

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

論 文

54A-4-2

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

王龍泌^{*} · 鄭亨煥^{*}

(Yong-Peel Wang · Hyeng-Hwan Chung)

Abstract - Electromagnetic transient simulation can be used to model complex non-linearities that very difficult to represent adequately in the frequency domain. This problem is greatly reduced with the use of frequency dependent network equivalents for the linear part of the system. S-domain rational function fitting techniques for representing frequency dependent equivalents have been developed using Least Squares Fitting(LSF). However it does not suffer the implementation error that existed in this work as it ignored the instantaneous term. 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.

Key Words : Electromagnetic Transient Studies, Least Squares Fitting(LSF), S-Domain Equivalent System, Frequency Dependent AC System Equivalent(FDACSE),

1. 서 론

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.

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 해석하고자 하는 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 필요하다[1-2].

모든 주파수 영역에서 등가 회로망을 개발하기 위하여 최

소제곱적합(Least Square Fitting)을 이용한 S 및 Z 영역 유리함수 계수(Rational Function Coefficient)를 추정하는 연구가 이루어지고 있다[3-8]. S 영역 유리함수 적합은 시간영역 해석시 시간 스텝(Time Step)의 변화에 의존하지 않는 반면, Z 영역 유리함수 적합은 시간영역 해석시 시간 스텝의 변화에 따라 유리함수 적합을 다시 실행하여야 하는 단점을 가지고 있다. S 영역 유리함수 적합을 이용한 주파수 의존 등가 회로망을 구성하여 정확한 시간영역 과도현상 해석을 위하여 과거항(History Term) 및 순간항(Instantaneous Term)을 고려한 모델 완성(Model Implementation)이 이루어져야 한다. 그러나 현재 개발된 주파수 의존 등가회로망은 과거항만을 고려한 모델 완성으로 이루어져 있다. 따라서 이 주파수 의존 등가 회로망은 시간영역 전자기 과도현상 해석시 오차를 발생한다. 따라서 본 저자는 모델완성에서 과거항과 순간항을 포함한 테브랑 및 노턴등가 회로로 표현한 S 영역 1 포트 주파수 의존 등가 회로망을 개발하였다[9].

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 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 적용하여 다양한 부하조건(선형 부하, CB 고장, 비선형 부하, 고장)에서 AC 테스트 시스템의 과도현상을 비교·검토하였다. 이상의 결과 개발한 S 영역 2 포트 FDACSE은 전자기 과도 현상 해석시 강인성과 정확성을 가짐을 확인하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 東亞大 電氣工學科 招聘 教授 · 工博
E-mail : ypwang@daunet.donga.ac.kr

^{*} 正會員 : 東亞大 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 2004年 11月 8日
最終完了 : 2005年 3月 9日

2. S 영역의 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 테브랑(Thevenin Equivalent) 등가와 노턴 등가(Norton Equivalent) 회로 표현인 주파수 의존 등가 회로를 완성한다. 과도현상을 해석하기 위하여 대상시스템은 경계모선을 통해 해석시스템(Study System)과 외부시스템(External System)으로 연결되어 있다. 따라서 외부 시스템의 주파수 의존 등가회로는 이 경계모선에서 구동점(Driving Point) 전달 임피던스(Transfer Impedance)나 전달 어드미턴스(Transfer Admittance) 함수로 나타내어야 한다. 또한 이 외부 시스템은 주파수 영역이 0-5000[Hz]에서의 주파수 의존 등가회로로 구성하여야 정확한 과도현상을 해석할 수 있다. 주파수 영역 동정에서 임피던스와 어드미턴스를 구성하기 위하여 시간 영역에서 단자 모선에 전류나 전압을 입력으로 사용한다. 여기서 전류 입력으로 한 경우는 출력이 전압이므로 임피던스로 나타내어지고, 전압 입력으로 한 경우는 출력이 전압이므로 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 적합방법은 S 영역과 Z 영역에서 구성할 수 있다[8]. 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 이용한다.

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

본 논문에서는 최소 제곱 적합(Least Squares Fitting: LSE)을 이용하여 S 영역 유리함수를 구성할 수 있다. 이 LSE방법은 임의의 유리함수(Artificial Rational Function)를 적용한 결과 매우 우수한 방법임이 증명되었다. 또한 특이값 분해(Singular Value Decomposition: SVD)를 이용하면 해를 직접적으로 빠르게 구할 수 있다. 따라서 시간영역에서 시간 응답을 구하고, 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 응답을 구하고, 이 주파수 응답을 SVD를 기초로 한 LSE를 이용하여 S 영역에서 유리함수로 적합할 수 있다. 이 적합한 S 영역 유리함수의 계수(Coefficient)들은 모델 완성(Implementation of Model)에서 노턴 등가회로 풀인 S 영역 주파수 의

존 등가회로를 구성할 수 있다. 그림 1은 S 영역에서 주파수 영역 동정 및 모델적합 과정을 나타낸 것이다.

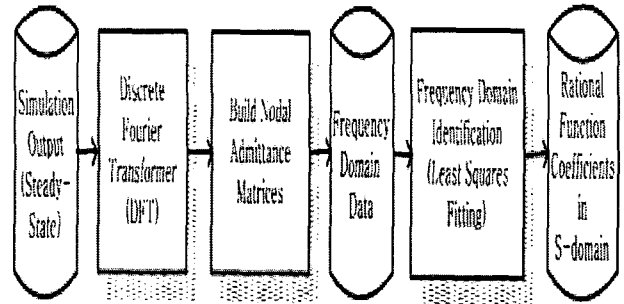


그림 1 S 영역에서 주파수 영역 동정 및 모델 적합

Fig. 1 Frequency domain identification and model fitting in S Domain.

이상에서 S 영역 n 차 유리함수 계수를 선택하여 모델 완성을 한다. 여기서 모델 완성을 하기위한 n 차 유리함수 계수를 선택하기 위하여 시스템 안정도(System stability), 최대 절대치 오차(Maximum absolute error), 실효값 오차(Root mean squares error) 및 기본 주파수 오차(Fundamental frequency error)를 고려한다.

2. 3. 모델 완성

최소 제곱 적합 과정에서 S 영역 유리함수를 구성하고, 이것을 이용하여 S 영역 주파수 의존 등가 회로망을 완성한다. 모델 적합에서는 임피던스 유리함수는 테브랑 등가회로로 구성되고, 어드미턴스 유리함수는 노턴 등가회로로 구성할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 모델 적합에서 임피던스 및 어드미턴스 유리함수로 구성할 경우 식(2)와 같은 전달함수를 이용한다.

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

상태 공간 해석법 중 Successive differentiation을 이용하여, 식(2)를 출력방정식을 벡터 행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -b_0 & -b_1 & -b_2 & \dots & -b_{n-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \end{pmatrix} u$$

$$y = (1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix} + a_n u \quad (3)$$

주어진 임피던스 및 어드미턴스 유리함수를 이상의 방법으로 상태 방정식을 구성한 후 사다리꼴(Trapezoidal) 방정식을 이용하여 모델 완성을 한다. 이 완성된 모델은 테브랑 및 노

턴 등가회로로 구성되고 PSCAD/EMTDC 이용하여 전자기 과도현상을 해석한다.

먼저 식(3)의 상태 방정식을 사다리꼴 방정식에 치환하면 식(4), 식(5)와 같이 상태 변수로 형태로 일반화 할 수 있다.

$$X(t) = X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}(X(t) + X(t-\Delta t)) \quad (4)$$

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

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)X(t) = \left(I + \frac{\Delta t}{2}A\right)X(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}B(U(t) + U(t-\Delta t)) \quad (5)$$

식(5)에서 $X(t)$ 을 입력항과 출력항으로 다시 나타내면 식(6)과 같이 쓸 수 있다.

$$X(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2}A\right)X(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2}B(U(t) + U(t-\Delta t)) \quad (6)$$

식(6)을 식(3)의 출력식을 이용하면 입력에 대한 출력을 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$y(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2}A\right)x_1(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2}B(u(t) + u(t-\Delta t)) + \beta u(t) \quad (7)$$

식(7)은 현재 PSCAD/EMTDC에서 전자기 과도현상을 해석시 사용되는 방법이다. 그러나 식(18)은 과거항(History Term)과 순간항(Instantaneous Term)을 구분하지 않고 있어 모델 완성에 따른 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서 식(7)을 과거항과 순간항을 구분한 식(8)을 사용하였다.

$$y(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2}A\right)x_1(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2}Bu(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2}Bu(t) + \beta u(t) \quad (8)$$

식(8)에서 전압원 (Voltage Source) VHistory 와 레지스턴스(Resistance)를 가지는 테브랑 등가회로 및 전류원 (Current Source) IHistory와 컨덕턴스(Conductances)를 가지는 노턴 등가회로를 식(9), 식(10)과 같이 개발하였다.

$$Y_{Equivalent} = \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2}Bu(t) + \beta u(t) \quad (9)$$

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2}A\right)x_1(t-\Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2}A\right)^{-1} \frac{\Delta t}{2}Bu(t-\Delta t) \quad (10)$$

이상에서 PSCAD/EMTDC에서 Recursive Two Side Component를 완성하여 노턴 등가회로망으로 구성한 S 영역

2 포트 주파수 의존 교류 시스템 등가(FDACSE)를 개발하였다. 그림 2는 개발한 Recursive Two Side Component를 이용하여 PSCAD/EMTDC에서 S 영역 2 포트 FDACSE를 나타내었다.

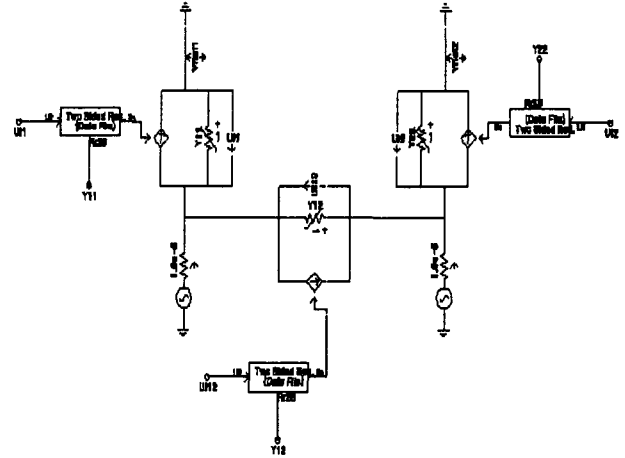


그림 2 Recursive two side component 이용한 2포트 주파수 의존 등가 회로

Fig. 2 2 port frequency dependent network equivalent using recursive two side component

3. 사례 연구

S 영역에서 과거항과 순간항을 포함한 노턴 주파수 의존 교류시스템 등가(FDACSE)를 개발하여 그 우수성을 입증하고자 그림 3과 같은 테스트 AC 시스템을 사용하였다[8]. 그림 3에서 Tiwai 모선과 Invercargill 모선에 정현파 전류를 입력하여 2 포트 FDACSE를 개발하였다. 이 개발된 2 포트 FDACSE는 발전기, 변압기, 전송선로, 부하를 모두 포함한 것이다. 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 테스트 교류 시스템과 개발한 2 포트 FDASC을 다양한 부하조건(선형부하, CB 고장, 비선형부하, 고장)에서 과도현상을 비교·고찰하였다.

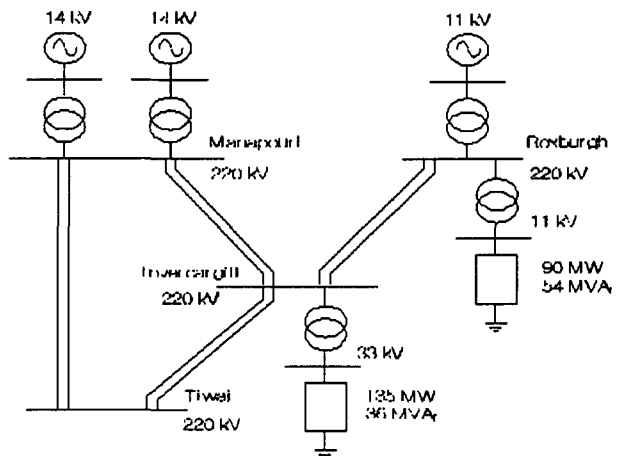


그림 3. 테스트 교류 시스템
Fig. 3. Configuration of Test AC system.

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 4, 5 및 6은 FDACSE의 임피던스, 어드미턴스의 주파수 응답 및 궤적(Loci)을 나타내었다.

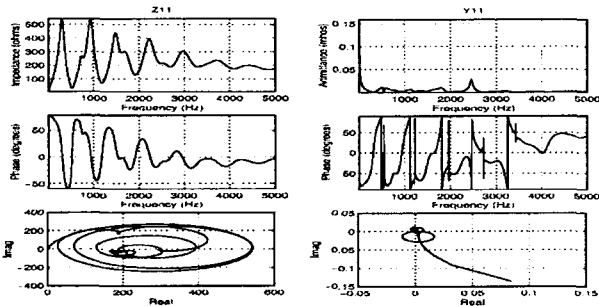


그림 4. 임피던스 및 어드미턴스의 주파수 응답 및 궤적(Z11, Y11)

Fig. 4. Frequency response and Loci of impedance and admittance(Z11, Y11)

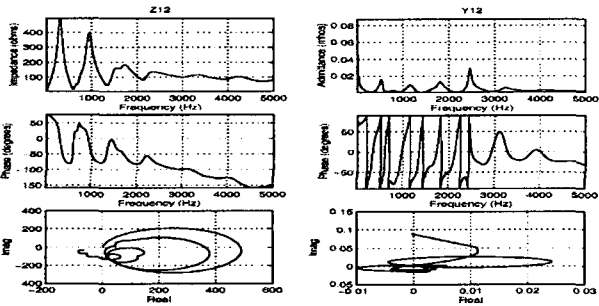


그림 5. 임피던스 및 어드미턴스의 주파수 응답 및 궤적(Z12, Y12)

Fig. 5. Frequency response and Loci of impedance and admittance(Z12, Y12)

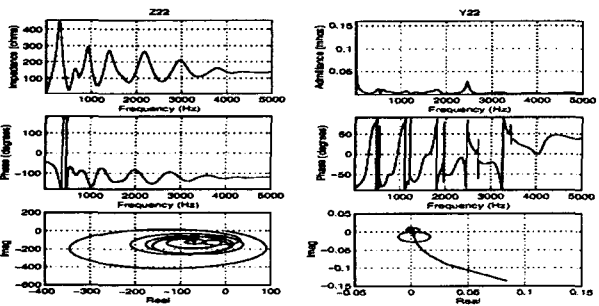


그림 6. 임피던스 및 어드미턴스의 주파수 응답 및 궤적(Z22, Y22)

Fig. 6. Frequency response and Loci of impedance and admittance(Z22, Y22)

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 7, 8 및 9의 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 1, 2 및 3과 같은 유리함수 계수를 선정하였다. 이상의 10차 유리함수를 이용하여 과거항과 순간항을 포함한 주파수 의존 교류 등가시스템을 개발하였다.

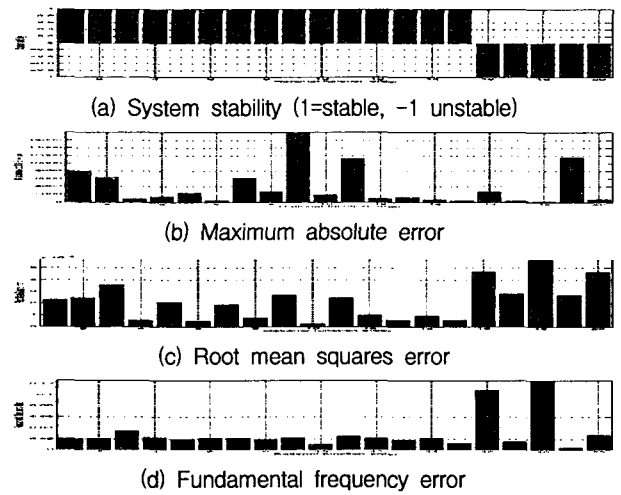


그림 7. Y11의 주파수 영역 동정 지수

Fig. 7. Indices of frequency domain identification for Y11

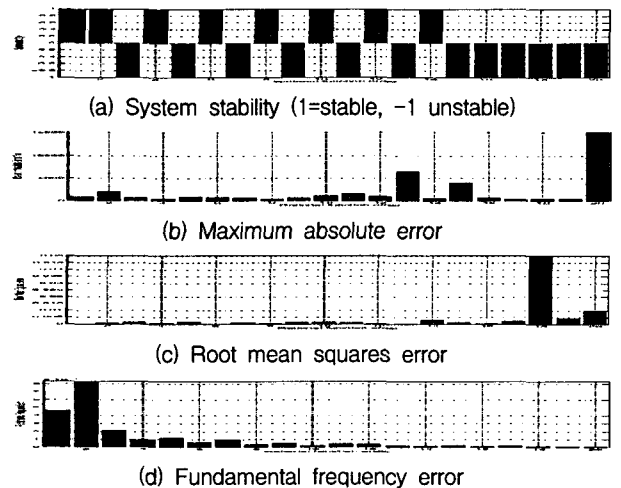


그림 8. Y12의 주파수 영역 동정 지수

Fig. 8. Indices of frequency domain identification for Y12

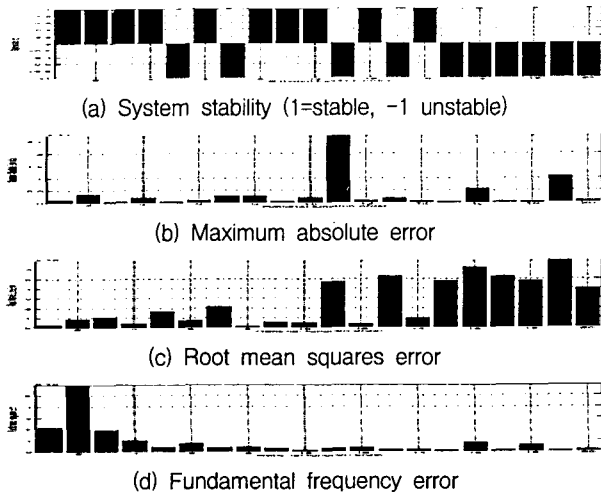


그림 9. Y22의 주파수 영역 동정 지수
Fig. 9. Indices of frequency domain identification for Y22

표 1. Y11의 유리함수 계수
Table 1. Coefficients of rational functions for Y11

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

표 2. Y12의 유리함수 계수
Table 2. Coefficients of rational functions for Y12

Order	a	b
0	1.9369412e-003	1.0000000e+000
1	-1.0144515e-002	-5.7792918e+000
2	2.6274043e-002	1.6773662e+001
3	-4.3280321e-002	-3.1856087e+001
4	4.8930902e-002	4.3580159e+001
5	-3.7816752e-002	-4.4708432e+001
6	1.7544720e-002	3.4714897e+001
7	-1.2714373e-003	-2.0090766e+001
8	-4.5682237e-003	8.2662784e+000
9	3.2558146e-003	-2.1709199e+000
10	-8.7292693e-004	2.7062609e-001

표 3. Y22의 유리함수 계수
Table 3. Coefficients of rational functions for Y22

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 3과 같은 테스트 AC 시스템을 그림 10과 같이 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 하였다. 또한 그림 11과 같이 개발한 2 포트 FDACSE를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 하였다. 여기서 개발한 2 포트 FDACSE를 PSCAD상에 전문가 틀을 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, CB 고장, 비선형부하, 고장)에서 과도현상을 비교·고찰하였다.

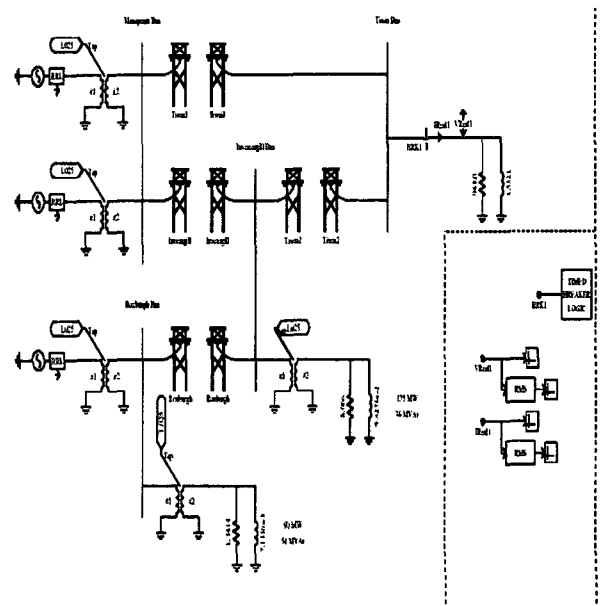


그림 10. PSCAD/EMTDC를 이용한 테스트 시스템 설계
Fig. 10 Design of test System using PSCAD/EMTDC

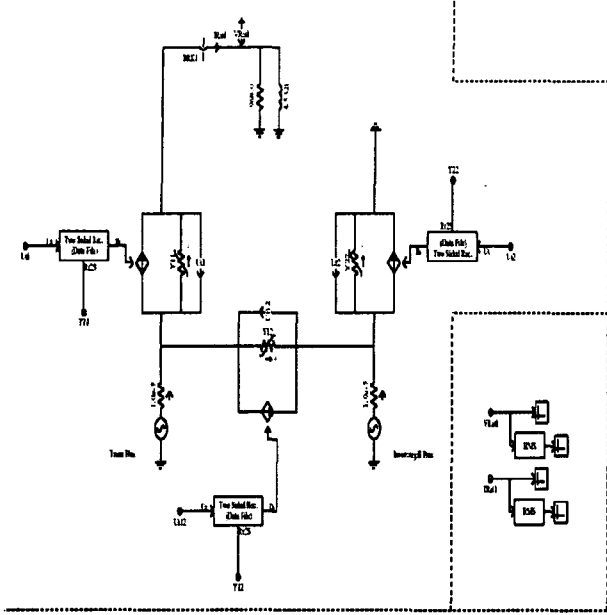


그림 11 PSCAD/EMTDC를 이용한 2 포트 주파수 의존 교류 등가 시스템
 Fig. 11. 2 port Frequency Dependent AC System Equivalent using PSCAD/EMTDC

그림 12, 13, 14 및 15는 Tiwai 모선에서 다양한 부하조건 (선형부하, CB 고장, 비선형부하, 고장)을 가정하여 테스트 교류 시스템과 개발한 2 포트 FDACSE를 전압을 비교·고찰 하였다. 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.

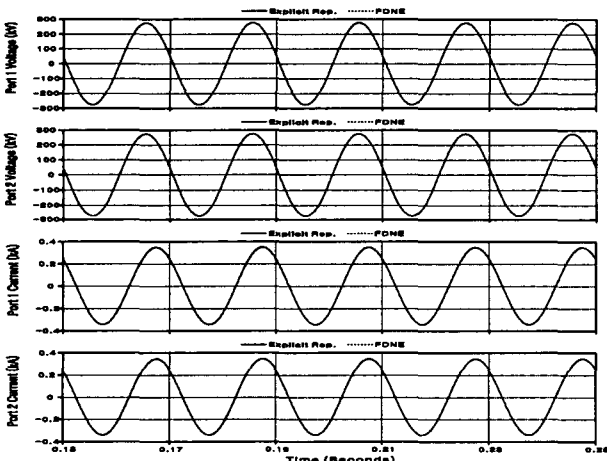


그림 12 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(선형부하)
 Fig. 12 Comparison of transient result for the explicit representation and the 2 port FDACSE with linear load

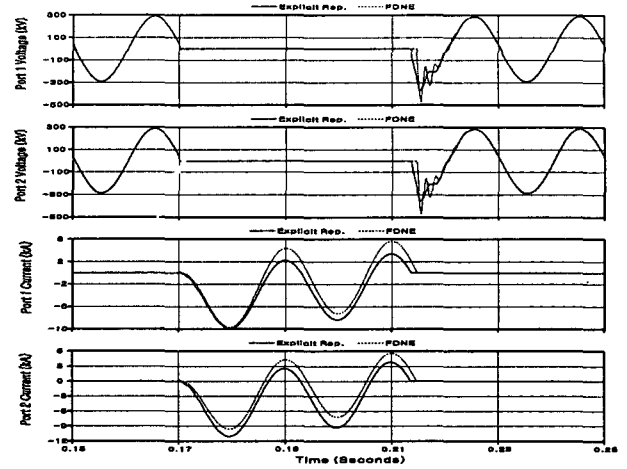


그림 13 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(CB 고장)
 Fig. 13 Comparison of transient result for the explicit representation and the 2 port FDNE with CB fault

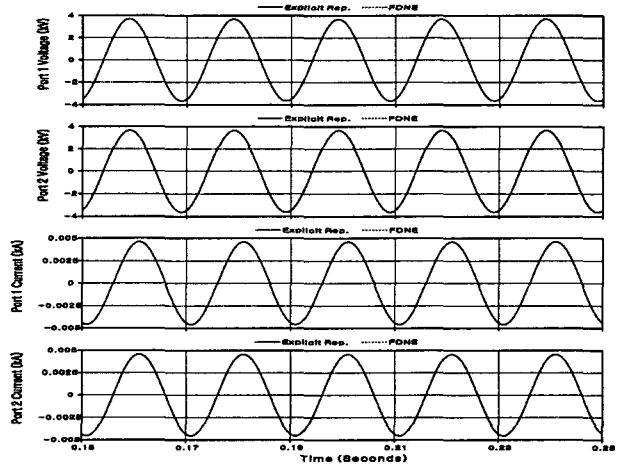


그림 14 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(비선형 부하)
 Fig. 14 Comparison of transient result for the explicit representation and the 2port FDNE with nonlinear loading

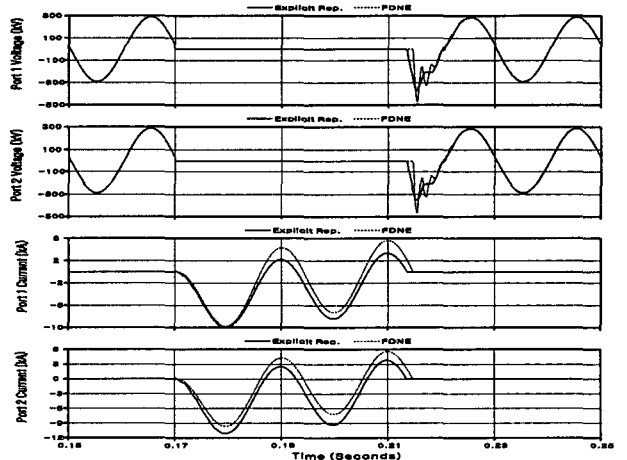


그림 15 실제시스템과 2 포트 FDACSE의 과도응답(고장)
 Fig. 15 Comparison of transient result for the explicit representation and the 2 port FDNE with fault

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. 그리고 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 테스트 AC 시스템과 개발한 FDACSE을 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 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 Burebery 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] 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

[4] Morched A.S., Ottevangers J.H. and Marti L., "Multi Port Frequency Dependent Network Equivalents for the EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp 1403-1412

[5] Nota T., Nagaoka N. abd Ametani A. "Phase-Domain Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996, pp 401-411

[6] 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

[7] Gustavsen B. and Semlyen A., "Simulation of

Transmission Line Transients Using Vector Fitting and Modal Decomposition", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998, pp 605-614

[8] 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.

[9] 왕 용필, "전자기 과도현상 해석을 위한 S 영역 등가시스템 PART I : 주파수 의존 시스템 등가", 대한전기학회논문지, 52권, 11호, pp. 632-638, 2003

저 자 소 개



왕 용 필 (王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년-2001년 뉴질랜드 Canterbury University(Post- Doc). 현재 동아대학교 전기공학과 초빙 교수. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전자기 과도현상, 전력품질(교조파, 플리커)
Tel : 051-200-6944, Fax : 051-200-7743
E-mail : ypwang@smail.donga.ac.kr



정 형 환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 관심분야 : 직류송전 시스템 해석 및 제어설계, 전자기 과도현상, 전력품질
Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743
E-mail : hhchong@daunet.donga.ac.kr