

**전자기 과도현상 시뮬레이션을 위한 주파수 의존 등가 시스템 개발**

한형주\*, 이철영\*, 왕용필\*, 정형환\*, 김상효\*, 안병철\*\*, 김해재\*\*\*  
 \*동아대학교, \*\*부산울산중소기업청, \*\*\*마산대학

**Frequency Dependent Equivalent System for Electromagnetic Transient Simulation**

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

**Abstract** - This paper presents the formulation for developing 2 port Frequency Dependent AC System Equivalent(FDACSE) with the instantaneous term in S-domain and illustrates its use. This 2 port FDNE have been applied to the New Zealand AC system. The electromagnetic transient package PSCAD/EMTDC is used to assess the transient response of the 2 port (FDACSE) developed with Norton Equivalent network.

The study results have indicated the robustness and accuracy of 2 port FDACSE for electromagnetic transient studies.

**1. 서 론**

주파수 의존 등가 시스템 모델링 기초는 시간 영역과 주파수 영역에서 관계를 가지고 있다. 따라서 과도현상 해석시 주파수 응답이 정확하게 해석된다면 정확한 시간 영역에서의 해석이 될 것이다. 그러므로 과도현상을 해석하기 위하여 해석 하고자하는 주파수 영역에서 외부 회로망을 정확하게 표현할 필요가 있다. 시간 영역에서 정확하고 효과적인 과도현상 해석을 위하여 주파수 영역에서 주파수 특성을 반영하는 주파수 의존 등가 회로망(Frequency Dependent Network Equivalent: FDNE)이 필요 하다[1-2].

본 논문에서는 전력시스템 전자기 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석하기 위하여 모델완성에서 과거항과 순간항을 모두 포함한 노턴 등가(Norton Equivalent) 회로로 표현한 S 영역 2 포트 주파수 의존 교류 시스템 등가(Frequency Dependent AC System Equivalent: FDACSE)를 개발하였다. 개발한 2 포트의 FDACSE의 우수성을 입증하기 위하여 전자기과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 적용하여 다양한 부하조건(선형 부하, 비선형 부하, 고장)에서 AC 테스트 시스템의 과도현상을 비교 검토하였다. 이상의 결과 개발한 S 영역 2 포트 FDACSE은 전자기 과도현상 해석시 강인성과 정확성을 가짐을 확인하였다.

**2. S 영역 주파수 의존 회로망 등가**

**2.1 주파수 영역 동정**

전력시스템의 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)한다. 셋째, 과도현상 시뮬레이션 프로그램에서 노턴 등가(Norton Equivalent)회로 표현인 주파수 의존 등가 회로를 완성한다.

**2.2 모델 적합**

주파수 영역 응답을 등가 회로망으로 구성하기 위하여 곡선 적합(Curve Fitting)을 이용하여 유리함수(Rational Function)로 구성한다. 현재 유리함수 적합방법은 S 영역과 Z 영역에서 구성할 수 있다[3]. 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 시행해야하는 단점을 가지고 있다.

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

$$H(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 \dots + a_ns^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 + \dots + b_ms^m} \quad (1)$$

**2.3 모델 완성**

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

먼저 식(1)을 이용하여 치환하면 식(2), 식(3)와 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)은 현재 PSCAD/EMTDC에서 전자기 과도현상을 해석시 사용되는 방법이다. 그러나 식(3)은 과거항(History Term)과 순간항(Instantaneous Term)을 구분하지 않고 있어 모델 완성에 따른 오차를 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서 과거항과 순간항을 구분한 식(4)를 사용하였다.

$$y(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right) x_1(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t) + \beta u(t) \quad (4)$$

식 (4)에서 전압원 (Voltage Source) VHistory 와 레지스턴스(Resistance)를 가지는 테브랑 등가회로 및 전류원(Current Source) IHistory와 콘덕턴스

(Conductances)를 가지는 노턴 등가회로를 식(5), 식(6)과 같이 개발하였다.

$$Y_{Equivalent} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} Bu(t) + \beta u(t) \quad (5)$$

$$I_{History} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A\right) x_1(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} Bu(t - \Delta t) \quad (6)$$

이상에서 PSCAD/EMTDC에서 Recursive Two Side Component를 완성하여 노턴 등가회로망으로 구성된 S 영역 2 포트 주파수 의존 교류 시스템 등가(FDACSE)를 개발하였다. 그림 1은 개발한 Recursive Two Side Component를 이용하여 PSCAD/EMTDC에서 S 영역 2 포트 FDACSE를 나타내었다.

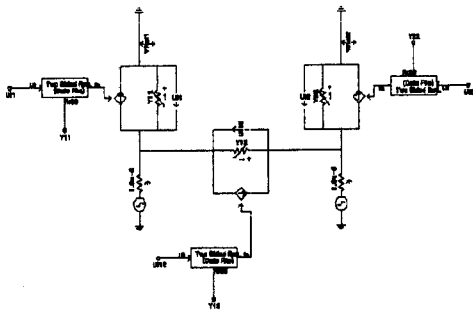


그림 1. Recursive two side component 이용한 2포트 주파수 의존 등가 회로

### 3. 사례 연구

S 영역에서 과거항과 순간항을 포함한 노턴 주파수 의존 교류시스템 등가(FDACSE)를 개발하여 그 우수성을 입증하고자 그림 2와 같은 테스트 AC 시스템을 사용하였다[3]. 그림 2에서 Tiwai 모선과 Invercargill 모선에 정현파 전류를 입력하여 2 포트 FDACSE를 개발하였다. 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 테스트 교류 시스템과 개발한 2 포트 FDACSE을 다양한 부하조건(선형부하, 비선형부하, 고장)에서 과도현상을 비교·고찰하였다.

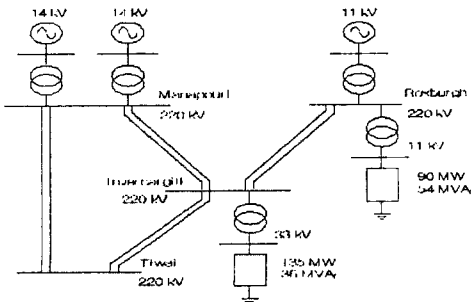


그림 2. 테스트 교류 시스템

### 3.1 주파수 영역 동정

시간 영역 시뮬레이션에서 외부 시스템의 전압파형 혹은 전류파형을 구하고, 이 파형을 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 응답을 구할 수 있다. 따라서 각 주파수 지점에서 자기 및 상호 임피던스를 구할 수 있다. 그러므로 2 포트 주파수 의존 교류 시스템 등가는 2X2의 임피던스 혹은 어드미턴스 행렬로 나타내어진다. 그림 3은 FDACSE의 임피던스, 어드미턴스의 주파수 응답 및 궤적(Loci)을 나타내었다.

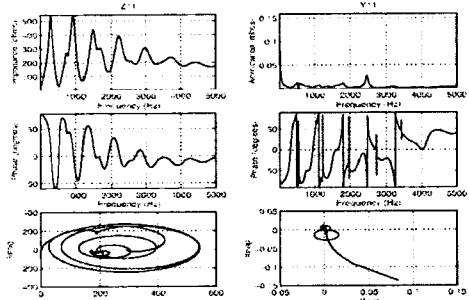


그림 3. 임피던스 및 어드미턴스의 주파수 응답 및 궤적 (Z11, Y11)

### 3.2 모델 적합

이상의 주파수 영역 응답을 주파수 의존 교류 등가 시스템을 구성하기 위하여 곡선 적합을 이용하여 유리함수 계수를 선택하여야 한다. 유리함수 계수를 선택함에 있어서 그림 4의 유리함수 차수에 따른 시스템 안정도 (System stability), 최대 절대치 오차(Maximum absolute error), 실효값 오차(Root mean squares error) 및 기본 주파수 오차(Fundamental frequency error)를 고려하였다. 이상의 4가지 항목의 결과를 검토하여 주파수 의존 교류 등가 시스템을 개발하기 위하여 2 포트 시스템의 각각의 유리함수 차수를 10으로 선택하였고, 표 1과 같은 유리함수 계수를 선정하였다. 이상의 10차 유리함수를 이용하여 과거항과 순간항을 포함한 주파수 의존 교류 등가시스템을 개발하였다.

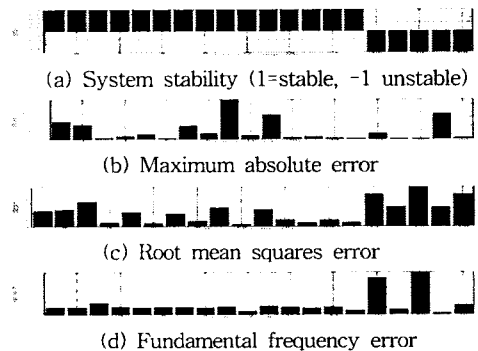


그림 4. Y11의 주파수 영역 동정 지수

표. 1. Y11의 유리함수 계수

Order	a	b
0	2.7411320e-003	1.0000000e+000
1	-1.7234925e-002	-5.8510825e+000
2	5.4313446e-002	1.7096834e+001
3	-1.1181432e-001	-3.2517647e+001
4	1.6565653e-001	4.4288763e+001
5	-1.8404156e-001	-4.4918630e+001
6	1.5511665e-001	3.4181644e+001
7	-9.8018829e-002	-1.9163915e+001
8	4.4581193e-002	7.5173806e+000
9	-1.3260309e-002	-1.8368353e+000
10	1.9824575e-003	2.0367384e-001

### 3.3 과도응답 특성

S 영역에서 과거항과 순간항을 포함한 노턴 주파수 의존 교류시스템 등가(FDACSE)를 개발하여 그 우수성을 입증하고자 그림 2와 같은 테스트 AC 시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 하였다. 여기서 개발한 2 포트 FDACSE를 PSCAD상에 전문가 툴을 이용하여 개발한 것이며, 항상 사용할 수 있도록 라이브러리화 하였다. 또한 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 테스트 교류 시스템과 개발한 2 포트 FDACSE를 다양한 부하조건(선형부하, 비선형부하, 고장)에서 과도현상을 비교·고찰하였다.

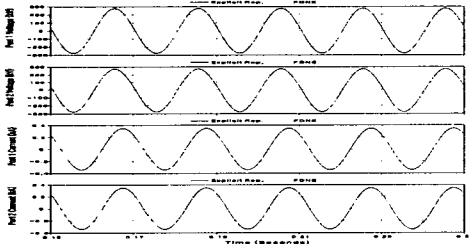


그림 5. 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(선형 부하)

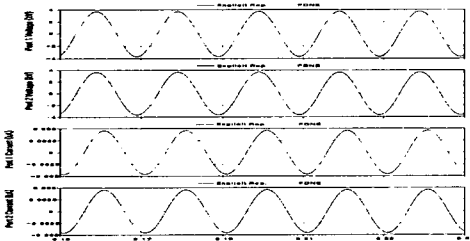


그림 6. 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(비선형 부하)

그림 5, 6 및 7은 Tiwai 모선에서 다양한 부하조건(선형부하, 비선형부하, 고장)을 가정하여 테스트 교류 시스템과 개발한 2 포트 FDACSE를 전압을 비교·고찰하였다. 개발한 2 포트 FDACSE는 최소 제곱 적합(LSF)을 이용하여 10차 S 영역 유리함수를 구성하였다. 또한 PSCAD/EMTDC에서 이 유리함수를 이용하여 2 포트

FDACSE를 완성하고, 시간영역 과도현상 시뮬레이션 결과 상당히 우수한 특성을 나타내고 있다. 또한 개발한 FDACSE는 정상상태 오차가 적고, 과도응답 특성도 매우 정확함을 알 수 있다.

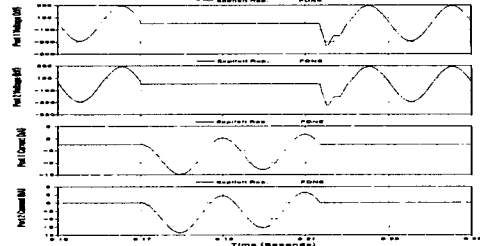


그림 7. 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(고장)

## 4. 결 론

본 논문에서는 전자기 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석하기 위해 주파수 응답의 S 영역 유리함수적합(S Domain Rational Function Fitting)을 이용하여 과거항과 순간항을 포함한 2 포트(2-port) 노턴 주파수 의존 교류 시스템 등가(Frequency Dependent AC System Equivalent: FDACSE)를 개발하였고, 개발한 FDACSE의 유용성을 입증하기 위하여 테스트 AC 시스템에 적용하였다. 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 2 포트 노턴 FDACSE는 전자기 과도현상 프로그램에 쉽게 적용할 수 있다.
4. 개발한 S 영역 2 포트 노턴 FDACSE는 강인성과 우수성을 가지고 있어, 실 전력시스템의 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석할 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Hingorani N.G. and Burberry M.F., "Simulation of AC System Impedance in HVDC System Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 5/6, May/June 1970, pp 820-828
- [2] Do V.Q. and Gavrilovic M.M., "A Synthesis method for One Port and Multi-Port Equivalent Networks for Anaysis of Power System Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 2, April 1986, pp 103-111
- [3] 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.
- [4] 왕 용필, "전자기 과도현상 해석을 위한 S 영역 등가시스템 PART I : 주파수 의존 시스템 등가", 대한전기학회 논문지, 52권, 11호, pp. 632-638, 2003