

전자기 과도현상 해석을 위한 S 영역 등가시스템 PART II : 주파수 의존 교류 시스템 등가

왕용필*, 이현정*, 정형환*, 안병철**, 김해재***
*동아대학교, **부산울산중소기업청, ***마산대학

S-Domain Equivalent System for Electromagnetic Transient Studies PART II : Frequency Dependent Network Equivalent

Yong-P Wang*, Hyun-J, Lee*, Hyeng-H Chong*, Byung-C An**, Hae-J Kim***
*Dong-A University, **Busan-Ulsan Small & Medium Business Administration, ***Ma-San College

Abstract - Modern power systems are very complex and to model them completely is impractical for electromagnetic transient studies. Therefore areas outside the immediate area of interest must be represented by some form of frequency dependent equivalent. This paper presents the formulation for developing 1 & 2 port Frequency Dependent Network Equivalent (FDNE) with the instantaneous term in S-domain and illustrates its use. This 1 & 2 port FDNE have been applied to the CIGRE Benchmark Rectifier test AC system. The electromagnetic transient package PSCAD /EMTDC is used to assess the transient response of the 1 & 2 port (FDNE) developed with Norton Equivalent network.

1. 서론

전력시스템 전자기 과도현상은 시간 영역에서 정확하고 효과적으로 해석되어야 한다. 그러나 대규모 전력시스템을 상세하게 표현하기 위해서는 엄청난 계산량이 필요하다. 그러므로 전력시스템 과도현상을 해석하기 위하여 전력시스템의 작은 부분은 상세하게 표현하고, 나머지 부분은 효과적인 등가 회로망으로 표현하는 방법이 필요하다. 종래의 등가방법은 상용 주파수 단락회로를 기초로 하였으나, 다른 주파수 성분이 존재하는 경우에는 외부 회로망의 과도현상을 해석하기에는 부적절하였다. 본 논문에서는 전력시스템 전자기 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석하기 위하여 모델완성에서 과거항과 순간항을 모두 포함한 노턴 등가(Norton Equivalent) 회로로 표현한 S 영역 1 & 2 포트 주파수 의존 등가 회로망을 개발하였다. 개발한 1 & 2 포트의 주파수 의존 등가 회로망의 우수성을 입증하기 위하여 CIGRE Benchmark rectifier AC 테스트 시스템에 적용하여 전자기과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 과도현상을 비교·검토하였다. 또한 1 포트 FDNE를 CIGRE 시스템과 Hingonani 등가회로 방법과 비교·검토하였다. 이상의 결과 개발한 S 영역 1 포트 주파수 의존 등가회로망은 전자기 과도 현상 해석시 강인성과 정확성을 가짐을 확인하였다.

2. S 영역 주파수 의존 회로망 등가

2.1 테브랑 주파수 의존 등가

S 영역에서 주파수 의존 등가 회로망을 개발하기 위하여 다음과 같은 과정이 필요하다. 첫째, 시간영역 혹은 주파수 영역에서 시스템 응답을 주파수 의존 임피던스나 어드미턴스로 나타낸다. 둘째, 주파수 영역 동정(Frequency Domain Identification)을 사용하여 시스템 파라미터를 S 영역에서 유리함수적합(Rational Function Fitting)을 한다. 셋째, 과도현상 시뮬레이

션 프로그램에서 노턴 등가(Norton Equivalent)회로로 표현된 주파수 의존 등가 회로를 완성한다.

과도현상을 해석하기 위하여 대상시스템은 경계모션을 통해 해석시스템(Study System)과 외부시스템(External System)으로 연결되어 있다. 따라서 외부시스템의 주파수 의존 등가회로는 이 경계모션에서 구동점(Driving Point) 전달 어드미턴스(Transfer Admittance) 함수로 나타내어야 한다. 또한 이 외부시스템은 주파수 영역이 0-1250[Hz]에서의 주파수 의존 등가회로로 구성하여야 정확한 과도현상을 해석할 수 있다.

주파수 영역 동정에서 어드미턴스를 구성하기 위하여 시간 영역에서 단지 모션에 전류나 전압을 입력으로 사용한다. 여기서 전압 입력으로 한 경우는 출력이 전류이므로 어드미턴스로 나타내어진다.

2. 2. 모델 적합

주파수 영역 응답을 등가 회로망으로 구성하기 위하여 곡선 적합(Curve Fitting)을 이용하여 유리함수(Rational Function)로 구성한다. 현재 유리함수 적합 방법은 S 영역과 Z 영역에서 구성할 수 있다. S 영역 유리함수 적합은 적합된 계수가 시간 영역 해석시 시간 스텝에 의존하지 않는 장점을 가지고 있다. 그러나 Z 영역 유리함수 적합은 적합된 계수가 시간 영역 해석시 시간 스텝에 따라 다시 유리함수 적합을 시행해야 하는 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 주파수 영역 응답을 S 영역 유리함수로 적합하기 위하여 식(1)과 같은 함수를 이용한다.

$$H(s) = \frac{a_0 + a_1s^{-1} + a_2s^{-2} + \dots + a_ns^{-n}}{b_0 + b_1s^{-1} + b_2s^{-2} + \dots + b_ns^{-n}} \quad (1)$$

2. 3. 모델 완성

최소 제곱 적합 과정에서 S 영역 유리함수를 구성하고, 이것을 이용하여 S 영역 주파수 의존 등가 회로를 완성한다. 모델 적합에서는 어드미턴스 유리함수는 노턴 등가회로로 구성할 수 있다.

먼저 식(1)을 이용하여 식(2), 식(3)과 같이 상태 변수로 형태로 일반화 할 수 있다.

$$X(t) = X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}(X(t) + X(t-\Delta t)) \quad (2)$$

$$= X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}(AX(t) + BU(t) + AX(t-\Delta t) + BU(t-\Delta t))$$

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)X(t) = \left(I + \frac{\Delta t}{2}A\right)X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}B(U(t) + U(t-\Delta t)) \quad (3)$$

식(3)에서 $X(t)$ 을 입력항과 출력항으로 다시 나타내면 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$X(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right) X(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B(U(t) + U(t - \Delta t)) \quad (4)$$

식(4)와 출력식을 이용하면 입력에 대한 출력을 식(5)과 같이 얻을 수 있다.

$$y(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right) x_1(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B(u(t) + u(t - \Delta t)) + \beta u(t) \quad (5)$$

식(5)는 현재 PSCAD/EMTDC에서 전자기 과도현상을 해석시 사용되는 방법이다. 그러나 식(5)는 과거항(History Term)과 순간항(Instantaneous Term)을 구분하지 않고 있다. 따라서 본 논문에서 식(5)를 과거항과 순간항을 구분한 식(6)을 사용하여 전류원(Current Source) $I_{History}$ 와 콘덕턴스(Conductances)를 가지는 노턴 등가회로를 개발하였다.

$$y(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right) x_1(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t) + \beta u(t) \quad (6)$$

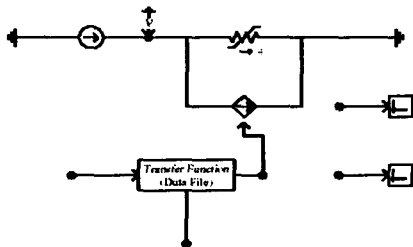
$= Y_{Equivalent} + I_{History}$ (노턴 등가회로)

여기서

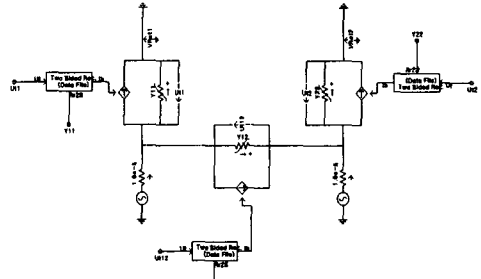
$$Y_{Equivalent} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t) + \beta u(t)$$

$$I_{History} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right) x_1(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t - \Delta t)$$

이상에서 PSCAD/EMTDC에서 Recursive Two Side Component를 완성하여 노턴 등가회로망으로 구성된 S 영역 1 & 2 포트 주파수 의존 네트워크 등가(FDNE) 회로를 개발하였다. 그림 1은 개발한 Recursive Two Side Component을 이용하여 PSCAD/EMTDC에서 S 영역 1 & 2 포트 FDNE를 나타내었다.



(a) 1 포트 등가회로



(b) 2 포트 등가회로

그림 1 Recursive two side component 이용한 1 & 2 포트 주파수 의존 등가 회로

3. 사례연구

S 영역에서 과거항과 순간항을 포함한 테브랑 및 노턴 주파수 의존 등가 회로망(FDNE)을 개발하여 그 우수성을 입증하고자 그림 2와 같은 CIGRE Benchmark rectifier AC 시스템을 사용하였다[5]. 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 1 & 2 포트 FDNE의 과도현상을 CIGRE 시스템과 Hingorani 등가회로와 비교·고찰하였다.

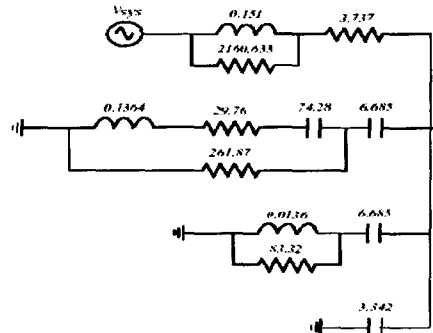
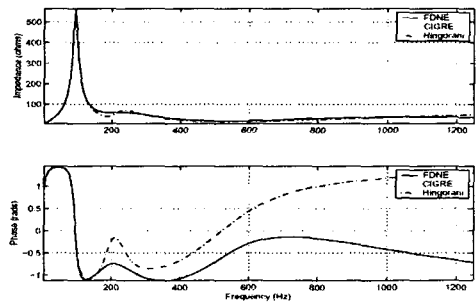
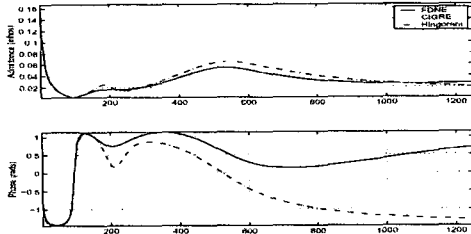


그림 2. CIGRE Benchmark rectifier AC 테스트 시스템.

시간 영역 시뮬레이션에서 외부 시스템의 전압파형 혹은 전류파형을 구하고, 이 파형을 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 응답을 구할 수 있다. 그림 3는 FDNE, CIGRE 및 Hingonai 등가회로의 임피던스와 어드미턴스의 주파수 영역 응답을 나타내었다. 또한 그림 4는 FDNE, CIGRE 및 Hingonai 등가회로의 임피던스와 어드미턴스의 궤적(Loci)을 나타내었다.

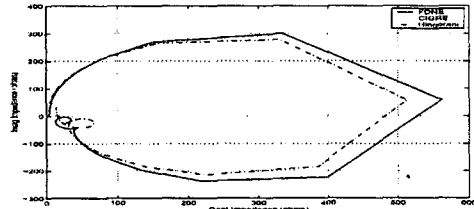


(a) Impedance

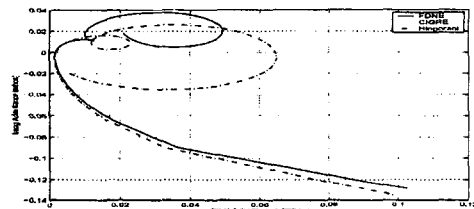


(b) Admittance

그림 3. 임피던스 및 어드미턴스의 주파수 응답



(a) Impedance



(b) Admittance

그림 4. 임피던스 및 어드미턴스의 궤적

그림 5와 6은 CIGRE Benchmark rectifier AC 테스트 시스템에서 기존의 Hingorani 등가회로와 개발한 2 포트 노턴 FDNE의 전압을 비교·고찰하였다. 개발한 2 포트 노턴 FDNE는 최소 제곱 적합(LSF)을 이용하여 6차 S 영역 유리함수를 구성하였다. 또한 PSCAD/EMTDC에서 이 유리함수를 이용하여 FDNE를 완성하고, 시간영역 정상상태 및 과도현상 시뮬레이션 결과 상당히 우수한 특성을 나타내고 있다. 또한 개발한 FDNE는 정상상태 오차가 적고, 과도응답 특성도 매우 정확함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 LSF를 이용하여 S 영역 유리함수의 구성은 매우 우수함을 알 수 있고, 개발한 2 포트 FDNE는 매우 정확하고, 강인성을 가짐을 보이고 있다.

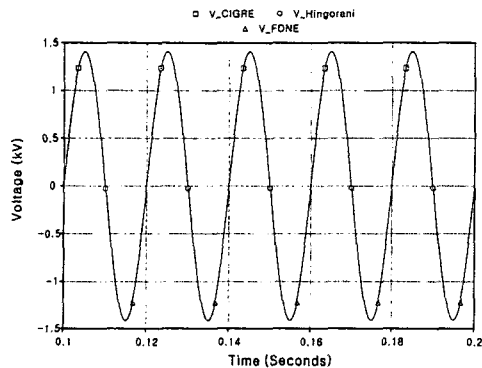


그림 5 정상응답 비교

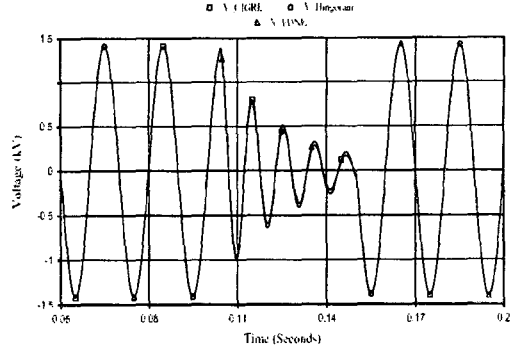


그림 6 과도응답 비교

4. 결론

본 논문에서는 전자기 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석하기 위해 주파수 응답의 S 영역 유리함수적합(S Domain Rational Function Fitting)을 이용하여 과거항과 순간항을 포함한 1 & 2 포트(1 & 2-port) 노턴 주파수 의존 네트워크 등가 시스템(Frequency Dependent Network Equivalent: FDNE)을 개발하였고, 개발한 FDNE의 유용성을 입증하기 위하여 CIGRE Benchmark rectifier AC 시스템에 적용하였다. 그리고 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 CIGRE Benchmark rectifier AC 시스템과 개발한 FDNE를 비교·검토하였다. 이상에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 주파수 응답을 최소 제곱 적합을 이용하여 S 영역 유리함수 구성 방법은 매우 정확하였다.
2. 과도항과 순간항을 포함한 S 영역에서 등가 시스템 모델은 구성이 용이하고 구성 오차를 포함하지 않는다.
3. 개발한 S 영역 1 & 2 포트 노턴 FDNE는 전자기 과도현상 프로그램에 쉽게 적용할 수 있다.
4. 개발한 S 영역 1 & 2 포트 노턴 FDNE는 강인성과 우수성을 가지고 있어, 전력시스템 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Do V.Q. and Gavrilovic M.M., "A Synthesis method for One Port and Multi-Port Equivalent Networks for Analysis of Power System Transients", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-1, No. 2, April 1986, pp 103-111
- [2] Medina A., Arrillaga J. and Watson N.R., "Derivation of Multi-Harmonic Equivalent Models of Power Networks", *Proceedings of the 1990 International Conference on Harmonics in Power Systems*, Budapest, Hungary, 4-6 Oct, 1990
- [3] Todd S., Wood A.R., Bodger P.S. and Smith B.C., "Rational functions as frequency dependent equivalents for transient studies", *Proceedings of the 1997 International Conference on Power Systems Transients*, pp 137-144, June 1997, Seattle, USA
- [4] Wang Y. P. and Watson N. R., "Z domain frequency-dependent AC-system equivalent for electromagnetic transient simulation", *IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, 2003.
- [5] M. Szechtman, T. Weiss and C. V. Thio, "First benchmark model for HVdc control studies", *Electra*, No. 135, April 1991, pp 55-75