

순시무효전력 보상에 의한 중성선 전류의 제거

김 호 성
국립천안공업대학 제어계측과

Eliminating the Neutral Current by the Instantaneous Reactive Power Compensation

Hyosung Kim
Cheonan National Technical College

Abstract - This paper proposed the p-q-r coordinate system where the instantaneous active power p, and the two instantaneous reactive powers q_q , q_r were defined. The three power components are linearly independent, so the compensation for the two instantaneous reactive powers leads to control the two components of the current space vector. With the theory, the neutral current of the three-phase four-wire system can be eliminated by only compensating the instantaneous reactive power using no energy storage element.

1. 서론

우리나라의 배전계통은 미국, 유럽등의 나라와 같이 3상 4선식을 채용하고 있다. 단상 다이오드정류기 부하의 경우 선전류의 약 1.73배까지 되는 고조파 전류가 중성선에 흐른다.[1] 종래에 설치되어 있는 배전선의 중성선은 이러한 고조파 전류에 대한 대책이 없이 설계되었으므로 향후 전력전자 기기의 증가에 따라 심각한 문제를 야기하게 될 것이다.[2]

3상 계통에서 순시무효전력을 보상하는 경우 이론적으로 에너지 저장요소가 필요하지 않다. 이는 직류속 커패시터와 같은 에너지 저장요소를 극소화시킬 수 있어서 전력보상기의 크기와 가격을 감소 시키며, 신뢰성을 향상 시킨다.

3상 계통에서 영상 전압과 영상전류 성분은 순시무효전력 뿐만 아니라 순시유효전력에도 영향을 미친다. 따라서 순시무효전력만의 보상에 의해서 계통의 중성선 전류를 제거하기 위해서는 영상전류의 제거가 계통의 순시유효전력에 영향을 미치지 않도록 하는 특별한 보상 알고리즘이 필요하였다.[3]

본 논문에서는 전류공간벡터를 전압공간벡터에 기준하여 3축 성분으로 분해하고 3개의 선형독립적인 순시전력 성분을 정의한다. 정의된 3개의 전력성분의 보상에 의해서 3축의 순시전류 성분을 독립적으로 제어할 수 있다. 전원전압이 불평형되고 중성선에 영상성분 전류가 흐르는 경우에도 순시무효전력만의 보상에 의해 중성선 전류를 제거할 수 있음을 이론적으로 증명하고 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 전류공간벡터 및 순시전력의 정의

2.1 a-β-0 좌표 변환

3상 계통에서 3상 전압은 일반적으로 다음과 같이 a-β-0 좌표계로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_\beta \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_\beta \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

중성 선에 흐르는 전류를 고려하면 3상 전류도 일반적으로 다음과 같이 a-β-0 좌표계로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 i_0 는 영상전류이며 중성선 전류 i_n 은 $\sqrt{3}i_0$ 의 관계에 있다. 3상 평형의 조건이라면 전류 및 전압 공간벡터는 a-β평면위에 원형의 궤적을 그리며 회전할 것이다. 계통의 전압이나 전류에 역상분 또는 고조파 성분이 포함되면 공간벡터의 궤적은 더 이상 원형이 되지 못하여 왜곡된 형태를 갖게된다. 계통의 전압이나 전류에 영상성분이 포함되면 공간벡터의 궤적은 영상성분의 부호에 따라 a-β평면의 위 또는 아래에 나타나게 된다.

2.2 p-q-r 좌표 변환

a-β-0 좌표계의 0-축을 중심으로 잡고 θ_1 만큼 회전시켜서 a-축이 전압 공간벡터가 a-β 평면에 수직으로 투영되는 선 위에 오도록 하면 새로운 a'-β'-0 좌표계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_\beta \\ i'_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{e_a}{e_{a\beta}} & \frac{e_\beta}{e_{a\beta}} & 0 \\ -\frac{e_\beta}{e_{a\beta}} & \frac{e_a}{e_{a\beta}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}$$

단 $e_{a\beta} = \sqrt{e_a^2 + e_\beta^2}$

다음, a'-β'-0 좌표계의 β'-축을 중심으로 잡고 θ_2 만큼 회전시켜서 a'-축이 전압 공간벡터의 방향과 일치되도록 하면 새로운 p-q-r좌표계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_a \\ i'_\beta \\ i'_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{e_{a\beta}}{e_{a\beta 0}} & 0 & \frac{e_0}{e_{a\beta 0}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{e_0}{e_{a\beta 0}} & 0 & \frac{e_{a\beta}}{e_{a\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_a \\ i'_\beta \\ i'_0 \end{bmatrix}$$

단 $e_{a\beta 0} = \sqrt{e_a^2 + e_\beta^2 + e_0^2}$

이때 β'-축과 q-축은 동일 하다. 식(3)과 (4)에 의해 p-q-r좌표계와 a-β-0 좌표계의 관계는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_a}{e_{a\beta 0}} & \frac{e_\beta}{e_{a\beta 0}} & \frac{e_0}{e_{a\beta 0}} \\ -\frac{e_\beta}{e_{a\beta}} & \frac{e_a}{e_{a\beta}} & 0 \\ -\frac{e_0}{e_{a\beta}} & \frac{e_a}{e_{a\beta}} & \frac{e_{a\beta}}{e_{a\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

p-q-r좌표계의 p-축은 전압 공간벡터의 방향과 일치한다. q-축은 p-축과 직교하며 a-β평면위에 존재한다. 마지막으로 r-축은 p-축과 q-축이 이루는 평면과 수직을 이룬다. p-q-r의 순서는 오른손 나사 법칙에 준한다.

p-q-r좌표계에서 전압공간벡터는 오직 p-축 성분만 존재하며 그 크기는 식 (6)과 같다.

$$e_p = \sqrt{e_a^2 + e_\beta^2 + e_0^2} = \sqrt{e_a^2 + e_\beta^2 + e_c^2} \quad (6)$$

2.3 순시전력

순시유효전력과 순시무효전력은 각각 순시전압/전류 공간벡터의 스칼라 곱 및 벡터 곱으로 정의된다. [3]

$$p \triangleq \vec{e}_{pqr} \cdot \vec{i}_{pqr} = e_p i_p \quad (7)$$

$$\vec{q}_{pqr} \triangleq \vec{e}_{pqr} \times \vec{i}_{pqr} = [0, -e_p i_r, e_p i_q]^T \quad (8)$$

식(7)과 (8)을 매트릭스 형태로 정리하면 순시전력과 전류공간벡터 사이에는 식 (9) 및 (10)의 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = e_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{e_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (10)$$

즉, 순시유효전력 p 및 순시무효전력 q_r, q_q 는 각각 전류 공간벡터의 3성분인 i_p, i_q, i_r 에 의해 유일하게 정의된다.

순시피상전력 s 는 순시전류/전압 공간벡터의 크기를 산술곱함으로써 정의할 수 있다.

$$s \triangleq e_p \cdot \sqrt{i_p^2 + i_q^2 + i_r^2} = \sqrt{p^2 + q_r^2 + q_q^2} \quad (11)$$

순시무효전력 q_r, q_q 를 보상하여 전류공간벡터의 2성분인 i_p 와 i_r 을 제거하면 계통의 순시피상전력은 순시유효전력 $e_p i_p$ 와 같게되며 계통의 전류는 i_p 로 최소화 된다.

3. 순시전력보상 알고리즘

3.1 순시무효전력 보상

순시무효전력을 보상함으로써 순시전류 공간벡터의 위상을 제어할 수 있다. 그림1에서 전류 공간벡터 \vec{i} 는 전압 공간벡터 \vec{e} 와 동상성분인 i_p 와 직각성분인 i_q 및 i_r 로 분해된다. 순시무효전력 q_r, q_q 의 보상을 통하여 i_q 와 i_r 을 제어하면, 전류공간벡터의 끝점을 q-r 평면과 평행하며 i_p 에 위치하는 무한 평면인 i_p -평면상의 임의의 곳에 위치시킬 수 있다.

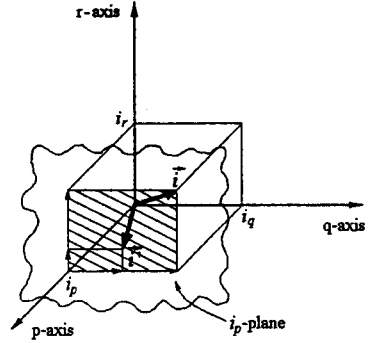


그림1. 순시무효전력과 전류 공간벡터의 관계
Fig. 1 Relation between the instantaneous reactive power and current space vector.

3.1 중성선전류 제거 알고리즘

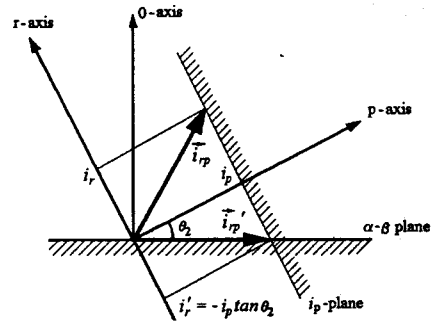


그림2 중성선 전류제거 알고리즘
Fig. 2 The algorithm for the neutral current elimination

그림2에 보인 바와 같이, 전원계통에 영상전압 성분이 있는 경우 p-q-r좌표계의 p-축은 a-β-0 좌표계의 a-β평면으로부터 θ_2 만큼 떨어져 있고 r-축은 0-축으로부터 역시 θ_2 만큼 떨어져 있게 된다. 이때 i_p -평면은 $90^\circ - \theta_2$ 의 각도로 a-β평면과 접하게 된다. 중성선 전류가 영이 되기 위해서는 전류 공간벡터가 a-β평면위에 위치하여야 한다. 따라서 무효전력 q_q 를 적절히 보상하여 i_r 을 식(12)와 같이 되도록 제어하면 계통의 중성선 전류는 제거된다. 즉, 그림2에서 i_r 및 i_p 요소에 의한 전류벡터 \vec{i}_m 가 a-β평면위의 전류벡터 \vec{i}_m' 으로 제어되는 것이다.

$$i_r = -i_p \tan \theta_2 = -i_p \frac{e_0}{e_{a\beta}} \quad (12)$$

추가적으로, 무효전력 q_r 을 보상하여 i_q 가 영이 되도록 하면, 전류공간벡터 \vec{i} 는 \vec{i}_m' 과 같게되어 전압공간벡터가 a-β평면에 수직으로 투영되는 선위에 놓여지게 된다. 이때, 전류공간벡터의 크기는 중성선전류가 없는 조건에서 최소화 된다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

단상 정류기 부하를 갖는 3상-4선식 계통에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림3에 3상-4선식 계통의 시뮬레이션 모델을 보인다. 전원 전압은 3상 평형된 이상적인 정현파의 경우와 c상 전압이 20% 떨어져서 불평형된 두 가지 조건을 고려한다. 부하측 단상 정류기의 직류출력 필터는 각각 $L=1[mH]$, $C=1000[\mu F]$ 이다. 각 단상 정류기 부하는 서로 다른 값을 갖는다. 표1에 시뮬레이션 조건을 보인다.

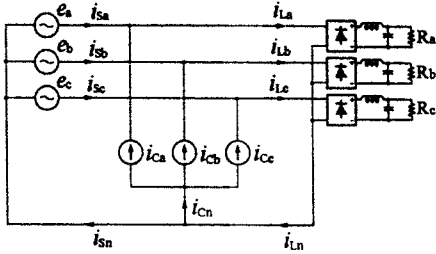


그림3 시뮬레이션 모델
Fig.3 Simulation model.

표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation condition

	Case 1	Case 2
Source voltage	$E_a[V_{rms}]$	127
	$E_b[V_{rms}]$	127
	$E_c[V_{rms}]$	101
Load resistance	$R_a[\Omega]$	2.00
	$R_b[\Omega]$	3.87
	$R_c[\Omega]$	4.84

4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 PSIM에 의하여 수행하였다. 시뮬레이션 파형을 그림4 및 5에 보인다. 전력보상기는 초기에 정지상태에 있다가 80[ms] 후에 동작된다. 시뮬레이션 파형은 전력보상기가 동작하기 전후의 상태를 같이 보여준다. 그림4는 전원전압이 평형되어 있는 경우이고 그림5는 c상 전압의 크기가 나머지 두 상의 전압에 비하여 80%로서 불평형 되어 있는 경우이다. 그림4d) 및 그림5d)에서 알 수 있는 바와 같이, 두 경우 모두 중성선의 전류가 완벽히 제거되었다. 또한 그림4e) 및 그림5e)에 나타난 것처럼, 두 경우 모두 전력보상기에서의 순시 유효전력의 흐름이 발생되고 있지 않음을 알 수 있다. 전력보상기에서의 순시유효전력 p_c 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$p_c = e_a i_{ca} + e_b i_{cb} + e_c i_{cc} \quad (13)$$

4. 결론

p-q-r좌표계를 도입하여 3상 4선식 계통에서 전류 공간벡터 및 전압 공간벡터를 정의하였다. 전압 및 전류 공간벡터의 스칼라곱 및 벡터곱으로 정의 되는 순시유효전력 p 와 두 개의 순시 무효전력 요소 q_0 및 q_1 은 서로 선형 독립적인 관계에 있다. 순시무효전력 q_0 및 q_1 은 각각 전류 공간벡터 i_r 및 i_0 에만 영향을 미치므로 순시 무효전력만을 보상하는 것에 의해 전류공간벡터의 두 성분, i_r 및 i_0 를 원하는대로 제어할 수 있다. 제안된 순시전력 이론을 적용하여 전력보상기에서의 에너지 저장요소가 필요없이 3상4선식 계통의 중성선 전류를 제거하는 순시무효전력보상 알고리즘을 수립하였고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

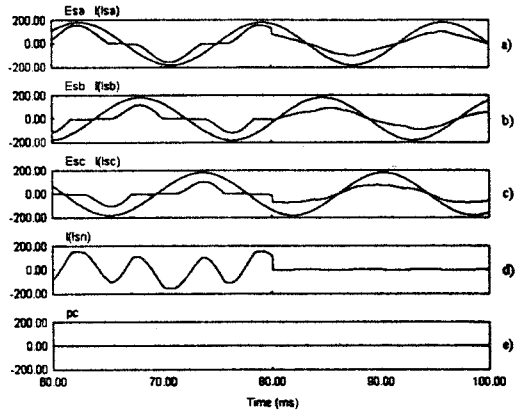


그림4 시뮬레이션 결과(Case 1); a) a상 전원전압과 전원전류의 파형, b) b상 전원전압과 전원전류의 파형, c) c상 전원전압과 전원전류의 파형, d) 중성선 전류의 파형, e) 보상기에서 순시유효전력의 흐름.

Fig. 5 Simulation results(Case 1); a) Waveforms of the source voltage and current for a-phase, b) Waveforms of the source voltage and current for b-phase, c) Waveforms of the source voltage and current for c-phase, d) Waveform of the source-side neutral current, e) The instantaneous active power flows from the power compensator.

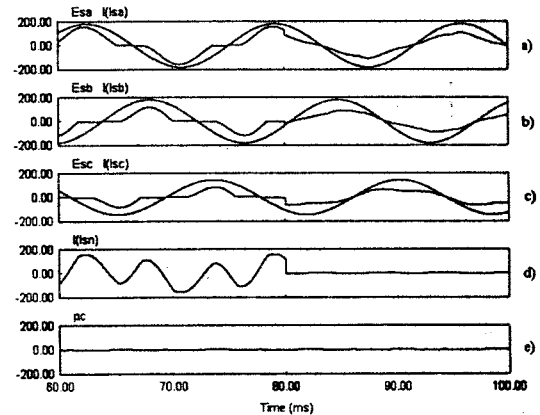


그림5 시뮬레이션 결과(Case 2); a) a상 전원전압과 전원전류의 파형, b) b상 전원전압과 전원전류의 파형, c) c상 전원전압과 전원전류의 파형, d) 중성선 전류의 파형, e) 보상기에서 순시유효전력의 흐름.

Fig. 5 Simulation results(Case 2); a) Waveforms of the source voltage and current for a-phase, b) Waveforms of the source voltage and current for b-phase, c) Waveforms of the source voltage and current for c-phase, d) Waveform of the source-side neutral current, e) The instantaneous active power flows from the power compensator.

[참고문헌]

- [1] Robert Arthur, R.A.Shanahan, P.E, "Neutral Currents in Three Phase Wye Systems," ICHQP'96-Lasvegas, pp.40-47, 1996.
- [2] P.Enjeti, W.Shireen, P.Packebush, I.Pitel, "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three phase Four wire Electric Distribution Systems, Proceedings of PESC-93, pp.939-946, 1993.
- [3] 김효성, 최재호, "전압 펄핑매트릭스를 사용한 일반화 순시전력 보상이론," 전기학회 논문지, 제 47권, 제8호, pp.1169-1175, 1998.