

전력용 변압기에 침입하는 switching surge computer simulation에 관한 연구

김 길 상 ° , 김 정 부 , 정 상 진  
(한국전기연구소) ( 한국 전력 공사 )

A computer simulation for the switching surges subjecting to electric power transformers

Kil Sang, Kim , Jeong Boo, Kim Sang Jin, Chung  
( K. E. R. I. ) ( K. E. P. C. O. )

It is well known that switching overvoltages in the electric power system can damage electric power apparatus. To investigate switching overvoltages, electric power system has been modeled using mathematical equations. Using developed model, switching overvoltages in the transformer terminal have been computed and analysed.

1. 서론

전력계통에서 개폐기의 동작이나 고장발생시 이상 과도전압이 발생하게 된다. 이러한 이상과도전압은 개폐기나 고장발생 단독에 의해 나타나는 것이 아니고 전체 계통과의 상관관계가 밀접히 있게 된다.

특히 과도전압의 발생기간은 상당히 짧은 기간일지라도 전력기기에 손상또는 절연파괴를 심각히 일으킬 가능성이 있게 된다. 그러므로 전력기기의 안정적인 운영을 위해서는 전력계통에서 일어나는 과도 이상전압을 파악하고 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다.

이러한 이상전압을 계산하기 위해서 계통을 수학적 방정식에 의한 Model로 나타내어 Digital Computer에 의해 해를 구할 수 있다. 특히 한국전력공사의 22.9 KV 배전계통에서 중성선 다중접지 및 재폐로 방식 적용에 따라 실배전계통에서 빈번한 1선 지락발생으로 개폐기의 동작빈도가 자주 있게 된다.

따라서 이러한 1선지락 고장발생 및 개폐동작에 따라 전력용 변압기 단자에 과도 이상전압이 발생하게 된다. 이것은 변압기 단자에 전압크기가 크지 않더라도 Rising Time이 빠르고 또한 반복적으로 발생하면 권선의 중간 절연이 파괴될 수 있다. 그러므로 현 배전계통에서 1선지락 발생 및 개폐기 동작시 변압기 단자에 걸리는 이상전압파형의 Rising Time과 회수를 Computer Simulation에 의해 검토함으로써 전력용 변압기 사고대책연구의 일환으로 수행코자 한다.

2. 본 문

2.1. Schematic Diagram

그림 (1)은 일반적인 배전계통의 단선도를 나타낸다.

사고변압기의 평균 Feeder수는 5개 전후가 되며 대부분 인출부는 Cable을 통해 가공선으로 이어진다. Cable길이는 수십m에서 수 Km까지 분포되어 있다. 본 연구에서는 Feeder수 1개, 2개로 cable 200m, 1Km 가공선 5Km, 30Km에 대하여 분석하였다.

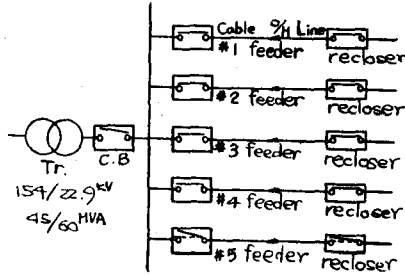


그림 1. 배전계통의 단선도

2.2. 등가회로 (초기조건 해석등)

그림 (2)와 같이 등가회로는 Cable을  $10\pi$  Section, 가공선은  $10\pi$  Section으로 나타내었고, 1선지락고장회로, 고장 및 부하시 재폐로 회로가 검토의 대상으로 하였다. 선로의 Impedance가 변압기의 무부하 Impedance보다 훨씬 작으므로 변압기는 L, C 회로로 Modelling하였다.

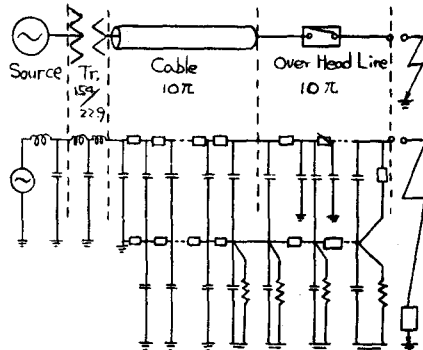
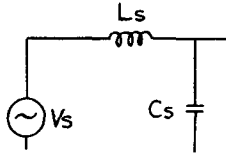


그림 2. Single Feeder, Single Phase  $\pi$  등가회로

각 회로의 정수는 아래와 같다.

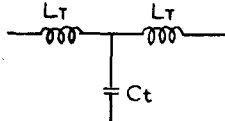
1) Source Part

- (1) Source Voltage ( $V_s$ ) =  $22.9\sqrt{2}/\sqrt{3}$ [kV]
- (2) Source Inductance ( $L_s$ ) = 0.505[mH]
- (3) Source Capacitance ( $C_s$ ) = 0.090[ $\mu$ F]



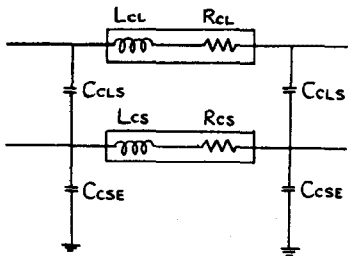
2) Transformer Part

- (1) Transformer Equivalent Inductance ( $L_T$ ) = 2.526[mH]
- (2) Transformer Equivalent Capacitance ( $C_t$ ) = 0.150[ $\mu$ F]



3) Cable 10 $\pi$  Equivalent Parameters (per meter)

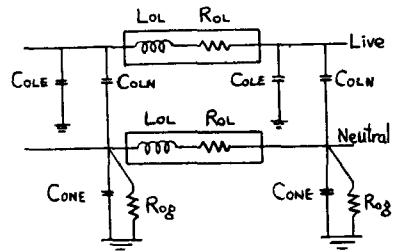
- (1) Live Line Impedance  
 $R_{cl} = 0.2175$ [m $\Omega$ ]  
 $L_{dl} = 0.7913$ [ $\mu$ H]
- (2) Sheath Impedance  
 $R_{cs} = 1.0566$ [m $\Omega$ ]  
 $L_{cs} = 0.5935$ [ $\mu$ H]
- (3) Live to Sheath Capacitance  
 $C_{cls} = 0.3297$ [nF]
- (4) Sheath to Earth Capacitance  
 $C_{cse} = 0.2000$ [nF]



1) Overhead Line 10 $\pi$  Equivalent Parameters (per meter)

- (1) Live Line Impedance  
 $R_{ol} = 0.1243$ [m $\Omega$ ]  
 $L_{ol} = 1.8358$ [ $\mu$ H]
- (2) Neutral Line Impedance  
 $R_{on} = 0.6961$ [m $\Omega$ ]  
 $L_{on} = 1.9608$ [ $\mu$ H]
- (3) Live to Neutral Capacitance  
 $C_{oln} = 0.0242$ [nF]
- (4) Live to Earth Capacitance  
 $C_{ole} = 0.0081$ [nF]
- (5) Neutral to Earth Capacitance  
 $C_{one} = 0.0074$ [nF]

5) Ground Resistance  $R_g = 5.0$  [ $\Omega$ ]/[km]



고장점 Model은 고장점 저항을 1 $\Omega$ , 100 $\Omega$ 으로 하고, 고장점 Inductance를 2 $\mu$ H로 모의하였으며, 재폐로시 차단기부를 5 $\mu$ H의 Inductance로 모의하였다.

3. 상태변수에 의한 System 방정식 구성

그림(3)의 등가회로는  $\pi$ 형회로가 대부분이므로 기본적인  $\pi$ 형 회로의 상태방정식을 구성해보면 다음과 같다.

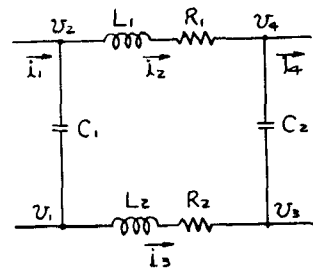


그림 3. System 등가회로

$$di_2/dt = (U_2 - U_4 - R_1 i_2) / L_1 \text{ : 상태변수 } i_2 \text{ 에 대한식}$$

$$dU_2/dt = (i_1 - i_2) / C_1 + dU_2/dt \text{ : 상태변수 } U_2 \text{ 에 대한식}$$

상태방정식은 L에 흐르는 전류와 C에 걸리는 전압을

상태변수로 하는 미분방정식이므로, 상태변수를 독립적으로 정의할 수만 있으면 상태방정식을 구성할 수 있다. 그림(3)와 같은 System 등가회로는 각 Branch가 L, C, R-I직렬, C-R병렬 중의 하나로 구성되어 있으므로 상기 방법에 의해 상태방정식으로 용이하게 표현할 수 있다.

4. Runge-Kutta-England 법에 의한 Computer 해석 Computer Simulation은

- 1) 1선 지락 발생시
- 2) 1선 지락 재폐로시
- 3) 1선 지락 제거후 부하재폐로시

등 3 경우의 과도상태에 대해서 수행하였다.

각종 선로조건에 따른 Computer 해석 결과는 1), 2), 3)항에 대해 각각 그림(4), 그림(5), 그림(6)과 같고, 전력용 변압기의 부하측 단자에 걸리는 전압의 최단 Rising Time은 표(1)과 같이 나타났다.

5. 결과검토

(1) 1선 지락 발생순간에 변압기 단자에 걸리는 전압의 Rising Time은 17 $\mu$ S로 표준 Switching Surge파형의 250 $\mu$ S보다도 훨씬 빠르고, 파형발생도 반복된다.

(2) 고장지속시 Reclosing할때 변압기 단자에 걸리는 전압의 Rising Time도 7 $\mu$ S로 상당히 빠르고 반복적이 된다.

(3) 고장 제거후의 Reclosing할때 변압기 단자에 걸리는 Rising Time도 7 $\mu$ S로 상당히 빠르고 반복적이다.

(4) 1선지락사고 발생시 전압상승율 보다는 고장지속 및 고장제거후 변전소 C.B가 Reclosing할때 변압기 단자전압 상승율이 크게 된다. 이는 재투입전 Feeder의 전압.전류가 0인 상태에서 재투입하고 Feeder의 전압.전류의 반사로 인한 전압상승율이 크게 되기 때문이다.

<표1> 변압기 2차측에 가해지는 Transient Voltage 의 Rising Time

Transient mode	선로 길이	Rising Time	Feeder 수
S-L-G Fault *1)	5km	17 $\mu$ s	2
	20km	80 $\mu$ s	
	30km	100 $\mu$ s	
	20km	70 $\mu$ s	1
Fault Reclosing *1)	5km	7 $\mu$ s	2
	20km	9 $\mu$ s	
	30km	9 $\mu$ s	
	20km	9 $\mu$ s	1
Load Reeclosing *2)	200m	8 $\mu$ s	2
	1km	9 $\mu$ s	
	1km	7 $\mu$ s	1

주 \*1) : 가공선의 선로길이임.

\*2) : Cable의 선로길이임.

6. 향후 연구계획

앞으로는 본 연구에서 나타난 바쁜 초기 과도전압파형을 보다 세부적으로 검토해 볼 계획이다.

References

(1) R.E.SCRATON  
"Estimation of the truncation error in the Runge-Kutta and allied processes"  
Computer Journal, Vol.7, Jan. 1965

(2) R.ENGLAND  
"Error estimates for Runge-Kutta type solutions to systems of ordinary differential equations"  
Computer Journal, Vol.12, Nov. 1969

(3) J.D.LAMBERT  
"Computational methods in ordinary differential equations"  
John Wiley Sons, Chapter 4, pp.114-161

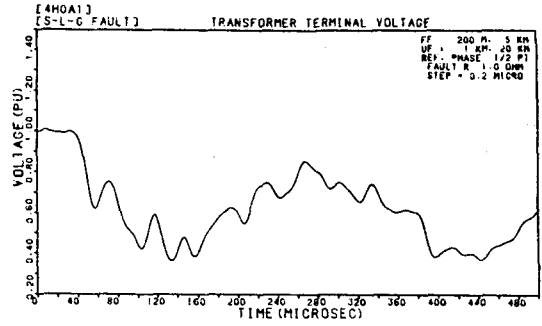


그림 4-1

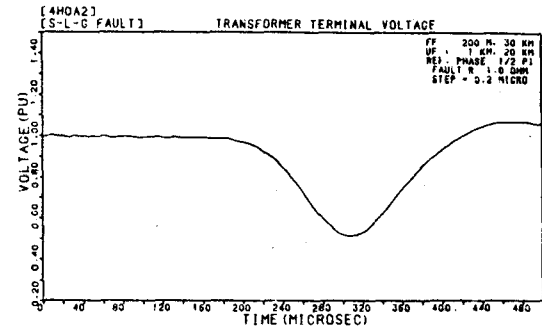


그림 4-2

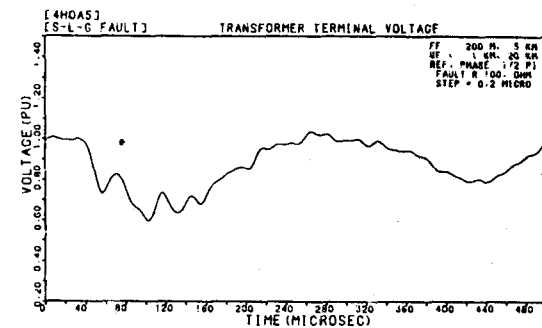


그림 4-3

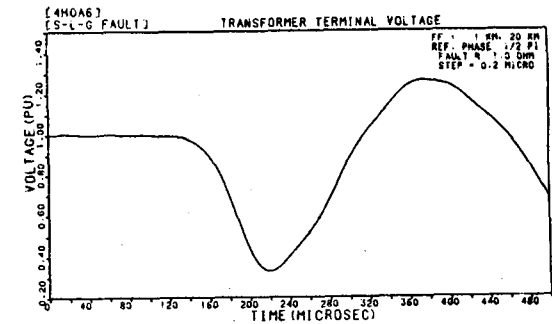


그림 4-4

그림 4 1선 지락 발생시 변압기 부하측 과도전압파형

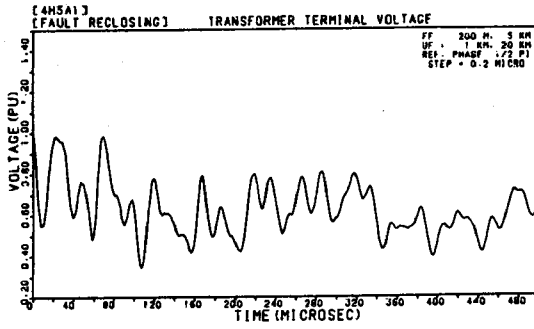


그림 5-1

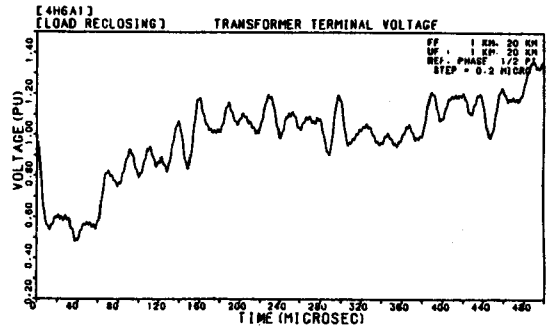


그림 6-1

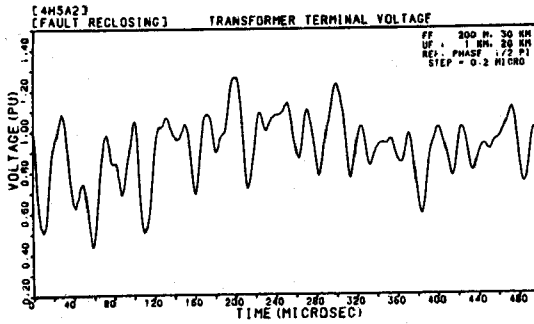


그림 5-2

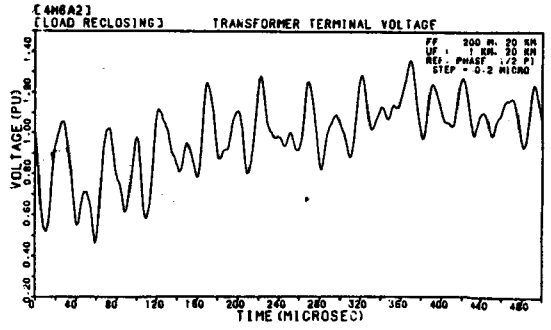


그림 6-2

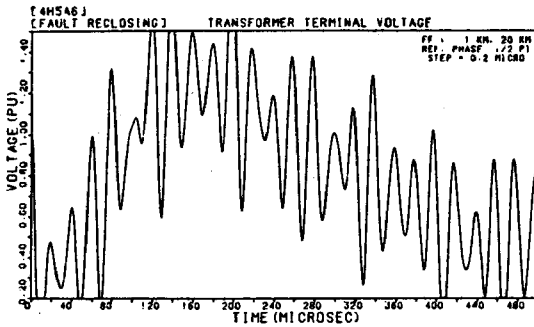


그림 5-3

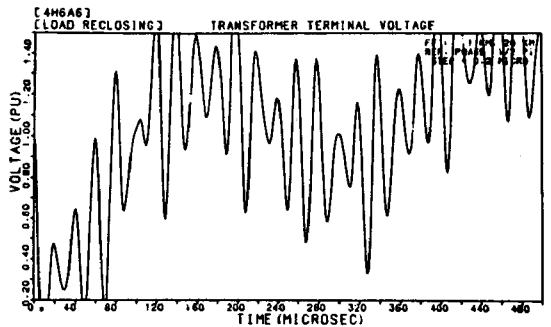


그림 6-3

그림 5 고장 재폐로시 변압기 부하측 과도전압파형

그림 6 부하 재폐로시 변압기 부하측 과도전압파형