

다 단자망 축약 이론을 이용한 TRV 해석

은 제 영\*  
한국전기연구소

문 영 현\*\*  
연세대 전기과

박 동 우\*\*  
한국전기연구소

TRV analysis by using multi - port equivalent

Jae Young , Yoon\*  
KERI\*

Young Hyun , Moon\*\*  
Yonsei Univ\*\*

Dong Wook , Park\*\*\*  
KERI\*\*\*

Abstracts

The simplified equivalent by using the short circuit impedance has been used for analyzing the prospective transient recovery voltage of the large power system.

But it sometimes generates untorelable error in the rate-of-rise of TRV when using the Thevenin equivalent source. This paper provides the new equivalent by using the multi-port theory.

The application of the new method to the sample system gives satisfactory accuracy compared with the short-circuit equivalent.

1. 서론

이상차단 (Ideal Interruption) 시 차단기 극간에 발생하는 과도회복 전압을 고유과도회복 전압 (Prospective Transient Recovery Voltage : 이하 고유 TRV) 이라 하는데, 차단전류의 크기와 함께 차단성공 여부에 큰 영향을 미친다. 따라서 전력계통에서의 고유 TRV 해석기법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 근래에는 과도현상해석용 프로그램인 BMTP를 주로 이용하고 있다.

그런데 전력계통 전체를 모의한다는 것은 계산기 용량 및 인력면에서 너무 비효율적이므로 대형계통을 축약시켜 간략화 하지 않으면 안된다. 이러한 목적으로 근래까지 단락임피던스를 이용한 축약 기법이 주로 활용되어 왔으나, Thevenin 등가전원 사용시 정상상태 해석이 달라지므로 경우에 따라

서는 큰 오차를 발생시킬 수도 있다.

따라서 본 논문에서는 다 단자망 이론을 이용해서 축약 대상계통의 내부 결선 상태를 고려함으로써 보다 정확한 축약기법을 제시하였다. 또한 간단한 대상계통에 있어서 위의 축약기법 적용시의 고유 TRV 에 대한 BMTP 해석결과를 분석함으로써 새로운 축약기법의 효용성을 입증하였다.

2. 고유 TRV

회복전압 (Recovery Voltage) 이란 전류 차단 직후 차단기 양극간의 전압차를 말하며, 크게 수 KHz 의 주파수 성분을 가지는 과도성분과 60Hz 정상상태 주파수를 가지는 상용주파성분으로 나뉘어 지는데 수 ms 이내에 소멸하는 고주파수의 과도성분 회복전압을 과도회복전압 (Transient Recovery Voltage) 이라고 한다.

이러한 과도회복전압에 영향을 미치는 요소는 크게 나누어 다음과 같다.

- 고장종류 (3상지락, 3상단락, SLF .....)
- 계통특성 (고장전류, 선로특성 임피던스, 연결된 선로회선수 .....)
- 차단기특성 (아-크 전압, 소호매질, 플라스마 도전성 .....)

위의 요소중 차단기의 특성을 무시- 이상차단기 (투입시 R=0, 개방시 R=∞)에 의해 전류 0 점에서 순시차단 - 하고 계통 특성 및 고장종류에 의해서만 발생하는 과도회복전압을 고유 TVR 라 한다.

3상 회로의 경우에는 3상중 첫번째 차단상 (제1상) 에서 발생하는 고유TVR가 다른 두상에 비해서 더 가혹하기 때문에 별도의 언급이 없는한 제1상 차단시에 나타나는 전압을 말한다.

이러한 고유 TVR 는 초기부분인 100-200 $\mu$ s 부분에서는 높은 과도전압 상승률로 인한 열적 차단실패 (Thermal Failure) 가 야기 될 수 있고, 파고치 부근에서는 높은 과도전압이 차단기 극간에 가해지므로 극간 절연 내력 회복능력이 이에 미치지 못하는 경우 절연실패 (Dielectric Failure) 로 인한 차단실패가 발생하므로 차단기의 성능및 나아가서는 계통의 안정성에도 큰 영향을 미친다.

### 3. 계통 축약 기법

실제의 전력계통은 아주 복잡한 대형 시스템이므로 과도현상해석시 대상계통 전체를 모의하여 컴퓨터로 해석한다는 것은 실제로 거의 불가능 하다. 따라서 허용오차 범위내에서 정확한 해를 구할수 있도록 일부계통을 간략화하지 않으면 안된다.

#### (1) 단락 임피던스 축약법

그림 1-1 과 같은 해석 대상 계통에서 F 점에서의 과도현상을 해석하고자 하는 경우 계통 - D 지역은 영향이 크므로 상세히 모의 할 필요가 있으나 몇단계의 임피던스 비정합점을 지난 이후 계통인 계통-R 지역의 영향은 그다지 크지 않으므로 그림 1-2와 같이 근사축약 시키는 방법이다. 이 방법은 경계모선의 단락 전류를 이용하여 등가 임피던스를 구하는 방법으로서 다음과 같이 R, L, C 값을 구한다.

모선 A, B에서의 3상 고장시 계통-R로부터 계통-D로 유입되는 고장전류  $I_a$ ,  $I_b$  를 구한다.

- 다음식에 의해 인덕턴스를 구한다.

$$L = V_s^2 / WP$$

단,  $V_s$  : 계통 선간전압 [KV]

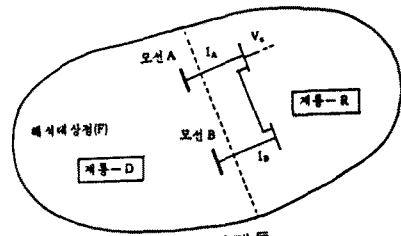
$W$  : 각 주파수

$P$  : 유입 단락용량[MVA]= $\sqrt{3}V_sI$

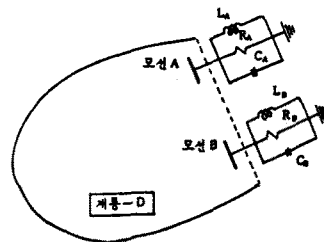
· 캐패시턴스는 그 지점의 TRV 주파수가 IEC - 56 에서 규정하고 있는 주파수와 동일하다는 전제조건에서 다음과 같이 구한다.

$$C = (2.35 \times t_3)^2 / [(2 \times 3.14)^2 L]$$

$t_3$  : 2 - Parameter TRV 파고시간



1-1 대상계통



1-2 축약계통

그림 1. 대상계통 및 축약계통

- 저항은 R-L-C 병렬회로의 전폭율이 IEC - 56에서의 전폭률과 일치하도록 선정한다.

$$R = a\sqrt{L/C} \quad a : \begin{matrix} 2 \text{ (변전소)} \\ 7 \text{ (발전소)} \end{matrix}$$

그림 1-2 에서 해석 대상 지점 (F) 의 전원은 정상상태 Thevenin 등가전압원 혹은 고장전류원을 사용할수 있다.

#### (2) 다 단자망 축약법

그림 2 의 해석 대상 계통에 대해서 계통-R 에 대한 전류 전압 관계는 선형 계통에 대한 다 단자망 이론을 적용 시킴으로서 다음과 같이 나타낼수 있다.

다 단자망 축약 이론을 이용한 TRV 해석

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_0^1 \\ v_0^2 \\ \vdots \\ v_0^m \end{pmatrix}$$

단,  $[v_1^0, v_2^0, \dots, v_m^0]$  는 계통-R 의 내부전원에 의한 개방단자 전압  $[Z]$  는 단자 임피던스 행렬

- 개방 단자 전압 계산

개방단자 전압  $[v_1, v_2, \dots, v_m]$  은 계통-D 와 계통-R 을 연결하는 경계 선로를 개방 시켰을 때 계통-R 의 경계모선에 나타나는 정상 상태 전압으로서 계통-R 에 대해서 조류계산을 행함으로써 계산할 수 있다.

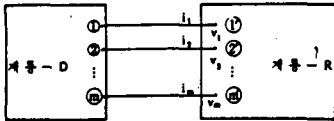


그림 2. 해석대상 계통

- 단자망 임피던스 행렬  $[Z]$  계산 알고리즘

• 계통-R 에 포함되어 있는 모든 독립전원을 제거한다.

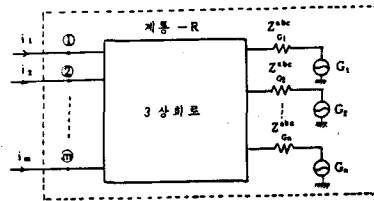
• 행렬  $[Z]$  의 요소  $Z_{ij}$  는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{ij} = \frac{v_i}{i_j} \quad i_1 = i_2 = \dots = i_m = 0, \quad i_j \neq 0$$

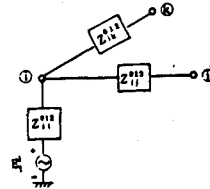
즉 j 모선에 단위 전류 주입시 i 모선 전압이  $Z_{ij}=Z_{ji}$  이고 j 모선 전압이  $Z_{jj}$  이다.

- 3상 등가전압원 구성 알고리즘

3상 전력계통에서 그림 3-1 의 계통-R 에 대한 모선 i 를 중심으로 한 대칭성분 등가회로를 그려 보면 그림 3-2와 같다.



3-1. 축약대상 3상 회로



3-2. 모선 i 를 중심으로한 대칭성분 등가회로

그림 3. 3상계통

4. 적용 예

그림 4 의 대상계통에 대해서 위에서 기술한 축약 기법들을 적용하여 고유 TRV 를 해석 하였다.

(1) 해석 조건

가) 고장종류 : BUS 2에서의 3상 지락 고장

나) 축약지점 :

CASE I: BUS 1 // BUS 9 이후

CASE II: BUS 7 // BUS 9 이후

(2) 해석 결과

표 1. 고유 TRV 해석 결과

CASE 별	축약 방법	파고치(KV)	오차 %	초기상승률 (KV/μS)	오차 %
전 계통	전 계통	- 616	기준	0.5	기준
CASE I-1	단락 임피던스 법 전원: Thevenin 전압원	- 590	4.3	0.7	28
CASE I-2	단락 임피던스 법 전원: 전류원	- 600	2.6	0.5	0
CASE I-3	다 단자망 이론 전원: 전압원	- 606	1.6	0.5	0
CASE II-1	단락 임피던스 법 전원: Thevenin 전압원	- 603	2.1	0.7	28
CASE II-2	단락 임피던스 법 전원: 전류원	- 606	1.6	0.5	0
CASE II-3	다 단자망 이론 전원: 전압원	- 610	1.0	0.5	0

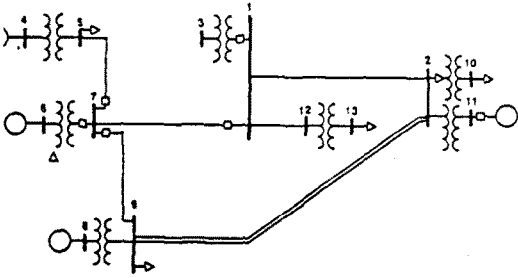


그림 4. 해석 대상 계통

위의 해석결과에서 Thevenin 전압원을 이용한 단락 임피던스 축약방법만 초기 상승률이 다르고 나머지 두 방법은 모두 동일하다. 그 이유는 Thevenin 전압원을 이용한 단락 임피던스법은 축약 계통-R 내부의 상호 결선상태를 무시했기 때문이다.

파고치의 관점에서 다단자망 축약방법이 실제계통해석시와 가장 정확하며 CASE I-1 인 경우를 제외하고는 3% 미만의 오차를 보였다. 또한 가까운 거리의 축약시 (CASE I) 보다 먼 거리의 축약시 (CASE II) 실제계통 해석값과 보다 더 가까움을 알 수었다.

5. 결론

본 논문에서는 종래의 전력계통 고유 TRV 해석시 적용되어져 온 단락 임피던스 축약법은 Thevenin 전압원 사용시 고유 TRV 의 초기 상승률에서 큰 오차가 발생하는 단점을 보완하기 위하여 선형계통의 다단자망 이론을 이용한 새로운 축약기법을 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 종래의 단락 임피던스 축약법은 Thevenin 등가 전원 사용시 고유 TRV 상승률에서 큰 오차가 발생하는 단점이 있다.

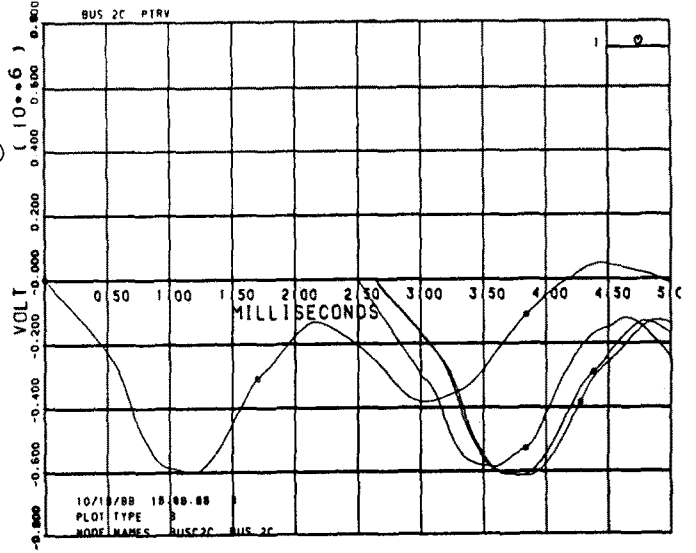


그림 5. 전계통과 CASE I TRV 파형

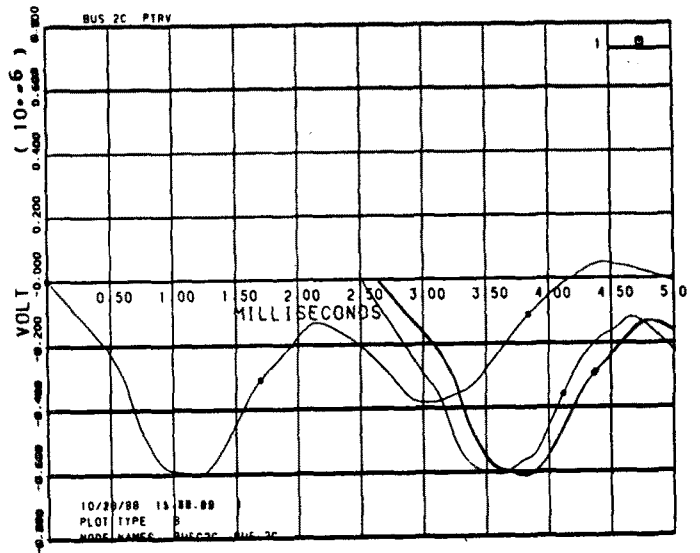


그림 6. 전계통과 CASE II TRV 파형

(2) 단락 임피던스 축약시에는 전류 주입법을 사용하는 것이 바람직하다.

(3) 축약 경계 지점이 고장지점에 가까울 수록 파고 부분의 오차가 커진다.

(4) 다단자망 이론을 이용한 축약 기법 적용시 단락 임피던스법에 비해 정확한 결과를 얻을 수 있다.

[참고문헌]

1. O.Naef , C.P.Zimmerman, "Proposed Transient Recovery Voltage Ratings for Power Circuit Breakers."
2. 전력계통 과도 회복전압 조사전문위원회 보고서, 일본, 1985
3. J.L .Diesendorf , S.K.Lowe ,  
"Determination of peak Transient Recovery Voltage"
4. A.S.Morched , V.Brandwajn ,  
"Transmission Network Equivalents for Electromagnetic Transients" ,  
IEEE PAS , PP. 2984-2984 , 1983
5. 한국전기연구소 대전력연구실 ,  
"EMTP를 이용한 TRV해석연구, 1986