

## JMarti 선로 정수 모델링 및 개폐서지 분석

이강석, 박건우, 김철환  
성균관 대학교

### The Modeling of the JMarti Line and Analysis of Switching Surge

Kang-Suk Lee, Keon-Woo Park, Chul-Hwan Kim  
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

**Abstract** - 회로 구성 방법에 따라 등가 회로의 파형이 다르게 나타나 는 경우가 있는데 본 논문에서 분석한 500kV 시스템에서 J.R. Marti가 제안한 주파수 의존 모델과 II-등가회로를 각각 이용했을 경우를 예로 들 수 있다. 본 논문에서는 각각의 파형을 비교 분석하고 500kV 시스템에서 스위치 개폐에 따른 전압, 전류 파형을 분석하므로써 JMarti line의 특성을 제시하였다.

#### 1. 서 론

배전변전소에서 과도현상은 주로 스위칭으로 인해 발생한다. 때문에 이 스위칭으로 인하여 발생하는 과전압은 초고압 송전선로를 설계하는 데에 있어서 중요한 고려 사항 중의 하나가 된다. 500kV 시스템은 해외에서 많은 수요가 있고 우리 나라는 765kV 시스템을 운용할 수 있는 기술을 국산화하여 500kV 송변전 사업에도 적극적으로 참여할 수 있게 되었다. 이러한 초고압 송전에서 과도현상으로 인한 파형의 왜곡은 역률 개선 및 안정성을 위해 최대한 줄일 수 있도록 하여야 할 것이다. 본 논문에서는 500kV 시스템에서 JMarti Model과 II-등가회로를 각각 이용하여 파형을 비교해보고 커패시터 뱅크를 스위치와 함께 결선하여 스위치 개폐에 따른 파형을 비교 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 JMarti Model

J.R. Marti가 제안한 주파수 의존 송전선로의 모델링 방법은 기존 방법에 비해 이전의 방법에서 쉽게 직면하는 계산상의 어려움을 해소시키면서 비교적 정확성을 나타내고 있다. 또한 안정성 문제도 없으며 거의 모든 범위의 주파수 대역과 선로 길이를 적용할 수 있다. 때문에 이 방법을 이용하면 과도 시뮬레이션에서 주파수나 선로 길이에 있어서 어떤 값이 더 적합한지를 고려할 필요가 없다.

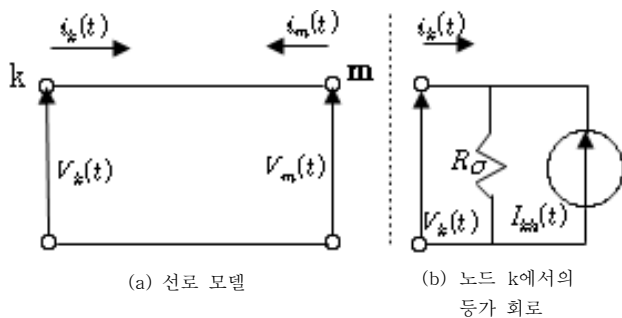
##### 2.1.1 Time Domain에서의 과도 해석

Time domain에서는 frequency domain에서보다 송전선 모델링이 까다로울 수 있지만 스위칭 작동, 비선형 소자 등을 고려한 완전한 시스템의 연구에 있어서 더 유연하고 보편적인 해석이 가능하다.

EMTP에서 다상의 선로는 단상의 회로로 분리되어 연구될 수 있으며 주파수 독립 회로는 이러한 해석에서 가정된다. 이러한 절차는 안정한 선로 구성이나 그 선로의 등가 선로에서 매우 정확하다. 따라서 안정한 회로에서는 보편적으로 주파수 독립으로 가정하고 해석한다.

##### 2.1.2. 단순화된 선로 모델

선로가 상수 파라미터를 가지고 손실이 없다는 가정 아래 선로 방정식은 time domain에서 쓰일 수 있다. 다음 그림 1은 이런 가정 하에서 Dommel이 단순화시킨 선로 모델이다.



〈그림 1〉 선로 모델과 노드 k에서의 등가 회로

그림 1 모델에서  $R_0$ 는 선로 특성 임피던스이고  $I_{kh}(t)$ 는 시간 t일 때의 값을 나타내는 전류원으로서 이 값은 단위시간  $\tau$ 에서 노드 m의 전류와 전압값으로부터 구할 수 있다.

##### 2.1.3 Frequency-Dependent Line Model

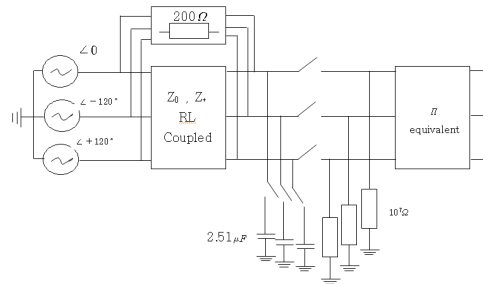
초기에 time domain에서의 주파수 의존 모델을 제시한 사람은 Budner였다. 하지만 그의 모델은 진동이 심하여 정확한 결과값의 도출이 어려웠다. 그의 모델은 Snelson을 거쳐 Meyer와 Dommel에 의해 발전되었다. 그림 1의 노드k에서의 등가회로에서  $I_{kh}(t)$ 를  $b_k(t)/R_0$ 로 대체하면, 다음 식(1)과 같이 나타난다.

$$b_k(t) = \int_0^{\infty} f_m(t-u)a_1(u) + f_k(t-u)a_2(u)du \quad (1)$$

Meyer와 Dommel의 식을 이용하여 대부분의 과도현상 연구에 있어서 신뢰할 만한 결과를 도출할 수 있다. 하지만 이 방법은 계산에 있어서 불편하고 60Hz를 포함하는 저주파에서의 정확성 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 JMarti Model에서는 Meyer와 Dommel이 제시한 모델에서 저항을 같은 주파수 응답 특성을 가진 임피던스로 바꿔 제시하였다. 이 모델에 의해서 위의 식 같은 경우에  $a_2(t)$ 를 포함한 항이 소거되면서 계산상의 어려움을 상당히 해소시킬 수 있게 된다. 하지만 그림에도 불구하고 여전히 복잡한 컨벌루션을 포함한다는 단점을 지니고 있다.

##### 2.2 Switching surge와 Capacitor bank

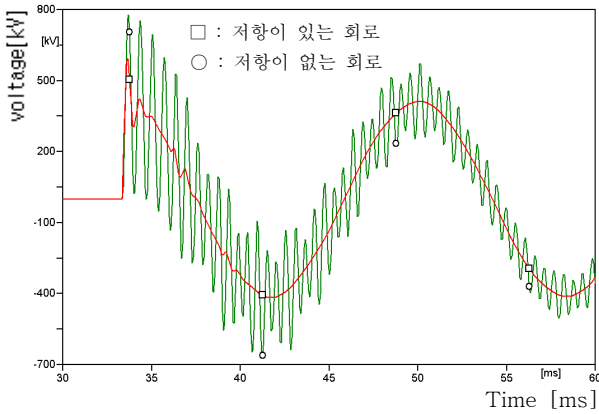
본 논문에서 다루는 회로에서 나타나는 개폐서지는 3상을 동시 투입하지 않을 때의 서지로서 차단기의 각상 전극은 정확히 동일한 시각에 투입되지 않고 근소한 시간 차이를 가지며 투입된다. 이 차이가 좀 심한 경우에는 상규 대기전압 피크치의 3배 전후의 서지가 발생할 수 있다. 이러한 경우 서지 발생을 억제하는 방법에는 여러 가지가 있다. 다음 그림 2에서 볼 수 있는 것과 같이 회로에 저항을 병렬로 연결함으로써 서지 발생을 억제하였다. 다음 그림 2는 시뮬레이션에 이용할 회로도도 나타낸 것이다.



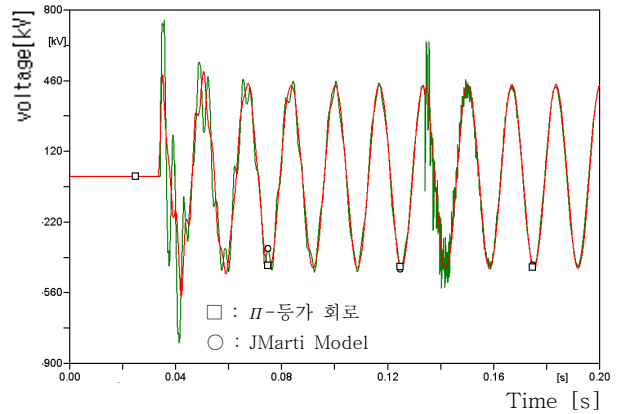
〈그림 2〉 시뮬레이션에 이용할 회로도

다음 그림 3에서 고조파가 매우 심하게 나타나는 파형은 저항을 설치하지 않은 회로의 것이다. 그에 비하여 저항을 설치한 회로의 파형은 초기에 스위치를 작동 시간을 제외하고 파형의 일그러짐이 별로 심하지 않은 것을 볼 수 있다.

커패시터 뱅크는 스위치와 함께 직렬 연결되어 있는데 만약 커패시터가 연결되어 있지 않은 경우 직렬 연결되어 있는 스위치가 닫히는 순간 전압의 파형은 사라진다. 하지만 전류는 커패시터 뱅크의 설치 여부와 관계없이 일정하게 흐르다가 스위치가 닫히는 순간 큰 진폭을 보이며 진동하기 시작하는데 진폭의 크기는 커패시터 뱅크가 연결된 회로에서 더 크게 나타난다.



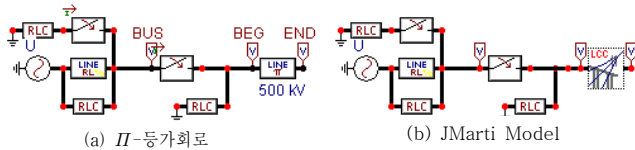
〈그림 3〉 저항의 설치 여부에 따른 과도 전압의 변화



〈그림 6〉 II-등가회로와 JMarti Model의 전압 파형 비교

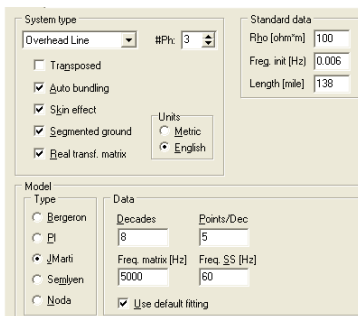
### 2.3 JMarti Model과 II-등가회로의 비교

다음 그림 4는 500kV 시스템에서의 II-등가회로와 JMarti Model을 각각 나타낸 것이다.



〈그림 4〉 II-등가회로와 JMarti Model을 각각 이용한 등가회로

II-등가회로에서는 R, L, C의 값만 각각 입력하면 되는 반면에 JMarti Model은 실제 선로를 설치했을 때의 구성에 대한 값을 입력해야 한다. 다음 그림 5는 ATPDraw에서 사용되는 JMarti 변수 입력창이다.



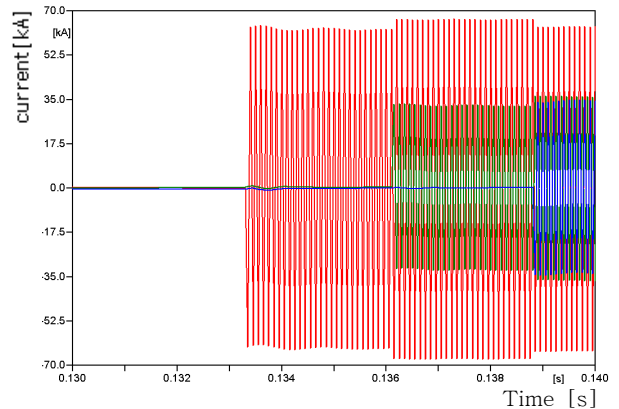
#	Ph.no.	Rin	Rout	Rleis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[inch]	[inch]	[ohm/mile DC]	[feet]	[feet]	[feet]	[inch]	[deg]	
1	1	0.2178	0.801	0.05215	-20	50	50	18	0	2
2	2	0.2178	0.801	0.05215	0	77.5	77.5	18	0	2
3	3	0.2178	0.801	0.05215	20	50	50	18	0	2
4	0	0	0.193	2.61	-12.9	98.5	98.5	0	0	0
5	0	0	0.193	2.61	12.9	98.5	98.5	0	0	0

〈그림 5〉 ATPDraw를 이용한 JMarti Model 사용 방법

ATPDraw에서는 도선의 반경부터 선로를 설치하는 탑의 구성에 관련된 수치들까지 입력하고 접지, 포피효과 등 실제 선로를 구성에 있어서 필요한 값들을 적용할 수 있다.

그림 4의 각각의 회로에서 II-등가회로와 JMarti Model과 직렬 연결된 스위치 왼쪽의 probe에서 측정하면 JMarti Model이 이용된 회로의 파형에서 고조파 성분이 더 적게 나타난다는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 다음 그림 6에서와 같이 각각의 등가회로에서 왼쪽 끝단의 파형을 관찰하면 오히려 JMarti Model의 파형이 II-등가회로보다 고조파 성분을 많이 포함하는 것을 볼 수 있다. 특히 파형의 일그러짐은 초기에 스위치를 작동시켰을 때보다 커패시터 뱅크와 연결된 스위치를 작동시키는 순간에 더 심하게 나타난다. 또한 a, b, c 상 순서로 스위치가 개폐될 때 고조파 성분은 a상에서 가장 많이 나타나지만 그 지속 시간의 길이는 결국 3상이 모두 비슷하다는 것을 확인할 수 있다. 다음 그림6은 II-등가회로와 JMarti Model의 전압 파형을 비교한 것이다.

전류 파형은 초기에 스위치가 작동될 때 진폭이 약간 진동한 후에 3상 모두 피크값이 400암페어 안팎으로 비교적 일정하게 진동하다가 커패시터와 연결된 스위치가 작동하면 a상의 경우 진폭이 100배 이상의 큰 폭으로 증폭되면서 주기도 짧아진다. b상과 c상도 각각 증폭되는데 그 크기는 a상의 1/2 정도로 이 때 b상과 c상의 스위치가 작동된 후에 좀 더 진폭이 커지는 모습을 보인다. 다음 그림 7은 커패시터와 연결된 스위치가 작동하는 순간 각 상의 전류 파형 변화를 나타낸 그래프이다.



〈그림 7〉 커패시터와 연결된 스위치가 작동할 때 전류 파형의 변화

## 3. 결 론

J.R. Marti의 주파수 의존 송전선로 모델링은 이전의 방법에서 직면하는 계산상의 어려움을 해소시키면서도 비교적 정확하다. ATPDraw를 이용한 II-등가회로와의 파형 비교에서 JMarti Model은 II-등가회로에 비해 많은 고조파 성분을 포함하는 것으로 나타나 3상 회로에서의 안정적인 송전에 있어서는 불리해 보이지만 이는 실제 적용되는 변수를 고려한 결과로 II-등가회로보다 송전선에 있어서 더 정확한 값을 나타내고 있는 것으로 분석할 수 있다.

### [참 고 문 헌]

[1] J. R. Marti "ACCURATE MODELING OF FREQUENCY DEPENDENT TRANSMISSION LINES IN ELECTROMAGNETIC TRANSIENT SIMULATIONS", IEEE TRANS. PAS, VOL.101, NO.1, 1982