순시무효전력이론에 대한 구현관점에서의 고찰

이왕근, 전성즙, *변영복
부경대학교, *(주)루텍

Practical Considerations on Instantaneous Reactive Power Theories

Wang-Geun Lee, Seong-Jeub Jeon, *Young-Bok Byun
Pukyong National University, *Rootech Inc.

ABSTRACT

In this paper, differences between average power theory and instantaneous power theories are considered in view point of practical application.

1. 서 론

[1]에 따르면 보통 널리 쓰이는 순시 무효전력이론은 순시전력이론이라 불릴 수 있다. 순시전력이론과 평균전력이론과의 차이점은 이론적으로 [1]에서 잘 다루어져 있으나 본 논문에서는 보다 실제적인 관점에서 다루고자 한다. 평균전력이론과 순시전력이론의 용어 정의적 면에서 그 차이를 말하기가 쉽지 않으나 [1]에 따르면 평균전력이론은 평균전력과 평균전력손실에 기반을 둔 전력이론이며 순시전력이론은 순시전력과 순시전력손실에 기반을 둔 이론이다. [1]에서 제안한 unified Instantaneous Reactive Power (IRP) 이론이 중요한 다수의 IRP 이론을 포함하고 있으므로 이러한 정의는 타당하다고 할 수 있다. [2]에서는 abc이론을 IRP 이론에 대비된 것으로 논하고 있으나 이는 적절하지 못하다. 평균전력이론이나 순시전력이론 모두 abc frame (원좌표계)에서 기술할 수 있고 transform (표환좌표계)를 사용하여 표현할 수 있다. 변환을 사용하는 것과 하지 않는 것은 기술(記述)이나 구현의 차이로 보아야 하겠다. 전력회로에서 좌표변환(Clarke 변환, D-Q 변환, 대칭좌표 변환)은 많은 이들에게 매력적으로 보이지만 실상은 교류전동기 제어를 제외하면 제어기 설계에 도움을 주지 않는다. 본고에서는 Clarke 변환의 무익성만을 다루고자 한다.

2. 평균전력이론과 순시전력이론

평균전력이론과 순시전력이론에서 정의된 것들을 먼저 살펴본 후 순시전력이론을 좀 더 상세히 검토하자.

2.1 평균전력이론

평균전력이론에서는 [1]에서 제시된 다음과 같은 순시전압, 전류 벡터를 사용한다. 이들 벡터는 순시전력이론에서도 사용된다.

$$\mathbf{i} \equiv \left[\sqrt{\frac{r_1}{r}} i_{s1} \; \sqrt{\frac{r_2}{r}} i_{s2} \cdots \sqrt{\frac{r_l}{r}} i_{sl} \cdots \sqrt{\frac{r_m}{r}} i_{sm} \right]$$

(1a)

$$\mathbf{v} \equiv \left[\sqrt{\frac{r}{r_1}} v_{s1} \; \sqrt{\frac{r}{r_2}} v_{s2} \cdots \sqrt{\frac{r}{r_l}} v_{sl} \cdots \sqrt{\frac{r}{r_m}} v_{sm} \right]$$

(1b)

i_{sl}, v_{sl}은 l번 선의 전류 전압이다. 또한 다음과 같은 rms 전류 전압 벡터를 사용한다.

$$\mathbf{I} \equiv \left[\sqrt{\frac{r_1}{r}} I_{s1} \; \sqrt{\frac{r_2}{r}} I_{s2} \cdots \sqrt{\frac{r_l}{r}} I_{sl} \cdots \sqrt{\frac{r_m}{r}} I_{sm} \right]$$

(2a)

$$\mathbf{V} \equiv \left[\sqrt{\frac{r}{r_1}} V_{s1} \; \sqrt{\frac{r}{r_2}} V_{s2} \cdots \sqrt{\frac{r}{r_l}} V_{sl} \; \cdots \; \sqrt{\frac{r}{r_m}} V_{sm} \right] \qquad (2b)$$

실효전류와 실효전압은 rms 전류 전압 벡터의 유크리드 놈(norm)으로 정의한다.

$$I_e \equiv \|\mathbf{I}\|, \quad V_e \equiv \|\mathbf{V}\| \qquad (3)$$

피상전력은 다음과 같이 정의하였다.

$$S \equiv V_e I_e = \|\mathbf{V}\| \|\mathbf{I}\| \qquad (4)$$

무효전력은 다음과 같이 정의하였다.

$$Q \equiv \sqrt{S^2 - P^2} \qquad (5)$$

동일한 전력을 부하에 공급한다면 선로에서의 손실은 무효전력이 영일 때 가장 작다. 식 (5)와 같이 정의된 무효전력은 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \frac{1}{T_w} \sqrt{ \sum_{l=1}^{m} \int_0^{T_w} \sum_{j=l}^{m} \int_{t_0}^{T_w} \left(\sqrt{\frac{r_j}{r_l}} v_{sl}(t) i_{sj}(\tau) - \sqrt{\frac{r_l}{r_j}} v_{sj}(\tau) i_{sl}(t) \right)^2 d\tau \, dt }$$

(6)

평균전력이 P이고 전력손실이 최저인 최적전류는

다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{i}_G = \frac{P}{V_e^2}\mathbf{v} \tag{7}$$

2.2 순시전력이론

순시 전력손을 최소로 하는 해를 제공해 주는 순시전력이론에서는 순시 전압 전류 벡터의 유크리드 놈을 순시 실효전압, 순시실효전류로 정의한다. 그리고 이들의 곱을 순시 피상전력이라 정의한다.

$$s \equiv \|\mathbf{v}\|\|\mathbf{i}\| = \sqrt{\sum_{l=1}^{m}\frac{r}{r_l}v_{sl}^2}\sqrt{\sum_{l=1}^{m}\frac{r_l}{r}i_{sl}^2}$$

(8)

순시 전력은 순시 전압 전류 벡터의 내적으로 주어진다. 순시무효전력은 다음과 같이 정의한다.

$$q \equiv \sqrt{s^2-p^2} = \sqrt{\sum_{l=1}^{m}\sum_{j=l+1}^{m}\left(\sqrt{\frac{r_j}{r_l}}v_{sl}i_{sj}-\sqrt{\frac{r_l}{r_j}}v_{sj}i_{sl}\right)^2}$$

(9)

순시무효전력을 영으로 만드는 전류는 주어진 순시 전력에서 가장 적은 전력손실을 만든다. 순시무효전력이 영인 최적 전류는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{i}_I = \frac{p}{\|\mathbf{v}\|^2}\mathbf{v}$$

(10)

2.3 Clarke 변환의 무익성

순시전력이론은 우리에게 두 가지를 제공해 준다. 첫째는 순시무효전력이고 둘째는 순시무효전력을 영으로 만드는 전류(최적해)이다. Clarke 변환이 유익한 도구인지 또는 무익한 도구인지는 이 두 가지를 제공함에 있어 필수적이거나 편리한 지 아닌 지로 판단할 수 있다.

먼저 3상 3선식 전력시스템에서의 순시무효전력부터 살펴보자. Akagi 및 그의 동료들은 순시무효전력을 다음과 같이 정의하였다.[3]

$$q = e_\alpha i_\beta - e_\beta i_\alpha$$

(11)

$a-\beta$ 좌표계의 전류전압을 원좌표계의 전류 전압으로 바꾸면

$$q = \mathbf{c}_1[v_{s1}\ v_{s2}\ v_{s3}]^T\mathbf{c}_2[i_{s1}\ i_{s2}\ i_{s3}]^T - \mathbf{c}_2[v_{s1}\ v_{s2}\ v_{s3}]^T\mathbf{c}_1[i_{s1}\ i_{s2}\ i_{s3}]^T$$
$$= \sqrt{3}/2(v_{s1}(i_{s2}-i_{s3})-(v_{s2}-v_{s3})i_{s1}) \tag{12}$$

여기서 $\mathbf{c}_1$은 Akagi와 그의 동료들이 사용한 변환 행렬의 첫 행으로, $\mathbf{c}_2$는 변환 행렬의 두 째 행으로 만든 행벡터를 나타낸다.[2],[3] 두 가지 인덱스만 사용하도록 정리하면 다음과 같이 주어진다.

$$q = \sqrt{3}(v_{s1}i_{s2}-v_{s2}i_{s1})$$
$$= \sqrt{3}(v_{s2}i_{s3}-v_{s3}i_{s2}) = \sqrt{3}(v_{s3}i_{s1}-v_{s1}i_{s3})$$

(13)

이것은 [1]에서 언급한 바와 같은데 원좌표계를 사용하면 순시무효전력이란 이와 같이 간단한 형식으로 주어진다. [2]에서 Akagi와 그의 동료들이 존재하지 않다고 말한 원좌표계에서의 순시무효전력 직접식이다.

다음은 순시무효전력을 영으로 만드는 전류(최적해)를 보자. Willems은 Akagi가 정의한 순시무효전력이 (1)과 같음을 보였고[4] Peng과 Lai는 다선식에 확장한 이론에서 최적해를 (10)과 같은 형태로 제시하였다.[5] 식 (10)에는 원 IRP 이론뿐 만 아니라 수정된 IRP 이론도 포함되어 있다. 즉 Clarke 변환을 쓰지 않으면 직접적이고 간편한 해를 가질 수 있다.

이로써 우리는 Clarke 변환이 순시무효전력이론에 전혀 도움이 되지 않는 것임을 알 수 있다. 일반적으로 변환이란 것은 뚜렷한 목적이 없다면 쓰지 않는 것이 훨씬 좋다.

3. 구현관점에서 본 평균전력이론과 순시전력이론의 차이

이미 다수의 학자로부터 순시(무효)전력이론은 무효전력을 제거하기에는 완전한 이론이 아님이 밝혀졌다. 이는 당연한 결과로 무효전력이란 평균전력이론에서 정의될 수 있는 양이기 때문이다. 매순간의 순시무효전력이 영이라 하더라도 무효전력은 영이 아닐 수 있다. 그러나 순시전력이론이 반드시 쓰일 수 있는 경우가 있는데 에너지 저장 요소를 쓰지 않고 제어를 하는 경우이다. 이런 경우는 극히 예외적인 것으로 반도체로 전력을 제어하는 곳에는 반도체 소자의 안전을 위하여 수~수십 사이클 동안의 에너지를 저장할 수 있도록 설계하는 것이 일반적이다.

순시(무효)전력이론을 지지하는 분들은 아직도 제어시스템의 구현상 이 이론이 적합하다고 주장할지도 모른다. 몇 가지 사항을 제어장치 구현의 관점에서 검토해 보자.

3.1 PWM의 구현 (SVPWM의 활용)

혹자는 Clarke 변환을 사용한 순시(무효)전력이론이 SVPWM의 구현에 도움이 된다고 한다. 이는 두 가지 면에서 타당성이 없다. 중요한 대부분의 SVPWM은 carrier-based PWM으로 구현할 수 있음이 알려져 있고, 또 SVPWM에서 sector를 나누는 것은 이미 a-b-c frame에서 공간벡터를 선택한다는 뜻이다.

3.2 최적해의 차이

전력 변환 장치에 전력이론을 적용한다는 것은 그 이론이 제공하는 최적해로 제어한다는 것을 의미한다. 평균전력이론이 제공하는 최적해 (7)과 순

시전력이론이 제공하는 최적해 (10)은 매우 유사하다. 순시전력이론의 최적해(10)에 따른 전류는 비대칭전원이거나 불평형 부하에서는 일그러진다고 알려져 있다. 그것은 (10)을 다음과 같이 표현하면 명확해 진다.

$$\mathbf{i}_I = \frac{p}{\|\mathbf{v}\|^2}\mathbf{v} = f_m \mathbf{i}_G \,, \quad f_m = \frac{p}{\|\mathbf{v}\|^2}\frac{V_e^2}{P}$$

(14)

순시전력이론의 해는 평균전력이론의 해를 f_m으로 변조한 것이다. f_m이 일정할 때는 평균전력이론의 해와 같아지고 f_m이 시간에 따라 변하면 일그러진다. 순시전력이론을 선호하는 쪽에서는 순시전력이론을 사용하면 계통의 변화에 즉각 대응할 수 있고 평균전력이론을 사용하면 그렇지 못하다고 하는데 이를 고려하여 전력계통의 상황을 둘로 나누어 생각하자.

A. 대칭성을 유지하는 경우: 전원이나 부하가 대칭성을 유지하면서 변한다면 이것은 순시전력이론에 유리한 상황이다. 전원이나 부하가 급변하더라도 그것은 순시전력이론에 따른 제어에 즉시 반영되고 정상상태에서 일그러짐이 없기 때문이다. 이런 경우란 거의 가정으로 그칠 정도로 현실적이지 못하다. 이런 경우라도 평균전력이론을 사용하여 생기는 지연은 그다지 크지 않다. 부하의 변동을 먼저 생각하자. 혹시 비선형부하(이 경우 순시전력이론에서는 다른 문제가 야기된다. *C* 참조)라 하더라도 순시전력은 주기가 1/6 사이클이므로 평균전력을 구하는 적분구간을 1/6로 하고 이동평균을 구하여 사용하면 1/6 사이클 동안 부하변동이 선형적으로 반영된다. 다음으로 전원의 변동을 생각하자. 많은 이들이 (7)에 사용된 실효전압 V_e를 구하는데 최소 1 사이클이 걸린다고 생각하고 있으나 이것도 그렇지 아니하다. 3상3선식의 경우 (3)을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

$$V_e = \sqrt{\sum_{l=1}^{3} V_{sl}^{\;2}} = \sqrt{\sum_{l=1}^{3}\frac{1}{T}\int_0^T v_{sl}^2\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \sum_{l=1}^{3} v_{sl}^2\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \|\mathbf{v}\|^2\,dt}$$

(15)

합산과 적분을 교환하여 재미있는 식으로 바뀌었는데 순시실효전압의 실효값(rms)으로 주어졌다. 혹시 비정현파 전원(이 경우 순시전력이론에서는 다른 문제가 야기된다. *C* 참조)이라 하더라도 반파기대칭을 유지하면 $\|\mathbf{v}\|$의 주기는 1/6 사이클이므로 이동평균을 구하여 사용하면 1/6 사이클 동안 전원변동이 선형적으로 반영된다. 이와 같이 비현실적이면서 순시전력이론에 가장 유리한 경우라 하더라도 평균전력이론을 사용하여 생기는 지연은 대략 1/12 사이클이라 볼 수 있고 이런 지연은 에너지 저장이 가능한 시스템에서 문제가 되지 않는다.

B. 대칭성을 유지하지 못하는 경우의 이론 수정: 전원이나 부하가 대칭성을 유지하지 못하면 순시전력이론의 적용은 오히려 전원전류를 왜곡시켜 사용할 수 없다. 순시전력 옹호자들은 이론에 수정을 가하면 사용가능하다고 주장한다. 그러나 그 노력은 별로 바람직하지 못하다. 그 이유는 그렇게 하여 얻으려고 하는 결과가 식 (7)로 주어져 있고 수정한 부분은 결국 시간지연을 가져오기 때문이다.

가장 최근의 노력은 [6]에서 볼 수 있다. 그들의 str3과 str4가 이에 해당된다. 그들은 매우 어려운 작업을 거쳐 성취하였다. 그 이전의 노력으로는 [7]이 있다. 여기에서는 90 뒤지는 전압을 만들어 f_m을 일정하도록 하였다. 90 뒤지는 신호의 생성에서는 결국 측정에서의 지연을 가지고 온다.

C. 고조파가 포함되는 경우: 순시전력이론에서는 전원전압의 고조파나 비선형 부하에 따른 전류의 고조파는 최적전류에 영향을 미치고 영향을 없애려면 필터를 사용해야 하나 시간지연이 생긴다.

3. 결 론

평균전력이론에 대비해 순시전력이론을 검토하였다. 에너지 저장장치를 전혀 쓰지 않는 경우가 아니라면 순시전력이론을 쓸 이유가 없는 것으로 보인다. 특히 Clarke 변환을 사용하는 것은 전혀 도움이 되지 못한다.

참 고 문 헌

[1] S.-J. Jeon, "Unification and evaluation of the instantaneous reactive power theories", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 23, no. 3, pp.1502-1510, 2008. (also presented at PESC 2006)

[2] H. Akagi, E. H. Watanabe and M. Aredes, 'Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning', (IEEE Press, 2007)

[3] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 20, No. 3, pp.625-630, 1984.

[4] J.L. Willems, "A new interpretation of the Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 41, no. 4, pp. 523-527, Aug. 1992.

[5] F.Z. Peng and J.H. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase systems", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement,* vol. 45, no. 1, pp. 293-297, Feb. 1996.

[6] P. Salmeron and R. Herrera, "Distorted and unbalanced systems compensation within instantaneous reactive power framework", *IEEE Trans. Power Delivery,* vol. 21, no. 3, pp. 1655-1662, Jul. 2006.

[7] Y. Komatsu and T. Kawabata, "Characteristics of three phase active power filter using extension pq theory", *in proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1997, pp. 302-307.