

# 지중송전케이블시스템의 SURGE 현상과 대책 및 과제

이종범\* · 박대회\*\*

(\*원광대 공대 전기공학과 조교수

\*\*동 대학교 재료공학과 조교수)

## 1. 서 론

최근 도시의 인구집중현상에 따른 전력수요의 밀도가 급격히 높아짐에 따라 도심의 지중송전 필요성이 날로 증대되고 있으며, 인구밀집지역내의 가공송전이 갖고 있는 어려움 때문에 지중송전시스템이 도입되고 있는데 이러한 추세는 앞으로도 계속 확산될 전망이다 있다.

지중송전은 여러가지 장점을 갖고 있는 반면 건설비 등의 초기 투자비용이 크고 설치 및 유지보수가 어려우며, 특히 회선당 송전용량이 가공송전에 비해 현저히 저하되고 있는 실정에 있다. 그러나 지중송전이 갖고 있는 이러한 결점에도 불구하고 구미 및 일본등지에서는 최고 500 kV 초고압시스템까지 지중화하여 운전하고 있으며 국내에서도 154 kV까지 운전되고 있는 지중송전시스템이 머지않아 345 kV급까지 격상되어 운전에 들어가기 위해 건설중에 있다.

이렇게 지중송전시스템이 급속히 확장되고 있음에 따라 다루어야 할 분야가 많이 있으나 그중에서도 케이블 시스템에서 발생하는 각종 surge에 대해 합리적인 절연설계를 하여 고신뢰도로 케이블을 운전하기 위해서는 지중송전케이블 시스템에서의 surge 현상과 해석 및 그 보호대책을 세우는 것은 매우 중요하다고 하겠다. 지중송전시스템에서의 surge 현상

은 이미 많이 검토되었고 전력케이블의 surge 보호대책도 몇가지 방식이 현장에서 적용되고 있으나 케이블의 종류, 포설방식 등에 따라 체계적, 기술적으로 정리된 것은 아직 없는 것이 국내외의 실정이다.

본고에서는 케이블 시스템에서 발생하는 surge 현상과 해석방법, 보호대책 및 장치에 대해 그 현황을 언급하고 아울러 앞으로 해결하여야 할 과제에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 지중케이블의 접속형태

지중송전시스템의 접속형태는 가공-지중접속시스템, 지중-지중접속시스템으로 크게 나눌 수 있으며, 또 가공-지중접속시스템에서는 기중-기중, 기중-기기의 접속이 있고, 지중-지중접속시스템도 기중-기중, 기중-기기 및 기기-기기의 접속이 있다.

### 2.1 지중케이블의 종단접속형태

가공선과의 접속형태는 지상분기방식과 철탑상에서의 분기방식으로 나눌 수 있다. 먼저 지상분기방식은 지중송전시스템의 분기중 일반적인 형태로서 피뢰기의 설치와 공통접지 등의 뇌대책에 용이하다. 이것은 가공선에서 철탑상의 보호애자를 경유하여

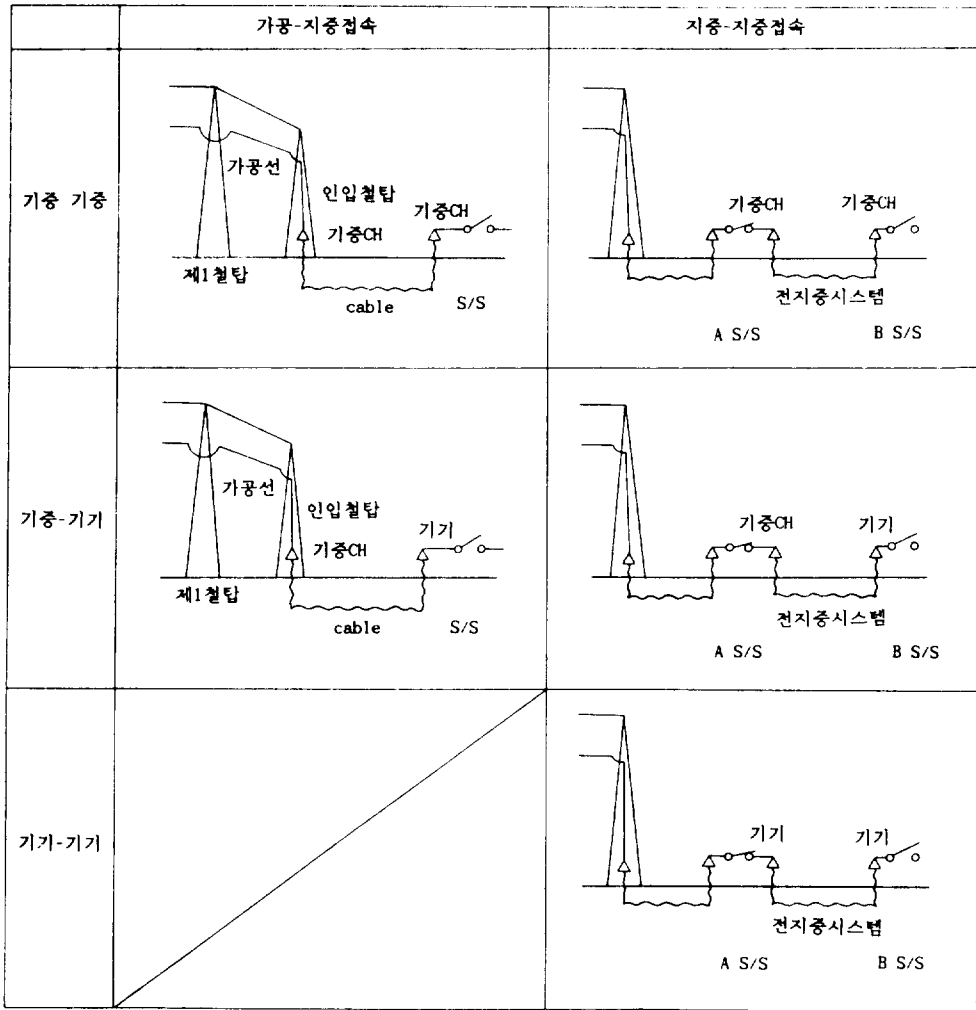


그림 1. 케이블과 기기와의 접속형태

케이블 종단부로 들어오는 것과 가공선에서 별도의 철구조물을 경유해 케이블 종단부로 들어오는 것이 있다. 한편 철탑상에서의 분기방식으로는 용지확보, 환경면에서 유리하나 피뢰기 설치 등 뇌대책의 곤란한 점이 있다.

또한 변전기기와의 접속형태는 기중종단부를 매개로 접속하는 방식과 가스중, 유증등의 기기직결방식으로 나눌 수 있으며, 기기직결방식이 설비의 compact화 및 안전운전차원에서 증가하고 있다. 특히 GIS와의 접속에서는 기중방식에 비해 고주파의 surge가 발생하여 케이블 도체 및 sheath를 전파해온 surge에 의해 케이블 sheath 회로에 높은 surge 전압이 발생되므로 surge 보호대책이 실시되고 있는

경우가 많다. 그림 1은 이가운데 특히 케이블과 기기와의 접속형태를 나타낸 것이다.

## 2.2 Sheath 접지방식

케이블에는 금속차폐층인 sheath에 접지를 실시하며, 접지되고 있는 방식으로는 solid-bonding 방식 및 cross-bonding 방식 등이 있다.

Solid-bonding 방식은 통상 접속부 전체를 접지하는 다지점 접지방식으로 sheath 유기전압이 거의 없지만 sheath 손실이 생긴다. 이 때문에 sheath 회로 손실이 없는 3심 케이블 또는 도체전류가 작은 소도체나, sheath 저항이 커서 손실이 작은 케이블 및

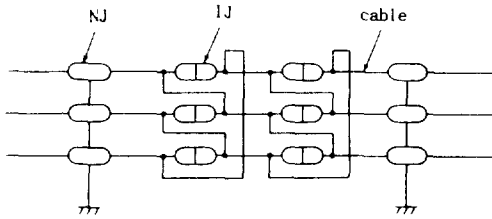


그림 2. Cross-bonding 접지방식

해저케이블 등에 사용된다. 편단접지방식은 케이블 단말의 한쪽이나 중앙의 한 지점에 접지하는 방식으로 귀로회로가 구성되어 있지 않아 sheath 회로손실은 영이 된다. 또한 절연접속부에 의해 장거리 선로를 구간 분할하고 각 구간마다의 끝을 접지할 수도 있지만 귀로회로가 구성되지 않아 장거리 선로에서는 채용되지 않는다. 한편 cross-bonding 방식은 그림 2와 같이 절연접속부에서 3구간으로 분할하고 sheath를 cross로 bonding하는 방식으로 sheath 회로손실이 크게 되는 단심케이블의 장거리선로에 일반적으로 채용되고 있다.

### 3. 케이블의 impulse 내전압 특성

Impulse 시험은 전력시스템에서 발생하는 과전압에 대해 케이블의 절연을 검증하는 시험으로서 특히 초고압 설비에서 매우 중요하게 취급되고 있다.

#### 3.1 OF 케이블 절연체의 impulse 특성

케이블 절연체의 보유성능을 검증할 목적으로 실시되고 있는 시료시험에서 요구되고 있는 각종 내전압성능은 다음과 같이 결정된다.

(1) 상용주파내전압 =  $E_0/3 \times k_1 \times k_2 \times k_3$

여기서,  $E_0$ : 상시최고선로전압

$k_1$ : 시간환산계수(1.5)

$k_2$ : 안전율(1.1)

$k_3$ : 기타계수(1.25)

(2) 뇌 impulse 내전압 =  $BIL \times k_4 \times k_5$

여기서,  $k_4$ : 여유도(1.1)

$k_5$ : 온도계수(1.1)

(3) 개폐 impulse 내전압 =  $BSIL \times k_4 \times k_5$

특히 OF 케이블의 뇌 impulse 특성은 절연파괴를 일으키는 최대전계의 최저치를 추정하고 여기에 약간의 여유도를 주어 설계되고 있다. 개폐 impulse 특성으로서는 먼저 파두장, 파미장의 영향으로서 파두장이 500  $\mu$ s 이상의 영역에서는 절연강도는 뇌 impulse 절연강도 보다 증대하나 50~150  $\mu$ s에서는 파괴강도에 값이 일정치 않은 경우가 있지만 거의 동등 level이다. 또 파미장의 차는 파괴강도에 그다지 영향이 없다. 그 밖에 극성효과는 명확하지 않으며 온도의 의존성이 있고 반복과정에 의한 영향은 고려할 필요가 없다고 보고되고 있다. 즉 파두파가 완전한 개폐 impulse에 대한 OF 케이블의 내전압 성능은 뇌 impulse에 대한 내전압 성능에 비해 명확한 차이는 거의 없고 거의 동일한 성능을 갖는다고 알려져 있다. 또한 공간전하가 OF 케이블에 잔류하고 있을 때 영향을 받으나 명확하지는 않으며, 한편 급준파의 영향으로서는 기체절연에서는 파괴전압에 영향이 있으나 OF 케이블에서는 파두가 급격히 짧아도 표준 뇌 impulse와 같은 성능을 갖고 있다고 추정되고 있다.

#### 3.2 CV 케이블 절연체의 impulse 특성

CV 케이블 절연체의 시료시험에 요구되고 있는 각종 내전압성능은 다음과 같이 결정된다.

(1) 상용주파내전압 =  $E_0/3 \times k_1 \times k_2 \times k_3$

여기서,  $E_0$ : 상시최고선로전압

$k_1$ : 시간환산계수(4.0)

$k_2$ : 안전율(1.1)

$k_3$ : 기타계수(1.1)

(2) 뇌 impulse 내전압 =  $BIL \times k_4 \times k_5 \times k_6$

여기서,  $k_4$ : 여유도(1.1)

$k_5$ : 온도계수(1.25)

$k_6$ : 경년열화에 대한 여유도(1.1)

(3) 개폐 impulse 내전압 =  $BSIL \times k_4 \times k_5 \times k_6$

뇌 impulse 특성을 보면 온도 의존성과 극성효과를 보이고 있으며 반복 뇌 impulse 과전특성으로서는 절연설계상 영향은 없는 것으로 알려져 있다. 개폐 impulse에 대해서는 개폐 impulse의 파두장이 길면 파괴강도도 높게되는 경향이 있으며 반복과정으로는 초기치보다 낮아지는 경향이 있다. 이 이외에도 급

준파와 잔류전압 AC 중첩의 영향이 있으나 CV 케이블도 OF 케이블과 마찬가지로 급준파와 고주파진동에 대해서는 거의 표준 impulse 파와 같은 성능을 갖고 있다고 추정되고 있다.

### 3.3 방식층의 impulse 특성

PVC와 PE에 대해서 조사한 바에 의하면 파괴강도는 20~50 kV/mm 이다. 방식층의 impulse 특성은 장기사용에도 큰 특성의 저하는 없지만 포설, 사용 조건에 영향이 있으므로 보다 명확한 자료가 있어야 할 것으로 보고되고 있다.

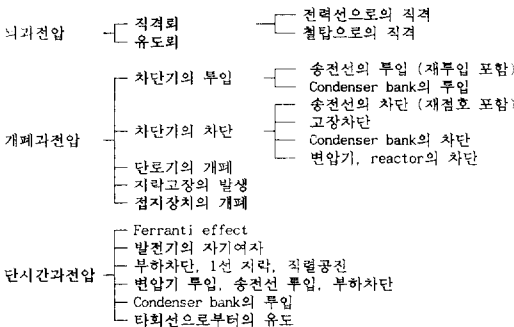
## 4. 케이블 시스템에서 발생하는 surge의 종류와 발생 mechanism

### 4.1 과전압의 발생원인

전력시스템에서 과전압의 주된 발생원인을 분류하면 표 1과 같으며, 이 가운데 뇌과전압 및 개폐과전압이 surge라고 불려지고 있어 뇌 surge 및 개폐 surge라고 한다.

케이블의 절연을 생각할 때 심선-sheath 사이, sheath-대지 사이를 고려할 필요가 있으며, 단 sheath-대지 사이는 단시간 과전압에서는 극히 작은 전압이 발생하여 무시할 수 있다. 이것은 sheath 회로가 보통 여러곳에 접지되어 있고 주파수가 상대적으로 낮은 단시간 과전압에 대해서는 접지점에서 떨어진 sheath 회로에도 접지에 의한 전압 억제효과가

표 1. 과전압의 분류와 발생원인



미치기 때문이다. 또한 개폐과전압에 대해서도 거의 문제가 없는 것으로 보고되고 있다.

### 4.2 surge 발생 mechanism 과 개요

#### (1) 뇌 surge

뇌 surge 발생은 첫째 송전선에 가해지는 직격뇌 surge에 의한 것이다. 한가닥의 송전선의 경우 surge impedance를  $Z$ , 뇌전류를  $I$ 라고 하면 전류는 양분되어 흐르므로 뇌격점에서 양측으로 향해  $ZI/2$ 의 전압 surge가 진행된다. 또한 철탍에 가해지는 직격뇌 surge가 있는데 이것은 가공지선의 surge impedance와 철탍의 surge impedance의 합성 surge impedance  $Z$ 에 의해 탑정상에서는  $ZI$ 에 의한 전위상승이 생기며 지표로 향해서 진행된 전압은 탑각에서 반사상을 일으키고 탑정상으로 되돌아와 탑정상의 전위가 그 이상의 전위를 상승하지 않도록 한다. 이 탑정상의 전위 즉 가공지선전압에 의해 전력선에 전압이 유도된다. 또 철탍을 진행하는 전압에 의해 arm에도 전압이 생기는데 이들의 차로로서 전력선과 arm 사이에 전압이 발생한다. 이 전압에 에자나 horn이 견딜 수 없으면 flashover(역 flashover)가 생기며 지락사고가 되는 동시에 철탍측의 전압이 전력선에 인가되고 전력선에 생긴 전압은 진행파가 되어 변전소 등에 침입한다. 한편 유도뢰 surge가 있는데 이것은 직격뢰에 의한 전압에 비해 작다.

이렇게 발생된 뇌 surge는 철탍 등에 의해 투과, 반사 혹은 감쇄를 하면서 진행하여 변전소와 케이블 접속점 등에 도달한다. 역 flashover에 의한 뇌 surge의 파미장은 짧다. 단 GIS와 케이블 등 surge impedance가 작은 회로근처에서 발생한 역 flashover 지점에서 반사상 되는 결과로 최초의 전압과 동극성의 surge가 파미부에 중첩되어 등가적으로는 보다 긴 파미장이 되는 경우가 있다.

뇌전류는 큰 경우 100 kA 까지 되며 송전선에 걸리는 전압은 수천 kV가 된다. 변전소에서 발생하는 파형은 변전소의 구성에 의해 여러가지로 변화하며, 고주파진동을 포함하는 파형이 되는데 그 주파수는 MHz 단위이다. 그림 3은 변전소내 뇌 surge 파형계산의 한 예를 보이고 있다.

(2) 회로투입 및 차단에 의한 surge

회로투입의 경우는 차단기와 단로기의 투입이나 재접촉의 경우에 해당되는 것으로서 투입점의 차단기 양측의 전압차가 급격히 0으로 되므로 발생한다. switch 투입전의 switch 좌측전압을  $E_s$ , 우측전압을  $E_l$ , switch 양측의 surge impedance 를  $Z_s, Z_l$  이라 할 때 switch 사이의 전압( $E_s - E_l$ )을  $Z_s + Z_l$ 로 비례 배분한 전압이 좌우로 surge 가 되어 진행하며 회로 내에서 반사와 투과를 반복해 과전압을 발생한다. 한편, 다상 시스템에서는 다른상으로부터 유도때문에 단상보다 큰 전압이 된다.

회로투입에 의한 surge 도 시스템 구성과 모선구성에 따라 여러가지 파형이 되는데 일반적으로는 송전선을 투입한 경우의 surge 의 주요주파수는 단로기보다 낮으며 차단기에 의한 송전선의 투입시 가공이나 케이블에서는 2.0~2.8배 정도의 전압이 발생하는 최대치로 취급되고 있다. 단로기 투입시나 차단시에는 짧은 모선내의 surge 전파가 되므로 수십~100 MHz 의 진동주파수가 되는 경우가 있다.

회로의 차단경우는 차단기에 의한 사고전류차단이나 접지장치의 개방등에 의해 surge 가 발생하며, 가공시스템에서 사고전류 차단시의 surge 전압의 최대치는 1.8~2.0배가 되고 있다. 한편, 케이블을 포함한 시스템의 차단 surge 의 검토결과는 보고되지 않고 있으나 가공시스템과 같거나 그 이하로 예상되고 있다.

(3) 지락발생에 의한 surge

이것은 송전선의 지락, 접지장치의 투입 등에 의해 생기는 것으로서 지락이 발생하지 않은 경우의 지락점의 전압과 크기가 같고 역방향의 전압을 지락점에 인가한 것과 등가이다. 더욱 가공시스템에서는

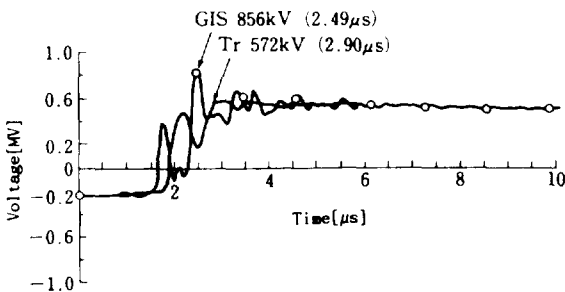


그림 3. 변전소내의 뇌 surge 파형계산 예

지락발생에 의한 surge 는 지락이 생긴 선로가 아니고 유도를 받은 건전상에서 최대전압을 발생한다.

케이블 시스템내의 사고경우는 상간의 결합 impedance 가 작으므로 지락상에서 최대치가 된다. 단 비접지 혹은 impedance 접지의 경우에는 지락상의 전압변화가 중성점의 전압변화로 되어 건전상에 전압변화가 생기고 또 다시 overshoot 가 되어 건전상에 최대치를 발생한다.

케이블만의 시스템에서는 상간의 결합이 작으므로 가공시스템 정도의 과전압은 발생되지 않을 것으로 예상된다. 케이블과 가공선이 접속된 경우 케이블 부분에서는 가공만큼 되지 않으며, 더욱 케이블 부분에서 지락이 발생하면 가공시스템의 2배이상 되는 과전압이 생기는 경우가 있다.

5. 케이블 sheath 에서 발생하는 surge 전압

케이블 접속부는 종단부와 중간부가 있는데 종단부는 가공선과 GIS 등과의 접속점이다. 이 때 케이블 sheath 가 접속되어 있어도 그 접지선 접촉점이 접속점에서 멀리 떨어져 있는 경우 혹은 접지저항이 큰 경우는 가공선이나 GIS 로 침입하는 surge 의 준도가 높아 케이블에 sheath 전압이 발생한다.

5.1 종단접속부에서 발생하는 surge 전압

(1) 가공지중접속점

이것은 철탑상에서 분기하거나 단독 가설대에 의해 지상으로 분기하는 경우가 있다. 이중 특히 탐상 분기의 경우는 sheath 의 접지선이 높고 접지선의 impedance 가 크게 되는데 이 때문에 sheath surge 전압을 충분히 억제할 수 없는 경우가 있다. 또 케이블이 대지에 수직인 것과, 포설위치도 탐내 및 완금부를 통과하며 회로정수가 높이에 따라 변화하는 등 아직까지 정량적으로 회로정수가 파악되지 않아 해석적인 해명은 미흡하다.

(2) 가스절연모선접속점

가스절연모선 tank 와 케이블 sheath 사이가 절연통으로 절연되어 있으며, 가스모선측에서 급준 surge 가 진행해 오면 가공지중접속점과 같은 현상에 따라 고주파 surge 가 발생하는데, 이 경우도 정확한

해석이 어려운 실정이다.

### 5.2 Cross-bonding 점에서 발생하는 surge 전압

Cross-bonding 점은 변이점이므로 복잡한 투과와 반사가 생기고, 또 심선과 sheath 사이의 전압으로부터 sheath ~대지간 전압이 생기며, 그 반대의 전압도 생긴다. 그런데 이 전압과 전류의 크기와 파형을 엄밀하게 구하는 것은 매우 어려운데 그 이유로서는 전파해 오는 전압, 전류는 감쇄를 하며, 특히 sheath ~ 대지사이의 진행파는 대지의 영향을 크게 받기 때문에 정확한 예측이 곤란하다. 또한 복잡한 구조의 전력구 등에서는 surge impedance 를 정확히 구하기가 어려운 실정에 있다. 한편, 진행파가 감쇄하지 않으면 제 1 cross-bonding 점에서 최대치가 발생한다고는 할 수 없으나 field test 의 결과에서는 대부분의 경우 전압입력점에 가장 가까운 점에 전압이 도달시에 최대전압이 발생한다고 보고되고 있다. 그리고 실측결과 surge 침입측으로부터 떨어진 점일수록 sheath 에 생기는 전압은 작게되나 방식층 보호장치를 설치하면 그 앞의 설치하지 않은 곳의 전압이 크게 된다.

## 6. 케이블 시스템의 surge 해석 방법

전력케이블의 전자과도현상을 계산하는 방법은 크게 나누어 analog 계산법과 digital 계산법이 있다. analog 의 대표적인 계산법은 TNA(Transient Network Analyzer)가 있으며, digital 은 진행파법으로서 격자도법, Schnyder-Bergeron 법, EMTP (Electro-Magnetic Transient Program)법이 있으며, 그 이외에 주파수변환법, 수치적분법 및 차분법 등이 있다.

### 6.1 Analog 계산법

Analog 에 의한 surge 계산법에는 analog 계산기, surge 계산반, 모의송전선 및 TNA 등이 있으며, 이 모두 TNA 와 원리적으로는 동일하지만 parameter 의 변경 등 조작성에 난점들이 있다. TNA 는 전력시스템에 존재하는 송전선, 각종기기의 등가성을 유지하면서 축소시킨 model 을 이용해서 대상회로를

구성하여 현상을 해석을 하는 것이다. 주요구성요소로서는 전원, 송전선, 차단기, 피뢰기, 변압기, reactor 및 직교변환기 등이 있다. TNA 에 의한 surge 계산의 장점으로서 real-time 으로 동작하며 계산이 빠르고 반복계산이 쉽다. 또한 현상을 물리적으로 파악하기가 쉬우며 피뢰기 등의 비선형 모의가 쉽다. 그리고 시스템회로계산은 TNA 로, data 처리와 TNA 로, data 처리와 TNA 제어는 digital 계산기를 이용하는 hybrid 형 계산시스템이 1972년 IREQ 등에서 채용되고 있다. 그러나 모의 시스템을 구성하는데 오랜시간이 걸리며 모의대상 시스템의 크기에 한계성이 있는 등의 결점이 있다.

### 6.2 Digital 계산법

이것은 Schnyder-Bergeron 법을 기초로 하여 다시 발전시킨 것으로서, 즉 분포정수선로를 포함한 전력시스템의 모든 소자를 등가전류원과 저항으로 치환하고 이 등가회로에 대해서 nodal equation 을 세우고 그 admittance 행렬의 역행렬을 구함으로 해를 얻는 방법이다.

EMTP 의 계산대상은 다음과 같은 요소의 조합회로나 이 회로로 등가표현할 수 있는 물리적 현상이다.

- R, L, C 집중정수소자
- 다상분포정수선로(완전연가, 비연가, 가공·지중케이블)
- 집중정수다상  $\pi$  형선로(상호유도포함)
- 비선형저항(피뢰기), 비선형 reactor, 시변저항
- switch 소자(차단기, 보호 gap, 회로접속상태 변경)
- 변압기, 각종전압전류원
- 동기기, 제어회로

또한 EMTP 에서는 가공선, 케이블의 각종 정수 계산과 통계적 과전압계산을 할 수 있는데, EMTP 는 1968년 Dommel 에 의해 미국의 BPA 에서 개발된 것으로서 그 범용성과 공개형 software 라는 관점에서 범세계적으로 실용화 되어 있으며, 케이블 시스템의 surge 해석에도 매우 실용적으로 이용되고 있다.

한편 주파수변환법(FTP)을 보면 이것은 대상으로

하는 주파수영역에서의 정상해를 구하고 이것을 수치적으로 Fourier 나 Laplace 역변환을 하여 시간해를 구하는 것이다. 해석적인 해를 이용하고 있기 때문에 수치계산상의 오차를 무시하면 수학적으로 엄밀한 해가 되는 특징이 있다. 특히 Wedepohl에 의해 개발된 program은 분포정수를 포함한 전력시스템의 surge 계산을 주목적으로 하고 있어 영국, 캐나다에서도 이용되고 있는데, 이것은 다음의 조합으로 이루어지는 회로의 정상 및 과도현상을 다루고 있다.

- R, L, C 집중정수소자
- 다상집중정수선로
- 다상분포정수선로(임의의 가공선, 지중케이블)
- 비선형저항, switch 소자, 각종 전압전류원

## 7. 케이블 시스템의 surge 해석 평가에

여기서는 EMTP와 FTP에 대해서 계산치와 실제치의 검토 예를 기초로 케이블 시스템의 surge 해석방법으로서의 비교, 평가를 본다. 먼저 그림 4의 선로 경우에서 케이블은 110 kV, 650 mm<sup>2</sup> Al sheath 케이블이며, 심선에는 가공선과의 접속을 모의한 500 ohm의 저항을 넣고 sheath는 10 ohm의 저항으로 접속한 회로로 인가상 송전단 심선전압과 제2 crossing-bonding 점의 sheath 전압에 대한 계산을 EMTP의 다상분포정수 model과  $\pi$ 형 등가선로 및 FTP법의 각각에 대해서 실시하였다.

그림 5, 6, 7은 EMTP와 FTP법에 의한 계산과 실제결과의 파형을 나타낸 것이며, (a)와 (b)는 인가 cable의 심선전압 및 제2 cross-bonding 점의 sheath 전압이다. 이 경우는 FTP가 실제에 더 가까우나 EMTP 방법도 실용적으로는 충분히 좋은 결과

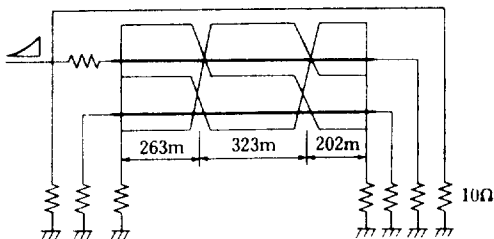
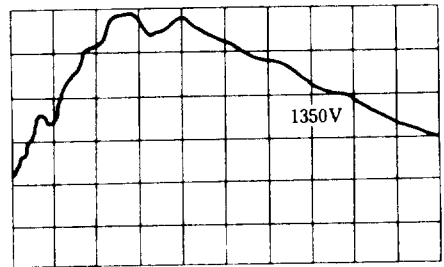


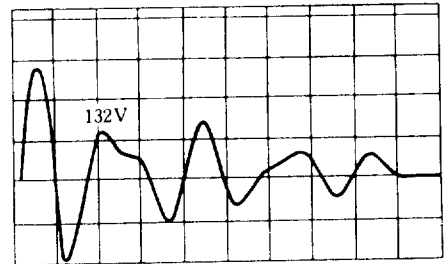
그림 4. 케이블 선로

가 얻어진 것이며, 특히 EMTP의 경우는 대상선로에 피뢰기 등의 비선형소자를 접속해도 일부의 data 변경만으로 쉽게 해석할 수 있고, 또 switch 조작이 많아도 쉽게 대응할 수 있다.

한편, 전력케이블은 매설방식, 배치 등이 진행과의 감쇄, 전파속도 등에 영향을 미치게 하고 있는데 여기서는 그중 전력구 포설의 경우 보고된 영향과 해석결과를 살펴보기로 한다. 이 경우는 전력구의 벽 두께, 벽면의 매질, 케이블 포설 위치 및 전력구 반경 등에 따라 주파수 의존성과 전파속도, 특성 임피던스 등이 변화하게 되는데, 특히 파형전파특성은 케이블과 전력구 벽면간의 거리에 크게 좌우되므로 거리는 매우 중요하다. EMTP 해석 예를 보면 275 kV, 1x1, 400 mm<sup>2</sup> OF 케이블로서 길이가 7 km인 전력구포설 선로에 대한 모의 pulse 시험을 실시하여 실측치와 계산치를 비교하였다. 특히 여기서는 케이블을 6도체의 분포정수선로로 하고 전파정수를 EMTP의 케이블 constants routine에 의해 구했으며, 전력구는 커다란 pipe로 취급하여 전력구 장벽에서의 케이블 거리를 실제와 같게 하였다. 또한 절연접속부의 gapless 피뢰기는 다상 ZnO형 피뢰기 소자 model를 이용하고 cross-bonding 선, NJ 접지선 등은 1  $\mu$ H/m의 inductance로 취급하였다. IJ의

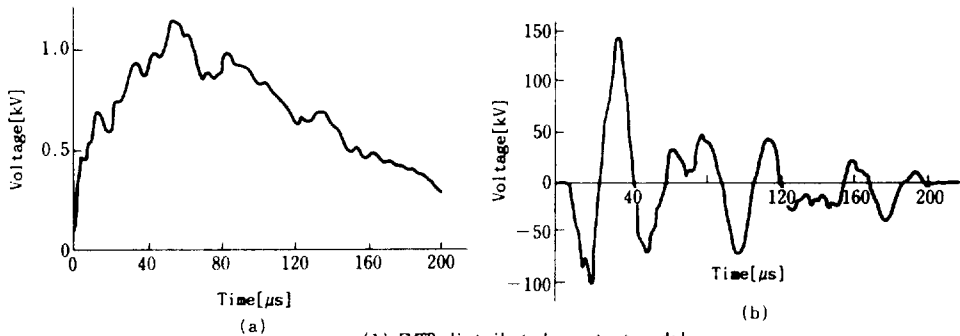


(a)

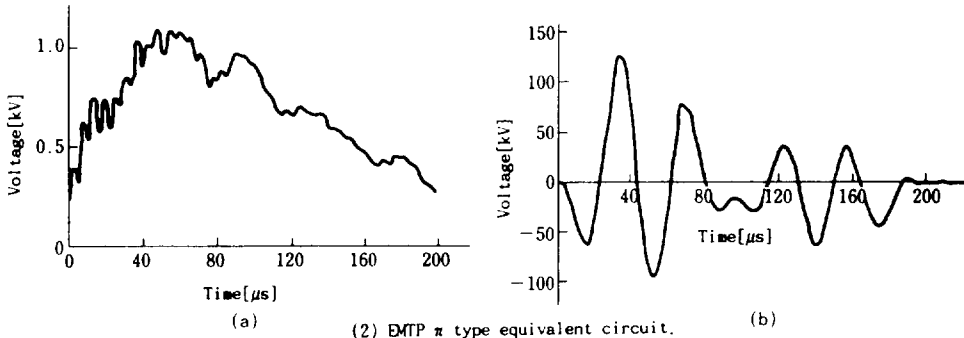


(b)

그림 5. 실측결과



(1) EMTP distributed constant model.



(2) EMTP  $\pi$  type equivalent circuit.

그림 6. EMTP법에 의한 결과

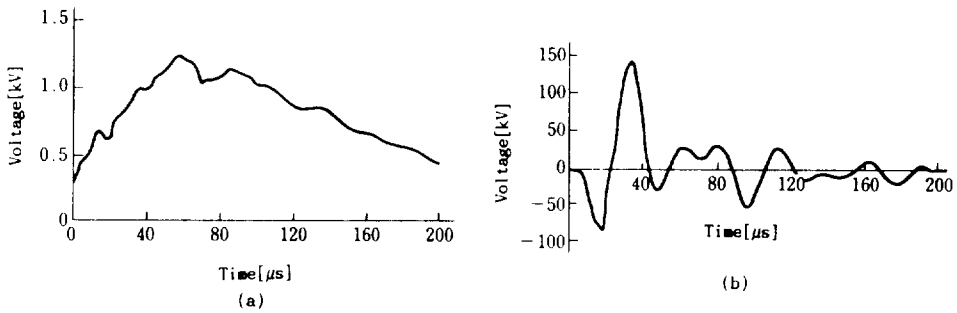


그림 7. FTP 법에 의한 결과

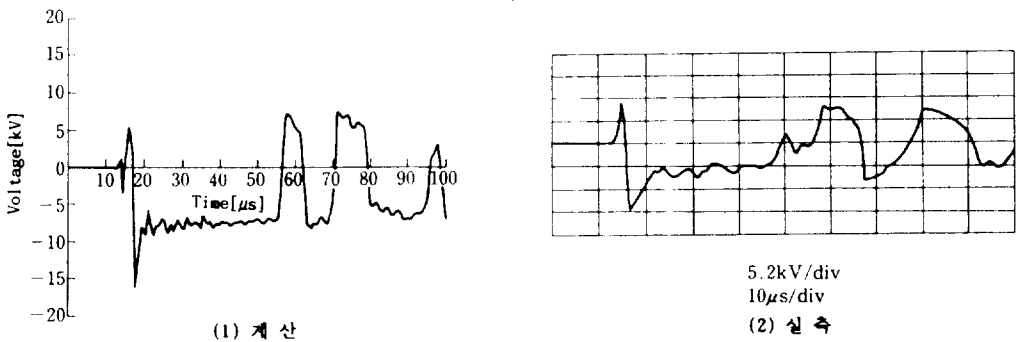


그림 8. Sheath 전압의 한 예



전압과형 계산결과중의 하나와 실측치와의 비교에는 그림 8과 같으며, 거의 파고치 및 파형이 일치함을 보이고 있다.

또한, EMTP에 의한 surge 해석 예는 보통 케이블 constants routine이 사용되고 있으며 이 정수계산에 있어서 케이블과 GIS의 심선에서 sheath 사이의 surge impedance는 기하학적인 형상과 재료물성치로부터 구해진다. 특히 케이블 constants의 입력에는 보다 실제상황에 부합되는 정수를 얻기 위해

- 관로포설에서는 관로의 빈 공간과 케이블 방식층의 복합유전체라는 관점에서 합성 유전율을 구하여 채용
- 케이블 절연체의 경우 반도체 차폐층과 Al sheath 사이에 공간이 있으므로 비유전율로서는 구조를 고려한 등가유전율을 사용

와 같은 방법이 추천되고 있다.

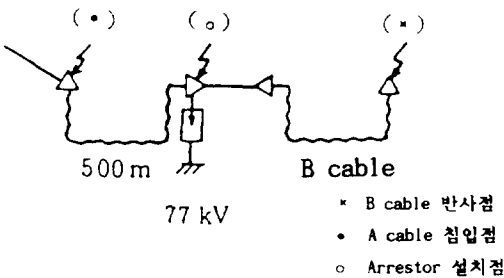


그림 9. 전 지중케이블 시스템

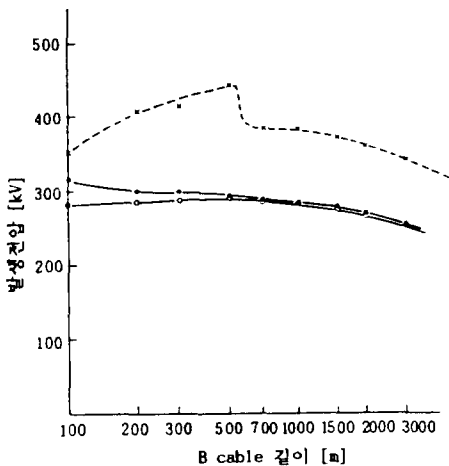


그림 10. 뇌 surge 해석 예

또한 전력구에서는 pipe type cable model을 사용하여 전력구벽면을 pipe로 간주하여 계산하며, 직사각형의 전력구는 원형으로 근사화시키고 직경은 전력구의 등가직경으로 한다. 그리고 EMTP의 다상분포정수 model에서는 계산주파수를 지정할 필요가 있으며, ZnO형 소자가 있는 방식층 보호장치는 아주 큰 정전용량을 갖고 있어 급준파에서는 이 정전용량을 무시할 수가 없기 때문에 정전용량과 비선형저항과의 병렬회로로 처리한다. 한편 케이블 시스템에 접속되어 있는 변압기나 reactor는 surge 해석에서 집중정수선로로 취급되는 것이 보통이며, GIS의 심선에서 sheath 사이는 무손실의 분포정수회로로서 취급 된다. 그림 10은 A 케이블의 길이가 500 m의 경우인 그림 9와 같은 77 kV 전지중케이블 시스템의 각 지점에서 발생하는 전압을 EMTP에 의한 뇌 surge 해석을 통해 나타낸 것이다. 케이블 내부에서의 최고전압은 개방단인 B 케이블의 B 변전소측에서 발생함을 볼 수 있으며, 특히 A 케이블 길이와 B 케이블 길이가 거의 같으면 각각의 케이블 내부 왕복반사가 중첩하게 되어 발생전압이 높게 된다.

## 8. 케이블 시스템에서의 surge 대책 현황

### 8.1 주절연체의 surge 보호장치

내뢰설계를 하는 것 뿐만 아니라 케이블에 침입하는 surge에 의해 케이블에 발생하는 surge 전압이 BIL 값을 넘는 시스템에 대해서는 케이블 보호를 위해 보호장치를 설치하여 뇌 surge에 대한 보호를 해야 하는데 현재 사용되고 있는 보호장치의 종류는 다음과 같다.

#### (1) 기중 gap

비교적 간단하게 구성할 수 있는 피뢰장치이나 급준 surge에 대한 flashover 전압이 높아지는 등 특성상 결점이 있어 현재는 사용되지 않고 있다.

#### (2) 피뢰기

피뢰기는 지금까지 이용되고 있는 대표적인 보호장치로서 과거부터 직렬 gap형의 피뢰기가 사용되는 것이 대부분이었으나 최근에는 ZnO 소자를 이용한 보다 고성능인 gapless의 ZnO형 피뢰기가 많이 사용되고 있다. 특히 이 gapless형 피뢰기의 특징을

보면 직렬 gap를 갖지 않고 비선형 소자로서 ZnO 소자를 이용하고 있는 피뢰기이다. ZnO 소자는 종래의 SiC 소자에 비해 전압제한효과가 우수하다. 또 SiC 소자의 경우에는 직렬 gap를 매개로 선로에 접속해야 하나 ZnO 소자는 상시대지전압에서 소자의 발열에 영향을 주는 저항분전류가 매우 작아 수백  $\mu\text{A}$  정도이므로 직렬 gap를 매개로 하지 않고 직접 시스템에 접속할 수가 있다. 이와 같이 gapless형 피뢰기는 종래의 피뢰기와 비교해서 소형, 경량 및 보호성능의 향상 등 여러가지의 장점을 갖고 있어 현재 선진국의 거의 모든 경우에서 이 피뢰기가 사용되고 있다.

## 8.2 방식층의 surge 보호 장치

### (1) 고주파 surge by-pass condenser

이것은 주파수가 높을 수록 그 impedance가 작게 되는 특성이 있어 절연통 사이에 설치하는 것으로서 고주파 surge의 by-pass 회로를 형성할 수가 있다.

### (2) 방식층 보호장치

종래는 SiC 소자와 직렬 gap 구성된 것이 일반적으로 사용되어 왔으나 이제는 방식층 보호장치에도 gapless의 ZnO형 피뢰기가 널리 사용되어 오고 있다. 이것은 시스템 구성, 사용케이블의 종류 및 보수작업성 등을 고려하여 specification이 정해지나 주절연의 피뢰기와 원리적으로 같은 것이 사용되므로 기본적인 소자특성은 거의 같다.

## 8.3 주절연체의 보호대책

내뢰설계를 할 경우 대상선로, 뇌격파형, 철탑, 송전선의 model 방법의 차이, 해석 방법의 차이 등으로 결과가 크게 다를 수 있다. 일본에서는 거의가 개별설계로 전력회사들이 대처하고 있으며 주로 CRIEPI에서 개발한 발변전소 내뢰설계 guide book에 기초하여 케이블내에 발생하는 뇌 surge level을 추정하고 발생전압이 시스템의 BIL을 넘을 경우에 대해서는 피뢰기를 접속하는 등의 대책을 세우고 있다.

특히 뇌격조건으로 뇌격파형은 실측결과에 기초하지만 파두장은 짧고 가혹한 것을 고려해 2  $\mu\text{s}$ 로 하고 파미장은 케이블내의 surge 왕복반사에 의한 전

위상승에 주는 영향이 크므로 실측 data의 90% 이상을 점유하는 70  $\mu\text{s}$ 로 하고 있다. 또한 피뢰기 설치 장소는 송전선측, 변전소측 및 양방에 설치하는 경우가 있으나 선로조건에 따라 결정되며 일반적으로 어느 한쪽에만 설치되는 경우가 많고 양단에 설치되는 경우는 적다.

## 8.4 방식층의 보호대책

Sheath 회로에서는 주절연회로와 달리 surge 전과 과정에서 특이점이 되는 종단접속부와 중간접속부가 존재하고 있으므로 surge 침입시에는 이들 점에서 고전압이 발생할 가능성이 있다. 그러나 sheath surge 현상은 복잡하여 표준적인 방식층 보호대책을 확립하는데는 아직 이르지 못한 실정에 있다.

### (1) 기중종단접속부에서의 보호대책

접지방식으로서의 surge 침입측 가공지중접속점의 종단부를 접지하거나 접지 lead 선 길이, 보수성에 따라 접지장소를 선정하게 된다. 또한 기중종단접속부는 GIS 경우와는 달리 모선측의 surge impedance가 크므로 큰 sheath surge 전압이 발생하는 경우는 드물다. 그러나 초고압 시스템에서는 시스템 전압이 크므로 케이블 방식층의 내전압 level을 초과하는 경우도 있는데, 이 대책으로서는 저 impedance 접지장치가 개발되어 사용되고 있다.

### (2) GIS 종단접속부에서의 보호대책

GIS 종단접속부에서는 고주파의 surge 침입 우려가 있으므로 GIS 종단접속부에서 sheath를 접지하는 것이 바람직하다. 또한 GIS와 케이블 sheath 사이에 상용주파의 순환전류가 흐르는 것을 방지하고 GIS와 케이블 sheath를 절연해서 사고구간 판별용의 CT부에 sheath 전류가 흐르는 것을 방지하기 위해 절연통이 GIS 종단접속부에 접속되어 있다.

### (3) 중간접속부에서의 보호대책

Cross-bonding 회로의 중간접속부에서 발생하는 sheath surge 대책으로서 현재는 대부분이 방식층 보호장치를 이용하여 보호하는 방식이 채용되고 있다. 현재 일반적으로 채용되고 있는 접지방식은 대지간 방식으로 접지선은 보통 manhole내에 설치하여 접지점에 접속하고 있으며 저항이 수10 ohm 이하가 되도록 하고 있다.

## 9. 금후의 과제

지금까지 지중송전케이블 시스템의 surge 현상과 보호대책의 현황에 대해 개략적으로 언급하였다. 한편 보다 합리적으로 신뢰성이 높은 절연 및 내뢰설계기술을 확립하고 그 보호대책을 세우기 위해서는 앞으로 다음과 같은 것이 검토되어야 할 것으로 보고 되고 있다.

(1) 케이블 시스템의 surge 현상에 대한 상세한 해석을 위해서는 최근 전력케이블과 그 이외 설비의 연결방식이 다양해져서 케이블에 더욱 가혹한 surge가 침입되므로 케이블만이 아니라 변전소와 가공선부분 등 surge source가 되는 부분의 해석방법을 포함하여 연계해서 다루어야만 한다.

(2) 해석방법의 확립에는 실선로에서의 실측 data에 의한 확인이 필요하므로 금후 실선로의 여러가지 포설방식까지 고려하여 많은 data의 수집이 이루어져야 한다. 특히 실선로에서의 surge 측정시에서는 측정항목, 측정장소 등 적절한 측정조건을 선정하는 것 이외에 측정시스템의 유도대책 등 신뢰성 있는 data가 얻어지도록 해야 한다. 최근의 DAS 시스템이나 내유도성에 우수한 정보전송매체인 optical sensor 또는 optical fiber 등을 적극적으로 이용할 필요가 있다.

(3) 케이블 시스템에서 절연체에 대해서는 비교적 간단한 해석으로 현상이 파악되며, 절연설계도 절연체의 impulse 내전압 특성을 고려하여서 실시하여 고신뢰도의 보호대책이 얻어지고 있다. 한편 방식층의 절연설계는 두께를 두껍게 하여 내전압 level을 높이는 것은 실용적이지 못해 필요에 따라 보호장치를 설치해서 과전압을 억제하고 합리적인 두께가 되도록 설계하고 있으나, sheath 회로의 surge 현상은 매우 복잡하기도 하여 경험적으로 방식층 보호대책이 이루어지고 있는 실정에 있다. 앞으로 방식층 보호장치의 방식뿐만이 아니라 필요갯수, 장소 및 포설형태에 적합한 방식등을 검토하고 방식층의 성능 및 보호장치의 성능도 고려한 합리적인 sheath 보호대책을 확립해 나갈 필요가 있다.

(4) 케이블의 impulse 내전압 특성에서 절연체가 급준파 surge와 AC 중첩의 impulse 특성에 대해서는 명확하지 않은 경우가 있다. AC 중첩시의 surge는 금후 BIL 값이 낮아지면 케이블 절연체에 보다

가혹한 조건이 될 수 있으므로 그 특성을 파악할 필요가 있다.

(5) 방식층의 특성에 대해서는 장기성능면에서 data가 부족하여 적정한 내 impulse level을 구하기가 어렵다. 장기성능은 사용조건, 환경 등에 영향을 받을 것으로 예상되므로 실험적 data와 철거 케이블의 data를 모두 고려하여 장기성능을 분명히 할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] EMTF Reference book
- [2] L. M. Wedpohl: "Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems", Proc. IEE, 120, No. 2, 1973.
- [3] A. Ametani: "A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables", IEEE Trans. PAS-99, No. 3, 1980.
- [4] A. Ametani: "A Study of Cable Transient Calculations Part I, II", Sci. Eng. Rev. Doshisha Univ. 24, No. 2, 1983.
- [5] N. Nagaoka, et al. "Transient Calculations on Crossbonded Cables", IEEE Trans. PAS-102, No. 4, 1983.
- [6] 松原, 他: "洞道内布設CVケーブルのサージ特性", CRIEPI, T 86550, 1987.
- [7] R. G. Wasley, et al.: "Computation of Sheath Transient Response in a Single Point Bonded Cable Section", IEEE PAS-86, No. 1, 1977.
- [8] 絶縁設計合理化専門委員會: "絶縁設計の合理化", 電氣協同研究, 44, No. 3, 1988.
- [9] CRIEPI: "電力系統における開閉サージ性過電壓の検討", 電力中央研究所綜合報告, 121.
- [10] W. F. J. Kersten, et al.: "Surge Arrestor for Sheath Protection in Crossbonded Cable System", Proc. IEE 126, No. 12, 1979.
- [11] 神野, 他: "管路布設ケーブルツース回路における解析基礎検討", 日本電氣學會全國大會, 1418, 1989.
- [12] 尾崎, 他: "發變電所耐雷設計ガイドブック", CRIEPI 技術報告, 175034, 1976.
- [13] Ametani, et al.: "Transient Sheath Voltage Characteristic of a Crossbonded Cable Installed within a Tunnel", IEEEJ, Vol. 111-B, No. 7, 1991.
- [14] 吉田, 他: "洞道布設クロスホトケーブルシースサージの實測と解釋", 日本電氣學會全國大會, 1990.
- [15] 日本電氣學會: "ケーブル系統におけるサージ現象と對

策”, 日本電氣學會技術報告, 1991.

[16] 한국전력공사: “과도해석프로그램”, 전력기술 Workshop, 1987.

[17] A. Ametani: “EMTP Program의適用について”,

日新電氣技報 Vol. 27, No. 1, 1982.

[18] EPRI: “Surge Behavior of UD cable systems”, EPRI EL-720, 1978.



**이종범(李鍾範)**

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987~90년 전기연구소 지중송전연구실장. 현재 원광대 공대 전기공학과 조교수.



**박대희(朴大熙)**

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985~89년 일본 오사카대 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 금성전선 연구소 선임연구원. 현재 원광대 공대 재료공학과 조교수. 당학회 편집위원.