

단거리송전선에서 투입저항이 없는 차단기적용에 관한 연구

論文

53A-1-5

The Study on Application of Circuit Breaker without Closing Resistor in Short Transmission Line

金正培* · 鄭永煥** · 宋元杓***

(Jung-Bae Kim · Young-Hwan Chung · Won-Pyo Song)

Abstract - In this paper, the analysis result of the switching surge in substation including GIS(Gas Insulated Switchgear) has been described using the EMTP(Electro Magnetic Transient Program) program. After performing the modeling of the input data, we have reviewed the energization overvoltages of GCB(Gas Circuit Breaker) without closing resistor in 345kV network, according to the conditions of simultaneously operating switch and statistically operating switch. Firstly, it can be known that the energization overvoltage of single line is higher than that of parallel energized line. Secondly, the maximum energization overvoltage obtained in statistics switch is higher than one in simultaneous switch. From these results, it can be known that the phase-to-earth energization overvoltages of α - β section are less than 2.2 p.u when closing resistor is eliminated. Therefore, it is possible to consider the circuit breaker eliminated the closing resistor in α - β section.

Key Words : GIS, EMTP, switching surge, energization overvoltage, closing resistor

1. 서 론

고전압 전력계통에서 과전압은 피할 수 없는 현상으로 경제적인 계통설계 및 운용을 위해서는 이에 대한 검토가 선행되어야 하며, 계통에서 발생하는 과전압은 외부원인에 의해 발생하는 뇌과전압과 내부원인에 의해 발생하는 일시적과전압 및 개폐과전압으로 분류할 수 있다. 그런데 이러한 과전압은 계통에 설치된 기기정격전압 또는 상시운전전압보다 훨씬 높기 때문에 절연파괴에 의한 사고의 중요한 원인이 된다. 따라서 기기 및 계통에 대한 효과적인 절연대책을 수립하기 위해서는 과전압의 크기 및 파형을 정확하게 파악해야 한다. 본 논문에서는 EMTP를 이용하여 실제 GIS(Gas Insulated Switchgear : 가스절연개폐장치)설계에 반영한 사례를 서술하고자 한다.

일반적으로 한전에서는 345kV 계통의 투입씨지를 2.3 p.u 이하로 억제하기 위해 345kV 전력계통에 사용되는 모든 선로보호용 차단기에 투입저항을 설치하도록 요구하고 있다. 적용된 투입 저항치는 투입씨지 뿐만 아니라, 재투입 씨지까지 억제할 수 있도록 고려하여 결정된 값으로서, 520 Ω 으로 선정되었으며, 현재 362kV GCB에는 각 상별 극간에 해당 저항치만큼의 투입저항이 조립되어있다. 이 투입저항은 차단시에는 작용되지 않고, 투입시에만 작용되도록 설계되어 투입씨지를

억제하는 효과를 발휘하고 있다.

그러나, 최근 국내 345kV 계통의 네트워크화가 이루어짐에 따라 선로길이가 비교적 짧거나, 운전조건이 특수한 경우가 존재하여, 투입저항 필요여부를 재검토할 필요가 있다고 판단된다. 특히 본 논문에서 검토된 구간(α - β 구간으로 약칭)은 345kV 2회선 송전선이 약 46km로서 매우 짧은 거리이며, 운전조건 역시 타선로와는 다른 조건에서 운전되므로 투입저항이 없는 차단기의 적용이 예상되었다.

따라서, 투입저항이 없이도 차단기의 차단성능 및 계통의 절연협조면에서 이상이 없는지를 판단하기 위해 EMTP를 이용하여 상계통에 발생될 투입씨지에 대해 해석하였다. 해석결과를 토대로, 상계통에 설치될 차단기의 투입저항 설치유무에 대해 검토하였다.

2. 본 론

2.1 대상계통 모델링

그림 1은 해석대상인 α - β 구간의 단선도이다. α T/P와 β S/S간 선로거리는 약 46km이며, 상도체는 ACSR 480mm²×2Bundle, 가공지선은 ACSR 120mm²×2Bundle로써 2회선으로 구성되어 있다. 표 1에 적용된 케이블의 정수를 나타내었다 [1]. 또한 실제 구간에는 많은 종류의 절탑이 설치되어있으나, 그림 2의 한전표준절탑사양을 적용하였으며[2], 대지고유저항은 300 Ω -m, 변환행렬주파수는 500Hz를 적용하여 선로정수를 구하였다. 출력은 비연가 주파수 독립 분포정수 선로(K.C.Lee)모델로 도출하였다.

해석대상의 전원은 다음과 같은 가정하에 모의되었다. (1) 전원모델은 평형3상 이상전압원으로 모의하고, 대상계통의 등

* 正 會 員 : (株)曉星 重工業研究所 首席研究員
** 正 會 員 : (株)曉星 重工業研究所 先任研究員
*** 正 會 員 : (株)曉星 重工業PG 遮斷機擔當 理事
接受日字 : 2002年 9月 23日
最終完了 : 2003年 12月 9日

가전원의 전압값은 정상상태에서의 최고전압이 1 p.u가 되도록 조정하였다. (2) 부하 등의 썬지 뎀핑성분은 무시하였으며, (3) 전원임피던스는 단락용량에 상응하는 등가 리액턴스로 모의하였다. 이러한 기본가정하에서 등가회로 계산은 아래와 같이 실시하였다.

먼저, α T/P는 양수발전소로서 350MW×2기로 구성되어있다. 따라서, ZBase는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{Base} = (345)^2 / 700 = 170\Omega$$

α T/P의 임피던스는 수력발전소의 평균임피던스인 0.2 p.u와 345kV 변압기의 평균임피던스인 0.3 p.u의 합으로 이루어지며, 이를 각각 계산하면 아래와 같다.

$$Z_{Gnr} = 170 \times 0.2 = 34\Omega$$

$$Z_{Trn} = 170 \times 0.3 = 51\Omega$$

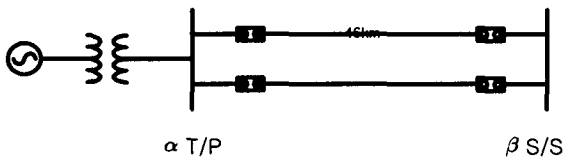


그림 1 α-β 구간의 단선도

Fig. 1 Single line diagram of α-β section

표 1 전선의 규격[1]

Table 1 Standards of overhead line

공칭단면적 [mm ²]	외경 [mm]		전기저항 [Ω/km]
	Al	St	
480	29.61	7.41	0.05994
120	17.5	10.5	0.25

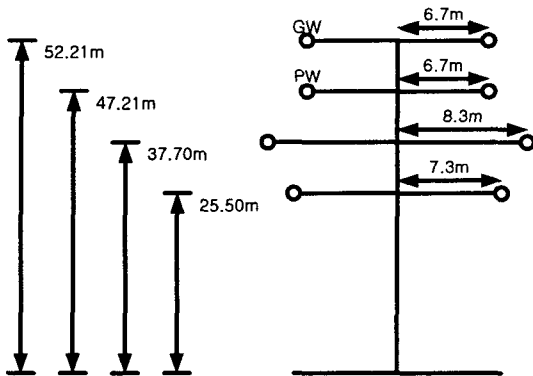


그림 2 345kV 철탑모형도[2]

Fig. 2 Tower model of 345kV class

그림 3은 입력데이터 파일을 작성하기 위한 노드회로도를 나타내고 있다. 투입저항이 삭제된 차단기인 SCH-A3~SCH-A4, SCH-B3~SCH-B4, SCH-C3~SCH-C4, SCH-A3~SCH-A5, SCH-B3~SCH-B5, SCH-C3~SCH-C5는 그림과 같이 일반스위치로 모델링되었다. α T/P 차단기와 β S/S 차단기는 양수발전시스템과 연계된 차단기로, 일반적으로

open상태로 있다가 계통용량부족시 α T/P 차단기가 투입된 후 β S/S 차단기가 투입되는 시스템으로 운영되고 있다. 따라서, α T/P 차단기는 투입과 차단을 주 목적으로, β S/S 차단기는 차단을 주목적으로 설치되었다. 본 연구는 양수발전 시스템을 고려하여, α T/P 차단기와 β S/S 차단기가 모두 open된 상태에서 α T/P 차단기가 투입될 때 발생하는 썬지의 영향을 해석하기 위함이므로, S/S측의 노드는 개방된 상태로 두어 해석을 실시하였다.

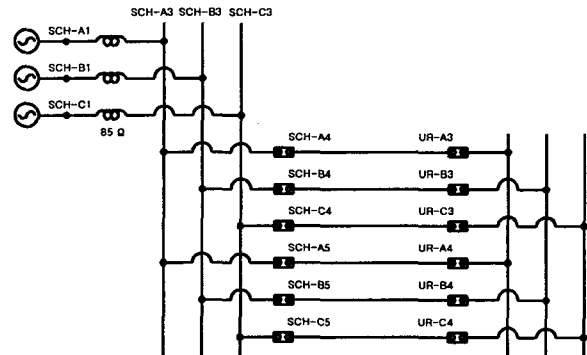


그림 3 해석대상의 노드회로도

Fig. 3 Node diagram of analysis objects

2.2 계통운전조건별 투입·재투입썬지 해석 ; 임의동작조건하에서

계통의 썬지해석시 차단기는 스위치로 모의되는데, 각 상의 동작시점을 일치시킨후, 임의시점에서 동작시키는 임의동작조건과 각 상의 동작시점에 차이를 두는 확률동작조건에서 해석을 실시한다. 따라서, 본 연구에서도 이러한 2가지 조건에 대해 해석을 실시하였다.

2.2.1 투입썬지 해석

일반적으로 국내 345kV 송전계통은 2회선으로 운영되고 있는데, 전체 전력계통운영조건에 따라 1회선만 운영되는 경우와 2회선 모두 운영되는 경우가 있어, 투입썬지해석을 두가지 조건 즉, 병행회선 차단상태의 경우와 병행회선 운전상태의 경우에 대해서 해석을 실시하였다.

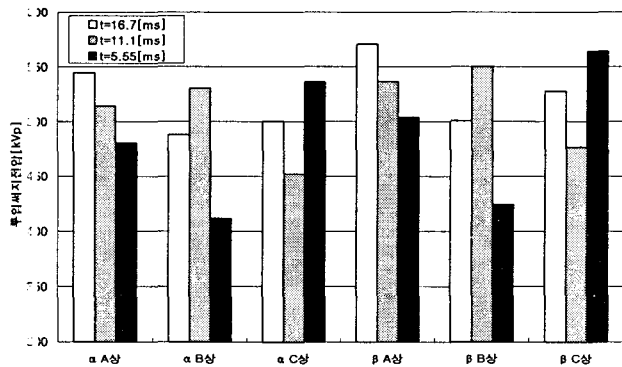
그림 4(a)는 #2 T/L이 운전중이지 않은 경우, 즉 병행회선 차단상태인 경우, EMTTP를 이용하여 투입썬지를 계산한 결과로서, α T/P차단기의 3가지의 투입시점에서 계통의 투입썬지를 확인하였다. 각각의 투입시점은 각 상의 위상이 90°가 되는 시점이며, 16.7ms는 A상, 11.1ms는 B상, 5.55ms는 C상이 90°가 되는 시점에 해당한다. 그림 4로부터 투입썬지는 대략적으로 450~550kVp이며, α T/P보다는 β S/S에서 높은 투입썬지가 발생되는 것을 확인하였다. 또한, 투입시점이 각 상의 위상이 90°가 되는 시점에서 투입될 경우, 해당상에서 가장 높은 투입썬지 전압이 나타남을 알 수 있었다.

그림 4(a)의 결과중 t=16.7ms에서 α T/P 차단기의 3상 투입시 α T/P와 β S/S 차단기의 각 상에서 발생하는 투입썬지 파형을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 α T/P와 β S/S 거리는 46km로 상당히 근접거리이므로, α T/P와 β S/S 차단기

에서 발생한 투입찌지는 동상으로 중첩되어 보여주고 있다.

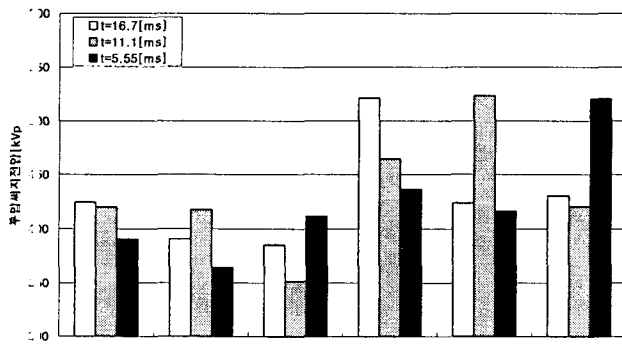
그림 4(b)는 #2 T/L이 운전중인 경우, 즉 병행회선 운전상태에서, α T/P 차단기의 3가지의 투입시점에서의 투입시, 투입찌지를 모의한 결과이다. 그림 4(b)로부터 투입찌지는 대략적으로 350~450kVp이며, 역시 β S/S에서 높은 투입찌지가 발생하는 것을 확인하였으나, 병행회선 차단상태의 경우보다는 병행회선 운전상태의 경우에서 낮은 투입찌지가 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 병행회선 차단상태의 경우와 동일하게 투입시점이 각 상의 위상이 90° 가 되는 시점에서 투입될 경우, 해당상에서 가장 높은 투입찌지 전압이 나타남을 알 수 있었다. 일반적으로, 투입되는 변전소에 따라 투입찌지의 크기가 달라지는 것은 전원 임피던스의 크기가 다르기 때문이므로, 상대적으로 낮은 전원 임피던스를 갖는 α T/P에서 투입찌지의 크기가 낮음을 알 수 있었다.

그림 4(b)의 결과중 $t=11.1\text{ms}$ 에서 α T/P 차단기의 3상 투입시 (B상의 위상이 90° 인 시점)에서 α T/P와 β S/S 차단기의 각 상에서 발생하는 투입찌지 파형을 그림 6에 나타내었다.



(a) 병행회선 차단상태의 경우

(a) In the case of single energized line

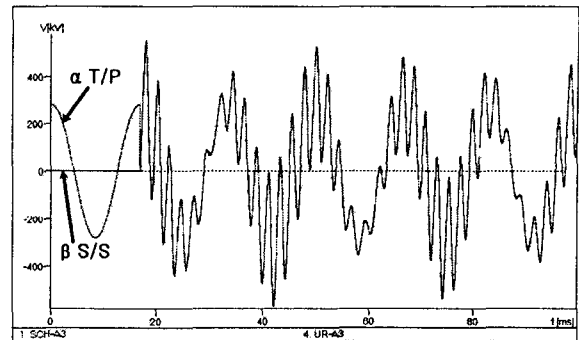


(b) 병행회선 운전상태의 경우

(b) In the case of parallel energized line

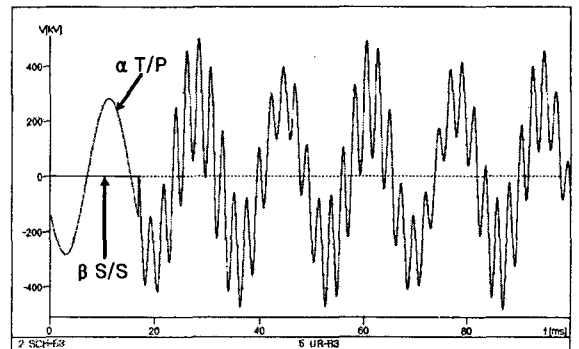
그림 4 계통운전조건별 투입찌지 계산결과

Fig. 4 Analysis results of closing surge according to the operation condition (단위 : kVp)



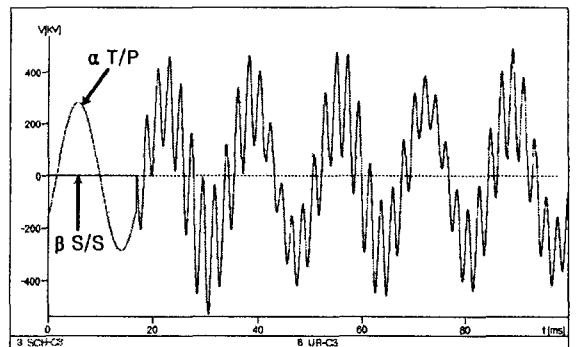
(a) α T/P와 β S/S의 차단기 A상

(a) At α T/P and β S/S, circuit breaker of phase A



(b) α T/P와 β S/S의 차단기 B상

(b) At α T/P and β S/S, circuit breaker of phase B

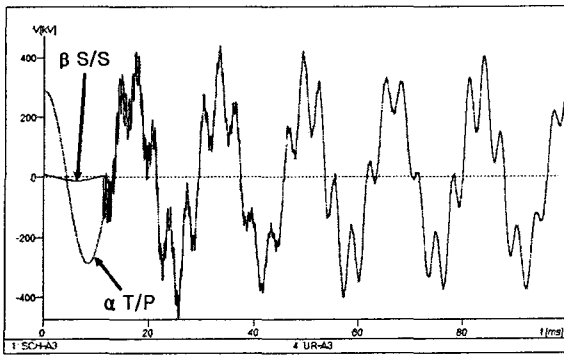


(c) α T/P와 β S/S의 차단기 C상

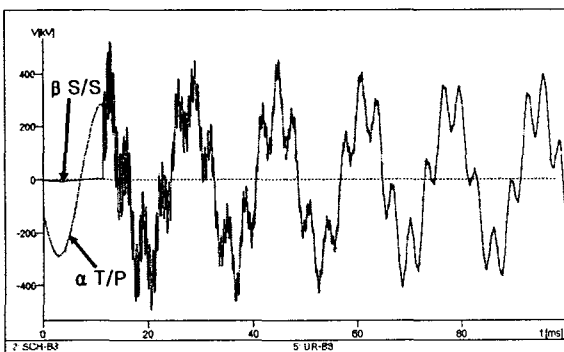
(c) At α T/P and β S/S, circuit breaker of phase C

그림 5 병행회선 차단상태의 경우, 투입찌지 파형 ($t=16.7\text{ms}$)

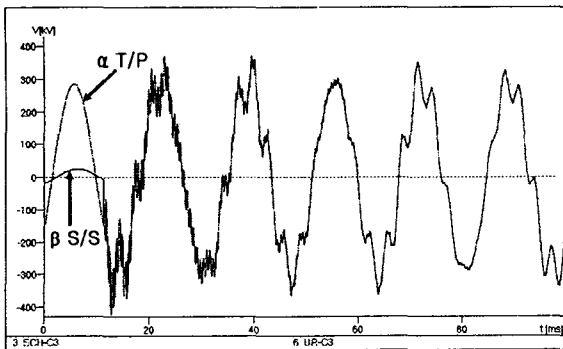
Fig. 5 Waveforms of closing surge in the case of single energized line ($t=16.7\text{ms}$)



(a) α T/P와 β S/S의 차단기 A상
(a) At α T/P and β S/S, circuit breaker of phase A



(b) α T/P와 β S/S 차단기 B상
(b) At α T/P and β S/S, circuit breaker of phase B



(c) α T/P와 β S/S 차단기 C상
(c) At α T/P and β S/S, circuit breaker of phase C

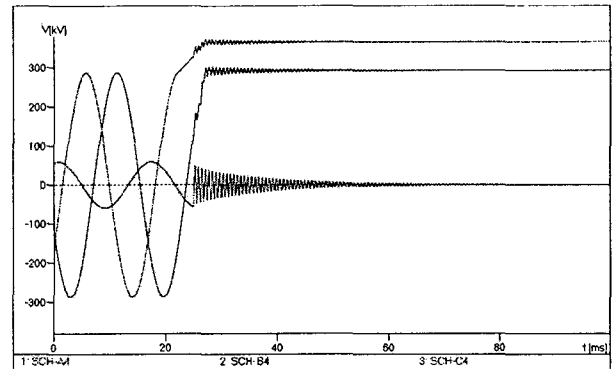
그림 6 병행회선 운전상태의 경우, 투입써지 파형 (t=11.1ms)
Fig. 6 Waveforms of closing surge in the case of parallel energized line (t=11.1ms)

2.2.2 재투입써지 해석

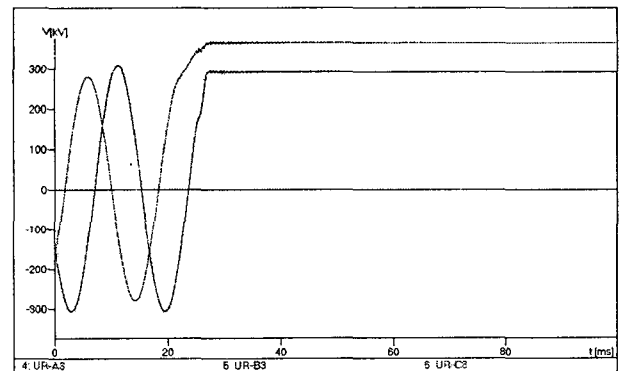
계통에서 1선지락등의 고장 발생시 3상 일괄 차단을 실시하면 건전상에는 포획전하(Trapped Charge)가 남게 되고, 고속도 재투입시 포획전하의 영향이 나타나게 된다. 포획전하가 존재하는 선로를 재투입시킬경우 전원전압과 선로측 전압극성이 다르면 무전압 선로 투입시보다 훨씬 높은 과전압이

발생한다.[3] 이러한 재투입 써지해석을 위해서는 고장이 제거된 후의 선로에 충전된 전하를 계산하여야 하는데, 이를 위한 모의는 다음과 같이 하였다.[4]

정상운전상태에서, 수전단에 1선 지락고장이 발생하여 계속 고장 지속하다가 임의시점 t=20ms에서 차단기를 개방하였을때, 송전단과 수전단의 충전전압을 계산하였고, 그림 7에 결과를 보여주고 있다. 이때, A상을 1선 지락고장으로 모의하였으며, 송전단과 수전단에 남아있는 충전전하는 B상 291kVp, C상은 364kVp의 계산결과를 얻었다.



(a) 송전단(α T/P) 충전전압 파형
(a) Charged voltage waveforms of the transmission side (α T/P)



(b) 수전단(β S/S) 충전전압 파형
(b) Charged voltage waveforms of the load side (β S/S)

그림 7 계산된 송전단/수전단 충전전압
Fig. 7 Analyzed charged voltage of the transmission and load side

일반적으로, 충전전하는 선로 차단시 선로의 정전용량에 트랩되는 전압으로 나타나는데, 선로에는 권선형 PT가 설치되어 있어 PT 권선에 의한 자연방전 현상이 나타나, 그림 8 (a)의 B상, C상의 전압도 시간의 경과에 따라 감쇄되는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 그림 8의 파형은 시간이 경과됨에 따라 실제로는 영전위로 감쇄되지만, 가장 가혹한 조건인 최대값을 확인하기 위해 최대값을 유지하는 해석기법을 적용하였다.

병행회선 차단상태의 경우에서, 그림 7의 최대충전전압을

조건으로 적용하여 재투입써지해석을 실시, 재투입 써지 값과 및 파형을 그림 8과 그림 9에서 보여주고 있다. 재투입 써지는 α T/P에서 807.7kVp, β S/S에서 888.7kVp로 높은 재투입써지가 발생하는 것을 확인하였다. 그림 9에서 β S/S의 차단기에서 α T/P 차단기보다 높은 재투입써지가 발생하고 있음을 그리고, 투입써지보다 높은 재투입써지가 발생하고 있음을 확인하였다.

병행회선 운전상태의 경우, 재투입 써지 모의결과 및 파형은 그림 10과 그림 11에서 보여주고 있다. 그림 10으로부터, 재투입 써지는 α T/P보다 β S/S에서 높은 재투입 써지가 발생되는 것을 확인하였으며, 투입써지의 해석결과와 동일하게, 병행회선 차단상태의 경우보다는 병행회선 운전상태의 경우에서 낮은 재투입써지가 발생하는 것을 확인하였다.

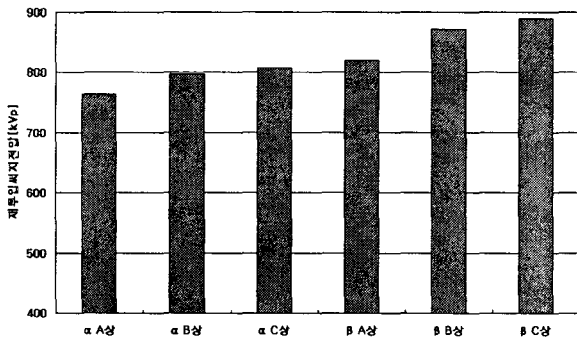


그림 8 병행회선 차단상태의 경우, 재투입써지 계산결과
 Fig. 8 Analysis results of reclosing surge in the case of single energized line

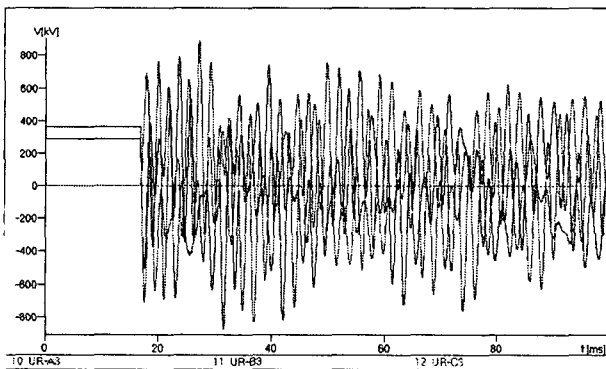


그림 9 병행회선 차단상태의 경우, 재투입써지 파형
 Fig. 9 Waveforms of reclosing surge in the case of single energized line

일반스위치로 계산해본 결과, 재투입이 써지의 값이 가장 높게 나오지만, 대상 계통인 α - β 구간의 경우는 재투입을 하지 않도록 예정된 선로임을 확인하였기에, 차단부의 투입저항 설치유무에 대한 검토를 위해서는 투입써지 해석결과만을 사용하였다. 그림 4의 결과로부터 최대발생투입써지는 병행회선 차단상태에서 발생되며, 투입써지는 570.5kVp이고, 써지배수로 환산할 경우, 2.03 p.u임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 α - β 구간에서는 차단기 투입저항을 쓰지않아도 투입써지가

한전의 계통설비 기준치인 2.3 p.u를 넘지 않는 최대 2.03 p.u 이하로 발생되고 있음을 알았다.

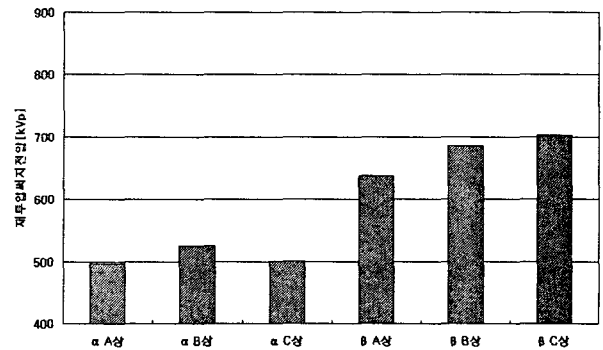


그림 10 병행회선 운전상태의 경우, 재투입써지 계산결과
 Fig. 10 Analysis results of reclosing surge in the case of parallel energized line

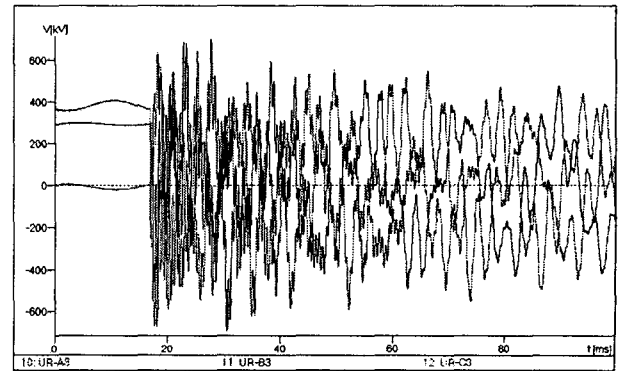


그림 11 병행회선 운전상태의 경우, 재투입써지 파형
 Fig. 11 Waveform of reclosing surge in the case of parallel energized line

2.3 투입써지 해석 ; 확률동작조건하에서

2.3.1 해석범위

일반 스위치로 계산해본 2.2절의 결과는 각 상의 동작시점이 일치하는 조건으로 해석을 실시하였으나, 실제적으로 각 상의 동작시점에는 최대 8ms차이까지 발생되므로, 이러한 투입시점 상이에 대한 추가해석이 필요하였다. 이와 같은 통계스위치 해석은 2.2절의 결과로부터 재투입써지는 확률해석범위에 포함시키지 않았다. 또한 병행회선 운전상태의 경우보다 차단상태의 경우에서, 써지값이 높게 나왔으므로, 병행회선 운전상태의 경우는 해석범위에서 제외하였다.

2.3.2 통계스위치 조건

그림 13에 나타낸 통계스위치의 입력값은 크게 2가지로서, 첫번째 m 은 평균동작시점을 정의한다. 본 논문에서는 60Hz의 한주기에 대해서 확인하기 위해 m 을 8, 12, 16, 20ms의 네 가지로 설정하였다. 두번째로 3σ 는 스위치 동작시점의 편

차에 해당하는 값으로서, 실제 차단기의 최대 상간 개리차 8ms를 고려하여 4ms를 적용하였다.

또한, 동작횟수도 200회가 가장 일반적인 계산조건으로 알려져 있으므로, 본 논문에서도 200회로 설정하였다[5].

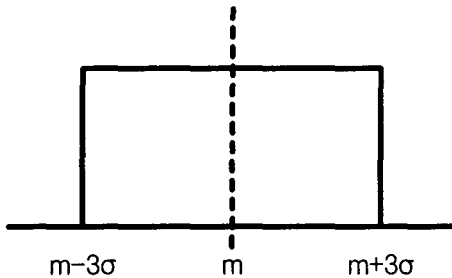


그림 12 통계스위치 EMTP 모델
Fig. 12 Statistic switch EMTP model

2.3.3 확률해석 결과

평균 동작시점 m 이 8, 12, 16, 20ms인 경우에 대해 해석을 실시한 결과, 동작시점 m 에 따라 미소한 해석편차를 갖으며, $m=12$ 에서 최대찌지값을 갖는 결과를 얻었다. 이때의 편차는 동작시점 m 의 차이이기보다는 생성된 스위치의 조합에 따라 차이가 있는 것으로 판단되어 진다.

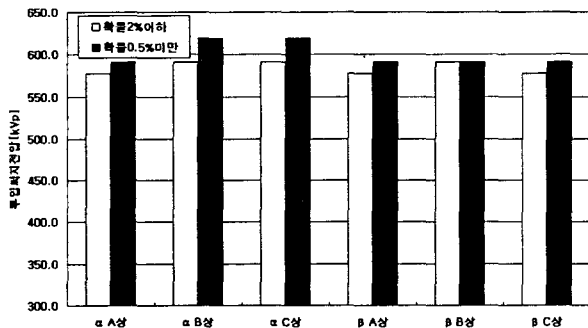


그림 13 병행회선 차단상태의 투입찌지 계산결과
Fig. 13 Analysis results of closing surge in the case of single energized line ($m=12ms$)

상기 그림 13에서 설명하고 있는 통계적 스위치에 따른 투입찌지 해석결과에 따르면, 발생확률 2%에서 최대발생 투입찌지는 α T/P측 B상의 590kVp로 찌지배수로 환산할 경우, 2.1 p.u임을 알 수 있었다. 또한, 발생확률 0.5%에서는 최대발생 투입찌지는 α T/P측 B상과 C상의 619.7kVp이고, 찌지배수로 환산할 경우, 2.2 p.u까지 발생됨을 보여주고 있다. 따라

서, 본 구간에서는 차단기 투입저항을 적용하지 않아도 투입찌지가 계통설비 기준치인 2.3 p.u를 넘지 않음을 알 수 있다. 이때, 최대발생 투입찌지가 2.2 p.u까지 낮추어진 것은 변전소내에 설치된 피뢰기에 의해 찌지가 상당부분 억제된 것으로 사려되며, 46km의 단거리 선로환경 역시 상당부분 역할을 담당한 것으로 판단된다.

3. 결 론

일반적으로 국내 전력회사에서는 345kV 전력계통에 사용되는 모든 선로보호용 차단기에 투입찌지가 한전의 계통설비 기준치인 2.3p.u를 넘지않도록 투입저항 520Ω의 조립이 규정되어 있다. 그러나 본 연구에서 설정한 α - β 구간(단거리 송전선, 예외구간)에 대해서는 투입저항의 설치유무에 대한 검토가 요구되었다.

본 논문은 전력계통 모의 프로그램인 EMTP를 이용하여, 투입찌지와 재투입찌지에 대해 해석을 실시하였다. 각 상의 동작시점을 일치시킨후 임의시점에서 동작시키는 임의동작조건과 각상의 동작시점에 차이를 두는 확률동작조건에서 해석을 실시하였으며, 대상계통인 α - β 구간은 재투입을 하지않도록 예정된 선로이므로 투입찌지에 대해서만 투입저항 설치판단의 근거로 이용하였다. 해석결과, 병행회선 차단상태의 경우가 병행회선 운전상태의 경우보다 높은 투입찌지 전압이 발생되는 것을 확인하였다. 또한 확률동작조건에서 얻은 최대 투입찌지전압은 619.7kVp로, 임의동작조건에서 얻은 최대 투입찌지전압 570.5kVp보다 높은 값을 얻었다. 이러한 결과로부터, α - β 구간(예외구간)에서는 차단기 투입저항을 쓰지 않아도 투입찌지가 한전의 계통설비 기준치인 2.3 p.u를 넘지 않은 최대 2.2 p.u이하로 발생하고 있음을 알았다. 따라서, 각 계통의 운전조건과 운전특성에 따라 차단기의 투입저항은 생략가능 하다고 사려된다. 그러나, 실증시험에 의한 측정결과, 예를들어 투입시 파형 측정, 차단기 투입 시간차 정보등이 있다면 해석결과와의 비교를 통해 좀더 신뢰성 높은 결론을 얻을 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국 전력 표준 규격 ESA 121-113~160, pp.1. 1994. 8
- [2] 찌지해석 초급반, 한국전력공사 중앙교육원, pp.108, 2000
- [3] 제5차 EMTP Workshop, EMTP국내위원회, pp.4, 1990, 12.
- [4] 한국전력공사 기술연구원 "전력계통 과도해석 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구" III. 적용사례, pp. 139-140, 1991. 1
- [5] EPRI. "Electromagnetic Transients Program Primer", Final Report, 1985

저 자 소 개



김 정 배 (金正培)

1966년 10월 12일 생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 일본 규슈대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~현재 효성 중공업연구소 개폐장치팀 수석연구원.

Tel : 055-268-9916, Fax : 055-268-9928
E-mail : hico-jbkim@hyosung.com



정 영 환 (鄭永煥)

1975년 4월 29일 생. 1998년 부산대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 (주)효성 중공업연구소 개폐장치팀 선임연구원

Tel : 055-268-9935, Fax : 055-268-9928
E-mail : gozip@hyosung.com



송 원 표 (宋元杓)

1958년 9월 23일 생. 1981년 서울대 원자핵공학과 졸업. 1991년 경남대 전기공학과 졸업(석사). 1985년~현재 (주)효성 중공업PG 차단기담당 이사.

Tel : 055-268-9007, Fax : 055-268-9488
E-mail : wpsong@hyosung.com