 경우

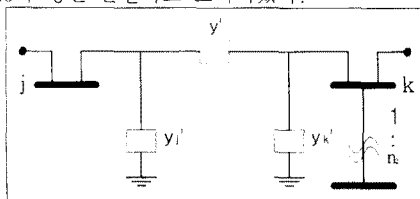
이제 모든 모선에 가상 모선을 적용할 경우를 고려해 본다. (그림 5)는 전모선에 가상 모선을 적용하였을 때, j, k모선에 대해 나타낸 것이다.



(그림 5) 전모선에 가상 모선을 적용

j모선에 있는 가상모선을 먼저 처리한 후, k모선에 있는 가상모선을 처리하는 식으로 수행해 나간다. 그 다음에 k모선에 연결된 다른 모선에 적용하여 전모선에 확대 적용시킨다.

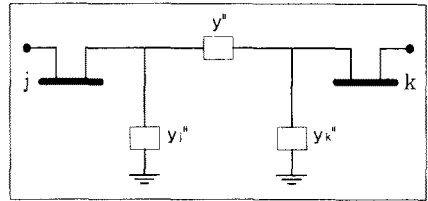
먼저 j 모선의 가상모선을 처리하면 (그림 6)과 같이 되고 어드미턴스 구성은 식(7)과 같다. 그림에서는 y'_j 가 선로의 from측 병렬 콘덴서로 고려되었고, y'_k 가 선로의 to측 병렬 콘덴서로 고려되었다.



(그림 6) j모선의 가상 모선을 소거

$$\begin{aligned} y' &= \frac{1}{n_1} y \\ y'_j &= \frac{1}{n_1} \left(\frac{1}{n_1} - 1 \right) y + \frac{1}{n_1^2} y_j \\ y'_k &= \left(1 - \frac{1}{n_1} \right) y + y_k \end{aligned} \quad (7)$$

이제 k모선의 가상모선을 처리하면 (그림 7)과 같이 되고 어드미턴스 구성은 식(8)과 같이 된다. 이번에는 y'_k 가 선로의 from측 병렬 콘덴서로 고려되었고, y''_k 가 선로의 to측 병렬 콘덴서로 고려되었다.



(그림 7) k모선의 가상 모선을 소거

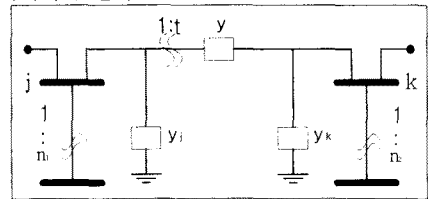
$$\begin{aligned} y'' &= \frac{1}{n_2} y' \\ y''_j &= \left(1 - \frac{1}{n_2} \right) y' + y'_j \\ y''_k &= \frac{1}{n_2} \left(\frac{1}{n_2} - 1 \right) y' + \frac{1}{n_2^2} y'_k \end{aligned} \quad (8)$$

정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} y'' &= \frac{1}{n_2 n_1} y \\ y''_j &= \frac{1}{n_1} \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) y + \frac{1}{n_1^2} y_j \\ y''_k &= \frac{1}{n_2} \left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} \right) y + \frac{1}{n_2^2} y_k \end{aligned} \quad (9)$$

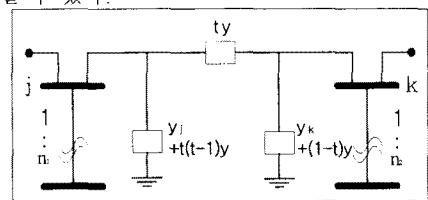
2.2.3 선로 변압기가 있는 가상모선의 처리

(그림 7)과 같이 변압기가 있는 선로의 모선에 가상 모선이 설치된다면, 선로의 성분은 선로의 변압기에 의한 변화분과 가상모선의 변압기에 의한 변화분 두 가지가 고려되어야 한다.



(그림 7) 선로 변압기가 있는 가상모선

먼저 선로의 변압기에 대해 고려하면 (그림 8)로 등가화 될 수 있다.

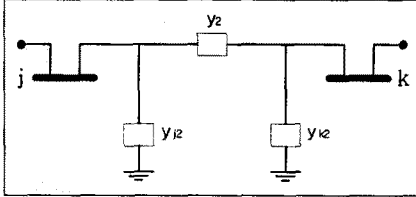


(그림 8) 선로 변압기를 고려시 선로성분의 변화

[그림 8]은 [그림 5]와 같은 형태로서, 선로 변압기에 의해 변화된 선로성분을 가지고 있으며 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} y_0 &= t \cdot y \\ y_{j0} &= y_j + t(t-1)y \\ y_{k0} &= y_k + (1-t)y \end{aligned} \quad (10)$$

이제 j, k 모선의 가상모선을 처리하기 위해 식(10)을 식(9)에 대입한다.



[그림 9] 선로 변압기와 가상모선을 고려한 경우

$$\begin{aligned} y_2 &= \frac{1}{n_2 n_1} t y \\ y_{12} &= \frac{1}{n_1} \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) t y + \frac{1}{n_1^2} y_{j0} \\ y_{22} &= \frac{1}{n_2} \left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1} \right) t y + \frac{1}{n_2^2} y_{k0} \end{aligned} \quad (11)$$

이를 Y_{BUS} 로서 정리하면 다음과 같다.

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_1^2} t^2 y + \frac{1}{n_1^2} y_j & -\frac{1}{n_1 n_2} t \cdot y \\ -\frac{1}{n_1 n_2} t y & \frac{1}{n_2^2} y + \frac{1}{n_2^2} y_k \end{bmatrix}$$

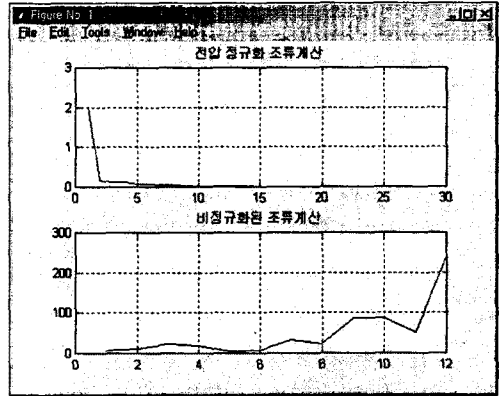
2.2.4 조류계산에 적용

낮은 전압을 갖는 모선 각각에 대해 tap이 있는 가상 모선을 지정하여, 가상 모선의 전압이 1이 되도록 tap 비 n의 값을 구한다. 조정된 n 값을 이용해 어드미턴스 Y_{BUS} 를 구성한 뒤, 조류계산을 수행할 시에는 $V_i = nV_j = 1$ 을 초기치로 반영하여 계산한다. 이의 계산 결과로 부터 새로운 $V_i^{(2)}$ 를 얻고, tap비로 부터 $V_j^{(2)} = \frac{1}{n} V_i^{(2)}$ 를 구해낸다. 다시 $V_j^{(2)}$ 대하여 $V_i^{(3)} = n^{(2)} V_j^{(2)} = 1$ 가 되도록 tap비 $n^{(2)}$ 를 구한 뒤, 이 $n^{(2)}$ 값을 이용해 Y_{BUS} 를 구성한 뒤, 조류계산을 반복 수행하면 된다.

3. 사례연구

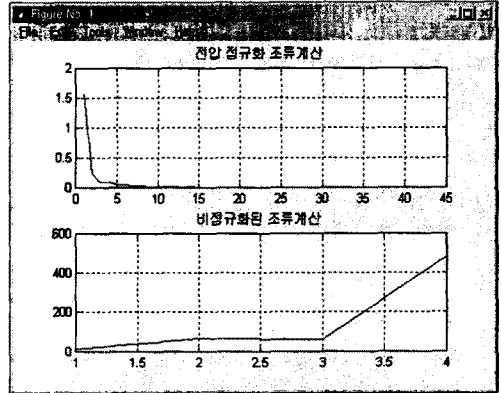
전압 정규화를 실험하기 위해 IEEE57 모선을 사용하였고, 조류계산 방법은 Newton-Raphson 법을 사용하였다. IEEE57 모선의 특정 부하모선의 전압값을 인위적으로 조정하면, 일반적인 조류계산과 전압정규화를 적용한 조류계산을 함께 수행하여 수렴, 발산여부를 판정하였다.

다음의 [그림 10]은 IEEE57 데이터에서 1050 부하 모선의 전압을 0.580으로 떨어뜨려, 이 값을 초기치로 적용하여 전압 정규화 조류계산과 일반적인 조류계산을 수행했을 때의 Norm 값을 비교한 것이다. 가상 모선을 적용한 전압 정규화 조류계산은 수렴특성이 좋았고, 정규화를 수행치 않은 조류계산에서는 발산하는 것을 알 수 있다.



[그림 10] IEEE57 1050모선 전압값을 조정한 경우

[그림 11]은 IEEE57 데이터에서 1043 부하모선의 전압을 0.604로 떨어뜨려, 이 값을 초기치로 적용하여 전압 정규화 조류계산과 일반적인 조류계산을 수행했을 때의 Norm 값을 비교하였다. 전압 정규화를 수행했을 경우 조류계산의 수렴특성이 개선됨을 알 수 있다.



[그림 11] IEEE57 1043모선 전압값을 조정한 경우

4. 결 론

가상 모선을 적용하였을 때 가상 모선의 tap비는 전력 P, Q에는 관여하지 않았고, 선로의 어드미턴스 성분에만 기여하였다. 병렬콘덴서가 있는 모선을 비롯하여 선로 변압기가 있는 모선에서도 가상 모선의 적용이 가능함을 알 수 있었다.

IEEE57 모선의 특정 모선에 대해 전압 정규화를 수행한 결과 수렴 특성이 일반 조류계산보다 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 수식적으로 가상 모선을 전 모선에 확대 적용시킬 수 있는 가능성을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.KUNDUR, "POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL", McGraw-Hill Inc, 1993
- [2] M.A.PAL, "Computer Techniques in Power System Analysis", McGraw-Hill Inc, 1979
- [3] Glenn W.Stagg, Ahmed H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill Inc, 1968