

시스 순환전류 저감장치의 과도특성 및 보호방식에 관한 연구

論文
52A-7-10

A Study on the Transient Characteristic and Protection Schemes of Sheath Circulating Current Reduction Equipment

姜地原* · 韓鏞熙** · 鄭彩均*** · 李鍾範§
(Ji-Won Kang · Yong-Hee Han · Chae-Kyun Jung · Jong-Beom Lee)

Abstract - After the cable is installed, many geometric factors, such as burying types of the cable and the length difference of the cable between each minor section will cause the impedance unbalance between cables. The impedance unbalance will increase or decrease the sheath circulating currents, which are critical to human safety and sustaining the capabilities of electric power. Accordingly, in this paper, a new method is also proposed to reduce the sheath circulating currents and an reduction equipment according to the theory of the new method is developed. The reduction equipment is tested when the cable is on service. The test results show that it can reduce the sheath circulating currents by up to 97.8[%]. This confirms the validation of the new method and the reduction equipment, and assures the safe operation of the transmission cables.

In order to illustrate the safe operation of the cable with new current reduction equipment at transient state due to lightning and single line-to-ground fault, extensive simulations have been made. Then the protection scheme of sheath circulating currents reduction equipment is proposed by adopting the new device of RDP(Reduction Device Protector).

Key Words : Sheath circulating current, Transmission cable, RDP

1. 서론

국내 지중송전계통은 1997년부터 345kV급 OF 케이블이 대도시를 중심으로 포설되어 운전중에 있으며, 2003년부터는 345kV급 XLPE 케이블을 2002년 11월말에 서울 외곽지역에 최초로 포설되어 운전될 예정이다. 이처럼 전력수요는 해마다 증가하고 있고 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요가 높아지는 등 여러 가지 환경적 요인으로 인하여 전력계통에서 지중송전선로의 점유율이 증대되고 있다.

그러나 국내 지중송전계통의 포설은 체계적인 시스템 구성을 통한 관련기준안을 수립하여 적정 포설형태를 시행하기 보다는 포설환경에만 지나치게 의존한 관계로 전력구식, 관로식, 직매식과 같은 단일 포설형태보다는 이러한 방식이 혼합되어 포설되는 경우가 많다. 이러한 지중송전선로의 다양한 포설형태로 인하여 선로에서 발생하는 문제점이 많이 있는데, 그 중에서도 특히 과다한 시스전류의 발생은 우리나라와 같이 다회선이 동시에 포설되어 운용되거나 수직회선의 지중배전선로와 병행하여 포설 운용되는 상황에서는 송전용량을 제한시키고 있어 전력전송에 많은 저해요인으로 대두되어 큰 문제점으로 나타나고 있으므로[1-5], 과다한 순환전류에 대한 저감대책을 수립하는 것은 지중송전계통의 합리적 운용과 안정성 확보 및 신뢰도 증진을 위해 필수적이라고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 실제 시스 순환전류 과다로 문제가

되고 있는 실계통을 선택한 후, 개발된 시스 순환전류 저감장치의 실증시험을 통해 시스전류 저감효과가 탁월함을 보였으며, 아울러 저감장치를 적용한 실계통에서 발생할 수도 있는 1선 지락고장 및 뇌 찌지 침입으로 인한 저감장치 및 케이블 시스 계통의 과도특성 분석을 통하여 저감장치 보호방식을 수립하여 실선로 적용 가능성을 제시하였다.

2. 저감장치를 이용한 시스 순환전류 저감효과 검토

본 절에서는 시스 순환전류 저감방안을 모색하고자 국내 지중송전선로 케이블 계통의 시스회로에 임피던스 성분의 시스 순환전류 저감장치를 삽입하였을 때의 실증시험 결과에 대해서 다루었다.

일반적으로 지중송전계통의 크로스분당 된 한 구간에서 회선수에 관계없이 시스 순환전류를 계산하는 일반적인 계산식은 식 (1)과 같이 표현된다[6].

$$l \cdot [z_1][I_{si}] + m \cdot [z_2][I_{si}] + n \cdot [z_3][I_{si}] + [V_s] + (R_1 + R_2) \sum_{i=1}^n I_{si} = 0$$

$$[V_s] = l \cdot [Z_1][I_i] + m \cdot [Z_2][I_i] + n \cdot [Z_3][I_i] \quad (1)$$

여기서, l, m, n : 크로스본드 각 소구간의 경간길이[km]
 $[z_1], [z_2], [z_3]$: 각 소구간에서의 케이블 시스 대지 귀로 임피던스 행렬[Ω/km]
 $[Z_1], [Z_2], [Z_3]$: 각 소구간에서의 케이블 도체-시스 간 상호임피던스 행렬[Ω/km]
 $[I_{si}]$: 케이블 시스 순환전류 행렬[A]
 $[I_i]$: 케이블 도체전류 행렬[A]
 $[V_s]$: 케이블 시스 유기전압 행렬[V]

2.1 실증시험을 위한 대상선로 검토

그림 1은 2회선 154kV OF 2000[mm²] 케이블계통의 케이블 접속형태 및 구간길이를 나타내었다. 케이블 선로공장은

* 正會員 : 韓電 電力研究院 先任研究員
 ** 正會員 : 韓國電力公社 구조개편팀장
 *** 正會員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 博士課程
 § 正會員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授
 接受日字 : 2003年 1月 22日
 最終完了 : 2003年 6月 2日

6.264[km]이며, 부하전류는 300[A], 포설방식은 전력구식과 관로식이 혼합된 형태이며, SVL(Sheath Voltage Limiter) 결선방식은 대지접지방식을 사용하는 실제 운전중인 계통이다.

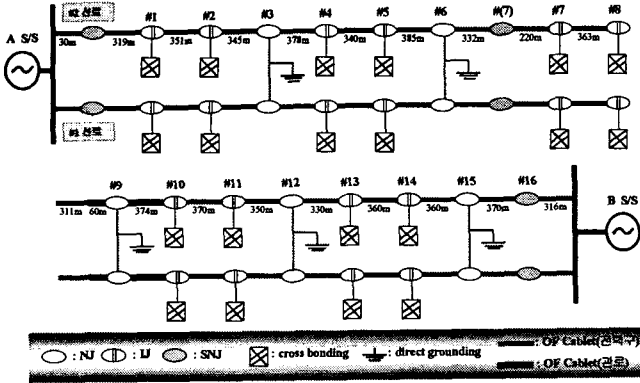


그림 1 케이블의 접속형태 및 구간길이
Fig. 1 Joint type of cable and section distance

그림 1과 같이 6개의 크로스본드 단위구간으로 되어있는 대상선로에 대하여 실측한 시스전류값과 EMTP를 이용한 시뮬레이션 시스전류값은 상당히 일치하는 경향성을 보였으므로 본 논문에서 목적으로 하는 시스 순환전류 저감을 위한 모의회로로 사용하기에는 문제가 없다고 판단된다.

한편, 현실적으로 시스 순환전류 저감을 위한 저감장치로서 어느 정도의 임피던스 크기가 적당한가를 판단하기 위해서 삽입 임피던스의 크기를 가변하면서 시스 순환전류의 저감효과를 검토할 필요성이 대두된다. 따라서 현장 실측결과 시스 순환전류가 가장 많이 흐르고 있는 J/B #11 절연접속함의 크로스본드 리드선에 저항 성분을 삽입시 삽입저항의 크기별 시스 순환전류의 크기를 비교하여 표 1 및 그림 2에 나타내었다.

표 1 및 그림 2와 같이 0.1[Ω]의 임피던스를 삽입하였을 때 평균 33.7%, 0.5[Ω]일 때 평균 77.9%, 더욱이 1.0[Ω]일 때 84.9%로 시스 순환전류 저감효과가 증가함을 알 수 있다. 또한 저항 성분을 직접 삽입한 J/B #11 절연접속함에서의 시스 순환전류는 최대 87% 이상의 저감효과가 있음을 알 수 있다.

표 1 삽입저항의 크기에 따른 시스 순환전류

Table 1 Sheath circulating currents depending on insertion resistor variation

| 접속함 No. | 시스 순환전류[A] | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--|
| | 개선전 | | | 저항 삽입 | | | | | | | | | |
| | | | | 0.1[Ω] | | | 0.5[Ω] | | | 1.0[Ω] | | | |
| A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | | |
| #9 | 52.1 | 95.9 | 101 | 26.6 | 62.0 | 59.5 | 4.8 | 12.3 | 12.1 | 10.5 | 1.2 | 9.7 | |
| #10 | 52.6 | 93.1 | 92.6 | 35.5 | 66.9 | 59.6 | 12.3 | 23.1 | 18.9 | 8.5 | 13.7 | 10.1 | |
| #11 | 59.9 | 100 | 99.8 | 41.0 | 71.9 | 66.4 | 13.5 | 24.0 | 23.0 | 7.2 | 12.8 | 12.2 | |
| #12 | 48.0 | 87.9 | 86.8 | 34.5 | 65.3 | 56.1 | 17.7 | 28.0 | 20.8 | 15.1 | 20.1 | 14.8 | |
| 시스 순환전류 저감율(%) | | | | 35.3 | 29.3 | 36.4 | 77.0 | 76.6 | 80.2 | 80.1 | 87.1 | 87.6 | |

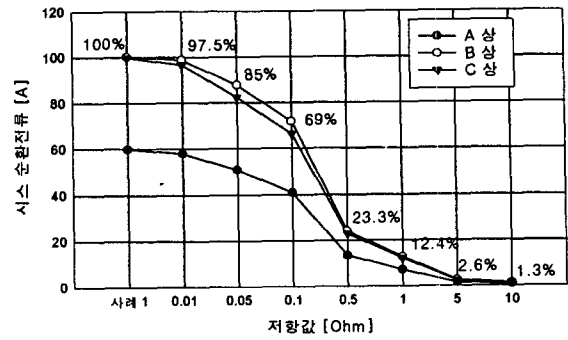


그림 2 저항삽입에 의한 시스 순환전류 저감효과 비교
Fig. 2 Comparison of sheath circulating current reduction effect by resistor insertion

따라서 시스 순환전류 저감효과, 개발될 저감장치의 크기 및 제작문제 등을 고려하여 본 논문에서는 1[Ω] 크기의 저감장치를 개발하여 실증시험을 실시하였으며, 실증시험을 통한 시스전류 저감효과에 대해서 아래 2.2절에 기술하였다.

2.2 실증시험을 통한 저감효과 검토

본 절에서는 2.1절에서 검토한 시스 순환전류 저감용 저감장치를 이용한 실증시험 결과를 비교·검토함으로써 시스 순환전류 저감효과 및 실선로 적용 가능성에 대하여 기술하였다. 실증시험은 그림 1의 선로를 대상으로 실시함으로써 데이터의 신뢰성을 더하였으며, 시스전류가 상대적으로 많이 흐르고 있는 J/B #11 절연접속함(IJ)에 저감장치로서 저항과 리액터를 삽입하는 두 가지 시험을 행하였으나 두 경우 모두 같은 경향의 저감효과를 보였으므로 본 절에서는 리액터 삽입에 의한 시스 순환전류 저감효과에 대해서만 언급하였다[7].

즉, 그림 1과 같은 해당선로에서 실제 시스 순환전류가 상대적으로 과다하게 흐르고 있는 구간인 J/B #11(IJ) 접속함의 크로스본드 시스회로에 1.0[Ω](2.65[mH])의 리액터를 삽입하여 실시한 실증시험 장면을 그림 3에, 저항 삽입 전, 후에 있어서 크로스본드 단위구간내의 전류를 비교한 결과에 대해서 표 2에 나타내었다.

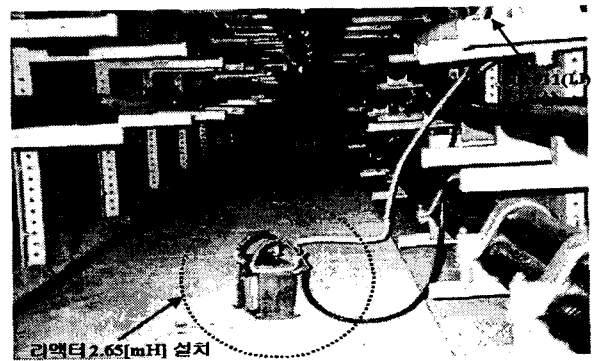


그림 3 리액터 삽입에 의한 시스 순환전류 측정
Fig. 3 The sheath circulating current measurements after reactor insertion

표 2와 같이 리액터를 삽입시 직접 적용된 J/B #11 접속함의 경우 삽입전에 비해서 평균 2.2[%]의 시스전류가 측정됨으로써 약 97.8[%]의 저감효과가 있었으며, 크로스본드 단위구간에 해당하는 J/B #9, #10, #12 접속함의 경우 평균 12.7[%]가 흐름으로써 약 87.3[%]의 저감효과가 있을 뿐만 아니라 시스전류의 불평형률도 많이 저감되었음을 알 수 있다. 즉, 상대적으로 시스 순환전류가 과다하게 흐르는 크로스본드 단위구간의 시스회로에 임피던스 성분(저항 또는 리액터)을 삽입하는 방식은 시스전류의 저감뿐만 아니라 불평형률 해소에도 상당한 효과가 있으므로 과다한 시스 순환전류가 흐르고 있는 기설선로의 시스전류 저감대책 중의 하나임을 실증시험을 통하여 입증하였다[7].

표 2 리액터 삽입 전후 실측 시스 순환전류 비교 결과
Table 2 Comparison of sheath circulating current between real circuit and reactor insertion

| 접속함 No | 측정 대상 | 시스 순환전류[A] | | | 실측에 의한 평균 저감율[%] |
|---------|-------|------------|---------------|---------------|------------------|
| | | 리액터 삽입 전 | 리액터 삽입 후 | | |
| | | | 모의결과 | 실측결과 | |
| J/B #9 | A | 50.6 | 15.7(31.0[%]) | 10.1(20.0[%]) | 86.4 |
| | B | 78.9 | 15.1(19.1[%]) | 7.3(9.30[%]) | |
| | C | 81.0 | 24.8(30.6[%]) | 9.4(11.6[%]) | |
| J/B #10 | A-B | 72.0 | 4.1(5.70[%]) | 5.7(7.90[%]) | 89.7 |
| | B-C | 69.9 | 5.6(8.00[%]) | 7.2(10.3[%]) | |
| | C-A | 56.1 | 1.7(3.00[%]) | 7.2(12.8[%]) | |
| J/B #11 | A-B | 78.4 | 6.6(8.40[%]) | 1.4(1.80[%]) | 97.8 |
| | B-C | 61.6 | 11.4(18.5[%]) | 1.7(2.80[%]) | |
| | C-A | 83.8 | 11.2(13.4[%]) | 1.6(1.90[%]) | |
| J/B #12 | A | 62.6 | 5.0(8.00[%]) | 8.8(14.1[%]) | 85.8 |
| | B | 56.8 | 3.5(6.20[%]) | 9.5(16.7[%]) | |
| | C | 72.4 | 4.8(6.60[%]) | 8.6(11.9[%]) | |

3. 계통 실적용에 따른 시스 순환전류 저감장치의 과도특성 검토

2절에서는 지중송전계통에서 시스 순환전류 과다로 문제가 되고 있는 선로에 대한 저감방안으로 제안한 크로스본드 단위구간의 시스회로에 임피던스 성분을 삽입하는 방법을 실증시험을 통하여 입증하였다. 한편, 지중케이블 선로에 낙뢰 썬지가 유입되었을 때 삽입한 저감장치의 안정성과 케이블 선로에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 검토의 필요성이 대두된다. 따라서 본 절에서는 저감장치를 적용한 그림 1의 실제계통에서 1선 지락고장 및 뇌 썬지 침입으로 인한 케이블 시스 계통의 과도특성, 저감장치에 미치는 영향 등을 고려한 저감장치 보호방식을 제안하였다.

3.1 시스 순환전류 저감장치 보호방식

저항 및 리액터의 임피던스 성분으로 구성된 시스 순환전류 저감장치는 크로스본드 리드선과 직렬로 접속되기 때문에 1선 지락고장 및 뇌 썬지가 침입하였을 때 고장전류는 저감되나 임피던스성분 증가로 인해 시스 전위는 상승하게 되어 저항 및 리액터의 저감장치 양단에 높은 과전압이 유기될 수가 있다. 특히 리액터 저감장치의 경우 고주파 성분의 썬

지가 침입하면 임피던스가 상승하여 높은 과전압이 발생할 수 있다. 즉, 이러한 과전압 발생에 의해 저감장치가 파괴되면 크로스본드 리드선은 단선되며, 단선된 크로스본드 리드선을 중심으로 양쪽은 편단절지가 되므로 고장전류가 귀로하지 못하여 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압이 상승하게 되는 문제점이 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 지중송전계통에 과도 발생시 저감장치 보호를 위한 방안으로 그림 4와 같은 저감장치 보호유닛을 제안하여 검토하였으며, 그림 5는 SVL 및 RDP의 V-I 동작 특성곡선이다.

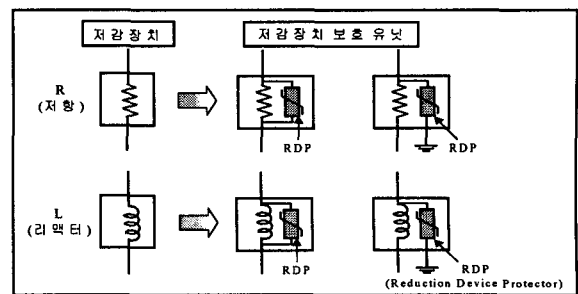


그림 4 시스 순환전류 저감장치 보호방식
Fig. 4 Protection schemes of sheath circulating current reduction equipment

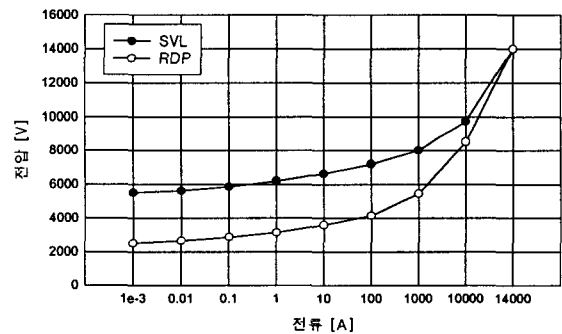


그림 5 SVL과 RDP의 V-I 특성곡선
Fig. 5 V-I characteristic curve of SVL and RDP

그림 4에 나타난 저감장치 보호 유닛은 저감장치에 SVL과 같은 기능을 하는 저감장치 보호장치(RDP : Reduction Device Protector)를 병렬로 접속하여 정상 운전시는 동작하지 않으며 저감장치 양단에 과전압이 발생하게 되면 SVL보다 낮은 전압에서 동작하도록 하여 케이블 계통을 보호할 수 있도록 하였으며, 본 논문에서는 저감장치에 RDP가 병렬로 접속된 방식과 RDP의 하단을 접지하는 방식을 저감장치 보호 유닛으로 제안하였으며 EMTP를 이용한 다양한 과도해석을 통해 보호효과 및 현장적용 가능성을 제시하고자 한다.

한편, 표 3과 같이 대지접지방식(D) 및 교락비접지방식(K)으로 SVL이 결선된 계통에서 저항 및 리액터를 이용한 시스 순환전류 저감장치 보호에 대하여 8가지 방식을 제시하여 검토하였다. 첫 번째는 RDP를 사용하지 않고 대지접지방식과 교락비접지방식을 혼합하여 사용하는 방식이며, 두 번째는 SVL 결선은 대지접지방식과 교락비접지방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방식이다. 세 번째 방식

은 각 결선방식에 RDP만 병렬로 접속하는 방식이며, 네 번째는 각 결선방식에 병렬로 접속된 RDP의 한단을 접지하는 방식이다. 또한, 각 SVL 결선방식에 따른 보호방식마다 표 4에서와 같이 약칭을 제시하였으며 이후 검토에서는 모든 보호방식을 약칭으로 표기하였다.

표 3 시스 순환전류 저감장치 보호방식

Table 3 Protection schemes of sheath circulating current reduction equipment

| 저감장치종류 | SVL 결선방식 | 약칭 | 보호방법 |
|----------|---------------|-----|-------------------------|
| 저항 및 리액터 | 대지 접지 방식 (D) | DK | 대지접지방식+교락비접지방식 |
| | | DKC | 대지접지방식+교락비접지방식+RDP 병렬접속 |
| | | DC | 대지접지방식+RDP 병렬접속 |
| | | DCG | 대지접지방식+RDP 병렬 편단접지 |
| | 교락 비접지 방식 (K) | KD | 교락비접지방식+대지접지방식 |
| | | KDC | 교락비접지방식+대지접지방식+RDP 병렬접속 |
| | | KC | 교락비접지방식+RDP 병렬접속 |
| | | KCG | 교락비접지방식+RDP 병렬 편단접지 |

3.2 1선 지락고장에 의한 시스의 과도특성

검토선로인 그림 1과 같은 설계통의 J/B #11 절연접속함 크로스본드 리드선에 직렬로 접속한 경우 대지접지방식에서는 평균 1.1[kV]의 전압이 상승하였으나, 교락비접지방식에서는 평균 3.3[kV]의 비교적 높은 전압이 상승하였으며 표 4에서 처럼 SVL 결선방식에 따라 시스-대지간 전압은 교락비접지방식에서 높게 발생하나 절연통간 전압은 대지접지방식에서 높게 발생하고 있음을 알 수 있다.

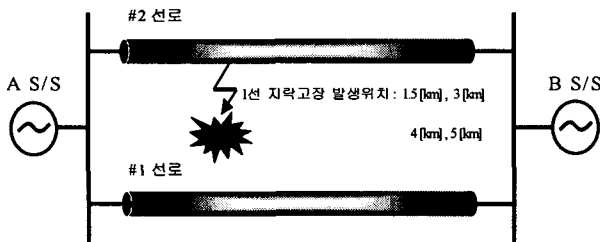


그림 6 2회선 지중송전계통의 1선 지락고장 해석모델
Fig. 6 Underground transmission model for single line-to-ground fault

3.2.1 저항(R)을 저감장치로 적용한 경우

그림 6의 검토선로를 대상으로 본 절에서는 시스 순환전류 저감을 위해 순환전류가 증가하고 있는 J/B #11 크로스본드 리드선에 저감장치(저항)를 삽입한 경우 1선 지락고장 발생시 시스에 미치는 과도특성 및 저감장치에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 7은 #2 선로의 A S/S로부터 1.5[km], 3[km], 4[km] 지점에서 1선 지락고장 발생시 저감장치 삽입 전, 후에 변화하는 J/B #11 절연접속함에서의 시스-대지간 전압을 비교하여 그래프로 나타내었으며, 표 4는 J/B #10 및 J/B #11 절연

접속함에 유기되는 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압을 나타내었다.

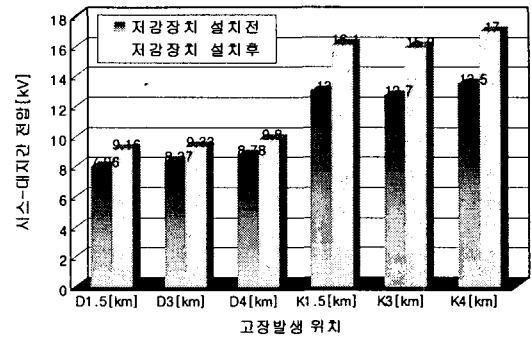


그림 7 저감장치(저항) 적용에 따른 시스-대지간 전압
Fig. 7 Sheath-ground induced voltages in case of the reduction equipment insertion(Resistor)

그림 7에서처럼 1[Ω]의 저항을 J/B #11 절연접속함 크로스본드 리드선에 직렬로 접속한 경우 대지접지방식에서는 평균 1.1[kV]의 전압이 상승하였으나, 교락비접지방식에서는 평균 3.3[kV]의 비교적 높은 전압이 상승하였으며 표 4에서 처럼 SVL 결선방식에 따라 시스-대지간 전압은 교락비접지방식에서 높게 발생하나 절연통간 전압은 대지접지방식에서 높게 발생하고 있음을 알 수 있다.

표 4 저감장치(저항) 삽입시 시스 전압

Table 4 Sheath induced voltages in case of the reduction equipment insertion(Resistor)

| 1선 지락 고장 위치 | J/B #11(IJ) 크로스본드 리드선에 저항 삽입 | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|------|-------------|-------|---------------|------|-------------|------|
| | 대지접지방식 | | | | 교락비접지방식 | | | |
| | 시스-대지간 전압[kV] | | 절연통간 전압[kV] | | 시스-대지간 전압[kV] | | 절연통간 전압[kV] | |
| | #10 | #11 | #10 | #11 | #10 | #11 | #10 | #11 |
| 1.5[km] | 7.90 | 9.16 | 16.6 | 16.45 | 16.6 | 16.1 | 8.67 | 8.49 |
| 3[km] | 8.32 | 9.33 | 16.3 | 15.60 | 16.5 | 15.9 | 8.84 | 8.47 |
| 4[km] | 8.45 | 9.80 | 16.4 | 17.1 | 16.0 | 17.0 | 9.07 | 8.93 |
| 5[km] | 8.80 | 9.48 | 16.0 | 16.07 | 10.6 | 10.5 | 8.02 | 7.78 |

한편, 표 4와 같이 시스 순환전류 저감장치에 가장 큰 영향을 미친 4[km] 지점에서 1선 지락고장 발생시, 저감장치 보호방식 적용에 따른 J/B #11에서의 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압을 표 5에 나타내었다.

표 5에서처럼 대지접지방식에서 DC 및 DCG의 경우 절연통간 전압이 보호방식이 없는 경우의 17.1[kV]에 비해 약간 감소되나 DK 및 DKC에 비해 비교적 높은 전압이 발생하였다. 또한 시스-대지간 전압은 모두 비슷하나 DCG에서 가장 낮은 6.73[kV]를 보였다. 한편 교락비접지방식에서는 보호방식이 없는 경우 17[kV]였던 시스-대지간 전압이 KCG에서는 6.88[kV]로 가장 낮았으며, KD 및 KDC는 8.8[kV]를 나타내었으나 KC의 경우 저감효과가 미비함을 알 수 있다.

표 5 저감장치 보호방식 적용에 따른 시스 전압
Table 5 Sheath induced voltages with respect to protection schemes

| 고장종류 | | A S/S로부터 4[km] 지점에서 1선 지락고장 | |
|-----------------|----------|---------------------------------|-------------|
| SVL 결선방식 | 보호 방식 | J/B #11(IJ) 크로스본드 리드선에 저항 삽입 | |
| | | 시스-대지간 전압[kV] | 절연통간 전압[kV] |
| 대지접지 방식 | DK | 8.95 | 8.64 |
| | DKC | 8.91 | 8.63 |
| | DC | 8.92 | 15.3 |
| | DCG | 6.73 | 13.7 |
| 교락 비접지 방식 | KD | 8.80 | 8.24 |
| | KDC | 8.80 | 8.24 |
| | KC | 16.7 | 8.23 |
| | KCG | 6.88 | 8.22 |

한편, SVL 및 RDP는 과전압에 의해 동작하나 열화의 결정적인 원인은 과전류의 유입 때문이므로 각 저감장치 보호 방식에 따라 시스 순환전류 저감장치에 흐르는 전류를 그래프로 비교하여 그림 8에 나타내었다.

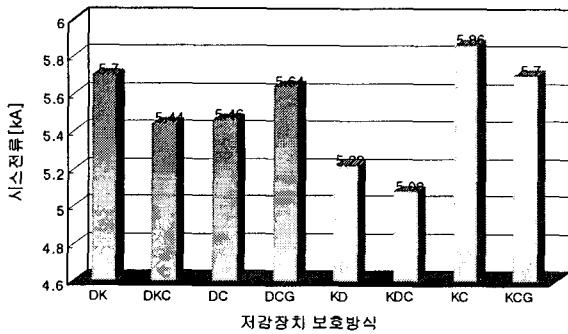


그림 8 저감장치 보호방식별 저감장치에 흐르는 전류
Fig. 8 Currents of reduction equipments with respect to protection schemes

표 5 및 그림 8에서처럼 대지접지방식에서는 절연통간 전압에서 DK와 DKC가 가장 낮은 값을 보였으나 DKC는 DK에 비해 전류 저감효과가 더욱 좋게 나타났다. 따라서 대지접지방식에서는 DKC, DK, DC, DCG순으로 보호효과가 우수한 것으로 나타났으며, 대지접지방식에 교락비접지방식을 혼합하고 RDP를 저감장치와 병렬로 접속하는 방식인 DKC의 저감효과가 가장 좋았다. 또한 교락비접지방식의 보호효과는 KDC, KD, KCG, KC의 순으로 대지접지방식과 마찬가지로 교락비접지방식에 대지접지방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방식인 KDC의 경우가 저감장치의 과도특성면에서 가장 양호함을 알 수 있다.

3.2.2 리액터(L)를 저감장치로 적용한 경우

다음은 J/B #11 절연접속함의 크로스본드 리드선에 2.65[mH]의 저감장치(리액터)를 삽입한 경우 1선 지락고장 발생시 시스에 미치는 과도특성 및 저감장치에 미치는 영향

을 분석하였다. 표 6은 A S/S로부터 각각 1.5[km], 3[km], 4[km], 5[km] 지점에서 1선 지락고장 발생시 대지접지방식과 교락비접지방식에 따른 J/B #10과 J/B #11 절연접속함의 시스-대지간 전압과 절연통간 전압을 나타내었다.

표 6 저감장치(리액터) 삽입시 시스 전압
Table 6 Sheath induced voltages in case of the reduction equipment insertion(Reactor)

| 지락 고장 위치 | J/B #11(IJ) 크로스본드 리드선에 리액터 삽입 | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------|------|----------------|------|------------------|------|----------------|------|
| | 대지접지방식 | | | | 교락비접지방식 | | | |
| | 시스-대지간 전압[kV] | | 절연통간 전압[kV] | | 시스-대지간 전압[kV] | | 절연통간 전압[kV] | |
| | #10 | #11 | #10 | #11 | #10 | #11 | #10 | #11 |
| 1.5[km] | 8.46 | 8.6 | 2.51 | 5.37 | 16.1 | 15.4 | 2.65 | 5.57 |
| 3[km] | 8.12 | 8.4 | 3.17 | 5.3 | 15.9 | 15.3 | 4.15 | 6.10 |
| 4[km] | 9.00 | 11.0 | 3.90 | 7.5 | 16.5 | 16.4 | 4.20 | 8.01 |
| 5[km] | 8.71 | 9.8 | 2.31 | 8.3 | 14.4 | 14.2 | 1.16 | 5.80 |

표 6에서처럼 저감장치가 삽입되어있는 4[km] 부근에서 지락고장 발생시 가장 높은 과전압이 발생하고 있으며, 전체적으로 저항을 사용한 경우에 비해 약간 낮은 전압 분포를 보이고 있다. 또한 표 6에서 알 수 있듯이 저감장치에 가장 큰 영향을 주는 4[km] 지점에서 1선 지락고장 발생시, 저감장치 보호방식 적용에 따른 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압을 표 7에 나타내었다.

표 7 저감장치 보호방식 적용에 따른 시스전압
Table 7 Sheath induced voltages with respect to the protection schemes application

| 고장종류 | | A S/S로부터 4[km] 지점에서 1선 지락고장 | |
|-----------------|----------|----------------------------------|-------------|
| SVL 결선방식 | 보호 방식 | J/B #11(IJ) 크로스본드 리드선에 리액터 삽입 | |
| | | 시스-대지간 전압[kV] | 절연통간 전압[kV] |
| 대지접지 방식 | DK | 8.88 | 6.50 |
| | DKC | 8.93 | 6.44 |
| | DC | 8.94 | 6.59 |
| | DCG | 7.90 | 6.40 |
| 교락 비접지 방식 | KD | 9.47 | 7.45 |
| | KDC | 9.46 | 6.18 |
| | KC | 16.1 | 7.20 |
| | KCG | 6.60 | 7.03 |

표 7에서처럼 대지접지방식에서는 보호방식이 없는 경우의 절연통간 전압 7.5[kV]에 비해 모든 보호방식에서 저감효과는 미비하였으며, 시스-대지간 전압은 보호방식이 없는 경우의 11.0[kV]에 비해 DCG에서 3.1[kV], DK에서 2.12[kV]의 저감효과가 있었으나 그 외 보호방식과의 차이는 크지 않았다. 한편 교락비접지방식의 시스-대지간 전압은 보호방식이 없는 경우 16.4[kV]가 유지 되었으나 보호방식 적용결과 KC의 저감효과는 없으나 KCG는 6.6[kV]로 저감효과가 가장 좋았으며 KD 및 KDC에서도 약 6.9[kV]의 저감효과가 나타났다. 또한 각 저감장치 리액터 보호방식에 따라 저감장치에 흐르는 전류를 그래프로 비교하여 그림 9에 나타내었다.

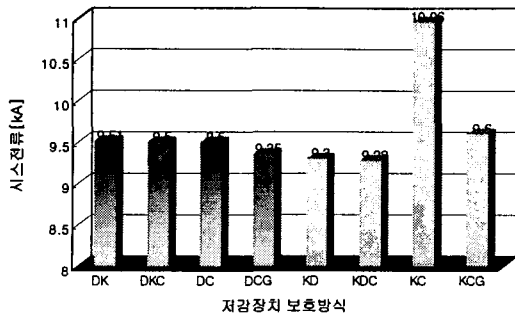


그림 9 저감장치 보호방식별 저감장치에 흐르는 전류
Fig. 9 Currents of reduction equipments with respect to protection schemes

그림 9에서처럼 대지접지방식에서는 DCG가 9.35[kA]를 보였으며 DK, DKC, DC는 평균 9.5[kA]를 보여 저감효과의 차이는 크게 발생하지 않았으나, 교락비접지방식에서는 KC의 경우 10.96[kA]로 가장 높은 전류값을 보였으며 KCG는 9.6[kA], KD와 KDC는 각각 9.3[kA]와 9.28[kA]의 순으로 나타났다.

따라서 리액터를 저감장치로 사용하는 지중송전계통에서 1선 지락고장 발생시 보호방식 적용시의 보호효과 검토를 위해 시스 전위상승 및 저감장치에 흐르는 고장전류를 비교하여 검토한 결과, 대지접지방식에서는 DCG, DKC, DK, DC순으로 저감효과가 나타났으나 저감효과에는 큰 차이가 발생하지 않았으며 DCG의 경우 고조파가 다량으로 포함된 고장이 발생할 경우 주파수 상승에 의해 저감장치 뿐만 아니라 절연통간에도 일시적인 전압상승이 우려된다. 또한 교락비접지방식에서는 KC의 경우 가장 높은 시스-대지간 전압이 유기될 뿐만 아니라 저감장치에 흐르는 전류의 양도 가장 높아 저감효과는 가장 낮았다. 따라서 교락비접지방식에 대지접지방식으로 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방식인 KDC가 저감장치 과도특성면에서 가장 양호함을 알 수 있다.

3.3 뇌 썩지에 의한 과도특성

국내의 낙뢰 발생별 뇌격전류 크기에 따른 분포는 60[kA] 이하가 98[%]이며, 이 중 20~60[kA]가 대부분의 비중을 차지하고 있는 것으로 보고 되고 있다[8].

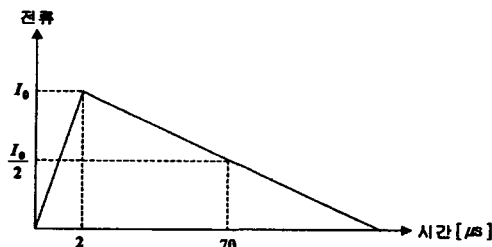


그림 10 뇌격전류 파형
Fig. 10 Typical lightning current waveform for cable simulation

따라서 본 논문에서는 그림 10에 나타낸 것처럼 뇌 썩지 해석을 위한 뇌격전류 피크값(I_0)을 60[kA]로 설정하였으며,

뇌 썩지 임피던스는 400[Ω], 뇌격파형은 2/70[μs]로 램프파를 사용하여 선형적으로 상승, 감쇄하는 것으로 근사화 하였다.

또한 뇌 썩지 해석을 위해 그림 6의 계통에 154kV 20[km] 가공선로 2회선을 동시에 모델링하여 혼합송전계통을 구성하였으며, 가공지선은 0.5[km]마다 10[Ω]으로 접지하였고 지중선로의 케이블 헤드로부터 1[km] 떨어진 지점의 #2 선로 도체 A상에 직격뇌가 침입한 것으로 설정하여 뇌 썩지 침입시 시스 순환전류 저감장치에 미치는 영향 및 저감장치 적용에 따른 케이블 시스의 과도특성을 다양하게 검토하였다.

3.3.1 뇌 썩지에 의한 저감장치의 과도특성

구성된 혼합송전계통에 뇌 썩지 침입시 J/B #11 절연접속함의 시스 및 저감장치에서의 과도특성을 분석하여 저감장치의 최적 보호방식을 제안하고자 하였다.

즉, 혼합송전계통에 뇌격 침입시 저감장치 유무에 따라 저항과 리액터 저감장치에 유기되는 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압을 비교하여 표 8에 나타내었다.

표 8 뇌격 침입시 저감장치에 유기되는 시스전압
Table 8 Sheath induced voltage at the reduction equipment by means of lightning surge

| 저감장치 종류 | 측정 위치 : J/B #11 절연접속함 | | | |
|---------|-----------------------|-------------|---------------|-------------|
| | 대지접지방식 | | 교락비접지방식 | |
| | 시스-대지간 전압[kV] | 절연통간 전압[kV] | 시스-대지간 전압[kV] | 절연통간 전압[kV] |
| 없는 경우 | 8.34 | 16.9 | 8.87 | 8.68 |
| 저항 | 8.72 | 22.2 | 9.45 | 9.13 |
| 리액터 | 10.5 | 175.0 | 13.0 | 9.77 |

표 8에서 알 수 있듯이 대지접지방식에서 리액터 삽입시 절연통간 전압은 뇌 썩지 침입시 발생하는 고주파수의 영향으로 임피던스가 상승하여 일시적으로 전압이 175.0[kV]까지 상승하므로 저감장치로 리액터를 사용하고 SVL이 대지접지방식으로 구성된 선로에서는 저감장치 보호방식이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

또한 뇌격 침입시 저항과 리액터의 저감장치 각 상에 흐르는 시스전류를 SVL 결선방식별로 비교하여 표 9에 나타내었다.

표 9 뇌격 침입시 저감장치 각 상에 흐르는 시스전류
Table 9 Sheath current at the each phase of reduction equipment by means of lightning surge

| 저감장치 종류 | 측정위치 SVL 결선방식 | J/B #11 절연접속함 시스전류[kA] | | |
|---------|---------------|------------------------|--------|-------|
| | | A-C | B-A | C-B |
| | | 저항 | 대지접지방식 | 13.09 |
| | 교락비접지방식 | 6.08 | 5.76 | 7.88 |
| 리액터 | 대지접지방식 | 2.46 | 2.54 | 2.5 |
| | 교락비접지방식 | 0.38 | 0.47 | 0.5 |

표 9에서 알 수 있듯이 대지접지방식에서는 교락비접지 방식에 비해 저항 사용시는 약 1.8배, 리액터 사용시는 5.6배의 높은 전류가 발생하였으며, 저항 및 리액터를 비교한 결과 저항에 비해 리액터에 흐르는 전류의 크기가 더욱 적게 나타났다. 이는 뇌 썩지 침입시 나타나는 고주파수의 영향으로 리액터의 임피던스가 상승하여 저항에 비해 전류의 크기가 상대적으로 감소되는 것으로 판단된다.

3.3.2 보호방식 적용에 따른 시스의 과도특성

뇌 썩지 침입시 시스 순환전류 저감장치(저항 또는 리액터)가 적용된 계통에서 보호방식 적용에 따른 시스-대지간 전압 및 절연통간 전압을 SVL 결선방식별로 비교하여 표 10에 나타내었다.

표 10 저감장치(저항 또는 리액터) 적용시 보호방식별 시스전압

Table 10 Sheath induced voltages with respect to protection schemes

| SVL 결선 방식 | 보호 방식 | 저감 장치 | J/B #10(IJ) | | J/B #11(IJ) | |
|-----------|-------|-------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | | | 시스-대지간 전압[kV] | 절연통간 전압[kV] | 시스-대지간 전압[kV] | 절연통간 전압[kV] |
| 대지 접지 방식 | DK | 저항 | 8.09 | 8.75 | 9.05 | 9.12 |
| | | 리액터 | 9.13 | 10.24 | 9.75 | 9.58 |
| | DKC | 저항 | 8.06 | 8.96 | 6.50 | 9.21 |
| | | 리액터 | 8.13 | 9.91 | 10.39 | 10.16 |
| | DC | 저항 | 8.90 | 19.3 | 8.30 | 13.5 |
| | | 리액터 | 9.50 | 17.5 | 9.30 | 18.5 |
| DCG | 저항 | 9.54 | 19.0 | 7.17 | 12.8 | |
| | 리액터 | 9.50 | 17.7 | 8.38 | 170.0 | |
| 교락 비접지 방식 | KD | 저항 | 8.09 | 9.06 | 9.50 | 9.07 |
| | | 리액터 | 8.22 | 9.02 | 10.3 | 9.43 |
| | KDC | 저항 | 8.00 | 9.00 | 9.49 | 9.10 |
| | | 리액터 | 8.75 | 9.09 | 9.80 | 9.10 |
| | KC | 저항 | 9.39 | 9.10 | 10.1 | 9.06 |
| | | 리액터 | 10.89 | 9.18 | 11.9 | 9.24 |
| | KCG | 저항 | 9.42 | 9.09 | 5.74 | 10.1 |
| | | 리액터 | 10.1 | 9.47 | 9.45 | 12.8 |

표 10과 같이 대지접지방식에서 저감장치로 저항을 적용할 경우 J/B #11 접속함에 발생하는 절연통간 전압은 표 8의 보호방식이 없을 때의 22.2[kV]에 비해 전압이 상당히 저감되었으며, 시스-대지간 전압은 DK에서 가장 높았던 반면 DKC에서는 6.5[kV]로 가장 적게 발생하였다. 교락비접지 방식에서는 KCG에서 시스-대지간 전압이 5.74[kV]로 가장 낮았으며 KD, KDC 보호방식의 보호효과에 대한 차이는 크게 나타나지 않았다.

한편, 리액터를 삽입한 경우 대지접지방식에서 저감장치 보호방식이 없는 경우 절연통간 전압이 주파수의 영향으로 일시적으로 175.0[kV]까지 상승하였으나, 보호방식 적용결과 절연통간 전압은 DK, DKC에서 9.58[kV]와 10.16[kV]를 보여 SVL 및 RDP의 동작에 의한 보호효과가 우수하다는 것

을 알 수 있다. 교락비접지방식에서는 KDC가 가장 좋은 보호효과를 보였으며, KD의 보호효과도 비교적 양호하게 나타났다.

또한 대지접지방식과 교락비접지방식에서 뇌 썩지 침입시 각 저감장치(저항 및 리액터)에 흐르는 전류의 크기를 비교하여 그림 11에 나타내었다.

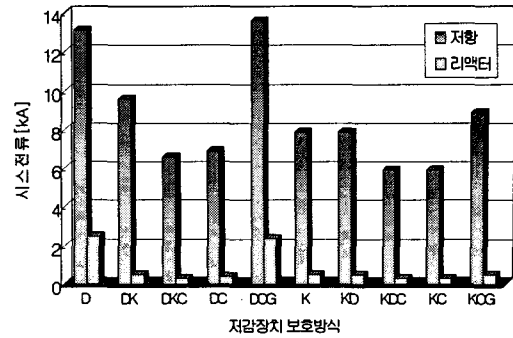


그림 11 보호방식별 저감장치(저항 및 리액터)에 흐르는 전류
Fig. 11 Currents at the reduction equipments(Resistor and Reactor) with respect to protection schemes

그림 11에서처럼 저항을 삽입한 경우 대지접지방식에서 전류 저감효과는 DKC가 가장 양호하며, 교락비접지방식에서는 KDC와 KC는 저감효과가 나타났으나 KD 및 KCG에서는 전류 저감효과가 나타나지 않았다. 또한, 리액터를 삽입한 경우 전체적으로 저항에 비해 전류의 발생이 적었으며 보호방식 적용에 따른 전류 감소효과도 저항에 비해 양호하게 나타나고 있다.

한편, 혼합송전계통에 뇌 썩지 침입시 저감장치로 저항을 적용한 경우 시스 전위상승 및 저감장치에 흐르는 고장전류를 비교·검토한 결과 대지접지방식에서는 DCG의 저감효과가 가장 적었으며 DKC, DC, DK 순으로 나타나 대지접지방식에 교락비접지방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속하는 방식인 DKC의 저감효과가 가장 우수하였다. 또한 교락비접지 방식에서도 SVL 결선방식을 혼합하고 RDP를 병렬 접속한 KDC의 방식의 보호효과가 가장 우수하였으며 KC, KD, KCG의 순으로 나타났다.

또한 리액터를 적용한 경우 시스 전위상승은 저항과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았으나 전류의 저감효과는 매우 좋았다. 이는 리액터의 주파수성분이 증가함에 따라 임피던스가 증가하여 상대적으로 저감장치로 흘러가는 전류의 크기는 감소되며 이 때 발생하는 과전압은 SVL 및 보호유닛의 RDP 동작에 의해 저감되기 때문으로 판단된다.

지금까지의 검토 결과 저감장치로 저항을 사용했을 시 저항 양단에 과전압이 발생할 경우 소비되는 에너지양의 증가로 높은 과열이 발생할 수도 있으므로 뇌 썩지 발생시에도 저항에 비해 보호효과가 우수하게 평가된 보호방식이 포함된 리액터를 시스 순환전류 저감장치로 사용하는 것이 타당하다고 판단된다. 이와 같은 리액터에 대한 보호방식으로는 각 SVL 결선방식을 혼합하고 저감장치에 RDP를 병렬로 접속한 DKC와 KDC의 방식이 적절하다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 시스 순환전류 저감용으로 제작된 저항 및 리액터 저감장치가 설치된 지중송전계통에 과도발생시 저감장치 보호방식을 제안함으로써 실선로 적용 가능성을 제시하였다. 본 논문의 주요한 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 시스 순환전류 저감방안

시스 순환전류가 증가하는 크로스본드 단위구간에서 시스 전류의 순환경로인 크로스본드 리드선에 저항 또는 리액터와 같은 임피던스 성분을 가진 저감장치를 삽입하면 시스 순환전류의 저감효과 뿐만 아니라 시스전류 불평형을 해소에도 상당한 효과가 있는 것으로 실증시험을 통해 입증하였다.

(2) 계통 실적용에 따른 저감장치의 보호방식

(i) 시스 순환전류 저감장치를 적용한 실계통에서 1선 지락고장 및 너 써지 침입으로 인한 저감장치 및 케이블 시스 계통의 과도특성 등을 검토한 결과 보호방식이 적용된 리액터 저감장치의 현장 적용 가능성을 제안하였다.

(ii) 리액터 저감장치에 대한 보호방식으로 각 방식측 보호장치(SVL) 결선방식을 병행하고 저감장치에 RDP (Reduction Device Protector)를 병렬로 접속하는 방식을 제안하였다.

본 논문에서 검토된 지중송전계통의 시스 순환전류 저감방안은 국내 실선로에 대한 시스 순환전류 저감대책으로 적용 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 정채균 외3 “지중송전계통에서 시스 순환전류 해석 및 저감방안”, 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No.11, 2001.
- [2] 하체웅 외5, “다회선 지중송전 케이블에서의 EMTP를 이용한 시스 순환전류 분석”, 대한전기학회 논문지, Vol. 50A, No.10, 2002.
- [3] 전력연구원, “지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구”, 1998.
- [4] IEEE, “IEEE Guide for the application of sheath-bonding Methods for single-conductor cables and calculation of induced voltages and currents in cable sheaths, ANSI/IEEE Std 575-1988.
- [5] J.S.Barrett, G.J.Anders, “Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths, and armour of electric power cables mathematical models and comparison with IEC Standard 287.
- [6] M.G.Dwek, M.N.Eggleton, “Electric parameters of 400kV and 275kV cables used in England and Wales”
- [7] 강지원, 양해원 “지중송전계통에서 저감장치를 이용한 시스 순환전류 저감방안에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51A, No.9, 2002.
- [8] “LPATS를 이용한 뇌격누적 분포곡선 작성에 관한 연구”, 한국전력공사 전력연구원 최종보고서, 1993.

저 자 소 개



강 지원(姜 地 原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5884, Fax : 042-865-5844
E-mail : jwkang@kepri.re.kr



한 용 희(韓 鎭 熙)

1948년 2월 13일생. 1975년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 연세대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 1975년~현재 한국전력공사 구조조정실 구조개편팀장

Tel. 02-3456-3403
E-mail : hanyh@kepco.co.kr



정 채 균(鄭 彩 均)

1973년 7월 14일생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 063-850-6735
E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr



이 중 범(李 鍾 範)

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987~1990년 한국전기연구소 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