

## 전자기 과도 현상 해석을 위한 등가 시스템

박종근  
서울대학교

\* 홍준희  
서울대학교

박동욱  
한국전기연구소

### Equivalent System for Electromagnetic Transients Study

Park Jong-Keun  
Seoul National University

\* Hong Jun-Hee  
Seoul National University

Park Dong-Wook  
K. E. R. I.

**Abstract** - In electromagnetic transient analysis studies, complex transmission system should be modelled in detail. But in large system, modelling of complete system is a big burden in many sides such as computation time, modelling efforts. It is needed to model only a concerned part of the system in detail. The remaining parts of the system have to be reduced to equivalents. This study suggests a method of generating a simple network equivalents which has equivalent frequency charastics in wide frequency range.

#### 제 1 장. 개 요

고전압 계통 및 기기의 경제적인 절연설계, 보호계통 설계를 위해서는 계통내에서 발생하는 여러 요인들에 의한 과도현상이 정확히 파악되어야 한다. 이때 정확한 과도현상 해석을 위해서는 대상으로 하는 계통에 대한 자세한 표현(Modelling)이 필요하다. 그러나 대규모 시스템에 대한 자세한 표현에는 계산 시간 및 경제성 등에 의한 제약이 따르게 되므로, 필요한 부분만을 자세히 다루고 나머지 부분은 간단하게 등가 시스템으로 표현하는 것이 필요하다.

이번 연구에서는 충분히 넓은 주파수 대역에서 계통과 같은 특성을 보이는, 간단한 등가 시스템을 구성하는 방법을 제시한다.

#### 제 2 장. 본 론

##### 1. 전원계통에 대한 표현

계통의 과도전압은 그 발생 지점에서 선로를 따라 전파되면서 점차로 감쇄되기 때문에 멀리 떨어진 선로나 기기들은 과도전압의 크기 및 파형에 큰 영향을 주지 못한다.

따라서 계통의 과도현상 해석때는 발생지점에서 가까운 지점은 정확히 모의하고 멀리 떨어진 계통은 근사적인 등가 시스템으로 간단하게 표현함으로써, 효율적인 해석을 할 수 있다.

종래에는 이 등가 시스템을 상용 주파수(60Hz)에서의 단락 임피던스로 표현하는 것이 일반적이었다. 그러나 이 방법은 60Hz이외의 주파수에 대하여 필연적으로 많은 오차를 보이게 된다.

또 다른 방법으로는 위의 등가 시스템에, 송전선로에 대한 켜어지 임피던스(Surge Impedance)를 Shunt로 연결하여 높은 주파수에 대한 특성을 개선시키는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 높은 주파수 영역에서의 특성이 개선되는 대신 낮은 주파수 영역에서의 특성이 나빠진다.

그림 1에 나타난 실험 계통으로 종래의 등가 시스템과, 실험계통에 대한 자세한 표현과의 차이를 비교하였다.

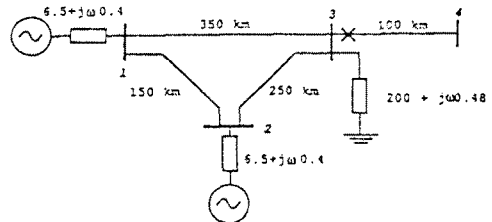
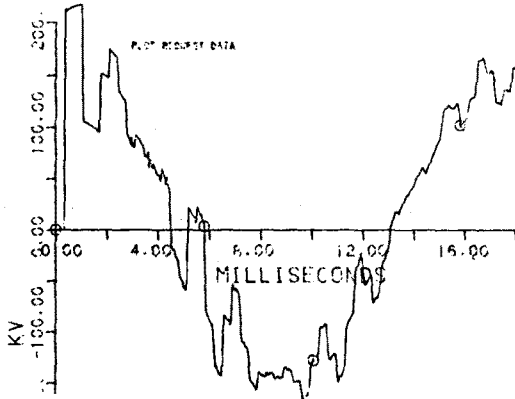


그림 1. 실험 계통

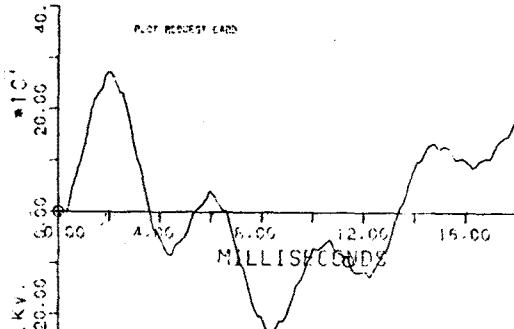
그림 2는 실험계통의 Node 3과 Node 4에 연결된 송전선로의 3상 동시 충전(3-phase simultaneous energization)때의 대안 종단 개방 전압(open-end voltage)을 EMTP를 사용하여 구한 것이며 전원계통은 다음의 3가지 방법으로 구성하였다.

- 선로정수들의 주파수 의존효과를 고려한 진행파 모형(완전 시스템)
- 60Hz에서의 단락 임피던스
- 60Hz에서의 단락 임피던스 + 송전선로의 켜어지 임피던스

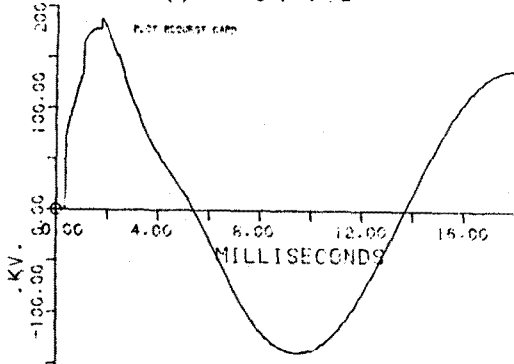
그림 2로 부터 60Hz 에 대한 단락 임피던스 등가회로로 전원계통을 표현하는 것은 많은 오차를 포함함을 알 수 있다. 또한 반사파 효과를 무시하기 위해 켜어지 임피던스를 shunt시키는 경우도 오차가 있다.



(a) 완전 시스템



(b) 60Hz 등가 시스템



(c) 60Hz 단상 입력전압 + 제어지 입력전압

그림 2. 시뮬레이션(Simulation)

2. 계통의 주파수 응답

실제의 계통과 같은 주파수 응답특성을 가지는 모델 계통(등가시스템)을 구성하면, 동일한 과도응답 특성을 얻을 수 있으며, 이때 과도응답특성의 정밀도는 구성한 등가시스템이 실제 계통에 대하여 동일한 응답을 보이는 주파수 대역(frequency range)에 따라 결정된다.

주, 임의의 지점에서 일어난 계통의 주파수 응답특성으로부터 그 계통을 충분히-원하는 주파수 대역에 걸쳐-등가적으로 표현할 수 있는 회로를 구성할 수 있게 된다.

이때 필요한 주파수 응답은 다음과 같이 얻을 수 있다.

가. 어드미턴스 행렬 구성

실제계통에 대한 어드미턴스 행렬은 다음과 같은 형태이다.

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때 행렬  $[Y]$ 의 각 요소  $Y_{ij}$ 는 보통 주파수에 따라 변하는 값이며, 엄밀하게는 주파수의 함수이다.[부록 1. 참고]

그리고, 위의 어드미턴스 행렬  $[Y]$ 는 각 계통요소들에 대한 어드미턴스 행렬 표현으로부터 간단하게 구성할 수 있다.[부록 2. 참고]

나. 구동점 어드미턴스 구성

어드미턴스 행렬 $[Y]$ 의 각 요소  $Y_{ij}$ 들은 전력계통의 다상성(multiphase nature) 때문에 그 자체가 행렬이 된다. 그러나 각 상(phase)사이의 충분한 대칭성이 존재되면 모드변환(modal transformation)을 거쳐 n-phase의 계통을 n개의 단상계통으로 다룰 수 있다.

그리고 모드 변환에 의해 얻어진 모드 어드미턴스(modal admittance) 행렬을 축약하면 모드 구동점 어드미턴스를 구할 수 있다.

다. 필요한 구동점 어드미턴스의 주파수 응답은 그림 3과 같은 계산과정에 의하여 구해진다. 이 방법으로 정확한 등가시스템을 간단하게 구성할 수 있다.

그림 3은 대상 시스템의 전원계통에 대한 모드 어드미턴스를 그린 것이다.

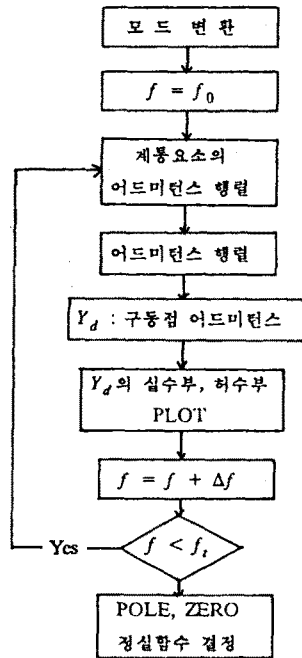
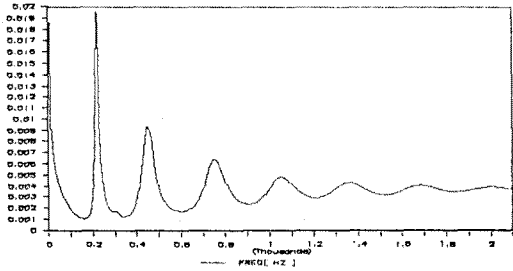
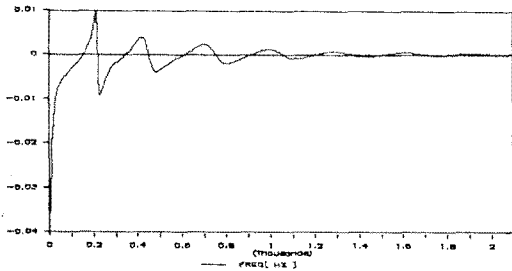


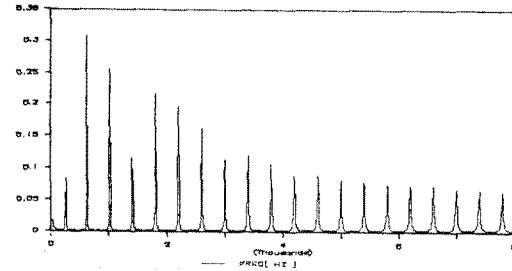
그림 3. 주파수 응답(flow chart)



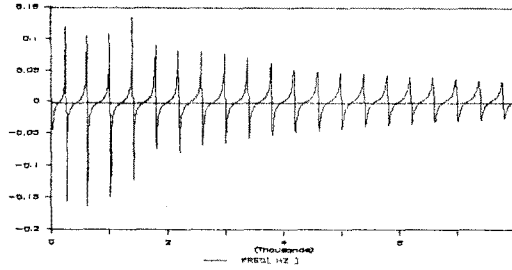
(a) Ground Mode, Real Part



(b) Ground Mode, Imaginary Part



(c) Aerial Mode, Real Part



(d) Aerial Mode, Imaginary Part

그림 4. 실험계통의 어드미턴스

그림 4에서 모드 어드미턴스는 연속적인 직.병렬 공진점을 가지고 있음을 알 수 있다. 이때 공진주파수는 모드 어드미턴스의 허수부가 0이 되는 지점이 된다.

또 일반적으로 어드미턴스의 극점(pole)과 영점(zero)들은 허수축에 가까우며 이로부터 직.병렬 공진 각주파수(angular frequency)가 어드미턴스의 극점 영점과 거의 일치함을 알 수 있다.

각각의 모드 어드미턴스는 송전선로정수의 분포성(distributed nature)으로 인해 무한개의 극점과 영점을 가진다.

주파수가 증가함에 따라 이들 극점과 영점들은 허수축에서 멀어지고 인접한 극점과 영점들 사이의 상호작용이 뚜렷해진다. 충분히 큰 주파수 대역에서는 모드 어드미턴스가 공진성을 잃고, 거의 실수가 됨을 알 수 있다.

### 3. 등가 시스템의 구성

앞절에서 구해진 주파수 특성과 같은 특성을 보이는 시스템을 R.L.C 회로로 구성하면 다음 그림 5가 된다. 이와같은 lumped parameter model이 구성하기가 쉽고 EMTF에의 적용도 쉽다.

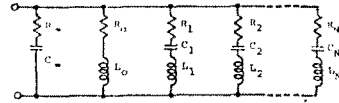


그림 5. 등가 시스템

그림 5의 회로는 R, L, C값에 따른 많은 직.병렬의 공진점을 가지며 대상계통에 대한 어드미턴스 함수로부터 R, L, C값을 간단하게 결정할 수 있다.

위 그림에서  $R_0L_0$  branch는 저주파수에서의 특성을  $R_{00}C_{00}$  branch는 고주파수 대역의 특성을 나타낸다. 또한 저항 요소는 damping의 양을 결정하는 것이다. 등가 시스템의 각 요소는 다음과 같이 결정된다.

(가) 우선  $R_i=0$  ( $i=0,1,\dots,N$ )으로 놓고 리액턴스 요소들을 직.병렬 공진주파수로부터 구한다. 이 무손실 근사 모델(lossless model approximation)은 아래 그림 5'에 나타내었다.

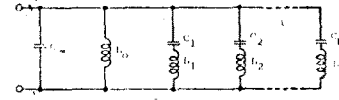


그림 5'. 무손실 근사 모델

이 무손실 회로의 어드미턴스는 다음 식과 같다.

$$Y(s) = K_{00} \prod_{i=1}^N (s^2 + W_{pi}^2) / s \prod_{i=1}^N (s^2 + W_{si}^2) \quad (2)$$

위 식에서  $W_{pi}$ 와  $W_{si}$ 는 각각 병렬 공진 각주파수, 직렬 공진 각주파수이며 N은 공진가지(branch)의 갯수이다. 이 값들은 어드미턴스 주파수 응답으로부터 결정된다.

상수  $K_{00}$ 는 60Hz에서의 모드 어드미턴스 값과 식(2)에서 얻은 값을 갖게 놓고 구할 수 있다. 식 (2)의 양변을 S로 나누고, 우변을 부분분수로 전개하면

$$Y(s) = K_{00}S + K_0/S + \sum_{i=1}^N K_i S / (s^2 + \omega_{si}^2) \quad (3)$$

이 되며,  $K_0$ 와  $K_i$ 는  $Y(s)/S$ 의 유수(residue)이다.

이때 무손실 근사모델의 어드미턴스는 식 (4)의 형태로 주어지므로

$$Y(s) = C_{00}S + 1/L_0S + \sum_{i=1}^N (S/L_i) / (s^2 + 1/L_i C_i) \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)의 계수를 비교하여 다음의 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} C_{00} &= K_{00} \\ L_i &= 1/K_i, \quad 0 < i < N \\ C_i &= K_i / \omega_{si}^2, \quad 1 < i < N \end{aligned} \quad (5)$$

(나) 저항 성분의 값은 반복하여 개선시킨다.

이때 branch저항 성분의 초기값은 각 branch의 어드미턴스가 그 branch의 공진 주파수 근처에서 지배적이라는 사실로부터 정할 수 있다.

또 branch 저항은 그 공진 주파수 근처에서 등가 임피던스의 실수부가 된다.

이 초기값을 다른 branch의 영향을 고려하여 반복 계산하여 허용 오차 이내로 개선시키는 것이다.

(다) 그리고 그림 5의 등가 시스템에 대하여 EMTP 사용시의 numerical noise를 줄이고, 등가 어드미턴스와 오차를 줄이기 위하여 약간 수정이 될 수도 있다. 그 한 방법으로 높은 값의 저항을 공진 branch의 L 양단에 병렬 연결을 할 수 있다.

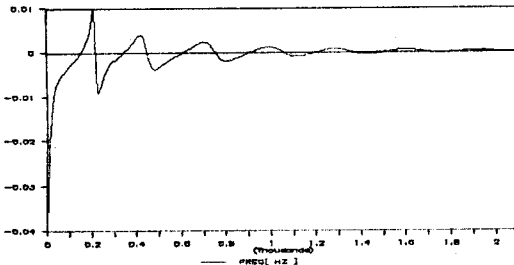
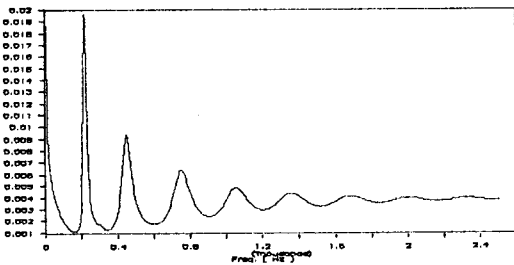


그림 6-1. 등가 시스템의 주파수 응답(Ground)

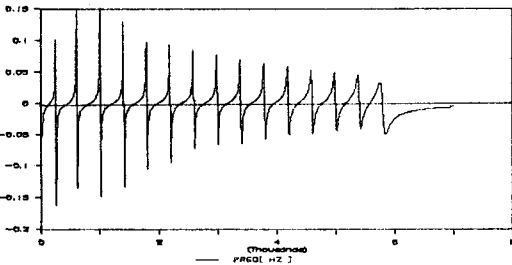
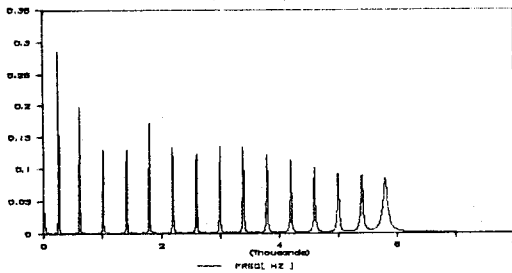


그림 6-2 등가 시스템의 주파수 응답(Aerial)

4. EMTP에서의 모델 적용

앞에서 구성한 등가 시스템의 각 가지(branch)를 다음 그림 7에 나타냈다.

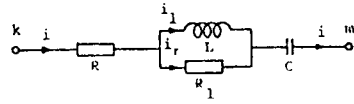


그림 7. 등가시스템의 branch 모델

이 등가 시스템에 대한 EMTP 적용은 다음과 같다. 위 그림의 branch에 대하여

$$v(t) = v_r(t) + v_c(t) + v_l(t) \tag{4-1}$$

여기서

$$v(t) = e_k(t) - e_m(t) \tag{4-2}$$

$$v_r(t) = Ri(t) \tag{4-3}$$

$$v_c(t) = v_c(t-\Delta t) + 1/c \int_{t-\Delta t}^t i(u)du \tag{4-4}$$

그리고

$$v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = R_l i_r(t) \tag{4-5}$$

$$i(t) = i_l(t) + i_r(t) \tag{4-6}$$

이다.

EMTP에서는 계통의 표현시에는 마디 방정식(nodal equation)을 사용한다. 그림 7에 보인 가지에 대한 전류전압 관계는 대형 공식에 의한 수치적분을 식 (4-3) - (4-5)에 적용하면 마디 전압의 관계식으로 고쳐지게 된다.

즉,

$$v_r(t) + v_r(t-\Delta t) = R(i(t)+i(t-\Delta t)) \tag{4-7}$$

$\Delta t$  ; time-step.

이고

$$v_c(t) + v_c(t-\Delta t) = d(i(t)+i(t-\Delta t)) + 2v_c(t-\Delta t) \tag{4-8}$$

$$d = \Delta t/2C$$

이다. 그리고

$$v_l(t) + v_l(t-\Delta t) = 2L/\Delta t(i_l(t)-i_l(t-\Delta t)) \tag{4-9}$$

이다.

식 (4-9)로부터 전류  $i_l(t)$ 는

$$i_l(t) = i(t) - v_l(t)/R_l \tag{4-10}$$

이고

식 (4-10)과 (4-9)으로부터

$$v_l(t) + v_l(t-\Delta t) = a(i(t)-i(t-\Delta t)) + b \cdot v_l(t-\Delta t) \tag{4-11}$$

$$a = 2LR_l/(R_l \Delta t + 2L) \tag{4-12}$$

$$b = 2a/(R_l \Delta t) \tag{4-13}$$

그리고 (4-7),(4-8)와 (4-11)식을 (4-1)식에 대입해서

$$v(t) = (R+a+d)i(t)+(R-a+d) i(t-\Delta t) + bv_1(t-\Delta t)+2v_c(t-\Delta t)-v(t-\Delta T) \quad (1-14)$$

가 된다.

식 (4-14)는 가지 전압  $v(t)$ 를 가지전류  $i(t)$ 와 주어진 초기치를 써서 표현한 것이다. 위의 식은 다음과 같이 정리할 수 있고

$$i(t) = Yv(t)+I(t-\Delta t) \quad (4-15)$$

(4-15)식에서  $I(t-\Delta t)$ 는 history에 대한 전류원이 된다. (4-15)식은 phase가 아닌 모드에 대한 관계식이므로 직접 EMTF에 적용될 수 없다.

그래서 다음의 방법이 사용된다.

- (1) history 전류를 모드 전류로 반영하고 그 결과를 phase 영역으로 변환한다.
- (2) phase 영역에서 전압의 해를 구하고 결과를 다시 모드 영역으로 변환한다.

### 제 3 장. 결 론

본 연구에서는 계통의 주파수 응답으로 부터 그 계통을 동가적으로 표현할 수 있는 동가 시스템을 개발하였다. 이 동가 시스템은 단순한 구조를 가지면서도 넓은 주파수 대역에 걸쳐 원래 시스템과 동일한 특성을 보인다.

또, 제안된 방법으로 주파수 의존 효과가 고려된 동가 시스템을 개발하고, 대규모의 시스템에 대한 적용등이 앞으로 계속 연구되어야 할 것이다.

### REFERENCES

- [1] EMTF Rule Book, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, Apr. 1982.
- [2] A. Clerici and L. Marzio, "Coordinated use of TNA and Digital Computer for Switching-Surge studies : Transient Equivalent of a Complex Network", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. RAS-89, pp. 1717-1726, Nov./Dec. 1970.
- [3] A.S. Morched, "Transmission Line Energization Transients", Division of High Voltage Systems, The Norwegian Institute of Technology, Feb. 1972.
- [4] A.S. Morched, G.A. Tench and P. Kundur, "Accurate Calculation of Assymetrical Fault Currents in Complex Power Systems", IEEE Trans. App. Syst., Vol. PAS-100, pp. 3785-3790, July/Aug. 1981.
- [5] V. Brandwajn, "Damping of Numerical Noise in the EMTF Solution", EMTF Newsletter, Vol. 2 No. 3, pp. 10-19, Feb. 1982.
- [6] H.W. Dommel, "Digital Computer Solutions of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-88, pp. 388-399, Apr. 1969.
- [7] C.W. Gear, "The Automatic Integration of Stiff Ordinary Differential Equations", Proceedings IFIPS Conference, Edinburgh, 1968.
- [8] H. Karrenbauer, "Propagation of Travelling Waves on Overhead Lines for Various Tower Configurations and its Effects on the Shape of the Recovery Voltage for Short Line Faults", Doctoral Dissertation, Munich, 1967 (in German).