

Vector Fitting을 이용한 주파수 의존 등가시스템 모델링

왕용필*, 최선영*, 김경훈**
 동아대학교*, 이플러스이엔씨(주)**

Modeling of Frequency Dependent Network Equivalent using Vector Fitting

Yongl-Peel Wang*, Sun-Young Choi*, Kyoung-Hoon Kim**
 Dong-A University*, Eplus E&C**

Abstract - 전력시스템 전자기 과도현상은 시간 영역에서 정확하고 효과적으로 해석되어야 한다. 그러나 대규모 전력시스템을 상세하게 표현하기 위해서는 엄청난 계산량이 필요하다. 따라서 전력시스템 과도현상을 해석하기 위하여 전력시스템의 작은 부분은 상세하게 표현하고, 나머지 부분은 효과적으로 등가 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 모든 주파수 영역에서 등가 시스템을 개발하기 위하여 벡터 적합을 이용하여 S 영역 유리함수 계수를 추정하고, 과거항과 순간항을 고려한 주파수 의존 등가 시스템을 개발하였다. 개발한 FDNE의 우수성을 입증하기 위하여 테스트 시스템에 적용하여 시스템이 고장시 전자기 과도현상을 비교, 검토하였다.

1. 서 론

전력시스템에서 일어나는 전자기 과도현상은 시스템 내부 및 외부로부터의 급격한 에너지 유입이나 축전된 전자기 에너지의 분출로 인하여 전력시스템 내부에 정상상태의 경우보다 매우 급격한 전압 및 전류의 변동을 일으킨다. 이에 따라 시스템이 가진 주파수 의존성은 과전압의 크기 및 파형에 영향을 주는 원인이 될 수 있다. 따라서 시스템을 축약 표현하는 등가시스템에는 축약 시스템의 주파수 의존성이 적절히 평가·반영되어야 한다[1].

본 논문에서는 벡터 적합(Vector Fitting)을 이용하여 S 영역 유리함수를 구성하였다[2]. 이 유리함수를 이용하여 노턴 등가회로로 표현한 S 영역 주파수 의존 시스템 등가시스템을 개발하였다. 개발한 FDNE의 유용성을 입증하기 위하여 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 고장시에서 테스트 시스템의 과도현상 및 고조파 평가를 비교·검토하였다.

2. 주파수 의존 등가시스템

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 유리함수 적합(Rational Function Fitting)한다. 셋째, 과도현상 시뮬레이션 프로그램에서 노턴 등가(Norton Equivalent)회로 표현인 주파수 의존 등가 회로를 완성한다.

2.2 Vector fitting을 이용한 모델 적합

주파수 영역 응답을 등가 회로망으로 구성하기 위하여 벡터 적합(Vector Fitting)을 이용하여 유리함수(Rational Function)로 구성한다.

$$H(s) \approx \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_n s^n}{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_n s^n} \quad (1)$$

식(1)을 식(2)와 같이 유리함수를 근사화 할 수 있다.

$$H(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (2)$$

c_n : 유수(Residues), a_n : 극(Pole)

식(2)을 해석하기 위하여 벡터 적합을 이용한다. 벡터 적합은 2 단계 과정을 거쳐 극과 유수를 동정한다.

단계 1 : 극 동정

$$\begin{bmatrix} \sigma(s)H(s) \\ \sigma(s) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \\ \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\left[\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \right] \approx \left[\sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - a_n} + 1 \right] H(s) \quad (4)$$

식(4)에서는 c_n , d , h 및 \tilde{c}_n 이 선형 미지수이다. 따라서 주파수 영역에서 식(5)와 같은 과잉 선형 문제로 나타낼 수 있다.

$$A_x = b \quad (5)$$

단계 2 : 유수 동정

식(2)에서 단계 1과 같은 방법을 이용하여 유수 c_n 의 해를 얻을 수 있다.

2.3 모델 완성

모델 적합에서는 어드미턴스 유리함수는 노턴 등가회로로 구성할 수 있다. 따라서 과거항과 순간항을 구분하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

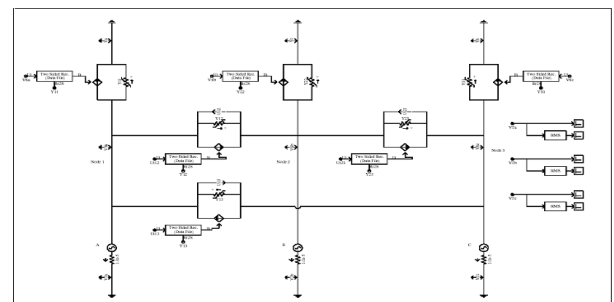
$$y(t) = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A \right) x_1(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t) + \beta u(t) \quad (6)$$

식 (6)에서 전류원 $I_{History}$ 와 콘덕턴스 $Y_{Equivalent}$ 가지는 노턴 등가회로를 식(7), 식(8)와 같이 개발하였다.

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

$$I_{History} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right)^{-1} \left(I + \frac{\Delta t}{2} A \right) x_1(t - \Delta t) + \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right)^{-1} \frac{\Delta t}{2} B u(t - \Delta t) \quad (8)$$

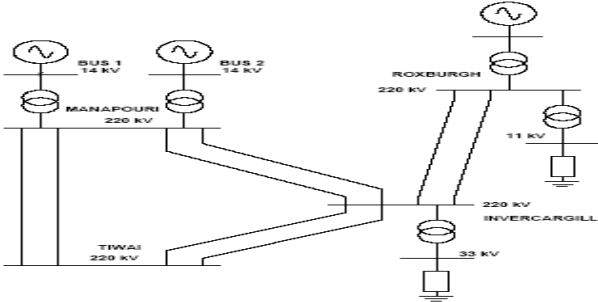
이상에서 PSCAD/EMTDC에서 노턴 등가회로망으로 구성된 S 영역 주파수 의존 시스템 등가(FDNE)를 개발하였다. 그림 1은 개발한 Recursive Two Side Component를 이용하여 PSCAD/EMTDC에서 S 영역 FDNE를 나타내었다.



<그림 1> 주파수 의존 등가회로

3. 사례 연구

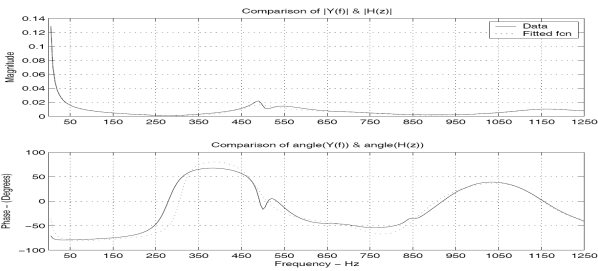
S 영역에서 과거항과 순간항을 포함한 노턴 주파수 의존 등가 시스템 개발하여 그 우수성을 입증하고자 그림 2과 같은 테스트 시스템을 사용하였다. 그림 2에서 Tiwai 모선과 Invercargill 모선에 정현과 전류를 입력하여 FDNE를 개발하였다. 이 개발된 FDNE는 발전기, 변압기, 전송선로, 부하를 모두 포함한 것이다. 전자기 과도현상 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 테스트 교류 시스템과 개발한 FDNE를 고장시에서 과도현상을 비교·고찰하였다.



〈그림 2〉 테스트 시스템

3.1 주파수 영역 동정

시간 영역 시뮬레이션에서 외부 시스템의 전압파형 혹은 전류 파형을 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 주파수 의존 교류 시스템 등가는 3X3의 어드미턴스 행렬로 나타내어진다. 그림 3은 실제 시스템과 FDNE의 주파수 응답을 나타내었다.



〈그림 3〉 주파수 응답

3.2 모델 적합

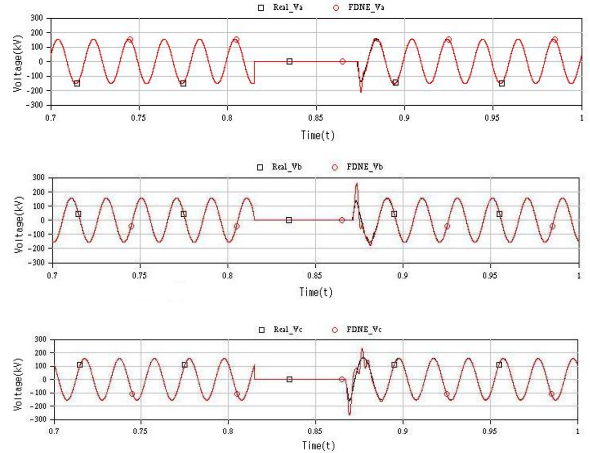
이상의 주파수 영역 응답을 주파수 의존 등가 시스템을 구성하기 위하여 벡터 적합을 이용하여 유리함수 계수를 선택하였다. 유리함수 계수를 선택함에 있어서 유리함수 차수에 따른 시스템 안정도, 최대 절대치 오차, 실효값 오차 및 기본 주파수 오차를 검토하여 주파수 의존 교류 등가 시스템을 개발하기 위하여 시스템의 각각의 유리함수 차수를 6으로 선택하였고, 표 1과 같은 유리함수 계수를 선정하였다.

〈표 1〉 Y_{self} 의 유리함수 계수

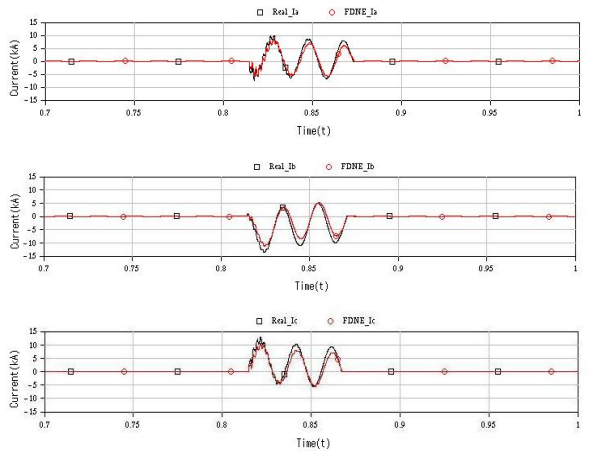
Order	a	b
0	3.0078294923663079e-03	1.0
1	-1.6867157879437031e-02	5.8699942174618052e+00
2	3.9394334773642417e-02	1.4405484110295935e+01
3	-4.9025038511999172e-02	-1.8918195083417309e+01
4	3.4265228069600508e-02	1.4022321525318672e+01
5	-1.2743659396358313e-02	-5.5620099984815141e+00
6	1.9684664251101679e-03	9.2239367111043769e-01

3.3 과도 응답 특성

개발한 FDNE를 PSCAD상에 전문가 툴을 이용하여 개발한 것이며, 항상 사용할 수 있도록 라이브러리화 하였다. 그림 4-5은 실제 시스템과 개발한 FDNE의 전압 및 전류 과도현상을 비교하였다.



〈그림 4〉 실제 시스템과 FDNE의 전압 비교



〈그림 5〉 실제 시스템과 FDNE의 전류 비교

시간영역 과도현상 시뮬레이션 결과 상당히 우수한 특성을 나타내고 있다. 또한 개발한 FDNE는 정상상태 오차가 적고, 과도 응답 특성도 매우 정확함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전자기 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석하기 위해 벡터 적합을 이용하여 주파수 응답의 S 영역 유리함수를 과거항과 순간항을 포함한 노턴 주파수 의존 등가 시스템을 개발하였다. 이상에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 주파수 응답을 벡터 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 FDNE는 강인성과 우수성을 가지고 있어, 실전력시스템의 과도현상을 정확하고 효과적으로 해석할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 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
 [2] Gustavsen B. and Semlyen A. "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting", *IEEE/PES Winter Meeting 1997*. Paper No. PE-194-PWRD-0-11-1997
 [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.