

22.9[kV] 지중배전계통케이블의 동심중성선에 흐르는 순환전류의 제거방안 및 효과

(An Elimination Method of the Circulating Current Flowing into Coaxial-Neutral Lines in
22.9[kV] CNCV Underground Cable Systems)

전명수 · 송중호*

(Myung-Su Jeon · Joong-Ho Song)

요 약

22.9[kV]-y 배전 방식은 지중 케이블로 전력을 공급하고 있으며 선로 운영상 배전케이블 선로의 동심중성선을 케이블 접속 구간마다 3선 일괄 접지하는 다중 접지방식을 채택하고 있다. 그러나 지중 배전 선로에서 각 상의 부하가 평형일 경우에도 동심중성선에는 부하 전류의 약 40[%](전력구)~50[%](관로)의 동심중성선 순환 전류가 발생되고 있기 때문에, 순환전류로 인한 손실이 도체 손실의 76[%]에 달한다. 이러한 손실 전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 허용전류 용량이 관로의 경우 20[%] 정도 감소하게 된다. 본 논문은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 새로운 동심중성선 접지방식을 제안하고 있다. 새로운 방법은 동심중성선의 순환전류를 효과적으로 제거하고 있으며, 그 방안을 직접 계통망에서 적용시켜서 실측하여 본 결과, 그 타당성과 유용성을 확인하였다.

Abstract

In 22.9[kV]-y distribution systems, underground cables are provided with multiple-point ground in which each coaxial-neutral line of the distribution cable lines(A, B, C phases) is 3-wire common grounded. In the underground cable distribution systems, circulating current flows in the coaxial-neutral lines and its magnitude amounts to about 40~50[%] load currents, even though loads are balanced. Power loss due to the circulating current consequently reaches to about 76[%] total losses occurred in all conductor lines. This power loss provokes additional temperature rise of the underground cable lines and finally results in 20[%] reduction of the current capacity of the cables.

This paper presents a new ground method to overcome such a problem. The proposed method eliminates the circulating current flowing in the coaxial-neutral line effectively. Measurement results confirmed from the practical site-test show validity and effectiveness of this research.

Key Words : Corculating current in co-axial neutral lines of distribution cables,
Multiple-point ground, 22.9[kV] CNCV distribution system

* 교신저자 : 서울산업대 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6415, Fax : 02-978-2754, E-mail : joongho@snut.ac.kr

접수일자 : 2007년 10월 16일, 1차심사 : 2007년 10월 22일, 심사완료 : 2007년 11월 5일

1. 서 론

22.9[kV]-y 배전 방식은 변전소로부터 지상 및 지하에 매설된 배전 선로를 통해 공장, 빌딩 등 비교적 규모가 큰 수용가에게 직접 전력을 공급하거나 2차 변압기를 통해 소규모 공장 내지 일반 가정에 전력을 공급하는 주요 간선로의 역할을 담당하고 있다. 시 외곽 또는 농어촌 지역의 경우 가공선 형태로, 대도시 중심부 등 사람의 왕래가 빈번한 곳이나 신도시 지역 등에서는 도시 미관을 고려하여 지중으로 전력을 공급하고 있으며, 선로 운영상 배전 선로의 중성선을 일정 구간 마다 접지하는 다중 접지방식을 채택하고 있다[1-4]. 이러한 다중 접지방식은 동심 중성선을 대지에 직접 접지하기 때문에 지락 사고시 건전상의 전압 상승이 적어 전력 설비의 절연 및 지락 전류의 검출이 용이하고 보호 계전기 등이 신속하게 동작한다. 그러나 계통 사고 등으로 인하여 동심 중성선의 전위가 상승되는 것을 방지 하고자 케이블 접속 구간마다 동심 중성선을 일괄 접지하는 방식으로 배전 계통을 운영하고 있다[1-4].

이는 고압과 저압을 공통으로 사용함에 따라 평상시에는 불평형 부하전류를, 지락 사고시에는 동심 중성선의 대지 전위 상승을 일정값 이하로 제한하여 배전 계통을 안전하게 유지하기 위해서이다. 그러나 지중 배전 선로에서 각상의 부하가 불평형이 되는 것은 물론 평형일 경우 에도 동심 중성선에는 부하 전류에 비례하는 동심 중성선 순환 전류가 발생되고 있기 때문에, 불필요한 손실전력이 발생하며 이러한 손실전력으로 케이블의 내부 온도가 상승되어 케이블의 전류용량이 감소한다[5]. 또한 케이블 흑크롬 메타로 전류 측정시에는 배전선로의 실제 부하전류와 동심 중성선의 순환전류가 백터합성 값으로 나타나기 때문에, 실제 전류값 보다 적게 나타나므로 부하관리에도 문제가 되고 있다.

본 논문은 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 순환전류 발생원인 및 현황을 분석하고, 그 합리적인 해결방안을 제시하고 있으며, 실측을 통하여 그 타당성을 확인하였다.

2. 동심중성선의 순환전류 발생원인 및 현황

2.1 순환전류 발생원인

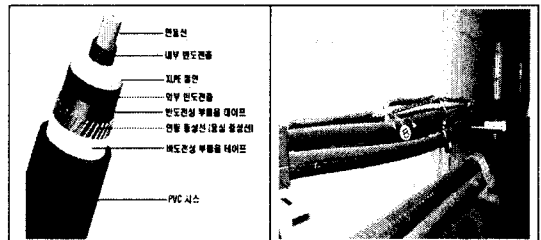


그림 1. CNCV 케이블 구조 및 전력구 포설
Fig. 1. CNCV cable and its configuration in cable tunnel

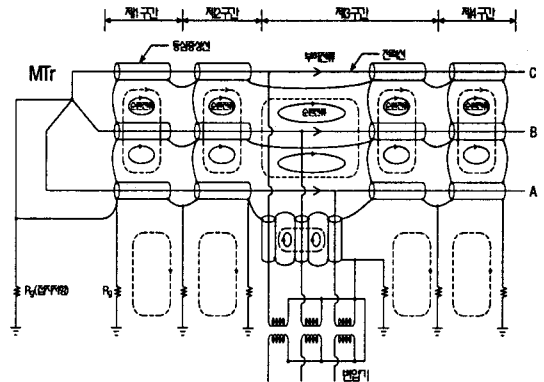


그림 2. 현재의 CNCV 배전설비계통
Fig. 2. Conventional distribution system of CNCV cables

현재 사용중인 22.9[kV]-y 다중접지계통에 사용하는 CNCV 케이블은 그림 1과 같으며, 현재의 22.9[kV]-y 다중접지 CNCV케이블 지중배전설비계통도는 그림 2와 같이 구성되어 있다. 동심중성선에 흐르는 순환전류의 발생원인은 다음과 같다. 전력선 도체에 흐르는 부하전류에 의해 도체를 둘러싸고 있는 동심중성선에 전자유도에 의한 유기전압이 발생한다. 또 A, B, C 3상의 중성선 각각을 단락시킨 후 일괄 접지하므로 접지선에는 3상의 백터 합성 전류가 접지선을 통하여 흐르게 되므로 서로 상쇄 되어 적은 값의 전류가 흐르게 된다. 그러나 3선을 단락시

킨 중성선 상호간에는 발생된 유기전압이 중성선의 작은 저항을 통하여 단락되어 있는 상태이므로, 대단히 큰 순환전류가 그림 2와 같은 순환회로 내에서 흐르게 된다.

2.2 순환전류의 실측 예

표 1은 동심중성선에 흐르는 순환전류와 그 손실을 보여주고 있다[5]. 전력선 굵기의 33[%]인 동심중성선에 부하전류의 약 46.7~51.6[%] 정도의 순환전류가 흐르고 있으므로, 325[mm] CNCV의 경우 케이블 손실의 약 76[%] 정도가 동심중성선에서 발생하고 있음을 표 1에서 알 수 있다. 이러한 동심중성선에 흐르는 순환전류는 전력손실의 발생, 케이블이 용을 감소, 케이블의 온도상승 등의 문제점을 유발한다.

표 1. 중성선순환전류 및 손실률[5]
Table 1. Circulating current and loss factor of coaxial-neutral lines

도체 굵기	배열방식	부하전류	중성선 전류	순환전류 비율	손실률
325[mm]	관로식	117	59	0.504	0.73
		140	73	0.521	0.77
		175	88	0.503	0.73
		204	104	0.509	0.75
		222	122	0.549	0.86
		235	119	0.506	0.74
	평균	182	94	0.516	0.76
	암거식	135	61	0.458	0.58
		149	68	0.456	0.59
		156	73	0.468	0.63
		175	81	0.463	0.62
		197	95	0.482	0.67
		240	115	0.479	0.66
		241	110	0.456	0.6
평균	184	86	0.467	0.62	

3. 동심중성선의 순환전류 제거방안

3.1 기설치된 시설에서의 제거방안

그림 2에서 보는 바와 같이, 22.9[kV]-y 다중접지 계통의 CNCV 케이블은 케이블 연결점 또는 분기점마다 동심중성선을 A, B, C 3선 모두 일괄하여 접지시키기 때문에 A, B, C 3선의 동심중성선이 단락 상태로 접지되어 있음을 알 수 있다. 도체에 부하전류가 흐르게 되면 전자유도작용에 의해 동심중성선에 전압이 유기된다. 이 유기 전압은 3상 단락되어 있는 동심중성선이 이루고 있는 3상 단락회로에 인가되는 상황이므로, 부하전류의 46.7~51.6[%] 정도의 순환전류가 동심중성선의 순환접지회로 내에서 흐르고 있음을 표 1이 보여주고 있다. 따라서 이 순환전류의 제거방안을 모색하려는 것이 이 논문의 주요 초점이다. 순환전류는 완전히 제거하되, 동심중성선의 본래 목적인 평상시 불평형 부하전류를 흘려주고, 지락사고시 지락전류의 귀환 회로의 역할을 지속하는 것은 필요하다. 그 해결 방법으로 그림 3과 같이 케이블 동심중성선의 시작점은 3선 일괄 접지하고, 종단점에서는 1상만을 중성선으로 사용하면서 접지시키고, 나머지 2상은 개방 하여 비접지시키는 방안을 제안한다. 이 경우 문제가 되는 동심중성선의 순환회로는 더 이상 존재하지 않게 된다. 뿐만 아니라 다중접지 계통 측면에는 어떠한 변화도 없으므로, 평상

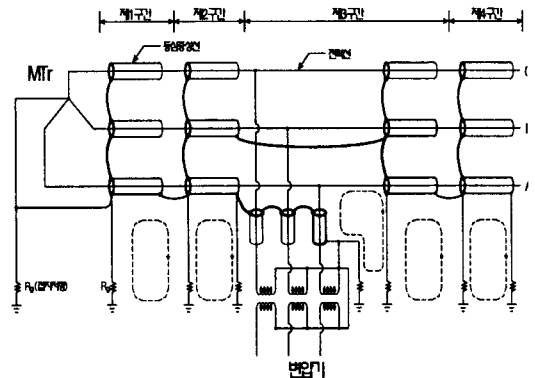


그림 3. 기설치된 시설의 해결방안
Fig. 3. Proposed distribution system (retrofit application)

22.9[kV] 지중배전계통케이블의 동심중성선에 흐르는 순환전류의 제거방안 및 효과

시 불평형 전류 및 지락시 고장전류 귀환에는 아무런 문제가 없다.

3.2 신중설 시설에서의 제거방안

현재 사용하고 있는 CNCV 케이블은 3선의 색깔 및 규격이 동일하므로 현장에서 A, B, C상의 구별이 어렵다. 그러므로 그림 4와 같이 케이블을 새로이 포설하는 경우임의 1선을 동심 중성선 전용 케이블로 사용할 수 있도록 피복 색깔을 차별화(백색 등)하여 시공한다면, 즉 3선 중에서 특정의 1선은 중성선으로 연속 접지하고 나머지 2선의 시작점은 3선을 일괄 접지하고 종단점을 개방하여 사용하도록 하면, 현장은 용상 혼선 없이 용이하게 시공할 수 있다.

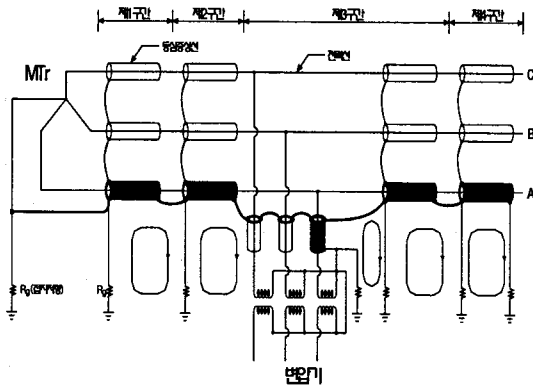


그림 4. 신중설 시설의 해결방안
Fig. 4. Proposed distribution system (new application)

3.3 동심중성선의 순환전류 제거 방안의 현장적용실험

동심중성선 순환전류에 의해 케이블 및 접속재의 온도를 확인하기 위하여 그림 5와 같이 각 부위 별로 온도 센서와 전류 센서를 설치하고 아래 장소에서 21시간 측정하였다. 또 동심중성선 순환전류를 제거한 상태의 온도상승을 측정하기 위하여 그림 6과 같이 동심중성선 3선중 2선의 1단을 개방하여 순환전류를 제거하고 케이블의 온도 변화와 동심중성선 개방 양단의 전위상승을 측정하기 위하여 전압계를 부

설하고 측정하였다(측정장소: 한국전력공사 북부지점 상계 S/S, 측정개소: 공능 D/L 및 중일 D/L 맨홀 NO:노원 23, 2006년 9월 1~3일).

그림 7은 동심중성선 접지방법 개선 후의 전류 및 유기전압을 측정하고 있는 현장 사진을 보여 주고 있다.

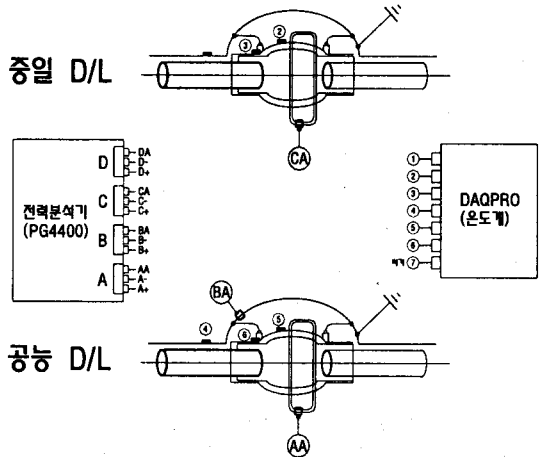


그림 5. 전류 및 유기전압 측정방법(개선 전)
Fig. 5. Method measuring currents and induced voltage(before modification)

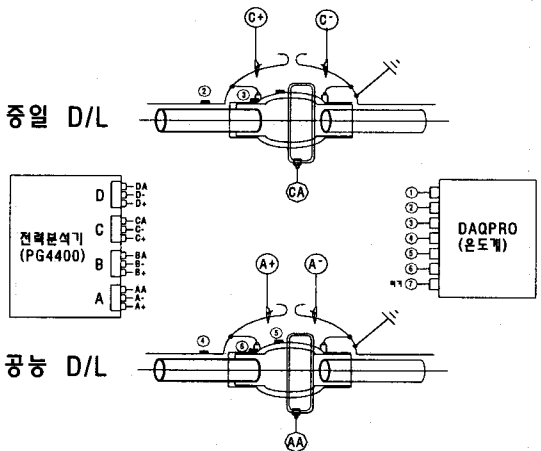


그림 6. 전류 및 유기전압 측정방법(개선 후)
Fig. 6. Method measuring currents and induced voltage(after modification)

표 2는 동심중성선 순환전류가 흐를 때와 순환전류를 제거했을 때의 측정치를 비교 정리한 것이다.

325[mm] CNCV 케이블배선에서 기존의 일괄접지방식을 적용했을 경우, 평균 부하전류가 약 136[A] 일 때, 평균 순환전류는 56.78[A]인 동심중성선 순환전류가 흐르고 있음을 확인하였다. 반면에 비일괄 접지방식으로 변경할 경우 거의 동일한 평균 부하전류가 흐르고 있는 상태에서 동심중성선 순환전류는 0[A]로 확인되었다.

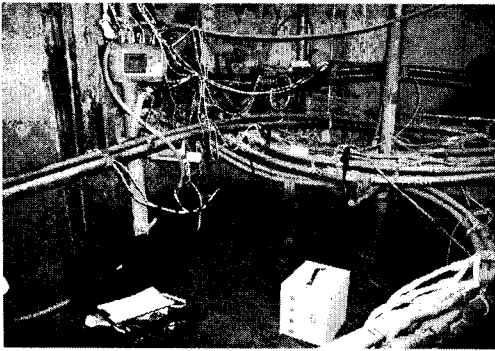


그림 7. 전류 및 유기전압 현장 측정
Fig. 7. Site Test

표 2. 개선 전후의 케이블 온도 비교 측정치
Table 2. Effect of modification on cable temperature rise

항 목 (평균 값)	공통 D/L		비 교 처 C=(B-A)
	종 전(A)	개선 후(B)	
부하전류 ([A])	136.45	136.78	0.33
동심중성선순환전류 (*)	56.78	0	-56.78
케이블 온도 ([°C])	30.17	18.64	-11.53
외기온도 (*)	26.07	20.50	-5.57
케이블온도(온도보정) (*)	30.17	24.21	-5.96
동심중성선 유기전압 ([V])	0	5.50	5.50
접지저항 ([Ω])	2.5	2.5	0

4. 동심중성선 순환전류제거의 효과

4.1 케이블 온도상승 억제

동심중성선에 순환전류가 흐르므로 주올열에 의한 발열로 인해 케이블의 온도가 상승되고 이로 인

해 해당 케이블의 온도상승은 물론이고, 주변 케이블 상호간에도 상승 작용을 하여 맨홀 및 전력구의 온도가 상승하므로, 허용전류 감소에 따른 전력구사고 유발 원인 등으로 작용할 수 있다. 따라서 동심중성선의 순환전류에 의한 케이블온도상승 문제를 실측하기 위하여 그림 5 및 6과 같은 측정방법을 시행하였다.

표 2는 케이블온도상승을 비교 측정한 결과를 함께 보여 주고 있다. 동심중성선 접지방식을 일괄접지에서 비일괄접지로 변경하는 경우, 외기 온도를 감안하여 6[°C]정도의 케이블 온도가 내려가는 것을 확인할 수 있었으며, 일반적인 부하전류 230[A]가 흐를 경우는 10[°C] 이상 온도 저하가 예상된다.

4.2 케이블 손실전력의 절감

케이블의 손실전력은 케이블의 도체손, 유전체손, 동심중성선 손실 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서 도체손실과 유전체손은 변화가 없고 동심중성선 손실은 동심중성선의 순환전류에 의해서 발생하므로 비일괄접지방식의 채용으로 효과가 있다. 순환전류의 크기는 부하전류 크기에 의해서 결정되므로 전국의 케이블 동심중성선 손실을 정확하게 계산하는 것은 매우 곤란하다. 각 Feeder별 부하율, 최대 부하공장 등 다양한 자료를 분석하여야 하므로, 본 논문에서는 한국전력공사의 2005년 통계자료를 참고하여, 전체 손실 전력량과 배전손실 중 케이블 점유율을 고려하고, 도체에 대한 동심중성선 손실비율을 케이블 손실전력에 곱해서 계산하였다.

전체 배전선로에서 케이블 점유율 11.72[%][7], 배전선로의 손실은 배전손실의 32.2[%][7], 동심 중성선의 순환전류에 의한 케이블 손실 점유율[3]은 표 1의 실측 데이터를 기준으로 하여, 관로식배열에서 손실전력은 76[%]이고 암거식배열에서는 손실전력 62[%]이므로, 그 평균치인 69[%]를 대표 값으로 취하기로 한다. 아래의 몇 가지 가정을 고려하여 연간 총 배전 손실전력 절감량을 계산해 볼 수 있다. CNCV 케이블의 손실은 동손과 동심중성선이 대부분이며 유전체손은 미미하므로 무시하기로 한다. 케이블의 동손은 도체의 저항과 부하전류에 의해 결정되

22.9[kV] 지중배전계통케이블의 동심중성선에 흐르는 순환전류의 제거방안 및 효과

고, 시스손(동심중성선)은 동심중성선 순환전류와 동심중성선 저항에 의해 결정된다. 전력 케이블은 도심에 많이 설치되므로 배전 선로 손실 비율이 선로공장 비율보다 클 것이나 선로 공장 비율로 계산한다.

[손실전력]

$$P_w = \text{전체배전손실} \times \text{배전선로손실 점유율} \times \text{케이블 점유율} \times \text{동심중성선 손실률}$$

$$= 5,956,356 \text{ [MWh]} \times 0.322 \times 0.11716 \times 0.69$$

$$= 155,047 \text{ [MWh/년]}$$

[손실절감액]

$$W = \text{손실절감전력량} \times \text{판매단가}$$

$$= 155,047 \times 1000 \times 74.46 = 11,544,800 \text{ [천원/년]}$$

4.3 케이블 허용전류 및 이용률의 증대

케이블의 허용전류는 케이블온도상승에 의해 제한되므로, 본 제안기술 적용시 순환전류가 제거됨에 따라 케이블 배전용량이 증가 된다. 개선 전, 후의 케이블 허용전류 증감 및 케이블 이용률 증감 현황은 표 3과 같다.

표 3. 허용전류 및 이용률 비교표
Table 3. Tolerant current and availability of cables

구	격	허용전류		이용률 증가(%)	비 고
		현재	신기술 적용		
CNCV 325[mm]	관로 (요람배열)	602	727	20.76	평균증가율 18.74[%]
	전력구 (3각배열)	622	726	16.72	

4.4 케이블 이용률 증대에 따른 설치비 절감액

케이블의 이용률 증대에 따른 경제적 효과 계산은

한국전력공사의 지중 분야 공사비 중에서 325[mm] 케이블 부분만을 고려하여 이용률 증대 비율을 적용하여 km당 건설비 절감 효과를 전체 설비에 적용하여 계산하였다.

[1km당 건설비 절감 효과]

$$\text{절감금액} = 1[\text{km}] \text{당 평균건설비} \times \text{이용감소율}$$

(관로 및 전력구의 평균)

$$= 125,259 \times \left(\frac{0.1672 + 0.2076}{2} \right)$$

$$= 23,473 \text{ [천원/km]}$$

여기서 km당 평균건설비는 한국전력공사 통계 2005년 기준을 적용하고, 동심 중성선에서 순환전류로 인한 CNCV 케이블의 허용전류는 표 3의 데이터 평균 18.74[%] 감소율을 적용한다.

[전국에 설치된 CNCV 케이블 이용률 증대효과]

$$\text{절감금액} = \text{케이블 설치총공장} [c\text{-km}] \times \text{km당케이블 공사비} (325[\text{mm}]) \times \text{이용 감소율}$$

$$= 22,107 \text{ km} \times 125,259 \times \left(\frac{0.1672 + 0.2076}{2} \right)$$

$$= 518,929,473 \text{ [천원]}$$

5. 결 론

에너지의 90[%] 이상을 수입하여 사용하고 자원이 부족한 우리나라에서는 자원과 에너지의 절약이 중요한 사회적 이슈이며, 배전선로에서의 전력손실의 경감 및 케이블 이용률을 증가시키는 기술은 전기에너지의 낭비를 예방하고 에너지자원의 절약에 크게 기여하는 기술이다. 본 논문에서는 CNCV 케이블의 지중배전시스템에서 동심중성선에 흐르는 순환전류가 부하전류의 약 46.7~51.6[%]에 이르고 있음을 확인하고, 이 순환전류손실을 줄이기 위한 대책을 제시하였다. 동심중성선에 흐르는 순환전류는 A, B, C상 도체의 33[%] 굵기만을 가지고 있는 동심중성선 회로를 순환하므로, 전력손실과 케이블 이용률을 감소시킬 뿐만 아니라, 배전계통사고의 발생 요인이 되고 있다. 본 논문에서 제안한 3상 비일

팔 공동접지방식은 기존의 양단 접지 방식과 편단접지 방식을 혼합 사용하는 방식으로서, CNCV 케이블 전력손실을 76[%] 정도 감소시키고 케이블 이용률을 18[%]정도 증가시킬 수 있을뿐만 아니라, 연간 155,047[MWh]의 전력손실 감소와 약 5,189억원의 설비이용률 증대효과가 있다.

References

- [1] '지중편설계기준 1650', 한국전력공사, 2004.
- [2] '배전규정', 대한전기협회 배전규정전문위원회, 1997.
- [3] '배전지중설계기준 5900부록', 한국전력공사, 2003.
- [4] 헌전표준구매시방서, '22.9(kV) 동심중성선 전력케이블', ES-126-650-664, 한국전력공사, 2001.
- [5] 김복현, '22.9(kV) CV/CN케이블의 중성선 전류가 허용전류에 미치는 영향', 석사 논문, 연세대학교, 1987.
- [6] 'IEEE guide for the application of sheath-bonding methods for single-conductor cables and the calculation of induced voltages and currents in cable sheaths', ANSI/IEEE Standard 575, 1988.
- [7] 경영정보처. '전력통계15, 배전설비추이', 한국전력공사, 2005.

◇ 저자소개 ◇

전명수 (全明洙)

1945년 2월 26일생. 1978년 경기공전 졸업. 2007년 서울산업대 철도전문대학원 졸업(석사). 1991년 발송배전 기술사. 1965~1982년 한전과장. 1984~1992년 현대정유 차장. 1992~1997년 선도전기 이사. 1997~1999년 한신콘설터트 전무. 1999년~현재 일렉컨설팅 대표. 2004년~현재 서울산업대 겸임교수.

송중호 (宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울공대 전기공학과 졸업. 1982년 서울공대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신대 초빙연구원. 1982~1985년 이화전기 기술개발부. 1985~2002년 한국과학기술원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002년~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수.

Email : joongho@snut.ac.kr