

제어 자유도를 한 차원 증가시킨 순시무효전력 보상이론

金孝城

국립천안공업대학 제어계측과

Instantaneous Reactive Power Compensation Theory: Increasing The Control Freedom One Degree Higher

Hyosung Kim

Dept. of Control & Measurement

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 a three-phase four-wire system can be eliminated by only compensating the instantaneous reactive power using no energy storage element.

3상 계통에서 3상 전압은 일반적으로 다음과 같이 α - β -0 좌표계로 변환된다[1].

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

1. 서론

중성선에 흐르는 전류를 고려하면 계통의 전류도 일반적으로 다음과 같이 α - β -0 좌표계로 변환된다.

3상 계통에서 순시무효전력을 보상하는 경우 이론적으로 에너지 저장요소가 필요하지 않다[1]. 다시 말해, 정지전력형 스위치에 의한 스위칭을 적절히 함으로써 순시무효전력을 상쇄시킬 수 있기 때문에 전력보상기에서 직류측 커패시터와 같은 에너지 저장요소를 극소화시킬 수 있다. 이는 전력보상기의 크기와 가격을 감소시키며, 신뢰성을 향상시킨다.

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

여기서 i_0 는 영상전류이며 중성선 전류 i_n 은 $\sqrt{3}i_0$ 의 관계에 있다.

3상 계통에서 순시유효전력과 순시무효전력은 각각 전압공간벡터와 전류공간벡터의 스칼라곱 및 벡터곱에 의해 정의할 수 있다[2]. 계통의 영상전압과 영상전류 성분은 순시무효전력 뿐만 아니라 순시유효전력에도 영향을 미친다[2,3]. 따라서 순시무효전력만의 보상에 의해서 계통의 중성선 전류를 제거하기 위해서는 영상전류의 제거가 계통의 순시유효전력에 영향을 미치지 않도록 하는 특별한 보상 알고리즘이 필요하였다[4].

2.2 p-q-r 좌표 변환

α - β -0 좌표계를 전압공간벡터의 방향에 맞추어 회전시키면, 새로운 좌표계인 p-q-r좌표계와 α - β -0 좌표계의 관계는 다음과 같이 정리된다.

본 논문에서는 전압공간벡터의 회전에 따라 회전하는 p-q-r 좌표계를 제시한다. p-q-r 좌표계의 전압공간벡터와 전류공간벡터의 스칼라곱에 의해서 한 개의 순시유효전력요소가 정의되며 벡터곱에 의해서 두 개의 순시무효전력요소가 정의된다. 정의되는 3개의 순시전력요소는 서로 선형독립성을 갖는다. 따라서, 3개의 순시전력성분을 보상함으로써 3축의 순시전류 성분을 독립적으로 제어할 수 있다. 순시무효전력만을 보상하는 경우는 2축의 순시전류 성분을 독립적으로 제어할 수 있다. 전원전압이 불평형 되고 중성선에 영상성분 전류가 흐르는 경우에도 순시무효전력만의 보상에 의해 중성선 전류를 제거할 수 있음을 이론적으로 증명하고 시물레이션 실험을 통해 검증한다.

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_a}{e_{a\beta 0}} & \frac{e_\beta}{e_{a\beta 0}} & \frac{e_0}{e_{a\beta 0}} \\ -\frac{e_\beta}{e_{a\beta}} & \frac{e_a}{e_{a\beta}} & 0 \\ -\frac{e_0 e_a}{e_{a\beta} e_{a\beta 0}} & -\frac{e_\beta e_0}{e_{a\beta} e_{a\beta 0}} & \frac{e_{a\beta}}{e_{a\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

p-q-r좌표계의 p-축은 전압 공간벡터의 방향과 일치한다. q-축은 p-축과 직교하며 α - β 평면 위에 존재한다. 마지막으로 r-축은 p-축과 q-축이 이루는 평면과 수직을 이룬다. p-q-r의 순서는 오른손 나사 법칙과 같다.

p-q-r좌표계에서 전압공간벡터는 오직 p-축 성분만 존재하며 그 크기는 식(4)와 같다.

2. 전류공간벡터 및 순시전력의 정의

2.1 α - β -0 좌표 변환

$$e_p = \sqrt{e_a^2 + e_\beta^2 + e_0^2} = \sqrt{e_a^2 + e_b^2 + e_c^2} \quad (4)$$

2.3 순시전력

순시유효전력과 순시무효전력은 각각 순시전압/전류 공간벡터의 스칼라 곱 및 벡터 곱으로 정의된다[2].

$$p \triangleq \vec{e}_{pr} \cdot \vec{i}_{pr} = e_p i_p \quad (5)$$

$$\vec{q}_{pr} \triangleq \vec{e}_{pr} \times \vec{i}_{pr} = [0, -e_p i_r, e_p i_q]^T \quad (6)$$

식(5)와 (6)을 매트릭스 형태로 정리하면 순시전력과 전류공간벡터 사이에는 식(7) 및 (8)의 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = e_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{e_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

순시유효전력 p 및 순시무효전력 q_r, q_q 는 각각 전류 공간벡터의 3성분인 i_p, i_q, i_r 에 의해 유일하게 정의되며 선형독립성을 갖는다. 다시 말해, 순시유효전력 p 는 i_p 에 의해서만 영향을 받으며 i_q, i_r 과는 관계가 없다. 또한 순시무효전력 q_r, q_q 를 보상함으로써 전류공간벡터의 2성분인 i_q, i_r 을 각각 독립적으로 제어할 수 있다.

3. 순시전력보상 알고리즘

3.1 순시무효전력 보상

3상 계통에서 순시무효전력만을 보상하는 경우, 이론상 전력보상기에서 에너지 저장요소가 필요하지 않다. 따라서 전압형 인버터를 전력보상기로 사용하는 경우, 전력보상기의 사이즈가 줄어들고 커패시터의 열화 등에 의한 문제가 발생하지 않는다. 특히 고전압용의 커패시터를 필요로 하는 송전계통의 전력보상에 있어서는 커패시터의 용량을 줄이는 것은 필수적이다[4].

순시무효전력만을 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 궤적을, q-r 평면과 평행하며 i_p 에 위치하는 무한 평면인, i_p -평면상의 임의의 점으로 제어 가능하다.

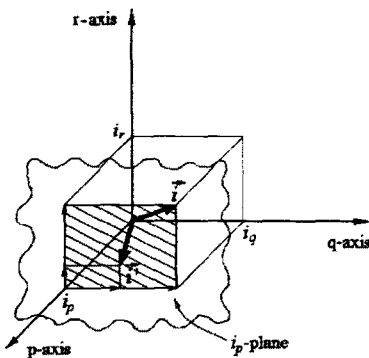


그림1. 순시무효전력의 보상과 전류 공간벡터의 관계
Fig. 1 Relation between the instantaneous reactive power compensation and current space vector.

3.1 중성선 전류 제거 알고리즘

전원계통에 영상전압 성분이 있는 경우, p-q-r좌표계의 p-축은 α - β -0 좌표계의 α - β 평면으로부터 θ_2 만큼 떨어져 있고 r-축도 0-축으로부터 역시 θ_2 만큼 떨어져 있게 된다. q-축은 항상 α - β 평면 위에 위치한다. 전류 공간벡터의 r-축 및 p-축 성분인 i_r 및 i_p 가 그림2와 같다고 하면, i_p -평면은 $90^\circ - \theta_2$ 의 각도로 α - β 평면과 접하게 된다. 중성선 전류가 영이 되기 위해서는 전류 공간벡터가 α - β 평면 위에 위치하여야 한다. 따라서 무효전력 q_r 를 적절히 보상하여 i_r 을 식(9)와 같이 되도록 제어하면 계통의 중성선 전류를 제거할 수 있다. 즉, 그림2에서 i_r 및 i_p 요소에 의한 전류벡터 \vec{i}_p 를 α - β 평면 위의 전류벡터 \vec{i}_p' 으로 제어하면 된다.

$$i_r' = -i_p \tan \theta_2 = -i_p \frac{e_0}{e_{\alpha\beta}} \quad (9)$$

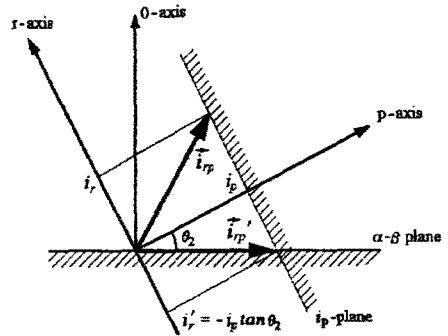


그림2 중성선 전류제거 알고리즘
Fig. 2 The algorithm for the neutral current elimination.

추가적으로, 무효전력 q_r 을 보상하여 i_r 가 영이 되도록 하면, 전류공간벡터 \vec{i} 는 \vec{i}_p' 과 같게되어 전압공간벡터가 α - β 평면에 수직으로 투영되는 선 위에 놓이게 된다. 따라서, 전류공간벡터의 크기는 중성선 전류가 제거된 상태에서 최소화된다. 이때 계통의 순시유효전력에는 전혀 변화가 발생하지 않으므로 전력보상기에 순시유효전력의 흐름이 발생하지 않으며 직류 링크 측의 커패시터와 같은 에너지저장요소가 필요하지 않다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

표 1 시뮬레이션 조건
Table 1 Simulation condition

		Case 1	Case 2
Source voltage	Ea[Vrms]	127	127
	Eb[Vrms]	127	127
	Ec[Vrms]	127	101
Load resistanc	Ra[Ω]	2.00	2.00
	Rb[Ω]	3.87	3.87
	Rc[Ω]	4.84	4.84

단상 정류기 부하를 갖는 3상-4선식 계통에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림3에 3상-4선식 계통의 시뮬레이션 모델을 보인다. 전원전압은 3상 평형된 이상적인 정현파인 경우(Case 1)와 c상 전압이 다른 두 상에 비하여 20% 떨어져서 불평형된(Case 2) 두 가지 조건을 고려한다. 부하측 단상 정류기의 직류출력 필터는 각각 $L=1[mH]$, $C=1000[\mu F]$ 이다. 각 단상 정류기 부하는 서로 상이하다. 표1에 시뮬레이션 조건을 보인다.

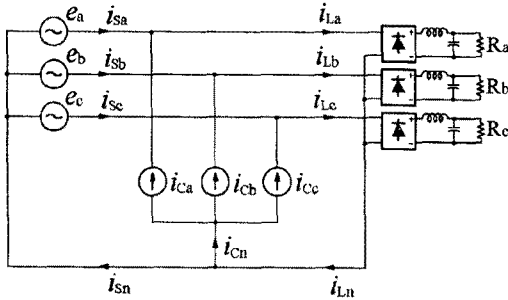


그림3 시뮬레이션 모델
Fig.3 Simulation model.

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 평형 되어 있는 경우(Case 1)이고 그림5는 c상 전압의 크기가 나머지 두 상의 전압에 비하여 80%로서 불평형 되어있는 경우(Case 2)이다. 두 경우 모두 전력보상기가 동작하기 전에는 중성선에 3고조파의 영상성분전류가 흐른다. Case 1의 경우 중성선 전류에 기본파 성분이 포함되어 있다. 이는 각상의 부하저항 값이 달라서 불평형 되었기 때문이다. Case 2의 경우는 중성선에 흐르는 전류의 기본파 성분이 좀더 증가한 것을 알 수 있는데 이는 전원전압이 불평형 되어있기 때문이다. 80[ms] 후에 전력보상기가 동작하면 두 경우 모두 중성선의 전류가 완벽히 제거된다. 또한 그림4e) 및 그림5e)에 나타난 것처럼, 두 경우 모두 전력보상기에서의 순시 유효 전력의 흐름이 발생되고 있지 않음을 알 수 있다. 이는 전력보상기에 에너지저장요소가 필요하지 않음을 의미한다. 전력보상기에서의 순시유효전력 p_c 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$p_c = e_a i_{Ca} + e_b i_{Cb} + e_c i_{Cc} \quad (10)$$

4. 결론

p-q-r좌표계를 도입하여, 3상 4선식 계통에서 전류 공간벡터 및 전압 공간벡터의 스칼라곱 및 벡터곱으로 정의되는, 순시유효전력 p 와 두 개의 순시무효전력 q_a 및 q_r 를 정의하였다. 순시유효전력 q_a 및 q_r 은 각각 전류 공간벡터 i_r 및 i_q 에만 영향을 미치므로 순시무효전력만을 보상하는 것에 의해 전류공간벡터의 두 성분, i_r 및 i_q 를 독립적으로 제어할 수 있다. 순시무효전력만의 보상에 의해서 3상4선식 계통의 중성선 전류를 제거하는 전력보상 알고리즘을 수립하였고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 제안된 전력보상기에는 직류 링크측 커패시터와 같은 에너지저장요소가 필요하지 않다.

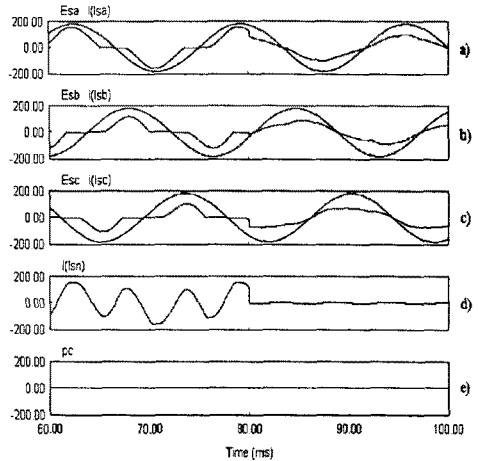


그림4 시뮬레이션 결과(Case 1); a) a상 전원전압과 전원전류의 파형, b) b상 전원전압과 전원전류의 파형, c) c상 전원전압과 전원전류의 파형, d) 중성선 전류의 파형, e) 전력보상기에서 순시유효전력의 흐름.

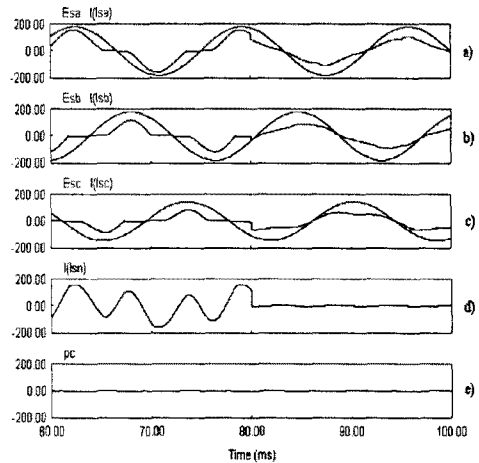


그림5 시뮬레이션 결과(Case 2); a) a상 전원전압과 전원전류의 파형, b) b상 전원전압과 전원전류의 파형, c) c상 전원전압과 전원전류의 파형, d) 중성선 전류의 파형, e) 전력보상기에서 순시유효전력의 흐름.

참고 문헌

- [1] H.Akagi, Y.Kanazawa, A.Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. on IA-20*, no.3, pp.625-630, May/June 1984.
- [2] F.Z.Peng, J.S.Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems," *IEEE Trans. on IM-45*, no.1, pp.293-297, Feb. 1996.
- [3] J.L.Willems, "A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations," *IEEE Trans. on IM-41*, no.4, pp.523-527, Aug. 1992.
- [4] 김효성, 최재호, "전압 맵핑매트릭스를 사용한 일반화 순시전력 보상이론," 전기학회 논문지, 제 47권, 제8호, pp.1169-1175, 1998.
- [5] W.Zhang, G.Asplund, A.Äberg, U.Jonsson, O.Löf, "Active DC Filter for HVDC System-A Test Installation in the Konti-Skan DC Link at Lindome Converter Station," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.8, no.3, pp.1599-1606, July, 1993.