

## 전력변환회로의 독립형 시뮬레이션모델 구축에 관한 연구

鄭勝基

A Study on the Development of Stand-Alone Model  
for Power Converter Circuit Simulation

Seung-Gi Jeong

## 요 약

본 논문에서는 시스템수준 시뮬레이션 언어를 통해 전력전자회로의 시뮬레이션을 행하기 위한 회로 모형화의 체계적인 접근방식을 제시하였다. 회로 내의 요소들을 입출력 조건에 따라 네가지 기본적 형태로 나타낼 수 있음을 보이고 병렬요소와 직렬요소들에 대한 일반 모델을 도출한 다음 이들을 조합하여 일반적인 컨버터시스템의 모델을 개발하는 방법을 제안하였다. 그 과정에서 모델간의 입출력 조건을 만족하면서 대수적 순환루우프의 발생의 방지라는 두 제약조건을 동시에 만족시키기 위해서는 일반적으로 모델간의 원활한 접속을 위한 가상 접속블록의 도입이 필요함을 보였다. 제시된 방법을 간단한 체강형 컨버터 회로를 대상으로 구현한 예를 보였고 접속블록의 도입을 일반적인 모델간 변환의 개념으로 확장하여 설명하였다.

## ABSTRACT

This paper presents a systematic approach to the modeling of power electronic circuits with system-level simulation languages. It is shown that a circuit model reduces to one of four basic types according to input/output conditions. The elementary models for single series components and shunt components are derived which are integrated to develop a model of given converter circuit. The constraints imposed on the model development—matching input/output conditions and avoiding algebraic loop—are discussed in relation to the realization example of a buck converter circuit model. It is shown that the constraints can always be fulfilled by introducing fictitious interface blocks, which is generalized to the concept of model transformation.

**Key Words:** simulation, modeling

## 1. 서 론

근래에 전력변환회로의 시뮬레이션은 전력전자 분야의 연구와 개발, 그리고 교육에 있어서 필수적인 도구가 되었다. 전력전자분야에서 사용되는 시뮬레이션 도구로서 대표적인 것들을 보면 MATLAB, PSPICE, ACSL, EMTF, SABER 등이 있다<sup>(1)</sup>. 최근 이들 시뮬레이션 도구들은 그 기본적인 기능을 그래픽 형태로 제공하여 사용자의 편의성과 직관성, 그리고 모델 구축의 용이성에 있어서 획기적인 진보를 보여주고 있다. 효과적인 시뮬레이션을 위해서는 목적에 부합하는 적절한 도구를 선택할 필요가 있으며 또한 사용되는 도구에

따라 대상시스템을 취급하는 방식에도 현격한 차이가 있다. 여러 시뮬레이션 도구들은 나름대로의 특징과 정점을 지니고 있으나 대체로 소자수준(device-level) 시뮬레이션 도구와 시스템수준(system-level) 시뮬레이션 도구 두가지로 구분될 수 있다<sup>(2)</sup>.

소자수준 시뮬레이션도구로 대표적인 것은 PSPICE이며 시스템을 구성하는 단위소자를 일일이 모델에 포함시켜 전체 회로를 하나의 방정식으로 치환하여 매 시점에 대한 해를 연속적으로 구해나가는 방식이다<sup>(3)</sup>. 한편 시스템수준 시뮬레이션에서는 시뮬레이션하고자 하는 대상 시스템을 수학적 표현식으로 나타내고 이를 적절한 형태로 조합하여 모델을 구성

하게 된다.

전자의 경우는 실제 사용되는 회로의 모든 요소를 구체적으로 사용하기 때문에 회로의 모든 부분에 대해서 사실에 가깝게 그 동작을 모의할 수 있고 예컨대 스너버회로와 같은 구체적인 회로의 상세 설계를 위해 동작특성을 확인하는 등의 목적에 적합하다<sup>(4)</sup>. 그러나 시스템의 규모가 커지면 복잡도가 현저히 증가하여 시뮬레이션 속도가 대단히 낮아지게 된다. 또한 제어신호의 발생부를 함수형태로 처리하기 어려워 전력 시스템에서와 같이 복잡한 제어기능을 포함하고 있을 경우 시스템의 전반적인 특성을 살펴보고 이를 제어시스템의 설계에 적용하는 데에 많은 제약과 불편이 따르게 된다.

시스템수준 시뮬레이션 도구는 시뮬레이션의 목적에 적합하게 마련된 하나의 프로그래밍 언어라 할 수 있다. 이들을 통해 회로를 시뮬레이션하고자 할 때는 전체 혹은 일부 회로를 상태방정식의 형태로 표현하는 것과 같은 일련의 수학적 모형화의 과정이 반드시 필요하다. 특히 전력전자회로를 모의할 경우에 회로 내 변수의 실제 변화를 관찰하기 위해서는 회로의 스위칭 상태에 따라 달라지는 회로의 수학적 모형을 일일이 고려에 넣어야 한다. 많은 경우에 이는 적절한 스위칭 함수의 형태로 비교적 간단히 구현할 수 있다. 그러나 전류의 불연속구간이 존재한다거나 전류중복이 존재한다거나 할 경우에는 하나의 스위칭함수로 표현하는 데에 어려움이 따르기 때문에 별도의 모델을 추가하여야 한다. 요컨대 일반적으로 발생가능한 모든 동작모드를 고려에 넣어 모델을 작성하고 모드간 전환조건을 자세히 정의하여야 하는 번거로움이 따르게 된다.

따라서 시스템수준 시뮬레이션은 회로 각 부분의 변수 변화를 자세히 살펴보기 위한 용도보다는 컨버터 회로의 근사적 수리모형(예컨대 상태평균화법에 의해 작성된 모델)에 입각하여 회로의 세부적 동작보다는 제어시스템에 초점을 둔 시뮬레이션에 주로 적용되고 있다. 또한 시스템 수준에서의 다양한 수학적 도구들이 제공되며 시스템의 전반적인 동특성을 살펴보는 것이 용이하므로 전력변환회로를 포함하는 제어시스템의 분석, 평가 및 설계에 적합한 도구라 할 수 있다<sup>(5)</sup>.

한편 전력전자 시스템의 시뮬레이션에 있어서는 회로의 내부적 동작을 관측하면서 동시에 시스템의 전반적인 제어특성을 볼 수 있어야 하는 경우가 많이 있는데 이러한 경우에는 위 두 방식의 특징을 모두 살릴 수 있는 중간수준의 시뮬레이션이 요구된다. 이를 위해 소자수준 시뮬레이션 도구를 사용할 경우에는 이상화된 소자모델의 사용 등으로 어느 정도 대응할 수는 있으나 복잡한 제어시스템을 구현하는 데에 있어서 아직까지는 현실적으로 어려움이 따르는 것으로 생각된다. 따라서 시스템수준 시뮬레이션 언어를 사용하여 전력전자회로의 세부적인 동작을 구현하는 접근방향이 보다 현실적이라 할 수 있다. 그러나 여기서 전체가 되어야 할 것은 위에

서 언급한 것과 같은 여러 가지 복잡한 동작모드에 대한 수리 모형의 유도과정을 효과적으로 대체할 수 있는 적절한 방법론이 강구되어야 한다는 점이다. 그리고 유도된 모형은 하나의 독립적인 조립단위(stand-alone building block)로 취급될 수 있어야 하는데 그러기 위해서는 불연속동작, 제어신호의 휴지시간(예컨대 데드타임 구간), 전류중복, 상태변수 개수의 변화 등 여러 가지 일반적인 동작모드들에 대해서 항상 하나의 모델만으로 대체할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 시스템수준 시뮬레이션 모델에서도 소자수준 시뮬레이션에서와 같은 소자의 전압-전류 특성에 기반을 둔 회로 모델이 도입되어야 한다.

근래에 컴퓨터의 고속화와 그래픽 사용자 인터페이스의 보편화와 같은 소프트웨어 기술의 발전은 소자수준 시뮬레이션 도구와 시스템수준 시뮬레이션 도구간의 경계를 모호하게 만들어가고 있다. 이는 다시 말해서 시스템수준 시뮬레이션 도구를 통해 소자수준의 시뮬레이션을 행하는 것이 보다 용이해지고 있다는 의미로 해석할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 관점에서 시스템 수준 시뮬레이션 도구를 소자수준 시뮬레이션에 적용하기 위한 기본적인 방법론을 체계적으로 수립하고자 하였다. 시뮬레이션 도구로는 최근 철도차량 견인시스템 등과 같이 비교적 규모가 크고 복잡한 시스템을 대상으로 한 시뮬레이션에 널리 사용되고 있는 MATLAB/SIMULINK를 기준으로 하였다<sup>(6,7)</sup>.

## 2. 시뮬레이션모델의 일반 형태

시뮬레이션하고자 하는 대상시스템이 복잡할 경우에는 보통 이를 몇 개의 부시스템(sub-system), 혹은 시뮬레이션 단위가 되는 모듈로 나누게 된다. 이들 부시스템은 각각 입력과 출력을 가지게 되며 이들을 통하여 인근의 부시스템들과 상호작용을 하게 된다. 일반적으로 하나의 부시스템과 상호작용하는 부시스템의 개수에는 제한이 없으나 여기서는 논의를 간단히 하기 위해 그림 1에서와 같이 부시스템이 단선적으로 접속되는 직렬접속모델(cascade model)을 가정하기로 한다.

그림 1에서 어떤 부시스템  $S_N$ 은 그 전단의 부시스템  $S_{N-1}$ 과 후단의 부시스템  $S_{N+1}$  사이에 위치하게 된다.  $S_N$ 은 주변의 이들 두 부시스템으로부터 입력  $IN_F$ 와  $IN_B$ 를 받아서 그에 대한 응

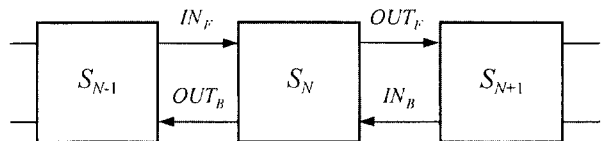


그림 1 직렬접속 시스템의 일반적인 구성형태  
Fig. 1 A general representation of cascaded model

답으로 출력  $OUT_f$ 와  $OUT_b$ 를 내보낸다. 입출력의 흐름으로 보아 이들 네 입출력 변수는 전방에서 후방으로 진행되는 전향 변수(feedforward variable)인  $IN_f$ (전향입력)와  $OUT_f$ (전향출력), 그리고 그 반대로 진행되는 궤환변수(feedback variable)인  $IN_b$ (궤환입력)와  $OUT_b$ (궤환출력)로 나눌 수 있다.

엄밀한 의미에서 어떤 부시스템의 입력측과 출력측을 구분하는 것은 의미가 없고 보는 관점에 따라 전향변수와 궤환변수는 입장이 바뀔 수도 있다. 그러나 통상적인 표현을 따라 능동적 요소(예컨대 전원)에서 수동적 요소(예컨대 부하)쪽으로 진행되는 방향을 전향으로 취하도록 한다. 이렇게 하였을 때 전향변수는 전단 시스템에서 후단 시스템에 가해지는 작용(action)으로, 그리고 궤환변수는 후단시스템에서 전단 시스템에 가해지는, 작용에 대한 반작용(reaction)으로 간주된다. 이하에서는 부시스템의 전단측을 1차측, 후단측을 2차측으로 표기하도록 한다.

전기적 시스템에서 이들 변수는 전압 혹은 전류의 형태로 나타난다. 전원-전력변환장치-부하로 구성된 어떤 시스템을 생각하여 보면 전력변환장치(이하 간단히 컨버터로 칭함)를 중심으로 보았을 때 전향입력은 전원의 전압 또는 전류가 되고 매 순간 컨버터의 스위칭 상태에 의해 결정되는 컨버터 출력전압 또는 전류가 전향출력으로서 부하에 인가된다. 이에 대한 반응으로 부하를 통해 전류가 흐르거나 부하 단자간에 전압이 유기되는데 이것이 부하로부터 컨버터로 주어지는 궤환입력이 된다. 이 부하측 전류 또는 전압은 컨버터의 스위칭 상태에 따라 다시 컨버터 입력측에 반영되며 이것이 컨버터가 전원측에 전달하는 궤환출력에 해당한다.

부시스템의 1차측과 2차측 각각에서 전압과 전류 중 어느 것을 전향변수로, 어느 것을 궤환변수로 설정할지는 편의에 따라 달라질 수 있는 선택의 문제라 할 수 있으나 일반적으로는 그 부시스템의 전후에 접속되는 회로의 속성에 따라 그 선택이 달라지게 된다. 예컨대 일반적인 전압원에 의해 구동되는 컨버터에서는 전원전압을 전향입력변수로 취하는 것이 보통이지만 전원이 순수한 전압원이 아니라 직렬 인덕턴스를 포함하고 있을 때는 컨버터에의 입력을 전압이 아닌 전류로 취하여야 한다. 이는 전원이 전류원의 특성을 지니게 되기 때문이며 수학적 표현상 인덕터의 특성을 적분방정식으로 변환한 모델이 전압을 입력으로 하고 전류를 출력으로 하는 형태가 되는 데에 기인한다.

한편 컨버터의 2차측에 직렬인덕터가 있을 경우 인덕터 모델에 입력으로 작용하는 컨버터 모델의 출력은 전류가 아닌 전압이 되어야 하고 이때 컨버터모델로 궤환되는 입력은 전류가 된다. 요컨대 1차측이건 2차측이건 인덕터모델로부터 주어지는 컨버터모델의 입력변수는 전류가 되고 인덕터모델로 인가되는 컨버터모델의 출력변수는 전압이 된다. 그리고 이러한 관계는 컨버터의 전후에 병렬커패시터가 접속될 때는

반대가 된다. 즉 1차측의 병렬커패시터는 전압 전향입력으로, 2차측의 병렬 커패시터는 전압 궤환입력으로 컨버터 모델에 작용하고 이들은 각각 컨버터 모델로부터 전류 궤환출력과 전류 전향출력을 입력으로서 받아들이는 형태로 된다.

이와 같은 점을 고려하면 컨버터 전후에 접속되는 회로의 속성에 따라 컨버터를 포함한 일반적인 회로의 부시스템 모델은 다음과 같은 네가지 형태 중의 하나로 되어야 한다.

1. 교차임피던스모델(transimpedance model): 유도성전원과 유도성부하 사이에 있을 때, 전류를 입력으로, 전압을 출력으로 취함.
2. 교차어드미턴스모델(transadmittance model): 용량성전원과 용량성부하 사이에 있을 때, 전압을 입력으로, 전류를 출력으로 취함.
3. 전류증폭모델(current amplifier model): 유도성전원과 용량성부하 사이에 있을 때, 전류를 전향변수로, 전압을 궤환변수로 취함.
4. 전압증폭모델(voltage amplifier model): 용량성전원과 유도성부하 사이에 있을 때, 전압을 전향변수로, 전류를 궤환변수로 취함.

여기서 이들 모델의 명칭은 전방이나 후방 어느 한쪽 방향에 대한 모델의 전달함수로서의 속성을 표현하고 있다. 그 입출력 변수들은 그림 2에 보인 것과 같으며 이하에서는 이들을 간단히 각각 Z모델, Y모델,  $A_i$ 모델 및  $A_v$ 모델로 부르기로 한다.

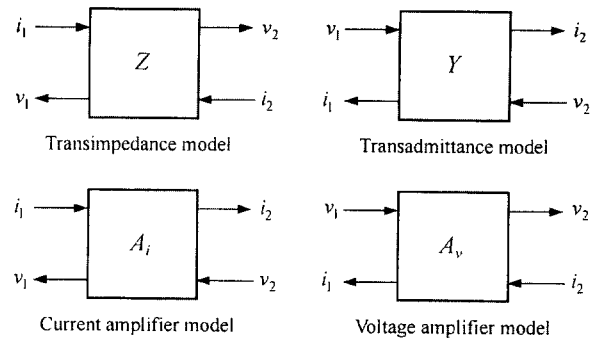


그림 2 회로모델의 네가지 기본형  
Fig. 2 Four basic model types

### 3. 기본 회로요소의 모델

전력변환시스템에서 회로를 구성하는 기본 요소는 저항, 인덕터, 커패시터 및 반도체스위치가 있다. 이들 요소의 전압-전류특성, 즉 요소 양단의 전압과 요소를 통해 흐르는 전류의 관계는 그림 3(a)와 같다. 일반적인 시뮬레이션은 모든 미분

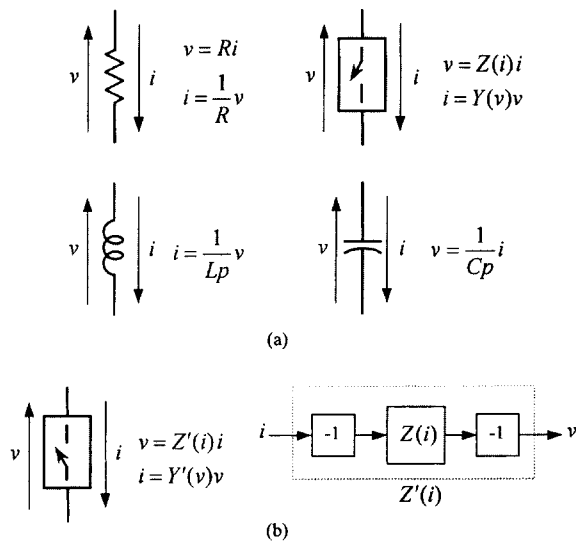


그림 3 회로요소의 기본 전압-전류특성  
Fig. 3 Voltage-current characteristics of circuit components

방정식을 적분방정식의 형태로 변환하여 취급하기 때문에 인덕터는 전압을 입력으로 하고 전류를 출력으로 하는 어드미턴스 전달함수의 형태로, 커패시터는 전류를 입력으로 하고 전압을 출력으로 하는 임피던스 전달함수의 형태로 표현되어야 한다. 반면에 저항과 스위치의 전류-전압간 특성은 임피던스 혹은 어드미턴스 어느 형태의 전달함수가 되어도 무방하다. 여기서 반도체 스위치는 제어입력에 따라 저항값이 가변되는 저항소자와 같이 취급된다. 그러나 비선형특성을 갖는 반도체 스위치에 있어서는 소자의 방향에 따라 그 전달함수 관계가 달라지는 것에 유의하여야 한다. 즉 그림 3(a)에서와 같이 소자의 순방향 전압강하와 순방향 전류를 기준방향으로 취하는 것이 일반적이는데 이때의 임피던스 전달함수가 전류의 함수로서  $Z(i)$ 로 표현된다고 하면 그림 3(b)에서와 같이 소자가 반대로 접속되어 있을 경우의 전달함수는  $Z' = -Z(-i)$ 가 된다. 이러한 관계는 어드미턴스로 표현될 때도 마찬가지이다.

이들 소자들로 구성된 회로의 모델은 각각의 소자들의 모델을 조립하여 이루어진다. 먼저 가장 간단한 예로서 그림 4(a)와 같은 직렬요소를 생각하여 보기로 한다. 직렬요소에서는 1차측 전류  $i_1$ 과 2차측 전류  $i_2$ 가 항상 같기 때문에 이들을 동시에 독립적으로 변화하는 입력변수로 사용할 수 없다. 따라서 그림 2의 네가지의 가능한 모델 중 Z형 모델은 존재할 수 없으며 그림 4(b)에 보인 Y형,  $A_1$ 형 및  $A_2$ 형 모델이 가능하다. 여기서 보다시피 Y모델은 회로요소의 어드미턴스 전달함수를 필요로 하는 반면에 다른 두 모델은 임피던스 전달함수를 사용하고 있다. 저항과 스위치는 이들 세가지 모델 어느 것도 가능하지만 인덕터의 경우에 있어서는 Y형 모델만이 가

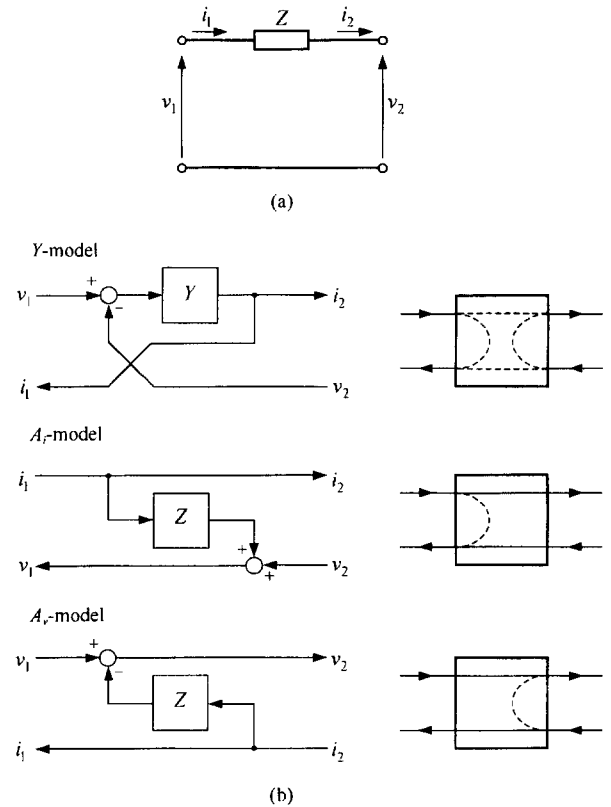


그림 4 직렬요소의 모델  
Fig. 4 Models of a series component

능하며 커패시터는  $A_1$ 형 및  $A_2$ 형만이 가능하다.

한편 각각의 모델 오른쪽에 보인 도형은 해당 모델의 입출력간 대수적 결합관계(algebraic feedthrough)를 나타내고 있다. 대수적 결합이란 시물레이션 과정 중 어떤 시점에서 출력변수를 계산하는 데에 있어서 그 시점에서의 직접적인 입력변수의 값을 필요로 하는 상태를 의미한다. 여러 개의 모델이 접속되는 과정에서 이러한 대수적 결합이 루우프를 형성하게 되면 출력변수를 계산하기 위해 입력변수를 필요로 하고 입력변수를 얻기 위해서는 다시 출력변수를 알아야 하는, 이른바 대수적순환(algebraic loop)의 문제가 발생하게 된다. 대수적순환상태에서는 연립방정식의 해를 구하는 것과 같은 방식으로 해가 구해여야 한다. 시물레이션 도구에 따라서는 이러한 상태를 처리할 수 있는 내부적 알고리즘이 제공되고 있지만<sup>(4)</sup> 대부분의 경우 시물레이션의 수행속도를 현저히 느리게 할 뿐 아니라 수치해석과정에서의 안정성(numerical stability)을 해쳐 수렴하지 않게 되는 경우가 흔히 있다. 따라서 일반적으로 이러한 대수적 순환은 시물레이션 모델구축 과정에서 피하여야 할 대상이 된다.

그림 4의 대수결합도에서 블록 내부의 실선은 대수적 결합

이 직접적으로 이루어지고 있음을 나타내며 접점은 소자의 전달함수를 통하여 이루어짐을 나타낸다. 소자가 저항이나 스위치같은 단순이득의 형태일 경우에는 이 전달이 실선과 마찬가지로 대수적 결합으로 되지만 전달함수가 적분요소를 포함하고 있는 경우에는 그 결합관계가 차단된다. 그 이유는 적분기의 출력은 현재의 입력이 아니라 과거의 입력에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 Y모델에서는 대상 요소가 저항이나 스위치일 경우 전방결합(forward feedthrough:  $v_1$ 에서  $i_2$ 로), 후방결합(backward feedthrough:  $v_2$ 에서  $i_1$ 으로), 1차측 케환결합(primary feedback feedthrough:  $v_1$ 에서  $i_1$ 으로), 그리고 2차측 케환결합(secondary feedback feedthrough:  $v_2$ 에서  $i_2$ 로) 네 가지의 대수적 결합이 모두 존재하게 된다. 그러나 적분요소로 표현되는 인덕터에 대해서는 이들 모두가 차단된다. A<sub>1</sub>형과 A<sub>2</sub>형 모델에서는 전방결합과 후방결합이 항상 존재하며 대상요소의 속성에 따라 1차측 케환결합 혹은 2차측 케환결합 중 하나가 존재할 수 있다. 이하에서는 그림에 표시한 것과 같이 1차측 케환결합을 가질 수 있는 모델을 L<sub>1</sub>형, 2차측 케환결합을 가질 수 있는 모델을 L<sub>2</sub>형, 양측 케환결합을 모두 가질 수 있는 형태를 L<sub>3</sub>형으로, 그리고 양측 케환결합이 모두 존재하지 않는 형태를 L<sub>0</sub>형으로 칭한다.

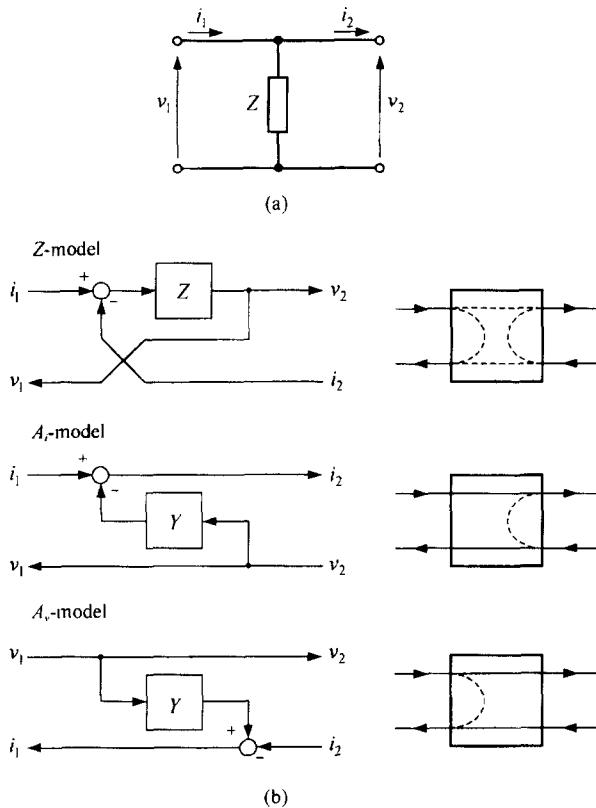


그림 5 병렬요소의 모델  
Fig. 5 Models of a shunt component

그림 5는 병렬요소에 대한 모델을 보여주고 있다. 이 경우에는 1차측전압  $v_1$ 과 2차측 전압  $v_2$ 가 항상 같기 때문에 이들을 동시에 입력으로 취하는 Y형 모델은 존재할 수 없고 Z형 및 A<sub>1</sub>형, A<sub>2</sub>형만이 가능하다. 여기서 Z모델은 회로요소의 임피던스를 필요로 하고 A<sub>1</sub> 및 A<sub>2</sub> 모델은 어드미턴스를 필요로 한다. 따라서 병렬인덕터는 A<sub>1</sub>형 또는 A<sub>2</sub>형의 모델이 되어야 하고 병렬커패시터는 Z모델만이 가능하다. 여기서도 그림에 각 모델의 임출력간 대수적 결합관계를 함께 도시하였다.

그림 4와 그림 5를 비교하여 보면 직렬요소의 Y모델과 병렬요소의 Z모델은 그 구조가 동일하며 직렬 A<sub>1</sub>모델은 병렬 A<sub>1</sub>모델과, 그리고 직렬 A<sub>2</sub>모델은 병렬 A<sub>2</sub>모델과 같은 형태임을 볼 수 있다. 이러한 구조상 유사성은 직렬요소와 병렬요소 사이의 쌍대성(duality)을 반영하고 있다.

component	Z	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
	Not exist		
	Not exist		
	Not exist	Not exist	Not exist
	Not exist	Not exist	Not exist
		Not exist	Not exist
	Not exist	Not exist	Not exist

그림 6 직렬, 병렬 회로요소들에 대한 가능한 모델형태의 요약  
Fig. 6 Summary of possible model types for series and shunt circuit components

그림 6은 여섯가지 형태의 가능한 직렬 병렬회로요소의 모델과 그 대수적결합관계를 요약하고 있다. 여기서 스위치와 저항은 같은 형태인 것으로 간주하고 있다. 그림에서 보듯이 직렬 인덕터와 병렬 커패시터는 1차, 2차측 케환결합 뿐 아니라 전방결합과 후방결합이 모두 존재하지 않는 대수적 순환결합의 차단블럭(algebraic loop isolator)으로서 작용한다. 반면에 여타 다른 요소들은 모두 전방 및 후방결합을 허용한다. 특히 저항과 스위치는 1차측 케환결합이나 2차측 케환결합, 혹은 양자 모두를 가질 수 있기 때문에 대수적 순환결합의 직접적인 원인을 제공함을 알 수 있다.

### 4. 모델의 접속

위에서 기술한 기본 회로요소들의 모델을 결합하는 데 있어서 일반적으로 직렬접속된 두 개의 요소는 하나의 직렬요소로 묶어서 생각할 수 있고 병렬접속된 요소들 역시 하나로 묶어서 취급할 수 있다. 따라서 회로요소들 사이에 추가적인 분기점을 갖지 않는 단순 1선키로형의 회로는 직렬요소와 병렬요소가 교대로 나타나는 사다리형 회로로 귀착된다.

모델간의 접속은 기본적으로 다음의 두 조건이 만족되어야 한다. 먼저 입출력변수간 대응이 이루어져야 한다. 예를 들어 전향 전류출력을 갖는 Y모델 뒤에는 전향 전류입력을 갖는 Z형 혹은 A<sub>i</sub>형 모델이 접속 가능하다. 다음으로 모델의 접속으로 인해 대수적 순환루우프가 형성되어서는 안된다. 즉 그 이전의 어느 단계에서 2차측 대수결합이 존재하고 그 사이에 대수결합 차단요소(병렬커패시터나 직렬인덕터)가 없을 경우에는 1차측 대수결합이 있는 모델이 접속되어서는 안된다.

그림 7은 직렬요소 모델  $M_k$ 와 병렬요소 모델  $M_{k+1}$ 이 결합되는 경우의 가능한 모델들을 보여주고 있다. 표 1에서 보듯이 가능한 조합은 모두 다섯가지이며 이들 중 Y-Z결합과 A<sub>i</sub>-A<sub>v</sub>결합 (두 경우 모두 합성모델은 A<sub>i</sub>형이 됨)은 그 자체로 내부 루우프를 갖는다. 따라서 두 요소가 모두 저항이나 스위치인 경우에는 이들 두 결합은 사용될 수 없고 등가 합성모델은 Z, Y, A<sub>i</sub>형 중 하나가 된다. 그리고 자체 내부 루우프를 갖지 않는 이들 모델들에서는 모두 두 요소간의 결합이 전향전류  $i_2$ 와 케환 전압  $v_2$ 를 통해 접속되고 있음을 관찰할 수 있다.

다음으로 그림 8과 표 2는 병렬요소 모델  $M_k$ 와 직렬요소 모델  $M_{k+1}$ 이 결합되는 경우를 보여주고 있다. 여기에서도 가능한 조합은 모두 다섯가지이며 이들 중 Z-Y결합과 A<sub>i</sub>-A<sub>v</sub>결합 (두 경우 모두 합성모델은 A<sub>i</sub>형이 됨)은 그 자체로 내부 루우프를 갖는다. 따라서 두 요소가 모두 저항이나 스위치인 경우에는 이들 두 결합은 사용될 수 없고 등가 합성모델은 Z, Y, A<sub>i</sub>형 중 하나가 된다. 그리고 이들은 모두 전향전압  $v_2$ 와 케환전류  $i_2$ 를 통해 접속되고 있다는 공통점이 있다.

그림 9는 몇 단계의 접속이 반복되는 경우 모델간의 가능한 접속관계를 나타내고 있다. 선에 표시된 원은 두 모델간의 접속시 내부루우프가 발생하는 경우를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 접속이 3개 단계 이상일 경우에는 그 과정에서 반드시 루우프가 존재하게 된다. 따라서 저항이나 스위치가 2개 이상 들어가는 회로에서는 내부루우프가 대수결합을 야기하는지 여부를 점검하여야 할 필요가 있다.

### 5. 모델작성의 예

본 절에서는 이상의 방법에 의해 만들어지는 회로 각 요소의 모델을 접속함으로써 실제의 회로 모델을 구축하는 예를

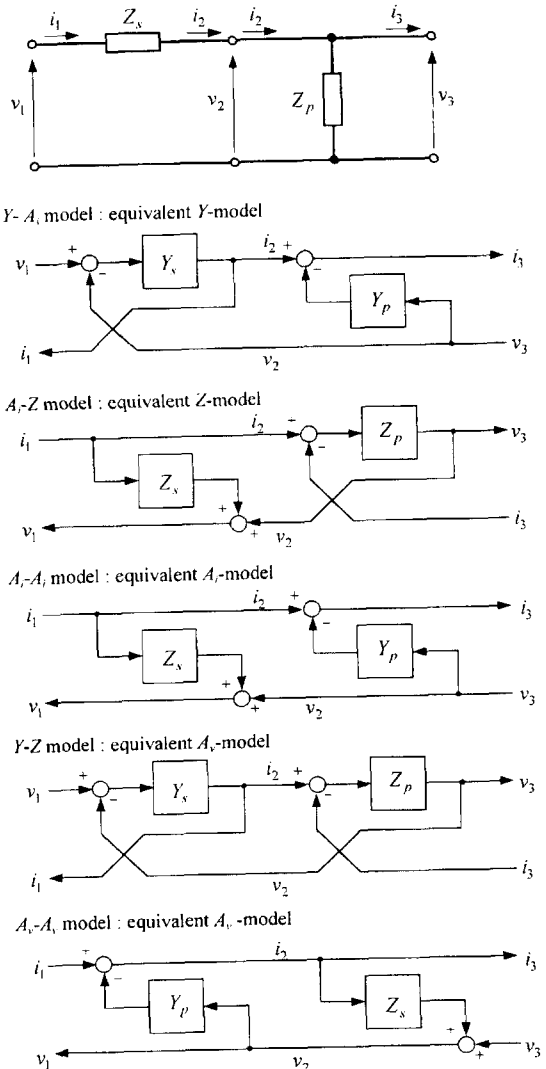


그림 7 직렬요소와 병렬요소 모델의 결합  
Fig. 7 Cascading a series and a shunt component model

표 1 직렬요소 모델과 병렬요소 모델의 결합시 등가모델  
Table 1 Equivalent models derived from cascading a series component model and a shunt component model

$M_k$	$M_{k+1}$			
	$Z(L_{12})$	$Y$	$A_i(L_{12})$	$A_v(L_{11})$
$Z$	-	-	-	-
$Y(L_{12})$	$A_v(L_{12})^*$	-	$Y(L_{12})$	×
$A_i(L_{11})$	$Z(L_{12})$	-	$A_i(L_{12})$	×
$A_v(L_{12})$	×	-	×	$A_v(L_{11})^*$

\* 는 내부 루우프를 갖는 모델을 표시함

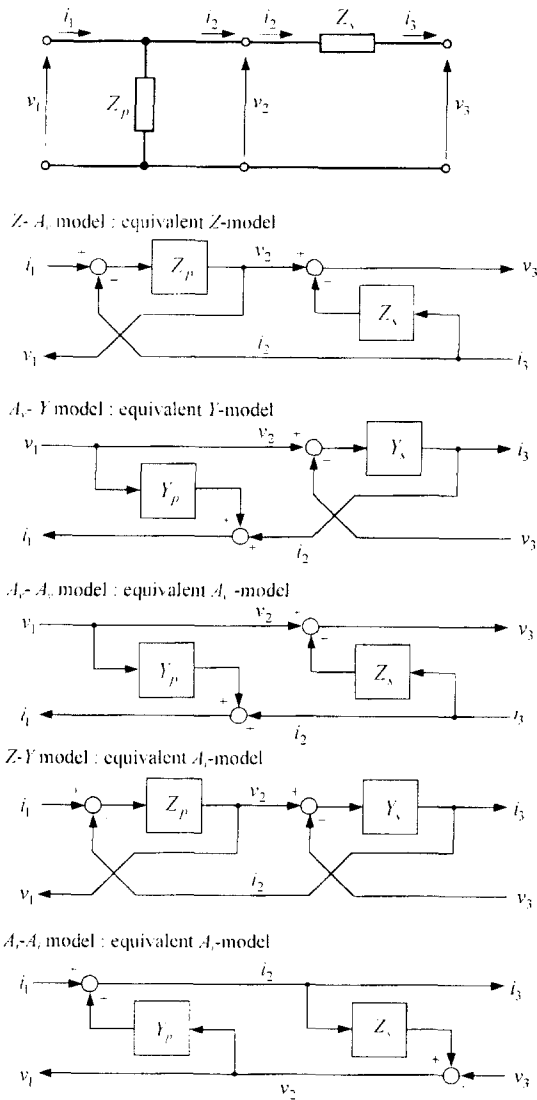


그림 8 병렬요소 모델과 직렬요소 모델의 결합  
Fig. 8 Cascading a shunt and a series component model

표 2 병렬요소 모델과 직렬요소 모델의 결합시 등가모델  
Table 2 Equivalentnet models derived from cascading a shunt component model and a series component model

$M_k$	$M_{k+1}$			
	$Z(L_{12})$	$Y$	$A_i(L_1)$	$A_v(L_2)$
$Z(L_{12})$	-	$A_i(L_{12})^*$	×	$Z(L_{12})$
$Y$	-	-	-	-
$A_i(L_2)$	-	×	$A_i(L_{12})^*$	×
$A_v(L_1)$	-	$Y(L_{12})$	×	$A_v(L_0)$

\* 는 내부 루우프를 갖는 모델을 표시함

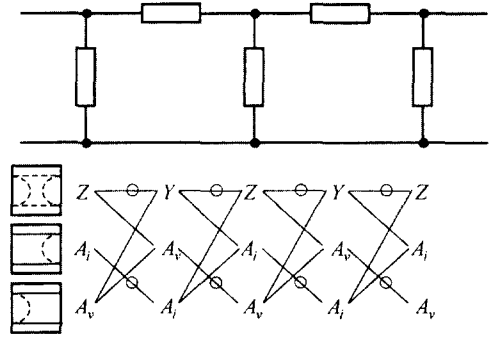
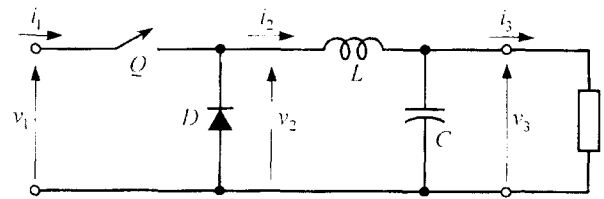
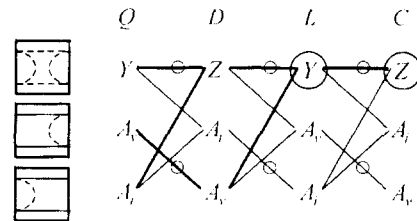


그림 9 사다리형 회로에서의 모델접속  
Fig. 9 Cascading models in a ladder network

보기로 한다. 모델의 대상은 그림 10(a)에 보인 간단한 체강 dc-dc 변환기(buck converter)이다. 이 회로는 직렬접속된 능동스위치  $Q$ 와 그 후단의 (역방향으로)병렬접속된 다이오드  $D$ 를 지니고 있다.  $Q$ 와  $D$ 를 조합하여 하나의 컨버터 회로로 간주하면 이 컨버터의 입력은 전압원이고 컨버터의 출력단은 직렬 인덕터가 접속되어 있기 때문에 그 합성 모델은 전향 전압입력과 전압출력을 갖는  $A$ 모델이 되어야 한다. 그러나 이들 두 스위치는 그림 7과 같은 구조를 지니고 있으며 앞서 설명한 바와 같이 이같은 접속에서  $A_i$ 모델은 내부 루우프를 가지기 때문에  $Z, Y, A_i$ 형 중의 하나가 되어야 한다. 따라서 그 자체의 모델만으로는 입출력조건과 대수적 순환루우프 배제 조건 두가지를 동시에 만족시킬 수 없으며 대수결합 루우프



(a)



(b)

그림 10 체강형 컨버터 회로  
Fig. 10 A buck converter circuit

를 방지하는 방법 또는 입출력 조건을 만족시켜 주는 방법 중의 하나를 강구하여야 한다.

이를 다른 각도에서 살펴보면 그림 10(b)에 보인 모델간 접속도에서 볼 때 출력단 인덕터 모델로 접속이 가능한 경로는 굵은 선으로 표시된 Y-Z-Y-Z (경로 1), A<sub>1</sub>-A<sub>1</sub>-Y-Z (경로 2), A<sub>1</sub>-Z-Y-Z (경로 3)이 된다. 이들 중에서 경로 1과 경로 2는 스위치들끼리의 결합에서 자체 내부 루우프를 갖게 되므로 사용될 수 없다. 그리고 경로 3은 입력단이 전류입력의 형태로 되어야 하기 때문에 입출력 조건에 부합하지 않는다.

이러한 모순을 제거하기 위한 하나의 방법은 컨버터 블록의 입력단 혹은 출력단에 가상의 블록을 삽입하는 것이다. 그림 11(a)는 세가지의 가능한 컨버터 모델(Z, Y, A<sub>1</sub>형)에 각각 가상의 접속블록(interface block)을 사용하여 입출력조건을 만족시켜주는 방법을 보여주고 있다. 맨 위의 것은 컨버터의 Y 모델 후단에 전류입력과 전압출력을 갖는 Z형 접속블록을 삽입한 것이고 두 번째는 컨버터의 Z모델 전단에 전압입력과 전류출력을 갖는 Y형 접속블록을삽입한 것이다. 그리고 세 번째는 컨버터의 A<sub>1</sub>모델을 사용하고 전후단에 모두 접속블록을 삽입한 것을 보여주고 있다.

이러한 접속블록의 조건을 생각하여 보면 앞서 표 1에서 보

인 것과 같이 스위치 모델들이 복합된 컨버터 모델이 모두 1, 2차측 케환대수결합을 갖는 L<sub>12</sub>형이기 때문에 대수결합 루우프를 형성하지 않기 위해서는 후단에 접속되는 Z형 블록은 1차측 케환결합을 갖는 L<sub>12</sub>형이나 L<sub>1</sub>형이 되어서는 안된다. 그런데 그림 6에서 보면 병렬 커패시터에 해당하는 모델만이 이를 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 같은 이유로 전단에 접속되는 Y형 블록은 직렬 인덕터에 해당하는 모델이 될 수밖에 없다. 즉 이와 같은 접속블록의 삽입은 회로상에서 그림 11(b)에 나타낸 것과 같이 전원측에 가상적인 직렬 인덕터 L'를 삽입하거나 부하측에 가상적인 병렬 커패시터 C'를 삽입한 것에 해당한다.

이러한 접속용 소자의 삽입은 가상적인 것이기는 하지만 실제 전원측 선로의 인덕턴스와 선로간 부유용량을 반영하고 있는 것으로 간주할 수 있다. 그러나 일반적인 시뮬레이션의 목적상 이들이 취하는 값은 회로의 동작특성에 영향을 거의 미치지 않도록 매우 작은 값으로 설정하는 것으로 충분하다.

그림 12는 그림 11(a)에서 제일 위의 모델을 MATLAB/SIMULINK 모델로 나타낸 것이다. 여기서 그림 12(a)는 컨버터회로를 하나의 단위 모듈로 나타낸 것이고 (b)는 컨버터 모듈의 내부를 요소단위로 구체적으로 표현한 것이다. 여기서 각각의 블록들의 내부는 지면상 생략하기로 한다. 이 블록들은 회로 시뮬레이션을 위한 기본 라이브러리를 구성하고 있으며 라이브러리 내의 각 블록은 사용자정의 블록(customized block)의 형태로 표준화되어 있다. 그림 12(c)은 그 한 예로서 그림 12(b)의 병렬 다이오드 블록의 사용자정의창을 보여주고 있다. 여기서 보다시피 각 블록의 사용자정의창은 입출력변수의 정의, 대수적 결합관계를 표시하고 있고 관련 인수들의 입력란을 지니고 있다. 이 병렬다이오드 경우에는 그 접속방향(upward/downward)과 도통 및 불통시의 임피던스를 입력하도록 되어 있다. 일반적으로 이러한 방식의 시뮬레이션 목적상 불통저항은 충분히 큰 값, 예컨대 1MΩ, 그리고 도통저항은 충분히 작은 값, 예컨대 0.1Ω 정도로 적절히 선택하는 것으로 충분하다. 이러한 방식으로 구성된 회로요소들의 라이브러리에서 회로구성에 따라 필요한 블록을 선택, 조합하여 전체 컨버터회로를 구성하게 된다. 이렇게 구성된 컨버터회로는 여러 가지 형태의 컨버터를 망라하는 상위 라이브러리 요소들 중의 하나가 된다. 여기서는 MATLAB/SIMULINK를 사용하는 경우를 보였지만 유사한 그래픽 인터페이스 기능을 갖는 어떤 다른 시뮬레이션 패키지라도 같은 방식을 적용할 수 있다.

그림 13은 이 모델에 대한 시뮬레이션 출력파형(출력전압, 필터 전단의 다이오드 양단전압, 필터인덕터전류)을 보여주고 있다. 여기서 사용된 변수들의 값은 다음과 같다: 전원전압 12.6 V, 스위칭 주파수 5 kHz, 필터 인덕터 0.8 mH, 필터 커패시터 50 μF, 스위치의 도통비(duty ratio) 0.4, 부하

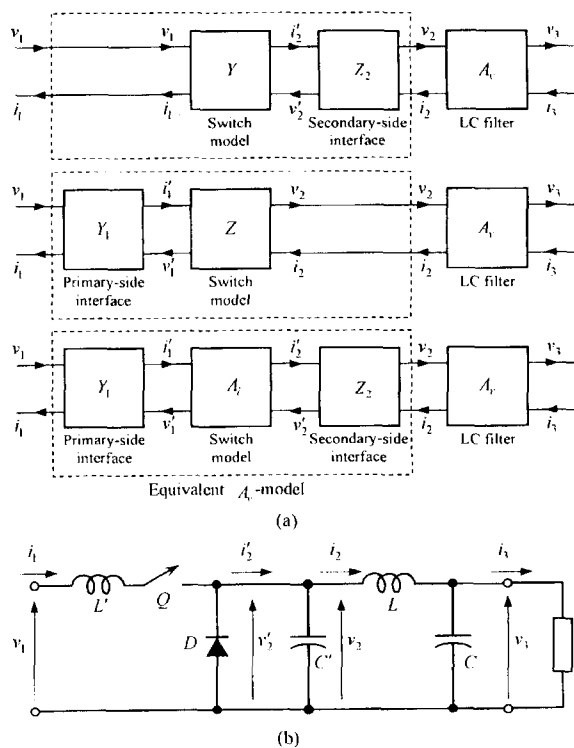


그림 11 접속블록을 갖는 체강형 컨버터의 모델  
Fig. 11 Buck converter models with interface blocks



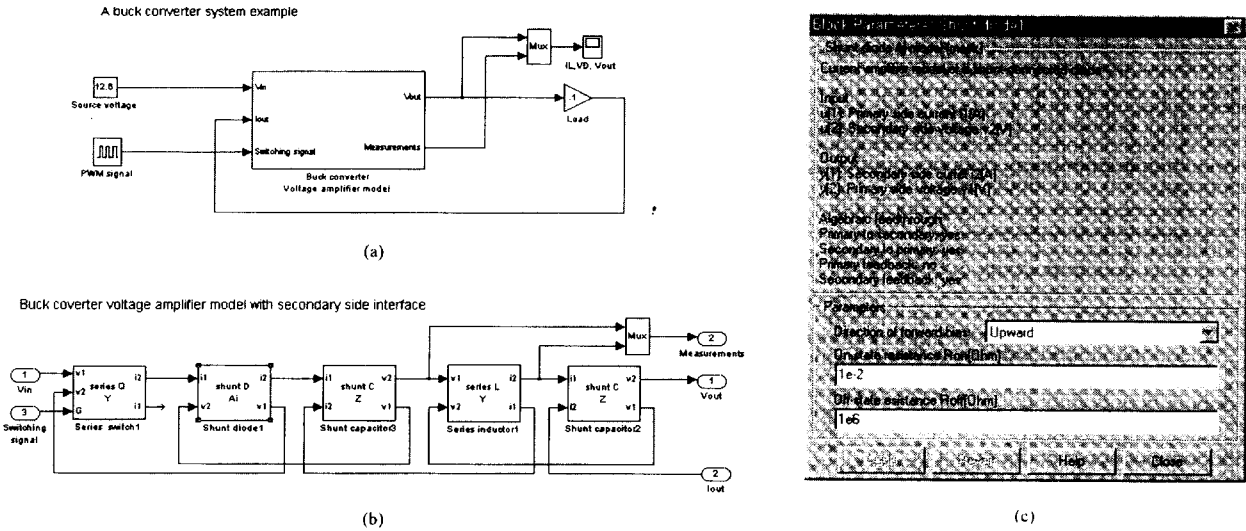


그림 12 체강형 컨버터의 MATLAB/SIMULINK 모델  
 Fig. 12 A buck converter model realized with MATLAB/SIMULINK

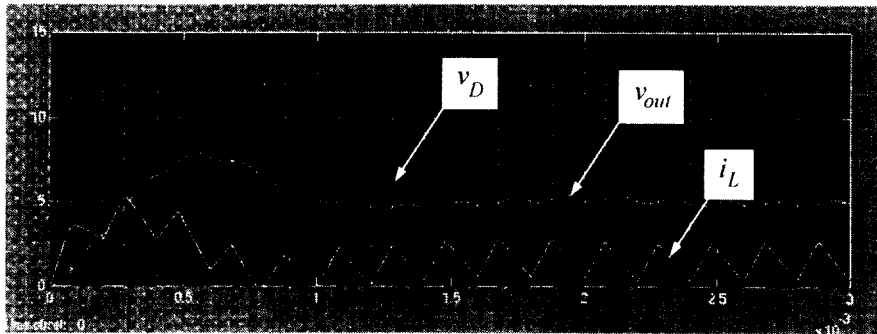


그림 13 체강형 컨버터 모델의 시뮬레이션 결과  
 Fig. 13 Simulation result with the developed model

저항  $10 \Omega$ , 접속블록의 커패시터  $0.1 \text{ nF}$ , 접속블록에서의 병렬저항(다음 절 내용 참조)  $50 \text{ k}\Omega$ . 여기서는 초기에 출력이 0인 상태에서 동작이 시작되는 과도상태를 보여주고 있으며 적절한 접속블록 수치의 설정으로 인덕터 전류가 불연속이 되는 구간을 포함하여 전체적인 동작의 시뮬레이션이 잘 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

### 6. 모델의 변환과 접속요소의 선정

위에서는 간단한 체강형 컨버터를 예로 들었지만 이와 쌍대성 관계에 있는 체승형 컨버터(boost converter)나 여타 다

른 형태의 컨버터의 모델에서도 마찬가지로 문제가 발생하며 같은 방식으로 입출력 조건을 만족시켜줄 수 있다. 일반적으로 회로를 구성하는 자체 요소들의 모델만으로 이루어지는 컨버터 회로의 원모델(natural model)의 작성에는 컨버터의 소자들의 결합을 통해 대수결합이 존재하게 될 개연성이 높기 때문에 회로가 복잡하여짐에 따라 이를 피하기가 어렵고 피한다 해도 컨버터의 입출력조건을 만족시키지 못하게 될 가능성이 높다. 이러한 전력전자회로의 모델을 구축하는 과정에서는 위에서 설명한 것과 같은 입출력조건을 만족시켜주기 위한 방법이 거의 항상 적용되어야 한다고 볼 수 있다.

모델간의 접속에는 일반적으로 원모델의 1차측에 Z형 블록

또는  $Y$ 형 블록을 삽입하는 경우와 2차측에  $Z$ 형 블록 또는  $Y$ 형 블록을 삽입하는 경우 네 가지가 존재하게 된다. 여기서는 이들을 각각  $Z_1$ 변환( $Z_1$ -transformation),  $Y_1$ 변환( $Y_1$ -transformation),  $Z_2$ 변환( $Z_2$ -transformation),  $Y_2$ 변환( $Y_2$ -transformation)으로 정의한다. 이러한 변환을 통하여 4가지 중의 어느 한 형태의 원모델은 다른 임의의 형태로 치환될 수 있다. 그림 14는 그 관계를 요약하여 보여주고 있다.

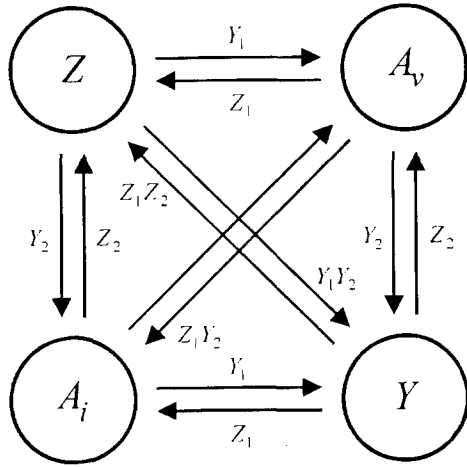


그림 14 모델간의 변환  
Fig. 14 Transformation between models

이들 변환은 기본적으로 주어진 모델의 입력단 혹은 출력단에서 전압과 전류의 역할을 바꾸어주는 역할을 한다. 예컨대  $Y$ 모델이나  $A_i$ 모델은 1차측에서 전압입력으로서 전압을, 제출력으로서 전류를 취하게 되는데 여기에  $Z_1$ 변환을 적용하면 전류 전압입력, 전압 제출력을 갖는 등가의  $Z$ 형 혹은  $A_v$ 형 모델로 변환된다.  $A_i$ 나  $A_v$ 형은 이러한 변수간 교차를 행하지 않기 때문에 접속블록으로 사용되지 않는다.

이와 같은 모델간의 변환은 컨버터와 같이 회로 내 어느 한 부분을 하나의 독립형 조립 단위(stand-alone building block)의 모형으로 만드는 데 있어서 특히 유용하다. 흔히 나타나는 회로 또는 컨버터의 모델은 하나의 독립형 모듈로서 작성되어 필요할 때 주변회로 모델에 끼워 넣음으로써 바로 수행이 가능한 형태로 제공되는 것이 바람직하다. 그러기 위해서는 주변의 입출력조건에 언제든지 대응하여 접속될 수 있어야 하므로 컨버터회로의 라이브러리에는 각각의 컨버터마다 입출력조건에 따른 네가지 형태가 모두 준비되어 있을 필요가 있다(예컨대 그림 12의 체강형 컨버터 모듈은 네가지 중  $A_v$ 형 모델에 해당한다). 따라서 어떤 컨버터 회로의 모델이 있다고 할 때 이 모델을 위의 변환을 통해 네가지 기본형으로 만들어 놓은 다음 필요에 따라 적절한 형태를 다른 회로

안에서의 부분으로 삽입하여 보다 큰 회로의 모델을 간단히 구현할 수 있다. 특히 모델 양단에 삽입되는 접속요소는 병렬 커패시터 혹은 직렬 인덕터로서 대수결합 차단기로서의 역할을 하기 때문에 대수결합이 일어나지 않도록 하는 기능을 함께 갖는다. 따라서 라이브러리가 구축된 이후에는 회로모형들의 간단한 조립을 통해 바로 수행 가능한 전체 모델을 쉽게 구성함으로써 '삽입 및 수행(plug-and-run)'의 방식으로 시뮬레이션을 행할 수 있다.

그림 15(a)-(d)에 네가지 변환을 각각 블록도의 형태로 나타내었다. 그리고 두가지 변환이 함께 행해지는 예를 그림 15(e)에 보였다. 이들 블록도를 보면 이러한 변환을 시스템에 제어기를 설치하는 것과 같은 형태로 생각할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 그림 15(a)에서 보면 입력이  $i_1$ 로 주어지고 실제 시스템의 전류가  $i_1'$ 일 때 가상요소  $Z_1$ 은  $v_1$ 을 조절하여  $i_1'$ 가  $i_1$ 과 같아지도록 작용하는 일종의 제어기와 같이 동작하고 있음을 알 수 있다. 이러한 관점에서 보면  $Z_1$ 이 반드시 순수한 적분요소일 필요는 없으며 1차지연요소 혹은 대수 결합루우프가 발생할 우려가 없는 경우라면 lead-lag 보상기와 같은 전달함수를 지닐 수도 있다. 이러한 경우에는 시스템의 제어대상에 해당하는 원모델의 특성과의 관계를 고려해서 접속요소에 해당하는 제어기의 전달함수를 결정하는 기법이 적용될 수 있을 것이며 이 점에 관해서는 앞으로 더 깊은 연구가 필요할 것으로 보인다.

단 현 시점에서 언급할 수 있는 점은 이들 요소의 삽입은 모델 안에 고유치(eigenvalue)를 추가하게 되며 기생진동(ringing)을 유발할 수 있다는 것이다. 또한 일반적으로 컨버터 회로는 스위칭에 의해 그 특성이 급격하게 변화하는 비선형 시스템의 특성을 지니기 때문에 이러한 차수의 증가는 수치해석적으로 불안정한 결과를 초래할 가능성도 있다. 그 한 예로 그림 16(a)는 그림 13에서 컨버터 출력단 전류가 불연속 모드가 되는 구간을 확대한 것으로 부적절한 값의 순 커패시터를 접속블록으로 사용할 때 전류의 영점 교차 이후에 큰 기생진동이 수반됨을 보여주고 있다. 이 현상은 순 커패시터에 해당하는 순수 적분기 대신 병렬 R-C회로에 해당하는 1차 지연 전달함수 접속블록을 사용, 적절한 병렬저항값을 통해 그림 16(b)와 같이 억제될 수 있으며 이는 회로 내에 접속요소들로 인해 발생하는 진동현상을 감쇄저항을 통해 억제한 것으로 생각할 수 있다. 한편 직렬인덕터 접속블록의 경우에는 직렬 감쇄저항을 사용하게 된다.

감쇄저항값은 시스템의 동특성에 영향을 미치지 않을 정도로 크면서 기생진동을 감쇄시킬 수 있을 만큼은 작아야 하는데 그 값의 대략적인 선정방법은 접속블록의 커패시터(혹은 인덕터)와 감쇄저항에 의한 시정수가 시뮬레이션상에서 관측의 대상이 되는 시간 구간의 최소치보다 충분히 작도록(예컨대 100분의 1 정도) 설정한다. 그러나 시정수가 지나치게 짧

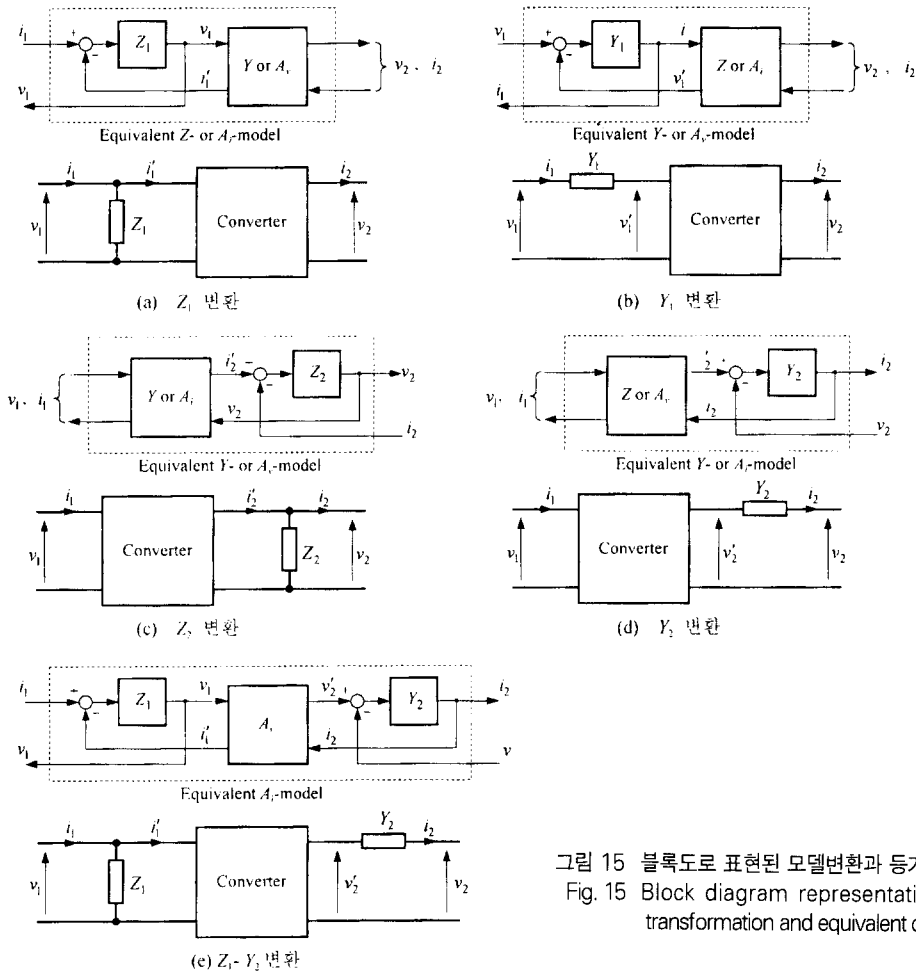


그림 15 블록도로 표현된 모델변환과 등가회로  
 Fig. 15 Block diagram representation of model transformation and equivalent circuit

은 경우에는 시뮬레이션 도구에서 사용하는 적분방식이나 적분구간의 최소길이, 그리고 오차한계 설정 등과 같은 수치해석적 제반 인수들의 영향을 받을 수 있으므로 이들과의 상호관계를 고려한 경험적인 측면이 다소 요구된다.

### 7. 결론

본 논문에서는 시뮬레이션 전용 언어를 통해 전력전자회로의 시뮬레이션을 행하기 위한 회로 모형화의 체계적인 접근방식을 제시하였다. 회로 내의 요소들을 교차임피던스형, 교차 어드미턴스형, 전압증폭형 및 전류증폭형의 네가지 형태로 나타낼 수 있음을 보이고 병렬요소와 직렬요소들에 대한 일반 모델을 도출한 다음 이들을 조립하여 일반적인 컨버터시스템의 모델을 개발하는 방법을 제안하였다. 그 과정에서 모델간의 입출력 조건을 만족하면서 대수적 순환루우프의 발생의 방지라는 두가지 제약조건을 동시에 만족시키기 위해서는 일반적으로 모델간의 원활한 접속을 위한 가상블록의

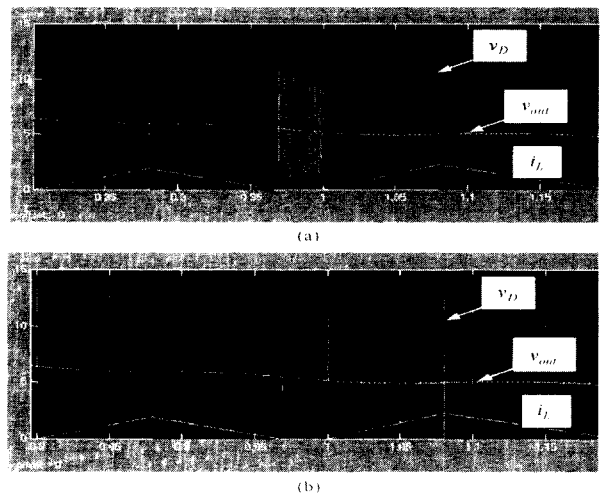


그림 16 접속요소로 인한 수치해석적 불안정성의 억제  
 Fig. 16 Damping of numerical instability due to interfaing component

도입이 불가피함을 보였다. 제시된 방법을 간단한 체강형 컨버터 회로를 대상으로 대표적인 시스템수준 시뮬레이션 도구 중의 하나인 MATLAB/SIMULINK로 구현한 예를 보였다. 그리고 가상블록의 도입을 일반적인 모델간 변환의 개념으로 확장하여 설명하였으며 이를 통해 컨버터 회로의 시뮬레이션 모델을 독립형 모듈의 라이브러리로 구축할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 단순 사다리형 회로로 치환될 수 있는 간단한 회로 구조를 대상으로 하였으나 실제의 전력전자회로는 브릿지회로와 같은 다수의 분기점을 갖는 회로가 대다수이기 때문에 현 단계에서 단순 직렬모델, 병렬모델간의 조합으로 나타낸 본 연구의 결과를 그대로 적용하기에는 많은 제약이 있다. 단 본 논문이 의도하는 바는 전력 스위치를 포함하는 회로의 시뮬레이션 모델을 구축하는 데에 있어서 기본적인 개념을 제시하고자 하는 데에 있으며 이를 바탕으로 보다 일반화된 모델 구축의 방법론을 수립하기 위한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

본 논문은 광운대학교 학술연구비 지원으로 이루어졌음.

### 참고 문헌

- [1] C. Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice-Hall, 1998.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics—Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, 1995.
- [3] R. Kielkowski, *Inside SPICE—Overcoming the Obstacles of Circuit Simulation*, McGraw-Hill,

1994.

- [4] H. H. Rashid, *SPICE for Power Electronics and Electric Power*, Prentice-Hall, 1993.
- [5] *Using Simulink*, The Math Works, 1990.
- [6] F. Flinders, S. Senini and W. Oghanna, "Mixed electrical and mechanical simulations using dynamic systems analysis packages," *Proc. of the IEEE-ASME Joint Railroad Conf.*, Pittsburgh, pp. 87-93, April, 1993.
- [7] S. Wade, M. W. Dunnigan and B. W. Williams, "Modeling and simulation of induction machine vector control with rotor resistance identification," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 495-506, May 1997.

### 〈 저 자 소 개 〉



#### 정승기(鄭勝基)

1982년 서울대학교 전기공학부를 졸업하고 동 대학원에서 1984년과 1988년에 각각 공학석사 및 공학박사학위를 취득하였음. 1987년 이후 광운대학교에 재직, 현재 전기공학과 부교수. 1994년 미국 Texas A&M 대학교 방문연구. 현재 당

학회 편집위원.