

Analysis of Switching Overvoltage in 345kV Underground and Combined Transmission Systems

鄭彩均* · 李鍾範** · 姜地原***

(Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee · Ji-Won Kang)

Abstract - This paper analyzes the switching overvoltage occurred on 345kV underground power cable system as well as combined transmission system using EMTP. Cable length and closing time, preinsertion resistance have effect on switching overvoltage. Therefore, this paper analyzes the switching overvoltage occurred on conductor and sheath with change of those parameters. Specially, the cross bonding position becomes discontinuity point because of the difference between surge impedance of metal sheath and that of lead cable. Thus, the transmission and the reflection of traveling wave complexly occur at this connection point. According to these influences, voltage between sheath and earth as well as voltage between joint boxes rise.

Time to crest point of switching overvoltage is longer than lightning overvoltage. Even though the voltage induced by switching surge is smaller than lightning surge, that voltage may have serious effect on the metal sheath. Therefore, this paper also analyses the reduction effect of switching overvoltage when the preinsertion resistance of circuit breaker is considered.

Key Words : Switching surge, Underground transmission cable, Overvoltage, Preinsertion resistance, Circuit breaker

1. 서 론

최근 도심지 인구집중현상과 함께 전력수요의 밀도가 급격히 높아짐에 따라 지중송전계통의 필요성이 날이 증가되고 있으며, 인구 밀집지역 내의 가공송전계통이 갖고 있는 한계 때문에 지중 시스템이 도입되고 있는데, 이러한 추세는 앞으로도 계속 확산될 전망이다. 또한, 이처럼 급속히 확장되고 있는 지중시스템의 고신뢰도 운전을 위해서는 계통에 발생하는 각종 썬지에 대한 합리적이고 정확한 해석이 이루어져야 하며, 이를 통해 적절한 보호대책을 수립하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

지중송전계통에는 가공선로나 중단접속부로부터 유입되는 뇌썬지로 인한 뇌과전압과 차단기의 차단과 투입에 의한 개폐 과전압, 지락이나 부하차단으로 인해 발생하는 일시 과전압 등의 과전압이 발생한다. 이러한 과전압에 관한 해석 및 연구는 국내외적으로 많은 부분에서 활발하게 진행되고 있으며, 과전압이 계통에 미치는 영향 등을 고려하여 선로 및 전력 기기 설비의 절연설계에 반영하고 있다[1-6]. 또한 스위칭 썬지에 관한 해석은 배전 계통 및 345[kV]급 이상의 가공송전계통 분야에서는 활발히 진행되고 있으나, 차단기의 재투입이 적용되지 않는 지중송전계통에서는 재투입

썬지에 의한 영향이 없어 투입시 발생하는 개폐 과전압의 영향이 가공선로에 비해 적게 나타나는 이유로 개폐 썬지에 관한 체계적인 연구가 활발히 진행되고 있지 않다. 또한 일부 이루어진 연구 내용도 주로 케이블의 도체에 발생하는 개폐 과전압에 관련된 것이며, 개폐 썬지가 케이블의 시스 및 절연통 등의 설비에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 없는 상태이다[2-3].

지중송전계통은 가공선로와는 달리 시스템 구성이 복잡하고 금속시스, 접속함, 절연통 보호장치(SVL) 등 과전압에 직접적으로 영향을 받는 많은 설비들이 있으며, 충전전하의 영향으로 가공선로에 비해 높은 개폐 과전압이 발생할 수 있다. 특히, 크로스본드 지점은 변이점이 되므로 투과와 반사가 복잡하게 발생하며 도체-시스간 전압으로부터 시스-대지간에도 전압이 유기 된다. 시스-대지간의 진행파는 대지와 복잡한 구조를 가진 포설 방식 등의 영향으로 인해 썬지 임피던스를 정확히 계산하기가 어려우나, 접속지점에서 절연통 사이에는 시스에 나타나는 진행파의 투과와 반사의 영향으로 시스-대지간 전압보다 훨씬 높은 과전압이 발생하게 된다.

따라서 본 논문에서는 연속적으로 투입위상을 변화하여 확률적 과전압을 계산하는 통계적 해석방법을 이용하여 345kV 지중송전계통 및 혼합송전계통에서 차단기 투입시 도체뿐만 아니라 시스에 발생하는 과전압을 다양하게 해석하였다. 또한 케이블 길이 변화에 따라 전원단과 부하단의 도체 및 금속시스 등에 나타나는 개폐 과전압과 실제 운전 중인 혼합송전계통에서의 투입썬지를 분석하였으며, 차단기 투입저항을 고려한 경우 발생하는 개폐 과전압의 저감효과도 함께 검토하였다.

* 正會員 : 圓光大 電氣工學科 博士課程

** 正會員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授 · 工博

*** 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

接受日字 : 2003年 2月 3日

最終完了 : 2003年 10月 15日

2. 지중송전케이블 개폐 과전압 해석

2.1 통계적 해석방법

Monte Carlo 기법은 선로나 변전소등에 침입하는 개폐 과전압과 뇌 과전압 등의 해석시 확률 분포를 적용하여 계산하는 기법이다. 통계적인 해석방법은 EMTP의 Miscellaneous 데이터 카드에서 반복 계산횟수를 지정하고 "STATISTICS" 스위치를 조합하여 과전압을 해석하는 방법으로 무작위로 개폐기 투입시간을 선정하여 최대 과전압을 계산하는 기법이다. 일반적으로 개폐 과전압의 크기는 차단기가 투입 혹은 재투입되는 시점에서 교류전압의 위상에 따라 변화한다. 그러므로 각상의 차단기가 투입되는 시점의 위상별로 투입씨지를 분석하기 위해서는 0도에서 360도 사이의 Random Number를 선택하고, 정상분포 또는 균일분포 등의 통계적인 확률분포를 이용해 표준편차(σ)에 따라 무작위로 투입시간을 반복하여 개폐 과전압을 계산하여야 한다. 그림 1에서는 통계스위치의 확률분포에 따른 정상분포와 균일분포의 형태를 나타내었으며, 그림 2에서는 투입저항 고려시 차단기 동작을 도면으로 나타내었다[8].

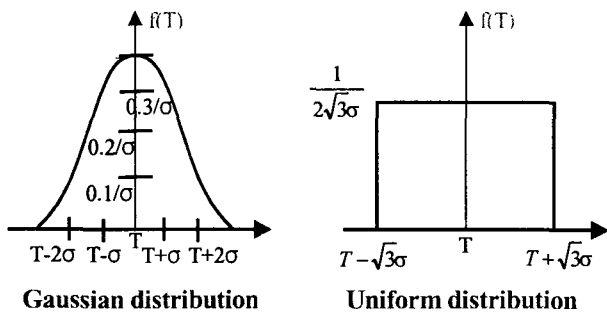


그림 1 통계스위치 분포 곡선
Fig. 1 Distribution curve of statistic switch

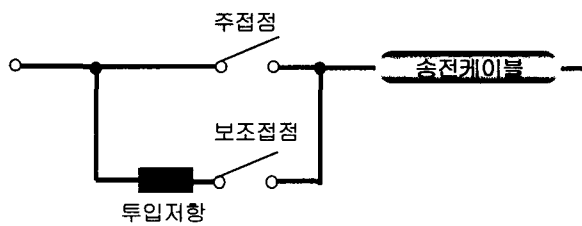


그림 2 투입저항 고려시 차단기 동작
Fig. 2 Circuit breaker operation as the preinsertion resistance is considered.

본 논문에서는 연속적인 투입위상의 변화에 따른 확률적 투입 과전압을 해석하기 위해 통계스위치를 이용하였다. 통계스위치의 투입시간은 그림 1의 정상분포(Gaussian distribution)에 따라서 무작위로 변화시켰으며, 그림 2의 주 차단기의 평균 투입시간은 0.02s, 표준편차를 1ms로

설정하고 투입시간 분포에 따라 200회의 반복계산을 하였다. 통계스위치는 정상상태를 포함하여 초기상태에서는 항상 개방되어 있으며, 확률적인 특성에 의해 정해지는 적절한 시간에 투입되고, 투입된 이후 다시 개방되지 않는다. 또한 투입저항 고려시 저항접점은 주점점 동작 10ms 이전에 동작하는 것으로 하였으며 투입저항은 200Ω, 400Ω, 600Ω, 1,000Ω을 다양하게 적용하였다.

2.2 케이블 선로에 발생하는 개폐 과전압

2.2.1 선로투입에 의한 써지

선로투입에 의한 써지는 차단기 투입의 경우에 해당하며 투입 전 차단기 양측의 전위차가 급격히 영이 됨에 따라 발생한다. 그림 3의 단선도에서처럼 차단기 투입전의 전원단 전압을 E_s , 선로의 전압을 E_l , 양측의 써지 임피던스를 Z_s , Z_l 이라 할 때 차단기 양단전압 $E_s - E_l$ 이 양방향으로 써지처럼 진행하면서 선로에 식 (1)과 같은 과전압이 발생한다 [4].

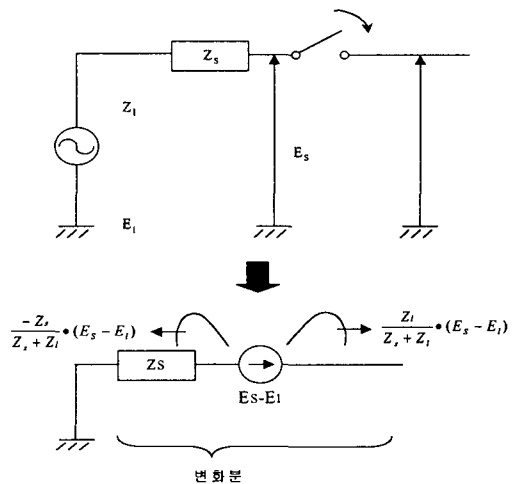


그림 3 차단기 투입에 의한 써지
Fig. 3 Surge by the closing circuit breaker

$$E = \frac{Z_l}{Z_s + Z_l} (E_s - E_l) \quad (1)$$

2.2.2 크로스본드점에서 발생하는 개폐 과전압

지중송전케이블 계통의 절연접속함에서는 비닐절연전선인 IV선을 이용한 리드선을 통해 크로스본드가 이루어진다. 따라서 시스템을 통해 진행파가 침입했을 때 크로스본드 지점은 서로 다른 써지 임피던스를 가지는 변이점이 되며, 이 지점에서 진행파의 투과와 반사가 복잡하게 발생하고 도체-시스 간 전압으로부터 시스-대지간에도 전압이 유기된다. 특히, 시스-대지간의 진행파는 대지의 영향을 많이 받기 때문에 정확한 예측이 곤란하며, 또한 복잡한 구조의 전력구 및 관로 등으로 인해 써지 임피던스를 정확한 계산이 어려우나 본 절에서는 써지현상을 단순화하여 크로스본드점에서 발생하는 써지의 영향을 나타내었다[4].

$$\begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \\ V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_c] + [Z_c] & [Z_{aa}] \\ \dots & \dots \\ [Z_{aa}] & [Z_{aa}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \\ I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$$[Z_c] = \begin{pmatrix} Z_c & 0 & 0 \\ 0 & Z_c & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{pmatrix} \quad [Z_{aa}] = \begin{pmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{pmatrix}$$

V_{ca}, V_{cb}, V_{cc} : 각 상 도체전압

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : 각 상 시스-대지간전압

I_{ca}, I_{cb}, I_{cc} : 각 상 도체전류

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : 각 상 시스전류

Z_c : 도체-시스간 썬지 임피던스

Z_{ij} : 시스 썬지 임피던스

식 (2)에 의해 단심 3상케이블의 케이블의 크로스본드점에 발생하는 도체 및 시스전압을 계산할 수 있으며, 3상 케이블이 서로 대칭이고 또한 대지에 대해서도 완전히 대칭으로 배치되어 있다고 가정하면 식 (2)에서 $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_s$, $Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc} = Z_m$ 의 관계로부터 식 (3)과 식 (4)와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_s - Z_m & 0 & 0 & Z_m \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 & Z_m \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m & Z_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{ca} + I_{sa} \\ I_{cb} + I_{sb} \\ I_{cc} + I_{sc} \\ I_t \end{pmatrix} \quad (3)$$

단, $I_t = I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} + I_{sa} + I_{sb} + I_{sc}$

$$\begin{pmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_c & 0 & 0 \\ 0 & Z_c & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} \quad (4)$$

또한 그림 4와 같이 진행해 온 전압에 의해 크로스본드 지점에서 발생한 전압은 테브난 정리를 이용해 그림 5로부터 식 (5)와 같이 계산할 수 있다[3-4].

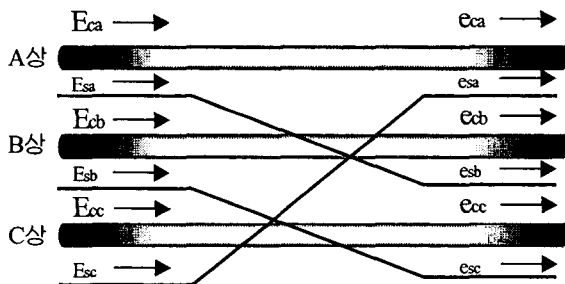


그림 4 크로스본드 지점에서의 진행파
Fig. 4 Traveling wave at the cross bonded point

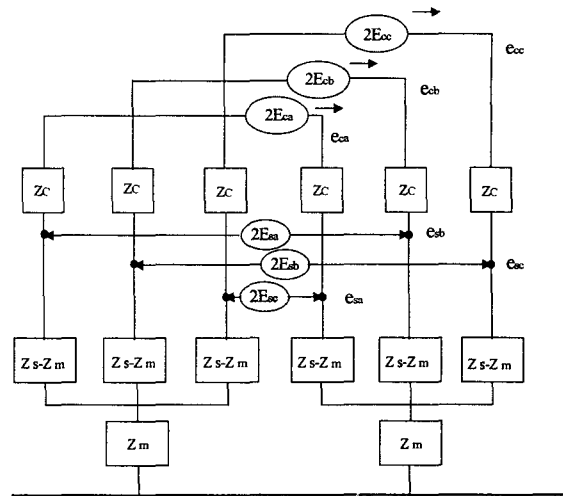


그림 5 크로스본드 지점의 등가회로
Fig. 5 Equivalence circuit of the cross bonded point

$$\begin{pmatrix} e_{ca} \\ e_{cb} \\ e_{cc} \\ e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & m & -m & -(1+m)/2 & 0 & (1+m)/2 \\ -m & 1 & m & (1+m)/2 & -(1+m)/2 & 0 \\ m & -m & 1 & 0 & (1+m)/2 & -(1+m)/2 \\ 2m & 0 & -2m & -m & m & 1 \\ -2m & 2m & 0 & 1 & -m & m \\ 0 & -2m & 2m & m & 1 & -m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_{ca} \\ E_{cb} \\ E_{cc} \\ E_{sa} \\ E_{sb} \\ E_{sc} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서, $m = \frac{Z_s - Z_m}{4Z_c + 3(Z_s - Z_m)}$

식 (5)에서 A상 도체에 식 (1)과 같은 썬지전압이 진행해 오면 제 1 크로스본드 및 제 2 크로스본드 지점에서 도체와 시스-대지간 전압은 식 (6)과 식 (7)과 같이 각각 계산할 수 있다. 여기서 B상 및 C상의 도체전압은 영이다.

$$\begin{pmatrix} e_{ca} \\ e_{cb} \\ e_{cc} \\ e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ -mE \\ mE \\ 2mE \\ -2mE \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} e_{ca} \\ e_{cb} \\ e_{cc} \\ e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-m-3m^2)E \\ 3m^2E \\ mE \\ 2m(1-3m)E \\ 0 \\ -2m(1-3m)E \end{pmatrix} \quad (7)$$

또한 m은 주로 0.15 - 0.25의 값을 가지므로 식 (6)과 식 (7)에서 알 수 있듯이 제 1 크로스본드점의 시스전압은 제 2 크로스본드점보다 높게 된다. 따라서 썬지 침입측 측, 전 원단에 가까운 크로스본드 지점에서 시스전압이 높게 나타난다. 이는 본 논문의 해석결과에서도 확인할 수 있다.

2.2.3 혼합송전계통에서 가공-지중 접속점에서의 개폐 과전압

그림 6은 혼합송전계통의 가공-지중 접속점인 종단접속부에서 식 (1)과 같은 차단기 투입썬지가 가공선로로부터

침입할 때 단면도 및 등가회로이다. 등가회로로부터 도체-시스간 전압은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며, 시스-대지간 전압은 식 (9)와 같다[4].

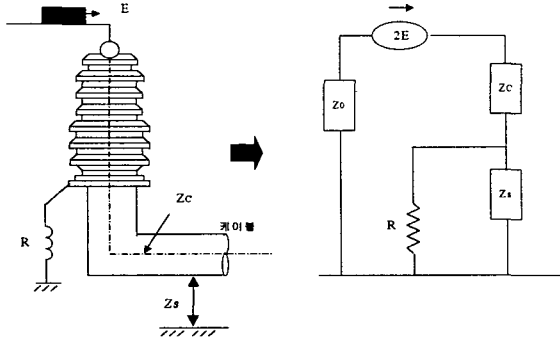


그림 6 가공-지중 접속점의 단면도 및 등가회로
Fig. 6 Diagram and equivalence circuit of line-cable joint

$$\frac{2Z_c \cdot E}{Z_0 + Z_c + R \cdot Z_s / (R + Z_s)} \quad (8)$$

$$\frac{2E \cdot R \cdot Z_s / (R + Z_s)}{Z_0 + Z_c + R \cdot Z_s / (R + Z_s)} \quad (9)$$

여기서, E는 가공선로로부터 침입파, Z₀는 가공선로 써지 임피던스, Z_c는 케이블 도체 써지 임피던스, Z_s는 케이블 시스 써지 임피던스, R은 접지 임피던스이다. 접지점이 접속부에서 떨어지면 접지점으로부터의 반사파가 되돌아오기까지의 사이에는 식 (9)에서 R의 효과가 없다. 따라서 시스전압은 2Z_s/(Z₀ + Z_c + Z_s)의 비율로 상승한다.

2.3 케이블 길이에 따른 개폐 과전압 분석

본 논문에서는 케이블 길이에 따른 투입시 개폐 과전압을 해석하기 위해 345kV 양단전원의 부하단은 개방상태로 하였다. 케이블 총 길이는 크로스본드 대구간을 고려하여 각각 2.7km, 4.5km, 6.3km, 8.1km로 설정하였으며, 차단기 투입시 전원단과 부하단의 도체뿐 아니라 접속함의 시스에 유기되는 과전압을 해석하였다. 그림 7에서는 케이블 길이 변화에 따른 모델 계통도를 나타내었다.

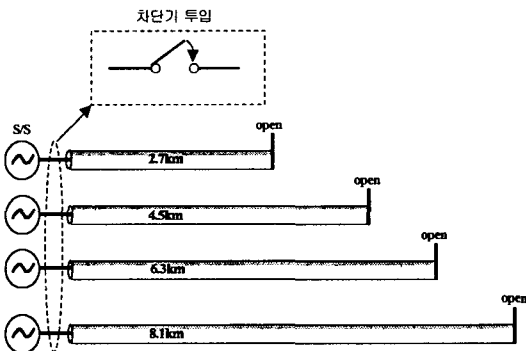


그림 7 케이블 길이 변화에 따른 모델 계통도
Fig. 7 Model system with cable length

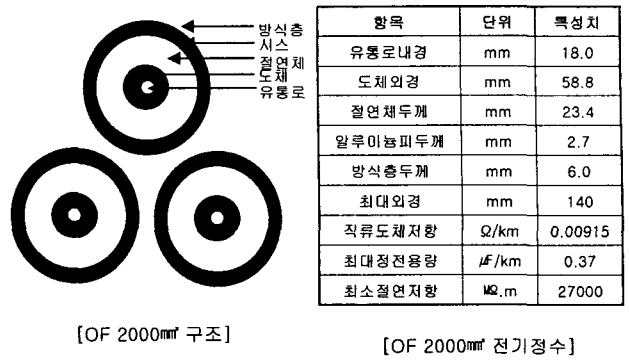


그림 8 케이블 구조 및 전기정수
Fig. 8 Cable structure and electric parameters

케이블은 그림 8의 케이블 구조와 같이 2000mm² OF 케이블이 전력구방식의 정삼각 배열로 포설되어 있으며, 케이블의 선로정수는 분포정수 선로모델과 그림 8에 나타낸 전기정수를 이용하여 EMTP/ATP의 선로정수 계산 프로그램인 ATP-LCC를 통해 계산하였다. 접속함간 길이는 300m로 일정하게 하였고, 교락비접지 방식으로 크로스본딩된 2구간과 직접접지가 반복되는 특성을 가지고 있다.

표 1 케이블 길이 변화에 따른 도체의 개폐과전압
Table 1 Switching overvoltage on conductor with change of cable length

케이블 길이	도체 개폐과전압			
	2.7km	4.5km	6.3km	8.1km
전원단(PU)	2.14	2.18	2.23	2.15
부하단(PU)	2.17	2.22	2.28	2.21

표 1에서는 그림 7의 케이블 계통에서 차단기 투입시 케이블 길이 변화에 따라 전원단과 부하단의 도체에 발생하는 최대 개폐 과전압을 나타내었다. 표에서처럼 부하단에서는 전원단에 비해 높은 과전압이 발생한다.

현재 국내에서 적용하고 있는 개폐과전압 절연설계 목표치는 154kV 계통의 경우 2.8(PU)이며, 345kV 계통은 2.3(PU)로 설정하고 있다. 본 논문에서 검토한 결과 최대 개폐 과전압이 2.3(PU)를 초과하지 않고 있다.

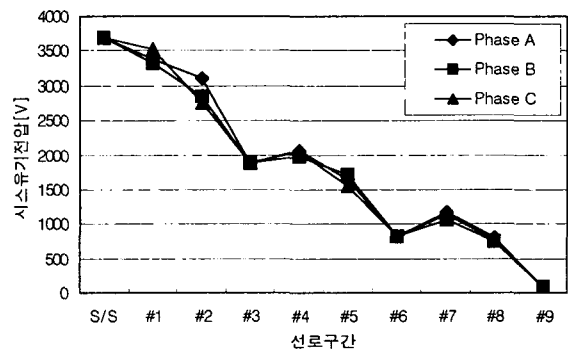


그림 9 2.7km 선로 각 접속함에서 시스-대지간 전압
Fig. 9 Voltage between sheath and earth at the cable with length in 2.7km

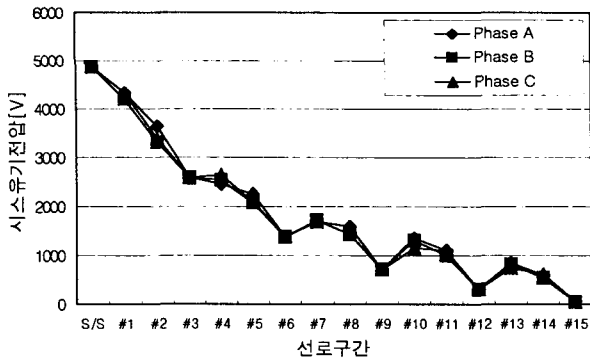


그림 10 5km 선로 각 접속함에서 시스-대지간 전압
Fig. 10 Voltage between sheath and earth at the cable with length in 4.5km

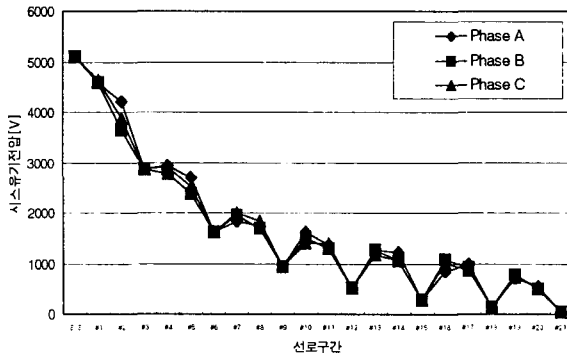


그림 11 6.3km 선로 각 접속함에서 시스-대지간 전압
Fig. 11 Voltage between sheath and earth at the cable with length in 6.3km

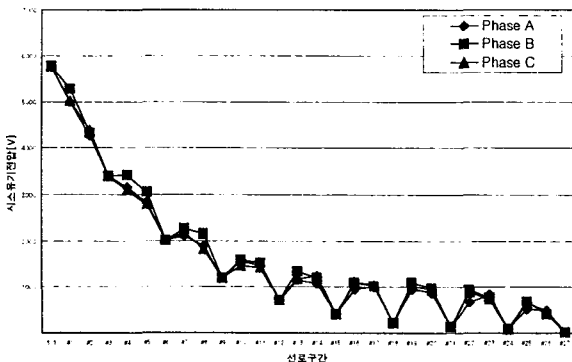


그림 12 8.1km 선로 각 접속함에서 시스-대지간 전압
Fig. 12 Voltage between sheath and earth at the cable with length in 8.1km

그림 9 - 그림 12는 케이블 길이가 각각 2.7km, 4.5km, 6.3km, 8.1km인 계통에서 차단기 투입시 각 접속함 시스에 유기 되는 과전압의 크기를 나타내었다. 그림에서처럼 전원 단 종단접속부 시스에서 최대 과전압이 발생하고 있으며 부하단으로 갈수록 직접접지의 영향으로 시스에 발생하는 개폐 과전압의 크기가 감소하는 특성을 보이고 있다. 또한 중

단접속부에서 발생하는 최대 개폐 과전압의 크기는 선로길이에 비례하여 증가하고 있다.

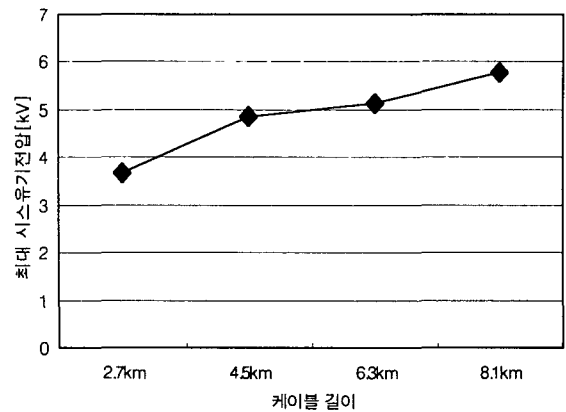


그림 13 케이블 길이 변화에 따른 최대 시스 개폐 과전압
Fig. 13 Maximum sheath switching overvoltage with change of cable length

그림 13에서는 각 케이블에서 발생하는 최대 시스-대지간 전압을 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 8.1km 선로의 종단접속부에서 5.77kV의 개폐과전압이 시스와 대지 사이에 발생하고 있으며, 케이블 길이가 증가할수록 크기가 점차 높아지는 경향을 보이고 있다.

IEEE 또는 IEC에서 정의하고 있는 표준 뇌 임펄스 파형의 파두 시간은 1.2 μ s이며, 표준 개폐 임펄스의 파두 시간은 250 μ s이다[9]. 이처럼 개폐 임펄스는 뇌 임펄스에 비해 완만한 파형을 가지나 임펄스의 지속시간은 매우 길다. 가공송전선로와 마찬가지로 지중계통에서도 개폐 썬지는 뇌 썬지에 비해 선로에 미치는 영향이 매우 적게 나타난다. 그러나 지중송전계통의 시스에서는 SVL의 동작개시전압 이상의 과전압이 발생할 수 있으며, 개폐 과전압의 파두 시간이 뇌 썬지에 비해 길기 때문에 낮은 전압에서도 선로에 미치는 영향은 매우 높게 나타날 수 있다. 특히 케이블 제작이나 포설 과정에서 발생할 수 있는 방식층 부분의 흠집, 또는 시스와 방식층 사이의 절연층이 약화되어 시스 부분이 외부로 노출된 지중송전계통에서 개폐 썬지가 발생할 경우 가대와 같은 도전성 물체와의 전위차로 인해 스파크 등이 발생할 가능성도 있다고 사료된다.

2.4 크로스본드 지점에서의 썬지 변화 특성

그림 5에서 보는 것처럼 크로스본드 리드선을 통해 진입한 썬지 전압의 영향으로 절연통간에는 이의 2배의 전압이 발생하게 된다. 따라서 국내외에서는 뇌 또는 개폐 임펄스 등의 이상전압이 침입할 때 케이블 계통의 절연통과 방식층 보호를 위해 절연통 보호장치(SVL: Sheath Voltage Limiter)를 사용하고 있으며, SVL 결선방식에 따라 그림 14와 같은 대지간 방식과 교락비접지 방식이 주로 이용되고 있다.

일반적으로 154kV 지중송전계통에 사용되는 SVL의 동작개시전압은 3.5-5.5kV이고, 345kV에는 5.5-7.5kV 동작개시전압과 표준 임펄스 전류에서 14kV이하의 제한전압을 가지는 SVL이 사용되고 있다.

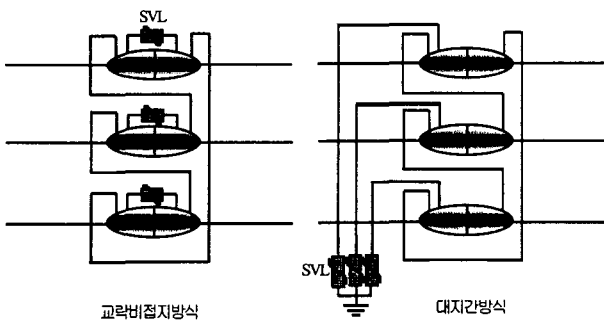


그림 14 SVL 결선방식
Fig. 14 SVL connection types

따라서 SVL은 시스에 높은 과전압이 발생하는 지락고장이나 뇌 썬지 침입시는 제한전압 이하로 시스-대지간 전압 또는 절연통간 전압을 저감시킬 수 있으나, 상대적으로 과전압의 크기가 작은 개폐 썬지로 인한 과전압의 발생시는 원활한 동작을 하지 못하게 된다. 그리고 개폐 썬지의 영향으로 인해 시스에 나타나는 과전압은 250/2500 μ s의 긴 지속시간동안 시스에 유기됨으로써 시스계통에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

차단기의 재투입이 이루어지는 가공송전계통에서는 이러한 개폐 과전압의 영향을 해소하기 위해 전원단에 투입저항을 설치하여 운영하고 있으나, 지중송전계통에서는 투입저항 설치에 대한 조항이 일괄적으로 적용되고 있지 않다. 특히 154kV 지중송전계통에서는 거의 적용되고 있지 않으며, 345kV 지중송전계통에서도 일부 선로에서는 투입저항이 설치되어 있으나, 투입저항 없이 운전중인 선로도 있는 것으로 나타나고 있다.

따라서 본 논문에서는 345kV 지중송전계통에 차단기 투입 썬지가 발생했을 때 투입저항 적용에 따른 개폐 과전압의 영향을 분석하였다.

2.5 투입저항 적용에 따른 개폐과전압

본 절에서는 투입저항 적용에 따른 개폐 과전압의 영향을 다양하게 분석하였다. 그림 15에서는 썬지(E)가 투입저항이 고려된 선로로 진행할 때 등가회로를 나타내었다. 투입저항 고려시 보조 차단기는 주 차단기 동작 10ms 이전에 동작하며 선로에 미치는 썬지의 영향은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

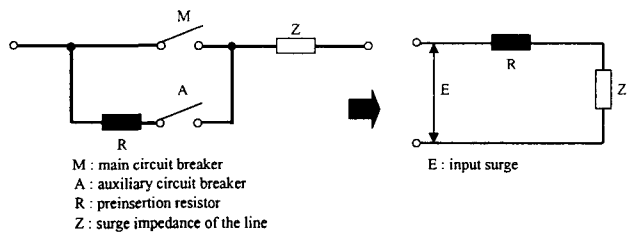


그림 15 투입저항 적용시 등가회로
Fig. 15 Equivalence circuit of line applied with preinsertion resistor

$$E_c = E \frac{Z}{R + Z} \tag{10}$$

여기서, E_c 는 투입저항 고려시 선로에 미치는 썬지 전압이며 식 (10)에서처럼 선로에 미치는 썬지 전압은 투입저항 (R)에 의해 감소됨을 알 수 있다.

표 2 8.1km 선로에서 투입저항에 따른 도체 개폐 과전압
Table 2 Switching overvoltage of conductor with preinsertion resistance at the cable with length in 8.1km

투입저항		무	200 Ω	400 Ω	600 Ω	1,000 Ω
상		A	A	A	A	A
최대개폐 과전압 [PU]	전원단	2.15 (100%)	1.22 (56.7%)	1.44 (66.9%)	1.62 (75.3%)	1.95 (90.6%)
	부하단	2.21 (100%)	1.24 (56.1%)	1.47 (66.5%)	1.67 (75.6%)	2.01 (90.9%)

표 2는 그림 7의 8.1km 케이블 선로에서 200 Ω , 400 Ω , 600 Ω , 1,000 Ω 의 투입저항에 따라 도체에 발생하는 투입 과전압을 나타내었다. 표 2에서처럼 도체 부분에 발생하는 개폐 과전압은 투입저항을 고려하지 않아도 345kV 지중송전계통의 절연설계 목표치인 2.3(PU)를 초과하지 않으나, 600 Ω 이하의 투입저항을 고려할 경우 전원단과 부하단에 발생하는 개폐 과전압의 크기는 상당부분 저감됨을 알 수 있다.

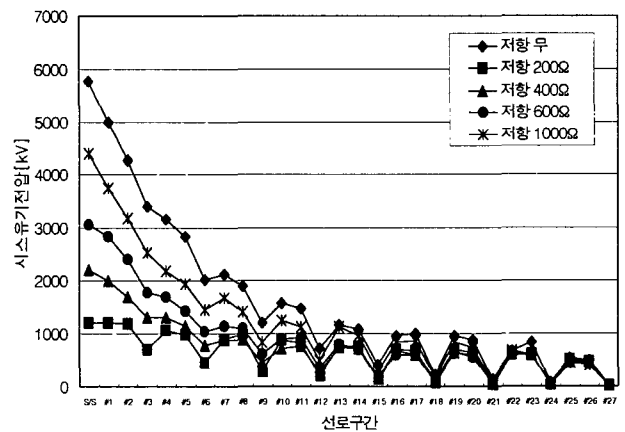


그림 16 8.1km 선로에서 투입저항에 따른 시스-대지간 전압
Fig. 16 Voltage between sheath and earth with preinsertion resistance at the cable with length in 8.1km

그림 16에서는 그림 7의 8.1km 선로에서 투입저항의 적용에 따라 시스와 대지 사이에 발생하는 투입과전압의 영향을 그래프로 나타내었다. 그림에서처럼 투입저항이 없을 때 전원단 종단접속부에서 나타나는 5.77kV의 과전압은 투입저항 적용으로 저감됨을 알 수 있다. 투입저항 값에 따른 중

단점속부의 시스-대지간 전압은 각각 200Ω에서는 1.19 kV, 400Ω에서는 2.2kV, 600Ω에서는 3.1kV, 1,000Ω에서는 4.3kV로 저감됨을 알 수 있다. 이는 투입저항이 설치되어 있는 보조접점이 주접점 동작 이전에 동작함으로써 선로와 직렬로 접속되는 영향으로 판단된다. 따라서 투입저항의 설치는 지중송전선로의 시스계통 안정화에도 상당히 기여할 수 있을 것으로 본다.

3. 혼합송전계통에서의 개폐 과전압 분석

2.2절의 케이블 길이 변화에 따른 개폐 과전압 분석을 통해 케이블 길이가 증가함에 따라 도체 및 시스에 발생하는 과전압도 증가함을 알 수 있다. 또한 투입저항의 적용으로 케이블 계통에 발생하는 개폐 과전압이 매우 저감된다. 본 장에서는 실제 국내에서 운전중인 345kV 혼합송전계통을 대상으로 차단기 투입시 발생하는 도체와 시스의 과전압과 투입저항을 고려한 경우의 저감효과를 검토하였다.

3.1 모델계통

본 논문에서 모델링한 혼합송전계통은 국내에서 실제 운전중인 가공선로 345kV ACSR 480mm²×2B, 7.19km와 전력구방식의 삼각배열로 포설 되어 있는 OF 2000mm²의 선로공장이 8.98km인 지중선로가 혼합되어 있는 계통이다. 그림 17에서는 선로 계통도 및 케이블 구간의 접지방식을 나타낸 것이다.

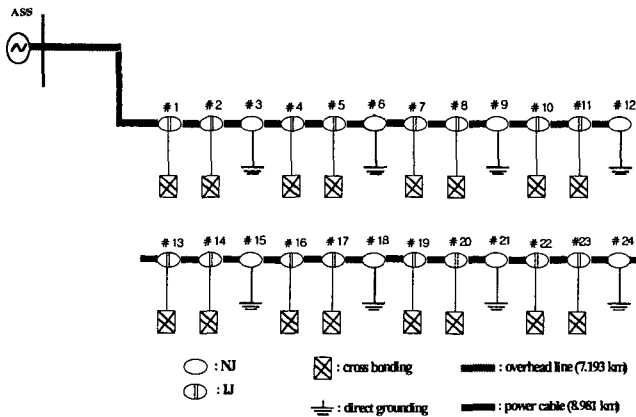


그림 17 혼합송전계통의 모델 계통도
Fig. 17 Diagram of combined transmission system

3.2 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 케이블 길이에 따른 개폐 과전압을 해석하기 위해 345kV 양단전원의 부하단은 개방 상태로 하였으며 그림 17의 A S/S에 차단기 투입시 발생하는 도체와 시스-대지간 과전압을 분석하였다. 혼합송전계통도 지중송전계통과 마찬가지로 선로고장으로 인해 차단기가 동작하면 재폐로가 이루어지지 않기 때문에 차단시 선로에 잔재하는 충전전하와 재투입 썬지는 고려하지 않았다.

투입썬지는 통계적 해석방법을 이용하였으며, 주 차단기

의 평균 투입시간은 0.02[sec], 표준편차를 1[ms]로 설정하고, 투입시간 분포는 정상분포로 하여 200회 반복계산 하였다.

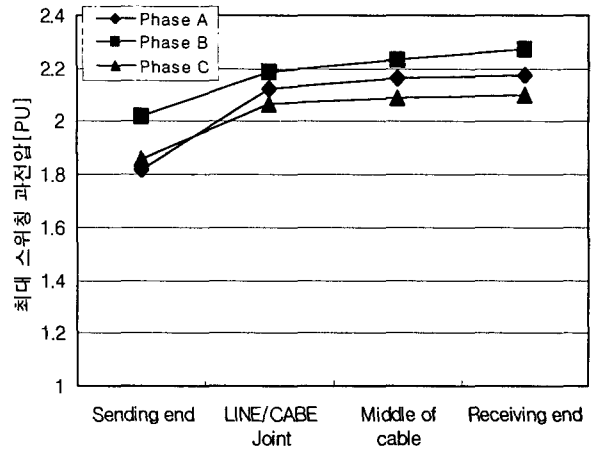


그림 18 선로위치에 따른 각 상별 도체의 개폐 과전압
Fig. 18 Conductor switching overvoltage of each phase with location of cable

그림 18은 혼합송전계통의 선로 위치에 따른 각 상별 도체에서 발생하는 개폐 과전압을 나타내었다. 과전압의 크기는 A S/S에서 부하단으로 갈수록 증가하고 있으며, 최대 개폐 과전압은 부하단에서 2.27(PU)로 345kV 절연설계 목표치인 2.3(PU)에 근접하고 있다.

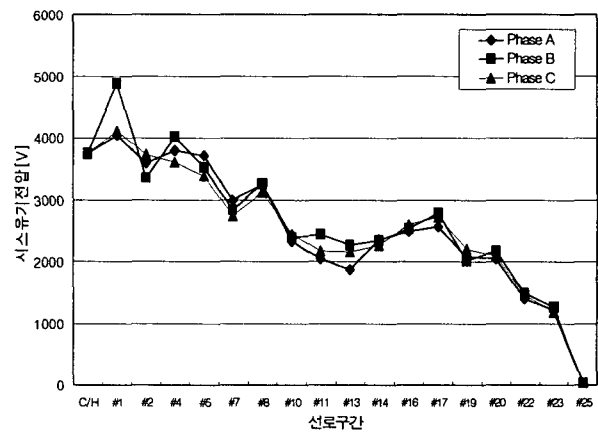


그림 19 케이블 구간의 각 상별 시스-대지간 개폐 과전압
Fig. 19 Switching overvoltage between sheath and earth of each phase at the cable section

그림 19에서는 A S/S에서 차단기 투입시 케이블 구간의 각상 시스-대지간에 발생하는 개폐 과전압을 그래프로 나타내었다. 그림에서처럼 시스-대지간 과전압은 C/H 종단점속부의 시스에서 4.8kV로 최대 과전압이 유기되며 전원단으로 갈수록 과전압의 크기는 점차 감소하는 특성을 보이고 있다.

3.3 투입저항 적용에 따른 개폐 과전압

투입저항 적용시 저항접점은 주접점 동작 10ms 이전에 동작하는 것으로 하였으며 표준편차는 0.7ms 이고, 투입저항은 각각 200Ω, 400Ω, 600Ω, 1,000Ω을 적용하였다.

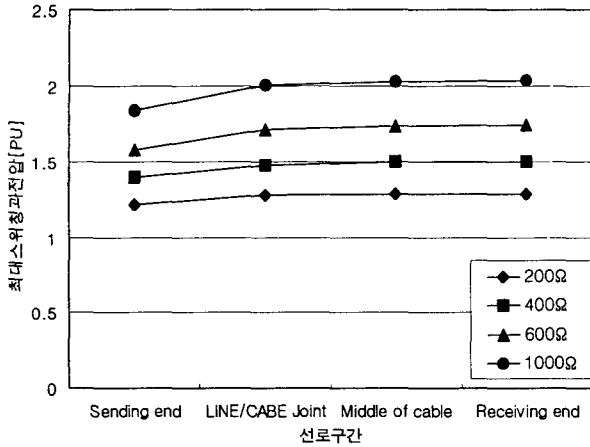


그림 20. 투입저항 적용에 따른 도체의 개폐 과전압

Fig. 20. Conductor switching overvoltage with preinsertion resistance application

그림 20에서는 혼합송전계통에서 투입저항 적용에 따라 도체에 발생하는 개폐 과전압을 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 도체의 개폐 과전압은 전원단에 비해 개방되어있는 부하단으로 갈수록 높은 과전압이 발생되고 있으며, 부하단에 발생하는 개폐 과전압은 200Ω에서 1.29[PU], 400Ω에서는 1.5[PU], 600Ω에서는 1.74[PU], 1,000Ω에서는 2.03[PU]로 투입저항을 고려하지 않았을 때의 2.27[PU]보다 낮은 과전압을 보였으며, 투입저항이 낮을수록 발생하는 과전압도 적게 나타나고 있다.

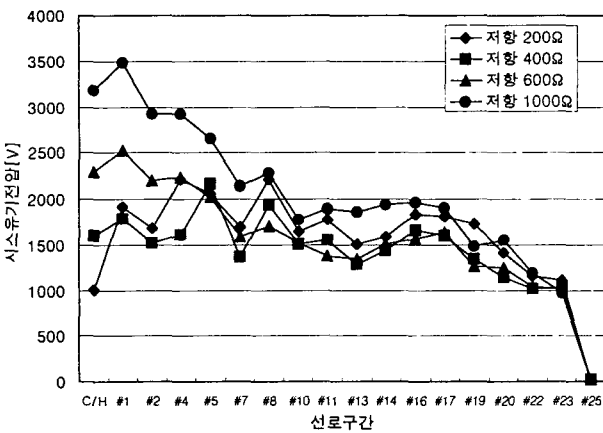


그림 21. 투입저항 적용에 따른 시스-대지간 개폐 과전압

Fig. 21. Switching overvoltage between sheath and earth with preinsertion resistance application

그림 21에서는 혼합송전계통에서 투입저항 적용에 따라 시스에서 발생하는 개폐 과전압의 크기를 비교한 그래프를 나타내었다. 그림에서처럼 600Ω이하의 투입저항을 적용할 경우 시스에서 51.2%의 개폐 과전압이 감소됨을 알 수 있다. 그러나, 1,000Ω의 경우에 저감효과는 25%에 불과했다.

4. 결 론

본 논문에서는 연속적으로 투입위상을 변화하여 확률적인 과전압을 계산하는 통계적인 해석방법을 이용하여 345kV 지중송전계통과 혼합송전계통에서 차단기 투입시 도체 및 시스에 발생하는 개폐 과전압을 다양하게 분석하였다. 본 논문에서 분석한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 차단기 투입시 지중 송전케이블 길이 변화에 따라 시스에 발생하는 개폐 과전압의 크기는 선로길이가 증가할수록 비례하여 증가한다.
- 2) 차단기 투입시 지중 송전케이블 및 혼합송전계통에서 도체에 발생하는 개폐 과전압은 개방된 부하단으로 갈수록 증가하였으며, 시스에 발생하는 과전압은 전원단 종단접속부의 시스에서 가장 높은 과전압이 발생하였고, 부하단으로 갈수록 개폐 썬지에 의한 영향이 감소되는 특성을 보였다.
- 3) 지중 및 혼합송전계통에 투입 과전압 발생시 도체에 발생하는 개폐 과전압은 절연설계 목표치는 2.3[PU]를 초과하지 않았으나, 600Ω이하의 투입저항을 고려할 경우 과전압의 크기는 현저히 줄었다.
- 4) 시스계통에서도 600Ω 이하의 투입저항을 고려할 경우 최대 과전압이 나타나는 전원단과 C/H 종단접속부 시스의 과전압이 상당부분 저감되었다.
- 5) 지중 및 혼합송전계통의 시스에 발생하는 개폐 과전압은 SVL의 동작 개시전압에도 미치지 못하므로 SVL에 의한 원활한 차폐는 기대하기가 어렵다. 또한 완전한 파형을 가지는 개폐 썬지는 뇌 썬지에 비해 발생하는 과전압의 크기는 작으나 지속시간이 긴 특성에 의해 케이블 계통에 미치는 영향은 커질 수 있으며, 크로스본드 지점의 복잡한 투반사의 영향으로 절연통간에는 시스-대지간 전압의 2배에 해당하는 전압이 발생되게 되므로 시스계통에 심각한 영향을 미칠 우려가 있다.
- 6) 따라서 도체와 특히 시스 계통의 안정화를 위해 지중 및 혼합송전계통에 투입저항 설치가 고려되어야 할 것으로 판단되며, 앞으로 345kV XLPE 케이블을 포함해 이에 대해 더욱 체계적이고 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 원광대학교의 교비지원에 의하여 연구됨

참 고 문 헌

- [1] Jeong-Boo Kim, Eung-Bo Shim, Jeong-Woon Shim, "Switching Overvoltage Analysis and Air Clearance Design on the KEPCO 765 kV Double Circuit Transmission System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, 2000
- [2] Yilmaz UYAROGLU, M.Ugar UNVER, "Switching Transients in Power Cables", IEEE Conference, 1998
- [3] 전력연구원, "지중송전 케이블의 썬어지 보호 대책에 관한 연구, 1993. 6
- [4] 일본전기학회 기술보고, "케이블계통에서의 썬지현상과 대책". 제 366호(II부), 1991. 4
- [5] A. C. Legate, J. H. Brunke, J. J. Ray, E. J. Yasuda, "Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, 1998
- [6] A. Carvalho, M. Lacorte, O. Knudsen, "Improved EHV Line Switching Surge Control by Application of Mo-arresters and Controlled Switching", IEEE Conference, 1995
- [7] D. A. Woodford, L. M. Wedepohl, "Transmission Line Energization with Breaker Pre-Strike", IEEE Conference, 1997
- [8] 심용보, "송변전설비의 썬지 해석론", EMTP 강좌 교재, 2002
- [9] IEEE Std 1313-1993, "IEEE Standard for Power Systems Insulation Coordination", 1993
- [10] 전력연구원, "전력계통 과도해석 프로그램의 이론 및 활용에 관한 연구", 1991

저 자 소 개



정 채 균 (鄭 彩 均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년~현재 동 대학원 박사과정.
Tel : (063)850-6735
E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr



이 종 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수.
Tel : (063)850-6735
E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr



강 지 원 (姜 地 原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 기전공학과 졸업(공학박사). 1993년 ~ 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.
Tel : (042)865-5884
E-mail : jwkang@kepri.re.kr