

전력계통 과도현상 해석을 위한 상영역에서의 등가축약 기법

정 병태\* 김 성희\* 허 성일\* 안 복신\* 홍 준희\*\*

\* LG 산전 시스템 연구실 \*\* 경원대학교, 공과대학 전기공학과

A Phase-Domain Equivalent Representation for Electromagnetic Transients Studies

B. T. Jung\* S. H. Kim\* S. I. Heo\* B. S. Ahn\* J. H. Hong\*\*

\* System Lab., LG Industrial Systems \*\* Dept. of Elec. Eng., Kyungwon Univ.

**Abstract.** In this paper, a new time-domain reduction method for unbalanced 3 phase power systems will be represented. The impulse response of the system is used to identify a discrete-time equivalent filter model. The model is formulated directly in the phase domain. Each phase has a self-mode equivalent model and two mutual-mode equivalent models. The equivalent model is determined by the transfer function identification technique based on the Prony analysis. The model is implemented in EMTDC and tested with an unbalanced 3 phase network. The result of test showed that the equivalent model is accurate.

1. 서론

전력계통의 과도현상 모의는 기기의 해석, 안정도 해석, 제어기 성능 평가, 계전기 시험 등 여러 가지 목적을 가지고 이루어지고 있다. 이 때 모의 대상 계통의 복잡도와 크기는 관찰하고자 하는 현상의 주파수 대역, 시간제약 및 컴퓨터의 계산용량 등을 고려하여 결정된다.

일반적으로 과도해석에 사용하는 모델의 정밀도는 과도현상의 전파속도와 밀접한 관계가 있으며 전파속도가 빠를수록 증가되는 경향을 보인다. 이는 계통 내에서 전자기 과도파에 가해지는 뎀핑이 그 전파속도에 따라 다르기 때문으로 빠른 과도현상이 상대적으로 급격한 에너지 소모를 경험하기 때문이다. 그 결과 느린 과도현상은 넓은 지역에 걸쳐 영향을 주는 반면 매우 빠른 과도현상의 경우는 상대적으로 국부적인 영향만을 주게 된다. 그러므로 안정도 해석과 같은 느린 현상을 주목하는 경우는 넓은 범위에 걸친 계통을 모의할 필요가 있고 따라서 개개의 구성요소들은 간단하게 표현되어야 한다. 그러나 전자기 과도현상 해석의 경우에는 전체 계통중 일부분만을 대상으로 아주 자세한 모델을 사용하여 모의, 비선형, 시변 등의 특성을 정확히 반영할 수 있도록 하여야 한다.

이와같은 관점에서 보통의 전력조류 계산이나 고장해석 등이 수 백, 수 천 모선 규모의 계통을 대상으로 행해짐에 반하여 동일한 규모의 전자기 과도현상 해석은 비현실적인 것이 된다. 더욱이 과도현상의 유형에 따라 사용모델의 정밀도와 계통 규모가 결정되더라도 현실적으로는 컴퓨터의 계산용량에 따라 계통 규모가 제조정되어야만 한다. 특히 RTDS(Real-Time Digital Simulator)와 같은 모의기를 이용하여 실시간 모의를 하고자하는 경우, 해석 가능한 계통의 규모는 모의기의 계산한계 내로 결정되어야

한다. 따라서 보다 빠르고 경제적인 과도현상 해석을 위해서 일부 계통의 특성을 손실없이 등가적으로 간단히 표현하여 계산부담을 줄일 수 있는 등가축약기법에 대한 연구는 항상 존재하게 된다.

기존의 등가축약 방법들은 선로의 주파수 의존성을 모델링하기가 상대적으로 쉬운 주파수 영역에서 이루어졌었다 [2, 3]. 한편 최근에는 스위치와 비선형요소의 표현이 시간영역에서 이루어지고, 또한 EMTF 나 EMTDC 와 같은 과도현상 해석 프로그램 들이 시간영역 해법을 채택하고 있는 점 등을 고려하여 그에 적합한 시간영역에서의 등가축약기법들이 제안되고 있다[4, 5]. 이들 시간영역 등가축약기법으로는 두 가지를 들 수 있는데 하나는 구동점 어드미턴스 함수를 ARMA 폴로 정식화한 후 최소자승법으로 파라미터를 구하는 방법으로 특별히 고안된 사인함수들의 조합으로 축약부분계통을 여자시키며 구해진 등가모델의 차수가 실제보다 훨씬 커지는 단점을 가지고 있다[4]. 다른 하나는 프로니 해석법을 이용하여 파라미터를 구하는 방법으로 전압임펄스로 축약부분계통을 여자시키며 등가모델의 차수선정 기준을 제시하고 있다.[5]

본 논문에서는 프로니 해석법을 이용하여 상영역에서 등가모델을 구하는 기법에 대해 기술하고 3상 비대칭 계통에서의 사례연구를 통해 검증하였다.

2. 본론

다상계통의 해석에는 Karrenbaur 변환, Clark 변환 등의 상수 모달변환 행렬이 많이 이용되어왔다. 그러나 축약대상 부분계통이 비연가구역을 포함하거나 케이블 선로를 포함하는 경우 이러한 상수 행렬로는 선로의 주파수 의존성이 제대로 반영되지 않는데, 각각의 행렬요소가 심한 주파수의존특성을 포함하게 되기 때문이다. 게다가 모달행렬을 이용하는 경우 모드교차(Mode Crossing)로 인한 수치 불안정이 발생할 가능성이 존재하는 것으로 알려져 있다. 이러한 주파수 의존성은 시간영역에서의 복잡한 상승적분(Convolution)을 통해 구현 가능한데, 이러한 상승적분은 많은 계산 부담을 필요로한다. 그러므로, 적절한 수치기법이 제공된다면 상영역에서의 등가축약은 본래 시간영역에서의 등가축약기법이 갖는 장점들을 잘 살릴 수 있다. 본 논문에서는 M 상의 계통에 대한 다음 행렬식이 축약 모델에서의 전압과 전류간의 관계를 나타낸다.

$$I(n) = Y_E V(n) + HIST(n-1)L \quad (1)$$

$I(n) = [i_a(n) \ i_b(n) \ i_c(n) \ \dots]^T$ , M 차 상전류 벡터  
 $Y_E = M \times M$  등가어드미턴스 행렬인 상수대각 행렬  
 $V(n) = [v_a(n) \ v_b(n) \ v_c(n) \ \dots]^T$ , M 차 상전압 벡터  
 $HIST(n-1) = M \times M$  과거이력 행렬  
 $L = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ , M x 1 계수행렬  
 $M =$  모델의 차수

3상의 경우에는 등가어드미턴스 행렬  $Y_E$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Y_E = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

그리고 이 경우에, 행렬  $HIST(n-1)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$HIST(n-1) = \begin{bmatrix} h_{aa}(n-1) & h_{ab}(n-1) & h_{ac}(n-1) \\ h_{ba}(n-1) & h_{bb}(n-1) & h_{bc}(n-1) \\ h_{ca}(n-1) & h_{cb}(n-1) & h_{cc}(n-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 식(1)에 대입하면 A 상에 대한 등가 모델은 다음의 식으로 표현된다.

$$i_a(n) = i_{aa}(n) + i_{ab}(n) + i_{ac}(n) \quad (4)$$

이때

$$i_{aa}(n) = Y_{aa} v_a(n) + h_{aa}(n-1) \quad (5)$$

$$i_{ab}(n) = Y_{ab} v_b(n) + h_{ab}(n-1) \quad (6)$$

$$i_{ac}(n) = Y_{ac} v_c(n) + h_{ac}(n-1) \quad (7)$$

그리고

$$Y_{aa} = \sum_{k=1}^l d_{aa}(k), \quad Y_{ab} = \sum_{k=1}^r d_{ab}(k), \quad Y_{ac} = \sum_{k=1}^p d_{ac}(k) \quad (8)$$

$$h_{aa}(n-1) = \sum_{k=1}^l e_{aa}(k) v_a(n-1) - \sum_{k=1}^l a_{aa}(k) i_{aa}(n-1) - \sum_{k=1}^l b_{aa}(k) i_{aa}(n-2) \quad (9)$$

$$h_{ab}(n-1) = \sum_{k=1}^r e_{ab}(k) v_b(n-1) - \sum_{k=1}^r a_{ab}(k) i_{ab}(n-1) - \sum_{k=1}^r b_{ab}(k) i_{ab}(n-2) \quad (10)$$

$$h_{ac}(n-1) = \sum_{k=1}^p e_{ac}(k) v_c(n-1) - \sum_{k=1}^p a_{ac}(k) i_{ac}(n-1) - \sum_{k=1}^p b_{ac}(k) i_{ac}(n-2) \quad (11)$$

식(8)부터 식(11)에서 상수 파라미터  $a_{ij}(k)$ ,  $b_{ij}(k)$ ,  $d_{ij}(k)$  그리고  $e_{ij}(k)$ ,  $i, j = a, b, c$ 는 i 상에서 가한 전압 임펄스에 대한 j 상에서의 전류 응답으로부터 얻어진다. 또한, 두 모선간의 상호결합성분이 같으므로  $a_{ij}(k) = a_{ji}(k)$ , for  $i \neq j$ 가 된다. 이것은  $b_{ij}(k)$ ,  $d_{ij}(k)$ ,  $e_{ij}(k)$  and  $Y_{ij}$ 에 대해서도 마찬가지로 성립한다. B 상과 C 상에 대한 등가모델도 같은 방법으로 구할 수 있다. 특히 식(8)에서 식(11)까지의 계산은 병렬 처리가 가능한 구조를 갖고 있는데, 이것은 제안하는 알고리즘이 갖는 장점으로 현재 대부분의 실시간 모의기가 병렬처리를 하기 때문에 실시간 모의기에 적용하기에 매우 용이하다고 할 수 있다.

A 상에서 지연(Delay)를 나타내는 모든 항들의 합을  $HISTa(n-1)$ 이라 하고, 각각의 어드미턴스의 합을  $Y_{eqa}$ 로 표시하면,  $HISTa(n-1)$ 과  $Y_{eqa}$ 는 외부 제어입력을 가진 전압원과 저항이 병렬로 연결된 꼴로 구현된다. 실제로 EMTDC에서 구현된 A 상의 등가모델의 형태는 그림 1과 같다. B 상과 C 상에 대한 등가모델도 같은 구조로 구현되었다.

### 3. 사례연구

제안하는 새로운 등가모델의 정확도를 검증하기 위하여 선로가압(Line Energization)과 A 상 지락을 축약 전 계통과 축약된 계통에 동시에 같은 조건으로 인가하고 과도시 전압 파형을 비교하였다.

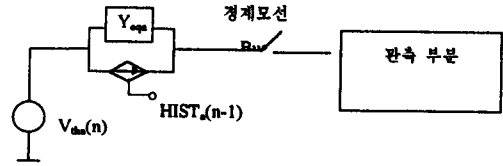


그림 1. A 상에 대한 등가모델

시험 모의계통은 그림 2와 같은데 관측부분계통은 160km의 송전선로와 전압원으로 구성되어 있다. 고장점은 경계모선으로부터 60km 지점으로 A 상 완전지락을 가하였다. 축약대상부분계통은 점선으로 표시하였다. 모의계통의 모든 선로모델은 주파수 의존 모델을 이용하였다. 축약 대상 계통의 전압 임펄스에 대한 전류응답 특성은 EMTDC(Electro-Magnetic Transient DC)를 이용해 구하였으며 PC에서도 등가시스템의 구현이 가능하도록 등가모델의 차수는 45차로 제한하였다. 계통 모의시 모든 송전선로는 분모정수 모델로 표현하고, 모의시간간격  $\Delta t$ 는 50 $\mu$ sec으로 하였다. 이 모의 시간간격으로 주파수 대역 10kHz까지의 현상에 대해서는 정확히 모의할 수 있다. 그리고 모선 1과 3사이의 선로를 비연가로 하여 축약대상 부분계통이 불평형이 되게 하였다. 그림 3에 비연가된 철탑의 기하학적 배치를 표시하였다.

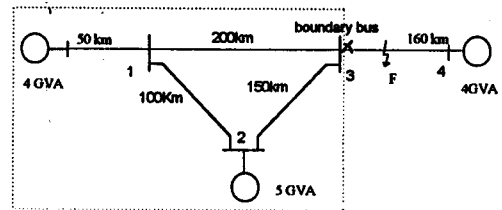


그림 2. 불평형 송전계통

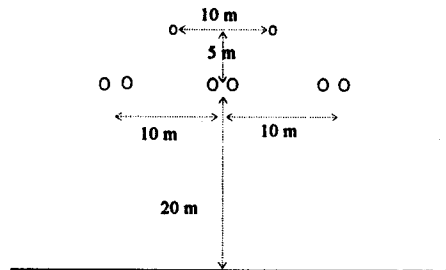


그림 3. 비연가된 철탑의 기하학적 배치

선로 가압 모의는 모선 3과 모선 4의 양단이 개방된 상태에서 0.3초에 동시에 양단을 폐로하고 제안된 등가모델을 이용한 경우와 이용하지 않은 경우의 전압파형을 비교하였다. 그림 4는 이 때의 파형을 그린 것으로 등가모델의 유용성을 잘 보여주고 있다.

그림 5는 0.402초에 A 상 완전지락이 발생한 경우에 대해 등가모델을 이용해서 얻은 전압 파형과 축약하지 않고 얻은 파형을 비교하여 보여 주고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 제안된 등가모델이 과도시에도 매우 정확한 결과를 내고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 송전계통에 대한 등가시스템을 모드영역이 아닌 상영역에서 직접 구현하는 방법을 제안하고 이를 일반적인 불평형 전력계통에서의 과도현상 해석에 적용하였다. 이로써 modal 변환 행렬의 주파수 의존성에 수반되는 계산부담을 줄이고 모드교차에 의한 수치 불안정을 제거하였다. 특히 기존의 등가축약법들이 비연가 송전계통이나 불평형 계통에 대한 과도현상 해석 등에 적용될 수 없었던 불편함을 해소하고 보다 정확한 해석결과를 기대할 수 있게 되었다.

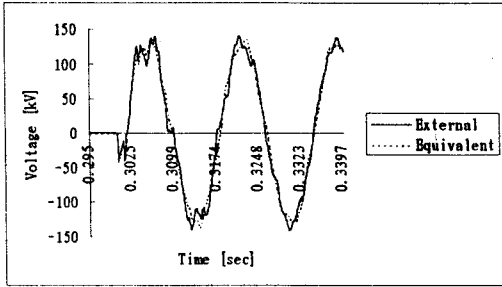


그림 4. 경계모선에서의 과도전압 파형

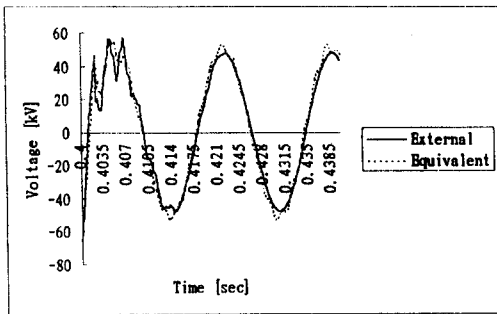


그림 5. 경계모선에서의 1상 지락사고 모의결과

#### 참고문헌

- [1] W. Dommel: "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-phase Networks," IEEE Trans. in Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, Apr. 1969, pp. 388-399
- [2] A. Semlyen and M. H. Abdel-Rahman, "Transmission Line Modeling by Rational Transfer Functions," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 9, Sept. 1982, pp. 3576-3584.
- [3] A. S. Morched and V. Brandwajn, "Transmission Network Equivalents for Electromagnetic Transient Studies," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, Sept. 1983, pp. 2984-2994.
- [4] Ali Abur and Harinderpal Singh, "Time Domain Modeling of External Systems for Electromagnetic Transients Programs," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993, pp. 671-679.
- [5] Jun-Hee Hong and Jong-Keun Park, "A Time-Domain Approach to Transmission Network Equivalents Via Prony Analysis for Electromagnetic Transients Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 1789-1797, Nov. 1995.