

3상 계통에서 전류/전압과 순시전력간의 맵핑이론

김 효 성^o
o천안공업 전문대학 제어계측과

최 재 호*
*충북 대학교 전기전자공학부

The Mapping Theory between Current/Voltage and Instantaneous Powers in Three-phase Systems

Hyosung KIM^o
oCheonan Technical College

Jaeho CHOI*
*Chungbuk University

[Abstract]

The relation between instantaneous active/reactive powers and currents is defined by voltage mapping matrix in three-phase four-wire systems. Control strategies for an active filter without energy storage components are proposed on the basis of mapping matrices. It can compensate for the zero-sequence current, irrespectively of whether or not a zero-sequence voltage exists in a three-phase four-wire system.

1. 서 론

정지전력형 반도체 소자기술의 발달에 따라 산업체의 각종 요구에 부응하는 다양한 전력전자기기 및 전력변환장치가 보급되어 에너지절감, 설치면적 및 중량의 감소, 제어성의 향상, 경제성의 제고 등 많은 이점을 가져왔다. 그러나 이러한 정지전력형 반도체소자의 사용은 비선형 부하요인이 되어 계통에 무효전력 및 고조파 전력을 발생시켜서 새로운 전원장해문제를 야기시키고 있기도 하다. 최근 Flexible AC Transmission System(FACTS)의 개념이 등장하면서 전력에너지의 품질은 경제와도 직결되어 관심의 대상이 되고 있으며, 유용한 전력과 무익한 전력을 어떻게 분리하고 보상시킬 것인가가 다양하게 연구되고 있다.

전통적으로 유효전력(active power)은 인가된 전압과 전류 곱의 평균치로 정의되어, 두 계통간에 실제적인 전력에너지의 흐름을 야기시키는 것으로 이해되어 왔다. 이에 반해 무효전력(reactive power)은 유효전력에 대하여 직교·보존적인 값으로 정의되어, 실제 전력에너지의 흐름은 발생시키지 않으면서 인가전류의 크기만 증가시키는 무익한 것으로 이해되어 왔다. 이러한 전통적 정의는 단상·정현적 계통의 정상상태에서는 잘 적용되지만, 다상·불평형 전원 및 비선형부하 계통에서는 많은 논란을 불러일으켜왔다.[1,2]

Akagi씨 등에 의하여 순시전력이론이 수립된 이후 3상-3선식 계통에서의 고조파/무효전력의 보상에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다.[3,4,5] 이른바 "p-q 이론"에 의해 정의된 순시 허전력을 보상함으로써 에너지 저장요소의 필요 없이 무효전류를 제거할 수 있었다. 한편, "p-q 이론"은 3상-4선식 계통에 있어서의 순시 영상전력을 영상 전류/전압의 곱으로 정의하여 순시유효전력의 일부로 간주함으로써 유효전력에 영향을 주지

않고 영상전류를 제거하는 것이 불가능하였다.[6,7,8,9]

Peng씨 등은 3상-4선식 계통에서 전압공간벡터와 전류공간벡터의 벡터 적으로써 순시무효전력의 공간벡터를 정의하였다.[10,11] 정의된 순시무효전력을 보상함으로써 3상-4선식 계통의 중성선에 흐르는 영상전류를 제거할 수 있음을 검증하였으나, 전원전압이 불평형 되거나 영상전압이 포함되는 경우 등에 대하여는 일반적인 보상알고리즘이 수립되어있지 않고 있다.

본 논문은 전압맵핑매트릭스를 사용하여 3상 계통에서 순시전류에 따른 순시유효/무효전력을 정의한다. 순시유효/무효전력과 영상-전류/전압간의 관계를 분석한다. 분석결과에 의거한 가상맵핑매트릭스 개념을 도입하여 전원측 영상-전압의 존재 유무에 관계없이 순시무효전력만을 보상함으로써 전원측 중성선 전류를 제거할 수 있는 전력보상알고리즘을 수립한다. 제안된 알고리즘은 이론적으로 유효전력이 전혀 흐르지 않으므로 에너지저장요소가 필요치 않게 되어 전력보상기의 크기를 줄일 수 있다. 불평형 전원전압과 비대칭 저항부하를 갖는 3상-4선식 계통에 대한 전력보상 시뮬레이션을 통해 제안된 이론을 검증한다.

2. 순시전력과 순시전류간의 맵핑

2.1 순시유효/무효전력의 정의

3상 계통에서 3상 전압은 일반적으로 다음과 같이 0- α - β 좌표로 변환된다.

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

중성선에 흐르는 전류를 고려하면 3상 전류도 일반적으로 다음과 같이 0- α - β 좌표로 변환된다.

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

순시유효전력과 순시무효전력공간벡터는 각각 전압/전류 공간벡터의 스칼라적 및 벡터 적으로 표현된다. [4.10.11]

$$p \triangleq \vec{e}_{0\alpha\beta} \cdot \vec{i}_{0\alpha\beta} = e_0 \cdot i_0 + e_\alpha \cdot i_\alpha + e_\beta \cdot i_\beta \quad (3)$$

$$\vec{q}_{0\alpha\beta} \triangleq \vec{e}_{0\alpha\beta} \times \vec{i}_{0\alpha\beta} = \text{Det} \begin{bmatrix} \hat{0} & \hat{\alpha} & \hat{\beta} \\ e_0 & e_\alpha & e_\beta \\ i_0 & i_\alpha & i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

단, $\hat{0}, \hat{\alpha}, \hat{\beta} : 0, \alpha$ 및 β 축의 단위벡터.

식(4)의 순시무효전력공간벡터의 각요소는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e_\beta & e_\alpha \\ e_\beta & 0 & -e_0 \\ -e_\alpha & e_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)의 맵핑매트릭스는 랭크 값이 2이므로, 순시무효전력은 두 개의 선형 독립적인 전력요소로 표현 가능하다. 다시 말해, 세 개의 순시무효전력 중 한 개는 나머지 두 개의 순시무효전력요소의 선형조합 형태로 표현 가능하다. 만일 e_0 를 q_0 , e_α 를 q_α , 그리고 e_β 를 q_β 에 각각 곱하면, (5)는 (6)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} e_0 \cdot q_0 \\ e_\alpha \cdot q_\alpha \\ e_\beta \cdot q_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e_0 \cdot e_\beta & e_0 \cdot e_\alpha \\ e_\alpha \cdot e_\beta & 0 & -e_0 \cdot e_\alpha \\ -e_\alpha \cdot e_\beta & e_0 \cdot e_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 순시무효전력 요소간에는 다음의 관계가 존재함을 알 수 있다.

$$0 = e_0 \cdot q_0 + e_\alpha \cdot q_\alpha + e_\beta \cdot q_\beta \quad (7)$$

2.2 순시전류

만일 e_0, e_α , 그리고 e_β 중의 어느 하나 이상이 영이 아니라면, 그에 대응되는 각 순시무효전력요소 q_0, q_α , 그리고 q_β 는 나머지 두 순시무효전력요소의 선형조합으로 표현 가능하다. 예를 들어, e_β 가 영이 아니라면 q_β 는 q_0 와 q_α 로부터 계산되어질 수 있다. 이 경우 전류요소는 p, q_0, q_α 로부터 다음과 같이 구해진다:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\beta e_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} e_0 e_\beta & e_0 e_\alpha & e_\alpha^2 + e_\beta^2 \\ e_\alpha e_\beta & -(e_0^2 + e_\beta^2) & -e_0 e_\alpha \\ e_\beta^2 & e_\alpha e_\beta & -e_0 e_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

단, $e_{0\alpha\beta}^2 = e_0^2 + e_\alpha^2 + e_\beta^2$.

마찬가지로, e_α 가 영이 아닌 경우 전류요소는 p, q_0 및 q_β 로부터 역으로 다음과 같이 구해진다:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha e_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} e_0 e_\alpha & -e_0 e_\beta & -(e_\alpha^2 + e_\beta^2) \\ e_\alpha^2 & -e_\alpha e_\beta & e_0 e_\alpha \\ e_\alpha e_\beta & (e_0^2 + e_\alpha^2) & e_0 e_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

앞서 언급한 바와 같이 (8)은 $e_\beta=0$ 인 경우에는 사용할 수 없다. 반대로, (9)는 $e_\alpha=0$ 인 경우 사용할 수 없다. 이를 해결할 수 있는 한가지 방법으로 (8)과 (9)를 각각 계수 $e_\beta^2 / (e_\alpha^2 + e_\beta^2)$ 및 $e_\alpha^2 / (e_\alpha^2 + e_\beta^2)$ 에 의해 선형 조합시키면 다음의 관계식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2 e_{0\alpha\beta}^2} \quad (10)$$

$$\times \begin{bmatrix} e_0 e_{\alpha\beta}^2 & 0 & e_\beta e_{\alpha\beta}^2 & -e_\alpha e_{\alpha\beta}^2 \\ e_\alpha e_{\alpha\beta}^2 & -e_\beta e_{0\alpha\beta}^2 & -e_0 e_\alpha e_\beta & e_0 e_\alpha^2 \\ e_\beta e_{\alpha\beta}^2 & e_\alpha e_{0\alpha\beta}^2 & -e_0 e_\beta^2 & e_0 e_\alpha e_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix}$$

단, $e_{\alpha\beta}^2 = e_\alpha^2 + e_\beta^2$.

식(10)에 (7)을 적용하면 (11)과 같이 간단화 된다.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{0\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} e_0 & 0 & e_\beta & -e_\alpha \\ e_\alpha & -e_\beta & 0 & e_0 \\ e_\beta & e_\alpha & -e_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(11)은 $e_0^2 + e_\alpha^2 + e_\beta^2 \neq 0$ 인 한 타당하다. 순시무효전력 공간벡터 $\vec{q}_{0\alpha\beta}$ 가 영으로 보상된다면, 다음의 결과가 발생 된다.

$$e_0 : e_\alpha : e_\beta = i_0 : i_\alpha : i_\beta \quad (12)$$

식(12)는 전류공간벡터의 위상이 전압공간벡터의 위상과 일치함을 의미한다. 더욱이, 영상전류 i_0 는 (13)과 같이 영상전압 e_0 에 비례하게 된다.

$$i_0 = \frac{i_\alpha}{e_\alpha} \cdot e_0 = \frac{i_\beta}{e_\beta} \cdot e_0 \quad (13)$$

영상전압이 존재하면 그에 따라 영상전류도 존재하는 것을 알 수 있다.

3. 전력보상 알고리즘

3.1 영상전압성분이 없는 경우 ($e_0=0$)

영상전압성분이 없는 경우 ($e_0=0$), 식(11)의 맵핑 매트릭스를 수정하여 다음과 같은 전력보상식을 수립할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{0\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_\beta & -e_\alpha \\ e_\alpha & -e_\beta & 0 & 0 \\ e_\beta & e_\alpha & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_C^* \\ q_{C0}^* \\ q_{C\alpha}^* \\ q_{C\beta}^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

기준보상전력은 여러 가지 조합이 가능하지만[11], 본 논문에서는 $p_C^*=0, q_{C0}^*=q_{L0}, q_{C\alpha}^*=q_{L\alpha}, q_{C\beta}^*=q_{L\beta}$ 로 한다 (단, 첨자 L은 부하측의 값을 의미함).

3.2 영상전압성분이 있는 경우 ($e_0 \neq 0$)

영상전압성분이 존재하는 경우 ($e_0 \neq 0$), 식(11)의 맵핑 매트릭스를 사용하여 다음과 같은 보상전략을 세울 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{0\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} e_0 & 0 & e_\beta & -e_\alpha \\ e_\alpha & -e_\beta & 0 & e_0 \\ e_\beta & e_\alpha & -e_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_C^* \\ q_{C0}^* \\ q_{C\alpha}^* \\ q_{C\beta}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

순시무효전력을 영으로 보상함으로써 에너지저장요소의 필요 없이 인가전류의 rms(root mean square)값을 극소

화시킬 수는 있으나, 영상전압에 비례하는 영상전류는 여전히 존재하게 된다. 더욱이, 전원측 전압이 3상평형·정현적이지 않으면 전원측 전류도 3상평형·정현적이지 못하게 된다.

3.3 가상 맵핑 매트릭스

실제의 전압성분 대신 가상적인 전압성분에 의해 구성되는 가상 맵핑 매트릭스를 적용함으로써 다양한 보상전략을 수립할 수 있다.

예를 들어, 계통에 영상전압성분이 존재하고 있음에도 불구하고 가상적으로 영상전압성분이 제거된 맵핑 매트릭스를 생각해 보자. 달리 말하여, 식(5)대신에 (16)을 사용하여 가상무효전력을 구하고,

$$\begin{bmatrix} q_{L0} \\ q_{L\alpha} \\ q_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e_{\beta} & e_{\alpha} \\ e_{\beta} & 0 & 0 \\ -e_{\alpha} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L0} \\ i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

보상전류를 다음과 같이 결정한다고 하면,

$$\begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_0}{e_{0\alpha\beta}^2} & 0 & \frac{e_{\beta}}{e_{\alpha\beta}^2} & \frac{-e_{\alpha}}{e_{\alpha\beta}^2} \\ \frac{e_{\alpha}}{e_{0\alpha\beta}^2} & \frac{-e_{\beta}}{e_{\alpha\beta}^2} & 0 & \frac{e_0}{e_{\alpha\beta}^2} \\ \frac{e_{\beta}}{e_{0\alpha\beta}^2} & \frac{e_{\alpha}}{e_{\alpha\beta}^2} & \frac{-e_0}{e_{\alpha\beta}^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_C^* \\ q_{C0}^* \\ q_{C\alpha}^* \\ q_{C\beta}^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

단, $p_C^* = 0$, $q_{C0}^* = q_{L0}$, $q_{C\alpha}^* = q_{L\alpha}$, $q_{C\beta}^* = q_{L\beta}$.

가상순시무효전력벡터 $\vec{q}_{L0\alpha\beta} = [q_{L0} \ q_{L\alpha} \ q_{L\beta}]^T$ 는 원래의 순시무효전력벡터 $\vec{q}_{L0\alpha\beta}$ 와는 다르게 된다. 엄밀히 말하여, q_{L0} 는 같으나 $q_{L\alpha}$ 및 $q_{L\beta}$ 는 다르게 된다. 각각의 차이 $\Delta q_{L\alpha}$ 및 $\Delta q_{L\beta}$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta q_{L\alpha} \\ \Delta q_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{L\alpha} - q_{L\alpha} \\ q_{L\beta} - q_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e_0 \\ e_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (18)$$

이 경우 (16), (17)로부터 (19)가 도출되며, 전력보상기의 영상전류는 부하측 영상전류와 같은 값이 되어 서로 완전히 상쇄되어짐을 알 수 있다.

$$i_{C0} = \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} (e_{\beta} q_{L0} - e_{\alpha} q_{L\beta}) = i_{L0} \quad (19)$$

또한, 전력보상기에서 발생하는 순시유효전력은 (20)과 같이 영이 되어 에너지의 흐름이 발생하지 않으므로 에너지 저장요소가 필요하지 않음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} p_C &= e_0 i_{C0} + e_{\alpha} i_{C\alpha} + e_{\beta} i_{C\beta} \\ &= e_0 i_{C0} + \frac{1}{e_{\alpha\beta}^2} \{ (-e_{\beta} q_{L0} + e_0 q_{L\beta}) \\ &\quad + (e_{\alpha} q_{L0} - e_0 q_{L\alpha}) \} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

전원계통에 영상전압성분이 존재하더라도 가상순시무효전력을 보상함으로써 에너지저장요소의 필요 없이 전원 측의 영상전류성분을 영으로 제어 가능하다. 이 경우, 영상전류 성분은 제거되지만, 식(18)에 보인 바와 같은 전류 순시무효전력 Δq_{α} 과 Δq_{β} 로 인하여 전류의 rms값은 최소화 되지 못한다.

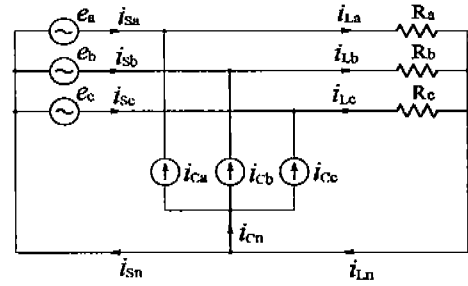


그림1. 제안된 시뮬레이션 모델
Fig.1 Proposed simulation model.

표1. 시뮬레이션 조건
TABLE I SIMULATION CONDITIONS.

Items		Case-1	Case-2	Case-3
Source	e_a [V]	127	127	127
	e_b [V]	127	127	127
	e_c [V]	127	102	102
Load	R_{La} [Ω]	3.87	3.87	3.87
	R_{Lb} [Ω]	4.84	4.84	4.84
	R_{Lc} [Ω]	4.84	4.84	4.84
Control Strategy		Real	Mapping	Pseudo
		Matrix	Matrix	Matrix

표2. 시뮬레이션 결과
TABLE II SIMULATION RESULTS.

		Case-1	Case-2	Case-3
Source [A]	I_{sa}	43.4	43.8	42.2
	I_{sb}	39.2	39.2	38.4
	I_{sc}	39.2	31.9	34.3
Load [A]	I_{La}	46.4	46.4	46.4
	I_{Lb}	37.1	37.1	37.1
	I_{Lc}	37.1	29.7	29.7
AF [A]	I_{Ca}	4.4	4.4	6.7
	I_{Cb}	4.2	4.2	4.9
	I_{Cc}	4.2	4.0	6.2
Neutral [A]	I_{sn}	0.0	8.0	0.0
	I_{Ln}	9.3	14.5	14.5
	I_{cn}	9.3	8.7	14.5
VA_{AF}/VA_{SRC}		0.1	0.1	0.16

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

그림1에 3상-4선식 계통의 시뮬레이션 모델을 보인다. 정격출력은 10kVA이고 정격 선간 전압은 220Vrms이다. 따라서 1상당 정격저항값은 4.84 Ω 이다.

세 가지의 시뮬레이션 조건을 고려하였다. 케이스1은 3상 평형전압과 3상 비대칭 저항부하를 고려한다. 케이스2는 3상 불평형 전압과 3상 비대칭 저항부하를 고려한다. 케이스3은 케이스2와 같은 조건에서 가상 맵핑 매트릭스를 적용하여 전력보상을 한다.

표1에 상세한 시뮬레이션 조건을 보인다. a상 저항부하만을 정격저항값의 80%로 낮추어 비대칭 3상 부하로 하였다. 또한, 케이스2와 3에서는 c상의 전압전압만을 정격의 80%로 낮추어 3상 불평형전원 조건을 취하였다.

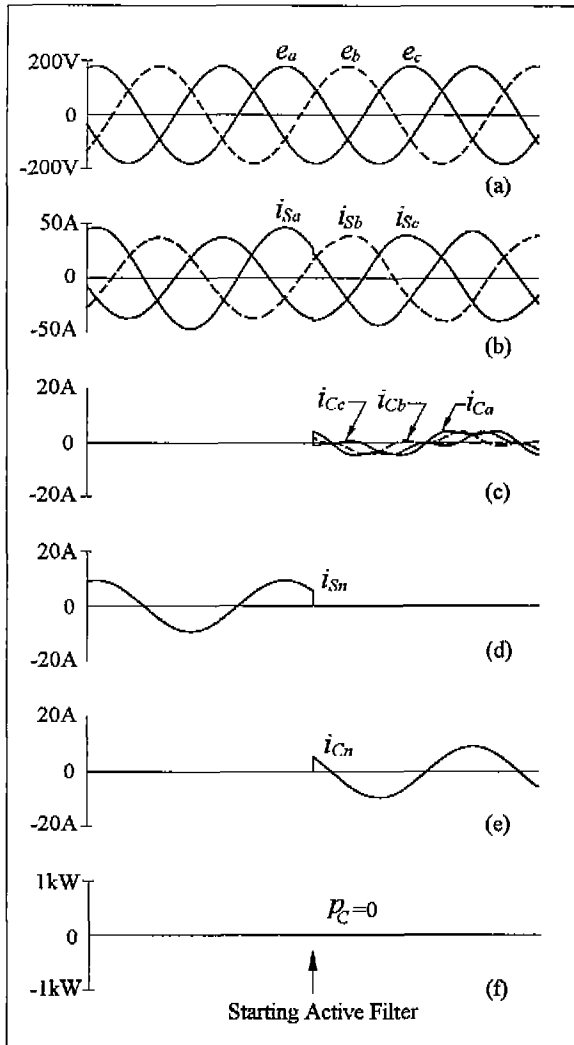


Fig.2 Simulation results in Case-1; (a) balanced source voltages, (b) source currents, (c) compensating currents, (d) neutral current on the source side, (e) neutral current of the active filter, (f) instantaneous active power generated by the active filter.

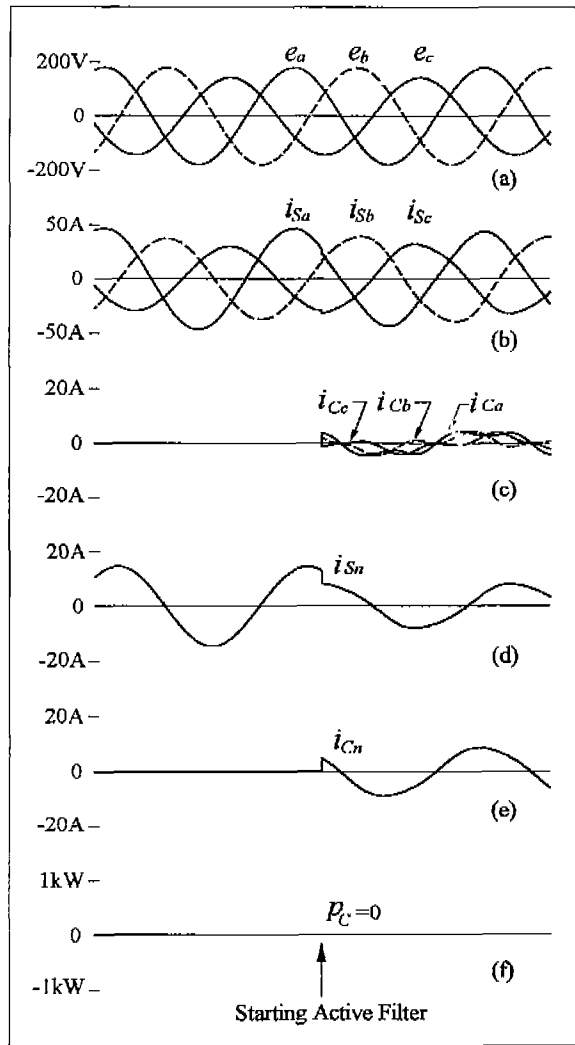


Fig.3 Simulation results in Case-2; (a) unbalanced source voltages, (b) source currents, (c) compensating currents, (d) neutral current on the source side, (e) neutral current of the active filter, (f) instantaneous active power generated by the active filter.

4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 PSpice Design Center V6.0에 의하여 수행되었다. 표2는 시뮬레이션 결과를 보인다. 각파형의 최대값을 측정하였다. 케이스1의 부하전류는 비대칭 부하저항에 기인하여 불평형 된다; i_{La} 는 다른 상의 전류에 비하여 1.25배 커진다. 케이스2와 3의 부하전류는 비대칭 저항부하 뿐만 아니라 불평형 전원전압에 의해서 불평형 된다; i_{La} 는 i_{Lb} 에 비하여 1.25배 크고 i_{Lb} 는 i_{Lc} 에 비하여 또한 1.25배 크다. 입력전력에 대한 전력보상기의 전력비는 최대치에 기초하였다.

케이스1의 시뮬레이션 결과를 그림2에 보인다. 구분을 명확히 하기 위하여 b상의 파형은 모두 점선으로 표시하였다. 초기에 전력보상기는 정지상태에 있다가 일정시간후 동작된다. 시뮬레이션 파형은 전력보상기가 동작하기 전후의 상황을 보여준다. 그림2(d)는 전원측 중성선에 흐르는 전류의 파형을 보이며, 전력보상기가 동작되면 완전히 영이 됨을 알 수 있다. 그림2(e)는 전력보상기의 중성선에 흐르는 전류를 보이며, 이는 전력보상기의 교류측 3단자에 흐르

는 전류의 순시 합과 같다. 그림2(f)에서 p_C 는 (21)과 같이 전력보상기의 교류 측에 발생하는 순시유효전력이다.

$$p_C = e_a i_{Ca} + e_b i_{Cb} + e_c i_{Cc} \quad (21)$$

$p_C=0$ 이므로 전력보상기에서 에너지의 흐름이 발생하지 않고 있음을 알 수 있다.

케이스2의 시뮬레이션 결과를 그림3에 보인다. 부하 측의 순시무효전력을 전부 보상해도 영상전류 및 역상전류가 제거되지 않으며 전원측 중성선에 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다.

케이스3의 시뮬레이션 결과를 그림4에 보인다. 그림4(a)의 전원전압은 케이스2와 같다. 그림4(b)의 전원전류도 케이스2와 비슷하게 보인다. 그러나 그림4(d)의 전원측 중성선 전류는 가장무효전력을 보상함에 의하여 완벽히 제거됨을 알 수 있다. 또한 그림4(f)에 보인 바와 같이 전력보상기에 순시유효전력이 나타나지 않으므로, 전력보상기의 설계시 직류링크측 평활용 커패시터와 같은 에너지저장요소가 필요치 않음을 알 수 있다.

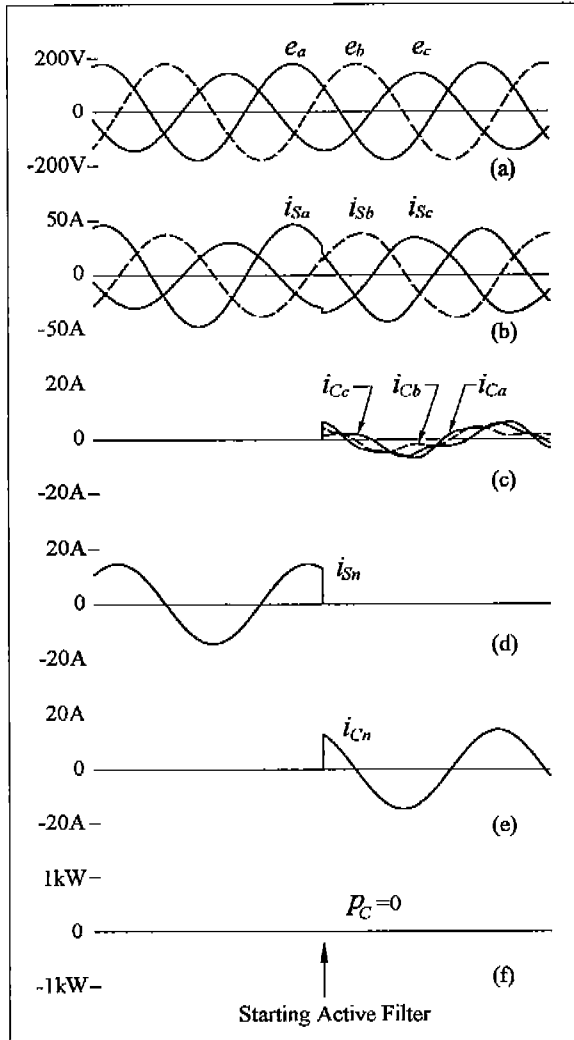


Fig.4 Simulation results in Case-3; (a) unbalanced source voltages, (b) source currents, (c) compensating currents, (d) neutral current on the source side, (e) neutral current of the active filter, (f) instantaneous active power generated by the active filter.

5. 결론

본 논문은 전원전압요소로 구성되는 전압맵핑매트릭스를 사용하여 순시유효/무효전력을 정의하였다. 순시유효/무효전력은 순시 영상전류/전압에 모두 영향을 받는다. 가상맵핑매트릭스 개념을 도입함으로써 전원측에 영상전압이 포함되는 3상-4선식 계통의 중성선에 흐르는 전류를 제거할 수 있는 전력보상 알고리즘을 수립하였다. 수립된 이론을 적용하여 불평형 전원 비대칭 부하의 3상-4선식 계통에서의 전력보상을 실시한 결과, 에너지 저장요소의 필요 없이 순시무효전력만 보상함으로써 전원 측에 흐르는 중성선 전류를 완전히 제거할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

[1] Leszek S.Czarnecki, "On some deficiencies of Fryze's approach to describing power properties of systems under nonsinusoidal condition," *Proc. of IEEE ICHPS VI, Bologna*, Sept. 21-23, 1994, pp.360-364.

[2] P.S.Filipski, "Apparent Power - A Misleading Quantity in the Nonsinusoidal Power Theory. Are All Nonsinusoidal Power Theories Doomed to Fail?," *International Workshop on Power Definitions & Measurement*, 1991, pp.39-47.

[3] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, Akira Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. on IA-20, No.3*, May/June 1984, pp.625-630.

[4] Alessandro Ferrero, and Gabrio Superti-Furga, "A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems Under Nonsinusoidal Conditions," *IEEE Trans. on IM-40, No.3*, June 1991, pp. 568-577.

[5] Jacques L. Willems, "A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations," *IEEE Trans. on IM-41, No.4*, Aug. 1992, pp.523-527.

[6] Mauricio Aredes and Edson H. Watanabe, "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters," *IEEE PES Winter Meeting, 95 WM 240-2 PWRD*, 1995.

[7] 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," in *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp.939-946, 1993.

[8] Girish Kamath and Ned Mohan, "A Novel, Reduced Rating Active Filter for 3-Phase, 4-Wire Loads," in *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp.936-940, 1994.

[9] Thierry Thomas, Kevork Haddad, Geza Joos, Alain Jaafari, "Performance Evaluation of Three Phase Three and Four Wire Active Filters," in *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp.1016-1023, 1996.

[10] Feng Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems," *IEEE Trans. on IM-45, No.1*, Feb. 1996, pp.293-297.

[11] Feng Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, "Reactive Power and Harmonic Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems," *Proceedings on 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Oct. 1996, pp.83-89.