

유전알고리즘을 이용한 주파수의존 등가회로 모델개발과 전자기 과도현상 해석

(Development of Frequency Dependent Equivalent using Genetic Algorithm and it's Application for Electromagnetic Transient Analysis of Practical Power System Model)

최선영* · 박승엽**

(Sun-Young Choi · Seung-Yub Park)

Abstract

This paper deals with an methodology for acquiring optimal order of rational function model in FDNE(frequency dependent network equivalents) with GA(genetic Algorithm). In order to analyze the modern power system with huge complexity, an practical and efficient equivalent model is needed which represents the system's characteristics of transient phenomenon. this paper shows developing a z domain rational function model which have the resultant coefficient from proposed GA simulation.

To demonstrate this methodology, some simulations are performed with practical power system of NZ which applied with fault condition and nonlinear converter load.

Key Words : FDNE(Frequency Dependent Network Equivalent) GA(Genetic Algorithms), Evolution Process, ARMA , Optimal Order, Phenotype, Elecromagnetic Transient

1. 서 론

현대 전력시스템의 규모와 복잡성은 종종 전자기 과도현상을 연구하기에 너무도 방대하여 시스템의 특성을 잘 표현하는 모델을 구성하기에 많은 어려움이 있다. 이와 관련하여 다양한 EMTP 분석 모델 등이 개발 제안되고 있으며, 분석에 대한 시간 효율적

인 특징을 고려하는 여러가지 모델링 기법이 연구되고 있다.

특히 전력시스템의 안정적 설계 및 운영에 대한 요구가 증대함에 따라서 복잡한 시스템을 간단하면서도 본래의 특징을 잘 대변하는 모델 개발이 필수적이다. 이러한 등가모델은 정상상태 뿐 아니라 과도적 요소 등도 잘 표현되어야 한다. 과도현상의 특성상 급격한 상태변화는 폭넓은 대역의 주파수요소를 포함하고 있어서 주파수 의존 등가모델이 해석의 적절한 방법으로 평가되고 있다. 이러한 주파수 의존 모델의 개발에는 다양한 해석 방법이 제안되고 있다. 초기의 단순한 R,L,C모델을 기반으로 하는 단락회로에서 출발한 등가모델은 FDNE과 같이 넓은 대역의 주파수를 해석에

* Main author : Dept. of Electrical Engineering at Dong-A Univ. Assistant Professor

** Corresponding author : Dept. of Electronic Eng. at ChangWon National Univ. Professor

Tel : 051-200-0910, Fax : 051-200-7743

E-mail : drputt@dau.ac.kr

Received : 2014. 11. 19

Accepted : 2014. 12. 4

반영하는 고차의 유리전달함수로 표현되는 임피던스, 어드미턴스 모델의 적합화에 초점이 맞추어지고 있다. ARMA모델로 표현되는 해석모델이 다양한 전력계통 요소 등이 포함되는 시스템 모델링을 위해 제안되었다[1]. 또한 주파수영역에서 각 극점의 역할을 모델해석에 반영하는 벡터해석이 제안되었다[2], 최근에는 주파수 영역에서 지배적 극점요소를 우선적으로 반영하기 위하여 구간 주파수에 대한 응답의 영향력을 가중하여 모델 설계에 적용하는 해석방법에 대한 연구가 발표되고 있다[3-4]. 하지만 이와 같은 해석에 있어서 시스템의 최적 차수 모델을 선정하는 요소들은 중요하게 다루어지지 못하고 있다[4,9]. 본 논문에서는 주파수 의존 등가모델의 최적의 차수선정을 위해서 유전알고리즘을 적용한 최적차수 선정에 대한 방법 등이 제시된다. 완성 모델의 유용성을 테스트하기 위하여 전력변환 컨버터 설비가 연계된 실제 전력시스템 모델을 대상으로 다양한 상태조건의 부하를 인가하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 행하여 제안된 모델의 유용성을 입증하고자 한다.

2. 주파수 의존 등가시스템

전력시스템의 과도현상 해석을 위한 등가회로 개발에서 모델의 정의를 위해서 먼저 해석 시스템과 외부 등가 시스템으로 구분한다[5]. 두 시스템 사이는 경계 모선으로 연결된다. 해석 시스템과 외부 등가화 시스템에 대한 분리는 그림 1과 같다. 해석에 대한 경계는 다음과 같은 내용을 고려하여 설정한다. 첫째, 전력시스템의 과도 응답 시뮬레이션을 위해서는 과도현상과 밀접한 관계를 가지고 있는 시스템내부에서 해석 시스템의 영역 설정이 중요하다. 둘째, 실제 시스템에 대한 등가회로 구성 시에 오차는 존재할 수밖에 없지만, 이 오차를 최대한 줄이는 것이 이상적인 등가회로 개발이 될 것이며, 필요한 등가회로의 정확성에 따라 외부시스템의 영역을 선택적으로 설정하는 것이 필요하다.

전력시스템에서 일어나는 전자기 과도현상은 전력시스템 내부 및 외부로부터의 급격한 에너지 유입이나 축전된 전자기 에너지의 분출로부터 비롯되며, 전력시스템 내부에 정상상태의 경우보다 매우 가혹하고

급격한 전압 및 전류의 변동을 일으킨다. 이와 같은 과전압 및 과전류는 시스템 내의 송전선로나 변압기 등을 통하여 다른 부분으로 확산 전파되는데 이 과정에는 시스템이 가진 분포성, 주파수 의존성, 비선형성 등이 모두 관여하게 된다. 따라서 등가모델의 주파수 응답은 이러한 요소들의 영향이 등가회로의 중요한 파라미터로 반영되어야 한다.

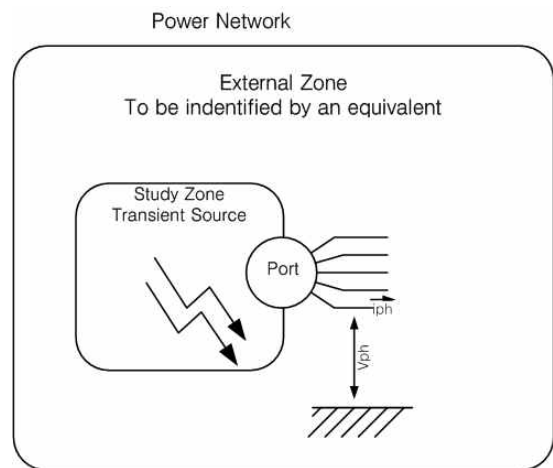


그림 1. 등가축약대상 전력시스템
Fig. 1. Power System for FDNE in Analysis

2.1 주파수영역에서의 시스템 정의

본 논문에서 연구되는 축약 대상시스템의 모델

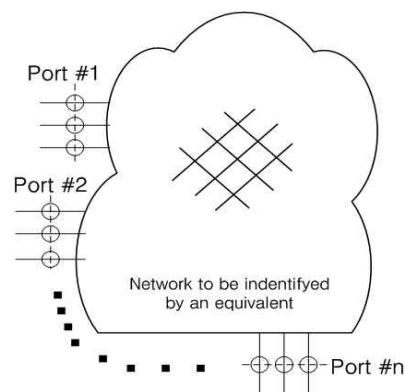


그림 2. 멀티포트의 전력시스템
Fig. 2. Power System of Multi-Port

링은 그림 2와 같은 멀티포트를 가지는 3상 시스템을 기준으로 한다. 시스템 확인을 위해 그림 3과 같이 각 포트에 전류/전압을 투입하여 응답 전압/전류 관계로부터 어드미턴스/임피던스의 전달함수를 정의한다. 정확한 해석을 위해서 투입 전원의 주파수의 범위는 과도현상의 대역 특성을 충분히 고려하여 선택되어야 하며[8], 주파수 스캔에 간격 또한 해석의 정확성과 연산의 효율성을 감안하여 결정한다.

(주파수스텝 5Hz, 주파수 스캔 범위 5~2500Hz)

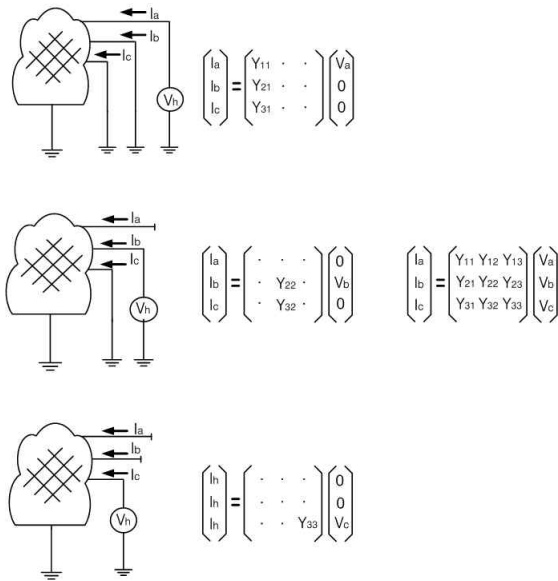


그림 3. 등가 어드미턴스 정의
Fig. 3. Equivalent Admittance Model

본 논문에서는 3상 멀티포트의 등가축약시스템에 있어서 각각의 포트에 대한 자기/상호 관계와 대칭적 구조를 고려하여 식 (1)과 같이 6개의 어드미턴스 파라미터를 결정한다.

$$Y_{ki} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix} Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{33} \quad (1)$$

각각의 어드미턴스 파라미터는 다시 아래와 같은 수식 (2), (3)의 전달함수로 표현될 수 있다.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (2)$$

$$H(j\omega) = \frac{\sum_{n=0}^N (b_n \epsilon^{-nj\omega\Delta t})}{1 + \sum_{n=1}^N (a_n \epsilon^{-nj\omega\Delta t})} \quad (3)$$

5Hz~2500Hz 스캔 주파별 응답 데이터는 각각의 자기/상호 어드미턴스 전달함수 계수설정을 위해서 실 시스템에 대한 시간응답의 결과를 DFET한 시스템 파라미터와 함께 유리함수(어드미턴스)의 계수선정을 위한 overdetermined 방정식의 해를 구하는 데 사용된다.

최적차수 선정을 위한 기본 자료로서의 주파수 모델 확인은 각 유리함수의 차수를 1차에서 20차까지로 설정하여 전 범위에서 계수적합을 실시한다, 다음으로 이러한 차수별 계수를 이용하여 각 시스템 차수에 대한 오차 평가가 이루어진다. 오차의 평가는 최대치 오차, 실효값 오차, 그리고 기본주파수에 대한 오차평가가 이루어진다.

아래 그림 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11은 오차의 종류별로 해당 시스템 차수에 대한 오차의 크기를 나타낸다.

2.2 유전알고리즘을 이용한 모델 차수선정

유전알고리즘은 진화라는 과정을 통해서 적합성이 높은 유전요소들이 그 특징을 세대에 거쳐서 전달하여, 보다 최적화된 형질의 개체로 구성원을 형성하는 생태 시스템에 적자생존의 특징을 적용하는 방법이다 [6-7].

본 논문에 있어서 최적화의 대상은 멀티포트를 갖는 축약시스템의 등가 어드미턴스를 유리함수로 하는 시스템의 차수이다. 최적차수 선정을 위한 유전알고리즘 적용에 있어서, 하나의 개체는 6개의 유전형질(gene)로 구성되며, 각각의 유전형질은 배열순서에 따라 6개의 자기/상호 어드미턴스를 나타낸다 (그림 12).

자기어드미턴스 Y_{11} 에 대한 안정성 및 오차평가

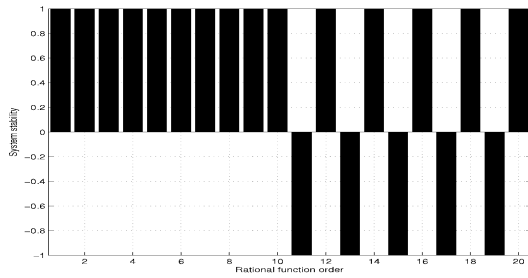


그림 4. Y_{11} 안정성평가(안정1/불안정-1)
Fig. 4. Stability Evaluation Y_{11} (stable 1/not -1)

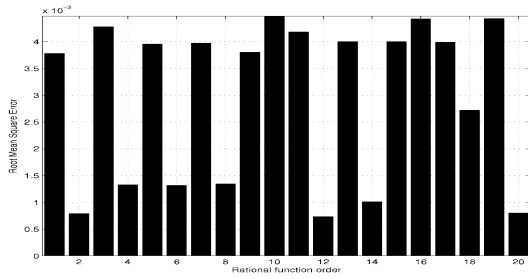


그림 5. RMS 오차평가
Fig. 5. RMS Error Evaluation

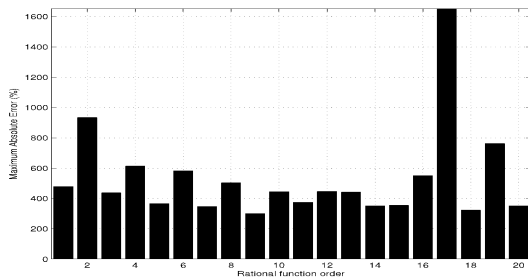


그림 6. 최대치 오차 평가
Fig. 6. Maximum Error Evaluation

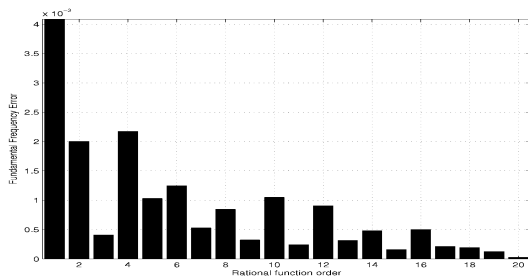


그림 7. 기본주파수 오차 평가
Fig. 7. Fundamental Frequency Error Evaluation

상호어드미턴스 Y_{12} 에 대한 안정성 및 오차평가

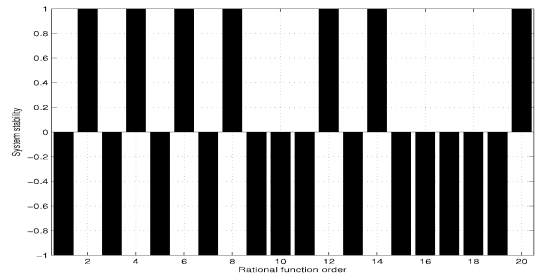


그림 8. Y_{12} 안정성평가(안정1/불안정-1)
Fig. 8. Stability Evaluation Y_{12} (stable 1/not -1)

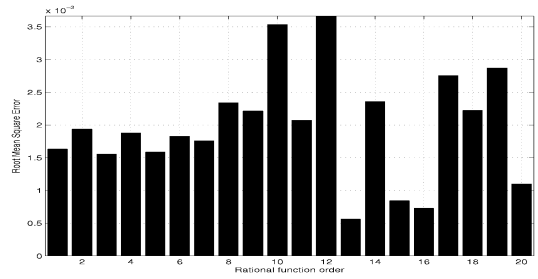


그림 9. RMS 오차평가
Fig. 9. RMS Error Evaluation

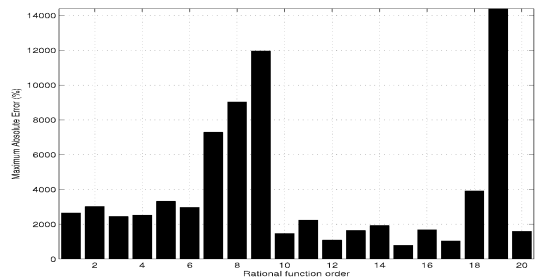


그림 10. 최대치 오차 평가
Fig. 10. Maximum Error Evaluation

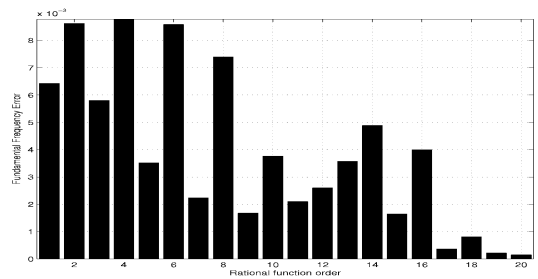


그림 11. 기본주파수 오차 평가
Fig. 11. Fundamental Frequency Error Evaluation

Chrom 1 = Gene1+Gene2+Gene3+Gene4+Gene5+Gene6
 (K:Y11) (K:Y12) (K:Y13) (K:Y22) (K:Y23) (K:Y33)
 Chrom 2 = Gene1+Gene2+Gene3+Gene4+Gene5+Gene6
 (K:Y11) (K:Y12) (K:Y13) (K:Y22) (K:Y23) (K:Y33)
 Chrom 3 = Gene1+Gene2+Gene3+Gene4+Gene5+Gene6
 (K:Y11) (K:Y12) (K:Y13) (K:Y22) (K:Y23) (K:Y33)
 Chrom 4 = Gene1+Gene2+Gene3+Gene4+Gene5+Gene6
 (K:Y11) (K:Y12) (K:Y13) (K:Y22) (K:Y23) (K:Y33)
 *
 *
 *
 Chrom N = Gene1+Gene2+Gene3+Gene4+Gene5+Gene6
 (K:Y11) (K:Y12) (K:Y13) (K:Y22) (K:Y23) (K:Y33)

K는 각 자기/상호 어드미턴스의 구성차수
 N은 구성객체수 (Population)

그림 12. 개체에 대한 유전자 구조
 Fig. 12. Genes Consisting of a Chromosome

각각의 유전형질이 의미하는 해당 어드미턴스 함수의 차수는 1차~20차 까지 A~T의 알파벳과 대응하여 다음의 예와 같이 간단하면서도 식별력 있는 phenotype으로 표현할 수 있다.

chromosome3 = AGETFH

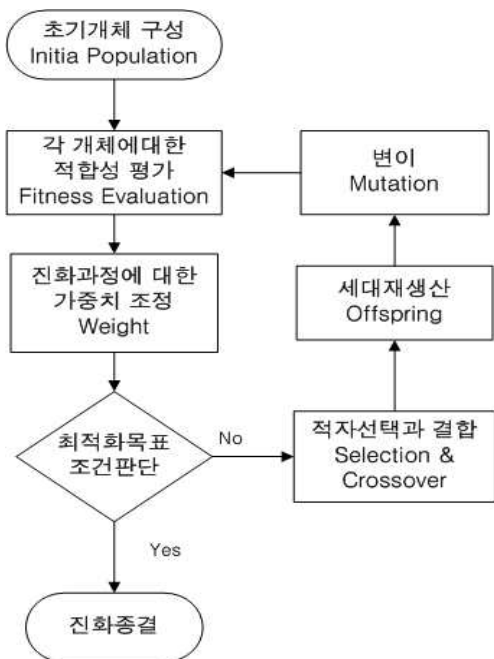


그림 13. 진화과정에 대한 순서도
 Fig. 13. Evolution Flow Chart

진화과정에 적합성 평가와 최소오차에 대한 우수 형질의 세대전달 과정은 그림 13의 순서도와 같은 절차에 따라서 세대에서 세대로 이어지며 결정된다.

적합성 평가 함수 및 Cost 평가 함수의 구성은 먼저 각 개체에 대하여 식 (4)의 적합성 평가가 이루어지고 다음으로 식 (5)와 같이 6개의 유전형질로 대표되는 각 자기/상호 어드미턴스의 차수에 대한 평가오차의 합을 구하는 절차로 진행된다.

$$E_G = W_1 e_{K_{max}} + W_2 e_{k_{cms}} + W_3 e_{k_{f_1}} + W_{k_{vital}} \quad (4)$$

$$Cost_{(fitness)} = \sum_{G=1}^6 (E_G) \quad (5)$$

식 (4)에 있어서 k는 해당 차수를 나타내며, k_vital은 그 차수에서의 안정성 평가를 의미한다.

전달함수에 대한 특성상 시스템의 안정성에 대한 요소는 다른 오차 요소와는 차별되게 다루어져야 한다. 즉 진화 초기과정에서는 다른 오차 평가 요소에 대하여 적합성 판단에 가장 부적합한 가중치를 부여하여, 진화 초기에 해당 형질의 세대전달의 확률을 최소화시킨다. 또한 세대의 진화에 따라서 동일 크기의 적합성에 대하여는 낮은 차수에 높은 적합가중치를 부여하여 자연선택과 함께 인위적 선택요소도 작용하도록 한다.

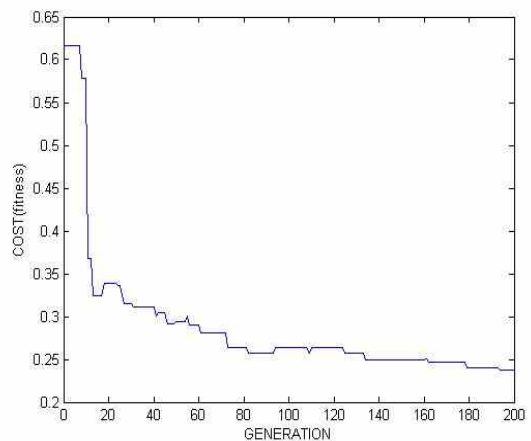


그림 14. 세대진화에 따른 Cost평가
 Fig. 14. Cost of Fitness Evaluation from Iteration

최적차수 선정을 위한 GA 적합과정은 다음의 조건으로 100회 반복 실시되었고(그림 15), 수렴빈도 및 최소 오차 값을 고려하여 다음과 같이 선정하였다.

$$Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{33} = [16, 14, 17, 15, 17, 15]$$

구성개체수(Population) = 20

변이율(Mutation rate) = 2%

반복세대수(Generation)= 200

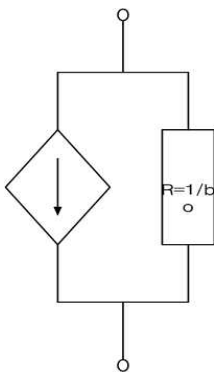


그림 15. 노튼 등가 모델
Fig. 15. Norton Equivalent Model

2.3 FDNE 모델의 완성(3×3 다상모델)

최적차수가 결정된 유리함수는 동반모델의 등가회로 구성을 위해서 다음과 같이 정리될 수 있다. 특히 Z영역의 모델은 전달함수 자체가 차분방정식으로 표현되어 별도의 변환을 거치지 않고도 등가회로 동반모델을 구성하여 해석하기 용이하다.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} = \frac{I(z)}{V(z)} \quad (6)$$

식 (6) 양변에 분모를 곱하여 식 (7)과 같이 기술한다.

$$I(z)(1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}) = (b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}) V(z) \quad (7)$$

다시 전류 I(z)의 식으로 정리하면 식 (8)과 같다.

$$I(z) = (b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}) V(z) - (a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}) I(z) \quad (8)$$

어드미턴스 전달함수는 양변을 위식과 같이 전압/전류의 관계식으로 나누어 정리할 수 있으며 다시 아래의 식 (9)와 같이 과거 항과 현재 항으로 구분하여 기술할 수 있다.

$$I(z) = \frac{(b_0) V(z)}{1 + (a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n})} + \frac{(b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}) V(z)}{1 + (a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n})} - \frac{(a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}) I(z)}{1 + (a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n})}$$

$$i(z) = (I_{instantaneous}) + (I_{history}) \quad (9)$$

시간영역의 해석을 위해서 계수 적합된 Z영역의 유리함수는 전류원/전압원 모델에 따라서 선택적으로 동반모델을 선택할 수 있다. 그림 15는 전류원으로서의 노튼등가 동반(Companion)모델을 나타낸다.

표 1. 자기 어드미턴스 Y₁₁ 선정계수
Table 1. Coefficient of Admittance Y₁₁

order	b	a
0	4.752239556933829e-03	1.000000000000000e+00
1	-6.023227668510024e-02	-1.262497024242788e+01
2	3.635871839535504e-01	7.586366569490744e+01
3	-1.386006272493900e+00	-2.877060794775120e+02
4	3.730128220105988e+00	7.698439034515631e+02
5	-7.505326798600464e+00	-1.539131263762131e+03
6	1.166114223800462e+01	2.374630377320647e+03
7	-1.424460068945174e+01	-2.878457278409573e+03
8	1.379199148019099e+01	2.763598933243101e+03
9	-1.058445314447898e+01	-2.101411907256417e+03
10	6.386157101904918e+00	1.255160234669213e+03
11	-2.975255399188378e+00	-5.783380376973504e+02
12	1.036290487024117e+00	1.990076900498497e+02
13	-2.548154332700979e-01	-4.828611513171749e+01
14	3.956711962853908e-02	7.388467333801065e+00
15	-2.926055008415310e-03	-5.376197803305102e-01
16	-1.049868059150995e-02	1.069723309470266e+01

표 2. 상호 어드미턴스 Y_{12} 선정계수
Table 2. Coefficient of Admittance Y_{12}

order	b	a
0	2.629442240812388e-03	1.000000000000000e+00
1	-3.549515352930371e-02	-1.431778604079589e+01
2	2.278597610540342e-01	9.830828855521611e+01
3	-9.220685243457782e-01	-4.298793434987363e+02
4	2.628021201280650e+00	1.340764774677046e+03
5	-5.580744927959834e+00	-3.165371853592611e+03
6	9.102829448913999e+00	5.857865257591116e+03
7	-1.157224850048574e+01	-8.680433919186004e+03
8	1.148532148329732e+01	1.042862343637257e+04
9	-8.781461954148927e+00	-1.021695460176714e+04
10	4.971103553440096e+00	8.163544233488038e+03
11	-1.857853311684295e+00	-5.290290559988260e+03
12	2.416173524024798e-01	2.746812484178906e+03
13	2.000976974260841e-01	-1.118860691370553e+03
14	-1.544584791011494e-01	3.453251292640737e+02

표 1, 2는 최적차수 선정에 따른 어드미턴스함수의 계수를 나타낸다.

3. 사례연구

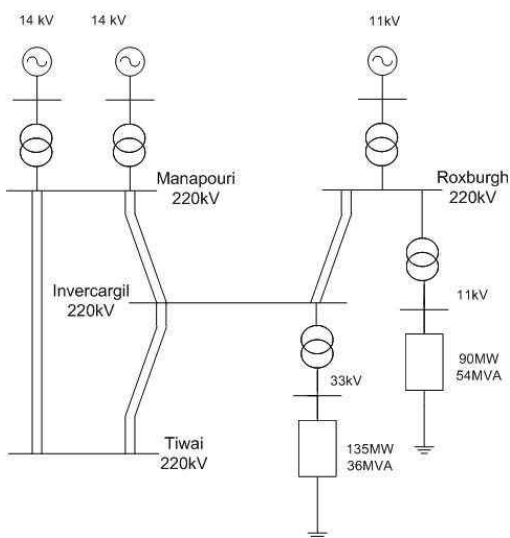


그림 16. 테스트 교류 시스템
Fig. 16. Practical Test system of New Zealand

결과에 따라 구성된 FDNE모델은 그 유용성을 입증하기 위하여 실제 전력망 시스템으로 모델화 되어있는 뉴질랜드 전력시스템에 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 16은 테스트 시스템에 대한 계통을 나타낸다. 그림 17은 비선형 부하에 대한 실험에 연계되는 컨버터 시스템을 보여준다.

과도현상의 해석을 위해 시스템 계통에 대한 폴트 상황은 0.82초에 시작하여 0.05초 후 고장 후 복귀 과정을 시뮬레이션 한다(그림 20~24).

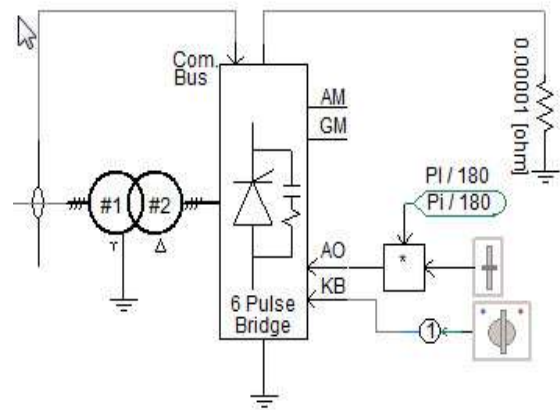


그림 17. 테스트 비선형부하(컨버터)
Fig. 17. Nonlinear Test System(Converter)

3.1 정상상태(실제시스템과 FDNE비교)

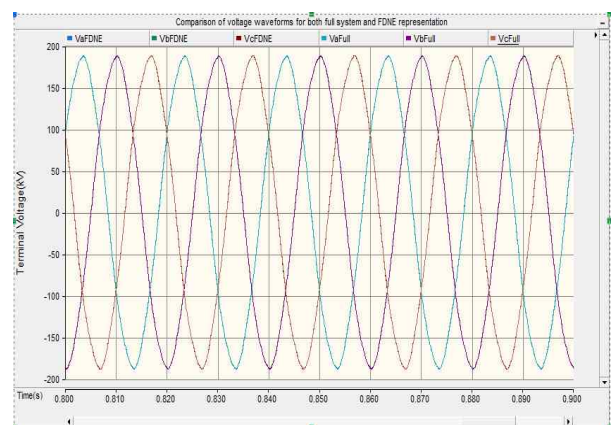


그림 18. 정상상태 교류전압 실모델 vs FDNE
Fig. 18. Comparison of Waveform Full-System vs FDNE

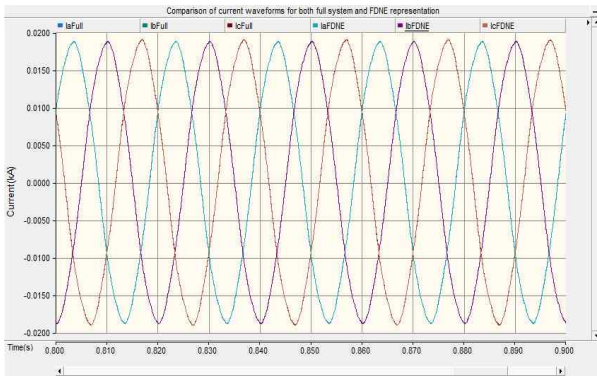


그림 19. 정상상태 교류전류 실모델 vs FDNE
Fig. 19. Comparison of Waveform Full-System vs FDNE

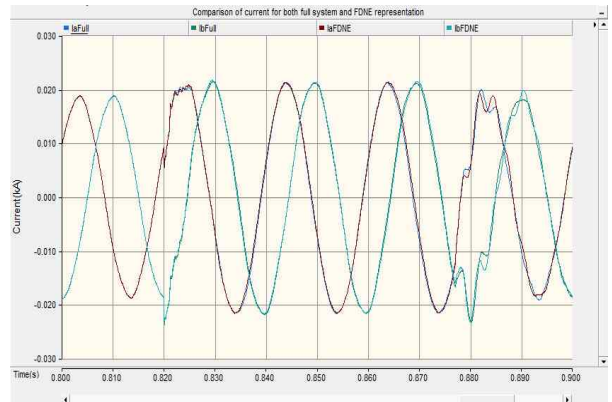


그림 22. 과도상태 교류전류 실모델 vs FDNE
Fig. 22. Transient AC Current Full-System vs FDNE

3.2 과도상태(실제시스템과 FDNE비교)

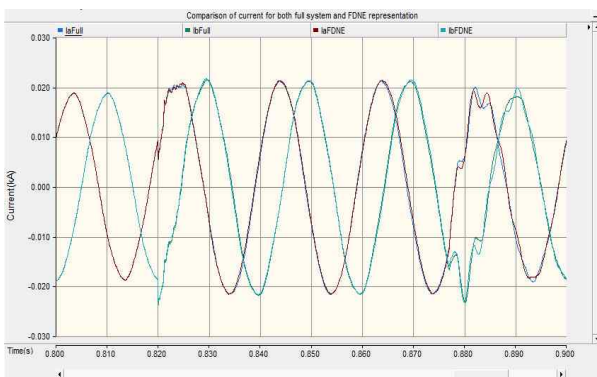


그림 20. 건전상전류 실모델 vs FDNE
Fig. 20. Comparison of Waveform Full-System vs FDNE

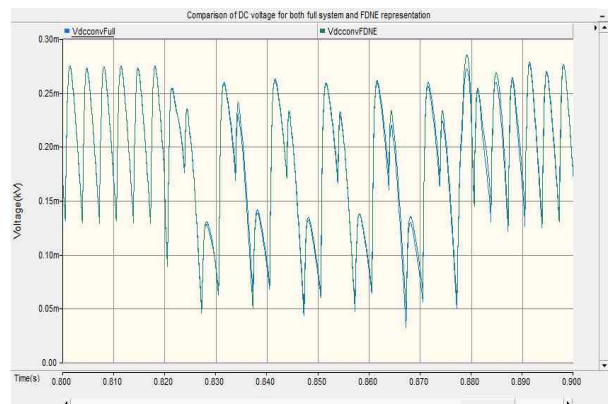


그림 23. 과도상태 직류전압 실모델 vs FDNE
Fig. 23. Transient DC Voltage Full-System vs FDNE

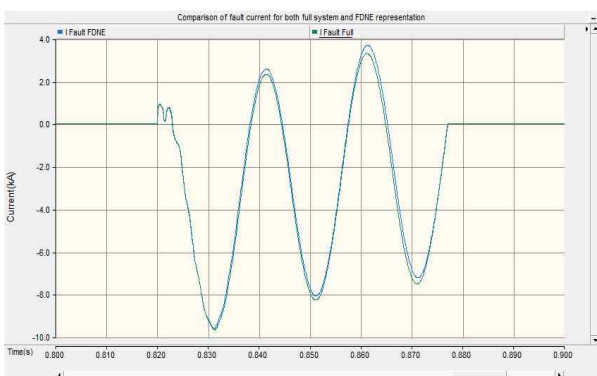


그림 21. 과도상태 고장전류 실모델 vs FDNE
Fig. 21. Fault Transient Current Full-System vs FDNE

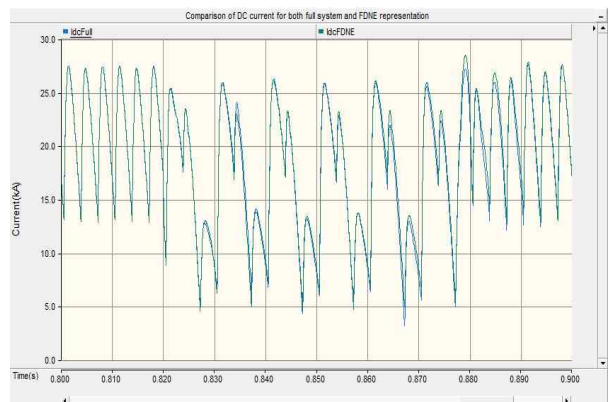


그림 24. 과도상태 직류전류 실모델 vs FDNE
Fig. 24. Transient DC Current Full-System vs FDNE

4. 결론 및 향후연구

이번 연구는 주파수의존 등가모델에 관한 계수선정 과정의 계산적 효율성과 결과에 대한 정확성에 초점을 두었던 이전 연구와는 달리, 3상 시스템에 대하여 전체 6개의 유리전달함수(자기/상호어드미턴스)에 대하여 동시에 최적차수를 선정하는 모델링을 실시하였다. 유전알고리즘을 적용한 최적차수의 선정 결과를 이용하여 실시스템의 모델을 구성하였다. 제안된 FDNE 모델을 적용한 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 그림 18~그림 24에 나타낸다. 정상상태의 전압/전류의 파형비교에서 볼 수 있듯이 결과는 실시스템을 충실하게 표현하였고, 폴트상황에 대한 과도현상의 복귀과정 또한 실시스템을 잘 나타내고 있다. 비선형부하의 컨버터 모델의 적용에서도 직류 과도상황에 잘 부합하는 응답을 보여주었다. 향후 지배극점이 선반영되는 시스템 전달함수의 구성과 기본시스템에 대한 주파수 위상특성 등에 대한 오차들도 유전알고리즘의 적합성 판정에 반영하여 보다 건설한 시스템 계수를 선정하는 방법에 대한 연구를 진행하고자 한다.

References

[1] T.Noda, N.Nagaoka and A.Ametani: "Further Improvements to a Phase-Domain ARMA Line Model in Terms of Convolution and Stability" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12 1997.
 [2] Y.P.Wang, S.Y.Choi, K.W.Kim: "Modeling FDNE using Vector Fitting". 2008 KIEE Summer Symposium.
 [3] Taku Noda: "Application of Frequency-Partitioning Fitting to the Phase-Domain Frequency-Dependent Modeling of Overhead Transmission Lines" IEEE Transactions on Power Delivery 2014.

[4] Keyhan Sheshyekani and Barzan Tabei: 'Multiport Frequency-Dependent Network Equivalent Using a Modified Matrix Pencil Method' IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
 [5] Y.P.Wang and N.R. Watson: "A benchmark test system for frequency dependent network equivalents for electromagnetic simulations" Electrical Power and Energy Systems 44, 2013 364-374.
 [6] C.F.M Almeida, and N.Kagan: "Determining Frequency Dependent Equivalents through Evolutionary Algorithms" IEEE 2012.
 [7] Randy L. Haupt, Douglas H.Werner: "Genetic Algorithms in Electromagnetics" IEEE PRESS Wiley interscience.
 [8] Neville Watson and Jos Arrillaga: "Power Systems Electromagnetic Transients Simulation" IEE Powr and Energy Series 39.
 [9] Iraj Rahimi Rordanjani and Wilsun Xu: "Improvement of vector fitting by using a new method for selection of starting poles" Electric Power Systems Reserch 107 2014 206-212.

◇ 저자소개 ◇



최선영

1991년 2월 동아대학교 전기공학 졸업. 1994년 2월 동아대학교 전기공학과 전력전자 졸업(석사). 2009년 2월 창원대학교 전자공학과 박사수료. 2002~2010년 White-stonetnet Korea Rep. 2012년~현재 동아대학교 전기공학과 조교수.



박승엽

1981년 2월 고려대학교 전기공학과 졸업. 1984년 2월 고려대학교 전기공학과 자동제어 졸업(석사). 1988년 2월 고려대학교 전기공학과 자동제어 졸업(박사). 1993~1994년 미국 텍사스대학 연구교수. 1988년~현재 창원대학교 전자공학과 교수.