

전력전자 사상(思想) : 전자변압기 및 페이저변환

임춘택

KAIST 원자력및양자공학과

The Most Fundamental Principles of Power Electronics : "Electronic transformer & Phasor Transformation"

Chun-taek Rim

Dept. of Nuclear & Quantum Engineering, KAIST

ABSTRACT

전력전자공학의 목적은 전자적인 스위치를 이용하여 전력을 원하는 대로 변환하는 것이다. 전력전자시스템을 제어하려면 스위치 동작과 교류회로의 동적특성을 이해해야 한다. 본 논문에서는 전력전자의 핵심이 되는 기술사상(技術思想)을 다음 2가지로 정리하였다. 1) 모든 전자 스위치는 등가적으로 정확히 시변 선형 또는 비선형 전자변압기다. 2) 모든 교류회로의 정적 또는 동적 특성은 페이저변환으로 해석가능하다. 이번 논문에서 일반화된 전자변압기 모델을 제시하고, 단상 및 다상을 통합하고 D-Q회로변환과 양자회로변환(quantum circuit transformation)을 모두 포용하는 일반화된 페이저변환을 제시한다.

1. 서론: 전력전자 기술사상(思想)의 배경

유교사상이나 서양사상 등 지난 2천년간 인류문명을 지배해오던 각종 사상의 영향력이 감소하고 20세기 이후 등장한 원자력공학, 전자공학, 소프트웨어공학, 유전자공학 등의 기술사상이 세계 변화를 주도하고 있다. 전력전자공학은 반도체 스위치를 사용하여 전력을 변환하고 제어하며, 21세기의 에너지, 환경, 교통 등의 문제를 해결할 핵심 기술분야다.

그런데, 모든 전력전자시스템은 스위칭에 의해 회로구조가 시간에 따라 변하는 시변시스템(time-varying system)이기 때문에 기존의 회로이론이 적용될 수 없다. 이러한 이유로 난해한 전력전자회로를 손쉽게 이해할 획기적인 이론이 필요하게 되었는데, 이것이 "전력스위치 = 전자변압기" 등가이론이다^[1,2].

또 하나, 다수의 스위치와 고차 필터(high order filter)를 포함한 교류회로(DC-AC, AC-DC, AC-AC)는 수식에 의한 해석이 거의 불가능하여 D-Q 회로변환, 양자회로변환, 페이저변환^[3,4] 등이 새로운 이론으로 제시되어 쓰이고 있다.

본 논문에서는 이러한 전력전자공학의 기술사상(技術思想)을 역사적으로 정리하고 완전히 일반화하여, '전자변압기'와 '페이저변환' 사상으로써 모든 전력전자 시스템을 설명하고자 한다.

2. 제1 사상: "모든 전력스위치는 전자변압기다"

2.1 이상적인 전력스위치의 정확한 등가회로

30여년전 Middlebrook은 DC-DC 컨버터에 상태공간 평균을 적용하면 전력스위치가 등가의 이상적인 변압기가 됨을 증명했고^[5], Peter Wood는 모든 컨버터의 전압, 전류를 스위칭

함수로 표현될 수 있음을 보였다^[6]. 이러한 기술 사조의 영향을 받아, 모든 전력스위치가 정확히 이상적인 스위칭 변압기로 등가화 될 수 있음을 보이게 되었다^[1,2]. 중요한 것은 평균적으로만 등가이거나 DC-DC 컨버터에서만 등가이지 않고, 시간적으로 펄스형태로 변하는 모든 직류/교류 컨버터의 입출력 관계에 있어서 완전히 동등하다는 점이다. /교서 기본회와 고조파로 등가변압기의 단수를 표현하면 기본회로와 고조파회로로 분화된다. 또한 기본회로를 DC등가회로와 AC소신호 등가회로로 분화시킬 수 있다. 이렇게 하면 모든 직류 컨버터는 온전히 해석가능하며, 교류 컨버터는 시변성을 제거해주는 과정이 추가로 필요하다.

2.2 비이상적인 전력스위치의 정확한 등가회로

불연속 모드로 스위칭 동작을 하거나 스위칭손실과 도통손실이 있는 실제적인 전력스위치도 변형된 형태의 전자변압기가 되는 것을 새롭게 보이고자 한다.

2.2.1 불연속 모드로 동작하는 전력스위치

스위치의 On/Off 동작이 스위칭 제어신호에만 의하지 않고 전력회로의 전류나 전압의 영향도 받을 경우 불연속 모드가 된다. 이 경우에 스위치 전압/전류는 다음과 같이 된다.

$$v_d = h_1 v_s + \overline{h_1 h_2} v_o, \quad \therefore \overline{h_1} \equiv 1 - h_1, \quad \overline{h_2} \equiv 1 - h_2 \quad (1)$$

$$i_s = h_1 i_L \quad (2)$$

[그림1]은 완전한 스위칭 변압기에 스위칭 전압원이 부가된 회로로서 위 수식을 정확히 만족하므로 완전한 등가회로다. 연속모드의 경우에는 h_1, h_2 가 동시에 0이 되는 경우가 없으므로 (1)에서 스위칭 전압원이 없어진다.

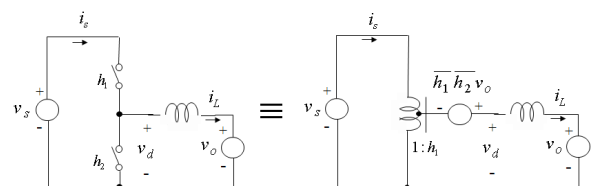


그림 1 불연속모드로 동작하는 전력스위치의 등가 변압기 회로
Fig. 1 An eq. transformer circuit of DCM power switches

2.2.2 스위칭손실 및 도통손실이 있는 전력스위치

스위칭 전압과 전류가 동시에 On이 되면 스위칭 손실이 발생하며 이 경우 스위칭 전압/전류는 다음과 같이 된다.

$$v_d = h_v v_s, \quad i_s = h_i i_L; \quad \because h_i \neq 1 - h_v \quad (3)$$

도통손실까지 고려한 등가회로는 [그림1]에 스위치의 도통전압과 도통저항을 추가한 후 변압기의 시변 턴수가 (3)처럼 전압식과 전류식이 각기 다르게 하면 얻어진다.

3. 제2 사상: “모든 교류회로는 페이지변환된다”

모든 교류회로에 대해 페이지변환이 적용가능하다는 것을 보이기 위해 [그림2]의 3상 매트릭스 컨버터를 예로 든다. 상 전압/전류 크기가 같고 위상각이 균등하여 밸런스된 매트릭스 컨버터의 입출력 기본파 전압/전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{o1} &= \sum_{l=1}^3 h_{1l} v_{il} \equiv \sum_{l=1}^3 \frac{1+s_{1l}}{2} v_{il} \quad \because \Delta\omega \equiv \omega_o - \omega_s \\ &\equiv \frac{1}{2} \sum_{l=0}^2 \left\{ 1 + \operatorname{Re} \left(\frac{2S_m}{\sqrt{3}} e^{j\phi_m + j2\pi l/3 + j\Delta\omega t} \right) \right\} \operatorname{Re} \left(\frac{2V_i}{\sqrt{3}} e^{j\phi_{v_i} - j2\pi l/3 + j\omega_s t} \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{l=0}^2 \operatorname{Re} \left(\frac{2S_m}{\sqrt{3}} e^{j\phi_m + j2\pi l/3 + j\Delta\omega t} \right) \operatorname{Re} \left(\frac{2V_i}{\sqrt{3}} e^{j\phi_{v_i} - j2\pi l/3 + j\omega_s t} \right) \\ &\left(\because \sum_{l=0}^2 \operatorname{Re} \left(\frac{2V_i}{\sqrt{3}} e^{j\phi_{v_i} + j2\pi l/3 + j\omega_s t} \right) = \operatorname{Re} \left\{ \left(\frac{2V_i}{\sqrt{3}} e^{j\phi_{v_i} + j\omega_s t} \right) \sum_{l=0}^2 e^{j2\pi l/3} \right\} = 0 \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{l=0}^2 \operatorname{Re} \left(\frac{2S_m}{\sqrt{3}} e^{j\phi_m + j2\pi l/3 + j\Delta\omega t} \right) \operatorname{Re} \left(\frac{2V_i}{\sqrt{3}} e^{j\phi_{v_i} - j2\pi l/3 + j\omega_s t} \right) \\ &= \frac{S_m V_i}{3} \sum_{l=0}^2 \operatorname{Re} \left(e^{j\phi_m + \frac{j2\pi l}{3} + j\Delta\omega t} e^{-j\phi_{v_i} + \frac{j2\pi l}{3} - j\omega_s t} + e^{j\phi_m + \frac{j2\pi l}{3} + j\Delta\omega t} e^{j\phi_{v_i} - \frac{j2\pi l}{3} + j\omega_s t} \right) \\ &= \frac{S_m V_i}{3} \operatorname{Re} \sum_{l=0}^2 \left(e^{j\phi_m - j\phi_{v_i} + \frac{j4\pi l}{3} + j(\omega_o - 2\omega_s)t} + e^{j\phi_m + j\phi_{v_i} + j\omega_o t} \right) \\ &= S_m V_i \operatorname{Re} \left(e^{j\phi_m + j\phi_{v_i} + j\omega_o t} \right) \equiv \operatorname{Re} \left(\mathbf{S}_m \mathbf{V}_i e^{j\omega_o t} \right) \quad (4-1) \end{aligned}$$

$$v_{o2} = \operatorname{Re} \left(\mathbf{S}_m \mathbf{V}_i e^{-j2\pi/3 + j\omega_o t} \right), \quad v_{o3} = \operatorname{Re} \left(\mathbf{S}_m \mathbf{V}_i e^{-j4\pi/3 + j\omega_o t} \right) \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} i_{i1} &= \sum_{l=1}^3 h_{1l} i_{ol} \equiv \sum_{l=1}^3 \frac{1+s_{1l}}{2} i_{ol} \\ &\equiv \frac{1}{2} \sum_{l=0}^2 \left\{ 1 + \operatorname{Re} \left(\frac{2S_m}{\sqrt{3}} e^{j\phi_m - j2\pi l/3 + j\Delta\omega t} \right) \right\} \operatorname{Re} \left(\frac{2I_o}{\sqrt{3}} e^{j\phi_{i_o} - j2\pi l/3 + j\omega_o t} \right) \\ &= S_m I_o \operatorname{Re} \left(e^{-j\phi_m + j\phi_{i_o} + j\omega_o t} \right) = \operatorname{Re} \left(\mathbf{S}_m^* \mathbf{I}_o e^{j\omega_o t} \right) \quad (5-1) \end{aligned}$$

$$i_{i2} = \operatorname{Re} \left(\mathbf{S}_m^* \mathbf{I}_o e^{-j2\pi/3 + j\omega_o t} \right), \quad i_{i3} = \operatorname{Re} \left(\mathbf{S}_m^* \mathbf{I}_o e^{-j4\pi/3 + j\omega_o t} \right) \quad (5-2)$$

고조파가 없는 경우를 고려했으나 있는 경우에도 위 식은 성립한다. (4)(5)는 매트릭스 컨버터가 등가의 복소변압기임을 나타내고 있으며 ($\mathbf{V}_o = \mathbf{V}_i \mathbf{S}_m$, $\mathbf{I}_i = \mathbf{I}_o \mathbf{S}_m^*$), 다른 상의 위상차를 알고 있으므로 한 상의 페이지만 알면 된다. 이제 남은 일은 한 상의 교류회로에 대한 페이지 등가회로를 구하여 해석한 후 (4)(5)를 이용하여 실제회로의 전압, 전류를 관찰하는 것이다.

복소변압기의 입출력전력은 보존($P_i = \mathbf{V}_i \mathbf{I}_i^* = \mathbf{V}_o \mathbf{I}_o^* = P_o$)되며, 임피던스는 복소변압기를 사이에 두고 S_m^2 배 변화한다. 복소변압기 입력과 출력의 주파수가 0이 아니기만 하면 위 식의 페이지변환이 성립하므로, 이는 모든 AC 컨버터에 적용가능하다.

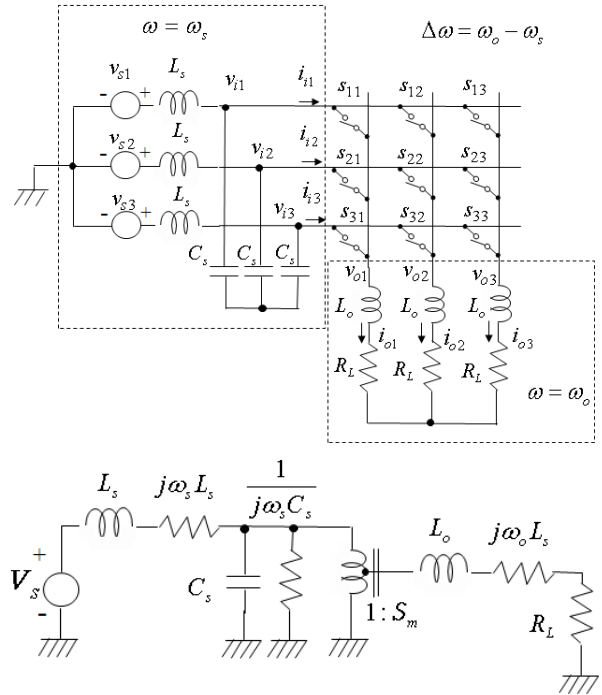


그림 2 3상 매트릭스 컨버터 및 등가의 페이지변환 회로
Fig. 2 3 phase matrix converter & its eq. phasor circuit

4. 결론: “전력전자 사상의 완성”

본 논문을 통해 전력전자의 핵심사상은 ‘전자변압기’ 및 ‘페이지변환’임을 밝혔다. 이제 모든 전력전자회로는 이 원리에 의해 통일적으로 해석가능하게 되었다.

참고 문헌

- [1] 임춘택, "회로 변환을 이용한 선형 스위칭 시스템의 해석", KAIST 박사학위 논문, 1990년 2월.
- [2] C. T. Rim, D. Y. Hu and G. H. Cho, "Transformers as equivalent circuits for switches : General proofs and D-Q transformation-based analysis," *IEEE Trans. on Industry Application*, pp. 777-785, 1990, July/August.
- [3] C. T. Rim and G. H. Cho, "Phasor transformation and its application to the DC/AC analyses of frequency/phase controlled series resonant converters (SRC)," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 5, No. 2, pp. 201-211, 1990, April.
- [4] 임춘택, "페이지 변환의 불완전성 보완", 전력전자학회 추계 학술대회, 1999년 11월, 고려대학교, 서울, pp. 159-163.
- [5] R. D. Middlebrook and S. Cuk, "A general unified approach to modeling switching converter stages," *IEEE PESC 1976*, pp. 18-34
- [6] P. Wood, "General theory of switching power converters," *IEEE PESC 1979*, pp. 3-10.